



PROPOSTA DIDÁTICA INVESTIGATIVA PARA DESENVOLVER O TEMA DE FÍSICA DE PARTÍCULAS E INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

Jonas Bakalarczyk

Dissertação de Mestrado realizada e apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UFSC no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Dr. Celso de Camargo
Barros Junior

Florianópolis
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Bakalarczyk, Jonas, 1972

Proposta Didática Investigativa para desenvolver o tema de Física de Partículas e Interações Fundamentais / Jonas Bakalarczyk - Florianópolis: UFSC, 2017.

viii, 240f.: il.;30cm.

Orientador: Dr. Celso de Camargo Barros Junior

Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – UFSC / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2017.

Referências Bibliográficas: f. 102-106.

1. Ensino de Física - Estudo e Ensino. 2. Física Moderna. 3. Aprendizagem. 4. Física de Partículas. I. Junior. Celso de Camargo Barros. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Proposta Didática Investigativa para desenvolver o tema de Física de Partículas e Interações Fundamentais.

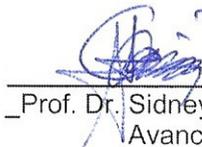
Proposta Didática Investigativa para Desenvolver o Tema de
Física de Partículas e Interações
Fundamentais

Jonas Bakalarczyk

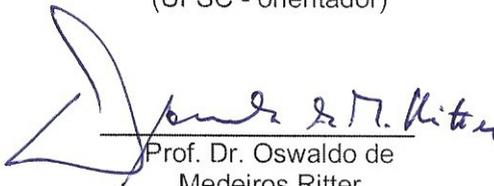
Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção
do título de **MESTRE EM ENSINO DE FÍSICA**, aprovada em sua
forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de
Física, nível Mestrado Profissional.



Prof. Dr. Celso de Camargo
Barros Junior
(UFSC - orientador)



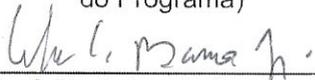
Prof. Dr. Sidney dos Santos
Avancini
(membro titular) - UFSC/FSC



Prof. Dr. Oswaldo de
Medeiros Ritter
(UFSC/FSC - Coordenador
do Programa)



Profa. Dra. Debora Peres de
Menezes
(membro titular) - UFSC/FSC



Prof. Dr. Celso de Camargo
(UFSC - presidente)



Profa. Dra. Lara Fernandes
dos Santos Lavelli

(membro externo) -
UFSC/Blumenau

Amada companheira e esposa Magali. Você deixou seus sonhos para que eu sonhasse os meus. Derramou lágrimas para que eu sorrisse. Você cuidou de nossas filhas, de nossa casa para que eu voasse. Acreditou em mim, me protegeu, me iluminou, me defendeu de tudo e de todos.

Para minhas filhas Mariana e Mailu deixo o exemplo, que são melhores que mil conselhos.

AGRADECIMENTOS

Dedico especial agradecimento ao professor Dr. Celso de Camargo Barros Junior, meu orientador, pela disposição, dedicação e conselhos prestados durante a construção deste trabalho.

À equipe de professores pelos ensinamentos, apoio e conhecimentos construídos durante as aulas.

Aos colegas de Mestrado pelo convívio e experiências compartilhadas.

À direção e ao Colégio Carmem Seara Leite pelo espaço oportunizado ao desenvolvimento prático deste trabalho.

Aos meus alunos que proporcionaram momentos agradáveis e que colaboraram para a concretização e o sucesso das aulas.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de formação.

A CAPES por todo o auxílio financeiro prestado.

A toda a minha família que me apoiou e ajudou na realização e concretização deste Mestrado.

RESUMO

PROPOSTA DIDÁTICA INVESTIGATIVA PARA DESENVOLVER O TEMA DE FÍSICA DE PARTÍCULAS E INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

Jonas Bakalarczyk

Orientador: Celso de Camargo Barros Junior

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Atividades investigativas representam o espírito dos cientistas. Ao longo da história mostraram ser uma boa alternativa às aulas tradicionais e demonstram potencial em promover evolução das concepções alternativas para a construção de argumentos.

Neste trabalho relato uma experiência didática de aplicação de um módulo didático através da elaboração de um livreto como material de apoio para os alunos, que integrou o tópico de física de partículas e interações fundamentais no ensino médio regular de uma escola pública situada na cidade Garuva em Santa Catarina.

O estudo, de natureza qualitativa, tem como principal motivo de pesquisa a inserção da Física moderna e a análise do processo de construção de novos conceitos científicos nas aulas de Física, fundamentadas na perspectiva investigativa de ensino.

A reflexão pauta-se nas interações discursivas estabelecidas em classe, em uma turma da terceira série do ensino médio. Para a abordagem desenvolvi uma sequência didática desde o aparecimento e a evolução do modelo padrão de partículas através de uma dinâmica investigativa que durou vinte e uma horas-aula.

O livreto foi utilizado como material didático de apoio contendo situações, problemas e quebra cabeças enfrentados pelos Físicos para construir o modelo padrão, onde cada capítulo foi pensado principalmente em relação ao nível de profundidade que poderia ser explorado sempre tentando transformar o saber sábio em um saber a ser ensinado.

Dentro desse contexto, os alunos tiveram a oportunidade de desenvolver uma opinião crítica a respeito da formação da matéria e os desafios que ainda a humanidade terá que resolver.

Palavras chave:Ensino médio, Física de Partículas, Interações Fundamentais.

Florianópolis
2017

ABSTRACT

INVESTIGATIVE DIDACTIC PROPOSAL TO DEVELOP THE PHYSICS THEME OF PARTICLES AND FUNDAMENTAL INTERACTIONS

Jonas Bakalarczyk

Advisor: Celso de Camargo Barros Junior

Master's Dissertation submitted to the Post-Graduation Program in Physics Teaching in the Professional Master's Course of Physics Teaching (MNPEF), as part of the requirements necessary to obtain the Master's degree in Physics Teaching.

Investigative activities represent the minds of scientists. Throughout history they have shown to be a good alternative to the traditional classes and they demonstrate potential in promoting evolution of the alternative conceptions for construction of arguments.

In this work I report a didactic experience of applying a didactic module through the elaboration of a book as a support material for the students, which integrated the topic of Particle Physics and Fundamental Interactions in the regular High School of a public school located in the city of Garuva in Santa Catarina.

The qualitative study has as main research motivation the insertion of modern physics and the analysis of the process of construction of new scientific concepts in physics classes, based on the research perspective of teaching.

The reflection is based on the discursive interactions established in class, in a class of the third grade of high school. For the approach I developed a didactic sequence from the appearance and evolution of the standard particle model through a twenty-one-hour research dynamics.

The book was used as supporting teaching material containing situations, problems and puzzles faced by physicists to construct the standard model, where each chapter was thought mainly in relation to the level of depth that could be explored always trying to turn knowledge wise into a knowing to be taught.

Within this context, the students had the opportunity to develop a critical opinion about the formation of the subject and the challenges that humanity will still have to solve.

Keywords: High School, Particle Physics, Fundamental Interactions.

Florianópolis
2017

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	23
1.1.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
2. ASPECTOS HISTÓRICOS E MATEMÁTICOS DA FÍSICA DE PARTÍCULAS.....	25
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS	25
2.2 ASPECTOS TEÓRICOS NA CONSTRUÇÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS	34
2.2.1 Equação de Klein-Gordon	38
2.2.2 A equação de Dirac	40
2.2.3 Quantização do campo eletromagnético.....	43
2.3 ELETRODINÂMICA QUÂNTICA	47
2.3.1 Renormalização.....	48
2.4 TEORIA DE CALIBRE: SIMETRIA LOCAL E GLOBAL	50
2.5 SIMETRIAS E GRUPOS	53
2.5.1 Simetrias e grupos em Física Quântica.....	54
2.5.2 Spin, momento angular orbital e os grupos SU(2) e SO(3)	55
2.5.3 Isospin e o grupo SU(2): simetrias de sabores ..	57
2.5.4 Grupo SU(3): Simetria de Cor.....	60
2.6 DIAGRAMAS DE FEYNMAN	61
2.6.1 Elementos de um Diagrama	63
2.6.2 Diagramas de Feynman na Eletrodinâmica Quântica	65
2.6.3 Colisão elástica entre elétron e pósitron.....	67
2.7 A LAGRANGEANA DO MODELO PADRÃO	68
2.8 O TRIUNFO FINAL OU APENAS O COMEÇO?	70
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	73
3.1 ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO	73
3.2 A TEORIA SOCIAL DA APRENDIZAGEM DE VYGOSTSKY	75
3.3 A IMPORTÂNCIA DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA	78
3.4 CONSTRUÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	82

3.5 ABORDAGEM INVESTIGATIVA PARA CONSTRUIR A SEQUÊNCIA DIDÁTICA: O ENSINO DE CIÊNCIAS POR INVESTIGAÇÃO	83
3.6 A CONSTRUÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA INVESTIGATIVA	87
3.7 O PROFESSOR COMO PESQUISADOR NA PRODUÇÃO DO MATERIAL DIDÁTICO	90
4 MÉTODOS	93
4.1 USANDO A INVESTIGAÇÃO NAS AULAS DE FÍSICA	93
4.2 A ESCOLA E OS SUJEITOS PARTICIPANTES⁶⁷	
4.2.1 A escola	94
4.2.2 Sujeitos Participantes	94
4.2.3 Organização das atividades	95
4.3 A SEQUÊNCIA DIDÁTICA	95
5 ANÁLISE E DISCUSSÕES	97
5.1 ANÁLISES DO PROCESSO DA CONSTRUÇÃO DE CONCEITOS CIENTÍFICOS E PROCEDIMENTOS	97
5.2 DESCRIÇÃO DE AULA POR AULA	98
5.3 CONSTRUINDO DIAGRAMAS DE FEYNMAN EM CAMISETAS.....	130
5.4 COMPARAÇÕES ENTRE O PRÉ-TESTE E O PÓS-TESTE	132
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
APÊNDICE.....	151
Apêndice A: PRÉ-QUESTIONÁRIO.....	151
Apêndice B: PÓS-QUESTIONÁRIO	157
Apêndice C: PRODUTO EDUCACIONAL	164

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de minha carreira, como professor de física, sempre me questioneei sobre porquê ensinar física para adolescentes. A principal dúvida sobre isto era devido a questionamentos feitos pelos alunos durante aula do porque da necessidade de aprender física. Então comecei a refletir e indagar se o problema era a física ou o professor de física. Acabei constatando que o maior problema era o professor de física.

Dentro desta perspectiva me questioneei se a maneira pela qual aprendi física era o melhor modo de ensinar física. Acredito que alguns métodos aplicados nas relações de ensino e aprendizagem estabelecidas na sala de aula, muitas vezes são falhos, pois o que faz sentido para mim pode não fazer sentido para o aluno. Acredito que uma possível consequência dessa falta de sentido e diálogo entre o que se ensina e o que se aprende pode ser a desmotivação dos alunos.

Sempre optando por apresentar conteúdos usando muita matemática, solicitando o aluno uma relação cartesiana, para cada pergunta apenas uma resposta. Dessa forma o aluno calculava e se obtia uma resposta correta o sucesso estava atingido mesmo sendo desconexa com sua realidade. São realidades vividas dentro da escola e diversos fatores, como de seguir o planejamento proposto pela escola ou a sequência do material didático adotado pela escola e quem sabe pela própria formação docente.

Para os alunos, quando estudam física, acreditam que ela acaba reunindo sempre um conjunto de leis e equações prontas, que precisam ser decoradas e precisam fazer uma substituição de variáveis. Assim não conseguem ver uma descrição do mundo em que vivem muito menos concatenar que o conteúdo escolar tem relação evolução e dinâmica da história da humanidade e por fim com sua vida.

O que fazer para mudar este processo? A resposta que acreditamos ajudar a responder está na escolha da abordagem a ser feita: como devemos abordar um assunto de física para adolescentes. O curso de mestrado me ofereceu um leque de possibilidades e acabei optando por um método que parece ser simples, fazer o que muitos cientistas

faziam: questionar modelos já existentes através da investigação. A primeira medida a ser tomada foi de fazer uma ruptura da aula tradicional, criando um material, no caso um livreto, que tivesse o caráter investigativo, contendo modelos, situações e alguns fatos históricos.

Em uma das revisões bibliográficas me deparei com um questionamento, o que desejamos para estes adolescentes, que sejam reativos ou proativos? A investigação vem justamente criar este espírito nos alunos, que sejam capazes de pensar, hipotetizar, discutir e sintetizar um problema físico e ultrapassar obstáculos.

A inserção de física moderna e contemporânea apresenta alguns obstáculos que precisam ser enfrentados. Destaco que existe uma estrutura pronta que começa com mecânica clássica e acaba se inserindo no final algum assunto de física moderna e contemporânea. Parece-me que existe uma receita pronta, que se insere ao final alguma coisa complementar. As orientações oficiais baseadas nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) que são as bases legais, mais as orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais na área Ciências Humanas e suas Tecnologias (PCN+) e nas pesquisas na área de ensino de física apontam a importância para a introdução de tópicos de física moderna no ensino médio, no sentido de formar um cidadão que possa ser inserido no contexto tecnológico atual através de uma abordagem contextualizada. O ensino de física nesse nível de ensino indica que a escolha dos temas a serem abordados deve ser feita de modo que o conhecimento de física deixe de se estruturar como um objeto em si mesmo, passando a ser entendido como um instrumento para a compreensão do mundo.

Nesse contexto devemos resaltar o fato de que alguns aspectos da chamada física moderna são imprescindíveis para que os alunos possam adquirir uma compreensão mais abrangente dos conhecimentos físicos e tecnológicos da era atual.

Diante disso devemos refletir: a física moderna e contemporânea é complementar então?

Algumas questões podem ser discutidas, entre elas destacamos três: a secretaria de Educação de Santa Catarina, apesar dos programas

conterem alguns tópicos de física moderna e contemporânea, diz que não existem professores capacitados para trabalhar estes tópicos, assim são facultativos. Outro problema que constatei é justamente o algoritmo usado nas aulas de física: a explanação do professor, o exemplo do livro e o demasiado foco matemático, e então é necessário construir junto aos alunos tópicos sem a presença de matemática. Quem sabe este último relato seja uma herança da própria academia. O último problema é que a maioria dos professores de física não investem em sua formação, e isto não se refere a escolas públicas estaduais, mas também em redes municipais e particulares.

A escola é um espaço de socialização, entre suas finalidades, uma delas é construir os conhecimentos produzidos pela civilização ao longo da história. O ensino praticado nas escolas carece de estrutura, comprometendo a qualidade do ensino. Por exemplo, o lento acompanhamento das escolas às profundas e rápidas transformações que se processam nas sociedades, fruto em grande parte, das relações e uso das tecnologias.

Esta acelerada evolução inicia a partir do século XX, e na física não é diferente. Ainda ensinam nas escolas que os constituintes do átomo, que formam a matéria são apenas três partículas. Depois da descoberta do elétron, em 1897, em um século, descobriram-se centenas de outras partículas, porém um aluno, um futuro cidadão, sai da escola, onde para a maioria é seu ciclo final de estudos, com o mesmo conhecimento de um século atrás. Sem maiores pretensões, além de prepararmos futuros cidadãos, também é necessário dar oportunidades para jovens serem cientistas.

Diante desta reflexão, buscamos nesse trabalho contribuir para construir novos caminhos para as práticas em sala de aula. Uma prática que seja informativa e formativa, não só para alunos, mas também para nossa formação. A intenção deste trabalho é construir junto aos alunos o espírito dos cientistas, oferecer oportunidades de diálogo, reflexão, crescimento, conhecimento científico, crescimento social e cultural e que finalmente consiga romper esta barreira que existe entre o antigo e o novo, e que dentro dessa proposta, forneçamos a eles condições de se tornarem proativos.

Consideramos que o aluno pode e deve ser proativo em suas relações de ensino e aprendizagem. Entendemos que isso pode ser buscado ao darmos voz ao aluno nas aulas, ou seja, nós, professores, devemos promover a participação direta e efetiva dos mesmos na construção do conhecimento e deixarmos de ser puramente transmissores desse conhecimento. A construção deve ser dialógica na sala de aula, com professores e alunos, em negociação conjunta, construindo os significados. Mas para isso devemos planejar.

Dentro das opções que poderia usar para construir o meu projeto, optei pelo ensino por investigação, conclui ser uma ferramenta importante sob a perspectiva de ensino por privilegiar a participação ativa dos alunos, tirando o foco do resultado, buscando entender o processo. Essa participação do aluno não se restringe a responder questionários, não se restringe a seguir um roteiro, mas o que pode dar um caráter investigativo, a observação do fenômeno é importante, mas sem reflexão perde o valor. Assim a reflexão contínua, a discussão, a explicação e o relato de uma investigação poder fazer sentido para o aluno.

Durante minha prática docente tive a oportunidade de trabalhar em várias escolas, tanto públicas como particulares e em cursinhos pré-vestibulares, mas em todas estas experiências já existia o currículo prescrito para a disciplina de física, com pequenas alterações e ajustes para cada ambiente de trabalho, sendo todos propedêuticos e, portanto seguindo a mesma ordem: física clássica, na 1ª série são relativos à física newtoniana, na 2ª série trabalha-se termodinâmica, ótica geométrica e ondulatória, já na 3ª série restam a eletricidade e o magnetismo.

Com a implantação do Programa Nacional do Livro Didático do Ensino Médio (PNLEM), a partir de 2003, começou-se contribuir para essa inserção de tópicos de física moderna e contemporânea de forma mais efetiva nos materiais didáticos impressos e, mais recentemente, digitais, mas seguem a mesma cartilha.

Mesmo diante de todas estas constatações por que não mudei a minha concepção sobre minhas aulas? Por que não inseri tópicos de física moderna e contemporânea no meu plano de ensino? Acredito que a falta de formação e por considerar que de tópicos de física moderna e

contemporânea não eram importantes e principalmente por falta de um material didático de melhor qualidade.

O surgimento da oportunidade de uma nova formação acadêmica através do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Catarina, através do curso de mestrado profissionalizante em ensino de Física, foi a motivação que faltava para elaborar uma pesquisa e que pretendo relatar nessa dissertação.

Outras questões e dúvidas têm sido levantadas sobre a eficácia de métodos e estratégias de ensino e do próprio conteúdo tradicionalmente adotados na educação em nosso país. Essas questões têm sido objeto de estudos e pesquisas há algumas décadas, porém me parece que há uma distância entre a academia e os professores, pois estes resultados não chegam à sala de aula, especialmente nas redes públicas de ensino.

Já os professores, que se encontram no centro dessa discussão, têm dificuldades em promover ensino adequado às condições da sociedade atual, não conseguem mudar a inércia dos ambientes escolares, além de, particularmente no ensino de ciências, enfrentarem o desinteresse dos alunos pela aprendizagem da física, a falta de laboratórios, de bibliotecas e de aspectos outros associados à infraestrutura. Acreditamos que falta também a nós professores de física o espírito de pesquisador.

As escolas brasileiras, de maneira geral, como estão organizadas hoje não conseguem cumprir seu papel de oferecer um ensino de qualidade, como preconizado por documentos oficiais. Os PCN e PCN+ (BRASIL, 1999; BRASIL, 2002), os quais visam formar cidadãos críticos e participativos e, de outro lado, capaz de fazer com que os jovens dominem os conteúdos e os princípios científicos básicos para fazer frente às situações do cotidiano.

Logo, os professores de física, devem ser os inovadores nesse processo, pois a inovação pode trazer ao aluno de física o interesse e a curiosidade e que possam adquirir uma cultura científica capaz de transpor o analfabetismo científico e que assim possam eles mesmos construir sua autonomia intelectual. Esta autonomia poderá gerar entre

elas mudanças sociais, políticas, culturais e econômicas.

Não há mais como falar em evolução na educação brasileira se o foco não for o professor. Diante disso são necessárias políticas públicas que incentivem os professores a ter uma formação continuada, onde o professor possa explorar do ponto de vista intelectual/disciplinar e didático sua capacidade de planejamento, preparação, aquisição e uso de material instrucional de boa qualidade. Acreditamos que para atender a essa demanda escolar e social que vivemos hoje deve haver investimentos.

A última reforma na educação brasileira, através de seus documentos oficiais, reconhece a necessidade de uma melhor formação dos professores. Acredito que existem incentivos, mais ainda não é universalizado. As Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2012), apresentam e direcionam a pesquisa como princípio pedagógico norteador nesse processo. A escola deve acompanhar o desenvolvimento acelerado de conhecimentos construídos pelas ciências, com o intuito de socializá-los.

A pesquisa como princípio pedagógico deve ser orientada e motivada pelos professores que são os verdadeiros mediadores ou facilitadores na construção de conhecimentos. Assim é desafiador ao professor de física, neste mundo onde as tecnologias de informação e comunicação cada vez mais inseridas na vida dos alunos, deixem de ser uma simples informação e que o professor seja o mediador para que esta informação se transforme em conhecimento.

A condição mínima para que a escola acompanhe a evolução é a necessidade de rever e atualizar o currículo, em especial na física, que é objeto desta pesquisa de mestrado. Acredito que seja indispensável incorporar a física moderna e contemporânea nos conteúdos a serem abordados no ensino médio de maneira mais efetiva.

Mas por que física de partículas? Acreditamos que possibilitar aos alunos conhecerem as entranhas da matéria irá revelar a história do nosso Universo, oferecendo respostas sobre realmente quem somos, de onde viemos e para onde vamos. Ao conhecerem o mundo microscópico da matéria terão certeza que o conhecimento não é privilégio apenas dos

cientistas, mas que pode ser construído por todos, e a escola pode desencadear este processo de socialização do conhecimento sobre física de partículas elementares.

A física de partículas tem como objetivo produzir uma melhor compreensão da lei física fundamental seguindo uma estratégia reducionista. Os cientistas tentam compreender o comportamento da matéria em geral, trabalhando a partir de uma profunda compreensão das propriedades e interações de seus constituintes elementares, ou seja, a física de partículas tenta reduzir os fenômenos complexos a seus componentes mais simples e considerar estes últimos como mais fundamentais que os fenômenos complexos observados. Esta estratégia tem provado ser notavelmente frutífera e bem sucedida, especialmente ao longo do século XX e XXI. Foram descobertos teoremas matemáticos estranhos, mas precisos e elegantes, resumidos no chamado Modelo Padrão que revelam as leis da física em escalas subatômicas. Há toda razão para pensar que essas leis, tal como estão formuladas atualmente, são adequadas e servem de base para a ciência dos materiais, a química e a astrofísica.

À medida que a fronteira da estratégia reducionista passou explicar a matéria em termos de átomos para explicar átomos em termos de elétrons e núcleos e depois explicar núcleos em termos de prótons e nêutrons para explicar prótons e nêutrons em termos de quarks e glúons, os modelos criados se tornaram cada vez mais precisos e mais amplamente aplicáveis. A física subatômica nos permitiu compreender e refinar os princípios básicos da química e projetar materiais com propriedades elétricas e magnéticas desejadas. A física nuclear nos permitiu compreender a fonte de energia das estrelas e a relativa abundância dos elementos químicos. A física dos quarks e glúons permitiu-nos compreender o comportamento da matéria no universo.

Desenvolvimentos futuros podem nos ajudar a penetrar mais profundamente nos primeiros momentos do Big Bang ou a reconhecer e compreender ambientes astronômicos ainda não descobertos ou ainda o sonho de buscar uma única equação que explique todo conjunto de partículas e interações.

Neste trabalho tentaremos utilizar a criatividade para efetuar a transposição didática deste conteúdo para o ensino médio sendo um desafio para a nossa docência e que possa servir de material para outros professores.

Após pesquisas optamos em desenvolver uma sequência

didática investigativa de aproximadamente 20 aulas utilizando um livreto. O planejamento sobre o número de aulas é absolutamente variável, pois depende da interação entre os alunos bem como a mediação do professor. Apesar de ser um material dirigido, não é uma apostila fechada. Outros recursos foram usados, como vídeos e uma modelagem computacional sobre o princípio da incerteza. Acredito que este material possa facilitar e por que não inspirar outros professores de física que pretendem levar esse tema para a sua sala de aula. Assim, o produto final deste trabalho é um produto educacional didático. Uma narrativa da aplicação dessa sequência será feita nos próximos capítulos.

A estrutura deste trabalho é composta de seis capítulos, além das referências e apêndices. Nesse primeiro, apresento a questão da pesquisa, a justificativa e os objetivos.

No segundo capítulo é feita uma revisão da evolução dos principais aspectos históricos e matemáticos da física de partículas.

No terceiro capítulo, abordo sobre a fundamentação teórica sobre a qual esta pesquisa foi embasada. Nela apresento algumas atividades investigativas e a teoria sociocultural de Vygotsky, bem como sua importância no desenvolvimento das atividades investigativas; discuto estudos que utilizaram sequências de ensino investigativas (SEIs) no ensino de física.

No quarto capítulo, descrevo os métodos utilizados para desenvolver este trabalho de pesquisa.

No quinto capítulo, apresento os resultados e discussões a partir das análises dos dados obtidos da aplicação da SEI.

No sexto capítulo, faço as considerações finais desta pesquisa, analisando pontos positivos e negativos apresentando sugestões para futuras investigações.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

- Contribuir para a inserção da física moderna e contemporânea no currículo de física do ensino médio por meio do estudo do tópico física de partículas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma sequência didática constituída de um livreto de apoio ao aluno contendo atividades investigativas.
- Aplicar o material desenvolvido em uma turma de terceira série do ensino médio em uma escola da rede pública estadual de Garuva, SC.
- Analisar indícios de aprendizagem através do diálogo desenvolvido pelos alunos.

2. ASPECTOS HISTÓRICOS E TEÓRICOS DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

O estudo da matéria em dimensões cada vez menores é em grande parte motivado pela busca antiga dos constituintes fundamentais do mundo físico. Até a teoria atômica de Leucipo e Demócrito, século V AC, a ideia de que todas as substâncias materiais são compostas de um pequeno número de partículas elementares, unidas, era irresistivelmente atraente. A evolução do pensamento humano apoiado num conjunto de teorias matemáticas transformou o conceito físico inicial de indivisível pelo conceito atual de fundamental. Para os físicos construírem estes conceitos as teorias matemáticas foram de fundamental importância.

Neste capítulo iremos fazer uma breve descrição da evolução da física de partículas em duas partes. Na primeira parte descreveremos a evolução dos conceitos históricos e na segunda parte revisaremos os aspectos gerais teóricos utilizados na construção do modelo padrão.

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

O Modelo Padrão da física de partículas elementares é o resultado de mais de dois mil anos de evolução do pensamento sobre a natureza. Na atualidade é a melhor resposta que podemos dar a uma questão que desde primórdios é discutida: do que a matéria é feita?

A física tem suas raízes nos pensamentos dos grandes filósofos e evoluiu bastante desde a ideia da substância primordial da matéria proposta por Tales de Mileto, um elemento fundamental que ele identificou com a água e que comporia todas as coisas, e da concepção Pitagórica de que todas as coisas são números, passando pelo atomismo de Leucipo e Demócrito que postularam que todas as coisas seriam compostas de pequenas partes indivisíveis e perpétuas em movimento determinístico eterno.

O interessante é que muitas das concepções dos gregos antigos podem parecer até ingênuas, acreditar na existência de elementos básicos como o água, o fogo, a terra e o ar (HAWKING,2015). Mais tarde o conceito de calor também teve suas ideias primordiais em partículas, o calórico. A luz também teve seu momento partícula. Desse

modo fica evidente que a ciência buscou explicar vários fenômenos através de partículas.

A concepção moderna dos átomos como constituintes últimos da matéria deve sua existência a muitos cientistas como Newton, que concebia os átomos como centros de força, e o irlandês Robert Boyle, mas foi o inglês John Dalton, em 1803, quem fez afirmações com base em experimentos que indicavam a precisão da hipótese atômica (MASON,1996). Dalton afirmava que toda matéria é formada por partículas extremamente pequenas e indivisíveis, os chamados átomos e que o número de diferentes tipos de átomos que existem na natureza é relativamente pequeno, mas em número enorme de cópias iguais, e esses átomos formariam toda a matéria através de suas combinações.

No fim do século XIX algumas descobertas viriam a conduzir a física do século XX a novos rumos. Em 1879, William Crookes, baseando-se nas experiências dos cientistas alemães H. Geissler, J. Plucker e Eugen Goldstein descobriram os raios catódicos. Em 1887 Hermann Hertz descobriu o efeito fotoelétrico e em 1891 o físico irlandês George Johnstone Stoney calculou a quantidade mínima de carga elétrica negativa na matéria, baseado nas experiências de Faraday e Arrhenius e essa carga mínima deu o nome elétron. W. Roentgen, em 1895, descobriu os raios X. Em 1896 nasceu o estudo da radioatividade com Henri Becquerel e finalmente, em 1897, Joseph John Thomson, baseando-se em várias experiências próprias e de muitos físicos mostrou que os raios catódicos são constituídos de partículas muito pequenas com carga elétrica negativa, que ele identificou com os elétrons de Stoney. Nascia então a Física das Partículas Elementares.

Seguiram-se pesquisas para determinar as propriedades dessa partícula, como sua massa e carga, como as experiências do Norte americano R.A.Millikan, entre outros. Thomson supôs acertadamente que o elétron seria um constituinte básico dos átomos. Essa foi a primeira descoberta de uma partícula elementar. Mas a suposição de Thomson (GRIFFITHS,1987) era de que o átomo era composto de elétrons embebidos numa sopa de carga positiva como as passas num pudim. Este modelo foi descartado pelas experiências do Neo-zelandês Ernest Rutherford e seus colaboradores. O experimento de Rutherford (OKUNO,1998) tem um papel importante para a física de partículas elementares exatamente por ilustrar um tipo de experimento

fundamental com que os físicos lidam nessa área que é o de espalhamento de partículas.

Nos anos seguintes, o estudo experimental dos raios cósmicos trouxe muitos resultados importantes para o entendimento da física de partículas.

Nesses estudos, partículas de diversos tipos e de energias arbitrárias foram detectadas. Os raios cósmicos, partículas livres vindas do espaço com energias que podem ser bem altas, atingem a atmosfera da terra e decaem, passaram a ser observados através de traços deixados em placas de emulsões fotográficas, câmaras de bolha, câmaras de nuvem, cintiladores, contadores Gêiser, detectores de radiação Cerenkov, fotomultiplicadores entre outros (WILLIAMS,1991). Mas logo se tornou claro que se tratava de esperar a sorte por alguns eventos, pois não era possível controlá-los. Começou então a era dos aceleradores onde se produziam colisões entre partículas com energia cada vez maior e se interpretavam os resultados destas colisões chamadas de experimentos de espalhamento, observando que existe a possibilidade de indicar e controlar o evento escolhido. E foram nesses variados aceleradores, que são os microscópios para observarmos sistemas físicos a esse nível, que a física descobriu muitas das inúmeras partículas que conhecemos hoje, em experimentos semelhantes ao de Rutherford de 1911, onde se incide um feixe de partículas em um alvo e estuda-se o ângulo do espalhamento das partículas. Nesta experiência, a maioria das partículas passa sem muita alteração na direção de incidência, enquanto uma pequena parte delas choca-se violentamente e volta formando um ângulo maior que 90° com a direção de incidência.

Em 1932, o inglês James Chadwick descobriu uma partícula com aproximadamente a mesma massa do próton (HAWKING,2015), mas carga nula, pondo um ponto final em questões que intrigavam os físicos naquela época, como a da existência dos isótopos, assim como no que hoje chamamos de período clássico da física de partículas.

Assumia-se que toda matéria era formada por apenas cinco constituintes básicos; o próton, o elétron e o nêutron, juntamente claro, com o fóton que havia sido sugerido por Einstein em 1905, e conclusivamente demonstrado em experimentos por Compton em 1923, e com uma partícula intrigante, o pósitron, que havia sido previsto

teoricamente por Dirac em 1927 (ROSENFELD, 2003) como uma das soluções de sua famosa equação e interpretada como o antieletrón, detectada por Anderson em 1931. O interessante nesse fato é que o pósitron não parecia representar qualquer papel na estrutura da matéria. A física tinha, portanto uma bela e simples teoria para a estrutura da matéria, mas não uma teoria completa.

Em 1933, o físico italiano Enrico Fermi formulou uma teoria que propunha uma explicação para o chamado decaimento radioativo beta. Sua teoria implicava na existência de uma terceira força fundamental da natureza, mais fraca que a eletromagnética, que foi denominada força fraca, e mostrou que essa força desempenha um papel decisivo na produção de energia pelo Sol.

Outra questão que necessitava de uma explicação era a da estabilidade nuclear, e a resposta para isso foi a proposta chamada força nuclear forte, atualmente considerada uma força básica da natureza. Essa força deveria ser maior que as outras e surpreendentemente, ter curto alcance, na ordem de 10^{-15} m.

A primeira teoria significativa para explicar esta força foi proposta pelo físico Japonês Hideki Yukawa em 1934(ENDLER, 2010), que supôs um campo para essa força que poderia ser representado pelo potencial,

$$V = \frac{g \cdot e^{-\frac{r}{R}}}{4\pi r}, \quad (1)$$

onde g é uma constante de acoplamento que representa a intensidade da força efetiva, $R \cong \hbar/Mc$, é um parâmetro que determina o alcance desta interação, c é a velocidade da luz, \hbar a constante de Planck, r é a distância radial e M é a massa do quanta do campo, inicialmente chamado de méson de Yukawa. Uma estimativa do alcance da força pode ser feita facilmente partindo do princípio da incerteza de Heisenberg:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (2)$$

podemos supor que existe a possibilidade de ocorrer uma flutuação de energia da partícula da ordem de:

$$\Delta E \cong mc^2 \quad (3)$$

por um intervalo de tempo, da ordem de

$$\Delta t \cong R/c. \quad (4)$$

este intervalo de tempo seria uma fração do tempo que a luz leva para atravessar o núcleo de um átomo que é da ordem de 10^{-15} m. Substituindo as equações (3) e (4) na equação (2),

$$\Delta E \cdot \Delta t \cong mc^2 \frac{R}{c} \cong \hbar, \quad (5)$$

Assim podemos observar que R , que por ser interpretado como o alcance da força é inversamente proporcional à massa da partícula criada

$$R \cong \frac{\hbar}{m \cdot c} \quad (6)$$

e assim fornece uma estimativa para a massa dessa partícula.

Yukawa mostrou que a massa dessa partícula, nunca antes observada, deveria ser intermediária entre a massa do elétron e a massa do próton. Essa é a origem do termo méson, nome que vem do grego "meso" que significa médio.

Em 1937, dois físicos Carl Anderson e Seth Neddermeyer independentemente identificaram, em raios cósmicos, partículas que aparentemente se encaixavam com a descrição do méson de Yukawa, mas logo se tornou evidente que a aparência era apenas superficial, a massa da partícula parecia ser discrepante com cálculos mais precisos, e essas partículas detectadas interagiam fracamente com os núcleos dos átomos. Em 1947, o brasileiro César Lattes, trabalhando no grupo do inglês Cecil Powell descobriu dois tipos de partículas de peso médio nos raios cósmicos detectados até então, a que denominaram pión (π) e a outra que foi chamada de múon (μ). O π era o esperado quantum de

Yukawa, e o múon (μ) uma partícula mais pesada que o elétron.

A teoria original de Fermi do decaimento beta era do tipo interação de contato, ou seja, a interação que Fermi propusera não admitia partículas intermediadoras como a teoria de Yukawa previa. Mais tarde foram propostos outros modelos que previam os chamados bósons vetoriais intermediadoras, porém, certas propriedades como as massas dessas partículas não poderiam ser previstas da mesma maneira em que se previra a massa do pión de Yukawa. Este problema aparecia inconsistente por que a força fraca não formava estados ligados.

A partir de então várias outras partículas começaram ser detectadas. Em 1953, Cowan e Rives, em um reator nuclear na Carolina do Sul (GRIFFITHS, 1987), tiveram confirmação da existência da partícula que W. Pauli previra existir ainda em 1930, para explicar a conservação da energia nos eventos de desintegração beta, e que veio a ser chamada de neutrino. Em 1955, foram descobertos o antipróton e o antinêutron no acelerador de partículas bévatron em Berkeley. Em 1959, Davis e Harmer, descobriram que o neutrino e o antineutrino eram na verdade partículas diferentes.

E ainda antes, em 1947 Rochester e Butler publicaram uma fotografia de uma câmara de bolhas que mostrava os traços de uma partícula neutra mais pesada que o π e mais leve que o nêutron, a que veio a ser chamada Káon (K^0), e em 1949, Powell publicou uma fotografia que aparentemente indicava a existência de uma partícula Káon positiva (K^+). Em 1950 detectou-se o Λ , uma partícula mais massiva que o próton. Na sequência foram descobertas as partículas Σ , Ξ e Ω . Em 1953, apesar desta situação ser confusa, se estabeleceram dois grupos para estas partículas instáveis, os híperons, mais pesados que os nucleons e os mésons K, com massas intermediárias entre píons e nucleons mais pesados que o Λ , essas partículas foram chamadas de partículas estranhas (ENDLER, 2010). Esta chuva de partículas causou uma grande dor de cabeça aos físicos, aparentemente não tinham uma ordem, não se tinha propriedades que pudessem acomodá-las nos padrões conhecidos a tal ponto que Enrico Fermi afirmou que se soubesse que a física iria se tornar um exercício de procurar partículas e anotar suas características ele preferiria ter se tornado um botânico.

Em 1964, estes problemas começaram ter solução através de Murray Gell-Mann, George Zweig e independentemente, o israelense Yuval Ne'eman. Eles introduziram o que denominou de “Caminho Óctuplo”, uma espécie de tabela periódica das partículas elementares, formada de figuras que dispunham as partículas em arranjos geométricos simples de acordo com suas cargas e estranhezas, chamadas supermultipletos. Gell-Mann notou que uma das partículas figurando em um de seus decupletos não havia sido detectada, então ele calculou sua massa e tempo de vida, carga e estranheza e, em 1964, a partícula Ω^- foi detectada.

Desde então muitas outras partículas foram previstas da mesma maneira, e não restavam mais dúvidas da funcionalidade do caminho óctuplo. Pouco tempo depois, em 1964 Gell-Mann propôs, como explicação para a existência desses supermultipletos, que essas partículas pesadas deveriam ser compostas de constituintes mais básicos os quais chamou de quarks. Em 1964 eram necessários apenas três tipos diferentes de quarks para explicar estrutura de todos os hádrons observados que foram denominados sabores, e que ele chamou de “up” (u), “down” (d) e “strange”(S).

Estas partículas tinham propriedades diferentes, como cargas elétricas fracionárias. Já seus correspondentes os antiquarks, possuíam carga e estranheza opostas. O modelo de quarks postulava a existência de partículas que deveriam ser compostas de três quarks ligados, chamados de hádrons, três antiquarks chamadas de antipartículas e outras seriam um estado ligado quark-antiquark, ao qual denominamos mésons.

Todos os bárions e mésons são conhecidos coletivamente como hádrons que do grego significa forte, os léptons não interagem via força nuclear forte, ao contrário dos hádrons.

No modelo dos quarks proposto por Gell-Mann uma mesma combinação de quarks pode resultar em diferentes partículas. Se por exemplo um estado ligado de um elétron e um próton representa um átomo de hidrogênio no estado fundamental ou em qualquer outro estado excitado, um estado ligado de dois quarks u com um quark d pode representar tanto um próton quanto um Δ^+ .

A diferença destes estados ligados é a quantidade de energia e a configuração do spin. Enquanto no átomo de hidrogênio estados excitados possuem apenas alguns elétrons-volts de diferença em relação ao estado fundamental; Δ^+ tem milhões de elétrons-volts de diferença com relação à massa m do próton, por isso consideramos como partículas distintas.

Apesar de todo esse sucesso, o modelo dos quarks passou por uma crise, os quarks livres nunca foram observados! Inúmeros experimentos à procura de quarks livres falharam e surgiram dúvidas quanto a hipótese da existência dos quarks. Conciliando o extraordinário sucesso do modelo dos quarks com o decepcionante fato de ser aparentemente impossível observá-los isolados surgiu o conceito de confinamento de quarks. De alguma maneira ainda não compreendida, os quarks individuais estariam confinados no interior dos hádrons.

Em 1964, Oscar Wallace Greenberg, Moo-young Han e Yoichiro Nambu propuseram, independentemente, uma ideia que viria a dar mais suporte ao modelo dos quarks através de uma propriedade semelhante à carga elétrica que foi chamada de carga de cor. O objetivo era manter a estrutura de alguns hádrons consistente como o princípio de exclusão de Pauli. Segundo Greenberg, todo quark deveria possuir apenas um dos três tipos possíveis de cor: verde, azul e vermelho, e cada antiquark uma das correspondentes anticores. Todo hádron seria um estado ligado incolor de quarks, onde incolor significa uma partícula composta de três quarks ou antiquarks diferentes ou de um par quark-antiquark. Mais tarde foram feitos experimentos que demonstraram conclusivamente a realidade do conceito de carga cor.

Em 1974 dois grupos, também de forma independente, publicaram uma descoberta que deu o apoio final para a aceitação do modelo dos quarks, o grupo de Samuel Chao Chung Ting de Brookhaven, e o grupo de Burton Richter do SLAC, detectaram um méson neutro extremamente pesado cerca de três vezes mais pesado que o próton e com tempo de vida médio muito longo cerca de mil vezes o tempo de vida médio de hádrons com essa massa, que foi denominado ψ por Richter e J por Ting, desse modo atualmente é conhecido como J/ψ . Observaram que esse méson era, na verdade, um estado ligado de um novo quark. Esse quarto quark, chamado charm(c) havia sido previsto ainda em 1964 por Glashow e Bjorken, levados por um possível paralelo

entre quarks e léptons, de que até aquela data sabia-se da existência de quatro léptons o elétron, múon e seus correspondentes neutrinos e apenas três quarks, o u , d e s . Por razões mais técnicas, Glashow, Iliopoulos e Maiani em 1970 esperavam por esse quark.

Em 1975, um quinto lépton, o tau (τ) foi descoberto, e como se esperava que existisse o seu correspondente neutrino, o neutrino tauônico (ν_τ), assim como ocorre com o elétron e o múon com seus respectivos neutrinos eletrônico (ν_e) e muônico (ν_μ), o número total de léptons passava de quatro para seis! Correspondentemente o número de sabores de quarks também deveria passar de quatro para seis. A correspondência mostrou-se funcional, dado que em 1977, o méson pesado úpsilon (Y) foi detectado e mostrou-se que era um estado ligado de um quinto tipo de quark chamado quark bottom(b).

Com o surgimento da teoria eletrofraca de Salam, Weinberg e Glashow, foi possível prever as massas dos três bósons vetoriais intermediadores da força fraca e, em Janeiro de 1983, o grupo de Carlo Rubbia, no colisor próton-antipróton do CERN, anunciou a descoberta do chamado bóson W e, cinco meses depois, o bóson Z.

E finalmente, em 1993; o sexto e último quark foi detectado por uma equipe do CERN. Esse quark de massa elevada em torno de 172,9 GeV, sendo o quark mais pesado, recebeu o nome de top(t).

O modelo padrão foi desenvolvido de modo a explicar essas descobertas, teóricas e experimentais. Mas nesse modelo existe um grande problema que é a interação gravitacional. Gravitação quântica é o campo da física teórica que desenvolve modelos físico-matemáticos específicos, no propósito de contribuir para a unificação da mecânica quântica, que já descreve três das quatro conhecidas interações de campo, com a relatividade geral que descreve brilhantemente a quarta interação de campo, a interação gravitacional.

O desafio final é construir uma teoria do campo unificado que irá descrever todas as interações nos domínios micro e macrocósmico.

Mas existem muitas pedras nesse caminho. Como exemplo, podemos observar que a teoria quântica de campo baseia-se em campos de partículas inseridas no espaço-tempo da relatividade restrita. A relatividade geral modela a gravidade como uma curvatura no espaço-

tempo que afeta o movimento das massas. Esse seria o tipo de abordagem para descrever a gravidade quântica, mas devido a muitas dificuldades isso não foi possível até hoje.

O caminho para combinar estas duas teorias conduz às teorias de renormalização. Partículas de gravidade, ou grávitons, devem atrair-se mutuamente, o que resulta em muitos valores infinitos os quais não podem ser facilmente cancelados. Isto contrasta com a eletrodinâmica quântica onde às vezes em que se atingem resultados infinitos, estes podem ser removidos via renormalização.

Outro problema é experimental. A energia e as condições na qual a gravitação quântica se torna importante são inacessíveis aos experimentos laboratoriais nos dias de hoje. A consequência é que não há dados observacionais que possam prover qualquer auxílio para combinar as duas.

Mas mesmo assim os cientistas criaram hipoteticamente o bóson da gravidade: o gráviton, porém ainda não faz parte do modelo padrão.

2.2 ASPECTOS TEÓRICOS NA CONSTRUÇÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

A relatividade especial e a mecânica quântica fornecem as bases teóricas mais avançadas que conhecemos para descrever a estrutura da matéria até hoje.

A teoria da relatividade foi construída por Albert Einstein a partir do eletromagnetismo de Maxwell. Esta teoria discute como dois observadores em referenciais inerciais distintos descrevem um mesmo fenômeno físico. Para descrever este fato, Einstein postulou dois princípios fundamentais: todos os sistemas de referência inerciais são equivalentes para a formulação de uma lei física e a velocidade da luz no vácuo é constante e possui o mesmo valor em qualquer sistema de referência inercial.

Estes dois princípios estão relacionados a dois conceitos básicos: invariância e covariância. A covariância é uma invariância na forma de uma equação, ou seja, uma equação escrita na forma covariante será a mesma em qualquer sistema inercial. Já a invariância significa que o valor de uma grandeza assume o mesmo em qualquer

sistema inercial. Por exemplo, a velocidade da luz no vácuo, a massa de repouso de uma partícula, a carga do elétron são invariantes. Já a velocidade, energia, o momentum não são grandezas invariantes.

Na mecânica clássica a transformação de Galileu relaciona quantidades físicas observadas em dois sistemas inerciais distintos, em função de um tempo absoluto. Na relatividade especial, espaço e tempo formam uma entidade única, o espaço-tempo, as transformações de Galileu devem ser substituídas pelas transformações de Lorentz, observando essas transformações que relacionam um evento no espaço-tempo visto por dois observadores inerciais distintos, Einstein levanta a discussão sobre a existência de eventos simultâneos e informação instantânea entre dois objetos em pontos distintos do espaço-tempo.

Uma questão de especial é a propagação de perturbações geradas no espaço-tempo por algum tipo de fonte. No caso particular do eletromagnetismo de Maxwell, um objeto de interesse é o estudo dos campos, elétrico e magnético, gerados por cargas, correntes, ou densidades de spin e a análise da energia transportada por estes campos.

Ideias primordiais de mecânica quântica surgem através do físico Louis de Broglie, que sugeriu que como a luz se comporta em alguns fenômenos como se fosse composta de partículas, a matéria poderia se comportar também como ondas. Sua hipótese foi comprovada em experiências realizadas no estudo da difração de elétrons em redes cristalinas.

De acordo com de Broglie, o comprimento de onda de uma partícula é inversamente proporcional ao seu momento, com a constante de proporcionalidade sendo a constante de Plank, $\lambda = h/p$.

As consequências dessas ideias foram imediatas. Erwin Schrödinger desenvolveu uma mecânica ondulatória para a matéria, descrita através de uma equação de ondas. As soluções desta equação conseguiam descrever a evolução espacial e temporal das ondas de matéria sob alguns aspectos, por exemplo, que um elétron movendo-se no campo elétrico de um próton. Também foi possível mostrar os níveis de energia que os elétrons poderiam ocupar eram precisamente os mesmos níveis que haviam sido postulados por Bohr anteriormente.

Por volta de 1925, a ideia o quantum foi aplicada à mecânica do movimento de elétrons nascendo assim a mecânica quântica, resultando na chamada dualidade onda-partícula expressada na famosa equação de Schrodinger (Ryder, 1996).

Como foi dito anteriormente, a partir da década de 30 os raios cósmicos passaram a ser observados com o objetivo de detectar partículas já que muitas vezes sua energia parecia ser precisamente alta. Os fenômenos quânticos passaram a ser analisados sob o ponto de vista relativístico e a formulação matemática de uma teoria quântica relativística tornou-se indispensável.

Assim a teoria quântica se tornou a base teórica da física moderna para explicar a natureza e o comportamento da matéria e da energia no nível atômico e subatômico. O termo quantizar significa determinar a menor porção de uma entidade. Após o sucesso da mecânica quântica, onde os níveis de energia das partículas eram quantizadas, o próximo passo parecia natural: a quantização dos campos.

O nascimento da teoria quântica de campos ocorreu no final da década de 1920 como aplicação das regras de quantização de Heisenberg ao campo de radiação. Ao escrever a energia do campo eletromagnético em termos dos modos normais de vibração, ou seja, das componentes de Fourier, notou-se que ela parecia ser formulada como uma superposição de osciladores harmônicos.

Nessa teoria, as partículas surgem como resultado dos campos quantizados, logo pode se pensar que as entidades básicas da natureza são campos. Esse pensamento direcionou pesquisa para as interações fortes, como fez Yukawa, para descrever as interações e Fermi para as interações fracas durante a década de 1930. No entanto uma teoria que tenta descrever a natureza deve ser compatível com a relatividade restrita de Einstein, logo ela deve ser local no sentido de que as interações são descritas por produtos dos campos no mesmo ponto.

As partículas são definidas então como pontos materiais localizados em uma posição finita do espaço. Isto exigiu o estudo do movimento das partículas e as equações de movimento de um sistema

mecânico com um número finito de graus de liberdade foram determinadas pelos formalismos Lagrangiano e Hamiltoniano.

O campo é definido como uma grandeza que existe em todos os pontos do espaço, ou seja, ele não está localizado em uma posição específica. Por exemplo, quando associamos um valor de temperatura a cada ponto de espaço, estamos definindo um campo escalar chamado de campo de temperatura. Por sorte, muitas teorias de campo de interesse físico são descritas classicamente pelos formalismos Lagrangiano e Hamiltoniano. As interações básicas das partículas elementares, constituintes da matéria, por sua vez puderam ser expressas por meio de teorias quânticas de campo. Desse modo a construção das teorias quânticas das interações fundamentais da natureza depende primeiro, da possibilidade de formulá-las como teorias clássicas de campos, ou seja, nas linguagens Lagrangeana e Hamiltoniana (LEMOS, 2007), para então ser feita a quantização.

No restante desse capítulo, fazemos uma breve apresentação de algumas teorias importantes no desenvolvimento do modelo padrão de partículas. É claro que devido ao objetivo desta dissertação, o tratamento muitas vezes será limitado, pretendendo dar uma ideia introdutória e geral do assunto e deixamos para os leitores mais interessados consultarem as referências mais avançadas e técnicas a respeito dos assuntos abordados.

Iniciaremos esta revisão as equações relativísticas para partículas de spin 0 e 1 (Klein-Gordon e Dirac). A seguir traremos uma ideia de como o campo eletromagnético pode ser quantizado e como isso levou a formulação da eletrodinâmica quântica (QED, que é uma sigla para quantum electrodynamics).

Depois a questão de simetrias e grupos serão apresentadas e como estas teorias são usadas para estudar as propriedades das partículas.

Finalmente mostraremos (de modo bastante introdutório) os diagramas de Feynman e como eles podem ser usados para se estudar as interações das partículas.

2.2.1 Equação de Klein-Gordon

Começemos pela partícula livre. Em mecânica quântica não relativista a equação de Schrodinger é obtida da equação fundamental

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = H\psi, \quad (7)$$

e usando o Hamiltoniano para uma partícula livre não relativista

$$H = \frac{p^2}{2m}, \quad (8)$$

e fazendo a substituição $\vec{p} \rightarrow -i\hbar\vec{\nabla}$, obtemos

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi. \quad (9)$$

O que leva a

$$\hat{H}\psi = E\psi, \quad (10)$$

onde E é a energia da partícula. Se quisermos alguma generalização dessas ideias para descrever uma partícula relativística podemos, em primeiro lugar mostrar que

$$p_\mu p^\mu = m^2 \cdot c^2, \quad (11)$$

onde o quadrivetor do momento é dado por

$$p^\mu \equiv \left(\frac{E}{c}, \vec{p} \right). \quad (127)$$

Temos então

$$\frac{E^2}{c^2} - \vec{p} \cdot \vec{p} = m^2 c^2, \quad (13)$$

ou seja

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (14)$$

Classicamente exige-se que as energias sejam positivas por isso deveríamos ter no caso relativístico

$$H = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}. \quad (158)$$

O problema desta equação era interpretar a raiz quadrada do operador H . Para evitar este problema uma possibilidade é encontrar uma equação para H^2 , observando a comutação

$$\left[i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, H \right] = 0, \quad (16)$$

podemos obter

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi = (-\hbar^2 c^2 \nabla^2 + m^2 c^4) \psi, \quad (17)$$

e finalmente chegamos à equação de Klein-Gordon

$$\left[\left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \square \right] \psi = 0, \quad (18)$$

onde $\square = \partial_\mu \partial^\mu$ é conhecido como operador d'Alambertiano.

Este procedimento resolveu parte dos problemas relacionados a teoria relativística mas ainda restava o problema da interpretação das energias negativas. Contudo não foi a existência de soluções com energia negativa que levou ao abandono da equação de Klein-Gordon (SCHRODINGER, 1926). Como veremos, as soluções de energia negativa não podem deixar de existir em mecânica quântica relativista e a sua interpretação está relacionada com as antipartículas. A observação experimental de antipartículas veio confirmar esta interpretação.

O próximo passo é construir uma expressão de densidade de corrente que satisfaz a equação de Klein-Gordon (6):

$$\rho = \frac{1}{c^2} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} - \psi \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \right). \quad (19)$$

A expressão (13) não pode ser interpretada como a densidade de probabilidade. Tanto o valor de ψ como de $\partial\psi/\partial t$ para um determinado instante, podem assumir tanto valores positivos e negativos. Sendo assim, não podemos interpretar ρ como uma densidade de probabilidade. A razão mais profunda para isto é que a equação de Klein-Gordon possui uma derivada de segunda ordem no tempo, então devemos saber tanto ψ como a variação temporal de ψ .

Interpretações posteriores levaram a considerar que a equação relativística de Klein-Gordon deveria ser utilizada para descrever partículas de spin zero, e esta foi a razão pela qual não pode explicar os níveis do átomo de hidrogênio, pois este apresentava o spin diferente de zero.

As soluções de energia negativa foram posteriormente compreendidas e a densidade ρ foi reinterpretada não como uma densidade de probabilidade, mas sim como uma densidade de carga.

2.2.2 A equação de Dirac

Em 1928, Dirac apresentou uma equação relativista para o elétron. Essa equação representava uma evolução em relação aos conhecimentos da época, pois nessa formulação seu spin aparece naturalmente. A equação de Klein-Gordon, que tinha natureza relativística, não apresentava as características completas para descrição quânticas do elétron, por exemplo, o seu spin.

Dirac enxergou que a equação de Schrodinger era de primeira ordem no tempo, e essa era a diferença clara em relação à equação de Klein-Gordon, ele julgou ser necessário baixar a ordem das duas derivadas, no tempo e no espaço, para escrever um hamiltoniano compatível.

Confrontado com os problemas da equação de Klein-Gordon, Paul Dirac considerou dois princípios básicos, a equação deveria ser linear na derivada temporal e deveria ser relativisticamente covariante, ou seja, o Hamiltoniano também deveria ser linear nas derivadas em relação as coordenadas do espaço e tempo.

Para solucionar este problema, Dirac propõe, a partir da expressão para a energia relativística

$$\frac{E}{c} = \pm \sqrt{p^2 + m^2 c^2} \quad (209)$$

Determinar um operador para obter uma equação quântica.

Esta reestruturação da equação tinha o objetivo de cumprir a finalidade de se ter somente derivadas de primeira ordem no tempo e no espaço, e obedecer à conformidade do espaço-tempo da relatividade, quanto as suas derivações.

Dirac propôs então, um operador na forma:

$$H = \vec{\alpha} \cdot \vec{p}c + \beta mc^2, \quad (21)$$

onde H é o hamiltoniano, que tem origem na energia relativística (E) da partícula e α e β deveriam ser determinados.

Partindo da expressão e efetuando os cálculos Dirac chegou a seguinte equação:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\hbar c}{i} \left(\alpha_0 mc\psi + \alpha_1 \frac{\partial \psi}{\partial x_1} + \alpha_2 \frac{\partial \psi}{\partial x_2} + \alpha_3 \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \right). \quad (22)$$

Cada α é um operador linear que se aplica à função de onda. Escritos como matrizes 4×4 , são conhecidos como matrizes de Dirac. Uma das escolhas possíveis de matrizes é a seguinte:

$$\alpha_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \alpha_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & -i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \alpha_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

onde α_0 , α_1 , α_2 e α_3 não são números reais ou complexos, mas sim matrizes quadradas com N^2 . Neste caso são escritos como matrizes 4×4 , e determinam o Hamiltoniano da teoria de Dirac, que vem a ser o operador Hamiltoniano.

Neste caso,

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{bmatrix}.$$

compostas por quatro componentes ψ_i , com $i = 1, 2, 3, 4, \dots$.

A equação de Dirac, diferentemente da equação de Klein-Gordon, é uma equação que forneceu bons resultados para partículas de spin $\frac{1}{2}$. Um dos sucessos é que esta equação incorporou o spin de forma natural, o que não ocorria com a equação de Schrodinger, onde o spin era admitido através de uma hipótese. Não obstante, isso levou certos autores a afirmarem que o spin é um grau de liberdade relativístico, o que é uma interpretação que pode ser contestada. Outro sucesso da equação de Dirac foi prever a existência do pósitron, pois a equação previa valores negativos de energia. Essa teoria afirmava que os pósitrons seriam vacâncias produzidas pela promoção desses elétrons para estados com energias positivas. O vácuo então, pode ser visto como um mar de elétrons onde eles estariam compactamente colocados.

Entretanto, essa teoria cedeu lugar à questão de criação e aniquilação de partículas num contexto mais geral da quantização canônica dos campos.

2.2.3 Quantização do campo eletromagnético

No final do século XIX, Planck descobriu que a radiação eletromagnética emitida por corpos negros não poderia ser explicada pela física clássica, que considerava que a matéria poderia absorver ou emitir qualquer quantidade de radiação eletromagnética. Naquela época a física usada para explicar a radiação eletromagnética era baseada na lei de Rayleigh e Jeans, mas não ajustava a curva espectral em toda a faixa de comprimentos de onda, pois Rayleigh e Jeans admitiam que os osciladores pudessem irradiar qualquer quantidade de energia.

Planck impôs uma restrição à essa teoria, os osciladores só poderiam emitir energia em determinadas quantidades:

$$E = nhf \quad (n= 0,1,2,3..) \quad (23)$$

onde h é a constante de Planck e f é a frequência de radiação emitida.

Em 1887, Heinrich Hertz, investigava a natureza eletromagnética da luz, produzindo descargas elétricas entre duas superfícies de metal em potenciais diferentes, ele observou que uma faísca proveniente de uma superfície gerava uma faísca secundária na outra. Na sequência dos seus experimentos ele constatou que o fenômeno não era de natureza eletrostática, pois não havia diferença se a proteção era feita de material condutor ou isolante. Após uma série de experimentos, Hertz, confirmou que a luz poderia gerar faíscas e dois anos após a descoberta de Hertz, Thomson postulou que o efeito fotoelétrico consistia na emissão de elétrons.

Em 1865, James Clerk Maxwell estava aprofundando seus estudos sobre o eletromagnetismo. Ele juntou todas as ideias e leis a respeito da eletricidade e do magnetismo que existiam na época e percebeu a possibilidade de unificar a eletricidade e o magnetismo através de poucas equações. Desse modo conseguiu formular uma teoria que até hoje pode ser considerada a teoria do eletromagnetismo.

Em 1905, Einstein desenvolveu uma teoria revolucionária para explicar o efeito fotoelétrico baseada nas ideias de Planck. Ao invés de considerar a luz como uma simples onda, ele propôs que a onda era composta de partículas, chamadas fótons.

A ideia de quantização do campo eletromagnético tem suas

bases nas ideias de Planck e Einstein, mas tem uma interpretação mais profunda a partir das regras de quantização de Heisenberg aplicadas a um campo de radiação, o qual descreve a energia do campo eletromagnético em termos dos modos de oscilação de osciladores harmônicos ou osciladores de campo.

Um dos resultados desse processo é o aparecimento de fótons, os quanta do campo de radiação, os quais haviam sido postulados anteriormente por Einstein.

As equações de Maxwell fornecem uma descrição clássica completa de campos elétricos e magnéticos. A descrição destes campos na mecânica quântica tem um formalismo bem definido e oferece soluções bem claras.

As equações de Maxwell no espaço livre sem cargas $\rho(\vec{x}, t)=0$ e sem correntes $\vec{J}(\vec{x},t)= 0$, são:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \end{array} \right.$$

Onde \vec{E} e \vec{B} são os campos elétrico e magnético, respectivamente.

O procedimento tradicional é postular um potencial vetor $\vec{A}(\vec{x}, t)$, tal que:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \tag{24}$$

Em um sistema físico sem cargas e correntes é possível aplicar o Gauge de Coulomb, onde

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0, \tag{25}$$

e

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}. \tag{26}$$

A solução das equações de Maxwell para o vácuo, nos leva a concluir que o campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{B} obedecem às expressões

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad (2710)$$

e

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}, \quad (2811)$$

que são as equações de onda se propagando na velocidade da luz.

A densidade de energia ε pode ser escrita em função dos campos \vec{E} e \vec{B}

$$\varepsilon = \frac{1}{8\pi} \int [|\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)|^2 + |\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)|^2]. \quad (29)$$

A ideia é então quantizar a energia desses campos.

No contexto da mecânica quântica a energia pode ser determinada a partir da expansão

$$E = \frac{1}{4} V \sum_{k\lambda} \frac{\omega_k^2}{c^2} [a_{k\lambda}^* a_{k\lambda} + a_{k\lambda} a_{k\lambda}^*]. \quad (30)$$

O primeiro passo para a quantização do campo eletromagnético era mostrar que esse campo modal era equivalente a um oscilador harmônico quântico.

A ideia de escrever a equação (30) dessa forma é associar esse valor de energia ao autovalor de um operador Hermitiano fazendo a hipótese que o campo eletromagnético seja composto por uma coleção

de partículas idênticas. Para isso, foram definidos dois operadores, $a_{\lambda}^{\dagger}(k)$ como um operador que cria uma partícula e $a_{\lambda}(k)$ um operador que aniquila a partícula, de modo totalmente análogo ao que se faz na mecânica quântica usual.

Tomando como hipótese que estas partículas não interagem, a hamiltoniana é aditiva, e pode ser escrita como:

$$H = \sum_{k\lambda} \hbar\omega_k a_{\lambda}^{\dagger}(k) a_{\lambda}(k) . \quad (31)$$

A Hamiltoniana de um sistema de partículas idênticas pode ser reescrita como

$$H = \sum_{k\lambda} a_{\lambda}^{\dagger}(k) a_{(\lambda)}(k) , \quad (32)$$

e usando a regra de comutação

$$H = \sum_{k\lambda} \frac{1}{2} \hbar\omega_k [a_{\lambda}^{\dagger}(k) a_{\lambda}(k) + a_{\lambda}(k) a_{\lambda}^{\dagger}(k) + 1] . \quad (33)$$

Separando termo a termo, os dois primeiros são clássicos, mas o último termo é um resultado interessante:

$$E_0 = \sum_{k\lambda} \frac{1}{2} \hbar\omega_k = \sum_k \frac{1}{2} \hbar\omega_k . \quad (34)$$

Esta é a energia contida no campo eletromagnético, quando não existir nenhuma partícula. Esta energia foi chamada de energia de vácuo. É um número infinito, porém constante! Em outras palavras este campo tinha uma quantidade infinita de energia que se manifestava através de criação e aniquilação de partículas.

A conclusão foi inevitável, o campo eletromagnético é então uma reserva inesgotável de energia formada por partículas, Essas partículas foram chamadas de fótons e eram as partículas que teriam o papel fundamental de interagir com toda matéria que possuísse carga elétrica.

Como partículas surgem no processo de quantização de campos, os campos passam a ser chamados de entidades básicas da natureza.

2.3 ELETRODINÂMICA QUÂNTICA

Os elétrons são partículas que absorvem e emitem fótons de luz. A teoria que descreve a interação da luz com a matéria necessita lidar com três partículas: elétrons, pósitrons e fótons. A teoria quântica de campos que descreve estas interações é conhecida como eletrodinâmica quântica (QED). A QED se baseia numa ideia simples, elétrons, fótons e pósitrons interagem num ambiente em que partículas virtuais estão sendo criadas e destruídas constantemente.

Segundo a QED, nunca enxergamos um elétron “despido”, com massas infinitas. Só podemos ver através de uma nuvem de partículas virtuais, que estão constantemente sendo criadas e aniquiladas ao seu redor. Estas partículas virtuais existem por pouco tempo, enquanto outras são criadas constantemente. Assim o elétron sempre estará envolto por uma nuvem de partículas virtuais. Além disso, esta nuvem fica polarizada (MORRIS, 1998). Esta nuvem polarizada cria uma proteção e impede que observemos a massa infinita do elétron assim como sua carga. A QED mostra que o elétron tem uma carga nua, que pode se considerada infinita, mas também é envolvida por uma nuvem de partículas virtuais infinitas, pois os campos que geram estas partículas tem um reservatório infinito de energia.

O método utilizado para solucionar este problema era conhecido como método perturbativo. Este método consiste em fazer aproximações sucessivas e obter resultados mais precisos. No entanto, tentativas de utilizar este método sempre acabavam em resultados que levavam a infinitos. O resultado mais preciso aparecia na primeira aproximação, na segunda aproximação apareciam infinitos por toda parte (ROSENFELD, 2003). Desse modo podemos concluir que no procedimento de quantização dos campos apresentam muitas quantidades infinitas, o que a primeira vista, inviabiliza a teoria. Para que esta teoria pudesse ser considerada, este problema deveria ser resolvido.

2.3.1 Renormalização

Ao escrevermos uma teoria quântica de campos observamos que as equações de movimento obtidas para os campos são, em geral, não lineares e acopladas. Na maior parte dos casos é necessário o uso de métodos perturbativos para resolvermos esse tipo de problema. A teoria de perturbação é um método capaz de descrever um fenômeno complicado, como a interação em termos de soluções conhecidas para o caso simples de partícula livre.

Somente em alguns casos, geralmente bidimensionais, se obtém a solução exata. Nos outros casos, como na auto-interação do elétron, aparecem quantidades divergentes que contaminam as séries perturbativas para os processos físicos. Um procedimento proposto para tratar deste problema foi separar estas divergências e removê-las de modo consistente para estabelecer um elo entre teoria e experimento. A tarefa consiste em separar as partes divergentes e as partes finitas e, então eliminar os efeitos dos infinitos nas amplitudes físicas.

Estas divergências apareceram pela primeira vez na eletrodinâmica quântica e para resolver este problema surgiu a teoria da renormalização.

O processo de renormalização de uma teoria consiste em absorver os infinitos que surgem no decorrer dos cálculos necessários à resolução de suas equações de campo, numa reparametrização da teoria. Em outras palavras, os parâmetros como massa e carga que inicialmente aparecem numa teoria de campos em interação não são, na realidade, os parâmetros observáveis, isto é, não podem ser comparados com resultados experimentais. Isso acontece porque os efeitos quânticos da interação alterarão seus valores por quantidades infinitas. Assim, uma maneira proposta para chegarmos a resultados finitos para os parâmetros físicos da teoria é supormos que os parâmetros iniciais, também chamados de parâmetros nus, são quantidades elas mesmas infinitas, de tal modo que a combinação parâmetro nu com quantidades infinitas tenha como resultado uma quantidade finita, que associaremos à quantidade física correspondente ao parâmetro nu recombinação.

Ao se calcular os efeitos da autoenergia do elétron e da polarização no vácuo, por exemplo, surgem vários infinitos como resultado das interações. Ambos os efeitos estão relacionados à emissão e absorção de partículas virtuais e tais partículas possuem um tempo de vida muito curto.

A autoenergia do fóton resulta de uma contínua emissão e reabsorção de fótons virtuais por qualquer carga elétrica. Isto é consequência da própria carga elétrica ser a geradora da interação eletromagnética que envolve fótons virtuais na interação. A consequência desse fenômeno é que um observador olhando o elétron pelo lado de fora detectaria a massa do elétron com uma energia total determinada também pela massa da nuvem de partículas virtuais ao seu redor:

$$m_{e_0} + m_{\text{nuvem}}$$

Esta autointeração teria por consequência esconder a energia inicial do elétron e_0 . Logo, a massa do elétron seria diferente. O problema crucial era corrigir o efeito trazido pela nuvem, pois a técnica utilizada até então pela eletrodinâmica quântica resultava em infinitos.

A renormalização surgiu com o objetivo de propor que a carga real do elétron seja finita. A técnica de renormalização combinava o infinito da carga do elétron com o infinito das correções da nuvem resultando um número finito.

Na polarização do vácuo, o campo eletrostático de um elétron leva ao surgimento de pares elétron-pósitron virtuais que são criados a partir do vácuo. Os elétrons virtuais são repelidos pela carga negativa original, ao passo que os pósitrons são atraídos. Por causa dessa assimetria, o elétron original fica envolvido por uma nuvem de pósitrons virtuais que blinda parte da sua carga, resultando em uma carga efetiva que é menor do que a carga original. O vácuo se comporta, assim, como um meio dielétrico polarizável pelo campo elétrico, daí o nome do efeito.

No início se pensou que era uma blindagem de carga, mas mais tarde se considerou que o campo elétrico do elétron ao seu redor gerava uma assimetria no meio dielétrico, onde este meio é composto por uma nuvem de fótons, que surgem da interação entre elétrons e pósitrons. Esta nuvem gera então um campo elétrico contrário ao campo gerado pelo elétron que contrabalança o campo elétrico criado pelo elétron e_0 , cancelando os vários infinitos dos observáveis.

O sucesso da eletrodinâmica quântica inspirou na comunidade científica a esperança de que as outras interações da natureza, além da eletromagnética, pudessem ser descritas por meio de teorias quânticas renormalizáveis.

Porém, à medida que se prosseguia nesse projeto, percebeu-se que isso dificilmente seria conseguido no que se refere à interação nuclear fraca e à interação forte. No caso da interação fraca, as divergências que surgiam eram de um tipo que não podia ser erradicado por meio das técnicas de renormalização existentes. No caso da interação forte, existiam muitas dificuldades em aplicar a teoria da perturbação, que era o modo pelo qual a maioria dos cálculos eram efetuados na teoria do campo, devido ao valor elevado das constantes de acoplamento.

2.4 TEORIA DE CALIBRE: SIMETRIA LOCAL E GLOBAL

As teorias de gauge, também chamadas de teorias de calibre, representam uma classe de teorias baseadas na ideia de que as transformações de simetria podem ser utilizadas para estudar a física de partículas elementares. Essa ideia aplica-se não somente às teorias de campo, mas aos sistemas de dimensão finita, como alguns descritos por equações diferenciais ordinárias. Muitas teorias são descritas por Lagrangianas que são invariantes sob determinados grupos de transformações de simetria. Quando tais grupos são invariantes sob uma transformação em cada ponto do espaço, esses grupos descrevem uma simetria global. Em uma teoria de gauge, a exigência de que as transformações sejam globais é deixada de lado, e a Lagrangiana possui uma simetria chamada de local. A simetria local pode ser diferente nos diferentes pontos. Isso pode ser visto, por exemplo, considerando o princípio de equivalência da relatividade geral, onde que em cada ponto do espaço-tempo é permitida uma escolha de um referencial local.

O modelo padrão unifica a descrição do eletromagnetismo, interações fracas e fortes na linguagem das teorias de gauge.

A teoria de calibre é um tipo particular de simetria. Ela consiste em somar ao potencial A^μ o gradiente de uma função arbitrária $f(x)$ e mesmo assim manter inalteradas as previsões teóricas.

A descoberta das teorias de gauge representa um dos grandes

avanços da física contemporânea. Atualmente, existe o paradigma de que as teorias que descrevem as quatro interações fundamentais da natureza, a interação gravitacional, a eletromagnética e as interações fraca e forte, podem ser formuladas através de um princípio de invariância sob transformações locais pertencentes a um determinado grupo.

Numa teoria de campos relativística, onde as partículas são vistas como campos, podemos considerar uma Lagrangiana que descreve um férmion de spin $\frac{1}{2}$ eletricamente carregado que interage com o campo eletromagnético. O ponto de partida é a Lagrangiana que descreve o campo fermiônico livre, ou seja, a Lagrangiana de Dirac:

$$\mathcal{L}_D = \bar{\psi} (i\gamma^u \partial_\mu - m)\psi, \quad (35)$$

onde ψ denota o campo espinorial de Dirac com 4 componentes, γ^u são as matrizes de Dirac, $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$ é o adjunto de ψ e m é a massa de repouso da partícula. Note que nessa expressão não há qualquer referência ao fato de que a partícula não possui carga elétrica nula.

O próximo passo é construir a derivada covariante de calibre ∇_μ . Para isso se introduz um campo vetorial A_μ para que ψ se transforme corretamente, segundo a lei de transformação:

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) - \partial_\mu \alpha(x). \quad (3613)$$

Como foi introduzido um campo vetorial, a forma explícita de ∇_μ é dada por:

$$\nabla_\mu = \partial_\mu - iqA_\mu. \quad (37)$$

Seguimos agora os seguintes passos, partindo da Lagrangiana \mathcal{L}_D que descreve um campo de spin $\frac{1}{2}$, e essa Lagrangiana possui a propriedade de invariância sob transformações de calibre globais. Em seguida se propõe estender a invariância em questão para o caso em que $\alpha = \alpha(x)$. Então a teoria que passamos a considerar é aquela que pode ser derivada da Lagrangiana \mathcal{L}_D dada por:

$$\mathcal{L}_D' = \bar{\psi} (i\gamma^u \nabla_\mu - m)\psi. \quad (38)$$

Essa Lagrangiana é invariante sob uma transformação que é chamada de transformação de calibre local, onde a palavra local reflete o fato de que o parâmetro α não é mais uma constante, mas cumpre o papel de função das coordenadas do espaço-tempo. Nessa linguagem, adotar o princípio de gauge significa exigir que a teoria sob consideração seja invariante sob transformações de calibre locais.

Identificando os potenciais φ e A com as componentes do quadrivetor A_μ , isto é usando que $A_\mu = (\varphi, A)$, é possível demonstrar as equações de Maxwell no espaço livre podem ser derivadas da seguinte densidade de Lagrangiana:

$$\mathcal{L}_{EM} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}, \quad (3914)$$

onde o chamado tensor do campo eletromagnético tem as suas componentes covariantes dadas por

$$F^{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu. \quad (40)$$

Perceba que o tensor de campo $F^{\mu\nu}$ é invariante sob a transformação

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) - \partial_\mu \alpha(x). \quad (41)$$

de tal forma que \mathcal{L}_{EM} também é invariante sob uma tal transformação.

Somando a Lagrangiana \mathcal{L}_{EM} , que descreve o campo eletromagnético livre, à Lagrangeana \mathcal{L}_D , que descreve uma partícula com massa de repouso m , carga elétrica q e spin $\frac{1}{2}$ a interagir com o campo eletromagnético, obtemos a Lagrangiana \mathcal{L} da teoria completa:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^u \nabla_\mu - m)\psi. \quad (4215)$$

Esta é uma teoria chamada de teoria de calibre Abelian.

2.5 SIMETRIAS E GRUPOS

Uma importante ferramenta com a qual os físicos estudam simetrias é chamada teoria de grupos. O estudo de simetrias só veio a se desenvolver com o surgimento da mecânica quântica.

A estreita relação entre simetrias e leis de conservação foi estabelecida na década de 20 no que ficou conhecido como o teorema de Noether. Simetria significa invariância das equações de movimento mediante uma determinada operação.

Por exemplo, a invariância da Lagrangiana por translações no espaço implica na conservação do momento e da energia, assim como a invariância por rotações espaciais implica na conservação do momento angular. Aqui não faremos, já que não é o objetivo da dissertação, uma discussão mais detalhada sobre simetrias, mas apenas nos utilizaremos dos conceitos básicos para explorar as consequências de um tipo particular simetria: a invariância de calibre. Um tratamento mais completo pode ser encontrado em diversas referências.

O estudo das consequências das simetrias no domínio da mecânica quântica é um assunto bem mais amplo que na mecânica clássica. Como exemplo podemos citar o importante tópico da indistinguibilidade de partículas elementares, como o elétron. Costuma-se dizer que não se pode pintar um elétron; isso expressa de forma bem simples a ideia de indistinguibilidade ao nível microscópico, característica essa fundamentalmente inexistente ao nível macroscópico. Por mais que se diga que uma moeda é igual a outra, pode-se “pintar uma mancha” em uma delas e distingui-las, ou seja, pode-se seguir a trajetória dessas moedas. Mesmo que não o façamos, a simples possibilidade de o fazermos muda a física. Mesmo que pudéssemos marcar um elétron, pelo simples fato de se tratar um objeto quântico isto não seria possível já que um elétron é indistinguível de outro!

E isso simplifica enormemente o nosso estudo dos sistemas quânticos; não precisamos nos preocupar com elétrons grandes ou pequenos, velhos ou novos, leves ou pesados. Essa identidade absoluta é de certa maneira bem representada pelo princípio de exclusão de Pauli.

A teoria de grupos pode ser definida como um conjunto finito ou infinito de elementos que tem certa estrutura ou conjunto de

propriedades. Em física, geralmente esses elementos são identificados com mudanças ou transformações com propriedades bem definidas:

1. Quando ocorrer duas mudanças consecutivas em um conjunto de pontos ao final devem dar um resultado que poderia ser obtido por uma outra mudança única;

2. Se uma determinada ordem for obedecida, não importa como fazemos as mudanças;

3. Deve haver a possibilidade da não mudança;

4. É imprescindível haver a possibilidade de se reverter ou desfazer cada mudança para restaurar o estado original.

A teoria dos grupos e a teoria das representações de grupos são auxílios consideráveis no importante tópico de classificação de operadores, que tem interesse físico direto em mecânica quântica, onde observáveis físicos são descritos por operadores.

2.5.1 Simetrias e grupos em mecânica quântica

A ocorrência de degenerescências é resultado das simetrias de um sistema quântico. Pode-se demonstrar isso de forma simples considerando um sistema qualquer com um Hamiltoniano H e descrito por uma função de onda ψ .

$$H\psi = E\psi. \quad (4316)$$

Agora consideremos uma transformação de coordenadas qualquer que transforma ψ em ψ' , mas tal que $H' = H$, ou seja, H é invariante por essa transformação, H “possui essa simetria”. Então, como a energia E é um escalar podemos escrever da seguinte forma:

$$H'\psi' = E'\psi' \Rightarrow H\psi' = E\psi', \quad (4417)$$

o que nos mostra que ψ' e ψ são duas autofunções de H com a mesma energia E . A menos que tenhamos $\psi' = \alpha\psi$ (α uma constante), isso nos dará uma degenerescência dupla. Notemos que dizer que H é invariante sob essa transformação S é o mesmo que dizer que $[H, S] = 0$, e que podemos generalizar essa transformação para o caso de ser uma transformação não necessariamente de coordenadas. Mais formalmente, consideremos um hamiltoniano independente do tempo $H(r)$ e uma função de onda arbitrária $\psi(r)$. Qualquer grupo G define um conjunto de transformações induzidas $T(Ga)$ no espaço de funções de onda representadas pela equação:

$$\psi' = T(Ga)\psi(r) = \psi(G_a^{-1}r), \quad (45)$$

e define também o Hamiltoniano H transformado que é invariante sob essas transformações

$$H = T(Ga)HT^{-1}(Ga), \quad (46)$$

então dizemos que G é um grupo de simetria do hamiltoniano.

Multiplicando a última equação por $T(Ga)$ obtemos uma equação equivalente

$$[T(Ga).H] = 0. \quad (47)$$

As ideias básicas que levaram à formulação de uma teoria generalizada de gauge são devidas a Amalie Emmy Noether que mostrou que as simetrias das leis físicas eram de fundamental importância para a compreensão do Universo. Antes dela as simetrias eram vistas como coisas acidentais e se as teorias físicas apresentavam certas estruturas com simetrias (BASSALO, 1990), elas eram encaradas como sendo bonitas, simplesmente, sem que isso tivesse alguma importância fundamental. Noether (Noether, 1918) demonstrou, usando um formalismo variacional, o seu famoso Teorema:

“Para cada simetria na natureza há uma correspondente lei de
conservação
e para cada lei de conservação há uma simetria.”

O teorema de Noether relaciona simetrias às leis de conservação, considerando como um princípio fundamental da natureza, usando as teorias de gauge. De acordo com a “teoria de gauge” (MORIYASU. K, 1978), as transformações de gauge locais são feitas visando obter simetrias internas das partículas de tal modo que suas propriedades físicas permaneçam invariantes com as referidas transformações.

2.5.2 Spin, momento angular orbital e os grupos SU(2) e SO(3)

No estudo da mecânica quântica, atribui-se ao elétron um momento angular intrínseco além do momento angular orbital (SAKURAI, 1994). Esse momento angular intrínseco, ou spin, só veio a encontrar explicação apropriada na teoria quântica relativística de

campos através de Dirac. Assim como o momento angular orbital, uma medida de uma componente qualquer do spin altera inevitavelmente os valores das componentes previamente medidas, e é impossível medi-las simultaneamente com precisão arbitrária, pois os observáveis são incompatíveis. Mas, diferentemente do momento angular orbital, no qual as partículas podem se apresentar em diferentes estados orbitais, o spin é fixo. E assim como uma medida do quadrado do momento angular orbital L^2 , nos retorna um espectro discreto de valores:

$$l(l + 1)\hbar^2, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (48)$$

uma medida do quadrado do spin de uma partícula e pode apresentar um dos valores do espectro discreto:

$$s(s + 1)\hbar^2, \quad (49)$$

onde o s pode assumir valores semi-inteiros para férmions

$$s = 1/2, 1, 3/2, 2, \dots,$$

ou valores inteiros para bósons

$$s = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

com s fixo para a partícula ou um sistema de partículas. E, como uma medida de uma componente qualquer de \mathbf{L} (\mathbf{L}_z por convenção) sempre irá fornecer:

$$m_l\hbar, \quad m_l = -l, -l + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, l - 1, l \quad (50)$$

com um total de $(2l + 1)$ possibilidades, uma medida de uma componente qualquer de S (S_z por convenção) analogamente, sempre dá:

$$m_s\hbar, \quad m_s = -s, -s + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, s - 1, s \quad (51)$$

com um total de $(2s + 1)$ possibilidades.

O spin $\frac{1}{2}$, é o mais importante. Todas as partículas constituintes que consideramos atualmente como elementares, os léptons e os quarks possuem o mesmo spin $\frac{1}{2}$. Através do estudo de partículas de spin $\frac{1}{2}$ é possível estudar as propriedades de partículas com outros valores de spins.

2.5.3 Isospin e o grupo SU(2): simetrias de sabores

Pouco depois da descoberta do nêutron em 1932, Werner Heisenberg observou que essa partícula era quase idêntica ao próton. Com exceção das cargas diferentes e das massas aproximadamente iguais, elas pareciam idênticas e Heisenberg imaginou que se pudéssemos desligar a força eletromagnética elas se assemelhariam a dois estados diferentes de uma mesma partícula, que foi denominado núcleon, assim como dois elétrons com spins opostos, up e down. Heisenberg cunhou o termo isospin I para esse novo grau de liberdade e as propriedades matemáticas do isospin são idênticas às do spin.

Escrevamos um nucleon como um isoespino N :

$$N = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}, \quad (52)$$

os vetores da base de autoestados seriam:

$$p = |1/2, +1/2\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad n = |1/2, -1/2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Portanto, podemos representar o próton com um estado de isospin *up* e o nêutron como um estado de isospin *down*. O isospin, como Heisenberg o via, claramente nada tinha a ver com espaço e tempo, mas sim com relações entre diferentes partículas, não é um vetor no espaço tridimensional ordinário, mas sim em um espaço abstrato de isospin com componentes que podemos chamar de I_1 , I_2 e I_3 , chamado de espaço interno. Uma rotação de 180° no eixo I transformaria um próton em um nêutron, e vice-versa.

Heisenberg postulou que as forças nucleares fortes entre núcleons deviam ser invariantes sob rotações no espaço de isospin, assim como forças elétricas são invariantes sob rotações no espaço ordinário, e chegou à conclusão, segundo o teorema de Noether, que o isospin deve ser conservado em todas as interações fortes, assim como o momento angular é conservado em todas as outras interações.

Na linguagem de teoria de grupos, diríamos que as interações fortes são invariantes sob o grupo de simetria interna SU(2) e que os núcleons pertencem à representação bidimensional (fundamental, isospin $1/2$) desse grupo. Quem tiver interesse nesse assunto poderá

consultar outras referências, já que esta teoria vai além do nível proposto nesta dissertação.

Outras partículas poderiam ser assim, classificadas em multipletos de isospin desde que apresentassem um conjunto de propriedades impostas pela teoria o que levou a definir o isospin para o nucleon. O pión e delta são exemplos :

$$\begin{aligned} \pi^+ &= |1,1\rangle, & \pi^0 &= |1,0\rangle, & \pi^- &= |1,-1\rangle, \\ \Delta^{++} &= |3/2,3/2\rangle, & \Delta^+ &= |3/2,1/2\rangle, & \Delta^0 &= |3/2,-1/2\rangle. \end{aligned}$$

Nos anos cinquenta, a história se repetiria. Assim como em 1932, o próton e o nêutron pareciam formar um dubleto, parecia que as muitas partículas que estavam sendo detectadas nos aceleradores formavam multipletos e presumia-se que elas pertenceriam à mesma representação de algum grupo de simetria mais amplo, no qual SU(2) deveria ser um subgrupo.

Em 1960, o físico Murray Gell-Mann, propôs uma classificação que foi considerada a primeira tentativa bem sucedida de evidenciar a conexão básica existente entre partículas de diferentes famílias. O caminho óctuplo (eightfold way) proposto por Gell-Mann (GRIFFITHS, 1987) foi a resposta para essas questões afirmando que esse grupo seria o grupo SU(3), e sugeriu que as partículas poderiam ser agrupadas em famílias com três, oito ou dez lugares. Todas as partículas dentro de uma família tinham spin e número bariônico iguais e todas tinham aproximadamente a mesma massa. Essas famílias são conhecidas matematicamente como tripletos, octetos e decupletos.

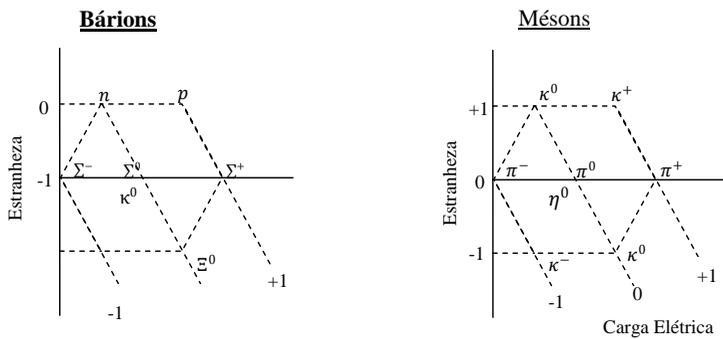
Muitas partículas que estavam sendo detectadas nos aceleradores (MOREIRA,2011; ROSENFELD, 2003) e formavam multipletos presumindo-se que elas pertenceriam à mesma representação de algum grupo de simetria mais amplo, no qual SU(2) deveria ser um subgrupo.

Com a descoberta de novas partículas no final dos anos 50, percebeu-se que algumas partículas muito massivas, e foi proposto que em sua estrutura possuíam um novo tipo de quark, chamado quark *s*, com um novo número quântico que devia ser conservado nas interações

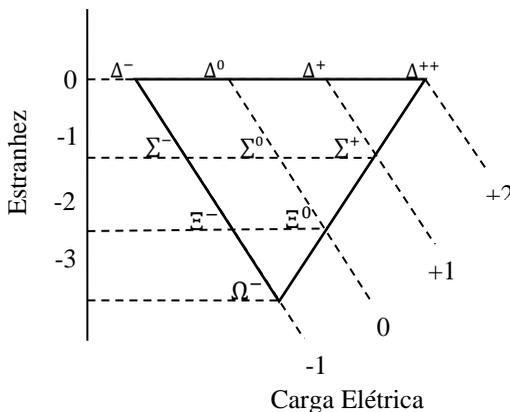
fortes, chamado estranheza S .

Os bárions e mésons conhecidos até meados de 1961 (ROSENFELD, 2003) se encaixavam perfeitamente em uma família de oito lugares. De fato faltava um méson, denominado eta, que foi descoberto depois.

A figura representa os grupos de oito mésons e bárions em termos de sua carga elétrica e estranheza.

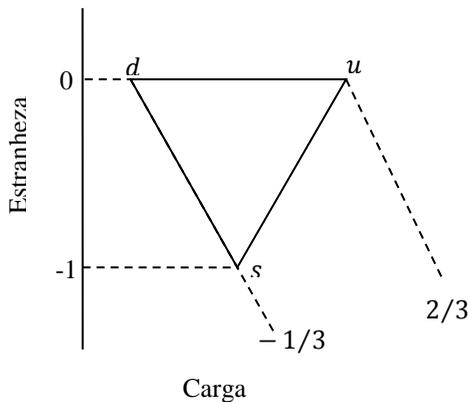


Depois de 1962 (ROSENFELD, 2003) foram descobertos novos bárions que foram acomodados em famílias de dez lugares.



Faltava ainda interpretar quais eram as partículas que se encaixavam nas famílias de três lugares, os tripletos.

Os físicos Murray Gell-Mann, Yuval Ne'eman e George Zweig, de maneira independente, interpretaram que os bárions poderiam ser construídos de partículas pertencentes ao triplete, porém deveriam possuir carga fracionária. Prevaleceu o nome das partículas sugerida por Gell-Mann, quark, e esta era a resposta para essas questões afirmando que esse grupo, pertencia ao grupo $SU(3)$, tendo os quarks up (u), down (d) e strange (s) como a representação fundamental formando um triplete.



2.5.4 Grupo $SU(3)$: Simetria de Cor

Em 1964, Oscar W. Greenberg, Moo-young Han e Yoichiro Nambu (L'ANNUNZIATA, 2007) propuseram independentemente uma ideia que viria a dar mais suporte ao modelo dos quarks; o conceito de “cor”, que pode ser vista como análogo a carga elétrica nas interações eletromagnéticas. Segundo Greenberg, todo quark deveria possuir apenas um dos três tipos possíveis de cor: “verde”, “azul” e “vermelho”, cada antiquark possuindo uma das correspondentes anticores, e todo hádron sendo um estado ligado “incolor” de quarks, onde incolor significa um quark com uma determinada cor ligado a um antiquark qualquer, mas possuindo a correspondente anticor com o objetivo da cor

total ser nula, ou um estado ligado de três quarks, cada um com uma cor diferente.

O grupo de cor $SU(3)$ corresponde a uma simetria local cujo processo de transformação em uma teoria de gauge dá origem a teoria cromodinâmica quântica. A carga elétrica é um parâmetro do grupo de simetria local $U(1)$ que é transformada em um parâmetro de gauge e dá origem a teoria eletrodinâmica quântica chamada de QCD, quantum chromodynamics.

Na cromodinâmica quântica há duas de simetrias $SU(3)$ diferentes: a que age em diferentes cores de quarks, que é uma simetria de gauge exata mediada por glúons, e há também a simetria entre diferentes sabores de quarks, que transforma sabores de quarks uns nos outros, ou simetria $SU(3)$ de sabor. A simetria $SU(3)$ de sabores é uma simetria aproximada do vácuo da teoria eletrodinâmica quântica, e portanto não assume o posto de simetria fundamental. É uma consequência acidental da pequena massa dos três quarks mais leves (up, down e strange).

No vácuo da teoria cromodinâmica quântica existem condensados de todos os quarks cujas massas são menores que a escala da teoria cromodinâmica quântica. Isso inclui os quarks up e down, e em uma medida menor o quark strange, porém nenhum dos outros mais pesados. O vácuo é simétrico sob uma transformação $SU(2)$ de isospin entre os quarks up e down, em grau menor também entre rotações entre os sabores up, down e strange, ou grupo completo $SU(3)$ sabor, e as partículas observadas compõe multipletos $SU(3)$.

2.6 DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Diagramas de Feynman são formas gráficas que simbolizam regras matemáticas para representar interações de partículas em uma colisão.

Feynman criou um conjunto de regras que permitem calcular a amplitude de probabilidade da ocorrência de um determinado processos físicos sem ter que lidar com os operadores de campo ou de criação e aniquilação. Essa amplitude é calculada tendo em conta todas as

contribuições dos diferentes diagramas para determinados estados iniciais e finais desses sistemas. Com a amplitude de espalhamento em mãos, podemos calcular a seção de choque deste processo e desse modo saber a probabilidade desse processo ocorrer em um experimento.

Para isso, vamos primeiramente supor que uma teoria de campos interagente pode ser descrita pelo seguinte hamiltoniano:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{int}, \quad (53)$$

onde \hat{H}_0 contém os termos cinéticos do hamiltoniano e \hat{H}_{int} os termos de interação.

A amplitude de probabilidade para que o estado $|i\rangle$ se transforme no estado $|f\rangle$ é dada pela equação:

$$\langle f|i(t_i)\rangle = \langle f|e^{-iH(t_f-t_i)}|i\rangle. \quad (54)$$

A matriz S é um operador evolução temporal $e^{-iH(t_f-t_i)}$ no limite $(t_f - t_i) \rightarrow \infty$. Neste limite, a amplitude de probabilidade é chamada amplitude de espalhamento :

$$S_{fi} = \langle f|S|i\rangle = \lim_{(t_f-t_i)\rightarrow\infty} \langle f|e^{-iH(t_f-t_i)}\rangle. \quad (55)$$

Aplicando as regras aos diferentes diagramas podemos calcular a amplitude de Feynman associada ao diagrama \mathcal{M}_{if} . Assim, calculamos a amplitude de espalhamento a partir da matriz S de espalhamento:

$$S_{fi} = \delta_{fi} + \left[(2\pi)^4 \delta^4 \left(\sum_i^n p_i^\mu - \sum_j^m k_j^\mu \right) \right] iT_{fi}, \quad (56)$$

onde p_i^μ e k_j^μ são os quadrimomentos dos estados iniciais e finais respectivamente, ou seja, os momentos que são representados pelas linhas externas. O delta de Kronecker δ_{fi} apresenta o caso em que o sistema permanece no mesmo estado inicial.

A amplitude de Feynman, \mathcal{M}_{if} é dada por:

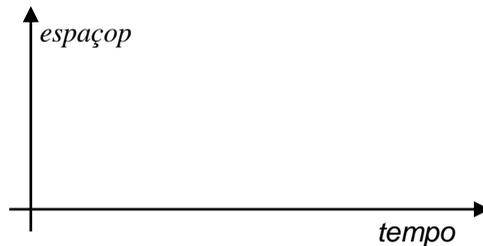
$$\mathcal{M}_{if} = \sum_{n=1}^{\infty} \mathcal{M}_{fi}^{(n)} \quad (57)$$

As amplitudes $\mathcal{M}_{fi}^{(n)}$ estão associadas a todos os diagramas de Feynman que são topologicamente diferentes e conexos, que contém n vértices.

2.6.1 Elementos de um diagrama

Basicamente os elementos do diagrama são compostos por:

1. Um sistema de eixos representando o espaço-tempo:



2. As partículas, como elétrons e antipartículas, como pósitrons, são representadas por linhas com setas indicando a direção de deslocamento no tempo, com a particularidade tendo as suas setas invertidas no caso de antipartículas.

→ *Partícula*

← *Antipartículas*

→
tempo

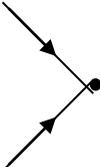
3. As partículas virtuais, partículas que trocam força, são partículas internas nos diagramas. Como exemplo temos representadas por linhas onduladas o fóton e pontilhadas como o méson Pi.

γ
~~~~~ *Fóton*

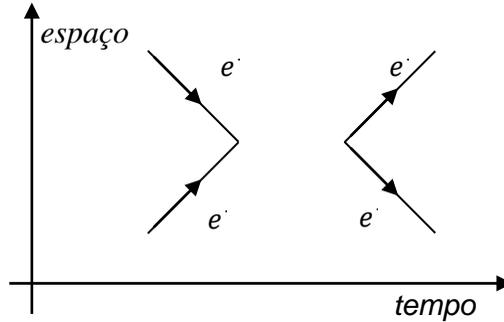
-----  $\pi$  ----- *Méson Pi*

4. Os vértices são os pontos em que a interação acontece, onde uma partícula é acoplada com outra sendo sujeita à interação correspondente. O número de vértices indica o ordem  $n$  dos diagramas, ou seja a que potência a constante de acoplamento será elevada.

• *Vértice*



5. Apenas as linhas que entram ou saem do diagrama representam partículas observáveis. As partículas são orientadas no sentido crescente no eixo do tempo e as antipartículas no sentido decrescente.



Na próxima seção detalharemos uma interação eletromagnética como exemplo.

## 2.6.2 Diagramas de Feynman na eletrodinâmica quântica

Nesta seção indicaremos um conjunto completo de regras de Feynman para a QED (Eletrodinâmica Quântica, ou seja, o estudo de processos eletrodinâmicos em termos de uma teoria de campos quantizados). O procedimento básico para estudar um processo físico é dado a seguir.

1. Para num dado processo desenhar todos os diagramas topologicamente distintos.
2. Antiférmions que entram no diagrama um fator  $\bar{v}(p, s)$ , e para os que saem do diagrama um fator  $v(p, s)$ , onde  $v(p, s)$  é um espinor de Dirac representando um antiférmion.
3. Férmions que entram no diagrama um fator  $u(p, s)$ , e para os que saem do diagrama um fator  $\bar{u}(p, s)$ , onde  $u(p, s)$  é um espinor de Dirac representando um férmion.

4. Para cada fóton no estado inicial o vetor polarização  $\varepsilon_\mu(k)$  e no estado final  $\varepsilon_\mu^*(k)$ .

5. Nas linhas internas existem os propagadores. Cada uma delas contribui com um fator:

$$\text{f}{\acute{e}}rmions \text{ e antif}{\acute{e}}rmions: \frac{i(\gamma^\mu q_\mu + mc)}{q^2 - (mc)^2} \quad (58)$$

$$\text{f}{\acute{o}}tons: \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2}. \quad (59)$$

6. Cada v{e}rtice contribui com um fator  $ie\gamma^\mu$ , onde  $e = \sqrt{4\pi\alpha}$  {e} a constante de acoplamento da intera}{c}{\~{a}o eletromagn{e}tica e  $\gamma^\mu$  {e} uma matriz de Dirac, onde  $\alpha = \frac{1}{137}$ , {e} a constante de estrutura fina.

7. Integrar sobre os momentos internos: Para cada momento interno  $q$  temos o fator  $\int \frac{d^4q}{(2\pi)^4}$ .

8. Cancelar a fun}{c}{\~{a}o Delta remanescente. No resultado final restar{a} um fator

$$(2\pi)^4 \delta(p_1 + p_2 + \dots - p_n)$$

que corresponde {a} conserva}{c}{\~{a}o do momento e da energia do processo.

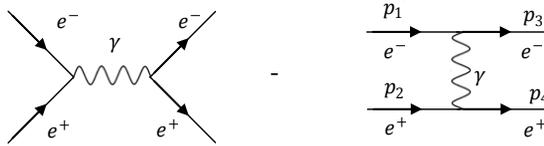
9. O resultado da aplica}{c}{\~{a}o das regras anteriores nos fornece  $-i\mathcal{M}$ .

10. Caso o processo seja representado por mais de um diagrama, a amplitude total  $\mathcal{M}$  corresponder{a} {a} soma das amplitudes individuais dos diagramas.

11. Se dois diagramas de um mesmo processo diferem por uma permuta}{c}{\~{a}o de f{e}rmions, ent{a}o as amplitudes desses diagramas em quest{a}o devem ser subtra{e}das. Este processo {e} devido a antissimetria.

### 2.6.3 Colisão elástica entre elétron e pósitron

A figura abaixo mostra o exemplo de um processo, onde temos dois diagramas e há um sinal de diferença entre eles.



Como temos dois diagramas a amplitude total corresponderá à soma das amplitudes individuais,

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2, \quad (60)$$

onde

$$\mathcal{M}_1 = -\frac{e^2}{s} \bar{v}(p_2) \gamma^\mu u(p_1) \bar{u}(p_3) \gamma_\mu v(p_4) \quad (6118)$$

e

$$\mathcal{M}_2 = -\frac{e^2}{t} \bar{u}(p_3) \gamma^\mu u(p_1) \bar{v}(p_2) \gamma_\mu v(p_4). \quad (62)$$

As variáveis  $s$  e  $t$  são calculadas por:

$$s = (p_1 + p_2)^2 \quad (63)$$

e

$$t = (p_3 - p_4)^2. \quad (6419)$$

Onde  $p_i$  são os quadrimomentos das partículas externas dos processos (Duas partículas iniciais e duas finais).

Aprendemos que a mecânica quântica nos diz que os objetos tomam todos os caminhos entre um estado observado inicial e um estado observado final. Assim, se  $\hat{e}$  vê uma partícula no ponto A foi observada, a probabilidade de aparecer no ponto B é dada pela soma das amplitudes de probabilidade para cada caminho intermediário entre os pontos A e B.

Finalmente, ressaltamos que os processos de espalhamento têm extrema importância para a física de partículas elementares, já que ele é a base para entender processos mais complexos.

É claro que apresentemos aqui processos bem simples, mas essas ideias podem ser generalizadas para sistemas mais complexos como aqueles que pares  $q\bar{q}$  são produzidos e fenômenos de hadronização (criação de hádrons) ocorrem.

## 2.7 A LAGRANGIANA DO MODELO PADRÃO

Todo conhecimento visto até agora pode ser reunido num conjunto de teorias matemáticas, com o objetivo de descrever as interações entre as partículas elementares observadas por meio das forças fraca, forte e eletromagnética. O modelo se mostra consistente, pois as evidências experimentais têm se mostrado sempre de acordo com a mecânica quântica e com a relatividade especial e é considerada uma excelente teoria para descrever as interações da natureza. Mas existem problemas, como por exemplo, o fato de não incorporar a teoria da gravitação, descrita pela relatividade geral, e a física da matéria ou da energia escura, além de não descrever alguns fenômenos, como a oscilação dos neutrinos.

A Lagrangiana do modelo padrão é formada pelas somas individuais de Lagrangianas que representam diversas partículas e suas interações. As partículas que fazem parte do modelo são seis quarks, três léptons carregados, três neutrinos associados mais as antipartículas correspondentes que são representados por  $\psi$  e  $\bar{\psi}$ . Fazem parte ainda

quatro bósons mediadores da interação eletrofraca, representados por  $W$  e  $B$  e os glúons que são representados por  $G$ .

O modelo padrão é formado por uma Lagrangiana composta de quatro partes. A seguir iremos descrever cada parte da Lagrangeana

A primeira parte,

$$-\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}, \quad (65)$$

representa a energia cinética carregada pelos bósons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $\gamma$  e  $g$  informando como esses bósons interagem uns com os outros.

A segunda parte,

$$\bar{\psi}_j \gamma^\mu (i\partial_\mu - g\tau_j \cdot W_\mu - g'Y_j B_\mu - g_s \mathbb{T}_j \cdot \mathbb{G}_\mu) \psi_j, \quad (66)$$

representa os férmions interagem por meio dos bósons mediadores em  $W$ ,  $B$  e  $G$ . As matrizes hermitianas  $2 \times 2$  com traço nulo  $W$ ,  $B$  contém os bósons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  e  $\gamma$ , enquanto que as matrizes hermitianas  $3 \times 3$  com traço nulo  $G$  contém os glúons  $g$ . Enfim, o primeiro termo da equação (66) representa a energia cinética carregada pelos férmions massivos.

A terceira parte,

$$|D_\mu \phi|^2 + \mu^2 |\phi|^2 - \lambda |\phi|^4, \quad (67)$$

descreve a energia cinética, a massa e a auto-interação dos bósons de Higgs.

A quarta parte,

$$-(y_j \bar{\psi}_{jL} \phi \psi_{jR} + y'_j \bar{\psi}_{jL} \phi_c \psi_{jR} + \text{conjugado}), \quad (68)$$

descreve como estes bósons interagem com a matéria, férmion  $\psi$ , gerando massa.

Reunindo todas as partes, a Lagrangeana do modelo padrão pode ser escrita na forma:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{MP} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} & (6920) \\ & +\bar{\psi}_j\gamma^\mu(i\partial_\mu - g\tau_j\cdot W_u - g'Y_jB_u - g_s\mathbb{T}_j\cdot\mathbb{G}_u)\psi_j \\ & +|D_\mu\phi|^2 + \mu^2|\phi|^2 - \lambda|\phi|^4 \\ & -(y_j\bar{\psi}_{jL}\phi\psi_{jR} + y'_j\bar{\psi}_{jL}\phi_C\psi_{jR} + \text{conjugado}). \end{aligned}$$

## 2.8 O TRIUNFO FINAL OU APENAS O COMEÇO?

A construção do modelo padrão tem se mostrado eficiente até agora no que diz respeito às teorias e evidências experimentais. Mas isso não quer dizer que chegou ao fim. O modelo explica tudo muito bem até os níveis de energias que conseguimos acessar. Mas há algumas coisas para as quais não fornece respostas satisfatórias.

Ele não explica, por exemplo, a matéria escura. Na verdade, o modelo fornece respostas para apenas 4% da composição do Universo conhecido e nada diz sobre a origem de seus 23% de matéria escura e 73% de energia escura. Também não dá conta da assimetria entre a quantidade de matéria e antimatéria observada no Universo. Acredita-se que no Big Bang havia a mesma quantidade de matéria e antimatéria, mas, é sabido que atualmente que o universo é composto predominantemente por matéria.

Outro problema é a gravidade. Como podemos observar não faz parte do modelo padrão, e este fato incomoda ainda muitos físicos, no seu modo de formulação ela não é uma teoria renormalizável e assim não se encaixa na construção do modelo. Além disso, não existe nenhuma evidência experimental para o bóson da interação, o gráviton.

O modelo padrão é uma teoria física que está em construção. Apesar de ser uma teoria excelente não tenha o caráter definitivo, a teoria mais completa produzida pelo homem sobre a constituição do universo, mas com certeza é provisória e não há dúvidas que outras

teorias serão criadas e complementarão, podendo até chegar a substituir o modelo atual.

A física de partículas é fascinante por isso, não chegou ao fim e a busca por respostas provavelmente continuarão enquanto houver a humanidade.



### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 ORGANIZAÇÃO DA APRENDIZAGEM**

As medidas para atingir a aprendizagem são contínuas e ocorrem em todas as atividades do ser humano e, portanto também dentro das escolas. As medidas estão presentes no cotidiano dos indivíduos e conduzem o indivíduo na aquisição de conhecimentos desde o início de sua vida. Existem diferenças na aquisição de conhecimento que ocorre em espaços formais de ensino, como na escola, e ainda hoje são objetos de pesquisa e discussões relacionadas à prática pedagógica. A escola como espaço formal segue regras, apoiadas em leis, e tem como seu maior objetivo humanizar o conhecimento.

Podemos recorrer à história e constatar que desde as sociedades antigas até as contemporâneas, a educação é um processo de mediação organizado. Este processo recebe o nome de educação escolar, na qual suas ações têm propósitos bem definidos. Assim todos os conteúdos escolares acumulados pela humanidade são a base dos elementos integrantes para organizar o conhecimento de maneira formal nas escolas.

No ensino das disciplinas científicas, como a física, existem diversas pesquisas que objetivam identificar possíveis problemas e construir propostas que possam representar alternativas.

Vários autores defendem que o planejamento pedagógico e a pesquisa de ações educativas são ferramentas importantíssimas nesse processo e seu desenvolvimento possui uma intenção particular do docente, que podem ser frutos de suas próprias experiências e influenciam sobre sua prática pedagógica.

Diante desta perspectiva é inevitável se questionar: por que o ser humano, em especial as crianças, devem aprender? Por que e o que se deve ensinar? O que justifica a obrigatoriedade de crianças na escola? Na construção das respostas que podem justificar as questões, destaco duas, a primeira é que o conhecimento acumulado pela humanidade é um patrimônio intelectual, mas todos têm direito de acessar este conhecimento; a segunda é de que, para haver um equilíbrio social é

necessário que todos os cidadãos tenham acesso ao conhecimento, assim existe uma possibilidade que todos tenham condições de equilíbrio na sociedade não gerando diferenças absurdas na sociedade em relação ao conhecimento.

Historicamente, o processo educativo é consolidado na perspectiva do que Engels no século XIX já criticava, mostrando que a transmissão do conhecimento na escola caminhava na perspectiva de técnicas de produção, restringindo o aprendizado à reprodução destas técnicas. Isso de certa forma é contrário os objetivos da educação científica baseados nos documentos oficiais.

De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN):

“Com esta compreensão, o aprendizado deve contribuir não só para o conhecimento técnico, mas também para uma cultura mais ampla, desenvolvendo meios para a interpretação de fatos naturais, a compreensão de procedimentos e equipamentos do cotidiano social e profissional, assim como para a articulação de uma visão do mundo natural e social. Deve propiciar a construção de compreensão dinâmica da nossa vivência material, de convívio harmônico com o mundo da informação, de entendimento histórico da vida social e produtiva, de percepção evolutiva da vida, do planeta e do cosmos, enfim, um aprendizado com caráter prático e crítico e uma participação no romance da cultura científica, ingrediente essencial da aventura humana (PCN, 2004, p. 7).”

No mesmo texto do PCN, há um reconhecimento de vários problemas do processo educacional, onde afirma logo após a consideração anterior, que:

“Uma concepção assim ambiciosa do aprendizado científico-tecnológico no Ensino Médio, diferente daquela hoje praticada na maioria de nossas escolas, não é uma utopia e pode ser efetivamente posta em prática no ensino da Biologia, da Física, da Química e da

Matemática, e das tecnologias correlatas a essas ciências (PCN, 2004, p. 7).”

Dessa forma se faz necessário adotar um conjunto de medidas e referenciais teóricos que dizem respeito ao plano que orienta as decisões do professor, de sua concepção de educação, aprendizagem, da forma de planejar e no conhecimento que deve ser trabalhado. As propostas e ações a serem tomadas devem estabelecer objetivos educacionais do tema a ser tratado, as estratégias e atividades de avaliação, representando as responsabilidades do professor e seus objetivos de forma clara e mais completa possível. A importância das estratégias se deve ao fato de que o processo de planejamento visa promover a mudança nas estratégias docentes da prática pedagógica cotidiana. As medidas que visam transformar o ensino devem ser feitas a partir de referências na busca de intencionalidades, percebendo que a ação pedagógica deve estar sustentada por pressupostos teóricos e cada vez são mais frequentes propostas de ações e atividades que possam caracterizar alternativas aos procedimentos geralmente utilizados em sala de aula.

Assim com o auxílio das teorias de aprendizagem, podemos buscar ferramentas de apoio e através delas refletir o ensino da física, dando enfoque na perspectiva das dificuldades apresentadas pelos estudantes na compreensão dessa ciência.

Esta revisão tem como objetivo utilizar referenciais pedagógicos que possam subsidiar atividades de ensino alternativas. Assim, o próximo tópico se destina a apresentar os referenciais que foram seguidos durante a construção do material e da sequência didática utilizada em sala de aula.

### **3.2 A TEORIA SOCIAL DA APRENDIZAGEM DE VYGOTSKY**

Vygotsky nasceu, na Bielo-Rússia, em 1896. Depois de receber aulas particulares de Solomon Ashpiz, frequentou e trabalhou no Instituto de Psicologia de Moscou, entre 1923 e 1934, onde teve oportunidade de desenvolver as suas teorias sobre o desenvolvimento cognitivo e a relação entre o pensamento e a linguagem. Viria a morrer, aos 38 anos, de tuberculose. Deixou uma obra vasta, composta por seis volumes escrita ao longo de uma carreira curta de apenas dez anos.

Vygotsky defende que a criança aprende melhor quando é confrontada com tarefas que impliquem um desafio cognitivo não muito discrepante, ou seja, que se situem naquilo a que o psicólogo soviético chama de zona de desenvolvimento próximo.

Esta teoria tem implicações importantes no processo de instrução: o professor deve proporcionar aos alunos a oportunidade de aumentarem as suas competências e conhecimento, partindo daquilo que eles já sabem, levando-os a interagir com outros alunos em processos de aprendizagem cooperativa.

Vygotsky enfatiza a ligação entre as pessoas e o contexto cultural em que vivem e são educadas. De acordo com ele, as pessoas usam instrumentos que vão buscar a cultura onde estão imersas e entre esses instrumentos tem lugar de destaque a linguagem, a qual é usada como mediação entre o sujeito e o ambiente social. A internalização dessas competências e instrumentos conduz à aquisição de competências de pensamento mais desenvolvidas, constituindo o cerne do processo de desenvolvimento cognitivo.

Driver et al. (1999) destacam que, “[...] o conhecimento e o entendimento, inclusive o entendimento científico, são construídos quando os indivíduos se engajam socialmente em conversações e atividades sobre problemas e tarefas comuns[...]”. Concluem, portanto, que a tarefa de conferir significado ocorre em processo dialógico no qual os indivíduos, além de serem introduzidos em uma cultura, vão se apropriando das ferramentas culturais quando se envolvem nas atividades dessa cultura.

Na escola pública nos dias de hoje trabalhamos com dezenas de alunos, então é necessário entendermos os processos de aprendizagem no plano social da sala de aula e nesse sentido torna-se importante as contribuições de Vygotsky e dos desdobramentos de suas ideias no campo da educação científica.

Carvalho (2013) destaca dois temas importantes que Vygotsky desenvolveu em seus trabalhos. O primeiro foi mostrar que as mais elevadas funções mentais do indivíduo emergem de processos sociais. O segundo foi a demonstração que os processos sociais e psicológicos humanos se firmam através de ferramentas ou artefatos culturais, que

negociam a interação entre os indivíduos e entre esses e o mundo físico. O entendimento desses temas é relevante para escola e para a relação entre alunos e professores na sala de aula. A interação social na escola enumera como o ambiente é modificado e como a comunicação entre professores e alunos ocorre mediante essa interação.

Ghedin (2012, p. 150) coloca que uma das questões fundamentais do sociointeracionismo para o Ensino de Ciências é a relevância atribuída à linguagem como mediadora do conhecimento. O aprendiz se comunica carregando seus valores, culturas e os próprios conteúdos trabalhados em sala de aula.

A zona de desenvolvimento proximal (ZDP) é um conceito importante trazido por Vygotsky. A ZDP é entendida como a distância entre o nível de desenvolvimento real e o nível de desenvolvimento proximal do indivíduo, sendo uma ferramenta para evidenciar o papel do professor com seus alunos. O desenvolvimento real diz respeito ao que o indivíduo já consolidou e que o torna capaz de resolver situações de forma autônoma com os seus conhecimentos, já o desenvolvimento proximal é aquele que o indivíduo consegue resolver com a ajuda de um “outro mais capaz”, que pode ser um adulto ou até mesmo seus companheiros.

Promover os trabalhos em grupos nas salas de aula é oferecer meios ou condições para que exista outra dimensão e importância na aprendizagem. A ideia da ZDP é tornar mais acessível o conhecimento e oferecer aos alunos mais conforto ao trabalharem com esse tipo de atividade. Para Carvalho (2013), os alunos se encontram dentro da mesma zona de desenvolvimento real e, portanto, é muitas vezes mais fácil o entendimento entre eles do que entender o professor.

A ideia central trazida por Vygotsky é usar a mediação. Para Vygotsky a mediação é um processo característico da relação do homem com o mundo e com outros homens, e a mediação ocorre através de signos. Portanto os signos são os instrumentos que operacionalizam a mediação, e o mediador terá um papel fundamental na formação de um conceito utilizando signos.

Shoerder, Ferrari e Maestrelli (2009) destacam que a linguagem falada é o sistema de signos mais utilizado pelo ser humano. Conforme

estes autores, Vygotsky considera que os signos não devem ser apenas apropriados, mas sim, internalizado, com condições de entendimento próprio. O signo palavra é importante somente por mediar as interações discursivas, para Vigotsky (1996, apud CREPALDE e AGUIAR JR, 2013) afirma que a palavra não serve apenas para compreendermos os outros, mas também compreender a si mesmo.

Não é de se esperar que a verbalização do aluno seja suficiente ou que produzirá um resultado satisfatório tanto para o aluno como para o professor. Além da interação com os outros e o mundo é necessário utilizamos outra ferramenta, o conceito.

A formação de conceitos em sala de aula é um processo dinâmico que envolve os alunos em apropriação de novos modos de falar e pensar o mundo. Compreender e interpretar uma nova palavra necessita de um diálogo baseado na confrontação e interpretação. Este diálogo irá resultar em novos signos na consciência.

Máximo e Abib (2012), considerando os estudos de Vygotsky, afirmam que um conceito científico sofre uma evolução, o primeiro contato do aprendiz com o conceito é o começo dessa formação. Para que esse processo de evolução continue, novos problemas devem surgir e conflitar o conceito anterior, então uma nova situação deve ser resolvida com a formação de um novo conceito e assim sucessivamente.

Portanto a proposta de atividades investigativas propostas na sala de aula em grupos devem propiciar aos alunos o sentido de troca conjunta de símbolos, significados, experiências, oposição e outras experiências que oportunizem as vivências de diferenças e não a simples soma de experiências (CARVALHO, 2013; MARTINS, 1997).

### **3.3 A IMPORTÂNCIA DA TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA**

O papel principal da escola é compartilhar o conhecimento produzido intelectual e cultural pela humanidade. Todavia, este saber somente é reconhecido e validado pela comunidade científica e difere do saber escolar.

Segundo Chevallard (1991 apud SENA, 2007) o conhecimento produzido pelos cientistas matemáticos não chega aos alunos exatamente como foi elaborado.

Primeiramente, o cientista divulga o resultado dos seus trabalhos de pesquisa entre seus pares por meio de artigos em periódicos, conferências ou teses. Neste período, o conhecimento produzido sofre as mudanças iniciais para se adaptar as normas impostas pela comunidade científica ou pelas editoras de revistas. Quando o conhecimento já foi compartilhado no meio científico e se torna relevante, determinadas frações do conhecimento são selecionadas para compor os currículos e programas escolares.

Esta escolha é determinada por critérios e interesses específicos, como que tipo de sociedade que se quer formar. Então os conhecimentos selecionados serão transpostos para um programa escolar. Estes conhecimentos irão passar por uma textualização, devendo haver modificações e possíveis adaptações no conhecimento científico para que o mesmo seja compreensível pelos estudantes. Cabe aos autores de livros didáticos e especialistas a responsabilidade pelas modificações as quais irão diferir do conhecimento original feito pelos cientistas. Para Sena (2007), os cientistas e autores de livros didáticos exercem papéis diferentes, mas relevantes na estruturação das instituições de ensino.

A instituição escolar é responsável por socializar a cultura e o saber estabelecido. Contudo, a escola não apresenta este saber em seu formato e estrutura original. Ainda para Sena (2007) a linguagem científica que causa limitações no entendimento dos alunos e, portanto, o saber apresentaria barreiras de ordem conceitual e epistemológica.

Assim, na escola não há produção de saber científico e tampouco estudos dos textos originais, mas uma adaptação do conhecimento científico o que não significa uma mera simplificação deste. Portanto, a teoria da transposição didática proposta por Yves Chevallard é um excelente instrumento para a leitura e análise do processo transformador do saber científico em saber escolar.

Yves Chevallard (1991, p.39 apud LEITE, 2004, p. 45) define transposição didática como sendo:

“Um conteúdo de saber que tenha sido definido como saber a ensinar sofre, a partir

de então, um conjunto de transformações adaptativas que irão torná-lo apto a ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O ‘trabalho’ que faz de um objeto de saber a ensinar, um objeto de ensino, é chamado de transposição didática.”

Chevallard (1985, apud AGRANIONIH, 2001) apresenta e diferencia dois tipos de transposição: *stricto sensu* e *lato sensu*. A primeira ocorre no espaço interno da escola, especificamente na sala de aula em que professor, aluno e o saber a ser ensinado estão inter-relacionados. Essa transposição acontece na passagem do saber formal a uma versão didática deste objeto de saber. Segundo Chevallard, a transposição focada apenas nessa passagem não é conveniente. É necessário considerá-la em um sentido mais amplo, o da transposição didática lato sensu, esta envolve uma análise do objeto de saber desde que é produzido na academia até ser selecionado como objeto a ensinar e tornado objeto de ensino. Para a ocorrência deste processo transformador deve existir então um ponto de partida ou de referência.

Na transposição didática o saber sábio assume este papel. A partir da transposição tem-se o saber a ensinar e por último o saber ensinado. Estes grupos, de cientistas e intelectuais junto a autores e editores de livros didáticos e por fim os professores, interagem, coexistem e se influenciam em conjunto com a sociedade na perspectiva da elaboração de currículos e planejamento de ensino.

O saber sábio ao ser transposto para o ambiente escolar transforma-se em outro tipo de saber, o saber a ensinar. A técnica de transposição do saber sábio em saber a ensinar recebe o nome de transposição externa. É este saber que é caracterizado como objeto de ensino-aprendizagem no ambiente escolar e que aparece nos materiais instrucionais como os livros didáticos. Como o saber sábio segue regras previamente estabelecidas para ser legitimado pela comunidade científica, o saber a ensinar também tem condicionantes no contexto educacional.

Tomando como base os trabalhos de Chevallard e Johsua, Astolfi (1997 apud ALVES FILHO, 2000a, p.182), estabeleceram algumas diretrizes que nortearam estas transformações. Estas diretrizes foram geradas com o objetivo de proporcionar uma análise dos

diferentes saberes. Um conjunto de regras define e auxilia a compreender a proposta:

“Regra 1 - Modernizar o saber escolar.

A modernização faz-se necessária, pois o desenvolvimento e o crescimento da produção científica são intensos. Novas teorias, modelos e interpretações científicas e tecnológicas forçam a inclusão desses novos conhecimentos nos programas de formação (graduação) de futuros profissionais.

Regra 2 - Atualizar o saber a ensinar.

Saberes ou conhecimentos específicos, que de certa forma já se vulgarizaram ou banalizaram, podem ser descartados, abrindo espaço para introdução do novo, justificando a modernização dos currículos.

Regra 3 - Articular saber velho com saber novo.

A introdução de objetos de saber novos ocorre melhor se articulados com os antigos. O novo se apresenta como que esclarecendo melhor o conteúdo antigo, e o antigo hipotecando validade ao novo.

Regra 4 - Transformar um saber em exercícios e problemas.

O saber sábio, cuja formatação permite uma gama maior de exercícios, é aquele que, certamente, terá preferência frente a conteúdos menos operacionalizáveis. Esta talvez seja a regra mais importante, pois está diretamente relacionada com o processo de avaliação e controle da aprendizagem.

Regra 5 - Tornar um conceito mais compreensível.

Conceitos e definições construídos no processo de produção de novos saberes elaborados, muitas vezes, com grau de complexidade significativo, necessitam sofrer

uma transformação para que seu aprendizado seja facilitado no contexto escolar.”

A Teoria da Transposição Didática consta em um instrumento de análise que possibilita investigar as transformações sofridas pelo saber. Nesse sentido, procura agir e criar até torna-se objeto de ensino. Desprezar a transposição didática é conceber que os conteúdos científicos contidos nos livros textos são uma cópia fiel da produção científica.

Cabe ao professor consciente a transposição didática, desenvolver métodos para um ensino mais contextualizado, menos fragmentado criando um ambiente criativo, reflexivo e integrador.

### **3.4 CONTRUÇÃO DE UMA SEQUENCIA DIDÁTICA**

O termo sequência didática vem sendo empregado para nomear uma sequência contínua de fatos que apresentam certa unidade, ou que se reproduzem com certa regularidade que divide o ensino de determinado conteúdo em etapas encadeadas, que juntas compõe uma melhor forma de construção do conhecimento. Esta técnica é muito utilizada no ensino de gêneros textuais. Estes textos recebem este nome devido às diferentes formas de linguagem empregadas nos textos. Estas formas podem ser mais formais ou mais informais, e até se mesclarem em um mesmo texto. Contudo, podem-se realizar trabalhos com sequências didáticas em outras áreas do conhecimento como a física em geral.

Uma sequência didática geralmente é estruturada em quatro etapas principais:

- Apresentação da situação: Apresentação aos alunos de um cronograma contendo as atividades que serão desenvolvidas durante a sequência;
- Produção inicial: seu principal objetivo é fazer um levantamento dos conhecimentos prévios do aluno a respeito do conteúdo que será iniciado. Este levantamento irá orientar e adaptar a sequência dos módulos seguintes para aprimorar os pontos fracos dos alunos em tópicos específicos do conteúdo;

- Módulos: O professor irá construir o módulo didático utilizando recursos didáticos variados que possam contribuir para o processo de aprendizagem do aluno, baseando-se nos resultados obtidos na produção inicial.
- Produção final: será uma atividade que, de certo modo, averiguará se os métodos utilizados durante os módulos foram eficientes. Poderá, inclusive, servir como método de avaliação da aprendizagem do aluno e da própria sequência didática.

A construção de uma sequência didática é um maneira de organizar os conteúdos a serem trabalhados seguindo uma ordem que pode ser cronológica ou lógica. Dessa forma os objetivos do módulo didático tornam-se mais claros e isso favorece a construção de caminhos para se atingir as metas propostas.

### **3.5 ABORDAGEM INVESTIGATIVA PARA CONSTRUIR A SEQUÊNCIA DIDÁTICA: O ENSINO DE CIÊNCIAS POR INVESTIGAÇÃO**

Não há consenso na literatura sobre um marco histórico do surgimento de propostas investigativas de ensino. A ideia teria surgido no século XIX e nos Estados Unidos sob influência das ideias do filósofo Dewey. Entretanto, mesmo quase sendo difundido pela América do Norte e Europa, sendo uma abordagem consolidada e importante no ensino de ciências, aqui no Brasil o ensino por investigação é menos reconhecido e pouco discutido, mas aos poucos vem ganhando a atenção de pesquisadores e professores.

O currículo escolar até a segunda metade do século XIX, seja na Europa ou na América do Norte, tinha ênfase no que se chamava de clássico, no qual o destaque era para o estudo da matemática e gramática. Mas a ciência despontava como uma disciplina importante para a formação dos indivíduos, pois ela se diferenciava por oferecer uma prática lógico-indutiva, ou seja, desenvolvimento dos princípios gerais a partir de observações empíricas. Neste século, as atividades de laboratório ganharam espaço no ensino de ciências, sendo defendida pelo cientista e filósofo positivista, do século XIX, Herbert Spencer. Spencer defendia a ideia que as atividades de laboratório forneciam

informações claras e precisas sobre a natureza que não se encontravam nos livros.

De 1869 a 1895, o químico Charles Eliot, presidente da Universidade de Harvard, incentivou e defendeu a necessidade de se ensinar ciência com o uso do laboratório, argumentando que o uso de laboratório nas aulas de química poderia desenvolver habilidades de pensamento que incluem: comparação, discriminação e indução.

Na primeira metade do século XX, a educação científica tinha objetivos definidos nos valores sociais, então somente na segunda metade do século XX, o ensino por investigação ganha força com forte influência do educador Joseph Schwab. Com o surgimento do movimento progressista no final do século XX, surge uma proposta que defendia o ensino centrado na vida, na atividade que alia a teoria à prática, tornando o aluno proativo no processo de aprendizagem. Esse movimento está relacionando com as ideias de Vygotsky que defendia os elementos sociais na aprendizagem, enfatizando a importância das interações socioculturais para a aprendizagem.

Com a mudança nos meios de produção, a crescente urbanização, industrialização, imigração e a necessidade de se implantar saúde pública, no início do século XX a educação científica é direcionada para os valores sociais. O filósofo e pedagogo americano John Dewey (1859-1952) torna-se um referencial das ideias progressistas na educação científica e surge como a pessoa influente na abordagem do ensino de ciência por investigação. A teoria de educação de Dewey teve como objetivo restaurar o equilíbrio entre a educação implícita e não formal recebida diretamente da vida, e a educação direta e expressa das escolas, integrando a aprendizagem obtida através de um exercício específico a escola, com a aprendizagem diretamente absorvida nas experiências sociais. Em seu livro *Democracia e educação*, Dewey confere aos educadores a responsabilidade de utilizar a ciência para modificar atitudes e hábitos de pensamento pouco adequados ao projeto de construção da sociedade democrática.

A ideia central de Dewey que o fator determinante na educação científica é a experiência, isto não pode ser interpretado somente com aulas práticas, mas deve ser relacionada com a vida cotidiana em que as experiências são realizadas e vivenciadas no dia a dia. Para Dewey,

experiência e aprendizagem estão conectadas pois a experiência se adquire a partir de um conjunto de vivências. Assim, quando a experiência educativa é refletida, a construção do conhecimento será seu resultado natural, portanto, a experiência dá significado à vida.

Por volta da segunda metade do século XX, houve um incentivo para a graduação de professores de ciências e um crescente número de cientistas e engenheiros foram motivados a realizar pesquisas industriais. Mas também surgiu um movimento contrário na educação que argumentava que o ensino de ciências tinha perdido o seu rigor acadêmico. Ele, o ensino de ciências, estava demasiadamente centrado no aluno, destacando os aspectos sociais e que era necessário maior rigor acadêmico para o desenvolvimento intelectual dos alunos.

Na década de 40 com o fim da segunda guerra mundial, surgiu o advento da guerra fria e começa uma corrida em busca de tecnologias e teve um marco importante o lançamento do primeiro satélite russo, o Sputnik I, em 4 de Outubro de 1957. Este evento levou os Estados Unidos a questionarem a qualidade da educação científica e, conseqüentemente, dos currículos desenvolvidos nas escolas.

No caso da física, um programa de renovação de ensino de Física no ensino médio, *Physical Science Study Commitee* (PSSC) foi lançado como um programa revolucionário e teve seu início em 1956 nos Estados Unidos e tinha o objetivo de mudar radicalmente o ensino de física naquele país.

Este programa reformulou os currículos de ciências para que os alunos pudessem pensar como um cientista. Havendo também ênfase em processos considerados científicos, como habilidades individuais na observação, classificação, inferência, controle de variáveis, entre outras.

O programa, PSSC, acabou tendo grande reflexo no Brasil na década de 1960. Houve uma tradução desse documento para o português e sua inclusão curricular nos projetos nacionais de ensino de Física. Nesta época no Brasil a referência de material didático eram livros textos, muito pobres com pouca ênfase ao aspecto a atividade experimental, mesmo sendo considerada importante. A reforma educacional da segunda metade do século XX preocupou-se em mostrar a relação entre os conteúdos e métodos da forma mais rigorosa, mas

admitia que isso pudesse tanto ser feito através de um ensino baseado em investigação como através do ensino tradicional.

Na década de 1970, o ensino de ciências foi reformulado, houve uma ruptura, o foco era dar atenção aos aspectos sociais relativos ao desenvolvimento científico e tecnológico. O ensino por investigação passou a ser utilizado como orientação, para ajudar os estudantes a pesquisar problemas sociais como o aquecimento global, a poluição, entre outros.

No final dos anos 1970 e início dos anos 1980, a americana National Science Foundation (NSF) financiou um projeto a fim de fazer um raio-X na educação dos Estados Unidos, o objetivo era analisar qual era o papel e a situação na qual se encontrava a educação científica. Esse projeto, intitulado *Project Synthesis*, revelou que o termo investigação tinha várias conotações. Entre pesquisadores da educação científica utilizavam o termo “investigação” de diversas formas. O termo investigação era utilizado tanto se referindo a investigação como conteúdo, quanto como técnica de instrução, não sendo claro o significado do termo. Os pesquisadores ainda apontaram que os professores apresentavam muitas dificuldades, semelhantes às apresentadas por professores brasileiros, em se trabalhar o ensino de ciências no sentido de uma investigação, apesar de a maioria ter uma atitude positiva quanto a essa abordagem no ensino dos conteúdos.

Em 1989 o documento *Project 2061 - Science For All Americans* (AAAS) foi uma tentativa de explicitar de forma homogênea sobre o que os estudantes deveriam saber para não serem analfabetos científicos. Da mesma forma outra entidade, a National Research Council (NRC) contribuiu com a definição de alfabetização científica através da publicação do *National Science Education Standards* (NRC, 1996). O resultado final deste documento apontou que existia uma centralidade do ensino por investigação nos Estados Unidos.

Em 2000, um documento foi elaborado para orientar professores “*Investigação e os Parâmetros Curriculares Nacionais de Ciências: Um Guia para Ensino e Aprendizagem*”. Todas as pesquisas realizadas nestes países apontaram uma consolidação em fazer uma abordagem do ensino por investigação principalmente nos Estados Unidos e até mesmo na Europa.

### **3.6 A CONSTRUÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA INVESTIGATIVA**

Com certeza o ensino de física é muito mais do que fórmulas físicas ou cálculos matemáticos. Ao estudar ciências, precisamos fazer com que o aluno crie um senso crítico da sua realidade à medida que o pensamento e a prática científica são introduzidos no plano social da sala de aula. O ensino de física que tem como objetivo a formação de cidadãos capazes de reflexão e ação na sociedade contemporânea, e isto requer uma revisão do conceito de ciência como um conjunto de verdades absolutas, concepção ainda dominante na sala de aula e nos livros didáticos.

Muitos pesquisadores, além de contribuírem para identificar as concepções alternativas, subsidiaram propostas para lidar com elas criando várias estratégias e metodologias de ensino. Na literatura, encontramos muitos trabalhos de pesquisa sobre o ensino de ciências mostrando que os estudantes aprendem melhor quando participam de atividades baseadas em investigação (CARVALHO e TEIXEIRA, 1985); (MUNFORD e LIMA, 1996); (AZEVEDO, 2006); (ZÔMPERO e LABURÚ, 2011); (CARVALHO, 2013); (CARVALHO, 2006).

Peduzzi e Peduzzi (1985) sugerem que um método de ensino eficiente é aquele que promove a evolução conceitual dos estudantes, criando situações nas quais eles percebam que suas concepções alternativas são insuficientes para resolver ou alcançar os resultados corretos dos problemas apresentados. Nessa perspectiva, os alunos são obrigados a recorrer às novas concepções, que são as ideias cientificamente aceitas e a evoluir suas próprias concepções. Zylbersztajn (1983) chegou à mesma conclusão, defende a ideia que um bom método de ensino é aquele que coloca os alunos frente a situações nas quais suas concepções alternativas são incapazes de explicar o fenômeno ou de resolver o problema. Em seu trabalho, o autor sugere a seguinte sequência de etapas a serem desenvolvidas durante as atividades:

- “1- Criar uma situação que induza os alunos a invocarem suas concepções a fim de interpretá-las.
- 2- Encorajá-los a descreverem verbalmente e através de figuras as suas ideias.

- 3- Ajudá-los a enunciarem de modo claro e conciso as suas ideias.
- 4- Encorajar o debate sobre os prós e contras de diferentes interpretações dos alunos.
- 5- Criar um conflito cognitivo entre as concepções iniciais apresentadas pelos alunos e algum fenômeno que não possa ser explicado pelas mesmas.
- 6- Apoiar a busca de uma solução e encorajar sinais de uma acomodação de ideias.
- 7- Encorajar a elaboração da nova concepção quando esta for proposta.”

As sequências de ensino investigativas (SEIs) são um método de ensino criado por Carvalho (2013). Em sua pesquisa a autora aposta na investigação como uma oportunidade dos alunos confrontarem suas concepções alternativas com os resultados obtidos através de um processo de investigação que não necessariamente tem que ser experimental. Neste método de ensino são propostas uma série de situações problemas/questões que o grupo de alunos têm que resolver. O método oferece meios para que os alunos levantem e testem hipóteses e, ao final do processo ocorra a evolução das concepções dos alunos. O papel do professor é ao final da interação construir junto aos alunos a conscientização de como e por que do resultado alcançado.

A elaboração de processos de ensino-aprendizagem é fundamental para o sucesso deste método. O método requer uma mudança profunda nos papéis assumidos pelo professor (transmissor) e pelo aluno (receptor), até a utilização de novos métodos que possibilitem, ao aluno, construir seu próprio conhecimento tendo o professor como mediador do processo (WILSEK e TOSIN, 2012).

Criar SEIs é um processo de inovação, é a mudança de foco na dinâmica da aula, o professor deve abandonar o papel de monólogo, onde exerce a mera transmissão de conteúdo, para tornar os alunos os protagonistas, fazer com que os alunos participem da aula repassando parte da responsabilidade do processo de ensino. O professor, ao assumir este papel, passa a promover debates e acompanhar as discussões, a cada pergunta efetuada por aluno deve responder e provocar com novas questões, questionando e conduzindo o processo de ensino. É nas hipóteses e nas discussões que ocorre a construção do conceito científico contrapondo as ideias que os estudantes têm (concepções alternativas) com as teorias científicas.

Este método de ensino tem por objetivo também à aculturação científica, alavancando os alunos a construir o conceito sendo parte integrante do processo de construção. Além do mais se cria oportunidades de aprenderem a argumentar e exercitar a razão, em vez de fornece-lhes seus próprios pontos de vista transmitindo uma visão fechada das ciências (CARVALHO, 2006, p. 3).

Quando se utiliza a investigação científica no ensino de física, acredita-se que o aluno tenha potencial para aprender os conteúdos através de atividades de ensino que nascem de uma necessidade de aprender desencadeada por situações-problema que os possibilita a agirem como solucionadores de problemas, assim como os cientistas buscavam soluções para os problemas. Para que isto ocorra é necessário definir ações, escolher os dados e fazer uso de ferramentas que sejam adequadas para a solução da situação posta.

Wilsek e Tosin (2012) afirmam que o aluno é conduzido a aprender a resolver e resolver para aprender, isto implica que o aluno deve se mobilizar para solucionar um problema. É a partir dessa necessidade, que ele começa a produzir seu conhecimento por meio da interação entre pensar, sentir e fazer. Criar atividades investigativas para a construção de conceitos é uma forma de oferecer ao aluno a participação em seu processo de aprendizagem (AZEVEDO, 2006); (WILSEK e TOSIN, 2012).

Este trabalho de mestrado tem como objetivo propor criação de uma SEI. Baseado neste método de ensino proponho a construção de um livreto abordando toda evolução do conceito de partículas e interações. A SEI irá fornecer subsídios e oferecer ferramentas para desenvolver uma estratégia de ensino/aprendizagem que contribuirá para a evolução conceitual dos estudantes aproximando suas concepções das ideias aceitas cientificamente.

### **3.7 O PROFESSOR COMO PESQUISADOR NA PRODUÇÃO DO MATERIAL DIDÁTICO**

A produção de um material didático se apresenta como um instrumento importante no processo de aprendizagem, pois parte de uma situação problema parte do professor em dinamizar e facilitar o ensino e aprendizagem de conteúdos e conceitos em sala de aula, além de “emancipar” o professor, deixando de ser um “mero consumidor” para ser produtor de conhecimento.

Para Castellar (1999, p. 52) o professor deve se apropriar de suas experiências e de seu conhecimento para investir em sua emancipação e seu desenvolvimento profissional deixando de ser um mero expectador para virar principal sujeito da ação na aprendizagem.

A produção de material didático em si não impossibilita uma aula extremamente conteudista, pois não é o material que diz como será organizado uma aula, mas sim o conhecimento teórico, didático e metodológico do professor bem como sua ideologia docente.

Outro aspecto importante na produção de material didático pelo professor é a apropriação, e muitas vezes o aprendizado, de aspectos pedagógicos inerentes a sua profissão, visto que a pedagogia com a qual temos contato no dia a dia escolar é uma extensa citação e leitura de clássicos da pedagogia, na maioria das vezes sem ligação com o contexto real da escola. Assim, ao produzir materiais didáticos o professor se vê obrigado a ir além do discurso pedagógico e pensar a educação, se aproximando ao fazer-pensar (KIMURA, 2010).

A produção de materiais didáticos pelos professores também pode ser uma política pública, num incentivo à pesquisa e preparo de materiais didáticos no período destinado a atividades extraclasse – 1/3 da jornada do magistério público da escola básica definidos na Lei nº 11.738 de 16 de julho de 2008 -, desde que não seja similar as demais políticas públicas voltadas para a educação, que ao contrário de criar possibilidades engessam o trabalho do professor sendo mais uma obrigação burocrática, mais relatórios, mais respostas a dar às secretarias de educação.

As Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCN+Médio) trazem essa discussão ao colocar a escola como espaço de formação docente, sem negar a necessidade de cursos de capacitação fora da escola, eles colocam que:

“A participação do professor no projeto educativo da escola assim como seu relacionamento extraclasse com alunos e com a comunidade, são exemplos de um trabalho formativo essencial [...]” bem como “[...]A pesquisa pedagógica, que na formação inicial é vista, em geral, de forma predominantemente acadêmica e quase sempre dissociada da prática, pode na escola ser deflagrada e conduzida a partir de problemas reais de aprendizado [...](SEMTEC, 2002, pg. 241,).”

Considero que a produção de materiais didáticos por professores pode contribuir em sua formação continuada, sobretudo se tal produção não for individual, mas inserida nos espaços de discussão e formação coletivos nas escolas.



## 4. MÉTODOS

### 4.1 USANDO A INVESTIGAÇÃO NAS AULAS DE FÍSICA

O ensino de ciências por investigação no Brasil tem sido nos últimos anos objeto de muitos estudos e análises por parte de pesquisadores no Brasil (AZEVEDO, 2004; SÁ et al, 2007; MUNFORD e LIMA, 2007; RODRIGUES e BORGES, 2008; PENHA, CARVALHO e VIANNA, 2009; ZÔMPERO e LABURÚ, 2011; CARVALHO,2013).

No ensino por investigação os alunos são desafiados por problemas propostos, devem lançar hipóteses, colher e analisar dados, comunicar seus resultados e conclusões obtidas, sempre com a atuação conjunta do professor (AZEVEDO, 2004; MUNFORD e LIMA, 2007). Para isso é necessário que o aluno se sinta motivado e que entenda a necessidade de ruptura da aula clássica, devendo haver mudança de postura do aluno e, também do professor, nessa perspectiva de ensino. De acordo com Souza e Sasseron (2012) os alunos e professores devem ter outra postura no desenvolvimento de aulas sob a perspectiva investigativa, pois a sala de aula é um ambiente dinâmico no que se refere às interações entre alunos e seus pares; alunos e professores e os objetos de aprendizagem.

Portanto o aluno deve ser o “protagonista da construção de sua aprendizagem” (BRASIL, 1998, p. 40), as funções do professor assumem novos significados no processo de ensino e aprendizagem. Na perspectiva do ensino por investigação, os papéis do professor e aluno em sala de aula mudam radicalmente, o aluno, conforme Carvalho (2004), uma tábua rasa, vazia, que será preenchida à medida que o professor, detentor do conhecimento, enche essa tábua (aluno) vazia. Sasseron e Carvalho (2011) defendem que o ensino de ciências deve ser visto como um processo de “enculturação científica” dos alunos, expressão que designa que o objetivo do ensino de ciências deve aspirar à formação cidadã dos estudantes para o domínio e uso dos conhecimentos científicos e suas utilidades nas mais diferentes esferas da sua vida.

Sá et al (2007), buscando entender qual o conjunto de características que são necessárias para que uma atividade possa ser

considerada investigativa, observam que um ponto central para início desse tipo de atividade é a criação de situações-problemas. Consideram outras características também importantes: valorização do debate e argumentação, obtenção e avaliação de evidências, aplicação e avaliação de teorias científicas e, por fim, deve permitir múltiplas interpretações.

## **4.2 A ESCOLA E OS SUJEITOS PARTICIPANTES**

### **4.2.1 A Escola**

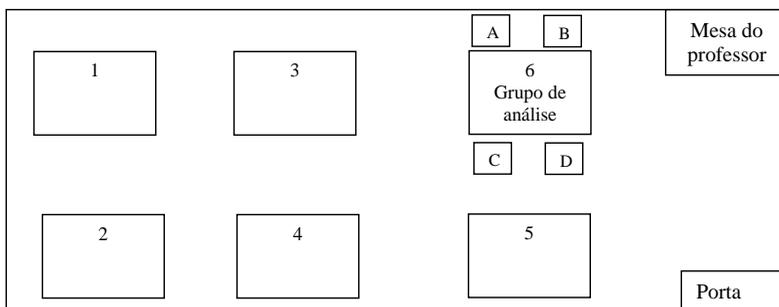
A Escola Estadual de Ensino Básico Carmem Seara Leite, localizado no município de Garuva, SC, funciona com aulas nos turnos matutino, vespertino e noturno. Na escola estão matriculados em torno de 1200 alunos. Sua estrutura pode ser classificada como precária, não oferece laboratórios e auditório. A quadra poliesportiva se encontra em céu aberto em péssimas condições e o laboratório de informática por sua vez está desatualizado com máquinas antigas, o prédio encontra-se em condições medianas e necessita de reparos. A sequência didática foi desenvolvida com os alunos da terceira série do ensino médio dessa escola onde ministrou as aulas. A instituição da rede pública estadual é a única da cidade absorvendo todos os alunos das escolas municipais.

### **4.2.2 Sujeitos Participantes**

Nesta escola tenho uma carga horária de 38 aulas dadas, sendo distribuída em todas as séries. A turma escolhida foi do 3º ano turma 1, com 36 alunos matriculados. Esta turma possui duas aulas semanais e as atividades do produto pedagógico começaram a ser desenvolvidas na primeira quinzena do mês de agosto de 2016, onde seriam aplicadas durante o 3º bimestre distribuídas em 20 aulas. A escolha da turma foi aleatória não privilegiando turmas com maior potencial ou desqualificando as outras turmas. A maioria dos alunos é de origem humilde. Seus pais trabalham no comércio, em bananeiras e na plantação de palmitos. Existem poucas indústrias na cidade. A renda média de cada família gira em torno de 2,5 salários mínimos e a maioria dos pais não possui o ensino médio.

### 4.2.3 Organização das atividades

As atividades foram desenvolvidas dentro e fora da sala de aula organizada em grupos aleatórios. Por motivos de ordem técnica foram gravadas apenas a discussão de um grupo, no caso o grupo 6 representados pelos alunos A, B, C e D:



Na primeira aula foram entregues os livretos e foi dado início às atividades. Com o objetivo de acelerar o tempo de estudo, as tarefas posteriores da primeira aula deveriam ser realizadas pelos grupos, lendo, discutindo as atividades propostas como tarefa extraclasse. Na aula seguinte eram discutidas as tarefas e combinadas as tarefas a serem discutidas para a próxima aula. O objetivo dessa dinâmica era analisar a discussão das concepções dos alunos e não o tempo na execução da mesma.

### 4.3 A SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Esta sequência foi pensada a partir de um problema clássico, mas até agora não discutido no ensino médio, a estabilidade nuclear. A sequência então foi construída com o objetivo do aluno experimentar e construir soluções para este problema.

Para isso foi criado um livreto (Apêndice C) oferecendo aos alunos a oportunidade de expor suas ideias e ao mesmo tempo a finalidade de analisar as falas e as produções escritas dos estudantes.

Nesta proposta o papel do professor era fazer a mediação dando suporte aos mesmos para que eles emitissem suas opiniões e pensamentos a respeito do tema.

O problema inicial foi a discussão da estabilidade nuclear sem que os alunos tivessem contato algum com conceitos de física moderna como relatividade e mecânica quântica. Então foi necessário acrescentar tópicos relevantes à sequência que pudessem oferecer aos alunos suporte teórico para que a sequência pudesse ser desenvolvida. No primeiro momento foi pensado que não havia possibilidade de construir, por exemplo, o conceito de partícula real e virtual sem que fosse trabalhado antes o princípio da incerteza.

Assim a unidade 1 se estendeu um pouco mais em relação às outras unidades devido a esta necessidade. No próximo capítulo será descrita a sequência, sua aplicação e o discurso dos alunos.

## **5 ANÁLISE E DISCUSSÕES**

### **5.1 ANÁLISE DO PROCESSO DA CONSTRUÇÃO DE CONCEITOS CIENTÍFICOS, ATITUDES E PROCEDIMENTOS.**

Neste capítulo relatamos as aulas que foram transcritas na ordem em que aconteceram o desenrolar de cada atividade investigativa proposta, buscando analisar o processo de construção dos conceitos que envolvem o modelo padrão junto aos alunos. Tentamos analisar quais foram os procedimentos e atitudes potencializados e os obstáculos que surgiram durante a realização da atividade.

Devido ao pequeno tempo pedagógico da escola pública optamos pelos alunos sempre tentarem desenvolver as atividades em casa para posteriormente serem discutidas por algum tempo no grupo e depois abrir a discussão para todos.

A descrição das aulas foi dividida por unidades e capítulos seguidos das atividades propostas.

Para organizar a descrição das aulas, foi criada uma tabela onde é relatada aula a aula com o objetivo de mostrar como a sequência foi desenvolvida, a divisão da aula, os objetivos propostos, a descrição, o diálogo e possíveis obstáculos enfrentados.

## 5.2 DESCRIÇÃO DE AULA POR AULA

| Unidade 1 - Bagunça Dinâmica |           | Capítulo 1: Forças e campos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 1                       | Objetivo  | Discutir a estabilidade nuclear.<br>Construir o conceito de mais uma força para explicar a estabilidade.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                              | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                              | Descrição | - No primeiro momento os alunos formaram os grupos Expliquei que eu faria uma intervenção com eles, onde iríamos abordar a relação entre campo e força. Explanei para os alunos que as aulas seriam gravadas em áudio para posteriormente serem analisadas.<br><br>-Os alunos desenvolveram as atividades 1 e 2.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                              | Diálogo   | <i>Aluno C:– “Professor como vou saber o número de prótons e de elétrons desses átomos?”</i><br><i>Professor – “Não lembra do significado de número atômico, aquele Z lá do primeiro ano de química?”</i><br><i>Aluno C: “– Professor, nem tivemos química no primeiro ano, o professor primeiro fez greve e depois só passava doente.”</i><br><i>Professor – “Mais alguém está com dificuldades nessa tarefa?”</i><br><i>Professor – “Então como os prótons ficam dentro do núcleo?”</i><br><i>Aluno A:– “Pela questão anterior supõe que exista uma força, mas que força é esta?”</i><br><i>Aluno B:– “Eletromagnética.”</i><br><i>Professor – “Concordam com o colega?”</i><br><i>Aluno A:– “Não, se fosse eletromagnética os prótons iriam se repelir.”</i><br><i>Professor – “Concordo contigo.”</i><br><i>Aluno A:– “Mas que força é?”</i><br><i>Professor – “Mais adiante veremos. O essencial dessa atividade era perceber que deve existir outro tipo de força.”</i> |

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Obstáculos  | Parece que os alunos realmente não tiveram aula de química em relação a distribuição eletrônica e o reconhecimento da simbologia e significado de número atômico e o número de massa. Então propus uma revisão deste conteúdo. Foi um obstáculo contornável, mas exigiu um tempo pedagógico. Com esse acréscimo de tempo não houve tempo para discutir as outras atividades para esta aula.                                                       |
|  | Observações | Após a explicação retornei ao problema da atividade proposta envolvendo a distribuição dos átomos de hidrogênio e do hélio. Não houve problemas nesta atividade. A discussão que teve maior obstáculo, o que era esperado foi a quinta pergunta, de como os prótons não se repelem no núcleo. A tarefa proposta sobre a estabilidade não encaminhava para uma resposta final mas sim para que o aluno percebesse a necessidade de mais uma força. |

| Unidade 1 - Bagunça Dinâmica |           | Capítulo 2- Princípio da Incerteza                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 2                       | Objetivo  | Discutir a dualidade onda-partícula da matéria.<br>Inserir o conceito da Princípio da incerteza.<br>Interpretar a relação de incerteza entre energia e tempo.                                                                                                                                                                            |
|                              | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                              | Descrição | Esta aula foi realizada na sala de informática. O simulador utilizado foi desenvolvido nas aulas de Física Computacional ofertado durante o mestrado. Este simulador tinha como objetivo que o aluno alterasse o $k$ da onda e localizando a onda em determinado instante. Cada grupo ocupou uma máquina para desenvolver as atividades. |
|                              | Diálogo   | <b>Aluno A:</b> –“Como pode o elétron ser onda e partícula ao mesmo tempo?”<br><b>Aluno B:</b> – “Ele não é ao mesmo tempo! Ou é um ou é outro.”<br><b>Professor:</b> –“O fato é confuso mesmo. Mas a                                                                                                                                    |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>natureza nos revela surpresas!</p> <p>Aluno C: –“Agora entendi porque você falou naquela experiência das borrachinhas, que as borrachinhas poderiam ser campos ou partículas.”</p> <p>Aluno D:–“Mas os campos então podem ser partículas?”</p> <p>Professor: –“ A TQC fala justamente isso aí! Os campos são formados por partículas.</p> <p>Aluno A: –“Saqui agora professor. As partículas e Campos são a mesma coisa.”</p> <p>Aluno D: – “Quase a mesma coisa, elas tem propriedades diferentes...”</p> <p>Professor: –“Tipo...”</p> <p>Aluno D: – “Umas formam a matéria e as outras fazem a interação.”</p> <p>Professor: –“Todas formam a matéria! Elas são classificadas de acordo com sua função.”</p> <p>Professor: –“Através deste simulador qual a conclusão que vocês chegaram em relação ao <math>k</math>?”</p> <p>Aluno A: –“Se o <math>k</math> da onda aumenta o elétron fica localizado e não espalhado.”</p> <p>Aluno B: – “Quantos <math>k</math> podem ser somados?”</p> <p>Professor: –“Quantos você quiser! O fato é que quanto maior for o <math>k</math> mais precisão você tem da localização da elétron.”</p> <p>Professor: –“Alguma dúvida sobre o papel do <math>k</math> na onda e sobre a localização de uma partícula? Agora preciso que me respondam qual é o problema da localização da partícula e da velocidade?”</p> <p>Aluno A: –“É o tal princípio da incerteza. Diz que acertei professor!”</p> <p>Professor: –“Direi que acertou se me explicar...”</p> <p>Aluno A: – “Fala que não é possível observar a partícula e a velocidade ao mesmo tempo. E agora, acertei?”</p> <p>Professor: –“Observar ou medir?”</p> <p>Aluno A: – “Deixa eu ver aqui... é medir né!”</p> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |            | <p><b>Professor:</b> –“E isto significa o que?”</p> <p><b>Aluno A:</b> – “Se consigo medir a velocidade não consigo medir a posição!”</p> <p><b>Professor:</b> –“Só faltou a palavra precisão, não temos precisão na medida, mas o resto está correto. Mas e a energia, tem alguma relação de incerteza?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“Acho que tem a ver com a incerteza da energia e o tempo de uma partícula ...”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Sim se tivermos certeza da quantidade de energia não teremos certeza do tempo e vice-versa.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Mas qual é o problema de ter incerteza no tempo de uma partícula?”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“ Não sei o tempo dela...”</p> <p><b>Professor:</b> –“Tempo de que?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“O tempo que ela percorre alguma distância?.”</p> <p><b>Professor:</b>–“Pode ser. Mas quem sabe se definíssemos este tempo com tempo de existência? Faz sentido?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“Acho que sim.</p> <p><b>Professor:</b>–“Qual o significado do delta t grande?</p> <p><b>Aluno B:</b> – “o tempo de vida é maior?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Sim.”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Mas e a energia, qual o significado?”</p> <p><b>Aluno B:</b>–“Deve estar relacionado com a sua existência!”</p> <p><b>Aluno C:</b> – “Existência! O que tem haver energia com existência?”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “O que você precisa fazer todo dia meio dia para sobreviver?”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “Comer!”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Então, para você sobreviver precisa de energia que esta nos alimentos, a partícula também!</p> <p><b>Professor:</b>– “ E da onde vem esta energia?”</p> |
|  | Obstáculos | A atividade proposta deu aos alunos o primeiro                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|                                     |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                     |             | contato com o princípio da incerteza. Nestas discussões fica claro que o professor toma a iniciativa de discussão julgando o que é importante às vezes limitando o que os alunos pensam. Muitas das questões levantadas ficaram sem respostas dos alunos e merecem mais atenção.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                     | Comentários | Quando coloquei a questão para os alunos da relação de incerteza da energia e do tempo não esperava que chegassem a uma conclusão científica, mas esperava algum comentário na tentativa de desencadear um processo dialógico na sala de aula. É importante reconhecer que um conceito tão abstrato como o princípio da incerteza não se assimila rápido, muito menos em uma aula. Quem sabe se explorasse este conceito de outra forma poderia ser mais acessível aos alunos. Porém era necessário este tópico para o prosseguimento do conteúdo. |
| <b>Unidade 1 - Bagunça Dinâmica</b> |             | <b>Capítulo 3 – Matéria x Antimatéria</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Aula 3</b>                       | Objetivo    | Construir os primeiros conceitos de antimatéria.<br>Diferenciar matéria e antimatéria.<br>Relacionar a atividade experimental com o conhecimento matemático para construir um modelo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                     | Duração     | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                     | Descrição   | Na primeira parte da aula foram revisadas as trajetórias de partículas ao passarem por um campo magnético.<br>Na segunda parte foi introduzida a ideia de energia negativa e sua interpretação.<br>Na parte final foi discutida a como modelos científicos tem uma interdependência entre o modelo matemático e o experimento para a validação de uma teoria.                                                                                                                                                                                      |
|                                     | Diálogo     | <b>Professor:</b> –“Alguma problema nas trajetórias das tarefas?”<br><b>Aluno B:</b> –“No terceiro exemplo, são duas partículas ou uma?”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p><b>Professor:</b> –“Este exemplo é uma novidade. Mas gostaria de saber, as partículas tem diferença de massa?”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“Não.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Qual a diferença entre elas?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“A carga.”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “Sim, uma é positiva e a outra negativa.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Mas existem partículas com a mesma massa é cargas?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Poderia ser um próton e um elétron?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Não, lembre que prótons tem mais massa que o elétrons.”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“No texto diz que uma antipartícula.”</p> <p><b>Professor:</b> –“E o que é uma antipartícula segundo o texto?”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“Achei bem confuso, mas entendi que é uma partícula bem parecida com o elétron, só tem energia negativa.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Só energia negativa? Não tem mais nada diferente? O que as trajetórias dizem sobre as cargas?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“É verdade, uma é positiva e a outra negativa.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Mas o que é energia negativa? Alguém saberia me explicar?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Eu entendi que lá quando vai tirar a raiz, tipo lá do “báscara” tem um sinal positivo e outro negativo, o sinal positivo dá tudo certo, mas o negativo é complicado.”</p> <p><b>Professor:</b> –“O que é complicado?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Sei lá, não é estranho falar em energia negativa? É uma energia que se perde?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Não tem como se perder energia! Lembra que o professor falava lá que nada se perde tudo se transforma!”</p> <p><b>Professor:</b> –“Eu concordo com a colega. É uma novidade para vocês. A energia negativa foi um</p> |
|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | <p>conceito difícil de interpretar e quem sabe até hoje. Mas a física apontou para algumas ideias baseadas em duas coisas. Alguém saberia me dizer o que são estas coisas?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Poderia ser a matemática?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Falta mais um?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Seria o experimento?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Um tem a validade sem o outro?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Entendi, a matemática não vale nada sem o experimento!”</p> <p><b>Professor:</b> –“Não é bem assim, ela é tão importante como o experimento!”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“Qual é o mais importante?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Os dois são importantes. É que hoje em dia as teorias matemáticas conseguem prever muitos eventos de partículas, mas só terão validade se forem confirmados experimentalmente!”</p> |
|  | Obstáculos  | <p>O conceito de energia negativa é difícil. Tentar construir o conceito a partir da equação relativística não pareceu ser uma estratégia adequada, mas tentamos reproduzir como os cientistas da época encontraram e resolveram o problema.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|  | Comentários | <p>Discutir com alunos sobre energia negativa foi interessante, apesar de ser um assunto complexo, notei que os alunos se esforçam para encontrar uma resposta.</p> <p>Em relação à discussão entre experimento e matemática, foi bem produtivo, acredito que os alunos perceberam a ligação que existe entre os dois.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

| Unidade 1 - Bagunça Dinâmica |           | Capítulo 4- Matéria x Radiação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 4                       | Objetivo  | Diferenciar os conceitos de matéria e radiação.<br>Introduzir novas unidades de medida de energia e momento.<br>Construir o conceito de quantum de energia.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                              | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                              | Descrição | Na primeira parte da aula foi discutida a diferença dos conceitos de matéria e radiação utilizando os conceitos de energia de repouso e energia cinética. Na segunda parte foram introduzidas as unidades de medidas usuais em física de partículas para momento e energia (MeV e GeV). Na terceira parte foi discutido o conceito de quantum de energia.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                              | Diálogo   | <b>Aluno A:</b> –“Então no inicio o universo era vapor?”<br><b>Aluno B:</b> – “Acho que não, era radiação, né professor?”<br><b>Professor:</b> –“Calma lá! Aonde diz que no inicio o universo era vapor? O universo era muito quente! Mas não era vapor.”<br><b>Aluno C:</b> –“Eu entendi que no inicio a matéria de alguma forma não estava bem organizada, é isto?”<br><b>Professor:</b> –“Matéria não, a energia.”<br><b>Aluno A:</b> –“Claro, nem existia matéria, só radiação.”<br><b>Aluno D:</b> – “Sim e quando o universo se resfriou, a energia de certa forma se tornou mais organizada e as coisas começaram acontecer.”<br><b>Professor:</b> –“Assim está melhor, mas não é só isso. Se o universo resfriou não existe mais radiação então?”<br><b>Aluno C:</b> –“Existe sim! A diferença está na temperatura, temperaturas altas é radiação e temperaturas menores é matéria.”<br><b>Professor:</b> –“É possível então que uma partícula |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>seja radiação e se transforme em matéria e vice-versa?”</p> <p>Aluno A: –“Sim, o próprio texto diz isso, por exemplo, o elétron no início do universo ele era radiação e depois se tornou matéria.”</p> <p>Professor: –“Exatamente”.</p> <p>Professor: –“Em relação as novas unidades de energia e momento, alguma dificuldade?”</p> <p>Aluno B: – “Como sempre digo só fazem para complicar.”</p> <p>Aluno A: – “Realmente, por que não continuam usando a mesma unidade de medida?”</p> <p>Professor: –“Na verdade ela é uma unidade adaptada, veja para medir um saco de arroz usamos quilograma, agora se medir a massa de um grão de arroz, fica mais apropriado usar gramas, concorda?”</p> <p>Aluno A: – “Faz sentido professor”.</p> <p>Professor: –“Em relação ao quantum de energia, alguma dúvida?”</p> <p>Aluno D: – “Existe um quantum de grandeza para todas as grandezas físicas.”</p> <p>Professor: –“Depende. No caso a energia é uma grandeza que nos interessa. Cada partícula irá apresentar uma quantidade mínima de energia, essa será uma característica que irá definir que partícula ela é. Não sei te dizer se outras grandezas apresentam uma quantidade mínima. Utilizamos o termo quantum para energia e não para outras grandezas.”</p> <p>Aluno A: – “Não seria correto usar o termo qual é o quantum mínimo da matéria?”</p> <p>Professor: –”Como disse, não sei te responder esta questão. O termo quantum é utilizado para energia nesse contexto. O que importa nesse contexto é interpretar o que é um quantum de energia. Alguém poderia me exemplificar?”</p> <p>Aluno C: – “Vou usar uma analogia, o saco de arroz representaria a quantidade total de energia e os grãos de arroz seriam a quantidade</p> |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | <b>mínima do arroz, é isto?”<br/>Professor: –”Sim.”</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|  | Obstáculos  | Existiu uma confusão de relacionar o diagrama de fases com radiação e matéria associaram a radiação a algum tipo de vapor. Em relação as unidades de medidas, os alunos tem dificuldades de compreenderem a importância das unidades, parece que as unidades aparecem por acaso. O conceito de quantum já tinha sido trabalhado em eletromagnetismo, o aluno questionou se todas as grandezas possuíam um quantum, tive dificuldades de responder pois utilizamos o termo quantum para energia e não para outras grandezas. |
|  | Comentários | A discussão mais uma vez foi fundamental, apesar de nem todos os alunos participarem, acredito que as dúvidas levantadas, em parte, é a dúvida dos outros. O aluno que explicou o que era um quantum através de uma analogia conseguiu assimilar o significado. Após a aula revendo o áudio, poderia ter exemplificado para o aluno que questionou se todas as grandezas possuíam um quantum, a analogia do colega poderia ter sido utilizada para responder a sua pergunta.                                                |

| <b>Unidade 1 - Bagunça Dinâmica</b> |           | <b>Capítulo 5- Confronto histórico: Gregos x Físicos</b>                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aula 5</b>                       | Objetivo  | Construir o conceito moderno de partícula elementar como uma função matemática.<br>Confrontar o conceito clássico de partícula elementar com o conceito quântico.<br>Apresentar uma classificação de partículas a partir da propriedade magnética spin. |
|                                     | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                     | Descrição | Na primeira parte da aula foram trabalhadas propriedades geométricas para se discutir como os físicos definiram o que era uma partícula elementar.<br>A segunda parte foi introduzida a propriedade spin.                                               |

|                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | <p>O objetivo desta atividade era inserir a classificação de partículas.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <p>Diálogo</p> | <p><b>Aluno B:</b> –“Então quer dizer que elementar não é o menor?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Não! Historicamente os gregos buscavam a menor partícula. Os físicos buscaram a ideia de partícula “indivisível”, porém suas propriedades estão baseadas em uma função de onda particular.”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“O que é uma função de onda particular?” <b>Professor:</b> –“Alguém quer me ajudar?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“Pelo que entendi tem haver com alguma coisa única não pode ser uma mistura, mas é complicado entender que alguma coisa é representada por uma conta matemática.”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “Mas pode misturar também, o texto fala ali de combinações.”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Então uma partícula não é uma partícula, é uma conta matemática? Tá complexo de entender isso.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Pois é esse é o grande lance da física conseguir descrever a natureza através de equações. Foram exatamente estes conceitos que revolucionaram a maneira dos físicos explicarem os fenômenos em escala microscópica. Tentem relacionar com a analogia do triângulo, as outras peças foram montadas a partir do triângulo. Mas somente a montagem física pode ser descrita ou existe outra forma?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Existe sim! As equações! Ali podemos montar as equações da área usando matemática.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Isto mesmo. Agora será que seria possível criar uma equação matemática para calcular vários tipos de áreas?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“Sim, mas deve ser complicado, to imaginando aqui calcular a área de uma figura toda torta usando áreas do triângulo.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Seu comentário vai de encontro em</p> |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | <p>relação ao que os físicos fazem hoje em dia, além de buscar mais respostas eles tentam encontrar métodos matemáticos mais eficazes para resolver os problemas.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Por que classificar as partículas em relação ao spin? Não poderia ser pela massa ou pela carga elétrica?”</p> <p><b>Aluno A:</b> – “Deve ser por que o spin é uma propriedade importante. Mas como o senhor disse por que não classificar pela massa?”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Não só iremos classificar as partículas pelas massas mas também por outras propriedades. Mas essa classificação é um divisor de águas. Mais adiante veremos que o spin divide as partículas em duas classes, não só por ser inteiro ou semi-inteiro, mas por que desempenham funções diferentes.”</p> <p><b>Aluno : B:</b> –“Faz sentido professor.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Em relação ao quantum de energia, alguma dúvida?”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “De onde saíram tantas partículas que estão colocadas na tabela?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Se as partículas podem ser construídas matematicamente, será que não é possível combinar equações e criar novas partículas?”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “Então se eu fosse físico poderia sair por aí combinando fórmulas e criando partículas? Eu seria um deus!”</p> <p><b>Professor:</b> –”Será que é tão fácil assim? Como vimos antes o que é necessário para uma teoria ter validade?”</p> <p><b>Aluno A:</b> – “Tem que ter experimentação colega! “</p> <p><b>Professor:</b> –” Isso mesmo. Mas existem físicos que tentam brincar de “deus” para encontrar partículas.</p> |
| Obstáculos | A inserção de partícula elementar foi complexa. A pergunta que me faço é: Será que os alunos conseguem interpretar que a partícula pode ser                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | descrita como uma função de onda?                                                                                                                                                                                                                                                |
|  | Comentários | Apesar da tímida participação, algumas dúvidas foram levantadas. O conceito de partícula elementar é abstrato e deve ser confuso para um adolescente que está tendo contato pela primeira vez com esse conceito. A concepção dos alunos ainda é forte por bolinhas indivisíveis. |

| Unidade 1 - Bagunça Dinâmica |           | Capítulo 6- Interação Eletromagnética                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 6                       | Objetivo  | Reconstruir o conceito de campo eletromagnético inserindo o fóton como partícula mediadora.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                              | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                              | Descrição | Após estas aulas, onde considero como aulas de pré-requisitos, demos início a jornada das interações. A interação eletromagnética já tinha sido vista pela turma, pois já havia trabalhado eletromagnetismo e construído de alguma forma o conceito de campo, como uma onda eletromagnética. Começamos a aula retornando a ideia de interação a distância.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                              | Diálogo   | <p><b>Professor:</b> –“Qual foi a novidade da interação eletromagnética em relação ao que foi visto anteriormente em eletromagnetismo?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ Toda aquela conversa de ação a distância não existe, é uma partícula que faz o contato entre os corpos?”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Não entre corpos, não é entre partículas?”</p> <p><b>Aluno C:</b> – “Acho que é entre ondas....”</p> <p><b>Professor:</b> –“Parece que temos dúvidas entre qual ente que existe contato, mas me parece que ficou claro que existe algo que faz o contato!”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“ Sim! São os fótons!”</p> <p><b>Professor:</b> –”Mas são fótons virtuais ou reais”?</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ De acordo com que está no texto do livro são virtuais!</p> |

|                                     |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                     |             | <p><b>Professor:</b> –“Por quê?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ O que eu entendi é que estas partículas virtuais tem um tempo de vida pequeno e são as partículas de interação.</p> <p><b>Professor:</b> –”E de onde eles surgem”?</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Pelo que eu entendi é uma confusão! O campo que está ali, empresta energia para uma nova partícula ser criada esta quantidade de energia que determina seu tempo de vida”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“Mas da onde vem a energia?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Bom, essa pergunta eu não sei te responder, e acredito que não existe uma resposta definitiva, vamos partir do principio que exista esta energia e que os campos carregam esta energia”.</p> |
|                                     | Obstáculos  | A energia é um conceito tão presente nas nossas vidas, mas é muito abstrato. Responder da onde vem a energia foi complexo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                     | Comentários | Neste diálogo podemos observar que os alunos tentam explicar os fenômenos recorrendo a um vocabulário que não é científico, cada um do seu modo, construindo uma relação com o vocabulário da sua vida social e o conhecimento científico. O que é relevante é que abordam sobre aspectos da realidade que podem se tornar significativos, mais familiares, mesmo usando uma linguagem que não seja técnica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Unidade 1 - Bagunça Dinâmica</b> |             | <b>Capítulo 7- Interação Nuclear Forte</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Aula 7</b>                       | Objetivo    | Discutir e construir a existência de uma interação nova, a interação nuclear forte.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                                     | Duração     | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                     | Descrição   | Nesta aula haviam dois desafios, o primeiro inserir o conceito de quarks e depois discutir a interação nuclear forte. As atividades propostas tinham o objetivo dos alunos ter contato pela primeira vez com um conceito muito abstrato.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                     | Diálogo     | <b>Aluno A:</b> –“Por que estas partículas recebem                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>estes nomes estranhos?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“Você queria que se chamasse João e Pedro?”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“Os nomes não interessam! Cada criador dá o nome que quiser ao sua criatura.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Acredito que a origem do nome não vem ao caso. Existem nomes que tem uma relação com um significado, mas muitos termos não têm. A propriedade sabor e cor foram artifícios ou quem sabe falta de criatividade? Veja o exemplo da interação eletromagnética por quê carga positiva e negativa? Não poderia ser carga preta e branca?”</p> <p><b>Aluno A :</b> –“ Então a carga cor não é colorida?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Fisicamente não é apenas um artifício. A questão é por que azul, vermelho e verde?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“ Porque a combinação das cores dá branco que seria uma cor nula!</p> <p><b>Professor:</b> –“Por quê?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ Da mesma o quark e o antiquark?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Sim.”</p> <p><b>Aluno C:</b> – “A questão da carga cor é por causa do spin? Não entendi! O que tem haver uma coisa com outra”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Entendi que dois spin podem se anular, mas três spin não conseguem, de alguma forma iriam se repelir. Mas também não entendi porque precisa da carga cor!”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Se os três spins se repelem como a matéria ficaria agregada? O que iria manter os quarks confinados dentro próton e do Nêutron?”</p> <p><b>Aluno B :</b> –“ É mais ou menos como aquela história do próton repelir próton mas existe uma força que atraí..... deve ser uma força ou propriedade que vence a força do spin...”</p> <p><b>Professor:</b> –“É isso! Houve a necessidade de uma nova interação para explicar a estabilidade.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Na atividade que propus substituir</p> |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | <p><b>a carga cor por uma forma geométrica, como vocês interpretam as formas?”</b></p> <p><b>Aluno B : –“ Cada quark teria uma forma geométrica. Três formas diferentes se atraem e qualquer outra combinação se repele.”</b></p> <p><b>Aluno A : –“ Mas eles não tem essa forma geométrica, né?”</b></p> <p><b>Professor: –”Não. Lembrem que isto foi apenas uma alegoria para nos entendermos da necessidade de outra propriedade.”</b></p> |
| Obstáculos  | <p>Como era esperado os alunos relacionaram a cor com o sentidos da visão.</p> <p>Outro problema identificado foi o tempo, não foi possível aplicar este capítulo em uma aula.</p>                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Comentários | <p>Apesar da ideia física de cor, alguns integrantes conseguiram encontrar uma explicação da necessidade de uma propriedade para explicar a estabilidade apesar da repulsão magnética. Acredito que a atividade proposta onde substituo o termo carga por forma geométrica tenha ajudado. Apesar de serem propriedades matemáticas a alegoria ajudou na interpretação.</p>                                                                    |

| Unidade 1 - Bagunça Dinâmica |           | Capítulo 8- Interação Nuclear Fraca                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 8                       | Objetivo  | Inserir a interação nuclear fraca.<br>Explicar o decaimento beta e o surgimento teórico de novas partículas através de simetrias.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                              | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                              | Descrição | Nesta aula a discussão inicial foi evidenciar aos alunos a transformação de nêutrons em prótons. A Discussão ocorreu em torno do conceito de simetria onde foram inseridas algumas simetrias. Após esta discussão voltamos para o decaimento beta até inserir uma nova partícula o neutrino. Para finalizar foi construído o conceito de interação nuclear fraca.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                              | Diálogo   | <p><b>Professor:</b> –“ Pra que servem as simetrias?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ Tem a ver com conservação de grandezas...”</p> <p><b>Professor:</b> –“Correto. Mas qual o significado de conservar?”</p> <p><b>Aluno A:</b> – “E quem nem energia, só se transforma.”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Ok! Entendemos o significado da simetria, mas pra que servem as simetrias?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Pelo que vi, por exemplo na conservação de carga, não tem como sair uma carga do sistema ou entrar, tem que ser a mesma no inicio e no final.”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Mas se a simetria não se conserva, em algo errado? O quê?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ Ali no livro diz que existem duas hipóteses, ou está errado alguma coisa ou é uma nova partícula. Pelo que entendi neste caso falta uma partícula.”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ O neutrino né professor!”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Sim. Neste caso para conservar a simetria foi colocada teoricamente uma nova partícula para manter a simetria. Mas qual propriedade muda no decaimento beta?”</p> |

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | <p><b>Aluno C –” O nêutron vira um próton.”</b><br/> <b>Professor: –“ Correto. Mas sob o ponto de vista de quarks o que ocorre?”</b><br/> <b>Aluno B:-“O quark muda de sabor.”</b><br/> <b>Professor: –“ Qual seria a interação responsável pela mudança de sabor?”</b><br/> <b>Aluno D: –“A eletromagnética.”</b><br/> <b>Professor: –“ Mas a interação eletromagnética não é responsável pela interação entre cargas?”</b><br/> <b>Aluno A: –“ Então é a forte?”</b><br/> <b>Professor: –“ Mas a interação forte não muda de sabor, ela é responsável por manter os quarks estáveis e o núcleo.”</b><br/> <b>Aluno B:–“ Tem o texto no livro que fala de uma interação fraca que é responsável pelo decaimento beta.”</b><br/> <b>Professor: –“Mas porque ocorre este decaimento?”</b><br/> <b>Aluno B:–“Deixa eu achar aqui, espera um pouquinho...”</b><br/> <b>Aluno B:–“Hum.. Tá existem muitos prótons e nêutrons e para estabilizar um deles tem que ser tirado dali.”</b><br/> <b>Professor: –“Mas como você vai tirar se existe uma força nuclear de atração?”</b><br/> <b>Aluno A:–“Não tira, você transforma em outras partículas, aí que aparece o neutrino...”</b><br/> <b>Aluno D:–“Tá então é um tipo de força que serve pra transformar?”</b><br/> <b>Professor: –“De certa forma sim. Acredito que a melhor forma de vocês construírem este conceito é de pensar que existe uma força que puxa os prótons e nêutrons pra dentro, mas existe outra força que puxa algum deles para fora. Assim o excesso de partículas vão ser retiradas do núcleo pra estabilizar.”</b></p> |
|  | Obstáculos  | Os alunos tentam ainda explicar vários fenômenos através da interação eletromagnética.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|  | Comentários | A interação fraca é a mais difícil de interpretar. Até o momento foram vistas duas forças que tinham                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>uma função bem específica de unir. A força fraca apesar de ser atrativa tem o papel de separar, extrair alguma coisa em excesso, no caso transformando o sabor. Para os alunos quando se fala em força vem a cabeça deles a questão de puxar e empurrar, mudar o significado é complexo, as suas concepções estão enraizadas e mudar uma concepção é difícil. Porém a troca de informação através do diálogo, muitas vezes de forma tímida, sempre colabora para que o grande grupo consiga refletir e opinar e de certa forma o diálogo mais uma vez é incisivo para ajudar construir novos conceitos. No primeiro contato é normal que os alunos aparecerem dúvidas e interpretações erradas. É importante sempre discutir com os alunos que a ciência é assim, muitas ideias e discussões para depois de algum tempo se chegar a um consenso.</p> |
|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| Unidade 1 - Bagunça Dinâmica |           | Capítulo 9- Interação Gravitacional                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 9                       | Objetivo  | <p>Inserir a interação gravitacional sob o ponto de vista quântico<br/> Discutir a ciência como modelos criados por cientista e sua validade.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                              | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                              | Descrição | <p>As atividades propostas neste capítulo tinham apelo mais informativo que investigativo. Começamos a aula assistindo o vídeo e em seguida foram discutidas as atividades propostas.</p>                                                                                                                                                                                                                            |
|                              | Diálogo   | <p><b>Professor:</b> – “Alguma novidade nesta primeira atividade sobre a interação gravitacional?”<br/> <b>Aluno A:</b> – “Aparentemente não. Só que ela não existe...”<br/> <b>Professor:</b> – “Digamos que até agora não!”<br/> <b>Aluno B:</b> – “Então é apenas uma hipótese?”<br/> <b>Professor:</b> – “Sim e digamos que existe uma corrente de cientistas que acreditam que esta hipótese está correta.”</p> |

|  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>Aluno A: –“Se é uma hipótese como podemos dizer que estamos no caminho certo?”</p> <p>Professor:–“ Que vocês acham a colocação do colega?”</p> <p>Aluno C: –“ Tem sentido eu falar, tipo aquela história lá do Fermi que ele falou que havia o tal do neutrino.....”</p> <p>Aluno A: –“ Mas eles descobriram depois a partícula....”</p> <p>Professor: –”Correto, mas tem mais uma diferença, alguém sabe dizer?”</p> <p>Aluno D: –“ Tem o lance da matemática que não deu certo também!”</p> <p>Professor: –“Correto! Por isso existem grandes desafios ainda para chegarmos a uma conclusão definitiva”.</p> <p>Aluno C: –“ E esta história de ondas gravitacionais, que tem haver com esse gráviton?”</p> <p>Professor: –“ Bom, como os campos se propagam? Lembram da experiência do Hertz, aquele que provou que o campo magnético eram ondas eletromagnéticas?”</p> <p>Aluno C: –“ Hum... Aquela da fâisca, que aparecia de uma lado e acendia a lâmpada do outro sem encostar.”</p> <p>Professor: –“ Esta mesmo, qual foi a conclusão do Hertz?”</p> <p>Aluno B: –“ Aquilo ocorria porque tinha um campo que mandava a mensagem....”</p> <p>Professor: –“ De que forma?”</p> <p>Aluno A: –“ Lembrei, eram ondas eletromagnéticas...”</p> <p>Aluno D: –“ Tá... o professor disse que todos os campos tem forma de ondas, lembrei, eram ondas eletromagnéticas...”</p> <p>Professor: –“ Bom, como os campos se propagam, ou lembram da experiência do Hertz? Naquele experimento ficou comprovado que os campos magnéticos eram formados por</p> |
|--|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | <p>ondas. Porém estas ondas gravitacionais são objetos clássicos, já os campos na TQC são campos quânticos, há uma diferença conceitual, quem sabe seja um caminho ...</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ Mas um dia vão descobrir?</p> <p><b>Professor:</b> –“ Acho que a melhor resposta para sua pergunta e refletirmos sobre a pergunta, será que a ciência apresenta uma verdade absoluta?</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ Acredito que não! Pelo que foi visto estes modelos estão em constante mudança.”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Exato. Em Física a verdade é relativa. Neste momento uma teoria pode ser aceita e mais tarde ser refutada.”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“ Como assim? Aquilo que aprendemos antes era mentira?”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Para um cientista modelos anteriores não são falsos, mas passaram por uma evolução.”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ E este lance da gravitação do Einstein? É verdade? Se é verdade qual é mais verdadeiro?”</p> <p><b>Professor:</b> –“ O modelo de Einstein é comprovado! Já o modelo do gráviton por enquanto é uma especulação. Veja o problema que temos ainda que resolver! Imagina se encontrarem o gráviton.”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ Qual é o problema?”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Qual dos modelos estão corretos? Ou os dois estão corretos? Ou ainda, teremos que encaixar estes dois modelos só em um?”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“ Que droga isso aí! O que o senhor acha?”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Eu não acho nada! Esta história continua. Mas posso te dizer duas hipóteses, uma que irão encontrar uma solução e a outra é <b>que algum dos modelos pode ser abandonado.</b>”</p> |
| Obstáculos | Os alunos carregam o conceito de que a Física é uma verdade absoluta. Levaram um choque ao discutirmos que modelos podem ser substituídos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

|                |                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | Comentários                             | Neste diálogo podemos observar que existe uma dificuldade dos alunos em diferenciar o conceito clássico do quântico, que é até certo ponto aceitável, pois conceitos quânticos são abstratos e mudar a concepção dos alunos num primeiro momento é uma tarefa que necessita de uma abordagem mais qualificada e até quem sabe mais histórica e filosófica. Mas é importante destacar que apesar destes obstáculos, os alunos conseguem de alguma forma detectar que existem problemas.                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | <b>Unidade 2- Organizando a Bagunça</b> | <b>Capítulo 1- Modelo Padrão</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Aula 10</b> | Objetivo                                | Classificar e organizar as partículas através de propriedades como interação e massa.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                | Duração                                 | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                | Descrição                               | Para esta aula as atividades propostas se baseavam em alegorias sobre propriedades da matéria, como massa, tamanho. Em seguida as atividades foram direcionadas para construir a tabela do modelo padrão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                | Diálogo                                 | <b>Professor:</b> –“Ficou mais organizada as partículas com esta tabela?”<br><b>Aluno A:</b> –“ Sim, mas por que não apresentou a tabela pronta?”<br><b>Professor:</b> –”A ideia era vocês montarem a tabela tentando algumas alternativas.”<br><b>Aluno B:</b> – “Só não entendi porque as partículas não correspondem as interações, não poderiam ter uma organização pensando nisso?”<br><b>Professor:</b> –“ Não sei! Tente e mostre para turma.”<br><b>Aluno A:</b> –“Não dá!”<br><b>Aluno C:</b> –“ Como tu sabe?”<br><b>Aluno A:</b> –“Tentei fazer diferente, quebrei a cabeça e não dá.”<br><b>Professor:</b> –“ Acho que é uma tarefa complexa quem sabe ficaria uma tabela não muito simétrica ....”<br><b>Aluno B:</b> –“ E se surgirem mais partículas como |

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | <b>vão encaixar nesta tabela?”</b><br><b>Professor: –”Acho que o mais importante nesta atividade foi identificarmos quais as partículas fundamentais, a forma da tabela ou como ela poderia ser montada não é fundamental, mas sim que estas são os tijolos fundamentais da matéria e se novas partículas surgirem com certeza alguém terá que pensar como acomodá-las.”</b> |
|  | Obstáculos  | Como era de se esperar houve algumas divergências em relação a alguns critérios nas primeiras atividades. Outra dificuldade em montar a tabela é que na sequência montada abordei bastante sobre interações e quarks mas faltou uma abordagem maior sobre os léptons.                                                                                                        |
|  | Comentários | Para inserir os conceitos do modelo padrão as atividades propostas não foram tão investigativas. Mas o objetivo deste capítulo era que os alunos reconhecessem as partículas que formam a matéria e que pudessem recriar a lógica que os Físicos na época pensaram para organizar as partículas.                                                                             |

| <b>Unidade 2- Organizando a Bagunça</b> |           | <b>Capítulo 2 - Afinal o que é massa?</b>                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Aula 11</b>                          | Objetivo  | Inserir o bóson de Higgs no modelo padrão                                                                                                                                                                                                                                                  |
|                                         | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                         | Descrição | As atividades iniciais discutiam a definição de massa clássica baseadas na inércia de um corpo. Em seguida as propostas se baseavam em alegorias sobre propriedades da matéria, como massa e tamanho. As atividades seguintes foram direcionadas para construir a tabela do modelo padrão. |
|                                         | Diálogo   | <b>Professor: –“Existe alguma diferença de massa que nós aprendemos com as leis de Newton e da visão quântica ?”</b><br><b>Aluno A: –“ Sim, o que faz os objetos terem massa na verdade é algum tipo de campo.”</b>                                                                        |

|             |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |  | <p><b>Professor:</b> –”Mas podemos explicar a massa de todas as partículas com essa teoria?”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Não, lá no texto fala que apenas uma parte da massa ...”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “E a outra parte vem da onde?”</p> <p><b>Professor:</b> –”A outra parte vem da energia de ligação mas ainda não temos um domínio total sobre a massa mas uma parte podemos explicar pelo campo de Higgs e pela energia de ligação.”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ Mas o que é esta energia de ligação?”</p> <p><b>Professor:</b> –”Quando os núcleos de alguma forma se fundem há um excesso de energia na configuração final do átomo. Einstein através da sua famosa equação <math>E=mc^2</math> demonstrou que este excesso de energia se transformava em massa!”</p> <p><b>Aluno D:</b> – “Isso é muito louco!”</p> <p><b>Professor:</b> –“ Em relação a quebra de simetria qual o entendimento de vocês ?”</p> <p><b>Aluno B:</b> –“ Acho que é algo do tipo tirar as partículas de um movimento ordenado, algo do tipo que essas partículas se movimentam livremente, se você coloca algum tipo de campo e elas são atraídas você vai orientá-las e tipo vão quebrar esta organização...”</p> |
| Obstáculos  |  | <p>Mais uma vez ficou difícil de abordar um conceito que não estava na sequência como investigação que era a energia de ligação. Apesar de eu tentar explicar, e de forma superficial, fica a dúvida se realmente os alunos conseguiram entender este conceito.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Comentários |  | <p>Ressalto que a todo o momento, tento dar forma, selecionar e compartilhar os significados com os estudantes, sobre os conceitos. Suas opiniões ajudam a construir os conceitos as vezes não de forma científica mas existe uma evolução.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

| Unidade 2- Organizando a Bagunça |            | Capítulo 3 – Transição de fase e quebra de simetria                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 12                          | Objetivo   | Construir o conceito de unificação da interação eletromagnética e da interação fraca através da quebra de simetria.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                  | Duração    | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                  | Descrição  | A sequência apresentada tinha na sua primeira parte a discussão sobre a evolução do universo em termos da sua temperatura. Na segunda parte era para relacionar a importância da evolução do universo na construção e evolução do modelo padrão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                  | Diálogo    | <p><b>Professor:</b> –“O que vocês entenderam por transição de fase neste capítulo?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“ Há uma mudança de estado físico?”</p> <p><b>Professor:</b> –”Será que não seria mais adequado falar em mudança de temperatura?”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Concordo com o professor, fica mais fácil visualizar mudança de temperatura do que mudança de estado físico.”</p> <p><b>Professor:</b> –“E como vocês interpretam a unificação das interações eletromagnéticas e fraca?”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Como foi dito anteriormente, a simetria é quebrada porque um campo aparece, ou melhor dizendo mudou sua forma e classificou as partículas com massa e sem massa...”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“ Tipo a gelatina né ...?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“Mas não entendo onde está a quebra de simetria?”</p> <p><b>Professor:</b> –“ A quebra ocorre para explicar porque três bósons da interação fraca ganham massa e o fóton não. Se a simetria fosse conservada o fóton também ganharia massa.</p> |
|                                  | Obstáculos | O conceito quebra de simetria me parece ser um grande problema e merece atenção. Os alunos não conseguiram relacionar a quebra de simetria e                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | quem sabe nem compreender o conceito de simetria.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|  | Comentários | Apesar da participação dos alunos neste capítulo, a atividade por si só não consegue construir o conceito de quebra de simetria espontânea, o papel do professor seria de mediar e deixar os alunos construírem ou pelo menos buscar mais participação.<br>Outra observação, quem sabe por pressão do tempo curto em sala de aula, mais uma vez acabei finalizando a aula e definindo o conceito. |

| Unidade 3- Diagramas de Feynman |           | Capítulo 1 – Diagramas de Feynman                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 13                         | Objetivo  | Identificar e interpretar os elementos que o compõem os diagramas de Feynman.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                 | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                 | Descrição | Neste capítulo introduzi o assunto através de um texto explicativo. Em seguida inseri os elementos gráficos do diagrama para os alunos se familiarizarem e por fim uma atividade para os alunos identificarem os elementos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                 | Diálogo   | <b>Professor:</b> –“Qual será o objetivos destes diagramas?”<br><b>Aluno A:</b> –“ De certa forma dá pra visualizar o que acontece.”<br><b>Professor:</b> –”É importante comentar com vocês que estes diagramas realmente ajudam visualizar, por exemplo, a colisão de partículas, mas que a construção destes diagramas, principalmente o resultado que aparecem são construções matemáticas, e que não iremos explorar.”<br><b>Aluno B:</b> – “É muito difícil?”<br><b>Professor:</b> –“Sim! Para se chegar a solução destes problemas é preciso estudar muito cálculo e isto só se faz em cursos universitários sendo ainda necessário continuar estudando |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | <p>através de mestrado e doutorado.”</p> <p><b>Aluno D:</b> –“Mas é possível entender o que eles dizem?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Sim. Na verdade veremos os resultados concluídos por Físicos. A ideia é que através destes diagramas vocês consigam visualizar e compreender que todas as partículas que estudamos estão neste exato momento interagindo e resultando na formação da matéria que está a nossa volta.”</p> <p><b>Professor:</b> –“Em relação aos elementos do diagrama alguma dúvida?”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Por que as antipartículas andam contra o tempo? Elas voltam pro passado?”</p> <p><b>Professor:</b> –“É bem complexa sua pergunta, mas vou tentar responder, a melhor forma de você interpretar a antipartícula neste diagrama não é relacionando passado e futuro, apenas interprete como elas viajando em direções opostas.”</p> |
| Obstáculos  | <p>A questão temporal das antipartículas foi um fato inesperado. Explicar regressão temporal não era apropriado, contornei a situação com um artifício que não sei se tem validade.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Comentários | <p>Esta atividade não era investigativa e sim informativa. Mas os alunos conseguiram interpretar os diagramas sem maiores problemas, até por que não houve uma exploração conceitual ou investigativa como foi dito.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

| Unidade 3- Diagramas de Feynman |             | Capítulo 2 – Diagramas de Interações Fracas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 14                         | Objetivo    | Construir e interpretar o decaimento beta através do diagrama de Feynman.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                 | Duração     | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                 | Descrição   | A parte inicial da aula foi de interpretar alguns vértices das interações fracas em relação aos seus bósons e em seguida as atividades contemplaram a construção dos diagramas dos decaimentos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                 | Diálogo     | <p><b>Professor:</b> –“Por que no decaimento beta menos o bóson é negativo e no decaimento beta mais o bóson é positivo?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“É por causa da carga?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Sim, é por causa da carga.”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Na atividade três da captura do elétron, é assim que se formam os nêutrons?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Essa é uma das formas, mas existem outras formas, no próprio decaimento beta o que ocorre com os prótons e nêutrons?”</p> <p><b>Aluno C:</b> –“Os prótons se transformam em nêutrons e os nêutrons se transformam em prótons.”</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Isto quer dizer que tudo tá se transformando?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Quase tudo! Na verdade são eventos. Mas ao nosso redor está ocorrendo muitas transformações como esta. ”</p> |
|                                 | Obstáculos  | A proposta de esclarecer onde se usava os bósons devido a diferença de carga com um pequeno texto antes das atividades não surtiu muito efeito. Foi na discussão após terem feito a tarefa que elucidou a situação.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                 | Comentários | Os diagramas apresentados foram construídos corretamente com o detalhe da carga do bóson, os alunos conseguiram identificar as partículas e inseri-las no diagrama. A questão é se realmente conseguiram interpretar. A substituição dos nucleons por quarks não apresentou problemas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

| Unidade 3- Diagramas de Feynman |             | Capítulo 2 – Diagramas de Interações Eletromagnéticas                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 15                         | Objetivo    | Construir e interpretar a aniquilação e formação de pares através do diagrama de Feynman.                                                                                                                                                                     |
|                                 | Duração     | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                 | Descrição   | Novamente inicio das atividades foi apresentar os elementos do diagrama e a continuidade foi a construção dos diagramas através da formação de pares e aniquilação de pares seguido de uma breve discussão.                                                   |
|                                 | Diálogo     | <b>Professor:</b> –“Alguma dificuldade nestas atividades?”<br><b>Aluno A:</b> –“Não tudo tranquilo.”<br><b>Aluno B:</b> – “Só parece mais fácil entender agora usando um desenho.”<br><b>Professor:</b> –“Quem sabe por que este assunto não é uma novidade.” |
|                                 | Obstáculos  | Não houve problemas.                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                 | Comentários | Parece que os alunos quando possuem um pré-conhecimento conseguem realizar as tarefas com mais rapidez e com menos dúvidas. Conseguiram resolver rápido sendo nessa aula sobrou tempo.                                                                        |

| Unidade 3- Diagramas de Feynman |             | Capítulo 2 – Diagramas de Interações Fortes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aula 16                         | Objetivo    | Construir e interpretar a interação entre quarks através de glúons e interação entre prótons e nêutrons através de píons.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                 | Duração     | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                 | Descrição   | A aula se dividiu em duas partes, a primeira identificando e interpretando a diferença das interações fundamental e residual e a segunda construindo a interação forte identificando todas as partículas envolvidas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                 | Diálogo     | <p><b>Professor:</b> –“Qual interação foi mais difícil de construir?”</p> <p><b>Aluno A:</b> –“A última que envolvia tudo meu, partícula antipartícula, glúon, pión achei que não ia ter fim...”.</p> <p><b>Aluno B:</b> – “Existem diagramas mais difíceis que este último?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Existem diagramas bem complexos, mas tudo é uma questão de interpretar. Eu quero saber se ficou alguma dúvida, ou alguma coisa que vocês não conseguiram resolver?”</p> <p><b>Aluno C:</b> – “Só uma pergunta, qual dos diagramas é mais correto desta atividade?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Não entendi sua pergunta?”</p> <p><b>Aluno C:</b> – “Assim, se eu representar a interação apenas com o pión, tipo usando a linha pontilhada, ou se devo fazer toda aquela tripa usando quarks, mésons e antipartículas?”</p> <p><b>Professor:</b> –“Entendi. As duas formas estão corretas, na verdade o objetivo é que vocês interpretassem as duas possibilidades. O que é mais importante é que se um dia vocês virem um diagrama desses, tenho certeza que vocês irão se arriscar a interpretá-lo.”</p> |
|                                 | Obstáculos  | Não houve problemas na execução.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                 | Comentários | Acredito que devido as aulas anteriores e já                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>familiarizados com os símbolos os alunos conseguiram desenvolver as atividades sem problemas. A questão em relação qual o diagrama mais correto mostra que o aluno busca fazer o mais correto possível.</p> <p>Surgiu um fato inesperado nesta aula. De acordo com o cronograma a próxima aula seria o encerramento desta sequência com um vídeo sobre raios cósmicos. Então um grupo de alunos sugeriu que levássemos uma recordação destas aulas e sugeriram que desenhássemos alguns diagramas nas camisetas do uniforme, pois seria o último ano que iriam utilizá-las e seria uma boa lembrança do colégio. Então ficou decidido que após o vídeo e as discussões cada aluno escolheria um diagrama e desenharia na camiseta inclusive eu.</p> |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                        |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Unidade 3- Diagramas de Feynman</b> |           | <b>Atividade complementar</b><br><b>O maior acelerador de partículas</b><br><b>Universo</b><br><b>O Cosmo e a produção de raios cósmicos</b>                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Aula 17</b>                         | Objetivo  | Relacionar a produção de partículas a partir de eventos ocorridos no cosmo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                        | Duração   | 45 minutos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|                                        | Descrição | A primeira parte da aula se destinou à leitura de um pequeno texto sobre raios cósmicos. Em seguida foi apresentado um vídeo palestra sobre raios cósmicos. A segunda parte da aula foi utilizada para questionamentos sobre o vídeo.                                                                                                                                          |
|                                        | Diálogo   | <b>Professor:</b> –“Então, conseguiram entender como as partículas são formadas?”<br><b>Aluno A:</b> –“Que loucura isso. Nunca pensei que essas partículas vinham do espaço..“<br><b>Aluno B:</b> – “Mas todas as partículas são na verdade raios cósmicos?”<br><b>Professor:</b> –”Podemos dizer que a maioria sim”.<br><b>Aluno C:</b> – “Até as partículas que formam nosso |

|  |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |             | <p><b>corpo?” Professor: –“De certa forma sim. Nesse exato momento uma rajada de raios cósmicos está interagindo acima de nossas cabeças, algumas sendo criadas e outras sendo destruídas, algumas sendo agregadas e outras desagregadas.”.</b></p> <p><b>Aluno A: – “Somos filhos dos raios cósmicos.”</b></p> <p><b>Professor: –“De certa forma sim. O que deve ficar claro é que o espaço é formado por campos e partículas que por sua vez ficam interagindo entre eles, a diferença é que os raios cósmicos são partículas aceleradas e colidem entre elas. Já o nosso corpo não existem colisões com tanta energia e dessa maneira a matéria se comporta de forma mais comportada e mais agregada originando os átomos e moléculas.”</b></p> |
|  | Obstáculos  | Não houve.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|  | Comentários | <p>O vídeo tinha por objetivo mostrar aos alunos como o nosso universo interage com ele mesmo. A palestra abordou muito dos temas vistos já nas aulas e por isso, apesar de ser uma palestra de um professor universitário, os alunos conseguiram acompanhar. Mesmo assim para o aluno desta idade deve ser difícil para o aluno abstrair esse mundo quântico, ouvir falar de raios cósmicos, que nem são raios, são partículas ou são ondas? Como diz Feynman, : “São ondas, não, não, não... são partículas, não, não, não,... vou deixar vocês pensar um pouco ...” É complexo!</p>                                                                                                                                                             |

### 5.3 CONSTRUINDO DIAGRAMAS DE FEYNMAN EM CAMISETAS

No final da última aula um grupo de alunos sugeriu construir uma lembrança para guardar de recordação. Foram várias sugestões, mas a ideia que acabou criando força e sendo escolhida pelos alunos foi a de construir em suas camisetas os diagramas de algumas interações. Ficou acordado que na aula seguinte construiríamos os diagramas. Esta aula foi dividida em duas partes, a primeira foi usada para os alunos responderem um pós-teste que tinha por objetivo avaliar seus novos conhecimentos e a segunda parte foi utilizada para confeccionar as camisetas. Alguns alunos se encarregaram de trazer canetas permanentes para desenhar as camisetas.

As fotos a seguir ilustram algumas camisetas confeccionadas pelos alunos



Figura 1- Alunos desenhando os diagramas



Figura 2- Alunos desenhando os diagramas

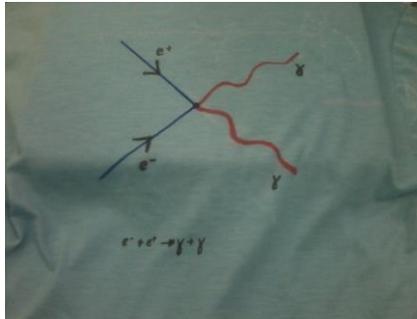


Figura 3- Diagrama confeccionado pelos alunos

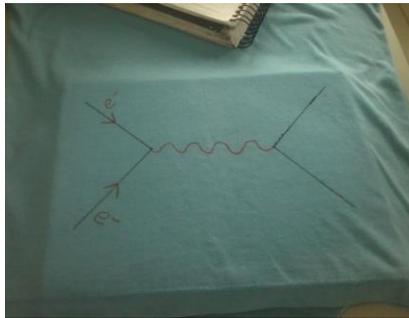


Figura 4- Diagrama confeccionado pelos alunos

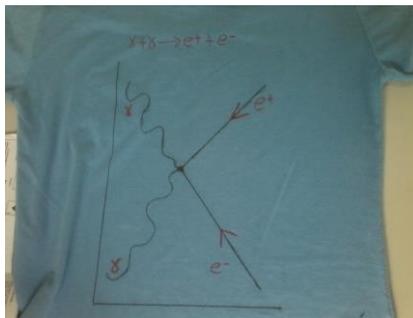


Figura 5 - Diagrama confeccionado pelos alunos

A construção desses diagramas mostra que de alguma forma os alunos conseguiram adquirir os novos conceitos. A confecção das camisetas mostrou que houve alguma empolgação pelos alunos em relação a estes novos conceitos construídos. Mesmo apresentando várias dificuldades conceituais, o que é compreensível, os alunos conseguiram explicar o significado do diagrama, reconhecendo a formação da matéria com seus componentes e interações.

Aparentemente a construção do diagrama mostrou que os alunos conseguiram interpretar através de uma simbologia a interação da matéria e pode-se afirmar num primeiro momento que a aplicação da SEI apresentou indícios de que os alunos conseguiram assimilar os novos conceitos. Não se pode afirmar que foi em sua totalidade, mas em primeira análise, parcialmente houve assimilação.

#### **5.4 COMPARAÇÕES ENTRE O PRÉ-TESTE E PÓS-TESTE**

Nesta última aula os alunos foram solicitados a responder um questionário pós-teste (Apêndice B). Este questionário continha o mesmo número de questões do questionário pré-teste ( Apêndice A). As questões do pós-teste eram similares e tinham por objetivo ver se os alunos conseguiram avançar nos conceitos que foram abordados. O número de alunos tanto no pré-teste e no pós-teste foram iguais e totalizaram um total de 36 alunos. A tabela 1 apresenta, para efeitos de comparações, o número de acertos obtidos no pré e pós-teste.

**TABELA 1**

|         | PRÉ-QUESTIONÁRIO<br>(APENDICE 1) | QUESTIONÁRIO<br>AVALIADOR (APÊNDICE<br>2) |
|---------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| QUESTÃO | Nº DE ACERTOS                    | Nº DE ACERTOS                             |
| 1       | 1                                | 6                                         |
| 2       | 0                                | 10                                        |
| 3       | 1                                | 6                                         |
| 4       | 0                                | 10                                        |
| 5       | 2                                | 20                                        |
| 6       | 13                               | 16                                        |
| 7       | 10                               | 17                                        |
| 8       | 5                                | 18                                        |
| 9       | 5                                | 19                                        |
| 10      | 4                                | 20                                        |
| 11      | 9                                | 16                                        |
| 12      | 2                                | 18                                        |
| 13      | 6                                | 12                                        |
| 14      | 10                               | 28                                        |
| 15      | 7                                | 20                                        |
| 16      | 1                                | 14                                        |
| 17      | 6                                | 24                                        |
| 18      | 2                                | 14                                        |
| 19      | 2                                | 24                                        |
| 20      | 2                                | 18                                        |
| 21      | 2                                | 12                                        |
| 22      | 0                                | 4                                         |
| 23      | 15                               | 20                                        |
| 24      | 1                                | 4                                         |
| 25      | 0                                | 16                                        |
| 26      | 20                               | 26                                        |
| 27      | 2                                | 10                                        |
| 28      | 7                                | 24                                        |
| 29      | 3                                | 22                                        |
| 30      | 3                                | 20                                        |

Para os dois questionários foram oferecidos o mesmo tempo de 30 minutos. A tabela mostra que em todas as questões houve um aumento de acertos.

Porém algumas questões este incremento foi abaixo do esperado, isto fazendo uma análise em relação ao aumento de acertos de outras questões. A seguir descrevo as questões que tiveram o incremento menor.

Na questão 1 foi abordado sobre as partículas que formam o átomo, observando os resultados é fato que a concepção da maioria dos alunos ainda é clássica, para eles o átomo ainda é formado por três partículas, o próton, o nêutron e o elétron e que a matéria é formada também apenas por estas três partículas. A dúvida que fica é se a concepção do aluno é tão forte devido a forte presença desde as séries iniciais, em que a escola oferece a construção do átomo com apenas estas partículas, o elétron, próton e nêutron ou por outro lado se a maneira que foi abordado o assunto na sequência não foi relevante para mudar a concepção e portanto merece atenção. Acredito que a dificuldade da evolução conceitual se refere ao que é uma partícula fundamental. Acredito que este conceito deve ser mais elaborado para que realmente o aluno consiga mudar sua concepção.

A questão 3, onde abordamos o conceito de partícula fundamental mais conceitualmente, apesar de ter aumentado o numero de acertos, porém não de forma significativa. Apesar de ser uma definição muito abstrata, a função de onda unívoca é a definição de partícula fundamental, este conceito não foi construído de maneira satisfatória. Acredito que estes conceitos por serem tão abstratos e os alunos terem contato pela primeira vez, devem ser abordados de outra forma e merece uma atenção.

Na questão 22 foi abordada a estabilidade do núcleo. Parece que os alunos tiveram dificuldades em diferenciar a interação fundamental e residual. Quando usei uma forma aristotélica de construir o conhecimento usando analogias e alegorias não surgiu o efeito esperado, pois não atingiram ou despertaram o interesse do aluno. Diante do resultado obtido merece um aprofundamento maior para que os alunos consigam construir melhor este conceito.

A questão 24, o assunto que foi abordado era referente ao de partículas virtuais. Este conceito apresentou um índice muito baixo de acertos antes e depois. O conceito de real e virtual é bastante complexo e a forma que foi abordada não surtiu o efeito desejado. Existe, portanto a necessidade de se repensar uma alternativa de construir este conceito para que se torne mais eficaz. Apesar de não ser crucial para se desenvolver o modelo padrão é importante que o aluno tenha contato com este conceito e se aproprie desse conhecimento para enriquecer sua cultura científica.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta sequência didática teve o objetivo principal de inserir na sala de aula conteúdos de física moderna. A decisão de fazer um livro foi de desenvolver um material completo que tivesse início, meio e fim. A abordagem escolhida das aulas por meio de investigação veio de uma pesquisa sobre tendências utilizadas para desenvolver uma aula com a intervenção e participação dos alunos, pois me parece que este tipo de abordagem pode desencadear um espírito de participação dos alunos. Este método já foi utilizado entre outros pesquisadores em outros temas e não tive a intenção de inovar, mas sim de utilizar esta ferramenta para inserir no ensino médio novos conceitos de física. É importante ressaltar que essa ferramenta foi utilizada de forma consciente, observando quais objetivos que o assunto pretendia abordar com o uso daquela investigação através de uma pergunta, analogia ou alegoria sempre objetivando que tais condições realmente trabalhariam o conteúdo e se ele poderia ser utilizado como ponte para inserir e construir novos conceitos de física.

O tema física de partículas foi escolhido por ser relevante, uma vez que até hoje não chegamos a uma conclusão de como o universo se formou, como evoluiu e por fim construir junto ao aluno que a física não é uma verdade absoluta que o tempo vai moldando as teorias e a física tenta mostrar como estes fatos ocorrem através de modelos, e o modelo padrão é um deles e sem dúvida que o cidadão moderno tem que ter acesso a este tipo de informação.

Há muito tempo ministro minhas aulas na perspectiva centralizada e autoritária aonde minhas ações vem em primeiro lugar sendo o aluno um mero expectador, copiando e eu explicando. Sempre havia uma arrogância de minha parte em me julgar o detentor de todo o conhecimento. No programa de mestrado, comecei a ter contato com outras perspectivas e métodos no ensino de física como teoria da aprendizagem significativa, ensino por investigação, interações dialógicas entre outros. Essas aulas foram proveitosas e esclarecedoras, pois, após inúmeras discussões com colegas e professores do programa de mestrado, comecei realmente a perceber que não podemos desprezar o conhecimento que o aluno traz consigo da sua experiência. Partindo da ideia de que o aluno tem potencial, pois carrega consigo seus significados, o processo interativo possibilita a negociação de

significados, assim a investigação e a interação ajuda o aluno a construir seu próprio conhecimento.

Independente da teoria pedagógica, boa parte desses autores afirma que o aluno tem que ter poder de fala, tem que expressar as suas ideias e ouvir a opinião de outros para que ele forme sua concepção a respeito de assunto abordado, para que possa se apropriar do conhecimento. O professor não pode simplesmente despejar todo o conhecimento científico sem estruturá-lo esperando que o aluno aceite tudo o que lhe é dito.

Apresentar uma aula em uma perspectiva mais dialógica apresenta sim obstáculos e confesso não foi fácil, pois os alunos já trazem consigo o método da aula tradicional e sempre quando há mudanças há dificuldades.

Criei uma sequencia didática para inserir novos conceitos de física, a maior dificuldade foi de fazer a transposição didática, pois o modelo padrão é uma construção toda matemática. Muitos conceitos abordados por vezes não tinham conexão com a física vista pelos alunos, mas ao inserir novos conceitos através da investigação criada oportunizou aos alunos repensarem o mundo em que vivem e interpretar o que está a sua volta.

Apesar de revisar o material didático sempre aparecem problemas na sua aplicação, pois é nessa hora que realmente acontece a interação, como questões levantadas pelos alunos que não estão na sequencia didática e confesso que nessa hora o professor tem que “ter um jogo de cintura” imenso para conduzir uma aula dialógica, pois nem sempre as questões levantadas são as dúvidas que os alunos tem e apesar de ser uma aula diferente existe um programa um determinado conteúdo e tenta-se seguir à risca. Na aula dialógica por mais planejada que a aula esteja ela não é engessada, pode mudar de rumo pelas perguntas e respostas que os alunos propõem a cada momento e cabe ao professor estar preparado para tais perguntas e também ter a humildade se não souber ir pesquisar para dar uma resposta.

Acredito que este tipo de aula serve para o professor ficar atento com as perguntas e respostas que surgem a cada momento e se tornar

um pesquisador nesta área, reconhecendo erros, pesquisando novas possibilidades e apontando soluções.

Também foi complicado abordar o tema de forma mais dialógica ao analisar os áudios ficou evidente que em diversos momentos voltei ser um professor autoritário, não dando prosseguimento ao diálogo sempre pondo um ponto final e definindo a conceito, acredito que por inexperiência nesse tipo de aula acabei em muitas aulas contradizendo o objetivo de uma aula investigativa e dialógica.

A narrativa dos alunos contribuiu para minhas análises, através delas foi possível relatar todos os acontecimentos registrados em áudio e para minha formação e evolução como profissional da educação foi essencial analisar as mesmas.

Esta narrativa me ajudou muito a analisar os sentidos atribuídos pelos estudantes em relação aos conceitos compartilhados na sala de aula, ao mesmo tempo em que permitiu analisar a minha prática ao narrar essa experiência de ensino. É conclusivo e necessário que pela análise onde é preciso melhorar e essa reflexão da prática escolar deve ser permanente para nosso processo de formação contínua. Nas próximas aulas e quem sabe quando for reaplicar esta sequência didática novamente eu possa fazer uma aula mais dialógica, já que terei mais experiência com esse tipo de abordagem.

Pude perceber durante as aulas que os sentidos produzidos pelos estudantes sobre os conceitos de partículas e interações foram evoluindo de forma gradativa, partimos de um problema inicial, onde pedi para explicarem a estabilidade do núcleo e através da discussão e das hipóteses puderam perceber as falhas e a falta de mais uma interação.

A discussão sobre interação à distância ou por contato também foi crucial para inserirmos e construirmos o modelo de interações mediadas por campos e a partir dessa construção inserir o conceito de partícula mediadora e como era de se esperar os alunos trazem consigo a concepção forte de interação à distância e mudar esta concepção não é fácil.

Entre muitas dificuldades e que merecem atenção é que devemos nos perguntar se é possível inserir física de partículas sem antes estudarmos relatividade. Apesar de direcionar no material didático alguns tópicos que fossem relevantes ao interesse da física de partículas, confesso que foi difícil abordar tais conceitos, já que não era o foco da pesquisa, mas se fez necessário para construir o modelo de partículas, pois como falar em partícula virtual sem falar no princípio da incerteza ou da relatividade. Esta inserção de conceitos levou algum tempo, apesar de começarmos com um problema de interação acabamos navegando por outras áreas da física, mas sem elas acredito que a abordagem ficaria incompleta.

Em relação à opinião dos estudantes sobre o material didático e o debate investigativo como ferramenta para a fomentação de ideias, teve alguns problemas, o material se tornou muito extenso e isso acabou tirando o foco de alguns alunos. Acredito que a presença de mais vídeos quem sabe poderia chamar mais a atenção, porém sairia do foco da pesquisa e necessitaria de uma vasta pesquisa para selecionar vídeos coerentes com o conteúdo. Existem muitos vídeos na internet, porém necessitariam de uma análise mais detalhada a fim de evitar o sensacionalismo visual em detrimento de discussões em sala de aula.

Foi importante também na discussão e construção do modelo padrão, a visão e as práticas da comunidade científica, com seus objetivos específicos, suas maneiras de ver o mundo e suas formas de dar suporte as novas descobertas e aos problemas não resolvidos.

Deve ficar bem claro que a SEI e sua maneira que foi aplicada não é a solução para os problemas enfrentados pelo ensino de física no Brasil, a pretensão foi através desse trabalho utilizar uma ferramenta de apoio, para iniciar discussões e fomentar as ideias dos discentes a fim de termos uma aula mais dialógica. É satisfatório ao saber que ao fim da intervenção os alunos além de terem construído novos conceitos tenham extrapolado seus conhecimentos, mudando sua postura e desenvolvendo mais seu senso crítico e reflexivo.

Apesar de muito trabalho e dedicação uma questão fica em aberto, será que a proposta deste mestrado ofereceu uma melhoria para um ensino de qualidade na escola pública? Será que essa proposta poderia promover grandes mudanças nas conquistas futuras desses

alunos? Pois bem é difícil chegar a uma conclusão, a sensação que percebi é que as mudanças produzidas pela proposta pedagógica são apenas pequenos ruídos na estrutura da educação brasileira e que há ainda muita coisa a se fazer, mas este mestrado foi o início de uma longa jornada, outros trabalhos virão com certeza enriquecendo ainda mais a inserção de física de partículas no ensino médio, e assim continuaremos a evoluir e cada vez mais oferecer uma aula de melhor qualidade para os alunos.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRANIONI, Neila Tonin. A teoria da transposição didática e o processo de didatização dos conteúdos matemáticos. EDUCERE - Revista de educação. Toledo, v.1,n.1, jan/jun. 2001. Disponível em: <<http://revistas.unipar.br/educere/article/view/812/709>>. Acesso em Jun. 2016.

ALVES FILHO, Jose de Pinho. Atividades experimentais: do método prático a prática construtivista. 2000. (Tese de Doutorado). Florianópolis: UFSC, 2004. Disponível em: <[http://nupic.incubadora.fapesp.br/portal/banco-de-dados/publiçoes/tcc-teses-e-dissertacoes/Tese\\_Jose\\_de\\_Pinho\\_alves\\_filho.zip/view](http://nupic.incubadora.fapesp.br/portal/banco-de-dados/publiçoes/tcc-teses-e-dissertacoes/Tese_Jose_de_Pinho_alves_filho.zip/view)>. Acesso em: jun. 2016.

AZEVEDO, M. C. P. S. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática. In: CARVALHO, A. M. P. (Org.). São Paulo: Pioneira Thomson Learning, p.19-33, 2004.

AZEVEDO, Maria. Cristina. P. Stella. de. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: \_\_\_\_\_. Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática. Anna Maria Pessoa de Carvalho (Org.). São Paulo. Pioneira Thomson, 2006, p. 19-33.

BASSALO, J.M.F.; CATTANI, M.S.D. Teoria de Grupos para Físicos. Publicação IF E-BOOK 1661/2011

BOUWARE, D. and GROSS, D., Nucl. Phys. B233, 1 (1984).

CARVALHO, A. M. P.; Teixeira, O. P. B. O Conceito de Velocidade em Alunos da 5<sup>o</sup> série do 1<sup>o</sup> grau: um Estudo a partir de Questões Típicas de Sala de Aula. São Paulo: R. Fac. Educ. 11 (1/2), 1985. p.173-191.

CARVALHO, A. M. P. Critérios estruturantes para o Ensino de Ciências. 1-17,

2004. Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática. In: CARVALHO, A. M. P. (org.). São Paulo: Cengage Learning, p. 1-17, 2004.

CARVALHO, Anna Maria P. de. Critérios estruturantes para o ensino das ciências. In:\_\_\_\_\_. Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática. Anna Maria Pessoa de Carvalho (Org.). São Paulo. Pioneira Thomson, 2006, p. 1-17.

CARVALHO, A. M. P. O ensino de Ciências e a proposição de sequências de ensino investigativas. In: CARVALHO, Anna Maria Pessoa de (org.). Ensino de Ciências por Investigação: Condições para Implementação em Sala de Aula. São Paulo: Cengage Learning, p. 1-20. 2013.

CASTELLAR, S. M. V. A formação de professores e o ensino de geografia. Terra Livre, São Paulo, n. 14, p. 51-59, Jan-Jul. 1999.

CREPALDE, R. S.; AGUIAR JR., O. G.. A formação de conceitos como ascensão do abstrato ao concreto: da energia pensada à energia vivida. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, V18(2), p. 299-325, 2013.

DEWEY, J. Experiência e Natureza: lógica: a teoria da investigação: A arte como experiência: Vida e educação: Teoria da vida moral. São Paulo: Abril Cultural, 1980.

DIRAC, P. A. M. Proc. Roy. Soc. Lond. A117, 610 (1928).

DRIVER, R.; ASOKO, H.; LEACH, J.; MORTIMER, E.; SCOTT, P. Construindo o conhecimento científico na sala de aula. Química Nova na Escola, n. 9, p. 31-40, 1999.

ENDLER, ANNA MARIA FREIRE. Introdução à Física de Partículas. São Paulo: Editora Livraria da Física:2010.

GHEDIN, E. Teorias Psicopedagógicas do Ensino Aprendizagem. Boa Vista: UERR. Editora, 2012.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES. M.O.C.; Teoria Quântica de Campos ,vol. 39.São Paulo: EDUSP,2002.

GRIFFITHS, D. Introduction to Elementary Particles. New York: Ed. John Wiley, 1987.

HAWKING, SW.Uma breve história do tempo.1ªed.Rio de Janeiro:Intrínseca,2015.

KIMURA, S.Geografia no ensino básico: questões e propostas. 2ª ed. São Paulo: Contexto, 2010.

LEITE, Miriam Soares. Contribuições de Basil Bernstein e Yves Chevallard para a discussão do conhecimento escolar. Dissertação (Mestrado em Educação). Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Educação, 2004. Disponível em:[http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0212105\\_04\\_cap\\_03.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0212105_04_cap_03.pdf). Acesso em: junho. 2016.

L'ANNUNZIATA, M.F. Radioactivity: Introduction and History. United Kingdom: Elsevier, 2007

LEMONS, NIVALDO A. Mecânica Analítica. Segunda edição, Editora Livraria da Física, 2007 São Paulo.

LIBÂNEO, José Carlos.Democratização da Escola Pública: a pedagogia crítico-social dos conteúdos.21ª ed. São Paulo: Loyola, 2006.

LIMA, M. E. C. C.; AGUIAR JÚNIOR, O.; DE CARO, C. M. A  
formação de  
conceitos científicos: reflexões a partir da produção de livros didáticos.  
Ciência  
& Educação, Bauru, v. 17, n. 4, p. 855-871, 2011

LUDKE, M.; ANDRE, M. E. D. A.. Pesquisa em educação: abordagens  
qualitativas. São Paulo: EPU, 1986.

MACHADO, V. C.. Considerações a respeito da pesquisa educacional  
brasileira  
e das investigações de tipo etnográfico e sua relação com a geografia.  
Revista  
Percurso-NEMO. Maringá, v.2, n.2, p.163-180, 2010.

MASON, S. F.. Historia de las Ciencias. Madrid: Alianza Editorial. 5  
v,1996.

MARTINS, J. C. Vygotsky e o papel das interações sociais na sala de  
aula:  
reconhecer e desvendar o mundo. Série Idéias: os desafios enfrentados  
no  
cotidiano escolar. Secretaria de Estado da Educação, Governo do Estado  
de  
São Paulo, Fundação para o desenvolvimento da Educação, n ° 28, p.  
111-122,  
março, 1997.

MÁXIMO, M. P., ABIB, M. L. V. S., Ensino por investigação e  
aprendizagem de  
conceitos físicos e de habilidades ao longo do tempo. XIV Encontro de  
Pesquisa em Ensino de Física, 2012, Maresias, São Paulo. 2012.

MOREIRA, Marco Antonio. Física de Partículas: Uma abordagem  
conceitual & epistemológica. São Paulo:Editora Livraria da Física,2011.

MORTIMER, E. F.; SCOTT, P. H. Atividade discursiva nas salas de  
aula de  
ciências: uma ferramenta sociocultural para analisar e planejar o ensino.  
Investigações em Ensino de Ciências, v. 7, n. 3, p. 283-306, 2002.

MORIYASU, K. Gauge Invariance Rediscovered, American Journal of Physics 46, p. 274. 1978.

MORRIS, Richard. Uma breve história do infinito. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998

MUNFORD, D. e LIMA, M. E. C. de C. Ensinar ciências por investigação: em quê estamos de acordo? Revista Ensaio, v. 1, 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa Física Moderna e Contemporânea no ensino médio. Investigações em Ensino de Ciências. v.5, n.1. 2000.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A.. Atualização do currículo de Física na escola de nível médio: um estudo desta problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, V.18, n.2, p.135-151, ago 2001.

OKUNO, Emico. Radiação: Efeitos, Riscos e Benefícios. São Paulo: Editora HARBRA Ltda, 1998.

PEDUZZI, L. O. Q.; PEDUZZI, Sônia S. O conceito de força no movimento e as duas primeiras leis de Newton. Cad. Cat. Ens. Fis. v.2, n.1, p.6 -15, 1985.

PENA, F. L. A. Sobre a presença do Projeto Harvard no sistema educacional brasileiro. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 1, p. 1-4, 2012.

PENHA, S. P.; CARVALHO, A. M. P.; VIANNA, D. M. A utilização de atividades investigativas em uma proposta de enculturação científica: novos indicadores para análise do processo. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS (ENPEC), 2009, Florianópolis. Anais do VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Florianópolis: Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009.

PEREIRA, RODRIGO GONÇALVES, MIRANDA, EDUARDO Introdução à Teoria Quântica de Campos: do Oscilador Harmônico ao Campo Escalar Livre, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, no. 2, Junho, 2002.

RODRIGUES, B.A.; BORGES, A.T. O ensino de ciências por investigação: uma reconstrução histórica. Anais do XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Curitiba, 2008.

ROSENFELD, R. Feynman & Gell-mann – Luz, quarks, ação. São Paulo:Odysseus Editora, 2003.

RYDER, L. H. Quantum Field Theory, second edition. Cambridge. (1996).

SÁ, E. F. de, PAULA, H. de F, LIMA, M. E. C.; AGUIAR, O. G. de. As características das atividades investigativas segundo tutores e coordenadores de um curso de especialização em ensino de ciências. In: Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências, 6, Florianópolis, SC, Atas..., 2007.

SÁ, E. F.; LIMA, M. E. C. C.; AGUIAR JUNIOR, O. A construção de sentidos para o termo Ensino por Investigação no contexto de um curso de formação. Investigações em Ensino de Ciências. v. 16, n. 1, p. 79-102, 2011.

SANCHES, M.B. A Física moderna e contemporânea no Ensino Médio: Qual sua presença em sala de aula? Dissertação (Mestrado em educação para a Ciência e o ensino de Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 16, n.1, p. 59-77, 2011.

SAKURAI, J. J., *Modern Quantum Mechanics, Revised Edition*, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.

SCHROEDER, E. ; MAESTRELLI, S. R. P.; FERRARI, NADIR. A Construção dos conceitos científicos em aulas de Ciências: contribuições da teoria histórico-cultural do desenvolvimento. In: VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC), 2009, Florianópolis. *Anais do VII ENPEC*, 2009.

SCHRONDIGER, E. *Ann. Physik* 81, 109 (1926).

Secretaria de Educação Média e Tecnológica – SEMTEC.PCN + Ensino Médio: Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais -Linguagens, códigos e suas tecnologias. Brasília : MEC, 2002.

SENA, Hildegard João de. A transposição didática do conceito de área em livros didáticos do ensino fundamental: período de 1923 a 2002. 2007. Dissertação (Mestrado em Educação).Tubarão: UNISUL, 2007.

SILVA, L. L. da, TERRAZZAN, E. A.; As Analogias no Ensino de Conteúdos Conceituais, Procedimentais e Atitudinais em Aulas de Física do Ensino Médio, *Experiências em Ensino de Ciências – V6(1)*, pp. 133-154, 2011.

SOUZA, V. F. M.; SASSERON, L. H. As interações discursivas no Ensino de Física: a promoção da discussão pelo professor e a Alfabetização Científica

pelos alunos. *Ciência e Educação*, v. 18, n. 3, p. 593-611, 2012.

STELLE, K. ; *Phys. Rev. D* 16, 953 (1977)

ZÔMPERO, A. F.; LÁBURU, C. E. Atividades investigativas no ensino de Ciências: aspectos históricos e diferentes abordagens. *Revista Ensaio, Belo Horizonte*, v. 13, n. 03, p. 67-80, set./dez. 2011.

ZYLBERSZTAJN, A. Conceitos espontâneos em Física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. *Rev. Ens. Fís.* v.5, n.2, p.3-16, 1983.

WEINBERG,S.; *Quantum Field Theory*. Vols. I to III Cambridge University Press (2000)

WEINBERG,S.; *The European Phys. J. C* 34 Issue 1, pp 5-13 (2004)

WILSEK, M.; TOSIN, J. Ensinar e aprender ciências no ensino fundamental com atividades investigativas através da resolução de problemas. *Estado do Paraná*, v. 3, n.5, 2012. Disponível em: <<http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/1686-8.pdf>> Acesso em: jun de 20

WILLIAMS, W S C - *Nuclear and Particle Physics*, Oxford University Press, 1991

## APÊNDICE

### Apêndice A: PRÉ-QUESTIONÁRIO

Apêndice B: PÓS-QUESTIONÁRIO

Apêndice C: PRODUTO EDUCACIONAL

### APENDICE A: Pré-Questionário sobre partículas e interações fundamentais

Universidade Federal de Santa Catarina

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Mestrado

Profissional em Ensino de Física

Nome: \_\_\_\_\_ Turma/Série: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Caro Aluno,

Este questionário tem por objetivo identificar seus conhecimentos prévios sobre o tema partículas e interações fundamentais. As questões são formuladas com quatro alternativas de respostas, sendo que a última apresenta a alternativa “**Não sei a resposta**”. Pense e escolha uma alternativa que lhe pareça mais correta de acordo com suas concepções.

1. Do que é formado um átomo?

- a) prótons e nêutrons
- b) prótons, nêutrons e elétrons.
- c) léptons e quarks
- d) Não sei a resposta

2. O que são prótons?

- a) partículas elementares, pois são indivisíveis.
- b) partículas elementares, pois possuem carga elétrica.
- c) partículas constituídas por quarks
- d) Não sei a resposta

3. O que são elétrons?

- a) partículas elementares, pois não é formada por outras partículas.
- b) partículas elementares, pois possuem carga elétrica.
- c) partículas constituídas por quarks

d) Não sei a resposta

4) O que são nêutrons?

- a) partículas elementares, pois são indivisíveis.
- b) partículas elementares, pois não possuem carga elétrica.
- c) partículas constituídas por quarks
- d) Não sei a resposta

5. O elétron tem o comportamento de:

- a) uma partícula
- b) uma onda
- c) de partícula e onda ao mesmo tempo
- d) Não sei a resposta

6. Como um modelo atômico é construído?

- a) Por meio de experimentos.
- b) Por uma observação na natureza
- c) Por um modelo científico baseado na observação experimental e teorias matemáticas.
- d) Não sei a resposta

7. O que é uma partícula elementar?

- a) um átomo
- b) um conjunto de elétrons
- c) uma partícula que não possui estruturas menores
- d) Não sei a resposta

8. Como as partículas são detectadas

- a) através de microscópio eletrônico de alta resolução
- b) uso de supertelescópios especiais
- c) uso de câmara de nuvens, aceleradores de partículas e detectores de raios cósmicos.
- d) Não sei a resposta

9. O que é um quark?

- a) um íon
- b) um átomo eletrizado
- c) uma partícula elementar
- d) Não sei a resposta

10. Qual é o número de quarks que existem na natureza?

- a) 2
- b) 4
- c) 6
- d) Não sei a resposta

11. Qual o significado da cor dos quarks?

- a) mudam de cor conforme a luz que incide sobre eles
- b) esta relacionado a massa
- c) é uma propriedade particular dessa partícula como a carga elétrica
- d) Não sei a resposta

12. O que é um lépton?

- a) um íon
- b) um átomo eletrizado
- c) uma partícula elementar
- d) Não sei a resposta

13. Qual é o número de léptons que existem na natureza?

- a) 2
- b) 4
- c) 6
- d) Não sei a resposta

14. O que é antimatéria?

- a) é ausência de matéria
- b) e um espaço vazio
- c) é matéria com propriedades diferentes
- d) Não sei a resposta

15. Toda partícula tem antipartícula?

- a) não
- b) sim
- c) às vezes
- d) Não sei a resposta

16. A antipartícula do elétron é:

- a) próton
- b) pósitron

- c) íon
- d) Não sei a resposta

17. O que é o modelo padrão?

- a) uma teoria simples baseada em observações
- b) uma teoria baseada em matemática
- c) uma teoria unificando a matemática ao experimento que descreve atualmente a estrutura da matéria
- d) Não sei a resposta

18. De acordo com o modelo padrão quais são as partículas elementares

- a) Elétrons, prótons e nêutrons.
- b) Elétrons e prótons
- c) quarks, léptons e bósons
- d) Não sei a resposta

19. Quais são as forças fundamentais da natureza?

- a) Peso, atrito, elástica e atômica
- b) eletromagnética, nuclear forte, nuclear fraca e gravitacional
- c) eletromagnética e gravitacional
- d) Não sei a resposta

20. Quais são as partículas mediadoras das forças fundamentais

- a) elétron e próton
- b) glúons, fótons, partículas Z e W e o gráviton
- c) somente elétrons
- d) Não sei a resposta

21. Qual a interação que mantém o núcleo atômico estável?

- a) Eletromagnética
- b) Nuclear forte
- c) nuclear fraca
- d) Não sei a resposta

22. Qual a partícula mediadora da força que mantém os prótons unidos no núcleo?

- a) fótons
- b) elétrons
- c) píons
- d) Não sei a resposta

23. O que são partículas virtuais?

- a) partículas mediadoras da carga elétrica
- b) partículas que possuem um tempo de vida curto
- c) partículas mediadoras da massa
- d) Não sei a resposta

24. As partículas virtuais são baseadas em qual princípio físico?

- a) de energia
- b) de momento
- c) da incerteza
- d) Não sei a resposta

25. O que é vácuo?

- a) espaço com ausência de matéria
- b) espaço que contém uma quantidade mínima de energia
- c) espaço com ausência de ar
- d) Não sei a resposta

26. Qual foi o acontecimento que deu origem a matéria?

- a) o Big Bang
- b) a explosão de estrelas
- c) a explosão do sol
- d) Não sei a resposta

27. Como a matéria surge do vácuo?

- a) através da flutuação da energia
- b) através do choque de partículas
- c) através do acaso do universo
- d) Não sei a resposta

28. O que é teoria quântica de campos?

- a) Prevê que o universo todo é permeado por campos
- b) Prevê a existência de matéria quântica
- c) Prevê a existência de energia a partir de partículas
- d) Não sei a resposta

29. Quais as partículas podem ser descritas pela teoria quântica de campos?

- a) somente léptons

- b) somente quarks
- c) todas as partículas menos o gráviton
- d) Não sei a resposta

30. Todas as partículas sentem a presença de campos?

- a) sim, todas
- b) somente partículas com carga elétrica
- c) somente partículas com massa
- d) Não sei a resposta

## APENDICE B: Questionário avaliador sobre partículas e interações fundamentais

### Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Mestrado Profissional em Ensino de Física

Nome: \_\_\_\_\_ Turma/Série: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Caro Aluno,

Este questionário tem por objetivo avaliar a evolução na construção de seus conhecimentos após a aplicação do módulo didático sobre o tema partículas e interações fundamentais. As questões foram formuladas com quatro alternativas de respostas, sendo que a última apresenta à alternativa “**Não sei a resposta**”. Pense e escolha uma alternativa que lhe pareça mais correta de acordo com suas concepções.

1. Quais são as partículas elementares que formam o átomo?

- a) prótons e nêutrons
- b) prótons, nêutrons e elétrons.
- c) léptons e quarks
- d) Não sei a resposta

2. O átomo é formado por ..... No núcleo existem os hádrons, elementos mais pesados, que são formados por quarks. Uma possível combinação desses quarks forma o ....., que não pode ser considerado uma partícula elementar porque .....

- a) quarks e léptons;próton; não pode ser dividido.
- b) quarks e léptons ;próton; não possui uma função de onda unívoca.
- c) prótons, nêutrons e elétrons;elétron; não possui uma função de onda unívoca.
- d) Não sei a resposta

3.Em relação aos léptons que formam o átomo, a partícula que representa os léptons é o ..... . Esta partícula é considerada elementar pois .....

- a) elétron; são indivisíveis.
- b) elétron; possui função de onda unívoca
- c) quarks; possui função de onda unívoca
- d) Não sei a resposta

4) Os nêutrons são partículas com carga nula e se localizam no núcleo do átomo. Os nêutrons podem ser considerados

- partículas elementares, pois são indivisíveis.
- partículas elementares, pois não possuem carga elétrica.
- partículas não fundamentais, pois são constituídas por quarks e não apresentam uma função de onda unívoca.
- Não sei a resposta

5. A experiência da fenda dupla, caracteriza os elétrons com um comportamento de:

- uma partícula
- uma onda
- de partícula e onda ao mesmo tempo
- Não sei a resposta

6. Os modelos atômicos passaram por evoluções e revoluções científicas surgindo sempre novos modelos mais eficientes. Em todas as evoluções pode-se afirmar que estes modelos foram construídos através de:

- Atividades experimentais baseadas nas observações do homem
- Apenas por construções matemáticas
- Construções matemáticas com confirmação experimental.
- Não sei a resposta

7. Partículas elementares no mundo científico possuem uma definição diferente a que os gregos postularam. Segundo a Física de Partículas uma partícula elementar é definida como:

- Uma função de onda unívoca
- um conjunto de elétrons
- a menor porção de matéria
- Não sei a resposta

8. A construção de modelos que criam partículas é feita através de dois métodos, um é construção matemática abstrata e o outro é:

- atividade experimental através de microscópio eletrônico de alta resolução
- atividade experimental com o uso de supertelescópios especiais
- atividade experimental através de câmara de nuvens, aceleradores de partículas e detectores de raios cósmicos.
- Não sei a resposta

9. Os prótons e nêutrons são formados por quarks. Estas partículas podem ser definidas como:

- a) a menor partícula da matéria
- b) íons eletrizados
- c) partículas fundamentais por apresentarem uma função de onda unívoca.
- d) Não sei a resposta

10. O nêutron é composto de três quarks..... . A combinação de quarks para o próton é ..... . De acordo com o modelo padrão existem um total de ..... quarks.

- a) uud, udd , dois
- b) uuu , dds, três
- c) udd, uud, seis
- d) Não sei a resposta

11. A interação nuclear forte é baseada em uma nova propriedade chamada de carga:

- a) elétrica
- b) massa
- c) cor
- d) Não sei a resposta

12. Uma classificação das partículas está relacionada à massa dessa partícula. As partículas que apresentam uma massa pequena, como a do elétron, são classificadas como:

- a) hádrons
- b) mésons
- c) léptons
- d) Não sei a resposta

13. As partículas são classificadas como léptons podem ser representadas pelas partículas:

- a) elétron, Tau, Múon e seus neutrinos
- b) próton, elétron e seus nêutrons
- c) glúon, gráviton, fóton e seus bósons
- d) Não sei a resposta

14. Paul Dirac propôs a existência de partículas que se comportavam de uma maneira diferente, possuíam características iguais a de outras partículas, porém apresentavam a carga elétrica oposta, por exemplo, o elétron, possuía uma partícula com mesmas características porém com carga positiva, o pósitron. Esta parte da matéria é classificada como:

- a) antimatéria
- b) matéria negativa
- c) matéria positiva
- d) Não sei a resposta

15. De acordo com a teoria proposta por Paul Dirac é correto afirmar que todas as partículas têm antipartículas?

- a) não
- b) sim
- c) às vezes
- d) Não sei a resposta

16. O pósitron é a antipartícula do:

- a) próton
- b) nêutron
- c) elétron
- d) Não sei a resposta

17. Com a evolução dos estudos na Física de partículas foi criada uma tabela de partículas elementares. Esta tabela é conhecida como..... e foi concebida através de.....:

- a) tabela periódica; uma teoria simples baseada em observações químicas
- b) modelo padrão; uma teoria baseada em matemática
- c) modelo padrão; uma teoria unificando a matemática ao experimento que descreve atualmente a estrutura da matéria.
- d) Não sei a resposta

18. Este modelo padrão organizou as partículas em partículas elementares, De acordo com este modelo padrão as partículas elementares são:

- a) Elétrons, prótons e nêutrons.
- b) Elétrons e prótons
- c) quarks e léptons
- d) Não sei a resposta

19. O modelo organizou todas as interações em quatro interações fundamentais. Estas interações são:

- a) Peso, atrito, elástica e atômica
- b) eletromagnética, nuclear forte, nuclear fraca e gravitacional
- c) eletromagnética e gravitacional eletromagnética, nuclear forte, nuclear fraca e gravitacional
- d) Não sei a resposta

20. A TQC( Teoria Quântica de Campos) classifica as partículas de acordo com seu spin. Esta classificação divide as partículas como ....., sendo que as partículas que formam os campos são os..... . Estas partículas que formam os campos são chamadas de partículas mediadoras das forças fundamentais. Estas partículas são:

- a) Férmions e bósons; bósons; glúons, fótons, partículas Z e W e o gráviton.
- b) elétrons e prótons; prótons; bósons e férmions.
- c) Férmions e prótons; bósons; elétrons, neutrinos, prótons e nêutrons.
- d) Não sei a resposta

21. Qual a interação que mantém os quarks estáveis formando os prótons e nêutrons e qual é a partícula mediadora desta interação?

- a) Eletromagnética, fóton
- b) Nuclear forte fundamental, glúon
- c) nuclear forte residual , pión
- d) Não sei a resposta

22. Qual a interação que mantém os prótons e nêutrons estáveis no núcleo a qual é a partícula mediadora desta interação?

- a) Eletromagnética, fóton
- b) Nuclear forte fundamental, glúon
- c) nuclear forte residual , pión
- d) Não sei a resposta

23. Em relação ao principio da incerteza, a relação de energia e tempo  $\Delta E \times \Delta t$ , existe a possibilidade da partícula sobreviver por um tempo muito pequeno ou muito longo. Estas partículas são chamadas de :

- a) partículas virtuais
- b) partículas reais
- c) partículas bosônicas

d) Não sei a resposta

24. As partículas virtuais violam a conservação de energia?

a) Sim

b) Não

c) as vezes

d) Não sei a resposta

25. Em relação ao vácuo quântico, ele é:

a) vazio

b) preenchido por campos de forças que por sua vez é formado por partículas

c) matéria com ausência de ar

d) Não sei a resposta

26. A teoria mais aceita em relação ao início do universo é a teoria ..... . Quando ocorreu este fenômeno, o universo era dominado apenas pela..... e imperavam..... temperaturas. Após ....., a radiação começou a se transformar em .....e se formar o acontecimento que marca este fato é?

a) da explosão do sol; radiação; altas; o resfriamento, matéria.

b) da explosão de estrelas; matéria; baixas, aquecimento; radiação.

c) do Big Bang, radiação, altas; o resfriamento; matéria

d) Não sei a resposta

27. A energia é um conceito abstrato em Física. Mas sabemos que esta grandeza direciona toda Física, que começa com o início do universo e sua evolução até os dias de hoje. Em relação à TQC, podemos observar uma relação entre campos, energia e matéria . Esta relação pode ser expressa através de afirmativa:

a) os campos transportam energia, a energia sofre flutuações e origina a matéria.

b) os campos criam a energia, esta energia diminui e origina a matéria

c) As partículas criam a energia e os campos

d) Não sei a resposta

28. Em relação à TQC, os campos de forças são formados por:

a) linhas de força

b) partículas mediadoras

c) vácuo do espaço

d) Não sei a resposta

29. A matéria interage através dos campos de forças e a matéria é formada por partículas, então tudo em nossa volta é formado por campos e partículas. As partículas que compõem a matéria e os campos são:

- a) somente léptons e bósons
- b) somente quarks e férmions
- c) léptons, quarks e bósons
- d) Não sei a resposta

30. As partículas interagem formando e unindo a matéria. Esta interação ocorre:

- a) através dos campos
- b) pelo contato entre as partículas
- c) através de uma ação à distância
- d) Não sei a resposta.

## **APENDICE C: Produto Educacional**

---

# FÍSICA DE PARTÍCULAS

---

**Atividades  
Investigativas  
no  
Ensino Médio**

**Autores:**

**Dr. Celso de Camargo Barros Jr.**

**Jonas Bakalarczyk**

---

# Prefácio

Atualmente vivemos em uma época de constantes avanços, tanto científicos como tecnológicos: A cada dia que passa obtemos mais e mais informações a respeito do Universo em que vivemos, frequentemente nos deparando com notícias de descobertas físicas anunciadas na mídia, desde partículas fundamentais, como o bóson de Higgs, a chamada “partícula de Deus”, no LHC (large hadron collider, ou grande colisor de hádrons), ou mesmo indícios a respeito dos primeiros instantes do Universo, a partir de análises de dados experimentais provenientes do grande colisor e de muitas outras experiências que vêm sendo realizadas, tanto na terra como no espaço. Notícias a respeito da detecção de ondas gravitacionais, existência de matéria e energia escura, são só alguns exemplos desses anúncios, que são temas de fronteira no estudo da Física atual.

Vemos que diversos termos, tais como hádrons, bósons, antimatéria ou mesmo física quântica, entre muitos outros, frequentemente são usados nas mais diversas ocasiões, mas é com grande pesar que vemos que esse tipo de conhecimento não é nem de longe discutido de modo satisfatório no ensino médio (muitas vezes nem mesmo apresentado). Na verdade, o que transparece, é que o senso comum leve a pensar que não deva ser abordado, talvez por dificuldades no seu entendimento, partindo do argumento que sejam temas muito complexos para alunos do ensino médio, talvez pela falta de material adequado para esse fim, ou talvez por simplesmente não parecer ser um assunto que tenha aplicações práticas cotidianas. Nesse ponto podemos nos perguntar, seria o futuro tão desprezível assim?

Com o objetivo de tratar de vários desses temas, e principalmente, dar uma visão geral da Física das partículas elementares para os alunos de ensino médio é que esse projeto foi desenvolvido. Vemos que nesse livro, vários temas são desenvolvidos de forma simples e acessível para os estudantes, com diversos exemplos e recursos, visando dar aos alunos um entendimento progressivo dos principais conceitos e fenômenos, partindo de forças e campos, passando pela física quântica, até chegar à física das partículas elementares e na representação de suas reações através de diagramas de Feynman, assuntos que muitas vezes são realmente inacessíveis, tanto por sua dificuldade conceitual como por sua dificuldade matemática. A grande virtude deste trabalho é exatamente essa, apresentar de forma simples e direta essa parte tão importante da Física atual. Apesar de todas as dificuldades para que esse tipo de estudo seja realizado no ensino médio, não tenho dúvidas que um trabalho desenvolvido com o auxílio do presente volume possa causar um efeito permanente na visão da Física dos estudantes.

Professor Dr. Celso de Camargo Barros Jr.

## SUMÁRIO

### UNIDADE 1: UMA BAGUNÇA DINÂMICA

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1 – Forças e Campos</b> .....                                   | <b>6</b>  |
| Atividade 1: Descobrimo uma nova interação.....                             | 6         |
| Atividade 2: Interação por contato ou à distância .....                     | 7         |
| Atividade 3 : Campos Quânticos .....                                        | 12        |
| Atividade 4: Características da força Forte .....                           | 14        |
| <b>Capítulo 2 – Princípio da incerteza</b> .....                            | <b>15</b> |
| Atividade 1: Natureza ondulatória da luz.....                               | 15        |
| Atividade 2: Objetos quânticos x objetos clássicos .....                    | 15        |
| <b>Capítulo 3 – Matéria x Antimatéria</b> .....                             | <b>16</b> |
| Atividade 1: Determinando a trajetória da Antimatéria .....                 | 16        |
| Atividade 2: Atividade 2: Explorando o conceito de energia negativa ..      | 17        |
| Atividade 3 : Teoria e experimento um casamento de sucesso .....            | 17        |
| Atividade 4: Câmara de Névoa .....                                          | 19        |
| <b>Capítulo 4 – Matéria X Radiação</b> .....                                | <b>20</b> |
| Atividade 1: Condições iniciais do universo .....                           | 20        |
| Atividade 2: Matéria x Radiação .....                                       | 20        |
| Atividade 3 : Grandezas fundamentais: Energia e momento .....               | 22        |
| Atividade 4: Leitura e interpretação de texto .....                         | 23        |
| Atividade 5 : Qual é a quantidade mínima de energia? .....                  | 24        |
| <b>Capítulo 5 – Confronto histórico: Gregos x Físicos</b> .....             | <b>26</b> |
| Atividade 1: Partícula elementar na Física .....                            | 26        |
| Atividade 2: O que é elementar .....                                        | 26        |
| Atividade 3 : O spin .....                                                  | 28        |
| Atividade 4: Organizando partículas pelo spin .....                         | 28        |
| <b>Capítulo 6 – Interação eletromagnética</b> .....                         | <b>31</b> |
| Atividade 1: Cargas, campos, interação e fótons .....                       | 31        |
| Atividade 2: Virtual x Real .....                                           | 31        |
| Atividade 3 : Uma colisão explosiva .....                                   | 33        |
| <b>Capítulo 7 – Interação Nuclear Forte</b> .....                           | <b>34</b> |
| Atividade 1: Construção do nêutron e do próton .....                        | 34        |
| Atividade 2: Construindo o quark colorido.....                              | 36        |
| Atividade 3 : Glúon : A cola colorida .....                                 | 36        |
| Atividade 4 : Mésons = Quark + antiquark .....                              | 38        |
| Atividade 5 : Efeito residual: Prótons se atraem! .....                     | 38        |
| Atividade 6 : Próton atrai Nêutron também! .....                            | 40        |
| Atividade 7 : Píon a partícula que Yukawa propôs! .....                     | 40        |
| <b>Capítulo 8– Interação Nuclear Fraca</b> .....                            | <b>41</b> |
| Atividade 1: Decaimento Beta .....                                          | 41        |
| Atividade 2: Simetrias para resolver o problema do decaimento $\beta$ ..... | 41        |
| Atividade 3 : Mudança de sabor .....                                        | 45        |
| Atividade 4 : Bóson massivo .....                                           | 46        |
| <b>Capítulo 9– Interação Gravitacional</b> .....                            | <b>48</b> |
| Atividade 1: O quantum da gravidade .....                                   | 48        |
| Atividade 2: Gráviton, cadê você? .....                                     | 48        |
| Atividade 3 : Relatividade x Quântica .....                                 | 50        |

## UNIDADE 2: ORGANIZANDO A BAGUNÇA

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1 – O Modelo Padrão</b> .....                            | <b>52</b> |
| Atividade 1: Hádron ou Lépton? .....                                 | 52        |
| Atividade 2: Organizando objetos pelas características .....         | 53        |
| Atividade 3 : Organizando as partículas pela interação .....         | 54        |
| Atividade 4: Organizando pelas partículas com os bósons mediadores . | 54        |
| Atividade 5 : Quarks, Léptons e Bósons! Enfim o modelo padrão .....  | 55        |
| <b>Capítulo 2 – Afinal, o que é massa?</b> .....                     | <b>56</b> |
| Atividade 1: Comparando massas .....                                 | 56        |
| Atividade 2: Adicionando campos e percebendo propriedades .....      | 57        |
| Atividade 3 : Quebrando uma simetria .....                           | 57        |
| Atividade 4: Conhecendo o CERN .....                                 | 58        |
| Atividade 5 : Atualizando o modelo padrão .....                      | 59        |
| <b>Capítulo 3 – Transição de fase e Quebra de simetria</b> .....     | <b>60</b> |
| Atividade 1: Partículas também “congelam” .....                      | 60        |
| Atividade 2: Unificando forças .....                                 | 61        |

## UNIDADE 3: DIAGRAMAS DE FEYNMAN

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1 – Diagramas de Feynman</b> .....                      | <b>64</b> |
| Atividade 1: As regras do jogo .....                                | 64        |
| <b>Capítulo 2 – Diagramas de Interações Fracas</b> .....            | <b>66</b> |
| Atividade 1: Decaimento beta .....                                  | 66        |
| Atividade 2: Decaimento beta completo .....                         | 67        |
| <b>Capítulo 3 – Diagramas Interações Eletromagnéticas</b> .....     | <b>68</b> |
| Atividade 1: Absorção e emissão de Fótons .....                     | 68        |
| Atividade 2: Aniquilação e criação de pares .....                   | 69        |
| Atividade 3 : Interação entre cargas positivas e negativas .....    | 70        |
| <b>Capítulo 4 – Diagramas de Interações Fortes</b> .....            | <b>71</b> |
| Atividade 1: Diagramas para os quarks .....                         | 72        |
| Atividade 2: Diagramas da força nuclear para próton e nêutron ..... | 72        |
| Atividade 3 : Decaimento da partícula $\Delta^0$ .....              | 73        |
| Atividade complementar: .....                                       | 74        |

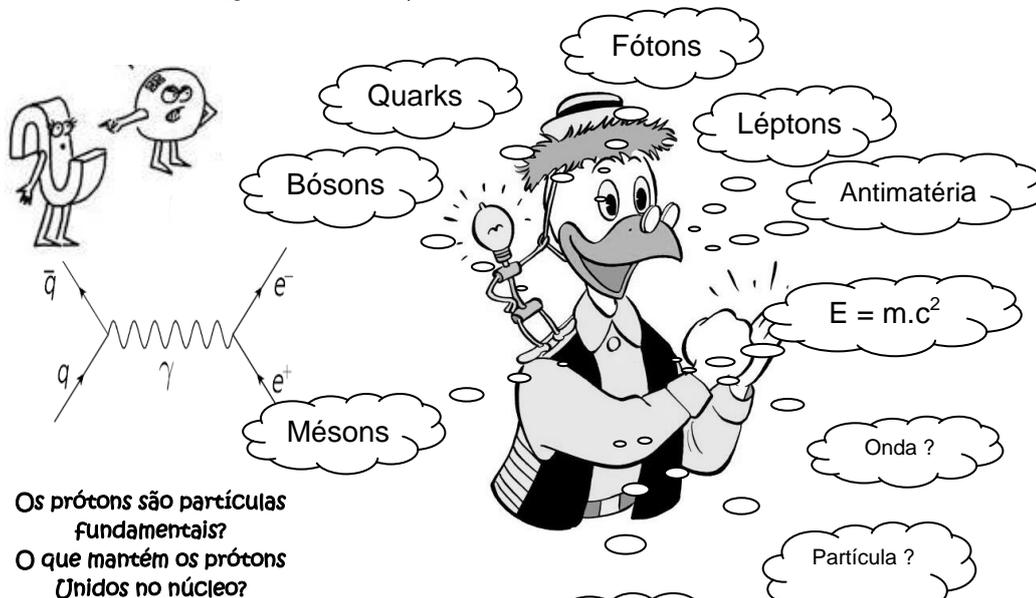
|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>Considerações Finais</b> ..... | <b>75</b> |
|-----------------------------------|-----------|

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b> ..... | <b>76</b> |
|-------------------------------|-----------|

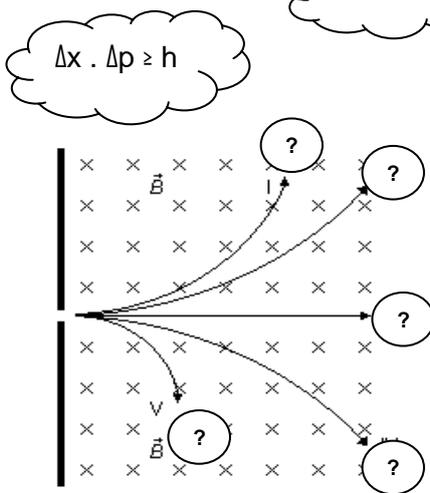
# Unidade 1

## Uma bagunça Dinâmica

Como a matéria permanece unida?  
Como as peças fundamentais da natureza interagem?  
Qual é o modelo que a Física utiliza para explicar esta união?



Qual o significado de real e virtual  
No mundo quântico?



## Capítulo 1 – Forças e campos

Como a matéria permanece unida?  
Como as peças fundamentais da natureza interagem?  
Qual é o modelo que a Física utiliza para explicar esta união?

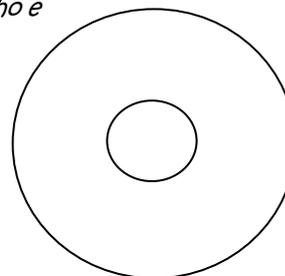
### Atividade 1: Descobrindo uma nova interação

O hidrogênio é o mais abundante dos elementos químicos, constituindo aproximadamente 75% da massa elementar do Universo. É um elemento químico com número atômico  $Z=1$  e representado pelo símbolo  ${}^1\text{H}$ . O hidrogênio é o elemento menos denso, sendo inflamável, incolor, inodoro, e insolúvel em água. O hidrogênio neutro possui um próton em seu núcleo e um elétron na sua eletrosfera.

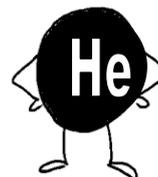


Distribua no átomo a seguir o elétron e o próton no desenho e discuta com seu grupo as seguintes questões:

- 1- Existe uma força atuando entre o elétron e o próton?
- 2- Se existir uma força ela é atrativa ou repulsiva?
- 3- Como você poderia representar esta força atuando nas cargas?

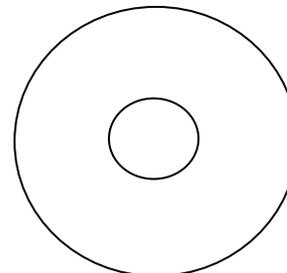


O hélio (em grego: *Hélios* é a personificação do Sol na mitologia grega) é um elemento químico de símbolo  ${}^4\text{He}$ , e que possui número atômico  $Z=2$ . À temperatura ambiente, o hélio encontra-se no estado gasoso. É um gás monoatômico, incolor e inodoro. O hélio tem o menor ponto de evaporação de todos os elementos químicos, e só pode ser solidificado sob pressões muito grandes. É o segundo elemento químico em abundância no universo, atrás do hidrogênio, mas na atmosfera terrestre encontram-se apenas traços, provenientes da desintegração de alguns elementos.



Distribua no átomo de Hélio os elétrons, os prótons e os nêutrons no desenho e discuta com seu grupo as seguintes questões:

- 1- Existe uma força atuando entre o elétron e o próton?
- 2- Esta força ela é atrativa ou repulsiva? Represente esta força.
- 3- Existe uma força atuando entre o próton e o nêutron no núcleo?  
E entre os dois prótons?
- 4- Esta força é atrativa ou repulsiva? Represente esta força.
- 5- Então como os prótons ficam dentro ao núcleo?



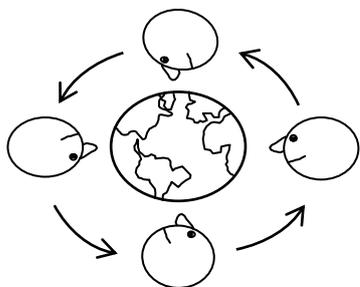
## Atividade 2: Interação por contato ou à distância?

O conceito de campo é uma das noções fundamentais da física. Este conceito se consolidou ao longo do século XIX, quando se revelou uma das mais importantes invenções desde o tempo de Newton. As atividades a seguir irão propor dois caminhos diferentes e convergentes através dos quais o conceito de campo começou a ser formulado. De um lado, consideraremos a noção de campo como algo responsável pela mediação da interação entre os corpos a uma certa distância um do outro e que poderia ser considerado como uma alternativa à ideia de *ação à distância*. Nas tarefas a seguir iremos discutir e construir a evolução do conceito de campo.

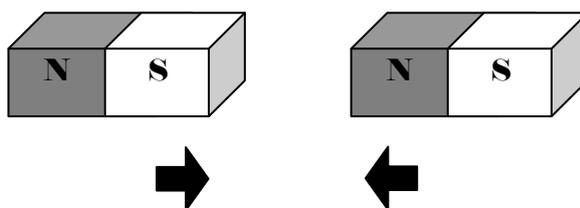


Discuta com seus colegas e classifique se estas ações ocorrem por contato ou à distância

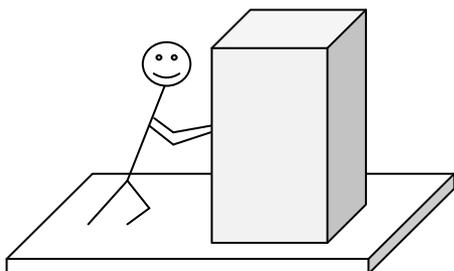
1 – Atração entre a Terra e a lua



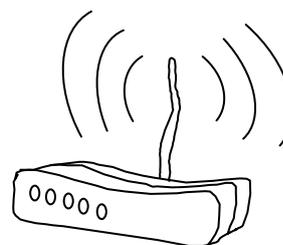
2 – Atração entre ímãs



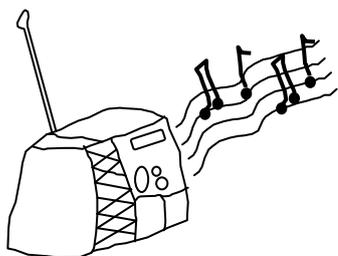
3 – Empurrando



4 – Sinal Wi-fi



5- Ouvindo som



6- Sentindo cheiro



## Afinal o que são campos na Física?

Como podemos interpretar o que são campos? Se você pensou em um campo de futebol, a resposta não é totalmente errada, porém precisa de alguns ajustes. Primeiro vamos fazer uma revisão histórica da origem e evolução desse conceito.

Uma dessas questões pelas quais a humanidade anseia por uma resposta desde a Antiguidade é, seguramente, a seguinte: de que maneira ocorrem as interações físicas na natureza? Como um corpo pode interferir no movimento de outro sem se tocar?

### Ideia de Lucrécio

*“Vou agora começar a explicar outro assunto, a dizer”. Por que leis naturais podem atrair ao ferro a pedra a que chamam os gregos magneto, nome que lhe designa a origem, por quanto se diz que provém de Magnésia. [...] É necessário primeiro que saiam desta pedra numerosos elementos ou uma corrente [átomos do magneto] que por seus golpes dissipe o ar que se encontra colocado entre a pedra e o ferro. Logo que o espaço se encontra vazio, logo que se despeja o lugar que está no meio, imediatamente os elementos do ferro, caindo, se lançam juntos no vácuo, de maneira que o próprio anel os segue e vai com toda a sua substância. [...]*

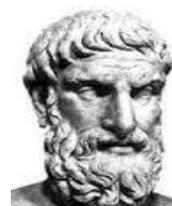


Figura 1.1.1

Lucrécio Caro, poeta epicurista, considera que a atração é devida ao fato de que, assim como em todas as coisas há um fluxo para fora de corpos minúsculos, assim também há um fluxo de átomos do ferro para o espaço entre este e a magnetita - um espaço esvaziado de ar pelos átomos da magnetita; e quando estes átomos começam a voltar para a magnetita, o ferro segue-os, pois os corpúsculos estão emaranhados uns nos outros.

### Ideia de Roger Cotes

Num artigo de 1873, denominado Ação e Distância, James Clark Maxwell afirma que foi o matemático e físico inglês Roger Cotes quem primeiro afirmou a doutrina da ação direta, em seu prefácio à 2ª edição do Principia, livro de Newton, que o mesmo editou durante a vida de Newton. Nesse citado

Artigo, Maxwell escreve que de acordo com Cotes:

*[...] é pela experiência que aprendemos que todos os corpos gravitam. Não é de nenhum outro modo que aprendemos que eles têm extensão, que são capazes de mover-se ou que são sólidos. Portanto a gravitação tem tanto direito de ser considerada uma propriedade essencial da matéria quanto a sua extensão, a mobilidade ou a sua impenetrabilidade.*

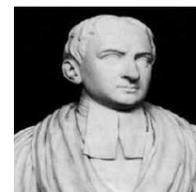


Figura 1.1.2

### Ideia de Isaac Newton

*Em 17 de janeiro de 1693, Newton escreveu a Bentley: [...] O Senhor algumas vezes fala da gravidade como sendo essencial e inerente à matéria. Peço-lhe não atribuir essa noção a mim, pois a Causa da gravidade é o que eu não pretendo saber, e, portanto levaria muito tempo para considerá-la.*



Figura 1.1.3

Em 25 de fevereiro de 1693, em outra Carta a Bentley, Newton escreveu:

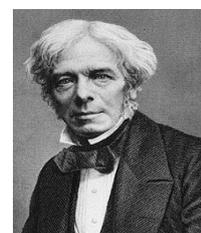
*[...] É inconcebível que a matéria bruta, inanimada, opere sem a mediação de alguma outra coisa, não material, sobre outra matéria e a afete sem contato mútuo, como deve ocorrer se a*

gravitação, no sentido de Epicuro, for essencial e inerente a ela; E é por esta razão que desejei que você não atribuísse a gravidade inata a mim. Que a gravidade devesse ser inata, inerente e essencial à matéria de modo que um corpo pudesse atuar sobre outro a distância através de um vácuo, sem a mediação de qualquer coisa, por cujo intermédio sua ação e força pudesse ser transmitida de um corpo para outro é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem dotado de uma faculdade de pensamento competente em questões filosóficas jamais possa cair nele. A gravidade deve ser causada por um agente que atua constantemente de acordo com certas leis; mas se esse agente é material ou imaterial é uma consideração que deixo para meus leitores.

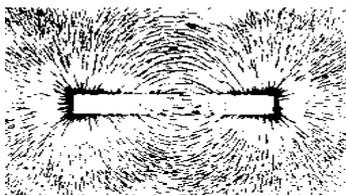
Nesse contexto de renovação que, em 1687, Isaac Newton (1642-1727) publica sua preciosa obra denominada *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*), na qual ele apresenta sua lei de gravitação universal que, matematicamente, costuma ser escrita na forma:  $F = Gm_1m_2/r^2$ . Através dessa obra, Newton explica como os corpos materiais interagem, mas não explica o mecanismo pelo qual esses corpos o fazem, ficando, portanto, um espaço para especulações. Sem explicar o mecanismo pelo qual os corpos se atraíam, a lei da gravitação universal permitia a suposição (não por Newton) de que as interações entre os corpos eram do tipo ação à distância, sem a necessidade de um meio para mediar tais interações. Por essa razão, muitos passaram a crer que também Newton defendesse a ideia de ação e distância.

### ***Ideia de Michael Faraday***

As contribuições de Faraday para o eletromagnetismo começaram em 1821, quando publicou na revista *Annals of Philosophy* suas experiências e teorias eletromagnéticas, que tinham aparecido no ano anterior, como consequência dos trabalhos de Hans Oersted e outros.



**Figura 1.1.4**



**Figura 1.1.5**

Faraday realizou várias experiências e observou figuras de limalhas de ferro produzidas por um ímã colocado sob uma folha de papel ou lâmina de vidro. Faraday passou a visualizar as forças magnéticas e elétricas como uma espécie de tubos de borracha ou linhas elásticas que se estendiam no espaço a partir de ímãs ou de corpos eletrizados e

assumiam várias configurações, as quais ele denominou *linhas de força*. Como essas linhas preenchiam o espaço vazio, este espaço passou a constituir-se em um *campo* de forças.

Essa concepção diferenciava-se de ação à distância, pois agora estas forças tinham uma geometria e, portanto necessitava de propriedades matemáticas e físicas. Imagine seus músculos, de alguma forma são excitados por um estímulo, e de alguma forma somos capazes de uma maneira desconhecida de responder, as fibras tendem a encurtar-se e ao mesmo tempo expandir lateralmente. Um estado de tração se produz no músculo e o membro se move. Por razões similares podemos considerar a concepção de Faraday de estado de tensão de um campo eletromagnético como um método de explicar a ação à distância por meio de uma transmissão contínua de força, mesmo que não saibamos como este estado de tensão se produz.

Faraday percebeu no meio um estado de tensão. As propriedades físicas desse meio, entretanto precisavam ser esclarecidas.

### ***O Éter***

Para Aristóteles (384-322 A.C.), o éter era um fluido puro e transparente que preencheria a chamada esfera celeste. Dentro da sua visão da natureza e de acordo com a dualidade de sua física (terrestre e celeste), Aristóteles aprimorou a ideia dos quatro elementos de Empédocles: terra, fogo, ar e água, e admitiu que tais elementos compusessem apenas as coisas da Terra, de forma que o espaço celeste seria formado por um quinto elemento - o éter. Sendo estranho ao mundo sublunar, o quinto elemento, a que ele chamou de éter, não poderia transformar-se em outras substâncias e seria incorruptível e eterno, como o mundo celeste. O éter seria uma substância que se distinguiria de todas as formas de matéria. Mais tarde, na Idade Média, os aristotélicos a denominaram de quinta essência.

É a partir dessas ideias que em 1678, Christiaan Huygens concebe o éter como meio propagador da luz. O fio condutor do raciocínio de Huygens foi a analogia com o som, que é uma vibração

mecânica em meios como o ar, os sólidos e os líquidos. Como o som não se propaga no vácuo, e a luz propaga-se nele, Huygens então precisou conceber a existência de um meio luminoso, que penetrava os poros de todos os corpos e enchia todo o espaço. Este meio seria para ele um fluido, batizado de éter luminífero, apoiado no éter aristotélico-cartesiano.

### ***Ideia de Maxwell***

Em 1873, Maxwell desenvolveu todo formalismo matemático para explicar as ideias de Faraday. Porém, em lugar de se concentrar nas linhas de força, como Faraday o fez, Maxwell gradualmente foi deslocando sua atenção para a ideia de uma substância que preencheria todo o espaço e que seria responsável pela transmissão dos efeitos elétricos e magnéticos, tendo incorporado ao seu éter, nesse processo, muitas das ideias que Faraday havia desenvolvido para as linhas de força.



**Figura 1.1.6**

O grande feito de Maxwell foi interpretar a luz como uma onda composta por campos magnéticos e elétricos unificando estes campos e um único campo chamado campo eletromagnético e atribuir a grandeza energia ao campo.

### ***Ideia de Einstein***

Baseado em um ponto de vista bastante diferente dos outros, Albert Einstein entra em cena em 1905 com a teoria da relatividade restrita. Einstein havia tomado conhecimento dos trabalhos de pesquisa sobre o éter, mas, diferentemente, não considerou a hipótese do éter na formulação da sua teoria, o que, naturalmente, gerou muita polêmica.

Em seu artigo de 1905, Einstein escreveu:

*“A introdução de um éter luminífero revelar-se-á supérflua visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um “espaço em repouso absoluto”.”*



**Figura 1.1.7**

Apesar de a teoria eletromagnética incluir o éter, e a teoria da relatividade restrita, de Einstein, serem, do ponto de vista dos resultados experimentais, praticamente equivalentes, em pouco tempo a teoria de Einstein prevaleceu sobre a teoria do éter.

Mas a discussão sobre a hipótese da existência do éter não se encerra. Onze anos mais tarde Einstein publica a teoria da relatividade geral. Em 1916, Einstein, numa Carta escreveu:

*“Eu concordo que a teoria da relatividade geral admite uma hipótese do éter assim como a teoria da relatividade especial”*

Vemos então que Einstein afirma existir duas formas de éter: o éter compatível com a teoria da relatividade e o éter clássico. Este novo éter depende, por exemplo, da influência da matéria em pontos próximos, ao passo que o éter clássico não dependia destas propriedades, ele apenas ocupava o espaço.

### ***O fim do Éter***

Experiências realizadas Michelson e Morley, em 1887, colocaram em séria dúvida a presença do éter no Universo e, aos poucos, a esperança de explicar o campo com base em concepções mecânicas para o éter, foi se enfraquecendo. O campo elétrico, por exemplo, era imaginado como sendo uma modificação de um meio elástico, análoga a uma tensão neste meio. A luz foi compreendida como uma onda. As atenções dos cientistas se deslocaram do conceito de éter para o conceito de campo. Foi Hertz em 1887 que comprovou as teorias de Maxwell, sem a necessidade do meio etéreo no qual as ondas se propagariam.

## Questões em Aberto

Como podemos perceber a Física necessita de uma grandeza que seja capaz de explicar questões envolvendo interações. O campo até o presente momento dá uma explicação satisfatória para interpretar eventos relacionados à interação. Mas será que consegue responder a tudo? Podemos pensar em campo e matéria como duas realidades diferentes? Quais são as propriedades físicas que distinguem campo e matéria?

Ao apreciar estas questões, devemos notar que, até 1905, não havia dificuldade em se distinguir campo e matéria. Todos concordavam que matéria tinha massa enquanto campo não tinha. Com a teoria da relatividade geral, entretanto, matéria passou a representar enormes reservatórios de energia e energia a representar matéria. Na teoria de Maxwell a onda de luz é um campo eletromagnético com o campo representando energia.

Você consegue imaginar então uma superfície separando distintamente campo e matéria?

### Tarefa 2

A figura a seguir esta relacionada algumas propriedades da atmosfera. Vamos construir o conceito de campo a partir de observações e possíveis relações. Discuta com seu grupo as questões propostas.

| ALTITUDE Km  | CAMADAS                                                                                                                                                                                                                                                                  | TEMPERATURA °C |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| ACIMA DE 500 | EXOSFERA  SPUTNIK                                                                                                                                                                      | 1000           |
| 500          | TERMOSEFERA  Auroras Boreais                                                                                                                                                          | -95            |
| 80           | MESOSFERA  RAIOS CÔSMICOS                                                                                                                                                             | -5             |
| 50           | EXTRATOSFERA<br>Camada de Ozônio                                                                                                                                                     | -60            |
| 12           | TROPOSEFERA    | 20             |

1. A atmosfera poderia ter relação com o conceito de campo? De que forma?
2. Você poderia associar mais de um campo neste espaço? Cite quais campos.
3. Você poderia relacionar um desses campos a uma grandeza física? Qual?
4. Algum desses campos está relacionado algum evento ou vários eventos? Cite o campo e a função ou evento.
5. Pode existir relação entre dois campos da atmosfera? Qual?

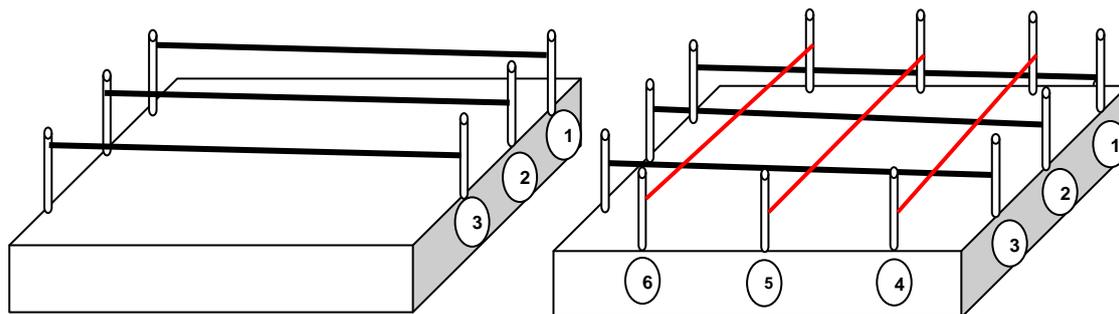
### Atividade 3: Campos Quânticos

Nesta atividade vamos investigar como os campos interagem. Para isso vamos construir nosso mundo quântico!



Monte a atividade experimental e discuta com seu grupo as questões propostas

Na base existem pregos para colocar borrachinhas. Distribua primeiro três borrachinhas de forma horizontal nas posições 1,2 e 3. Proceda da mesma forma para cada par vertical nas posições 4,5 e 6, de modo que as borrachinhas fiquem encostadas (figura 2).



Discussão:

1. Tente o seguinte: Escolha aleatoriamente uma borrachinha horizontal (1,2 ou três) e faça-a vibrar. O que acontece com as outras borrachinhas
2. Pense no seguinte: Se o espaço fosse “preenchido” por um montão dessas borrachinhas, inclusive o vácuo, esta perturbação movimentaria o espaço?
3. Fazendo uma possível analogia, este espaço de borrachinhas poderia representar um campo de borrachinhas? Por quê?
4. Imagine que as borrachas 1,2 e 3 representam partículas (elétrons, prótons) e as borrachas 4, 5 e 6 representam o campo imerso no espaço entre as partículas, o que você faria para as partículas se movimentarem?
5. Como você faria para movimentar a borrachinha dois (que representa uma partícula, por exemplo, um elétron), sem mexer nas borrachas 4,5 e 6, que representam o campo?
6. Se as borrachinhas não fossem numeradas poderíamos diferenciar quem são partículas e quem são os campos? Ou todas as borrachinhas são campos? Campos podem ser partículas?

### A teoria Quântica de Campos

No final de 1920 foi desenvolvida a Teoria Quântica de Campos, a famosa TQC e sofreu vários avanços ao longo das décadas seguintes. E uma das principais coisas que a TQC fez foi mudar nossa visão de mundo. Pois essa teoria nos fez ver um universo todo permeado por campos, que dão origem às partículas que formam nosso universo, colocando os campos em uma posição fundamental para compreendermos a natureza. O espaço não é totalmente vazio, ele é permeado por campos! Esta teoria postulou que existem dois tipos de campos: Um campo de partículas e um campo de mediação,

que nada mais é que outra partícula, esta partícula é chamada de partícula mediadora.

Na TQC, um pulso no campo de uma partícula provoca uma “vibração” de um campo mediador. Este campo mediador transfere para a outra partícula energia e movimento. A partícula mediadora então é a responsável pela interação entre partículas desse campo. Mais adiante veremos com mais detalhes as características destas partículas mediadoras.

Então o pulso do campo mediador transporta energia e momento para o campo da partícula que absorve. E assim sucessivamente os campos vão interagindo com as partículas.

Então do que são formados os campos? Existe diferença entre partícula e o campo? São dois entes físicos diferentes?

A TQC construiu uma teoria que explica que os campos são constituídos por partículas. A TQC diferencia as partículas que compõem a matéria e as partículas que formam o campo e fazem a interação.

Portanto agora você está pronto para responder o que são campos.

### Apenas uma teoria

A interação forte possui características muito particulares. Para manter as partículas nucleares agregadas a força forte deve superar a repulsão que surge quando os prótons positivamente carregados são “empacotados” no pequeno espaço do núcleo.

Embora a força nuclear seja a mais forte de todas as outras forças fundamentais, ela tem um alcance muito curto. Na verdade, a força forte só é efetiva na escala das dimensões do núcleo atômico, ou seja, seu alcance é de  $10^{-13}$  centímetros. Deste modo a força forte somente pode superar a repulsão elétrica quando os prótons estão suficientemente próximos para estarem quase se “tocando”.

Podemos, então, dizer que as forças fortes são aquelas responsáveis pelos fenômenos que ocorrem a curta distância no interior do núcleo atômico.

O trabalho pioneiro sobre as forças fortes foi realizado pelo físico japonês Yukawa em 1934, apresentou a ideia de que essa força de coesão nuclear entre os núcleons tinha como origem a troca de partículas entre eles. Com esse modelo, além das partículas elementares conhecidas até então os prótons, elétrons e nêutrons, a matéria passaria a ser constituída também por outra partícula, responsável pela mediação da força forte.

A existência desta partícula prevista por Yukawa colocou em xeque a ideia sobre quais eram as partículas elementares. Nos anos seguintes novas descobertas, principalmente com pesquisas em aceleradores de partículas, abriu caminho para a descoberta de outras partículas.

A hipótese de Yukawa sobre uma força que atraía os prótons e nêutrons revolucionou o modelo atômico. O modelo atômico de Bohr teve que ser revisto. Assim começou uma nova procura entre os físicos: Criar um novo modelo atômico que incluísse esta nova interação.



Figura 1.18

As principais características dessa força são:

- 1) Ser tão intensa quanto a repulsão elétrica no espaço estreito do núcleo para garantir a estabilidade e o equilíbrio.
- 2) Ter curto alcance, isto é, só se manifestar efetivamente dentro do núcleo, já que não há nenhuma evidência de sua presença fora dele.
- 3) Ser transportada entre as partículas do núcleo (prótons e nêutrons) por outra partícula, até então desconhecida.

#### Atividade 4: Características da força Forte

---

Com base na leitura acima responda as questões

1. A força elétrica é uma força caracterizada pela equação  $F = \frac{K \cdot Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$ . A força gravitacional é caracterizada por uma equação muito parecida  $F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2}$ . Em relação a estas duas forças, se a distância aumentar, o que acontece com a força? Ela tem alcance infinito?
2. A força forte que identificamos tem alcance infinito como a força elétrica e gravitacional? Ela tem limites? Quais?
3. A força nuclear forte possui algumas características que difere da força elétrica e gravitacional que são inversamente proporcionais ao raio. A força nuclear forte é proporcional à distância. Fazendo uma analogia assinala qual dos exemplos abaixo tem relação com a força nuclear forte e explique.  
( ) Atirando de estilingue  
( ) Levantando uma pedra

Explicação:

### Interação ou força?

Após a física ter abandonado o conceito de "ação à distância", foi introduzido o conceito de "campo". Cada partícula cria à sua volta uma perturbação, seu "campo", que é sentido pelas outras partículas. A Teoria Quântica de Campos (TQC) introduziu o conceito de "mediadores". Segundo a TQC cada uma das forças que existem na natureza é mediada pela troca de uma partícula que é chamada de "mediador".

Mas qual a diferença entre força e interação? São a mesma coisa?

A palavra interação no dicionário tem o seguinte significado:

**Quaisquer processos em que o resultado do estado de suas partículas é influenciado pela ação de outra partícula.**

A palavra força no dicionário tem o seguinte significado:

**O que altera ou provoca um movimento onde a velocidade de corpo varia, cessando seu estado de repouso.**

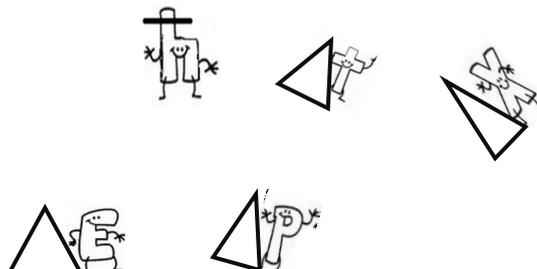
Pela definição parecem conceitos diferentes, mas se relacionam. A diferença é que se adotou o termo interação para o mundo microscópico enquanto força é mais utilizado no mundo macroscópico. É muito comum ouvirmos as duas palavras, força e interação. Não é errado em falar em força elétrica, porém seria mais apropriado dizer interação elétrica devido a sua definição. Vai ser muito comum quando você ler uma revista científica e usarem o termo força e logo adiante usarem o termo interação. Mas de qualquer forma é mais elegante usarmos o termo interação quando falarmos em partículas.

## Capítulo 2 -Princípio da incerteza

O que é uma partícula?  
 A partícula é matéria ou é um campo?  
 Qual a forma dos campos que formam a matéria?

### Atividade 1: Natureza ondulatória da luz

Vamos visitar o site  
<http://sites.google.com/site/professorbakalarczyk>  
 e desvendar mais um  
 mistério da matéria



### Atividade 2: Objetos quânticos x objetos clássicos

Discuta com seu grupo as seguintes questões:

A figura abaixo mostra um homem pescando onde são colocadas duas situações

1. Qual a situação que representa o peixe quântico? Por quê?
2. Na situação 2, poderíamos afirmar em qual posição o peixe se encontra?
3. Em relação ainda a situação 2, seria possível determinar a velocidade de cada parte do peixe com precisão?
4. De acordo com o princípio da incerteza  $\Delta E \times \Delta T$ , existe uma imprecisão na medida simultânea dessas grandezas. Se uma partícula vive por muito tempo, ela irá carregar uma quantidade de energia pequena ou grande? E se ela viver por pouco tempo, ela carrega consigo uma quantidade de energia grande ou pequena?

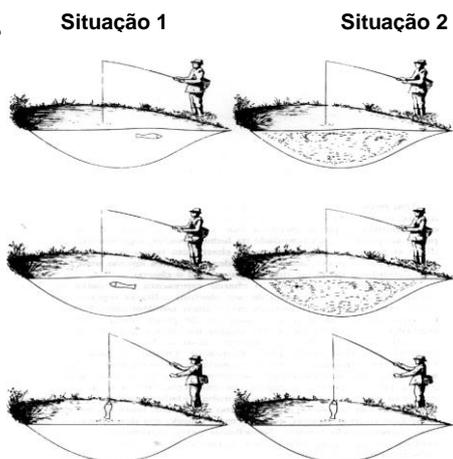


Figura 1.2.1

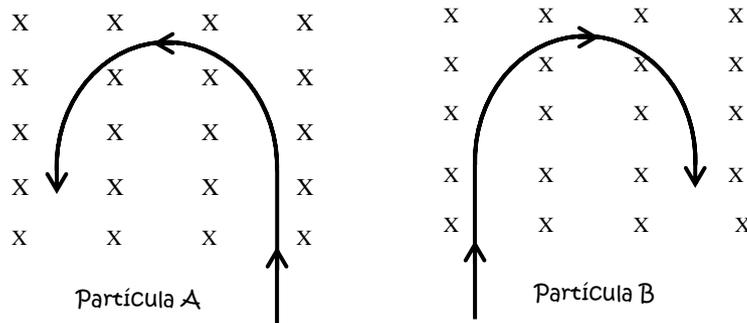


## Capítulo 3 Matéria x Antimatéria

O que é energia?  
 É possível uma partícula possuir energia negativa?  
 O que é antimatéria?

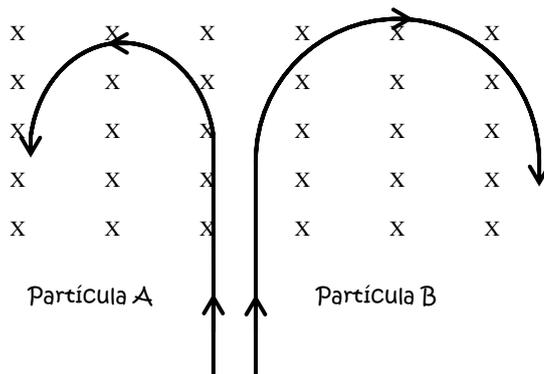
### Atividade 1: Determinando a trajetória da Antimatéria

→ As figuras abaixo representam partículas penetrando num campo magnético constante



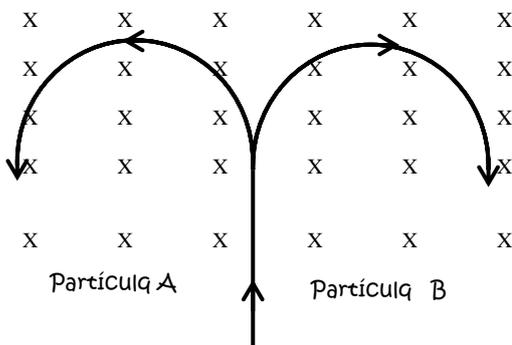
**Resposta:**  
 Com base na trajetória deixada pelas partículas, qual é a carga de cada partícula?  
 Quais partículas tem esta carga?

→ A figura abaixo representa as duas partículas acima penetrando no mesmo campo magnético constante



**Resposta:**  
 1. Quais as diferenças que você observa nas trajetórias deixadas pela partículas?  
 2. A massa influencia na trajetória?  
 3. Qual partícula tem maior massa?

→ A figura abaixo representa duas trajetórias penetrando no mesmo campo magnético constante



**Resposta:**  
 1. Quais as diferenças que você observa nas trajetórias deixadas pelas partículas?  
 2. As partículas possuem o mesmo raio?  
 3. Qual a carga da partícula A e da partícula B?  
 4. Qual partícula tem maior massa?  
 5. Pela figura é possível afirmar que antes das partículas entrarem no campo magnético eram uma coisa só?

## Atividade 2: Explorando o conceito de energia negativa

O conceito de energia é um dos conceitos mais abstratos em Física. Agora iremos inserir um conceito mais abstrato ainda: **Energia negativa!** As tarefas propostas a seguir tem a intenção de inserir este novo conceito de energia.



Discuta com seus colegas as seguintes questões

1. Qual é o valor da raiz quadrada de  $\sqrt{4}$ ?
2. Existem várias maneiras de calcular energia. A tabela abaixo mostra algumas delas

| Forma de Energia | Equação para calcular                                  |
|------------------|--------------------------------------------------------|
| Cinética         | $E_{\text{Cinética}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$        |
| Gravitacional    | $E_{\text{gravitacional}} = m \cdot g \cdot h$         |
| Elétrica         | $E_{\text{Elétrica}} = \text{Pot.} \cdot \text{tempo}$ |

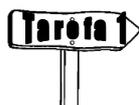
Em alguma delas é possível obter um valor de energia negativa dessa tabela? Como você interpretaria um valor negativo?

3. Se existisse uma equação para calcular energia do tipo  $E = \sqrt{A \cdot B}$ , é plausível dizer que exista duas soluções para este tipo de energia?
4. Em relação ao sinal quais seriam as soluções?

## Atividade 3: Teoria e experimento um casamento de sucesso

Pode-se dizer que a Física começou a ter sucesso a partir do momento em que a humanidade começou a ver e analisar os fenômenos naturais de modo racional, abandonando explicações místicas ou divinas. O modo racional de ver as coisas foi através de modelos físicos. Mas o sucesso destes modelos depende de quais fatores? O que é necessário para construir um modelo? O que é mais importante, a teoria ou o experimento?

Nas tarefas a seguir são propostas tarefas que ajudarão a esclarecer e compreender que os modelos físicos têm seus limites.



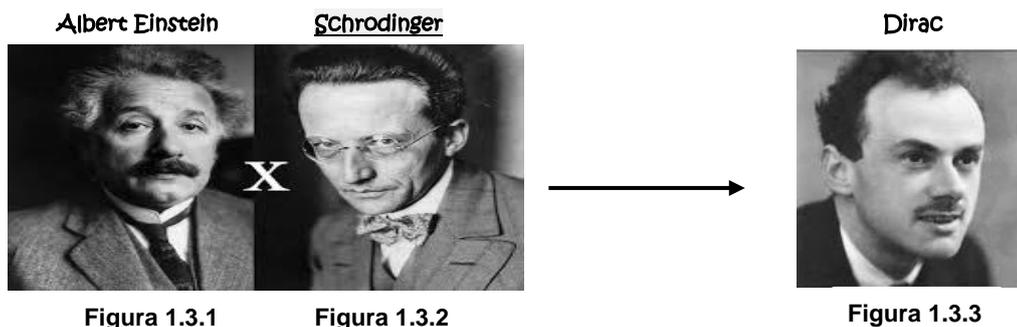
### Leitura e interpretação de texto

A descoberta da existência da antimatéria é um dos capítulos mais surpreendentes da física do século passado. Em 1928, o físico inglês Paul Dirac (1902-1984) apresentou uma teoria para o comportamento do elétron com base nas duas grandes teorias da física moderna: a mecânica quântica, que trata dos fenômenos no universo atômico e subatômico, e da relatividade restrita, que lida com fenômenos envolvendo velocidades próximas à da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

A equação de Dirac, como ficou conhecida, tinha uma solução que descrevia, com precisão, o comportamento do elétron. Mas outra apontava para algo completamente inusitado: um elétron com energia negativa. E isso não fazia, e ainda não faz o menor sentido.

Energia negativa? Depois de muitas especulações, nem Dirac teve a coragem de afirmar que aquela solução estava indicando a existência de uma partícula com a mesma massa do elétron, mas com carga elétrica oposta. Ou seja, um elétron positivo, mais tarde denominado pósitron.

A descoberta da existência da antimatéria é um dos capítulos mais surpreendentes da física do século passado. Em 1928, o físico inglês Paul Dirac (1902-1984) apresentou uma teoria para o comportamento do elétron com base nas duas grandes teorias da física moderna: a mecânica quântica, que trata dos fenômenos no universo atômico e subatômico, e da relatividade restrita, que lida com fenômenos envolvendo velocidades próximas à da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8$  m/s).



$$E = m \cdot c^2 \quad \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi = E\psi \quad \longrightarrow \quad E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Em 15 de março de 1933, foi publicado um artigo científico que mudaria para sempre a visão do homem sobre a matéria e a antimatéria. E foram necessárias 6 mil fotos para se conseguir escrevê-lo. A imagem ao lado rendeu um Nobel em 1936 para o seu autor, o físico norte-americano Carl D. Anderson, por ter detectado pela primeira vez uma antipartícula – no caso, um pósitron.

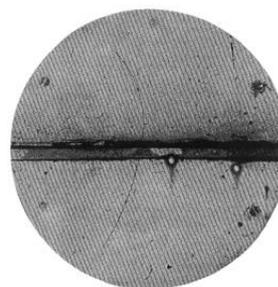


Figura 1.3.4

Anderson conseguiu fotografar o pósitron por meio de uma câmara de nuvens, que também é chamada de câmara de Wilson. Esta câmara é um recipiente lacrado, tomado por vapor d'água, que permite observar algumas partículas subatômicas. Como a engenhoca funcionou no experimento de Anderson? Raios cósmicos, preenchidos de partículas com carga elétrica, invadiram o recipiente. Por uma mudança repentina de pressão, o vapor foi condensado e, assim, foi possível enxergar rastros de gotículas deixados para trás pela passagem das partículas existentes nos raios cósmicos.

Um detalhe importante: toda a experiência aconteceu dentro de um campo magnético, gerado por um ímã gigantesco elaborado pelo próprio Anderson. Assim, dependendo da direção da curva apontada pelo rastro de água, seria possível observar a carga elétrica – positiva ou negativa – da partícula.



Figura 1.3.5

Em 1932, algo diferente aconteceu. A partícula descreveu uma trajetória diferente, o que denotava a sua carga positiva. Seria um próton, até então a única partícula positiva de que se tinha notícia. Não, a curva era diferente. Depois de 6 mil fotos já dava para saber: Não era um próton, o próton não faria a curva daquela maneira, devido a sua massa ser maior que a massa de um elétron. O comportamento era mesmo o de um elétron, um espantoso elétron positivo – o pósitron.

A parte curiosa da história é que Anderson não estava em busca do pósitron, estava apenas estudando o comportamento dos raios cósmicos. E mais: Anderson não conhecia as ideias do físico inglês Paul Dirac, que, no final da década de 1920, já havia postulado essa antipartícula.

Mas afinal de contas, o que é antimatéria? A resposta é: Simplesmente matéria!

O nome antimatéria é um pouco apelativo. Mas fiquem tranquilos, antimatéria tem as mesmas características da matéria e não vai destruir com o universo.

### Responda as questões

1. A equação de Dirac teria validade se Carl Anderson não tivesse encontrado o pósitron?
2. Em sua opinião o que é mais importante: A teoria ou o experimento?
3. Podemos concluir que a teoria só terá validade se existir um experimento para comprová-la?

### Atividade 4: Câmara de Névoa

---

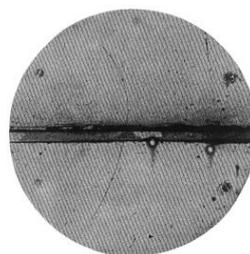
O vídeo a seguir mostra o funcionamento de uma câmara de nuvem.

**SESSÃO CINEMA**  
**Estrelando: Cloud Chamber!**  
**Endereço eletrônico-<https://youtube/pewTySxfTQk>**



Com base no vídeo que assistimos e no texto da atividade 3 responda as questões:

1. Neste momento podemos estar sendo metralhados por partículas subatômicas?
2. O que é necessário para enxergamos estas partículas?
3. No experimento de Anderson, a descoberta do pósitron, ele usou uma técnica parecida com essa? Quais eram as diferenças?
4. Observe a foto obtida por Anderson
  - a) Desenhe sobre a figura a sentido e direção do campo magnético
  - b) De acordo com a configuração que você fez do campo magnético, o pósitron vem de cima ou de baixo?
5. A teoria de Dirac teria validade se Carl D. Anderson não tivesse detectado o pósitron?
6. Para validar uma teoria física o que é necessário então?

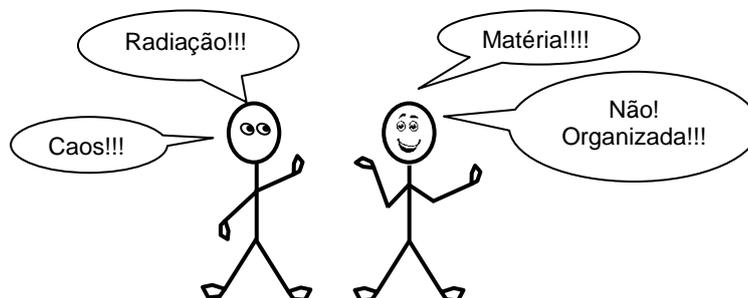


---

## Capítulo 4 – Matéria X Radiação

---

Qual a diferença entre matéria e radiação?  
Quem “nasceu” primeiro?



### Atividade 1-Condições iniciais do universo



Discuta com seu grupo as questões a seguir

1. Imagine um recipiente contendo água e sendo aquecido por uma fonte. As moléculas estão em movimento, pois a sua energia cinética varia devido à transferência de calor. Este movimento é organizado ou é caótico? Por quê?
2. Se aumentarmos mais a temperatura, as moléculas se organizam mais ou ficam cada vez mais caóticas?
3. Existe algum estado, ou alguma temperatura em que estas moléculas tendem a ficar mais organizadas? Qual?
4. Será que a matéria que existe no universo no início era organizada ou era um caos?

### Atividade 2- Matéria x Radiação

#### Leitura e interpretação de texto

O universo inicial era um lugar muito quente em torno de  $10^{32}$  K. De acordo com o modelo de Big Bang, pressupõe que toda a matéria existente no universo já estava lá, apenas muito comprimida e numa forma diferente do estado atual. Então o universo se expandiu e resfriou, até que hoje sua temperatura é cerca de 2,7 K. Podemos interpretar que no início e durante sua evolução, o universo era um gás de partículas com uma determinada temperatura. A energia associada a este gás é a energia cinética média dessas partículas, que é definida como  $KT$ , em que  $K$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura. Por outro lado temos a energia de repouso definida como  $mc^2$ . O conceito de matéria é definido sendo qualquer partícula que sua energia de repouso,  $mc^2$ , é grande em relação à energia cinética média das partículas,  $KT$ , assim, a velocidade dessas partículas é bem menor que a velocidade da luz. Por sua vez, radiação é qualquer partícula que sua massa de repouso é muito pequena quando comparada da  $KTe$ , conseqüentemente, sua velocidade é bem próxima a da luz.

Os cosmólogos definiram desta forma o que é matéria: depende da temperatura do sistema e, considerando que ele esfrie com o tempo, depende também do tempo. Com isso, logo no início do universo, quando a temperatura era de milhões de milhões de graus, o elétron era considerado como radiação pelos cosmólogos. Hoje, com o universo muito mais frio, o elétron está na categoria de matéria.

A radiação foi crucial ao desenvolvimento de um estágio mais primitivo do universo. A radiação destes instantes era a principal forma de energia. A matéria era a princípio quase inexistente e somente gradualmente tornou-se significativa quando o número de partículas elementares foram produzidas do instante posterior em diante.

Os fótons que foram libertados formavam uma nuvem de radiação que cobria o universo inteiro. Considerando que o universo estava principalmente vazio, não havia nada que capturasse estes fótons. Conseqüentemente, eles ainda devem estar hoje ao nosso redor. A teoria do Big Bang prevê que estes

fótons estão ainda em todos os lugares.

Mas o que é radiação? Quando se fala em radiação, as pessoas geralmente associam esta palavra com algo perigoso. O que elas não sabem é que estamos expostos diariamente à radiação. Radiação nada mais é do que a emissão e propagação de energia de um ponto a outro, seja no vácuo ou num meio material. Isto pode ocorrer através de fenômenos ondulatórios ou por partículas com energia cinética.

Mas da onde vem a radiação e as partículas? A resposta é que na teoria quântica as partículas podem ser criadas da energia, ou melhor, as partículas elementares foram criadas a partir da energia. O nosso universo é feito de energia!

## Tarefa 1 Perguntas

1. Qual era a temperatura inicial do universo? E hoje, qual é a temperatura do universo?
2. Qual o tipo de energia que poderia ser medida através da temperatura?
3. De acordo com a teoria da relatividade de Einstein qual é a outra energia?
4. Na tabela abaixo complete a tabela a relação matemática > maior que ou < menor que para definir o que é matéria e o que é radiação

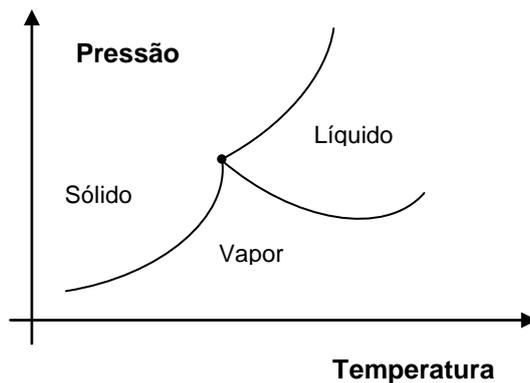
| Energia | Sinal | Energia | Consequência |
|---------|-------|---------|--------------|
| $kT$    |       | $mc^2$  |              |
| $kT$    |       | $mc^2$  |              |

5. Na tabela abaixo complete o comportamento da matéria e da radiação em relação à velocidade da luz

|          |  |
|----------|--|
| Matéria  |  |
| Radiação |  |

6. Qual é a grandeza física que define então o que é matéria ou não?

7. Escreva no gráfico em quais regiões existiria matéria e radiação

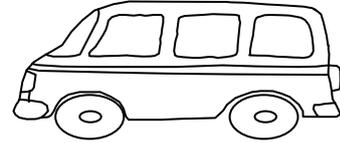


### Atividade 3- Grandezas fundamentais: Energia e momento

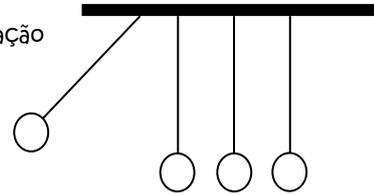
O conceito de energia e momento são um dos conceitos mais importantes para a Física. Para prosseguirmos a compreender a evolução dos conceitos de Física de Partículas vamos construir uma nova unidade de medida para estas grandezas. Apesar de você já ter visto estes conceitos, vamos recordar e abordar de outra forma estes conceitos.



Discuta com seus colegas e responda as questões



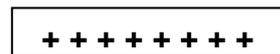
1. Qual é a cor do carro ao lado?
2. Mas o carro é esta cor ou a cor é uma propriedade associada ao carro?
3. Olhando para o mesmo carro, porém agora em movimento, ele tem energia? Qual?
4. Fazendo uma analogia entre cor e energia, o carro é energia ou energia é uma propriedade associada ao carro?
5. Qual outra propriedade que está associada ao Carro em relação movimento? Lembra-se do pêndulo de Newton?



Nesta tarefa vamos acrescentar uma nova medida de energia e momento. As questões a seguir irão ajudar a construir estas novas unidades de medida que passarão a ser utilizadas

1. Considere que o carro da tarefa 1 possua uma massa de 1000 kg e se movimenta com uma velocidade de 20 m/s. Qual é a energia associada a este movimento?

2. Qual é a unidade de medida desta energia?

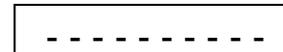


3. A figura ao lado mostra um elétron na presença de um campo elétrico. O elétron vai se movimentar entre as placas. A energia gasta pode ser calculada pela expressão:

$$E = q \cdot (V_a - V_b)$$



Se  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C e  $V_a = 1$  V e  $V_b = 0$ , qual foi a energia necessária para mover o elétron?



4. Se você utilizar unidades na equação, carga  $q$  é C (Coulomb) e potencial  $V$  (Volts), como ficaria a unidade de medida?

5. Agora no lugar de Coulomb substitua por  $e$  (que vem do elétron) como ficaria esta unidade de medida?

6. Qual seria o significado desta medida?

7. Existem múltiplos das medidas utilizadas em Física, como k, M, G e T. Então escreva a unidade da questão 5 acrescentando estes múltiplos. Como se lê então estas grandezas?

8. Se pegarmos a equação  $E = mc^2$  e isolarmos a massa na equação, qual seria a medida da massa usando a nova unidade de energia?

O elétron volt (eV) é uma unidade muito pequena de energia que é utilizado em campos de investigação da física, como física nuclear e de partículas, devido em parte ao fato de que a unidade padrão de energia, o Joule, é grande para ter significado claro uma unidade de base. O valor padrão de um elétron volt é calculado como sendo  $1,602 \times 10^{-19}$  joules, ou uma fração de 0,0000000000000000001602 de um joule. O valor é derivado a partir da energia necessária para mover um único elétron de um potencial elétrico através de um volt.

O uso de valores de elétrons volts também é difundido em outras áreas de pesquisa científica fundamental, onde, em certos cálculos, pode representar valores de temperatura ou radiação eletromagnética. Isto inclui astronomia, onde é utilizada para categorizar os comprimentos de onda de luz. Isto é porque o volt é uma medida fundamental da energia cinética, que pode ser aplicada praticamente a investigação ao nível molecular. Um valor de 13,6 eV iguala a energia necessária para ionizar um átomo de hidrogênio. Um valor de 4,2 eV é necessário para quebrar uma molécula de sal de sódio para a sua constituinte e elementos de cloro, o que faz de elétron-volt um termo de medição conveniente para muitas reações químicas comuns.

Apesar de sua ampla utilização na pesquisa, o elétron volt não é considerado como uma unidade do SI (sistema internacional de medidas), assim como o seu valor pode mudar de acordo com as condições e requisitos experimentais.

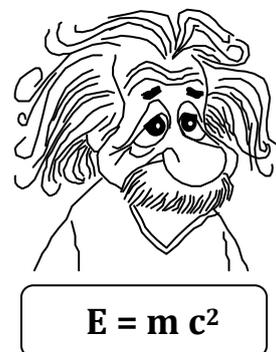
Ele também pode ser usado para representar uma unidade de massa em cálculos físicos para equilibrar unidades de energia na equação da relatividade especial de  $E = mc^2$ . Isto permite o cálculo da massa de partículas subatômicas, como prótons, onde um próton é equivalente a 938 milhões eV dividida pela velocidade da luz ao quadrado, que é expressa como Giga elétron-volt em forma abreviada como 0,938 GeV /  $c^2$ .

#### Atividade 4- Leitura e interpretação de texto

### QUAL A ORIGEM DA MATÉRIA

A Matéria é uma propriedade bastante exótica do universo. A sua melhor definição pode ser extraída da equação de Einstein  $m = E/c^2$ . A massa pode ser interpretada como uma espécie de transformação da Energia!

Esta transformação seria a responsável pela formação da radiação e da matéria. A transformação desta Energia teria começado nos primeiros segundos do bigbang, através de uma Energia que surgiu junto com o início do Cosmos e que a consolidação da matéria-energia teria evoluído do caos até atingir um estado de equilíbrio e de ordem, e que esta não é mais do que energia pura em movimento.



Como num processo de transição da água líquida para água a vapor, temos um sistema caótico que atinge um equilíbrio justamente ao transitar da fase líquida para a fase gasosa. Analogamente poderíamos supor que houve um processo semelhante na formação das primeiras partículas da matéria do nosso Universo. Estas primeiras partículas surgiram de uma "substância" ou uma forma de energia primitiva, existente nos primórdios da formação do nosso Universo.

Na Física Clássica, um campo Electromagnético ou Gravitacional são gerados numa determinada região do espaço a partir de uma carga ou uma massa de prova. Expostos a esses campos tem uma consequência relevante: sentem os efeitos de forças. Porém mesmo na ausência de cargas ou de massas, os campos existem, eles estão no espaço. Após o evento do bigbang não existiam cargas ou matéria, mas estaríamos perante um Campo Fundamental. Este Campo poderia ser traduzido como uma Energia ou Radiação.

Por exemplo, as linhas de forças geradas por um campo magnético, são superfícies que representam um armazenamento de energia. Estas linhas de energia constituem um Campo de Força, um campo virtual e invisível que só se manifesta na presença de uma carga; mas o campo sempre esteve lá, esperando se tornar bem real.

A questão é: Seria a Radiação ou a Energia uma "substância" existente no início do universo?

Vamos recorrer a duas grandezas que fundamentam leis de conservação: Energia  $E$  e quantidade de

movimento  $p$ .

Existe uma equação relativística que relaciona energia  $E$  e momento  $p$ :

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

Se considerarmos que este campo é formado por partículas com massa nula, ou seja  $m_0 = 0$ , a equação acima se reduz a:

$$E = p \cdot c$$

Considerando que as altas energias deste universo, preenchido por radiação, tornaria essas partículas em partículas virtuais altamente energéticas e que a maior parte da sua energia seria usada para o seu movimento frenético, quicando de um lado para o outro.

Isolando o momento  $p$  da equação acima:

$$p = E/c$$

Esta equação leva a uma conclusão: Quantidade de movimento é a Energia em movimento! Este era o estado inicial do nosso Universo! Quem sabe o Momento e Energia foram as grandezas verdadeiramente fundamentais. Mas mais fundamental é a ideia de campo! A energia e quantidade de movimento estão associadas a esta grandeza que chamamos de campo. Os campos carregam toda informação do sistema, Este seria o processo de formação das partículas fundamentais! A energia contida no campo é responsável por criar partículas!

O universo é permeado por campos, estes campos geram geram partículas e governam suas interações, que por sua vez unem a as partículas, dando origem a matéria e a sua dinâmica.

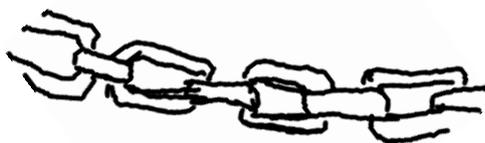
## Quebrando a cabeça...

1. Na sua opinião qual é a grandeza fundamental para a existência de Partículas?
2. Qual é a grandeza física que dá origem ao movimento?
3. Quem veio primeiro: a energia ou os Campos?



### Atividade 5- Qual é a quantidade mínima de energia?

A figura mostra uma corrente. Suponha que ela tenha um comprimento infinito!



Discuta com seu grupo as questões propostas

1. Você concorda que o Comprimento da Corrente representa uma grandeza Contínua?

2. Qual seria a menor parte que forma a corrente? Esta parte é contínua ou discreta?
3. A energia é uma grandeza contínua ou discreta?
  
4. o que você entende por quantizar?
  
5. Os campos que vimos na TQC, são quantizados?
  
6. Como poderíamos chamar esta pequena quantidade de energia armazenada nos campos?

### O quantum

Segundo o físico alemão Max PLANCK (figura 1.4.2), a energia radiante de frequência  $f$ , só pode ser emitida ou absorvida em quantidades discretas (quantum), múltiplos inteiros de  $hf$ , sendo  $h$  a constante universal de Planck ( $6,6 \times 10^{-34}$  J.s).



Figura 1.4.1

$$E = h \cdot f$$

Assim para cada campo, existe uma quantidade mínima de energia. Esta quantidade mínima é chamada de **quantum**. Dizemos então que este tipo de grandeza é quantizada. Essa quantização é um pulso mínimo no campo que é uma partícula. Mais adiante veremos que para cada campo, existe uma interação que esta associada a uma partícula.

---

## Capítulo 5 - Confronto histórico: Gregos x Físicos

---

Qual o significado de partícula elementar para a Física?

É o mesmo conceito que os gregos tinham sobre a partícula elementar?

Será que esta relacionada à geometria?

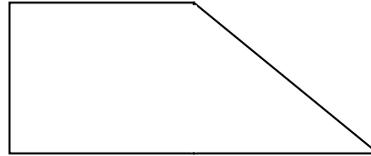
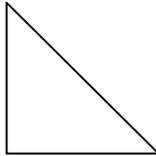
### Atividade 1- Partícula elementar na Física

---



Discuta com seu grupo as seguintes questões

1. Observe as figuras geométricas abaixo. Quais as diferenças que elas possuem?



2. Pensando em propriedades matemáticas, por exemplo, na área dessas figuras, as equações para calcular a área são iguais? Quais são elas?

3. Você conseguiria construir o triângulo a partir do quadrado? E o quadrado a partir do triângulo? De que forma? Regras: Você não pode cortar nenhuma figura, mas pode repetir a figura para construir a outra.

4. Agora tente construir o trapézio. Quantos triângulos você usou para construir o trapézio?

5. Qual dessas figuras pode ser considerada elementar?

### Atividade 2- O que é elementar

---



#### Como se define o que é uma partícula elementar em Física

O conceito que define uma partícula elementar em Física é de natureza abstrata e matemática. Todas as partículas elementares são descritas por objetos matemáticos: as suas funções de onda, a partir das quais são extraídas informações sobre a dinâmica de tais partículas como momento, energia, spin, carga elétrica e outras propriedades.

A função de onda que descreve uma partícula elementar é diferente da função de onda de outras partículas. Essa linguagem é ditada pela mecânica quântica, sendo bem complexa sua matemática.

Como foi visto, o elétron possui propriedades ondulatórias. A partir desta definição os físicos observaram que existem partículas que a função de onda é particular, como uma impressão digital, nenhuma outra partícula possui esta função de onda, é como você pensar nas figuras da atividade acima, o triângulo possui forma única, isto pode ser caracterizado através da sua área, do número de arestas, seus ângulos, ou seja, propriedades matemáticas que lhe conferem uma particularidade. Já as outras figuras são combinações, ou seja, a partir do triângulo que no nosso exemplo é elementar, podemos construir outras figuras, que irão mudar suas características matemática, porém irão carregar

peculiaridades do triângulo.

Os físicos idealizaram um modelo para as partículas baseado em propriedades matemáticas! Portanto existem partículas que tem uma função de onda particular e outras partículas são funções de onda que são combinações como o quadrado e o retângulo.

A partir de 1932, muitos cientistas acreditavam que o problema da estrutura básica da matéria estava resolvido. O átomo era constituído por três partículas: O elétron, o próton e o nêutron.

A euforia não durou muito tempo. No final da década de 30 começou um período de descobertas de novas partículas que se mantém até hoje. O avanço da mecânica quântica e de tecnologias aplicadas em novos experimentos resultaria em um verdadeiro zoológico de partículas. Mas como foram descobertas? Quais os métodos e evidências foram utilizados para comprovar estas novas partículas? É o que veremos daqui para frente.

Para os gregos o conceito de partícula elementar é que fosse uma partícula indivisível, a menor partícula possível. A própria definição de átomo, "A" = NÃO; "TOMO" = divisão; dava um cunho de que a menor parte da matéria era indivisível, levando em conta a penas uma forma, como ao se quebrar uma pedra esta seria feita de argila, areia, sendo a areia a menor parte da pedra, sendo indivisível.

Para a Física o que define uma partícula elementar

- ( ) uma partícula indivisível
- ( ) uma função de onda particular

1. As partículas tiveram sua construção apoiadas em

- ( ) objetos matemáticos
- ( ) observações experimentais

2. A função de onda carrega informações da dinâmica de tais partículas como

- ( ) Cor, idade, data de nascimento.
- ( ) momento, energia, spin, carga elétrica.

3. Quando a partícula é representada por uma função de onda particular, ela é:

- ( ) uma partícula fundamental
- ( ) apenas uma onda vagando pelo espaço

4. Quando a partícula é representada por uma combinação de funções de onda, ela é:

- ( ) uma partícula fundamental
- ( ) uma partícula não fundamental

5. Em 1932, as partículas consideradas fundamentais eram:

- ( ) O elétron, o próton e o nêutron.
- ( ) O elétron, o núcleo a eletrosfera.

6. A parte da física que organizou o modelo de partículas foi

- ( ) a mecânica exotérica
- ( ) a mecânica quântica

7. Para os gregos, o que era uma partícula elementar?

- ( ) uma função de onda
- ( ) uma partícula indivisível

8. Estas partículas elementares foram uma construção matemática, porém para se tornar um modelo aceito precisa:

- ( ) de experimentação
- ( ) ver no microscópio

9. Em analogia ao triângulo e suas propriedades como as arestas, ângulos e a área fazem referência às propriedades da onda como

- ( ) momento, energia, spin, carga elétrica
- ( ) nome, sobrenome, idade

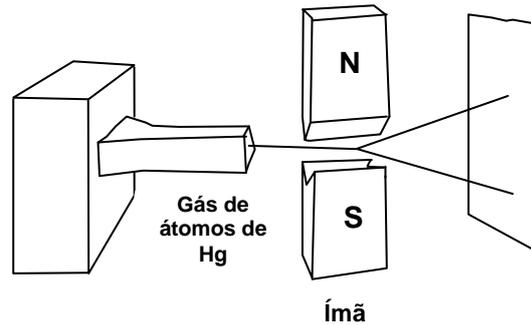
Você gosta de  
Quiz?  
Então seja  
rápido!



### Atividade 3- O spin

Um capítulo importante para a Física foi a descoberta de uma nova propriedade dos elétrons. Um experimento realizado em 1921 pelos físicos alemães Otto Stern (1888-1969) e Walther Gerlach (1889-1979).

Nesse experimento, eles fizeram com que um feixe de átomos de prata eletricamente neutros, produzidos a partir da evaporação em um forno, passasse por um campo magnético não uniforme. O campo magnético desviava os átomos de prata, como se estes fossem pequenos ímãs, e eles atingiam uma placa.



Agora vamos assistir a um vídeo mostrando o experimento de Stern e Gerlach

Os resultados obtidos foram totalmente inesperados e surpreendentes. O esperado era que os 'polos magnéticos' desses átomos apontassem para qualquer direção, mas eles apontavam apenas para duas direções no espaço. Esse estranho resultado foi associado à propriedade que denominamos de *spin*.

O *spin* é uma propriedade que não se compara com nada que existe em nossa volta. Ele está associado com a maneira como os elétrons ocupam os níveis de energia no átomo. Um elétron pode ter o *spin* "up" (para cima) ou "down" (para baixo).

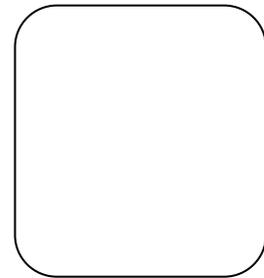
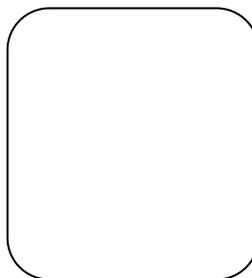
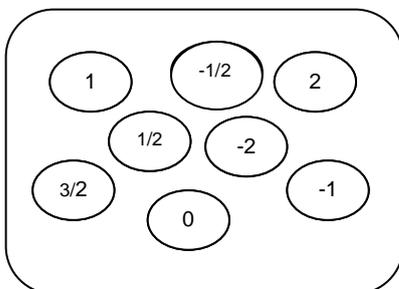
Essa nomenclatura é apenas para diferenciar duas situações, pois não existe "para cima" e "para baixo" nos átomos. O *spin* é uma característica particular das partículas elementares, assim como massa e carga elétrica.

**SESSÃO CINEMA**  
<https://youtube/3SrlZmwuthk>

### Atividade 4- Organizando partículas pelo spin



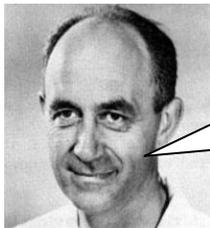
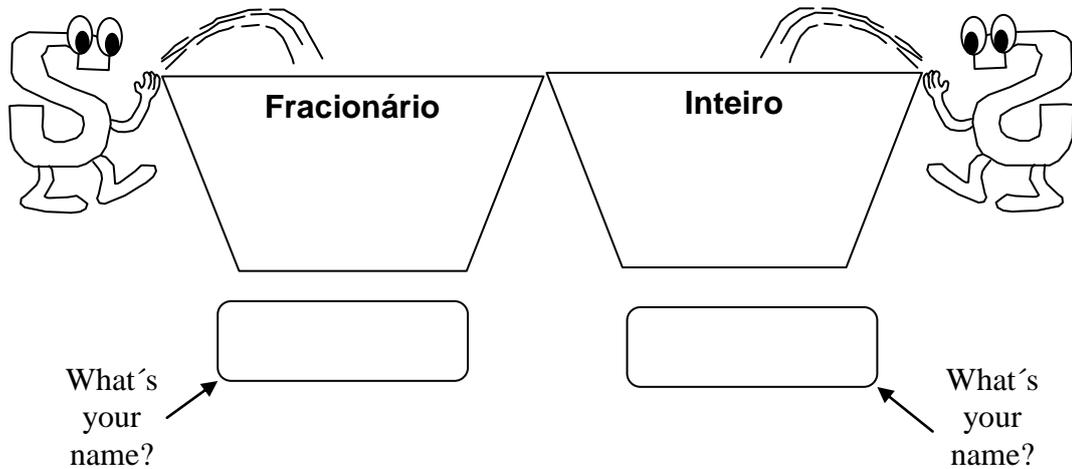
Junto com seus colegas organizem os balões nos outros recipientes seguindo alguma lógica!



Na opinião do grupo quem tem o maior valor  $+1/2$  ou  $-1/2$ ? Qual a interpretação do sinal negativo?



A figura mostra dois recipientes. Jogue para dentro os balões de acordo com a classificação proposta



Eu sou **Enrico Fermi**, físico italiano. Os **férmions** receberam esse nome em minha homenagem. Essas partículas são essencialmente solitárias, formam uma parte da família das partículas elementares, são blocos básicos com as quais a matéria é construída. Apresentam uma característica bem particular: seu spin semi-inteiro.

Figura 1.5.1

Eu sou **Satyendra Nath Bose**, físico indiano. Os **bósons** receberam esse nome em minha homenagem. Essas partículas formam outra parte das partículas elementares e vivem essencialmente em grupos ao invés de se moverem sozinhas. A característica particular dos bósons é que elas possuem spin inteiro



Figura 1.5.2

Estes dois físicos chegaram a esta classificação através de muitos cálculos extremamente complicados para nos interpretarmos! Porém foi fundamental para entendermos algumas propriedades da matéria.

Assim chegamos a uma primeira classificação das partículas: **Bósons e Férmions**.

Como se sabe em Física quantifica-se tudo! Então o spin também foi quantificado. Os valores associados ao spin que estão na tabela servem para organizar um pouco as partículas.

Na tarefa a seguir iremos fazer uma organização de partículas de acordo com o spin da partícula. Não se preocupe em decorar as partículas. Preocupe-se apenas em classificar de acordo com a propriedade de férmions e bósons.



Na tabela abaixo classifique as partículas como férmions ou bósons.

| Nome                | Símbolo  | Spin      | Classificação |
|---------------------|----------|-----------|---------------|
| elétron             | $e^-$    | $\pm 1/2$ |               |
| próton              | $P^+$    | $\pm 1/2$ |               |
| up                  | u        | $\pm 1/2$ |               |
| charm               | c        | $\pm 1/2$ |               |
| Pi mais             | $\pi^+$  | 0         |               |
| Pi menos            | $\pi^-$  | 0         |               |
| Pi zero             | $\pi^0$  | 0         |               |
| W mais              | $W^+$    | +1        |               |
| W menos             | $W^-$    | -1        |               |
| Z nulo              | $Z^0$    | 0         |               |
| Neutrino do elétron | $\nu_e$  | $\pm 1/2$ |               |
| múon                | $\mu^-$  | $\pm 1/2$ |               |
| Fóton               | $\gamma$ | 1         |               |

## Capítulo 6 - A interação Eletromagnética

Qual é o quantum do campo eletromagnético?  
Se existe um campo existe uma partícula mediadora?

### Atividade 1-Cargas, campos, interação e fótons

A figura mostra a interação entre cargas elétricas



Como já sabemos estas Cargas “geram” um Campo (ou será que os Campos geram as Cargas?). Também sabemos que se existe um Campo, existe uma interação e que também existe uma partícula mediadora da interação, que é o quantum deste Campo.

1. A interação entre as Cargas tem um alcance curto ou longo?
2. De acordo com TQC existe uma partícula que faz a mediação da força entre as partículas, no caso da interação eletromagnética, a partícula mediadora possui uma massa grande ou pequena? Por quê?
3. Esta interação pode ser entendida como troca de partículas? Por quê?
4. É possível uma partícula ter massa zero? E a energia também é zero? Como ?

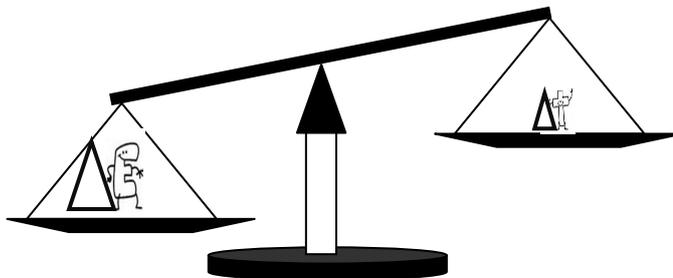
#### ANOTE PARA NÃO ESQUECER

Partícula mediadora da  
interação  
Eletromagnética

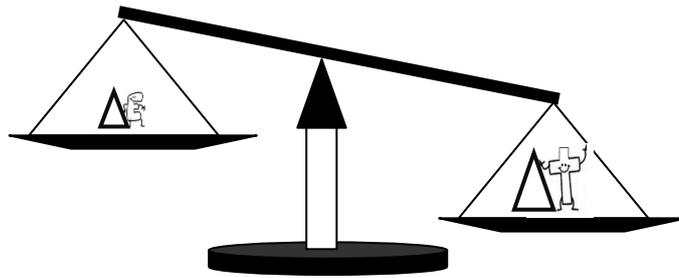
### Atividade 2- Virtual x Real

Qual o significado de real e virtual no mundo subatômico?

A figura mostra duas balanças onde são colocadas as grandezas do princípio da incerteza. Baseado no princípio da incerteza considere uma partícula que possa existir nas duas situações



Situação 1



Situação 2

Pense  
E  
Responda

1. Em qual situação a partícula sobrevive mais?
2. Em qual situação a partícula possui mais massa? Por quê?
3. Em qual situação a partícula vai mais longe?
4. É possível uma partícula adotar as duas situações? Deveria haver uma "classificação" para distinguir as duas situações? Você teria uma sugestão? Qual?

## Virtual ou Real

O termo "partícula virtual" é um assunto infinitamente confuso. A melhor maneira de abordar este conceito é abandonar o conceito da palavra "partícula". Uma partícula virtual não pode ser definida como uma partícula na sua totalidade.

Tal conceito refere-se precisamente a um distúrbio num **campo**. Podemos interpretar o conceito de partícula como uma ondulação regular em um campo, que pode viajar suavemente e sem esforço através do espaço, como um tom claro de um sino em movimento através do ar. Uma "partícula virtual" pode então ser considerada uma perturbação num campo que não será encontrada com precisão, mas em vez disso é algo que é causada pela presença de outras partículas, ou melhor, dizendo de outros campos.

As partículas decaem em outras partículas, que podem ser partículas transportadoras de força, que por sua vez, decaem novamente em outras partículas. Mas, em alguns casos, uma partícula pode decair em uma partícula transportadora de força onde a energia desta partícula define o tempo de existência desta partícula, uma vida longa requer uma quantidade menor de energia, já uma vida curta requer uma quantidade maior de energia. O surgimento de uma partícula parece violar a conservação de energia, afinal a energia não pode surgir do nada!

A explicação para o surgimento, ou a transformação de uma partícula em outra, é baseado no Princípio da Incerteza de Heisenberg. Quando ocorre a transformação de uma partícula em outra, ocorre se a nova partícula tiver energia. Mas da onde vem esta energia?

A energia desta nova partícula é emprestada do campo. Este empréstimo pode ser feito então em curto prazo ou a longo prazo. Então podemos ter partículas de longo prazo e de curto prazo. As partículas de longo prazo são denominadas de **partículas reais**, e as partículas de curto prazo são denominadas **partículas virtuais**.

As partículas virtuais não violam a conservação de energia. A energia da partícula que decai e o produto final do decaimento são iguais. As partículas virtuais existem por tão pouco tempo que nunca são observadas.

Vamos analisar a interação eletromagnética, com a troca de fótons entre dois elétrons. Esta interação é confinada a dois eventos locais, a emissão e a absorção de um fóton. Uma característica importante é que o fóton não transforma uma partícula em outra, ele simplesmente surge do campo eletromagnético. Mas como então o fóton surge da onde? O aparecimento do fóton não viola a lei de conservação de energia?

O fóton emitido transporta energia, mas o elétron emissor está num estado estacionário, assim a energia deste elétron não varia e se conserva. O outro elétron que absorve o fóton também está num estado estacionário e, portanto sua energia não varia. Então pra onde vai a energia do fóton quando o segundo elétron absorve o fóton?

Isto é permitido pela mecânica Quântica! Se o tempo que durou a violação, satisfazer o princípio de incerteza de Heisenberg  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$

Como foi visto anteriormente a essência da TQC é que os campos são formados por partículas mensageiras. A TQC descreve as interações sem a necessidade do conceito de ação à distância. O fóton pode surgir de duas formas então: por pouco tempo e ser massivo ou por muito tempo e sem massa, assim fótons massivos vão durar pouco tempo e alcançar distâncias pequeníssimas ou caso contrário fótons sem

massa irão durar por muito tempo e irão alcançar distâncias infinitas. A questão do fóton ser massivo ou não se deve ao fato de que para o universo quântico, massa e energia são intercambiáveis. Basicamente é o mesmo que dizer que você pode ter uma incerteza na energia, e quanto maior a incerteza, menor é o tempo que você tem na certeza o sobre se a partícula existe mesmo.

Os fótons virtuais só aparecem no contexto de uma interação direta entre partículas. Já os fótons reais aparecem no contexto da formação da luz.

Albert Einstein postulou baseado na hipótese quântica de Planck, que a luz em si é composta de partículas quânticas individuais, as quais mais tarde, em 1926, foram chamadas de fótons. A luz é emitida em pequenos pacotes de ondas eletromagnéticas, os fótons. Esta ideia desenvolveu-se em física quântica, com o seu postulado de dualidade onda partícula. De acordo com a dualidade onda partícula, a luz consiste em partículas (fótons), cuja localização e momento são regidos pelo princípio da incerteza de Heisenberg, e são descritos por uma "função de onda".

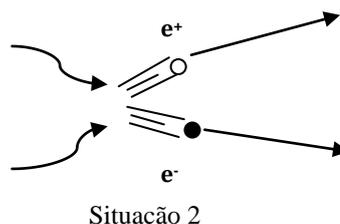
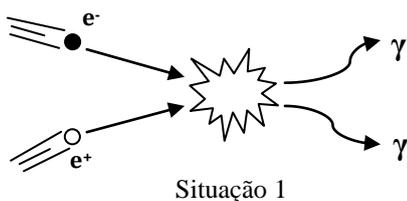
O que você realmente precisa saber é que os campos eletromagnéticos são constituídos por partículas chamadas fóton, que podem ser reais ou virtuais, depende da situação que for analisada.

### Atividade 3- Uma colisão explosiva

Nesta atividade é proposta uma discussão acerca de colisões entre partículas. Existem várias possibilidades de colisões, algumas prováveis e outras improváveis de acontecer. Mas o podemos esperar de uma colisão de duas partículas? E da colisão entre matéria e antimatéria, é possível de acontecer?



Observe as situações e responda as questões propostas



### Discussão em grupo

1. Quais as partículas estão envolvidas no evento da figura 1?
2. E no evento da figura 2?
3. A radiação liberada na figura 1 é luz? Se for luz são fótons? Se forem fótons são reais ou virtuais? Por quê?
4. É possível de acordo com a figura 2 a radiação se transformar em "partículas"? Como?

## Capítulo 7 - A Interação Nuclear Forte

Os prótons são partículas fundamentais?

Qual a interação que mantém estável o próton e o nêutron dentro do núcleo?

### Os grãos que formam o tijolo

Dois físicos chegaram à mesma ideia de forma independente em 1964 George Zweig (figura 1.7.1) e Murray Gell-Mann (figura 1.7.2). Eles propuseram a existência de partículas menores que os prótons e nêutrons, ou seja, existiriam partículas menores que formariam as outras partículas. Zweig propôs o nome de "ases"; Gell-Mann, de "quarks" (palavra retirada do livro de James Joyce: *Finnegan's wake*). Prevaleceu o nome de Gell-Mann .



Figura 1.7.1

Na teoria original de Gell-Mann algumas partículas, entre elas o próton e o nêutron, poderiam ser descritas pela combinação de três quarks: o up (u), o down(d) e o strange(s) e seus antiquarks :  $\bar{u}$   $\bar{d}$   $\bar{s}$ . Esta classificação é chamada de **sabores**. Então podemos dizer que os sabores dos quarks são :up, down e strange !

Neste modelo Gell-Mann postulou uma propriedade radical nos quarks: eles tinham carga fracionária! Os quarks s e d possuíam carga  $-1/3$  enquanto o quark u tinha a carga  $+2/3$ .



Figura 1.7.2

Mais tarde com o avanço tecnológico e a necessidade de explicar outras partículas foram incluídos mais três sabores: charm(c) carga  $2/3$ ; bottom (b) carga  $-1/3$  e top (t) carga  $2/3$ .

O quark, é uma partícula elementar e um dos dois elementos básicos que constituem a matéria (o outro é o lépton). Quarks se combinam para formar partículas compostas chamadas hádrons; os mais estáveis desse tipo são os prótons e os nêutrons, que são os principais componentes dos núcleos atômicos .

Devido a um fenômeno conhecido como confinamento, quarks nunca são diretamente observados ou encontrados isoladamente; eles podem ser encontrados apenas dentro de hádrons, como os bárions (categoria a que pertencem os prótons e os nêutrons), e os mésons. Por esta razão, muito do que se sabe sobre os quarks foi elaborado a partir das observações dos próprios hádrons.

Você deve estar se perguntando: - O que são léptons? O que são hádrons?

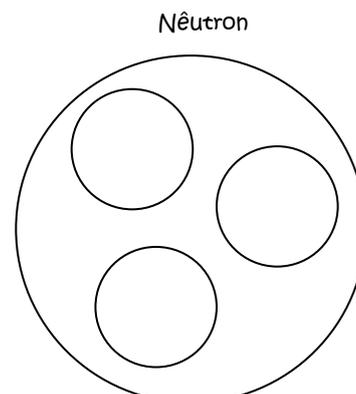
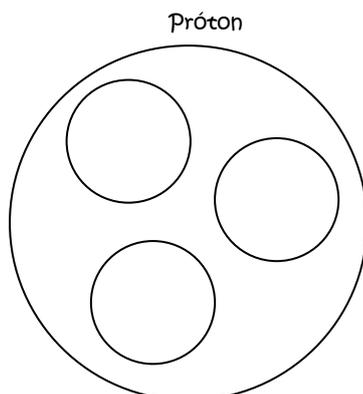
Não se preocupe! No decorrer dos outros capítulos vamos nos familiarizar com estes nomes.

### Atividade 1- Construção do nêutron e do próton

Os prótons e os nêutrons são partículas formadas pelos quarks u, d e s. Complete nas esferas pequenas quais são os quarks que compõem os prótons e nêutrons. (Sugestão: a carga elétrica do próton é  $+1$ ; e a carga do nêutron e zero)

#### ATENÇÃO!

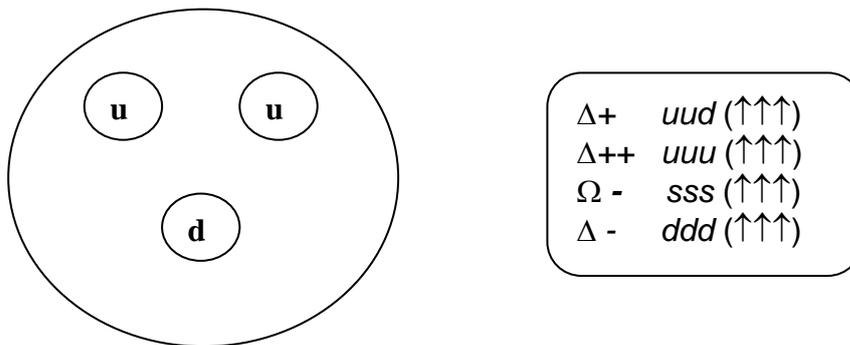
As partículas não tem forma esférica!  
Isto é apenas um recurso didático para ilustrar!!



## Quarks têm cores

### O QUARK

O princípio de exclusão de Pauli é um princípio da mecânica quântica formulado por Wolfgang Pauli em 1925. Ele afirma que dois elétrons idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico *simultaneamente*. Essa afirmação foi a solução encontrada para explicar, que apesar de existir uma repulsão elétrica entre os elétrons, havia uma atração magnética entre estes elétrons. A propriedade magnética associada ao elétron foi chamada de **spin**. Ao associar um campo magnético ao elétron, Pauli demonstrou que em um mesmo átomo, os elétrons poderiam dispor suas propriedades magnéticas apenas em duas orientações. Caso as orientações magnéticas de dois elétrons próximos, fossem iguais, ou seja, na mesma direção, haveria mais repulsão, porém se estes elétrons tivessem seus spins em sentidos contrários, existiria uma interação magnética maior que a interação elétrica, e isto que manteria a matéria unida.



Quando o modelo de quarks foi originalmente proposto havia uma objeção teórica. Uma das propriedades do modelo era que os quarks possuíam spin  $1/2$ . Pelo princípio de exclusão de Pauli dois férmions não podem ocupar o mesmo estado quântico, portanto violariam o princípio de exclusão de Pauli. O quadro ao lado mostra algumas partículas descobertas que violavam o princípio de exclusão de Pauli.

Em 1964, o físico americano Oscar Wallace Greemberg sugeriu uma nova propriedade: cada quark poderia existir em três estados quânticos diferentes!

Ele chamou esta propriedade de **carga cor**, sugerindo que as cores fossem o **vermelho, verde e o azul**, ou em inglês red, green e blue, o famoso **RGB**. Cada cor representaria três possíveis estados quânticos. Isto resolveria, pois em uma partícula constituída com três quarks do mesmo tipo cada um poderia ter uma cor diferente. O termo QCD vem de **Cromodinâmica Quântica**.

A nomenclatura "cor" é somente um artifício, pois não tem relação nenhuma com esta propriedade. Por exemplo, poderiam chamar a cor de letras: a, b e c. Podemos então considerar a cor como uma "propriedade" de cada quark. A propriedade não passa de um rótulo!

Então cada quark tem uma cor! Assim este problema estava resolvido! Então cada quark tem três cores, e como em física existe sempre o anti, como a antipartícula, também existirão as anticores.

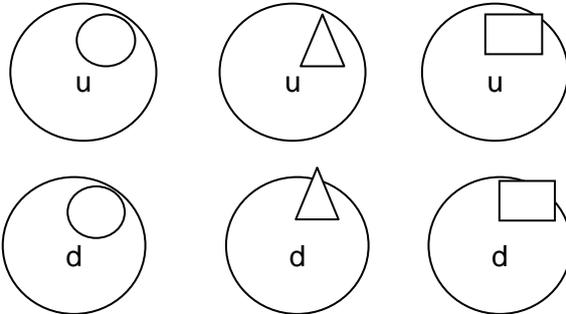
O objetivo da **carga cor** foi de que as combinações de cores diferentes se atraem e cores iguais se repelem, análogo à carga elétrica, cargas diferentes, prótons e elétrons, se atraem e cargas iguais, próton e elétron elétron, se repelem. Também é possível anularmos uma cor, usando uma cor e sua anticor.

No início houve muitas objeções, como sendo um artifício para salvar o modelo de quarks, mas depois foi essencial para explicar a força que une os quarks.

## Atividade 2- Construindo o quark colorido

### Tarefa 1

Complete dentro das formas (com R, G e B) as cores dos quarks

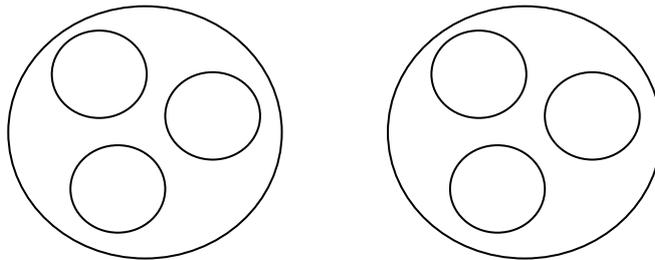


**Estas formas geométricas são artificios didáticos para demonstrar a propriedade carga cor e não confundir você relacionando com as cores que servem para colorir!  
A partir de agora iremos representar a carga cor simplesmente com as letras maiúsculas R, G e B**

### Tarefa 2

A figura mostra dois prótons. Construa o primeiro próton utilizando quarks, cargas, cores e sabores.

Em seguida construa outro próton modificando as cores dos quarks



## Atividade 3- Glúon -A cola colorida

Como foi visto os quarks possuem uma carga cor. Essa carga cor diferente provoca um tipo de força atrativa extremamente forte. Isto pode ser relacionado à interação entre um elétron e um próton, onde a partícula mediadora é o fóton. A partícula mediadora da força forte entre quarks recebeu o nome de glúon, do inglês *glue*, pois atua como uma cola dos quarks. Os glúons possuem duas cores ao mesmo tempo. Um quark "azul" e um quark "verde" trocam um glúon de cores "azul+verde". Nas tarefas a seguir iremos discutir o confinamento dos quarks dentro de um nucleon e qual a interação que mantém estável o próton e o nêutron.



## Colando os quarks

Esta atividade tem como objetivo interpretar como os glúons interagem com os quarks. Para isso vamos impor algumas regras

### LEIA AS

#### REGRAS

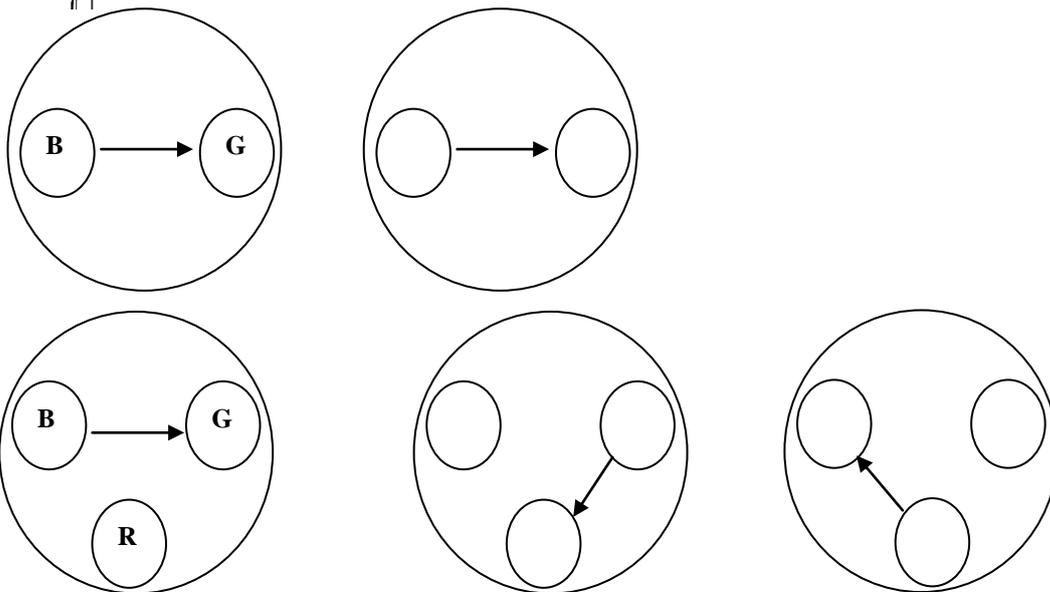
- 1ª - Um glúon é sempre colorido com duas cores **diferentes**
  - 2ª - Estas cores dependem dos quarks que interagem, uma é igual do quark de saída e a outra é igual ao quark de chegada.
  - 3ª - A cor muda do quark de saída pela cor do quark da chegada
  - 4ª - O quark de chegada adquire a cor da carga do quark da saída
- Vamos colocar as regras em prática!  
Para fins de visualização vamos usar o símbolo  $\longrightarrow$  para representar o glúon, com suas cores.

Por exemplo  $\begin{matrix} R \\ \longrightarrow \\ G \end{matrix}$  representa o glúon R e G (vermelho e verde)

Vamos começar com dois quarks. Complete a sequencia da interação



Faça a sequencia para três quarks



#### RESPONDA SE PUDE

Por que os quarks mudam de cor?

#### ANOTE PARA NÃO ESQUECER

Partícula mediadora  
da interação Forte  
Fundamental

#### Atividade 4- Mésons = Quark + antiquark

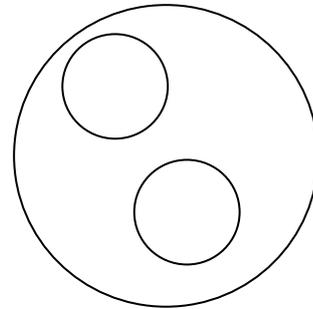
Existem partículas formadas por quarks e antiquarks. Estas partículas são chamadas de mésons e tem um papel fundamental na interação entre os nucleons.

A função dos glúons é fazer a troca de carga cor entre os quarks mantendo os quarks unidos. Fazendo uma analogia, então deve existir uma partícula que faça a interação entre os nucleons. Os glúons são partículas sem massa, e como já dissemos fazem a mediação da interação forte. Mas como funciona a interação entre nucleons? Yukawa previu uma interação que chamou de força forte, mas a força entre os quarks também não é chamada de força forte? Existe uma confusão aí! No decorrer das atividades vamos esclarecer.



Agora junto com seu grupo discutas as questões com seus colegas.

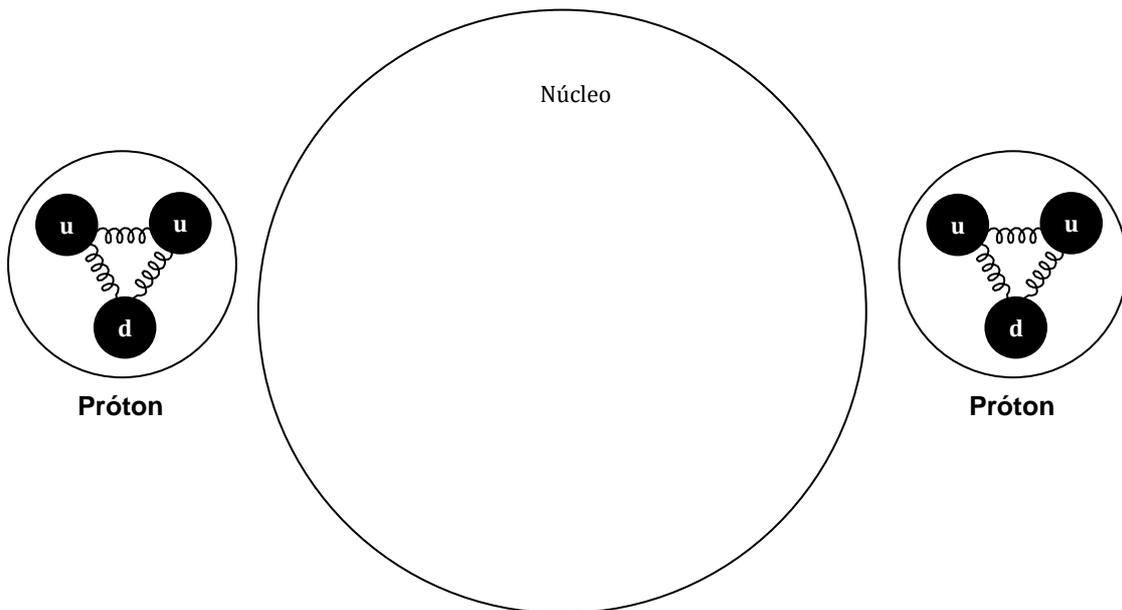
1. Crie uma partícula que possua um quark e antiquark?
2. Esta partícula possui carga cor?
3. Podemos chegar à conclusão que sempre que unir um quark e um antiquark, o resultado sempre vai ser colorido ou neutro?



#### Atividade 5- Efeito residual: Prótons se atraem!

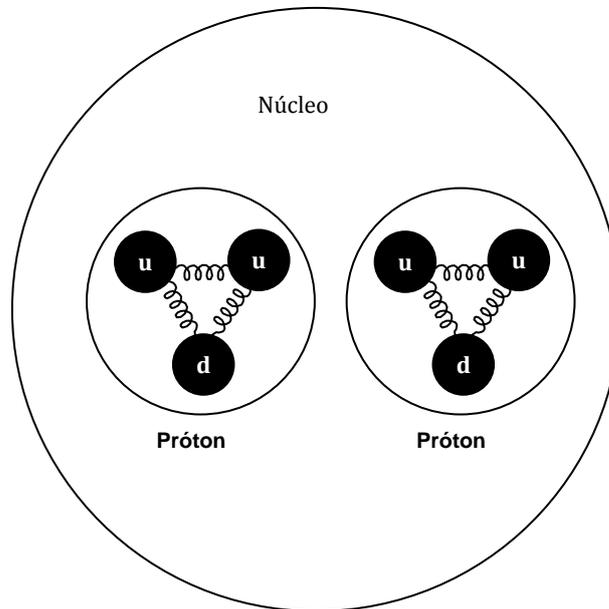
Lembram-se da proposta de Yukawa, que deveria existir uma força que atraísse os prótons? Ele estava correto! Agora vamos tentar entender como esta força surge. As questões a seguir vão ajudar.

→ A figura mostra dois prótons uma distância maior que o núcleo atômico.



1. Qual é a interação que ocorre dentro dos prótons?
2. Existe alguma interação entre os prótons? Qual? É a atrativa ou é repulsiva?

→ A figura a seguir mostra estes prótons bem próximos, agora dentro do núcleo.



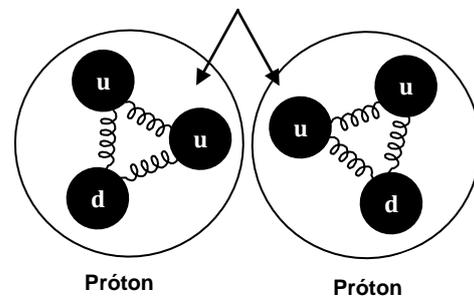
1. A interação dentro dos prótons modificou?

2. E entre os prótons? Continua a mesma interação?  
Modifica alguma coisa com a distância menor?  
A força elétrica não repele com mais força?

3. Mas se estão dentro do núcleo, eles não ficam presos? Como?

→ A figura mostra novamente os dois prótons dentro do núcleo, enfatizando dois quarks u.

1. Estes quarks podem trocar glúons? Por quê?
2. Devido à carga cor, estes quarks sofrem interação?



**Atividade 6- Próton atrai Nêutron também!**

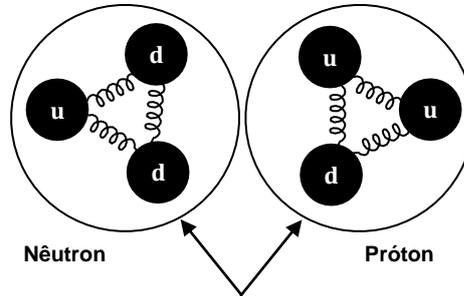
Agora colocamos um próton e um nêutron destacando novamente dois quarks

1. Da mesma forma proposta na atividade 2, estes quarks podem trocar glúons?

2. Então a carga cor atrai estes quarks?

3. Então um nêutron atrai um próton?

4. Poderíamos afirmar que esta força é que mantém o núcleo estável?

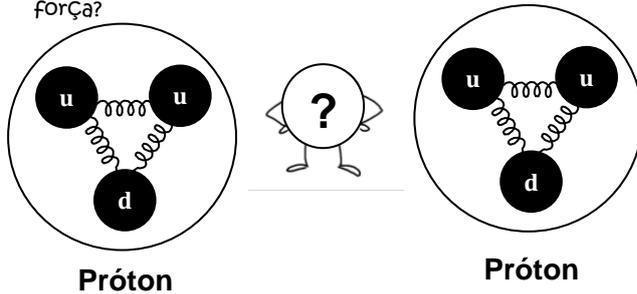


**Atividade 7 - Píon a partícula que Yukawa propôs**

1. Se existe uma força atraindo os nucleons, o próton consegue diferenciar quem é próton e quem é nêutron?

**PENSE RÁPIDO**

2. Se existe uma força de atração entre os nucleons, existe alguma partícula que faça a mediação desta força?



**ANOTE PARA NÃO ESQUECER**

**Partícula da interação da Força Forte Residual**

## Capítulo 8 - A interação Nuclear Fraca

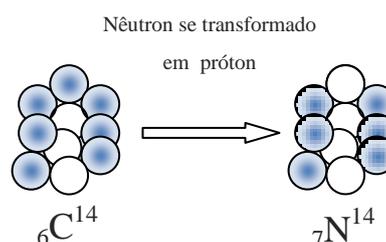
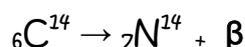
É possível prever uma partícula teoricamente?

Qual o significado de decaimento?

O que isso tudo tem a ver com partículas?

### Atividade 1- Decaimento Beta

Depois do elétron, do próton e do nêutron foram descobertas outras partículas. Uma dessas partículas foi prevista teoricamente. O átomo de carbono-14 possui 6 prótons e 8 nêutrons. Este átomo é instável e busca a estabilidade se transformando em um Nitrogênio-14. Segundo a reação



Rutherford chamou na época de radiação  $\beta$  (beta). Hoje em dia sabemos que é um elétron ou um pósitron muito energético que atinge velocidades entre 70.000 a 280.000 km/s!

As perguntas a seguir irão orientar a você pensar como os físicos da época baseado em conceitos de conservação descobriram mais uma partícula.

1. Quantos prótons e quantos Nêutrons tem o Carbono?
2. Quantos prótons e quantos Nêutrons têm o Nitrogênio?
3. Qual partícula sumiu do Carbono?
4. Qual partícula apareceu no Nitrogênio? Como pode ter aparecido?

### Atividade 2- Simetrias para resolver o problema do decaimento $\beta$



Discuta com seus colegas as seguintes questões

1. A figura mostra uma Carta de damas. Se fizermos uma rotação de  $180^\circ$ , você percebe a diferença entre a Carta na situação 1 e na situação 3. A orientação foi alterada após esta transformação?



situação 1



situação 2

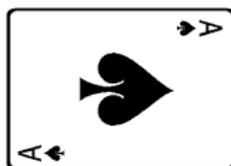


situação 3

2. Agora vamos trocar de carta e proceder da mesma forma. A orientação foi alterada?



situação 1



situação 2



situação 3

## Simetrias de partículas

As propriedades de simetrias desempenham um papel importante em qualquer ramo da física. Muitas vezes identificar simetrias é crítico para que um problema possa ser resolvido. Como foi visto o estudo de partículas necessita de muitos recursos matemáticos em nível avançado. O termo simetria está ligado ao termo invariância: Propriedade que um sistema e as suas grandezas apresentam de se manterem inalterados quando aplicado um conjunto de transformações. E o termo invariância está ligado à conservação de uma quantidade. A seguir temos três exemplos de invariância ligada a leis de conservação conhecidas até agora por nós

|                                                                              |                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Invariância</b><br>translação no espaço<br>translação no tempo<br>Calibre | <b>Grandeza conservada</b><br>Momento<br>Energia<br>Carga |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|

Outra lei de conservação é a da **Conservação da carga elétrica**, é o princípio em física que estipula que a carga elétrica não pode ser criada ou destruída. A quantidade total de carga, a diferença entre o somatório das cargas positivas e o somatório das cargas negativas no universo, é sempre *conservada*. Historicamente foi Benjamin Franklin, com base em seus próprios experimentos, quem apresentou a primeira formulação da conservação da carga elétrica, afirmando que processos de eletrização não criam cargas, mas as transferem.

A conservação da carga elétrica implica que a carga total do universo é constante. Isso constitui a chamada conservação **global** da carga elétrica. Tal lei de conservação não impede que uma carga desapareça e reapareça instantaneamente em lugares diferentes, pois isto não alteraria a quantidade total de carga no universo. Contudo, sabe-se que a carga elétrica conserva-se localmente, uma propriedade com alta rigorosidade matemática.

Outro caso em que as simetrias são úteis ocorre quando podemos agrupar partículas de propriedades (aproximadamente) iguais. Por exemplo, as partículas sofrem ação de forças devido algum tipo de simetria que possuem.

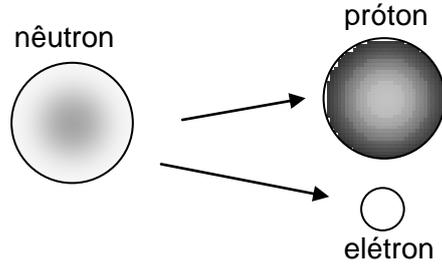


A seguir são colocadas algumas simetrias utilizadas no mundo microscópico. Discuta e responda com seu grupo as questões propostas

### 1. Simetria de Carga

A figura abaixo mostra para o decaimento de um nêutron e um próton e um elétron

Vamos aplicar a conservação de carga completando a tabela  
 Próton -  $Q = +1$   
 Elétron -  $Q = -1$   
 Nêutron -  $Q = 0$



| Antes | Depois |   |             |
|-------|--------|---|-------------|
| N     | P      | e | $Q_{Total}$ |
|       |        |   |             |

A carga se conserva se conserva?

Partícula Beta  
 $-1 \beta^0$

### 2. Simetria da Energia

Vamos aplicar a conservação de energia completando a tabela  
 Próton -  $E = 938,3 \text{ Mev}$   
 Elétron -  $0,511 \text{ Mev}$   
 Nêutron -  $939,6 \text{ Mev}$

| Antes | Depois |   |             |
|-------|--------|---|-------------|
| N     | P      | e | $E_{Total}$ |
|       |        |   |             |

A energia se conserva?

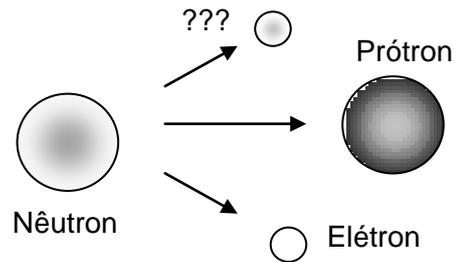
Quanto falta?



Estamos diante de um dilema! A energia não se conserva! Se você fosse um cientista teria duas hipóteses para testar:

**1ª hipótese:** A lei de conservação da energia foi quebrada. Portanto estamos diante de um desastre! Lembre-se que toda a Física parte desta lei: A energia se conserva!

**2ª hipótese:** Deve existir uma nova partícula. Esta partícula seria responsável por carregar esta energia. Assim estaria resolvido este problema. Mas qual seria a carga desta partícula? E qual seria sua massa?



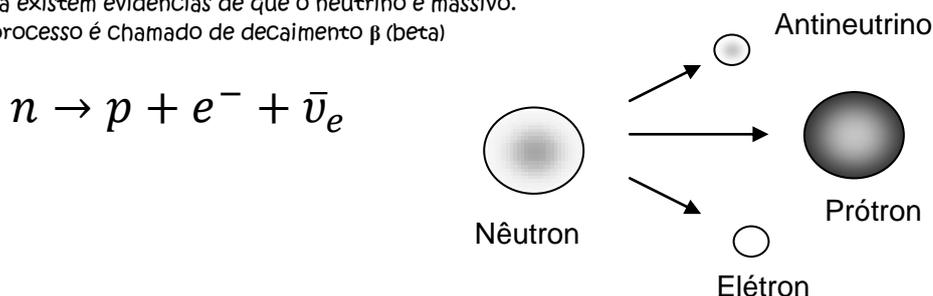
## Bingo!

Em 1930 Pauli postulou que durante o decaimento beta outra partícula além do elétron era emitida e nela estava a diferença de energia que aparentemente faltava. Enrico Fermi batizou esta partícula de neutrinho, um nêutron pequeno, que em italiano se pronuncia neutrino, já que sua carga era zero e tinha uma massa muito pequena próxima de zero.

A Invariância de grandezas é uma arma poderosíssima em Física. Como podemos ver o Neutrino surge teoricamente justamente da invariância por translação no tempo, mais conhecida como Conservação de energia. Sempre que os físicos se deparam com problemas eles recorrem às simetrias do problema.

Mas há casos em que a simetria pode ser quebrada. Este tipo de processo, é comum na natureza física e vital para a compreensão do modelo padrão das partículas fundamentais. Veremos mais a frente problemas com a quebra de simetria.

Os neutrinos são chamados de partículas fantasmas e só foram observadas pela primeira vez em 1956 por Frederick Reines que os definiu como a menor quantidade observada pelo homem. Hoje já existem evidências de que o neutrino é massivo. Este processo é chamado de decaimento  $\beta$  (beta)



O neutrino é produzido no núcleo de um átomo, quando um nêutron se transforma em um próton, ou o contrário. Isso é muito comum em átomos de hidrogênio de estrelas como o Sol e em átomos de potássio que compõem seu corpo. Sempre quando essas transformações acontecem, elas liberam energia, originando um novo neutrino.

### 3. Simetria de número leptônico

A palavra "lépton" vem do grego "leve", são as partículas subatômicas que não sofrem influência da força nuclear forte que mantém os prótons e os nêutrons unidos, participam somente das interações eletromagnéticas e fracas. Essas partículas não ficam no núcleo do átomo e podem viajar por conta própria.

Até o momento são conhecidos seis léptons, sendo que o mais famoso é o elétron. Outros dois léptons menos conhecidos e que também possuem carga negativa como o elétron, são o tau ( $\tau^-$ ) e o múon ( $\mu^-$ ). As outras três partículas são o neutrino do elétron ( $\nu_e$ ), o neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ) e o neutrino do múon ( $\nu_\mu$ ).

Os léptons possuem o número leptônico(L) igual a +1 e os antiléptons seu número leptônico é -1. Para as demais partículas o número leptônico(L) é zero

**Números Leptônicos**

| Partícula             | L  |
|-----------------------|----|
| Elétron, Múon e Tau   | +1 |
| Neutrinos dos léptons | +1 |
| Antiléptons           | -1 |
| Próton                | 0  |
| Nêutron               | 0  |
| Fóton, glúon          | 0  |

Vamos aplicar a conservação do número leptônico completando a tabela

| Antes | Depois |   |                     | Nº leptônico |
|-------|--------|---|---------------------|--------------|
| N     | p      | e | $\bar{\nu}_e e^{-}$ | Total        |
|       |        |   |                     |              |

O número leptônico se conserva?

Existem muitas simetrias em Física. Mostramos algumas para demonstrar como os cientistas elaboram simetrias e qual sua utilidade. Se você é curioso e deseja mergulhar nesse mundo, uma boa sugestão seria fazer uma graduação em Física.

### Atividade 3- Mudança de sabor

Para explicar o decaimento beta foi necessário uma nova teoria que explicasse a transformação de prótons em nêutrons e vice-versa. Para isso foi necessário entender o mecanismo que mudasse o sabor de um quark. Os questionamentos levantados eram se era possível uma partícula mudar de sabor e se existia uma interação responsável.

As atividades a seguir nos ajudarão a entender o processo.

#### Aula de REVISÃO

Qual a interação que mantém a os elétrons preso ao núcleo?

Qual é o bóson responsável pela interação?

A troca ocorre entre quais partículas?

Qual é a carga envolvida na interação?

Qual a interação que mantém o núcleo estável?

Qual é o bóson responsável pela interação?

Qual é a carga envolvida na interação?

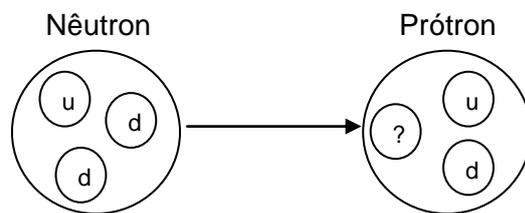


Vamos analisar o decaimento beta sob o ponto de vista de quarks.

Na figura a seguir aponte qual o sabor que o quark **d** se transformou para ser um próton.

Pense e responda as questões a seguir:

1. Se houve “troca” de sabor, existe uma interação?
2. Esta interação pode ser eletromagnética? Por quê?
3. Esta interação pode ser Forte? Por quê?



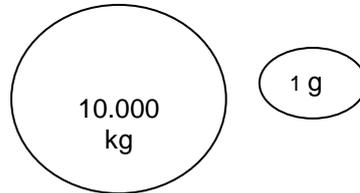
Seguindo a lógica proposta no quadro, complete

| Interação       | Carga    |
|-----------------|----------|
| Eletromagnética | Elétrica |
| Forte           |          |
| Fraca           |          |

## Atividade 4- Bóson massivo

Nesta atividade iremos discutir as propriedades bóson mediador da interação fraca. Questões como se este bóson tem massa e se a interação fraca ocorre a longas ou curtas distâncias.

**Tarefa 1** Observe a figura e discuta com seus colegas



1. Se for aplicada a mesma força nos dois corpos, qual vai mais longe? Por quê?
2. É possível fazer uma relação com a massa e a distância que o corpo percorre? Qual?
3. O bóson que é responsável pela interação no decaimento beta é massivo? Por quê?

## Uma interação fraca, mas poderosa

A interação fraca, também chamada de força nuclear fraca, é uma das forças que atua no interior do núcleo atômico. Assim podemos concluir que quatro interações atuam no interior do núcleo atômico: a interação nuclear forte, interação nuclear fraca, interação eletromagnética e a interação gravitacional.

Do mesmo modo que a interação nuclear forte, a interação fraca também é uma interação de curto alcance. Ela atua somente em uma vizinhança de cerca de  $10^{-16}$  centímetros. A interação fraca é, aproximadamente,  $10^{13}$  vezes menor que a interação eletromagnética.

### Para que serve então a força fraca?

Enquanto a interação nuclear forte é a responsável pela estabilidade do núcleo atômico, então para que serve a interação nuclear fraca? Existem fenômenos que ocorrem no interior do núcleo atômico que, embora também estejam relacionados com a estabilidade nuclear, não podem ser explicados sem a existência de outra interação, com características bastante diferentes da interação nuclear forte.

Entre estes fenômenos nucleares que exigem a presença de um novo tipo de interação está a radioatividade e o decaimento de partículas nucleares.

Um núcleo radioativo é instável por que contém prótons ou nêutrons demais. Para se tornar estável este núcleo expulsa partículas até se tornar estável. Neste processo o átomo pode se transformar em um outro elemento químico, processo esse que é chamado de decaimento.

A interação fraca é a interação responsável pelo decaimento beta, e seguindo o mesmo raciocínio das interações que vimos antes, a interação fraca possui **partículas mediadoras** da interação, que são:  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , denominadas **bósons pesados**.

Essas partículas foram descobertas em 1983, em colisões de alta energia que são obtidos nos aceleradores de partículas. A carga cor é a fonte da interação forte, e algumas vezes a denominação carga fraca é utilizada para indicar a fonte da interação fraca. A interação fraca é percebida por partículas como o próton, nêutron e o neutrino.

A interação fraca é atrativa sendo responsável pela emissão radioativa e pela divisão de núcleos como o urânio, utilizados no princípio de funcionamento da bomba atômica; Outro exemplo é a combustão solar, onde neutrinos são criados pela desintegração de nêutrons.

Basicamente, em todos os processos onde ocorre a emissão de neutrinos temos a interação fraca predominando, e acreditou-se por muito tempo que a emissão de neutrinos fosse a característica principal das interações fracas.

Porém, existem decaimentos de partículas estranhas em que o neutrino não aparece. Assim, o fator comum a todas as interações fracas é a baixa probabilidade de ocorrência, além do fato de realmente serem bem menos intensas, quando comparadas às outras interações nucleares.

## De onde os neutrinos vêm?

O Neutrino é provavelmente a segunda partícula mais comum no Universo, depois dos fótons. Eles foram produzidos em grande número no período imediatamente após o Big Bang: cosmólogos calculam que deve haver mais de 300 neutrinos por centímetro cúbico em todos os lugares em todo o Universo vindos desta fonte. Estrelas também produzem um grande número de neutrinos: o Sol produz mais de 60 bilhões por centímetro quadrado por segundo a uma distância da Terra. Outros fenômenos astrofísicos, tais como supernovas (explosão de estrelas) e os raios cósmicos, também produzem neutrinos.

Na Terra, os neutrinos são produzidos naturalmente por alguns isótopos radioativos, como o carbono-14 (usado na datação por carbono de artefatos arqueológicos) e potássio-40, e também por raios cósmicos notáveis na atmosfera da Terra. Eles também podem ser produzidos artificialmente por reatores nucleares e por aceleradores de partículas. Os processos artificiais são muito semelhantes aos naturais: neutrinos de reatores chegam do decaimento beta radioativo, e os neutrinos do acelerador vêm exatamente do mesmo processo que os neutrinos de raios cósmicos, apenas em um ambiente mais controlado.

# AVISO IMPORTANTE

Mais adiante discutiremos o mecanismo que dá origem à massa desses bósons e outras partículas. Afinal como esses bósons ganham massa?

ANOTE PARA NÃO ESQUECER

Partícula da interação da  
Força Fraca

---

## Capítulo 9 - Interação gravitacional: O Gráviton

---

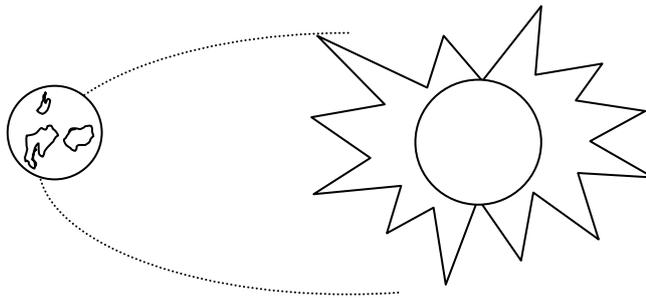
A força gravitacional é uma interação fundamental?

Existe um bóson mediador?

### Atividade 1: O quantum da gravidade

---

A figura ao lado mostra a terra sendo atraída pelo sol. Como foi visto lá nas leis de Newton, existe uma atração entre as massas. Também sabemos que as massas “geram” um campo gravitacional, mais conhecido como **gravidade** e, portanto existe uma interação.



### A questão é . . .

1. A interação entre as massas tem um alcance curto ou longo?
2. Da mesma forma que pensamos em eletromagnetismo, existe uma partícula que faz a mediação da força entre as partículas com massa, então é lógico pensar que existe uma “partícula” mediadora?
3. Se existe tal “partícula”, ela é um bóson? Ele possui uma massa grande ou pequena? Por quê?
4. Essa interação pode ser entendida como troca de “partículas”? Por quê?
5. Esta “partícula” tem massa zero? E a energia também é zero? Ela é virtual ou real? Por quê?

### Atividade 2- Gráviton, cadê você?

---

Existem grandes dificuldades para comprovar a existência dos grávitons. Uma delas é que fenômenos gravitacionais de grande escala são difíceis de reproduzir em laboratório por exigirem altos níveis de energia.

Os cálculos do âmbito de análise da interação gravitacional dão uma possível massa ao gráviton a cerca de  $10^{-69}$  kg, ou seja, que é tanto **uma centena de trilhões de quatrilhões de vezes mais leve do que um elétron**.

A outra dificuldade é que a gravidade é a força fundamental que possui menor intensidade. Seus efeitos são percebidos apenas em grandes aglomerações de massa (como os planetas e estrelas), mas em pequenas massas seus efeitos são difíceis de observar.

Veja por exemplo a interação eletromagnética existe uma infinidade de fenômenos: a luz que atinge os olhos com as letras que você lê, entre o contato com a cadeira e no chão, os sons que ouve (para a vibração ocorre pela repulsão elétrica entre camadas eletrônicas)... Você está eletromagneticamente interagindo com dezenas de outros objetos. Mas só observa a força gravitacional de um objeto: a Terra. A gravidade é muito, muito fraca! Sim, você também é atraído por outros objetos, mas dificilmente notará qualquer coisa - certamente não com os sentidos, ao contrário do caso da interação eletromagnética.

O gráviton é uma **partícula hipotética** que iria introduzir gravidade na Mecânica Quântica, que faz com que muitos físicos procurem de esta partícula. O Gráviton seria um bóson, o quantum da gravidade e



como foi visto seria a partícula que carrega uma força, neste caso, a gravidade. Esta partícula poderia se mover na velocidade da luz, reafirmando a teoria da Relatividade que afirma que a gravidade atua na mesma velocidade como a luz.

O gráviton é um elemento chave em qualquer teoria física que tenha como objetivo unificar a gravidade com outras interações da natureza, a saber, o eletromagnetismo, a interação forte e fraca.

Como já foi dito, as ondas eletromagnéticas são detectadas e usadas há muito tempo, Maxwell construiu uma teoria ondulatória e unificou o campo elétrico e magnético, e mais tarde Hertz provou a existência das ondas, ou seja, os campos são ondas. Então o campo gravitacional também necessita do mesmo comportamento, precisa ter ondas gravitacionais. Com o advento da mecânica quântica, no começo do século passado, verificou-se que a energia não era transferida de forma contínua, mas sim de forma discreta, ou seja, em forma de pequenos pacotes, conhecido como fótons. Fótons são, portanto, pequenas quantidades de energia. A conclusão que se chegou é que as ondas eletromagnéticas, que transportam energia, são então constituídas por fótons. Dizemos então que os fótons são a quantização das ondas eletromagnéticas. Isto faz com que a teoria eletromagnética e a mecânica quântica se conciliem.

Entretanto, a interação gravitacional ainda não passou por este estágio, ou seja, a teoria da relatividade geral, que explica interação gravitacional não é uma teoria quântica. Uma teoria que quantize a gravidade deve necessariamente quantizar as ondas gravitacionais. Deste modo, os "pacotinhos" da interação gravitacional deveriam existir. Embora ele não tenha sido detectado, seu nome é gráviton.

Mas temos dois problemas, o primeiro detectar estas ondas gravitacionais e o segundo é quantizar esta onda gravitacional e isto se faz com matemática.

Em relação à matemática é um problema que vai exigir muito esforço dos físicos, pois é uma tarefa que até hoje os físicos não conseguiram solucionar.

## Pense e responda

1. Se formos pensar na ordem cronológica do eletromagnetismo, primeiro foi detectado as ondas eletromagnéticas e depois verificado a existência dos fótons. Assim, a detecção das ondas gravitacionais pode ser um passo essencial na busca por uma teoria que comprove o gráviton?

2. O gráviton atinge distâncias infinitas. Então sua massa é grande ou pequena? Isto facilita ou dificulta encontrá-lo?

### Atividade 3- Relatividade x Quântica

#### SESSÃO CINEMA

<https://youtu.be/z5s9CYEzdcA>

Nesta atividade foi dividida em duas partes. Na primeira vamos assistir a um vídeo que mostra outra teoria para explicar a gravidade envolvendo a teoria da relatividade geral. Na segunda parte vamos ler um texto que faz algumas considerações sobre a gravidade e vamos discutir algumas questões.

## Leitura

Existe um grande problema para se verificar se o gráviton é um objeto físico de fato ou é uma especulação teórica. Como vimos anteriormente para validar uma teoria temos que encontrar evidências experimentais. Apesar dos cientistas descobrirem a existência de ondas gravitacionais, existe o outro problema é que para testar qualquer teoria da gravidade quântica é necessária grandes níveis de energia para observar tal "partícula". E isto é inatingível em experimentos de laboratório atuais. Mesmo teoricamente, a gravidade quântica é executada em problemas sérios.

Outro problema está na unificação teoria da relatividade geral e a gravitação quântica. A teoria geral da relatividade gera diferentes hipóteses sobre o universo em escala macroscópica do que aqueles feitos

pela mecânica quântica em escala microscópica.

O vídeo que assistimos mostra o comportamento da gravidade na visão da teoria da relatividade completamente diferente o que é abordado pela física de partículas.

As tentativas de combiná-los barram em processos matemáticos extremamente complexos, o procedimento de quantização utilizado nas outras teorias fundamentais para o caso da gravitação não produz resultados positivos.

Os pressupostos da gravitação quântica são, geralmente, que tal teoria iria provar ser muito simples e elegante, tanto é que os físicos tentam trabalhar olhando para trás, de forma a prever uma teoria de que eles se sentem responsáveis pelas simetrias observadas na física e, em seguida, vendo se essas teorias funcionam.

Deve ficar claro que o gráviton **não** faz parte do modelo padrão de partículas.

Muitos cientistas buscam uma teoria que combine a relatividade geral e a teoria quântica do campo gravitacional, o que parece uma tarefa muito difícil.

O problema teórico é grande, mas não é menos experimental: como "ver" gráviton?

## Pense e responda

1. Qual a diferença entre a teoria quântica e a relatividade geral para a gravitação?
2. A gravitação quântica é preferida pelos cientistas? Qual a razão?
3. O que torna difícil a unificação da teoria quântica e da teoria relativística?
4. Além do problema teórico da unificação, existe outro problema na gravidade quântica? Qual?

# Unidade 2

## Organizando a bagunça

Qual seria a melhor maneira de organizar as partículas?  
 Pela massa? Pela carga elétrica?  
 Pelo tipo de interação?

Como faço?

Por tamanho?

Pela interação?

Pela cor?

Pela carga?

Particle Classification

- Leptons
  - $\tau$
  - $\mu$
  - $e$
- Hadrons
  - Mesons
    - $\pi$
    - $\rho$
    - $\omega$
    - $\eta$
    - $\eta'$
    - $\pi_0$
  - Baryons
    - $\Delta$
    - $\Sigma$
    - $\Lambda$
    - $\Xi$
    - $\Omega$

|        |          |     |
|--------|----------|-----|
| $\tau$ | $\mu$    | $e$ |
| $\nu$  | $\gamma$ | $d$ |
| $s$    | $c$      | $W$ |
| $u$    | $Z^0$    | $t$ |
| $b$    | $t$      | $g$ |

|         |           |            |
|---------|-----------|------------|
| $u$     | $c$       | $t$        |
| $d$     | $s$       | $b$        |
| $\nu_e$ | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ |
| $e$     | $\mu$     | $\tau$     |

|          |
|----------|
| $g$      |
| $\gamma$ |
| $Z$      |
| $W$      |

---

## Capítulo 1 – O Modelo Padrão

---

Qual seria a melhor maneira de organizar as partículas?  
Pela massa? Pela carga elétrica?  
Pelo tipo de interação?

Durante os capítulos anteriores nos deparamos com diferentes nomes para partículas, bem como o surgimento de algumas delas. Mas como podemos organizá-las para não virar uma salada de fruta? Existem várias classificações, uma delas foi vista que é em relação ao spin: férmions e bósons. Mas existe será que outra classificação pode agrupá-las de acordo com a interação a que estão sujeitas?

Outra classificação de partículas está relacionada à sua massa.

Existe um grupo chamado de **hádrons** (do grego hadros que significa massivo, robusto, forte) e os quarks são exemplos deste grupo.

Os hádrons são divididos em duas classes:

1. **Bárions** (do grego barys, que significa pesado) são formados por três quarks.
2. **Mésons** (do grego mesos, significando intermediário, médio), são formados por um quark e um antiquark.

O nêutron e o próton são exemplos de bárions, o méson  $\pi$ , é um exemplo de méson.

Outro grupo são os **léptons** (do grego leptos, que significa delgado, fino, leve). São consideradas partículas fundamentais. O elétron é o lépton mais familiar, mas além dele existem o múon ( $\mu$ ), o tau ( $\tau$ ) e três neutrinos (neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau).

Os **hádrons** são as partículas que estão sob a ação da interação forte, eletromagnética e fraca. Já os **léptons** estão sob a ação da interação fraca e eletromagnética, não participam da interação forte. Mas tanto os **hádrons** como os **léptons** estão sob a ação da interação gravitacional.

A seguir são propostas algumas atividades que irão ajudar a organizar as partículas.

### Atividade 1- Hádron, lépton e interações

---



Com a ajuda do seu lápis, conecte as partículas com as suas respectivas interações.

Hádrons

Léptons

Interação Gravitacional

Interação Eletromagnética

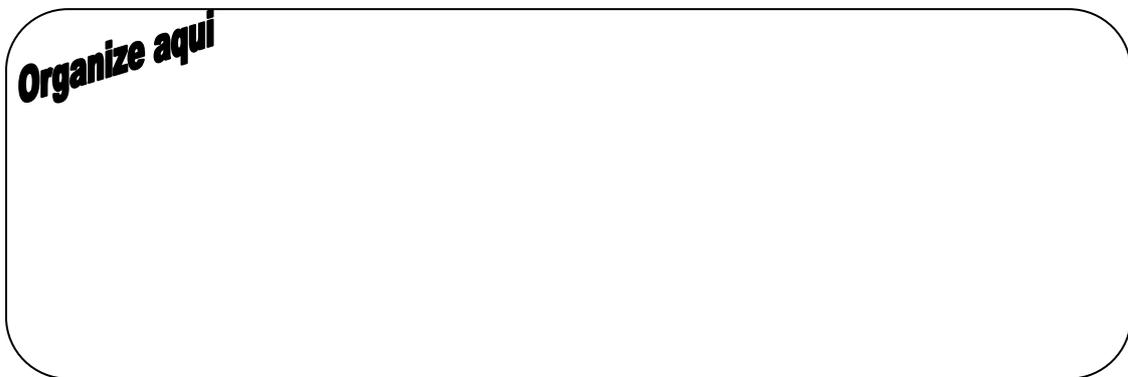
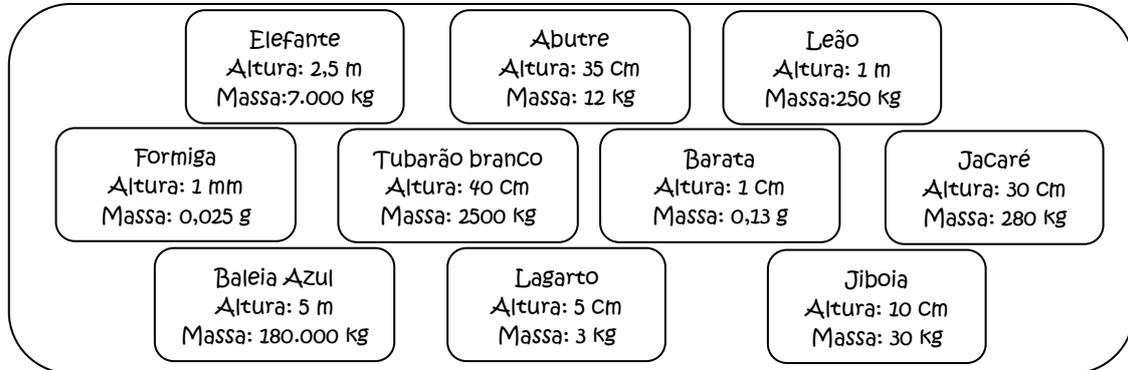
Interação Fraca

Interação Forte

Seria uma boa opção agrupar estas pela interação? Por quê?

## Atividade 2-Organizando objetos pelas características

No quadro a seguir estão colocados diversos animais contendo algumas características. Discutam com seu grupo e organize estes animais utilizando algum critério no outro quadro



1- Qual foi o critério que seu grupo utilizou?

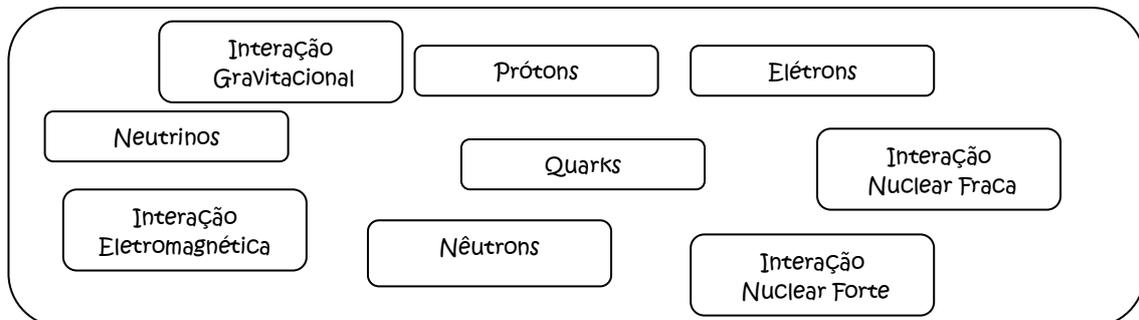
2- Os outros grupos organizaram da mesma forma?

3- Na opinião do seu grupo, os critérios utilizados pelos outros grupos também podem ser usados?

## Atividade 3- Organizando as partículas pela interação

Poderíamos utilizar as interações para organizar as partículas?

No quadro a seguir são colocadas algumas partículas e as interações fundamentais.



Agora use a tabela para organizar o quadro

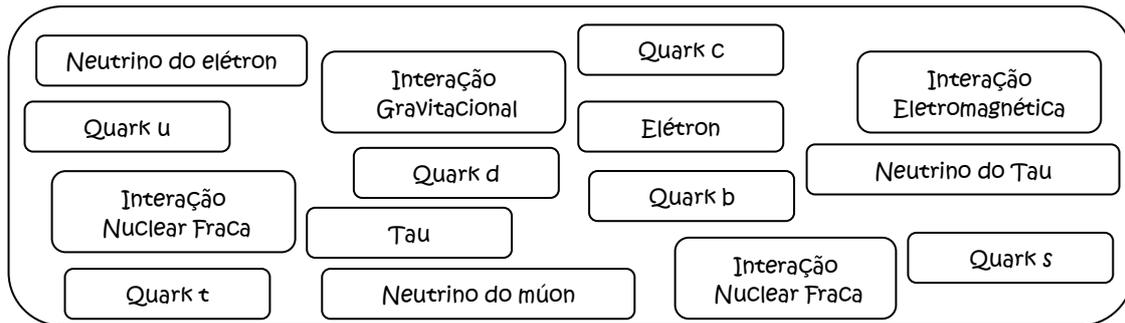
|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Se usarmos os bósons no lugar da interação como ficaria?

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

**Atividade 4- Organizando pelas partículas com os bósons mediadores**

No quadro a seguir são colocadas algumas partículas e as interações fundamentais



Agora use a tabela para organizar o quadro

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Algum problema para montar a tabela? Qual?

Vamos separar a ultima coluna para separar as interações

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Na próxima tabela substitua a interação pelo bóson respectivo

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |

**Atividade 5- Quarks, Léptons e Bósons! Enfim o modelo padrão**

---

Quem sabe algum grupo já tenha montado a tabela correta. Mas em todo caso vamos organizar separando quarks e léptons

|                |  |  |  |
|----------------|--|--|--|
| <b>Quarks</b>  |  |  |  |
|                |  |  |  |
| <b>Léptons</b> |  |  |  |
|                |  |  |  |

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |

Essa tabela que acabamos de montar está quase completa, mas ainda falta uma partícula.

## Capítulo 2 – Afinal, o que é massa?

Massa é tudo aquilo que ocupa espaço?

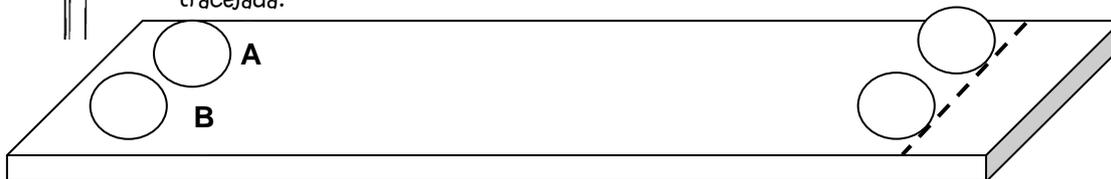
Como surge a massa?

Nesse capítulo iremos nos aprofundar um pouco mais no conceito de massa. O primeiro contato que tivemos com este conceito foi o de que massa é tudo aquilo que ocupa lugar no espaço. Depois o conceito de inércia na mecânica deu outra visão do conceito de massa. Mas afinal de contas o que é massa? As atividades a seguir ajudarão a construirmos um novo conceito sobre massa.

### Atividade 1- Comparando massas

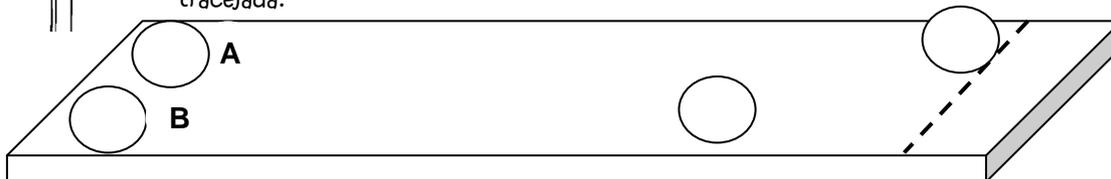
Vamos testar nossa intuição! Na figura abaixo existe uma superfície com duas esferas. Não existe atrito entre a superfície e as esferas. São colocadas duas situações. Discuta as questões com seus colegas.

**Situação 1** É aplicada a **mesma** força nas duas esferas. As esferas **A** e **B** chegam juntas na linha tracejada.



Na avaliação do grupo, qual esfera tem mais massa?

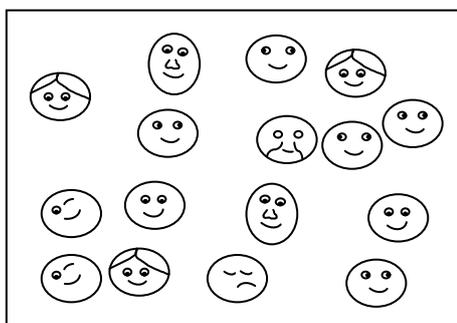
**Situação 2** É aplicada a **mesma** força nas duas esferas. Agora a esfera **A** chega mais rápido na linha tracejada.



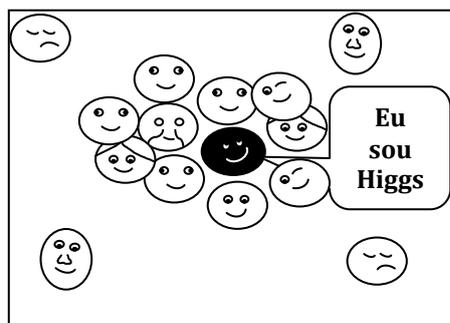
Na avaliação do grupo, qual esfera tem mais massa?

“A intuição nos diz que o corpo mais pesado se move mais devagar”

Sem Higgs

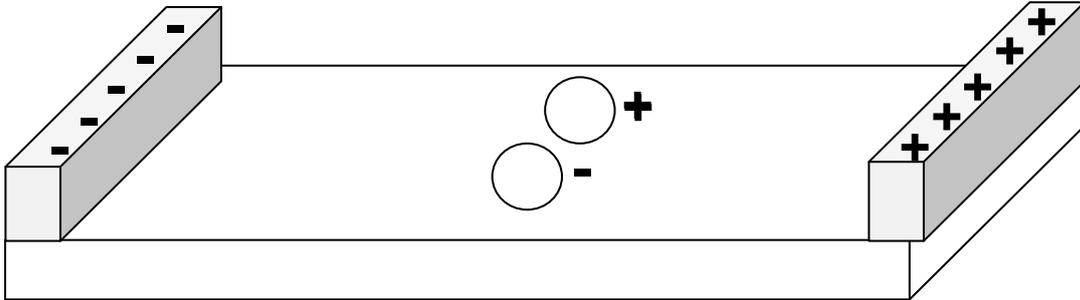


Com Higgs



### Atividade 2- Adicionando campos e percebendo propriedades

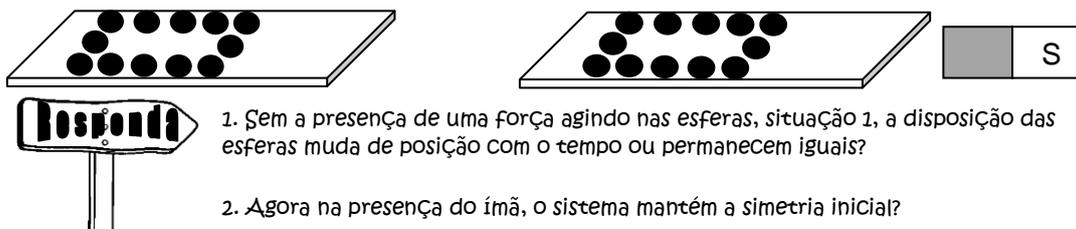
Vamos testar outra hipótese. Vamos supor que estas esferas possuam carga elétrica e nas extremidades sejam colocadas placas carregadas como mostra a figura. As duas esferas são empurradas para a direita. Discuta as questões com seus colegas.



1. Nessa situação podemos encontrar uma esfera que se move mais rápida que a outra? Qual?
2. É possível concluir que a esfera que anda mais devagar é a esfera mais pesada?
3. A presença de um campo influenciou no movimento?
4. Se algum tipo de campo influencia no movimento é possível que ele tenha influência sobre a massa?

### Atividade 3- Quebrando uma simetria

A figura mostra duas situações. A primeira uma mesa com esferas de ferro distribuídas na forma de um retângulo como mostra a figura sem a presença de um ímã e a segunda situação com a presença de um ímã como indica a figura.



1. Sem a presença de uma força agindo nas esferas, situação 1, a disposição das esferas muda de posição com o tempo ou permanecem iguais?
2. Agora na presença do ímã, o sistema mantém a simetria inicial?
3. Seria correto afirmar que o campo quebrou a simetria inicial das esferas?

Agora vamos substituir algumas esferas de ferro (pretas) por esferas de plástico (brancas)



1. Todas as esferas irão se movimentar na presença do campo magnético?
2. Então é possível que nem todas as partículas interagem com todos os campos?
3. Se existe um campo responsável por quantificar a massa, o fóton interage com este campo? E o elétron?
4. Se existe um campo existe uma interação?
5. Se existe uma interação existe um bóson?



## O universo não é tão simétrico

Em um universo simétrico não existiria direção ou orientação privilegiada. Os corpos seriam exatamente iguais, mesmo tamanhos, mesma carga e mesma massa entre outras grandezas. Se esse mesmo corpo fosse abandonado ele poderia ir a qualquer direção, e se vários corpos fossem abandonados todos se moveriam com a mesma velocidade. No entanto, se nós introduzimos um campo que viola esta simetria, poderíamos escolher uma direção "especial", ao longo do qual estes corpos iriam se mover mais lento ou mais rápido e, portanto, possuírem massas diferentes. A massa, que se definia como uma propriedade intrínseca da matéria, na verdade acredita-se que seja uma quantidade percebida, uma manifestação da interação entre um corpo e um campo. As partículas que parecem idênticas na ausência de um campo podem assumir variedades na sua presença.

Em 1964, Peter Higgs, Robert Brout e François Englert propuseram de forma independente, que o vácuo não implica necessariamente a ausência de tudo, mas na verdade poderia ser impregnado com um campo, que quebraria explicitamente algum tipo de simetria. Embora esse mecanismo fosse utilizado em teorias posteriores, era totalmente teórico, e difícil de provar de forma explícita sua existência. Pense, se algo está em toda parte, se permeia o espaço e forma um campo como podemos perceber? Como podemos convencer-nos de que é realmente este campo existe? A detecção do bóson de Higgs foi realizada no LHC fornecendo evidências da existência do campo de Higgs, e - quase cinquenta anos mais tarde a teoria da interação entre quebra de simetria e massa, foi finalmente laureado em 2013 com o Premio Nobel.

Logo após o big bang, o campo de Higgs era zero, mas como o universo esfriou a temperatura caiu abaixo de um valor crítico, o campo se expandiu, de modo que qualquer partícula poderia interagir com ele e adquirir massa. Pense no campo de Higgs como uma gelatina distribuída por todo o Universo. Na infância do cosmo, essa gelatina estava na forma líquida. Por isso, as partículas se movimentavam livremente no campo de Higgs. À medida que o Universo se resfriou, a gelatina se tornou mais densa, dificultando o movimento das partículas e de certa forma aumentou a interação delas com o campo de Higgs.

A partir do momento em que a gelatina se tornou sólida, o campo entrou em ação. Quanto maior a interação da partícula com o campo de Higgs, maior seria a massa dela. Por exemplo, algumas partículas, como os quarks, ficam mais presas à gelatina, o que os tornam mais massivos, já os elétrons passam quase sem interagir, e, por isso, são mais leves.

Quanto mais uma partícula interagir com este campo, mais massiva ela será. Partículas como o fóton que não interagem com ele não teriam massa. Como todos os campos fundamentais, o campo de Higgs tem uma partícula associada - o bóson de Higgs.

### Atividade 4- Conhecendo o CERN



Nesta atividade vamos assistir a um vídeo (<https://youtu.be/1TOnz71uDaK>) que mostra o funcionamento do maior laboratório de Física do mundo. O CERN, Centro Europeu de Pesquisa Nuclear, é o maior laboratório de física de partículas do mundo construído pelo homem, localizado em Meyrin, na região em Genebra, na fronteira Franco-Suíça. Assista ao vídeo para conhecer um pouco mais sobre este laboratório.

## Atividade 5- Atualizando o modelo padrão

A existência de mais um campo, considerado como fundamental, requer que mais um bóson seja incluído naquela tabela que construímos anteriormente. A seguir reescreva a tabela inserindo o bóson de Higgs.

|         |  |  |  |
|---------|--|--|--|
| Quarks  |  |  |  |
|         |  |  |  |
| Léptons |  |  |  |
|         |  |  |  |

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

## Leitura complementar

Ao longo dos Capítulos construímos e interpretamos modelos que descrevem as interações da natureza, como os decaimentos radiativos e as Criações de partículas, porém existia um problema, esses modelos não explicavam como essas partículas adquirem massa. Deveria todas ser como o fóton, sem massa e viajando na velocidade da luz. Este foi o trabalho de muitos cientistas, mas quem levou o mérito foi Peter Higgs.

Existiram vários modelos, mas Higgs desenvolveu um modelo baseado em um “campo” (o campo de Higgs) que funcionaria como um “freio” para as partículas. A analogia seria colocar um objeto que se movesse no vácuo sem resistência nenhuma e depois colocar o mesmo objeto em movimento numa piscina. Onde seria mais difícil o objeto se mover? No vácuo ou na água? Com certeza na água! Devido à resistência da água, o que dá a impressão de uma massa maior.

O campo de Higgs iria impor uma resistência ao movimento de partículas tornando essas partículas mais massivas. Lembre que na Teoria Quântica de Campos, todas as partículas são excitações de campos, então o campo de Higgs também é. O Higgs é especial, pois ele seria o único que provoca essa “resistência” ao movimento.

O bóson de Higgs é responsável pela massa de todas as partículas? Não! A existência do bóson de Higgs mostra a origem direta da massa de apenas uma pequena parte das partículas que conhecemos como o elétron. A massa de outras partículas, como o próton, tem origem em grande parte na força nuclear forte. Os prótons não interagem com o campo de Higgs então? Todas as partículas são afetadas diretamente pelo campo de Higgs, mas não pelo bóson de Higgs.

O Higgs é o mecanismo para dar massa aos bósons de força, e é o mais aceito para dar massa para partículas de matéria.

O próton e o nêutron, por exemplo, a totalidade de suas massas não podem ser explicadas pelo campo de Higgs, apenas 10% de suas massas correspondem a massa dos seus quarks que são geradas pelo Higgs. O restante é composto por outros mecanismos que não iremos discutir nesse trabalho.

Considerando que essas duas partículas, os prótons e os nêutrons, compõem quase a totalidade da massa da matéria, pois os elétrons são mil vezes mais leves. Então podemos dizer que boa parte da massa do nosso dia-a-dia **não vem** do Higgs.

Além de tudo isso, há fortes indícios que pode existir mais matéria pesada por aí, o que chamamos de **Matéria Escura**, que muitos acreditam que compõe boa parte da massa das galáxias.

O que é matéria escura? Bom, isto é outra história.

É importante deixar bem claro que estas analogias ajudam a entender o fenômeno, mas tem seus limites. O modelo de quebra de simetria é todo matemático, um arcabouço de propriedades matemáticas que foram reunidas para montar o modelo. Será que existem mais partículas? Mais campos? Isto é uma pergunta que quem sabe você mesmo possa responder se tornando um Físico e pesquisando sobre esta área. Se decidir seguir por este caminho, então boa sorte!

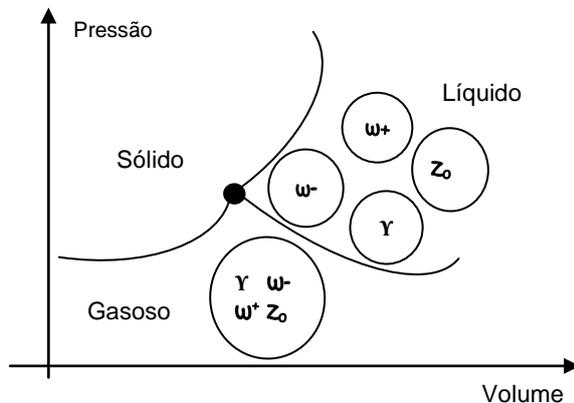
## Capítulo 3 - Transição de fase e Quebra de simetria

Qual o significado de transição de fase?

Ocorre transição de fase nos campos quânticos?

É possível uma partícula se transmutar em outra partícula?

É possível um fóton se transformar em outro bóson?



### Atividade 1- Partículas também "congelam"

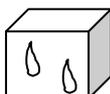
A figura mostra duas situações. Com base nas situações discuta com seus colegas as questões

água líquida



Situação 1

água sólida

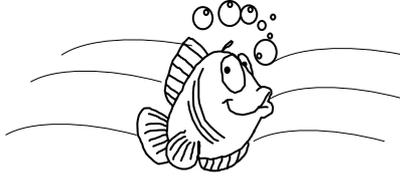


Situação 2

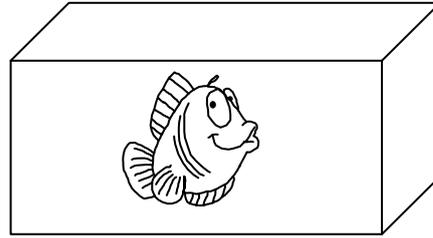
1. Em qual situação a temperatura da água esta mais alta?
2. Se você tivesse que escolher uma situação para ilustrar o início do universo, qual seria? Por quê?
3. Em relação à temperatura, o que aconteceu para a água virar gelo?
4. Podemos fazer uma relação em relação à temperatura do universo? Qual?
5. Se houve variação na temperatura do universo, houve variação de energia nos campos que compõe o espaço?

## Atividade 2- Unificando forças

No capítulo anterior estudamos uma quebra de simetria e o surgimento de mais um bóson, o bóson de Higgs. Este bóson daria massa a uma parte das partículas. A atividade a seguir relaciona uma quebra de simetria. Com base na figura responda as questões.



Situação 1 - Água



Situação 2 - Gelo

1. Em qual situação a temperatura está mais alta?
2. Houve transição de fase da situação 1 em relação à situação 2? Como se chama esta transição?
3. Em qual situação o peixe anda mais rápido?
4. Usando o mecanismo de Higgs, em qual situação o peixe "adquire" massa? Por quê?
5. Se você tivesse que escolher uma situação para o fóton, qual seria? Por quê?
6. E na situação 2, ele deixaria de ser o fóton?
7. Então é possível, mediante uma transição de fase, que o fóton ganhe massa?

## A Unificação de duas interações: A Teoria eletrofraca

Em 1979, Sheldon Glashow (figura 2.3.1), Abdus Salam (figura 2.3.2) e Steven Weinberg (figura 2.3.3) foram agraciados com o Prêmio Nobel por mostrar que a interação eletromagnética e a interação nuclear fraca eram de fato a mesma força fundamental em diferentes disfarces.

A alegação foi audaciosa. Havia muitas diferenças evidentes entre as duas interações, a interação eletromagnética é sentida através de grandes distâncias, enquanto que a interação fraca é sentida apenas em escalas nucleares.

Já se sabia que as interações são transportadas através do espaço por partículas; os portadores de cada interação têm certas características únicas, de acordo com sua "mensagem". A interação eletromagnética pode percorrer grandes distâncias, à velocidade da luz, porque o fóton não tem massa. A força fraca só sobrevive distâncias subatômicas porque seus portadores os bósons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  são muito pesados.

As interações fraca e eletromagnética só poderiam ser amarradas juntas, se seus portadores da interação estivessem unidos. Glashow, Salam e Weinberg utilizaram o modelo criado por Higgs e outros observando que o aparente desequilíbrio na massa não era uma característica intrínseca dos transportadores da interação, mas a manifestação de uma simetria quebrada.

Quando o Universo tinha acabado de nascer, a simetria perfeita prevaleceu e os bósons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  e fóton eram indistinguíveis, não tinham massa. Com o passar do tempo, as temperaturas foram baixando, o vácuo permeado pelo campo de Higgs se condensou e as assimetrias se desenvolveram de forma espontânea. Como resultado das suas várias interações com o campo de Higgs, três dessas partículas adquiriram massa, enquanto um permaneceu sem massa. Este é o mecanismo chamado de quebra de simetria. Quando houve a transição de fase a simetria foi quebrada, os bósons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  se separaram do fóton.



Figura 2.3.1



Figura 2.3.2



Figura 2.3.3

Abdus Salam usou a seguinte analogia para explicar: "olhar para gelo e água! Podem coexistir a zero grau centígrados, embora sejam muito distintos com propriedades diferentes. No entanto, se você aumentar a temperatura você pode achar que eles representam a mesma realidade fundamental, o mesmo fluido. Da

mesma forma, pensamos que se pudesse conceber um universo que foi muito, muito quente, então era nossa afirmação de que a força nuclear fraca iria apresentar o mesmo caráter de longo alcance como a força eletromagnética. Uma vez que só experimentar essas forças como são agora e não como eram no passado, percebemos o eletromagnetismo como sendo muito diferente da força fraca, ao passo que na verdade os dois podem ser rastreados até a mesma raiz”.

Apesar destas analogias poderem esclarecer o fenômeno, é importante frisar que foi através de muita matemática que estes modelos foram construídos. E depois do modelo matemático ser construído ele teve que ser experimentado. Então somente depois este modelo foi aceito.

Este modelo foi chamado de Teoria Eletrofraca.

# Unidade 3

## Diagramas de Feynman

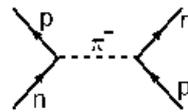
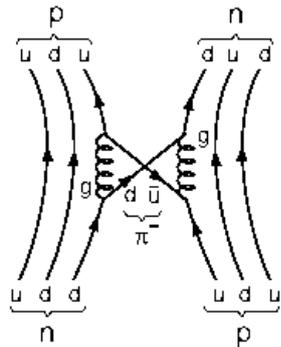


Imagem  
<http://www.omicron.com/2014/11/fisica-de-particulas-subatomicas-para-ninos-i/>

## Capítulo 1 – Diagramas de Feynman

Richard Feynman (figura 3.1.1) foi um dos físicos mais importantes do século XX. Seu trabalho em eletrodinâmica quântica lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1965, compartilhado com Julian Schwinger (figura 3.1.2) e Sin-ichiro Tomonaga (figura 3.1.3). Neste trabalho, ele desenvolveu um método para estudar as interações e as propriedades das partículas subatômicas na forma de diagramas.

Na segunda metade do século XX, os físicos de partículas, começaram a pesquisar sobre a colisão de partículas elementares. Eles encontraram um grande número de partículas e propriedades.

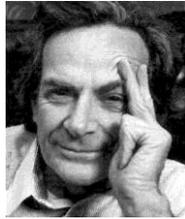


Figura 3.1.1



Figura 3.1.2



Figura 3.1.3

Além dos prótons, nêutrons e elétrons, eles descobriram partículas exóticas a que deram nomes como lambda, delta, ômega etc. Grande parte das investigações foram realizadas utilizando raios cósmicos e aceleradores de partículas. A análise detalhada dos caminhos curvos em um campo magnético, e aplicando as leis de conservação da quantidade de movimento e energia revelou partículas de diferentes massas.

### Atividade 1- As regras do jogo

Para começarmos montar os diagramas vamos construir algumas regras

- **Numa experiência com partículas teremos partículas iniciais – interação – partículas finais**
- **Podemos ter quatro tipos de linhas:** uma seta contínua, uma linha pontilhada, uma onda e uma mola.



A seta representa uma partícula



A linha pontilhada representa um méson



A onda representa Fótons,  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ ,



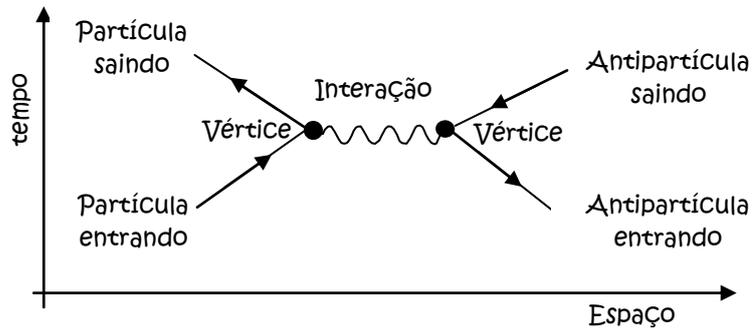
A mola representa um glúon

- **Vértices de Feynman:** Cada interação pode ser descrita utilizando um símbolo chamado **vértice**. Cada vértice representa um componente matemático sofisticado que é usado para calcular os vários aspectos de interações de partículas. Mas iremos usar os vértices de uma forma não matemática para ilustrar as interações
- Precisamos orientar a direção do movimento através de um eixo cartesiano do tempo e do espaço

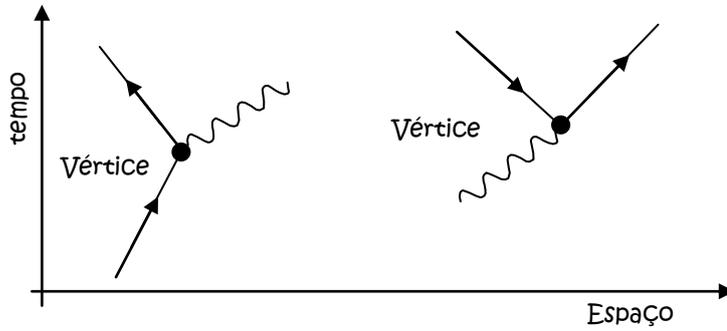


- É necessário distinguir partículas e antipartículas, por isso vamos adotar uma convenção para representar estas partículas. As partículas são representadas por uma seta que aponta direção positiva do eixo do tempo, e as antipartículas são representadas por uma **seta** que aponta na direção negativa do eixo do tempo.

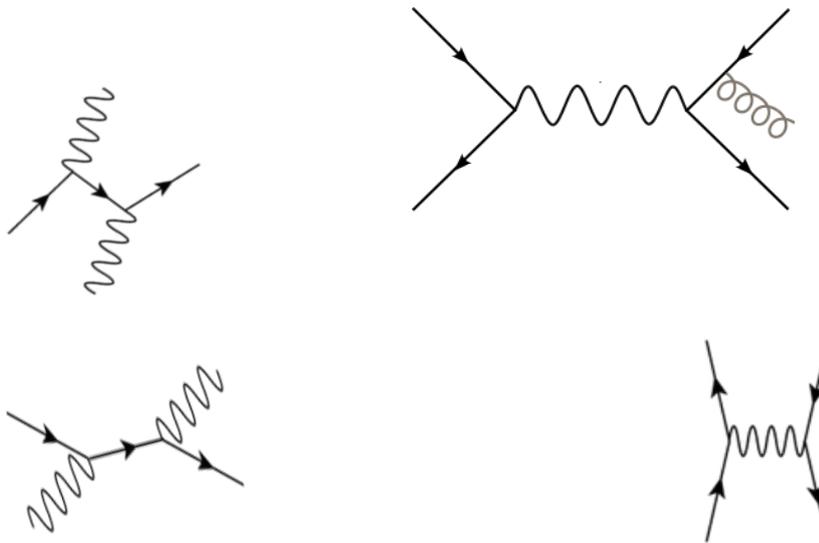
- As setas orientam o movimento. **Uma seta deve entrar no vértice e a outra sai do vértice.**



- Os bósons podem sair ou entrar no vértice



Nos diagramas a seguir identifique os constituintes do diagrama como partículas, anti partículas e bósons.



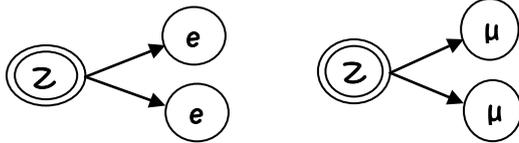
## Capítulo 2 – Diagramas de Interações Fracas

Há uma série de interações envolvendo vértices básicos associados com a interação fraca. Neste capítulo iremos construir alguns diagramas envolvendo o decaimento beta. Os bósons da interação fraca são os bósons  $w^+$ ,  $w^-$  e  $Z_0$ .

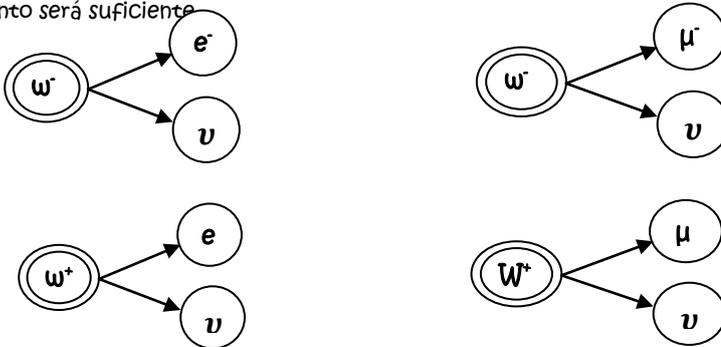
Os processos destas interações conservam uma série de grandezas, como o número bariônico, o número leptônico e a carga elétrica, mas iremos nos concentrar na conservação da carga elétrica.

Quando um bóson  $W$  ou  $Z$  decai, produz dois léptons que são os elétrons, múons e neutrinos bem como suas antipartículas.

Sabemos que o bóson  $Z_0$  tem carga elétrica nula, ele pode decair em dois léptons com cargas opostas (por exemplo,  $e^+ e^-$ ).



Os bósons  $W$  possuem carga +1 ou -1, por isso o bóson  $W$  decai em apenas um elétron ou um múon e mais seus respectivos neutrinos, que não tem carga. Essa história é bem mais complexa, mas para este momento será suficiente.



As atividades propostas tem por objetivo identificar as partículas e os bósons que participam da interação.

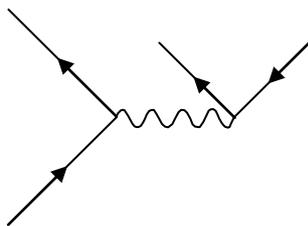
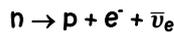
### Atividade 1- Decaimento beta

Como foi visto em capítulos anteriores a **emissão beta** ou **decaimento beta** é o processo pelo qual um núcleo instável pode transformar-se em outro núcleo mediante a emissão de uma partícula beta, alterando o seu número de prótons e número de nêutrons sem variar o número total de núcleons. A partícula beta pode ser um elétron, ou um pósitron. Um terceiro tipo de decaimento é a captura eletrônica. Nas tarefas a seguir são descritas as equações que descrevem estes processos.

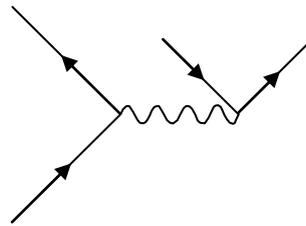
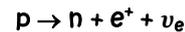


As figuras a baixo mostram o decaimento beta  $\beta^-$  e beta  $\beta^+$  e suas respectivas equações. Complete os diagramas com as respectivas partículas.

Decaimento beta  $\beta^-$

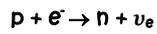


decaimento beta  $\beta^+$

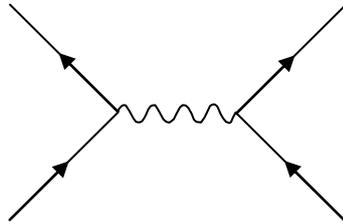




A Captura eletrônica é um processo onde um elétron de um átomo se combina com um próton do núcleo formando um nêutron e um neutrino.

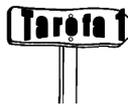


Complete o diagrama com as partículas



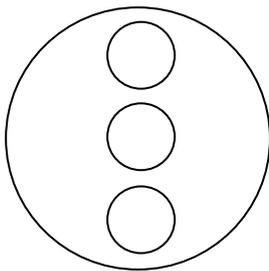
### Atividade 2- Decaimento beta completo

Nas atividades anteriores construímos diagramas parciais do decaimento beta. Nesta atividade iremos incluir os quarks e montar o diagrama completo. Vamos pegar como exemplo o decaimento  $\beta^-$ .

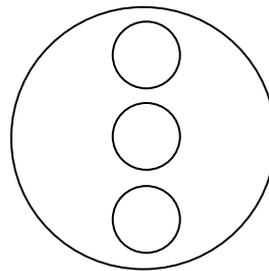


A figura abaixo mostra um nêutron se transformando em um próton. Identifique e nomeie os quarks que constituem o próton e o nêutron.

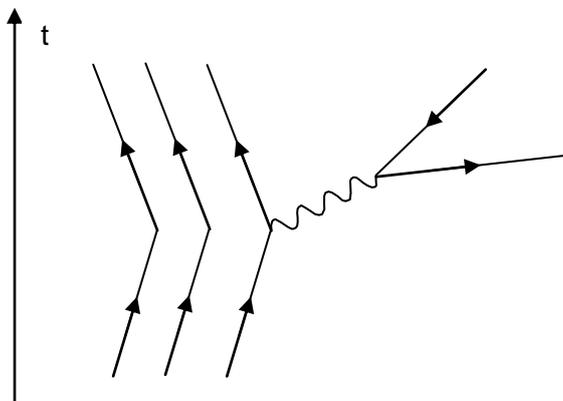
Nêutron



Próton



O decaimento  $\beta^-$  é regido pela equação  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ . No diagrama abaixo são colocadas as partículas fundamentais que participam do decaimento  $\beta^-$ . Identifique e nomeie todas as partículas que compõem o diagrama



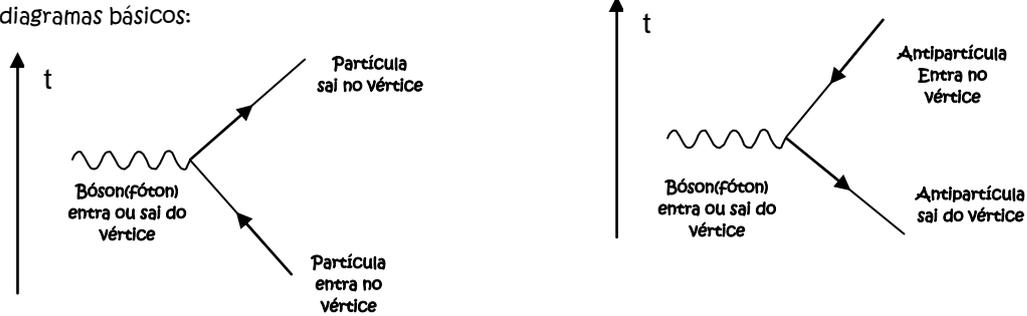
---

## Capítulo 3 – Diagramas Interações Eletromagnéticas

---

### Diagramas básicos da interação eletromagnética

Neste capítulo iremos construir os diagramas para as interações eletromagnéticas. Existem dois diagramas básicos:

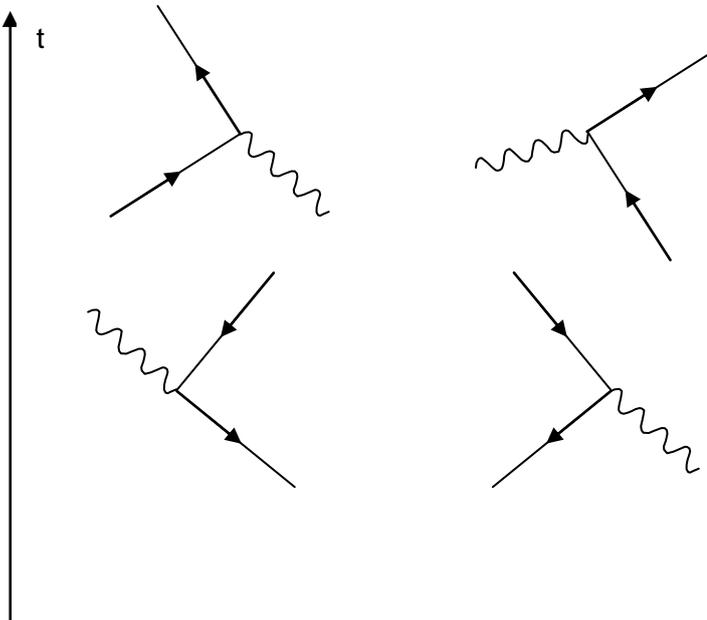


Mas é possível obter outras configurações de partículas e antipartículas no vértice. Estas configurações fornecem outra interpretação para os diagramas como veremos mais a frente.

#### Atividade 1- Absorção e emissão de Fótons

---

Nos diagramas abaixo identifique as partículas e antipartículas e verifique se o fóton foi absorvido ou emitido

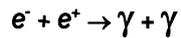


## Atividade 2- Aniquilação e criação de pares

Na atividade anterior podemos verificar através dos diagramas o mecanismo de absorção e emissão de fótons, porém não foi feita nenhuma interação de partícula com antipartícula. Nesta atividade veremos o comportamento da matéria ao colidir partícula e antipartícula.

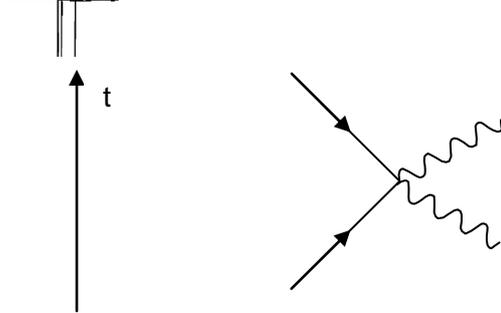
### Aniquilação de pares

Aniquilação é um processo onde uma partícula e uma antipartícula colidem liberando energia. Uma aniquilação pósitron elétron ocorre quando um elétron e um pósitron colidem. O resultado da colisão é o aniquilamento do elétron e do pósitron e a criação de fótons.



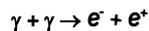
O processo deve satisfazer uma série de leis de conservação como conservação da carga elétrica, a conservação do momento linear e da energia total. Isso proíbe a criação de um único raio gama.

**Tarôta 1** Complete o diagrama com as devidas partículas no processo de produção de pares



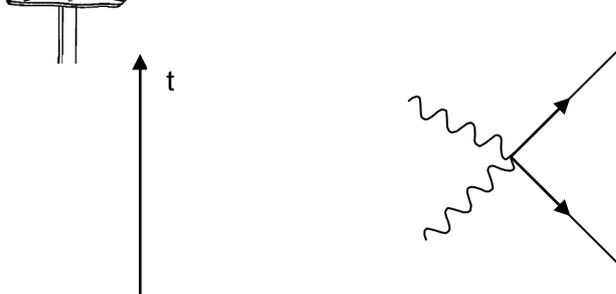
### Produção de pares

Produção de Pares ocorre quando um fóton se aproxima bastante do núcleo atômico. Ao interagir com o campo nuclear, ocorrerá uma grande mudança que “transforma” a energia do fóton em massa, pela famosa relação  $E = mc^2$ . Quando o fóton sofre esse tipo de interação, aparecem duas partículas em seu lugar e ele desaparece.



Da mesma forma que no processo de aniquilação, o processo deve também satisfazer as leis de conservação, por isso são necessário dois fótons.

**Tarôta 2** Complete o diagrama com as devidas partículas no processo de produção de pares

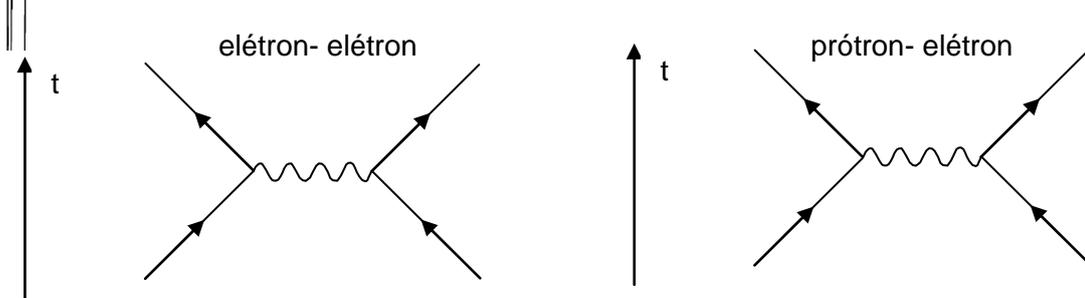


### Atividade 3- Interação entre cargas positivas e negativas

Já estamos familiarizados com interações entre cargas positivas e cargas negativas como prótons e elétrons. Nesta atividade iremos representar estas interações utilizando os diagramas de Feynman.

**Tarefa 1**

Complete os diagramas com as respectivas partículas e o bóson na interação



## Capítulo 4 – Diagramas de Interações Fortes

### Diagramas básicos da interação Forte Fundamental

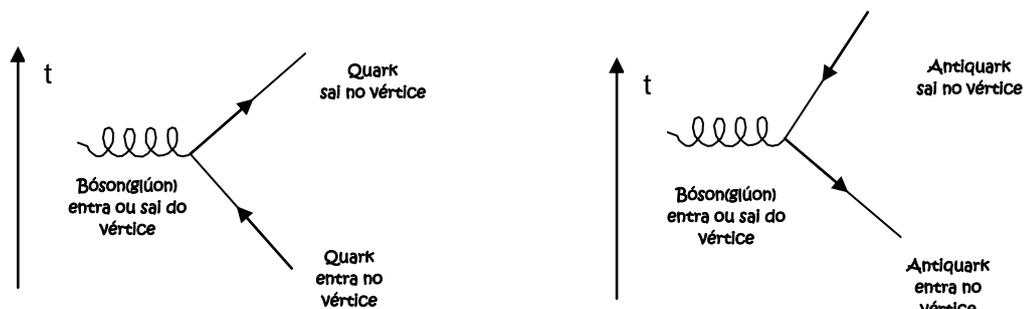
Nas interações eletromagnéticas com carga elétrica existem dois tipos de carga, positiva (+) e negativa (-). Como foi visto na unidade 2 os quarks transportam um tipo de carga chamado de cor. Esta carga cor é rotulada de vermelho (R), verde (G) e azul (B). O agrupamento de R + G + B é um agrupamento atraente, caso contrário é repelente.

Para cada cor, há uma anticor, ou seja, antivermelho (-R), antiverde (-G) e antiazul (-B). Um par cor e anti-cor se atraem da mesma forma que a combinação R + G + B (vermelho + verde + azul) é uma combinação neutra. Isto significa que o R + (-R) (vermelho e antivermelho) atraem e assim sucessivamente com as outras cores.

Mas a combinação do par cor mais anticor repelem o par anticor mais cor. Por exemplo, o par vermelho e antiazul, repelem o azul e antivermelho.

Essas regras de combinação de cores que impulsionam os quarks para combinar em grupos de três, para formar, por exemplo, prótons e nêutrons e pares quark antiquark, que formam os mésons, como o méson  $\pi$ . Nos grupos de três quarks, os bárions, haverá uma combinação das cores vermelho, verde e azul. Nos pares quark+antiquark, os mésons, haverá cor e anticor.

Existem dois diagramas básicos:

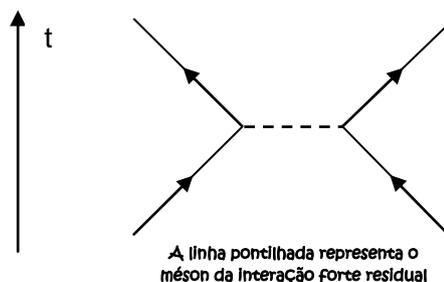


Como nos outros diagramas, existem configurações diferentes das partículas no vértice que darão outras possibilidades de diagramas. Nas atividades a seguir iremos construir alguns diagramas de Feynman de interações fortes.

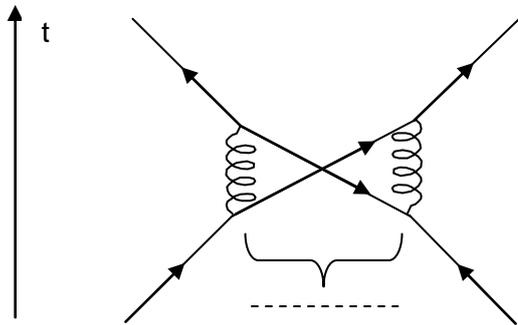
### Diagramas básicos da interação Forte Residual

O núcleo é composto por prótons e nêutrons, e estes são compostos de quarks. O mecanismo que mantém os quarks unidos é a carga cor e como vimos a interação entre nucleons é explicada por uma interação de carga cor residual. No modelo padrão a interação forte entre quarks é mediada por glúons, já a interação entre prótons e nêutrons é mediada por mésons. Os mésons são formados por um quark e um antiquark.

O diagrama básico na troca de mésons é:



Porém como o méson é formado por um quark mais um antiquark, temos um diagrama que mostra o mecanismo da interação com os mésons.

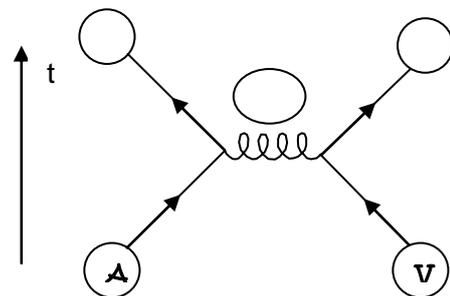
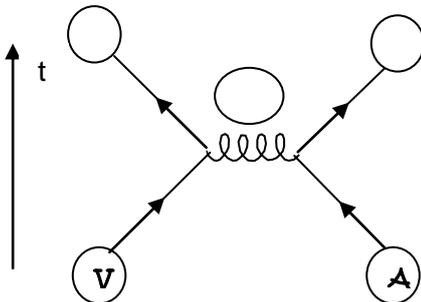


### Atividade 1- Diagramas para os quarks

Nesta atividade vamos construir alguns exemplos de diagramas para a interação forte fundamental. Sabemos que esta interação é mediada por glúons e mantém unida a estrutura de prótons, nêutrons e mésons.



Abaixo temos dois diagramas. No primeiro um quark vermelho se torna azul com a emissão virtual de um glúon vermelho-azul, que é absorvido por um quark azul que se torna vermelho. No segundo é o contrário. Complete os diagramas com as devidas partículas e bósons no processo de produção de pares

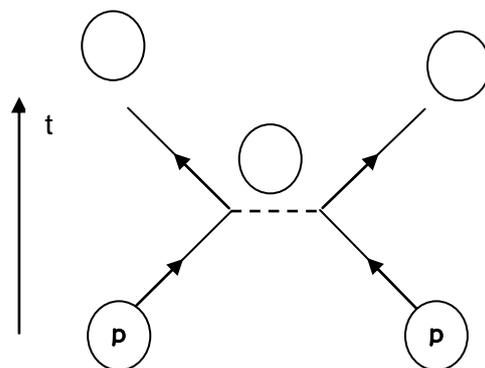


### Atividade 2- Diagramas da força nuclear para próton e nêutron

Sabemos que é a interação nuclear forte residual que mantém o núcleo estável. Nas tarefas a seguir vamos construir os diagramas para esta estabilidade.



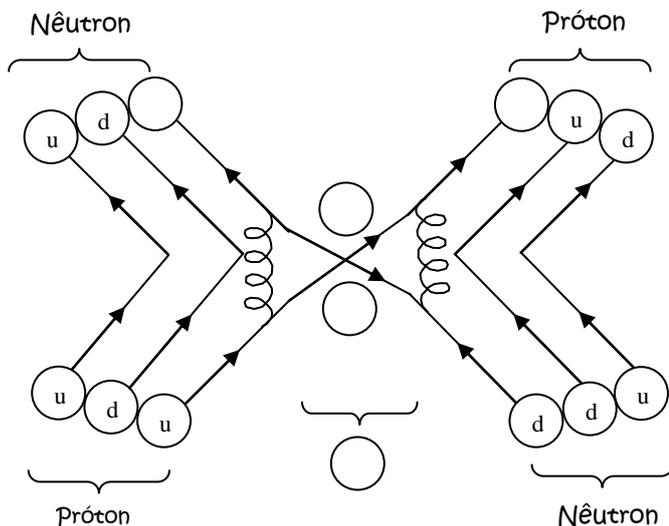
A interação entre um próton e próton é mediada pelo méson  $\pi^0$  também chamado de **Píon neutro**. Complete o diagrama com as devidas partículas e seu méson mediador





Um exemplo de interação forte residual é a troca de píons virtuais entre um próton e um nêutron. Um próton emite um pión com carga positiva ( $\pi^+$ ). Este pión é formado por um quark  $u$  e um antiquark  $\bar{d}$ .

Antes que o pión seja reabsorvido ele é captado por um nêutron que se encontra ao lado do próton. Neste processo o nêutron se transforma em um próton e o próton se transforma em um nêutron. Esta é uma dança constante entre os nucleons. Existem outros processos de interação fraca residual envolvendo outros píons como o  $\pi^-$  e o  $\pi^0$ . No diagrama a seguir complete as partículas que estão faltando



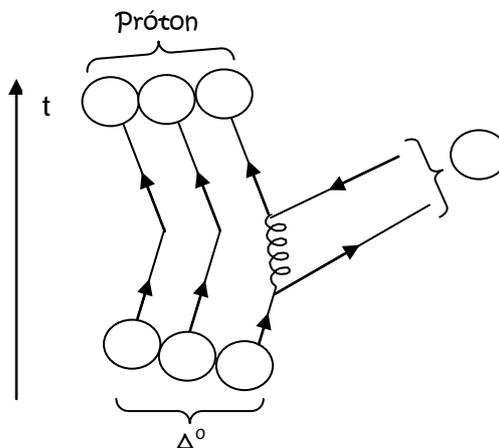
### Atividade 3- Decaimento da partícula $\Delta^0$

As partículas delta  $\Delta$  são bárions e pertencem à família dos hádrons. Estas partículas têm quatro variações e são representadas pelos símbolos  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ , e  $\Delta^-$ , suas cargas elétricas são respectivamente +2, +1, 0 e -1. Como os nucleons, são relativamente leves e feitos de apenas de quarks up ( $u$ ) e down ( $d$ ), mas diferente dos nucleons, a partícula  $\Delta$  têm spin total igual a  $\frac{3}{2}$ , em oposição ao próton e ao nêutron que têm spin  $\frac{1}{2}$ .



Todas as variedades de  $\Delta$  rapidamente decaem via interação forte em um nucleon (próton ou nêutron) e um pión de carga apropriada. O diagrama a seguir mostra o decaimento de um  $\Delta^0$  em um próton. A composição da partícula  $\Delta^0$  são os quarks  $udd$ . Já o próton tem na sua composição os quarks  $udu$ . Veja que um quark  $d$  se transformou num quark  $u$ .

Este decaimento ocorre mediante a interação forte de um méson, que é o bóson da interação. O méson deste decaimento é chamado de pión. O pión deste decaimento é o  $\pi^-$ , que é formado por quark  $d$  mais um antiquark  $\bar{u}$ . No diagrama ao lado, complete o diagrama com as partículas referentes ao processo.



# Atividade complementar

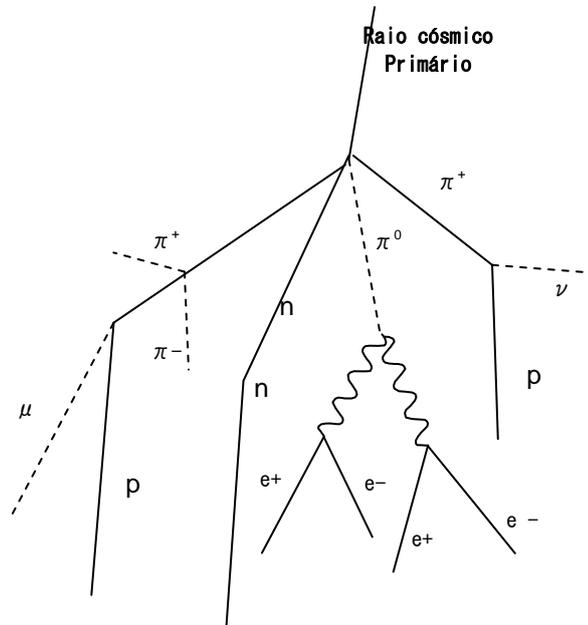
## O MAIOR ACELERADOR DE PARTÍCULAS O COŚMO E A PRODUÇÃO DE RAIOS CŚSMICOS

Há cerca de 100 anos descobriu-se que a Terra é castigada incessantemente por uma chuva cósmica de partículas que foram denominadas raios cósmicos. Hoje se sabe que algumas dessas partículas são incrivelmente energéticas. De onde elas vêm, como são produzidas e, afinal, o que são elas?

Essas questões levaram à construção de enormes observatórios dedicados ao estudo desses mensageiros de regiões de ambientes extremos: buracos negros, magnetares, explosões de raios gama, entre outros.

Vamos assistir à **palestra enigma dos raios cósmicos**, retirada do sítio <https://youtube/9Dn6opROS7M>, proferida pelo professor João Torres de Mello Neto, PhD em Física de Partículas e professor titular da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Nesta palestra explica didaticamente o que são os raios cósmicos, quais objetos celestes seriam capazes de produzir e como eles são detectados na Terra.



## Considerações Finais

Um dos principais objetivos da Física de Partículas é responder à pergunta:  
Do que é feito o universo?  
Poderíamos reduzir esta pergunta de maneira mais objetiva:  
O que é matéria e o que mantém ela unida?

Certamente esta pergunta não tem uma resposta concreta e terá que acumular muito conhecimento ainda da humanidade! As respostas encontradas até agora fazem parte do processo de construção da ciência, que se iniciou com Demócrito na antiga Grécia e irá se estender por toda a eternidade! A Física é uma ciência movida por perguntas, as respostas nem sempre irão revelar a verdade absoluta, mas a verdade daquele momento.

Consequentemente o que construímos nesse material terá que ser sempre revisado adaptando-o a novos conhecimentos produzidos.

A Física de Partículas fala em blocos de construção fundamentais da natureza, onde fundamentais assume um significado reducionista simples e sem estrutura. Muitas das partículas que discutimos até agora parecem ser simples em suas propriedades como os elétrons, mas há partículas que apresentam alguma complexidade devido à falta de experimentação e sua estruturação matemática sofisticada, é o caso do gráviton.

A busca pela origem da matéria significou a compreensão e a busca do que é elementar que denominamos partículas elementares. O entendimento das partículas elementares requer uma compreensão não apenas de suas características, mas como eles interagem e se relacionam com outras partículas e as forças da natureza que unem a matéria.

Mais de 200 partículas subatômicas foram descobertas até agora, as primeiras através de raios cósmicos e depois em aceleradores de partículas sofisticados. No entanto, a maioria não é uma partícula fundamental, a maioria é composta por outras partículas, mais fundamentais. Por exemplo, Rutherford mostrou que o átomo era composto de um núcleo e elétrons. Cientistas posteriores mostraram que o núcleo era composto de prótons e nêutrons. Os trabalhos mais recentes mostram que os prótons e nêutrons são compostos de quarks. Assim é importante ver que a ciência sobrevive de modelos e que um modelo pode ser substituído por outro que sempre será mais completo e mais evoluído. O modelo de Rutherford foi tão importante quanto aos modelos que o substituíram.

Os quarks até agora parecem ser verdadeiramente fundamentais, pois não apresentam nenhuma estrutura interna. Ocorrem em combinações com outros quarks ou antiquarks, nunca sozinhos.

Os léptons são todas as partículas membros da família dos férmions que interagem através da interação eletromagnética, fraca e gravitacional e não participam em interações fortes. Os Léptons são considerados partículas fundamentais, pois até agora não se tem evidências de estruturas internas.

Estas partículas fundamentais interagem através de forças. A força forte é dividida em duas, a força nuclear fundamental é responsável pela coesão dos quarks formando prótons, nêutrons e mésons e outras partículas, a outra, a força nuclear residual, é aquela que mantém o núcleo do átomo unido atraindo prótons e nêutrons. A força fraca controla o decaimento radioativo de núcleos atômicos e as reações entre léptons, como elétrons e neutrinos. Ela afeta todos os léptons e quarks.

A quarta força é a força gravitacional, um capítulo a parte, e atua em todas as partículas! Seu efeito é considerável em grandes aglomerações de matéria, mas seu efeito individual nas partículas praticamente desprezível. A teoria da relatividade geral, que relaciona a força gravitacional à curvatura do espaço-tempo, fornece uma teoria respeitável de gravidade numa escala maior. Para ser consistente com a relatividade geral, a gravidade no nível quântico deve ser transportada por uma partícula. O modelo padrão acrescentou o gráviton por uma questão digamos estética. Como foi visto temos dois problemas com o gráviton, um problema é matemático e outro problema é experimental. Estes problemas desafiam muitos físicos atualmente. Não há atualmente nenhuma teoria completa para combinar a teoria quântica e a relatividade geral para a gravidade. Muitos acreditam uma teoria muito mais profunda deva existir e a partir desta teoria possa emergir um casamento entre a mecânica quântica e a relatividade geral. Mesmo com a verificação de ondas gravitacionais atualmente, existe ainda um longo caminho a prosseguir.

As interações a nível quântico são explicadas através da TQC. Até agora a TQC explica como ocorre a troca de energia nas interações através da presença de campos de força. Os campos são formados por partículas mediadoras chamados bósons. As interações fundamentais ocorrem como se as partículas "trocassem" outras partículas entre si. Essas partículas são os fótons, partículas mediadoras da interação eletromagnética, glúons, partículas mediadoras da interação forte, partículas  $W$  e  $Z$ , partículas mediadoras da interação fraca e os teóricos grávitons, partículas mediadoras da interação gravitacional. Com exceção do gráviton, todas as partículas descritas do modelo já foram observadas.

É importante observar que o modelo padrão é um modelo evoluído em relação aos modelos anteriores propostos, desde o primeiro modelo proposto pelos gregos passando por Rutherford e Bohr e possivelmente novos modelos irão surgir no mundo subatômico, e que novos modelos irão superar os modelos existentes para explicar novos fenômenos.

A jornada da Física de Partículas não acaba aqui, foi apenas um passo. A procura das respostas continua!

## Lista de figuras

### Unidade 1

- Figura 1.1.1 - <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lucrecio>  
Figura 1.1.2 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Roger\\_Cotes](https://pt.wikipedia.org/wiki/Roger_Cotes)  
Figura 1.1.3 - <http://ameninaquemataVaCaraCois.files.wordpress.com/2009/09/newton7.gif>  
Figura 1.1.4 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](https://pt.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)  
Figura 1.1.5 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Linha\\_de\\_for%C3%A7a](https://pt.wikipedia.org/wiki/Linha_de_for%C3%A7a)  
Figura 1.1.6 - <https://pt.wikipedia.org/wiki/Maxwell>  
Figura 1.1.7 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Einstein](https://pt.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein)  
Figura 1.1.8 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Hideki\\_Yukawa](https://pt.wikipedia.org/wiki/Hideki_Yukawa)  
Figura 1.2.1 - <http://alternativa-med.com/html/assets/images>  
Figura 1.3.1 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Einstein](https://pt.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein)  
Figura 1.3.2 - [https://en.wikipedia.org/wiki/Erwin\\_Schrodinger](https://en.wikipedia.org/wiki/Erwin_Schrodinger)  
Figura 1.3.3 - [https://en.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Dirac](https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac)  
Figura 1.3.4 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Positron>  
Figura 1.3.5 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Carl\\_David\\_Anderson](https://pt.wikipedia.org/wiki/Carl_David_Anderson)  
Figura 1.4.1 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Max\\_Planck](https://pt.wikipedia.org/wiki/Max_Planck)  
Figura 1.5.1 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Enrico\\_Fermi](https://pt.wikipedia.org/wiki/Enrico_Fermi)  
Figura 1.5.2 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Satyendra\\_Nath\\_Bose](https://pt.wikipedia.org/wiki/Satyendra_Nath_Bose)  
Figura 1.7.1 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/George\\_Zweig](https://pt.wikipedia.org/wiki/George_Zweig)  
Figura 1.7.2 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Murray\\_Gell-Mann](https://pt.wikipedia.org/wiki/Murray_Gell-Mann)

### Unidade 2

- Figura 2.3.1 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Sheldon\\_Lee\\_Glashow](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sheldon_Lee_Glashow)  
Figura 2.3.2 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Abdus\\_Salam](https://pt.wikipedia.org/wiki/Abdus_Salam)  
Figura 2.3.3 - [https://pt.wikipedia.org/wiki/Steven\\_Weinberg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Steven_Weinberg)

### Unidade 3

- Figura 3.1.1 - [http://www.bgu.ac.il/~oaharon/feynman/Feynman\\_Portraits\\_files/Feynman.jpg](http://www.bgu.ac.il/~oaharon/feynman/Feynman_Portraits_files/Feynman.jpg)  
Figura 3.1.2 - <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3C/Schwinger.jpg/180px-Schwinger.jpg>  
Figura 3.1.3 - <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3a/Tomonaga.jpg/227px-Tomonaga.jpg>