



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA

Guilherme Emerim Nunes

De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang nas aulas de Física

Araranguá

2024

Guilherme Emerim Nunes

De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang nas aulas de Física

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Damasio

Araranguá

2024

Ficha catalográfica para trabalhos acadêmicos

Nunes, Guilherme Emerim

De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang nas aulas de Física /Guilherme Emerim Nunes ; orientador, Felipe Damasio, 2024.

236 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Ensino de Física. 2. Ensino de Física; Cosmologia; Teoria do Big Bang; Aprendizagem Significativa. I. Damasio, Felipe. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. III. Título.

Guilherme Emerim Nunes

De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang nas aulas de Física

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 23 de abril de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Marcelo Freitas de Andrade
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Dr.(a) Mônica Knöpker
Instituto Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Dr. Felipe Damasio
Orientador(a)

Araranguá, 2024.

Dedico este trabalho aos meus pais, Valdeci e Edna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Ao Programa de Bolsas do Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior – Fumdes, do Estado de Santa Catarina (UNIEDU) pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, pelas inúmeras lições valiosas que me ensinam, pelo apoio, pelo incentivo aos estudos, pelo carinho, amizade, dedicação e compreensão de vocês.

À minha avó e meu avô deixo um agradecimento mais do que especial, por todos os ensinamentos, pelo cuidado, carinho e compreensão.

Aos meus sobrinhos, Pedro e Mariah, que me inspiram a ser uma pessoa melhor e tornam meus dias mais felizes.

Aos meus amigos, por todo o apoio e incentivo. Pelas inúmeras horas de conversa sobre temas de pesquisa, trabalho e sonhos de um futuro não tão distante.

À minha melhor amiga, Maria Paula, pelo apoio, dedicação e compreensão. Por todas as nossas conversas reflexivas sobre os mais diversos temas, principalmente sobre ciência e sociedade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe, por todo o ensinamento, paciência, dedicação, preocupação, competência e profissionalismo. Seu excelente trabalho me inspirou a não desistir ainda na graduação. Agradeço também pelas divertidas conversas sobre temas de ficção científica, livros e futebol, gostos que compartilhamos e só me inspiram a continuar seguindo seu exemplo.

“Nós somos uma maneira do Cosmos conhecer a si mesmo.”

(Carl Sagan)

RESUMO

O presente trabalho buscou investigar o ensino de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia para o ensino médio, por meio da perspectiva histórica do centenário do Modelo Cosmológico Padrão (MCP), conhecido popularmente como Teoria do Big Bang. Para tanto, contou com o aporte teórico educacional da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David. P. Ausubel e epistemológico das ciências de Paul. K. Feyerabend. A metodologia utilizada se baseou nas unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) propostas por Marco A. Moreira. O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver um produto educacional de Física relacionado à Cosmologia Moderna, por meio da perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang, adotando uma abordagem *de* e *sobre* ciência, que permita descontextualizar a ideia de uma ciência imutável e centrada numa metodologia infalível; assim como a produção de um material paradidático e materiais de divulgação científica, estes últimos produzidos pelos estudantes. Os resultados obtidos por meio da investigação de variáveis de acordo com a Teoria Fundamentada de Strauss indicam um potencial relevante para o ensino de Física por meio dos referenciais teóricos e metodológico escolhidos, revelando indícios de aprendizagem significativa e promovendo o acesso aos conteúdos de ciência para o público, de forma geral, para além da sala de aula.

Palavras-chave: Ensino de Física; Astronomia; Astrofísica; Cosmologia; Teoria do Big Bang; Aprendizagem Significativa.

ABSTRACT

This work sought to investigate the teaching of Astronomy, Astrophysics and Cosmology for basic education, through the historical and centenary perspective of The Standard Cosmological Model, popularly known as The Big Bang Theory. The Project relies on the theoretical educational support of David P. Ausubel and the epistemology of Paul K. Feyerabend. The methodology used was based on the potentially significant teaching units proposed by Marco A. Moreira. The general objective of this research focused on the teaching of physics concepts related to Modern Cosmology, through an approach to and about Science, which allows the idea of an immutable Science centered on an infallible methodology to be descontextualized; as well as the production of a paradidact material and scientific dissemination materials, the latter produced by the students. The results obtained indicate a relevant potential between the theoretical and methodological frameworks chosen, revealing signs of meaningful learning and promoting access to Science content for the general public beyond the classroom.

Keywords: Physics Teaching; Astronomy; Astrophysics; Cosmology; Big Bang Theory; Meaningful Learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Margem vista de frente.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 1- Formas do Universo de acordo com a constante de curvatura	42
Figura 2- Relação entre o redshift e a distância por Hubble	43
Figura 3- Partícula de massa m com raio r situada na superfície de uma esfera simétrica (Universo) que pode se expandir ou contrair conforme indicam as setas no exterior da própria esfera.....	46
Figura 4 – Fator de escala como função do tempo cósmico para três modelos de Universo ...	49
Figura 5- Implementação do curso no auditório do colégio IFSC – Câmpus Araranguá.	61
Figura 6- Capítulo 1 do material de divulgação científica sobre o tema.....	75
Figura 7- O centenário da teoria do Big Bang.....	75
Figura 8- Origem da teoria do Big Bang	76
Figura 9- Teoria do Big Bang e Relatividade Geral	76
Figura 10 – Personagens envolvidos na história centenária da teoria do Big Bang.....	76
Figura 11- Uma jornada premiada.....	77
Figura 12- Convite à divulgação	77
Figura 13- Capítulo 2 do material de divulgação científica sobre o tema.....	77
Figura 14 – O que é a Cosmologia?	78
Figura 15- Como surgiu a Cosmologia Moderna?	78
Figura 16- Surge a Cosmologia Moderna	78
Figura 17- TRG e o Cosmos.....	79
Figura 18 – O que é a Teoria da Relatividade Geral?	79
Figura 19 –Espaço-tempo.....	79
Figura 20 – Entendendo o espaço-tempo	80
Figura 21- TRG e suas implicações.....	80
Figura 22 – Como era o modelo de Universo proposto por Einstein?	80
Figura 23 – Capítulo 3 do material de divulgação científica sobre o tema	81
Figura 24- O modelo cosmológico de Einstein	81
Figura 25 – Cosmologia relativística.....	81
Figura 26- Princípio Cosmológico	82
Figura 27- Problema previsto pela TRG.....	82
Figura 28- A constante cosmológica de Einstein	82
Figura 29- A constante cosmológica foi um erro?	83

Figura 30 – O legado do modelo de Einstein	83
Figura 31 – Capítulo 4 do material de divulgação científica sobre o tema	83
Figura 32- O universo de Einstein	84
Figura 33- Relembrando o modelo de Einstein	84
Figura 34- Características do modelo fechado e seus problemas	85
Figura 35- De Sitter, Friedmann e Lemaître.....	85
Figura 36- Propostas de modelos de Universo	85
Figura 37- Capítulo 5 do material de divulgação científica sobre o tema.....	86
Figura 38- O universo de Willem De Sitter.....	86
Figura 39- Quem foi De Sitter?	86
Figura 40- Como era o Universo de Willem De Sitter	87
Figura 41- Universo com ausência de matéria	87
Figura 42- Modelo matemático de Universo	87
Figura 43- O efeito De Sitter	88
Figura 44- A década de 1920.....	88
Figura 45- Um Universo dinâmico	88
Figura 46- Capítulo 6 do material de divulgação científica sobre o tema.....	89
Figura 47- O Universo de Friedmann.....	89
Figura 48- Quem foi Alexander Friedmann?	90
Figura 49- O trabalho de Friedmann de 1922	90
Figura 50- Artigo de Friedmann de 1922	90
Figura 51- Os resultados de Friedmann.....	91
Figura 52- Universo em expansão?	91
Figura 53- Friedmann e a previsão de um modelo de Universo que se expande	91
Figura 54- Evolução em escala cósmica.....	92
Figura 55- Modelo de Friedmann.....	92
Figura 56- Modelo evolutivo e dinâmico	92
Figura 57- A dinâmica do Universo	93
Figura 58 – Três possíveis modelos de Universo	93
Figura 59- 1ª possibilidade	93
Figura 60 – 2ª possibilidade.....	94
Figura 61- 3ª possibilidade	94
Figura 62 – Universo mutável	94
Figura 63 – Capítulo 7 do material de divulgação científica sobre o tema	95

Figura 64- Um padre e a teoria do Big Bang.....	95
Figura 65- Quem foi esse padre?.....	95
Figura 67- A teoria de Lemaître	96
Figura 68- A física dos raios cósmicos e o átomo primordial de Lemaître.....	96
Figura 69- Decaimento radioativo.....	97
Figura 70 – Expansão do Universo	97
Figura 71- Semelhanças com o modelo de Friedmann.....	98
Figura 72 – Capítulo 8 do material de divulgação científica sobre o tema	98
Figura 73 – Quem mediu o Universo?.....	98
Figura 74 – Henrieta S. Leavitt	99
Figura 75- A vida de Leavitt.....	99
Figura 76 – O trabalho de Leavitt.....	100
Figura 77 – Relação Período-Luminosidade de Leavitt	100
Figura 78 – Relação Período-Luminosidade	100
Figura 79- Curiosidades	101
Figura 80 - Curiosidades	101
Figura 81- Vídeo - Modelo Cosmológico Padrão e a Expansão do Universo.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise quantitativa de artigos	23
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMC	Física Moderna e Contemporânea
DC	Divulgação Científica
TRG	Teoria da Relatividade Geral
MCP	Modelo Cosmológico Padrão
λ CDM	<i>Lambda Cold Dark Matter</i>
EFL	Equação de Friedmann-Lemaître
TAS	Teoria da Aprendizagem Significativa
HFC	História e Filosofia da Ciência
MNPEF	Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1	16
1	INTRODUÇÃO..... ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
	CAPÍTULO 2	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
	CAPÍTULO 3	28
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EDUCACIONAL	28
3.1	TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA.....	28
3.2	UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA.....	33
3.3	EPISTEMOLOGIA DE PAUL K. FEYERABENDERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
3.4	ESCOLHA DOS REFERENCIAIS ADOTADOS	38
	CAPÍTULO 4	41
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE FÍSICA	41
4.1	MODELO DE EINSTEIN, PRINCÍPIO COSMOLÓGICO, MÉTRICA DE ROBERTSON WALKER	41
4.2	LEI DE HUBBLE-LEMAÎTRE	43
4.3	EQUAÇÃO DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE	47
4.4	PARÂMETRO DE DESACELERAÇÃO.....	51
	CAPÍTULO 5	54
5	METODOLOGIA.....	54
5.1	ESCOLHA E APROPRIAÇÃO DO TEMA.....	54
5.2	PLANEJAMENTO	56
5.3	DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO EDUCACIONAL	58
5.3.1	A TEORIA DO BIG BANG NAS AULAS DE FÍSICA: UEPS PARA UM ENSINO DE E SOBRE FÍSICA.....	58
5.3.1.1	DEFINIÇÃO DO TÓPICO ESPECÍFICO A SER ABORDADO	58
5.3.1.2	CRIAÇÃO DE SITUAÇÕES INICIAIS PARA OS ALUNOS EXTERNAREM SEUS CONHECIMENTO PRÉVIOS	59
5.3.1.3	PROPOSIÇÃO DE SITUAÇÕES-PROBLEMA.....	59
5.3.1.4	APRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO A SER ABORDADO	60
5.3.1.5	ABORDAGEM DO CONHECIMENTO EM UM NÍVEL MAIS ALTO DE COMPLEXIDADE.....	60

5.3.1.6	RETOMADA DAS CARACTERÍSTICAS MAIS RELEVANTES	60
5.3.1.7	AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM NA UEPS.....	61
5.3.1.8	AVALIAÇÃO DA UEPS.....	61
5.4	IMPLEMENTAÇÃO.....	61
5.5	ORIENTAÇÃO DE ESTUDANTES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO ENSINO MÉDIO.....	69
5.6	AVALIAÇÃO DO MATERIAL DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA.....	74
5.7	PUBLICAÇÃO DO MATERIAL DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA	75
5.7.1	MATERIAL DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA <i>DE E SOBRE</i> O CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG PRODUZIDO PELOS ALUNOS	76
5.8	REDAÇÃO.....	102
	CAPÍTULO 6.....	103
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	103
6.1	TEORIA DE GLASER E STRAUSS.....	103
6.2	ANÁLISE DAS CONCEPÇÕES PRÉVIAS	104
6.3	ANÁLISE DO DIÁRIO DE BORDO	105
6.4	ANÁLISE DA AVALIAÇÃO SOMATIVA INDIVIDUAL.....	105
6.5	ANÁLISE DO QUESTIONÁRIO FINAL.....	107
6.6	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE INVESTIGAÇÃO: ACHADOS DA PESQUISA	108
	CAPÍTULO 7.....	110
7	CONCLUSÃO.....	110
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE A	118
	APÊNDICE B.....	213
	APÊNDICE C.....	219

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física é alvo de discussões acerca da melhoria do desempenho dos alunos em áreas consideradas como ciências exatas, dividindo esse posto com o ensino de outras disciplinas catalogadas no mesmo eixo, como Matemática, Química e Biologia. Moreira (2018) lembra que apesar do avanço nas pesquisas em relação ao ensino de Física, essa área encontra dificuldades. O aluno quase sempre é direcionado à resolução de problemas e treinado para uma possível aprovação diante de provas, simulados e concursos vestibulares. Nesse contexto, evidencia-se uma questão comum entre os alunos em enxergar a Física como uma disciplina que exige habilidades matemáticas que estão muito além do que eles podem dominar. Apesar dessa disciplina procurar compreender fenômenos naturais, os alunos também mostram indícios de que não conseguem relacionar o que estão aprendendo com a realidade e tampouco percebem relação entre conceitos discutidos em sala de aula e processos do seu cotidiano, que podem ser explicados pela Física.

Existem muitos fatores que contribuem para que os alunos tenham essa percepção, como aulas expositivas dialogadas extensas e sem qualquer analogia com a realidade, exemplos abstratos e sem conexão com aplicações dos conceitos em tecnologias utilizadas pela sociedade, aspectos comportamentais dos alunos, formação dos professores, bem como condições estabelecidas por lei no que tange ao desenvolvimento desse componente curricular, que têm sido alvo de uma carga horária reduzida. Conforme argumentam Veit e Pires (2006), devido à diminuição da carga horária da disciplina de Física, os professores acabam por ter que escolher quais conteúdos ministrar e, em meio a esse processo, devido a reduções e sintetizações acabam gerando a falsa ideia de que essa disciplina seja uma extensão da Matemática.

Em complemento a isso, Rosa e Rosa (2005) destacam alguns problemas no ensino de Física, como o fato dos conteúdos presentes nos livros didáticos reforçarem tanto a ideia da constante presença de ferramentas matemáticas na Física quanto a concepção de que ela é uma ciência imutável. Esses autores também identificam a forte tendência apresentada nesse tipo de obra no sentido de treinar o aluno para a resolução de problemas envolvendo matemática aplicada.

Moreira (2017) aponta outra dificuldade relacionada aos desafios e às práticas adotadas por professores no contexto do ensino de Física, qual seja: a narrativa centrada no docente e a aceitação desse modelo pela comunidade escolar. Essa postura está aliada ao senso comum, à percepção de que quem produz o conhecimento científico é um grupo de pessoas com altas habilidades intelectuais ou, ainda em um termo mais popular entre os jovens, é um gênio. Contudo, a ciência está longe de ser um produto unificado de apenas um grupo de pessoas. A História da Ciência evidencia, por exemplo, como esse conhecimento é produzido, sua não linearidade e as barreiras encontradas ao longo de séculos para se obter êxito. A partir desse panorama, é possível deduzir que a narrativa de uma aula expositiva dialogada voltada apenas para as informações que um professor pode conceder a seus alunos é, no mínimo, limitante, em termos e condições para que ocorra aprendizagens relevantes sobre ciência.

Nesse cenário, torna-se cada vez mais difícil a inserção de tópicos de Cosmologia Moderna em sala de aula e o ensino de Astronomia e Astrofísica, tendo em vista a redução de conteúdos relacionados à Física e à falta de viabilidade para trabalhar esses tópicos. O ensino de Astronomia consta nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e a escolha por trabalhar com temas relacionados à Astronomia se mostra útil quando se leva em consideração algumas pesquisas e argumentos sobre o tema.

Bagdonas e Andrade (2010) apresentam a importância da História da Ciência aplicada ao ensino e suas potencialidades, posto que permite discutir sobre a natureza da ciência. Os autores ressaltam também os benefícios que episódios históricos da Astronomia podem trazer para essa discussão.

Silva e Almeida (2005) destacam que os assuntos sobre esses temas são os preferidos entre os jornalistas de divulgação científica, com destaque para informações sobre o Big Bang e buracos negros. Essa preferência não é exclusiva desse grupo, pois o interesse pela Astronomia pode surgir antes mesmo do ingresso no ambiente escolar. Geralmente o alunado não apresenta interesse nos assuntos relacionados à Física, na sala de aula, pois acaba visualizando o que entende por ciência, como algo distante de suas realidades. Contudo, muitos alunos demonstram interesse em assuntos que são explicados pela ciência e é nesse limiar entre o desinteresse pelas aulas tradicionais de Física e a curiosidade por algumas questões, que pode despertar no aluno a vontade de aprender sobre esses temas.

Oliveira (2006) analisa o papel da Cosmologia, fundamental e presente em todos os ramos da Física, por meio da visão de alunos e professores. São investigadas analogias e metáforas sobre Cosmologia, além das noções de Cosmologia presentes nos livros didáticos e

paradidáticos voltados ao ensino médio. A pesquisa ressalta que a Cosmologia é tida como um construto em evolução, realizada por sujeitos sociais, ou seja, um produto social, que faz parte da cultura humana que pode ser apresentado aos alunos para que estes possam ser agentes participativos dessa construção.

Langhi e Nardi (2014) discutem acerca do que pesquisadores de Educação em Astronomia revelam sobre a importância do ensino de Astronomia na educação formal e argumentam que ainda é preciso gerar reflexões sobre o tema. Nesse contexto, pode-se destacar que a Astronomia se mostra como um elemento potencializador para despertar o interesse por temas de ciência, contribuindo também na questão da alfabetização científica.

Dias e Santa Rita (2008) destacam a importância da inserção da disciplina de Astronomia como disciplina curricular do ensino médio. São apresentadas discussões sobre a relevância entre o que deve se ensinar e o que vem sendo ensinado sobre o tema. Além disso, os autores acentuam o papel interdisciplinar da Astronomia com relação a outras áreas de conhecimento.

Silva e Langhi (2021) apontam as dificuldades encontradas por professores ao ensinarem conteúdos relacionados à Astronomia. O problema deve ser abordado por influenciar diretamente na aprendizagem do alunado e, conseqüentemente, na forma como eles passam a enxergar a ciência.

Fróes (2014) apresenta um estudo realizado sobre o interesse dos alunos por temas de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia por meio do projeto ROSE (*Relevance of Science Education*) mostrando que os alunos realmente consideram o tema interessante, além de indicar algumas orientações para o professor que deseja trabalhar com esta temática.

Contudo, apesar de pesquisas contundentes e que enriquecem o âmbito do ensino de Física nesse sentido, há que se tomar cuidado na forma como conteúdos de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia são apresentados ao público do ensino básico. Conforme argumenta Horvath (2020), o ensino de Cosmologia é de fato um desafio, tendo em vista que teorias sobre a formação do Universo são baseadas na Teoria da Relatividade Geral (TRG). Quando falamos sobre a teoria do Big Bang e sua relação com a TRG, o problema parece permear a questão do grau de dificuldade imposto pelo entendimento das soluções das equações de campo da TRG até chegar à resposta do significado físico do problema envolvido. Por vezes, soluções que são baseadas nas equações de campo da TRG e que procuram explicar um problema relacionado à Cosmologia não são contempladas no âmbito do ensino formal, por apresentarem um alto nível de complexidade. Apesar de se mostrar como um conteúdo atrativo para o alunado devido à popularidade midiática em torno de pesquisas envolvendo

Astronomia Moderna, há uma ampla dificuldade de acessibilidade desse tipo conteúdo para o público do nível básico de ensino no contexto da sala de aula.

As pesquisas sobre o ensino de Astronomia são claras quanto às dificuldades que encontram e apresentam margens para a busca de mais questões e possíveis respostas para melhorias no ensino do tema na educação. Logo, a pesquisa aqui relatada buscou trabalhar no sentido de promover conhecimentos *de* e *sobre* Física, especialmente voltados para a área da Astronomia, Astrofísica e Cosmologia Moderna, à luz do centenário da Teoria do Big Bang, de forma a produzir não somente um produto educacional relevante para o ensino desses temas, como também formas de dialogar com o público por meio de materiais e meios de Divulgação Científica (DC).

Diante dessa perspectiva, a **questão** norteadora que essa pesquisa busca responder é: como promover conhecimentos *de* e *sobre* Física, especialmente voltados para a área da Astronomia, Astrofísica e Cosmologia Moderna, à luz do centenário da Teoria do Big Bang? Como **hipótese**, considera-se possível fazer isso tanto por meio da implementação de um material instrucional, em forma de curso para o ensino médio, quanto através da orientação de alunos, para que possam produzir conteúdo de divulgação científica. Nesse sentido, almeja-se utilizar a História e Filosofia da Ciência (HFC) para promover o ensino de Física e despertar nos alunos o interesse para temas relacionados aos tópicos sugeridos.

Além disso, procurou-se desenvolver materiais sobre o tema de ensino para promover a Divulgação Científica. Uma forma de buscar possíveis respostas para a questão proposta, foi por meio da formulação de um curso que possibilitou a produção de material de divulgação científica para mídias sociais por alunos e bolsistas de Iniciação Científica (IC's) do ensino médio. Essa abordagem aproxima e viabiliza o desenvolvimento da pesquisa acadêmica com a comunidade externa, além de fomentar o interesse e o acesso à ciência para o público geral. Sendo assim, a produção de material por conta dos discentes e a disponibilidade de acesso ao público, reforçam os laços do tripé entre Ensino, Pesquisa e Extensão, pois aproxima o público do conhecimento desenvolvido na universidade e desperta o interesse pelo aprendizado e acesso aos conteúdos de Ciência. É relevante destacar a participação da comunidade externa, que pode se beneficiar do conteúdo produzido oriundo da pesquisa acadêmica e sua fundamental importância, pois, assim, expande-se o conhecimento de temas relacionados à Física e História da Ciência e, de maneira geral, atinge um amplo espectro de pessoas.

A pesquisa contou com referenciais teóricos educacionais, metodológicos e epistemológicos que pudessem ser coerentes e complementares. Como fundamentação teórica

educacional, o trabalho teve como aporte teórico a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel. Para a fundamentação epistemológica, adotou-se a filosofia da ciência de Paul K. Feyerabend e como fundamentação metodológica as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), propostas por Marco A. Moreira. A escolha destes referenciais, conforme indicam Damasio e Peduzzi (2018) proporciona a discussão a respeito do ensino de conteúdos *de e sobre* ciência.

A fim de encontrar possíveis resultados consistentes e que façam sentido diante do problema de pesquisa e a hipótese sugerida, destaca-se como **objetivo geral** desenvolver um produto educacional de Física relacionado à Cosmologia Moderna, por meio da perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang, adotando uma abordagem *de e sobre* ciência, que permita descontextualizar a ideia de uma ciência imutável e centrada numa metodologia infalível; assim como a produção de um material paradidático e materiais de divulgação científica, estes últimos produzidos pelos estudantes. Os demais tópicos constituem os **objetivos específicos**: (i) Pesquisar o tema de pesquisa a ser abordado; (ii) Desenvolver e implementar uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para aulas voltadas ao ensino médio; (iii) Construir um material paradidático para o ensino de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia por meio da perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang; (iv) Implementar o produto educacional, promovendo um curso para o ensino médio para desenvolver a pesquisa de acordo com referencial teórico e epistemológico escolhido; (v) Orientar alunos do ensino médio, bolsistas de Iniciação Científica (IC's), na produção de material de divulgação científica sobre a temática da Teoria do Big Bang; (vi) Identificar indícios de aprendizagem significativa ao final da implementação da UEPS; (vii) Disponibilizar todo o material produzido para as aulas, bem como a UEPS, em um site na rede mundial de computadores; (viii) Avaliar e publicar o material de divulgação científica desenvolvido pelo alunos do ensino médio, disponibilizando textos, infográficos, *layouts* e vídeos nas plataformas do Instagram e Youtube, além da publicação no site, para acesso aos materiais produzidos para as aulas; (ix) Produzir conteúdo em forma de artigo a ser publicado em revista.

Nos próximos capítulos serão descritas as etapas pelas quais esta pesquisa passou e como ocorreu seu desenvolvimento. A revisão bibliográfica, que constitui o segundo capítulo do trabalho, mostra os artigos e os periódicos que foram consultados. Para o terceiro capítulo, foi reservada a apresentação e a descrição sobre a fundamentação teórica educacional utilizada. Ainda nesse mesmo capítulo são descritos os valores epistemológicos utilizados no trabalho e como essa visão epistemológica estrutura a pesquisa e delimita as questões de

ensino *de* e *sobre* ciência articuladas em conjunto para a construção do trabalho. A fundamentação teórica de Física aparece no quarto capítulo e apresenta os fundamentos da Teoria do Big Bang e os avanços relacionados às pesquisas sobre Cosmologia Moderna. Nessa parte do texto, optou-se por não descrever alguns modelos teóricos do Universo, por conta de suas particularidades, o que desviaria o escopo do trabalho e as intenções propostas. Além disso, são discutidas as principais contribuições relativas à evolução desse tipo de modelo que emergiu como o modelo cosmológico amplamente aceito na comunidade científica e o desenvolvimento dos princípios físicos vinculados à Teoria do Big Bang. No quinto capítulo, a metodologia utilizada nesta pesquisa é apresentada de forma detalhada. Para tanto, os tópicos relacionados à metodologia foram subdivididos na seguinte ordem: apropriação do tema, planejamento, implementação, orientação de IC's do Ensino Médio e redação. A metodologia buscou estar alinhada com os objetivos específicos propostos. O sexto capítulo é composto pela análise e discussão dos resultados encontrados, por meio da Teoria de Strauss. Essa parte do trabalho permite refletir e argumentar a respeito da questão norteadora e de possíveis respostas que estejam de acordo com a hipótese sugerida para o problema de pesquisa. Dessa forma, é possível argumentar a respeito dos resultados e problematizar as questões propostas pela pesquisa, bem como discutir outros problemas relacionados ao Ensino de Física. Para finalizar, a conclusão do trabalho é apresentada no capítulo sete, no qual são descritas as principais observações sobre o desenvolvimento e a implementação do produto educacional elaborado.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica contou com a pesquisa de artigos em oito periódicos. Estes escolhidos por relevância em seus trabalhos, classificação e nível de pesquisa: Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA), Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), Física na Escola (FnE), Investigação em Ensino de Ciências (IENCI), Revista do Professor de Física (RPF), Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF), Ciência & Educação (C&E), Experiências em Ensino de Ciências (EENCI). Para encontrar possíveis trabalhos que pudessem contribuir com a pesquisa em questão, foram usados temas de pesquisa sujeitos a serem encontrados em cada um dos periódicos citados. Os temas selecionados foram: “Ensino de Astronomia e Astrofísica”, “História e Filosofia da Ciência no Ensino de Astronomia” e “A teoria do Big Bang nas aulas de Física”. Ressalta-se que não se pretendia fazer um estado da arte dos temas e apenas utilizou-se artigos que seriam relevantes para a proposta da pesquisa. Ademais, não foram discutidos trabalhos acerca dos temas que não se enquadravam neste cenário.

Os resultados da revisão revelam uma inquietação iminente com essa área de pesquisa, especialmente no contexto da Astronomia, dado que inúmeros trabalhos abordaram o tema de interesse. No entanto, nem todas as publicações que tratavam sobre o tema se mostraram relevantes para este estudo, pois apresentam divergências entre as abordagens temáticas e nos subtemas a serem explorados. Encontra-se na literatura um número expressivo de trabalhos voltados para o ensino de Astronomia. Por outro lado, a demanda de pesquisas envolvendo assuntos que são possíveis de serem discutidos por meio do ensino de tópicos de Cosmologia, como a física do Big Bang a nível de ensino básico, utilizando História e Filosofia da Ciência (HFC), remonta ao mesmo quadro do ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino básico, que apesar de existir, ainda está em progresso para que cada vez mais pesquisas sobre o assunto sejam realizadas. O quadro literário acerca do ensino sobre temas de Física Moderna e Contemporânea mostra uma evolução com relação a publicação de trabalhos nessa área. No entanto, temáticas voltadas a Cosmologia e ao ensino do Modelo Cosmológico Padrão, relacionadas à História da Ciência não configuram um número expressivo de trabalhos.

Portanto, a revisão bibliográfica procurou investigar e encontrar pesquisas voltadas para o ensino de conteúdos que abordem conceitos de Cosmologia, Astronomia e Astrofísica,

principalmente quando aliados a outras áreas do conhecimento que podem até mesmo servir como ideias para incorporar elementos textuais e imagéticos, que auxiliem na compreensão e na importância daquele assunto para os alunos. Alguns trabalhos encontrados durante a revisão fizeram este papel e se aproximam dos objetivos desta pesquisa.

Sendo assim, as pesquisas mais relevantes foram selecionadas por apresentar conexões com a proposta e hipótese sugeridas, contribuindo para o seu desenvolvimento. Foi realizada uma análise quantitativa de trabalhos que apresentam os temas de pesquisa selecionados, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Análise quantitativa de artigos

Periódico	Ensino de Astronomia e Astrofísica	História e Filosofia da Ciência no Ensino de Astronomia	A teoria do Big Bang nas aulas de Física
RELEA	03	00	00
CBEF	00	01	01
FnE	00	00	00
IENCI	00	00	00
RPF	00	00	00
RBEF	03	00	00
C&E	00	01	00
EENCI	00	00	00
TOTAL	06	02	01

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Trabalhos como os de Justiniano e Botelho (2016) mostram como inserir e trabalhar com um recurso didático no ensino de Astronomia nas aulas de Física, por meio da construção de uma carta celeste. A procura por um recurso didático para o ensino do tema se torna comum na maioria das pesquisas sobre o ensino de Astronomia. Isto ocorre, pois, esta abordagem se diferencia das aulas tradicionais e coloca o aluno como protagonista.

Slovinski et al. (2021) analisam o ensino de Astronomia na formação inicial de professores de Física, com destaque para a falta de oferta de disciplinas de Astronomia nos cursos de licenciatura que foram observados em todas as regiões do país. Tal debilidade impacta diretamente na abordagem desses temas nas aulas de Física.

Langhi (2017) discute o papel dos astrônomos amadores e sua colaboração para com os astrônomos profissionais, observando a produção de conhecimento gerada nesta interação e

o benefício para a educação na esfera escolar. Com relação a este trabalho, é possível fazer um adendo para o fato de que a maioria dos estudantes não almejam serem cientistas, porém podem aprender a ver os conteúdos *de* e *sobre* ciência de outra maneira, pois se percebe a importância da construção do conhecimento científico e que se trata de um empreendimento cheio de obstáculos, descaracterizando uma ciência linear. Essa desconstrução do paradigma do senso comum que o alunado carrega sobre a produção do conhecimento científico se torna interessante para um futuro com mais interessados pela área.

No trabalho de Kleinke e Peixoto (2016) são relatadas as expectativas dos estudantes sobre a Astronomia no ensino médio, com destaque para os temas que motivam os alunos, como aqueles relacionados à ficção científica e temas com fortes influências midiáticas. Esse resultado revela um cenário intrigante para consideração, na qual a disseminação de princípios de Física Geral pode ser abordada usando meios de comunicação, cada vez mais abundantes e influentes na vida cotidiana dos estudantes dessa etapa educacional.

Gama e Henrique (2010) trazem à tona a relevante questão sobre o motivo do ensino de Astronomia na sala de aula, com destaque para a inserção de conceitos sobre o tema não somente como mais uma disciplina da grade curricular, mas evidenciando o papel da Astronomia como um conjunto de saberes com potencial de discussão sobre História e Filosofia da Ciência. Essa abordagem auxilia na desconstrução de uma visão de ciência estereotipada, na qual os cientistas são vistos como figuras isoladas e sem qualquer vínculo com a sociedade. A opção por trabalhar com História e Filosofia da Ciência permite discutir e fomentar os processos pelos quais a ciência passou para seu desenvolvimento, como construção humana e acessível.

Arthur e Peduzzi (2015) discutem os principais elementos relacionados à Teoria do Big Bang, por meio de uma visão epistemológica. O texto, como resultado da discussão, pode servir como um material didático para atividades sobre ciência que buscam dialogar sobre o tema. Os autores ainda destacam que a partir da Teoria do Big Bang é possível discutir questões a respeito da própria atividade científica. Os jovens do ensino médio estão cada vez mais habituados a lidarem com notícias e informações sobre ciência e tecnologia. Proporcionar a esses alunos e alunas que possam compreender e questionar acerca de como ocorre a atividade científica, relacionada aos conceitos que constituem a base do modelo cosmológico padrão, auxilia a despertar o interesse por conceitos de Astronomia e Física, de forma geral, além de esclarecer os caminhos, problemas, contradições e acertos de uma teoria científica.

Guttman e Braga (2015) apresentam um trabalho de discussões sobre a natureza da ciência com base em dois modelos distintos para a origem do universo, com uma turma de ensino médio. Os autores descrevem que ao final do processo os alunos passaram a apresentar uma visão mais complexa sobre Ciência. A comparação de modelos cosmológicos possíveis, quando apresentadas por meio de um viés que facilite a compreensão jovens do ensino básico, permite refletir sobre a concepção de ciência da turma. A partir dessa análise entre os tipos de modelos cosmológicos, os alunos passam a questionar sobre processos físicos que ainda não foram discutidos, mas que podem constituir a pauta das aulas, enriquecendo a construção de conhecimento.

Em um ensaio acerca da visão do ensino de Astronomia praticada nas escolas públicas brasileiras de educação básica, Silva (2019) argumenta sobre os processos de evolução sobre as teorias que buscam explicar a origem do universo: da concepção mecanicista de um universo estacionário até a visão de George Gamow, considerado um dos pais fundadores da Teoria do Big Bang. Além disso, o autor reflete sobre o distanciamento da disciplina Física com o campo de conhecimento da Astronomia Moderna.

Bagdonas e Neto (2023) analisam aspectos metafísicos e culturais presentes no desenvolvimento dos modelos cosmológicos até o modelo do Big Bang, com base na História e Filosofia da Ciência, buscando enfatizar a importância da diversidade na ciência. Os autores apresentam os modelos propostos por Friedman e Lemaître, precursores da teoria do Big Bang e investigam, por meio de uma análise histórica, as influências históricas, sociais e culturais presentes nos modelos cosmológicos propostos, por meio das concepções de mundo destes pesquisadores. Desta forma, o trabalho ainda ressalta o potencial uso de História e Filosofia da Ciência no ensino como base para a formulação de visão de mundo mais complexas acerca da natureza da ciência.

O número de trabalhos que abordam a questão sobre as preocupações e problemáticas envolvendo os descritores para a revisão mostram a relevância do desenvolvimento desta pesquisa. Apesar de existirem trabalhos com metodologias que busquem desenvolver o ensino de Física por meio de tópicos relacionado à Cosmologia, de forma geral, ainda se observa um déficit na produção de trabalhos voltados para essa área. Os jovens do ensino básico estão cada vez mais distantes dos conhecimentos relacionados às áreas de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia. Uma das formas de aproximar esses saberes está relacionado a forma como esse assunto os alcança por meio de websites, redes sociais, notícias e demais aplicativos de comunicação.

Nesse sentido, o ineditismo da proposta apresentada se dá não somente por uma abordagem sobre o assunto como um meio de produzir e divulgar conhecimento científico de maneira formal, por meio de um curso sobre o centenário da Teoria do Big Bang e com a elaboração de um produto educacional, mas também de maneira informal, ao fazer uso das produções sobre ciência que serão desenvolvidas a partir das ferramentas apresentadas no curso, para a produção de materiais sobre Astronomia, Astrofísica e Cosmologia pelos alunos e alunas, a serem divulgados em mídias digitais.

Capítulo 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EDUCACIONAL

Para fundamentar a hipótese da pesquisa, o trabalho tem como base os principais conceitos da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel (1918-2008) e a epistemologia e filosofia da ciência de Paul K. Feyerabend (1924-1994), usando como aporte metodológico as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), propostas por Marco Antônio Moreira.

3.1 Teoria da Aprendizagem Significativa

Gobara e Caluzi (2016) explicam que a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel foi desenvolvida para situações específicas de sala de aula, fundamentada em pressupostos cognitivistas. De acordo com Moreira e Masini (2008) um dos principais fatores para a ocorrência de aprendizagem significativa, é que haja material potencialmente significativo e uma pré-disposição em aprender. Nesse sentido, é papel do professor não somente preparar a aula, mas pensar em uma sequência de aulas que contenha elementos que possam permitir a ocorrência de aprendizagem significativa. Assim, torna-se interessante buscar uma aproximação para o ensino de conteúdos que possam despertar a atenção e o interesse dos alunos.

Alguns autores evidenciam a relevância do ensino de Astronomia, destacando a curiosidade apresentada pelos alunos para questões relacionadas ao tema. Scarinci e Pacca (2006) argumentam sobre o interesse relacionado ao senso comum das crianças com relação a fenômenos astronômicos. A Astronomia pode atrair a atenção do alunado, desde os primeiros anos escolares, pois contempla diversas áreas de conhecimento (Bernardes, T.O.; Iachel, G.; Scalvi, R.M.F.; 2008). Dentro desta perspectiva, é possível promover uma correlação com a TAS, no sentido de que a vontade dos alunos em aprender sobre temas que envolvem conceitos de Astronomia, pode ser um elemento facilitador para que haja pré-disposição em aprender. Outrossim, para buscar promover uma aprendizagem significativa acerca de um tema específico da área de Astronomia, como a Teoria do Big Bang, que abrange, em sua essência, primeiramente, tópicos de Cosmologia Moderna, Astrofísica e Física Moderna e Contemporânea (FMC), é preciso que haja material potencialmente significativo. Conforme coloca Moreira (2006) para que o material seja potencialmente significativo, precisa apresentar “significado lógico”, ou seja, possa ser relacionado com subsunçores específicos.

“Isto especifica as condições subjacentes para que um material seja considerado potencialmente significativo: a natureza do material em si e a natureza da estrutura cognitiva do aprendiz” (Moreira, 2006, p. 19).

De acordo com Moreira (2006), Ausubel chama de subsunçor o conhecimento específico que o estudante já possui em sua estrutura cognitiva.

O subsunçor é um conceito, uma ideia, uma proposição já existentes na estrutura cognitiva, capaz de servir de “ancoradouro” a uma nova informação de modo que esta adquira, assim, significado para o indivíduo (isto é, que ele tenha condições de atribuir significados a essa informação) (MOREIRA, 2006, p. 15).

Nesse sentido, Ausubel propõe uma série de princípios que buscam complementariedade no decorrer do processo e que podem facilitar a aprendizagem significativa. Conforme coloca Moreira (2017), Ausubel preconiza como principal elemento influenciador para a aprendizagem aquilo que o aluno já sabe. Para isso, é necessário preparar um material instrucional que também seja potencialmente significativo e que consiga despertar no aluno uma pré-disposição em aprender. Este último, fator decisivo para o início da construção de uma aprendizagem significativa. A vontade do aprendiz, ou seja, sua pré-disposição para conhecer e tentar assimilar os novos conceitos, a partir daquilo que já sabe, são de importância fundamental. Sem isto, não é possível que ocorra uma situação na qual se desenvolva uma aprendizagem significativa.

A essência do processo de aprendizagem significativa é que as ideias expressas simbolicamente são relacionadas às informações previamente adquiridas pelo aluno através de uma relação não arbitrária e substantiva (não literal) (Ausubel, Novak, Hanesian, 1980, p. 34).

A teoria de Ausubel propõe alguns critérios para que ocorra aprendizagem significativa: diferenciação progressiva, reconciliação integrativa, organização sequencial e consolidação. Conforme coloca Moreira (2010) a **diferenciação progressiva** é um processo no qual o sujeito aprendiz começa a atribuir novos significados a conceitos ou proposições, ou seja, aos conhecimentos prévios do aluno. Nesta parte são apresentados os conceitos mais gerais daquilo que se pretende ensinar, conforme explicam Ausubel, Novak e Hanesian (1980). De forma resumida, pode-se dizer que o indivíduo parte de uma informação geral e vai adequando a seus conhecimentos pré-existentes em relação à nova informação.

A **reconciliação integradora** permite resolver possíveis inconsistências e ajuda a integrar significados ao conhecimento a ser aprendido. Conforme explica o autor:

Em situações de aprendizado em que são introduzidas novas ideias que são semelhantes às ideias aprendidas anteriormente e, portanto, confundíveis com elas, é aconselhável, por meio de um procedimento conhecido como reconciliação integrativa, apontar explicitamente as semelhanças e as diferenças entre elas (Ausubel, D.; 1968. p. 132, tradução nossa).

É possível que o sujeito aprendiz possa confundir informações que estão sendo apresentadas com aquelas que já possui em sua estrutura cognitiva. Portanto, no processo de reconciliação integrativa não se deve descartar os conhecimentos pré-existentes, mas sim trabalhar nas diferenças entre aqueles conceitos que podem servir de base e já estão presentes na estrutura cognitiva, interagindo com as novas informações.

A **organização sequencial** está atrelada ao material potencialmente significativo, que irá ajudar no processo de como o aluno começa a organizar de forma hierarquizada os novos conceitos a serem aprendidos. Em seu artigo de 1968, Ausubel descreve sobre a consolidação das ideias âncoras e explica o papel da organização sequencial:

A organização sequencial do assunto pressupõe naturalmente que qualquer etapa de uma determinada sequência seja sempre clara e estável antes que a próxima etapa seja apresentada (Ausubel, D.; 1968, p. 131, tradução nossa).

Segundo Moreira (2005) é necessário que o material apresente coerência entre os princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integradora. A **consolidação** aparece como outro princípio sugerido por Ausubel e pode acontecer em consonância com a organização sequencial. Conforme explica o autor:

A consolidação também facilita a aprendizagem verbal significativa ao aumentar a capacidade de discriminação do material aprendido anteriormente em relação a novas tarefas de aprendizagem semelhantes – aquelas que dependem da sequência e aquelas que não dependem (Ausubel, D.; 1968, p. 131, tradução nossa).

Além destes quatro princípios norteadores, Ausubel ainda sugere o uso de organizadores prévios, para servirem de âncora para a aquisição de um novo conhecimento. Nesse caso, segundo Moreira e Masini (1982) um organizador prévio deve ser apresentado ao

aluno antes do conteúdo a ser aprendido, para que haja o desenvolvimento de um conceito que possa servir como subçunso para a nova informação. De acordo com Ausubel (1968, p.131, tradução nossa):

um determinado organizador é introduzido antes da nova tarefa de aprendizagem em si; é formulado em termos que, entre outras coisas, o relacionam e levam em conta as ideias de fundo geralmente relevantes já estabelecidas na estrutura cognitiva; e é apresentado em um nível adequado de abstração, generalidade e inclusão para fornecer um suporte ideacional especificamente relevante para o material mais diferencial e detalhado que é posteriormente apresentado.

O organizador ou os organizadores prévios atuam como “pontes cognitivas”, conforme explicam Moreira e Masini (1982), pois relacionam o material a ser aprendido com um conhecimento presente na estrutura cognitiva do aprendiz. A relevância desse processo é apresentada por Ausubel (1968) que acentua a importância dos organizadores como “ideias de ancoragem especificamente relevantes na estrutura cognitiva” (Ausubel, 1968, p. 131, tradução nossa).

Pensando na função e utilização de organizadores prévios, é possível visualizar a dicotomia existente entre a TAS e a aprendizagem mecânica, pois nesta última o indivíduo procura memorizar novos conceitos e informações, sem fazer relações com conhecimentos pré-existentes em sua estrutura cognitiva. Para que haja aprendizagem significativa, durante o processo de ensino é ideal que não ocorra memorização de conceitos, fórmulas, textos ou quaisquer tipos de aprendizagem com essa finalidade. Se aquilo que o aluno já sabe constitui um dos fatores que mais influenciam para uma aprendizagem significativa, logo devem ser levados em consideração os argumentos de Moreira (2010), que sugere insistir no domínio desses conhecimentos prévios antes de apresentar novos conceitos. Isto evidencia a importância da utilização de organizadores prévios, conforme explica Ausubel (1968, p. 132, tradução nossa):

Quando necessário, os organizadores também podem promover a meta de reconciliação integrativa, delineando explicitamente as semelhanças e diferenças essenciais entre os novos conceitos e princípios a serem aprendidos e ideias similares estabelecidas na estrutura cognitiva.

As condições ou princípios programáticos sugeridos por Ausubel esclarecem a falta de semelhança com a aprendizagem mecânica. No âmbito da sala de aula, no decorrer do processo de aprendizagem, alguns alunos são levados a acreditar, seja pela ansiedade de aprender um determinado conceito ou pelo desinteresse no conteúdo, a adotar estratégias de memorização, aliadas a um falso grau de entendimento daquilo que está sendo ensinado.

Os professores esquecem frequentemente que os alunos tornam-se facilmente adeptos da utilização de termos abstratos com um emprego aparentemente adequado – quando é preciso – muito embora inexista uma compreensão dos conceitos subjacentes (Ausubel, Novak, Hanesian, 1980, p. 36).

Dessa forma, a interação essencial entre aquisição de novos conceitos e atribuição de significado com base nos conhecimentos pré-existentes, não ocorre. Logo, se faz necessário um olhar atento na sala de aula quando se utiliza uma teoria de aprendizagem, como a TAS. O processo de implementação pode ser longo e apresentar algumas dificuldades relacionadas ao comportamento dos alunos e a recorrente técnica de aprendizagem mecânica.

Em Física, por exemplo, se os conceitos de força e campo já existem na estrutura cognitiva do aluno, estes servirão de subsunçores para novas informações referentes a certos tipos de forças e de campos, como, por exemplo, a força e o campo eletromagnéticos (Moreira, 2006, p. 15).

Outro exemplo na área da Física são os conceitos de espaço e tempo, quando analisados à luz da Teoria da Relatividade Geral (TRG), que podem ser facilmente interpretados equivocadamente pelos alunos, pois na TRG trabalha-se com a ideia do tecido do espaço-tempo. Seguindo os pressupostos da TAS, neste caso, a aquisição dos conceitos passa pelo processo de interação entre aquilo que o aluno já sabe e o novo conhecimento. A captação do significado físico do conceito de espaço-tempo na TRG será ancorada pela representação ou modelo dos conceitos de “espaço” e “tempo” internalizados pelo estudante. O professor, como mediador, ao reconhecer os conhecimentos prévios dos estudantes relacionados ao conteúdo a ser ensinado, pode argumentar sobre questões relativas a estes conhecimentos. Conforme Moreira e Masini (1982, p. 7): “a aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em *conceitos relevantes* preexistentes na estrutura cognitiva de quem aprende.” Ao ensinar conceitos de Astronomia, por exemplo, como o efeito Doppler, nas aulas de Física para o ensino médio, é preciso reconhecer que os estudantes talvez sequer tenham ouvido falar em algo semelhante, embora provavelmente já

tenham sido expostos ao fenômeno físico, quando ouvirem a sirene ligada de uma ambulância se aproximando ou se afastando. Como este fenômeno acontece tanto para o som como para a luz, é de grande relevância para a Astronomia e é utilizado na análise da separação aparente das galáxias e auxilia na compreensão da Teoria do Big Bang. Neste caso, no escopo da pesquisa apresentada, dentro do contexto da TAS, seguindo os princípios de Ausubel, é ideal que o professor proponha situações problemas com o uso de organizadores prévios afim de identificar quais os possíveis caminhos que podem resultar em uma aprendizagem significativa desses conceitos. Os dois exemplos citados, tanto para a TRG como para o efeito Doppler, são conceitos de Física comumente ignorados pelos professores no currículo desta disciplina, por questões de carga horária e por abordarem questões relacionadas a Física Moderna e à Astronomia.

3.2 Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS)

As Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) são sequências didáticas fundamentadas em algumas teorias cognitivistas, conforme destaca Ferreira et al. (2020). Sendo assim, ao propor a UEPS, Moreira (2011) utiliza aspectos da teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird, os campos conceituais de Vergnaud, as teorias educacionais de Novak e Gowin, a teoria socio-interacionista de Vygotsky, a teoria de aprendizagem significativa de Ausubel e a teoria da aprendizagem significativa crítica de Moreira. Nesse sentido, o uso do aporte metodológico de uma UEPS para a implementação e desenvolvimento do produto educacional, está aliada à teoria de aprendizagem utilizada. Um dos princípios norteadores da construção dessas sequências didáticas é a de que o conhecimento prévio do aluno é o fator que mais influencia na aprendizagem (Moreira, 2011). Ademais, a filosofia na qual são baseadas as UEPS estão atreladas a uma aprendizagem significativa, pois “só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa” Moreira (2011, p.2).

As UEPS podem ser utilizadas como forma de organizar as estruturas conceituais e os saberes a serem desenvolvidos no processo de aprendizagem. Geralmente, as UEPS são voltadas para situações em que se busca trabalhar os conceitos a serem aprendidos na sala de aula. Para o desenvolvimento da sequência didática da pesquisa, seguiu-se as sugestões de Moreira (2011) que destaca os princípios e aspectos sequenciais e transversais necessários para a construção de uma UEPS. Uma característica das UEPS que pode ser vantajosa em

relação a outros materiais é de que pode ser uma sequência modificável na qual demais profissionais da educação possam vir a utilizar em suas aulas.

A UEPS construída e utilizada nesta pesquisa adere os princípios norteadores de Moreira (2011) e está acessível não somente no Produto Educacional, disponível para consulta no Anexo I, como no *website* criado para a disponibilização dos conteúdos de divulgação científica acerca do centenário da Teoria do Big Bang.

3.3 Epistemologia de Paul K. Feyerabend

O trabalho conta com o viés epistemológico da filosofia da ciência de Paul K. Feyerabend (1924-1994). Sendo um dos pensadores mais analisados e comentados da epistemologia contemporânea, Feyerabend era doutor em Física, doutor honoris e causa em Letras e Humanidades, filósofo e crítico de teatro, tendo sido, inclusive, assistente do dramaturgo alemão, Bertold Brecht (1898-1956).

Em sua obra, Feyerabend valoriza a diversidade cultural, critica a forma como o conhecimento científico é aceito e propagado na sociedade e, devido a sua posição epistemológica, é alvo de críticas mordazes por conta de suas publicações. A principal delas, seu livro *Against the Method* (Contra o Método) (1975), é um desafio para aqueles que não apreciam o “pluralismo metodológico” defendido por ele e as maneiras pelas quais é possível valorizar conhecimentos que não sejam provenientes do método científico, segundo uma visão racionalista. Feyerabend dividiu o cenário da epistemologia contemporânea com Thomas Kuhn, Karl Popper e Imre Lakatos, para quem, inclusive, dedica seu livro, pelo incentivo de Lakatos para que publicasse suas ideias.

De acordo com Terra (2002) e Damasio (2017) as páginas da prestigiada revista *Nature* já serviram de palco para chamar Feyerabend de “o pior inimigo da ciência”, conforme aparece em artigo publicado por Teocharis e Psimopoulos (1987, p. 596). Criticado por adotar uma posição anarquista em relação a filosofia da ciência, Feyerabend expõe em sua obra as debilidades de uma visão positivista da ciência e como a visão racionalista pode apresentar argumentos que se contradizem em sua própria essência. Mas, afinal, o que seria o anarquismo epistemológico de Feyerabend e qual sua relação com o ensino de ciências?

Apesar de não fazer prescrições pedagógicas, suas ideias podem servir como reflexão para o ensino de ciências (Terra, P. S. 2002) (Damasio, F.; Peduzzi, L.O.Q. 2015). “Feyerabend sugere uma educação para uma sociedade livre, em que a educação geral prepare os cidadãos para escolher entre padrões, assim poderão achar seu caminho em uma sociedade que contém grupos comprometidos com vários princípios” (Damasio, F.; Peduzzi, L.O.Q.

2015, p. 72). Isto não significa que um cidadão deva se ater somente a padrões específicos de conduta do saber, mas se sentir à vontade para procurar ascender enquanto indivíduo conhecendo e pensando de diferentes maneiras sobre um determinado assunto. Em uma educação conforme sugerida por Feyerabend, um aluno da disciplina de Física, por exemplo, simplesmente não se conformaria com a informação dada como um “fato” pelo professor de que a Teoria do Big Bang nos diz que o Universo começou a evoluir a partir de um ponto extremamente denso e compacto, a uma temperatura da ordem de 10^{32} Kelvins. Quais foram os cientistas que chegaram a esta conclusão dentro da Teoria do Big Bang e por que isto constitui as bases do que entendemos por Modelo Cosmológico Padrão (MCP)? Por que esta teoria prevaleceu frente a Teoria do Estado Estacionário? Fatos históricos e contradições epistemológicas constroem estes dois modelos citados. Em 1917, Einstein introduz em suas equações de campo a famigerada constante λ , para corrigir os efeitos do que levaria, em seu modelo de universo estático, a um colapso gravitacional. Após as observações de Hubble evidenciando o afastamento das galáxias e corroborando visões e resultados de outros cientistas, como a do padre belga e cosmólogo Georges Lemaître e das soluções matemáticas apresentadas por Alexander Friedmann, Einstein se mostra arrependido pela inserção da então constante cosmológica. Ainda assim, esta constante é utilizada em pesquisas recentes e atua como modelo de investigação para explicar o que faz o Universo se expandir de forma acelerada. No entanto, a ideia de um universo dinâmico em expansão era completamente reprovada por Einstein e, conseqüentemente, foi aderida pela comunidade científica.

O filósofo austríaco desenvolve argumentos com exemplos retirados da História da Ciência, para descrever sobre a razoabilidade da contra-indução e o papel da pluralidade metodológica na construção da ciência. A exemplo desse tipo de situação, a história recente e centenária do desenvolvimento do Modelo Cosmológico Padrão (MCP), conhecido popularmente como Teoria do Big Bang, pode ser analisada à luz da epistemologia de Feyerabend. Conforme coloca o próprio Feyerabend (1977, p.43):

Com o que disse, terei, talvez, dado a impressão de que prego uma nova metodologia em que a indução é substituída pela contra-indução e onde aparecem teorias várias, concepções metafísicas e contos de fadas, em vez de aparecer o costumeiro binômio teoria/observação. Essa impressão seria, indubitavelmente, errônea. Meu objetivo não é o de substituir um conjunto de regras por outro conjunto do mesmo tipo: meu objetivo é, antes, o de convencer o leitor de que todas as metodologias, inclusive as mais óbvias, têm limitações.

Seguindo a lógica de pensamento de Feyerabend sobre a contra-indução e a pluralidade metodológica, pode-se refletir a respeito dos modelos cosmológicos (todos, sem exceção, puramente teóricos) desenvolvidos até meados da década de 1930. A coerência entre alguns modelos não era necessariamente clara e, por vezes, nem existia. O trabalho de Friedmann de 1922, sobre as soluções das equações de campo da TRG, é um exemplo de como uma nova teoria (ainda que não fosse completamente desenvolvida por Friedmann e pela omissão de significados físicos para as soluções), pode não se ajustar a teorias aceitas. Feyerabend (1977) argumenta que “a proliferação de teorias é benéfica para a ciência, ao passo que a uniformidade lhe debilita o poder crítico. A uniformidade, além disso, ameaça o livre desenvolvimento do indivíduo” (Feyerabend, P. K. 1977, p. 45). Isto não significa que o trabalho de Friedmann desconsiderou a TRG. Aconteceu exatamente o contrário, pois Friedmann aproveita os conceitos da TRG para formular suas soluções. Surge a possibilidade, com soluções matemáticas que obedecem à TRG, de uma nova teoria para um modelo do Cosmos. Para Einstein, o universo deveria ser fixo, ou seja, imutável, o que não concordava com os resultados apresentados por Friedmann. Após Friedmann, surge Lemaître, outro cosmólogo precursor da Teoria do Big Bang, com sua teoria do átomo primordial e sua previsão sobre o desvio para o vermelho gravitacional por meio da TRG. Certamente que uma metodologia única e exclusiva para caracterizar o desenvolvimento de um modelo cosmológico padrão tal qual conhecemos, estaria presa às suas próprias condições de uniformidade e tornaria a teoria cosmológica desarrazoada, pois sem a pluralidade de ideias/novas teorias, não haveria proliferação do conhecimento nesse sentido frente às observações que se sucederam nos anos seguintes ao desenvolvimento dos modelos cosmológicos mencionados. Essa pluralidade metodológica em Feyerabend permite captar significados de momentos e fatos históricos pertinentes para os avanços na ciência. Essa visão do empreendimento científico ainda proporciona discussões para o ensino de ciências.

Feyerabend (1977) tece críticas ao ensino de ciências e analisa a forma como é conduzida a educação científica nas escolas, sem nenhuma conexão com a realidade histórica dos fatos, propagando uma postura acrítica com relação a ciência. Conforme explicita o autor,

A ciência moderna, de outra parte, não é tão difícil e tão perfeita como a propaganda quer levar-nos a crer. Uma disciplina, como a física, a medicina ou a biologia, só parece difícil porque é mal ensinada, porque as lições comuns estão repletas de material redundante e porque a ela nos dedicamos já muito avançados na vida (Feyerabend, P. K. 1977, p. 463).

Os conteúdos elencados no currículo da disciplina de Física constituem a base das ferramentas tecnológicas utilizadas no mundo moderno, mas são tidos e ensinados como “fatos”, como verdade absoluta e indiscutível, sem qualquer chance de modificação, seja no presente ou no futuro. “Do mundo contemporâneo participa, de modo inegavelmente importante, a irmã xifópaga da ciência, mas não a ciência, isto é, pelo menos não o que é dela mais significativo e próprio: a forma de pensar” (Terra, P. S. 2002, p. 212). Esta educação sem cunho histórico e filosófico que coloca a ciência como detentora determinística do saber, pode fomentar uma defasagem na alfabetização científica, pois apresenta uma ciência irreduzível, incapaz de ser modificada. A visão de ciências apresentada aos alunos impacta diretamente na aprendizagem e na forma como estes podem vir a enxergar o empreendimento científico.

A filosofia da ciência de Feyerabend pode ser uma ferramenta auxiliar na desconstrução de visões equivocadas que os alunos do ensino básico apresentam sobre ciência, em particular sobre conceitos de Física. Conforme explicam Damasio e Peduzzi (2015) apesar de não ser contra o uso de regras, Feyerabend não concorda que exista um método universal pelo qual deve se dar o desenvolvimento do conhecimento científico. A História da Ciência, por si só, auxilia a corroborar os argumentos de Feyerabend, ao evidenciar por meio de fatos a não linearidade do progresso e do empreendimento científico.

Conforme Arthury (2010) a forma como o empreendimento científico é apresentado aos alunos pode ser visto como um reflexo das aulas do professor de ciências. A falácia de que o processo de fazer ciência ainda pertence exclusivamente aos professores de jaleco branco isolados em suas torres de marfim, ainda é divulgada por diversos meios de comunicação. Nesta perspectiva, o alunado do ensino médio se vê distante da possibilidade de pensar em trabalhar com a ciência no futuro, ou até mesmo iniciar algum projeto de relevância na área. A ciência é tratada como um objeto de estudo especial, como algo distante de suas realidades. Por conseguinte, o uso da História e Filosofia da Ciência (HFC) nas aulas de Física busca aproximar os alunos do desenvolvimento dos conceitos a serem ensinados. O uso de episódios históricos, fatos, documentos e artigos originais de personagens influentes para a realização de pesquisas que contribuíram para o conhecimento que pode ser ensinado em sala de aula, para além dos conceitos de Física, reflete o processo do fazer ciência. Essa abordagem em sala, permite mostrar ao aluno a reflexão de que a ciência é um construto humano, que possui muitas vertentes e busca compreender a natureza. Para Forato, Pietrocolla e Martins (2011) todo professor de ciências figura como um professor de filosofia da ciência.

Segundo Terra (2002), toda aula de ciências carrega em si uma postura baseada em uma filosofia da ciência que acaba sendo refletida em ações pedagógicas. Nesse sentido, torna-se viável aliar o ensino de ciências ao empreendimento científico e mostrar para os estudantes de ensino médio as causas e ferramentas da construção desses saberes. O estudante pode criar uma aproximação com o empreendimento científico quando apresentado à luz de uma ciência desmistificada, que mostra suas pluralidades e humanidades, conforme colocam Damasio e Peduzzi (2018). Assim, a pesquisa procurou tomar o eixo epistemológico de Feyerabend como guia para a fundamentação e a possível aproximação de suas ideias de uma educação para uma sociedade livre em um caminho que possa contribuir para a educação científica.

3.4 Escolha dos referenciais adotados

Os referenciais adotados foram escolhidos por apresentarem um grau de concordância com a pesquisa e os objetivos previstos. A Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (TAS) possui elementos no decorrer do processo de ensino que facilitam a participação ativa do aluno. O sujeito aprendiz deixa de ser um simples ouvinte e passa a ser um sujeito interativo do seu próprio processo de aprendizagem. Pensando nas aulas de Física e em como é possível alterar, ainda que em pequena escala, os modos pelos quais estas aulas possam deixar de serem desinteressantes e desconexas, o uso da TAS se mostra uma ferramenta educacional coesa para que o foco seja na formação de uma pessoa com olhar crítico para o mundo em que se encontra, permeado por tecnologia e elementos associados a esta disciplina. Este problema perpassa pela maneira como o empreendimento científico tem sido apresentado aos estudantes.

O uso de uma teoria de aprendizagem que pode ser facilitadora para a formação de um estudante mais crítico corrobora a escolha da filosofia da ciência de Feyerabend, como base para um ensino de física que aborde questões *de* e *sobre* ciência. As questões *de* ciência aparecem nos elementos relacionados aos conteúdos descritivos de Física, tais como os conceitos de Astronomia, Astrofísica e Física Moderna presentes no trabalho. Enquanto as questões *sobre* ciência estão no espectro da problematização de conceitos de Física, com base na História e Filosofia da Ciência (HFC) para discutir e levantar assuntos que, por vezes, são ignorados pelos professores durante as aulas. Para além disto, a Divulgação Científica (DC) que foi construída ao longo do desenvolvimento da pesquisa, ou seja, durante a implementação do produto educacional, permitiu que o ensino de Física extrapolasse o âmbito da sala de aula, promovendo a apresentação de conceitos de Cosmologia e temas históricos acerca da temática do centenário da Teoria do Big Bang.

Apresentar e dialogar com alunos do ensino médio do que se trata o empreendimento científico e como existem relações históricas, políticas e sociais envolvidas no fazer ciência, se mostra um desafio que, embora muito seja falado, tampouco tem sido construído em sala de aula. A HFC permite lidar com fatos acerca do processo da construção e dos desafios encontrados pela Física, e de como esta foi uma das áreas que mais apresentou desenvolvimento nos últimos séculos. Dentro da temática escolhida para este trabalho, estão presentes conceitos, fatos históricos e experimentais relacionados à Cosmologia Moderna, que formam uma base de conhecimento essencial para desvendar a evolução do nosso próprio Universo. Ao contrário do que os jornais, programas de televisão, redes e sites divulgam, equivocadamente, a Teoria do Big Bang é uma teoria de evolução do Universo. De maneira lógica, é possível compreender a euforia apresentada pela mídia ao falar sobre o assunto, afinal de contas, dentre muitos tópicos de Física, este encontra em suas bases, raízes filosóficas relacionadas a questões que ainda não podemos responder com precisão e que fazem parte da pesquisa atual no cenário da Cosmologia Moderna, como por exemplo: “O Universo teve um começo ou sempre existiu?”; “O que é a energia escura?”; “O tempo passava de forma mais lenta no início do Universo?”; entre outras inúmeras questões que, inclusive, configuram problemas de pesquisa.

Tendo em vista os saberes teóricos necessários para a implementação da aprendizagem significativa, é possível pensar na formação dos estudantes e na problemática de como ainda funciona o ensino, pautado na concepção de que existem respostas “certas” e “erradas” para toda e qualquer questão, infundindo o conceito de conhecimento “transmitido”, dentre outros problemas. Estes são alguns dos conceitos fora de foco elencados por Postman e Weingartner (1969) ao propor o ensino subversivo. Em um mundo tomado cada vez mais por construtos da ciência e da tecnologia, os estudantes continuam saindo da escola sem saber o mínimo sobre estes temas e são desestimulados a levantarem questões relevantes dentro do contexto em que estão inseridos.

A escola, por exemplo, ainda transmite a ilusão da certeza, mas procura atualizar-se tecnologicamente, competir com outros mecanismos de difusão da informação e, talvez não abertamente, ou inadvertidamente, preparar o aluno para a sociedade do consumo. Tudo fora de foco (Moreira, 2006, p. 17).

Uma possível saída deste cenário sem margens para a formação de um sujeito crítico e atento às mudanças sociais e tecnológicas que ocorrem no mundo, seria a aprendizagem

significativa subversiva proposta por Moreira (2006), baseada nas condições para que haja um ensino subversivo. Segundo o próprio autor, é preciso entender o que significa aprendizagem subversiva como “aquela perspectiva que permite ao sujeito fazer parte de sua cultura e, ao mesmo tempo, estar fora dela” (Moreira, 2006, p. 18).

Logo, a temática escolhida para o desenvolvimento da pesquisa, quando aliada a uma teoria de aprendizagem que se mostra útil e coerente com objetivos que visam promover o ensino de Física, baseada nos alicerces de uma filosofia da ciência que visa problematizar e não reter o procedimento da elaboração dos saberes, apenas com um método universal, permite discutir e oferecer caminhos para possíveis discussões e possibilidades para a construção de conhecimento dos alunos nesta disciplina.

Pensar no ensino de Física e na educação científica à luz da filosofia da ciência de Feyerabend aliada a uma teoria de aprendizagem que valorize o educando como protagonista de sua construção de conhecimento, como a TAS, possibilita a formação de seres críticos, que entendem os conceitos científicos e indagam acerca destes conceitos, que não aceitam informações prontas com respostas perfeitas e que serão capazes de reconhecer características de uma ciência não linear e multifacetária. Os estudantes são promovidos a questionadores, posto do qual não podem ser dessituados. Logicamente que não é coerente afirmar que esta abordagem irá agir como uma metodologia salvadora, mas que pode auxiliar e sugerir, com seus princípios, uma dissociação do ensino pautado na coleta de respostas acabadas e sem qualquer vínculo de interesse com o aprendizado que não seja puramente mecânico.

Capítulo 4

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DE FÍSICA

Neste capítulo serão descritos alguns dos principais conceitos físicos para a compreensão de um modelo do Universo, de acordo com a Cosmologia Moderna. Para tanto, serão analisados conceitos relacionados à cinemática e a dinâmica da expansão do Universo, envolvendo temas como: princípio cosmológico; métrica de Robertson-Walker; a equação de Friedmann-Lemaître; lei de Hubble-Lemaître. Não se trata de uma contextualização histórica destes conteúdos, pois pretende-se focar nos aspectos físicos e matemáticos da Cosmologia. Para uma descrição histórica do desenvolvimento da Cosmologia Moderna, é possível consultar o texto paradigmático produzido nesta pesquisa, disponível no Apêndice A.

4.1 Modelo de Einstein, Princípio Cosmológico, Métrica de Robertson-Walker

A Cosmologia Moderna surge em meados do século XX, mais precisamente após o trabalho de Albert Einstein de 1917, sobre os efeitos da Teoria da Relatividade Geral (TRG) no Cosmos. Partindo do pressuposto de que o Universo possui características de homogeneidade e isotropia em grande escala, Einstein modela um universo esférico espacialmente fechado. Um Universo homogêneo e isotrópico caracteriza o chamado Princípio Cosmológico. Isto significa que o Universo possui características iguais em todos os pontos e com as mesmas propriedades físicas em qualquer direção. Conforme coloca Amado (2022. p. 141)

“a suposição de homogeneidade em grande escala, associada com a suposição de isotropia em grande escala, implica, portanto, que as propriedades do Universo são as mesmas para todos os observadores, e é chamado de Princípio Cosmológico”.

Para um modelo baseado na TRG ser consistente, torna-se necessário lidar com espaços de curvatura constante. A métrica que permite a descrição desses parâmetros é obtida por meio do espaço-tempo de Minkowski e a dinâmica do Universo pode ser descrita pelas equações de campo de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu} \quad (1)$$

sendo $k = \frac{8\pi G}{c^4}$ a constante de gravitação de Einstein, Λ é a constante cosmológica, R é o escalar de curvatura e $T_{\mu\nu}$ e $R_{\mu\nu}$ são os tensores de energia-momento e curvatura do espaço-tempo. Schneider (2014, p. 177) explica que os modelos de universo homogêneos e isotrópicos são simplesmente soluções das equações de campo da Relatividade Geral (GR).

A geometria para um espaço bidimensional homogêneo e isotrópico no espaço pode assumir três formas: com constante de curvatura nula, positiva e uniforme ou negativa e uniforme, conforme coloca Ryden (2006). Sendo k a constante de curvatura e R o raio de curvatura, para um espaço tridimensional:

Para ($k = 0$):

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (2)$$

Em coordenadas esféricas, pode ser escrita como

$$ds^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\Phi^2) \quad (3)$$

Para ($k = +1$):

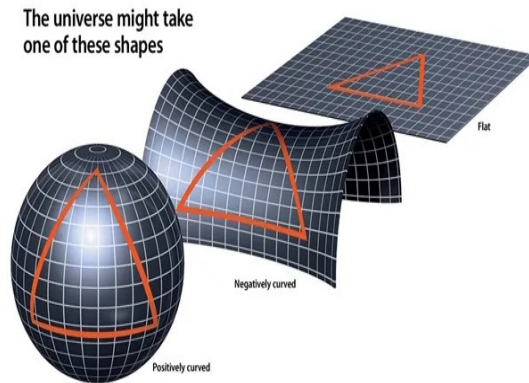
$$ds^2 = dr^2 + r^2 \sin^2 \frac{r}{R} (d\theta^2 + \sin^2\theta d\Phi^2) \quad (4)$$

Para ($k = -1$):

$$ds^2 = dr^2 + R^2 \sinh^2 \left(\frac{r}{R} \right) (d\theta^2 + \sin^2\theta d\Phi^2) \quad (5)$$

Estes espaços são conhecidos como espaços não-euclidianos de curvatura constante, conforme representados pela Figura 1. O modelo plano não se caracteriza como um espaço não-euclidiano. Para $k = 0$, o espaço é plano; para $k > 0$ o espaço é esférico e para $k < 0$ um espaço hiperbólico.

Figura 1- Formas do Universo de acordo com a constante de curvatura



Fonte: Astronomy Magazine. Disponível em: <https://www.astronomy.com/science/is-the-universe-infinite-or-finite-or-is-it-so-close-to-infinite-that-for-all-practical-purposes-it-is/>

Para um espaço uniformemente curvado de raio R_0 , se as distâncias começam a aumentar (se expandindo) ou diminuir (contraíndo) como uma função do tempo, a métrica é descrita conforme a métrica de Robertson-Walker, dada pela equação (6)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right] \quad (6)$$

4.2 Lei de Hubble-Lemaître

O comprimento de onda dado pela letra grega lâmbda λ que medimos para as linhas de absorção de uma galáxia distante, não será o mesmo medido para uma linha de absorção cujo comprimento de onda foi medido na Terra. Dizemos que a galáxia apresenta um desvio espectral para o vermelho, dado por

$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} \quad (7)$$

A grande maioria das galáxias apresenta $z > 0$, indicando um desvio das linhas espectrais para o vermelho, efeito conhecido como *redshift*. Quando $z < 0$, o desvio espectral tende para

o azul, efeito conhecido como *blueshift*. A relação entre a distância e a velocidade de afastamento das galáxias é dada pela lei de Hubble-Lemaître (8):

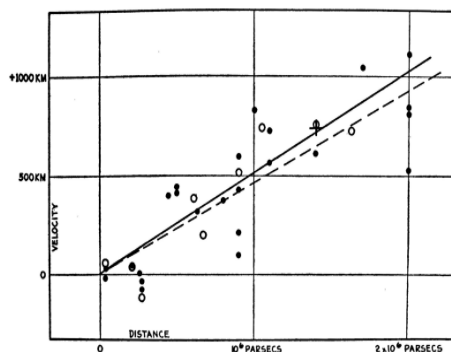
$$v = H_0 d \quad (8)$$

Sendo H_0 a constante de Hubble, medindo aproximadamente $H_0 = \pm 70 \text{ km/Mpc}$, v é a velocidade de afastamento e d representa a distância. Como os resultados obtidos por Hubble eram muito pequenos, isto permitiu com que ele interpretasse os *redshifts* como desvios do efeito Doppler. Considerando duas galáxias que se afastam mutuamente uma da outra, o tempo decorrido de suas separações é dado por

$$t_0 = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = H_0^{-1} \quad (9)$$

No qual H_0^{-1} é chamado de tempo de Hubble, sendo estimado em ± 14 bilhões de anos. Essa interpretação implica que os *redshifts* cosmológicos indicam uma expansão do Universo, corroborando o possível modelo teórico do Big Bang. A Figura (2) mostra a relação gráfica original apresentada por Hubble

Figura 2- Relação entre o redshift e a distância por Hubble



Fonte: Relação entre o redshift e a distância. Hubble, E. P. A relation between distance and radial velocity among extra Galacte-Nebulae. Hubble, E. P. 1929.

Vejamos agora como o *redshift*, ou seja, o desvio espectral de luz para o vermelho de um objeto distante, que pode ser emitido por uma galáxia, se relaciona com o chamado fator de expansão. A luz proveniente de uma galáxia distante, percorre uma geodésica nula dada

por $ds^2=0$. Podemos supor que esta galáxia possui coordenadas comóveis $(r, \theta \text{ e } \phi)$. De acordo com Ryden (2006): “a distância adequada, ou distância própria $d(t)$ entre dois pontos é igual ao comprimento da geodésica espacial entre eles quando o fator de escala é fixo no valor $a(t)$ ”. Dessa forma, a luz percorre uma geodésica dada por

$$c^2 dt^2 = a(t)^2 dr^2 \quad (10)$$

$$\frac{cdt}{a(t)} = dr \quad (11)$$

Interpretando a luz emitida com um comportamento ondulatório, pode-se fazer medidas com relação a suas características. A crista da onda é emitida em um instante t_e e observada em um instante t_0 . Integrando os dois lados da expressão (11) e adicionando os limites de integração de acordo com os instantes de tempo emitido e observado, como c é constante:

$$c \int_{t_e}^{t_e} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^r dr \quad (12)$$

Para a segunda crista da onda, a luz é emitida num tempo $t_e + \lambda_e/c$ e observado em um tempo $t_0 + \lambda_0/c$. Como λ_e geralmente difere de λ_0 , podemos reescrever os limites de integração

$$c \int_{t_e}^{t_e + \lambda_e/c} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^r dr \quad (13)$$

$$c \int_{t_e}^{t_0 + \lambda_0/c} \frac{dt}{a(t)} = \int_{t_e}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad (14)$$

No entanto, a integral entre o tempo de emissão e o tempo de observação é a mesma para toda crista de onda emitida. Ajustando os limites de integração para $t_e + \lambda_e/c$ até t_0 , temos

$$\int_{t_e + \lambda_e/c}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad (15)$$

para cada lado da equação, temos

$$\int_{t_e}^{t_e + \lambda_e/c} \frac{dt}{a(t)} = \int_{t_0}^{t_0 + \lambda_0/c} \frac{dt}{a(t)} \quad (16)$$

Isto significa que a integral de $\frac{dt}{a(t)}$ para diferentes emissões e observações de cristas de ondas será a mesma. Como $a(t)$ é constante nas duas integrações, logo podemos escrever

$$\frac{1}{a(t)} \int_{t_e}^{t_e + \lambda_e/c} dt = \frac{1}{a(t)} \int_{t_0}^{t_0 + \lambda_0/c} dt \quad (17)$$

Resolvendo a integral acima para os limites de integração, obtemos

$$\frac{1}{a(t)} \left(t_e + \lambda_e/c - t_e \right) = \frac{1}{a(t)} \left(t_0 + \lambda_0/c - t_0 \right) \quad (18)$$

$$\frac{\lambda_e}{a(t)} = \frac{\lambda_0}{a(t_0)} \quad (19)$$

Como o desvio espectral para o vermelho é dado pela equação (7), então podemos encontrar uma expressão para a forma como o *redshift* se relaciona com o fator de expansão

$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)} = \frac{1}{a(t_e)} \quad (20)$$

Desta expressão, pode-se concluir que z depende apenas da razão entre os fatores de escala. Isto significa que z é uma medida da expansão do Universo desde a emissão da luz. No Big Bang, pode-se estimar que o fator de escala era zero, o que implica em $z = \infty$.

4.3 Equação de Friedmann-Lemaître

Conhecida como a equação básica da Cosmologia, a solução da equação de Friedmann-Lemaître, mostra como o Universo evolui em larga escala. Ambos, Friedmann e

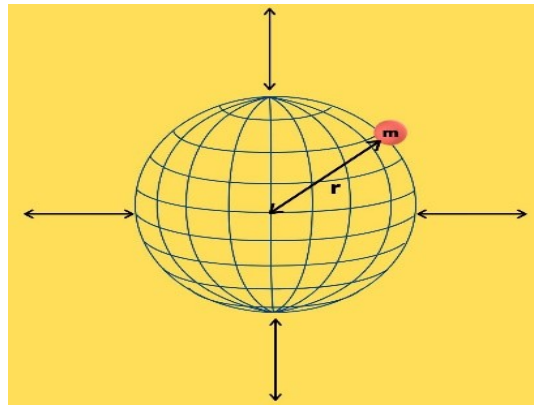
Lemaître, chegaram ao mesmo resultado, de maneira independente e, por conta de suas contribuições, nomeiam a equação.

Podemos derivar esta equação partindo do teorema de Birkhoff's, o qual nos diz que a força de gravidade em um sistema esféricamente simétrico é determinada apenas pela massa no interior do raio e que a densidade de energia gravitacional pode ser dada pela equação (6) abaixo:

$$\rho_m + \frac{u}{c^2} \quad (21)$$

sendo ρ_m a densidade da matéria e $\frac{u}{c^2}$ a densidade de energia de radiação e partículas relativísticas, dada por [ergs cm^{-3}]. Considerando uma partícula teste numa superfície esférica de raio R que pode se expandir ou contrair (Figura 3).

Figura 3- Partícula de massa m e com raio r situada na superfície de uma esfera simétrica (Universo) que pode se expandir ou contrair conforme indicam as setas no exterior da própria esfera



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

A segunda derivada da equação de movimento, ou seja, a aceleração, é dada pela equação (22)

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi}{3}G\rho R \quad (22)$$

Como a densidade é proporcional ao inverso de R^{-3} , definindo $R_0 = 1$, temos

$$\rho = \rho_0 R^{-3} \quad (23)$$

Substituindo a equação (8) na equação (7), obtemos a seguinte equação de movimento

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G\rho_0}{3R^2} \quad (24)$$

Para este resultado, como a densidade é diferente de zero, o Universo não pode ser estático, sendo assim deve estar se expandindo ou contraindo. Multiplicando os dois lados da equação por \dot{R} , como mostra a equação (10), obtemos

$$\dot{R}\ddot{R} + \frac{4\pi G\rho_0}{3R^2}\dot{R} = 0 \quad (25)$$

Como a derivada $\frac{d(R^2)}{dt}$ em relação ao tempo é dada por

$$\frac{d(R^2)}{dt} = 2\dot{R}\ddot{R} \quad (26)$$

Então podemos escrever a seguinte equação

$$\frac{1}{2} \frac{d(R^2)}{dt} + \frac{4\pi G\rho_0}{3} \frac{1}{R^2} \frac{dR}{dt} = 0 \quad (27)$$

Como o resultado para $\frac{1}{R^2} \frac{dR}{dt}$ é dado por

$$\frac{1}{R^2} \frac{dR}{dt} = -d\left(\frac{1}{R}\right)/dt \quad (28)$$

Dessa forma, ao aplicar e reescrever a equação, o termo entre colchetes vira uma constante, conforme mostram as equações (29) e (30) abaixo

$$\frac{d}{dt} \left[\dot{R}^2 - \frac{8\pi G \rho_0}{R} \right] = 0 \quad (29)$$

$$\dot{R}^2 - \frac{8\pi G \rho_0}{R} = K \quad (30)$$

Dividindo toda a equação (30) por R^2 e reassumindo que $\rho_0 = \rho$, obtemos a equação de Friedmann (31) abaixo

$$\left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 - \frac{8\pi}{3} G \rho_0 = -\frac{K}{R^2} \quad (31)$$

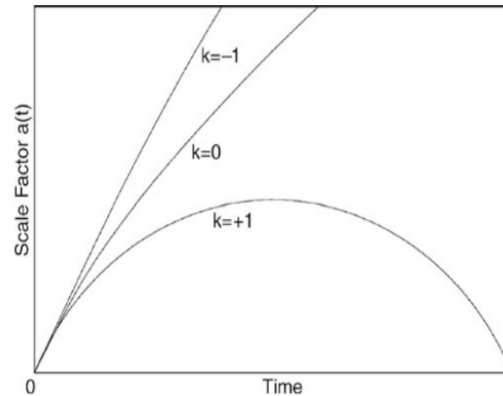
Esta equação permite descrever modelos para um Universo homogêneo e isotrópico. Friedmann conseguiu formular três modelos cosmológicos distintos: se $K = 0$ então R permanece positivo e o Universo tem uma densidade média entre a taxa de expansão e a força de gravidade. Isto significa que o Universo não entra em colapso e continua se expandindo lentamente; por outro lado, o modelo com $K > 0$ e $R > 0$ resulta em um Universo do tipo fechado. Este modelo de Universo seria muito denso, se expandindo continuamente até um ponto crítico no qual começaria a entrar em colapso; E, por último, um modelo para $K < 0$ resulta em um Universo que se expande continuamente, com $R > 0$. Este último modelo é chamado de Universo aberto. A equação obtida por Friedmann, em termos modernos, é dada por

$$H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{Kc^2}{a^2} \quad (32)$$

Isto implica que para modelos com essa estrutura simétrica não existe nenhuma posição privilegiada no Universo para todo e qualquer observador e a topologia da métrica FRW é determinada pela constante K . Como já vimos nesta seção, o fator de escala $a(t)$ é

responsável por ser um parâmetro de medida para estes modelos espaciais. A Figura 4 mostra a evolução do fator de escala do universo com o tempo cósmico.

Figura 4 – Fator de escala como função do tempo cósmico para três modelos de Universo



Fonte: Schneider, P. (2014, p. 185)

Da equação (32), para o caso especial no qual $k = 0$ o modelo de Universo apresentaria uma densidade crítica, dada por

$$\rho_{cr} = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (33)$$

Desta forma, definimos o parâmetro adimensional de densidade cosmológica para o Universo:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{cr}} \quad (34)$$

Para um universo plano, ou seja, com $k = 0$, o parâmetro de densidade é $\Omega = 1$. Os parâmetros de densidade podem ser descritos por meio de frações da densidade crítica e são definidos conforme coloca Lambourne (2010, p. 259):

$$\Omega_m(t) = \frac{\rho_m(t)}{\rho_c(t)}, \quad \Omega_r(t) = \frac{\rho_r(t)}{\rho_c(t)}, \quad \Omega_\Lambda(t) = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c(t)} \quad (35)$$

Usando os parâmetros de densidade, a equação (32) pode ser reescrita:

$$\Omega_m(t) + \Omega_r(t) + \Omega_\Lambda(t) - 1 = \frac{c^2 t}{H^2(t)R^2(t)} \quad (36)$$

4.4 Parâmetro de desaceleração

Para saber qual a taxa de expansão do Universo, utilizamos o chamado parâmetro de desaceleração, medido por meio da evolução do fator de escala, descrevendo a mudança na taxa de expansão:

$$q_0 = -\frac{1}{H^2} \frac{\ddot{a}}{a} \quad (37)$$

Desta forma pode-se estimar qual o tipo de expansão do Universo: se $q_0 > 0$ a expansão é desacelerada, para $q_0 < 0$ é acelerada e para $q_0 = 0$ a taxa de expansão permanece constante.

É possível descrever o fator de escala $a(t)$ sem necessariamente se basear em um modelo de Universo conhecido. Para isso, podemos utilizar uma expansão por meio de uma série de Taylor. Considerando uma função $f(x)$, esta pode ser escrita em torno de um ponto x_0 , da seguinte forma

$$f(x) = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_{x_0} (x - x_0)^2 + \dots \quad (38)$$

Expandindo o fator de escala em torno de t_0 e considerando uma boa aproximação para valores de $t \sim t_0$:

$$a(t) = a(t_0) + \left. \frac{da}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2a}{dt^2} \right|_{t_0} (t - t_0)^2 \quad (39)$$

Onde $a(t_0) = a_0 = 1$, então

$$1 + \left. \frac{da}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2a}{dt^2} \right|_{t_0} (t - t_0)^2 \quad (40)$$

Mas, como $\frac{da}{dt} = H_0$, temos

$$H_0 = H_{(t_0)} = \frac{1}{a_0} \left. \frac{da}{dt} \right|_{t=t_0} = \left. \frac{da}{dt} \right|_{t=t_0} \quad (41)$$

Assim,

$$a(t) \sim 1 + H_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2a}{dt^2} \right|_{t=t_0} (t - t_0)^2 \quad (42)$$

O parâmetro de desaceleração atual é dado pela equação (37), então podemos escrever

$$q_0 = -\frac{1}{H_0^2} \left. \frac{\ddot{a}}{a} \right|_{t_0} = -\left(\frac{\ddot{a}}{a H_0^2} \right)_{t_0} \quad (43)$$

Então

$$\left. \frac{1}{2} \frac{d^2a}{dt^2} \right|_{t_0} = -H_0^2 q_0 \quad (44)$$

Assim, a expansão em série de Taylor do fator de escala $a(t)$ é dada por

$$a(t) \sim 1 + H_0(t - t_0) - \frac{1}{2} q_0 H_0^2 (t - t_0)^2 \quad (45)$$

Diferindo da abordagem inicial para obter a expressão (45) acima, é possível considerar o modelo de Friedmann e estimar um valor para o parâmetro de desaceleração q_0 . Usando a equação da aceleração

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} \sum_i \varepsilon_i (1 + 3\omega_i) \quad (46)$$

Dividindo ambos os lados por H^2 , temos

$$\frac{\ddot{a}}{aH^2} = -\frac{1}{2} \frac{8\pi G}{3c^2 H^2} \sum_i \varepsilon_i (1 + 3\omega_i) \quad (47)$$

$$\frac{\ddot{a}}{aH^2} = -\frac{1}{2} \sum_i \Omega_i (1 + 3\omega_i) \quad (48)$$

E assim pode-se escrever uma expressão para o parâmetro de desaceleração

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}}{aH^2}_{t=t_0} = \frac{1}{2} \sum_i \Omega_{i,0} (1 + 3\omega_i) \quad (49)$$

No modelo padrão, temos a seguinte configuração para a matéria não relativística, a constante cosmológica e a radiação:

$$\begin{cases} \omega = 0, \Omega_{m,0} = 0,3 \\ \omega = -1, \Omega_{\Lambda,0} = 0,7 \\ \omega = 1/3, \Omega_{r,0} \approx 0 \end{cases} \quad (50)$$

Para o parâmetro de expansão do Universo, obtém-se

$$q_0 \approx \frac{1}{2} (0,3 - 2 \times 0,7 + 0) \approx -0,55 \quad (51)$$

Portanto, se o parâmetro q_0 é negativo, configura-se uma expansão acelerada do Universo.

Capítulo 5

5 METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa procurou estar em coerência com cada um dos objetivos específicos propostos, apoiada segundo os referenciais adotados e compreendeu as seguintes etapas: (i) Escolha e apropriação do tema; (ii) Planejamento; (iii) Produção do material instrucional; (iv) Implementação; (v) Orientação de estudantes de Iniciação Científica do Ensino Médio; (vi) Avaliação do material de Divulgação Científica; (vii) Publicação do material de Divulgação Científica; (viii) Redação. Para tanto, foram elucidados os objetivos específicos no primeiro capítulo desta dissertação e neste capítulo serão abordadas as etapas sugeridas.

5.1 Escolha e apropriação do tema

O primeiro momento da pesquisa se caracterizou pela escolha e apropriação do tema específico a ser abordado. Para tanto, optou-se por trabalhar em uma temática sobre a Teoria do Big Bang voltada para o ensino de Física relacionada a conceitos de Astronomia, Astrofísica e Física Moderna e Contemporânea (FMC), que constituem um eixo triplo do desenvolvimento da Cosmologia Moderna. A escolha do tema se mostra potencialmente relevante frente ao centenário da Teoria do Big Bang, que ocorreu em junho de 2022, celebrando o trabalho de Alexander Friedmann, publicado em 1922. Optou-se por apresentar e discutir aspectos históricos sobre o desenvolvimento desta teoria, desde as interpretações cosmológicas de Einstein de 1917 até o mais recente aspecto do chamado Modelo Cosmológico Padrão (MCP).

Para a apropriação do tema, foram utilizados livros, artigos e dissertações que pudessem servir de subsídio teórico para a construção de um material acessível e coerente, que possa ser utilizado pelos professores de Física. Os conteúdos foram baseados na leitura de artigos originais elaborados pelos próprios personagens envolvidos na construção e desenvolvimento do que viria a ser o modelo cosmológico vigente. Foram consultados artigos de Albert Einstein, Willem De Sitter, Alexander Friedmann, Georges Lemaître, Henrieta Leavitt, Edwin Hubble, Fred Hoyle, George Gamow, Ralph Alpher, James Peebles, William A. Fowler, entre outros cientistas que colaboraram com os estudos e pesquisas acerca da Teoria do Big Bang.

O primeiro trabalho a ser consultado foi o artigo publicado por Albert Einstein em meados de 1917, com o título “*Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen*

Relativitätstheorie”, que numa tradução literal do alemão, significa “Considerações Cosmológicas sobre a forma do Universo”. Nesse trabalho Einstein analisa as possibilidades para um modelo de universo fechado segundo sua própria TRG e adiciona às suas equações de campo a constante cosmológica. O segundo artigo consultado foi o trabalho de Willem De Sitter, publicado na *Monthly Royal Notices*, em 1917, intitulado como “*Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences*”. De Sitter propõe soluções para as equações de campo da TRG analisando modelos cosmológicos relativísticos.

Com relação aos trabalhos de Alexander Friedmann, considerado um dos precursores da Teoria do Big Bang devido às suas soluções matemáticas para as equações de campo da TRG, fez-se necessária uma análise cuidadosa de seus dois artigos, intitulados “*Über die Krümmung des raumes*” (Sobre a curvatura do espaço), de 1922, o qual dá significado ao centenário da Teoria do Big Bang e “*Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes. Zeitschrift für Physik*” (“Sobre a possibilidade de um mundo com curvatura negativa constante do espaço”), de 1924, ambos publicados na “*Zeitschrift für Physik*” (Revista de Física). Seguindo a sequência histórica dos fatos relacionados a história do modelo do Big Bang, após os artigos de Friedmann, foram consultados os artigos de Georges Lemaître, na seguinte ordem de leitura: “*Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*” (Lemaître, G. 1927); “*A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae*” (Lemaître, G. 1931); “*The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory*” (Lemaître, G. 1931). Os dois autores, Friedmann e Lemaître, foram os primeiros a prever uma possível evidência para a expansão do Universo com base na relação entre a distância e a velocidade das galáxias. Para a continuação da apropriação do tema, houve o estudo sobre o trabalho de Hubble de 1929 intitulado “*A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*”. A partir desse artigo, buscou-se o trabalho de Leavitt e Pickering, “*Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*”.

Para além destes trabalhos, houve a leitura e o estudo acerca dos demais artigos: “*The origin of chemical elements*” (Alpher, R. A.; Bethe, H.; Gamow, G. 1948), “*Evolution of the Universe*” (Alpher, R. A.; Herman, R. 1948), “*Thermonuclear reactions in the expanding universe*” (Alpher, R. A.; Herman, R. Gamow, G. 1948), “*On the Relative Abundance of Elements*” (Alpher, R. A.; Herman, R. 1948), “*Remarks on the Evolution of the Expanding Universe*” (Alpher, R. A.; Herman, R. 1948), “*Expanding Universe and the Origin of Elements*” (Gamow, G. 1946), “*The Evolution of the Universe*” (Gamow, G. 1948).

Após a leitura desses trabalhos, alguns livros sobre a história e o desenvolvimento da cosmologia moderna foram consultados. Os livros que serviram de base para a pesquisa sobre a história da Cosmologia foram os seguintes: “Big Bang: tudo sobre a mais importante descoberta científica de todos os tempos e por que esse conhecimento é indispensável” (Singh, S, 2004); “*The creation of the Universe*” (Gamow G., ANO); “*Cosmology*” (Weinberg, S. 2008); “*Introduction to Cosmology*” (Ryden, B. 2002) e “Uma breve história do tempo” (Hawking, S. 1988).

Este levantamento histórico por meio de trabalhos originais dos cientistas envolvidos no desenvolvimento do atual modelo cosmológico padrão, auxilia na utilização em debates sobre a História e Filosofia da Ciência (HFC). Logo, é possível fomentar a discussão em sala com alunos do ensino médio para além dos conceitos de Física envolvidos e possíveis de serem analisados à luz da Teoria do Big Bang. Esta premissa do uso de História e Filosofia da Ciência (HFC) ajuda a construir um ambiente no qual os alunos possam vislumbrar o papel da ciência como multifacetária e não-linear. Esta ideia de desenvolvimento com base na HFC foi fundamental para a segunda etapa da metodologia, na qual o planejamento do curso sobre o centenário da Teoria do Big Bang foi construído.

5.2 Planejamento

Na segunda etapa, ocorreu a idealização e preparação de uma sequência didática baseada no marco teórico educacional, epistemológico e metodológico escolhido. Esta sequência didática, composta por uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), guiou o desenvolvimento do curso sobre o centenário da Teoria do Big Bang. A elaboração da UEPS procurou levar em conta a construção histórica do conhecimento científico, à luz da epistemologia de Feyerabend, abordando a física de forma contextualizada e livre de métodos únicos e infalíveis, como já mencionado anteriormente.

Para a escolha dos subtemas a serem trabalhados e discutidos, foram selecionados os seguintes assuntos: *O modelo cosmológico de Einstein e de Willem De Sitter e os Universos de Friedmann; O átomo primordial de Lemaître e o modelo proposto por Gamow; A descoberta da expansão do Universo e os prêmios Nobel ao longo da pesquisa sobre o Big Bang.* Os temas foram escolhidos com base no desenvolvimento histórico e centenário da Teoria do Big Bang e a partir destes três tópicos iniciais de assunto, foi organizada uma sequência didática desde o início da cosmologia relativista até os mais recentes avanços acerca do Modelo Cosmológico Padrão (MCP). O curso foi desenvolvido para um público de todas as idades, mas com foco para alunos do ensino médio. Assim, os temas abordados e

discutidos foram pensados para que não extrapolassem o nível técnico em relação a tópicos de Física necessários para a compreensão do MCP. As aulas foram organizadas para que ocorressem de forma assíncrona e tivessem duração de no máximo uma hora e trinta minutos.

Pensando em uma abordagem conceitual sobre esses conteúdos, evitou-se o uso em excesso de equações nas apresentações textuais, o que não excluiu o uso de ferramentas matemáticas para a apresentação e discussão dos conceitos. Para iniciar uma discussão pertinente sobre o MCP, foi organizado um roteiro (disponível em anexo com a UEPS) respeitando os fatos históricos, sobre o surgimento da cosmologia relativista, desde o modelo cosmológico proposto por Albert Einstein até os mais recentes premiados com o Nobel de Física por pesquisas envolvendo o MCP. Dessa forma, em todas as aulas haveria espaço para discussões *de* Física, envolvendo os conceitos físicos a serem estudados para a compreensão do desenvolvimento da teoria cosmológica ao longo dos anos e *sobre* Física, ao fomentar discussões teóricas e investigar episódios da história do MCP.

Durante o planejamento do curso, foram pensadas quais seriam as estratégias de avaliação e foram idealizadas as atividades a serem realizadas pelos estudantes, também bolsistas de Iniciação Científica (IC's) do Grupo de Estudos e Divulgação Científica do Instituto Federal de Santa Catarina. Sendo assim, o curso sobre a Física e a história da Teoria do Big Bang ultrapassa a barreira do ensino formal, pois proporciona o desenvolvimento de saberes voltados para a Astronomia, Astrofísica e Cosmologia, de forma geral, permitindo que os alunos e alunas possam aprender além da sala de aula, ao desenvolverem materiais de divulgação científica sobre o tema. Seguindo o roteiro das aulas a partir dos três tópicos de assunto iniciais, a ideia seria que os estudantes produzissem textos, infográficos, imagens e vídeos acerca do tema de estudo. Para isto, após o curso foram marcadas orientações semanais com o professor, para que houvesse a recapitulação dos assuntos e o início das produções de material de divulgação. Essas reuniões foram organizadas nas formas síncrona e assíncrona. Pode-se dizer que esta etapa do planejamento ocorreu após a implementação do curso, respeitando as demandas e os horários de aulas dos estudantes e do professor.

As estratégias de avaliação foram organizadas de acordo com a evolução conceitual dos alunos que participaram do curso e do desenvolvimento do material de divulgação científica, consistindo em questionários ao longo das aulas, com perguntas conceituais e uma avaliação final ao fim da pesquisa. Estas questões estão disponíveis na UEPS e no Produto Educacional, disponível no Apêndice A.

5.3 Desenvolvimento do Produto Educacional

Esta etapa corrobora a importância da etapa 5.2, pois a partir do planejamento do curso foi possível desenvolver um material instrucional. Durante este processo, foram desenvolvidos materiais como apresentações de slides, textos, imagens e questões conceituais sobre os temas de Física e História da Ciência relacionados a Teoria do Big Bang.

Além do material a ser utilizado no decorrer das aulas e das orientações, foi elaborado um texto paradidático em forma de artigo, que constitui a fundamentação teórica de Física deste trabalho, apresentada no capítulo quatro. O texto procurou esclarecer a história recente da Cosmologia Moderna, dialogando entre alguns dos modelos cosmológicos que serviram de fundamento para a construção do Modelo Cosmológico Padrão (MPC) e argumentar acerca dos principais problemas cosmológicos atualmente, como o problema envolvendo a matéria escura e a energia escura. O material instrucional desenvolvido procurou estar alinhado aos pressupostos teóricos da TAS. Dessa forma, os textos, imagens e exemplos utilizados aparecem de forma gradual no material didático, composto pelo Produto Educacional, em uma ordem pensada para que os estudantes possam relacionar os conteúdos de forma organizada e progressiva.

5.3.1 A Teoria do Big Bang nas aulas de Física: UEPS para um ensino *de e sobre* Física

A Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) construída para o curso “A Teoria do Big Bang nas aulas de Física” e a orientação de estudantes para a produção de material de divulgação científica sobre o tema buscou seguir os aspectos sequenciais da UEPS propostos por Moreira (2011). Essa UEPS é constituída de slides, vídeos, textos e atividades experimentais e computacionais que subsidiam as discussões e está disponível em anexo.

5.3.1.1 Definição do tópico específico a ser abordado

Em consonância com a proposta de Moreira sobre o desenvolvimento e construção de uma UEPS, inicialmente pode-se definir o tópico específico que se pretende trabalhar em sala de aula. A partir do momento em que este tópico foi definido, a proposta da pesquisa apoiou-se em dois pilares fundamentais, pautados em uma educação *de e sobre* ciência. A proposta buscou trazer à tona para a sala de aula a Física relacionada ao Modelo Cosmológico Padrão, conhecido popularmente como Teoria do Big Bang, que se caracteriza por meio de conceitos relacionados à Astronomia, Astrofísica e Física Moderna e Contemporânea, assuntos quase sempre ausentes e negligenciados na educação científica. Para além desta abordagem, que constitui um eixo do trabalho, voltado para uma educação *de* Física, na qual se permite o

contato e a discussão sobre conceitos de Física com os estudantes, pretendeu-se desconstruir visões de ciência desalinhadas com a moderna filosofia da ciência, para falar *sobre* Física. Apoiada no referencial epistemológico de Feyerabend, durante a pesquisa procurou-se desmistificar a ideia do cientista como um indivíduo isolado da sociedade, estereotipado, sem quaisquer dificuldades ou empecilhos para a formulação de seus trabalhos. Além disso, buscou-se desenvolver uma abordagem na qual entende-se, por meio de fatos relacionados à História da Ciência, que a ciência, em si, não se constitui como linear ou mesmo cumulativa, nem mesmo apresenta um método único e infalível. Ou seja, tal qual propõe Feyerabend (1978) a ciência é praticada por indivíduos das mais diversas origens e que apresenta um caráter de pluralidade metodológica.

5.3.1.2 Criação de situações iniciais para os alunos externarem seus conhecimentos prévios

Esse aspecto da sequência didática procura levar em consideração possíveis conhecimentos dos alunos em relação ao tópico de estudo. Para tanto, no início das atividades, propõe-se criar situações nas quais os alunos possam falar à vontade sobre seus conhecimentos prévios relacionados aos conceitos *de* e *sobre* a ciência que fazem parte do desenvolvimento da Física e da história da Teoria do Big Bang. Após as considerações e respostas dos alunos, é interessante construir um quadro ou fazer anotações das respostas deles, para que haja comparações e socialização dos saberes por eles demonstrados. Destaca-se que nesse momento, não se almejam respostas certas ou erradas, e sim a valorização dos conhecimentos prévios de cada um dos alunos, para que possa se estabelecer o diálogo sobre o tema específico de estudo e gerar possíveis reflexões iniciais em sala de aula.

5.3.1.3 Proposição de situações-problema

A sequência segue com a formulação e a apresentação de possíveis situações-problema, para que se possa levantar questões que preparem o ambiente para a introdução do estudo do novo conhecimento. Essa parte da sequência didática pode ser formulada de acordo com cada docente, buscando envolver o tema específico a ser abordado, desde que leve em consideração os conhecimentos prévios dos alunos e que facilite a modelagem mental desses conceitos prévios externalizados por eles. Cada UEPS, a depender do professor, pode apresentar diferentes situações-problema, respeitando as características da turma, dos recursos a serem utilizados, ou de outros fatores de interesse que podem auxiliar na aula. Pode-se utilizar como situações-problema textos, vídeos, perguntas ou até mesmo atividades

experimentais. A UEPS desta pesquisa procurou se basear em concepções alternativas dos alunos, utilizando algumas questões sobre o tema de estudo.

5.3.1.4 Apresentação do conhecimento a ser abordado

Em seguida, deve ser apresentado o conhecimento a ser abordado, conforme propõe Moreira (2011). Essa apresentação deve levar em consideração os elementos da teoria de Ausubel para uma aprendizagem significativa: diferenciação progressiva, reconciliação integradora, consolidação e organização sequencial. Para esta pesquisa, foram produzidos slides e textos que podem ajudar nesta apresentação de conteúdo. Estes textos e apresentações de slides estão disponíveis no site criado para que docentes e alunos possam ter acesso.

5.3.1.5 Abordagem do conhecimento em um nível mais alto de complexidade

Após esse primeiro momento no qual os alunos têm contato com o assunto a ser discutido em sala, criam-se situações nas quais podem ser levantadas questões mais específicas e que, logicamente, podem envolver um nível mais alto de complexidade no assunto. No caso da pesquisa aqui descrita, é natural que o assunto esteja centrado nos conceitos físicos que regem saberes voltados à Astronomia, Astrofísica e Física Moderna e Contemporânea, que constitui um eixo triplo para o ensino da Cosmologia nesta pesquisa. Essa abordagem permeia questões de interesse filosóficas, como a questão de origem do Universo e quais são as possibilidades de novas descobertas envolvendo a Teoria do Big Bang que causariam impacto em questões de interesse não somente da Física, mas de outras áreas, como Química, Biologia, Geofísica e demais áreas de saberes.

5.3.1.6 Retomada das características mais relevantes

A próxima atividade visa ampliar o foco nos aspectos mais gerais das questões abordadas, conforme sugere Moreira (2011). Essa retomada pode ser realizada por meio de textos, imagens, vídeos, apresentações de slides, atividades experimentais e computacionais. Dentro dessa etapa, é possível perceber o conteúdo como uma unidade de ensino. A UEPS dessa pesquisa teve como foco discutir o desenvolvimento histórico da Teoria do Big Bang e os principais conceitos de Física envolvidos nessa teoria: relatividade geral, comportamento da luz, efeito Doppler, medidas de distância em Astronomia, lei de Hubble, física de partículas, espectroscopia, expansão do universo, formação de estruturas como galáxias, formação de elementos químicos (nucleossíntese) e idade do universo.

5.3.1.7 Avaliação da aprendizagem na UEPS

A avaliação da UEPS deve evitar ser composta somente de uma avaliação final. Deve-se evitar avaliações deste tipo e priorizar avaliações ao longo da implementação da UEPS, por meio de outras atividades (MOREIRA, 2011). Uma possível estratégia de avaliação adotada na UEPS dessa pesquisa foi realizar avaliações por meio dos materiais elaborados pelos alunos. Outro método de avaliação adotado e que se torna relevante para captar indícios de aprendizagem significativa, ou ainda, possíveis apontamentos que indiquem durante o processo de ensino e aprendizagem, uma construção do que venha a ser uma aprendizagem significativa, é listar as evidências de aprendizagem dos alunos ao longo das aulas. Esse método de avaliação somativa, apesar de fundamental, não exclui a importância da avaliação somativa individual. A avaliação sugerida na UEPS deste trabalho envolve aspectos *de e sobre* ciência, visando uma possível evolução conceitual do tema.

5.3.1.8 Avaliação da UEPS

De acordo com Moreira (2011) a UEPS terá êxito quando os resultados após a implementação apontarem indícios de uma aprendizagem significativa. No caso de não houver quaisquer apontamentos que possam indicar uma aprendizagem significativa, é indicado que o professor reavalie a sequência didática e aprimore ou modifique as atividades realizadas para uma próxima implementação. Na UEPS proposta sobre a Teoria do Big Bang, os alunos foram solicitados a avaliarem as aulas, orientações e seu próprio aprendizado.

5.4 Implementação

A implementação do curso ocorreu no Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá, nos dias 13, 20 e 27 de setembro de 2022, com início às 19h e término às 20h. Aberto para a comunidade local e para quem pudesse interessar, o curso foi anunciado previamente em redes sociais, convidando para a participação do público. A princípio, fora reservada uma sala pelo orientador da pesquisa (Professor de Física da escola) para a implementação do curso. Porém, como a demanda de participantes foi além do esperado, o curso ocorreu no auditório do colégio, conforme mostra a Figura 5. Participaram do curso estudantes do ensino médio da escola, bolsistas de Iniciação Científica (IC's) do Grupo de Estudos e Divulgação Científica – IFSCIENCE, representando a turma que seria orientada posteriormente para a construção e desenvolvimento de materiais de divulgação científica sobre o tema.

Ademais, participaram do curso alunos do ensino médio e professores do colégio E.E.B João Colodel, do município de Turvo. A participação desta escola representa o acesso ao público às aulas, reforçando os laços do tripé entre Ensino, Pesquisa e Extensão. Por motivos de transporte e logística, a escola não pôde comparecer no restante das aulas, mas estenderam um convite para palestras em suas dependências sobre o centenário da Teoria do Big Bang.

Figura 5- Implementação do curso no auditório do colégio IFSC – Câmpus Araranguá.



Imagem: Grupo de Estudos e Divulgação Científica – IFSCIENCE

A sequência didática teve início no dia 13/09/2022, com a apresentação do professor e, em seguida, a apresentação dos conceitos que seriam discutidos e a forma de abordagem para a explicação dos assuntos. Neste primeiro momento procurou-se deixar claro o tema principal de discussão e a dinâmica das aulas. Por conta do número elevado de participantes neste primeiro encontro, não houve apresentações por parte dos estudantes presentes, embora isto não configure um problema para a pesquisa. Apesar disto, ressalta-se a importância de conhecer os alunos e alunas para desenvolver o processo de ensino e aprendizagem.

Os assuntos escolhidos para a implementação foram divididos em tópicos, conforme descritos em 5.2. Logo, após o primeiro momento, caracterizado como uma situação inicial, algumas questões foram levantadas para os estudantes como forma de avaliação dos conhecimentos prévios:

- i) *Em quais conceitos de Física, relacionados à Astronomia e Astrofísica, vocês pensam quando se fala sobre a Teoria do Big Bang?*
- ii) *De onde surgiu a Teoria do Big Bang?*

- iii) *O Universo está se expandindo?*
- iv) *Quais foram os cientistas premiados com o Nobel por pesquisas sobre esse tema?*

Uma ampla gama de respostas foi dada pelos alunos para tais questões. Imediatamente após a apresentação das perguntas, os alunos formularam algumas respostas. Notou-se que a maioria dos estudantes que participaram respondendo, já tinham ouvido falar sobre o assunto, mas não tinham conhecimento sobre o tema. Estas questões foram feitas enquanto algumas imagens eram apresentadas na tela do reprodutor de mídias (*datashow*). Entende-se que as imagens podem despertar nos estudantes uma busca por respostas que realmente fazem parte de seus conhecimentos prévios. Esta estratégia foi adotada de forma improvisada durante a aula, pois observou-se que os alunos buscavam copiar e repetir as respostas uns dos outros. Após o uso das imagens, os alunos começaram a formular outras respostas, como por exemplo: *“ah agora que o professor mostrou a foto dessa galáxia, lembrei o que eu sabia porque vi um vídeo sobre a teoria do Big Bang que falava que começou com uma explosão”*. As demais respostas dos alunos que podem ser citadas e que foram consideradas de interesse para o âmbito da pesquisa, foram as seguintes: *“acho que o Big Bang é fácil de entender, porque tudo surgiu dele, então toda a Física faz parte né?!”*; *“tenho quase certeza que essa teoria foi feita pelo Newton, o mesmo das leis que a gente viu na escola”*; *“ah eu tenho certeza que foi o Einstein porque vi no vídeo do Youtube que dizia que foi ele e a relatividade dele”*; *“O prêmio Nobel do Einstein não foi por causa disso, mas outros caras ganharam o prêmio por causa da radiação que esqueci o nome”*; *“acho que tem a ver com mecânica quântica, porque é mecânica quântica que dá toda a informação pro universo, daí fica fácil de entender”*; *“eu sei que tem relação com a relatividade, professor, mas não sei se é bem isso porque não aprendemos nada disso na escola”*; *“pode ser que a Física do Big Bang seja tudo que fala de temperaturas muito altas e tudo que fala sobre relatividade”*; *“ouvi dizer que o universo é na verdade um oceano de matéria escura e tudo começou no Big Bang”*; *“o Big Bang veio de dentro de um buraco negro, tipo ele explodiu e daí as coisas começaram a existir”*; *“O Big Bang nada mais é que um buraco negro, só que é um super buraco negro, por isso ainda não conseguiram identificar de onde veio”*; *“a física dessa teoria fala de umas coisas que a gente não vê na escola, porque ninguém ensina isso sobre o Big Bang, mas é a parte mais legal, porque a gente faz parte do universo, então era pra gente entender ou pelo menos procurar aprender um pouco sobre isso, né?!”* *“sempre tive curiosidade, então vi um vídeo que falou que tem a ver com a*

massa concentrada de todas as galáxias, e tem a ver com formação de buracos negros, estrelas e tudo mais”;

Em seguida, houve uma conversa sobre o surgimento da Cosmologia Moderna, na tentativa de introduzir os conceitos por etapas, para que ao final do curso os alunos conseguissem obter algum tipo de resposta mais elaborada para as questões formuladas no início da aula. As respostas foram anotadas e houve um momento para uma série de perguntas sobre tópicos de Física Moderna, envolvendo desde objetos de estudo da Cosmologia à Mecânica Quântica. Esse espaço para perguntas serviu de base para desmistificar algumas ideias e conceitos equivocados envolvendo informações a respeito da Física da Teoria do Big Bang. Alguns estudantes apresentaram dúvidas relacionadas a princípios físicos como o comportamento da luz e seus meios de propagação, enquanto outros tentaram explicar conceitos relacionados à gravitação na Relatividade Geral. Houve uma conversação com a turma sobre cada tópico questionado e uma explicação sobre os fenômenos de estudo que são de interesse para a compreensão do Modelo Cosmológico Padrão (MCP). Um assunto muito debatido entre os estudantes nesse momento foram os conceitos ligados a Mecânica Quântica, que, em sua maioria, apresentaram equívocos conceituais sobre o tema. Ainda que não fizesse parte do escopo da pesquisa e do planejamento do curso, foi necessário reservar esse primeiro momento de questões sobre o tema para esclarecer a diferença entre os tópicos de estudo da Mecânica Quântica e da Relatividade Geral, bem como apresentar um panorama geral dos dois campos de pesquisa. Logo depois, houve uma breve explicação sobre a busca por uma teoria unificada sobre as duas áreas da Física, que ainda não encontrou nenhum êxito.

Esse primeiro momento da aula foi importante para estabelecer uma conexão com a turma e procurar compreender o grau de entendimento dos estudantes em relação aos tópicos abordados. Assim, foi possível identificar que os alunos e alunas mostraram vontade em aprender os conceitos propostos e predisposição em levantar questões e debater sobre o assunto, agregando discussões de interesse sobre os temas e se ajudando mutuamente na compreensão dos fenômenos que estavam sendo explicados.

Um ponto a se destacar é o respeito e o silêncio durante as explicações e colocações do professor, o que facilitou a implementação das aulas. Esse comportamento foi observado em todas as aulas e destaca-se que não houve problemas relacionados a conversas paralelas ou desordem na sala. Essa observação estende-se a todos os encontros do curso. As conversas eram mediadas pelo professor e cada estudante esperava sua vez para formular uma questão de interesse.

No segundo estágio da aula, ocorreu uma introdução à gravitação na Relatividade Geral com esclarecimentos minuciosos, empregando exemplos e representações visuais. Procurou-se utilizar ilustrações que pudessem ser facilmente equiparadas a objetos do dia a dia a fim de representar o tecido do espaço-tempo e seu funcionamento. Como estratégia para captar quais eram os conhecimentos prévios dos estudantes sobre o assunto, foram apresentadas as seguintes questões:

- i) *o que é a Relatividade geral?*
- ii) *qual a relação entre a Relatividade Geral e o começo do universo?*
- iii) *quando surgiu a Relatividade geral?*

Sem o intuito de chegar a respostas corretas, os alunos e alunas tentaram apresentar seus conhecimentos sobre Relatividade Geral e a relação com a Teoria do Big Bang. A conversa entre eles foi mediada pelo professor e, logo em seguida, houve a explicação para possíveis reformulações nas respostas dos estudantes. As respostas obtidas foram, em sua maioria, relacionadas a figura de Albert Einstein e a vídeos com explicações de terceiros. Notou-se que apesar do interesse pelo tema, eles não dominam o conceito básico sobre Relatividade Geral e acabam confundindo conceitos simples de cinemática e gravitação. Algumas das respostas obtidas deixam em evidência essas observações: *“acho que relatividade é quando a velocidade é muito alta, daí a velocidade muda o tempo todo, pra não existir aceleração no corpo”*; *“uma vez eu vi que no começo do universo a velocidade foi tão alta que não tinha aceleração em nenhuma estrela, mas não deve ser isso”*. Essas questões acabaram gerando ainda mais interesse nos alunos, pois apesar de confundirem conceitos, mostraram curiosidade sobre o assunto e vontade de aprender. Foram explicados os conceitos por trás da Relatividade Geral e a dissociação com a noção de espaço e tempo compreendidos por Newton e que geralmente é apresentada aos alunos no ensino médio. Pode-se dizer que os alunos não mostraram dificuldades entre as diferenças nos conceitos de espaço e tempo da teoria newtoniana para a teoria einsteiniana.

Em seguida, foram apresentados, dentro do contexto social e político da época, o desenvolvimento da Cosmologia Moderna a partir dos trabalhos de Einstein e De Sitter e uma breve descrição sobre a história desses cientistas. Ao apresentar uma visão de ciência sem o estereótipo do cientista considerado genial e isolado da sociedade, foi possível notar o entusiasmo dos estudantes por perceberem que personagens famosos e imprescindíveis para o

desenvolvimento científico eram seres humanos, apresentando dúvidas em suas áreas de interesse.

Para a abordagem da Física envolvendo os modelos cosmológicos de Einstein e De Sitter, foi necessário ter cautela no que diz respeito a matemática envolvida nesses tópicos. Por duas razões: i) o nível técnico para a compreensão das equações de campo de Einstein e o modelo apresentado por De Sitter envolvem cálculo tensorial. ii) Não faz parte do escopo da pesquisa ensinar a matemática da Relatividade Geral para a compreensão de modelos cosmológicos. Portanto, as equações de campo de Einstein foram explicadas usando analogias e exemplos, preparados na etapa 5.3 para uma melhor compreensão dos conceitos. O uso de imagens representativas foi útil não somente para explicar a gravitação na Relatividade Geral de forma conceitual, sem introduzir cálculos matemáticos, como também para visualização das possíveis geometrias para o universo. Apresentar e discutir as formas de universo por meio de possíveis desenhos geométricos possibilitou o debate concomitante entre os alunos sobre o modelo de universo fechado de Einstein e o universo com ausência de matéria de Willem De Sitter. O problema da gravidade em um universo estático, conforme proposto por Einstein foi explicado e para dar continuidade foi apresentada a história e a pesquisa de Alexander Friedmann. Antes de começar a problematização das três variações possíveis para o modelo cosmológico de Friedmann, houve uma explicação acerca da história envolvendo o arrependimento de Einstein pela inserção da sua constante cosmológica e que esse assunto viria à tona novamente no último encontro. Além disso, a seguinte questão foi levantada para a turma: “É possível medir o Universo?”

Na continuidade da aula, foram apresentados os modelos conceituais de Friedmann e sua explicação para a dinâmica do Universo. Nesse momento da aula, os estudantes de ensino médio alegaram não se espantarem com a ideia de um universo em movimento e que seria, nas palavras deles “muito pior” um universo estático. Essa afirmação, corroborada pela maior parte da turma, mostrou que os alunos e alunas já estavam familiarizados com um modelo cosmológico em expansão. Portanto, para a finalização do primeiro encontro, foram revisados os três principais modelos cosmológicos até meados do ano de 1922. Para fomentar o interesse e a discussão no próximo encontro, foi proposta uma questão em aberto: *i) Dentre os modelos estudados, qual deles mais se aproxima de corresponder à realidade?* Essa questão despertou uma curiosidade na turma e até mesmo causou algumas diferenças no sentido da busca pela resposta, pois alguns alunos queriam pesquisar em casa e trazer a resposta para o professor, enquanto outros gostariam de esperar o próximo encontro.

O segundo encontro do curso ocorreu no dia 20/09/2022, às 19h. Para esta aula, a questão norteadora sobre qual modelo estudado corresponderia à realidade serviu de suporte para as ideias de outro precursor da Teoria do Big Bang, as ideias do padre, físico e cosmólogo Georges Lemaître. Antes da introdução ao pensamento e a cosmologia de Lemaître, os alunos quiseram apresentar suas respostas para a questão norteadora apresentada ao final do primeiro encontro. Dessa forma, o primeiro momento da aula teve espaço para que os alunos que trouxeram possíveis respostas para a questão norteadora pudessem explicar e debater a respeito das ideias dos modelos que correspondem à realidade. Durante esse momento, nenhuma resposta foi considerada como certa ou errada, havendo a mediação das discussões apresentadas sobre os modelos cosmológicos possíveis. Após a discussão proveitosa sobre a diversidade dos modelos de Einstein e De Sitter, foram apresentadas as ideias da Física de Lemaître e as principais características de seu modelo cosmológico. Em consonância com a discussão da física conceitual presente na teoria do padre e cosmólogo belga, fora apresentada uma breve biografia de Lemaître e uma questão reflexiva para os alunos: “Como a comunidade científica lidou com o fato de um padre apresentar uma teoria sobre a origem do Universo?” Essa questão foi levantada propositalmente com a intenção de discutir com a turma sobre as diferentes visões de ciência dentro da construção de uma teoria e os aspectos sociais e culturais no processo do fazer ciência. O panorama geral da participação dos alunos frente a esse tópico mostrou um interesse deles na História da Ciência. Após a formulação da questão, um espaço para possíveis respostas e dúvidas foi aberto e a turma pôde dialogar, com a mediação do docente, sobre o tema. Observou-se um alto índice de preocupação dos alunos em conhecer o histórico dos cientistas envolvidos em alguma teoria, pois o assunto os levou a indagar sobre a vida e a obra de Einstein, De Sitter, Friedmann e Lemaître. Na sequência deste debate, foram apresentados os conceitos de física presentes na teoria de Lemaître, como os raios cósmicos, o efeito Doppler e os fundamentos de mecânica quântica considerados por Lemaître para compor sua explicação sobre a expansão do Universo.

Antes do início da segunda parte da aula, foi apresentado um quadro comparativo entre os modelos cosmológicos desenvolvidos antes de 1930, quando a comunidade científica passou a desconsiderar um universo estático. Para tanto, no segundo momento da aula, a pergunta “É possível medir o Universo?” foi retomada, desta vez em um nível mais alto de complexidade, reformulada para a questão “Diante dos modelos cosmológicos disponíveis a partir da Teoria da Relatividade Geral, é possível medir o Universo?” Para responder essa questão, foram apresentados os trabalhos de Henrietta Leavitt, Edwin Hubble e Humanson.

Partindo da explicação sobre a física das estrelas variáveis cefeidas, medidas por Leavitt, foi possível explicar a observação de Hubble da galáxia de Andrômeda e a lei de Hubble-Lemaître para o desvio gravitacional para o vermelho. Os alunos enfatizaram, por meio de suas falas e perguntas, após o término das explicações sobre estes conceitos físicos, uma compreensão sobre os processos físicos e relataram, oralmente, que a participação de diversos cientistas, ainda que desconhecidos, podem contribuir para o avanço da ciência. Essa observação denotou uma compreensão mais concreta dos alunos acerca de uma visão de ciência não linear e cumulativa, que engloba muitos fatores e é caracterizada por ser multifacetária e abrangente em vários termos dentro de seu próprio processo de construção.

A terceira e última parte da aula foi composta pelo tema do Big Bang quente e seus autores, Alpher, Gamow e Hermann, além da teoria do estado estacionário, rival do modelo do Big Bang quente. Para introduzir o assunto, foram apresentadas duas questões: “Podem duas teorias físicas estarem corretas e divergirem entre si?” e “Por que o modelo do Big Bang foi necessariamente chamado de “quente”?” Essas duas questões aprofundaram o debate e serviram de base para a discussão da Física presente nas teorias divergentes de Gamow e Fred Hoyle, este último, precursor da Teoria do Estado Estacionário. Os alunos apresentaram diferentes concepções a respeito da primeira questão e alegaram que a resposta para a segunda pergunta estaria relacionada a presença de calor no início do universo, afirmando termos como “fornalha cósmica do universo primordial” e “caldeirão de formação de estrelas e galáxias”. Essas observações foram anotadas durante o debate com a turma. Então houve a explicação das duas teorias, suas divergências e a confirmação experimental sobre a física teórica do Big Bang quente. O fim dessa aula contou com a apresentação dos ganhadores do Nobel, os radioastrônomos Arno Penzias e Robert Wilson, pela observação da radiação cósmica de fundo em micro-ondas, previstas pela teoria do big bang quente.

A última aula do curso ocorreu no dia 27/09/2022 às 19h e contou com a presença de todos os estudantes, bolsistas de iniciação científica do projeto e demais alunos e alunas do ensino médio da escola. Nesta aula, foram apresentados os conceitos envolvidos na observação da radiação cósmica de fundo e os estudos acerca deste fenômeno, como o conceito de anisotropia. Além disso, os vencedores do Prêmio Nobel de Física relacionados à Teoria do Big Bang foram mostrados à turma e os conceitos físicos de cada pesquisa foram estudados. Foram discutidos os conceitos de anisotropia, a expansão acelerada do Universo, composição do Universo, envolvendo os tópicos de estudo: matéria escura, energia escura e matéria bariônica. Logo após a apresentação e discussão dos conceitos e da história das pesquisas até o êxito do Prêmio Nobel, foi feita uma revisão de todos os conceitos abordados

durante o curso, buscando construir respostas mais completas e estruturadas, com sentido e significado físico, para as questões formuladas ao longo do curso.

Ao final da aula, foi possível perceber uma evolução conceitual nas falas dos estudantes com relação ao assunto abordado e, para além dessa observação, constatou-se que a maioria deles apresentaram melhoras na formulação de questões pertinentes ao tema. Para finalizar o último encontro, outras questões foram levantadas sobre o futuro das pesquisas em Cosmologia: “Existem falhas na Teoria do Big Bang? Se a resposta for sim, como resolvê-las? Precisamos de outras teorias?” Nesse contexto, partindo da premissa dessas questões, houve uma discussão pertinente e participativa com a turma, sobre as falhas na Teoria do Big Bang, as pesquisas que buscam resolver esses mistérios e o demais modelos cosmológicos, inclusive aqueles que divergem do modelo padrão.

5.5 Orientação de estudantes de Iniciação Científica do Ensino Médio

A orientação de estudantes da escola na qual houve a implementação da UEPS consistiu em mais uma etapa da metodologia. Nesta etapa, especificamente, os alunos e alunas, bolsistas de Iniciação Científica (IC's) do Grupo de Estudos e Divulgação Científica – IFSCIENCE que participaram das aulas, foram instruídos a produzir materiais de divulgação científica sobre o tema do curso. Silva e Kawamura (2001) ressaltam a utilização de divulgação científica no ensino de Física, por ser um elemento em potencial como recurso didático, despertando a curiosidade no alunado. No caso desta pesquisa, os alunos não apenas entram em contato com materiais de divulgação científica, como eles mesmos são autores deste material, com a supervisão docente. Silva e Zanotello (2017) evidenciam o papel do uso de textos de divulgação científica no ensino de física contemporânea para a compreensão dos conceitos físicos e para a formação de uma postura crítica sobre a prática científica. Essa estratégia de ensino com o uso da divulgação científica corrobora com a ampliação de oportunidades para que ocorra a alfabetização científica e para a ampliação do conhecimento sobre ciências, conforme apontam Moreira (2006) e Santos (2006).

Essa etapa da metodologia complementa a etapa 5.4, pois as atividades do curso se estendem à orientação dos alunos de ensino médio para a produção desses materiais. Nesse sentido, as aulas do curso se estenderam em forma de orientação com os alunos. Os encontros para as reuniões ocorreram em dois formatos de aula: assíncrona e síncrona. Para a produção desses materiais, aulas em formato de reuniões com os bolsistas ocorreram após o curso sobre a Teoria do Big Bang, para uma retomada dos conceitos apresentados e estudados. Todo o material desenvolvido, seja em formato de slides/cards/posts para redes sociais ou vídeos,

foram idealizados junto com os estudantes, para que pudessem participar efetivamente da construção desse produto de divulgação científica. Uma parte importante desse processo foi o cuidado de não extrapolar a quantidade de informações nas publicações, tendo em vista que a intenção seja atrair o público para temas de ciência. Pensando nessa forma de abordagem, optou-se por não utilizar equações nas publicações, pois o uso de equações acaba gerando um desinteresse pelo conteúdo, pois o público associa a Física à Matemática e tende a não se interessar pelo resto do produto. Ademais, não faria sentido expor as equações de campo de Einstein ou as soluções detalhadas de Friedmann para um público, que, em sua grande maioria, não são físicos. É preciso instigar o pensamento e a curiosidade, e não acabar afastando as pessoas desse tipo de material. Estas considerações foram ponderadas diante de questões levantadas pelos próprios alunos, que fazem parte do grande público que irá consumir essa divulgação científica.

A primeira reunião/aula ocorreu no dia 23/11/2022. Para dar início às orientações, em um primeiro momento houve uma revisão dos seguintes tópicos: Gravitação na Relatividade Geral e interpretação física das equações de campo de Einstein; Modelo Cosmológico de Einstein; Modelo Cosmológico de Willem De Sitter. A princípio, os alunos alegaram não ter dúvidas sobre os conceitos físicos envolvidos nesses tópicos de assunto, pois ainda lembravam das aulas. Após essa retomada, foram elencados quais materiais seriam elaborados para a divulgação científica sobre o tema. Foram sugeridos que os estudantes produzissem conteúdos para serem divulgados nos canais de comunicação do *Instagram* e no canal no *Youtube* do Grupo de Estudos e Divulgação Científica – IFSCIENCE. Além dessas plataformas, os materiais foram publicados no *website* desenvolvido para essa pesquisa. Sugerem-se essas plataformas midiáticas, devido ao grande alcance entre o público de todas as idades e por levar em consideração as anotações durante as aulas de que a maioria dos alunos acessam essas redes de comunicação para procurar informações em busca de explicações lúdicas sobre o assunto. Para fins didáticos e pensando no grande público, os estudantes foram orientados a criar uma série de *posts* em forma de slides para serem publicados no *Instagram*, com conceitos de Física da Teoria do Big Bang e sobre a história centenária desta teoria. As publicações nessa rede social foram divididas em sete capítulos, dos quais versavam sobre os tópicos de estudos do curso, explicando a história e a física dos fenômenos relacionados ao Modelo Padrão Cosmológico. Além disso, foi proposto a elaboração de um vídeo sobre o tema de estudo, a ser publicado no *Youtube*.

As dúvidas começaram a surgir no segundo encontro para a produção do material, que aconteceu no dia 30/11/2022, no formato presencial, no qual perguntas como “de que maneira

Einstein e De Sitter sabiam que estavam certos?"; "o que significa a constante cosmológica?" foram elaboradas pelos alunos. Essas perguntas foram respondidas com a utilização de recursos visuais, com imagens contidas nos slides e com o texto paradidático, procurando retomar o conteúdo visto nas aulas e tentando instigar os estudantes a chegarem numa resposta plausível e coerente com os conceitos estudados.

O terceiro encontro para orientação ocorreu no dia 07/12/2022, de forma presencial e foi o último do ano de 2022, devido ao fim do ano letivo previsto no calendário escolar. Nesta aula pôde-se perceber a evolução dos primeiros slides construídos pelos estudantes sobre a explicação para a relatividade geral e os modelos cosmológicos de Einstein e De Sitter. Durante esse momento, aproveitamos para corrigir alguns detalhes, como erros ortográficos, localização de imagens no slide e a sequência de apresentação. Notou-se uma percepção e um melhor entendimento dos conceitos quando comparados às aulas, sendo assim, os estudantes finalizaram o primeiro material a ser publicado nas plataformas digitais, apresentando conceitos de relatividade geral e sua relação com o surgimento da Cosmologia Moderna, que constituiu o capítulo um, das publicações.

O quarto encontro aconteceu após o período de férias, no dia 08/02/2023 de forma presencial. Nesta aula, os estudantes aproveitaram para perguntar sobre a lei de Hubble e sobre a importância do trabalho de Leavitt com a medida da distância das variáveis cefeidas. Esse encontro mostrou a importância da representatividade no campo das ciências, pois as alunas presentes na construção do material de divulgação científica, se identificaram com a cientista Henrietta Leavitt e seu trabalho fundamental, marcado na história da Cosmologia Moderna. Algumas frases ditas pelas alunas que podem ser destacadas nesse sentido foram: *"é muito interessante saber esses fatos históricos, porque ninguém presta atenção nisso e faz toda a diferença, principalmente pra quem se interessa e quer trabalhar com isso"*; *"não fazia ideia de que foi uma mulher que mediu o Universo, digamos assim, mas isto é incrível, porque dá vontade de estudar mais pensando na importância do trabalho dela"*; Ainda nessa aula, foram estipulados quais conceitos seriam elencados no próximo post de divulgação.

O quinto encontro ocorreu no dia 14/02/2023, no qual eles apresentaram os materiais produzidos e aproveitaram para tirar dúvidas sobre os modelos teóricos das soluções de Friedmann. Nessa aula houve a recapitulação dos modelos de Friedmann, uma associação com a lei de Hubble-Lemaître e a explicação do modelo cosmológico de Lemaître.

O sexto encontro, no dia 01/03/2023, foi marcado pela orientação de um roteiro a ser produzido pelos estudantes sobre os modelos cosmológicos de Friedmann e a divergência

entre estes e os modelos de Einstein e De Sitter. Para tanto, foram retomados os principais conceitos referentes a cada um destes modelos e em quais contextos eles foram propostos.

O sétimo encontro, no dia 10/03/2023, no qual foram retomados alguns conceitos, como o efeito Doppler na Astronomia, a lei de Hubble-Lemaître e o modelo de Lemaître para o Universo. O foco desta aula foi preparar um material voltado para a explicação do modelo do átomo primordial de Lemaître e suas contribuições para a Cosmologia Moderna, explicitando a física envolvida em seus trabalhos. Neste encontro foram apresentados, assim como nas aulas, textos originais dos artigos dos principais cientistas envolvidos na Teoria do Big Bang, traduzidos de forma literal, para que os alunos pudessem se aproximar do material produzido pelos próprios autores. Essa aproximação fomentou as discussões e perguntas sobre o tema, gerando ideias sobre as demais publicações a serem desenvolvidas, e possibilitando desmistificar a ideia de que os trabalhos de grandes cientistas só devem ser lidos por outros cientistas. Foram apresentados os artigos de Einstein de 1917, o artigo de De Sitter, o artigo de Friedmann e os artigos de Leavitt, Lemaître e Hubble. Os trabalhos não foram discutidos em sua integralidade, mas resumidos para os alunos, que puderam visualizar e aprender a pesquisar sobre estes textos. Podemos citar algumas falas dos alunos sobre essa aproximação com os textos originais: “nossa, eu sempre quis ler as coisas direto da fonte, e daí com a explicação ajuda a entender, porque dá pra ver que não foram ideias vagas, teve todo um processo de construção”; *“a gente consegue notar esse desenvolvimento na história por conta das datas das publicações dos artigos também, o que facilita estudar porque tem uma ordem cronológica dos trabalhos”*;

No dia 23/03/2023, no oitavo encontro, os capítulos dois e três já haviam sido publicados e serviram de referência para possíveis alterações nos próximos, buscando melhorar a qualidade das publicações e o alcance do público. As dúvidas desta aula tiveram como foco principal a edição de imagens e como relacionar conceitos físicos com a história de forma sintetizada, pois à medida que os capítulos eram construídos, maior a quantidade de informações a serem adicionadas. Isto gerou uma dúvida nos estudantes, pois o público precisa retomar as ideias do capítulo (publicação) anterior, pois associa melhor as informações. Partindo deste pressuposto, optou-se por repensar nas estratégias de publicação e elaboração dos próximos capítulos, discutindo a física por meio de novas perguntas elaboradas pelos alunos. Essa aula foi marcada pela identificação e percepção da evolução conceitual dos estudantes frente ao tema de estudo, como por exemplo: *“mas professor, como podemos explicar pro pessoal que o Big Bang não é bem uma explosão?”*; *“ah e se a gente explicar a vida dos cientistas para que haja a mesma identificação que tivemos?”*.

Novamente, as dúvidas foram explicadas diante de uma apresentação utilizando o texto paradidático e os slides produzidos para a UEPS.

O nono encontro, no dia 07/04/2023, foi marcado pela recapitulação da física do big bang quente e da elaboração dos roteiros dos próximos capítulos. Além disto, em homenagem ao dia do livro, os estudantes sugeriram fazer uma publicação sobre livros de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia que contribuem para o entendimento do Modelo Cosmológico Padrão e do desenvolvimento de teorias sobre outros modelos cosmológicos. Alguns livros foram analisados e sugeridos como opções de leitura: “Cosmos (Carl Sagan)”; “Pálido ponto azul” (Carl Sagan); “Astrofísica para apressados (Neil de Grasse Tyson)”; Astrofísica para a educação básica (Alan Alves Brito, Neusa Teresinha Massoni)”, “Big Bang (Simon Singh)”, “Uma breve história do tempo (Stephen Hawking)” e “Astronomia e Astrofísica (Kepler de Souza Oliveira Filho, Maria de Fátima Oliveira Saraiva)”. A publicação do dia do livro (23/04/2023) indicando as obras citadas foi pensada como um convite à leitura, que instiga e curiosidade sobre o tema de estudo. Ressalta-se que as sugestões de leitura foram livres, cabendo aos alunos a escolha para ler os livros de seus interesses sobre o tema.

A décima aula em forma de orientação foi no dia 20/04/2023 e teve como objetivo finalizar o capítulo quatro e desenvolver o material dos capítulos cinco, seis e sete, em conjunto com o roteiro de um possível vídeo sobre a nucleossíntese primordial. Os alunos iniciaram um roteiro sobre o tema, que compartilhado de forma on-line, foi editado em mediação e supervisão do docente. Deste encontro em diante, notou-se uma evolução diante da forma como os estudantes buscavam sanar suas dúvidas, abdicando dos vídeos e procurando material de leitura com os artigos originais de cientistas sobre a Teoria do Big Bang, por meio dos slides das aulas, com o texto paradidático e por meio de livros sobre Astronomia e Astrofísica. De acordo com as respostas dadas por eles quando indagados sobre os encontros para a produção do material de divulgação científica, pode-se citar uma das frases do tipo: “*essa forma de aprender sobre o Modelo Cosmológico Padrão facilita porque não envolve tanta matemática e relaciona tudo historicamente*”; “*Consigo aprender física lendo, e isso é incrível. Antes eu achava que era só conta mesmo*”; essa abordagem, com foco em buscar sentido físico antes de partir para as equações, ajuda os alunos a perceberem que a Física está além da linguagem utilizada para descrever os fenômenos e que pode ser compreendida por eles. Ainda assim, ressaltamos que as equações não devem ser negligenciadas nas aulas de Física e que, por meio da linguagem matemática podemos construir modelos teóricos que nos apresentam significado físico. Ainda nesta aula foi proposta uma atividade computacional sobre modelos nucleares, para o estudo e retomada do

processo de nucleossíntese primordial para a produção do vídeo. A atividade está disponível no Apêndice A.

Nesse intervalo de tempo, não houve reuniões para que os alunos pudessem finalizar os capítulos restantes, além do roteiro do vídeo. Todo o material de divulgação científica sobre o centenário e a física da Teoria do Big Bang que foi construído pelos estudantes, foi sendo avaliado e reformulado, a cada encontro/orientação, para que fossem sendo publicados gradativamente nas plataformas sugeridas. Destaca-se que todos os slides em forma de posts eram construídos com base no texto paradidático, nos slides das aulas e nos textos de apoio apresentados. Para além do material produzido pelos alunos, as orientações serviram para elaborar um resumo em forma de artigo científico, aceito para apresentação no Encontro Estadual de Ensino de Física (EEEFís) – 2023.

5.6 Avaliação do material de Divulgação Científica

Essa etapa da metodologia consistiu na avaliação dos materiais desenvolvidos pelos alunos, para posterior publicação nas plataformas digitais (item descrito na etapa 5.7). Conforme citado na etapa 5.5, a avaliação do material produzido ocorreu de forma simultânea às orientações, durante as reuniões, nas quais eram discutidos e avaliados os pormenores do texto com relação aos conceitos de Física e a forma como esses conceitos seriam apresentados e disponibilizados para o público.

Pode-se enfatizar que a elaboração de todos os materiais de divulgação científica acerca do tema não apresentou erros grotescos com relação aos conceitos de Física e tampouco à História da Ciência presente no tema. O material era apresentado pelos discentes, com suas explicações sobre o referido capítulo e assim eram avaliados e aprovados para a publicação. Essa dinâmica fortaleceu o engajamento dos estudantes, pois segundo eles a produção do material de divulgação os instigava a curiosidade sobre a Física e, principalmente, pela História da Ciência. Durante a avaliação do material, foi possível notar o progresso nas falas dos alunos quando se referiam ao tema, ou até mesmo nos roteiros de rascunho sobre o vídeo que estavam produzindo. Algumas dúvidas pertinentes sobre a física envolvida eram respondidas, mas foi possível notar que a maior parte do interesse dos alunos estava centrada na forma como o conhecimento produzido pelos cientistas envolvidos chegava até as pessoas. Uma das dúvidas que podem ser destacadas foi “*como essas informações chegavam nas pessoas que não estudavam Física ou Astronomia na época?*”; esse tipo de dúvida gerou debates sobre a forma de produção e divulgação do conhecimento

científico e como a sociedade consome informações sobre uma ciência completamente vedada àqueles que não são cientistas.

5.7 Publicação do material de Divulgação Científica

A etapa 5.6 foi de fundamental importância para a etapa 5.7, pois nesta etapa foram publicados os materiais de divulgação científica nas plataformas digitais. Todos os materiais foram publicados nas redes sociais do Grupo de Estudos e Divulgação Científica – IFSCIENCE: <https://www.youtube.com/@ifscienceciencianoifscepa5645> e no website <https://sites.google.com/view/teoriadobigbangnasaulasdefisica/página-inicial>. O vídeo disponível está intitulado como: “Modelo Cosmológico Padrão e a Expansão do Universo”. As demais publicações foram divididas em oito capítulos.

O capítulo um tratou da explicação sobre o centenário da Teoria do Big Bang e os principais personagens envolvidos no seu desenvolvimento”; O capítulo dois teve como foco explicar o que estuda a Cosmologia e como surgiu a cosmologia moderna a partir da Teoria da Relatividade Geral; O terceiro capítulo abordou com mais profundidade o modelo cosmológico de Einstein; O capítulo quatro procurou trazer a relação dos modelos cosmológicos propostos a partir da aplicação da TRG para descrever o cosmos. Logo, o capítulo cinco apresenta o modelo de universo sem matéria, proposto por De Sitter; o capítulo seis descreve e apresenta os principais fundamentos dos resultados obtidos por Friedmann e suas possíveis interpretações cosmológicas, principalmente a ideia de universo em expansão, prevista por ele e que enfatiza a comemoração do centenário do MCP. O capítulo sete tratou sobre o modelo de universo do padre e cosmólogo belga, Georges Lemaître, responsável por encontrar resultados que corroboram a expansão do universo. Além disso, sua ideia sobre o átomo primordial, da qual todo o universo estava concentrado em um ponto, como se este ponto representasse um átomo, do qual a partir de seu decaimento radioativo teria começado a se expandir indefinidamente. O oitavo capítulo buscou trazer à tona o papel de destaque de Henrieta Leavitt, responsável por encontrar a relação entre período e luminosidade para estrelas chamadas de variáveis cefeidas.

5.7.1 Material de divulgação científica *de e sobre* o centenário da Teoria do Big Bang produzido pelos alunos

Os slides ou *posts* fazem parte do material desenvolvido pelos estudantes para a publicação nas redes sociais.

Capítulo 1:

Figura 6- Capítulo 1 do material de divulgação científica sobre o tema



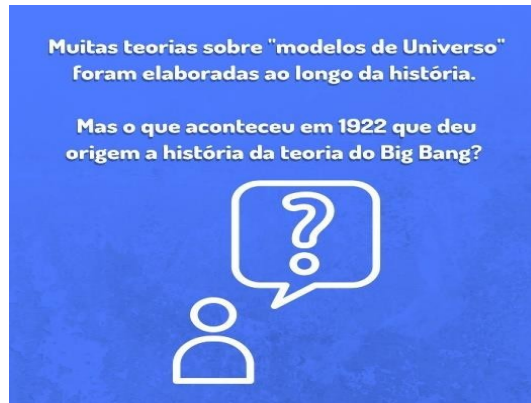
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 7- O centenário da teoria do Big Bang



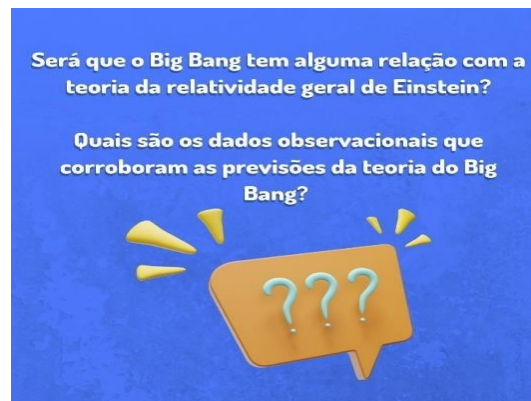
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 8 – Origem da Teoria do Big Bang



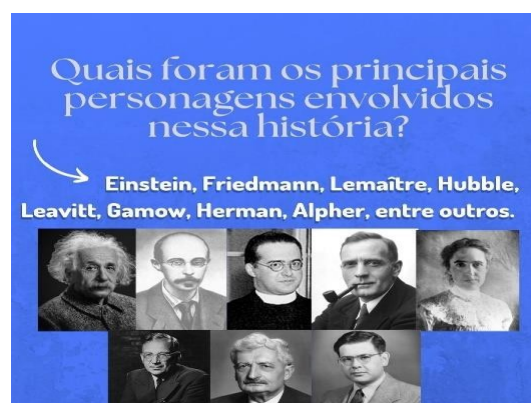
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 8- Teoria do Big Bang e Relatividade Geral



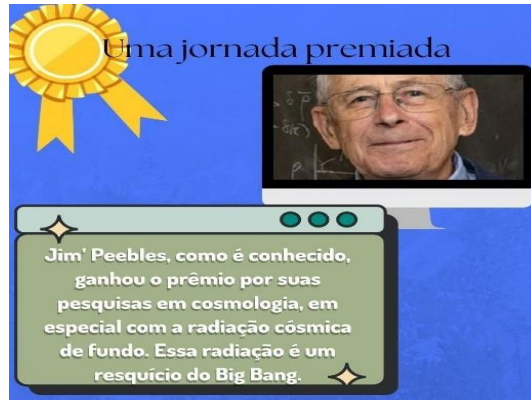
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 9 – Personagens envolvidos na história centenária da teoria do Big Bang



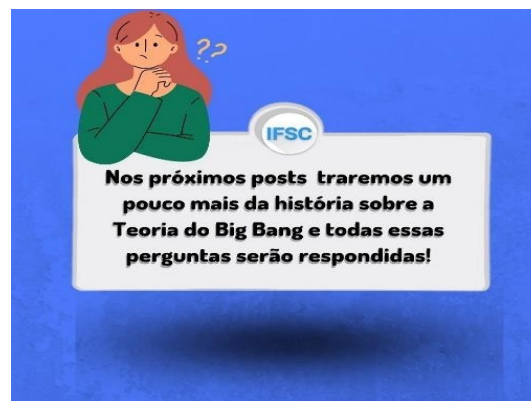
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 10- Uma jornada premiada



Fonte: IFSCIENCE, 2022

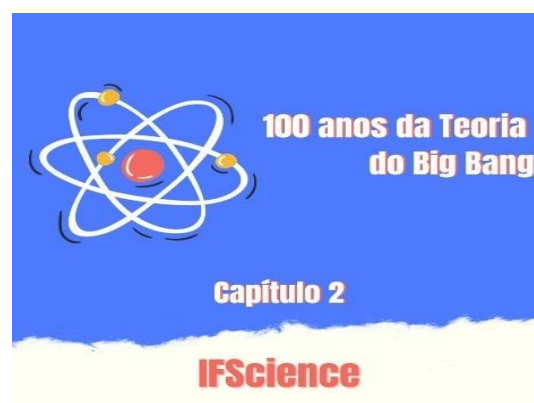
Figura 11- Convite à divulgação



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Capítulo 2:

Figura 12- Capítulo 2 do material de divulgação científica sobre o tema



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 13 – O que é a Cosmologia?



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 14- Como surgiu a Cosmologia Moderna?



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 15- Surge a Cosmologia Moderna



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 16- TRG e o Cosmos



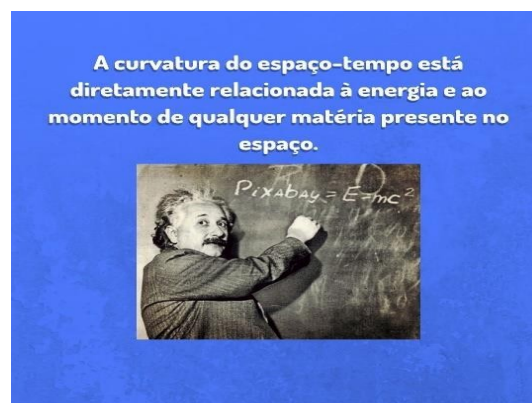
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 17 – O que é a Teoria da Relatividade Geral?



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 18 –Espaço-tempo



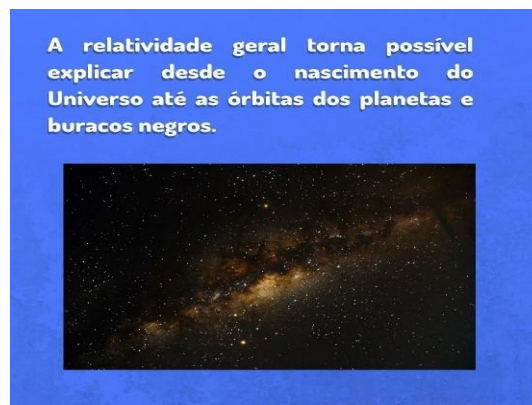
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 19 – Entendendo o espaço-tempo



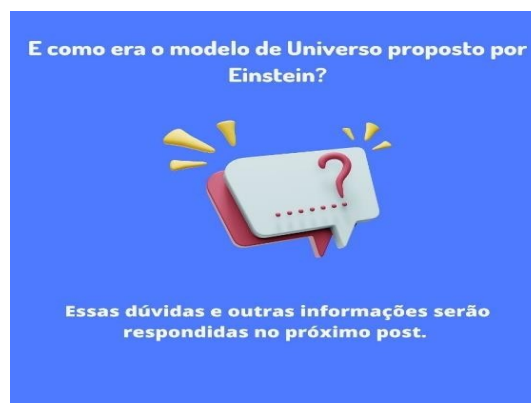
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 20- TRG e suas implicações



Fonte: IFSCIENCE, 2022

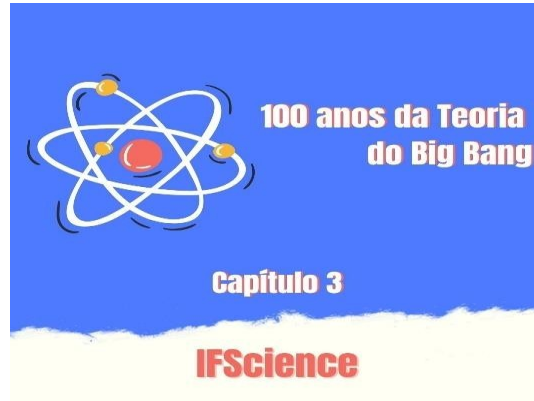
Figura 21 – Como era o modelo de Universo proposto por Einstein?



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Capítulo 3

Figura 22 – Capítulo 3 do material de divulgação científica sobre o tema



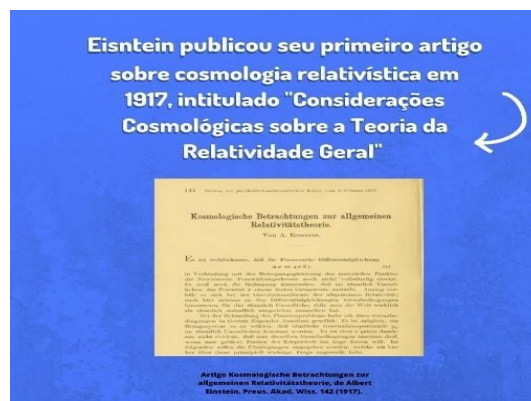
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 23- O modelo cosmológico de Einstein



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 24 – Cosmologia relativística



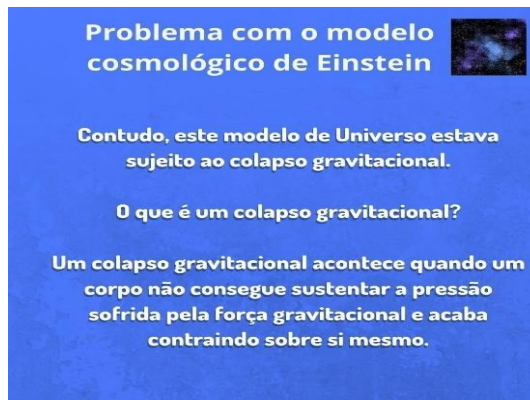
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 25- Princípio Cosmológico



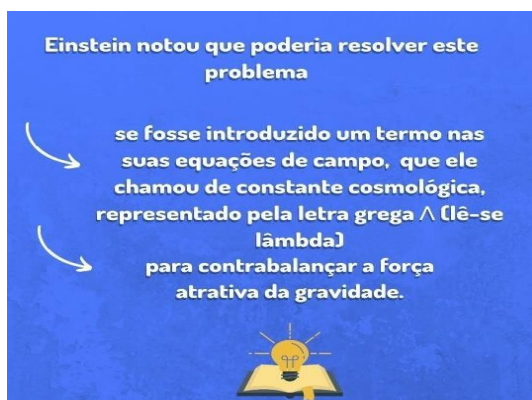
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 26- Problema previsto pela TRG



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 27- A constante cosmológica de Einstein



Fonte: IFSCIENCE, 2022

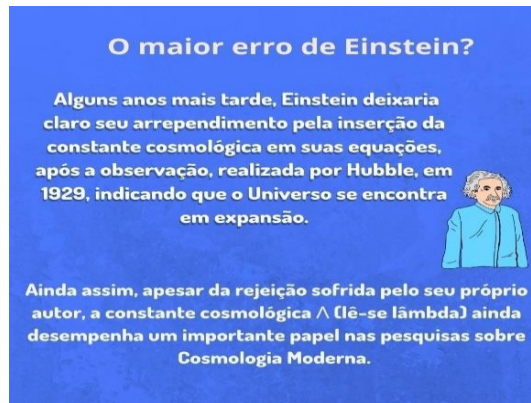
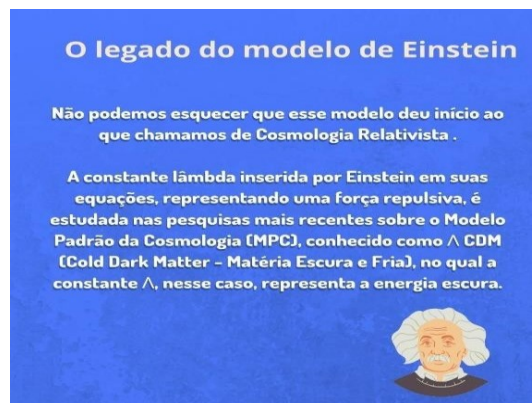


Figura 28- A constante cosmológica foi um erro?

Fonte: IFSCIENCE, 2022

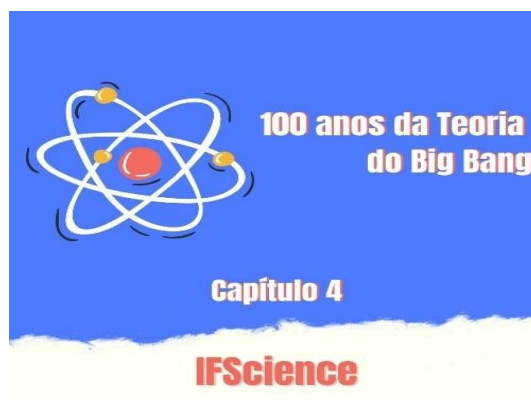
Figura 29 – O legado do modelo de Einstein



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Capítulo 4

Figura 30 – Capítulo 4 do material de divulgação científica sobre o tema



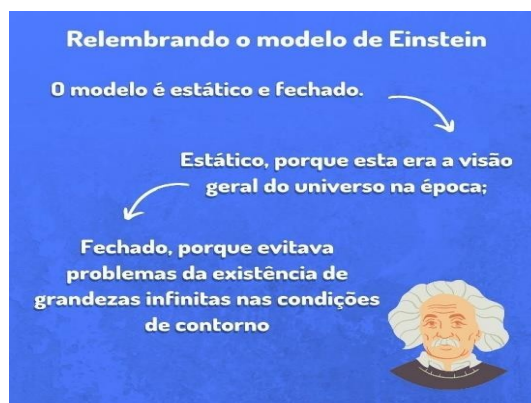
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 31- O universo de Einstein



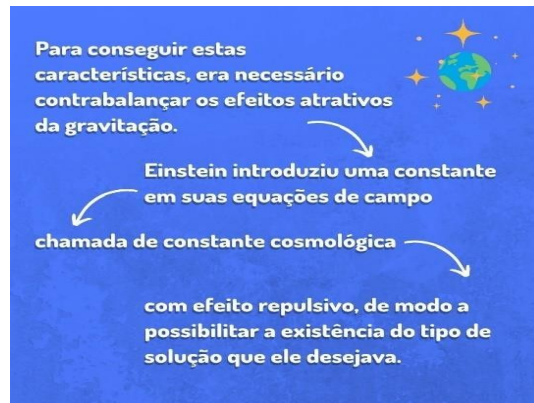
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 32- Relembrando o modelo de Einstein



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 34 – Características do modelo fechado e seus problemas



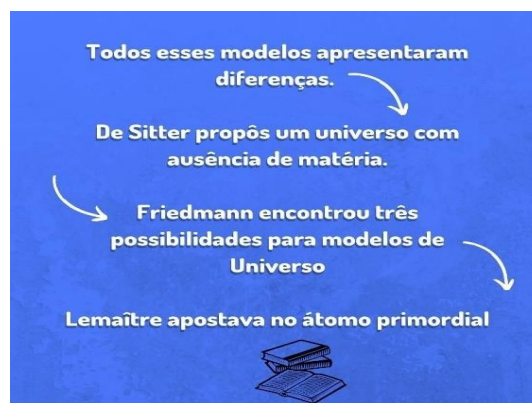
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 33- De Sitter, Friedmann e Lemaître



Fonte: IFSCIENCE, 2022

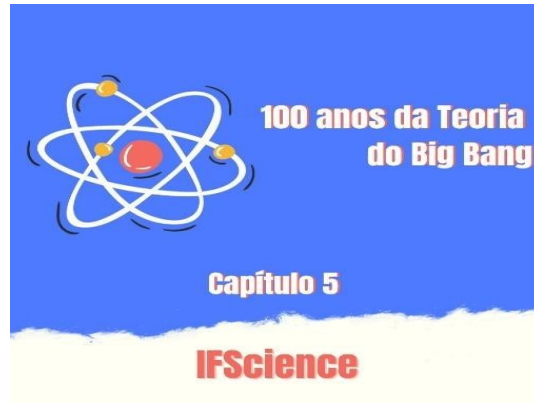
Figura 34- Propostas de modelos de Universo



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Capítulo 5

Figura 35- Capítulo 5 do material de divulgação científica sobre o tema



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 36- O universo de Willem De Sitter



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 37- Quem foi De Sitter?



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 38- Como era o Universo de Willem De Sitter



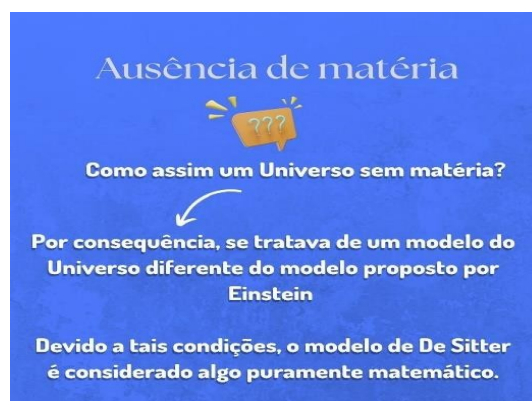
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 39- Universo com ausência de matéria



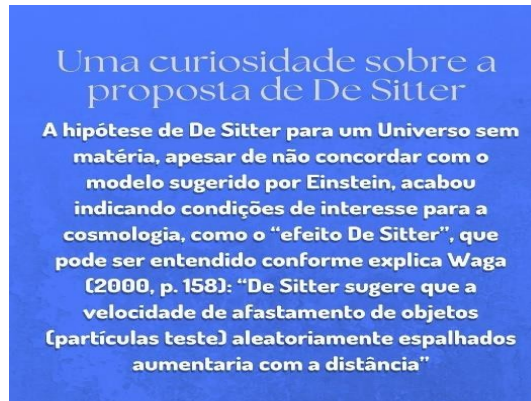
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 40- Modelo matemático de Universo



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 41- O efeito De Sitter



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 42- A década de 1920



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 43- Um Universo dinâmico



Fonte: IFSCIENCE, 2022

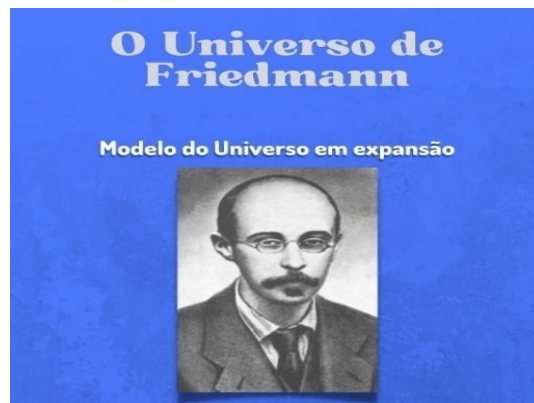
Capítulo 6

Figura 44- Capítulo 6 do material de divulgação científica sobre o tema



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 45- O Universo de Friedmann

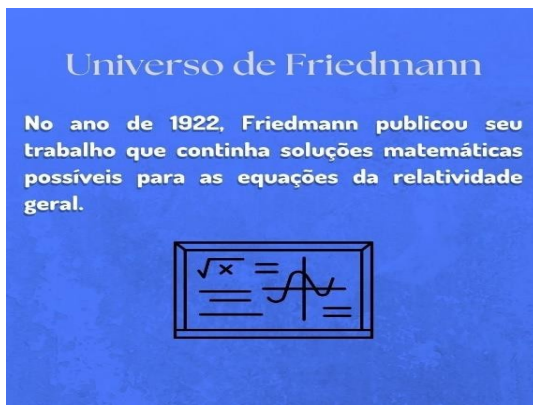


Fonte: IFSCIENCE, 2022



Figura 46- Quem foi Alexander Friedmann?
 Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 47- O trabalho de Friedmann de 1922



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 48- Artigo de Friedmann de 1922




Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 49- Os resultados de Friedmann

Universo de Friedmann

Friedmann encontra as mesmas relações matemáticas que descrevem tanto o modelo de Einstein quanto o modelo de De Sitter. Contudo, o matemático russo foi além e encontrou resultados que poderiam descrever modelos cosmológicos estáticos, em contração ou em expansão.



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 50- Universo em expansão?

Universo de Friedmann

Einstein havia previsto que o universo era estático, mas ao contrário dele, Friedmann apresentou soluções para as equações da relatividade geral em que o Universo estava em expansão.

É importante lembrar que Friedmann obteve esses resultados sem a constante cosmológica.

Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 51- Friedmann e a previsão de um modelo de Universo que se expande

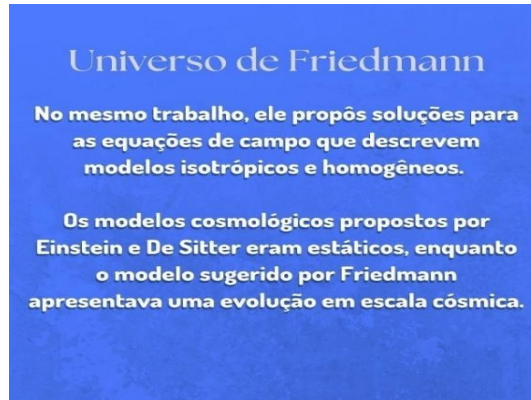
Universo de Friedmann

O seu trabalho se torna ainda mais relevante quando comparado às descobertas que surgiram posteriormente. "Na verdade, em 1922, vários anos antes da descoberta de Edwin Hubble, Friedmann previu exatamente o que Hubble descobriu!" (HAWKING, S. 1996, p. 72).



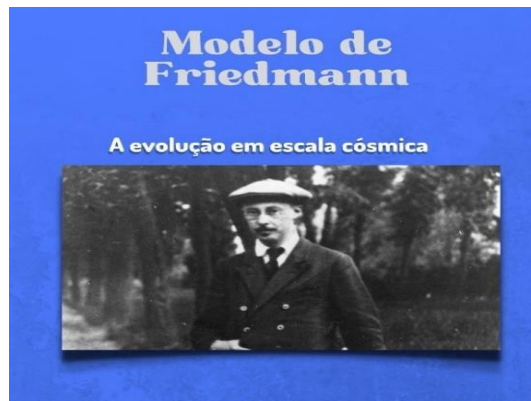
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 52- Evolução em escala cósmica



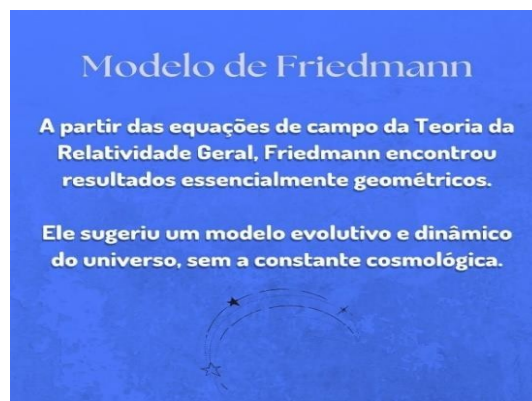
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 53- Modelo de Friedmann



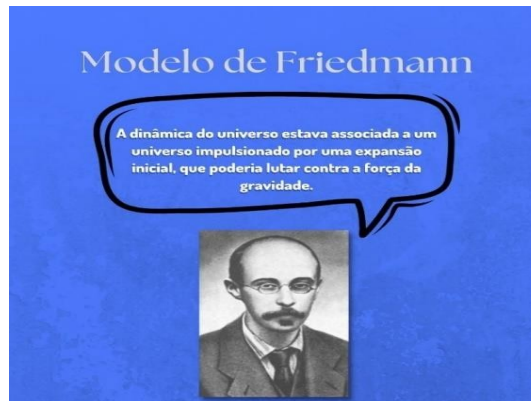
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 54- Modelo evolutivo e dinâmico



Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 55- A dinâmica do Universo



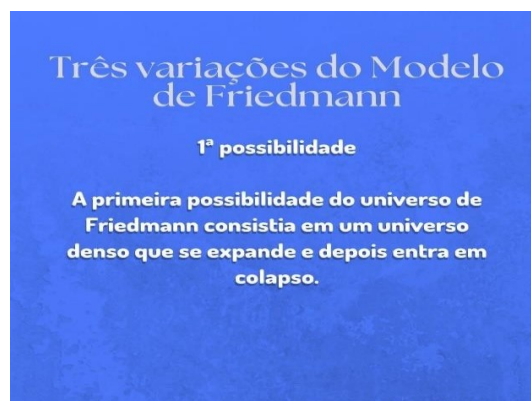
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 56 – Três possíveis modelos de Universo



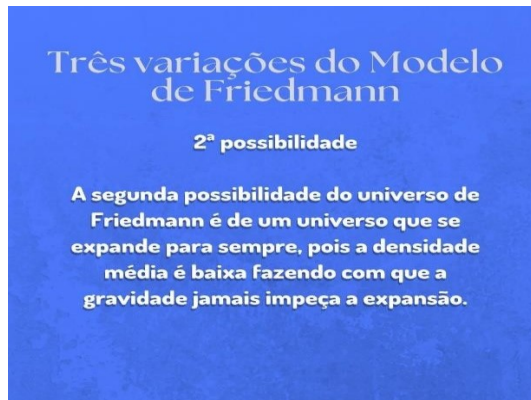
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 57- 1ª possibilidade



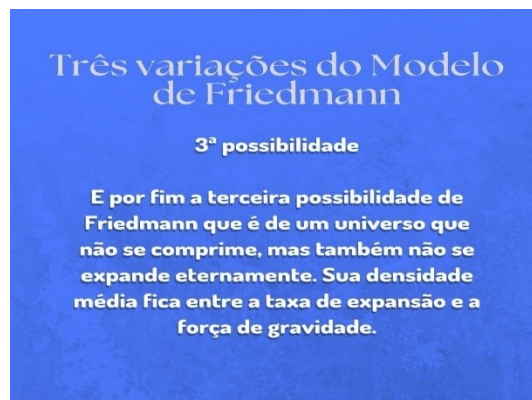
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 58 – 2ª possibilidade



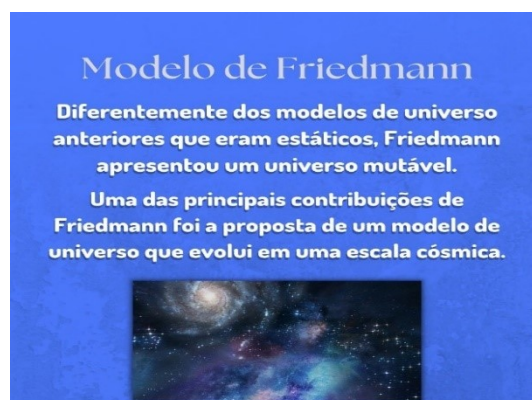
Fonte: IFSCIENCE, 2022

Figura 59- 3ª possibilidade



Fonte: IFSCIENCE, 2022

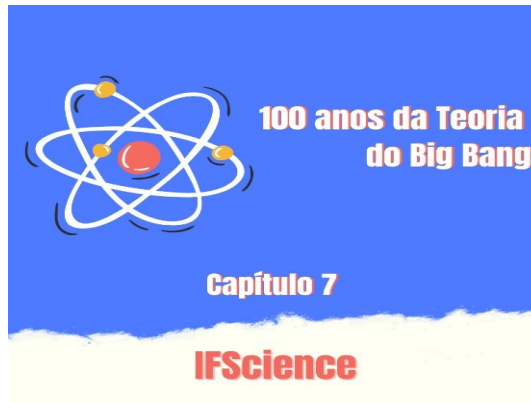
Figura 60 – Universo mutável



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

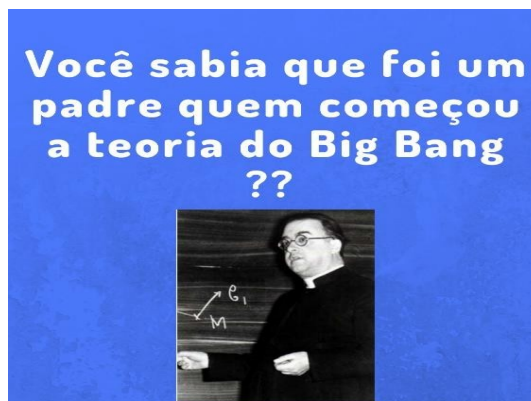
Capítulo 7

Figura 61 – Capítulo 7 do material de divulgação científica sobre o tema



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 62- Um padre e a teoria do Big Bang



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 63- Quem foi esse padre?



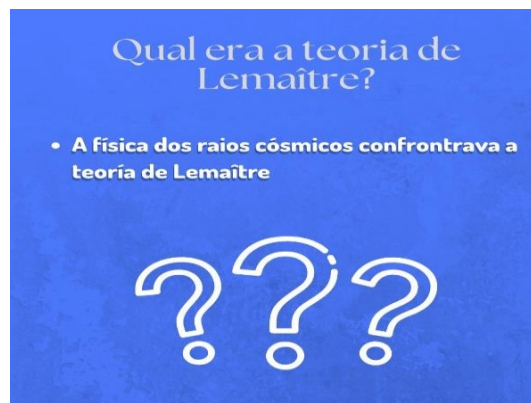
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 66 – O átomo primordial de Lemaître



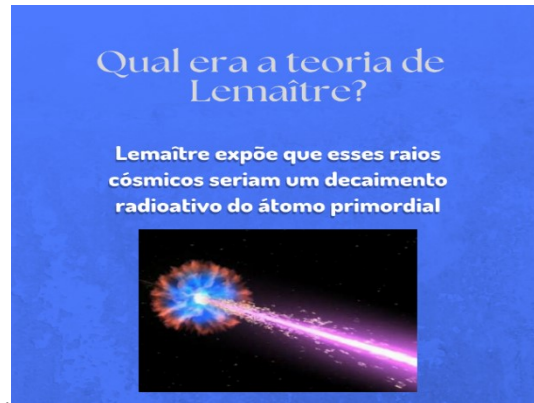
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 64- A teoria de Lemaître



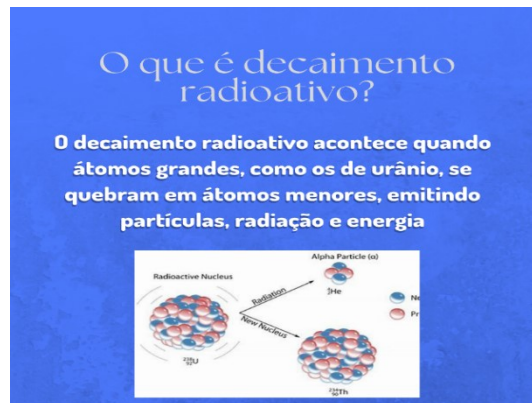
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 65- A física dos raios cósmicos e o átomo primordial de Lemaître



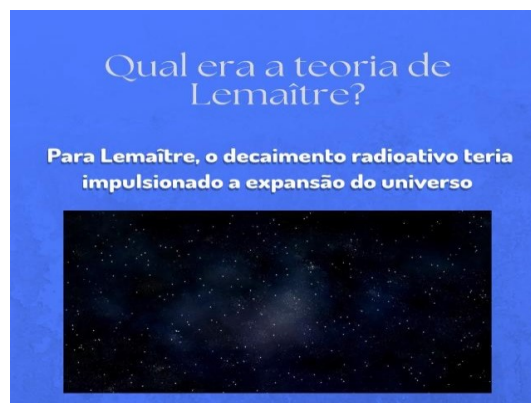
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 66- Decaimento radioativo



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 67 – Expansão do Universo



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 68- Semelhanças com o modelo de Friedmann



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Capítulo 8

Figura 69 – Capítulo 8 do material de divulgação científica sobre o tema



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 70 – Quem mediu o Universo?



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 71 – Henrieta S. Leavitt



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 72- A vida de Leavitt



Fonte: IFSCIENCE, 2022.



Figura 73 – O trabalho de Leavitt

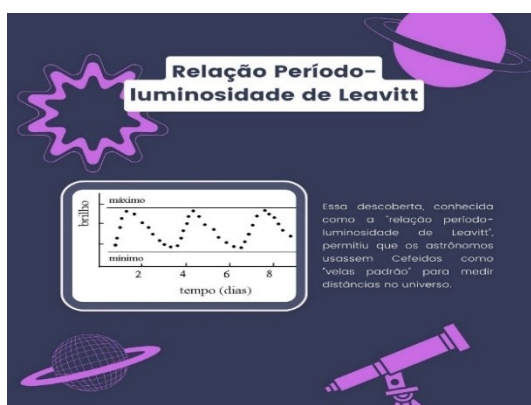
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 74 – Relação Período-Luminosidade de Leavitt



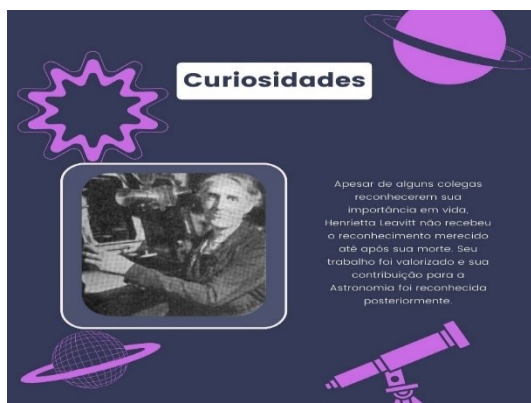
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 75 – Relação Período-Luminosidade



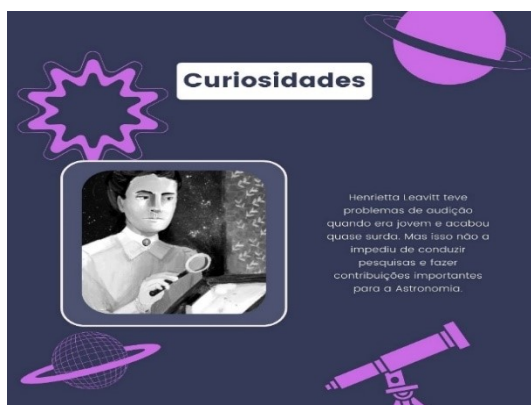
Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 76- Curiosidades



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Figura 77 - Curiosidades



Fonte: IFSCIENCE, 2022.

Vídeo produzido para o Youtube sobre o Modelo Cosmológico Padrão e a Expansão do Universo

Para além dos capítulos publicados nas plataformas digitais, os estudantes foram solicitados a produzirem um vídeo abordando questões sobre o Modelo Cosmológico Padrão e a expansão acelerada do Universo. O vídeo produzido pelos estudantes está disponível na plataforma do *Youtube* e pode ser acessado via <https://www.youtube.com/watch?v=xIDnRXp41Io&t=252s>.

Figura 78- Vídeo - Modelo Cosmológico Padrão e a Expansão do Universo



Fonte: IFSCIENCE, 2023

5.8 Redação

A última etapa da metodologia integra a produção de artigos acadêmicos, com a finalidade de publicação em periódicos das áreas do Ensino de Física. Durante o período de desenvolvimento da pesquisa, foram escritos cinco artigos e um resumo sobre o tema, listado a seguir:

- i) De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang
- ii) O centenário da Teoria do Big Bang
- iii) De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang nas aulas de Física (resumo)
- iv) Relatividade Geral e Modelos Cosmológicos: uma abordagem teórica por meio da aprendizagem significativa e da epistemologia de Feyerabend para um ensino *de e sobre* ciência.
- v) Georges Lemaître: padre, cosmólogo e precursor da Teoria do Big Bang.

Dentre estes, um artigo e um resumo já foram publicados. O texto (i) constitui o texto paradigmático disponível no *website* e no quarto capítulo deste trabalho. O artigo (ii) foi aceito para a publicação e encontra-se disponível nos anais do 11º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense (SICT-Sul) - 2022. O trabalho foi apresentado no formato oral e avaliado por uma banca de professores do evento, sob a supervisão do orientador da pesquisa. O resumo citado (iii), com o título da dissertação, foi aceito no Encontro Estadual

de Ensino de Física (EEEFís) – 2023, e publicado nos anais do evento, após a apresentação oral com banner. Os artigos (iv) e (v) estão em processo final de escrita e revisão. Ressaltamos que todos estes textos estão disponíveis na página na rede mundial de computadores produzida para a pesquisa

Capítulo 6

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a discussão dos resultados obtidos após a implementação da pesquisa, foi utilizada uma ferramenta de análise que tem sido usada em diversas dissertações dentro do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), tais como Santos (2019), Zanetti (2021), Felisberto (2021), Keli (2021). Esta ferramenta desenvolvida consiste na abordagem sequencial que pode ser dividida em i) análise das concepções prévias dos alunos; ii) análise do diário de bordo; iii) análise da avaliação somativa individual; iv) análise do questionário final; v) análise das variáveis de investigação: achados da pesquisa. Como referencial teórico para o desenvolvimento desta ferramenta os autores utilizaram a Teoria Fundamentada de Glaser e Strauss.

6.1 Teoria de Glaser e Strauss

A Teoria Fundamentada teve sua origem com a publicação do livro “*The Discovery of grounded theory: strategies for qualitative researches*” em 1967, por Glaser e Strauss. Conforme colocam Strauss e Corbin (1997) “a teoria evolui durante a pesquisa real e o faz devida à contínua interação entre análise e a coleta de dados”. Seguindo a metodologia da teoria fundamentada, deve-se adotar dados que sirvam como variáveis de investigação. De acordo com Torres et al. (2014) a teoria fundamentada compreende uma metodologia qualitativa que busca compreender os aspectos teóricos de evolução e potencialização da expansão do conhecimento. Logo, a teoria fundamentada permite ao pesquisador não somente analisar e interpretar os dados coletados, como talvez identificar o surgimento de uma nova teoria por meio dos dados obtidos. No caso desta pesquisa, optou-se por coletar os dados e interpretar os resultados de acordo com os objetivos propostos e utilizando uma ferramenta de análise baseada na Teoria Fundamentada.

Desse modo, as variáveis de investigação selecionadas foram: (a) houve evolução conceitual nos tópicos de física relacionados à Teoria do Big Bang? (b) houve evolução conceitual no que tange ao aspecto da problematização da ciência por meio de fatos históricos do seu desenvolvimento e a compreensão dos fenômenos físicos? (c) a abordagem adotada para o ensino de física por meio do centenário do modelo cosmológico padrão cumpriu seu papel, respeitando os referenciais utilizados, mostrando indícios de aprendizagem significativa e desconstruindo uma visão de ciência imutável, desalinhada dos fatos históricos

e descontextualizada? (d) houve uma maior adesão por parte dos alunos em aprender tópicos de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia Moderna?

6.2 Análise das concepções prévias

A análise das concepções prévias dos alunos foi realizada logo no primeiro encontro, conforme descrito na etapa 5.4. Os alunos citaram alguns termos relacionados à Astronomia, como formação de galáxias, estrelas, buracos negros, mecânica quântica e relatividade. Pôde-se observar que a maioria dos alunos demonstrava pouco conhecimento acerca do tema, apesar de citarem objetos e tópicos de estudo da área de interesse. A maior parte das respostas formuladas por eles focava na formação de buracos negros e que um buraco negro deu origem ao universo. Diante das respostas, observou-se que os alunos não tinham conhecimentos prévios sobre o tema e apenas reproduziam informações prontas sobre assuntos que, para eles, explicam a origem do universo. Ainda no primeiro encontro, os alunos foram indagados sobre o que seria a relatividade geral. Percebeu-se que os alunos não sabiam do que se tratava a relatividade geral e ainda confundem conceitos básicos de cinemática, como velocidade e aceleração. Outros se resumiram a dizer que simplesmente não sabiam.

Quando questionados sobre como a relatividade geral ajudou a construir o modelo do Big Bang, a maior parte dos alunos respondeu que não sabia ou que já tinha visto esta questão em algum meio de comunicação, como vídeos ou documentários, mas não sabia responder qual seria a relação. A pergunta sobre a expansão do Universo causou uma certa inquietação por parte da turma, pois alegaram que essa seria uma pergunta sem sentido, porque é óbvio que está se expandindo. No entanto, não souberam explicar a “obviedade” dita por eles do motivo do Universo estar se expandindo. Isto denota duas situações em relação aos conhecimentos prévios por eles apresentados: a primeira é que a maior parte da turma associa aquilo que imaginam a um tema de estudo da física sem se importar com os conceitos e a segunda observação é que, quando indagados sobre um assunto que de fato não dominam ou não tem qualquer ideia de resposta, acabam por ridicularizar ou diminuir o grau de importância das perguntas.

A última questão falava sobre os prêmios Nobel relacionados à Teoria do Big Bang e acabou revelando que os alunos não sabiam que as pesquisas renderam um prêmio Nobel. Alguns alunos relacionaram o prêmio ao estudo da mecânica quântica e da relatividade geral, confundindo conceitos das duas áreas de saber. Esse tipo de confusão mostra o quanto os conceitos relacionados à Física Moderna e Contemporânea não são abordados em sala de aula.

De forma geral, pode-se valorizar a vontade dos alunos e a predisposição em aprender sobre os novos conceitos, o que indicou uma variável importante para a construção de uma aprendizagem significativa.

6.3 Análise do diário de bordo

Conforme descrito na implementação da UEPS, ao longo das aulas, os alunos foram mostrando cada vez mais o interesse pelo tema abordado. Uma parte a se destacar é a elaboração de questões por parte dos alunos que, interessados, mostravam até mesmo ansiedade em sanar suas dúvidas. Nas últimas aulas e reuniões de orientação, notou-se que os alunos já respondiam questões com um certo grau de profundidade e sabiam diferenciar os conceitos físicos, bem como relacioná-los a uma ciência em constante processo de construção.

Pode-se dizer que a abordagem utilizada aumentou ainda mais a vontade e a predisposição dos alunos em aprender, observando o comportamento deles nas aulas. Logo, o que era perceptível no início das aulas, acabou refletindo-se em uma situação de maior potencial para construção de aprendizagens. Com relação a motivação para realizar as atividades planejadas, todos os alunos que participaram contribuíram demonstrando interesse e disposição para aperfeiçoar os materiais e aprender a cada aula.

6.4 Análise da avaliação somativa individual

A avaliação somativa individual foi composta de dez questões. Como ajuda para realizar a avaliação, os alunos puderam consultar os materiais dos slides, o texto paradidático, as vídeo-aulas e os materiais por eles construídos. A primeira questão da avaliação estava relacionada diretamente ao tema principal de estudo, a Teoria do Big Bang. As respostas foram semelhantes, de forma geral, mostrando que os alunos mencionam em suas respostas todas os conceitos físicos envolvidos, como o surgimento da cosmologia moderna e a relação com a TRG, citando a lei de Hubble, a relação período-luminosidade de Leavitt, o átomo primordial de Lemaître, os modelos de Friedmann e a radiação cósmica de fundo. Percebeu-se que eles ainda apresentam dificuldades em explicar os fatos históricos, mas conseguem demonstrar um certo grau de compreensão sobre a física do tema.

A segunda questão versava sobre o modelo cosmológico de Einstein. As respostas para esta pergunta foram sucintas, mas mostraram que os alunos puderam entender que o modelo de Einstein apresentava falhas, que foram indicadas por Friedmann e Lemaître, mas só foram consideradas após a observação de Hubble. Algumas respostas enfatizaram o fato de que o modelo einsteniano do cosmos implicaria num colapso gravitacional e comentaram

sobre a inserção da constante cosmológica para contrabalançar a atração gravitacional. Algumas respostas denotaram que os alunos confundem o conceito e o símbolo de constante cosmológica com o termo “equação cosmológica”.

A terceira questão estava relacionada ao precursor de um modelo cosmológico que falava sobre a expansão do Universo, as hipóteses de Friedmann. A maioria dos alunos descreveu o trabalho de Friedmann e as formulações dos modelos a partir de seus resultados para as equações da TRG. Alguns se resumiram a responder de forma prática: “universo em expansão, universo em contração e universo estático”. Outros foram mais específicos: “primeira hipótese: o universo que é muito denso, se expande e depois entra em colapso; segunda hipótese: o universo se expande para sempre, pois a densidade média é muito baixa e assim a gravidade jamais impediria a expansão; terceira hipótese: a densidade é média entre a taxa de expansão e a força de gravidade. O universo não se comprime, mas também não se expande para sempre.”

A quarta questão tratou diretamente do processo de recombinação, pedindo para os alunos explicarem com suas palavras o que foi o processo de recombinação na Teoria do Big Bang quente. Uma das respostas foi a seguinte: “recombinação é quando a temperatura do universo ficou mais baixa, em torno de 3000 K. Nesse momento, os elétrons se juntaram aos núcleos dos átomos, criando átomos mais estáveis.” Contudo, outras respostas foram cópias do material de ensino utilizado durante as aulas.

A quinta questão perguntou sobre os vencedores do prêmio Nobel de Física com pesquisas que contribuíram para o desenvolvimento da Teoria do Big Bang. Apesar de ser uma questão simples, houve mais respostas erradas do que certas sobre os vencedores do Nobel. Evidencia-se o erro pelo fato de alunos confundirem cientistas famosos ao *status quo* de vencedor de um prêmio, confundindo alguns nomes envolvidos nas pesquisas acerca do modelo cosmológico padrão.

A sexta questão procurou saber se os alunos sabiam explicar os conceitos de blueshift e redshift, geralmente utilizados no campo da Astronomia e estudados ao longo das aulas. Os alunos souberam responder esta questão sem dificuldades, diferenciando os termos e relacionando ao efeito Doppler.

A sétima questão perguntava sobre o que se tratava a fissão nuclear relacionada ao modelo do átomo primordial do padre e cosmólogo George Lemaître. Alguns alunos souberam responder de forma complexa, enquanto outros se limitaram a dizer que não sabiam, pois não lembravam.

A oitava questão procurava identificar se os alunos saberiam responder o que se trata a radiação cósmica de fundo e sua importância para a corroboração do modelo do Big Bang frente a outros modelos cosmológicos. As respostas dos alunos tenderam a ser rasas, apesar de estarem corretas. As respostas que não foram minimizadas, apresentaram argumentos discutidos em sala.

A nona pergunta pedia para que os alunos fizessem uma breve descrição do que se trata a Teoria da Relatividade. Obtiveram-se excelentes respostas, com base nas aulas, de que “a teoria da relatividade geral propõe que o espaço-tempo seja curvo e objetos com muita massa acabam curvando o tecido do espaço-tempo.” Além disso os alunos souberam identificar a TRG como uma teoria da Física Moderna e Contemporânea.

A décima questão procurou saber se os alunos sabiam dizer por que o Big Bang não se trata de uma explosão e sim de uma teoria de evolução e expansão do Universo. Em sua maioria, os alunos responderam de forma simples: “foi uma expansão do próprio espaço-tempo”.

6.5 Análise do questionário final

O questionário final foi implementando em conjunto com a avaliação somativa final, procurando saber como foi o processo de ensino e aprendizagem de acordo com a abordagem adotada para as aulas e orientações. A primeira questão perguntava como os alunos avaliam as aulas sobre a perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang. A maior parte das respostas foram as seguintes: “*maravilhosas, super didáticas e de fácil entendimento*”; “*ótimas e super explicativas*”. “*Saber mais sobre as descobertas por trás desta teoria rendeu muito aprendizado e compreensão sobre Astronomia e Astrofísica.*”

A segunda questão estava relacionada à metodologia utilizada para o aprendizado durante as aulas e orientações para a produção de material de divulgação científica. As respostas apresentadas prestigiam a metodologia e corroboram os achados da pesquisa: “*Com certeza!*”; “*Consegui aprender de um jeito fácil e muito compreensível.*”

A terceira questão buscou saber se os recursos didáticos utilizados durante as aulas e orientações foram suficientes e como eles avaliam a didática do professor. As respostas apresentam um certo consenso, embora os alunos não tenham expressado opiniões sobre os recursos utilizados: “*bom, sem sugestões, foi legal aprender, embora seja difícil*”; “*10/10!!*”. “*As aulas foram maravilhosas e se tivéssemos dúvidas era apenas perguntar que o professor explicava de novo.*” “*O professor possui uma ótima didática e a explicação fez a Astronomia*

e Astrofísica parecer mais fácil, pois conseguiu simplificar conceitos complexos do assunto e deixou mais claro.”

6.6 Análise das variáveis de investigação: achados da pesquisa

No tratamento das variáveis de investigação, pode-se concluir alguns achados, apresentados a seguir:

- (i) Partindo da análise das concepções prévias dos alunos e comparando estas respostas com o questionário final, evidencia-se que houve evolução conceitual desses estudantes no que diz respeito ao estudo de tópicos de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia, dentro da perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang. Os alunos passaram a expressar um conhecimento em um nível mais alto de complexidade até mesmo na formulação de perguntas sobre o assunto, buscando saber sobre as últimas pesquisas relacionadas a matéria escura e energia escura e quais os impactos do telescópio James Webb na nossa compreensão sobre o Modelo Cosmológico Padrão. Além disso, eles teceram comentários corretos relacionados aos conceitos físicos estudados, interpretando corretamente os assuntos estudados, como o *redshift* na separação das galáxias, a expansão acelerada do Universo, os conceitos de fissão e fusão nuclear, diferenciando os modelos cosmológicos propostos desde 1917 e identificando as falhas apresentadas pela Teoria do Big Bang.
- (ii) Pode-se apontar indícios de uma visão mais coletiva de ciência pelos alunos, que expressaram um entendimento sobre a forma como a ciência é produzida de acordo com a visão da moderna filosofia da ciência, principalmente durante as produções dos materiais de divulgação científica. Ao expressarem seus conhecimentos durante a produção dos vídeos e nas aulas em forma de orientação, foi possível identificar algumas visões compatíveis com a filosofia de ciência adotada na realização da pesquisa.
- (iii) É viável apontar que para uma aprendizagem significativa do tema, a metodologia utilizada conseguiu obter resultados de interesse, como a variável mais relevante para a ocorrência de uma aprendizagem desse tipo, tal qual explicita Moreira (2006), que é a vontade e a predisposição em aprender. A análise dos dados com a participação nas aulas, vide diário de bordo, as respostas no questionário final e a produção de material de divulgação científica sobre o tema indicam uma aprendizagem significativa dos temas. As duas condições necessárias explicitadas pela teoria, descritas anteriormente neste trabalho,

foram obtidas: a predisposição em aprender e a disponibilidade de um material potencialmente significativo.

- (iv) De forma geral, ao final da implementação da pesquisa, a partir do material produzido pelos estudantes e por meio das respostas obtidas no questionário final, foi possível observar a visão de ciência adotada e de certa forma, compreendida por eles, procurando desmistificar conceitos relacionados à História da Ciência e, alinhados à visão da moderna filosofia da ciência, elaborar materiais de divulgação científica que vão ao encontro da filosofia de ciência adotada na proposta da pesquisa.

Capítulo 7

7 CONCLUSÃO

A **questão** norteadora que essa pesquisa buscou responder foi: *como divulgar e levantar questões no ensino de Física relacionadas à Astronomia e Astrofísica e conceitos de Cosmologia Moderna por meio do contexto histórico da Teoria do Big Bang?* A **hipótese** adotada foi de que a construção e implementação de um material instrucional, em forma de curso para o ensino básico, bem como a orientação de alunos, para que os estudantes possam produzir conteúdo de divulgação científica, pode promover o levantamento de questões acerca do tema proposto e a participação no desenvolvimento de materiais que promovam a discussão *de e sobre* a ciência.

O tópico principal a ser discutido foi a Física presente na Teoria do Big Bang, com foco para Astronomia, Astrofísica e Cosmologia. O tema se torna potencialmente relevante não apenas pelas possíveis discussões sobre a física do modelo cosmológico, mas ainda do ponto de vista da comemoração do centenário da Teoria do Big Bang, que ocorreu em meados de 2022. Esse fator potencializa a escolha do tema de pesquisa a ser trabalhado na construção e implementação de uma sequência didática em forma de UEPS, pois permite a aproximação de uma discussão *de e sobre* ciência. Ademais, esta abordagem se estende para além da sala de aula, com foco para o protagonismo discente, ao oportunizar momentos para que os alunos possam construir um material de divulgação científica sobre o tema de estudo.

Os referenciais teórico e epistemológico escolhidos foram a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e a Epistemologia de Paul K. Feyerabend, que contribuem para a investigação da pesquisa e na construção de um produto educacional.

A revisão bibliográfica indica a necessidade de trabalhos que possam focar na construção de um material potencialmente significativo e, seguindo esta lógica, o desenvolvimento de um produto educacional sobre o tema. O ineditismo da proposta se mostra por meio da escassez de trabalhos voltados para o ensino e produção de materiais de divulgação científica para o ensino de Física que abordem a temática de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia dentro de um contexto histórico, tal qual o centenário da Teoria do Big Bang.

O produto educacional desenvolvido é constituído de um texto paradidático sobre a história do desenvolvimento da Cosmologia Moderna, com foco nas primeiras concepções

dos modelos cosmológicos, desde o modelo fechado de Einstein até os dias atuais, com as pesquisas mais recentes sobre o tema. O texto ainda procura apresentar os principais vencedores do prêmio Nobel relacionados às pesquisas sobre o Modelo Cosmológico Padrão. Além do texto paradidático, que pode ser utilizado pelos docentes e alunos, o produto dispõe de uma plataforma digital em formato de site, com todos os materiais das aulas do curso sobre o Centenário da Teoria do Big Bang, incluindo a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) em formato editável. No mesmo endereço on-line, encontram-se disponíveis os materiais de divulgação científica oriundos da orientação e da pesquisa aqui relatada.

Para análise dos resultados a pesquisa valeu-se de uma ferramenta de análise utilizada por pesquisas recentes do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), que possui como referencial teórico a Teoria Fundamentada de Strauss. Obtiveram-se indícios de aprendizagem significativa, respeitando os elementos e condições necessárias para isto: predisposição da vontade em aprender por conta do tema proposto, desenvolvimento de uma postura crítica e reflexiva com relação ao estudo dos conceitos físicos por meio de uma contextualização histórica da ciência, evolução conceitual dos conhecimentos discutidos nas aulas e durante a produção dos materiais de divulgação científica. Ademais, destaca-se ainda a divulgação de todo material produzido durante a pesquisa.

Nesse sentido, pode-se concluir que a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa esteve alinhada aos **objetivos específicos** propostos, que foram sendo cumpridos gradualmente. O primeiro objetivo específico foi alcançado por meio da leitura e estudo de artigos e livros sobre o desenvolvimento da física e da história dos modelos cosmológicos, ou seja, cumpriu-se a apropriação do tema; A partir deste momento, foi possível atingir o segundo objetivo específico, elaborando uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre o tema; Após o desenvolvimento da UEPS, foi possível completar o terceiro objetivo específico, que teve como pauta a construção de um material paradidático para o ensino de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia por meio da perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang. Este material foi desenvolvido visando seu uso em sala de aula, o que ocorreu durante a implementação do curso sobre o centenário da Teoria do Big Bang, alcançando o quarto objetivo específico proposto. O curso, que ocorreu em três etapas, nas dependências do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá, no período noturno, foi aberto para o público, com foco para os estudantes do ensino médio. O curso ainda contou com a presença de estudantes e professores de uma escola da rede estadual, do município de Turvo. Esta forma de conduzir o curso, pode fugir do escopo do ensino formal

tradicional e promove o alcance do ensino e divulgação de tópicos de Física para um grande público, sem deixar de cumprir o seu objetivo principal. Em contrapartida, o curso não deixa de se adequar aos pressupostos do ensino formal, pois o grande número de estudantes presentes fez com que as aulas ocorressem no auditório da escola e não propriamente na sala de aula.

O êxito em cumprir o quarto objetivo específico por meio do curso foi fundamental para alcançar o quinto objetivo específico, que consistia na orientação de alunos do ensino médio, bolsistas de iniciação científica, que participaram das aulas do curso, para a produção de materiais de divulgação científica sobre o tema. As orientações ocorreram ao longo de dez semanas, por meio de aulas em formas de reuniões síncronas e assíncronas e complementaram uma parte fundamental do ensino e aprendizado dos conteúdos por meio da produção de materiais pelos alunos. Após estas etapas, foi possível buscar indícios de aprendizagem significativa por meio do material produzido pelos alunos, por meio da avaliação deste material. Para tanto, houve a análise das respostas obtidas na avaliação somativa individual proposta para os estudantes e análise por meio das variáveis de investigação escolhidas, de acordo com o referencial teórico adotado, cumprindo, de forma complementar, dois objetivos específicos que foram atingidos em conjunto. Posteriormente, houve a publicação destes materiais nas mídias digitais, como o Instagram e o Youtube, o que conclui mais um objetivo específico. Para cumprir o último objetivo específico, houve a produção de textos, resumos e artigos sobre o tema. A produção destes textos em forma de artigos se deu ao longo da pesquisa e procuram tratar sobre a história da ciência em relação ao desenvolvimento dos modelos cosmológicos baseados na Teoria da Relatividade Geral (TRG) à luz da filosofia da ciência de Paul K. Feyerabend. Cabe destacar que alguns dos textos ainda se encontram em fase de finalização, pois dependem da conclusão desta pesquisa, enquanto alguns já foram publicados.

Sendo assim, conseqüentemente, o **objetivo geral** da pesquisa foi devidamente cumprido: um produto educacional foi desenvolvido para o ensino de Física sobre o tema de pesquisa, promovendo discussões *de* e *sobre* ciência, na perspectiva da história da Teoria do Big Bang. Dentro da análise dos resultados, identificaram-se motivações para o ensino de ciências, abordando questões de interesse dos estudantes para o ensino de Astronomia, de forma geral. Por sugestões dos alunos e da experiência do desenvolvimento do projeto, almeja-se que a pesquisa desta dissertação pode gerar ramificações para o ensino de Física dentro deste contexto, especialmente voltados para Cosmologia. Da revisão bibliográfica, atenta-se para o fato de que o ensino de Cosmologia não costuma ser valorizado dentro do

ensino de Ciências, o que não desperta o interesse dos estudantes e não apresenta quaisquer motivações para o estudo. Por experiência própria e em conversa com os alunos, o autor salienta a importância da motivação para o ensino de tópicos voltados para o ensino desses conceitos, negligenciados pelas aulas tradicionais de Física. Ainda nesse sentido, o autor almeja dar continuidade com este tema, desenvolvendo textos de divulgação científica que fujam de uma linguagem rebuscada e que possam ser acessíveis ao público.

Por fim, destaca-se a importância da linguagem a ser utilizada para o ensino destes tópicos de Cosmologia, que abordam Astronomia, Astrofísica e Cosmologia. Uma reflexão importante pode ser feita partindo do princípio de que os jovens alunos do ensino básico possuem um acervo enorme de conhecimento disponível com o acesso a plataformas de ensino digitais, vídeos, textos, publicações de redes sociais etc. No caso das redes sociais, ficou evidente no âmbito da pesquisa que a motivação dos alunos pareceu aumentar quando solicitados a produzirem material de divulgação sobre o tema para publicarem em plataformas desse gênero. Quando o alunado consegue relacionar as ferramentas que utiliza para interações sociais com o conhecimento a ser aprendido em sala de aula, parece existir uma identificação de saber e demonstração, no sentido de que almejam saber ainda mais sobre o tema, no caso, a física e a história da Teoria do Big Bang, para demonstrarem seus conhecimentos nas redes sociais, por meio de conversas, publicações de *posts* em forma de slides, vídeos e textos. Em um mundo tomado completamente pelo acesso a redes sociais, não se torna uma ideia absurda aproximar as ferramentas utilizadas para interações sociais para a divulgação do conhecimento científico, haja vista que os usuários dessa grande teia de comunicações, são, em grande parte, os próprios alunos e alunas do ensino básico. Logo, buscar aprimorar e trazer elementos de física contextualizados com a moderna filosofia da ciência, permitindo discussões *de* e *sobre* ciência, impulsionam a curiosidade dos jovens a participar mais ativamente não somente das aulas, como da divulgação do material *de* e *sobre* ciência.

Esta relação com o acesso ao ensino de ciências não só instiga a curiosidade por saber mais sobre tópicos e assuntos de Cosmologia Moderna, como de assuntos de Física geral, o que pode despertar o interesse desses jovens a se tornarem potenciais cientistas, no futuro. Dos alunos que participaram da pesquisa, pelo menos uma estudante alegou que pretende ser astrônoma e deseja seguir no caminho dos estudos sobre Física, comentando sobre o papel da pesquisa: “*o projeto me ajudou muito pois eu tinha muitas dúvidas sobre como um astrônomo publicava seus trabalhos e qual era realmente o significado físico de vários conceitos que antes eu só achava interessante, mas agora quero aprender ainda mais*”. Desta forma, além

dos materiais construídos na pesquisa, despertou-se o interesse de jovens cientistas em potencial que, ainda que não venham a se tornar cientistas, podem vir a contribuir para a alfabetização científica e futuros trabalhos sobre ciência.

REFERÊNCIAS

- ARTHURY, Luiz Henrique Martins; PEDUZZI, Luiz O.Q. A teoria do big bang e a natureza da ciência. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 20, p. 59-90, 2015.
- AUSUBEL, David P. Facilitating meaningful verbal learning in the classroom. **The Arithmetic Teacher**, v. 15, n. 2, p. 126-132, 1968.
- AUSUBEL, D.P.; NOVAK, J.D.; HANESIAN, H. **Psicologia Educacional**. Tradução de Eva Nick et al., 2. ed. Rio de Janeiro: Intramericana, 1980.
- BAGDONAS, Alexandre et al. Discussões sobre a natureza da ciência em um curso sobre a história da astronomia. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 9, p. 17-31, 2010.
- BAGDONAS, Alexandre; SILVA NETO, Climerio Paulo da. O papel epistêmico da diversidade e as origens metafísicas da teoria do Big Bang: reflexões para a educação científica. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 29, p. e23029, 2023.
- BERNARDES, Tamara de O.; IACHEL, Gustavo; SCALVI, Rosa Maria Fernandes. Metodologias para o ensino de Astronomia e Física através da construção de telescópios. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 1, p. 103-117, 2008.
- DAMASIO, Felipe; PEDUZZI, Luiz OQ. O pior inimigo da ciência: procurando esclarecer questões polêmicas da epistemologia de Paul Feyerabend na formação de professores. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 20, n. 1, p. 97-126, 2015.
- DAMASIO, Felipe et al. História da ciência na educação científica. 2017.
- DAMASIO, Felipe; PEDUZZI, Luiz OQ. Para que ensinar Ciência no século XXI?-Reflexões a partir da Filosofia de Feyerabend e do ensino subversivo para uma aprendizagem significativa crítica. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 20, p. e2951, 2018.
- DA ROSA, Cleci Werner; DA ROSA, A. B. Ensino de Física: objetivos e imposições no ensino médio. **Revista Eletrônica de Enseñanza de las ciencias**, v. 4, n. 1, 2005.
- DA SILVA, Wagner Moreira; ZANOTELLO, Marcelo. Discursos sobre Física Contemporânea no Ensino Médio a partir da leitura de textos de divulgação científica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, p. 45-74, 2017.

- DA SILVA, Pedro Paulo Santos. O ensino de astronomia nas escolas públicas brasileiras de Educação Básica. **Latin American Journal of Science Education**, v. 6, p. 22021, 2019.
- DA SILVA, Marcos Rodrigues; LANGHI, Rodolfo. Formação de professores para o ensino de astronomia: efeitos de sentido sobre a prática. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 209-224, 2021.
- DE MELLO FORATO, Thaís Cyrino; PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto Andrade. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.
- DIAS, Claudio André CM; SANTA RITA, Josué R. Inserção da astronomia como disciplina curricular do ensino médio. **Revista Latino-americana de educação em astronomia**, n. 6, p. 55-65, 2008.
- FEYERABEND, P Contra o método; tradução de Octanny S. da Mota e Leonidas Hegenberg. Rio de Janeiro, F. Alves, 1977.
- FEYERABEND, P. A ciência em uma sociedade livre. São Paulo: Editora Unesp. 2011.
- FRÓES, André Luís Delvas. Astronomia, astrofísica e cosmologia para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, p. 3504, 2014.
- GAMA, Leandro Daros; HENRIQUE, Alexandre Bagdonas. Astronomia na sala de aula: por quê? **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 9, p. 7-15, 2010.
- GLASER, Barney G.; STRAUSS, Anselm L.; STRUTZEL, Elizabeth. The discovery of grounded theory; strategies for qualitative research. **Nursing research**, v. 17, n. 4, p. 364, 1968.
- GOBARA, S. T.; CALUZI, J. J. O pensamento ausubeliano e ensino de ciências. In: O pensamento de David Ausubel e o ensino de ciências. Campo Grande, MS: Ed.: Oeste, 2016.
- GUTTMANN, Gustavo Antonio Montenegro; BRAGA, Marco. A origem do universo como tema para discutir a Natureza da Ciência no Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 442-460, 2015.
- HORVATH, Jorge Ernesto. Alguns conceitos no ensino da Cosmologia que quase sempre levam a confusão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

JUSTINIANO, Artur; BOTELHO, Rafael. Construção de uma carta celeste: Um recurso didático para o ensino de Astronomia nas aulas de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, 2016.

LAMBOURNE, Robert J. **Relativity, gravitation and cosmology**. Cambridge University Press, 2010.

LANGHI, Rodolfo; NARDI, Roberto. Formação de professores e seus saberes disciplinares em astronomia essencial nos anos iniciais do ensino fundamental. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, v. 12, p. 205-224, 2010.

LANGHI, Rodolfo; NARDI, Roberto. Justificativas para o ensino de Astronomia: o que dizem os pesquisadores brasileiros?. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 14, n. 3, p. 041-059, 2014.

LANGHI, Rodolfo. O caso de Cariclo: refletindo sobre o papel dos astrônomos na Educação em Astronomia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, 2017.

MASINI, Elcie F. Salzano; MOREIRA, Marco Antônio. **Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

MASINI, Elcie F. Salzano; MOREIRA, Marco Antônio. **Aprendizagem significativa: condições para ocorrência e lacunas que levam ao comprometimento**. São Paulo: Vetor, 2008.

MOREIRA, Marco Antonio. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006.

MOREIRA, Marco Antonio. Negociação de significados e aprendizagem significativa. **Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 1, n. 2, 2008.

MOREIRA, Marco A. Mapas conceituais e aprendizagem significativa. São Paulo. **Editora Centauro**, 2010.

MOREIRA, Marco Antonio. Mapas conceituais e aprendizagem significativa (concept maps and meaningful learning). **Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, digramas V e Unidades de ensino potencialmente significativas**, v. 41, p. 1-14, 2012.

MOREIRA, Marco Antonio. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. **Revista do professor de física**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2017.

- MOREIRA, Marco Antônio. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos avançados**, v. 32, p. 73-80, 2018.
- OLIVEIRA, Jorge Henrique Lopes de. **Noções de cosmologia no ensino médio: o paradigma criacionista do Big Bang e a inibição de teorias rivais**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.
- PEIXOTO, Denis Eduardo; KLEINKE, Maurício Urban. Expectativas de estudantes sobre a Astronomia no Ensino Médio. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 22, p. 21-34, 2016.
- PIRES, Marcelo Antonio; VEIT, Eliane Angela. Tecnologias de Informação e Comunicação para ampliar e motivar o aprendizado de Física no Ensino Médio. **Revista Brasileira de ensino de Física**, v. 28, p. 241-248, 2006.
- POSTMAN, Neil; WEINGARTNER, Charles. Meaning making. **Teaching as a subversive activity**, 1969.
- RYDEN, Barbara. **Introduction to cosmology**. Cambridge University Press, 2017.
- SCARINCI, Anne Louise; PACCA, Jesuína Lopes de Almeida. Um curso de astronomia e as pré-concepções dos alunos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, p. 89-99, 2006.
- SILVA, Henrique César. ALMEIDA, Maria José P. M. O deslocamento de aspectos do funcionamento do discurso pedagógico pela leitura de textos de divulgação científica em aulas de Física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**. vol. 4. n. 3. 2005.
- SLOVINSCKI, Luciano; ALVES-BRITO, Alan; MASSONI, Neusa Teresinha. A Astronomia em currículos da formação inicial de professores de Física: uma análise diagnóstica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, 2021.
- STRAUSS, Anselm; CORBIN, Juliet. Metodologia da Teoria Fundamentada. **Tradução: Frederico José Andries Lopes**, 1997.
- TERRA, Paulo S. O ensino de ciências e o professor anarquista epistemológico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n. 2, p. 208-218, 2002.
- TORRES, M. K. L.; DE OLIVEIRA, P. C.; NUNES, C. S.; NAKAYAMA, M. K. Análise da utilização da Grounded Theory (Teoria Fundamentada nos Dados) na produção científica brasileira entre 2008-2012. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, [S. l.], v. 11, n. 24, 2015.

APÊNDICE A

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 41

Guilherme Emerim Nunes

PRODUTO EDUCACIONAL

DE VOLTA AO PASSADO: O CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG NAS AULAS
DE FÍSICA

Araranguá

2024

Guilherme Emerim Nunes

DE VOLTA AO PASSADO: O CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG NAS AULAS
DE FÍSICA

Este produto educacional é parte integrante da dissertação: DE VOLTA AO PASSADO: O CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG NAS AULAS DE FÍSICA, desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 41 – UFSC, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Damasio

Araranguá

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Ao Programa de Bolsas do Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior – Fumdes, do Estado de Santa Catarina (UNIEDU) pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, pelo incentivo aos estudos e por todo o apoio e dedicação ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Damasio, pela dedicação e por toda atenção aos detalhes para que o trabalho pudesse ser realizado. Agradeço-lhe pela paciência para responder minhas inúmeras dúvidas ao longo do processo de desenvolvimento dessa pesquisa.

À Maria Paula, por se fazer presente mesmo estando distante, pela compreensão e apoio durante este período do mestrado.

Aos meus amigos, pelo apoio e incentivo e por todas as horas de conversa sobre problematização no ensino de Física. Agradeço especialmente ao Toni, amigo e colega de mestrado, por todo incentivo e por nossas longas horas de estudos de Física.

Aos colegas do Mestrado Profissional em Ensino de Física, que compartilharam bons momentos de estudo e por serem mais do que colegas, mas também meus alunos. Nossas aulas remotas de Mecânica Quântica e Termodinâmica oportunizaram momentos de aprendizagem como docente que levarei comigo.

APRESENTAÇÃO

Caro(a) Professor(a):

Este produto educacional, intitulado “*De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang nas aulas de Física*” foi desenvolvido para a conclusão do curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Catarina.

Esta é a versão impressa de um material instrucional que você, leitor(a), pode acessar no site: <https://sites.google.com/view/teoriadobigbangnasaulasdefisica/página-inicial>. Neste website você encontra uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para abordagem do Modelo Cosmológico Padrão (MCP), conhecido popularmente como Teoria do Big Bang, por meio de seu desenvolvimento histórico. Além disto, pode-se explorar materiais de divulgação científica sobre o tema, além de um texto paradidático *de e sobre* a perspectiva do centenário da Teoria do Big Bang. O produto é destinado, particularmente, a professores e professoras do ensino médio, embora possa ser acessível para o público, de forma geral.

O material foi desenvolvido por Guilherme Emerim Nunes, acadêmico do curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física – UFSC – Câmpus Araranguá, sob a orientação do Prof. Dr. Felipe Damasio, com o apoio do Programa de Bolsas do Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior – Fumdes, do Estado de Santa Catarina (UNIEDU).

A reprodução deste material é livre, desde que concedidos os direitos ao autor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Artigo de Albert Einstein intitulado Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral	16
Figura 02 -Willem De Sitter	18
Figura 03 – Artigo de Willem De Sitter	19
Figura 04 – Alexander Friedmann.....	20
Figura 05 – “Sobre a curvatura do espaço”	20
Figura 06 – “Sobre a possibilidade de um mundo com curvatura negativa constante do espaço”.....	22
Figura 07 – Partícula de massa m e raio r situada no exterior de uma esfera simétrica (Universo), que pode se expandir ou contrair conforme indicam as setas no interior da própria esfera	24
Figura 08 – Representação das geometrias espaciais para os modelos de Friedmann	27
Figura 09 - Evolução do fator de escala do Universo com o tempo cósmico	28
Figura 10 – Georges Lemaître	29
Figura 11 – Artigo de Lemaître publicado em 1931	30
Figura 12 – Edwin P. Hubble	33
Figura 13 – Henrieta S. Leavitt	33
Figura 14 – O artigo $\alpha\beta\gamma$	34
Figura 15 – Robert Herman, George Gamow e Ralph Alpher	35
Figura 16 - Comprimentos de onda do espectro eletromagnético	36
Figura 17 – Fred Hoyle e Georges Lemaître	181
Figura 18 – Arno Penzias e Robert Wilson na frente do radiotelescópio dos Laboratórios Bell	39
Figura 19 - Pyotr Leonidovich Kapitsa (à esquerda), Arno Penzias (ao meio) e Robert Wilson (à direita).....	40
Figura 20 - Subramanyan Chandrasekhar (à esquerda) e William A. Fowler (à direita), vencedores do Prêmio Nobel de Física de 1983.....	41
Figura 21 – Comparação das flutuações quânticas medidas pelo COBE e pelo WMAP.....	181
Figura 22 – Mapa de calor das flutuações de temperatura de aproximadamente 13,8 bilhões de anos.....	43
Figura 23 – John C. Mather e George F. Smooth.....	44

Figura 24 – G-299 Resquícios de uma Supernova tipo Ia.....	45
Figura 25 – Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam G. Riess	46
Figura 26 – Vencedores do Prêmio Nobel de Física de 2019	47
Figura 27 – Pequenas variações de temperatura na Radiação Cósmica de Fundo (RCFM)- Gráfico de pizza mostrando a composição do Universo – Curvas relacionadas a cada ponto na RCFM.....	48
Figura 28 – História do Universo desde o período da inflação	50
Figura 29 – Capa de apresentação	55
Figura 30 - Introdução aos tópicos	55
Figura 31 - Surge a Cosmologia Moderna	181
Figura 32 – Relatividade Geral e Cosmologia	181
Figura 33 -O artigo de Eintein de 1917	181
Figura 34 -O artigo de 1917	181
Figura 35 – O Universo de Einstein?	181
Figura 36 – Universo fininto e seus problemas matemáticos.....	181
Figura 37 – Modelos matemáticos dos tipos de Universo.....	181
Figura 38 – Espaços não-euclidianos de curvatura constante.....	181
Figura 39 – Problema previsto pela Teoria da Relatividade Geral.....	181
Figura 40 - A solução de Einstein	181
Figura 41 – A constante cosmológica.....	181
Figura 42 – Procurando entender a equação de Einstein.....	181
Figura 43 - Um erro de Einstein?	60
Figura 44 – Descrição de Einstein do seu artigo de 1917 sobre o seu modelo de Universo finito	181
Figura 45 – Modelo de Universo de Willem De Sitter.....	60
Figura 46 – Universo com ausência de matéria.....	61
Figura 47 – Efeito De Sitter.....	61
Figura 48 – O trabalho de Friedmann de 1922: “Sobre a curvatua do espaço”	61
Figura 49 – Os três modelos de Friedmann para o Universo	62
Figura 50 – A dinâmica do Universo de acordo com Friedmann.....	62
Figura 51 – Procurando entender o modelo de Friedmann e suas três variações.....	62
Figura 52 - Universo mutável, que evolui em escala cósmica	63
Figura 53 - Rivalidade entre os modelos de Universo?.....	63
Figura 54 – Lemaître e o átomo primordial.....	63

Figura 55 – A teoria de Lemaître.....	64
Figura 56 – A física dos raios cósmicos e a teoria de Lemaître	64
Figura 57 – O decaimento radioativo do átomo primordial de Lemaître	64
Figura 58 – O modelo de Universo de Lemaître e a Astronomia Observacional.....	65
Figura 59 – A expansão do Universo segundo o modelo de Lemaître.....	65
Figura 60 – Dois modelos de Universo	65
Figura 61 – Einstein e Lemaître	66
Figura 62 - Prevalece o modelo de Universo fechado de Einstein.....	66
Figura 63 – Um universo repleto de galáxias	66
Figura 64 – Galáxias com bilhões de estrelas.....	67
Figura 65 - Afastamento das galáxias - Estudo de blueshift e redshift	67
Figura 66 – Maioria das galáxias sofrem redshift	67
Figura 67 – O trabalho de Hubble de 1929	181
Figura 68 – Um Universo em expansão	181
Figura 69 – O modelo do Big Bang quente	68
Figura 70 – O artigo “Alfa, Beta, Gama”	69
Figura 71 – Gamow e a sopa de partículas.....	69
Figura 72 – Robert Hermann, George Gamow e Ralph Alpher	69
Figura 73 – Modelo do Big Bang quente e fusão nuclear	70
Figura 74 – Momentos iniciais do Universo	70
Figura 75 – Formação dos elementos químicos	181
Figura 76 - Recombinação.....	71
Figura 77 – Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas	71
Figura 78 – Faixa do espectro eletromagnético.....	71
Figura 79 – Esquema ilustrativo da expansão do Universo.....	72
Figura 80 – Contribuições e falhas do modelo do Big Bang quente	72
Figura 81 – Teoria do Universo Estacionário.....	181
Figura 82 – Fred Hoyle x Big Bang	181
Figura 83 – Big Bang x Estado Estacionário.....	73
Figura 84 – Arno Penzias e Robert Wilson e a detecção da Radiação Cósmica de Fundo.....	73
Figura 85 – Medidas da RCFM nos Laboratórios Bell	74
Figura 86 – A RCFM como evidência para o modelo do Big Bang	74
Figura 87 – Evidência do modelo do Big Bang quente.....	74
Figura 88 – Prêmio Nobel de 1979.....	75

Figura 89 – Dick e Peebles à esquerda e Penzias e Wilson à direita.....	75
Figura 90 – O satélite COBE e a RCFM	75
Figura 91 – Variações na RCFM.....	76
Figura 92 – Variações de temperatura indicam estágios do início do Universo	76
Figura 93 – Flutuações de temperatura na RCFM.....	76
Figura 94 – Expansão acelerada do Universo	77
Figura 95 - Supernovas Ia e a expansão acelerada	181
Figura 96 - Referências.....	181
Figura 97 - Referências.....	181
Figura 98 – Capa de apresentação – Orientação de produção de vídeos sobre o tema	181
Figura 99 – Um Universo em expansão – Breve revisão	181
Figura 100 – Efeito Doppler.....	79
Figura 101 – Estudando o efeito Doppler.....	79
Figura 102 – Revisão de conteúdo – Blueshift e Redshift	79
Figura 103 – Estudo de Redshift e Blueshift por meio do afastamento das galáxias.....	80
Figura 104 – Comportamento das galáxias e o modelo do Big Bang	80
Figura 105 – O modelo do Big Bang quente	80
Figura 106 – Estágios iniciais do Universo	81
Figura 107 - Recombinação.....	81
Figura 108 – Alpher, Hermann e a conclusão sobre a RCFM.....	81
Figura 109 – Uma jornada premiada	82
Figura 110 – O prêmio Nobel de Física de 1978.....	82
Figura 111 – O marco no respaldo teórico da teoria do Big Bang	82
Figura 112 – Prêmio Nobel de Física de 1983: William A. Fowler e as reações nucleares no interior das estrelas na formação dos elementos químicos.....	83
Figura 113 – Nucleossíntese primordial e o prêmio Nobel de Física de 1983	83
Figura 114 – Prêmio Nobel de Física de 2006	181
Figura 115 – Mapa de calor da RCFM.....	84
Figura 116 – Prêmio Nobel de Física de 2011	84
Figura 117 – Supernovas do tipo Ia e a expansão acelerada	84
Figura 118 - Supernovas.....	85
Figura 119 – Expansão acelerada	85
Figura 120 – Composição do Universo	181
Figura 121 – Prêmio Nobel de Física de 2019	86

Figura 122 – James Peebles e suas contribuições para a Cosmologia.....	86
Figura 123 – História do Universo	87
Figura 124 – Do Big Bang aos dias atuais	87

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1	9
1	UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA - UEPS.....	9
	PROPOSTA DE UEPS PARA O ENSINO DE ASTRONOMIA, ASTROFÍSICA E FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA POR MEIO DO CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG	9
	CAPÍTULO 2	13
2.1	TEXTO PARADIDÁTICO	13
	CAPÍTULO 3	55
3	APRESENTAÇÃO DE SLIDES – MATERIAL DIDÁTICO.....	55
3.1	SLIDES PARA A ABORDAGEM DO CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG	55
	CAPÍTULO 4	88
4	ORIENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAL DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA (DC).....	88
	CAPÍTULO 5	90
5	AVALIAÇÃO SOMATIVA INDIVIDUAL.....	90
3.1	QUESTÕES PROPOSTAS NA AVALIAÇÃO SOMATIVA INDIVIDUAL.....	90
	CAPÍTULO 6	93
6	AVALIAÇÃO DA UEPS.....	93
	CAPÍTULO 7	94
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	96

CAPÍTULO 1

1 UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA - UEPS

A sequência didática da proposta para o ensino de Astronomia, Astrofísica e Física Moderna e Contemporânea por meio da perspectiva centenária da Teoria do Big Bang foi composta por uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), que será apresentada neste capítulo.

2 PROPOSTA DE UEPS PARA O ENSINO ASTRONOMIA, ASTROFÍSICA E FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA POR MEIO DO CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG

Objetivo: Problematizar questões de Física por meio da perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang, para um ensino *de e sobre* ciência.

1. Situação Inicial: Apresentar o tema de estudo aos alunos e levantar questões sobre seus conhecimentos prévios. As respostas dos alunos serão anotadas em uma tabela, para que possam ser sistematizadas. As perguntas para a situação inicial podem ser as seguintes: i) Em quais conceitos de Física, relacionados à Astronomia e Astrofísica, vocês pensam quando falamos sobre teoria do Big Bang? ii) De onde surgiu a teoria do Big Bang? iii) Qual é a base científica para levarmos essa teoria em consideração? iv) Quem propôs essa teoria?
v) Por que essa jornada a respeito da teoria do Big Bang é tão premiada com Nobels? vi) Quem foram os ganhadores do Prêmio Nobel e o que eles estudaram sobre o Big Bang?

2. Situações-problema: Perguntar aos alunos sobre seus conhecimentos acerca de temas de Física. Uma estratégia interessante é fazer os seguintes questionamentos com base nas respostas que foram dadas anteriormente: i) O que é a relatividade geral? ii) Como a luz viaja? iii) Como os cientistas do século XX chegaram na hipótese do Big Bang? iv) Será que essa foi a única hipótese encontrada por eles? v) Quem foram esses cientistas? vi) Por que esse nome: “Big Bang”?

Todas as respostas devem ser levadas em consideração, e serão discutidas em grande grupo com a mediação do professor, sem o intuito de chegar a respostas certas.

3. Revisão: Nessa aula, haverá a explicação de conceitos físicos que podem servir de introdução para o ensino acerca do desenvolvimento histórico da teoria do Big Bang. Conceitos como Gravidade e Relatividade Geral, comportamento ondulatório da luz, podem ser explicados de forma mais simples, com exemplos e convites ao pensamento, levando em consideração as perguntas realizadas nas aulas anteriores. As aulas contam com o suporte de material didático desenvolvido (textos, imagens, vídeos, gifs, slides, artigos e livros). O apoio do material didático e a retomada dos conceitos por meio das perguntas iniciais ajuda na construção da organização sequencial, conforme orienta a TAS.

Após esse momento pedir para que os alunos construam, em grupos ou de maneira individual, um **slide em forma de post para rede social** para os conceitos vistos em sala. Os alunos podem usar a criatividade utilizando textos ou até mesmo desenhos representativos sobre os temas estudados. Ao final da aula todos os slides serão entregues ao professor para que haja revisão.

4. Nova situação problema, em nível mais alto de complexidade: Os conteúdos serão novamente explicados e os alunos serão solicitados a responder perguntas conceituais sobre o tema de estudo. As perguntas serão distribuídas aleatoriamente entre o grupo de alunos e cada aluno deverá tentar responder a pergunta do colega, tendo o professor como mediador. Todas as perguntas serão lidas com o grande grupo e cada aluno dirá sua resposta. As perguntas utilizadas podem ser as seguintes: O universo está diminuindo ou expandindo? Como a luz do início do Universo pode estar chegando até nós? Qual foi o modelo de universo proposto por Einstein? Quais foram as soluções encontradas e propostas por Friedmann?

Essa interação servirá para que temas mais complexos sejam apresentados, como os conceitos presentes na teoria do Big Bang quente, como Fusão e Fissão Nuclear, Nucleossíntese e Recombinação, idade do Universo, propagação e velocidade da luz, efeitos gravitacionais, *blueshift e redshift*, evolução do universo, formação de estrelas, galáxias e aglomerados de galáxias e formação de elementos mais pesados que o hélio.

Essas questões ajudam não somente a levantar temas do ponto de vista físico, mas também aborda a perspectiva histórica da teoria e seu desenvolvimento, mostrando aos alunos as personagens envolvidas e o embate de algumas teorias.

Os alunos serão solicitados a elaborar um material sobre os conteúdos, de acordo com o conceito físico envolvido e a importância da compreensão do tema para a história da ciência sobre a perspectiva da teoria do Big Bang.

5. Nova situação problema, em nível mais alto de complexidade: Os conteúdos serão novamente explicados e os alunos serão solicitados a responder perguntas conceituais sobre o tema de estudo. As perguntas serão distribuídas aleatoriamente entre o grupo de alunos e cada aluno deverá tentar responder a pergunta do colega, tendo o professor como mediador. Todas as perguntas serão lidas com o grande grupo e cada aluno dirá sua resposta. As perguntas utilizadas podem ser as seguintes: O universo está diminuindo ou expandindo? Como a luz do início do Universo pode estar chegando até nós? Qual foi o modelo de universo proposto por Einstein? Quais foram as soluções encontradas e propostas por Friedmann?

Essa interação servirá para que temas mais complexos sejam apresentados, como os conceitos presentes na teoria do Big Bang quente, como Fusão e Fissão Nuclear, Nucleossíntese e Recombinação, idade do Universo, propagação e velocidade da luz, efeitos gravitacionais, *blueshift e redshift*, evolução do universo, formação de estrelas, galáxias e aglomerados de galáxias e formação de elementos mais pesados que o hélio.

Essas questões ajudam não somente a levantar temas do ponto de vista físico, mas também aborda a perspectiva histórica da teoria e seu desenvolvimento, mostrando aos alunos as personagens envolvidas e o embate de algumas teorias.

6. Avaliação somativa individual: Nessa aula ocorrerá uma atividade com os alunos, avisada anteriormente, e consiste em propor questões problemas para os alunos, a fim de captar algum indício de aprendizagem significativa. Serão feitas algumas perguntas mais abertas em um grande círculo, com todos os alunos, para que eles expressem suas ideias e entendimento dos conteúdos discutidos.

7. Aula expositiva dialogada integradora final: retomar todo o conteúdo da UEPS, revisar os slides feitos pelos alunos e o cartaz com as perguntas mais relevantes sobre o tema na concepção deles. Logo depois explicar a importância de entender a História da Ciência e como o conhecimento científico é produzido, fazendo relações com o objeto de estudo da UEPS. Todas as perguntas propostas durante a UEPS serão respondidas junto com os alunos.

8. Avaliação da Aprendizagem: A avaliação da aprendizagem irá se basear pela qualidade dos trabalhos produzidos pelos alunos ao longo de toda a UEPS, nas observações feitas durante as aulas e na avaliação somativa individual. É válido ressaltar que o material de divulgação científica construído pelos alunos deve ser avaliado de maneira contínua, indicando melhorias ao longo da implementação das aulas e posteriormente, caso seja necessário, desde que um dos objetivos seja este, publicar os materiais produzidos.

9. Avaliação da UEPS: Os alunos serão solicitados a responderem um questionário sobre as estratégias de ensino utilizadas ao longo da UEPS.

Total de aulas: 7 a 10.

CAPÍTULO 2

Neste capítulo será apresentado o texto que pode auxiliar o(a) docente durante as aulas e implementação deste Produto Educacional. Destaca-se que este texto se encontra disponível no site <https://sites.google.com/view/teoriadobigbangnasaulasdefisica/página-inicial>. Embora alguns trechos apresentem equações diferenciais e integrais em seus capítulos, trata-se apenas de exemplos de descrições matemáticas de alguns modelos cosmológicos formulados ao longo dos anos e descritos de maneira sucinta. Ainda que a matemática que abrange o Modelo Cosmológico Padrão seja de difícil compreensão, optou-se por uma sintetização dos termos e explicação teórica das equações e suas interpretações. Desta forma, o texto apresenta as características históricas do desenvolvimento da Cosmologia Moderna com relação ao modelo do Big Bang. Ressalta-se ainda, que o texto pode servir de subsídio teórico para o(a)s docentes, bem como pode ser utilizado em sala de aula, de acordo com a metodologia escolhida, para que os alunos e alunas possam vir a construir materiais de Divulgação Científica sobre o tema.

3.2.1 TEXTO PARADIDÁTICO

De volta ao passado: o centenário da Teoria do Big Bang

Introdução

A história da Cosmologia no século XX é multifacetária em diversos aspectos e destaca-se por teorias que despertaram o avanço do conhecimento nas pesquisas acerca do tema. Em menos de um século e com a base teórica da relatividade geral, o campo de pesquisa sobre a origem do Universo mostrou um avanço significativo. No presente artigo, que visa contextualizar a história centenária da Teoria do Big Bang, relatando desde o surgimento da cosmologia relativística de Einstein aos mais recentes premiados com o Nobel acerca do tema, as seções foram nomeadas com o termo “*De volta ao passado*” e procuram contar um pouco do trabalho de cada personagem envolvida. A teoria do Big Bang completou seu centenário em junho de 2022. A forma como entendemos o Universo e o modelo padrão que possibilita investigações sobre o surgimento do Cosmos e que foi adotado pela maioria da comunidade científica ainda está pautada no modelo do Big Bang ou estrondão.

A Cosmologia Moderna teve seus primeiros passos com o modelo proposto por Einstein em 1917, ao tentar aplicar a Teoria da Relatividade Geral (TRG) para explicar o

Cosmos. Na época, seu modelo cosmológico de um universo finito, estático e isotrópico ganhou força junto à comunidade científica. Em junho de 1922, o matemático russo Alexander Friedmann apresentou o resultado das equações da relatividade geral com uma interpretação matemática, destacando três possíveis modelos cosmológicos. Os resultados propostos por Friedmann não convenceram a comunidade científica da época, tampouco Einstein. Contudo, a evolução histórica da Cosmologia está atrelada aos modelos teóricos de Friedmann e sua base estrutural, como vamos relatar neste trabalho. Apesar de surgir alguns anos depois, a notável e popular teoria que veio a ser denominada “teoria do Big Bang”, se fundamenta nas hipóteses de Friedmann, que previu até mesmo a expansão do Universo. Devido aos seus trabalhos, Friedmann é considerado, ao lado de Georges Lemaître, Ralph Alpher e George Gamow, um dos criadores da Teoria do Big Bang.

Uma teoria marcada por previsões, erros, discordâncias e aspectos observacionais que se destacaram e ainda servem de base para muitas questões dentro da Cosmologia. No cenário atual, apesar dos resultados encontrados e que servem de respaldo para a teoria do Big Bang não se mostrarem precisamente consistentes, ainda assim agregaram à pesquisa sobre a origem do Universo corroborando previsões de uma maneira que nenhuma outra teoria sobre o surgimento do Universo havia conseguido prever antes. O episódio que serve de exemplo mais notável disto ocorreu em 1964, na detecção da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM) por Arno Penzias e Robert Wilson, dos Laboratórios Bell. Entretanto, a descoberta da RCFM não propicia somente a Teoria do Big Bang, pois também pode ser explicada por modelos alternativos concorrentes.

Atualmente, as pesquisas mais recentes lidam com o Modelo Cosmológico Padrão (MCP), também conhecido como λ CDM (*Cold Dark Matter*), ou seja, “Matéria Escura Fria” numa tradução livre. Zimdahl (2021) esclarece os principais problemas com este modelo, que não possui nenhum argumento para explicar *o que é* a matéria escura e *o que é* a energia escura. Estes problemas em aberto colocam em dúvida até mesmo a Teoria da Relatividade Geral (TRG) e se existe outro meio de abordagem teórica como solução. Isto ocorre pelo fato do modelo padrão se apoiar nas bases da teoria de Einstein.

Ainda há um longo caminho para ser percorrido quando se trata de um entendimento profundo acerca da evolução do Cosmos. Entretanto, por vezes é necessário revisitar a história do surgimento do conhecimento disponível e, nesta breve visita ao passado, dialogar com as razões pelas quais comemora-se o centenário da Teoria do Big Bang e a sua importância frente à pesquisa para desvendar a evolução do Universo.

De volta ao passado: surge a Cosmologia Relativista

Para entender de onde surgiu o atual modelo cosmológico padrão (MCP) torna-se ideal analisar e contar a história de seu desenvolvimento, com foco nos personagens envolvidos e nas inúmeras contribuições para o avanço da ciência. Bertolami e Gomes (2018) destacam que a Cosmologia Moderna pode ser entendida como uma decorrência da Teoria da Relatividade Geral. Arthur e Peduzzi (2015) evidenciam aspectos sobre a teoria de Einstein e suas preferências para um modelo do Universo, que eram confrontadas pelos próprios resultados de sua teoria.

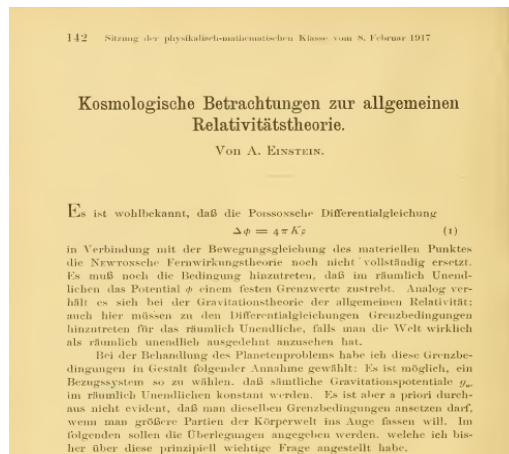
Para Einstein, em seu modelo cosmológico, proposto em 1917, no trabalho intitulado *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*¹ (Figura 1), o universo poderia ser essencialmente estático, homogêneo e isotrópico. Isso significa que o universo possui características iguais em todos os pontos e com as mesmas propriedades físicas em qualquer direção. Conforme coloca Amado (2022, p. 141) “a suposição de homogeneidade em grande escala, associada com a suposição de isotropia em grande escala, implica, portanto, que as propriedades do Universo são as mesmas para todos os observadores, e é chamado de Princípio Cosmológico”. Einstein descreve o problema da falta de uniformidade na distribuição da matéria e propõe o seguinte argumento:

Mas se estivermos preocupados apenas com a estrutura em larga escala, podemos representar a matéria como sendo uniformemente distribuída em espaços muito grandes, de modo que sua densidade de distribuição seja uma função variável que varia de forma extremamente lenta (EINSTEIN, A. 1917, págs.148, 149, tradução nossa).

Os modelos cosmológicos relativistas, ou seja, aqueles modelos que respeitam as características pressupostas pela TRG tomam como base o princípio cosmológico

¹ Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral (tradução nossa).

Figura 1- Artigo de Albert Einstein intitulado Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral



Fonte: Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie, de Albert Einstein. Preus. Akad. Wiss. 142 (1917).

Os resultados depois da aplicação da relatividade geral indicaram um universo instável, que previsivelmente ia acabar se autodestruindo devido à força de atração. Para Singh (2004), Einstein optou por insistir e procurar uma maneira de explicar um universo eterno e estático, em conformidade com o consenso científico da época. Einstein imaginou um Universo no qual não havia interação entre as partes, conforme coloca Novello (2021, p. 180): “Aceitou então que a fonte principal da geometria do espaço-tempo global deveria ser um fluido perfeito caracterizado somente por sua densidade de energia constante. Ou seja, não haveria pressão nesse fluido cósmico.” Sendo assim, seu modelo continuaria instável e logo não permitia a formação de estruturas mais complexas presentes no próprio Universo.

Desta forma, o problema relacionado à gravidade na teoria, que apontava para um universo autodestrutivo, foi resolvido por Einstein de uma maneira engenhosa. Soares (2012) argumenta que o modelo estático de Einstein possui uma curvatura espacial positiva do tipo fechada, resultando em um modelo de Universo finito. Para contrabalançar a atração da gravidade e evitar o colapso cataclísmico, Einstein inseriu em suas equações de campo originais, uma constante cosmológica, representada pela letra grega Λ (lê-se lâmbda), como pode-se perceber pela equação (1):

$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}T) \quad (1)$$

A constante κ também pode aparecer apresentando seu valor igual a $\frac{8\pi G}{c^4}$. Conforme descreve em seu artigo original

Esta equação de campo, com λ suficientemente pequeno, em todo caso, também é compatível com os fatos experimentais derivados do sistema solar (EINSTEIN, A. 1917. p. 151, tradução nossa).

As equações de campo buscam descrever, por meio da formalidade tensorial, a métrica de um espaço-tempo curvilíneo, bem como fatores associados à massa e energia. Fagundes (2002) lembra que o valor da constante foi ajustado a fim de modelar um Universo que não sofresse implicações com contrações ou expansões.

Assim, a nova constante universal λ define a densidade média de distribuição ρ que pode permanecer em equilíbrio e também o raio R e o volume $2\pi^2 R^3$ do espaço esférico (EINSTEIN, A. 1917. p. 152, tradução nossa).

Em outras palavras, Einstein articulou suas equações de campo de tal maneira que permitiu que a constante cosmológica adicionada executasse o papel que ele queria em seu modelo do cosmos. De acordo com Soares (2013) a constante pode apresentar diferentes valores, sendo positiva, negativa ou nula. Singh (2004) destaca que o “truque” de Einstein para manter um modelo de Universo estático agradou muitos cosmólogos, pois estava em concordância com as previsões e conhecimentos daquele período. Apesar da instabilidade apresentada em seu modelo, Einstein defendeu seus argumentos para um Universo estático e finito por algum tempo. Não obstante, para a época, essa era a única visão do cosmos baseada na relatividade geral e, portanto, parecia válida, pelo menos para o seu próprio autor:

De qualquer forma, essa visão é logicamente consistente e está mais próxima do ponto de vista da teoria da relatividade geral; se, do ponto de vista do conhecimento astronômico atual, é sustentável, não será discutido aqui (EINSTEIN, A. 1917, p.152, tradução nossa).

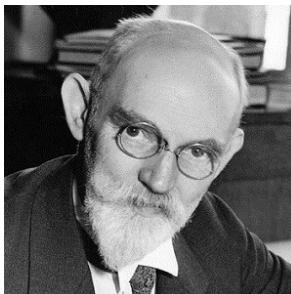
Esse modelo deu início ao que chamamos de cosmologia relativista, embora não tenha sido o único e isolado numa tentativa de explicar o cosmos. Alguns anos mais tarde, Einstein deixaria claro seu arrependimento pela inserção da constante cosmológica em suas equações, principalmente depois da descoberta da lei dos desvios para o vermelho para galáxias distantes. Ainda assim, apesar da rejeição sofrida pelo seu próprio autor, a constante cosmológica λ ainda desempenha um importante papel nas pesquisas sobre Cosmologia Moderna. O modelo proposto por Einstein pode ser considerado algo revolucionário, pois deu margens para o início de um novo campo de pesquisa, que viria a se tornar cada vez mais importante para o entendimento do cosmos.

Outras soluções para as equações de campo da relatividade geral, que também apresentavam uma descrição para o modelo do universo, foram propostas pelo astrônomo holandês Willem de Sitter (1872-1934) (Figura 2), com a publicação de três trabalhos sobre o tema, em 1917 (Figura 3). Kragh (2003) argumenta que o modelo proposto por De Sitter contém semelhanças com o universo de Einstein, apesar de não conter matéria. Sob tais condições, teríamos um universo essencialmente “vazio”, mas que respeitava as condições homogêneas e isotrópicas. O’Raifeartaigh (2022) explicita a solução proposta por De Sitter, para as equações da relatividade geral para um universo sem matéria. A métrica encontrada por De Sitter pode ser escrita conforme a equação (2)

$$ds^2 = -dr^2 - R^2 \operatorname{sen}^2\left(\frac{r}{R}\right) (d\Psi^2 + \operatorname{sen}^2\Psi d\phi^2) + \operatorname{cos}^2\left(\frac{r}{R}\right) c^2 dt^2 \quad (2)$$

A hipótese de De Sitter para um universo sem matéria, apesar de não concordar com o modelo sugerido por Einstein, acabou indicando condições de interesse para a cosmologia, como o “efeito de Sitter”, que pode ser entendido conforme explica Waga (2000, p. 158): “De Sitter sugere que a velocidade de afastamento de objetos (partículas teste) aleatoriamente espalhados aumentaria com a distância”. Até meados de 1922, a cosmologia estava pautada na rivalidade entre estes dois modelos de universo.

Figura 2 – Willem De Sitter



Fonte: <https://www.arciatea.it/6-maggio-1872-willem-de-sitter/>.

Figura 3 - Artigo de Willem De Sitter

Dec. 1916. *Einstein's Theory of Gravitation.* 155

On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences. By W. de Sitter, Assoc. R.A.S. Second Paper.*

Contents of Second Paper.

20. Field of a moving bodies; the differential equations.
21. First method of integration.
22. Second method of integration: comparison of the two methods.
23. Problem of n bodies: equations of motion. Planetary theories.
24. Lunar theory: equations of motion.
25. Further development, perturbing forces.
26. Motion of lunar perigee and node: comparison with observations.
27. Field of moving sun and motion of infinitesimal planet in it, compared with field of sun at rest.
28. Gravitational field of the system of the fixed stars. Effect on spectral lines. Upper limit for total mass of stars.
29. Irreality of co-ordinates. Relativity of rotation.
30. On the origin of inertia. Hypothesis of distant masses. Conclusion.

20. We will now derive the gravitational field of n bodies, which have arbitrarily given motions relatively to the system of co-ordinate axes. We will suppose the bodies to be rigid spheres.

Fonte: De Sitter, W. Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 77, p.155-184.

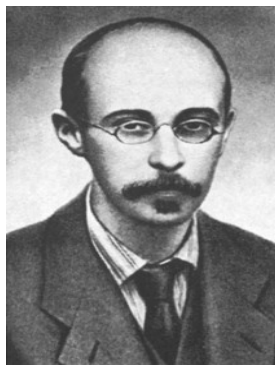
De volta ao passado: os universos de Friedmann

Em junho de 1922, Alexander Alexandrovich Friedmann (1888-1925) (Figura 4) publica seu trabalho acerca de soluções variáveis para as equações da relatividade geral, intitulado “Sobre a curvatura do espaço” (Figura 5) na *Zeitschrift fur Physik*.² O matemático russo utilizou resultados geométricos para superfícies curvas, resolvendo as equações de campo da relatividade geral e encontrando soluções que sugerem modelos para os quais o

² Revista de Física (tradução nossa)

Universo poderia estar se expandindo, contraindo ou até mesmo permanecendo estático, este último estado tal qual fora proposto nos modelos anteriores. O trabalho de Friedmann não obteve o reconhecimento imediato da comunidade científica, por ser considerado um trabalho de caráter matemático. Apesar de não apresentar e correlacionar uma explicação física aos resultados encontrados, sua contribuição para a Cosmologia Moderna é inegável e encerra em si mesma as críticas apresentadas ao seu trabalho à época em que foi desenvolvido.

Figura 4- Alexander Friedmann (1888-1925)



Fonte: Domínio Público.

Figura 5- “Sobre a curvatura do espaço”

Über die Krümmung des Raumes.

Von A. Friedman in Petersburg.

Mit einer Abbildung. (Eingegangen am 29. Juni 1922.)

§ 1. 1. In ihren bekannten Arbeiten über allgemeine kosmologische Fragen kommen Einstein¹⁾ und de Sitter²⁾ zu zwei möglichen Typen des Weltalls; Einstein erhält die sogenannte Zylinderwelt, in der der Raum³⁾ konstante, von der Zeit unabhängige Krümmung besitzt, wobei der Krümmungsradius verbunden ist mit der Gesamtmasse der im Raume vorhandenen Materie; de Sitter erhält eine Kugelwelt, in welcher nicht nur der Raum, sondern auch die Welt in gewissem Sinne als Welt konstanter Krümmung angesprochen werden kann⁴⁾. Dabei werden wie von Einstein so auch von de Sitter gewisse Voraussetzungen über den Materietensor gemacht, die der Inkohärenz der Materie und ihrer relativen Ruhe entsprechen, d. h. die Geschwindigkeit der Materie wird als genügend klein vorausgesetzt im Vergleich zu der Grundgeschwindigkeit⁵⁾ — der Lichtgeschwindigkeit.

Fonte: Friedmann, A. 1922. Über die Krümmung des Raumes. Zeit. Physik. 10: 377-386.

Friedmann encontra o resultado obtido por Einstein para um universo cilíndrico, definindo a densidade de matéria e a quantidade da constante cosmológica por meio dos

potenciais gravitacionais da relatividade geral. Conforme a equação (3), Friedmann encontra as relações de Einstein, definindo M como a massa constante do universo:

$$\lambda = \frac{c^2}{R} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{2}{kR^2} \quad (4)$$

$$M = \frac{4\pi^2}{k} R \quad (5)$$

Friedmann encontra as relações de De Sitter para modelos isotrópicos com curvatura espacial constante:

$$\lambda = \frac{3c^2}{R} \quad (6)$$

$$\rho = 0 \quad (7)$$

$$M = 0 \quad (8)$$

Esses valores corroboram o argumento de De Sitter para um universo desprovido de matéria e, conseqüentemente, sem densidade de matéria, na qual a curvatura espacial constante k é dada por $k = R^{-2}$. Após encontrar estas relações, Friedmann sugere: “Nós temos então o seguinte resultado: o universo estacionário será o universo cilíndrico de Einstein ou o universo esférico de De Sitter” (FRIEDMANN, 1922, p. 3). Contudo, o matemático russo foi além e encontrou resultados que poderiam descrever modelos cosmológicos estáticos e em expansão. Para Friedmann, a dinâmica do Universo estava associada a um impulso dado por uma expansão inicial, que poderia lutar contra a força da gravidade. No mesmo trabalho, ele propôs soluções para as equações de campo que descrevem modelos isotrópicos e homogêneos. O modelo proposto por Friedmann pode ser interpretado por meio da equação (5), que mede a taxa de expansão do universo por meio de um fator de escala. A equação obtida por Friedmann, em termos modernos, é dada por

$$H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{\kappa c^2}{a^2} + \frac{\lambda c^2}{3} \quad (9)$$

na qual H é a constante de Hubble, a é o fator de escala em função do tempo, G é a constante de gravitação universal, c é a velocidade da luz, k é um fator de dimensão de curvatura do universo e ρ representa a densidade de matéria e energia do universo (Fabris e Velten, 2012). Na verdade, de acordo com Dussault e Faraoni (2020) a constante k pode representar um universo fechado, um universo plano ou até mesmo um universo hiperbólico, a depender do valor assumido.

A equação de Friedmann é escrita em termos do chamado “fator de escala”, o qual descreve as mudanças de distâncias em cosmologia. Por exemplo, se o fator de escala dobra a distância entre duas galáxias quaisquer também dobra. Num universo em expansão o fator de escala está sempre aumentando (VIGLIONI, A.; SOARES, D. 2011, p.1).

Dois anos depois, em 1924, ele tem outro trabalho publicado na mesma revista: “Sobre a possibilidade de um mundo com curvatura negativa constante do espaço” (Figura 6), com considerações essencialmente matemáticas sobre a curvatura negativa de um dos seus modelos.

Figura 6 - “Sobre a possibilidade de um mundo com curvatura negativa constante do espaço”

326

**Über die Möglichkeit einer Welt
mit konstanter negativer Krümmung des Raumes.**

Von A. Friedmann in Petersburg.

(Eingegangen am 7. Januar 1924.)

§ 1. 1. In unserer Notiz „Über die Krümmung des Raumes“¹⁾ haben wir diejenigen Lösungen der Einsteinschen Weltgleichungen betrachtet, welche zu Welttypen führen, denen eine konstante positive Krümmung als gemeinsames Merkmal angehört; dabei haben wir alle möglichen Fälle erörtert. Die Möglichkeit, aus den Weltgleichungen eine Welt konstanter positiver räumlicher Krümmung abzuleiten, steht aber mit der Frage nach der Endlichkeit des Raumes im Zusammenhange. Aus diesem Grunde dürfte es von Interesse sein zu untersuchen, ob man aus denselben Weltgleichungen eine Welt konstanter negativer Krümmung erhalten kann, von deren Endlichkeit (auch unter einigen ergänzenden Annahmen) wohl kaum die Rede sein kann.

Fonte: Friedmann, A. 1924. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes. Zeit. Physik. 21: 326-332.

O seu trabalho se torna ainda mais relevante quando comparado às pesquisas que surgiram posteriormente. “Na verdade, em 1922, vários anos antes da descoberta de Edwin Hubble, Friedmann previu exatamente o que Hubble descobriu!” (HAWKING, S. 1996, p. 72). Os modelos cosmológicos propostos por Einstein e De Sitter eram estáticos, enquanto o modelo sugerido por Friedmann apresentava uma evolução em escala cósmica. Waga (2005) enfatiza a importância da valorização e do reconhecimento que o trabalho de Friedmann merece por suas contribuições essenciais para a Cosmologia Moderna. A importância dos trabalhos de Friedmann extrapola as contribuições para o estudo da Cosmologia Moderna, pois refuta argumentos de personalidades de destaque da Física do século XX, principalmente em relação a Einstein.

Acima de tudo, Alexander Friedmann provou que, ao contrário das afirmações anteriores de Einstein, existem soluções cosmológicas das equações da teoria da relatividade geral sem o termo cosmológico e todas elas descrevem universos não estáticos que se expandem ou se contraem com o tempo (MOSTEPANENKO, V. M. 2022, p. 19).

Os modelos que apresentam a característica de Universo dinâmico em uma escala evolutiva, sem a presença da constante cosmológica, são conhecidos como “Universos de Friedmann”. Apesar de sua importância para a história e desenvolvimento da Cosmologia Moderna, Friedmann não ganha o mesmo destaque de outros personagens fatídicos, como Hubble, Einstein e Gamow. Waga (2022, p. 9) destaca o legado de Friedmann:

O universo descrito pelo modelo de Friedmann, além de expansionista, é espacialmente homogêneo, isotrópico em relação a qualquer ponto e, em alguns casos, possui uma origem no passado em que a densidade da matéria diverge. Esse modelo tornou-se a base do modelo padrão da cosmologia.

Infelizmente, Friedmann não pôde desfrutar do sucesso para qual apontavam seus resultados para um modelo de Universo que se encontrava em expansão, pois veio a falecer ainda jovem por conta de uma febre tifoide.

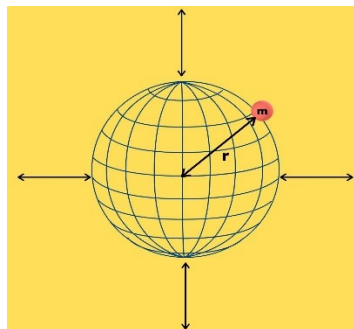
De volta ao passado: as equações de Friedmann

Conhecida como a equação básica da cosmologia, a solução da equação de Friedmann mostra como o Universo evolui em larga escala, vide equação (5). Podemos derivar esta equação partindo do teorema de Birkhoff's, o qual nos diz que a força de gravidade em um sistema esféricamente simétrico é determinada apenas pela massa no interior do raio e que a densidade de energia gravitacional pode ser dada pela equação (6) abaixo:

$$\rho_m + \frac{u}{c^2} \quad (10)$$

sendo ρ_m a densidade da matéria e $\frac{u}{c^2}$ a densidade de energia de radiação e partículas relativísticas, dada por [ergs cm^{-3}]. Começando com uma partícula teste numa superfície esférica de raio R que pode se expandir ou contrair (Figura 7).

Figura 7- Partícula de massa m e com raio r situada na superfície de uma esfera simétrica (Universo) que pode se expandir ou contrair conforme indicam as setas no exterior da própria esfera



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

a segunda derivada da equação de movimento, ou seja, a aceleração, é dada pela equação (11)

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi}{3}G\rho R \quad (11)$$

Como a densidade é proporcional ao inverso de R^{-3} , definindo $R_0 = 1$, temos

$$\rho = \rho_0 R^{-3} \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) na equação (11), obtemos a seguinte equação de movimento

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G\rho_0}{3R^2} \quad (13)$$

Para este resultado, como a densidade é diferente de zero, o Universo não pode ser estático, sendo assim deve estar se expandindo ou contraindo. Multiplicando os dois lados da equação por \dot{R} , como mostra a equação (14), obtemos

$$\dot{R}\ddot{R} + \frac{4\pi G\rho_0}{3R^2}\dot{R} = 0 \quad (14)$$

Como a derivada $\frac{d(R^2)}{dt}$ em relação ao tempo é dada por

$$\frac{d(R^2)}{dt} = 2\dot{R}\ddot{R} \quad (15)$$

Então podemos escrever a seguinte equação

$$\frac{1}{2}\frac{d(R^2)}{dt} + \frac{4\pi G\rho_0}{3R^2}\frac{1}{2}\frac{dR}{dt} = 0 \quad (16)$$

Como o resultado para $\frac{1}{R^2}\frac{dR}{dt}$ é dado por

$$\frac{1}{R^2}\frac{dR}{dt} = -d\left(\frac{1}{R}\right)/dt \quad (17)$$

Dessa forma, ao aplicar e reescrever a equação, o termo entre colchetes vira uma constante, conforme mostram as equações (18) e (19) abaixo

$$\frac{d}{dt}\left[\dot{R}^2 - \frac{8\pi G\rho_0}{3R}\right] = 0 \quad (18)$$

$$\dot{R}^2 - \frac{8\pi G \rho_0}{3R} = K \quad (19)$$

Dividindo toda a equação (19) por R^2 e reassumindo que $\rho_0 = \rho$, obtemos a equação de Friedmann (20) abaixo

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8\pi}{3} G \rho_0 = -\frac{K}{R^2} \quad (20)$$

Esta equação permite descrever modelos para um Universo homogêneo e isotrópico. Friedmann conseguiu formular três modelos cosmológicos distintos: se $K = 0$ então R permanece positivo e o Universo tem uma densidade média entre a taxa de expansão e a força de gravidade. Isto significa que o Universo não entra em colapso e continua se expandindo lentamente, apesar de cessar sua expansão em algum momento; por outro lado, o modelo com $K > 0$ e $R > 0$ resulta em um Universo do tipo fechado. Este modelo de Universo seria muito denso, se expandindo continuamente até um ponto crítico no qual começaria a entrar em colapso; E, por último, um modelo para $K < 0$ resulta em um Universo que se expande continuamente, com $R > 0$. Este último modelo é chamado de Universo aberto. A figura (8) ilustra parcialmente as possíveis geometrias espaciais que representam os modelos de Friedmann e que podem ser descritas e interpretadas por meio das equações (21) e (22) a seguir

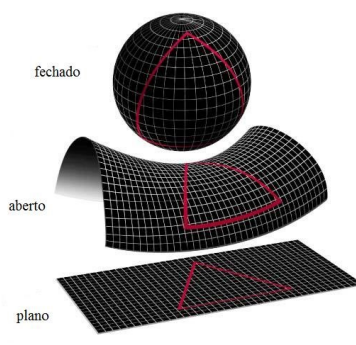
$$3\dot{H}^2 + \frac{k}{a^2} = 8\pi G \rho \quad (21)$$

$$3\dot{H}^2 + 2\dot{H} + \frac{k}{a^2} = -8\pi G \rho \quad (22)$$

A métrica utilizada para descrever um espaço com características homogêneas e isotrópicas pode ser descrita pela métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW), conforme mostra a equação (23) abaixo

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right] \quad (23)$$

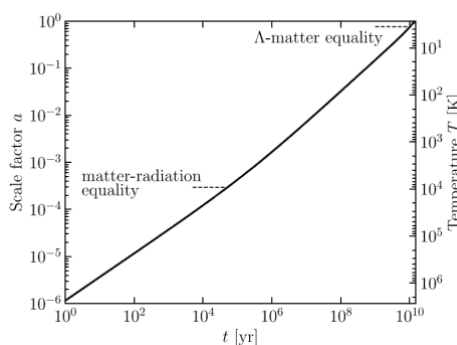
Figura 8 - Representação das geometrias espaciais para os modelos de Friedmann



Fonte: Domínio Público.

Isso implica que para modelos com essa estrutura simétrica não existe nenhuma posição privilegiada no Universo para todo e qualquer observador e a topologia da métrica FRW é determinada pela constante K . Como já vimos nesta seção, o fator de escala $a(t)$ é responsável por ser um parâmetro de medida para estes modelos espaciais. A Figura 9 mostra a evolução do fator de escala do universo com o tempo cósmico.

Figura 9- Evolução do fator de escala do Universo com o tempo cósmico



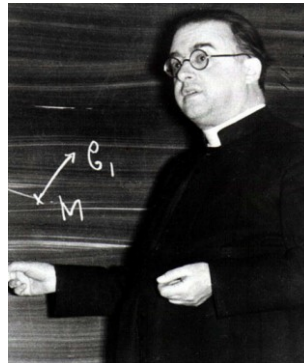
Fonte: Modern Cosmology - Dodelson, S.; Schmidt, F. 2021.

De volta ao passado: o átomo primordial

O modelo proposto pelo padre belga Georges-Henri Joseph Édouard Lemaître (Figura 10) (1894-1966) em meados de 1927, publicado na revista *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, trouxe à tona novamente a possibilidade de um universo em expansão, respeitando as equações de campo da relatividade geral. Curiosamente, Lemaître alegou não

conhecer os trabalhos de Friedmann quando publicou sua teoria para um Universo em expansão, embora seus trabalhos tenham sofrido o mesmo processo de rejeição pela comunidade científica. A prerrogativa para isto pode ser explicada pelo fato de que Lemaître publicara seu artigo em uma revista belga, que não tinha o mesmo alcance de outros periódicos da época e por acreditar que a ciência e a religião, embora diferentes, tinham caminhos complementares para alcançar uma verdade sobre o universo. Outro fator decisivo para a falta de reconhecimento de seu trabalho foi o idioma no qual fora publicado. O francês não era o principal idioma utilizado nos meios de pesquisa sobre Astronomia no século XX. Ainda assim, na conferência de Solvay, em 1927, Lemaître apresentou suas ideias ao renomado Einstein, que, por sua vez, elogiou sua matemática, mas disse que sua Física era abominável. Particularmente por razões filosóficas, assim como expõe Lambert (2012) o fato de que seu modelo não fosse admitido por Einstein como aceitável era devido à falta de concordância com o modelo estático.

Figura 10 - Georges Lemaître (1894-1966)



Fonte: <https://www.britannica.com/biography/Georges-Lemaitre>.

Em 1931, seu mentor da época em que obteve o P.h.d em Cambridge, o astrônomo inglês Sir Arthur Eddington reconheceu o trabalho de Lemaître e sua teoria cosmológica e fez com que o artigo de seu ex-aluno fosse publicado no *Monthly Notice of Royal Astronomical Society* (MNRAS), conforme mostra a Figura 11, intitulado “Um Universo Homogêneo de Massa Constante e Raio Crescente explicando a Velocidade Radial de Nebulosas Extragalácticas” numa tradução livre. Neste artigo, Lemaître explicita as relações matemáticas usadas para explicar os *redshifts* cosmológicos e prever a expansão do Universo. Lemaître apresentou uma solução para as equações da TRG, não necessariamente levando em conta a constante cosmológica para seu resultado de um cosmos em expansão.

Seus resultados descreviam uma densidade que varia no tempo, enquanto o raio do Universo aumentava. “Lemaître apontou que seu modelo de universo estava se expandindo e a velocidade de recessão deveria ser entendida como um efeito Doppler aparente devido à variação do raio do universo (KRAGH, H.; SMITH, R. 2003, p. 9)”. A explicação sobre o desvio espectral das galáxias para o vermelho, quando relacionada à sua teoria de expansão, evidencia a importância do seu trabalho. De acordo com Luminet (2015, p. 5):

A grande novidade foi que Lemaître forneceu a primeira interpretação de redshifts cosmológicos em termos da expansão do espaço, ao invés de um movimento real das galáxias: o espaço estava em constante expansão e, conseqüentemente, aumentou as aparentes separações entre as galáxias. Esta ideia provou ser uma das descobertas mais significativas do século.

Figura 11- Artigo de Lemaître publicado em 1931

Mar. 1931. *Homogeneous Universe of Constant Mass.* 483

A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae. By Abbé G. Lemaître.

(Translated by permission from “*Annales de la Société scientifique de Bruxelles*,” Tome XLVII, série A, première partie.)

1. *Introduction.*

According to the theory of relativity, a homogeneous universe may exist such that all positions in space are completely equivalent; there is no centre of gravity. The radius of space R is constant; space is elliptic, *i.e.* of uniform positive curvature $1/R^2$; straight lines starting from a point come back to their origin after having travelled a path of length πR ; the volume of space has a finite value $\pi^2 R^3$; straight lines are closed lines going through the whole space without encountering any boundary.

Fonte: G. Lemaître; A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, 483 (1931).

Stoeger (2012) chama a atenção para o fato de que a métrica que descreve um modelo padrão isotrópico e homogêneo, conforme visto na seção anterior, passou a ser denominada como métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW). Conforme coloca Mitton (2020, p. 10), Lemaître encontrou valores muito próximos aos valores de Hubble para medir a taxa de expansão do Universo em quilômetros por segundo. Por conta de suas contribuições, a lei de Hubble, que mede a taxa de expansão do Universo e a velocidade com a qual as

galáxias estão se afastando umas das outras, teve seu nome alterado devido as contribuições de excelência de Lemaître e sua interpretação dos desvios para o vermelho, para lei de Hubble-Lemaître pela União Astronômica Internacional em 2018.

No seu breve artigo intitulado “*The beggining of the World from the Point of View of Quantum Theory*” publicado em 1931 na revista Nature, Lemaître faz algumas colocações a respeito do início do Universo e a natureza das condições físicas com relação a pressupostos da mecânica quântica, expondo o que seria a hipótese do átomo primordial. Segundo o próprio Lemaître

Os princípios da Termodinâmica do ponto de vista da teoria quântica podem ser enunciados da seguinte forma: (1) a Energia total é constante e distribuída em quantas discretos. (2) O número de quantas distintos está sempre aumentando. Se voltarmos no tempo, encontraremos cada vez menos quantas, até encontrarmos toda a energia do universo concentrada em um pouco ou até mesmo em um único quantum (LEMAÎTRE, G. NATURE. Mar. 21, p. 447, tradução nossa).

Partindo do pressuposto de que no início o Universo era essencialmente frio e considerando que toda a matéria estivesse contida em um único átomo, denominado “átomo primordial”, o Universo então deveria ter ocorrido numa espécie de grande fissão nuclear. Este átomo teria se fragmentado em diversas partes, numa sucessão de subdivisões entre as partículas, até a formação dos demais átomos existentes. Este seria um dos estágios do processo de evolução do Universo, advindo de um estado inicial extremamente condensado e quente. Ainda no mesmo artigo Lemaître expõe o seguinte argumento:

Claramente que o quanta inicial não poderia ocultar em si todo o curso da evolução; mas, de acordo com o princípio da indeterminação isto não é necessário. Nosso mundo agora é compreendido como um mundo no qual algumas coisas realmente acontecem; toda a história do mundo não precisa ser escrita no primeiro quantum como uma música no disco de um fonógrafo. Toda a matéria do mundo deve ter estado no início, mas a história que ela tem para contar pode ser escrita passo a passo (LEMAÎTRE, G. NATURE. Mar. 21, p. 447, tradução nossa).

Contudo, apesar da hipótese do átomo primordial ser conhecida atualmente como a precursora do que conhecemos como Big Bang, este modelo não deve ser associado a uma explosão inicial da qual nasceu o Universo. A teoria do Big Bang se trata de uma teoria de

evolução cosmológica e não se configura como uma teoria de surgimento. Para Lemaître, o Universo poderia ser eterno, ou seja, ter existido desde sempre e para sempre, propondo um modelo no qual o Universo estava em expansão e não associado a uma explosão propriamente dita. Esses equívocos de interpretação acabam por propagar uma visão errônea do processo histórico da ciência e assim criar uma visão mística à sua imagem de padre, associando seu trabalho à uma cosmogonia. Em comparação com os parâmetros observacionais e os conhecimentos recentes da Física, a ideia do átomo primordial não se sustenta, embora o conceito de singularidade tenha obtido êxito em fomentar discussões que extrapolam o contexto da física e possam ser discutidos no âmbito da filosofia. Heller (2012) esclarece como Lemaître incorporou à singularidade como um “suporte geométrico” em sua teoria cosmológica e argumenta sobre o sentido atribuído a palavra “átomo” utilizada para a hipótese do átomo primordial. É praticamente um consenso entre a comunidade científica que apesar do universo estar se expandindo, não deve ter existido um início numa singularidade, pois isto confronta o limite de tempo na escala de Planck, conforme explica Lambert (2012).

De acordo com Mitton (2020, p. 11), o padre belga mostrou que o universo poderia apresentar as características propostas por Einstein, mas que chegaria num ponto de instabilidade, no qual começou a crescer e expandir de forma indefinida. Dessa forma, o trabalho do clérigo e físico teórico belga não somente se mostraria correto, como também resgata a essência dos resultados encontrados por Friedmann. Singh (2004, p. 154) afirma que “Lemaître foi o primeiro cientista a fornecer uma descrição detalhada e razoavelmente segura do que agora chamamos de modelo do Big Bang para o universo.”

De volta ao passado: um universo em expansão

Em 1917, Vesto Slipher (1875 – 1969) apresenta o crescente desvio espectral de galáxias para o vermelho, indicando o afastamento destas galáxias. Mas foi somente em meados da década de 1930 que a teoria sobre a possível expansão do universo foi aceita. Edwin Powell Hubble (1889-1953) (Figura 12), em trabalho publicado em 1929, intitulado “Uma relação entre a distância e a velocidade radial entre nebulosas extragalácticas” argumenta sobre as distâncias das nebulosas e seu desvio espectral para o vermelho. A fama de Hubble já era consolidada antes mesmo de mostrar a relação direta entre a distância das galáxias e sua velocidade, pois em 1923 ele havia identificado uma estrela variável cefeida em uma nebulosa que, na verdade, não fazia parte da via láctea, pois se tratava de outra galáxia, a galáxia de Andrômeda, situada a aproximadamente dois milhões de anos-luz.

Para tanto, Hubble se apoiou nos resultados da pesquisa desenvolvida por Henrieta Leavitt, do Harvard College Observatory, (Figura 13) para medir a distância até as estrelas situadas em uma nebulosa. Leavitt encontrou uma relação entre o período e a luminosidade das variáveis cefeidas, que são estrelas classificadas como supergigantes e que se encontram numa determinada fase, na qual alternam sua luminosidade, pulsando por um período estável de forma regular. “Essa relação foi de grande relevância para o meio astronômico, porque foi a partir daí que se pôde começar a medir a distância de estrelas fora de nossa galáxia” (CONCEIÇÃO DE BARROS, M. 2018. p.19).

Figura 12- Edwin P. Hubble



Fonte: Encyclopedia Britannica

Figura 13- Henrietta S. Leavitt



Fonte: sciencephoto.com

Hubble mede o desvio do deslocamento para o vermelho nas linhas espectrais das galáxias e encontra uma relação entre a velocidade de afastamento das galáxias e sua distância, concluindo que, quanto maior a distância da galáxia, maior a velocidade com a qual ela se afasta. Assim, sendo v a velocidade de afastamento da galáxia, d a sua distância e H a

constante de Hubble, pode-se escrever a equação (24), conhecida como lei de Hubble, hoje chamada de lei de Hubble-Lemaître:

$$v = H \cdot d \quad (24)$$

Para medir o deslocamento para o vermelho nas linhas espectrais, utiliza-se o efeito Doppler relativístico, dado por (25):

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sqrt{\frac{(1+\frac{v}{c})}{(1-\frac{v}{c})}} - 1 \quad (25)$$

Enquanto a velocidade pode ser obtida utilizando a equação (26)

$$\frac{v}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} \quad (26)$$

Sendo assim, como as galáxias estavam se afastando da via láctea, isto significa que em algum momento no passado, elas estariam mais próximas e, assim sucessivamente. Conforme voltamos nosso olhar para um instante de tempo no passado, as galáxias estariam cada vez mais perto umas das outras, como se formassem parte de algo único. Os resultados da pesquisa de Hubble pareciam apontar para uma evidência a favor de um universo em expansão, assim como apontavam os trabalhos de Friedmann e Lemaître.

De volta ao passado: modelo do Big Bang quente (*Hot Big Bang*)

As observações de um modelo sobre o universo mais consistente do ponto de vista físico foram propostas por George Gamow e Ralph Alpher. Waga (2005, p. 163) argumenta que esse modelo foi a base do modelo padrão da cosmologia. No artigo escrito em 1948, representado abaixo pela Figura 15, publicado na revista *Physical Review*, com a colaboração de Hans Bethe, apresentaram um modelo no qual o Universo primordial fora completamente composto de radiação. Além disso, investigaram a nucleossíntese do processo inicial do universo, que consiste no estudo da composição e formação de elementos químicos.

Figura 14 - O artigo $\alpha\beta\gamma$

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*
Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland

AND

H. BETHIE
Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW
The George Washington University, Washington, D. C.
February 16, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_0 dt$ during the building-up period is equal to 5×10^6 g. sec./cm³.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \propto 10^9/t^3$. Since the integral of this expression diverges as $t \rightarrow 0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^9/t^3) dt \approx 5 \times 10^6, \quad (2)$$

which gives us $t_0 \approx 20$ sec. and $\rho_0 \approx 2.5 \times 10^4$ g. sec./cm³. This result may have two meanings: (a) for the higher densities existing prior to that time the temperature of the neutron

Fonte: “The origin of the chemical elements”, Physical Review, 73 (1948), 803–804.

Conforme coloca Hawking (1996, p. 151) “nesse trabalho, eles fizeram a notável previsão de que a radiação (na forma de fótons) dos estágios primitivos muito quentes do universo deveria existir até hoje, mas com sua temperatura reduzida para apenas alguns graus acima do zero absoluto (- 273°C).” Alpher e Gamow também contaram com a participação do jovem físico Robert Hermann, que colaborou com os cálculos para a previsão teórica da radiação cósmica de fundo em micro-ondas (RCFM). A Figura 16 mostra os principais pesquisadores envolvidos no modelo da teoria, que inicialmente ficou conhecida como modelo do Big Bang quente ou *hot Big Bang*.

Figura 15 - Robert Herman, George Gamow e Ralph Alpher



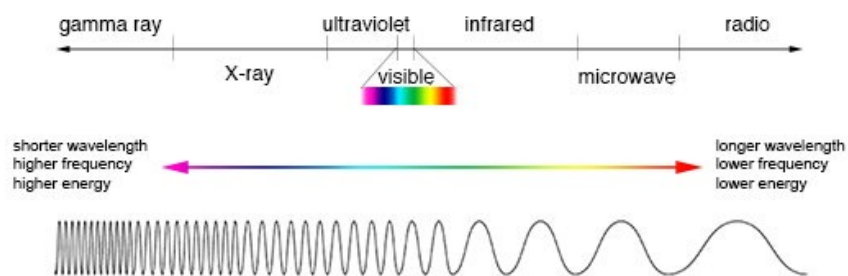
Fonte: American Institute of Physics.

De acordo com Kragh (2017, p. 16), Gamow e seus colaboradores estimaram que no estágio inicial do Universo, predominava a radiação de alta energia. Segundo Singh (2004) Alpher estimou cálculos para a formação de hélio durante os primeiros minutos após o Big Bang e que estavam de acordo com a astronomia observacional. Em meio a um mar de plasma e caos das partículas, a luz imperava em um período do universo recém-nascido. Como a luz

interage com partículas carregadas, como os elétrons, as interações sucessivas faziam com que a luz fosse espalhada das partículas para o plasma, resultando num nevoeiro cósmico. Após o processo batizado de recombinação (Rosenfeld, R. 2005), momento em que essa neblina foi dispersa e o universo ficou transparente, houve então a formação dos elementos neutros mais estáveis. De acordo com Zimdahl (2021, p. 109) “a temperatura na época era por volta de 3000 Kelvins (K). Ela diminuiu até hoje pelo fator 1000, o valor atual mais preciso é $T_0 = 2,75\text{K}$ ” (o índice zero indica o valor atual). Naquele momento, “a luz, que não interage com partículas neutras em um gás”, conforme argumenta Singh (2004, p. 310) conseguiu escapar e percorrer o espaço em expansão.

Contudo, o modelo do Big Bang quente se mostrava falho ao tentar descrever o processo de formação de átomos mais pesados que o hélio. Rosenfeld (2005) explica que a nucleossíntese dos elementos mais pesados ocorre dentro de estrelas, por meio de um processo de reação nuclear, dada às condições de temperaturas extremas em seus interiores. Ainda assim, Gamow, Alpher e Herman conseguiram estimar uma quantidade significativa e precisa de hélio presente no Universo. Alpher e Hermann concluíram que a luz proveniente desse processo inicial ainda poderia estar presente no universo, com um comprimento de onda de aproximadamente um milímetro e, portanto, estando situada na região de micro-ondas do espectro eletromagnético, como mostra a Figura 17. As micro-ondas apresentam comprimento de onda na faixa entre 1 mm e 30 cm.

Figura 796 - Comprimentos de onda do espectro eletromagnético.



Fonte: NASA's Imagine the Universe.

No entanto, a radiação cósmica de fundo (RCFM) não foi descoberta no mesmo período. A Cosmologia, quando analisada à luz da história da ciência, concorda com aspectos conceituais que podem ser comparados com a arqueologia e, por conta disto, torna-se válido observar que o trabalho de pesquisadores como Gamow, Alpher e Herman também pode ser

considerado uma espécie de arqueologia cósmica. Os resultados que levariam a imagem do modelo do Big Bang adiante seriam descobertos somente na década de 1960.

De volta ao passado: teoria do universo estacionário (*Steady State*)

A falta de evidências observacionais e de uma explicação para a formação de elementos mais pesados trouxe à tona outras teorias, que contestaram o modelo de um universo com as características do modelo do Big Bang quente, como a que foi proposta por Herman Bondi, Fred Hoyle e Thomas Gold, em 1948, intitulada teoria do estado estacionário (*steady state theory*). Hoyle e seus colaboradores alegavam que deveria haver uma produção de matéria para contrabalançar a expansão do universo.

Não obstante, o principal modelo de pesquisa apresentado que poderia enfrentar o modelo do Big Bang quente, foi abandonado logo após a descoberta da radiação cósmica de fundo na década de 1960. Inúmeros trabalhos de pesquisa acerca da história da cosmologia destacam este fato (ARTHURY, 2010; SINGH, 2004; WEINBERG, 2008. KRAGH 1996;) além de apontar para o abandono de outras teorias alternativas.

O debate histórico entre as duas teorias não será discutido neste trabalho, mas elucidada a importância de hipóteses a serem desenvolvidas e da produção de conhecimento para o avanço da ciência. Nesse sentido, a pesquisa em Cosmologia fornece material não somente sobre quase todos os ramos da Física envolvidos nos processos de formação do Universo e sua evolução, mas também sobre História e Filosofia da Ciência. Por que aceitar a teoria do Big Bang? O que esta teoria prevê e acerta em termos observacionais em detrimento das outras? Essas e outras perguntas remetem não somente a uma explicação pertinente do ponto de vista da Física, como despertam questões de interesse filosófico, pois se trata de um problema de evolução. De onde veio? Como surgiu? Quais foram os principais fatores para que o Universo viesse a acontecer? Seria o Universo um acontecimento ou sempre existiu? Essas reflexões podem ser elucidadas e analisadas de uma forma mais detalhada em outro artigo.

Um episódio histórico que remete a um grau de ironia na história desta teoria centenária está relacionado ao seu nome ou como é conhecida, não somente no meio acadêmico, mas de forma popular. O termo Big Bang foi cunhado pelo então líder da teoria do estado estacionário, Fred Hoyle (1915-2001) durante uma entrevista ao programa de rádio da BBC em 28 de março de 1949 (MITTON, S. A. 2020. p. 16) (HOLDER, D. R. 2012. p. 40). Embora a expressão Big Bang tenha se popularizado, é válido ressaltar, conforme apontam Lambert e Reisse (2008) que Lemaître nunca utilizou este termo. Como precursor da

teoria do estado estacionário, Hoyle não concordava com as suposições de Lemaître sobre um estágio inicial do universo de alta densidade, ou com a suposta radiação fóssil, por meio da desintegração de elementos primordiais. A Figura 18 mostra o encontro de Hoyle e Lemaître ainda na década de 1950.

Figura 17 - Fred Hoyle e Georges Lemaître



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Fred-Hoyle-father-of-the-Steady-State-theory-talks-with-Georges-Lemaitre-father-of-the_fig5_343047313 [acesso em 3 Jun, 2023].

Lemaître tinha como base a física dos raios cósmicos e então propôs, em concordância com sua própria teoria do átomo primordial, a radiação fóssil, que não deve ser confundida com a radiação cósmica de fundo em micro-ondas (RCFM) prevista por Gamow, Alpher e Herman.

De volta ao passado: um futuro em expansão numa jornada premiada com alguns prêmios Nobel

Ao longo dos anos, as pesquisas em Astronomia relacionadas aos princípios físicos que explicam a possibilidade de um cenário favorável à Teoria do Big Bang, foram contempladas com alguns prêmios Nobel. Ao todo, foram cinco prêmios concedidos, levando em consideração pesquisas que contribuem com o modelo do Big Bang, sejam de natureza experimental ou conceitual.

Nesta seção serão apresentados os vencedores do Prêmio Nobel de Física. As subseções do texto explicam a história e os conceitos de Física relacionados às pesquisas que levaram alguns dos personagens desta jornada ao êxito.

Prêmio Nobel de Física de 1978: um acidente benéfico, a radiação cósmica de fundo

Com o objetivo de estudar as fontes de rádio, Arno Allan Penzias e Robert Woodrow Wilson (Figura 19) trabalhavam em conjunto nas dependências da Bell Telephone

Laboratories, em 1964, quando constataram, acidentalmente, a Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM). Penzias e Wilson captavam ruídos em seus sinais medidos pelo radiotelescópio, sem saber, naquele momento, que estavam diante de uma das evidências que seria um marco no respaldo teórico da teoria do Big Bang. No início, Penzias e Wilson pensaram que o ruído observado na antena do radiotelescópio fosse consequência de um material dielétrico branco, conhecido como excremento de pombos. A solução encontrada pelos radioastrônomos foi capturar boa parte destes animais e levá-los para uma outra região. No entanto, ao voltar a atenção para suas pesquisas novamente, notaram que o ruído continuava e, desta vez, não havia como culpar os pássaros. De acordo com o radiotelescópio, a radiação vinha de toda parte, não importava a direção. “O eco do Big Bang se transformara em ondas de rádio e estava sendo detectado como ruído pelo radiotelescópio de Penzias e Wilson” (SINGH, 2004, p. 399).

Figura 18 - Arno Penzias e Robert Wilson na frente do radiotelescópio dos Laboratórios Bell



Fonte: Nokia Bell Labs

Na mesma época, Robert Dicke e James Peeble, da universidade de Princeton, haviam realizado pesquisas sobre o modelo proposto pela teoria do Big Bang e chegaram à mesma conclusão prevista por Alpher, Gamow e Hermann na década de 1940. Após alguns telefonemas e visitas ao laboratório Bell, a equipe de Princeton confirmou os dados sobre a RCFM e por volta de 1965 Penzias e Wilson publicaram um artigo com suas considerações acerca da descoberta no *Astrophysical Journal*. A descoberta da RCFM foi fundamental para a hipótese do modelo de estado estacionário ser descartado pela maioria da comunidade científica. Terminava a disputa entre os dois modelos cosmológicos mais consistentes do ponto de vista físico e da astronomia observacional.

Segundo Hu e White (2004, p. 44): “a descoberta estabeleceu firmemente a teoria do Big Bang, na qual o estado inicial do universo era um plasma quente e denso, com partículas

carregadas e fótons”. Villela et al. (2009) apontam aspectos essenciais associados ao estudo da radiação cósmica, como as medidas das variações de intensidade, que permitem observar condições sobre a estrutura do Universo. A notável medição da RCFM por Penzias e Wilson coloca os trabalhos de Gamow, Alpher e Herman em posição de destaque no cenário das pesquisas em Cosmologia, reafirmando suas previsões sobre a luz em forma de micro-ondas que se espalhou pelo Universo. O prêmio Nobel de 1978 foi dividido entre Pyotr Leonidovich Kapitsa (1894-1984), pelas suas invenções básicas e descobertas na área de física das baixas temperaturas e os responsáveis pelo radiotelescópio da Bell Telephone Laboratories, Penzias e Wilson, pela observação da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas. A Figura 20 mostra os vencedores do prêmio Nobel de 1978.

Figura 19 - Pyotr Leonidovich Kapitsa (à esquerda), Arno Penzias (ao meio) e Robert Wilson (à direita)



Fonte: Photos from the Nobel Foundation Archive.

Prêmio Nobel de Física de 1983: William A. Fowler e as reações nucleares no interior das estrelas na formação dos elementos químicos

O Prêmio Nobel de Física de 1983 foi dividido entre os astrofísicos Subramanyan Chandrasekhar, da Universidade de Chicago e William Alfred Fowler, do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Figura 21). Chandrasekhar recebeu o prêmio por seus estudos teóricos sobre processos físicos importantes para a estrutura e evolução das estrelas. Fowler descreveu como as reações termonucleares nos interiores das estrelas podem gerar elementos químicos. A pesquisa sobre a nucleossíntese primordial é de grande relevância para a Teoria do Big Bang, pois estuda e analisa a formação dos primeiros elementos químicos gerados no

Universo. Fowler (1984) explica que os dois primeiros elementos e seus isótopos estáveis, hidrogênio e hélio, surgiram no Big Bang.

Figura 800 - Subramanyan Chandrasekhar (à esquerda) e William A. Fowler (à direita), vencedores do Prêmio Nobel de Física de 1983



Fonte: Nobel Prize

De acordo com Salpeter (1983), uma das principais contribuições de Fowler e seus colaboradores de pesquisa acerca da nucleossíntese foi organizar por meio de uma análise experimental, tabelas com valores precisos acerca das taxas de reações nucleares. Elliot (1984) destaca que Fowler foi diretor do *Kellogg Laboratory Radiation* por muitos anos e seu trabalho mais importante foi em parceria com Fred Hoyle, Geoffrey Burbidge e Margaret Burbidge em um artigo conhecido como B²FH, que representa as iniciais dos autores. Com o título *Synthesis of the Element Stars*, o trabalho procurou explicar como os elementos pesados podem ser formados a partir de elementos leves, por meio de reações nucleares no interior das estrelas. Ademais, os autores explicam a ideia por trás da dinâmica geral dos processos *r* e *s* na formação de elementos. Estes processos estão relacionados a diferenças de energia internuclear. Como os elementos com massa atômica menor que a do ferro (Fe) são produzidos por meio da fusão nuclear, os elementos mais pesados que o ferro são formados a partir de dois processos, denominados *r* de *rapid* e *s* de *slow*, que envolvem a captura de nêutrons e decaimento radioativo. McCrea (1984) aponta outro trabalho relevante de Fowler, em parceria com Hoyle e R. V Wagoner, publicado em 1967, no qual mostraram como núcleos leves de ¹H, ²D, ³He, ⁴He poderiam ser resultados de um “modelo padrão do big bang quente”.

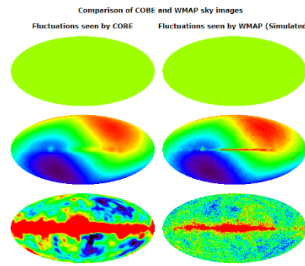
Após a entrega do prêmio, Fowler destacou a participação dos seus colegas de pesquisa e demais colaboradores no laboratório Kellogg. Com efeito, sua vasta contribuição no campo da Astronomia teórica e observacional fazem um papel fundamental nas pesquisas acerca da origem e evolução do Universo, sobretudo aliadas ao modelo do Big Bang quente.

Prêmio Nobel de Física de 2006: anisotropia da RCFM

O século XX ainda faria parte do cenário de mais descobertas sobre a história da teoria do Big Bang e conseqüentemente no estudo da Cosmologia. Um dos problemas de pesquisa intrigantes desta área é saber se o Universo se encontra em algum tipo de expansão, seja constante, acelerada ou desacelerada. Na década de 1980 surge a teoria da inflação cósmica, proposta originalmente por Alan Guth e com as colaborações de Andrei Linde e Paul Steinhardt. O Universo teria passado por um processo de inflação cósmica, fazendo com que o espaço aumentasse de maneira exponencial. De acordo com Steiner (2006, p. 243) “quando a idade do universo era de um trilionésimo de trilionésimo de trilionésimo de segundo (sic), o universo expandiu-se subitamente de um fator gigantesco (esse fator é o número 1 seguido de 50 zeros!).” Esta teoria ainda apresentou possíveis soluções para três problemas fundamentais no modelo do Big Bang: o problema de horizonte, o problema de planicidade do Universo e o problema de monopolos magnéticos.

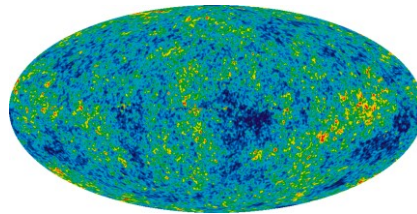
A teoria da inflação nos diz que dentro da relatividade geral existe a possibilidade de uma gravidade que não seja atrativa, mas também repulsiva. Esse tipo específico de gravidade surge do que é chamado de falso vácuo, um estado de matéria no qual o universo se expande enquanto a massa se mantém constante. Segundo esta teoria, pequenas flutuações poderiam ser previstas por meio de pequenas variações de temperatura na radiação cósmica de fundo (RCFM), como de fato foram observadas pela equipe do satélite intitulado Cosmic Background Explorer ou simplesmente como é popularmente conhecido, o satélite COBE. O projeto, liderado por George F. Smoot em 1992 foi capaz de indicar pequenas variações de radiação em diferentes regiões. Essas variações são interpretadas como flutuações quânticas, conforme prevista pela teoria da inflação. O resultado fornece material para estudar como se deu o início da formação de estrelas, galáxias e até mesmo aglomerados de galáxias. Em 2003 o satélite denominado Wilkinson Anisotropy Probe (Sonda de Anisotropia de Micro-ondas Wilkinson), conhecida como WMAP, que apresentava uma resolução trinta e cinco vezes melhor que o COBE, detectou pequenas variações na RCFM. As Figuras 22 e 23 representam mapas de flutuação de temperatura possíveis de serem analisados após as observações do COBE e do WMAP.

Figura 21 - Comparação das flutuações quânticas medidas pelo COBE e pelo WMAP



Fonte: https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/bb_cosmo_fluct.html.

Figura 22 - Mapa de calor das flutuações de temperatura de aproximadamente 13,8 bilhões de anos.



Fonte: <https://universe.nasa.gov/universe/basics/>. NASA/WMAP Science Team.
Acesso em: 28/05/2023

A pesquisa sobre a descoberta da forma do corpo negro e da anisotropia da RCFM rendeu o prêmio Nobel de Física em 2006 para John C. Mather e George F. Smoot (Figura 24). O discurso de John C. Mather após o reconhecimento com a premiação relata o impacto de receber o Nobel de Física pelo seu trabalho com o COBE:

Agora que passei dos 60 anos e o Prêmio Nobel reconheceu nosso trabalho no COBE, minha vida mudou novamente. Estou dando muitas palestras públicas para ajudar o público a entender o trabalho que fizemos e esperamos fazer no futuro para inspirar os jovens a ficarem tão entusiasmados com a ciência quanto eu. Também estou ampliando minhas perspectivas mais uma vez, tentando aprender sobre toda a gama de ciência espacial e ajudando a guiar a ciência da NASA para as descobertas do futuro (MATHER, J.C. 2006). The Nobel Prizes 2006, Editor Karl Grandin, [Nobel Foundation], Stockholm, 2007.

O trabalho de Mather consistiu em apontar que o espectro da RCFM na verdade corresponde a radiação do corpo negro. Esse resultado evidencia que a RCFM se trata de um

resquício da criação do universo, de acordo com a Teoria do Big Bang. George Smoot relata a aflição da comunidade científica por resultados acerca da teoria do Big Bang, que ainda não havia apresentado variações de temperatura na RCFM. Nas palavras de Smoot:

A comunidade científica ficou inquieta esperando os resultados e havia artigos afirmando que o Big Bang estava com problemas, pois as variações de temperatura não haviam sido encontradas. Houveram discussões acaloradas entre a equipe do COBE sobre se as descobertas estavam prontas para a publicação (SMOOT, G.F. 2006). The Nobel Prizes 2006, Editor Karl Grandin, [Nobel Foundation], Stockholm, 2007.

Figura 23- John C. Mather, George F. Smoot



Fonte: The Nobel Prize

Prêmio Nobel de Física de 2011: expansão acelerada

Para detectar a possibilidade de expansão do Universo, seja de forma acelerada ou desacelerada, os cosmólogos contam com um objeto de pesquisa já conhecido, as chamadas supernovas do tipo Ia conforme mostra a (Figura 25). Este nome é dado a uma estrela que se encontra em sua fase final do estágio de evolução. As supernovas do tipo Ia são assim classificadas por apresentarem uma linha espectral de silício, irradiando luz. Dessa forma, é possível calcular distâncias a partir do brilho emitido por estes objetos, ou seja, pela sua luminosidade aparente. Reis e Siffert (2022, p. 25) destacam que as “SN Ia são explosões extremamente brilhantes, e podem atingir bilhões de vezes o brilho do Sol sendo, portanto, visíveis a grandes distâncias.”

Figura 24 - G299, Resquícios de uma Supernova tipo Ia



Fonte: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/g299.jpg>. Crédito da imagem: NASA/CXC/U.Texas.

Em 1998, após a análise da luminosidade aparente de supernovas distantes, utilizando telescópios acoplados em satélites, equipes concorrentes de astrofísicos, os pesquisadores Saul Perlmutter, Adam G. Riess e Brian P. Schmidt (Figura 26) anunciaram a possibilidade de que o Universo estava em expansão acelerada. As três pesquisas, independentes uma da outra e realizadas em locais distintos, anunciaram dados semelhantes acerca de algumas dezenas de supernovas que aparentemente apresentavam menos brilho. Se o Universo estiver se expandindo, a luminosidade aparente detectada devido a uma supernova Ia seria cada vez menos intensa, pois as distâncias em um Universo que se expande passam a ser cada vez maiores. A constatação da expansão acelerada rendeu o prêmio Nobel de Física em 2011 a Saul Perlmutter, Adam G. Riess e Brian P. Schmidt. Nas palavras de Perlmutter: “Não poderíamos esperar pelo resultado real, uma surpresa que apresenta um novo quebra-cabeça para a física fundamental - Agora nos divertimos tentando descobrir o que faz o universo acelerar” (Perlmutter, S. The Nobel Foundation, 2019).

O anúncio de 1998, de que o Universo está se expandindo a uma taxa cada vez maior, foi inesperado, já que a maioria da comunidade científica acreditava que a expansão pudesse ocorrer até um determinado ponto, voltando a se contrair por conta do efeito gravitacional. Até a descoberta da expansão acelerada em 1998, o modelo Einstein-De Sitter fora considerado o modelo cosmológico padrão (Vom Marttens, R.F.; Ribeiro, F. K.; Zimdahl, W., 2012, p. 5).

Figura 25- Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam G. Riess



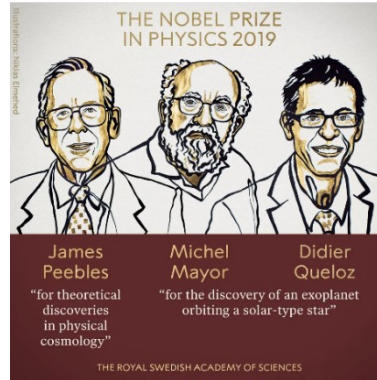
Fonte: The Nobel Prize

Não havia uma explicação para esta expansão, a não ser considerar a constante cosmológica λ de Einstein, que representa uma força repulsiva em relação a gravidade e quando ajustada às equações, permite soluções que estão de acordo com aquilo que fora observado. Ainda existem muitas discussões a respeito dos valores para a constante, que foi rebatizada de energia escura, por agora conter algum significado físico no Universo e que deve ser representada, matematicamente por $\lambda > 0$ em um universo com expansão acelerada para coincidir com a taxa do fator de escala $\ddot{a} > 0$ conforme explica Zimdahl (2021, p. 111). A inserção da constante cosmológica novamente nas equações para representar um universo dinâmico vai de encontro à célebre frase dita por Einstein ao afirmar que a constante cosmológica havia sido o maior erro da sua vida. Mais uma vez a constante voltava ao palco e desta vez para representar um dos maiores problemas de pesquisa em Cosmologia, pois cerca de 68% do Universo é composto de energia escura, 27% de matéria escura e apenas 5% de matéria bariônica, ou seja, matéria dita comum, composta por prótons, nêutrons e elétrons em sua estrutura.

Prêmio Nobel de Física de 2019

O prêmio Nobel de Física de 2019 foi dividido entre os cientistas James Peebles, Michael Mayor e Didier Queloz (Figura 27). Em trabalho publicado em 1995, Mayor e Queloz foram os primeiros a anunciar um planeta fora do sistema solar (exoplaneta) orbitando uma estrela semelhante ao Sol na Via Láctea. Por sua vez, Peebles, reconhecido por suas contribuições na pesquisa sobre Cosmologia desde a década de 1960, recebeu a metade do prêmio “por descobertas teóricas na cosmologia física” (Nobel Prize, 2019).

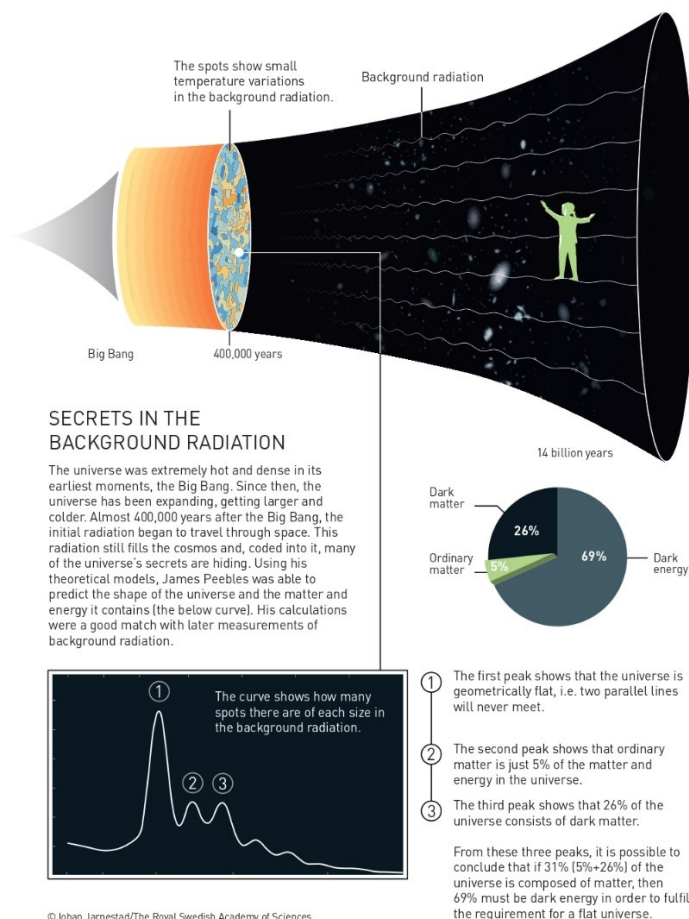
Figura 26 - Vencedores do Prêmio Nobel de Física de 2019



Fonte: Copyright © Nobel Media 2019. Illustration: Niklas Elmehed

Bahcall e Burrows (2020) destacam as contribuições de Peebles para o avanço das pesquisas em Cosmologia e suas previsões teóricas consistentes com as observações, fato relevante para o comitê do Nobel. Saikia (2019) argumenta que imediatamente após a detecção da RCFM, Peebles pesquisa sobre a formação de galáxias e sugere que os resquícios das perturbações de densidade inicial para a formação de estruturas poderiam ser observadas por meio da RCFM. Segundo Cho e Clery (2019), trabalhando na pesquisa das flutuações de temperatura, levou em conta a existência do que chamamos de energia escura. Da mesma forma, Peebles constatou que apenas 5% do nosso universo é conhecido, ou seja, é composto por matéria bariônica, enquanto os 95% restantes permanecem em mistério. Em artigo publicado em 2020, descreve partes da história da pesquisa em Cosmologia Moderna e destaca as contribuições que o levaram a ser agraciado com o prêmio Nobel de Física. A Figura 27 ilustra o cenário do modelo Big Bang, a composição do Universo dada por um gráfico de pizza e as variações de temperatura na RCFM.

Figura 27 - Pequenas variações de temperatura na Radiação Cós mica de Fundo (RCFM) – Gráfico de pizza ilustrando a composição do Universo – Curvas relacionadas a cada ponto na RCFM



Fonte da imagem: Johan Jarnestad, The Royal Swedish Academy of Sciences

Considerações finais: o passado, o presente e o futuro do Cosmos

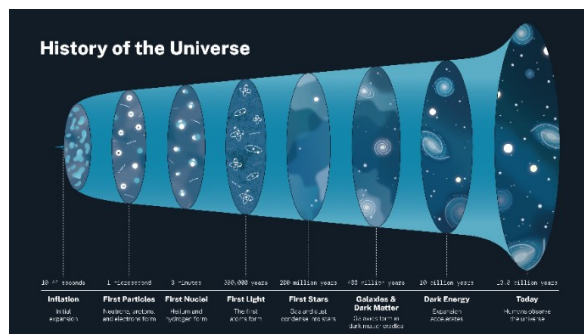
A história repleta de destaques, tais como prêmios, contradições entre teorias e suas personagens e principais colaboradores envolvendo a teoria do Big Bang, esclarece a importância da pesquisa acerca da origem e a evolução do Universo, evidenciando a não linearidade do fazer ciência e os caminhos para sua construção. Esse cenário é evidenciado desde o modelo cosmológico proposto por Einstein em 1917, passando pelo modelo de De Sitter, antes de chegar a dois dos fundadores daquelas que seriam as sementes da teoria do Big Bang, com Friedmann e alguns anos depois com Lemaître. O trabalho de Friedmann, que completa seu centenário em 2022, é um marco histórico não somente na história da

Cosmologia, mas na História da Ciência. O surgimento do modelo do Big Bang quente e a Teoria do Estado Estacionário, que o contra-argumentava, foram necessários para o caminho até a descoberta da RCFM.

As pesquisas em Cosmologia Moderna estão cada vez mais avançadas em comparação com o seu surgimento por volta do início do século XX, como podemos destacar ao longo do trabalho. A abordagem histórica apresentada no texto procurou trazer aspectos com mais detalhes a respeito dessa jornada, que começou há muito tempo e está longe de vislumbrar seu fim. Existe uma pesquisa ampla a respeito de modelos cosmológicos que discordam do modelo de concordância, como é chamado o modelo padrão baseado na Teoria do Big Bang. Contudo, este cenário padrão foi perdendo seu peso no *establishment* da comunidade científica com o surgimento de novas propostas acerca do Universo em expansão. Ainda na década de 1970, surgiram modelos sem singularidades, caracterizados pelo chamado *bouncing*. “Nesses modelos o Universo teria passado por um período inicial de colapso, onde seu volume espacial diminui com o tempo cósmico, atingido um valor mínimo para seu volume e depois iniciado uma fase de expansão” (NOVELLO, M. 2021, p. 179). Esses cenários possibilitam a configuração de um Universo cíclico, que passa por períodos de colapso-expansão. Apesar dos modelos serem mais realistas, não somente por estarem de acordo com as leis físicas, como também por apresentar uma descrição mais coerente com os resultados observacionais disponíveis até o momento, o cenário do Big Bang ainda desperta a atração de muitos cientistas que defendem o modelo.

É válido ressaltar que nenhum dos modelos citados no texto e até mesmo aqueles modelos que foram omitidos, são determinísticos para representação do Universo. A busca teórica aliada a experiências cada vez mais sofisticadas do ponto de vista tecnológico viabiliza os crescentes impactos nas pesquisas de Cosmologia. Ainda não sabemos o que de fato é a energia escura e nem mesmo o que é a matéria escura, apesar da comprovação de sua existência por meio do trabalho de Vera Rubin (1928 – 2016) e de seu colega Kent Ford, ainda na década de 1970. Juntos, estes pesquisadores observaram que a velocidade orbital de estrelas mais distantes do centro de uma galáxia era igual a velocidade das estrelas que estavam localizadas no centro desta mesma galáxia. Para isso acontecer deveria existir uma matéria invisível, de interação gravitacional, que foi denominada de matéria escura. Uma ilustração da História do Universo de acordo com a Teoria do Big Bang e a teoria da inflação cosmológica é mostrada na Figura 28.

Figura 28 - História do Universo desde o período da inflação



Fonte: <https://universe.nasa.gov/universe/basics/>. Acesso em: 28/05/2023.

Devido aos valores associados a composição do Universo, surge um dos problemas de pesquisa de maior destaque: o que estaria causando essa expansão acelerada? Ainda não existe por parte de pesquisas em Cosmologia alguma evidência que seja capaz de mostrar a causa da expansão acelerada. Atualmente, tentar entender e decifrar o que constitui a energia escura e o fator responsável pela aceleração da expansão do Universo têm sido um dos problemas de pesquisa mais intrigantes da área. Os problemas relacionados ao modelo λ CDM, que não é capaz de explicar as causas destes fatores, são discutidos no trabalho de Zimdahl (2021).

Ademais, espera-se que inúmeras contribuições acerca da pesquisa envolvendo os cenários de evolução e expansão acelerada do Universo possam ser valorosas e obtenham êxito. Como abordamos ao longo do texto, com as pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos, do modelo estático de Einstein às questões mais modernas sobre a energia escura, o trabalho para o entendimento do Cosmos enriquece à história da ciência e possibilita o desenvolvimento do estudo sobre Astronomia e Astrofísica de forma geral. Os horizontes em relação às pesquisas em Cosmologia são amplos e se expandem conforme o crescimento da pesquisa, tal qual o Universo em sua expansão acelerada.

Referências Bibliográficas

- [1] ZIMDAHL, Winfried. Big bang & energia escura: problemas atuais da cosmologia. **Cadernos de Astronomia**, v. 2, n. 1, p. 106-106, 2021.
- [2] BERTOLAMI, Orfeu; GOMES, Cláudio. A origem do Universo. **Do Big Bang ao Homem**, 2018.
- [3] ARTHURY, Luiz Henrique Martins; PEDUZZI, Luiz OQ. A teoria do big bang e a natureza da ciência. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 20, p. 59-90, 2015.
- [4] EINSTEIN, A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. **Reprinted in The Collected Papers of Albert Einstein**, v. 6, p. 1914-1917, 1917.
- [5] AMADO, ANTONIO TADEU F. A INOVAÇÃO DO Pe. GEORGE LEMAÎTRE NA COSMOLOGIA: O BIG-BANG. **LEOPOLDIANUM**, v. 48, n. 134, 2022.
- [6] SINGH, Simon. Big Bang: The Origin of the Universe (1st US ed.). **New York: Fourth Estate**. 2004.
- [7] NOVELLO, M. Quantum e cosmos (Quantum and cosmos). **Estudos da Língua(gem)**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 163-183, 2021. DOI: 10.22481/el.v19i1.9157. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/estudosdalinguagem/article/view/9157>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- [8] SOARES, Domingos. O universo estático de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, 2012.
- [9] FAGUNDES, Helio V. Modelos cosmológicos e a aceleração do universo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, p. 247-253, 2002.
- [10] SOARES, Domingos. Os fundamentos físico-matemáticos da cosmologia relativista. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, 2013.
- [11] KRAGH, Helge; SMITH, Robert W. Who discovered the expanding universe?. **History of science**, v. 41, n. 2, p. 141-162, 2003.

- [12] O'RAIFEARTAIGH, Cormac. Testando a relatividade geral nas maiores escalas nos anos 1915-1955: o surgimento da cosmologia moderna. **pré-impressão arXiv:2201.06893** , 2022.
- [13] WAGA, Ioav. A expansão do universo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 163-175, 2000.
- [14] FRIEDMANN, Alexander. Über die krümmung des raumes. **Z. Phys.**, v. 10, p. 377-386, 1922.
- [15] FABRIS, J. C.; VELTEN, H. E. S. Cosmologia neo-newtoniana: um passo intermediário em direção à relatividade geral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, 2012.
- [16] DUSSAULT, Steve; FARAONI, Valerio. A new symmetry of the spatially flat Einstein–Friedmann equations. **The European Physical Journal C**, v. 80, n. 11, p. 1-7, 2020.
- [17] VIGLIONI, A; SOARES, D. “Observações sobre as soluções clássicas da equação de Friedmann”. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, 4702. 2011.
- [18] FRIEDMANN, Alexander. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes. **Zeitschrift für Physik**, v. 21, n. 1, p. 326-332, 1924.
- [19] HAWKING, Stephen. **Uma breve história do tempo**. Editora Intrínseca, 2015.
- [20] WAGA, Ioav. Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para o século XXI. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, p. 157-173, 2005.
- [21] MOSTEPANENKO, Vladimir M. Alexander Friedmann e o universo em expansão. **Cadernos de Astronomia**, v. 3, n. 1, p. 17-17, 2022.
- [22] WAGA, Ioav. Friedmann e a descoberta da expansão do universo. **Cadernos de Astronomia**, v. 3, n. 1, p. 6-6, 2022.
- [23] LAMBERT, D. (2012). Georges Lemaître: The Priest Who Invented the Big Bang. In: Holder, R., Mitton, S. (eds) *Georges Lemaître: Life, Science and Legacy*. Astrophysics and Space Science Library, vol 395. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32254-9_2.
- [24] LUMINET, Jean-Pierre. Lemaitre's Big Bang. **arXiv preprint arXiv:1503.08304**, 2015.
- [25] LEMAITRE, Georges. A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae. In: **A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975**. Harvard University Press, 1979. p. 844-848.

- [26] STOEGER, W.R. (2012). Building on the Legacy of Georges Lemaître in Contemporary Cosmology. In: Holder, R., Mitton, S. (eds) *Georges Lemaître: Life, Science and Legacy*. Astrophysics and Space Science Library, vol 395. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32254-9_9.
- [27] LEMAÎTRE, G. The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory. *Nature* **127**, 706 (1931). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/127706b0>. Acesso em: 02/06/2023.
- [28] HELLER, M. (2012). Lemaître, the Big Bang and the Quantum Universe. In: Holder, R., Mitton, S. (eds) *Georges Lemaître: Life, Science and Legacy*. Astrophysics and Space Science Library, vol 395. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32254-9_5.
- [30] KRAGH, Helge. On modern cosmology and its place in science education. **Science & Education**, v. 20, n. 3, p. 343-357, 2011.
- [31] MITTON, Simon A. Georges Lemaitre and the Foundations of Big Bang Cosmology. **arXiv preprint arXiv:2007.09459**, 2020.
- [32] DE BARROS, Magali Conceição. As mulheres do Harvard College Observatory: Henrietta Swan Leavitt-a mulher que descobriu como medir a distância das galáxias. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, v. 18, p. 12-21, 2018.
- [33] KRAGH, Helge. Cosmology and the origin of the universe: Historical and conceptual perspectives. **arXiv preprint arXiv:1706.00726**, 2017.
- [34] ROSENFELD, Rogério. A cosmologia. **Física na Escola**, v. 6, n. 1, p. 31-37, 2005.
- [35] ARTHURY, Luiz HM. **A cosmologia moderna à luz dos elementos da epistemologia de Lakatos**. 133 f. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- [36] WEINBERG, Steven. **Cosmology**. OUP Oxford, 2008.
- [37] KRAGH, Helge. **Cosmology and controversy: The historical development of two theories of the universe**. Princeton University Press, 1996.
- [38] HOLDER, R.D. (2012). Georges Lemaître and Fred Hoyle: Contrasting Characters in Science and Religion. In: Holder, R., Mitton, S. (eds) *Georges Lemaître: Life, Science and*

Legacy. Astrophysics and Space Science Library, vol 395. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32254-9_4. Acesso em 02/06/2023.

[39] LAMBERT, Dominique; REISSE, Jacques. **Charles Darwin et Georges Lemaître: une improbable mais passionnante rencontre**. Académie royale de Belgique, 2008.

[40] HU, Wayne; WHITE, Martin. The cosmic symphony. **Scientific American**, v. 290, n. 2, p. 44-53, 2004.

[41] VILLELA, Thyrso; FERREIRA, Ivan; WUENSCHÉ, Carlos Alexandre. Cosmologia observacional: a radiação cósmica de fundo em microondas. **Revista USP**, n. 62, p. 104-115, 2004.

[42] FOWLER, William A. Experimental and theoretical nuclear astrophysics: the quest for the origin of the elements. **Reviews of Modern Physics**, v. 56, n. 2, p. 149, 1984.

[43] SALPETER, E. E. The 1983 Nobel Prize in Physics. **Science**, v. 222, n. 4626, p. 881-885, 1983.

[44] ELLIOTT, I. Nobel Prize for Astrophysicists. **Irish Astronomical Journal, Vol. 16, NO. 4/SEP, P. 287, 1984**, v. 16, p. 287, 1984.

[45] MCCREA, W. H. Nobel prize to astrophysicists. **Physics Bulletin**, v. 35, n. 1, p. 16, 1984.

[46] STEINER, João E. A origem do universo. **Estudos avançados**, v. 20, p. 231-248, 2006.

[47] John C. Mather – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 19 Dec 2022. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2006/mather/biographical/>>.

[48] George F. Smoot – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 19 Dec 2022. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2006/smoot/biographical/>>.

[49] REIS, R.R.R.; SIFFERT, B. B. Supernovas do tipo Ia e a expansão do Universo. **Cadernos de Astronomia**, vol. 3, nº1, 2022.

[50] Saul Perlmutter – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 19 Dec 2022.

[51] VOM MARTTENS, R.F.; RIBEIRO, F. K.; ZIMDAHL, W. Perturbações cosmológicas e a taxa de crescimento das flutuações da matéria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 34, nº1 (2012)

[52] BAHCALL, Neta A.; BURROWS, Adam. Profile of James Peebles, Michel Mayor, and Didier Queloz: 2019 Nobel Laureates in Physics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 2, p. 799-801, 2020.

[53] CHO, Adrian; CLERY, Daniel. Nobel honors pioneers in cosmology and exoplanets. 2019.

CAPÍTULO 3

3 APRESENTAÇÕES DE SLIDES – MATERIAL DIDÁTICO

Neste capítulo são apresentados os slides que o(a) professor(a) poderá utilizar em sala de aula para implementação deste Produto Educacional. Todos os slides podem ser acessados no site: <https://sites.google.com/view/teoriadobigbangnasaulasdefisica/página-inicial>.

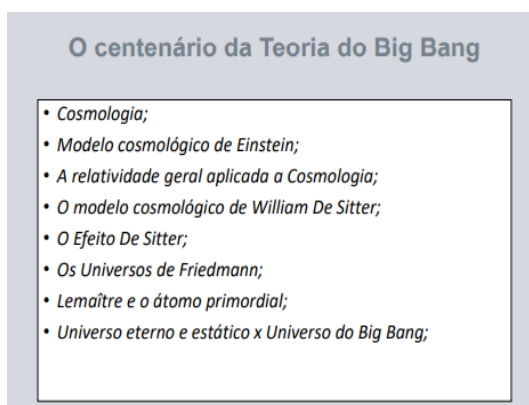
3.1 SLIDES PARA A ABORDAGEM DO CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG

Figura 29- Capa de apresentação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 30- Introdução aos tópicos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 31- Surge a Cosmologia Moderna

O centenário da Teoria do Big Bang

- A cosmologia moderna surge a partir dos resultados previstos pela Teoria da Relatividade Geral (TRG)
- Surgem modelos teóricos sobre o Universo





UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 32 - Relatividade Geral e Cosmologia

A relatividade geral e a Cosmologia

- A Teoria da Relatividade Geral (TRG) propõe que o espaço-tempo seja curvo e objetos com muita massa acabem curvando o tecido do espaço-tempo.
- De maneira resumida, a massa diz ao espaço tempo como se curvar e o espaço tempo diz a massa como se mover (TAYLOR, E. F.; WHEELER, J. A. 1992, p. 275).




UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 33 - O artigo de Einstein de 1917

A relatividade geral e a Cosmologia

- Em 1917, Einstein procurou quais seriam os efeitos da TRG no cosmos e publica um artigo sobre suas conclusões.

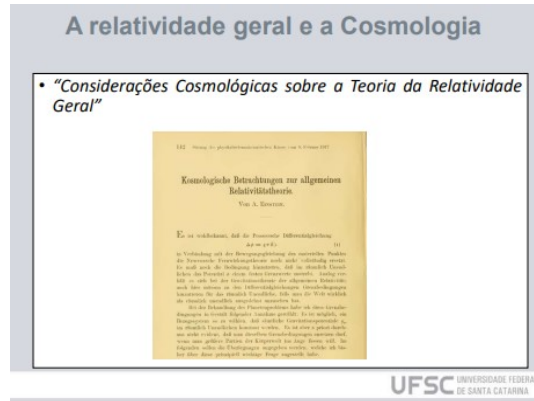




UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

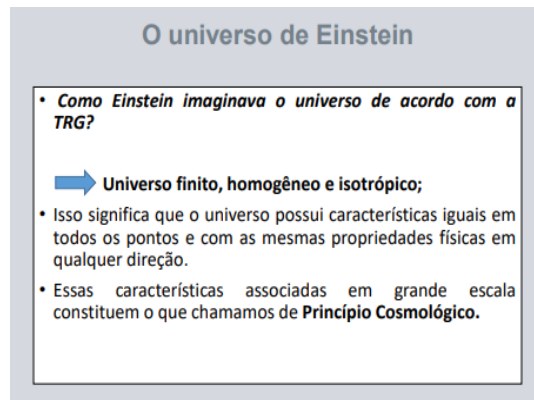
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 34 - O artigo de 1917



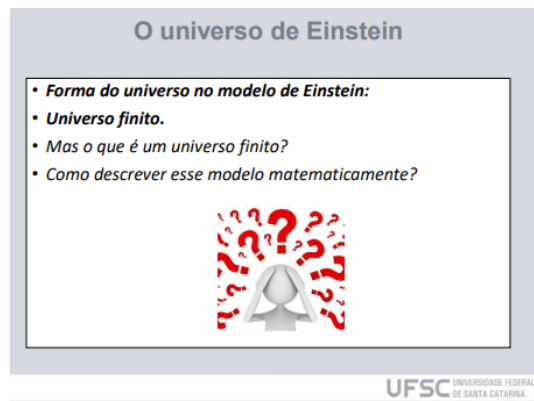
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 35 - O Universo de Einstein



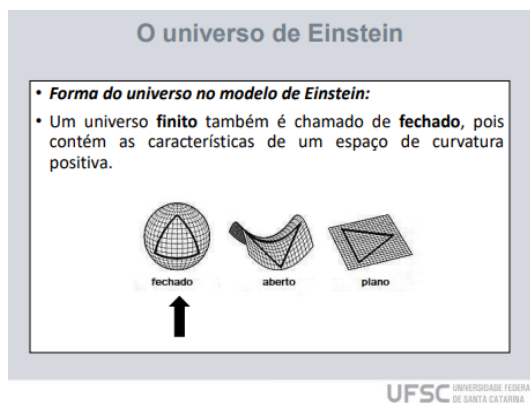
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 36- Universo finito e seus problemas matemáticos



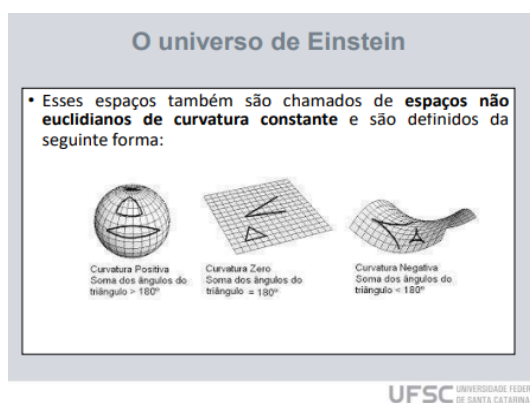
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 37- Modelos matemáticos dos tipos de universo



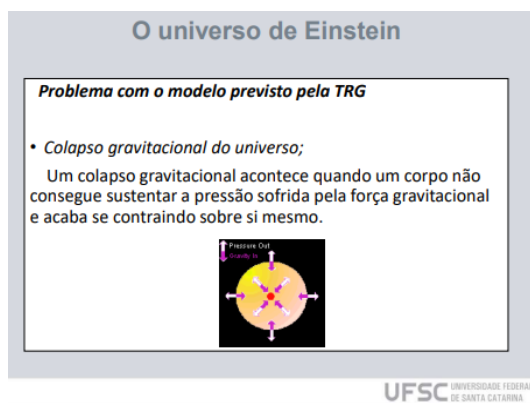
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 38- Espaços não euclidianos de curvatura constante



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 39- Problema previsto pela Teoria da Relatividade Geral




Fonte: Elaborado pelo autor, 2022


Figura 40 - A solução de Einstein

O universo de Einstein

A solução:

- Para contrabalançar a força gravitacional que faria o universo se autodestruir, Einstein adicionou uma constante em suas equações originais da TRG, a chamada **constante cosmológica**.



$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -K(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$


UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 41 - A constante cosmológica

O universo de Einstein

- A constante cosmológica é representada pela letra grega λ (lâmbda) e serve para contrabalançar a força gravitacional.
- A constante pode ser positiva, negativa ou nula.
- A ideia principal era permitir modelar um cosmo sem expansão e sem contração.
- A constante representava uma força repulsiva.


UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

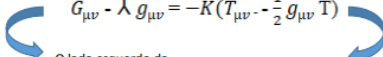
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 42 - Procurando entender a equação de Einstein

O universo de Einstein

Entendendo a equação...



$$G_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -K(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$


O lado esquerdo da igualdade descreve a métrica do espaço tempo, ou seja, sua forma, como é definido geometricamente.

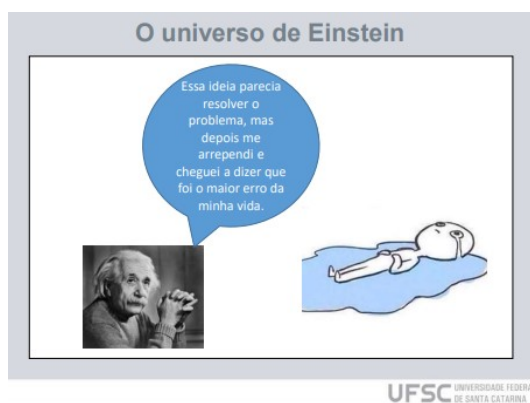
O lado direito da igualdade relaciona os efeitos sobre a massa e a energia

A constante cosmológica λ (lâmbda) contrabalança a força gravitacional, mantendo o universo finito e estático.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

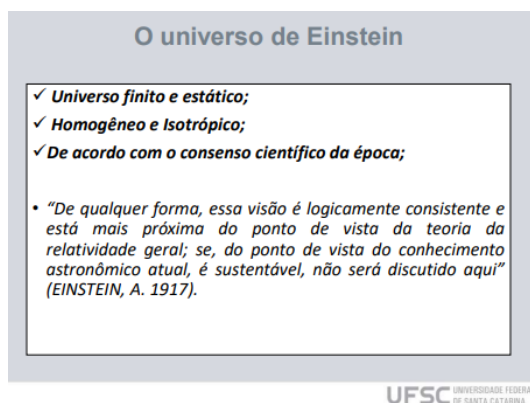
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 813 - Um erro de Einstein?



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 44- Descrição de Einstein do seu artigo de 1917 sobre o seu modelo de Universo finito




Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 45 - Modelo de Universo de Willem De Sitter

O universo de De Sitter

- Willem de Sitter (1872-1934) foi um astrônomo holandês que também apresentou um modelo de universo a partir da TRG.
- **Como era o universo de De Sitter?**
Universo com ausência de matéria e constante cosmológica nula, enquanto o espaço tempo estaria se expandindo;



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 46 - Universo com ausência de matéria

O universo de De Sitter

- ✓ **Universo finito e estático;**
- ✓ **Homogêneo e Isotrópico;**
- ✓ **Ausência de matéria;**
- **Modelo de De Sitter x Modelo de Einstein**

- O modelo proposto por De Sitter recebeu muita atenção da comunidade científica ;
- Até meados de 1922, a cosmologia estava pautada na rivalidade entre estes dois modelos de universo.

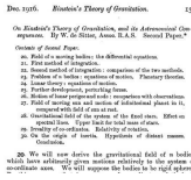
UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 47 - Efeito De Sitter

O universo de De Sitter

- **Efeito De Sitter:**
- A velocidade de afastamento de objetos aleatoriamente espalhados em seu universo aumentaria com a distância (WAGA, 2000).




UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 48 - O trabalho de Friedmann de 1922: “Sobre a curvatura do espaço”

Os universos de Friedmann

- Em junho de 1922, Alexander Alexandrovich Friedmann (1888-1925) publica seu trabalho acerca de soluções variáveis para as equações da relatividade geral, intitulado "Sobre a curvatura do espaço".




UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 49 - Os três modelos de Friedmann para o Universo

Os universos de Friedmann

- Friedmann encontrou resultados essencialmente geométricos a partir das equações de campo de TRG.
- Sugeriu um modelo dinâmico e evolutivo do universo, sem a constante cosmológica.
- Os resultados sugerem três modelos de universo:
 - ✓ Universo em expansão
 - ✓ Universo em contração
 - ✓ Universo estático
- Como assim três modelos de universo?**




UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 50 - A dinâmica do Universo de acordo com Friedmann

Os universos de Friedmann



A dinâmica do universo estava associada a um universo impulsionado por uma expansão inicial, que poderia lutar contra a força da gravidade.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 51 - Procurando entender o modelo de Friedmann e suas três variações

Os universos de Friedmann

Entendendo o modelo de Friedmann e suas três variações

- *Depende da rapidez com que o universo começou a se expandir e de quanta matéria ele continha.*
- 1ª possibilidade: universo muito denso que se expande e depois entra em colapso.
- 2ª possibilidade: universo se expande para sempre, pois a densidade média é muito baixa e assim a gravidade jamais impediria a expansão.
- 3ª possibilidade: densidade média entre a taxa de expansão e a força de gravidade. O universo não se comprime, mas também não expande eternamente.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 52 - Universo mutável, que evolui em escala cósmica

Os universos de Friedmann

Entendendo o modelo de Friedmann e suas três variações

- *Friedmann propôs um universo mutável, diferente dos modelos anteriores, que eram estáticos.*
- *Principal contribuição de Friedmann: modelo de universo que evolui em uma escala cósmica.*
- *Modelo do Einstein;*
- *Modelo de De Sitter;*
- *Modelo de Friedmann;*

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 53 - Rivalidade entre os modelos de Universo?

Rivalidade entre os modelos

Qual modelo corresponde à realidade?


UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 54 - Lemaître e o átomo primordial

Lemaître e o átomo primordial

- O padre e cosmólogo belga, George Lemaître (1894-1966) em meados de 1931, em um artigo publicado na revista *Nature*, ajudou a corroborar a visão de um universo em expansão.



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 55- A teoria de Lemaître

Lemaître e o átomo primordial

- Sua teoria do universo começa com a explosão de um **átomo primordial** e foi a precursora do modelo do Big Bang.





UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 56- A física dos raios cósmicos e a teoria de Lemaître

Lemaître e o átomo primordial

- Física dos raios cósmicos poderia respaldar a teoria de Lemaître;
- Em 1912 Victor Hess havia detectado indícios de partículas altamente energéticas vindas do espaço.

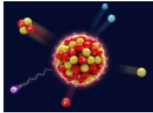
UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 57- O decaimento radioativo do átomo primordial de Lemaître

Lemaître e o átomo primordial

- Lemaître aponta que os raios cósmicos observados poderiam ser remanescentes de um *decaimento radioativo* do átomo primordial.
- Basicamente, o *decaimento radioativo* acontece quando átomos grandes, como os de urânio, se quebram em átomos menores, emitindo partículas, radiação e energia.



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 58 - O modelo de Universo de Lemaître e a Astronomia observacional

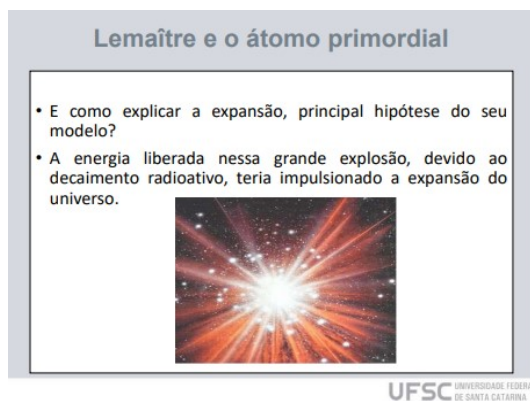
Universo estático x Modelo do Big Bang

- Uniu seu modelo ao uma estrutura de física e astronomia observacional.
- Partiu da relatividade geral e usou os conhecimentos e as observações de fenômenos como os raios cósmicos e o decaimento radioativo.
- Essa descrição de Lemaître forneceu a base do que chamamos de modelo do Big Bang.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 59 - A expansão do Universo segundo o modelo de Lemaître



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 60 - Dois modelos de Universo



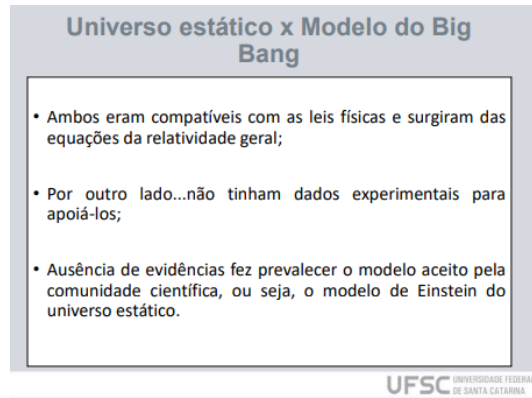
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 61 - Einstein e Lemaître



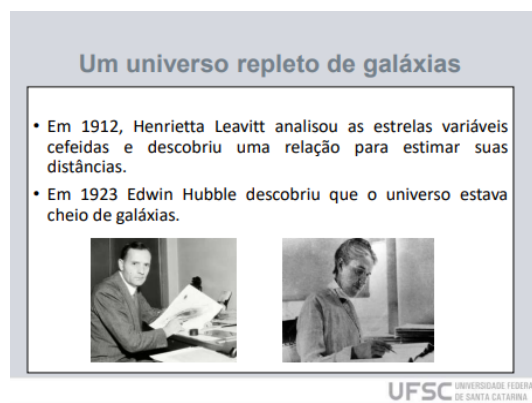
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 62 - Prevalece o modelo de Universo fechado de Einstein



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 63 - Um universo repleto de galáxias



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 64 - Galáxias com bilhões de estrelas

Um universo repleto de galáxias

- A maioria das nebulosas eram galáxias separadas, cada uma com bilhões de estrelas. O universo era repleto de galáxias.



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 65 - Afastamento das galáxias – Estudo de blueshift e redshift

Um universo repleto de galáxias

- A maioria das galáxias pareciam estar se afastando da via láctea (*desvio para o vermelho = redshift*)



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 66 - Maioria das galáxias sofrem redshift

Um universo repleto de galáxias

Revisando...

- Estrela se aproximando tem sua luz desviada para um comprimento de onda mais curto (desvio para o azul) *blueshift*
- Estrela se afastando tem sua luz desviada para um comprimento de onda mais longo (desvio para o vermelho); *redshift*
- O mesmo comportamento ocorre com as galáxias.
- Maioria das galáxias pareciam sofrer um *redshift*;


UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 67 - O trabalho de Hubble de 1929

Um universo repleto de galáxias

- Em 1929, Hubble mostrou que existe uma relação direta entre a distância da galáxia e sua velocidade (lei de Hubble).
- Observatório de Monte Wilson;
- Telescópio Hooker;



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 68 - Um Universo em expansão

Um universo repleto de galáxias

- Conclusão das descobertas de Hubble: **o universo estava em expansão.**



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 69 - Modelo do Big Bang quente

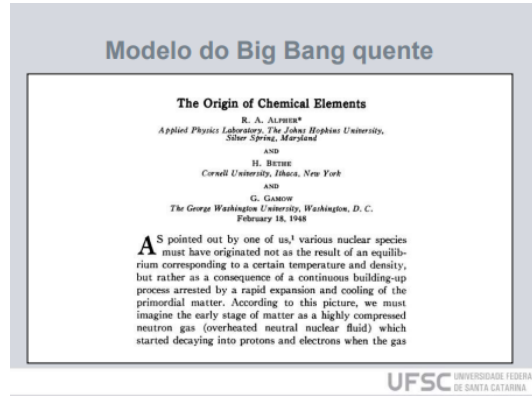
Modelo do Big Bang quente

- Trabalho de 1948 proposto por Gamow e Alpher no qual sugeriam um universo primordial dominado pela radiação.
- Nucleossíntese no Big Bang;
- Gamow convidou Hans Bethe para colaborar com o artigo para que as iniciais do trabalho formassem as letras *alpha*, *beta* e *gamma*.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

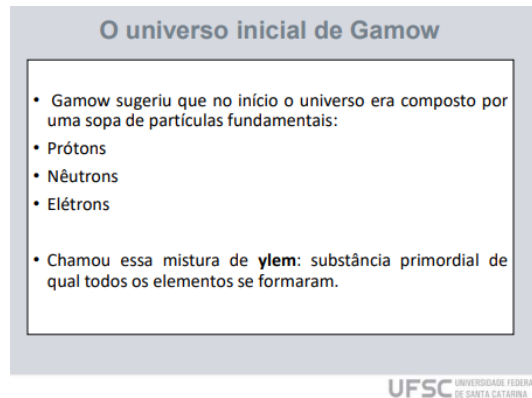
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 70 - O artigo "Alfa, Beta, Gama"



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 71 - Gamow e a sopa de partículas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 72 - Robert Hermann, George Gamow e Ralph Alpher

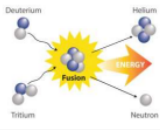


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 73 - Modelo do Big Bang quente e fusão nuclear

Modelo do Big Bang quente

- Basicamente, eles buscavam saber como surgiu a formação de átomos cada vez maiores pela fusão do calor do Big Bang.
- *O que é fusão?*
- A fusão ocorre quando dois núcleos pequenos se unem para formar um único núcleo maior e liberam energia.



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 74 - Momentos iniciais do Universo

Modelo do Big Bang quente

- Alpher e Hermann chegaram a conclusão de que uma hora depois do momento da criação o universo ainda seria uma sopa de plasma feita de núcleos simples e elétrons livres.
- O estado de plasma perdurava pois os elétrons ainda estavam muito rápidos para se instalar em órbitas em torno de um núcleo.
- O universo era um mar de luz e plasma que se expandia.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 75 - Formação dos elementos químicos

Modelo do Big Bang quente

- Conforme o universo expandia, chegaria um momento no qual o plasma não ia existir, pois a temperatura seria muito baixa.

Recombinação

- Assim, os elétrons se ligariam aos núcleos formando átomos de hidrogênio e hélio.
- Transição de plasma para átomos: 3 mil graus °C. Estimativa de 300 mil anos para o universo esfriar até essa temperatura.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 76 - Recombinação

Modelo do Big Bang quente

- **Recombinação**
- Os elétrons se ligariam aos núcleos formando átomos neutros e estáveis.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 77 - Radiação Cósmica de Fundo em Micro-Ondas

Modelo do Big Bang quente

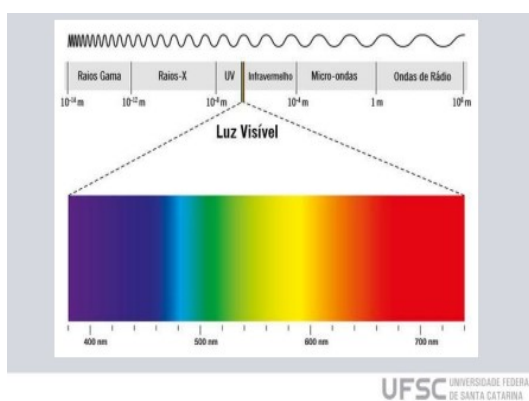
Recombinação

- O universo ficou cheio de partículas neutras.
- Agora a luz poderia atravessar o espaço. O universo estava transparente à luz.
- Essa luz ainda existiria como uma espécie de fóssil do Big Bang.
- Alpher e Herman previram que essa luz deveria ter um comprimento de onda de um milímetro (invisível ao olho humano e presente na região de micro-ondas do espectro).

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 78 - Faixa do espectro eletromagnético



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 79 - Esquema ilustrativo da expansão do Universo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 80 - Contribuições e falhas do modelo do Big Bang quente

Modelo do Big Bang quente

- **Contribuições do modelo e suas falhas...**
 - ✓ O universo é composto de 90% de átomos de hidrogênio e 9% de átomos de hélio
 - X Não explicava a formação de átomos mais pesados que o hélio.
 - ✓ Previram um eco luminoso do Big Bang que havia sido liberado cerca de 300 mil anos depois da criação.
 - ✓ Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (RCFM) que poderia ser detectada.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 81 - Teoria do Universo Estacionário

Teoria do estado estacionário


- Fred Hoyle Thomas Gold e Herman Bondi propuseram a **teoria do universo estacionário**.
- Um universo que se expande, mas não muda sua forma, existindo para sempre;
- Criação de matéria formaria novas galáxias;

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 82 - Fred Hoyle x Big Bang

Teoria do estado estacionário

-  Fred Hoyle, um dos criadores do modelo de estado estacionário do universo. Curiosamente foi Fred Hoyle quem sugeriu o termo Big Bang, após criticar o modelo rival publicamente em um programa de rádio em que apresentava na BBC News.
O seu modelo não era totalmente descartado pela comunidade científica e estava em rivalidade com o modelo do Big Bang quente.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 83 - Big Bang x Estado Estacionário

Teoria do estado estacionário

- Esse modelo era compatível com as descobertas de Hubble e agora entrava no páreo para disputa de modelo cosmológico correto.

Universo do Big Bang x Universo do Estado Estacionário

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

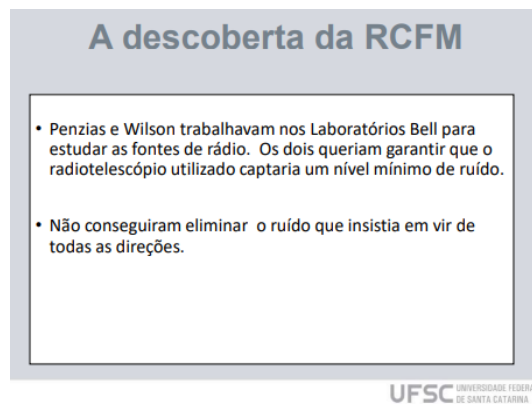
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 84 - Arno Penzias e Robert Wilson e a detecção da Radiação Cósmica de Fundo



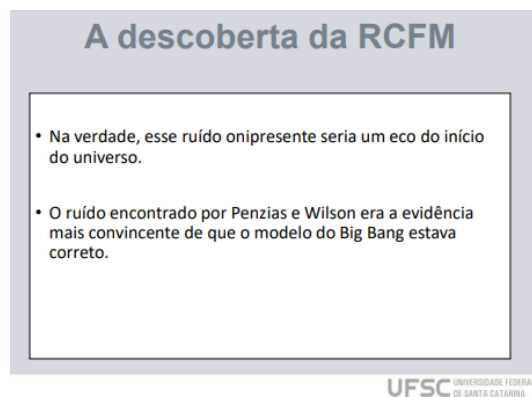
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 85 - Medidas da RCFM nos Laboratórios Bell



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 86 - A RCFM como evidência para o modelo do Big Bang



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 87 - Evidência do modelo do Big Bang quente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 88 - Prêmio Nobel de 1979



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 89 - Dicke e Peebles à esquerda e Penzias e Wilson à direita

A descoberta da RCFM



Dicke e Peebles previram a RCFM, sem saber que isto já tinha sido feito em 1948. Eles queriam construir um detector de RCFM para testar a previsão, mas Penzias avisou Dicke da descoberta e a corrida para encontrar a RCFM chegou ao fim.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 90 - O satélite COBE e a RCFM

Radiação cosmológica de fundo

- Nos anos 1990 o satélite COBE (Cosmic Background Explorer) trouxe mais informações a respeito da RCFM.
- Deteção das flutuações de densidade na fase inicial do universo. A pesquisa valeu o prêmio Nobel para John Matter e George Smoot em 2006.



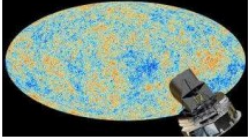
UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 91 - Variações na RCFM

Radiação cosmológica de fundo

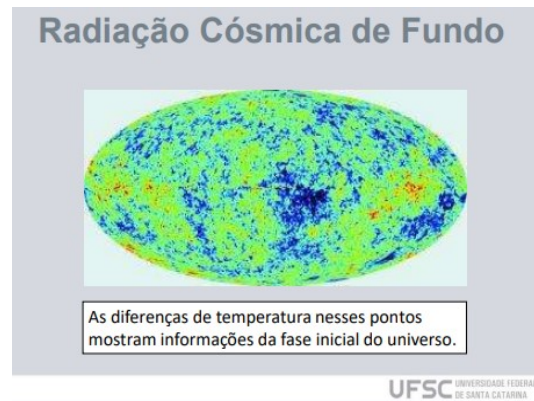
- Em 2003, o satélite WMAP (Wilkinson Anisotropy Probe) também determinou pequenas variações na RCFM, pois tinha uma resolução 35 vezes melhor que o Cobe.



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

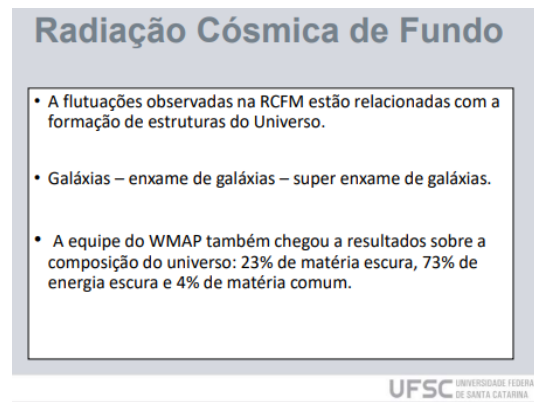
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 92 - Variações na temperatura indicam estágios do início do Universo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 93 - Flutuações de temperatura na RCFM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 94 - Expansão acelerada do Universo

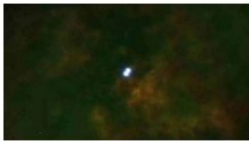


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 95 - Supernovas Ia e a expansão acelerada

Expansão acelerada

- **Como eles chegaram nesse resultado?**
- **A partir de características de supernovas do tipo Ia, que são usadas na Cosmologia para medir distâncias.**
- **Uma supernova é a explosão de uma estrela em sua fase final de evolução**



UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 96 - Referências

Referências Bibliográficas

- Kragh, Helge, and Robert W. Smith. "Who discovered the expanding universe?." *History of science* 41.2 (2003): 141-162.
- Einstein, Albert. "Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie." *Das Relativitätstheorie*. Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 1922. 130-139.
- Luminet, Jean-Pierre. "Lemaitre's Big Bang." *arXiv preprint arXiv:1503.08304* (2015).
- Mitton, Simon A. "Georges Lemaitre and the Foundations of Big Bang Cosmology." *arXiv preprint arXiv:2007.09459* (2020).
- Waga, Ioav. "Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para o século XXI." *Revista Brasileira de Ensino de Física* 27.1 (2005): 157-173.
- Kragh, H. *Cosmology and Controversy: The historical development of two theories of the Universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 97- Referências

Referências Bibliográficas

- Soares, D. "O universo estático de Einstein". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 1, 1302. 2012.
- Hubble, Edwin. "A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae." *Proceedings of the national academy of sciences* 15.3 (1929): 168-173.
- Longair, M. S. *A Brief History of Cosmology*. Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol. 2: Measuring and Modeling the Universe, 2004. Ed. W. L. Freedman (Cambridge Univ. Press).
- SINGH, S. *Big Bang*. Rio de Janeiro: Record, 2006.
- Ribeiro, M. B. *Cosmologia e Representação*. Cornell University Library, arXiv:1308.2929, 2013.
- North, J. D. *Measure of the universe: a history of modern cosmology*. New York: Dover, (edição de 1991), 1965.

UFSC UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

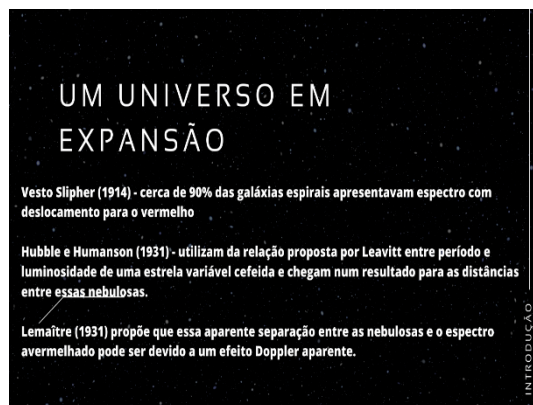
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 98 - Capa de apresentação - Orientação para produção de vídeos sobre o tema



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 99 - Um Universo em expansão - Breve revisão



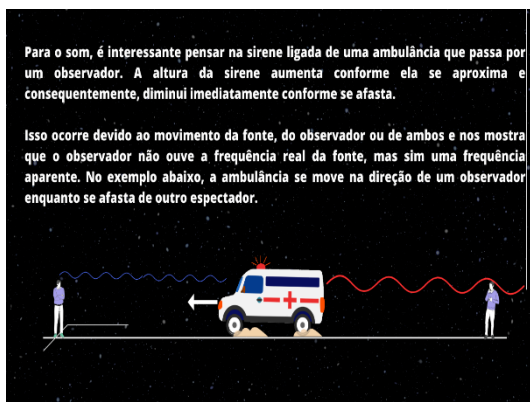
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 100 - Efeito Doppler



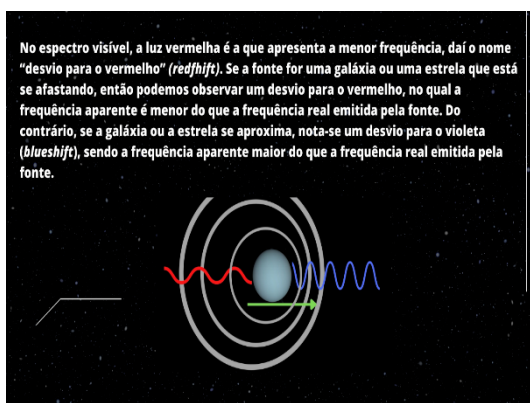
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 101 - Estudando o efeito Doppler



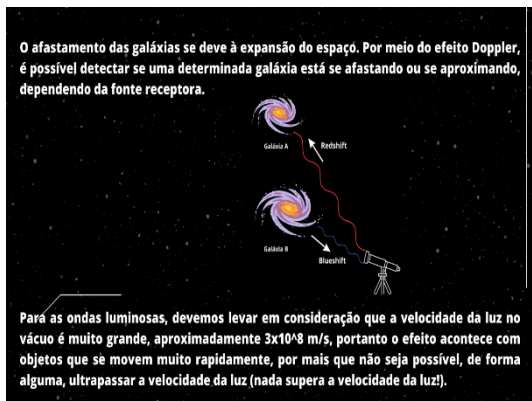
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 102 - Revisão de conteúdo - Blueshift e Redshift



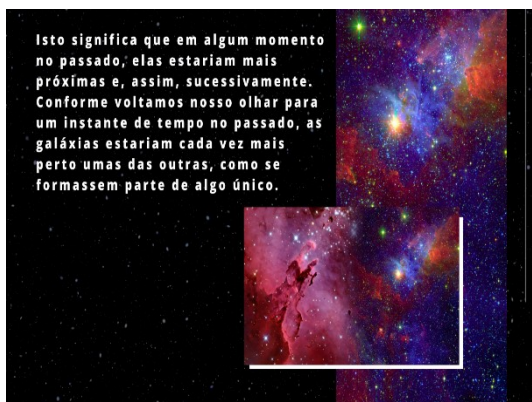
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 103 - Estudo do redshift e blueshift por meio do afastamento das galáxias



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 104 - Comportamento das galáxias e o modelo do Big Bang



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 105 - Modelo do Big Bang quente



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 106 - Estágios iniciais do Universo



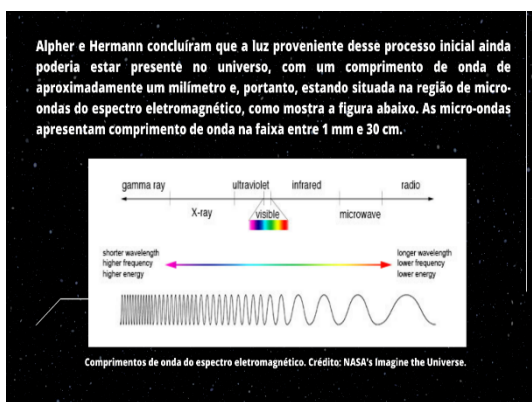
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 107 - Recombinação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 108 - Alpher, Hermann e a conclusão sobre a RCFM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 109 - Uma jornada premiada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 110 - O prêmio Nobel de Física de 1978



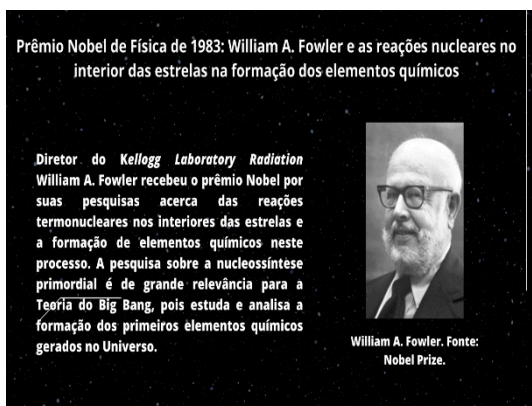
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 111 - O marco no respaldo teórico da teoria do Big Bang



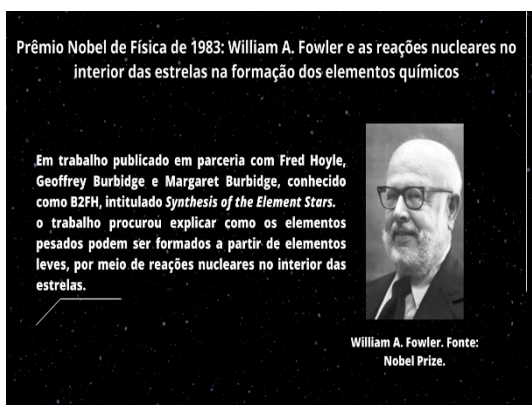
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 112 - Prêmio Nobel de Física de 1983: William A. Fowler e as reações nucleares no interior das estrelas na formação dos elementos químicos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 113 - Nucleossíntese primordial e o prêmio Nobel de Física de 1983



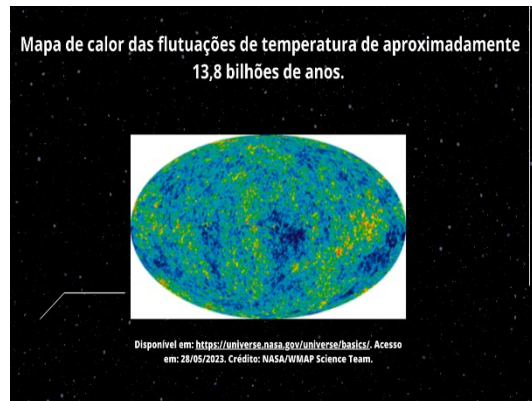
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 114 - Prêmio Nobel de Física de 2006



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 115 - Mapa de calor das flutuações da RCFM



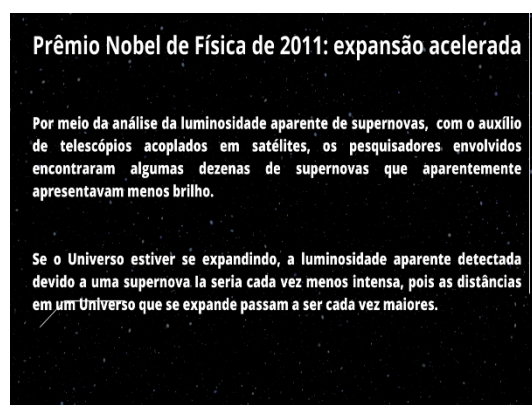
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 116 - Prêmio Nobel de Física de 2011



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 117 - Supernovas tipo Ia e a expansão acelerada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 118 - Supernovas

Prêmio Nobel de Física de 2011: expansão acelerada

O que são Supernovas Ia?

Uma supernova Ia é uma estrela que se encontra na sua fase final do estágio de evolução.

As supernovas do tipo Ia são assim classificadas por apresentarem uma linha espectral de silício, irradiando luz. Dessa forma, é possível calcular distâncias a partir do brilho emitido por estes objetos, ou seja, pela sua luminosidade aparente.

©2010. Imagens de uma Supernova tipo Ia. Disponível em <https://www.nasa.gov/links/default.asp?linkid=91239>. Crédito da Imagem: NASA/CCU/Texas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 119 - Expansão acelerada

Prêmio Nobel de Física de 2011: expansão acelerada

O anúncio dos pesquisadores sobre a expansão acelerada do universo ocorreu em 1998, mas o prêmio Nobel de Física pela detecção foi concedido no ano de 2011.

Anterior: Modelo cosmológico de Einstein De-Sitter
O universo se expandia até um determinado ponto e por conta do efeito gravitacional, voltava a se contrair.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

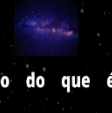
Figura 120 - Composição do Universo

Prêmio Nobel de Física de 2011: expansão acelerada

Mas o que causa essa expansão acelerada?

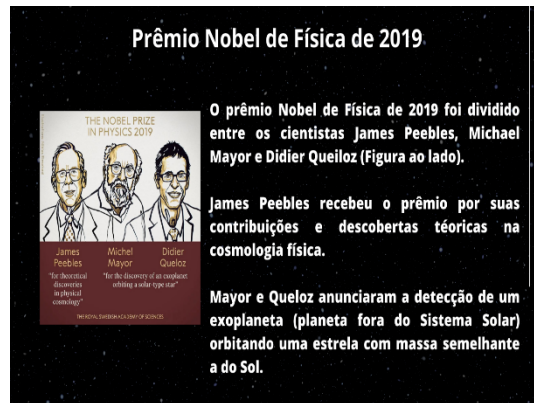
Uma possível explicação seria pelo efeito do que é denominada energia escura.

Cerca de 68% do Universo é composto de energia escura, 27% de matéria escura e apenas 5% de matéria bariônica, ou seja, matéria dita comum, composta por prótons, nêutrons e elétrons em sua estrutura.



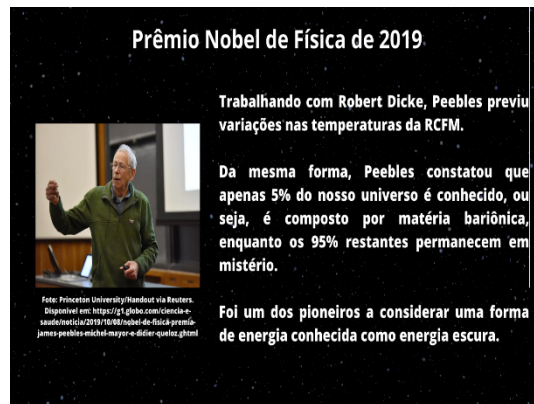
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 121 - Prêmio Nobel de Física de 2019



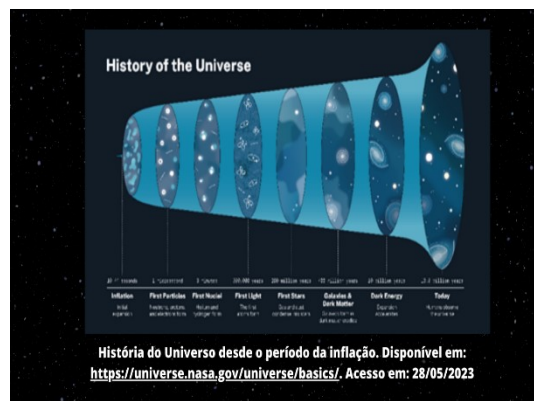
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 122 - James Peebles e suas contribuições para a Cosmologia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 123 - História do Universo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 124 - Do Big Bang aos dias atuais



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

CAPÍTULO 4

4 ORIENTAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAL DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA (DC)

Este capítulo mostra como o(a) professor(a) pode orientar seus alunos e alunas na construção de um material de divulgação científica sobre o tema abordado.

4.1 REUNIÕES EM FORMATO DE AULA PARA CONSTRUÇÃO DO MATERIAL DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

1. **Reuniões em forma de aula para esclarecimento de dúvidas:** Neste primeiro momento, após as aulas sobre o tema, sugere-se reunir os alunos para apresentar a ideia da produção de materiais de divulgação sobre a teoria do Big Bang e o desenvolvimento da Cosmologia Moderna. O(a) professor(a) pode definir os tópicos em sequência cronológica dos acontecimentos de acordo com a História da Ciência e apresentar para os alunos, da seguinte forma:

- a) Motivo do centenário da teoria do Big Bang;
- b) Principais cientistas envolvidos na história centenária do modelo do Big Bang;
- c) O que é a Cosmologia? Como surgiu a Cosmologia Moderna?
- d) A relação entre a Teoria da Relatividade Geral e o modelo do Big Bang;
- e) Modelos de Universo sugeridos no século XX;
- f) O modelo de Friedmann e o modelo de Lemaître;
- g) Universo em expansão;
- h) A jornada premiada da Cosmologia Moderna: vencedores dos prêmios Nobel e a relação com o modelo cosmológico padrão.

Após definir os conceitos a serem discutidos e revisados para que inicie a produção de textos e vídeo sobre o tema, o(a) professor(a) divide a equipe em grupos de, no máximo, três integrantes e distribui os temas para cada equipe. Este primeiro encontro após o curso sobre o centenário da Teoria do Big Bang, visa orientar os estudantes para que revisem os temas abordados em sala e possam pesquisar sobre os tópicos que foram distribuídos para cada grupo.

2. Definição das publicações do material de divulgação científica: No segundo encontro para orientações, o(a) professor(a) sugere aos estudantes algumas plataformas na rede mundial de computadores, para que possam ser publicados os materiais de divulgação que serão construídos, como o Youtube e o Instagram. Para tanto, o(a) professor(a) pode ouvir os alunos e alunas para que eles possam expressar suas ideias e opiniões sobre as possíveis publicações. Nessa etapa, indica-se criar uma conta, em parceria com a escola, em ambas as plataformas digitais escolhidas.

Ainda nesse segundo encontro em forma de reunião/aula, os alunos serão solicitados a apresentar suas ideias e dúvidas que ainda podem ter sobre o tema.

3. Correção dos textos e orientações: Este primeiro encontro serve para apresentação de possíveis textos, slides, layouts, infográficos ou vídeos produzidos por cada equipe, sobre cada tópico do assunto. Dessa forma, o (a) professor(a) pode corrigir e indicar melhorias a serem feitas no material. Importante definir com cada grupo qual o tipo de publicação será construída por cada equipe, seja em formato de slides, layouts ou vídeos.

4. Reapresentação e avaliação dos materiais desenvolvidos: Os alunos são solicitados a apresentar o conteúdo que já desenvolveram e apresentam para o professor(a) e para seus colegas. Assim, são feitas as correções necessárias para a publicação do material.

5. Publicação dos materiais de divulgação científica: Os materiais podem ser reunidos gradativamente ou publicados conforme os estudantes apresentam, após correção do professor(a). Depois de analisar o conteúdo, o professor(a) pode publicar o material elaborado pelos estudantes nas plataformas digitais combinadas, para alcançar um grande público. Sugere-se o Youtube para a publicação de vídeos sobre o tema de estudo e o Instagram para publicação de slides e miniatura e/ou infográficos.

CAPÍTULO 5

5 AVALIAÇÃO SOMATIVA INDIVIDUAL

Este capítulo aborda as questões desenvolvidas e que podem ser utilizadas pelo professor na implementação da UEPS, ou ainda podem ser reformuladas, de acordo com as condições necessárias dadas pelas características da turma.

5.1 QUESTÕES PROPOSTAS NA AVALIAÇÃO SOMATIVA INDIVIDUAL

Questões conceituais de Física sobre o curso e o projeto “De volta ao passado: o centenário da teoria do Big Bang nas aulas de Física”

Todas as questões foram baseadas nas aulas do curso acerca da Teoria do Big Bang e no desenvolvimento de materiais de divulgação científica produzidos.

AVALIAÇÃO SOMATIVA INDIVIDUAL

Prof(a).:	Nome:	Data:
-----------	-------	-------

1. Você está em um seminário de Astronomia e Astrofísica a respeito dos modelos teóricos do Universo. Um colega lhe faz a seguinte pergunta: “o que é a Teoria do Big Bang?” Descreva como você explicaria para ele do que se trata esta teoria, quais são suas principais características e as falhas apresentadas na tentativa de explicar alguns fenômenos físicos.
2. A Cosmologia Moderna surge a partir do trabalho proposto por Einstein em 1917 intitulado “Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral”. Como era o modelo do universo de Einstein e por que este modelo passou a ser inválido após a detecção da expansão do Universo?
3. Uma teoria que descrevia um universo dinâmico surgiu apenas na década de 1920,

com Alexander Friedmann. Escreva sobre as três hipóteses de Friedmann para os modelos possíveis de Universo.

4. Explique com suas palavras o que foi o processo de recombinação na Teoria do Big Bang quente.
5. Assinale a alternativa que contém **somente** os nomes dos cientistas laureados com o prêmio Nobel na jornada centenária da teoria do Big Bang:
 - a) George Gamow, Arno Penzias, Robert Hermann, Henrieta Leavitt, .Adam G. Riess, John C. Matter, Willem De Sitter.
 - b) Ralph Alpher, George Gamow, Robert Wilson, George F. Smoot, Arno Penzias, Brian P. Schmidt, Fred Hoyle.
 - c) Alexander Friedmann, Willem De Sitter, Saul Perlmutter. Albert Einstein, Georges Lemaître, Fred Hoyle, John C. Matter.
 - d) Arno Penzias, Robert Wilson, George F. Smoot, John C. Matter, Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess, William A. Fowler.
6. Na Astronomia, é bem comum utilizarmos os termos *redshift* e *blueshift* ao falarmos sobre a distância de alguns objetos ou mesmo sobre a expansão do Universo. O padre belga Georges Lemaître foi um dos primeiros a calcular e apresentar resultados com base no que ele denominou de “redshifts cosmológicos”. O que significam os termos *redshift* e *blueshift*? Explique citando exemplos com estrelas e/ou galáxias. (Dica: Faça desenhos para explicar os comprimentos de onda).
7. George Lemaître é considerado um dos pais fundadores da teoria do Big Bang. Sua proposta do suposto átomo primordial relacionada à fissão nuclear fora baseada na física dos raios atômicos. Apesar de defender um Universo que poderia ser eterno, Lemaître associou um dos estágios de evolução do Universo tal qual conhecemos ao que ele chamou de átomo primordial. Explique como funciona o processo de fissão nuclear associado ao modelo teórico de Lemaître. (Dica: Dê exemplos com desenhos, ilustrando os átomos e os processos envolvidos).

8. Na década de 1960, Arno Penzias e Robert Wilson identificaram a radiação cósmica de fundo (RCFM), prevista pela teoria do Big Bang quente por Gamow, Alpher e Hermann. Alguns anos mais tarde, os satélites COBE e WMAP fizeram algumas medidas em relação a RCFM encontrando pequenas variações de temperatura. Essas variações são interpretadas como flutuações quânticas, conforme prevista pela teoria da inflação. O resultado fornece material para estudar como se deu o início da formação de estrelas, galáxias e até mesmo aglomerados de galáxias. A respeito do trecho acima, responda a questão a seguir: a) o que é a radiação cósmica de fundo em micro-ondas e por que é tão importante para a teoria do Big Bang?

9. A Teoria da Relatividade Geral, de Albert Einstein, prevê a existência de buracos negros, buracos de minhoca e é fundamental para o Modelo Cosmológico Padrão (MCP) ou simplesmente, Teoria do Big Bang. Com base no que estudamos ao longo do curso e do desenvolvimento dos materiais de divulgação, faça um breve resumo sobre do que se trata a Teoria da Relatividade Geral e sua relação com a Teoria do Big Bang.

10. Por que a Teoria do Big Bang não se trata de uma explosão da qual surgiu o Universo, mas sim de uma teoria de expansão e evolução?

CAPÍTULO 6**6 AVALIAÇÃO DA UEPS****Questionário Final sobre a UEPS acerca do Centenário da Teoria do Big Bang
nas aulas de Física**

Prof(a).:	Nome:	Data:
-----------	-------	-------

1. Como você avalia as aulas sobre a perspectiva histórica do centenário da Teoria do Big Bang?
2. A metodologia adotada nas aulas do curso e nas aulas em formato de reunião para a produção de material de divulgação científica ajudou no seu aprendizado sobre os tópicos estudados?
3. Os recursos didáticos utilizados pelo professor foram suficientes para as aulas e explicações sobre os conceitos? Como você avalia a didática do professor?

CAPÍTULO 7

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este produto educacional pode ser utilizado como um material de apoio ao professor(a) de Física, para ensinar conceitos de Física presentes no Modelo Cosmológico Padrão. O material oferece recursos para que o(a) docente possa ensinar os conceitos de Física envolvendo Astronomia, Astrofísica e Cosmologia Moderna, por meio de uma abordagem histórica do conhecimento científico e como este é produzido. Ao todo, este produto educacional apresenta sequências de apresentações de slides, de forma organizada e coerente com o período histórico do desenvolvimento do conhecimento a ser estudado, um texto paradigmático sobre a história centenária da teoria do Big Bang, um guia de orientação de como organizar e estruturar as produções de material de divulgação científica a serem elaboradas pelos alunos, sob a supervisão do(a) docente, um questionário sobre os conceitos estudados e uma avaliação somativa final sobre a Unidade de Ensino.

As aulas podem ocorrer de forma presencial ou de forma remota, dependendo do que for proposto e organizado pelo(a) professor(a). Isto é possível devido aos materiais fornecidos no produto, que podem ser facilmente utilizados, tendo em vista que já estão em formato digital. Sugere-se ainda que as reuniões ou aulas para a orientação da produção de material de divulgação científica sobre o tema também possa ocorrer de forma remota, se houver necessidade. Todos os recursos para a implementação das aulas estão disponíveis em formato digital.

O objetivo deste produto educacional é proporcionar meios para que ocorra uma aprendizagem significativa e que possa colaborar, de alguma forma, para o ensino de Física, contextualizando conceitos de Astronomia, Astrofísica e Cosmologia com a História e Filosofia da Ciência. Nesse sentido, o ensino de tópicos fundamentais destas áreas, relacionadas a conceitos históricos do desenvolvimento do conhecimento a ser abordado, pode se adequar às práticas pedagógicas do(a) docente, facilitando a compreensão de alguns conceitos e suas origens para os estudantes.

Espera-se que este material possa ajudar o(a) professor(a) de Física a interpretar e elucidar os conceitos relacionados à Física e a História do Modelo Cosmológico Padrão, adaptando-o da melhor maneira possível para ensinar aos seus alunos e alunas, de acordo com a demanda de cada turma.

Referências

BAHCALL, Neta A.; BURROWS, Adam. Profile of James Peebles, Michel Mayor, and Didier Queloz: 2019 Nobel Laureates in Physics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 2, p. 799-801, 2020.

CHO, Adrian; CLERY, Daniel. Nobel honors pioneers in cosmology and exoplanets. 2019.

ELLIOTT, I. Nobel Prize for Astrophysicists. **Irish Astronomical Journal, Vol. 16, NO. 4/SEP, P. 287, 1984**, v. 16, p. 287, 1984.

FOWLER, William A. Experimental and theoretical nuclear astrophysics: the quest for the origin of the elements. **Reviews of Modern Physics**, v. 56, n. 2, p. 149, 1984.

George F. Smoot – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 19 Dec 2022. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2006/smoot/biographical/>>.

HU, Wayne; WHITE, Martin. The cosmic symphony. **Scientific American**, v. 290, n. 2, p. 44-53, 2004.

John C. Mather – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 19 Dec 2022. <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2006/mather/biographical/>>.

MCCREA, W. H. Nobel prize to astrophysicists. **Physics Bulletin**, v. 35, n. 1, p. 16, 1984.

STEINER, João E. A origem do universo. **Estudos avançados**, v. 20, p. 231-248, 2006.

MASINI, Elcie F. Salzano; MOREIRA, Marco Antônio. **Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

MASINI, Elcie F. Salzano; MOREIRA, Marco Antônio. **Aprendizagem significativa: condições para ocorrência e lacunas que levam ao comprometimento**. São Paulo: Vetor, 2008.

MOREIRA, Marco Antonio. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006.

MOREIRA, Marco Antonio. Negociação de significados e aprendizagem significativa. **Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 1, n. 2, 2008.

MOREIRA, Marco A. Mapas conceituais e aprendizagem significativa. São Paulo. **Editora Centauro**, 2010.

MOREIRA, Marco Antonio. Mapas conceituais e aprendizagem significativa (concept maps and meaningful learning). **Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, digramas V e Unidades de ensino potencialmente significativas**, v. 41, p. 1-14, 2012.

MOREIRA, Marco Antonio. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. **Revista do professor de física**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2017.

MOREIRA, Marco Antônio. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos avançados**, v. 32, p. 73-80, 2018.

REIS, R.R.R.; SIFFERT, B. B. Supernovas do tipo Ia e a expansão do Universo. *Cadernos de Astronomia*, vol. 3, nº1, 2022.

Saul Perlmutter – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022. Mon. 19 Dec 2022.

SALPETER, E. E. The 1983 Nobel Prize in Physics. **Science**, v. 222, n. 4626, p. 881-885, 1983.

SINGH, Simon. Big Bang: The Origin of the Universe (1st US ed.). **New York: Fourth Estate**. 2004.

VILLELA, Thyerso; FERREIRA, Ivan; WUENSCHÉ, Carlos Alexandre. Cosmologia observacional: a radiação cósmica de fundo em microondas. **Revista USP**, n. 62, p. 104-115, 2004.

VOM MARTTENS, R.F.; RIBEIRO, F. K.; ZIMDAHL, W. Perturbações cosmológicas e a taxa de crescimento das flutuações da matéria. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 34, nº1 (2012)

APÊNDICE B

Artigo apresentado no 11º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul, 2022

O CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG

Guilherme Emerim Nunes¹, Felipe Damasio², Danielle Amanda Raimundo da Silva³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina/Aluno de Pós-Graduação/MNPEF/guicubers@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina/Orientador/MNPEF/felipedamasio@ifsc.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Câmpus

Araranguá/Docente/danielle.amanda@ifsc.edu.br

Resumo: *Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa em andamento do Mestrado em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com o tema principal: “O centenário da Teoria do Big Bang”. O projeto conta com bolsistas de iniciação científica (IC’s) do ensino médio do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá que serão responsáveis pela produção de materiais de divulgação científica sobre o tema, sob a orientação do coordenador e orientador do projeto e coorientação do mestrando, responsável pelo projeto de pesquisa. Para viabilizar e dialogar com o ensino básico e a comunidade externa, o resultado, oriundo da pesquisa acadêmica, foi um curso destinado aos IC’s e, também, aberto ao público de forma geral.*

Palavras-Chave: *Big Bang; Ensino de Física; Divulgação Científica.*

1 INTRODUÇÃO

As diretrizes e parâmetros legais para o ensino de Física acentuam a importância da inserção de conteúdos que abordam a Física Moderna e Contemporânea (FMC) em sala de aula. Entretanto, grande parte dos professores está limitada a um cenário pedagógico sem muita flexibilidade, seja por prescrições de conteúdo, horários restritos ou especificidades de suas próprias disciplinas (Brockington & Pietrocola, 2005). Conforme coloca Moreira (2018,

p. 73), faltam professores de Física nas escolas e os que existem são obrigados a treinar os alunos para as provas, para as respostas corretas, ao invés de ensinar Física.

Como consequência deste panorama, o ensino de ciências acaba apresentando lacunas no que se refere ao ensino de tópicos da FMC no ensino básico. Geralmente o alunado não apresenta interesse nos assuntos relacionados à ciência, pois acaba visualizando ciência como algo distante de suas realidades. Contudo, muitos alunos demonstram interesse em assuntos que são explicados pela ciência e é nesse limiar entre o desinteresse pelas aulas tradicionais e a curiosidade por algumas questões, que se pode despertar a vontade de aprender ciência. Daí a importância da inserção de tópicos de FMC de maneira não formal, ou seja, por meio da divulgação científica, considerando-se que boa parte do desenvolvimento científico e tecnológico do nosso século deriva de aspectos da FMC.

Neste sentido, busca-se uma forma de analisar e problematizar a FMC com foco na Teoria do Big Bang, que completa seu centenário nesta década. Para entender de onde surgiu o atual modelo cosmológico padrão (MCP), ou como é conhecido, a teoria do Big Bang torna-se ideal para analisar e contar a história de seu desenvolvimento, com foco nos personagens envolvidos e nas inúmeras contribuições para o avanço da ciência.

Em meados de 1917, Albert Einstein publicou um artigo com o título “Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral” no qual propõe aplicações da sua teoria para entender o Cosmo de maneira mais efetiva. De acordo com o modelo de Universo proposto por Einstein, esse deveria ser eterno e estático, conforme o consenso científico da época. Contudo, os resultados depois da aplicação da relatividade geral indicaram um universo instável, que previsivelmente acabaria se autodestraindo devido à força de atração. Desta forma, o problema relacionado à gravidade na teoria, que apontava para um universo autodestrutivo, foi resolvido por Einstein de uma maneira engenhosa, introduzindo em suas equações a chamada constante cosmológica. Esse modelo deu início ao que chamamos de cosmologia relativista - embora não tenha sido o único e isolado numa tentativa de explicar o cosmos.

Outras soluções para as equações de campo da relatividade geral, que também apresentavam uma descrição para o modelo do universo, foram propostas por Willem de Sitter (1872-1934) com a publicação de três trabalhos sobre o tema, em 1917. Em um destes modelos, o mais famoso apresenta um universo com ausência de matéria e constante cosmológica nula, enquanto o espaço-tempo estaria se expandindo. Trata-se de um universo semelhante ao de Einstein: estático e finito, porém sem matéria (KRAGH, 2004, p.74.).

Em junho de 1922, Alexander Alexandrovich Friedmann (1888-1925) publicou seu trabalho acerca de soluções variáveis para as equações da relatividade geral, intitulado “Sobre a curvatura do espaço”. O matemático russo utilizou resultados geométricos para superfícies curvas, resolvendo as equações de campo da relatividade geral e encontrando soluções que sugerem modelos para os quais o universo poderia estar se expandindo, contraindo ou até mesmo permanecendo estático, como proposto nos modelos anteriores. Devido aos seus trabalhos, é considerado, ao lado de Gamow e Lemaître, um dos pais da teoria da expansão do universo e precursor da teoria do Big Bang.

O modelo proposto pelo padre belga Georges-Henri Édouard Lemaître (1894-1966) em meados de 1931, publicado na revista *Nature*, respeitava as equações de campo da relatividade geral e tomava como base a possibilidade de um universo em expansão. Partindo do pressuposto de que no início o Universo era essencialmente frio e considerando que toda a matéria estivesse contida em um único átomo, o processo para a criação do universo então deveria ter ocorrido numa espécie de grande fissão nuclear.

As observações de um modelo sobre o Universo mais consistente do ponto de vista físico foi proposto por George Gamow (1904 -1968). Em artigo escrito com a colaboração de Ralph Alpher e Hans Bethe, em 1948, apresentou um modelo baseado no processo de fusão nuclear, que se diferenciava daquele apresentado por Lemaître. Os resultados concordam razoavelmente com os dados conhecidos. Esse é o aspecto importante da teoria do “Big Bang”: unir a teoria relativística, que já existia, com os conhecimentos de física nuclear desenvolvidos na década de 1940 (MARTINS, R.D.A. 1994, p.161).

Outras teorias contestaram esta apresentada por Lemaître, como a que foi proposta por Herman Bondi, Fred Hoyle e Thomas Gold, em 1948, chamada de teoria do universo estacionário. Entretanto, com a descoberta da radiação cósmica de fundo (RCF) por Arno Penzias e Robert Wilson, este modelo de universo estacionário perdeu sua força, pois a radiação de fundo de micro-ondas corrobora ainda mais a hipótese da teoria do Big Bang.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada envolveu nove etapas: (i) Escolha do tema; (ii) Revisão Bibliográfica; (iii) Desenvolvimento de um texto paradidático sobre o tema de pesquisa; (iv) Planejamento do curso; (v) Execução do curso; (vi) Avaliação do curso; (vii) Construção de material de divulgação científica pelos IC's; (viii) Publicação do material; e, (ix) Avaliação do material de divulgação científica produzido.

Na etapa (i) foi feita a escolha do tema que poderia estar em evidência dada à importância de sua contribuição para a Ciência e por estar completando cem anos de sua primeira teorização.

Durante a etapa (ii), houve a revisão bibliográfica sobre trabalhos que pudessem contribuir para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, bem como, ressaltar o ineditismo da proposta. Essa parte envolveu a leitura de textos, artigos e livros sobre o tema.

A etapa (iii) consistiu em elaborar um texto paradidático para o ensino dos conceitos de Física sobre a teoria do Big Bang, envolto em seus aspectos históricos e epistemológicos. A produção do texto paradidático viabiliza a abordagem do assunto e ressalta a importância da etapa (ii), pois permite a construção de um texto de divulgação científica acerca do assunto.

Em seguida, na etapa (iv) houve a organização e a idealização dos tópicos a serem trabalhados para elaboração do planejamento do curso. Ainda nesta etapa, foi escolhido qual seria o trabalho final a ser desenvolvido pelos alunos durante a implementação de aulas sobre o tema.

As demais etapas ancoram-se na etapa (iv), pois, a partir da produção do curso e do seu planejamento, foi escolhido o local e o funcionamento dele, conforme proposto na etapa (v), que consiste em sua execução. O curso acontecerá no Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá, nos dias 13, 20 e 27 de setembro de 2022, sempre com início às 19h e término às 20h.

A etapa seguinte (vi) se trata da avaliação do curso, na qual os elementos desenvolvidos ao longo da proposta de aulas serão avaliados com base na teoria de Strauss. Para tanto, depois do curso, os bolsistas de iniciação científica irão produzir material de divulgação científica e publicar os resultados, que serão avaliados para um panorama geral do curso, complementando as etapas (vii), (viii) e (ix). A produção deste material será supervisionada e orientada para que os temas sejam selecionados de maneira organizada e de acordo com a ordem cronológica dos fatos históricos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa acadêmica desenvolvida acerca do centenário da teoria do Big Bang fundamenta-se em referenciais históricos e epistemológicos, para além dos conceitos físicos estudados. Nesse sentido, o resultado do projeto, até o momento, foi um curso oriundo de uma pesquisa em andamento de mestrado em ensino de Física que busca aproximar a pesquisa *de e sobre* ciência do ensino básico.

Para a escolha dos subtemas a serem trabalhados e discutidos, foram selecionados os seguintes assuntos: *O modelo cosmológico de Einstein e de De Sitter e os Universos de Friedmann; O átomo primordial de Lemaître e o modelo proposto por Gamow; A descoberta da expansão do Universo e os prêmios Nobel ao longo da pesquisa sobre o Big Bang.* No primeiro momento, os alunos serão apresentados a uma breve noção sobre a gravitação na relatividade geral, com exemplos, desenhos e espaço para perguntas. Essa primeira abordagem serve para introduzir e facilitar o entendimento do modelo cosmológico de universo estático e imutável proposto por Einstein após a publicação da teoria da relatividade geral. Seguindo a mesma linha de pensamento, também serão levantadas questões sobre o modelo de universo proposto por De Sitter e a relação entre estes dois tipos de modelos para explicar o cosmos. Em contrapartida, serão discutidos aspectos fundamentais sobre os modelos de universo de Friedmann, que diferencia os modelos anteriores e nos apresenta a primeira noção sobre a possibilidade da criação de um universo, tal como é proposto na teoria do Big Bang. A apresentação destas teorias conta com o respaldo da utilização dos trabalhos originais em formato digital, desenvolvido pelos cientistas em suas respectivas épocas, como os artigos publicados por eles, permitindo que os alunos possam visualizar e manter contato com essas obras.

O segundo encontro introduz a visão de alguns cientistas que contrariavam a ideia de um universo estático e imutável, como Georges Lemaître. Ainda no mesmo encontro serão discutidos os feitos de Henrieta Leavitt e sua colaboração para a medição da distância das variáveis cefeidas e o uso que Hubble fez de sua pesquisa para fazer uma das maiores descobertas do século, encerrando o Grande Debate. O modelo proposto por Gamow e a ideia de nucleossíntese também será apresentada ao final desta aula.

No último encontro, serão analisados os conflituosos embates contra e a favor da teoria do Big Bang, a teoria proposta por Fred Hoyle e seus colegas, assim como a descobertas da radiação cósmica de fundo e, finalmente, a aceitação e mudança de paradigma acerca do modelo mais aceitável para a origem do universo de acordo com as pesquisas realizadas. Não obstante, serão apresentados os vencedores do prêmio Nobel que contribuíram para resultados sobre a expansão do universo e corroboram a teoria centenária do Big Bang. Ao final de cada encontro, os alunos serão convidados a revisar os subtópicos trabalhados. No terceiro e último encontro, os mesmos alunos serão convidados a produzir um trabalho final sobre o curso.

A partir do curso, os alunos irão produzir material de divulgação científica das mais diversas formas, utilizando o laboratório de mídias. Serão elaborados pelos próprios alunos:

textos, infográficos, *layouts* e vídeos para o Instagram, Youtube e Tik Tok. De acordo com Silva e Almeida (2005, p.6), “a divulgação científica representa um espaço de interlocução que extrapola os circunscritos círculos de leitores especialistas capacitados a compreenderem *papers* de sua própria e restrita área de trabalho.”

Dessa forma, a pesquisa se alinha com o desenvolvimento e produção de material de divulgação científica por parte dos alunos e bolsistas de Iniciação Científica (IC's) do grupo de pesquisa IFSCIENCE do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia, Câmpus Araranguá.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A formulação de um curso que possibilita a produção de material de divulgação científica para mídias sociais por alunos e bolsistas de Iniciação Científica aproxima e viabiliza o desenvolvimento da pesquisa acadêmica com a comunidade externa, além de fomentar o interesse e o acesso à Ciência para o público geral.

Esta produção de material, por conta dos discentes e a disponibilidade de acesso ao público, reforçam os laços do tripé entre Ensino, Pesquisa e Extensão, pois aproxima o público do conhecimento desenvolvido na universidade e também promove o interesse pelo aprendizado e acesso a conteúdos de Ciência.

AGRADECIMENTOS

É válido destacar que o projeto de pesquisa de mestrado ainda encontra-se em andamento e busca contribuir para o ensino de Física no ensino básico. Um agradecimento especial aos bolsistas de Iniciação Científica do IFSC – Câmpus Araranguá, que contribuem para a pesquisa e também ao grupo IFSCIENCE. Por fim, vale ressaltar a participação da comunidade externa, que pode se beneficiar do conteúdo produzido oriundo da pesquisa acadêmica e sua fundamental importância pois, assim, expande-se o conhecimento de temas relacionados à Ciência e, de maneira geral, alcançando um grande público.

REFERÊNCIAS

BROCKINGTON, Guilherme; PIETROCOLA, Maurício. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física moderna?(*Are the rules for Didactical Transposition applicable to the concepts of modern physics?*). **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 3, p. 387-404, 2005.

KRAGH, Helge. **Matter and Spirit in the Universe: Scientific and Religious Preludes to Modern Cosmology**. London: Imperial College Press, 2004.

MARTINS, Roberto de Andrade. **O Universo: Teorias sobre sua origem e evolução**. São Paulo: Editora Moderna, 1994.

MOREIRA, Marco Antonio. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos avançados**, v. 32, p. 73-80, 2018.

SILVA, Henrique César. ALMEIDA, Maria José P. M. O deslocamento de aspectos do funcionamento do discurso pedagógico pela leitura de textos de divulgação científica em aulas de Física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**. vol. 4. n. 3. 2005.

APÊNDICE C

Resumo expandido apresentado no Encontro Estadual de Ensino de Física – EEFís (2023)

DE VOLTA AO PASSADO: O CENTENÁRIO DA TEORIA DO BIG BANG NAS AULAS DE FÍSICA

Guilherme Emerim Nunes [guilherme.emerim@posgrad.ufsc.br]

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – CEP, 88.906-072.

Campus Araranguá, Santa Catarina, SC – Brasil.

Júlia Bogo Anastacio [julia.b07@aluno.ifsc.edu.br]

Júlia Anacleto [julia.a07@aluno.ifsc.edu.br]

Laiane Mascarello Coutinho [laiane.mc@aluno.ifsc.edu.br]

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC – CEP, 88.905-112..

Câmpus Araranguá, Santa Catarina, SC – Brasil.

Resumo

O presente projeto de pesquisa tem como objetivo ensinar Astronomia, Astrofísica e FMC por meio do contexto histórico da teoria do Big Bang, que completou seu centenário em junho de 2022. O trabalho conta com o aporte teórico educacional da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e com a filosofia e epistemologia da ciência de Paul K. Feyerabend. A proposta visa desconstruir concepções alternativas errôneas por parte do alunado do ensino básico acerca da história da teoria do Big Bang e os conceitos físicos envolvidos, buscando desenvolver uma postura crítica e fundamentada em relação a aspectos da Ciência e sua jornada histórica. Tendo em vista o atual cenário do ensino de Astronomia no ensino básico, o trabalho proposto também coloca o aluno como protagonista e sugere a elaboração de conteúdo sobre o tema. Além disso, o projeto procura disponibilizar o material produzido em plataformas digitais, promovendo assim a divulgação científica e viabilizando a interação entre a pesquisa, o ensino e a comunidade externa.

Palavras-chave: Teoria do Big Bang; Ensino de Astronomia; História da Ciência.

INTRODUÇÃO

Moreira (2017) aponta um problema relacionado aos desafios e as práticas adotadas por professores no contexto do ensino de Física, como a narrativa centrada no docente e a aceitação desse modelo pela comunidade escolar. Nesse cenário, torna-se cada vez mais difícil a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e o ensino de Astronomia e Astrofísica, tendo em vista a redução de conteúdos relacionados à disciplina e a falta de viabilidade para trabalhar tópicos de ensino sobre esses temas. A escolha por trabalhar com temas relacionados à Astronomia se mostra útil quando se leva em consideração algumas pesquisas e argumentos sobre o tema.

Silva e Langhi (2021) destacam as dificuldades encontradas por professores ao ensinar conteúdos relacionados à Astronomia. Apesar de ser um tema recente de pesquisa, o problema deve ser abordado por influenciar diretamente na aprendizagem do alunado e, conseqüentemente, na forma como esses alunos passam a enxergar a ciência. Bagdonas e Andrade (2010) apresentam a importância da História da Ciência aplicada ao ensino e suas potencialidades, permitindo discutir sobre a natureza da ciência e ressaltando os benefícios que episódios históricos da Astronomia podem trazer para essa discussão. Silva e Almeida (2005) destacam que os assuntos sobre esses temas são os preferidos entre os jornalistas de divulgação científica, com destaque para informações sobre o Big Bang e Buracos Negros. Essa preferência não é exclusiva desse grupo, pois o interesse pela Astronomia pode surgir antes mesmo do ingresso no ambiente escolar. Geralmente o alunado não apresenta interesse nos assuntos relacionados à ciência, pois acaba visualizando ciência como algo distante de suas realidades.

As pesquisas sobre o ensino de Astronomia são claras quanto às dificuldades que encontram e apresentam margens para a busca de mais questões e possíveis respostas para melhorias no ensino do tema na educação formal. Logo, a pesquisa aqui relatada busca trabalhar no sentido de promover conhecimentos *de* e *sobre* Física, especialmente voltados para a área da Astronomia e Astrofísica, à luz do centenário da teoria do Big Bang, de forma a produzir não somente um produto educacional relevante para o ensino destes temas, mas também dialogar com o público por meio de materiais e meios de divulgação científica. Para fundamentar a hipótese da proposta, o trabalho tem como base os principais conceitos da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel e a epistemologia e filosofia

da ciência de Paul K. Feyerabend, usando como aporte metodológico as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).

O centenário da teoria do Big Bang se deve justamente ao artigo publicado por Alexander Friedmann em meados de 1922. Apesar de surgir alguns anos depois, a notável e popular teoria que veio a ser denominada “teoria do Big Bang”, se fundamenta nas hipóteses de Friedmann, que previu até mesmo a expansão do universo. Devido aos seus trabalhos, Friedmann é considerado, ao lado de Lemaître, Alpher e Gamow, um dos criadores da teoria do Big Bang.

O curso para o ensino médio, desenvolvido acerca do centenário da teoria do Big Bang, fundamenta-se em referenciais históricos e epistemológicos, para além dos conceitos físicos estudados, buscando aproximar a pesquisa *de e sobre* ciência do ensino básico. Para a escolha dos subtemas a serem trabalhados e discutidos, foram selecionados os seguintes assuntos: *O modelo cosmológico de Einstein e de De Sitter e os Universos de Friedmann; O átomo primordial de Lemaître e o modelo proposto por Gamow; A descoberta da expansão do Universo e os prêmios Nobel ao longo da pesquisa sobre o Big Bang.*

Diante dessa perspectiva, uma possível **questão** relevante que essa pesquisa busca responder é: como divulgar e levantar questões no ensino de Física relacionadas à Astronomia e Astrofísica e conceitos de FMC, por meio de uma perspectiva histórica? Como **hipótese**, propõe-se um trabalho com foco no desenvolvimento de tópicos de Astronomia, Astrofísica e FMC no contexto histórico da teoria do Big Bang. Dessa forma, busca-se utilizar a História da Ciência para promover o ensino de Física e despertar nos alunos o interesse para temas relacionados aos tópicos sugeridos. Além disso, procura-se desenvolver materiais sobre o tema de ensino para promover a divulgação científica. Uma maneira de implementar e analisar a questão proposta, bem como fundamentar a hipótese sugerida, ocorre por meio da formulação de um curso que possibilite a produção de material de divulgação científica para mídias sociais por alunos e bolsistas de Iniciação Científica (IC's), do ensino básico.

O projeto é oriundo de uma pesquisa de um aluno de pós-graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da UFSC, campus Araranguá e está sendo desenvolvido com a parceria do IFScience - Grupo de Divulgação Científica desenvolvido por professores e alunos do IFSC - Câmpus Araranguá.

OBJETIVO

A fim de encontrar possíveis resultados consistentes e que façam sentido diante do problema de pesquisa e a hipótese sugerida, destaca-se como **objetivo** geral ensinar Astronomia, Astrofísica e FMC por meio da perspectiva histórica do centenário da teoria do Big Bang, desenvolvendo um produto educacional para o Ensino de Física sobre o tema de pesquisa.

Os demais tópicos constituem os **objetivos específicos** do projeto: (i) Desenvolver e utilizar uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) sobre o tema do projeto para aulas voltadas ao ensino médio (ii) Construir um material paradidático para o ensino de Astronomia, Astrofísica e FMC por meio da perspectiva histórica do centenário da teoria do Big Bang; (iii) Implementar o produto, promovendo um curso para o ensino médio para desenvolver a pesquisa de acordo com referencial teórico e epistemológico escolhido; (iv) Solicitar às alunas do ensino médio, bolsistas de Iniciação Científica (IC's) do IFscience, a produção de material de divulgação científica sobre o tema das aulas; (v) Buscar encontrar indícios de aprendizagem significativa ao final da implementação da UEPS e desenvolvimento do material por parte das alunas e IC's do ensino médio; (vi) Disponibilizar todo o material produzido para as aulas, bem como a UEPS em um site na rede mundial de computadores; (vii) Avaliar e publicar o material de divulgação científica desenvolvido pelas alunas de ensino médio, disponibilizando textos, infográficos, *layouts* e vídeos para o Instagram, Youtube e Tik Tok e no site para acesso aos materiais produzidos para as aulas; (viii) Produzir conteúdo em forma de artigo a ser publicado em revista, com o tema do projeto de pesquisa.

METODOLOGIA

O processo de elaboração da sequência didática e sua implementação envolve nove etapas: (i) Escolha do tema; (ii) Revisão Bibliográfica; (iii) Construção de uma UEPS para aulas no ensino médio sobre o tema; (iv) Desenvolvimento de um texto paradidático e demais materiais, como slides, infográficos, resumos, vídeos e exercícios sobre o tema de pesquisa; (v) Implementação do curso ou aplicação do produto; (vi) Avaliação do curso; (vii) Construção de material de divulgação científica pelas alunas e IC's do ensino médio; (viii) Avaliação do material de divulgação científica produzido pelas alunas e IC's do ensino médio; (ix) Publicação do material produzido para as aulas e do material elaborado pelos

alunos do ensino médio. Na etapa (i) foi feita a escolha do tema, que completou seu centenário e mostra sua relevância dada à importância de sua contribuição para a Ciência e os avanços que a teoria do Big Bang possibilitou na Cosmologia. Durante a etapa (ii), houve a revisão bibliográfica sobre trabalhos que pudessem contribuir para o desenvolvimento do projeto de pesquisa, bem como ressaltar o ineditismo da proposta. Essa parte envolveu a leitura de textos, artigos e livros sobre o tema. Na etapa (iii) houve o desenvolvimento de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para utilização em sala com alunos do ensino médio, buscando fundamentar o trabalho de acordo com um aporte metodológico consistente em termos educacionais. A etapa (iv) consistiu em elaborar um texto paradidático para o ensino dos conceitos de Física sobre a teoria do Big Bang, envolto em seus aspectos históricos e epistemológicos. A produção do texto paradidático viabiliza a abordagem do assunto e ressalta a importância das etapas anteriores, (ii) e (iii), pois permite a construção de materiais para as aulas e um texto de divulgação científica acerca do assunto. A etapa (v) consiste na aplicação do produto ou implementação do curso, utilizando os materiais elaborados nas etapas (iii) e (iv). A escola na qual foi e está sendo realizada a implementação das aulas foi o Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá.

A etapa seguinte, (vi), se trata da avaliação dos encontros, na qual os elementos desenvolvidos ao longo da proposta de aulas serão avaliados com base na teoria de Strauss. Para tanto, depois do curso, as alunas e IC's do ensino médio irão produzir material de divulgação científica e publicar os resultados, que serão avaliados para um panorama geral do curso, complementando as etapas (vii) e (viii). Na etapa (ix) a produção deste material será supervisionada e orientada para que os temas sejam selecionados de maneira organizada e de acordo com a ordem cronológica dos fatos históricos, para que possam ser publicados nas plataformas sugeridas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado do projeto, até o momento, foi um curso acerca do centenário da teoria do Big Bang para alunos do ensino médio. A partir do curso, os alunos já começaram a produzir material de divulgação científica das mais diversas formas, utilizando o laboratório de mídias. Serão elaborados pelos próprios alunos: textos, infográficos, *layouts* e vídeos para o Instagram, Youtube e Tik Tok. De acordo com Silva e Almeida (2005, p.6), a divulgação científica representa um espaço de interlocução que extrapola os circunscritos círculos de leitores especialistas capacitados a compreenderem *papers* de sua própria e restrita área de

trabalho. Essa abordagem aproxima e viabiliza o desenvolvimento da pesquisa acadêmica com a comunidade externa, além de fomentar o interesse e o acesso à Ciência para o público geral. Sendo assim, a produção de material, por conta dos discentes e a disponibilidade de acesso ao público, reforçam os laços do tripé entre Ensino, Pesquisa e Extensão, pois aproxima o público do conhecimento desenvolvido na universidade e promove o interesse pelo aprendizado e acesso a conteúdo *de e sobre* Ciência.

REFERÊNCIAS

AUSUBEL, D. P., NOVAK, J. D. e HANESIAN, H. **Psicologia educacional** (trad. de Eva Nick et al.) Rio, Interamericana, 1980. 625 p.

BAGDONAS, Alexandre et al. Discussões sobre a natureza da ciência em um curso sobre a história da astronomia. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, n. 9, p.17-31, 2010.

DA SILVA, Marcos Rodrigues; LANGHI, Rodolfo. Formação de professores para o ensino de astronomia: efeitos de sentido sobre a prática. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 209-224, 2021.

FEYERABEND, Paul K. **Contra o método**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1989.

MOREIRA, Marco Antonio. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. **Revista do Professor de Física**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2017.

SILVA, H. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. O deslocamento de aspectos do funcionamento do discurso pedagógico pela leitura de textos de divulgação científica em aulas de Física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**. vol. 4. n. 3. 2005.

