

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**DEPARTAMENTO DE FILOSOFIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA**

Joanne Simon Flausino

**INCONSISTÊNCIAS EM CIÊNCIA**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Filosofia, como requisito  
para obtenção do grau de  
Mestre em Filosofia.

Orientador Prof. Dr. Décio  
Krause

Florianópolis  
2014



## RESUMO

Nos últimos anos, muitos filósofos da ciência (Lakatos 1978, Feyerabend 1988, Priest 1987, da Costa e French 2003, da Costa e Krause 2011) defenderam que certas teorias científicas são extremamente úteis e bem sucedidas, apesar de serem inconsistentes. Esta dissertação de mestrado procura analisar diversas formas de inconsistências em teorias científicas, tornando precisos os vários (e muitas vezes não equivalentes) conceitos de "inconsistência". O trabalho destaca o modo como inconsistências aparecem, ou podem aparecer, em diversos estágios na elaboração de uma teoria científica, pois para começarmos a falar sobre inconsistências em ciência – ou inconsistências em teorias científicas – precisamos assumir uma postura sobre o que são teorias, ou como elas deveriam ser concebidas, para assim avaliar casos de inconsistências em ciência de modo adequado. Todavia, apesar de parecer à primeira vista algo a ser evitado, nós poderíamos e deveríamos ir além e estudar teorias científicas inconsistentes (Bueno 2006). O passo crucial a ser tomado neste estudo é a mudança da lógica subjacente a teorias científicas inconsistentes. Assim, ao adotarmos, por exemplo, uma lógica paraconsistente, abarcamos a inconsistência evitando a trivialidade e proporcionando uma análise sem a perda de dados científicos importantes. Além disso, às vezes a única maneira de obtermos novos dados de um fenômeno científico é através de uma teoria inconsistente. A Teoria do Átomo de Bohr, por exemplo, apesar de inconsistente estabeleceu previsões corretas quanto ao comprimento de onda das linhas de emissão do espectro de hidrogênio. Desta forma, levando em conta os avanços sobre o entendimento das bases lógicas da ciência, o abandono de teorias científicas inconsistentes já não nos parece ser mais algo viável, já que algumas dessas nos ajudam a entender melhor certos aspectos científicos; assim, parece-nos no mínimo sensato investigar inconsistências em ciência.

**Palavras-chave:** Inconsistência, Teorias Científicas, Lógica Paraconsistente, Teoria do Átomo de Bohr.



## ABSTRACT

In the last years, many philosophers of science (Lakatos 1978, Feyerabend 1988, Priest 1987, da Costa e French 2003, da Costa e Krause 2011) argued that certain scientific theories are extremely useful and well succeeded, although inconsistent. This master's thesis is willing to analyze the various forms of inconsistencies in scientific theories, making accurate the many (and often not equivalent) concepts of "inconsistency". This work stand out the way inconsistencies appear, or may appear, in different stages in the development of a scientific theory, as to begin to deal with inconsistencies in science – or inconsistencies in scientific theories - we need to assume an attitude about what scientific theories are, or how they should be conceived, to thereby evaluate cases of inconsistencies in science in a proper way. However, although at first it seems something to be avoided, we could and should go further and study inconsistent scientific theories (Bueno 2006). The crucial step to be taken in this study is the shift of the underling logic of the inconsistent theories. Therefore, adopting, for example, a paraconsistent logic, we embrace the inconsistency avoiding the triviality and providing an analysis without losing important scientific data. Besides, sometimes the only way to get new data from a scientific phenomenon is through an inconsistent theory. The Bohr's Atom Theory, for example, despite inconsistent, established correct predictions regarding the wave length of the emission lines of the hydrogen spectrum. Thus, taking into account the progress of the understanding of the logical basis of science, the abandonment of inconsistent scientific theories no longer seems to be something practicable, since some of this help us to better understand certain scientific aspects; thereby, it seems at least reasonable to investigate inconsistencies in science.

**Keywords:** Inconsistency. Scientific Theories. Paraconsistent Logic. Bohr's atom Theory.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>INCONSISTÊNCIAS EM CIÊNCIA.....</b>	<b>17</b>
2.1	O QUE É UMA INCONSISTÊNCIA?.....	17
2.2	INCONSISTÊNCIAS EM CIÊNCIA: UM PANORAMA GERAL .....	18
2.3	O QUE É UMA TEORIA CIENTÍFICA? .....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Sobre a teoria e suas abordagens .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Abordagens, axiomatizações e modelos.....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>INCONSISTÊNCIAS E INCONSISTÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>
3.1	INCONSISTÊNCIAS NA REALIDADE VELADA.....	39
<b>3.1.1</b>	<b>Exemplos clássicos.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.2</b>	<b>O problema de sentenças de verdades-inelimináveis....</b>	<b>44</b>
3.2	INCONSISTÊNCIAS NA REALIDADE EMPÍRICA.....	48
3.3	INCONSISTÊNCIAS NO MODELO MATEMÁTICO.....	49
3.4	INCONSISTÊNCIAS NA TEORIA.....	50
3.5	INCONSISTÊNCIAS NO MODELO E QUASE- VERDADE.....	51
<b>4</b>	<b>A PERSPECTIVA INCONSISTENTE.....</b>	<b>55</b>
4.1	LÓGICAS PARACONSISTENTES.....	55
4.2	INCONSISTÊNCIAS NA ESFERA EPISTÊMICA.....	62
4.3	INCONSISTÊNCIA, PARACONSISTÊNCIA E VERDADE.....	69
<b>5</b>	<b>ESTUDOS DE CASOS.....</b>	<b>81</b>
5.1	CORPO NEGRO.....	81
5.2	ÁTOMO DE BOHR.....	87
<b>5.2.1</b>	<b>Sobre a teoria de Bohr e seus resultados.....</b>	<b>98</b>
5.3	PRINCÍPIO DE COMPLEMENTARIDADE.....	106
<b>5.3.1</b>	<b>Comportamento corpuscular da luz.....</b>	<b>106</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Comportamento ondulatório da luz.....</b>	<b>108</b>
<b>5.3.3</b>	<b>A construção da mecânica quântica.....</b>	<b>109</b>
<b>5.3.4</b>	<b>O princípio de incerteza.....</b>	<b>110</b>
<b>5.3.5</b>	<b>Origens e a consequência do princípio de incerteza.....</b>	<b>112</b>
<b>5.3.6</b>	<b>A interpretação probabilística.....</b>	<b>113</b>
<b>5.3.7</b>	<b>O princípio de complementaridade.....</b>	<b>116</b>
<b>5.3.8</b>	<b>A lógica da complementaridade.....</b>	<b>119</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>139</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>145</b>







## 1 INTRODUÇÃO

O problema de se trabalhar com teorias científicas inconsistentes é um tema certamente relevante dentro da filosofia da ciência e da lógica. É evidente, pela bibliografia recente (Vickers 2013), que a questão sobre a existência de inconsistências em ciência ainda é discutida dentro da filosofia. Ao constatarmos a existência de inconsistências de diferentes naturezas nas disciplinas científicas, interessa-nos estudar como acomodá-las na prática científica, já que, através da lógica clássica, se tivermos um conjunto de premissas inconsistentes, isto é, um conjunto tal que duas dessas premissas sejam contraditórias (este tipo de inconsistência denominaremos “inconsistência formal”), então a teoria acarretará qualquer sentença bem formada de sua linguagem. Como se pode perceber, o resultado da junção de inconsistência formal e lógica clássica é desastroso. O conjunto de premissas inconsistentes “explode” e torna a teoria, da qual estas premissas fazem parte, trivial. Entretanto, ao adotarmos como hipótese um enfoque lógico não-clássico, tornar-se-á possível trabalharmos com teorias inconsistentes de modo não-trivial. Depois disso, através de uma abordagem calcada em uma lógica não-clássica, estudaremos quais possibilidades existem para evitar o advento da trivialidade dentro de uma teoria científica. Portanto, levando em consideração a existência de várias teorias reconhecidas como sendo exemplos paradigmáticos de teorias inconsistentes, como a Teoria do Átomo de Bohr, parece-nos relevante um exame crítico das inconsistências encontradas na ciência, pois através dele podemos verificar a importância desse tema dentro da filosofia da ciência – e também da lógica –, o que provavelmente nos ajudará a compreender melhor as teorias científicas e o avanço da ciência.

Quando os cientistas notam uma inconsistência em uma teoria científica<sup>1</sup>, eles tendem a cessar todas as experiências designadas a testar sua veracidade, pois, dado que é contraditória, supõem de antemão que a teoria não pode ser verdadeira. Desse modo, se assumirmos que os cientistas estão preocupados com a verdade, parece que algo precisa ser modificado na teoria a fim de que ela possa continuar a ser sustentada. Esse tipo de atitude perante teorias científicas inconsistentes baseia-se na intuição de que a presença de uma contradição numa teoria indica que há algo de errado com ela. Sob uma perspectiva lógica, essa

---

<sup>1</sup> Restringiremos nosso discurso apenas a teorias científicas no campo da física.

intuição parece estar apoiada na lógica clássica, na qual vale a chamada “lei da explosão”, a qual, *grosso modo*, afirma que de uma contradição tudo se segue. Explicitaremos abaixo com maior precisão em que consiste tal lei. Para já, cabe-nos ressaltar que a intuição supracitada é partilhada, por exemplo, pelo filósofo da ciência Karl Popper:

Se fossemos aceitar contradições, então deveríamos desistir de qualquer tipo de atividade científica: isto significaria o completo colapso da ciência. Isto pode ser mostrado pela prova de que se duas proposições contraditórias são admitidas, qualquer proposição deve ser admitida; pois de duas proposições contraditórias qualquer proposição pode ser inferida de forma válida... Uma teoria que envolve uma contradição é assim inteiramente inútil como teoria. (POPPER, 1940, p. 48)

Apesar da colocação de Popper, nos últimos anos tem sido crescente o número de alegações de que cientistas às vezes trabalham com teorias científicas inconsistentes, mesmo conscientes disto, e que tais teorias podem ser extremamente úteis (Da Costa e French, 2003). Segundo Shapere (1984) e Feyerabend (1978), por exemplo, inconsistências podem existir e, de fato, existem em ciência, sem destruir o empreendimento científico ou mesmo afetá-lo. Destarte, se concordamos com a hipótese de que cientistas e filósofos não rejeitam, ou não deveriam rejeitar, teorias científicas inconsistentes, o que deveríamos fazer quando nos deparamos com uma teoria científica desse tipo?

Uma resposta para essa pergunta surge através do desenvolvimento da lógica. Em 1948, Jaskowski citou a presença de inconsistências em teorias científicas como uma motivação para o desenvolvimento de lógicas paraconsistentes – lógicas em que a preciosa lei de não-contradição de Aristóteles é revogada, juntamente com certas regras de inferência. Assim, uma resposta plausível à questão acima é que deveríamos adotar uma lógica paraconsistente a fim de que possamos continuar a trabalhar com teorias científicas inconsistentes, sem que se gere a chamada “explosão lógica”, provinda da lógica clássica.

Para compreender em que consiste a explosão lógica é preciso, em primeiro lugar, explicitar a noção de inconsistência com a qual estamos trabalhando. Quando utilizamos uma linguagem lógica,

dizemos que uma teoria (um conjunto de fórmulas fechado por dedução) é inconsistente se ela tem duas teses (teoremas) contraditórias,  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  (onde  $\alpha$  é uma fórmula da linguagem da teoria e  $\neg$  é o seu símbolo de negação); caso contrário, ela é consistente. Na maioria dos casos, quando há teses contraditórias, o sistema também tem sua conjunção como tese, a saber, a expressão  $\alpha \wedge \neg\alpha$ , uma contradição.

Feitas essas considerações, podemos passar a explicação da lei da explosão ou “lei de Scotus”. Nota-se frequentemente que há sistemas lógicos em que, a partir de duas proposições  $\alpha$  e  $\beta$ , não é lícito inferir a conjunção  $\alpha \wedge \beta$ . Contudo, a maioria dos sistemas lógicos usuais são adjuntivos neste sentido e, se a teoria for inconsistente, qualquer sentença bem formada de sua linguagem pode ser provada, devido à lei de Scotus (que pode ser formalmente apresentada do seguinte modo:  $(\alpha \wedge \neg\alpha) \rightarrow \beta$ , para  $\beta$  qualquer) que “explode” o sistema levando-o à trivialidade.

O desenvolvimento de lógicas paraconsistentes tem se tornado um empreendimento grandioso. Em particular, temos a esplêndida contribuição do Professor Newton da Costa, que vem desenvolvendo vários sistemas paraconsistentes desde os anos cinquenta (da Costa 2007). Como podemos perceber, nos dias atuais inconsistências não são um inferno ou anarquia científica para serem evitadas a qualquer custo.

Existem razões para tomarmos seriamente o estudo de teorias científicas inconsistentes. Primeiramente, precisamos ser cuidadosos e examinar os custos envolvidos ao trabalharmos com esse tipo de teoria. Um desses custos é a trivialidade. Como vimos, uma acusação comum feita a teorias científicas inconsistentes é que, se assumirmos como lógica subjacente a clássica, elas serão triviais; ou seja, tudo se seguirá de tais teorias. Desse modo, essas teorias inconsistentes careceriam de utilidade, pois supostamente não poderiam ser base para qualquer desenvolvimento científico. Este é o principal apontamento contra inconsistências e é uma das razões pelas quais a palavra “inconsistência” carrega sua má fama.

Outra razão pela qual as teorias científicas inconsistentes são consideradas cientificamente duvidosas é o fato de que, ao menos intuitivamente, ontologicamente falando, acreditamos que não existam inconsistências verdadeiras na realidade. Desse modo, se inconsistências não podem ser verdadeiras neste sentido, ou pelo menos não completamente verdadeiras, não existem fundamentos para pensarmos que tais teorias são confiáveis. Afinal, se nenhuma teoria científica inconsistente sobre o mundo pode ser verdadeira, nenhuma teoria

científica inconsistente é verdadeira, mesmo a longo prazo. Além disso, não saberíamos como chegar à consistência via inconsistência, já que como teorias científicas inconsistentes são triviais (via lógica clássica) não saberíamos quais partes de tal teoria preservar para um futuro desenvolvimento de uma teoria consistente. Dada a trivialidade (novamente, sob a ótica clássica) não teríamos como explorar consequências adicionais de uma maneira informativa, pois tudo se seguiria dessa teoria. Sob estas circunstâncias, teorias científicas inconsistentes não parecem ser convenientes.

As acusações vistas podem ser combatidas se adotarmos um *framework* adequado em que os custos encontrados ao trabalharmos com inconsistências se transformarão em benefícios quando as acomodarmos apropriadamente. Assim, ao examinarmos com seriedade teorias científicas inconsistentes, vários benefícios podem surgir. Notemos que examinar seriamente não significa considerar teorias científicas inconsistentes como verdadeiras, mas sim tomá-las como empiricamente adequadas e/ou quase-verdadeiras (a noção de quase-verdade será explicada adiante). De um ponto de vista pragmático, podemos simplesmente considerá-las com propósitos de investigação científica e/ou tomá-las como ferramentas para previsões sobre dados de fenômenos científicos.

Assim, neste trabalho começamos nosso estudo procurando identificar o que são inconsistências e como essas aparecem em diversos estágios da elaboração de teorias científicas. Uma vez constatada a existência de inconsistências de diferentes naturezas nas disciplinas científicas, interessa-nos estudar como acomodá-las na prática científica. O principal problema que investigamos no presente trabalho pode então ser colocado da seguinte maneira: é possível trabalhar com teorias científicas inconsistentes sem que estas se tornem triviais? Para resolver este problema, precisamos explicitar rigorosamente o que é uma inconsistência e onde esta aparece em uma teoria científica, bem como investigar as relações entre inconsistências e contradições.

Trabalhamos com a hipótese de que um enfoque não-clássico tornará possível o trabalho com teorias inconsistentes de modo não-trivial. Depois disso, através de uma abordagem calcada em uma lógica não-clássica, estudaremos quais possibilidades podem existir para evitar o advento da trivialidade dentro de uma teoria científica. Será discutida a implementação de uma lógica paraconsistente para a resolução de certos problemas em teorias inconsistentes, seguindo uma linha crítica quanto a diferentes abordagens que se dão a teorias inconsistentes.

Apresentamos um esquema mostrando que inconsistências podem ser encontradas em vários estágios no desenvolvimento de uma teoria científica. Dentro desse esquema foram encontrados quatro níveis onde as inconsistências são tratadas de modos distintos: o nível do que chamamos de Realidade Velada, o da Realidade Empírica, as inconsistências que aparecem no que denominamos de Modelo Matemático e na própria Teoria científica. Analisamos as consequências de se encontrarem inconsistências em cada um desses estágios, que serão explicados no que se segue.

Como tema correlato, adentramos superficialmente à teoria do dialeteísmo. Expusemos exemplos, e através deles fizemos uma crítica a esta filosofia que acredita que existem “contradições verdadeiras no mundo”.

Além disso, preocupamo-nos com o conflito epistemológico que cientistas que trabalham com teorias inconsistentes encontram ao desenvolverem suas teorias. Expusemos motivos para apoiar a ideia de que teorias inconsistentes não devem ser evitadas.

Por fim, podemos justificar o desenvolvimento do presente trabalho, já que existem várias teorias reconhecidas como sendo exemplos paradigmáticos de teorias inconsistentes. Serão apresentados três estudos de caso: Teoria do Corpo Negro, Teoria do Átomo de Bohr e o Princípio de Complementaridade. Estas teorias mesmo sendo consideradas inconsistentes, ajudaram os cientistas a entenderem melhor o funcionamento de certos fenômenos físicos. Por meio de teorias inconsistentes, muito foi alcançado dentro do âmbito científico e é também trabalho do filósofo da ciência investigar estas teorias de modo rigoroso. Nesse sentido, pode-se visualizar a importância desse tema para entender melhor o progresso na ciência.



## 2 INCONSISTÊNCIAS EM CIÊNCIA

### 2.1 O QUE É UMA INCONSISTÊNCIA?

Inconsistente é um adjetivo que significa: “não permanecer o mesmo no comportamento ou qualidade.”<sup>2</sup> (*Oxford English Dictionary online*, tradução nossa), enquanto consistente significa: “de acordo com outros fatos ou com comportamento típico ou anterior, ou ter os mesmos princípios que qualquer outra coisa”<sup>3</sup> (*Oxford English Dictionary online*, tradução nossa). De acordo com o dicionário filosófico Runes, a palavra inconsistência – quando aplicada a sistemas formais (lógicos) – significa: “o oposto de consistência”<sup>4</sup> (Runes, 1942, p.100, tradução nossa); mais precisamente segundo Alonzo Church: “Um conjunto de funções proposicionais é inconsistente se existe alguma função proposicional tal que sua conjunção implica formalmente tanto a própria como sua negação.”<sup>5</sup> (Church, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 4, tradução nossa). Assim, como podemos dizer informalmente que uma pessoa é inconsistente se ela constantemente muda suas crenças, ou que crianças e políticos são inconsistentes, o conceito requer significado mais preciso quando no âmbito dos logicamente bem desenvolvidos sistemas matemáticos.

Podemos distinguir inconsistências entre aquelas que aparecem dentro de sistemas formais - as inconsistências formais - e aquelas chamadas de inconsistências informais.

As inconsistências formais aparecem quando temos fórmulas  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  em um sistema formal adequado cuja linguagem contém um símbolo de negação,  $\neg$ . Em princípio, constituem teoremas das teorias paraconsistentes da lógica e da matemática paraconsistentes. As inconsistências informais podem ser classificadas de duas formas: as reais e as semióticas. As inconsistências informais semióticas são aquelas que expressam incompatibilidades entre conceitos, asserções, hipóteses, teorias; e surgem em contextos racionais, como contextos científicos por fatores sintáticos, semânticos ou de natureza pragmática

---

<sup>2</sup>“Not staying the same behavior or quality.” (*Oxford English Dictionary online*)

<sup>3</sup>“In agreement with other facts or previous behavior, or having the same principles as something else.” (*Oxford English Dictionary online*)

<sup>4</sup>The opposite of consistency.” (Runes, 1942, p.100)

<sup>5</sup>[a] set of propositional functions is inconsistent if there is some propositional function such that their conjunction formally implies both it and its negation”. (Church, *apud* da Costa e Krause, 2008, p. 4)

e não correspondem a nenhuma contradição real. Exemplos dessas inconsistências são o paradoxo do mentiroso e o paradoxo de Zenão de Eléia. As inconsistências informais reais tratam de contradições verdadeiras em sentido estrito, refletindo traços da realidade, referindo-se a estados de coisas reais. Existem filósofos que possuem a crença de que existem “contradições verdadeiras” no mundo. (da Costa e Krause, 2011, p.1). Notemos que não se enquadra como tarefa da lógica, sozinha, decidir se o mundo é consistente ou não. Existem sistemas lógicos que acarretam a existência de contradições reais através de seus postulados. Todavia, a aplicabilidade de sistemas lógicos aos seus contextos é dada por princípios pragmáticos da razão (da Costa, 2008, p. 233).

As inconsistências informais semióticas podem ser divididas em sistemáticas e essenciais. As sistemáticas surgem em contextos científicos e poderiam ser, supostamente, eliminadas por meio de adaptações e reformulações *ad hoc*; através da via clássica algo indispensável. Quanto às essenciais, não podemos afirmar positivamente sobre sua existência, pelo menos não no estado atual científico. Entretanto, podemos constatar que as contradições que aparecem em contexto científico têm sido eliminadas, e a lógica clássica vem sendo mantida no domínio das ciências empíricas. Todavia, também, percebemos, que há muito, somos ameaçados por diversas contradições advindas de crises na ciência. Ao almejarmos precisão lógica, encontramos-nos presos a métodos cujos fundamentos são imprecisos do ponto de vista estritamente lógico.

Dentro da ciência acreditamos que possamos ter inconsistências informais semióticas quando uma teoria em questão ainda não está completamente axiomatizada e inconsistências formais dentro da teoria formalizada. É razoável afirmar que estas inconsistências informais de natureza semiótica são verdadeiras, mas é contestável que reflitam propriedades ontológicas do mundo real, em sentido estrito. Voltaremos a este assunto no capítulo 3.

## 2.2 INCONSISTÊNCIAS EM CIÊNCIA: UM PANORAMA GERAL

David Hilbert em 1900 no congresso internacional de matemática de Paris apresentou uma lista de 10 problemas<sup>6</sup>. Um desses problemas era o de saber como axiomatizar todas as teorias físicas. Este problema

---

<sup>6</sup> Posteriormente essa lista foi acrescentada de 13 problemas para formar a famosa lista de 23 problemas matemáticos de Hilbert.

salientou a relevância da análise fundacional de teorias físicas. Muito foi feito com este intuito durante o século XX e as contrapartes matemáticas de teorias físicas foram estudadas exaustivamente com riqueza de detalhes. Hoje, a principal forma de estudar os fundamentos de uma teoria física é axiomatizá-la, explicitando sua estrutura lógico-matemática subjacente. Esta forma logicamente disciplinada de abordarmos o estudo fundacional de teorias físicas nos proporciona analisar características por vezes despercebidas; como, por exemplo, uma inconsistência.

Uma teoria formal  $T$ , cuja linguagem contém o símbolo de negação ( $\neg$ ) é inconsistente se tiver duas fórmulas contraditórias. Assim, se a lógica subjacente for adjuntiva (quando temos duas fórmulas  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  sempre podemos fazer a conjunção das duas nos levando à fórmula  $\alpha \wedge \neg\alpha$ ), a teoria  $T$  possui também a conjunção de duas fórmulas, as quais são uma a negação da outra, ou seja, uma contradição. Na maioria dos sistemas lógicos inconsistentes, qualquer sentença bem formada pode ser provada, devido à lei de Scotus (que pode ser formada desta forma:  $\alpha \wedge \neg\alpha \rightarrow \beta$ , para  $\beta$  qualquer) que “explode” o sistema levando-o à trivialidade. A constatação deste fato, à luz da lógica clássica, é simples. Suponha a derivação abaixo, na qual uma fórmula arbitrária  $\beta$  é derivada de duas premissas contraditórias,  $\alpha \wedge \neg\alpha$ :

- a)  $\alpha$  premissa
- b)  $\neg\alpha$  premissa
- c)  $\alpha \wedge \neg\alpha$  conjunção
- d)  $\alpha \wedge \neg\alpha \rightarrow \beta$  tese da lógica clássica
- e)  $\beta$  c) e d) por Modus Ponens

Não é necessário haver contradição para que haja inconsistência, para isso é suficiente que existam duas teses ou asserções contraditórias. Na prática científica, a maioria das teorias é apresentada informalmente, isto é, o método axiomático não é utilizado. Teorias informais são usualmente imprecisas, repletas de ambiguidades e noções relevantes que não são evidenciadas; por isso, acreditamos que o ideal seria a apresentação formal de uma teoria. Entendemos por *formal* uma teoria que contém uma linguagem, uma lógica subjacente e seus postulados explicitamente estabelecidos – onde por “postulados” entendemos seus axiomas ou esquemas de axiomas e regras de inferência.

A prática científica se dá no âmbito informal; assim, o que geralmente encontramos são suposições e equações, que se portam, respectivamente, como esquemas de axiomas e postulados de uma teoria. Além disso, cabe ressaltar que dentro de uma teoria normalmente não encontramos conceitos primitivos e os seus postulados não são claramente apresentados.

Formalmente, uma teoria  $T$  cuja linguagem possua um símbolo de negação é *inconsistente* se nela se pode derivar uma fórmula e a negação dessa fórmula (duas fórmulas contraditórias) como teoremas. Se a lógica subjacente a  $T$  for adjuntiva, sempre se pode formar a conjunção de duas formulas quaisquer e neste caso na teoria pode-se derivar uma contradição como teorema, que consiste na conjunção de uma fórmula e de sua negação.

Uma teoria  $T$  diz-se *trivial* se todas as fórmulas expressas na linguagem de  $T$  podem ser derivadas em  $T$ . Se a lógica subjacente à  $T$  for uma lógica clássica, ou a maioria das lógicas usuais, como a intuicionista, inconsistência implica trivialidade e vice-versa. De interesse filosófico são teorias inconsistentes, mas não triviais; tais teorias são chamadas de *teorias paraconsistentes*.

No entanto, se o problema for simplesmente o de evitar a trivialização da teoria, há outros fatores envolvidos. Isto porque podemos mostrar a trivialidade de certas teorias mesmo sem recorrermos à noção de negação. Um típico exemplo é dado pelo chamado paradoxo de Curry. (da Costa et al. 1998, p. 7).

O que se passa é o seguinte: Admitamos uma teoria  $T$  que encerra o Axioma de compreensão seguinte:

$$1) \exists y \forall x (x \in y \leftrightarrow F(x))$$

onde  $F(x)$  é uma fórmula qualquer na qual  $x$  figura livre. Chamaremos o conjunto dado pelo axioma de  $C$ .

$$2) \forall x (x \in C \leftrightarrow F(x))$$

E definimos  $F(x) \leftrightarrow C \in C \rightarrow \beta$  onde  $\beta$  é uma fórmula qualquer. Logo,

$$3) \forall x (x \in C \leftrightarrow (C \in C \rightarrow \beta))$$

Portanto,

$$4) C \in C \leftrightarrow (C \in C \rightarrow \beta)$$

Logo, temos

$$5) (C \in C \rightarrow \beta) \rightarrow C \in C$$

Mas, da lógica proposicional clássica temos:  
 $(A \rightarrow (A \rightarrow B)) \rightarrow (A \rightarrow B)$  (Lei da Contração). Ou seja,

$$6) (C \in C \rightarrow (C \in C \rightarrow \beta)) \rightarrow (C \in C \rightarrow \beta)$$

De (4) e (6) por Modus Ponens,

$$7) C \in C \rightarrow \beta$$

De (5) e (7) por Modus Ponens,

$$8) C \in C$$

De (7) e (8) por Modus Ponens.

$$9) \beta$$

Isto mostra que se T envolver (1), ela pode ser trivializada mesmo sem conter negação. Pode-se então prosseguir de um dos seguintes modos: alterar (1), como fez Zermelo, que substituiu (1) pelo chamado Esquema de Axiomas de Separação (Krause 2002), ou manter (1) e alterar a lógica subjacente a T, por exemplo, assumindo uma lógica paraconsistente (da Costa et al. 1998).

Além disso, cabe ressaltar que dentro de uma teoria normalmente não encontramos conceitos primitivos e os seus postulados não são claramente apresentados. Por exemplo, numa teoria informal as noções de “negação” e “dedução” não são explicitamente declaradas. Um caso em que isso ocorre é o das teorias físicas, as quais, enquanto mantidas informais, não apresentam sequer um conceito preciso de negação ou de dedução. Geralmente, utiliza-se lógica e matemática de maneira informal, empregando esses conceitos como se estivessem claros para o leitor (da Costa e Krause, 2008, p. 4).

Reescrevendo a definição dada acima, dizemos que uma teoria (um conjunto de fórmulas fechado por dedução) é inconsistente se ela tem duas teses (teoremas) contraditórias,  $\alpha$  e  $\neg\alpha$ , e é consistente caso contrário, onde  $\alpha$  é uma fórmula (da linguagem) da teoria e  $\neg$  é o símbolo de negação da teoria. Na maioria dos casos, quando há teses contraditórias, o sistema também tem sua conjunção como tese, a saber, a expressão  $\alpha \wedge \neg\alpha$ , uma contradição. Acreditamos ser melhor colocar a definição desta forma, pois há sistemas lógicos onde duas proposições  $\alpha$  e  $\beta$  não inferem uma conjunção  $\alpha \wedge \beta$ , assim, nem sempre uma teoria inconsistente contém uma tese que é uma contradição em sentido estrito, bastando conter duas teses contraditórias. Entretanto a maioria dos sistemas lógicos usuais é adjuntivo neste sentido.

Uma lógica paraconsistente é aquela lógica que quando usada subjacentemente a teorias inconsistentes – que contêm teses contraditórias como  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  – faz com que estas teorias não se tornem triviais, havendo fórmulas que não são teoremas na teoria. Uma lógica paraconsistente também pode ser muito útil se pretendermos juntar duas teorias (talvez incompatíveis)  $T_1$  e  $T_2$  para sistematizar uma nova teoria  $T$  (levando em consideração que suas linguagens e conceito de dedução devam ser tratados adequadamente).

Dentro de sistemas formais podemos ter contradições, mas é difícil dizer se estas contradições se dão no âmbito do *real* sem uma discussão detalhada deste conceito. No próximo capítulo veremos um esquema que nos mostrará onde aparecem inconsistências e também discutiremos sobre a “realidade” das contradições.

Lógicas paraconsistentes têm grande utilidade nos dias de hoje, elas são úteis como ferramentas matemáticas, que servem para formulação de diferentes perspectivas sobre certos domínios do conhecimento. (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 874). Há muitas aplicações em tecnologia, medicina, computação e em outras áreas. Na maioria das vezes, cientistas não trabalham com sistemas formais, nem respeitando as regras formais de dedução de certa lógica subjacente, e assim por diante. Eles se utilizam de várias formas alternativas de raciocínio em sua atividade intelectual, como raciocínio indutivo, abduutivo, formas não-monotônicas de raciocínio, entres outras, quando formulam hipóteses e teorias, apesar de que, pelo menos idealmente, suas teorias devam estar de acordo com a lógica clássica, ou pelo menos é assim que eles parecem pensar.

Ao tentarmos lidar com a ciência informal, para tentar implementar certas teorias em sistemas formais, depararíamos-nos provavelmente com sistemas inconsistentes, que abrangeriam várias

outras teorias auxiliares e concepções incompatíveis entre si quando colocadas “lado a lado”. Contudo, o que foi dito não implica que contradições realmente existam, mas somente que são concepções incompatíveis quando colocadas “lado a lado”. Se argumentarem que tal procedimento é incoerente, levando a inconsistências, podemos empregar uma lógica paraclássica, como será feito no capítulo cinco. (da Costa e Krause, 2008, p. 8).

Um amplo campo de conhecimento empírico pode ser teoricamente entendido de diferentes pontos de vista ou perspectivas, cada uma delas capturando uma parte do campo e de certo ponto de vista. Geralmente cada uma dessas perspectivas é influenciada pelo cientista que as têm devido as suas habilidades, suas preferências, entre outros fatores. Todavia, em princípio, toda teoria informal pode ser axiomatizada, ou até formalizada; e isto pode ser feito de diferentes maneiras. Além disso, cada teoria axiomatizada pode ter modelos distintos<sup>7</sup>. Esses modelos, ou pelo menos alguns deles, em parte e indiretamente, dada por alguma semântica, aparentemente refletem o campo empírico original. Podemos estabelecer uma interpretação pretendida de uma teoria. Podemos também dizer que certa teoria representa “a teoria do campo de estudo” somente de forma indireta, por meio de experiências ou postulados, por exemplo. Porém, outro cientista pode escolher outra perspectiva, outra teoria informal, outra teoria axiomatizada e um modelo correspondente que seja completamente diferente, ou mesmo logicamente distinto, do proposto por outro cientista. Em princípio, não há problema nisso. Comumente, uma perspectiva é sustentada por evidência empírica; é difícil sustentar uma perspectiva em detrimento de outra por isso. Isso é em parte o que faz a ciência tão rica.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup>Diferentes estruturas que satisfazem os postulados da teoria. Mesmo teorias categóricas, que têm seus modelos isomorfos, admitem uma infinidade de modelos, a menos de um isomorfismo.

<sup>8</sup> Hoje em dia teorias como a teorias das cordas e a teoria da gravitação quântica em loop, e também outras teorias no campo da astronomia, ainda não nos permitem fazer experimentos, dificultando ainda mais as razões para predileção de uma a outra. Diferentes perspectivas podem requerir lógicas e matemáticas distintas, mas é uma tarefa difícil provar, que sua perspectiva é melhor que outra, a não ser por considerações experimentais, ou então de índole pragmática, como simplicidade, capacidade de expressão ou mesmo de beleza. (da Costa e Krause, 2008, p. 14).

Por fim, podemos nos perguntar se o cientista deveria se preocupar com todos esses detalhes. Acreditamos que não seja o caso e que, se o cientista for se preocupar com os fundamentos de sua teoria, seus aspectos lógicos e matemáticos, ele acabará por não realizar seu trabalho. Então surge outra pergunta: onde separar o trabalho do lógico do trabalho do cientista? *Grosso modo*, o cientista está normalmente preocupado com as relações entre a teoria, os dados empíricos e o mundo; por outro lado, o lógico preocupa-se com a relação entre a teoria, sua axiomatização e o estudo dos modelos dessa teoria. Assim sendo, fica a cargo do lógico e do filósofo da ciência esclarecerem o conceito de teoria científica.

### 2.3 O QUE É UMA TEORIA CIENTÍFICA?

Vamos nos basear em uma figura para tentar diferenciar as áreas de atuação do lógico e do cientista, além de apresentar um esquema geral de como podem ser dadas as teorias. Figura esta que está e será explicada de acordo com o texto *Inconsistency, Quasi-Truth and Physics*. (da Costa e Krause, 2011, p.3, e no capítulo 8 de Krause 2011).

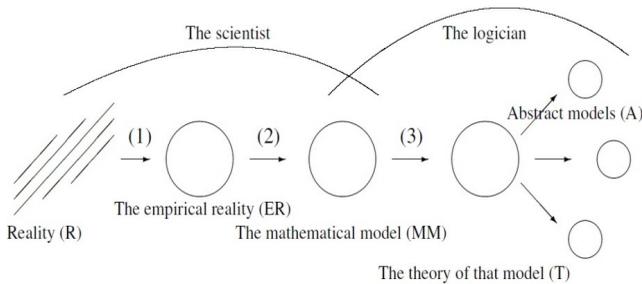


Figura 1: Um esquema geral para teorias empíricas. (da Costa e Krause, 2011,p.3).

Quando vamos estudar uma parte da realidade, devemos considerar nosso interesse: uma estrela distante, uma população de abelhas, uma rocha vulcânica, etc. Acreditamos que seja plausível dizer que nossas teorias “dizem” a verdade sobre o mundo, mesmo que parcialmente. Isso porque nossas melhores teorias conseguem fazer previsões e têm aplicações práticas – baseamo-nos nelas para descrever, em linhas quase precisas, o mundo. (Krause e Arenhart, 2012, p. 4)

Primeiramente temos algo que chamaremos de “realidade”, denotada R. Para nós, assim como para Bernard d’Espagnat, esta “realidade” é *velada*, permanecendo desconhecida. O que podemos conhecer é a Realidade Empírica, ER na figura, que nos é dada pelas nossas experiências e sensações com o mundo externo. É importante diferenciar a realidade velada da realidade empírica; mesmo que existam cientistas e filósofos que postulem que a realidade velada seja a mesma realidade empírica, acreditamos que a realidade empírica muda juntamente com o progresso da ciência e com a nossa capacidade de compreender o que acontece ao nosso redor. (da Costa e Krause, 2011, p.3).

Uma análise da Realidade através da Realidade Empírica não é totalmente pura. Devemos considerar que possuímos conhecimentos empíricos precedentes, facetas culturais, até mesmo hábitos, preferências e, infelizmente, preconceitos ideológicos. Carregamos uma bagagem prévia e devemos nos precaver de sua má influência, pois desejamos teorizar a respeito de R e fazemos isso com o que retiramos de Realidade Empírica, com apoio de nosso conhecimento antecedente, considerando a Realidade Empírica.

Com o intuito de estudar a realidade empírica, cientistas elaboram teorias informais (pois não estão, usualmente, axiomatizadas) e modelos matemáticos, MM na figura. Podemos estar interessados em muitos modelos matemáticos de uma realidade empírica, cada um deles dependendo de vários fatores. Os modelos matemáticos são formados por meio de experiências, conhecimentos prévios, *insights*, etc. Podemos fixar um de nossa escolha, e quando o fazemos começamos a lidar com a matemática. Cientistas usam a matemática que sabem, ou aprendem se necessário – como Einstein o fez, ou a desenvolvem – ao exemplo de Newton.

Os modelos matemáticos são elaborados a partir de dados vindos da realidade empírica, assim como também da intuição e competência do cientista. A construção de um modelo matemático depende obviamente da matemática, não só porque no domínio empírico precisamos considerar estatísticas e erros aleatórios, mas também para expressar conceitos teóricos como momento<sup>9</sup> – que são expressos por leis matemáticas, hipóteses, outras leis e para introduzir elementos que

---

<sup>9</sup> Em mecânica clássica o momento linear é definido pelo produto da massa pela velocidade de um corpo. É uma grandeza vetorial, com direção e sentido, cujo módulo é o produto da massa pelo módulo da velocidade, e cuja direção e sentido são os mesmos da velocidade.

podem não se encontrar na realidade empírica. Podemos, então, pensar os modelos matemáticos como estruturas matemáticas, descritas adequadamente para lidar com os dados retirados da realidade empírica e, igualmente, para lidar com nossas intuições e percepções da realidade velada. Cabe-nos dizer que a linha que divide a realidade velada da realidade empírica não é facilmente traçada. (da Costa e Krause, 2011, p.4)

Parece-nos interessante caracterizar o Modelo Matemático via uma estrutura conjuntista (como a teoria de conjuntos Zermelo-Fraenkel com o Axioma da Escolha), pois esta supre nossas necessidades quanto às ferramentas matemáticas necessárias para uma teoria física. Adicionalmente, quando produzimos um modelo matemático usamos outras teorias para modelar a realidade empírica, ou mesmo criamos conceitos quando os já disponíveis não são suficientes ou adequados.

A teoria informal que muitas vezes é o modelo matemático criado pelo cientista, carrega a visão que este tem da realidade velada, via conceitos da realidade empírica. Esta “teoria”, mesmo que informal, está impregnada de significado. No entanto, o cientista não vai além de sua teoria informal, não procede para que seu modelo matemático seja axiomatizado, ficando satisfeito com o modo que a realidade empírica e, indiretamente, a realidade, são explicados com a ajuda de suas teorias informais.

Para entender melhor um modelo matemático, um cientista pode criar um dispositivo heurístico. Exemplos destes dispositivos são maquetes, simulações, modelos, etc. Contudo, devemos nos precaver ao utilizarmos aqui a palavra modelo. Para o filósofo da ciência, os verdadeiros modelos são os constructos matemáticos. “O dispositivo heurístico que por vezes o cientista usa simplesmente o auxilia a entender a teoria (ou elaborá-la, pois pode permitir a simulação de situações que se supõem ocorrerem na realidade) e, portanto, em entender seus verdadeiros modelos, que são constructos matemáticos.” (Krause e Arenhart, 2012, p.7) Por isso, a importância da cautela ao utilizarmos a palavra modelo. Ao sermos rigorosamente disciplinados, precisamos atentar às diferentes acepções desta palavra, expressivamente importante no discurso filosófico, e não a utilizarmos como mera *façon de parler*.

Como vimos, normalmente o cientista está satisfeito com sua teoria informal (modelo matemático) e não avança em seu estudo teórico. Já o filósofo da ciência, lógico e/ou fundacionista visa(m) conhecer profundamente a estrutura desses estudos científicos.

Quando sistematizamos um modelo matemático, chegamos à teoria T em sentido estrito. A teoria será no mínimo uma versão axiomatizada do modelo matemático adotado. *Sistematizar*, neste caso, significa aplicar o método axiomático. Quando axiomatizamos certa teoria, geralmente pressupomos algumas coisas tais como outras teorias – teorias auxiliares – das quais a teoria que está sendo analisada se utiliza. Podemos supor que estas teorias auxiliares também podem ser axiomatizadas. Cada teoria possui seus teoremas, os quais podem ser derivados através de uma lógica não explícita; frequentemente fica implícita a lógica clássica como lógica subjacente, mas, em princípio, tal escolha é arbitrária. Estabeleceremos a diferença entre axiomatização e formalização da seguinte forma: para uma teoria ser formalizada devemos explicitar qual é sua lógica subjacente. Cabe-nos dizer também que existem vários modelos matemáticos de um mesmo domínio, e ainda várias teorias de um mesmo modelo matemático, inclusive, às vezes, incompatíveis entre si. (da Costa e Krause, 2011, p.5).

Uma teoria formal pode ter várias estruturas abstratas que podem ser não isomorfas, já que a teoria pode não ser categórica. Nossa teoria formal, neste ponto, ganha um caráter abstrato. Não precisamos de uma interpretação particular dos conceitos primitivos, ela pode ter vários modelos que satisfaçam seus postulados.

### 2.3.1 Sobre a teoria e suas abordagens

Qualquer teoria de um modelo matemático, principalmente se estiver formalizada, torna-se uma entidade abstrata à qual pode ser atribuída uma interpretação. A teoria pode ter várias interpretações (estruturas matemáticas abstratas) que satisfazem os postulados, e estas interpretações são chamadas de *modelos* da teoria. Quando estudamos estes modelos podemos obter resultados que podem ser reinterpretados em termos da realidade velada, fazendo com que possamos dizer que a teoria explica – ou não - parte da realidade velada, e/ou que descreve, ao menos, parte da realidade empírica. (da Costa e Krause, 2011, p.6).

Para facilitar a discussão, podemos assumir que a base axiomática de uma teoria abrange três níveis de postulados:

- 1) Os *postulados lógicos*, como por exemplo, os da lógica clássica de primeira ordem com identidade;

- 2) Os *postulados matemáticos*, como por exemplo, aqueles da teoria de conjuntos ZFC (a teoria de conjuntos Zermelo-Fraenkel com o Axioma da Escolha) de primeira ordem;
- 3) Os *postulados específicos*, que dependem da área particular que está sendo analisada. Estes postulados são sentenças da linguagem de ZFC enriquecida por conceitos adicionais que fazem referência ao domínio empírico que está sendo analisado, como por exemplo, “elétron”, “velocidade”, etc.<sup>10</sup> (da Costa e Krause, 2011, p.7)

Neste momento, por termos destrinchado em passos a elaboração de uma teoria científica estrito senso, podemos analisar os fundamentos desta teoria e evidenciar aspectos importantes dentro desta análise. Torna-se possível conhecer a linguagem e o aparato dedutivo da teoria, devido à especificação da contraparte matemática utilizada pela teoria, assim como sua lógica subjacente. Como uma axiomática particular foi adotada, é possível nomear os conceitos básicos escolhidos. Ora, por ser agora um ente abstrato devido à sua axiomatização ou formalização, a teoria pode admitir distintas interpretações. Isto certamente dá à teoria um atributo versátil, *i.e.*, podemos aplicá-la a outros domínios, diferente daquele que a originou. Feito isso, ela desliga-se dos objetos iniciais de sua formulação. De certa forma, a axiomatização, especialmente a formalização, proclama a independência da teoria científica. Podemos também ir além e começar um estudo metateórico da teoria, estudando se alguns metateoremas são válidos, como consistência e categoricidade, por exemplo.

Ao desemaranharmos as etapas para elaboração de uma teoria científica estrito senso, podemos enxergar particularidades não vistas anteriormente. Ampliamos o alcance de nosso estudo, tornando-o minucioso. A formulação axiomática ou formal acaba por revelar outras peculiaridades de uma teoria.

A discussão milenar sobre o postulado das paralelas na geometria euclidiana possibilitou a elaboração das geometrias não euclidianas; a axiomatização da teoria de conjuntos (iniciada com Zermelo) possibilitou que se percebesse que pode haver várias ‘teorias de conjuntos’ não

---

<sup>10</sup> Uma discussão mais detalhada pode ser vista em Krause, Arenhart e Moraes 2011.

equivalentes, e que a noção de conjunto não é absoluta (a mesma em todas as formulações); a discussão da independência da hipótese do contínuo e do axioma da escolha em teorias como Zermelo-Fraenkel levou à constatação da possibilidade da elaboração de ‘matemáticas não-cantorianas’. (Krause e Arenhart, 2012, p. 8)

Existem duas maneiras de apresentarmos os três níveis de postulados. Podemos trabalhar com uma estrutura matemática, como ZFC, deixando implícitos os postulados 1 e 2, precisando ser estabelecidos somente os postulados de nível 3. Isto é o que geralmente é feito pelas ciências empíricas e é chamado de *abordagem semântica* ou *abordagem interna*, mas, no entanto, algumas vezes isto não é levado em conta pelos cientistas e filósofos. As estruturas que satisfazem esses postulados de nível 3 são os *modelos* da teoria. Eles são modelos abstratos e usualmente um deles é escolhido como o modelo pretendido que reflete o modelo matemático adotado, correspondendo indiretamente à parte da realidade empírica e indiretamente da realidade velada (supostamente) modelada pelo modelo matemático adotado. Estes *modelos* são modelos do nível 3, mas aparece aqui um problema se pensarmos que eles devem também modelar os postulados do nível 2, já que estes postulados abrangem os postulados de ZFC, ao assumir a tese oposta teríamos um modelo de ZFC em ZFC, o que sabemos é impossível devido ao segundo teorema de incompletude de Gödel. Isto, evidentemente, se supormos que ZFC seja consistente.<sup>11</sup> (da Costa e Krause, 2011, p.8)

A segunda maneira de trabalharmos com os 3 níveis de postulados é listar os postulados de nível 1, 2 e 3 – chamada de *abordagem sintática* ou *abordagem externa*; e derivar as consequências desses postulados, os quais podemos interpretar informalmente como nos dizendo algo sobre a realidade empírica e a realidade velada (da Costa e Krause, 2011, p.10).

Quando apresentamos os postulados de uma teoria, estamos nos comprometendo com a matemática. Por exemplo, comumente dizemos que uma linguagem tem infinitas variáveis individuais. Porém devemos explicitar o que queremos dizer com infinitas, já que existem diferentes e não equivalentes definições de infinito. Ao considerarmos uma delas,

---

<sup>11</sup> Estas questões, relevantes em filosofia da ciência, não serão detalhadas aqui, mas podem ser vistas em Krause, Arenhart e Moraes 2011.

devemos justificar o porquê deste uso. Além disso, poderíamos formular uma teoria sem nos comprometermos com a lógica e com a matemática - por exemplo, a teoria dos conjuntos - ignorando alternativas como lógicas de ordem superior e teoria das categorias. Este tipo de investigação é do interesse do filósofo da ciência.

A fim de escrevermos postulados de uma teoria, raciocinamos em uma linguagem, via de regra usando lógica e conceitos de teoria dos conjuntos. Precisamos reconhecer sinais, distinguir coisas, compô-las, etc. Ainda usamos números, definições por recursão e assim por diante. Dessa forma, sempre haverá um núcleo mínimo inicial relativamente construtivo, com o qual formulamos o que precisamos. No fim, poderíamos dizer que este núcleo seria equivalente a um fragmento de uma lógica intuicionista, e daríamos continuidade a ele fazendo-o mais complexo até chegarmos a certa lógica e matemática, digamos as clássicas. (da Costa, 2008, p. 33). Apesar de diferir da lógica clássica no constante à interpretação dos conectivos lógicos e quantificadores, a lógica intuicionista pode, formalmente, ser vista como um subsistema da lógica clássica. Seguindo nosso exemplo de infinitas variáveis individuais, simplesmente significa que podemos ter quantas variáveis individuais quisermos. Outros conceitos podem ser interpretados da mesma forma. Neste sentido não estamos, como na abordagem interna, pressupondo uma matemática, mas trabalhando informalmente. (da Costa, Krause, 2011, p.11).

Como podemos lidar com a maioria dos conceitos que precisamos através da ideia do exemplo anterior, a abordagem externa parece mais adequada, já que não há comprometimento com uma matemática. Contudo, quando estabelecemos os postulados em todos os níveis 1, 2 e 3, esse apelo intuitivo para a matemática e a lógica cessam, e acabamos por nos comprometer com a lógica dada pelos postulados de nível 1 e a matemática dada pelos postulados de nível 2.

A lógica e matemática intuitivas devem ser usadas para certos fins somente, como em nosso dia-a-dia ao lidarmos com os objetos a nosso redor, mas para o propósito de estudar tópicos mais avançados este uso informal não é suficiente. (Krause, Arenhart, Moraes, 2011, p. 364).

Dos postulados de níveis 1, 2 e 3, derivamos proposições da hipótese assumida e obtemos os teoremas da teoria. A teoria torna-se uma coleção de sentenças de certa linguagem, conjunto este fechado por deduções. É importante perceber que na abordagem externa precisamos estabelecer todos os postulados da teoria, incluindo os da lógica e matemática subjacentes, pois precisamos estabelecer o modo como

fazemos deduções. Todavia, algumas teorias dependem de várias outras teorias auxiliares, como a relatividade geral que depende de cálculo tensorial, álgebra linear e multilinear, geometria riemanniana e assim por diante. Para obter-se a axiomatização de tal teoria seria preciso um grande esforço, transformando a teoria física em uma enciclopédia matemática. Por isso, seria mais econômico trabalhar de acordo com a abordagem interna, pressupondo uma teoria de conjuntos e sua lógica subjacente. De acordo com Suppes:

Na medida em que podemos perceber, a maioria dos problemas de importância central para a filosofia da ciência pode ser discutida em detalhes aceitando-se algo como uma formulação padrão da teoria de conjuntos, sem questionar os fundamentos da matemática.<sup>12</sup> (Suppes, *apud* da Costa e Krause, 2011, p.12, tradução nossa).

No entanto, a maioria não significa a totalidade e há questões interessantes a serem discutidas se prestarmos atenção aos compromissos que assumimos quando optamos por certa base matemática.

### 2.3.2 Abordagens, axiomatização e modelos

Como vimos temos duas opções para trabalhar com os modelos de uma teoria, a abordagem interna ou abordagem semântica e a abordagem externa ou abordagem sintática.

A abordagem externa ou abordagem sintática é caracterizada pela utilização de uma metateoria intuitiva, que deve ser adequada para expressar coisas básicas, como a contagem de elementos de um conjunto, o que é uma sequência infinita de números, o que é uma relação, entre outros. Através de um raciocínio finitista linguagens adequadas são construídas para lidar com os axiomas 1, 2 e 3 (dados anteriormente) até que teorias formais como ZFC sejam alcançadas. Quando chegamos à ZFC, adentramos à ZFC e começamos novamente, só que desta vez de

---

<sup>12</sup>“[a]s far as I can see, most problems of central importance to the philosophy of science can be discussed in full detail by accepting something like a standard formulation of set theory, without questioning the foundations of mathematics” (Suppes, *apud* da Costa e Krause, 2011, p.12).

modo formal: “lógica deve ser desenvolvida duas vezes.”<sup>13</sup> (Kunen, 2009, p. 191, tradução nossa)

Os conceitos trabalhados, como o de relação e função terão duas representações uma informal na metateoria e outra na teoria formal. As representações informais podem sempre ser formalizadas utilizando outra metateoria informal e assim por diante. Precisamos listar os postulados 1, 2 e 3 e não buscar modelos, somente derivar as consequências destes postulados, que serão interpretados informalmente, dizendo-nos sobre o campo que está sendo estudado. Ou seja, não buscamos modelos, buscamos provas.

A abordagem sintática demanda grande apelo à linguagem, à lógica e à matemática subjacentes. Além disso, ela não se acomoda à visão pragmática dos cientistas que usualmente não se preocupam com a lógica e a matemática subjacentes às suas teorias. Não há semântica no sentido de Suppes ou de Tarski. O conceito de verdade é sintático; uma proposição é verdadeira se há uma prova e falsa se há a negação da prova. A lógica clássica não é violada, ainda temos a lei do terceiro excluído, mesmo que ela possa não valer na metateoria. (Krause, Arenhart e Moraes, 2011, p. 371)

De acordo com a visão semântica uma teoria é classificada por sua classe de modelos. Queremos agora analisar as suposições que subjazem essa abordagem. Não podemos esquecer que a axiomatização de teorias deve ser considerada e também não podemos ignorar a metamatemática que utilizamos para construir modelos, pois restrições são implicadas aos modelos quando mudamos a metamatemática.

A concepção semântica de teorias é vista normalmente como vantajosa, pois não foca na linguagem utilizada, ou pelo menos, este não é um ponto a ser enfatizado quando usamos esta abordagem, o foco da abordagem semântica são os modelos da teoria. Entretanto, como dissemos, a linguagem não pode ser completamente ignorada, já que temos por objetivo agrupar uma classe de estruturas, fornecendo um conjunto de postulados. Ou seja, o método axiomático precisa ser empregado e isto certamente envolve estipular uma linguagem e também seu aparato dedutivo.

Frisamos, novamente, antes que a palavra modelo é utilizada de várias maneiras dentro da literatura científica e filosófica. Modelos são modelos de algo, e aqui trabalharemos com a palavra “modelo” no

---

<sup>13</sup> “Logic must be developed twice.” (Kunen, 2009, p. 191)

sentido descrito anteriormente sendo modelos abstratos de uma teoria, sendo esta também tomada como definimos anteriormente.

O pioneiro da abordagem semântica é Patrick Suppes. De acordo com ele os vários tipos de “modelos” que utilizamos podem ser reduzidos a modelos conjuntistas, *i.e.*, estruturas matemáticas que satisfazem os postulados de uma teoria: “Uma possível realização de uma teoria é uma entidade conjuntista de tipo lógico apropriado.”<sup>14</sup> (Suppes, 2002, p. 21, tradução nossa) Tomando a abordagem de Suppes, os modelos em questão são modelos de um predicado conjuntista<sup>15</sup> que representa a conjunção dos postulados da teoria: “axiomatizar uma teoria é definir um predicado conjuntista.”<sup>16</sup> (Suppes, 2002, p. 30, tradução nossa) Basicamente, a abordagem de Suppes consiste em descrever uma estrutura que modela certo domínio científico.

Quando escrevemos os postulados de uma teoria de certo domínio científico o fazemos em uma linguagem  $L_{\in}$  sendo esta a linguagem de primeira ordem de ZFC da estrutura em questão (esta pode ser enriquecida com símbolos adicionais e conceitos). Estes símbolos adicionais podem ser inseridos de várias formas, como abreviações de fórmulas de  $L_{\square}$  na metalinguagem, por exemplo quando usamos  $x \subseteq y$  abreviamos  $\forall z(z \in x \rightarrow z \in y)$ . Quando dizemos que uma estrutura modela certo campo de conhecimento, entendemos que o cientista que está interessado em investigar este campo começa escolhendo, mesmo que inconscientemente, conceitos, propriedades, relações, operações que podem ser aplicados aos objetos que estão sendo estudados. Essa abstração de supor que tudo isto pode ser feito pela apresentação de uma estrutura matemática é uma generalização que se adequa com o que acontece usualmente na prática científica. Então, os postulados específicos da teoria (aqueles postulados de nível 3 definidos anteriormente) são fornecidos através da definição desta estrutura. Esses axiomas podem ser abreviados por meio de um predicado conjuntista, que é uma fórmula de ZFC que representa a conjunção dos axiomas. Os postulados de nível 1 e 2 (definidos anteriormente) são subsumidos por ZFC e os postulados da lógica subjacente e não precisam ser mencionados. A noção de dedução é

---

<sup>14</sup> “A possible realization of a theory is a set-theoretic entity of the appropriate logical type.” (Suppes, 2002, p. 30)

<sup>15</sup> Um predicado conjuntista é uma fórmula adequada escrita em uma linguagem conjuntista.

<sup>16</sup> “To axiomatize a theory is to define a set-theoretic predicate.” (Suppes, 2002, p. 30)

aquela de ZFC, já que os postulados de ZFC entram nas deduções; vemos assim que a teoria não é estritamente elementar. A estrutura dada é um modelo da dada axiomatização. Para garantir que a estrutura satisfaça os postulados precisamos provar que os objetos e as relações da estrutura têm propriedades declaradas nos postulados, e isto é feito em ZFC; esta é uma característica desta abordagem. (Krause, Arenhart e Moraes, 2011, p. 369)

Como dissemos, teorias são caracterizadas como uma classe de modelos segundo Suppes. Devemos, então, agrupar todos modelos relevantes para nossa teoria. Suppes apresenta um modo de caracterizar classes de estruturas para satisfazer um predicado conjuntista cujo propósito é impor algumas restrições para termos estruturas adequadas. Entretanto, o filósofo não fornece uma definição rigorosa de como um predicado conjuntista deve ser escrito, devemos ter uma ideia intuitiva de como isto deve ser apresentado. Para isso, devemos esclarecer toda a ideia por trás da abordagem semântica. Suppes pressupõe uma teoria de conjuntos intuitiva, mas mesmo assim podemos supor que podemos trabalhar dentro de ZFC, ainda que informalmente, sem justificar sua construção. Visto que podemos empregar toda metamatemática necessária sem precisarmos explicitar a axiomatização, a vantagem de utilizarmos ZFC é nítida. Tudo que precisamos já está construído dentro de ZFC. O atrativo da abordagem semântica está em simplesmente podermos usar uma atmosfera matemática com a qual já estamos acostumados, deixando considerações metamatemática de lado.

Por exemplo, um grupo é uma estrutura do tipo  $\mathbf{G} = \langle G, \circ \rangle$  que satisfaz o predicado conjuntista:  $\mathbf{P}(\mathbf{G}) \leftrightarrow \exists G \exists \circ (\mathbf{G} = \langle G, \circ \rangle \wedge G \neq \emptyset \wedge \circ \in \mathbf{P}(G \times G \times G) \wedge A1 \wedge A2 \wedge A3)$ ; onde  $A1$ ,  $A2$  e  $A3$  são os axiomas de grupo usuais: associatividade de  $\circ$ , a existência de um elemento neutro e a existência de inversos. Todavia, nada é dito especificamente sobre a relação de satisfatibilidade ou sobre a linguagem a qual os axiomas são formulados.

Como dizer que alguma estrutura está na classe caracterizada pelo predicado definido acima? Como mostrar que  $\langle \mathbb{Z}, + \rangle$  é um grupo? Derivamos dos teoremas de ZFC que os elementos de  $\mathbb{Z}$  e a operação  $+$  tem as propriedades requeridas para ser um grupo. Então, dizemos que  $\langle \mathbb{Z}, + \rangle$  satisfaz os axiomas para a teoria de grupos, e que a estrutura e um modelo da teoria de grupos, ou é um grupo. As palavras “grupo” e “satisfaz” não são utilizadas de maneira usual. Não há uma linguagem formal sendo interpretada em uma estrutura, não há uma função interpretação atribuindo os itens adequados da estrutura a itens linguísticos e não há restrição para a formulação de axiomas. No sentido

de Tarski, modelos são estruturas que satisfazem (no sentido usual) algumas sentenças em uma linguagem específica. Quando usamos a abordagem de Suppes mostramos, por exemplo, que  $\vdash_{zfc} \forall x, y, z \in Z(x + (y + z) = (x + y) + z)$ , e o mesmo acontece para os outros axiomas. Esta é a ideia por trás da sugestão de Suppes de que a filosofia da ciência deveria trabalhar com a matemática e não com a metamatemática. Assim, um predicado conjuntista caracteriza, desta forma, uma classe de estruturas, mesmo que encontremos dificuldade em trabalhar com esta aceção que não é a usual utilizada em lógica. Quando dizemos que a estrutura composta pelo conjunto dos inteiros juntamente com a operação  $+$  tem alguma propriedade, dizemos isso diretamente na linguagem de ZFC, não apresentamos a propriedade primeiramente em uma linguagem formal e coordenamos os símbolos da linguagem com esses conjuntos e então procedemos para mostrar que a fórmula expressa a propriedade é satisfeita pela estrutura  $\langle Z, + \rangle$ . Se o fizermos, caímos na metamatemática. Por isso dizemos que na abordagem de Suppes trabalhamos com a matemática, trabalhamos com itens conjuntistas sem a mediação de linguagens formais. (Krause, Arenhart e Moraes, 2011, p. 373)

Um outro comentário relevante é que de um ponto de vista metateórico, a classe de modelos selecionada por um predicado conjuntista dependerá do modelo de ZFC com o qual estaremos trabalhando. Como ZFC é uma teoria de primeira ordem, se consistente, seus modelos não poderão ser construídos em ZFC propriamente. De qualquer forma, mesmo que o filósofo da ciência deva trabalhar com a matemática e não com a metamatemática, ele poderia, por exemplo, não trabalhar dentro de ZFC, poderia trabalhar com outras teorias de conjuntos como a teoria de quase-conjuntos, entre outras, em vez de trabalhar em ZFC. Para alguns propósitos isto é bastante interessante, e também seria interessante averiguar como certas teorias se caracterizariam dentro de diferentes teorias de conjuntos se as consequências filosóficas que estes diferentes enfoques trariam.

Assim, acreditamos que a linguagem tenha importância fundamental para esta abordagem, e também para os postulados da teoria, mesmo que filósofos como van Fraassen digam que: “[a] abordagem semântica para teorias faz com que a linguagem seja irrelevante para este tópico.” (van Fraassen, *apud* Krause e Bueno, 2011,

p.188, tradução nossa).<sup>17</sup> Sem os predicados de uma teoria não há modelo de uma teoria, já que não existem modelos *tout court*. Os modelos devem formar de algum modo a extensão da relevância do predicado conjuntista; teremos uma classe própria de elementos que serão os modelos do predicado.

Outra forma de tratarmos a abordagem semântica é através da abordagem de da Costa-Chuaqui. Nesta abordagem, começamos também com uma estrutura, mas agora também levamos em consideração a linguagem formal para esta estrutura (a linguagem  $L_{\in}$  mencionada anteriormente). Nesta linguagem formulamos axiomas adequados que terão a estrutura como modelo num sentido tarskiano padrão. Levamos em consideração aqui os modelos, embora eles não sejam em geral estruturas de primeira ordem, assim as linguagens também não serão, em geral, linguagens de primeira ordem. Deste modo, linguagens distintas podem ser utilizadas, cada uma com suas particularidades, já que existem muitas linguagens formais que se adéquam para uma dada estrutura; esta é uma característica desta abordagem.

Nesta abordagem estamos trabalhando em uma estrutura matemática, como ZFC de primeira ordem, por exemplo. Assim sendo, podemos deixar implícitos os postulados 1 e 2 (definidos anteriormente), trabalhando somente com os postulados específicos (os postulados de nível 3 definido anteriormente), mas agora estes postulados são formulados em uma linguagem formal da estrutura. Esta linguagem não é a linguagem de ZFC, assim não estamos modelando os axiomas de ZFC. Por conseguinte, podemos trabalhar com modelos construídos em ZFC, o que não poderia ser feito, como já apontado, se os axiomas de ZFC estivessem sendo axiomatizados também (se tivermos ZFC consistente).

Como na abordagem de da Costa-Chuaqui estamos usando linguagens formais, podemos utilizar lógicas não-clássicas para basear os postulados da teoria. Logo, esta abordagem é bastante geral, pois permite considerar sistemas não clássicos.

A diferença entre as abordagens de Suppes e da Costa-Chuaqui é que na última os axiomas não são formulados na linguagem de primeira ordem de ZFC, e podemos considerar linguagens de ordem superior, por exemplo. (Krause, Arenhart, Moraes, 2011, p. 370)

---

<sup>17</sup> “[t]he semantic view of theories makes language irrelevant to the subject.” (van Frassen, *apud* Krause e Bueno, 2011, p.188).

Os defensores da abordagem semântica dizem que os modelos são estruturas matemáticas. Todavia, estruturas matemáticas são construídas dentro de um aparato matemático adequado. Temos várias possibilidades para o aparato matemático a ser utilizado, como teoria de categorias ou lógicas de ordem superior, dependendo da teoria que estivermos considerando. Normalmente, estruturas matemáticas são estruturas conjuntistas que são construídas em certa teoria de conjuntos. Mesmo que cientistas frequentemente utilizem um aparato matemático informal, podemos sempre considerar que trabalham em uma teoria de conjuntos usual como Zermelo-Fraenkel. Assim sendo, modelos de uma teoria científica comumente são construídos em certa teoria de conjuntos. Por isso, acreditamos que haja relevância para linguagem e há um aparato matemático no qual as estruturas são construídas.

O emprego da linguagem realmente faz a diferença, pois ao usarmos uma linguagem de primeira ordem ou de ordem superior em nossa axiomatização da aritmética, por exemplo, teremos situações diferentes. Ao utilizarmos uma linguagem de primeira ordem teremos modelos não-standard e a teoria não será categórica, enquanto que ao utilizarmos uma linguagem de ordem superior e a teoria será categórica, seus modelos serão isomorfos. Este é um aspecto interessante para ser investigado pelos filósofos. Parece-nos imprudente dizer que realmente não importa qual tipo de linguagem empregamos ao caracterizarmos uma classe de modelos.

Como estamos trabalhando dentro de um aparato matemático, *e.g.* ZFC, os postulados, modelos, etc, são expressos em sua sintaxe. A palavra “semântica” nos parece ser somente uma forma de expressão. Quando filósofos usam a abordagem semântica para caracterizar teorias, estariam na verdade trabalhando em uma abordagem sintática, pois utilizam a sintaxe da metamatemática empregada à teoria. A abordagem semântica seria de fato uma abordagem sintática num sentido forte, pois é formulada dentro de um aparato de certa metamatemática. (da Costa e Krause, 2011, p.10)

Vimos que existem duas direções distintas em relação a axiomatização de teorias científicas dentro da abordagem semântica, seguindo Suppes, onde um predicado é escrito na própria linguagem da teoria de conjuntos e seguindo da Costa-Chuaqui onde linguagens formais são empregadas para escrever os postulados específicos da teoria que desejamos axiomatizar. Ambas as abordagens podem ser empregadas para especificar uma classe de estruturas que podem sustentar alguma versão da chamada abordagem semântica para teorias

científicas. Vimos também que a linguagem é importante mesmo para a abordagem semântica, então precisamos ser cuidadosos ao tomarmos o que é geralmente dito, que ela faz referências somente a modelos. De fato, diferentes linguagens são usadas de diferentes formas em vista de axiomatizar teorias. Cada abordagem tem seus benefícios e custos que trarão consequências quando o trabalho filosófico sobre modelos e teorias estiverem sendo estudados. (Krause, Arenhart e Moraes, 2011, p. 382)

### 3 INCONSISTÊNCIAS E INCONSISTÊNCIAS

Conforme nosso esquema há vários estágios para o desenvolvimento de uma teoria científica, e a necessidade de uma lógica ou matemática alternativa pode ser prevista de diferentes formas. Daremos sequência às explicações seguindo a figura apresentada no capítulo anterior.

A noção de inconsistência formal supracitada faz referência a teorias axiomatizadas ou formalizadas, as quais têm uma lógica subjacente fixada. Entretanto, como vimos, a noção de inconsistência também é aplicada a teorias informais. Sabemos que a maioria das teorias físicas é elaborada de maneira informal (não totalmente axiomatizada). Apesar disso, a maior parte das inconsistências informais encontradas comumente na ciência aparentemente não dificultam a prática científica, o que pode ser notado tendo em vista que inconsistências podem ser encontradas em cada um dos estágios de elaboração de uma teoria científica.

#### 3.1 INCONSISTÊNCIAS NA REALIDADE VELADA

A posição filosófica conhecida como *dialeteísmo* (como a interpretamos) sustenta a tese de que a realidade é inconsistente. Essas inconsistências – que acontecem na realidade velada – podem ser chamadas “inconsistências reais” (é importante salientar que, para os defensores de tal posição, a realidade pode não estar “velada”) Entretanto, é difícil saber se essa tese se aplica ao mundo real, aos objetos concretos. Em nossa opinião, o máximo que podemos saber (até agora) é que podem existir sentenças  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  referindo-se a uma porção da realidade que são ambas consideradas como verdadeiras. Ou seja, as inconsistências não se encontram na esfera do real ao nível concreto.

As inconsistências reais estão ligadas com as crenças de alguns filósofos de que existem “contradições verdadeiras” no mundo, “inconsistências reais”. Esses filósofos dizem que uma inconsistência real é dada quando temos duas proposições  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  dizendo respeito ao mesmo objeto real concreto. Alguns desses filósofos são chamados dialeteístas (Priest, 2006, p.4).

O dialeteísmo em si não é uma lógica formal, mas para se defender esta visão acreditamos que é preciso aceitar alguma lógica paraconsistente para não acabarmos fazendo do dialeteísmo algo trivial. O dialeteísmo é motivado por quebra-cabeças como o paradoxo do

mentiroso e o paradoxo de Russell. Como tal, o dialeteísmo se opõe ao princípio de não-contradição (em suas várias formas). Entre os dialeteístas podemos citar Priest e Beall. (*The Law of non-Contradiction*, 2004).

Outra característica de inconsistências referentes a objetos reais concretos é a de que elas dão origem a teorias alternativas em ciência. Sabemos que a interpretação do formalismo quântico apresenta dificuldades, como, por exemplo, a dualidade onda-partícula. Um feixe de elétrons se comporta como onda em certo momento e em partícula em outro momento. Explicaremos com mais detalhes este fato juntamente com a experiência da dupla fenda no capítulo 5, mas, brevemente, disparamos um feixe de elétron sobre um anteparo, passando por duas fendas. No anteparo, mostram-se padrões de interferência, corroborando seu caráter ondulatório. Contudo, ao colocarmos um detector de partículas após qualquer uma das fendas, obtemo um comportamento corpuscular. A interpretação de Copenhague nos diz que o elétron seria onda e partícula ao mesmo tempo, e que nada se pode conhecer do interfenômeno. Renunciamos da descrição completa dos fenômenos subatômicos para que possamos resolver tal dificuldade. Perdemos poder explicativo da teoria, pois não é possível explicar o comportamento das partículas entre duas observações sucessivas, fazendo com que as previsões sejam previsões estatísticas.

No paradoxo de Zenão de Eléia temos que o espaço e o tempo, se considerados discretos, não podem ser finitos. Para superarmos esta dificuldade lançamos mão de doutrinas abstratas do espaço e do tempo, como conjuntos contínuos (acepção matemática). Usamos o cálculo para mostrar que uma série pode ter soma finita. Por intermédio de aparatos teóricos abstratos, anulamos as contradições.

Bohn, tendo em vista as dificuldades da interpretação de Copenhague, sugeriu a teoria das variáveis ocultas em uma tentativa de reformular a mecânica quântica em alicerces causais.

A resolução de dificuldades no âmbito das ciências empíricas nos leva a perder poder explicativo de teorias, ou por meio da introdução de conceitos teóricos afastados da experiência, dentre outros artifícios, a origem de novas teorias alternativas. Não seria cabível, a princípio, se tomássemos tais dificuldades como falaciosas, que elas nos levassem a tais consequências. Talvez, tais dificuldades espelhem contradições reais. Contudo, podemos afirmar que, como, em geral, podemos eliminá-las, e isto é plausível, transcorre razoavelmente, não podemos seguramente garantir a existência de inconsistências deste tipo na realidade.

O problema da existência de inconsistências reais, como citado, não está ainda resolvido. E, provavelmente não haverá solução aceitável em um futuro próximo. Podemos dizer, ao recorrermos à lógica, que tais inconsistências não se justificam, nem podem ser anuladas. Isto somente a ciência poderá nos dizer.

### 3.1.1 Exemplos clássicos

De acordo com os dialeteístas existem contradições que são verdadeiras. Assim, já que queremos evitar a trivialização, uma vez que temos a intenção de não aceitar que todas as afirmações são verdadeiras - por exemplo, dizer que alguém nasceu antes de sua mãe - a lógica utilizada pela ciência teria de ser uma lógica paraconsistente. Aliás, não é claro para nós o que os dialeteístas querem dizer com “verdade”.

Primeiramente, faremos uma crítica ao dialeteísmo e mostraremos a razão pela qual não concordamos com este ponto de vista. A propósito, de modo algum dizemos que a lógica clássica não deva mais ser utilizada ou que deveria ser trocada por uma lógica paraconsistente.

As contradições dialeteístas, exemplo dados por Priest *opus citatum*, não nos convencem. Alguns desses exemplos envolvem percepção visual, por exemplo, envolvendo as chamadas “Figuras de Penrose” desenhadas pelo matemático inglês Roger Penrose ou as escadas do desenho “Relativity” do artista gráfico holandês Maurits Cornelis Escher.

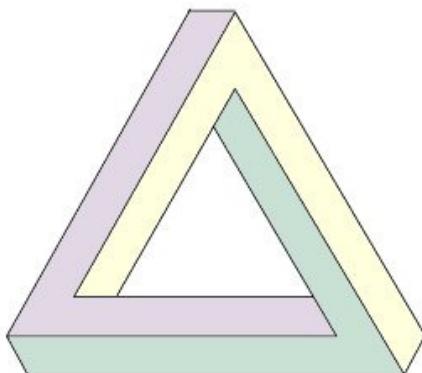


Figura 2: Triângulo de Penrose

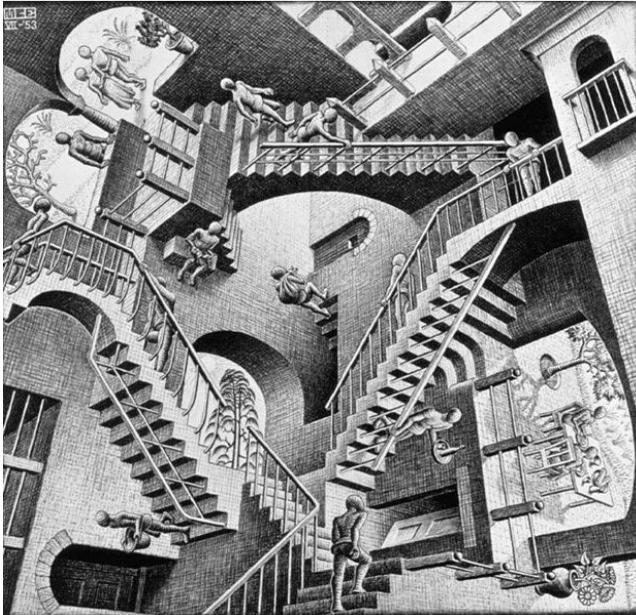


Figura 3: Relativity - Escher

Os objetos retratados nas figuras são chamados de objetos impossíveis, e são um tipo de ilusão de ótica que consiste em uma figura de duas dimensões que quando vista é instantaneamente e subconscientemente interpretada pelo sistema visual como representando uma projeção de um objeto de três dimensões, embora não seja realmente possível tal objeto existir (pelo menos não da forma como o sistema visual o interpreta). Na maioria dos casos a impossibilidade torna-se aparente depois de observarmos a figura por alguns instantes. Todavia, a impressão de um objeto de três dimensões permanece mesmo depois de ter sido contrariada “logicamente” pelo observador.

De acordo com Priest, “Esse é um caso onde podemos ver uma situação contraditória.” (Priest, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 7, tradução nossa)<sup>18</sup>. Mesmo sem sermos especialistas sobre essas questões, concordamos que a realidade que experimentamos é uma construção mental feita por nós, baseada em nossas experiências, para que possa ser

---

<sup>18</sup> “[t]his is the case where we can see a contradictory situation” (Priest, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 7).

concebia de diferentes perspectivas. A base de nossas reivindicações está nas palavras de Brian Davies:

Essas ilusões são possíveis porque nosso sistema visual precisa fazer adivinhações baseadas em informações incompletas. É um fato que se um objeto existe, então seu desenho seguirá as leis da perspectiva. Entretanto nosso sistema visual segue uma regra incorreta: que o desenho segue as leis da perspectiva, fazendo com que o objeto exista ou possa existir.<sup>19</sup> (Davies, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 7, tradução nossa).

Assim sendo, as figuras de Escher e Penrose não representariam algo *real*, pois não poderia haver uma escada *real* (no espaço usual tridimensional) que “sobe e desce levando ao mesmo ponto”. A percepção que temos é a de um objeto contraditório, mas se nossas reivindicações estiverem corretas, ele seria somente uma construção mental feita por nós. Aparentemente nenhum objeto físico real pode ser construído desobedecendo às regras da perspectiva, que são violadas pelas figuras mostradas acima (da Costa, Krause, 2008, p. 7). Outro exemplo dado por Priest diz respeito a movimento. Ele diz:

Se o campo visual é condicionado pela visão de um movimento contínuo de certo tipo, por exemplo, uma espiral rotatória, quando o observador olha para uma cena estacionária, ela parece estar movendo-se na direção oposta. Porém, um ponto no topo do campo visual, por exemplo, parece não mudar de lugar.”<sup>20</sup> (Priest, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 7, tradução nossa).

---

<sup>19</sup> “[t]hese illusions are possible because our visual system has to make guesses based on incomplete information. It is a fact that if an object exists than a drawing of it will follow the laws of perspective. However our visual system follows an incorrect rule: that if drawing follows the laws of perspective then a corresponding object exists, or could exist.” (Davies, *apud* da Costa, Krause, 2008, p.7).

<sup>20</sup> “[i]f the visual field is conditioned by viewing continuous motion of a certain kind, say a rotation spiral, when the viewer then looks at a stationary scene, it appears to be moving in the opposite direction. But a point at the top visual field, say, does not appear to change place.” (Priest, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 7)

Brian Davies explica que este exemplo é somente uma propriedade da nossa visão periférica. Dessa forma, parece-nos que também não há contradições nesse exemplo. (da Costa e Krause, 2008, p.7)

O próximo caso é a respeito de cores. Especificamente, neste caso, vermelho e verde. Explica Priest que se uma figura for apresentada para alguém, sendo ela metade vermelha e metade verde, sendo que as duas metades são separadas por uma fina linha preta, quando a linha é retirada, pessoas podem dizer que o espaço que era ocupado pela linha foi preenchido pelo seu cérebro pelas duas cores ao mesmo tempo. Assim, baseando-nos nesses relatórios, poderíamos dizer que existem contradições reais, somente porque algumas pessoas vêem verde e vermelho ao mesmo tempo? De qualquer forma, esses relatos não são suficientemente fortes para implicar que uma contradição exista em algo ser vermelho e não vermelho; esse é novamente um problema de uma construção mental particular (da Costa e Krause, 2008, p. 8). O que Brian Davies nos diz sobre isso é: “objetos não são vermelhos, verdes, azuis por eles mesmos: nossas impressões são criadas por processos neurais da informação limitada provida pelas nossas retinas.”<sup>21</sup> (Davies, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 8, tradução nossa)

### 3.1.2 O problema de sentenças de verdades-inelimináveis

Saindo do âmbito de questões sobre contradições encontradas na realidade, abordaremos o dialeteísmo através de paradoxos semânticos.

Dialeteístas clássicos como Priest e Beall aceitam a lei do terceiro excluído como uma lei lógica. Eles afirmam que o dialeteísmo clássico é a única maneira plausível de se resolver paradoxos semânticos. Alguns desses paradoxos podem ser chamados de sentenças de verdade-ineliminável. Sentenças de verdade-ineliminável são aquelas as quais os valores de verdade essencialmente envolvem a propriedade de “ser verdade”. Ou seja, uma sentença de verdade-ineliminável é aquela sentença da qual não pode ser eliminada a noção de ser verdade da sua condição de verdade. Entretanto, veremos que não há um modo natural ou plausível para um dialeteísta clássico atribuir valores de verdade para várias sentenças de verdade-ineliminável (Wang, 2011, p. 493).

---

<sup>21</sup> “[o]bjects are not red, green, or blue in themselves: our impressions are created by neural processing of the very limited information provided by our retinas.” (Davies, *apud* da Costa, Krause, 2008, p. 8)

Dialeteístas clássicos acreditam que verdade e falsidade são juntamente exaustivas, mas não-exclusivas, podendo atribuir para sentenças de verdade-ineliminável três valores de verdade: {V}, {F} e {V,F}. Contudo, não é fácil decidir qual o valor de verdade para cada sentença de verdade-ineliminável. Existem duas maneiras (não-exclusivas) que um dialeteísta clássico pode adotar para solucionar este problema. Ele pode ser antidemocrático: simplesmente atribuir um único valor de verdade ({V}, {F} ou {V,F}) para todas as sentenças de verdade-ineliminável, não importando o quão diferente sejam. Um dialeteísta clássico que adota a visão antidemocrática é Beall. Ou o dialeteísta clássico pode ser democrático: ele pode permitir o auxílio de todos os tipos de fato, *a priori* ou empíricos, para em conjunto decidir o valor de verdade de uma sentença de verdade-ineliminável. Um dialeteísta clássico que adota a visão democrática é Priest. (Wang, 2011, p. 494).

Consideremos o exemplo onde Dean afirma:

- (1) Os discursos de Nixon sobre Watergate são falsos,

Pretendendo o quantificador abranger toda sentença (2), enquanto Nixon por sua vez afirma:

- (2) Tudo que Dean diz sobre Watergate é falso,

Pretendendo o quantificador abranger toda sentença (1) (Wang, 2011, p.494).

Suponhamos que Dean tenha dito pelo menos uma sentença verdadeira sobre Watergate. Por exemplo, “Nixon está envolvido no escândalo de Watergate”, “Ou Nixon irá renunciar devido ao escândalo de Watergate ou não irá” ou “Se esta sentença sobre Watergate é verdadeira então esta sentença sobre Watergate é verdadeira”. Sobre essas premissas, há uma forte intuição para dizer que a frase (2) de Nixon é falsa, isto é, deveria ser atribuído o valor de verdade {F}, enquanto à frase de Dean (1) deveria ser atribuído valor de verdade {V}, embora ambas sejam sentenças de verdade-ineliminável. O exemplo mostra como a visão dialeteísta clássica anti-democrática de Beall é contra-intuitiva (Wang, 2011, p.495).

Um dialeteísta clássico, portanto, deve ter alguns princípios para ajudá-lo a tomar uma decisão quanto a como atribuir diferentes valores

de verdade para várias sentenças de verdade-inelimináveis; tendo assim uma visão democrática.

Em particular, Priest propõe dois princípios:

(P<sub>1</sub>) Se um raciocínio lógico nos força a concluir que certa sentença de verdade-ineliminável  $p$  é tanto verdadeira e falsa, então devemos concluir que  $p$  é tanto verdadeira e falsa.

(P<sub>2</sub>) Se não há fatos *a priori* e/ou empíricos que estabeleçam a verdade de uma sentença atômica de verdade-ineliminável  $p$ , então haverá um fato negativo, por exemplo, o fato de que nenhum fato *a priori* e/ou empírico pode estabelecer a verdade de  $p$ , o que faz a negação de  $p$  verdadeira. Neste caso, atribuiremos o valor de verdade {F} para  $p$ , já que a negação dela tem o valor de verdade {V} (Wang, 2011, p. 496).

Os princípios (P<sub>1</sub>) e (P<sub>2</sub>) parecem dar vereditos que correspondem bem com nossas intuições sobre exemplos como o dado acima. Todavia, existem problemas quanto à visão dialeteísta clássica democrática de Priest. Os princípios (P<sub>1</sub>) e (P<sub>2</sub>) não são juntamente suficientes ou adequados para decidir os valores de verdade de todas as sentenças de verdade-inelimináveis, isto porque os valores de verdade de algumas sentenças de verdade-inelimináveis são “dependentes”.

Por exemplo:

(A) (B) é falsa.

(B) (A) é falsa.

Ao refletirmos sobre (A) e (B) veremos que é inconsistente afirmarmos que ambas são verdadeiras ou que ambas são falsas. Se ambas forem verdadeiras, então ambas, como elas mesmas dizem, são falsas. E se ambas forem falsas, como elas mesmas dizem, são verdadeiras. De uma maneira ou de outra temos uma contradição. Porém, não é inconsistente dizer que ambas tem valores de verdade opostos. Se para (A) for atribuído {V}, então segue que para (B) tem que ser atribuído {F}; de onde resulta nenhuma contradição. Um dialeteísta clássico que aceita a navalha de Priest: “Não devemos supor contradição além do necessário”<sup>22</sup> (Priest, *apud* Wang, 2011, p. 497,

---

<sup>22</sup>“One should not assume contradiction beyond necessity.” (Priest, *apud* Wang, 2011, p. 497)

tradução nossa), não deveria classificar (A) e (B) como ambas tendo o valor {V,F}.

A suposição de que (A) tem {V}, mas (B) tem {F} como valores de verdade e a suposição de que (A) tem {F}, mas (B) tem {V} como valores de verdade são ambas consistentes. Assim, não há fato *a priori* com o qual posso estabelecer a verdade de (A) ou de (B). Também não há fato empírico como qual possa estabelecer os valores de verdade de (A) ou de (B). Dessa forma, parece-nos que o dialeteísta clássico democrático de acordo com (P<sub>2</sub>) deve atribuir {F} para ambas as sentenças. No entanto, isto não é plausível. Uma vez atribuído o valor {F} para ambas as sentenças, elas tornam-se verdadeiras e falsas, não tendo mais {F} como seu valor de verdade. Se o dialeteísta não pode atribuir o valor {F} nem o valor {V,F} para ambas sentenças, não parece haver maneira para determinar seus valores de verdade de acordo com os princípios dados por Priest. (Wang, 2011, p. 497).

Tendo em vista o exemplo acima, parece-nos mais sensata uma visão mista (não somente democrática; restringindo o uso dos princípios (P<sub>1</sub>) e (P<sub>2</sub>) quando tratamos de sentenças cujos valores de verdade dependem dos valores de verdade de outras sentenças de verdade-inelimináveis. Tendo essa visão desigual, o dialeteísta clássico pode deixar o princípio (P<sub>1</sub>) intacto e restringir a aplicação do princípio (P<sub>2</sub>) para sentenças as quais os valores de verdade não dependam dos valores de verdade de outras sentenças de verdade-inelimináveis. Assim, levando em consideração o exemplo dado, o dialeteísta clássico pode arbitrariamente atribuir algum valor de verdade para cada sentença (A) e (B) (desde que eles sejam opostos). Wang diz: “Para tais dialeteístas clássicos, sentenças como (A) e (B) são como crianças que não têm o total direito de determinar seus próprios valores de verdade.”<sup>23</sup> (Wang, 2011, p. 497, tradução nossa)

Para concluir, tanto a visão não-democrática, como a democrática e a mista são problemáticas. Elas parecem esgotar todas as possibilidades para um dialeteísta clássico lidar com sentenças de verdade-inelimináveis. Como podemos ver, não parece haver nenhum modo plausível ou natural para um dialeteísta clássico atribuir valores de verdade para várias sentenças de verdade-inelimináveis. O cerne do problema parece ser a aceitação da lei do terceiro excluído. Um

---

<sup>23</sup>To such a classical dialetheist, sentences like (1) and (2) are like children who do not have a full right to determine their own truth-value”. (Wang, 2011, p. 497)

dialeteísta que se recusa a atribuir qualquer valor de verdade para qualquer sentença problemática, certamente evita resultados indesejáveis, mas o dialeteísta clássico (que aceita a lei do terceiro excluído) é desprovido dessa liberdade. Contudo, parece-nos sem sentido para um filósofo dialeteísta negar a lei do terceiro excluído, para assim resolver paradoxos simplesmente alegando que eles não possuem valor de verdade. Por fim, Wang diz: “Talvez devêssemos dar um passo adiante e proclamar que o projeto dialeteísta é um fracasso total.”<sup>24</sup> (Wang, 2011, p. 500, tradução nossa).

### 3.2 INCONSISTÊNCIAS NA REALIDADE EMPÍRICA

Uma alternativa ao *dialeteísmo* é considerar que as supostas inconsistências na realidade empírica são o resultado de erros de medida de aparelhos ou deficiência de leitura de tais aparelhos, o que nos leva a pensar que essas inconsistências não são reais, mas se tratam tão somente de falhas epistêmicas. Para tornar mais claro o que isso quer dizer, consideremos um exemplo oriundo da mecânica clássica.

Na mecânica clássica, observáveis são funções de espaço de estados no conjunto dos números reais. Quando medimos algo, devido à imprecisão dos aparelhos, temos certo intervalo  $\epsilon > 0$  que nos dá a precisão do aparelho. Por exemplo, ao aplicarmos a segunda lei de Newton,  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , os observáveis correspondentes às três quantidades, quando medidos de um objeto físico, como uma bola, são associados ao intervalo de possíveis valores de erro relacionados aos objetos de medição, como  $F \pm \epsilon_1/2$ ,  $m \pm \epsilon_2/2$  e  $a \pm \epsilon_3/2$  (sendo  $\epsilon_1/2$ ,  $\epsilon_2/2$  e  $\epsilon_3/2$  os intervalos de erro de escala para aparelhos analógicos)<sup>25</sup>. (da Costa, Krause, 2011, p. 13). Existem ainda, além do erro de escala que se estabelece pela precisão do aparelho, o erro sistemático – devido a um problema no aparelho já conhecido pelo físico (como uma balança que marca 1Kg a mais do que deveria) – e o erro aleatório – que se dá quando o físico faz diversas medidas do mesmo observável.

Devido a estas possíveis imprecisões nas medidas, físicos são levados a considerar esses intervalos de erro. O importante aqui é que

---

<sup>24</sup>“Maybe we should even go a step further and proclaim that the dialetheist project is a total failure”. (Wang, 2011, p. 500)

<sup>25</sup>  $\epsilon_1/2$  seria o intervalo de erro do aparelho analógico que mediu a força do objeto,  $\epsilon_2/2$  o intervalo de erro do aparelho analógico que mediu a massa do objeto e  $\epsilon_3/2$  o intervalo de erro do aparelho analógico que mediu a aceleração do objeto.

qualquer valor em qualquer destes intervalos pode ser aceito como valores correspondentes às quantidades. Por exemplo, ao medir o diâmetro de uma bola com uma régua com marcações de 1 mm de intervalo, podemos encontrar a medida entre 15,4cm e 15,5cm, levando-nos a dizer que ela é de 15,45cm, ou melhor  $15,45 \pm 0,05$ cm. Sabemos que erros de escala não são erros de medida. Por isso, qualquer valor entre 15,4cm e 15,5cm seria útil para nossos propósitos.

Assim, poderíamos encontrar três valores para  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , digamos  $F_1$ ,  $m_1$  e  $a_1$  em cada intervalo, de modo que teríamos  $\vec{F}_1 = m_1 \cdot \vec{a}_1$ . Então podemos escrever  $\models \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ . Como vimos, existem outros valores possíveis e perfeitamente aceitáveis para  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , como  $F_2$ ,  $m_2$  e  $a_2$  também em cada intervalo, de modo que  $\vec{F}_2 \neq m_2 \cdot \vec{a}_2$ , mas isso também implica que  $\models \vec{F} = m \cdot \vec{a}$  para valores também válidos devido aos erros aceitos. Como podemos lidar com duas situações onde  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$  e  $\vec{F} \neq m \cdot \vec{a}$  no escopo da lógica clássica? Este é um caso típico de uma inconsistência na realidade empírica que implica questões no nível do modelo matemático e da teoria do nosso esquema. Para lidar melhor com questões dessa natureza, precisamos lançar mão de uma lógica paraconsistente.

### 3.3 INCONSISTÊNCIAS NO MODELO MATEMÁTICO

As definições com as quais tratamos relacionam-se principalmente a teorias bem formuladas, em princípio formalizadas – onde a lógica subjacente é explicitada. Contudo, a noção de inconsistência também é aplicada a teorias informais, não totalmente formalizadas, como usualmente acontece na física, domínio ao qual restringiremos nosso discurso; porém, é argumentável que essa noção possa ser aplicada também à biologia e às ciências humanas.

As inconsistências encontradas num modelo matemático – a teoria informal do cientista - são típicas de alguns casos que podem ser achados na literatura científica, tal como a Teoria do Átomo de Bohr, que será estudada neste trabalho. Esse tipo de situação pode estar relacionada com uma possível hipótese sobre a realidade empírica. Os físicos que se utilizam dessa teoria, por exemplo, continuam a proceder informalmente, embora inconsistentemente. Aparentemente, os físicos trabalham dentro de uma parte da teoria onde a presença de inconsistências não é relevante para propósitos práticos; quando a inconsistência torna-se um problema, o cientista fornece mudanças *ad*

*hoc* para lidar com ela (o que acarretaria uma mudança na teoria). Devido ao caráter informal do modelo matemático, em se tratando dele, essas modificações não são relevantes. A nova teoria se parece com a anterior e o cientista não menciona explicitamente a mudança – que às vezes não é por ele percebida. Talvez possamos dizer que a física atual, de certa forma, procede desta maneira: tenta incorporar um modelo matemático informal dentro de um modelo matemático anterior, não prestando atenção nas possíveis inconsistências que possam ali estar, as quais geralmente irão aparecer somente depois do desenvolvimento da teoria, cujo tratamento formal irá requerer um tipo de lógica paraconsistente (da Costa, Krause, 2011, p.14).

### 3.4 INCONSISTÊNCIAS NA TEORIA

Sabemos hoje que a Teoria Quântica de Campos e a Relatividade Geral são logicamente incompatíveis. Vamos supor que a chamada “Teoria da Gravitação Quântica”, que ligaria a Teoria Quântica de Campos e a Relatividade Geral, esteja bem fundamentada, o que ainda não ocorre nos dias de hoje. Se os físicos estiverem corretos, os modelos matemáticos de cada uma dessas duas teorias são inconsistentes um com o outro, e a teoria que tentar agrupá-los será necessariamente inconsistente. Como nossa preocupação é evitar a trivialidade, isto acontecendo, qualquer teoria que pretenda juntar as duas mencionadas teorias terá como a lógica subjacente de tal teoria seria um tipo de lógica paraconsistente.<sup>26</sup> Se for assim, uma questão interessante aparece: a teoria seria inconsistente e, neste caso, como podemos abordá-la semanticamente? Esta dúvida aparece porque raciocinamos com o conceito de modelo nos moldes ‘clássicos’, ou seja, vinculados ao que aprendemos via lógica clássica. Trataremos o assunto com mais detalhes a seguir. Essa situação é semelhante àquela que estamos enfatizando: o cientista, e mesmo o filósofo, usualmente raciocina a partir de conceitos

---

<sup>26</sup>Existem vários sistemas de lógica paraconsistente desenvolvidos até o nível do cálculo de predicados de primeira ordem. Sobre estes sistemas, já se estabeleceram lógicas de ordem superior inconsistentes e não-triviais e teorias de conjuntos. Em particular, as teorias de conjuntos paraconsistentes mostraram-se fortes o suficiente para dar origem a muitas questões e resultados na matemática e na filosofia. Existem também semânticas apropriadas que foram delineadas para se dar conta de vários sistemas paraconsistentes, e que há uma generalização da definição de verdade de Tarski para o nascimento da teoria de modelos paraconsistentes (da Costa, 2008, p. 288).

e teorias que muitas vezes não mais se aplicam como antes às teorias científicas atuais. Exemplos típicos são os casos de conceitos como *nomes próprios*, *intensão* e *extensão* de conceitos, a noção de *indivíduo*, dentre outros, que segundo algumas interpretações foram postas em dúvida pela mecânica quântica (ver French e Krause 2006). Situação análoga ocorre, ao que tudo indica, com o conceito de modelo. Veremos como podemos abordar a presença de inconsistências através do conceito de quase-verdade.

### 3.5 INCONSISTÊNCIAS NO MODELO E QUASE-VERDADE

Dada certa teoria, existe um número potencialmente infinito de interpretações que satisfazem seus postulados, a saber, os modelos da teoria. Esperamos que um dos modelos da teoria esteja adequadamente formulado e seja o seu modelo pretendido. Contudo, a maioria são somente modelos abstratos, sem aparentemente nenhuma ligação com a experiência. Enquanto uma teoria que possui modelos, ela poderá ser categórica, onde seus modelos são isomórficos, ou poderá possuir modelos que não são isomórficos entre si. Em larga medida, isso dependerá das características da teoria e também de sua lógica subjacente. Os resultados que obtivermos do estudo dos modelos da teoria, assim como do próprio estudo da teoria e de seu modelo matemático, podem ser reinterpretados em termos da realidade empírica, podendo assim o cientista dizer que a teoria explica parte da realidade. Ao analisarmos os dados da realidade empírica, a fim de formular o modelo matemático, estamos tomados pela teoria que certamente incorpora formulações de experiências prévias, como dito por Einstein<sup>27</sup>: “É a teoria que decide o que pode ser observado.”<sup>28</sup> (Einstein, *apud* da Costa, Krause, 2011, p. 7, tradução nossa)

Dentro do domínio da física veremos como podemos de um modo entender como lidar com inconsistências. Para isso, usaremos o conceito de quase-verdade.

---

<sup>27</sup> Como discutimos previamente, às vezes ideias ideológicas estão presentes no cenário científico. Mesmo que o caso de Einstein não possa ser comparado com situações ideológicas patológicas, acreditamos que seja tarefa da prática científica disciplinar tais situações.

<sup>28</sup> “It is the theory which decides what can be observed.” (Einstein, *apud* da Costa, Krause, 2011, p. 7)

Suponha que  $\Delta$  seja um domínio de conhecimento de  $R$  o qual gostaríamos de investigar. Como tratamos até o momento, abordamos  $\Delta$  através de um modelo matemático, e sem perda de generalidade, ele corresponderá a uma teoria. Podemos pensar o modelo matemático ou a teoria como uma estrutura, uma estrutura conjuntista  $\mathbf{A}$ . Devido às típicas dificuldades encontradas em  $\Delta$ , supomos que não possuímos todas as informações sobre o domínio de  $\Delta$ , de forma que algumas das relações avaliadas que se mantêm entre os elementos do domínio de  $\mathbf{A}$  seriam parciais, isto é, supondo que  $R$  seja uma relação binária, então para algum  $a$  e  $b$  pertencentes ao domínio, não sabemos, efetivamente ou não, se  $aRb$  ou  $\neg aRb$  se mantêm; como acontece frequentemente nos domínios empíricos. Na matemática padrão, aquela construída em ZFC, as relações são totais, já que o princípio de terceiro excluído é válido, assim teremos  $aRb$  ou  $\neg aRb$ .

Com intuito de construirmos  $\mathbf{A}$ , assumimos alguns fatos básicos dados por dados empíricos ou por hipóteses que lançamos acerca do domínio. Em um conjunto  $P$  de proposições básicas, aceitamos as informações coletadas como verdadeiras (no sentido padrão de Tarski) em  $\mathbf{A}$ . A estrutura parcial se dá da seguinte forma:  $\mathbf{A} = \langle D, (R_i)_{i \in I}, P \rangle$ , onde  $I$  é um conjunto de índices que nomeia relações parciais  $n$ -árias  $R_i$  definidas em  $D$ .

Podemos ampliar a estrutura parcial  $\mathbf{A}$  em uma estrutura total  $\mathbf{B}$ , na qual todas as relações de  $\mathbf{A}$  serão totais. Para isso, precisamos admitir outras condições coletadas num novo conjunto de proposições  $M$  que trará informações ausentes em  $\mathbf{A}$ . Para  $\mathbf{A}$  ser ampliada em uma estrutura total  $\mathbf{B}$  é condição necessária e suficiente que  $M \cup P$  seja consistente. As novas suposições de  $M$  não podem contradizer as proposições básicas encontradas em  $P$ . Quando chegamos a tal estrutura  $\mathbf{B}$ , dizemos que  $\mathbf{B}$  é normal relativa à  $\mathbf{A}$ , ou que é uma estrutura  $\mathbf{A}$ -normal.

Seja  $\alpha$  uma sentença da linguagem de  $\mathbf{A}$ . Dizemos que  $\alpha$  é quase-verdade em  $\mathbf{A}$  relativa a uma estrutura  $\mathbf{B}$   $\mathbf{A}$ -normal:  $\mathbf{A} \models_q^{\mathbf{B}} \alpha$ , se  $\alpha$  é verdadeira em  $\mathbf{B}$  no sentido padrão de Tarski.

A linguagem de  $\mathbf{A}$  pode conter duas proposições contraditórias  $\alpha$  e  $\neg \alpha$ , onde  $\alpha$  é quase-verdade em  $\mathbf{A}$  relativa a uma estrutura  $\mathbf{B}$   $\mathbf{A}$ -normal, enquanto  $\neg \alpha$  é quase-verdade em  $\mathbf{A}$  em outra estrutura  $\mathbf{B}'$   $\mathbf{A}$ -normal.

Um fato muito interessante é que, certamente, não é possível que ambas  $\alpha$  e  $\neg \alpha$  sejam quase-verdadeiras em  $\mathbf{A}$  relativa a uma mesma estrutura  $\mathbf{B}$   $\mathbf{A}$ -normal, e isto se segue da condição necessária e suficiente, que assegura este fato.

Vamos exemplificar a estrutura da seguinte forma: suponha que  $\mathbf{A}$  descreve a velha teoria quântica. Nesse modelo matemático, o qual

podemos supor que é formulado axiomáticamente em uma teoria, existem dois conceitos complementares, a saber, partícula e onda. Uma partícula não é uma onda e uma onda não é uma partícula. Ademais, quando um sistema é preparado para detectar uma partícula ele não pode detectar uma onda e vice-versa. Assim, se  $\alpha$  representa “certo objeto físico que se comporta como partícula”, então  $\neg\alpha$  representa que “o suposto objeto quântico não se comporta como partícula” – o que implica que ele se comporta como onda. Quando formuladas de forma propícia, os dois pontos de vista podem ser estendidos para um modelo matemático ou uma teoria adequada que incorporam cada ponto de vista como sua hipótese básica, como a mecânica de partículas como a teoria de Bohm<sup>29</sup> ou como mecânica de ondas como a teoria de Schrödinger. Mesmo que em cada uma delas haja partículas e ondas, essa disparidade não se refere a uma mesma situação. No quinto capítulo onde analisaremos estudos de caso este exemplo será mais bem detalhado.

Podemos tratar as teorias de Bohm e Schrödinger como extensões da velha mecânica quântica. Em cada uma delas as proposições  $\alpha$  e  $\neg\alpha$  são asseguradas por vez, mas não em cada uma delas separadamente. Portanto, se considerarmos a possibilidade de existência de mais de uma possível extensão para uma estrutura parcial, como a visão pluralista que temos permite, uma lógica paraconsistente pode lidar de maneira apropriada com a possibilidade de explicação envolvendo ambos casos.

Por fim, uma abordagem através de estruturas parciais proporciona o tipo adequado de *framework* para investigarmos questões relacionadas a inconsistências em ciência. Por meio desta abordagem é possível representar, sem trivialidade, teorias científicas inconsistentes como quase-verdadeiras. Ademais, se tivermos uma situação em que inconsistências não possam ser acomodadas pela extensão de uma estrutura parcial inconsistente em duas estruturas consistentes, em princípio podemos tratar inconsistências e contradições diretamente através da formalização da teoria considerada por meio de uma lógica paraconsistente, como o cálculo  $C_1$ , por exemplo.

---

<sup>29</sup>Na mecânica de Bohm a suposição básica é a concepção de partículas como na mecânica clássica, mas elas são acompanhadas de uma onda piloto que dá às partículas seu comportamento ondulatório. A mecânica de Schrödinger será melhor explicada mais adiante.



## 4 A PERSPECTIVA INCONSISTENTE

### 4.1 LÓGICAS PARACONSISTENTES

Para podermos entender melhor e lidar adequadamente com inconsistências, precisamos dar algumas definições, referindo-nos a uma linguagem adequada contendo um símbolo de negação,  $\neg$ . Muitos dos conceitos aqui revistos já foram antecipados anteriormente, mas são aqui revisados para tornar o capítulo mais preciso e auto-suficiente:

- 1) Definição: Chamaremos de contraditórias duas fórmulas da forma  $\alpha$  e  $\neg\alpha$ .
- 2) Definição: Chamaremos de contradição a conjunção de duas fórmulas contraditórias, ou seja, uma fórmula do tipo  $\alpha\wedge\neg\alpha$ .

Uma contradição, portanto, tem forma  $\alpha\wedge\neg\alpha$ . Uma inconsistência em uma teoria acontece quando esta deduz  $\alpha$  e também deduz  $\neg\alpha$ . Isto não quer dizer que na teoria deriva-se  $\alpha\wedge\neg\alpha$ . Isto porque a lógica pode não ser adjuntiva. Porém, em alguns casos isto pode ocorrer, como na maioria dos sistemas conhecidos.

Lógicas adjuntivas são aquelas em que quando se tem uma fórmula  $\alpha$  e uma fórmula  $\beta$ , pode-se deduzir a conjunção das duas; de forma que teremos uma nova fórmula  $\alpha\wedge\beta$ . Nas lógicas não-adjuntivas isto não acontece. Se tivermos uma fórmula  $\alpha$  e uma fórmula  $\beta$ , não podemos deduzir a conjunção das duas. Com isso, não deduzimos  $\alpha\wedge\beta$ ; ou particularmente  $\alpha\wedge\neg\alpha$  a partir de  $\alpha$  e de  $\neg\alpha$ .

O que ocasiona a trivialidade, em se tratando de lógicas clássicas contendo negação, então, são, em especial, duas proposições contraditórias  $\alpha$  e  $\neg\alpha$ , particularmente  $\alpha\wedge\neg\alpha$ . Já que, nas lógicas ditas clássicas é válido o *princípio da explosão*, que em uma de suas formas se escreve  $\alpha\wedge\neg\alpha\rightarrow\beta$ , ou seja, de uma contradição podemos deduzir qualquer sentença bem formada. Mesmo no caso de lógicas não-adjuntivas, proposições contraditórias apresentam problema se alguma das seguintes expressões for tese da lógica subjacente (na lógica clássica, ambas são equivalentes à Lei de Scotus):  $\alpha\rightarrow(\neg\alpha\rightarrow\beta)$  ou  $\neg\alpha\rightarrow(\alpha\rightarrow\beta)$ .

Em que perspectiva podemos lidar com teorias inconsistentes, mas não triviais? Podemos lidar com teorias inconsistentes, mas não triviais alterando nosso enfoque; saindo da lógica clássica e utilizando uma lógica subjacente que admita inconsistência sem tornar a teoria

trivial. Para isso, podemos usar uma lógica paraconsistente como lógica subjacente, já que esta é uma lógica que nos permite trabalhar com teorias inconsistentes, mas não triviais. Por esse motivo, teorias inconsistentes, mas não triviais são chamadas de teorias paraconsistentes.

Muitos filósofos, desde Heráclito de Éfeso, Antístenes o cínico, até os atuais dialeteístas, propuseram a tese de que contradições são fundamentais para o entendimento da realidade, ou seja, eles afirmavam que a realidade é contraditória. Esse tipo de pensamento poderia levar ao começo de estudos sobre a possibilidade de rejeitar ou restringir o princípio (lei) de não-contradição e estudos sobre sistemas paraconsistentes – um tópico interessante para o historiador da lógica.

O princípio de não-contradição nos diz (numa possível formulação) que uma fórmula e sua negação não podem ser ambas verdadeiras. Esse princípio é um dos principais princípios da lógica clássica; além de ser muito importante, pois quando admitimos uma contradição (infringimos a lei de não-contradição) geramos inconsistência que implica trivialidade. Um conjunto de premissas inconsistentes gera qualquer afirmação bem formada como consequência. Como resultado, obtemos um conjunto de premissas de uma teoria inconsistente que irá acarretar trivialidade, fazendo com que a teoria aparentemente não tenha utilidade. Podemos expressar esse fato ao dizermos que sob a lógica clássica, o fecho de qualquer conjunto inconsistente de sentenças inclui toda sentença. Ou seja, um sistema não informativo; que nada aparentemente nos acrescenta. Admitir inconsistências sob o âmbito clássico, ao que tudo indica, seria promover o colapso da ciência. Aristóteles já dizia que o princípio de não-contradição era o mais forte dos princípios: “O mais seguro de todos os princípios básicos é que asserções contraditórias não podem ser simultaneamente verdadeiras.” (Aristóteles, *Metafísica* Γ 6, 1005b13-14)

Por aparecerem em vários níveis de discussão na ciência e na filosofia, como vimos anteriormente, as inconsistências não necessitam ser eliminadas do nosso estudo científico-filosófico. Há vários exemplos de teorias inconsistentes, como a teoria do átomo de Bohr, a teoria quântica de radiação de corpo negro, entre outros. Dados casos como esses, parece-nos prudente investigá-los em vez de simplesmente eliminá-los. Assim, nesse contexto, lógicas paraconsistentes acabam por assumir um papel fundamental dentro da própria ciência e também dentro da filosofia, uma vez que existe uma ampla gama de aplicações

para a lógica paraconsistente nos dias de hoje em tecnologia, medicina, computação, por exemplo (da Costa, Krause, Bueno, 2007, p. 874).

Precusores reconhecidos das lógicas paraconsistente foram Jan Lukasiewicz e Nicolai Vasiliev. Independentemente um do outro, sugeriram em 1910 e 1911 que lógicas “não-aristotélicas” poderiam ser obtidas ao se revisar as leis da lógica aristotélica, em especial questionando a validade universal do princípio da não-contradição (Arruda, 1980, p. 6). Desse modo, estes lógicos sugeriram rejeitar o princípio de não-contradição, para a obtenção de uma lógica não-aristotélica. Apesar de não ter efetivamente construído um sistema de lógica paraconsistente, Lukasiewicz inspirou seu aluno Jaskowski, e este construiu uma lógica chamada discussiva (ou discursiva) em 1948. A lógica discussiva de Jaskowski é sistema de cálculo proposicional paraconsistente. Ele foi motivado a criar sua lógica discussiva pela necessidade de abordar questões como: sistematizar teorias que contêm contradições, estudar teorias onde contradições são originadas por imprecisão e para investigar teorias empíricas cujos postulados ou premissas são contraditórios (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 844).

Em 1911, 1912 e 1913, inspirado pelos trabalhos de Lobachewski em geometrias não-euclidianas, inicialmente chamadas de geometrias imaginárias, Vasiliev anteviu uma “lógica imaginária”; uma lógica não-aristotélica onde o princípio de não-contradição não seria válido em geral. A despeito disso, Vasiliev não acreditava que existissem contradições “reais” no mundo, mas somente em um mundo criado pela mente humana, deste modo nomeando sua lógica de “imaginária”. Com isso, formulou a hipótese de mundos imaginários onde os princípios aristotélicos não seriam válidos, apesar de não a ter trabalhado por completo. (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 792).

O primeiro lógico a construir um sistema formal de lógica paraconsistente foi Jaskowski em 1948. Ele foi motivado por teorias que contêm contradições, teorias empíricas cujos postulados incluem hipóteses contraditórias e também por teorias onde contradições são causadas por imprecisões; estudou-as como intuito de sistematizá-las. A lógica discussiva de Jaskowski era restrita ao nível proposicional, apesar de sua ampla variedade de aplicações. Outro precursor das lógicas paraconsistentes é o lógico americano D. Nelson, que desenvolveu sistemas paraconsistentes em 1949 e 1959 (da Costa, Krause e Bueno 2007, p. 738).

Newton da Costa, independentemente de Jaskowski, em 1958, começou a estudar sistemas contraditórios (da Costa, 1974, p. 6). Desde

então, da Costa desenvolveu vários sistemas relacionados à paraconsistência, como a lógica paraclássica, apontando diferentes perspectivas para se lidar com inconsistências, trabalhos que apareceram a partir de 1962 (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 892).

O construtor de sistemas fortes de lógica paraconsistente suficientes para neles se ter uma matemática tão forte como a usual, efetivamente, foi Newton da Costa. Ele desenvolveu vários sistemas de lógica paraconsistente, incluindo além de nível proposicional também o nível de predicados, cálculos com igualdade, lógicas de ordem superior e teorias de conjuntos.

Nos anos sessenta, o interesse em lógicas que lidavam com inconsistências, principalmente pela relação com os estudos de da Costa, já começava a despertar em outras partes do mundo, especialmente na Polônia, Austrália, Estados Unidos, Itália, Argentina, Bélgica, Equador e Peru.

Dois fatores relevantes contribuíram para a importância do desenvolvimento da lógica paraconsistente. Primeiramente, em 1990, a base de dados *Mathematical Reviews* adicionou um novo registro, a saber, 03B53, chamado de “*Paraconsistent Logic*”. A partir dos anos 2000, o título do registro foi mudado para “*Logics admitting inconsistency*” (lógicas paraconsistentes, lógicas discussivas, etc.), fazendo com que o registro abarcasse um tema mais amplo. Recentemente o verbete foi novamente chamado de “*Paraconsistent Logics*”<sup>30</sup>. O segundo fator se dá pelo fato de que desde 1996 vários congressos mundiais sobre paraconsistência têm sido organizados (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p.793).

Hoje em dia, “paraconsistência” pode ser considerada como um amplo campo do conhecimento. É curiosa a vastidão de aplicações relativas à paraconsistência; não somente nos fundamentos da ciência e sua análise filosófica, como também em tecnologia, medicina, computação, entre outras. Assim, fica evidente o mérito dessa área do conhecimento, assim como seu desenvolvimento (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p.902).

A lógica hoje é um campo de conhecimento de mesma natureza que a matemática. É necessário considerar isso para que possamos entender a natureza e o significado da lógica. Os resultados obtidos no campo da lógica podem ser comparados em sua profundidade e originalidade àqueles alcançados no campo da matemática e no campo das ciências empíricas. Assim como na matemática, podemos dividir a

---

<sup>30</sup><http://www.ams.org/mathscinet/msc/msc2010.html?t=03Bxx&btn=Current>

lógica em dois domínios: o puro e o aplicado. Lógica pura é similar à matemática pura, no sentido que podemos supostamente desenvolvê-la *in abstracto*, independentemente de possíveis aplicações. Em especial, podemos estudar lógicas paraconsistentes por elas mesmas, particularmente tendo em vista estudar suas propriedades matemáticas abstratas. Através desse aspecto, no desenvolvimento de um sistema lógico, podemos proceder como sugere Hilbert (Hilbert, *apud* da Costa, Krause, Bueno, 2007, 794, tradução nossa): “[o] matemático terá que levar em conta não só as teorias que se aproximam da realidade, mas também, como na geometria, todas as teorias logicamente possíveis.”<sup>31</sup> Em suma, do ponto de vista puro, a lógica estuda certas estruturas abstratas, tais como linguagens formais, modelos e máquinas de Turing; independentemente de suas aplicações.

Ao seguirmos a sugestão de Hilbert, podemos desenvolver sistemas abstratos (puros) onde algum princípio da lógica clássica pode ser violado, em especial o princípio que nos diz que de premissas contraditórias qualquer fórmula da linguagem pode ser derivada; ou seja,  $\alpha \wedge \neg \alpha \vdash \beta$ . O princípio correspondente  $(\alpha \wedge \neg \alpha) \rightarrow \beta$  é o princípio de explosão<sup>32</sup>, já mencionado, válido não somente na lógica clássica, como também em quase todos sistemas lógicos conhecidos. Vasiliev construiu sua lógica imaginária baseando-se nessa ideia de violar princípios da lógica clássica.

Outro modo de desenvolvermos uma lógica é do ponto de vista aplicado. Nesse caso, procuramos algum campo do conhecimento onde nos parece que alguma lógica (em particular uma lógica paraconsistente) poderia descrever certas estruturas abstratas que refletem a maneira que certas inferências dedutivas são feitas neste domínio. Então, uma lógica pode ser estudada independentemente de sua aplicação, como um sistema matemático puro. Dessa forma, até mesmo como um sistema matemático aplicado, uma lógica possui uma dimensão pura, adicionada ao lado aplicado. De fato, podemos começar estudando um sistema lógico devido a uma motivação empírica científica, porém, posteriormente, podemos proceder de modo a verificar se o domínio científico pode ser axiomatizado, podendo estudar outras propriedades metalógicas do sistema, e assim por diante.

---

<sup>31</sup> “[t]he mathematician Will have to take account not only of those theories that come near to reality, but also, as in geometry, of all logically possible theories.” (Hilbert, *apud* da Costa, Krause, Bueno, 2007, 794)

<sup>32</sup> Também chamada de lei de Duns Scotus ou Pseudo Scotus.

Às vezes, alega-se que lógicas não-clássicas precisam ser desenvolvidas porque a lógica clássica não é mais suficiente para abarcar problemas atuais, e, por isso, precisa ser substituída por uma lógica mais adequada, de acordo com algum critério filosófico<sup>33</sup> (como menciona Haack, 1974, p. 01). Esse seria o caso para, por exemplo, a lógica intuicionista de Brouwer-Heyting se a consideramos como uma aproximação da filosofia da matemática original de Brouwer. A postura de Brouwer implica que, de certa forma, a matemática clássica tem deficiências básicas e que uma matemática construtivista deveria tomar seu lugar. Da mesma forma que a posteriormente chamada “lógica intuicionista” (que surgiu com os trabalhos de Heyting no rastro deixado por Brouwer) pode ser vista formalmente como um subsistema da lógica clássica na qual o princípio do terceiro excluído não vigora. Podemos argumentar que, em domínios que envolvem inconsistências, alguma outra lógica deveria ser usada em vez da lógica clássica. Atualmente, também existem filósofos que acreditam nisso, nos domínios inconsistentes a lógica clássica deveria ser substituída por outra lógica, como os dialeteístas<sup>34</sup>. (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 794).

Todavia, não é assim que vemos a lógica clássica (como algo insuficiente que deva ser substituído). A lógica clássica é um tema central que tem, e continuará a ter, grande interesse, ampla importância e fortes aplicações. Entretanto, em certos domínios, outras lógicas, em particular lógicas paraconsistentes, podem ser mais adequadas para evidenciar algumas estruturas subjacentes que estão sendo assumidas nestes domínios. A lógica clássica, de acordo com o que estamos investigando, não pode fazê-lo em todo domínio. Isso não mostra que a lógica clássica deva ser descartada, mas que a sua área de aplicação pode ser restrita. O uso de lógicas não-clássicas para sistematizar certos domínios nos ajuda a entender melhor certos aspectos desses. Com o uso de uma lógica paraconsistente podemos, por exemplo, entender melhor a natureza da negação e a significância do conjunto de Russell<sup>35</sup> pode ser contemplada (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 830).

---

<sup>33</sup>Haack não defende esta ideia, apenas comenta a posição de alguns filósofos como Priest.

<sup>34</sup>Filósofos como da Costa, Krause e Bueno acreditam que em domínios inconsistentes a lógica clássica deveria ser substituída por outra lógica, mais especificamente por uma lógica paraconsistente; devido à característica desta de evitar trivialidade em domínios inconsistentes.

<sup>35</sup>O conjunto de Russell é definido por  $R =_{\text{def}} \{x : x \notin x\}$  Consideremos o conjunto  $R$  como sendo "o conjunto de todos os conjuntos que não pertencem a

Ademais, pensamos que a lógica clássica é válida no seu domínio particular de aplicação. Quando falamos em lógica paraconsistente nos deparamos com duas possibilidades de classificação. Primeiramente, em certos contextos, podemos chamá-la de “rival” ou “heterodoxa”. Ou seja, uma lógica que se desvia da lógica clássica com relação a alguns de seus princípios. Todavia, em outros contextos, a lógica paraconsistente pode ser vista como uma lógica “suplementar” à lógica clássica. Isso porque algumas lógicas paraconsistentes coincidem com a lógica clássica se considerarmos somente “proposições bem-comportadas” (*grosso modo*, aquelas que obedecem o princípio de não-contradição). Em resumo, não queremos abandonar a lógica clássica e outras lógicas, para aderirmos somente a lógicas paraconsistentes. Lógicas paraconsistentes são úteis em determinados domínios, mas continuaremos a utilizar a lógica clássica, ou outras lógicas, sempre que seja conveniente e apropriado. Entretanto, uma lógica lida com as estruturas subjacentes de inferência de domínios ou teorias específicas. Nesse sentido, um campo particular pode demandar uma lógica diferente (da clássica) que acomodará melhor certas características que podem não ser tratadas de forma apropriada se utilizarmos a lógica clássica, por exemplo. Diferentes perspectivas de domínios da ciência podem exigir ferramentas lógicas distintas, que nos colocam em uma esfera diferente da clássica<sup>36</sup>. (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 795). Estenderíamos muito nosso trabalho em outra direção se fossemos discutir este ponto, mas mencionamos a mecânica quântica (de acordo com algumas interpretações), a psicanálise, a teoria do direito, a ética, dentre muitas outras.

Contudo, enfatizamos que a possibilidade de utilizar sistemas não-padrão não implica que a lógica clássica tenha perdido seu campo de aplicação, ou que certos domínios necessitam de outra lógica. Físicos

si próprios como membros". Formalmente:  $x$  é elemento de  $R$  se e somente se  $x$  não é elemento de  $x$ . No sistema de Cantor,  $R$  é um conjunto bem definido. Será que  $R$  pertence a si mesmo? Se sim, não é membro de  $R$  de acordo com a definição. Por outro lado, supondo que  $R$  não se contém a si mesmo, tem de ser membro de  $R$ , de acordo com a definição de  $R$ . Assim, as afirmações " $R$  é membro de  $R$ " e " $R$  não é membro de  $R$ " conduzem ambas a contradições. (Russell, 1903, p.101)

<sup>36</sup>Como exemplo de domínios que utilizam lógicas paraconsistentes, podemos citar controle robótico, controle de tráfego aéreo, sistemas de controles para máquinas autônomas, reconhecimento de células cancerígenas, disfunções de fala, entre outros. (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 874).

e outros cientistas continuarão a utilizar-se da lógica (informal) clássica para formulação de suas teorias. Porém, devemos perceber que outras formas de lógica podem nos ajudar a entender certas características desses domínios, que não são facilmente abarcadas pela via clássica.

Não acreditamos num monismo lógico. Enfim, sistemas lógicos distintos podem ser úteis para descrever aspectos diferentes do conhecimento, assim como sistemas matemáticos e sistemas físicos distintos. Isto é, assim como Krause, defendemos uma forma de pluralismo lógico (da Costa, Krause e Bueno, 2007, p. 796). Em síntese, existem, em princípio, várias formas de “lógicas puras” cujos potenciais empregos dependem, sobre tudo, da natureza das aplicações que temos por intuito estudar.

#### 4.2 INCONSISTÊNCIAS NA ESFERA EPISTÊMICA

Idealmente falando, dentro de um aspecto clássico, deveríamos evitar toda e qualquer inconsistência. Lembremos que Aristóteles, em sua *Metafísica*, considerou o princípio da contradição como sendo “o mais certo de todos os princípios” (Aristóteles, *Metafísica*, Γ 1011b, 14). Todavia, levando em conta os avanços sobre o entendimento das bases lógicas da ciência, isto já não nos parece ser mais algo viável de ser assumido sem qualificação, já que algumas teorias inconsistentes nos ajudam a entender melhor certos aspectos científicos de como a natureza se comporta em determinados momentos, a exemplo da teoria do átomo de Bohr que será um dos estudos de caso desde trabalho. Sendo assim, tendo em vista estas teorias inconsistentes, porém importantes para o desenvolvimento da ciência, deveríamos começar a pensar em como podemos aprender a conviver com inconsistências. Em uma atitude atual, parece sensato investigar sistemas inconsistentes.

Vamos agora expor a teoria defendida por Brown sobre a aceitação de teorias inconsistentes, para em seguida analisá-la.

Deveríamos nos perguntar como podemos ser realistas quando tratamos de teorias científicas se as teorias que aceitamos são frequentemente inconsistentes, internamente ou em relação a outras afirmações que também aceitamos. Ser realista é uma questão de estar ciente da inevitabilidade da existência de algum fato ou condição indesejável; ser realista sobre ciência é uma questão de acreditar que existe certa correspondência especial entre a teoria científica e o mundo (Brown, 1990, p.281). Porém, as teorias científicas que aceitamos são inconsistentes internamente ou com os melhores dados que temos até o momento; ou com outras teorias as quais também aceitamos. Se

acreditarmos que as teorias que irão substituir nossas teorias atuais serão incompatíveis com elas, parece-nos que não podemos nos assegurar que essa substituição é justificada e que nossas teorias atuais são verdadeiras. Poderíamos ainda ser realistas – aqueles que acreditam que as coisas nas quais acreditamos neste momento são uma aproximação da realidade e que cada nova observação nos aproxima da compreensão da realidade – se não acreditarmos que nossas teorias atuais são verdadeiras?

Em teorias científicas, os detalhes e a precisão são alcançados através da fragmentação da ciência em áreas e subáreas diferentes. Em cada área suposições diferentes e incompatíveis são frequentemente feitas para dar curso à elaboração da teoria e de leis fenomenológicas precisas e detalhadas. Combinadas com um entendimento prático através do aparato experimental, essas leis fenomenológicas são utilizadas para contabilizar dados. Entretanto, podemos ter teorias que são inconsistentes em relação a outras afirmações como, por exemplo, com leis já estabelecidas que atualmente descrevam o mundo. Teorias também podem ser internamente inconsistentes, como a teoria do átomo de Bohr que combina eletrodinâmica clássica com restrições quânticas incompatíveis com elas.

Poderíamos acreditar que teorias inconsistentes são verdadeiras? Podemos supor que acreditar que uma teoria é verdadeira é suficiente para criar um comprometimento realista em relação a ela. Brown nos diz que o comprometimento cognitivo vai além da crença; ele utiliza o termo aceitação para se referir à atitude proposicional envolvida. Para o filósofo aceitar uma alegação envolve tratá-la como se se acreditasse nela. Então, aceitar uma teoria envolveria acreditar em todos seus princípios, acreditar que toda a teoria fosse verdadeira; ao se aceitar uma proposição agiríamos, em certo aspecto, como se acreditássemos nela (Brown, 1990, p. 283).

De que forma poderíamos tratar uma teoria inconsistente como se acreditássemos nela? Quando temos duas ou mais teorias incompatíveis, as quais aplicamos a diferentes fenômenos podemos tratá-las como se acreditássemos nelas dentro do contexto nos quais elas são aplicadas. Quando uma teoria é internamente inconsistente<sup>37</sup> não podemos tratar todos seus princípios como se eles fossem verdadeiros num contexto único. De que maneira poderíamos dizer que aceitamos tal teoria? Na

---

<sup>37</sup> Uma teoria é dita internamente inconsistente se esta estiver em contradição com outra teoria faz parte da teoria dita inconsistente.

teoria do átomo de Bohr, o físico incluiu regras para a aplicação dos princípios incompatíveis envolvidos. Assim, quando surgir algum contexto de aplicação do princípio incompatível, haveria sub-contextos identificáveis que poderiam ser isolados, impedindo a aplicação conjuntiva de asserções contrárias em qualquer momento. Não há contexto no qual todos os princípios são tratados como conjuntamente verdadeiros, fazendo com que uma abordagem não-adjuntiva represente uma possibilidade para uma aceitação lógica da teoria (Brown, 1990, p. 284). Outra maneira de se obter uma aceitação lógica é utilizar lógica paraconsistente, já que estas permitem que haja sentenças contraditórias sem que haja trivialização.

Poderíamos também pensar que não há comprometimento algum ao se dizer que uma teoria – inconsistente – é verdadeira. Verdadeira no sentido de uma teoria, em nível teórico como mostramos no capítulo dois. Não queremos dizer aqui que quando acreditamos que uma teoria é contraditória o mundo também o seja, já que não temos uma visão dialeteísta, como visto no capítulo três. Ou seja, seguramente, para nós, uma teoria como a do átomo de Bohr ser inconsistente não implica que o mundo (a realidade velada) seja contraditório, mas apenas talvez na realidade empírica, devido a um erro de medida, como discutido no capítulo três, implicando uma inconsistência epistemológica. Todavia parece um pouco simplista, pois poderíamos dizer que certa afirmação é verdadeira somente quando nos é conveniente, e dizer que é falsa quando não nos for conveniente. Como poderia essa posição em relação às teorias incorporar uma visão séria da nossa visão do mundo? Desta forma não estaríamos tratando todas as teorias de uma visão instrumentalista, como quando aplicamos geometria euclidiana plana a um projeto de mapeamento, sabendo que o que estamos mapeando é na realidade uma parte de uma superfície esférica?

Existem diferenças entre comprometimentos manifestamente instrumentais e comprometimentos que são considerados realmente cognitivos. Há diferença entre aceitação – como definimos anteriormente – e atitudes puramente instrumentalistas. Um caso no qual utilizamos uma teoria de forma claramente instrumental é o de quando usamos a geometria euclidiana plana para topografia local. Quando utilizamos esta teoria, estamos entrando em conflito com outras crenças que possuímos. Utilizamos os princípios e afirmações da geometria euclidiana plana como se fossem verdadeiras em um contexto restrito; e estamos dispostos a acreditar que os resultados que obtivermos serão confiáveis. Ainda nesse caso, erros de medida serão muito mais significativos do que erros relacionados a suposições falsas sobre o

formato da Terra. Estamos cientes de que restringimos a aplicação da geometria euclidiana plana a certos contextos e que em outros casos, como para um mapeamento global, o uso dela não estaria de acordo.

Podemos perceber que há certa relação entre o uso instrumental de uma teoria com a aceitação de contexto restrito. Nas duas formas precisamos decidir onde usar nossas alegações, já que em alguns contextos elas entram em conflito com alegações baseadas em outros contextos; restringimos os contextos os quais iremos aplicar uma teoria – aplicá-la em certas áreas nos levará a problemas em vez de nos levar a resultados úteis. Contudo, há certas diferenças entre o uso instrumental e do uso da aceitação em contexto restrito.

Quando consideramos a aceitação, aceitamos as alegações que nos levam a conflitos somente quando não há mais alternativas para evitá-lo. Quando há uma alternativa mais adequada, não estamos mais nos utilizando do termo “aceitação” no sentido no qual estamos tratando. No caso da utilização da geometria euclidiana plana para mapeamento nós temos uma alternativa. Podemos considerar a geometria euclidiana plana como um maquinário sintático, que desempenha um papel útil nos cálculos, cujos resultados agregam ao que acreditamos em relação à Terra. Acreditamos que tal maquinário nos levará aproximadamente aos resultados corretos quando aplicados localmente. De fato, podemos provar levando em conta o que realmente acreditamos que ele nos levará (Brown, 1990, p.286).

Não temos tal alternativa quando a estrutura de nossas melhores teorias científicas incluem inconsistências. Por isso, temos dificuldade em relação a teorias sendo usadas somente como maquinário sintático para gerar resultados. Temos razão em acreditar que o uso de tal maquinário é confiável quando aplicado no caso do mapeamento. Essas razões são independentes de qualquer crença literal nos princípios da geometria euclidiana aplicada à Terra. Nossas razões para acreditar na segurança de aceite de teorias são razões do tipo que suportam comprometimentos cognitivos. Eles são independentes de qualquer teoria mais geral, eles lidam com a capacidade das teorias de atender aos requerimentos epistêmicos impostos pelas suas áreas de interesse melhor que qualquer outra alternativa.

Há outra diferença que podemos encontrar entre o uso instrumental de uma teoria e sua aceitação, do modo como a tratamos. Se quisermos fazer um mapeamento global, iríamos recusar o uso da geometria euclidiana plana para fazê-lo. Entretanto, poderíamos pensar o contexto de mapeamento global como uma combinação de contextos

locais nos quais a geometria euclidiana plana é aplicável. Porém, não estamos preparados para aplicar uma teoria instrumental a uma combinação de contextos nos quais separadamente a aplicaríamos. Isso porque, contextos nos quais aplicaríamos uma teoria instrumental não são fechados sob combinação. Contudo, a aceitação das teorias, como a estamos descrevendo, é fechada sob combinação de contextos.

Tratar uma teoria de maneira estritamente instrumental nos leva a considerá-la uma ferramenta de cálculo em vez de pensá-la como (aproximadamente) verdadeira. Ser aproximadamente verdadeira em contextos locais, para geometria euclidiana plana, por exemplo, não é essencial para sua utilidade. O que esperamos de tal teoria é que ela nos traga consequências aproximadamente verdadeiras, já que ela gera consequências aproximadamente verdadeiras, as quais podemos empiricamente comprovar. Assim, quando temos uma teoria na qual não temos alternativa de discutir seus fenômenos de uma maneira livre de conflitos e não temos uma melhor maneira de falarmos sobre tal fenômeno a não ser utilizando tal teoria, temos um comprometimento diferente de uma aceitação puramente instrumental.

Aceitar uma teoria inconsistente não demanda tratá-la como mera ferramenta para descrever fenômenos descritos em termos independentes da teoria. Ao se aceitar uma teoria, geralmente, estamos também acreditando na maioria de suas consequências, inclusive aquelas puramente teóricas. Por isso, quando temos uma teoria inconsistente que explica o êxito parcial de outras teorias já aceitas, a aceitação contextual pode ser a melhor forma de expressão de nossa posição cognitiva (Brown, 1990, p. 287).

Adotar crenças concomitantes não é uma opção satisfatória quando temos que tomar a aceitação de uma teoria inconsistente como uma opção séria. O corpo das afirmações inconsistentes que aceitamos fornece-nos interconexões sistemáticas entre as afirmações nas quais já acreditamos e a única forma que temos para gerá-las em novas aplicações. Segundo Brown, a teoria é a única maneira que temos para especificar as subestruturas empíricas nas quais acreditamos que podemos mapear nossas observações. De modo similar, as teorias inconsistentes são uma maneira que temos de gerar e especificar o que acreditamos sobre o mundo ao adotarmos uma visão realista.

A falta de alternativas pode nos fazer ter uma teoria inconsistente como parte central para a melhor descrição de um fenômeno em questão e também central para nosso trabalho experimental em relação a ele.

A história sobre a velha teoria quântica ilustra a importância de se trabalhar com certos tipos de teorias, sendo elas as melhores teorias

disponíveis no momento, entre elas teorias inconsistentes. Segundo Bryson Brown, podemos sim ter comprometimento cognitivo racional mesmo com teorias inconsistentes, ele diz (Brown, 1990, p.288, tradução nossa): “Comprometimentos cognitivos racionais podem ser feitos até mesmo para teorias que falham desta maneira”.<sup>38</sup> Assim sendo, isso está muito longe da fácil proclamação “tudo vale” em relação a quando se vai ou não aplicar os princípios os quais aceitamos. Quando aceitamos uma teoria – comprometendo-nos cognitivamente além de nossas crenças, aceitando uma alegação e tratando-a como se acreditássemos nela – estamos nos comprometendo a dar uma divisão sistemática dos contextos, nos quais os princípios incompatíveis da teoria terão seu lugar. Essa divisão deve permitir os contextos de aceitação fechados sob combinação. A divisão de contextos deve nos permitir usar princípios particulares em contextos onde temos provas confirmando esses princípios (Brown, 1009, p.288).

Se formos pensar em uma lógica para lidar com nossa noção de aceitação, essa lógica seria paraconsistente. Uma lógica paraconsistente refletiria nossos comprometimentos com relação ao nosso conjunto de afirmações. A partir desse conjunto ao qual estamos comprometidos, poderemos saber quais outras afirmações estamos implicitamente também comprometidos. Se tentarmos trabalhar com a lógica clássica, um conjunto de afirmações inconsistentes nos levaria a uma catástrofe – estaríamos explicitamente comprometidos a qualquer tal conjunto de afirmações, isto nos levaria a um comprometimento implícito a tudo, incluindo contradições. Em vez disso, devemos encontrar uma lógica paraconsistente que se encaixa com nossa noção de aceitação. Uma lógica paraconsistente nos ajudará a mostrar que nossa noção de aceitação não é apenas uma atitude conveniente como “acolher somente o que gosta e ignorar o que não gosta”.

Adotar uma lógica paraconsistente é uma maneira que temos de enfraquecer nossos comprometimentos epistemológicos quando estes nos levam a conflitos. Podemos mudar a maneira pela qual raciocinamos os nossos comprometimentos em vez de rejeitar certa afirmação ou ponderar a evidencia conflitante para se chegar a alguma atribuição provável. Uma lógica paraconsistente nos permite lidar racionalmente com o comprometimento de afirmações inconsistentes.

---

<sup>38</sup> “Rational cognitive commitments can be made even to theories which are flawed in this way.” (Brown, 1990, p.288)

Uma lógica paraconsistente a qual poderíamos adotar seria uma lógica não-adjuntiva. Com uma lógica não-adjuntiva respondemos ao tipo de conflito com o qual estamos lidando de uma maneira natural. A possibilidade do conflito vem de uma estrutura “retalhada” e da natureza local das evidências as quais desejamos que nossa teoria possa trabalhar. Quando isso acontece e procuramos por teorias que acolham simultaneamente nossas exigências, podemos encontrar problemas. Princípios que fazem parte de uma área podem aparentemente colocar obstáculos intransponíveis no caminho dos princípios que precisamos em outro local. Podemos usar, então, lógica não-adjuntiva para uma abordagem paraconsistente para nos permitir usar esses contextos “retalhados” separados até que o problema seja resolvido. Ao utilizarmos essa abordagem estamos trabalhando de forma conservadora, pois está muito próxima da lógica clássica (Brown, 1990, p.289).

Às vezes, a melhor consideração epistêmica que podemos ter é inconsistente. Em determinado momento, o estado do nosso empreendimento científico pode ser tal que a melhor forma de realizar nossos objetivos é aceitando uma teoria inconsistente.

Uma pessoa que aceita a teoria do átomo de Bohr, na perspectiva de Brown, pode acreditar que: os termos referentes da teoria referem-se ao fenômeno; e que as propriedades atribuídas aos objetos descritos pela teoria são co-extensivos com propriedades reais dos objetos referidos, em todas possíveis circunstâncias físicas as quais abrangem os contextos para quais a teoria é aceita. Esta é uma versão bastante forte de aceitação, e pode ser que nem sempre seja tão fácil explicar como a teoria aceita se relaciona com o fenômeno ao qual estamos interessados. Porém, isso vai além de um comprometimento instrumental. A relação entre as entidades teóricas em que acreditamos e nosso comprometimento pela melhor teoria que possuímos sobre elas deve ser levando em conta.

Quando tentamos eliminar a inconsistência de nossos comprometimentos cognitivos, podemos perceber que as alternativas consistentes podem acabar sendo menos completas e menos unificadas. Ao deixarmos de lado um poder explicativo considerável e a unidade de uma teoria para deixá-la consistente, podemos estar pagando um preço muito caro. Uma aceitação de contexto restrito também tem custos, mas em termos da estrutura global dos nossos comprometimentos; e isso é refletido, nesse sentido, por lógica não-adjuntiva paraconsistente ser uma lógica mais fraca. Entretanto, tal forma de aceitação nos permite proceder com investigações em contextos separados dentro da teoria,

tornando-a “verdadeira” dentro de cada restrição que consideremos importante na teoria (Brown, 1990, p. 293).

Apresentada a visão de Brown, acreditamos que ela seja uma alternativa para uma posição realista quanto a inconsistências em ciência. Porém, veremos agora que há também outra posição quanto a abordagem inconsistente através do conceito de quase-verdade.

#### 4.3 INCONSISTÊNCIA, PARACONSISTÊNCIA E VERDADE

É amplamente reconhecido que suposições inconsistentes prevalecem em nossas estruturas de crença científicas e cotidianas. Dentro do mundo científico, a teoria do átomo de Bohr é um dos mais conhecidos exemplos. Como viemos argumentando até aqui, existe uma dificuldade em acomodar inconsistências dentro da prática científica, dado que neste aspecto dentro do âmbito da lógica clássica um conjunto de premissas inconsistentes produz qualquer declaração bem formada como consequência. O conjunto de inconsistências explode, tornando-se trivial e a teoria é fadada à nulidade. O declínio lógico-anárquico é melhor entendido quando vemos que dentro da lógica clássica o fecho de qualquer conjunto inconsistente de sentenças inclui todas as sentenças. Isso é corroborado pela passagem de Popper dizendo que aceitar a inconsistência “significaria o completo colapso da ciência.”<sup>39</sup> (Popper, 1940, p.408, tradução nossa)

Podemos acomodar inconsistências considerando um modelo teórico que relaciona teorias em termos de estruturas parciais, proporcionando uma maneira natural e direta para lidar com inconsistências. Através desta abordagem podemos colocar em primeiro plano a importância heurística das inconsistências para ciência. Teorias inconsistentes podem ser consideradas quase-verdadeiras e como tais aceitas da mesma forma que qualquer outra teoria em ciência. (da Costa e French, 2003, p. 85)

O ponto central da teoria de Brown é a sua visão contextual de aceitação, de forma que a teoria é considerada aceita quando “escolhemos tratá-la como se verdadeira, observando limites contextuais neste comprometimento de modo a evitar trazer afirmações

---

<sup>39</sup> “Would mean the complete breakdown of science.” (Popper, 1940, p.408)

inconsistentes a jogo em qualquer momento.”<sup>40</sup> (Brown, 1990, p. 285, tradução nossa)

A ideia trabalhada é que o contexto de aplicação de uma teoria inconsistente pode ser quebrado em sub-contextos onde os princípios conflitantes que aparecem junto às inconsistências possam ser isolados. Assim, a aplicação conjuntiva de afirmações contraditórias pode ser efetivamente desfeita. Na medida em que as evidências que suportam teorias científicas são essencialmente locais por natureza, a lógica de aceitação é uma lógica paraconsistente não-adjuntiva, segundo a qual o fecho de um conjunto de afirmações sob conjunção não é implicada pelo conjunto. Não há contexto em que os princípios sejam tomados como verdadeiros em conjunto.

Um dos exemplos usados por Brown é o da teoria do átomo de Bohr. Ele alega que Bohr foi muito cuidadoso em assinalar os contextos nos quais os princípios contraditórios devem ser aplicados. Como será melhor explicado no capítulo cinco, a mecânica clássica pode ser aplicada ao equilíbrio dinâmico do elétron em algum desses estados estacionários, mas não na transição entre esses estados, onde a relação entre a energia e a frequência da radiação emitida é dada pela fórmula de Planck. (da Costa e French, 2003, p. 88) Podemos ver que Bohr adotou a abordagem de “retalhos”, Bohr diz que em seu modelo: “a possibilidade de um panorama abrangente poderia talvez não ser buscada na generalidade de pontos de vista, mas antes na possível limitação estrita da aplicabilidade de pontos de vista.”<sup>41</sup> (Bohr, 1981, p. 563, tradução nossa) Brown enfatiza a afirmação de Bohr dizendo: “Essa combinação de princípios clássicos e não clássicos é um jogo de lógica arriscado. Independente da forma de comprometimento a esses princípios que Bohr estava propondo, não era um comprometimento fechado sobre a relação de consequência clássica.”<sup>42</sup> (Brown, 1993, p.399, tradução nossa)

---

<sup>40</sup> “We chose to treat it as if true, observing contextual limits on that commitment so as to avoid bringing incompatible claims into play at any point.” (Brown, 1990, p. 285)

<sup>41</sup> “The possibility of a comprehensive Picture should perhaps not be sought in the generality of the points of view, but rather in the strictest possible limitation of the applicability of the points of view.” (Bohr, 1981, p. 563)

<sup>42</sup> “This combination of classical and non-classical principles is a logically risky game. Whatever form of commitment to these principles Bohr was proposing, it was not a commitment closed under the classical consequence relation.” (Brown, 1993, p.399)

Mesmo assim, Brown afirma que havia comprometimento. Este comprometimento, como explicamos, envolve uma crença na verdade de componentes separados, os retalhos da teoria. Bohr estava comprometido com a quantização da energia irradiada e com a física clássica. No entanto, sabemos que ao aplicamos a relação de fecho clássico sob esse conjunto de afirmações inconsistentes, sob a qual há a adjunção de modo que a verdade é efetivamente distribuída, leva à trivialidade. Assim, Brown defende a imposição de uma lógica não-adjuntiva que provê uma forma de fecho não-trivial: “Esta proposta modesta a respeito ao fechamento nos permite assumir o compromisso de Bohr a estes princípios inconsistentes com seriedade e pelo valor nominal, sem considerá-lo como comprometido, implicitamente, a qualquer coisa ou a tudo.”<sup>43</sup> (Brown, 1993, p.405, tradução nossa)

Todavia, esta proposta ainda possui problemas. Tomando o átomo de Bohr como exemplo fica clara a aplicação de uma abordagem não adjuntiva, mas existem outros exemplos de teorias inconsistentes onde não há uma separação nítida de contextos. Queremos ir além e estudar a natureza do comprometimento e seu envolvimento com a verdade.

Pela abordagem de Brown, quando dividimos em partes o conjunto de afirmações inconsistentes, cada pedaço deve ser considerado como verdadeiro. Então, considerando o átomo de Bohr, por exemplo, cada princípio separado deve ser tomado como verdadeiro. Brown nos diz que cada princípio deve ser tomado como verdadeiro em seu contexto apropriado. O comprometimento é contextual em relação aos princípios, enquanto o modelo atômico abrange não-adjuntivamente os contextos, envolvendo uma crença “como se” o modelo como um todo fosse verdadeiro.

Ao trabalharmos com a quase-verdade notamos uma diferença. Por exemplo, a mecânica newtoniana é tomada “como se” fosse verdadeira, ao invés de verdadeira *per se*, em seu domínio restrito. Isto ajuda a demonstrar o que queremos dizer quando falamos que ela deve ser tomada como verdadeira pragmaticamente. Esta diferença evidencia ainda mais a distinção entre os contextos em cada caso. Com a quase-verdade, o contexto é invocado para barrar afirmações onde a mecânica

---

<sup>43</sup> “This modest proposal regarding closure allows us to take Bohr’s commitment to these inconsistent principles seriously and at face value, without regarding him as committed, implicitly, to anything or everything.” (Brown, 1993, p.405)

newtoniana não deve ser tomada como verdadeira em qualquer sentido, pragmaticamente ou de outra forma, ela deve simplesmente ser dispensada como falsa. Na abordagem de Brown, o contexto é estruturalmente incorporado à teoria, de Bohr, por exemplo, e é refletido na divisão de contextos. (da Costa e French, 2003, p. 89)

A abordagem proposta por Brown faz com que teorias inconsistentes sejam consideradas estruturalmente fragmentadas e desta forma fica difícil entendê-las e compreendê-las como teorias coerentes. Fica complicado entendermos essa coleção de contextos como uma unidade integrada de alguma forma. Porém, Brown propõe que a coerência está relacionada ao comprometimento cognitivo da comunidade científica. Na teoria do átomo de Bohr, por exemplo, como veremos no capítulo cinco, havia comprometimento da comunidade científica, que pode ser entendido como um conjunto fechado de afirmações, onde a inconsistência é intrínseca, o que nos obriga a representar este fecho de forma paraconsistente. Neste sentido tipicamente não-clássico temos coerência e integridade.

Mesmo assim, ainda há dificuldade em visualizarmos a divisão entre contextos; e mesmo Brown é ciente desta dificuldade:

Quando aceitamos afirmações, desta forma, estamos comprometidos a dar divisão sistemática do contexto em que as afirmações incompatíveis terão seus papéis. Esta divisão deve permitir o fecho dos contextos de aceitação sob combinação. E deve ter alguma conexão com as evidências que somos capazes de dar para as afirmações em questão: a divisão de contexto deverá permitir-nos usar afirmações específicas em contextos onde encontramos evidências que confirmem essas afirmações. <sup>44</sup> (Brown, 1990, p.288, tradução nossa)

---

<sup>44</sup> “When we accept claims in this way, we are committed to giving systematic division of the context in which the incompatible claims will have their roles. This division must allow for closure of the contexts of acceptance under combination. And it must have some connection with the evidence we are able to give for the claims in question: the division of context should allow us to use particular claims in the contexts where we find evidence confirming those claims.” (Brown, 1990, p.288)

A divisão sistemática de contextos mesmo que difícil de ser reconhecida em uma teoria parece poder ser aplicada à teoria de Bohr. Como Brown enfatiza, a mecânica clássica era para ser aplicada ao elétron nos estados estacionários, enquanto a teoria quântica aparecia na transição discreta entre os estados. Entretanto, não podemos esquecer que o estado estacionário primeiro era estável, e assim o elétron em tal estado não irradiaria energia espiralando em direção ao núcleo; esta era uma inconsistência central, e este fato não era previsto pela física clássica. Deste modo, podemos verificar que a divisão sistemática de conceitos não é assim tão facilmente delineada.

Outro estudo de caso que trataremos neste trabalho é o Princípio de Complementaridade de Bohr; vamos também analisá-lo aqui. A partir de 1925 houve o desenvolvimento da nova mecânica quântica, de fato, matematicamente consistente, porém ainda assim ela possui incongruências a nível interpretacional e um exemplo disso é como entender o aspecto dual onda-partícula dentro dos fenômenos quânticos. Essas incongruências eram chamadas por Bohr de incongruências superiores ou inconsistências aparentes, e o físico estava disposto a aceitá-las como parte integral da teoria. Veremos mais adiante que o Princípio de Complementaridade consagrou essa inconsistência de cunho interpretacional como aspecto fundamental para entendermos os fenômenos quânticos. (da Costa e French, 2003, p. 92)

As inconsistências aparentes ou superiores marcam a divisão entre a velha e a nova mecânica quântica. Na velha mecânica quântica, a inconsistência estava incorporada tanto no formalismo matemático e com isso também consequentemente em sua interpretação. Na nova mecânica quântica o formalismo matemático é consistente, mas não há uma figura interpretacional uniforme, ocasionando uma discussão neste aspecto.

As inconsistências superiores podem também ser referidas como paradoxos. Dentro do desenvolvimento da física, podemos notar que paradoxos são melhores aceitos que inconsistências como dizem Rechenberg e Mehra:

Desde o final de 1925 havia surgido um claro reconhecimento da diferença entre um paradoxo implícito na descrição dos fenômenos quânticos e uma inconsistência do esquema matemático empregado. Niels Bohr e os físicos quânticos aprenderam que uma inconsistência era muito pior do que um paradoxo. Um paradoxo pode ser

muito desagradável, mas ainda assim pode-se criar uma teoria na qual os resultados seguiriam de uma forma lógica, de modo que dois resultados nunca se contradizeriam.<sup>45</sup> (Rechenberg e Mehra, *apud* da Costa e French, 2003, 93, tradução nossa)

Mesmo assim, o paradoxo da dualidade onda-partícula incomodava os cientistas. Essa característica essencial advém das relações de incertezas, como veremos adiante, que se encontram na contraparte matemática da interpretação do Princípio de Complementaridade. Ao desenvolver suas hipóteses físicas, Bohr estava preocupado com a consistência lógica e veio a perceber que isto não poderia ser alcançado através de passos fragmentados em sua teoria, antes percebeu que precisaria de uma revisão nos fundamentos do campo da física. A limitação de contextos sobre a aplicação de conceitos clássicos e quânticos era necessária nos primórdios do desenvolvimento da mecânica quântica para que fosse possível obter resultados empíricos significativos. A inconsistência nesse ponto era problemática, pois estava situada dentro da matemática utilizada e conseqüentemente em sua única forma de interpretação – estritamente corpuscular do átomo e de seus constituintes. Posteriormente, com instauração da nova mecânica quântica o diagrama matemático foi obtido de forma consistente, mas ainda havia um paradoxo em sua interpretação. O paradoxo é visto pelas mais rigorosas limitações através de diferentes panoramas ontológicos relacionados à dualidade onda-partícula, mas não na aplicação de princípios clássicos e quânticos como acontecia anteriormente. (da Costa e French, 2003, p.94)

Podemos também pensar que uma teoria inconsistente é somente um passo para que uma nova teoria consistente venha a ser construída. Embora isto seja algo típico dentro da ciência e possa de fato vir a acontecer, a sucessora consistente talvez seja construída somente através de um procedimento muito complicado e através seja preciso lançar mão de muitos artifícios heurísticos para sua elaboração. E, ainda, mesmo

---

<sup>45</sup> “Since the end of 1925 there had come about a clear recognition of the difference between a paradox implied in the description of quantum phenomena and an inconsistency of the mathematical scheme employed. Niels Bohr and the quantum physicists learned that an inconsistency was much worse than a paradox. A paradox might be very disagreeable, but still one could set up a theory from which the results would follow in a logical way, so that two results would never contradict each other.” (Rechenberg e Mehra, *apud* da Costa e French, 2003, 93)

que por meio de uma subteoria uma nova teoria venha a surgir, isto será possivelmente feito através de uma retrospectiva; e este processo não nos dá indícios sobre como devemos tratar uma teoria inconsistente epistemicamente.

Não é uma tarefa fácil entender nossos comprometimentos epistêmicos e nossas crenças de maneira geral e uma tarefa ainda mais árdua em se tratando de ciência. Não somos logicamente oniscientes, somos capazes de manter somente certo número finito de crenças explícitas, e muitas das implicações de nossas crenças não são imediatamente óbvias. Quanto a inconsistências em ciência, Norton diz algo muito oportuno:

Na tradicional filosofia da Ciência, atribuímos rotineiramente poderes para os cientistas que estão perto de divinos. É apenas em circunstâncias desesperadas que podemos até cogitar a possibilidade de que os cientistas não são logicamente oniscientes e não veem imediatamente todas as consequências lógicas de seus comprometimentos. Os habitantes do mundo sujo da ciência real, estão muito aquém desse ideal. Na verdade eles vão rotineiramente comprometer-se conscientemente e até mesmo com entusiasmo ao grande anátema dos filósofos: um conjunto de proposições logicamente inconsistente.<sup>46</sup> (Norton, *apud* da Costa e French, 2003, p. 97, tradução nossa)

Ainda que haja uma falha de onisciência lógica, onde dado um conjunto de crenças e muitas das consequências dessas crenças não são conscientemente mantidas ou das quais não somos cientes devido a natureza finita de nossas mentes, há um comprometimento em relação a

---

<sup>46</sup> “In traditional philosophy of Science, we routinely attribute powers to scientists that are near divine. It is only in desperate circumstances that we may even entertain the possibility that scientists are not logically omniscient and do not immediately see all the logical consequences of their commitments. The inhabitants of the grubby world of real science fall far short of this ideal. In truth they will routinely commit themselves consciously and even enthusiastically to the great anathema of philosophers: a logically inconsistent set of propositions.” (Norton, *apud* da Costa e French, 2003, p. 97)

essas consequências. Essa falha pode ser acomodada em um sistema formal, como dissemos, e ele é dedutivamente fechado em certo sentido. Este sistema é não-clássico e o fecho a respeito da consequência lógica é dado de forma não-clássica.

De fato, não somos logicamente oniscientes neste aspecto. Podemos ainda manter nosso senso de fecho dedutivo, e este pode até mesmo ser não-clássico. Uma maneira de acomodar esta falta de onisciência lógica é através de um sistema formal onde é introduzida a noção de verdade relacionada à verdade pragmática. (Não trataremos deste assunto, mas ele pode ser encontrado em da Costa e French, 2003, cap. 7)

A relação entre crença e verdade não será detalhada aqui, mas uma atitude epistêmica mais fraca como a associada com a de verdade parcial nos permite negar a equivalência entre verdade e crença (acreditar que  $p$  é acreditar que  $p$  é verdadeira) para assim impedir a propagação de uma inconsistência. Deste modo podemos dizer que um cientista que aceita uma teoria inconsistente acredita em uma teoria contraditória, mas não possui crenças inconsistentes. O mais importante em relação a este ponto é o fato de que aceitar teorias inconsistentes não implica que estamos aceitando que “tudo vale”. (da Costa e French, 2003, p. 99)

Ainda existe quem diga que a aceitação e verdade devem ser mantidas separadamente, pois a noção de verdade é dedutivamente fechada e a aceitação parece não possuir tal fecho como propriedade:

Algumas partes teóricas da ciência estão longe do solo de sentenças observacionais. Sugeri que o falar de verdade está plantado neste solo, de modo que as raízes desse conceito se encontram longe de qualquer ponto de contato claro com as parreiras da física altamente teórica.<sup>47</sup> (Ullian, *apud* da Costa e French, 2003, p. 100, tradução nossa)

Mas concordamos com da Costa e French quando dizem:

---

<sup>47</sup> “Some theoretical parts of science are far from the soil of observational sentences. I have suggested the talk of truth is planted in that soil, so that the roots of that concept lie far from any points of clear contact with the trellised vines of highly theoretical physics.” (Ullian, *apud* da Costa e French, 2003, p. 100)

No entanto, dissociar completamente aceitação de verdade, mesmo ao nível da base empírica, é abrir a porta para convencionalismo. Embora as partes teóricas dos modelos utilizados na ciência pareçam residir na copa das árvores, elas ainda estão ligadas às suas raízes obseracionais (mesmo parreiras devem tocar o solo em algum lugar!).<sup>48</sup> (da Costa e French, 2003, p.100, tradução nossa)

Deve haver alguma forma de verdade para os comprometimentos cognitivos dos cientistas serem tomados seriamente; algum tipo de fecho deve ser atribuído à esfera de aceitação. Vimos que a divisão de teorias em contextos fracassa em atrelar as interconexões entre partes da teoria e da estrutura teórica em geral. Todavia, essa divisão passa a ser desnecessária quando consideramos teorias como quase-verdadeiras e as aceitamos como tal.

Temos, deste modo, que uma crença em uma inconsistência pode ser, contudo, considerada parcialmente verdadeira. Os motivos últimos para considerarmos isto é uma teoria pragmática, no sentido amplo, a relação com o suporte empírico que esta teoria recebe. Essa abordagem captura mais apropriadamente a atitude epistêmica a respeito de teorias inconsistentes. Além disso, quando analisamos a inconsistência deste modo, focamos na estrutura dos objetos de crença inconsistentes, em vez da natureza do conjunto de crenças. (da Costa e French, 2003, p. 101)

Quando consideramos teorias inconsistentes, vemos que cientistas estão primeiramente interessados nas consequências de suas suposições independentemente da consistência destas suposições quando as veem dentro de um sistema lógico. O que são vistos como primordiais são os resultados empíricos que acabam por trespassar a preocupação com a consistência. A existência de inconsistências pode ser compensada quando vista não como verdadeira, mas parcialmente verdadeira. Ademais, ao tratarmos uma teoria como parcialmente verdadeira

---

<sup>48</sup> “However, to disassociate acceptance entirely from truth, even at the level of the empirical basis, is to open the door to conventionalism. Although the theoretical parts of the models employed in science appear to reside in the treetops, they are still connected to their observational roots (even trellised vines must touch ground somewhere!).” (da Costa e French, 2003, p.100)

encorajamos a busca por uma representação completa da teoria e também evidenciamos seu potencial como fonte heurística para um futuro desenvolvimento científico.

Acreditamos que haja um papel heurístico que entra em jogo quando tratamos de teorias inconsistentes. Usualmente inconsistências são tomadas como falhas no decorrer da construção de uma teoria sucessora consistente. Um dialecionista como Priest discordaria de tal afirmação, dizendo que a verdade pode ser matida ao nível do objeto da própria inconsistência, a verdade da própria contradição – como visto no capítulo três. Um instrumentalista, dispensando a verdade, diria que teorias inconsistentes não deveriam ser eliminadas como objetivo final da ciência. Ambas as configurações conflitam com a atual prática científica, onde há uma tentativa nítida de se “caminhar” da inconsistência para consistência. Os processos e estratégias utilizadas pelos cientistas para este “caminhar” são descritos por Post:

Esta incompletude de teorias, ou a sua abertura para o crescimento para além delas, é um caso mais forte e mais interessante do que apenas preencher as lacunas nos dados abrangidos por uma teoria, como elementos que faltam na tabela periódica. Assim como o sistema de números reais não está fechado, no sentido em que se pode formular equações apenas em termos de números reais cujas soluções apontam para fora do sistema, deste modo uma teoria física pode apresentar a sua falta de fecho. Os pontos em que uma teoria é aberta, ou anómala, proporcionam uma forte indicação da maneira em que a futura maior teoria deva ser construída.<sup>49</sup> (Post, *apud* da Costa e French, 2003, p. 104, tradução nossa)

---

<sup>49</sup> “This incompleteness of theories, or their openness to growth beyond themselves, is a stronger and more interesting case than just filling the gaps in the data covered by a theory, such as missing elements in the periodic table. Just as the system of real numbers is not closed, in the sense that one can formulate equations in terms of real numbers only whose solutions point outside the system, so a physical theory may show its lack of closure. The points at which a theory is open, or anomalous, provide a strong indication of the way in which the future larger theory is to be build.” (da Costa e French, 2003, p. 104)

Cientistas como Bohr especularam como através de fragmentos já confirmados da velha mecânica quântica poderiam ser mantidos para uma futura teoria. Eles raciocinaram e inferiram partir de teorias inconsistentes. Estruturalmente as teorias eram inconsistentes e incompletas no sentido de que com as inconsistências não era possível saber se as propriedades relevantes e relações abarcadas pela teoria iriam ou não se manter dentro do domínio, onde a teoria é anômala é também onde se encontra seu espaço em aberto; esta abertura pode ser representada por uma estrutura parcial. Esta abertura pode, também, ser investigada heurísticamente, ou seja, orientações heurísticas em direção ao desenvolvimento científico são admitidas da maneira esboçada por Post. (da Costa e French, 2003, p. 105)

Uma posição conservadora como a de Popper falha em reconhecer a fertilidade heurística das inconsistências dentro do progresso científico, dizendo que elas devem ser removidas antes que qualquer outro passo seja tomado em direção ao avanço científico. Nossa caracterização coloca as inconsistências como propriedade fundamental da natureza, elevando sua posição dentro do desenvolvimento científico. Preservamos uma atitude epistêmica de aceitação e uma forma de fecho que é relevante para nosso conjunto de crenças, acreditando na fertilidade heurística das inconsistências. Rejeitamos a separação de teorias em contextos incompatíveis, mas concordamos que uma lógica para a aceitação deva ser paraconsistente, e que essa aceitação envolve um comprometimento. Certas teorias inconsistentes podem ser consideradas como quase-verdadeiras e aceitas desta forma. (da Costa e French, 2003, p. 106)

É uma grande motivação para pesquisa científica e uma importante tarefa buscar uma resolução, uma posição que possa ser adequada para abarcarmos de forma descritiva o mundo e que compreenda outros aspectos os quais queiramos que nossas teorias científicas suportem.



## 5 ESTUDO DE CASOS

### 5.1 CORPO NEGRO

Durante o século XIX estava sendo bastante estudado o efeito da temperatura sobre os corpos, as máquinas térmicas, a termodinâmica. Existe uma grandeza relacionada a esta questão que é chamada de calor específico. O calor específico é uma maneira de avaliação onde medimos o quanto de calor é preciso fornecer a um corpo para que ele aumente sua temperatura de um grau Celsius. Esta grandeza mede o quanto de energia um corpo pode absorver.

A diferença do calor para qualquer outro tipo de energia é que o calor não é uma energia direcionada. Quando aquecemos um corpo, a energia é compartilhada por todos os graus de liberdade que este corpo apresenta. De um ponto de vista, inclusive lógico, não há razão alguma para que um grau de liberdade seja privilegiado a outro. A partir disto temos o princípio de equipartição de energia. A energia de um corpo tem que ser igualmente compartilhada por todas as partículas de um corpo. *Grosso modo*, grau de liberdade é qualquer forma de um corpo gastar energia. Uma partícula pode ter três graus de liberdade: translação, rotação e vibração. Estes graus de liberdade estão relacionados aos possíveis movimentos que uma partícula pode ter.

Vamos entender melhor este princípio. Quando fornecemos energia a um corpo, não significa que vamos dividir a energia igualmente para todas as partículas. O que é equitativo são as diferentes formas de ter a mesma energia.

Suponha que tenhamos quatro partículas. A soma da energia total distribuída entre estas quatro partículas é três Joules. Na figura veremos quais são as possíveis formas de se ter três Joules de energia para estas quatro partículas.

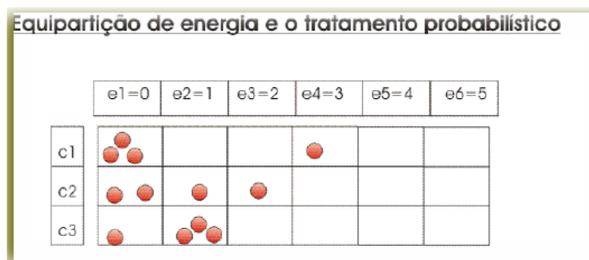


Figura 4: Equipartição de energia e o tratamento probabilístico.

Podemos ter três partículas com energia zero e uma partícula com energia três. Podemos ter duas partículas com energia zero e uma partícula com energia um e uma partícula com energia dois. Podemos ter, por fim, uma partícula com energia zero e três partículas com energia um. Estas são três configurações características onde há equipartição de energia. Agora fica claro que distribuir a energia não é dar a cada partícula a mesma quantidade de energia. São as configurações  $c_1, c_2$  e  $c_3$  da figura que se encontram igualadas.

Quando temos objetos clássicos, cada uma dessas três partículas pode ser identificada, nomeada. Então, em nosso exemplo, quando permutamos as partículas temos  $4!$  permutações possíveis. Dentro de  $c_1$ , temos a permutação do estado de energia  $e_1$  que é  $3!$ . Portanto  $\omega_{c_1} = 4!/3!$ . E o mesmo se segue para os estados  $c_2$  e  $c_3$ . Vejamos:

$$\omega_{c_1} = \frac{4!}{3!} \quad \omega_{c_2} = \frac{4!}{2!} \quad \omega_{c_3} = \frac{4!}{3!}$$

$$W = \omega_{c_1} + \omega_{c_2} + \omega_{c_3} = 20$$

$$P(c_i) = \frac{\omega_{c_i}}{W} \quad \left\{ P(c_1) = \frac{4}{20}, P(c_2) = \frac{12}{20}, P(c_3) = \frac{4}{20} \right\}$$

$$\langle n_1 \rangle = 3P(c_1) + 2P(c_2) + P(c_3)$$

$$P(e=0) = \frac{\langle n_1 \rangle}{N} \quad E_{total} = 3$$

Figura 5: Comportamento probabilístico.

Nosso número total de configurações será  $W = 20$ . Onde todas elas têm a mesma energia. Dentro do âmbito clássico, se quisermos distribuir igualmente a energia, teremos que seguir o princípio de equipartição de energia. As probabilidades do sistema se encontrar em cada um desses estados é diferente, como podemos ver acima.

O que precisamos notar é que, ao seguirmos este princípio, precisamos levar em conta que estamos distinguindo uma partícula da outra, pois isto nos faz ter este tratamento probabilístico. Ora, podemos pensar que a indistinguibilidade está presente dentro destas configurações, mas o que o princípio considera é o seguinte: não importa a partícula que coloquemos lá, o nome dela, ela nos dá a mesma configuração. Assim, a indistinguibilidade não é necessária para o princípio de equipartição de energia.

Agora que sabemos que o princípio de equipartição não privilegia nenhuma configuração, vamos tomar o exemplo de um gás. Quando aquecemos um gás, ele chega a uma energia total e essa energia será compartilhada por todo o gás. As partículas colidirão umas com as outras, e ao colidirem elas irão trocar energia. Teremos um sistema que se equilibrará dinamicamente. O gás passará dinamicamente por todas as configurações possíveis a ele, uma partícula em certo instante estará com uma velocidade alta, em outro instante com uma baixa velocidade. A probabilidade de o gás ter certo número de partículas e certa configuração pode ser calculada como feito anteriormente. Isto dependerá da energia total que dependerá da temperatura, dando-nos certa distribuição. Devido ao princípio de equipartição podemos calcular como as velocidades das partículas se distribuem e do que elas dependem. Esta é a famosa distribuição de velocidades de Maxwell.

Nossa estatística, em se tratando da equipartição, é muito forte, pois não estamos tratando de um sistema em particular, mas de qualquer sistema. Não sabemos exatamente o que acontece com cada partícula, mas possuímos a média e isso nos provê as informações, como o sistema recebe energia, por exemplo.

Uma partícula pode ter três graus de liberdade, como citado anteriormente. O que descobrimos com a distribuição de Maxwell é que a energia numa dada temperatura será  $KT/2$  para cada grau de liberdade.

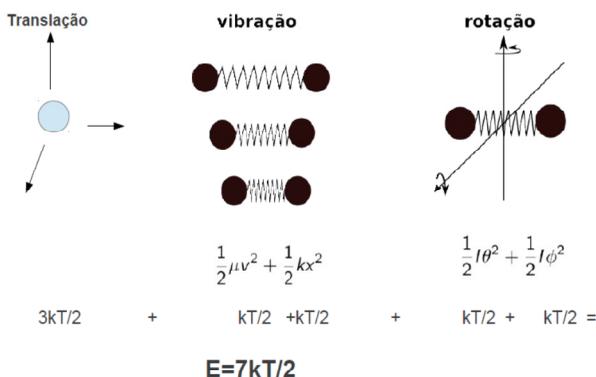


Figura 6: Os graus de liberdade.

Portanto, na translação temos três graus de liberdade, na vibração dois graus e na rotação também dois graus, totalizando  $E=7kT/2$ .<sup>50</sup>

Dentro da teoria temos, portanto, uma hipótese razoável onde para cada grau de liberdade temos  $kT/2$  e que a energia total do sistema estará associada à temperatura desta forma.

Todavia, quando aquecemos um gás certa anomalia aparece. O calor específico de um mol de gás será:  $c_v = \Delta E / \Delta T = 7k/2 = 7R/2$ . Sendo  $k=nR$ , onde  $n$  é o número de moles e  $R$  a constante universal dos gases ideais.

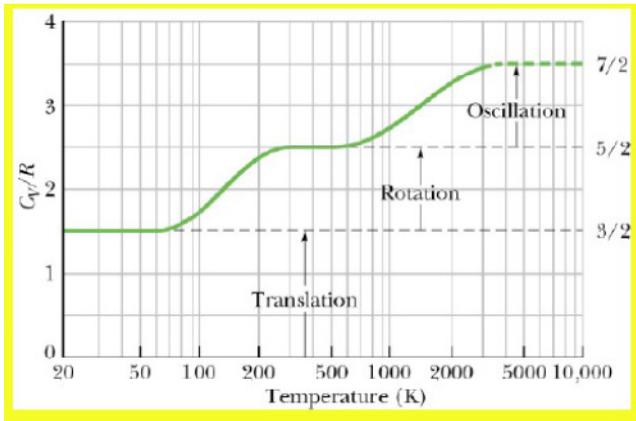


Figura 7: Gráfico relacionando energia e temperatura dos gases.

Esperaríamos que o gráfico tivesse o comportamento de uma reta. Contudo, ao observarmos a figura percebemos que até certa temperatura o sistema comporta-se como se somente transladasse. Ele precisa chegar a certa temperatura para que passe a apresentar características de rotação, e posteriormente de vibração. Como explicar por que os graus de liberdade de rotação e vibração não são observados a baixas temperaturas? Parece-nos que para baixas temperaturas esses graus foram esquecidos pela equipartição de energia. Há uma irregularidade que não deveríamos ignorar. Vamos voltar a este problema adiante.

Agora peguemos um sólido. Num sólido a força de coesão é maior que em um gás. Os átomos estão fortemente presos uns aos outros, por isso eles não possuem certos graus de liberdade. Os átomos num sólido têm somente três dimensões vibracionais. Portanto, teremos

<sup>50</sup> Sendo uma molécula diatômica tendo como exemplo um gás ideal.

$\Delta U=3nRT$ . Para um mol teremos  $\Delta U=3RT$ , logo  $c_v=3R$ . Notemos que este valor é uma constante, a constante de Dulong-Petit.

Esperaríamos que quando um sólido fosse aquecido, num gráfico  $c_v$  por  $T$ , obteríamos uma curva que tenderia para  $3R$ <sup>51</sup>.

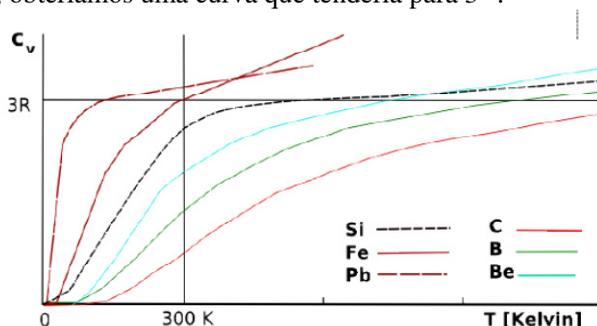


Figura 8: Gráfico relacionando energia e temperatura dos sólidos.

Contudo, no gráfico acima observamos que o resultado esperado não ocorre. No caso de temperaturas baixas, parece-nos que a energia não é absorvida totalmente; não conseguimos excitar todos os graus de liberdade. É preciso que o sólido atinja certa temperatura para que todos os graus de liberdade sejam ativados.

Novamente nos deparamos com uma anormalidade grave, considerado que nossos cálculos foram estabelecidos a partir de princípios fundamentais que expomos até aqui. Voltaremos em seguida a este problema.

Quando aquecemos um corpo ele começa a brilhar. Corpos aquecidos a certa temperatura emitem radiação.

Um corpo negro ideal é um corpo que absorve toda radiação eletromagnética que nele incide. Nenhuma luz o atravessa nem por ele é refletida. Em princípio, um corpo com essa propriedade não pode ser visto. Um corpo negro ideal é também uma fonte ideal de radiação térmica, pois em equilíbrio termodinâmico ele irradia energia na mesma taxa em que a absorve.

Num corpo negro os graus de liberdade provêm da luz, da radiação. Os possíveis modos de uma onda eletromagnética gastar energia estão relacionados à frequência dessa onda. A energia deve se distribuir pelas frequências e deve satisfazer o princípio de equipartição de energia e ao calcularmos devemos obter uma curva com a mesma

<sup>51</sup> Desconsiderando os elétrons livres.

distribuição que obtemos com as velocidades. Prevemos que ao aumentarmos a temperatura teremos frequências cada vez maiores. No entanto, o cálculo não nos dá os resultados previstos.

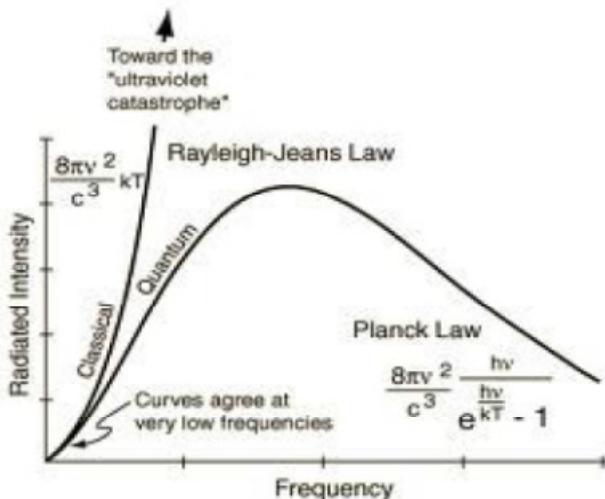


Figura 9: Gráfico relacionando energia e frequência.

Os cálculos previstos são diferentes dos resultados obtidos ao fazermos o experimento. Mais uma vez chegamos a um problema, a curva que obtemos empiricamente parece violar o princípio de equipartição de energia.

Planck, analisando a curva termodinamicamente, chega à hipótese de que a energia não é absorvida continuamente, mas absorvida discretamente em “pacotinhos”. Esta hipótese revolucionou a termodinâmica. Entretanto, Planck acreditava que o material do corpo era que absorvia a radiação discretamente, e não que a luz se comportasse discretamente; que esta era uma propriedade da matéria e não da energia. De fato, esta suposição faz sentido quando tratamos do calor específico, por exemplo. Quem vai efetivamente quantizar a luz posteriormente será Einstein.

Todos os problemas encontrados até então passam a ser analisados a partir da nova hipótese de Planck. Esta hipótese é contraditória, com a visão clássica adotada até o momento, mas não prevê os resultados obtidos através dos experimentos; há uma ruptura na intuição clássica. Apesar desta contradição, a hipótese proposta por

Planck revoluciona a ciência do começo do século XX, em termos de poder explicativo em relação ao que é efetivamente visto empiricamente.

## 5.2 ÁTOMO DE BOHR

Em 1904, Joseph John Thomson elaborou um modelo de átomo conhecido por “pudim de passas”. Devido ao experimento envolvendo descargas elétricas em tubos catódicos, Thomson chegou ao seu modelo de átomo, descobrindo o elétron e a relação entre a carga e a massa do elétron. A hipótese de Thomson para seu modelo era a estabilidade dos elétrons distribuídos uniformemente numa “sopa” de carga positiva.

Dentro de toda física dada até o momento, o modelo do átomo de Thomson era o mais razoável, pois atendia, mesmo que parcialmente, os requisitos que a descoberta do elétron requeria para um modelo estável de átomo, como a neutralidade do átomo, por exemplo. Todavia, em 1909, Ernest Rutherford realizou um experimento para investigar a estrutura do átomo. O experimento conhecido como Geiger-Marsden, ou experimento da folha de ouro, demonstrou pela primeira vez a existência de um núcleo atômico, invalidando o até então aceito modelo de Thomson.

O experimento da folha de ouro consistiu em um feixe de partículas alfa, geradas a partir do decaimento radioativo do radônio, direcionadas a uma fina folha de ouro numa câmara de vácuo. Uma tela de sulfato de zinco foi utilizada como detector para observar as partículas defletidas sob qualquer angulação. O modelo de Thomson previa que todas as partículas alfa deveriam ser defletidas, no máximo, numa pequena angulação. A partir da mensuração do padrão de deflexão das partículas esperava-se obter informações sobre a disposição das cargas dentro do átomo. Contudo, o experimento surpreendeu os cientistas da época, escapando das previsões esperadas. Apesar de muitas partículas alfa terem se comportado como o esperado, muitas delas foram defletidas em ângulos maiores que 90 graus e também de volta, em direção ao feixe.

Foi o evento mais incrível que já aconteceu em toda minha vida. Foi quase tão incrível quanto disparar uma projétil de 15 polegadas contra um lenço de papel e ela voltar e bater em você. Em contrapartida, eu percebi que essa dispersão para trás deveria ser resultado de uma única colisão, e quando eu fiz os cálculos eu vi que era impossível

conseguir algo dessa ordem de magnitude a menos que você tome um sistema no qual a maior parte da massa do átomo esteja concentrada em um núcleo atômico. Foi então que tive a ideia de um átomo com centro massivo carregando uma carga.<sup>52</sup> (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 632, APUD – Rutherford, tradução nossa)

Os fatos observados a partir da experiência da folha de ouro nos mostraram que o modelo de Thomson estava incorreto. As ocorrências de partículas alfa defletidas e/ou refletidas nos revelaram que o átomo tinha um núcleo com um número significativo de massa onde cargas positivas estavam concentradas. Para haver reflexão de partículas alfa, elas deveriam chocar-se ou passarem rentes a cargas positivas e este fenômeno foi constatado em um número significativo de vezes durante o experimento. Muitas partículas também atravessaram a folha de ouro, dizendo-nos que o núcleo atômico deveria ser relativamente pequeno comparado ao restante do átomo, levando-nos à conclusão de que o átomo deveria ser na sua maior parte um espaço vazio. Este fato levou Rutherford à conclusão de que o átomo possuiria uma região de baixa densidade.

Utilizando-se somente da física newtoniana, Rutherford chegou à conclusão de que a parte central fortemente carregada, posteriormente nomeada de núcleo, teria de ter por volta de 1/3000 do tamanho total do elétron.<sup>53</sup>

Posteriormente, foi obtido o mesmo resultado, encontrado por Rutherford classicamente, através de cálculos utilizando a mecânica quântica. Mesmo tendo diversos problemas, o modelo de Rutherford nos

---

<sup>52</sup> "It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you. On consideration, I realized that this scattering backward must be the result of a single collision, and when I made calculations I saw that it was impossible to get anything of that order of magnitude unless you took a system in which the greater part of the mass of the atom was concentrated in a minute nucleus. It was then that I had the idea of an atom with a minute massive center, carrying a charge." (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 632, APUD – Rutherford)

<sup>53</sup> Rutherford E. (1911). "The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom". *Philosophical Magazine, Series 6* 21: 669–688.

mostrou a existência de um núcleo atômico, dado que se mantém dentro do modelo atual quântico de átomo.

Um dos estudos de caso deste trabalho será a teoria do átomo de Bohr. Desde o início de sua discussão, no início do século XX, ela tem sido controversa. Isto porque sempre foi tomada por muitos cientistas como uma teoria inconsistente. Entretanto, para se afirmar seguramente isto, é preciso uma definição rigorosa de inconsistência em teorias científicas, formular o que é exatamente a Teoria do Átomo de Bohr e demarcar em que aspecto podemos alegar que esta teoria é inconsistente. Além disso, devemos encontrar onde está a inconsistência na teoria e investigar esse desacordo também em sua contraparte filosófica.

Primeiramente, iremos apresentar, *grosso modo*, a Teoria do Átomo de Bohr. Mais adiante faremos uma abordagem mais detalhada sobre a teoria de Bohr. De maneira geral, a teoria do átomo de Bohr é suposta ser inconsistente, pois reúne duas teorias incompatíveis, a mecânica clássica e a mecânica quântica. Da mecânica clássica (Mecânica Newtoniana e Leis de Maxwell) são utilizadas, por exemplo, a lei de Coulomb e as leis de Maxwell. De acordo com esta mecânica, elétrons em órbita do núcleo se assemelhariam aos planetas orbitando o nosso sol, mas com a força eletrostática fazendo o papel da força gravitacional. No entanto, os elétrons deveriam emitir radiação, o que ocasionaria perda de energia e o consequente colapso do elétron em direção ao núcleo. Ademais, essas órbitas podem estar a qualquer distância do núcleo. Em contrapartida, na teoria de Bohr, os elétrons circulam em órbitas fixas, atraídos pelo núcleo, são acelerados, mas quando em uma dessas órbitas, não emitem radiação, de forma que não colapsam em direção ao núcleo; a transição de um elétron entre as órbitas “estacionárias” é feita de maneira quantizada – são os misteriosos “saltos quânticos”; e por fim existe a órbita mais próxima do núcleo – chamada de órbita estacionária primeira – de onde o elétron não pode mais “saltar” para mais próximo do núcleo.

Em 1913, Niels Bohr desenvolveu um “modelo” (no sentido de um modelo matemático do capítulo 2) que se mostrou de acordo com os dados do espectro do átomo de hidrogênio. Os postulados no qual o modelo é baseado são:

1. Um elétron em um átomo se move em órbitas circulares ao redor do núcleo sob a influência da lei de atração de Coulomb entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica clássica.

2. Em vez de infinitas órbitas, as quais seriam possíveis através da mecânica clássica, só é possível para o elétron mover-se em uma órbita a qual seu momento angular orbital  $L$  é um número inteiro múltiplo da constante de Planck  $h$  dividida por  $2\pi$ .
3. Apesar do fato de que o elétron está em constante aceleração, um elétron, movendo-se em certa órbita permitida, não irradia energia eletromagnética. Assim, sua energia total  $E$  permanece constante.
4. Radiação eletromagnética é emitida se um elétron, inicialmente movendo-se em uma órbita de energia total  $E_i$ , descontinuamente muda seu movimento para que assim possa mover-se para uma órbita de energia total  $E_f$  (com  $i$  diferente de  $f$ ). A frequência da radiação emitida  $\nu$  é igual à quantidade  $(E_i - E_f)$  dividida pela constante de Planck  $h$ .

O primeiro postulado do modelo de Bohr baseia-se na existência de um núcleo atômico. O segundo postulado introduz a quantização. O terceiro postulado retira o problema da estabilidade do elétron movendo-se em uma órbita circular, devido à emissão de radiação eletromagnética como determina a física clássica. Porém, Bohr simplesmente postula que, neste caso, a física clássica não é válida para um elétron em órbita circular. Este postulado baseia-se no fato de que átomos observados experimentalmente são estáveis, mesmo que isto não seja previsto pela física clássica. O quarto postulado é o postulado de Einstein de que a frequência do fóton de uma radiação eletromagnética é igual à energia carregada pelo fóton dividida pela constante de Planck  $h$ . (Eisberg, Resnick, 1985. p.99)

Estes postulados fazem o magnífico trabalho de aliar duas teorias incompatíveis: a física clássica e a física quântica. Quando um elétron move-se em órbita circular, assume-se que ele obedeça às leis da física clássica, e ainda comporte-se seguindo a ideia não-clássica da quantização do momento angular orbital. Além disso, assume-se que o elétron comporta-se de acordo com a teoria eletromagnética clássica - lei de Coulomb - e também que não obedeça a outro caráter clássico de que há emissão de radiação quando há movimento acelerado de um corpo carregado.

Desde 1970, a Teoria do Átomo de Bohr tem sido tomada como um exemplo *par excellence* de uma teoria internamente inconsistente<sup>54</sup>. Porém, o acordo acaba nesse ponto. Quando tratamos de identificar o conteúdo científico específico que constitui a inconsistência, várias polêmicas aparecem. Divergências aparecem, pois, primeiramente, parece não haver conexão entre a definição lógica de “inconsistência” e o uso feito dessa definição para descrever a Teoria do Átomo de Bohr; em vez de prover o teorema  $\alpha \wedge \neg \alpha$ , é feito um apelo para a intuição daquele que estuda a teoria. Depois, cada cientista parece ter sua “versão” da teoria. Um filósofo, então, pode livremente modelar o conteúdo para que ele seja adequado para conclusão que optou, criando uma ausência de consenso sobre o critério utilizado.

Uma teoria é dita internamente inconsistente se esta deriva uma contradição ou duas teses contraditórias. E uma teoria é dita externamente inconsistente se estiver em contradição com outra teoria, sem que esta esteja dentro dessa.

Existem duas características principais da Teoria do Átomo de Bohr que estão constantemente no cerne dos argumentos para a inconsistência da teoria. São estes:

- a) Os misteriosos “saltos quânticos”;
- b) A não emissão de radiação de uma partícula carregada em órbita;

Baseando-nos nesses argumentos, podemos reivindicar que a teoria é inconsistente por si só, independentemente de uma hipótese externa a ela.

Desse modo, a teoria deveria ser considerada internamente inconsistente. Para isso, precisamos considerar os argumentos apontados acima como parte da teoria de Bohr.

Certamente os misteriosos “saltos quânticos” sofreram críticas de diversos cientistas. Rutherford escreveu a Bohr “Parece-me que você tem que supor que o elétron sabe de antemão onde ele irá parar”.<sup>55</sup> (Pais, *apud* Vickers, 2007, p. 4, tradução nossa): Porém, onde surge a inconsistência nessa dificuldade? Brown aponta a natureza clássica das trajetórias dos elétrons nos estados estacionários:

---

<sup>54</sup> Existem filósofos que discordam desta posição como, por exemplo, Peter Vickers.

<sup>55</sup> “It seems to me that you have to assume that the electron knows beforehand where it is going to stop.”(Pais, *apud* Vickers, 2007, p. 4)

A abordagem de Bohr forneceu um limite para as descrições clássicas dos estados estacionários, mas não considerou as transições entre eles... Essa combinação de princípios clássicos e não-clássicos foi um jogo arriscado... Os princípios são inconsistentes entre eles.<sup>56</sup> (Brown, *apud* Vickers, 2007, p. 4, tradução nossa).

Da Costa e French escreveram:

Brown enfatiza o ponto que a mecânica clássica foi considerada aplicável para a dinâmica do elétron no seu estado estacionário, enquanto a teoria quântica foi posta em jogo quando a transição entre estados discretos eram considerados – com os estados discretos contradizendo a física clássica, claro...<sup>57</sup> (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 4, tradução nossa).

A reivindicação nos parece ser que se os elétrons orbitam o núcleo em trajetórias contínuas nos estados estacionários, eles não poderiam orbitar somente o núcleo em certas distâncias discretas. Poderíamos reivindicar também que o elétron “aprecia” órbitas em linhas circulares contínuas, mas “salta” descontinuamente entre órbitas. Entretanto, poderíamos dizer que a teoria está incompleta, já que a transição entre os estados estacionários não é levada em conta, como afirma Brown.

Uma objeção que nos aparece é a da divisão de contextos. Ela nos diz que uma teoria com princípios contraditórios não é inconsistente se a teoria estipula contextos mutuamente exclusivos de aplicação para esses princípios contraditórios (Vickers, 2007, p. 4).

---

<sup>56</sup>“Bohr’s approach provided limited classical descriptions of the stationary states, but no account of transitions between them... This combination of classical and non-classical principles was a logically risky game... The principles are inconsistent with each other.” (Brown, *apud* Vickers, 2007, p. 4)

<sup>57</sup>“Brown emphasizes the point that classical mechanics was taken to apply to the dynamics of the electron in its stationary state, while quantum theory was brought into play when the transition between discrete states was considered – this discreteness contradicting classical physics, of course...” (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 4)

Como o próprio Bohr estipulou, os princípios clássicos ficam restringidos às trajetórias orbitais, e os princípios quânticos restringidos para as transições (Bohr, *apud* Vickers, 2007, p. 5, tradução nossa): “O equilíbrio dinâmico dos sistemas em estados estacionários é governado pelas leis comuns da mecânica, embora essas leis não se apliquem para a passagem dos sistemas entre estados diferentes”.<sup>58</sup> De acordo com a objeção de divisão de contextos, a teoria do Átomo de Bohr seria consistente, já que os contextos são claramente especificados e mutuamente exclusivos. Porém, dentro dessa contextualização de princípios conflitantes entre si, mesmo assim, acreditamos que não conseguiremos evitar inconsistência. Isto porque acreditamos que uma teoria que contém princípios contraditórios é inconsistente.

Todavia, o foco mais comum dado à inconsistência dentro da teoria de Bohr está relacionado à não emissão de radiação de uma partícula carregada em órbita. Além das órbitas comportando-se como contrapartes clássicas das transições quânticas, sua natureza não-clássica também é observada através da não emissão de radiação de uma partícula carregada em órbita. Porque elétrons ao orbitarem são acelerados, e de acordo com a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz, partículas carregadas aceleradas são obrigadas a emitir um fluxo constante de radiação, o que vai contra a hipótese de Bohr. Assim, não deveria existir o estado estacionário primeiro (o que se encontra mais próximo ao núcleo, de onde o elétron não pode mais “saltar” a diante), onde a quantidade de energia emitida é máxima. Dentro do aspecto clássico, os elétrons deveriam continuar a emitir radiação, causando uma perda de energia e conseqüentemente uma trajetória espiral “suicida” em direção ao núcleo. Vários autores realçam esse aspecto da teoria como o foco de uma inconsistência interna:

Entretanto, não são somente os estados discretos que conflitam entre a física clássica e a física quântica, mas também na afirmação de que o estado estacionário primeiro é estável, assim um elétron em tal estado não irradiaria energia e não se direcionaria em espiral ao núcleo como determinado pela física clássica. Esta é a

---

<sup>58</sup> “The dynamical equilibrium of the systems in the stationary states is governed by the ordinary laws of mechanics, while these laws do not hold for the passing of the systems between different states.” (Vickers, 2007, p. 5, APUD – Bohr)

inconsistência central.<sup>59</sup> (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 5, tradução nossa)

Neste ponto, podemos perceber a importância de se caracterizar uma inconsistência interna. Bueno nos diz em relação à não emissão de radiação de uma partícula carregada em órbita que: “Bohr... articulou uma proposta inconsistente, dadas as teorias aceitas naquela época”.<sup>60</sup> (Bueno, *apud* Vickers, 2007, p. 6, tradução nossa). Contudo, se a proposta de Bohr era internamente inconsistente, então certamente não dependia do conteúdo de outras teorias. O que é necessário para inconsistência interna é que afirmações clássicas relevantes estão dentro da teoria de Bohr.

Elétrons em órbitas são caracterizados pela física clássica, seguramente. A eles é atribuído um momento angular, levando-os a seguir uma trajetória periódica. Eles são partículas carregadas que são mantidas em órbita pela lei atração de Coulomb em direção ao núcleo. Então, se queremos afirmar que não há inconsistência interna, precisamos separar logicamente a eletrodinâmica clássica em partes, e somente algumas partes participarão da teoria. Assim, consideraríamos a física clássica como um bloco que poderá ser dividido em pedaços, de forma que poderíamos escolher e selecionar sem suscitar uma contradição.

Aqui surge outra objeção, desta vez em relação à divisão de uma teoria. Esta objeção nos diz que corpos de suposições não são indivisíveis. Uma teoria pode conter determinados pressupostos, sem se comprometer com outras hipóteses independentes, qualquer que seja a razão para o agrupamento original (Vickers, 2007, p. 7).

É evidente que a questão envolvida nessa objeção é o que chamamos de teoria. Não é porque certo corpo de suposições pode ser dividido, que o dividiremos.

Outro foco de inconsistência é sinalizado por da Costa e French:

A radiação emitida pelo átomo é supostamente descrita em termos de eletrodinâmica clássica,

---

<sup>59</sup>“However it is not only in the discreteness of the states that we have conflict between quantum and classical physics but also in... the assertion that the ground state was stable, so that an electron in such a state would not radiate energy and spiral into the nucleus as determinate by classical physics. This is the central inconsistency.” (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 5)

<sup>60</sup>“Bohr... articulated an inconsistent proposal, given the accepted theories at the time.” (Bueno, *apud* Vickers, 2007, p. 6)

enquanto o processo de emissão e de absorção, assim como o comportamento dos elétrons nos estados estacionários, são contabilizados em termos manifestadamente incompatíveis com a eletrodinâmica clássica.<sup>61</sup> (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 7, tradução nossa)

Novamente os estados estacionários são vistos como não-clássicos, mas desta vez o foco clássico é dado para a radiação emitida. Desta forma, podemos dissipar a objeção de divisão da teoria ao mostrar outras razões pelas quais acreditamos que partes relevantes da teoria eletrodinâmica clássica são, de fato, usadas na teoria, e também, parte da teoria.

Entretanto, poderíamos dizer que tratar a radiação emitida como clássica seria somente fazer uma aproximação do uso de uma ainda não conhecida lei física. Desta forma, não haveria contradição entre uma lei fundamental ao fenômeno e outra lei contraditória a ela, se esta lei contraditória for apenas uma aproximação para descrever o fenômeno. Assim, obtemos uma nova objeção, a objeção de redução do comprometimento – se uma hipótese de uma teoria é explicitamente tomada como uma aproximação ou idealização, então a hipótese em si não é parte da teoria.

Obtemos, por fim, três diferentes focos para a inconsistência dentro da teoria de Bohr:

I<sub>1</sub>) A transição dos elétrons entre órbitas discretas, apesar das trajetórias contínuas em órbitas;

I<sub>2</sub>) O fato de que nos estados estacionários (particularmente o estado estacionário primeiro) algumas, mas não todas as leis da física clássica são obedecidas;

I<sub>3</sub>) O fato de que as órbitas são estritamente não-clássicas, mas a radiação que interage com o elétron é tratada como clássica (Vickers, 2007, p. 8).

---

<sup>61</sup> “The radiation emitted by the atom is assumed to be describable in terms of classical electrodynamics, while emission and absorption processes, as well as the behavior of the electrons in stationary states, are accounted for in terms manifestly incompatible with classical electrodynamics.” (da Costa e French *apud* Vickers, 2007, p. 7)

Certamente estas afirmações são conflitantes. Contudo, para chamá-las de inconsistências, precisamos conectá-las a uma lógica.

Sabemos que um conjunto de sentenças  $\Gamma$  da linguagem de uma lógica adequada que contenha o símbolo de negação é inconsistente se contiver duas sentenças contraditórias, ou se uma contradição pode ser deduzida, ou então nenhuma interpretação pode fazer  $\Gamma$  verdadeiro. Porém, nos dois casos inconsistência é definida para um conjunto não interpretado de sentenças. Seguramente, quando falamos de inconsistências em ciência não identificamos teorias científicas como um conjunto não interpretado de sentenças. Da Costa e French dizem: “duas proposições contraditórias dentro... da teoria do átomo de Bohr.”<sup>62,</sup> (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 6, tradução nossa). Ou seja, referem-se à teoria de Bohr, logo a proposições “interpretadas”. Como podemos, então, definir inconsistência para um conjunto arbitrário de proposições?

O pensamento por detrás das definições sintática e semântica fornecidas de inconsistência é o de que as sentenças em questão não podem ser todas verdadeiras. Isto é parte integrante da definição semântica e ela segue da definição sintática se concordarmos que a dedução lógica em questão preserva a verdade; nenhuma contradição pode ser verdadeira. Podemos dizer, assim, que um conjunto de proposições é inconsistente se e somente se elas não podem ser todas verdadeiras. Se formalizarmos as proposições em, por exemplo, uma lógica clássica de primeira ordem, e as sentenças resultantes forem inconsistentes, pela definição lógica, então as proposições originais são inconsistentes.<sup>63</sup> Nisto vemos a importância de estabelecer todos os diferentes tipos de consequência que preservam a verdade. Vickers aponta: “Uma teoria científica é inconsistente se e somente se uma contradição decorre do emprego de qualquer consequência que preserve a verdade.”<sup>64</sup> (Vickers, 2007, p. 9, tradução nossa).

De que forma podemos estabelecer o conteúdo de uma teoria científica? Sobre a Teoria do átomo de Bohr, podemos dizer que ela foi

---

<sup>62</sup> “Two contradictory propositions within... Bohr’s theory of the atom.” (da Costa e French, *apud* Vickers, 2007, p. 9)

<sup>63</sup> Inevitavelmente quando traduzimos um conjunto de proposições para uma linguagem de teoria dos conjuntos, algo se perde durante a tradução. Todavia podemos dizer que não perdemos o que é relevante para mostrar ou não a inconsistência. (Vickers, 2007, p. 10)

<sup>64</sup> “A scientific theory is inconsistent IF and only IF a contradiction follows from employing any truth-preserving consequence.” (Vickers, 2007, p. 9)

bastante discutida nos anos vinte, mas sobre o que a comunidade científica falava na época? Deveríamos considerar somente o que Bohr, ele mesmo, escreveu ou deveríamos também considerar o que outros cientistas falaram sobre ela? Como podemos estabelecer o que faz e o que não faz parte da teoria? O que deveríamos chamar de “Teoria do Átomo de Bohr”? A forma com a qual apresentamos a teoria neste capítulo representa a teoria informal (modelo matemático) como ela foi descrita na época? Porque, se não representar, teremos uma reconstrução, um subconjunto dos comprometimentos feitos pelos cientistas da época. O que alegamos aqui é o que Bohr e os outros cientistas da época estavam dispostos a se comprometer vai além do que eles pensavam, mas não podemos dizer que a teoria foi realmente esse subconjunto de comprometimentos. Assim, quando debatemos sobre a identificação “da teoria” fica implícito um consenso, com o que os cientistas envolvidos se comprometiam. Para podermos dizer se do conjunto reconstruído podemos ter importantes derivações sobre a teoria, devemos levar em consideração o consenso da época e assim ver as tais derivações realmente se adaptam (Vickers, 2007, p. 11).

Num mundo ideal, os cientistas nunca se excederiam em seus comprometimentos. Ora, algumas afirmações feitas por Bohr foram adotadas pela comunidade científica porque elas levavam a previsões bem sucedidas. Bohr resumiu os pontos chave na forma de um conjunto de postulados. A comunidade que concordava que ele frequentemente reiterava ou parafraseava seus postulados. Portanto, para identificarmos uma teoria<sup>65</sup> (a teoria do átomo de Bohr) devemos dizer que ela inclui todas e somente aquelas proposições às quais uma significativa parte da comunidade se compromete por um período significativo. (Vickers, 2007, p. 12)

Com efeito, a distinção entre hipóteses centrais e hipóteses auxiliares deve ser considerada. As hipóteses centrais seriam um subconjunto de comprometimentos com os quais toda comunidade científica concordaria, e as hipóteses auxiliares seriam aquelas que diferentes indivíduos e subcomunidades agregariam às hipóteses centrais a título experimental. No caso da teoria de Bohr, comunidades expressivas foram feitas em Munich, Copenhague e Göttingen (Vickers,

---

<sup>65</sup> Isso mostra o caráter vago do conceito de “teoria”. O uso desta palavra no contexto em que se está discutindo a “teoria de Bohr” adequa-se ao que chamamos de *teoria informal*, ou *modelo matemático* de uma certa “realidade fenomênica” no capítulo dois. No entanto, prosseguiremos com o uso da palavra como vimos fazendo, uma vez que facilmente o leitor pode contextualizá-la.

2007, p. 12). Como todas essas comunidades trabalharam com a teoria de Bohr, parece-nos razoável identificar a teoria com o subconjunto de comprometimentos que todos concordavam assumir, e tomá-lo como sua fundação.

Agora que temos um acerto (ainda que algo vago) quanto ao conteúdo, interessa-nos estudar como ele será representado. A primeira objeção que vimos (sobre divisão de contextos) dizia que uma teoria com princípios contraditórios não é inconsistente se a teoria estipula contextos mutuamente exclusivos de aplicação para esses princípios contraditórios.

Contudo, como trabalharemos se não concordamos com essa objeção, já que tomamos a atitude de que a teoria é inconsistente em tal caso? Trabalharemos com esses conceitos através de uma abordagem não-clássica via uma lógica paraconsistente.

### 5.2.1 Sobre a teoria de Bohr e seus resultados

Nesta seção, vamos descrever com algum detalhe a teoria do átomo de Bohr com a finalidade de mostrar como uma teoria inconsistente pode ser útil. A palavra “teoria” pode ser usada aqui em sentido duplo, designando uma teoria informal, no sentido do capítulo dois, ou uma teoria axiomatizada, sendo os postulados de Bohr apresentados abaixo (ainda que de maneira informal) os seus postulados específicos.

Por volta do início do século XX, os físicos sabiam que a luz é emitida e absorvida somente por cargas aceleradas. Este fato sugeria que o átomo deveria conter cargas aceleradas. Através de certos padrões e regularidades nas propriedades da luz esperava-se encontrar pistas sobre a natureza do movimento das cargas aceleradas.

A teoria do átomo de Bohr teve grande sucesso no começo do século XX e existem razões importantes para isso. O modelo criado por Bohr pôde ser usado para explicar todas as linhas de emissão e absorção no espectro do átomo de hidrogênio, que havia sido introduzida por Balmer de forma heurística. O espectro do átomo de hidrogênio é descrito pela fórmula de Balmer:

$$\lambda = b(n^2/n^2 - 2^2)$$

Onde  $b$  é uma constante determinada empiricamente por Balmer de valor  $364,56 \times 10^{-9} \text{m}$ ;  $n$  é um número inteiro diferente para cada linha do espectro. Por exemplo,  $n$  tem valor 3 para a primeira linha visível do

espectro de emissão do hidrogênio ( $H_\alpha$ ) (vermelho); n tem valor 4 para segunda linha visível do espectro de emissão do hidrogênio ( $H_\beta$ ) (verde); n tem o valor 5 para a terceira linha visível do espectro de emissão do hidrogênio ( $H_\gamma$ ) (azul); n tem o valor 6 para a quarta linha visível do espectro de emissão do hidrogênio ( $H_\delta$ ) (violeta).

Somente depois de 30 anos os cientistas foram entender porque a fórmula empírica de Balmer funciona tão bem, porque o átomo de hidrogênio emite radiação cujo comprimento de onda forma uma sequência tão simples. Apesar disso Balmer continuou especulando e sugeriu que ao substituímos o “2” em sua equação poderíamos encontrar outros comprimentos de onda interessantes. A sugestão de Balmer estimulou outros cientistas a trabalharem em função disto, trazendo resultados frutíferos para a ciência.

Nos dias de hoje a fórmula de Balmer é escrita da seguinte forma:

$$1/\lambda = R_H(1/2^2 - 1/n^2)$$

Onde  $R_H$  é a constante de Rydberg para o átomo e tem valor  $4/b$ .

As séries de linhas descritas pela fórmula de Balmer são chamadas de séries de Balmer. A fórmula pôde ser usada para prever que deveria haver mais linhas na mesma série, de fato infinitas com  $n = \{1, 2, \dots\}$ . Além disso, cada uma das linhas foi prevista corretamente pela fórmula de Balmer com considerável precisão. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 627)

Wavelength $\lambda$ , in nanometers ( $10^{-9}$ m), for hydrogen emission spectrum.*				
Name of line	n	From Balmer's formula	By Ångström's measurement	Difference
$H_\alpha$	3	656.208	656.210	+0.002
$H_\beta$	4	486.08	486.074	-0.006
$H_\gamma$	5	434.00	434.01	+0.01
$H_\delta$	6	410.13	410.12	-0.01

\* Data for hydrogen spectrum (Balmer, 1885).

Figura 10: Comprimentos de onda para emissão do espectro de Hidrogênio. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 627)

Generalizando a fórmula de Balmer:

$$1/\lambda = R_H(1/n_f^2 - 1/n_i^2)$$

Onde  $n_f$  é um número inteiro fixo para a série em questão;  $n_i$  é um número inteiro que tem valor  $n_f+1$ ,  $n_f+2$ , ..., etc, para as linhas

sucessivas individuais numa dada série. A constante  $R_H$  deve ter o mesmo valor para todas as séries de hidrogênio. Primeiramente, as discussões sobre tomar  $n_f > 2$  eram somente especulativas, porém, mais tarde, cientistas descobriram que elas de fato existem.<sup>66</sup>

A fórmula de Balmer em si não funciona diretamente para descrever o espectro de outros gases além do hidrogênio. Todavia, ela inspirou outras fórmulas matematicamente similares que descreveram com sucesso muitos outros espectros.

A questão que nos aparece aqui é a de que não havia modelo – no sentido do modelo matemático descrito no capítulo dois – que explicasse o espectro descrito por essas fórmulas baseado somente na mecânica clássica e no eletromagnetismo. Obviamente, a emissão e absorção de radiação por um átomo precisaria corresponder a um aumento e diminuição de energia do átomo. Se os átomos de um elemento emitem radiação somente em certas frequências, então a energia dos átomos deve poder mudar somente em certas quantidades. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 629)

Essas mudanças que envolvem a energia do átomo exigem um rearranjo em suas partes. E assim, como parte da teoria foi confirmada, foi feito o razoável, os cientistas procederam temporariamente como se toda a teoria estivesse justificada. Assim, foi identificado que o conceito de núcleo sugeriu que o número de elétrons ao redor do mesmo fosse igual ao número de prótons encontrados neste. Muitos outros conceitos dentro da nova visão de átomo deveriam ser revistos. Contudo, não deveríamos esperar que um modelo, criado a partir de um conjunto de resultados intrigantes que o modelo de Bohr bem explicou, também fosse lidar com outras questões envolvidas no conceito de átomo.

Bohr introduziu dois novos postulados ousados para dar conta especificamente da existência de órbitas estáveis e para a emissão do espectro discreto para cada elemento. Através das suposições de Bohr foi possível calcular o raio de uma órbita estável:

$$r_n = (h^2/4\pi^2mkq_e^2) \cdot n^2$$

Onde  $(h^2/4\pi^2mkq_e^2)$  é constante e tem valor  $5,3 \times 10^{-11}$  m, e  $n$  é um número inteiro. Ora,  $n$  tem valores inteiros, a constante tem um valor que foi medido previamente por meio de experimentos e entre valores

---

<sup>66</sup> Em 1908, Friedrich Paschen encontrou duas linhas de hidrogênio no infravermelho para  $n_i=3$  e  $n_f=4$  e  $n_f=5$ . Desde então muitas outras linhas foram encontradas formando a série de Paschen.

inteiros não há órbitas permitidas. Disso temos que a emissão e absorção de radiação deveria dessa forma corresponder à transição do elétron entre as órbitas permitidas. Era sabido que o raio de um átomo de hidrogênio tem medida  $5 \times 10^{-11} \text{m}$  correspondendo à medida dada por Bohr de  $r$  para  $n=1$ . Um resultado realmente notável.

Por meio de seus postulados, Bohr também pôde calcular a energia total de um elétron em cada órbita.

$$E_n = (1/n^2)E_1$$

Onde  $E_1$  é a energia total do elétron na primeira órbita  $n=1$ .  $E_1$  é a menor energia possível para um elétron num átomo de hidrogênio. O estado estacionário  $E_1$  tem valor igual a  $-13,6 \text{eV}$ . No estado estacionário o elétron está mais “ligado” ao núcleo. À medida que vamos para órbitas mais afastadas o valor da energia diminui, facilitando o “pulo” do elétron para órbitas ainda mais afastadas.

Por meio do quarto postulado, a frequência da radiação emitida e absorvida pelo átomo deve ser determinada por:

$$hf = E_1 - E_2$$

Se  $n_f$  é o número quântico do estado final e  $n_i$  o número quântico do estado inicial temos:

$$E_f = (1/n_f^2)E_1$$

$$E_i = (1/n_i^2)E_1$$

A energia, então, pode ser determinada por:

$$hf = E_1 [(1/n_i^2) - (1/n_f^2)]$$

Entretanto, na fórmula de Balmer temos o comprimento de onda  $\lambda$ . A frequência de uma linha espectral é dada por:

$$f = c / \lambda$$

Ao fazermos a substituição obtemos:

$$1 / \lambda = (E_1 / hc) [(1/n_i^2) - (1/n_f^2)]$$

De acordo com o modelo de Bohr, esta equação nos dá o comprimento de onda  $\lambda$  para a radiação emitida ou absorvida quando o átomo de hidrogênio de um estado estacionário de número quântico  $n_i$  para outro  $n_f$ . Deste modo, a previsão do modelo de Bohr pode ser comparada com o resultado empírico da fórmula de Balmer para as séries de Balmer.

$$1/\lambda = R_H[(1/2^2) - (1/n^2)]$$

A equação para o comprimento de onda  $\lambda$  para radiação emitida ou absorvida derivada pelo modelo de Bohr é a mesma para fórmula de Balmer se  $n_f=2$  e  $R_H = -E_1/hc$ .

Era sabido que  $R_H = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ . Ao compararmos com o valor de  $-E_1/hc$ , vemos que os valores ficaram de acordo.  $R_H$  era somente determinada empiricamente, agora foi mostrado ser um número determinado através de constantes fundamentais da natureza: a massa do elétron, a carga do elétron, a constante de Planck e a velocidade da luz.

Todas as linhas nas séries de Balmer simplesmente correspondem às transições dos vários estados iniciais (valores de  $n_i$  maiores que 2) para o mesmo estado final onde  $n_f=2$ . Assim, os fótons que têm a frequência ou o comprimento de onda da linha  $H_\alpha$  são emitidos quando elétrons num gás de átomos de hidrogênio pulam do estado  $n=3$  para o estado  $n=2$ .  $H_\beta$  corresponde aos pulos de  $n=4$  pra  $n=2$ , e assim por diante. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 645)

A teoria de Bohr também previu as frequências medidas na região infravermelha do espectro. E ainda não existiam linhas que não fossem previstas pela teoria.

Um experimento feito por Jonas Franck e Gustav Hertz em 1914 mostrou que os estados estacionários realmente existem. Através da colisão de elétrons que passam por vapor de mercúrio, mostraram que as quantidades de energia ganhas pelos átomos nas colisões com os elétrons sempre correspondem à energia de fótons nas já conhecidas linhas espectrais. Assim, esse experimento confirmou diretamente a existência de estados estacionários separados dos átomos como previsto pela teoria de Bohr do espectro atômico. Este resultado forneceu uma forte evidência para a validade do modelo de Bohr.

Um trabalho de Bohr de 1922 sugeriu as sete camadas principais K, L, M, N, O, P e Q. O resultado deste trabalho ofereceu uma base física fundamental para entender melhor aspectos da química. Mostrou como a estrutura da tabela periódica se segue da estrutura atômica de

cada elemento químico. Este foi outro triunfo da teoria de Bohr. Mais sobre o assunto pode ser encontrado em *Niels Bohr Collected Works Vol. 4. The Periodic System*.

Todo modelo tem seus limites, e com o modelo de Bohr não foi diferente. Inclusive, a princípio, o modelo de Bohr encontrou dificuldades para ser aceito entre os cientistas da época:

Caro Doutor Bohr, eu recebi seu trabalho e o li com grande interesse, mas eu quero olhá-lo novamente com mais cuidado quando eu tiver mais tempo. Suas ideias em relação à origem do espectro de hidrogênio são bastante engenhosas e parecem funcionar muito bem; mas as mistura com as ideias de Planck com a velha mecânica dificultam a formação de uma ideia física do que é a base disso. Parece para mim uma grande dificuldade na sua hipótese, e não tenho dúvida que você percebeu, a dizer, como um elétron decide em qual frequência ele vai vibrar quando passa de um estado estacionário para outro? Parece-me que você tem que assumir que o elétron sabe de antemão onde ele vai parar...<sup>67</sup> (Ernest Rutherford, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 654, tradução nossa)

O modelo de Bohr foi bem sucedido de 1913 até 1924. Contudo, como apontou Rutherford, ele tinha problemas e outras questões relativas à estrutura atômica ainda precisavam ser respondidas como, por exemplo, o espectro para átomos com dois ou mais elétrons na camada mais externa.

---

<sup>67</sup> “Dear Dr. Bohr, I have received your paper and read it with great interest, but I want to look it over again carefully when I have more leisure. Your ideas as to the mode of origin of spectra in hydrogen are very ingenious and seem to work out well; but the mixture of Planck’s ideas with the old mechanics make it very difficult to form a physical idea of what is the basis of it. There appears to me one grave difficulty in your hypothesis, which I have no doubt you fully realize, namely, how does an electron decide what frequency it is going to vibrate at when it passes from one stationary state to the other? It seems to me that you would have to assume that the electron know beforehand where it is going to stop...” (Ernest Rutherford, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 654)

Apesar do sucesso singular da teoria do átomo de Bohr, no início dos anos 1920 já era claro que ela era limitada. Era preciso elaborar uma nova teoria para lidar com os problemas ainda não solucionados, assim a teoria de Bohr teria de ser revisada ou substituída. Esta nova teoria teria de ser baseada em conceitos quânticos e dar conta dos estados estacionários, separados distintamente para os níveis de energia.

Dentro da prática científica, novas teorias normalmente tendem a incorporar o que velhas teorias tinham de bom, em vez de derrotar revolucionariamente uma velha teoria. A ciência hoje tenta a preparar o terreno para uma ciência melhor amanhã.

O modelo de Bohr também contava com outro problema: não havia meios para testar os detalhes sobre os orbitais atômicos. As órbitas não podiam ser observadas diretamente, nem podiam se relacionar com qualquer outra propriedade observável dos átomos.

No começo dos anos 1920, físicos, inclusive Bohr, começaram a revisar as ideias básicas da teoria. O fato que se destacou foi a mistura de ideias clássicas e ideias quânticas. O átomo seguia leis clássicas até o ponto onde elas não mais funcionavam. Além disso, ideias quânticas foram introduzidas. O átomo combinava ideias da física clássica com conceitos onde a mesma não se aplicava. As órbitas dos elétrons eram determinadas pelas leis de movimento clássicas, mas apesar das muitas órbitas teóricas, somente algumas foram consideradas possíveis; e essas algumas eram escolhidas por meio de regras onde a física clássica não poderia ser aplicada.

A frequência calculada para cada volta orbital executada pelos elétrons era bem diferente da frequência da radiação emitida ou absorvida quando o elétron movia-se entre as órbitas. A decisão de que o número  $n$  não poderia ter valor zero parecia arbitrária, porém necessária para impedir o colapso do modelo por deixar o elétron cair em direção ao núcleo. Era evidente a necessidade de uma nova teoria da estrutura atômica com uma base consistente de acordo com conceitos quânticos.

Podemos resumir a contribuição do modelo de Bohr da seguinte forma: ele deu excelentes respostas para a estrutura atômica, apesar de posteriormente mostrar-se inadequada; ele chamou a atenção para como conceitos quânticos podem ser usados para elaboração de novas teorias; indicou o caminho que uma nova teoria deveria seguir para continuar a responder as questões a respeito da estrutura atômica.

Um dos aspectos mais fascinantes do trabalho de Bohr foi a prova de que propriedades físicas e químicas da matéria podem traçadas por números inteiros: “A solução de um dos sonhos mais ousados da ciência

natural é construir um entendimento das regularidades da natureza através de números puros.”<sup>68</sup> (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 656, tradução nossa).

Desde os anos de 1920 uma nova teoria da estrutura atômica foi desenvolvida. Ela faz parte da *mecânica quântica*, e vai além da compreensão da estrutura atômica. A mecânica quântica é a base da concepção moderna dos eventos que ocorrem em escala microscópica.

Discutiremos alguns aspectos dessa nova teoria a seguir, e mais uma vez Bohr se mostrou um grande colaborador.

A Teoria do Átomo de Bohr pode parecer incompleta e vaga, mas como disse Shapere: “Que uma teoria seja incompleta... não é motivo para rejeitar a teoria como falsa.”<sup>69</sup> (Shapere, *apud* Vickers, 2007, p. 16, tradução nossa). Darden também disse: “O critério de clareza não deveria ser imposto muito cedo nos estágios de desenvolvimento da teoria... Novos conceitos científicos... são frequentemente difusos em seus estágios iniciais.”<sup>70</sup> (Darden, *apud* Vickers, 2007, p. 17, tradução nossa). Devemos lembrar que mesmo sendo inconsistente, a Teoria do Átomo de Bohr foi bem sucedida, ajudou na descoberta do tamanho do átomo e na descoberta de leis empíricas como a de Whiddington e a de Bragg<sup>71</sup>. A teoria de Bohr também, previu que o átomo de hidrogênio emitiria radiação fora do âmbito visível. A região mostrou as frequências exatas previstas por Bohr. A teoria ainda explicou a fórmula de Rydberg para as linhas de emissão espectral do átomo de hidrogênio. A fórmula era conhecida experimentalmente, mas não possuía uma teoria que a embasasse até a teoria de Bohr ser introduzida. Não só explicou a razão da estrutura da fórmula de Rydberg como proporcionou a justificação para os resultados empíricos. A quantização do momento angular era uma suposição no modelo de Bohr enquanto que no modelo

---

<sup>68</sup> “The solution of the one of the boldest dreams of natural science is to build up an understanding of the regularities of nature upon the consideration of pure number” (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 656)

<sup>69</sup> “That a theory is incomplete... is no ground for rejecting the theory as false.” (Shapere, *apud* Vickers, 2007, p. 16)

<sup>70</sup> “The criterion of clarity should not be imposed too early in the stages of theory development... New scientific concepts... are often fuzzy in their early stages.” (Darden, *apud* Vickers, 2007, p. 17)

<sup>71</sup> A lei de Whiddington relaciona a velocidade mínima um elétron precisa para excitar raios X característicos com o peso atômico do material alvo. A lei de Bragg diz que o poder de parada de diferentes materiais para raios  $\alpha$  é proporcional a raiz quadrada de seus pesos atômicos. (Heibron, 1981, p. 252)

de Schrödinger ela é uma previsão, devido ao modelo matemático consistente da nova mecânica quântica onde a equação de Schrödinger nos dá valores corretos para os átomos como o de hidrogênio. Assim sendo, o modelo de Bohr, embora inconsistente, proporcionou insights valiosos que engatilharam o próximo passo para o desenvolvimento do conceito moderno de átomo.

Cabe ao filósofo da ciência estudar tais fenômenos insólitos que possam levar a teorias inconsistentes, pois desta forma o que parecia inicialmente sem sentido: “Isto é um absurdo!”<sup>72</sup> (von Laue, *apud* Vickers, 2007, p. 1, tradução nossa), pode tornar-se de grande valia para a ciência.

### 5.3 PRINCÍPIO DE COMPLEMENTARIDADE

A descoberta da quantização da energia no começo do século XX proporcionou uma explicação para o efeito fotoelétrico e permitiu o sucesso do modelo do átomo de Bohr. Estes aspectos, entre outros, contribuíram para o que hoje chamamos de teoria quântica.

Por ser incompatível com a mecânica newtoniana e o eletromagnetismo de Maxwell, a energia quantizada trouxe sérios problemas para a física da época. Porém, precisamos levar em consideração que as teorias clássicas foram construídas por meio da observação de eventos macroscópicos; não deveríamos nos surpreender ao descobrirmos que a natureza se comporta diferentemente quando estamos no âmbito microscópico, como no interior do átomo.

Como vimos anteriormente, questões relativas a teorias envolvendo quantização ainda precisavam ser respondidas e para isso uma nova teoria que envolvesse o mundo quântico em nível subatômico deveria ser desenvolvida, construída de modo a envolver os fundamentos da física desde o princípio. Para isso, foi preciso um estudo mais aprofundado de partículas e ondas.

#### 5.3.1 Comportamento corpuscular da luz

Quando um feixe de luz passa por duas fendas próximas, a luz que atravessa as fendas sofre interferência formando linhas claras e escuras num anteparo mostrando características de interferências ondulatórias. Este fato pode ser observado através do experimento da dupla fenda de Young. Todavia, o trabalho de Einstein indicou que a luz

---

<sup>72</sup> “This is nonsense!” (von Laue, *apud* Vickers, 2007, p. 1)

se comporta como uma partícula através do efeito fotoelétrico, criando um dilema para a física.

O efeito fotoelétrico mostrou a luz apresentando um comportamento corpuscular quantizado, corpúsculos que posteriormente foram nomeados “fótons”. Por outro lado, a teoria eletromagnética de Maxwell nos diz que a radiação eletromagnética é um fenômeno ondulatório, corroborando o experimento de Young.

Segundo Einstein, o fóton tem energia  $E=hf$ , onde  $h$  é a constante de Planck,  $E$  é a energia e  $f$  é a frequência da luz. Einstein mostrou também que como os fótons carregam energia, esta é equivalente a certa massa de acordo com a famosa fórmula  $E=mc^2$ .

O momento  $p$  de um corpo é definido pelo produto de sua massa  $m$  pela sua velocidade  $v$ :  $p=mv$ . Substituindo-se  $m$  pela energia equivalente temos:  $p=(Ev)/c^2$

Suponha que a mesma equação seja aplicada ao momento do fóton de energia  $E$ , podemos substituir  $v$  por  $c$ , já que o fóton se move à velocidade da luz:  $p=E/c$ .

A energia para a luz quantizada tem valor  $E=hf$ , substituindo:  $p=(hf)/c$ .

Ao usarmos a fórmula que relaciona a velocidade, a frequência e o comprimento de onda, obtemos:  $p=h/\lambda$ .

Faz sentido relacionarmos o momento do fóton desta forma, já que isto nos ajuda a compreender resultados experimentais como o efeito Compton.

Considere um feixe de luz batendo em átomos num anteparo fino de metal. De acordo com o eletromagnetismo clássico a luz irá se dispersar em várias direções, mas sua frequência não mudará. A absorção da luz a certa frequência pelo átomo pode ser seguida por uma reemissão de luz em uma frequência diferente. Todavia, se a onda de luz é simplesmente dispersa, então de acordo com a teoria clássica a frequência não deveria mudar. De acordo com a teoria quântica a luz é formada de fótons e de acordo com a teoria da relatividade estes possuem momento. Compton concluiu que se um fóton colidir com um elétron, o fóton deveria transferir uma grande quantidade de energia ao elétron. Compton mediu o momento do elétron disperso e verificou que há conservação do momento; com este trabalho ele recebeu o prêmio Nobel em física em 1927. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 664)

O efeito fotoelétrico, a expressão do momento e o efeito Compton alegaram evidências ao comportamento corpuscular da luz. Mesmo que fótons não existam a não ser a velocidade da luz, eles têm

momento e energia. Ou seja, a radiação eletromagnética tem um comportamento corpuscular. Por outro lado, a luz tem também comprimento de onda e frequência, apresentando comportamento ondulatório. Seria o fóton uma onda ou uma partícula? Continuaremos a discussão a seguir.

### 5.3.2 Comportamento ondulatório da luz

De Broglie foi o físico que sugeriu que o dualismo onda-partícula é uma propriedade fundamental de todos os processos quânticos. Este dualismo, além de ser aplicado à radiação também poderia ser aplicado a outras partículas atômicas.

Lembremos que o momento de um fóton é dado pela equação  $p=h/\lambda$ . De Broglie pensou que esta relação também poderia ser aplicada a um elétron que tem momento  $p=mv$ . O físico ousadamente sugeriu que o comprimento de onda do elétron seria  $\lambda=h/(mv)$ , onde  $m$  é a massa e  $v$  a velocidade do elétron.

Para comprovar esta sugestão foi medida experimentalmente a propriedade da difração. O experimento Davisson-Germer mostrou que os elétrons têm propriedades ondulatórias pelo padrão de difração das ondas obtidas experimentalmente. Os comprimentos de onda do elétron são realmente dados pela equação de De Broglie, como confirmado por G. P. Thomson em 1927. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 667)

Vimos que Bohr postulou que o momento angular dado por  $mvr$  - onde  $m$  é a massa,  $v$  a velocidade e  $r$  o raio da órbita do elétron - de um elétron orbitando um átomo de hidrogênio só pode ter certos valores quantizados. A equação de De Broglie tem uma aplicação que suporta este postulado e esclarece a existência dos estados estacionários.

Bohr assumiu que:  $mvr=(nh)/(2\pi)$ , onde  $n$  é um número inteiro.

Suponha que uma onda do elétron é de alguma forma espalhada sobre uma órbita de raio  $r$ ; que a onda ocupa toda a órbita. Poderíamos tomar esta onda como estacionária, então o perímetro da órbita seria igual ao comprimento de onda multiplicado por um número inteiro, ou seja:  $2\pi r=n\lambda$ .

Ao substituímos  $\lambda$  por  $h/(mv)$  de acordo com a equação de De Broglie obtemos:  $2\pi r=(nh)/mv$  ou  $mvr=(nh)/(2\pi)$ .

Isto é a equivalência exata da condição de quantização de Bohr. A equação de De Broglie para a onda do elétron e a ideia de que elétrons têm órbitas que suportam ondas estacionárias nos permitem derivar a quantização dos orbitais dos elétrons que Bohr assumiu.

Este resultado indicou que poderíamos desenhar o elétron ou como uma partícula que movimentava-se em uma órbita com um valor quantizado do momento angular, ou como uma onda ao estilo De Broglie ocupa certa região ao redor do núcleo. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 669)

### 5.3.3 A construção da mecânica quântica

A teoria para a estrutura atômica chamada de mecânica quântica foi introduzida em 1925. A mecânica quântica apareceu primeiramente em duas formas matematicamente diferentes propostas independentemente por Heisenberg e por Schrödinger. O primeiro enfatizou o aspecto corpuscular dos objetos quânticos, enquanto o segundo enfatizou o aspecto ondulatório.

Schrödinger provou que as duas formas de mecânica quântica são equivalentes. Ele buscou expressar a natureza dual da matéria matematicamente. Já que as equações da teoria eletromagnética se dão em termos de equações de onda, Schrödinger propôs que as ondas de De Broglie associadas a elétrons poderiam ser derivadas de forma análoga. Do mesmo modo em que há uma equação de onda para as ondas eletromagnéticas, deveria haver também uma equação de onda para a matéria.

Não discutiremos as ideias físicas em todo seu aparato avançado matemático, mas iremos ver as ideias físicas da teoria que indicam sua razoabilidade.

A equação de Schrödinger define as propriedades ondulatórias dos elétrons e também seu comportamento corpuscular. A equação para um elétron num átomo tem uma solução somente quando uma constante na equação tem um número inteiro que corresponde às diferentes energias. Desta forma, a equação prevê que somente certas energias são possíveis para um elétron num átomo. Num átomo de hidrogênio, por exemplo, a energia tem valores:

$$E_n = (k^2 2\pi^2 m e^2) / (n^2 h^2),$$

sendo  $n$  um número inteiro. Esses valores para a energia são aqueles encontrados experimentalmente, e aqueles dados previamente pelo modelo de Bohr. Esses estados também correspondem às ondas do elétron nos estados estacionários dos quais falamos anteriormente. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 672)

Bohr teve de assumir a existência de estados estacionários. Na formulação de Schrödinger estes resultados se seguem diretamente da formulação da natureza dual do elétron; os estados estacionários e suas energias são derivados da teoria de Schrödinger. A nova teoria abarca todos os resultados do modelo de Bohr sem a postulação de hipóteses inconsistentes.

Após a unificação das formulações de Schrödinger, de Heisenberg, de Dirac, de Born, dentre outros físicos, obtivemos um modelo matemático altamente bem sucedido do átomo. Todavia, os conceitos quânticos são muito abstratos, não temos um modelo físico do átomo palpável como o modelo planetário de Bohr. O sucesso da nova mecânica quântica pode ser visto em sua capacidade de dar previsões, descrições e explicações dos fenômenos subatômicos.

Através da mecânica quântica ficou claro que objetos como elétrons, átomos e fótons não podem ser tratados da mesma forma que tratamos os objetos macroscópicos do cotidiano. Perdemos a visão palpável do mundo atômico, mas obtemos uma forma mais precisa de lidarmos com o estudo da natureza em seu nível mais fundamental.

### **5.3.4 O princípio de incerteza**

Podemos medir a posição e a velocidade de um carro em uma pista marcando a posição do início e do fim do carro na própria pista com um risco de giz, por exemplo. No fim da pista fazemos outra marca e com um cronômetro medimos o tempo do percurso do carro. Desta forma, podemos medir a velocidade do carro tomando a distância dos pontos marcados na pista e dividindo a medida pelo tempo marcado no cronômetro. Sabemos em que direção se movimenta o carro, e assim sua velocidade média; diminuindo os intervalos também podemos obter a velocidade instantânea em qualquer ponto ao longo da pista. Tínhamos até então que qualquer propriedade de um objeto físico poderia ser medida precisamente, dependendo somente da capacidade de precisão do instrumento utilizado.

Vamos tomar agora um elétron se movendo no vácuo num tubo. Tentaremos medir a posição e a velocidade do elétron, mas para isso precisamos mudar nosso método, pois o elétron é tão pequeno que não conseguimos localizar sua posição através da luz comum (lembrando que para a medida do carro utilizamos a luz para enxergarmos todas as medidas que fizemos). Podemos tentar localizar o elétron numa região do tamanho de um átomo  $10^{-10}$  m, por exemplo. Para isso, precisamos de um raio de luz de comprimento de onda de valor  $10^{-10}$  m ou menor. Um

fóton de comprimento de onda  $\lambda$  pequeno como este terá uma frequência elevada  $f$ , e assim um momento  $h/\lambda$  de grande valor.

Vimos que o efeito Compton nos diz que tal fóton irá colidir com o elétron; sua velocidade mudará inclusive de direção devido à dispersão. Quando temos um fóton disperso podemos deduzir pela sua direção onde ele estava, para assim localizarmos o elétron. Contudo, neste processo mudamos a velocidade, e assim o momento do elétron (em todas suas características vetoriais). Quanto mais precisamente localizamos o elétron usando fótons de comprimento de onda curto, menos preciso é o valor de seu momento. Se utilizarmos fótons com menor energia, mas a luz existe em quanta de energia  $hf$ , ele terá comprimento de onda mais longo; e isto causará uma maior incerteza quanto à posição do elétron.

No instante do tempo quando a posição é determinada, isto é, no instante em que o fóton é disperso pelo elétron, o elétron sofre uma mudança descontínua no momento. Esta mudança é tão maior quanto o menor comprimento de onda da luz aplicada, i. e., quanto mais exata a determinação da posição. No instante em que a posição do elétron é conhecida, seu momento portanto pode ser conhecido somente até magnitudes as quais correspondem àquela mudança descontínua; então, quanto mais precisamente a posição é determinada, menos preciso é o valor do momento conhecido, e reciprocamente.<sup>73</sup> (Heisenberg, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 675, tradução nossa)

---

<sup>73</sup> “At the instant of time when the position is determined, that is, at the instant when the photon is scattered by the electron, the electron undergoes a discontinuous change in momentum. This change is the greater the smaller the wavelength of the light employed, i.e., the more exact the determination of the position. At the instant at which the position of the electron is known, its momentum therefore can be known only up to magnitudes which correspond to that discontinuous change; thus, the more precisely the position is determined, the less precisely the momentum is known, and conversely (Heisenberg, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 675)”

Esta é a primeira formulação do princípio de incerteza. Ele pode ser expresso quantitativamente em duas expressões matemáticas, relações de incerteza, as quais são conclusões advindas de fatores experimentais sobre medidas envolvendo objetos quânticos.

Seja  $\Delta x$  a incerteza na medida da posição do objeto, e seja  $\Delta p_x$  a incerteza na medida do momento do objeto na direção no mesmo instante. O princípio de Heisenberg diz que o produto destas duas incertezas precisa ser igual à, ou maior, à constante de Planck dividida por  $4\pi$ .

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/(4\pi)$$

Esta relação nos diz que se usarmos um fóton com um comprimento de onda curto para medir a posição do elétron com precisão,  $\Delta x$  terá de ter um valor muito pequeno, onde a incerteza do momento  $\Delta p_x$  precisam ser  $h/(4\pi\Delta x)$ . Quanto menor o  $\Delta x$  maior o  $\Delta p_x$ . Quanto mais curto o comprimento de onda do fóton, mais rápido o elétron se desviará. Se não houvesse incerteza, se não medíssemos a posição do elétron com precisão, o comprimento de onda  $\lambda$  do fóton teria de ser zero, tendo assim o fóton uma energia infinita; sendo a incerteza do momento infinita ou indefinida. E reciprocamente para a precisão do momento. Há uma troca, quando a precisão de uma variável aumenta, a outra diminui e vice-versa. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 676) O mesmo ocorre com uma segunda relação de incerteza envolvendo tempo e energia:  $\Delta t \cdot \Delta E \geq h/(4\pi)$ .

### 5.3.5 Origens e a consequência do princípio de incerteza

O princípio de incerteza se aplica para qualquer objeto, inclusive macroscópicos como o carro. Entretanto, as limitações do princípio não têm consequência prática para objetos tão massivos movendo-se em velocidades habituais. Isto porque as incertezas envolvidas são muito pequenas para as notarmos. As limitações tornam-se, no entanto, evidentes na escala subatômica.

Neste ponto precisamos deixar claro que a incerteza não se dá devido à imprecisão do aparelho que mede ou daquele que mede. Não há instrumento que contorne a questão das incertezas recíprocas nas medições impostas pelas relações de incerteza. As relações de incerteza permanecem válidas enquanto a mecânica quântica permanecer válida enquanto teoria, as relações são consequência direta da dualidade onda-partícula que há na mecânica quântica. As relações de incertezas são

fundamentais, pois estão diretamente relacionadas ao conceito de quantização. A constante de Planck  $h$  está nas equações básicas de energia e momento do fóton,  $E=hf$  e  $p=h/\lambda$ . Só haveria ondas contínuas se  $h$  tivesse valor zero; não haveria luz quantizada. A constante de Planck também tem papel fundamental na definição da quantização da luz e nos estados estacionários de Bohr. Se o momento do fóton tivesse valor nulo, as relações de incerteza seriam:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = 0$$

$$\Delta t \cdot \Delta E = 0$$

Desta forma, poderíamos medir simultaneamente as características corpusculares e ondulatórias dos objetos quantizados sem problemas. Não haveria incertezas em relação ao momento, posição, tempo e energia. Mesmo que seja pequena a constante de Planck não é igual à zero, temos a dualidade onda-partícula; a natureza se comporta de modo a limitar a precisão de nossas medidas de quantidades fundamentais do nível mais fundamental. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 677)

Vimos que a partir do modelo proposto por Rutherford que o átomo deveria colapsar devido à propensão do elétron a espiralar em direção ao núcleo. Bohr postulou como solução para este problema a existência dos estados estacionários, associados às ondas estacionárias, também haveria o primeiro estado estacionário, a órbita mais próxima do núcleo onde o elétron poderia se encontrar. Contudo, é o princípio de incerteza que explica porque não podemos ter estados estacionários ainda mais próximos ao núcleo. Ao aplicarmos a relação de incerteza da posição e do momento, podemos ver que um elétron confinado num espaço de  $10^{-8}$ cm, o tamanho médio de um átomo, a incerteza em sua velocidade é menor que a velocidade da luz. Todavia, se ele estiver confinado num espaço menor, sua velocidade ultrapassará a da luz, a saber,  $3 \times 10^{10}$ cm/s. E, sabemos através da teoria da relatividade que nenhuma partícula material pode exceder a velocidade da luz. Assim, o espaço entre o núcleo e o primeiro estado estacionário deve permanecer vazio.

### 5.3.6 A interpretação probabilística

Em um final de semana com feriado por volta de 25 milhões de automóveis passam por um a rodovia em direção ao litoral; fazemos a estatística, baseando-nos na experiência e temos que por volta de 400 pessoas serão mortas em acidentes. Certamente não saberemos quais automóveis estarão envolvidos nos acidentes e nem em que parte da rodovia eles acontecerão. Porém, a média do comportamento é bastante precisa e previsível. É possível fazer previsões probabilísticas. Podemos ter medidas bem precisas em relação a eventos similares através de cálculos probabilísticos.

De forma similar, na física podemos pensar sobre o comportamento de fótons e partículas atômicas. Contudo, vimos que há limitações em nossa habilidade de descrever o comportamento destas partículas. Quando uma estrela é fotografada por um telescópio a imagem formada é um padrão de difração; um ponto central com uma série de anéis circulares progressivamente mais fracos. Se a energia dos raios de luz não fosse quantizada, eles se espalhariam continuamente sobre as fontes de onda sempre em expansão. Então, a imagem de uma estrela tênue e de uma estrela mais luminosa teriam o mesmo padrão a não ser pela intensidade da luz. Só que a luz é quantizada; ela existe em quantas separados, fótons de uma energia definida que obedecem a equação de Schrödinger. Um fóton é visto no filme em uma posição única, não sobre todo o filme. Porém, essa localização não pode ser prevista antecipadamente. Tudo que podemos prever é a probabilidade em que o fóton pode chegar à localização designada. Somente alguns fótons por segundo podem chegar a marcar o filme quando examinamos uma estrela longínqua. O filme se apresenta de acordo com a figura 1 depois de certo tempo de exposição; e vai evoluindo de acordo com as figuras 2 e 3. Do mesmo modo que se comportam os elétrons no experimento Davisson-Germer descrito previamente.

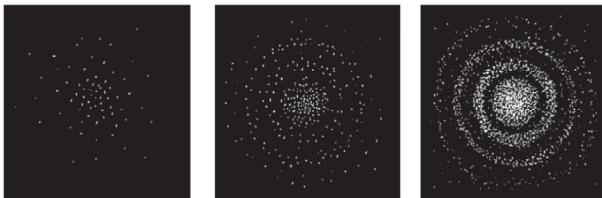


Figura 11: Estágios sucessivos de uma imagem de uma estrela longínqua, mostrando os impactos de fótons individuais. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 680)

Para um grande número de fótons, a distribuição em que eles se apresentam é, em geral, bem descrita pela distribuição esperada se tivermos como base a intensidade da luz como onda. Podemos esperar que eles ficarão nas partes de grande intensidade da imagem, mas para um único fóton não podemos prever exatamente onde ele se encontrará. Esses fatos se ajustam perfeitamente se considerarmos a intensidade da onda e a localização indicada pela probabilidade de um fóton encontrar-se em tal ponto específico.

Uma conexão similar pode ser feita com as ondas de De Broglie e as partículas de matéria. Em vez de considerarmos o padrão de difração formado por um feixe de elétrons, consideramos uma onda de um feixe de elétrons, consideramos uma onda de um elétron que está confinado numa região do espaço. A amplitude da onda em dada localização representa a probabilidade do elétron encontrar-se lá, se formos medir sua localização. Num átomo de hidrogênio a teoria quântica não proporciona nenhuma figura fixa fácil de ser visualizada deste átomo. Não há a figura de um elétron orbitando o núcleo como o modelo de Bohr, mas uma descrição probabilística da distribuição da partícula negativa; essa é a figura que a mecânica quântica fornece. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 681)

O uso da probabilidade na mecânica quântica, contrariamente ao uso habitual, não é feito por conveniência, mas por uma necessidade intrínseca. Na maioria dos casos a física atômica lida com o comportamento de várias partículas atômicas. As leis que governam esse comportamento usual são as leis da mecânica quântica. As ondas podem ser consideradas ondas cujas amplitudes são medida de probabilidade. A informação <sup>74</sup> viaja pelo espaço em ondas de probabilidade. Estas ondas podem interferir-se do mesmo modo que as ondas n'água o fazem.

Tomemos um feixe de elétrons passando por duas fendas. Neste experimento podemos considerar os elétrons como ondas, e assim, podemos medir seu padrão de interferência. O padrão de interferência é, de fato, o padrão de probabilidade que fornece as probabilidades de que cada elétron se encontrará em diferentes localizações atrás das fendas. Uma grande interferência construtiva indica grande probabilidade de que os elétrons lá estarão; uma grande interferência destrutiva indica baixa probabilidade. Não podemos dizer onde cada elétron

---

<sup>74</sup> Informação a respeito da probabilidade com a qual cada partícula deveria estar em uma dada posição em um dado tempo.

individualmente se encontrará depois de passar pelas fendas, somente saberemos de acordo com a mecânica quântica a probabilidade de encontrá-lo em cada região. No entanto, depois de vários elétrons passarem pelas fendas a formação estatística dos elétrons fornecerá um padrão de interferência familiar, aquele esperado para ondas.

### 5.3.7 O princípio de complementaridade

A mecânica quântica foi fundamentada na existência do dualismo onda-partícula da luz e da matéria, e o sucesso da teoria é reforçado pela interpretação probabilística mostrando a importância do dualismo. Percebemos que toda essa nova abordagem física é muito contra-intuitiva, pois logo nos perguntamos como uma partícula pode ser pensada como realmente tendo propriedades ondulatórias e como uma onda pode ser pensada como tendo realmente propriedades corpusculares. Como uma mecânica quântica consistente pode ser construída através da ideia de que um raio de luz ou um elétron pode ser descrito simultaneamente pelos conceitos incompatíveis de onda e de partícula?

Em 1927, Bohr percebeu que a palavra “simultaneamente” era a chave para uma consideração consistente. Ele percebeu que nossos modelos sobre a luz e a matéria são baseados em seus comportamentos atestados em laboratório. O efeito foto-elétrico e o efeito Compton atestam o comportamento da luz como se ela consistisse de partículas; o experimento da dupla fenda atesta o comportamento da luz como se ela consistisse de ondas. Entretanto, luz e elétrons nunca se comportam simultaneamente como se consistissem de ambas, partículas e ondas. Em cada experimento específico tanto um como o outro se comporta ou como partícula ou como onda, mas nunca como ambas.

Esses fatos sugeriram a Bohr as descrições da luz e da matéria como onda e partícula são ambas necessárias, mesmo que elas sejam logicamente incompatíveis entre si. Esses conceitos devem ser considerados como complementares um com o outro. Isto levou Bohr a formular o princípio de complementaridade:

Os modelos onda e partícula são ambos requeridos para uma descrição completa da matéria e da radiação eletromagnética. Uma vez que estes dois modelos são mutuamente exclusivos, eles não podem ser usados simultaneamente. Cada experimento, ou

experimentador que designa o experimento, seleciona uma ou outra descrição como a descrição apropriada para aquele experimento.<sup>75</sup> (Bohr, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 682, tradução nossa)

Bohr mostrou que este princípio é uma pressuposição em sua acepção fundamental da mecânica quântica. Ele tratou a dualidade onda-partícula, sem resolvê-la em favor de ondas ou partículas, mas abrigoando-a nos fundamentos da mecânica quântica. Esta foi outra iniciativa ousada tomada por Bohr em direção à formulação da mecânica quântica, pois a tomou mesmo que para isto fosse preciso contradizer a física clássica, como o fez também na formulação de seu modelo do átomo.

Vamos tentar entender o significado do princípio de complementaridade. Quando aceitamos a dualidade onda-partícula como um fato da natureza, podemos dizer que a luz e os elétrons (e os demais quanta) contêm *potencialmente* as propriedades de ondas e partículas até que sejam observados, e assim comportam-se como se fossem onda ou partícula, dependendo do experimento ou da escolha do cientista que faz o experimento.

Esta alegação perspicaz de Bohr nos diz que o que observamos em nossos experimentos não é o modo como a natureza realmente é quando não a estamos observando. Segundo Bohr, a natureza não fornece nenhum modelo específico quando não é observada, antes é uma mistura de inúmeras possibilidades de como poderia ser até que finalmente a observemos. Quando montamos um experimento, nós selecionamos o modelo que a natureza irá exibir, e nós decidimos como fótons, elétrons, prótons, bolinhas de gude, irão se comportar – como onda ou como partícula. Ou seja, de acordo com a escola de Copenhague o experimentador se torna parte do experimento, já que ao fazê-lo interage com a natureza de forma que não podemos observar todos os aspectos da natureza como ela realmente é por ela mesma. Em vez disso, podemos dizer que podemos saber somente parte da natureza

---

<sup>75</sup> “The wave and particle models are both required for a complete description of matter and of electromagnetic radiation. Since these two models are mutually exclusive, they cannot be used simultaneously. Each experiment, or the experimenter who designs the experiment, selects one or the other description as the proper description for that experiment.” (Bohr, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 682)

que se revela através de nossos experimentos. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 683)

A consequência desse fato para eventos em nível quântico é o princípio de incerteza que impõe uma limitação quantitativa sobre o que podemos apreender da natureza em qualquer dada interação, se estivermos de acordo com Bohr. A consequência dessa limitação é que precisamos aceitar a interpretação probabilística dos processos individuais quânticos. O princípio de incerteza é muitas vezes chamado de princípio de *indeterminação* justamente por isso. Segundo Bohr, não há maneira de contornar essas limitações, concordamos com Bohr enquanto a mecânica quântica for válida como teoria.

Percebemos que essas ideias vão de desacordo com o que normalmente pensamos sobre a natureza. Usualmente pensamos a natureza existindo completamente independente de nós e que possui uma realidade e um comportamento definido mesmo quando não a estamos observando. Entretanto, esta é a maneira com a qual a natureza se apresenta em nosso dia-a-dia e esta perspectiva é um pressuposto fundamental para a física clássica; e o nome filosófico para isto é “realismo”; para os fenômenos e objeto no âmbito da nossa experiência comum ele é perfeitamente apropriado. Contudo, como argumentamos até aqui, não deveríamos esperar que o mundo quântico tivesse um comportamento idêntico ao do mundo macroscópico em que vivemos, como Bohr bem enfatizou. (Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 683)

Uma das origens da nossa dificuldade está no fato de que somos sempre impelidos a usar a linguagem comum quando queremos descrever um fenômeno, não nos utilizamos de aparatos matemáticos ou lógicos, mas muitas vezes de nossa imaginação. A linguagem comum foi desenvolvida através da nossa experiência cotidiana e por isso é difícil que ela ultrapasse esses limites. A física clássica se restringiu ao uso de conceitos deste tipo, ela se desenvolveu de modo a representar os fenômenos visíveis em ondas e partículas. Portanto, acabamos por agir desta maneira ao analisarmos os processos quânticos, mas, como vimos, neste âmbito a física clássica se rompe.

O princípio de complementaridade, o princípio de incerteza e a interpretação probabilística formam uma interpretação do significado da mecânica quântica. Esta interpretação é conhecida como interpretação de Copenhague.

A ideia de que a solução da equação de Schrödinger é uma onda que representa a probabilidade de se encontrar a partícula associada em alguma condição específica de movimento teve grande sucesso. Todo experimento concebido desde então para testar esta interpretação a

confirmou em seus resultados. Mesmo assim vários cientistas não aceitaram esta ideia. Einstein mesmo disse que:

A mecânica quântica é muito imponente. Mas uma voz interior me diz que ainda não é a verdade final. A teoria é muito abrangente, mas dificilmente nos leva mais perto do segredo do Velho. Em qualquer caso, estou convencido de que Ele não joga dados.<sup>76</sup> (Einstein, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 685, tradução nossa)

A crença de que Deus não joga dados mostra a convicção de Einstein de que devem existir leis mais básicas e deterministas que ainda não foram encontradas; que uma explicação final em física não pode se basear em leis probabilísticas.

Alguns cientistas concordam, outros discordam de Einstein, mas devemos aceitar que a mecânica quântica funciona na prática. Ela fornece muitas respostas para as questões impostas pela física e une ideias que antes eram desconexas; produziu novos conceitos e experimentos além de abrir portas para o avanço tecnológico, desde transistores, supercondutores, microprocessadores até lasers entre outros.

Por outro lado, ainda há visões opostas sobre o significado da mecânica quântica. Ela abarca funções probabilísticas e não trajetórias precisas. Alguns tomam este fato como um indício da natureza do mundo. Outros tomam este fato como um indício de que a teoria ainda não está completa. Como em outros campos da ciência, grandes descobertas ainda hão de ser feitas.

### 5.3.8 A lógica da complementaridade

Explicamos historicamente e fisicamente como Bohr chegou ao princípio de complementaridade. Agora vamos tentar analisá-lo de forma mais profunda, elucidando o conceito de complementaridade, apresentando as dificuldades que ele ocasiona, suas implicações filosóficas e como englobá-lo dentro de uma teoria física através do estudo de uma lógica para proposições complementares.

---

<sup>76</sup> “The quantum mechanics is very imposing. But an inner voice tells me that it is still not the final truth. The theory yields much, but it hardly brings us nearer to the secret of the Old One. In any case, I am convinced that He does not play dice.” (Einstein, *apud* Cassidy, Holton, Rutherford, 2002, p. 685)

A primeira referência ao princípio de complementaridade foi encontrada num manuscrito escrito por Bohr em 10 de Julho de 1927:

...a teoria exibiu uma dualidade quando uma considerada por um lado o princípio de superposição e por outro lado a conservação de energia e momento (...) Aspectos complementares de experiência que não podem ser unificados em uma figura espaço-temporal dentro de teorias clássicas.<sup>77</sup> (Bohr, 1985, p. 26, tradução nossa)

Ou seja, complementaridade significa a possibilidade de unificar aspectos que não podem ser postos juntamente sob a ótica clássica. E ainda, a concepção de Bohr de complementaridade na mecânica quântica é uma parte inerente da teoria que tem a mesma validade de seu aspecto formal sem poder ser separada dela, não é somente a expressão de uma posição filosófica específica.

Podemos tomar o entendimento da complementaridade de dois pontos de vista. O primeiro previsto por Bohr é a ideia de que a complementaridade faz parte de um princípio epistemológico geral, um princípio com significado, que pode guiar não somente a física, mas outras ciências:

...as lições aprendidas por nós por acontecimentos recentes em física em relação à necessidade de uma extensão constante da estrutura de conceitos adequados para a classificação de novas experiências nos levam a uma atitude epistemológica geral a qual pode nos ajudar a evitar dificuldades conceituais aparentes em outros campos da ciência também.<sup>78</sup> (Bohr, 1985, p. 28, tradução nossa)

---

<sup>77</sup> “...the theory exhibited a duality when one considered on one hand the superposition principle and on the other hand the conservation of energy and momentum (...) complementary aspects of experience that cannot be unified into a space-time picture on the classical theories” (Bohr, 1985, p. 26)

<sup>78</sup> “... the lessons taught us by recent developments in physics regarding the necessity of a constant extension of the frame of concepts appropriate for the classification of new experiences leads us to a general epistemological attitude which might help us to avoid apparent conceptual difficulties in other fields of Science as well.” (Bohr, 1985, p. 28)

O modo complementar de descrição (...) é baseado ultimamente na comunicação com a experiência [citando Bohr] “que precisa usar a linguagem da vida cotidiana”. (Jammer, 1974, p.379)

A descrição objetiva da experiência precisa sempre ser formulada na [citando Bohr] “linguagem simples que atende às necessidades da vida prática e do convívio social”. (Jammer, 1974, p.379)

Estes pontos reiteram o papel da complementaridade como um princípio com significado. Vemos também que Bohr sugere que complementaridade pode ter utilidade também em outras áreas além da física como um meta-princípio. Podemos tomar, Segundo Bohr, o princípio de complementaridade como um princípio geral regulador metodológico, um princípio com significado. O segundo ponto de vista é tomar a ideia de complementaridade como parte de uma teoria.

A diferença entre esses dois pontos de vista está no que consideramos um princípio meta-teórico da ciência e no que consideramos um princípio estrito de uma teoria científica particular. A primeira posição toma o princípio como um meta-princípio e a segunda o toma como algo interno ao objeto da linguagem da própria teoria. Essa distinção é importante, pois a ideia de complementaridade se assemelha àquela da existência de contradições; se o tomarmos com um princípio com significado fica fácil aceitarmos que:

[o]s tipos de informação aparentemente incompatíveis sobre o comportamento de um objeto sob exame os quais temos devido a diferentes mecanismos experimentais podem claramente não vir a conectar-se entre si de forma usual, mas podem, como igualmente essencial para um relato exaustivo de toda experiência, serem considerados como ‘complementares’ um com o outro.<sup>79</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 104, tradução nossa)

---

<sup>79</sup> “[t]he apparently incompatible sorts of information about the behavior of the object under examination which we get by different experimental arrangement can clearly not be brought into connection with each other in the usual way, but may, as equally essential for an exhaustive account of all experience, be

Tentaremos discutir qual o papel da lógica na discussão da complementaridade considerados nos dois pontos de vista. A ideia de complementaridade pode suportar a perspectiva de um princípio regulativo de significado e também como uma lei que pode ser internalizada em uma teoria. Ainda, podemos analisar se proposições complementares podem ser colocadas em certa linguagem sem correremos o risco de trivializarmos a teoria da qual fazem parte.

A análise histórica do princípio de complementaridade de Bohr é problemática, pois não há acordo quanto ao seu significado exato. Por isso, precisamos chegar a uma caracterização do que devam ser proposições complementares, dando a elas um enfoque lógico. Faremos isto por meio da revisão das palavras Bohr e de vários comentadores do assunto. Temos a crença de que para entendermos um campo da ciência como a física quântica é vantajoso que tenhamos uma visão pluralista onde possamos examinar vários modos, por meio de lógicas não-clássicas por exemplo, eventualmente não equivalentes, para abordarmos o estudo desse campo, cada qual com sua perspectiva particular, evidenciando detalhes que não possam ser vistos por outros pontos de vista.

Mesmo que não entremos em detalhes históricos profundos, somos motivados pela atitude ousada de Bohr de aceitar a natureza dual da realidade por meio do princípio de complementaridade. É importante a distinção filosófica entre princípios de significado regulativo e leis físicas estritas para abordarmos as relações entre certas lógicas não-clássicas e as ciências empíricas, em particular a física.

Complementaridade, então, engloba princípios meta-teóricos que impõem limitações em certas teorias. Além disso, a complementaridade tomada como um princípio de significado apoia o uso de enfoques incompatíveis em física.

As consequências do conceito de complementaridade introduzido por Bohr na mecânica quântica são fundamentais, particularmente elas ajudaram no desenvolvimento da interpretação de Copenhague da mecânica quântica que é amplamente reconhecida na literatura, e esta constitui numa das contribuições mais fundamentais para o desenvolvimento da mecânica quântica.

---

regarded as ‘complementary’ to each other.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 104)

Para prosseguirmos nosso estudo vamos apresentar nosso entendimento da palavra “complementaridade”. A palavra complementaridade expressa um tipo de impossibilidade de medição simultânea, como argumentamos previamente. A palavra complementaridade pode ser interpretada como um princípio geral relacionado à incompatibilidade em certo sentido. Nossa visão é sustentada pelas próprias palavras de Bohr e de outros comentadores, embora um entendimento completo deste conceito seja uma tarefa complexa devido ao desacordo encontrado na literatura, como já dissemos. Por isso a importância de deixarmos claro qual é nossa compreensão deste conceito. Seguiremos da Costa e Krause, 2006.

Evidenciamos previamente a observação de Bohr de que conceitos complementares não podem ser usados ao mesmo tempo, simultaneamente. Apesar da possibilidade de avaliarmos esta observação como somente um *façon de parler*, precisamos precisar nossa análise cuidadosamente: “[é] preciso ser muito cuidadoso, por isso, em analisar quais conceitos realmente subjazem limitações.”<sup>80</sup> (Bohr, 1985, p.369, tradução nossa)

Existem diversas abordagens da complementaridade:

[s]e o uso de um conceito clássico exclui o de outro, podemos chamar ambos conceitos (...) complementares (um como o outro), seguindo Bohr.<sup>81</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106, tradução nossa)

[q]ualquer que seja a rota histórica, Bohr chegou a uma doutrina de figuras necessariamente clássicas mutuamente, mas exclusivas e incompatíveis as quais dada qualquer aplicação enfatizando uma classe de conceitos precisa excluir a outra.<sup>82</sup> (Bohr,

---

<sup>80</sup> [o]ne must be very careful, therefore, in analyzing which concepts actually underlie limitations.” (Bohr, 1985, p.369)

<sup>81</sup> “[if] the use of a classical concept excludes of another, we call both concepts (...) complementary (to each other), following Bohr.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106)

<sup>82</sup> “[w]hatever historical route, Bohr did arrive at a doctrine of mutually exclusive, incompatible, but necessary classical pictures in which any given application emphasizing one class of concepts *must* exclude the other.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106)

*apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106, tradução nossa)

A visão de proposições complementares excluindo uma a outra são vistas também em diversas passagens escritas por Bohr:

A existência de diferentes aspectos da descrição de um sistema físico, aparentemente incompatíveis mas ambos necessários para uma descrição completa do sistema. Em particular, para a dualidade onda-partícula.<sup>83</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106, tradução nossa)

O fenômeno pelo qual, no domínio atômico, objetos exibem as propriedades de ambas partículas e ondas, as quais na clássica, física macroscópica são categorias mutuamente exclusivas.<sup>84</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106, tradução nossa)

A própria natureza da teoria quântica deste modo nos força a considerar as coordenadas do espaço-tempo e a exigência da causalidade, a união que caracteriza as teorias clássicas, como recursos complementares, mas exclusivos da descrição, simbolizando a idealização da observação e da definição respectivamente.<sup>85</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107, tradução nossa)

---

<sup>83</sup> “The existence of different aspects of the description of a physical system, seemingly incompatible but both needed for a complete description of the system. In particular, the wave-particle duality.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106)

<sup>84</sup> “The phenomenon by which, in the atomic domain, objects exhibit the properties of both particle and waves, which in classical, macroscopic physics are mutually exclusive categories.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 106)

<sup>85</sup> “The very nature of the quantum theory thus forces us to regard the space-time co-ordination and the claim of causality, the union of which characterizes the classical theories, as complementary but exclusive features of the description, symbolizing the idealization of observation and definition respectively.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107)

Os tipos aparentemente incompatíveis de informação sobre o comportamento do objeto em análise os quais temos por meio de diferentes arranjos experimentais podem claramente não serem postos em contato entre si da maneira usual, mas podem, trazer para conexão como igualmente essenciais para um relato exaustivo de toda a experiência, serem vistos como ‘complementares’ entre si.<sup>86</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107, tradução nossa)

A informação no tocante ao comportamento de um objeto atômico obtida sob condições experimentais definidas pode, entretanto, de acordo com a terminologia frequentemente usada em física atômica, ser adequadamente caracterizada como complementar para qualquer informação sobre o mesmo objeto obtida através de algum outro arranjo experimental excluindo o cumprimento das primeiras condições. Embora tais tipos de informação não possam ser combinadas em uma única visão por meio de conceitos comuns, eles representam de fato aspectos igualmente essenciais de qualquer conhecimento do objeto em questão os quais podem ser obtido neste domínio.<sup>87</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107, tradução nossa)

---

<sup>86</sup> “The apparently incompatible sorts of information about the behavior of the object under examination which we get by different experimental arrangements can clearly not be brought into connection with each other in the usual way, but may, as equally essential for an exhaustive account of all experience, be regarded as ‘complementary’ to each other.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107)

<sup>87</sup> “Information regarding the behaviour of an atomic object obtained under definite experimental conditions may, however, according to a terminology often used in atomic physics, be adequately characterized as complementary to any information about the same object obtained by some other experimental arrangement excluding the fulfillment of the first conditions. Although such kinds of information cannot be combined into a single picture by means of ordinary concepts, they represent indeed equally essential aspects of any knowledge of the object in question which can be obtained in this domain.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107)

Para reforçar Scheibe ainda diz:

...o que aqui é dito ser ‘complementar’, é também dito ser ‘aparentemente incompatível’, a referência pode escassamente ser usada para aqueles conceitos clássicos, quantidades ou aspectos os quais a combinação foi previamente afirmada ser característica de teorias clássicas. Por ‘aparentemente incompatível’ certamente significa incompatível em considerações clássicas somente.<sup>88</sup> (Scheibe, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107, tradução nossa)

Por meio destas citações podemos observar que é perfeitamente razoável considerar aspectos complementares como incompatíveis, de forma que sua combinação em uma única descrição possa levar a dificuldades. Entretanto, em uma teoria calcada em uma lógica clássica a conjunção de duas teses é também uma tese. Ou seja, se  $\alpha$  e  $\beta$  são ambas teses ou teoremas da teoria, então  $\alpha \wedge \beta$  é também uma tese da teoria. Isto é o que intuitivamente dizemos quando, sob a luz clássica, uma proposição “verdadeira” não pode “excluir” outra proposição “verdadeira”. Assim, percebemos que o mundo quântico é diferente do clássico, apesar de proposições complementares serem consideradas aceitáveis, mas não sua conjunção.

Isto se dá, já que em lógica clássica se  $\alpha$  é consequência de um conjunto  $\Delta$  de declarações e  $\beta$  também o é, então  $\alpha \wedge \beta$  também é consequência de  $\Delta$ . Se  $\alpha$  for a negação de  $\beta$ , e reciprocamente, então essa regra implica que do conjunto de fórmulas  $\Delta$  deduzimos uma contradição, a saber,  $\alpha \wedge \neg \alpha$  ou  $\beta \wedge \neg \beta$ . Além disso, quando  $\alpha$  e  $\beta$  são incompatíveis,  $\alpha \wedge \beta$  estabelece uma impossibilidade. Logo, parece-nos que uma solução para o problema seria a restrição de tal regra. (da Costa, Krause, 2006, p. 107)

Pretendemos agora, então, fornecer uma descrição das ideias de complementaridade de Bohr de um ponto de vista lógico. A partir de

---

<sup>88</sup>“...which is here said to be ‘complementary’, is also said to be ‘apparently incompatible’, the reference can scarcely be to those classical concepts, quantities or aspects whose *combination* was previously asserted to be characteristic of the classical theories. For ‘apparently incompatible’ surely means incompatible on classical considerations alone.” (Scheibe, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 107)

uma definição plausível de complementaridade, podemos dizer que a lógica subjacente de uma teoria que abarca a complementaridade é uma lógica paraconsistente.

Uma teoria que abarca a complementaridade pode ser definida, pois Bohr nos proporciona os fundamentos para uma classe geral dessas teorias, chamadas de teorias complementares. Uma C-teoria é uma teoria chamada teoria complementar. Em adição a isso, o conceito de uma teoria complementar pode ser generalizado como teorias complementares com princípios de significado regulativo, as  $C_{mp}$ -teorias. Nestas, algumas meta-regras são consideradas de forma que podemos saber se há a possibilidade de aceitar ou não aceitar certas proposições. (da Costa, Krause, 2006, p. 110)

Vamos interpretar uma passagem de Max Jammer para então caracterizarmos as  $C_{mp}$ -teorias:

Embora não seja fácil, como podemos ver, definir a noção de Bohr de complementaridade, a interpretação da noção de complementaridade parece trazer algumas dificuldades de definição. As seguintes definições dessa noção sugerem-se. Uma dada teoria T admite uma interpretação complementar se as seguintes condições forem satisfeitas: (1) T contém (pelo menos) duas descrições D1 e D2 em seu conteúdo; (2) D1 e D2 referem-se ao mesmo universo de discurso U (no caso de Bohr, a microfísica); (3) nem D1 ou D2, se tomadas sozinhas, contam exhaustivamente para todo o fenômeno U; (4) D1 e D2 são mutuamente exclusivas no sentido de que sua combinação em uma única descrição levaria a contradições lógicas.<sup>89</sup> (Jammer, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 110, tradução nossa)

---

<sup>89</sup> “Although it is not easy, as we see, to define Bohr’s notion of complementarity, the notion of complementarity interpretation seems to raise fewer definitory difficulties. The following definition of this notion suggests itself. A given theory T admits a complementarity interpretation if the following conditions are satisfied: (1) T contains (at least) two descriptions D1 and D2 of its substance-matter; (2) D1 and D2 refer to the same universe of discourse U (in Bohr’s case, microphysics); (3) neither D1 nor D2, if taken alone, accounts exhaustively for all phenomena of U; (4) D1 and D2 are mutually exclusive in the sense that their combination into a single description would lead to logical contradictions.” (da Costa, Krause, 2006, p. 110, APUD, Jammer)

Que estas condições caracterizam uma interpretação complementar como entendido pela escola de Copenhagen pode ser facilmente documentado. De acordo com Léon Rosenfeld, (...) um dos principais porta-vozes desta escola, complementaridade é a resposta para a seguinte questão: O que devemos fazer quando nos confrontamos com tal situação, na qual temos que usar dois conceitos que são mutuamente exclusivos, e ainda ambos necessários para uma descrição completa do fenômeno? “Complementaridade denota a relação lógica, de um tipo completamente novo, entre conceitos que são mutuamente exclusivos, e os quais portanto não podem ser considerados ao mesmo tempo – que levariam a equívocos lógicos – mas os quais não obstante precisam ambos serem usados para obtermos uma descrição completa da situação.” Ou para citar o próprio Bohr a respeito da condição (4): “Na física quântica evidências sobre objetos atômicos por diferentes arranjos de experimentos (...) parecem contraditórias quando a combinação em uma única circunstância é pretendida.” (...) De fato, a palestra dada em Como [em 16 de setembro de 1927] por Bohr com sua ênfase na exclusão mútua mas simultânea da necessidade das descrições causal (D1) e espaço-temporal (D2), isto é, o primeiro pronunciamento de Bohr da sua interpretação da complementaridade, forma um exemplo que conforma totalmente com o definição precedente. A descoberta de Bohr da complementaridade, costuma-se dizer, constituir da sua maior contribuição para a filosofia da ciência moderna.<sup>90</sup>

---

<sup>90</sup> “That these conditions characterize a complementarity interpretation as understood by the Copenhagen school can easily be documented. According to Léon Rosenfeld, (...) one of the principal spokesmen of this school, complementarity is the answer to the following question: What are we to do when we are confronted with such situation, in which we have to use two concepts that are mutually exclusive, and yet both of them necessary for a complete description of the phenomena? “Complementarity denotes the logical

(Jammer, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 111, tradução nossa)

Assim, vamos supor que as sentenças D1 e D2 são sentenças formuladas na linguagem de uma teoria complementar T, portanto podemos tomar as partes (1) e (2) como implícitas. A parte (3) implica que D1 e D2, vistas de T, são necessárias para a compreensão total dos aspectos relevantes dos objetos do domínio. Ou seja,  $T \vdash D1$  e  $T \vdash D2$ , sendo ambas sentenças válidas sintaticamente – uma sentença é verdadeira em T se ela é teorema de T e falsa se sua negação é teorema de T; se nem a sentença nem sua negação forem teoremas de T, então ela é uma sentença independente.

Encontramos o problema na parte (4), onde Jammer diz que a combinação de D1 e D2 em uma única descrição levaria a contradições lógicas. Sendo mutualmente exclusivas, elas implicariam um equívoco lógico. Informalmente, proposições complementares, mutualmente exclusivas são sentenças que levam a uma contradição via dedução clássica, em particular sua conjunção leva a uma contradição.

A partir de Jammer vamos caracterizar uma C-teoria. Uma C-teoria admite uma interpretação complementar que engloba fórmulas  $\alpha$  e  $\beta$ , que para Jammer são D1 e D2, as quais são mutualmente exclusivas, como dito acima, que sua conjunção produz uma contradição quando a lógica clássica é aplicada. Se  $\vdash$  é o símbolo para a dedução clássica, então sendo  $\alpha$  e  $\beta$  complementares, temos  $\alpha, \beta \vdash \gamma \wedge \neg \gamma$  para algum  $\gamma$  da linguagem de T. (da Costa, Krause, 2006, p. 111)

Fica evidente que o problema com esta caracterização da complementaridade é que a lógica subjacente a T é a lógica clássica. Então, T que contém proposições complementares no sentido descrito é

relation, of quite a new type, between concepts which are mutually exclusive, and which therefore cannot be considered at the same time – that would lead to logical mistakes – but which nevertheless must both be used in order to give a complete description of the situation.” Or to quote Bohr himself concerning condition (4): “In quantum physics evidence about atomic objects by different experimental arrangements (...) appears contradictory when combination into a single picture is attempted.” (...) In fact, Bohr’s Como lecture with its emphasis on the mutual exclusive but simultaneous necessity of the causal (D1) and the space-time description (D2), that is, Bohr’s first pronouncement of his complementarity interpretation, forms an example which fully conforms with the preceding definition. Bohr’s discovery of complementarity, it is often said, constitutes his greatest contribution to the philosophy of modern science.” (da Costa, Krause, 2006, p. 111, APUD – Jammer)

uma teoria contraditória, inconsistente. Se nossa intenção for manter a ideia de proposições complementares como parte da teoria, de modo que possam ser expressas na linguagem sem trivialização, uma solução - e talvez a única - será empregar como lógica subjacente a T uma lógica que admita ambas  $\alpha$  e  $\beta$  sem nos levar a uma contradição. Para isso, podemos mudar o conceito de dedução clássica, adotando uma nova lógica, uma lógica paraclássica. Explicaremos o que é uma lógica paraclássica a seguir.

Esta espécie de lógica é aquela que subjazerá as teorias complementares; uma  $C_{mp}$ -teoria, uma C-teoria com princípios que contém significado. Entendemos princípios que contém significado como as hipóteses que sancionam algumas restrições de procedimentos clássicos ou a utilização de certos esquemas clássicos<sup>91</sup> incompatíveis dentro do domínio de teorias científicas. (da Costa, Krause, 2006, p. 112)

Vamos propor um sistema lógico para as  $C_{mp}$ -teorias de acordo com o artigo “*The Logic of Complementarity*”. Não investigaremos o sistema lógico que iremos propor em todos seus aspectos formais e o apresentaremos a nível proposicional.

Seja C um sistema axiomático para o cálculo proposicional clássico. Os símbolos  $\neg$ ,  $\rightarrow$ ,  $\wedge$ ,  $\vee$  e  $\leftrightarrow$  terão seus significados usuais e as convenções padrão para formação de fórmulas serão assumidas. O conceito de dedução em C é considerado como sendo o padrão. Usamos o símbolo  $\vdash$  para representar deduções em C. As fórmulas em C serão denotadas por letras gregas minúsculas, enquanto conjuntos de fórmulas serão denotados com letras gregas maiúsculas.

Definição 1. Seja  $\Gamma$  um conjunto de fórmulas de C e seja  $\alpha$  uma fórmula da linguagem de C. então, dizemos que  $\alpha$  é uma P-consequência sintática de  $\Gamma$  e escrevemos  $\Gamma \vdash_p \alpha$  se e somente se:

- (P1)  $\alpha \in \Gamma$ , ou
- (P2)  $\alpha$  é uma tautologia clássica, ou
- (P3) Existe um conjunto consistente de acordo com a lógica clássica  $\Delta \subseteq \Gamma$  de modo que  $\Delta \vdash \alpha$  de acordo com a lógica clássica.

---

<sup>91</sup> A palavra clássico se refere à física clássica. Para Bohr todo discurso envolvendo os fenômenos quânticos deveriam ser feitos através da linguagem da física clássica.

Chamamos  $\vdash_p$  a relação de P-consequência.

Definição 2. P é a lógica cuja linguagem é aquela de C e cuja relação de consequência é aquela de P-consequência. Tal lógica é chamada de lógica paraclássica.

Teorema 1.

1. Se  $\alpha$  é um teorema do cálculo proposicional clássico C e se  $\Gamma$  é um conjunto de fórmulas, então  $\Gamma \vdash_p \alpha$ ; em particular  $\vdash_p \alpha$ .
2. Se  $\Gamma$  é consistente de acordo com C, então  $\Gamma \vdash \alpha$  em C se e somente se  $\Gamma \vdash_p \alpha$  em P.
3. Se  $\Gamma \vdash_p \alpha$  e se  $\Gamma \boxplus \Delta$ , então  $\Delta \vdash_p \alpha$ ; a definida noção de P-consequência é monotônica.
4. A noção de P-consequência é recursiva.
5. Uma vez que as teses de P, as fórmulas válidas de P, são aquelas de C, P é decidível.

Definição 3. Um conjunto de fórmulas  $\Gamma$  é P-trivial se e somente se  $\Gamma \vdash_p \alpha$  para toda fórmula  $\alpha$ . Caso contrário,  $\Gamma$  é P-não-trivial.<sup>92</sup>

Definição 4. Um conjunto de fórmulas  $\Gamma$  é P-inconsistente se existe uma fórmula  $\alpha$  tal que  $\Gamma \vdash_p \alpha$  e  $\Gamma \vdash_p \neg\alpha$ . Caso contrário,  $\Gamma$  é P-consistente.

Teorema 2.

1. Se  $\alpha$  é uma fórmula atômica, então  $\Gamma = \{\alpha, \neg\alpha\}$  é P-inconsistente, mas P-não-trivial.
2. Se o conjunto de fórmulas  $\Gamma$  é P-trivial, então é trivial de acordo com a lógica clássica. Se  $\Gamma$  é não-trivial, então é P-não-trivial.
3. Se  $\Gamma$  é P-inconsistente, então é inconsistente de acordo com a lógica clássica. Se  $\Gamma$  é consistente de acordo com a lógica clássica, então  $\Gamma$  é P-consistente. (da Costa, Krause, 2006, p. 113)

---

<sup>92</sup> De forma similar definimos o conceito de um conjunto de fórmulas sendo trivial em C.

Notemos que o conjunto  $\{\alpha, \neg\alpha\}$ , onde  $\alpha$  é uma variável proposicional, é trivial de acordo com a lógica clássica, mas não é P-trivial. Não obstante, observemos que não sugerimos que proposições complementares sejam necessariamente entendidas como pares de sentenças contraditórias.

**Definição 5 (Teorias Complementares ou  $C_{mp}$ -teorias).** Uma C-teoria é um conjunto de fórmulas  $T$  da linguagem de  $C$ , o cálculo proposicional clássico, fechado pela relação de P-consequência, isto é,  $\alpha \in T$  para qualquer  $\alpha$  de modo que  $T \vdash_P \alpha$ . Ou seja,  $T$  é uma teoria cuja lógica subjacente é  $P$ . Uma  $C_{mp}$ -teoria é uma C-teoria sujeita a princípios que contém significado.

No caso de um princípio que contém significado que introduz restrições em declarações aceitáveis da teoria, as hipóteses e axiomas usados em deduções têm que satisfazer tais condições restritivas. Como no caso de um princípio que contém significado como o princípio de incerteza de Heisenberg, explicado anteriormente, fazendo parte da teoria, esta circunstância certamente irá impor restrições óbvias para certas afirmações em  $T$ .

**Teorema 3.** Existem C-teorias e  $C_{mp}$ -teorias que são inconsistentes, embora P-não-triviais.

A prova é consequência imediata do Teorema 2.

**Definição 6 (Proposições Complementares).** Seja  $T$  uma  $C_{mp}$ -teoria, em particular uma C-teoria, e sejam  $\alpha$  e  $\beta$  fórmulas da linguagem de  $T$ . Dizemos que  $\alpha$  e  $\beta$  são T-complementares, ou simplesmente complementares, se existe uma fórmula  $\gamma$  da linguagem de  $T$  tal que:

1.  $T \vdash_P \alpha$  e  $T \vdash_P \beta$
2.  $T, \alpha \vdash_P \gamma$  e  $T, \beta \vdash_P \neg\gamma$ , em particular  $\alpha \vdash_P \gamma$  e  $\beta \vdash_P \neg\gamma$

**Teorema 4.** Se  $\alpha$  e  $\beta$  são teoremas complementares de uma  $C_{mp}$ -teoria  $T$  e  $\alpha \vdash_P \gamma$  e  $\beta \vdash_P \neg\gamma$ , então em geral  $\gamma \wedge \neg\gamma$  não é teorema de  $T$ .

A prova é consequência imediata da definição de P-consequência. Podemos ver, então, que  $T$  é inconsistente sob a ótica clássica, mas é P-não-trivial. (da Costa, Krause, 2006, p. 114)

Nossa caracterização de complementaridade não implica necessariamente que proposições complementares sejam sempre contraditórias, já que  $\alpha$  e  $\beta$  não são necessariamente uma a negação da outra. Todavia, das proposições complementares podemos derivar contradições via lógica clássica. Podemos elucidar com o exemplo que discutimos anteriormente, “ $x$  é partícula” não é a negação direta de “ $x$  é onda”, mas “ $x$  é partícula” implica que  $x$  não é uma onda. A respeito da complementaridade não indicando uma contradição estrita, como deixamos claro e de acordo com Bohr:

Considerando os bem conhecidos paradoxos os quais encontramos na aplicação da teoria quântica à estrutura atômica, é essencial lembrar, nesta conexão, que as propriedades dos átomos são sempre obtidas através da observação das suas reações em colisões ou sob influência de radiação, e que a (...) limitação das possibilidades de medida está diretamente relacionada às aparentes contradições as quais têm sido reveladas na discussão sobre a natureza da luz e das partículas materiais. A fim de enfatizar que não estamos preocupados aqui com contradições reais, o autor [o próprio Bohr] sugeriu em um artigo anterior o termo ‘complementaridade.’<sup>93</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 115, tradução nossa)

Como dito, se uma teoria  $T$  é um fragmento da mecânica quântica que admite as relações de Heisenberg como princípios que contêm significado e tem como lógica subjacente uma lógica paraclássica – uma  $C_{mp}$ -teoria. Se  $\alpha$  e  $\beta$  são duas proposições incompatíveis de acordo com o princípio de Heisenberg podemos interpretar este princípio

---

<sup>93</sup> “In considering the well-known paradoxes which are encountered in the application of the quantum theory to atomic structure, it is essential to remember, in this connection, that the properties of atoms are always obtained by observing their reactions under collisions or under the influence of radiation, and that the (...) limitation on the possibilities of measurement is directly related to the apparent contradictions which have been revealed in the discussion of the nature of light and of the material particles. In order to emphasize that we are not concerned here with real contradictions, the author [Bohr himself] suggested in an earlier article the term ‘complementarity.’” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 115)

ocasionando que  $\alpha$  implica  $\neg\beta$ , ou o contrário. Assim, se adicionarmos  $\alpha$  e  $\beta$  em T, seremos impedidos de derivar em T  $\alpha\wedge\beta$ .

$C_{mp}$ -teorias estão mais próximas do que os cientistas realmente usam no seu dia-a-dia, pois a característica das  $C_{mp}$ -teorias de fazer P-inferências, supondo que alguns conjuntos de declarações com os quais lidamos são consistentes, proporciona um paralelo mais fiel à maneira pela qual cientistas formulam suas teorias. (da Costa, Krause, 2006, p. 115)

A complementaridade não é somente uma consequência de relações de incerteza como argumenta Englert:

(...) incerteza não é a única imposição de complementaridade. Elaboramos e analisamos experimentos reais e de pensamento que ignoram a relação de incerteza, de modo a ‘enganar’ os objetos quânticos sob estudo. Não obstante, os resultados sempre revelam que a natureza se garante contra tais intrusões – complementaridade se mantém intacta mesmo quando a relação de incerteza não está presente. Concluimos que a complementaridade é mais profunda do que aparenta: é mais geral e mais fundamental para a mecânica quântica do que o princípio de incerteza.<sup>94</sup> (Englert, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 108, tradução nossa)

Isto nos parece reforçar a utilidade da interpretação da complementaridade do modo descrito, parecendo a lógica paraclássica de grande valia. Experimentos recentes (1998) também indicam que o princípio de complementaridade foi verificado para férmions. Por meio de dispositivos nano-tecnológicos criados em escalas de baixa temperatura, cientistas desenvolveram técnicas de medida que os proporcionaram mostrar que em certo tipo de experimento de dupla

---

<sup>94</sup> “(...) uncertainty is not the only enforce of complementarity. We devised and analyzed both real and thought experiments that bypass the uncertainty relation, in effect to ‘trick’ the quantum objects under study. Nevertheless, the results always reveal that nature safeguards itself against such intrusions – complementarity remains intact even when the uncertainty relation plays no role. We conclude that complementarity is deeper than has been appreciated: it is more general and more fundamental to quantum mechanics than is the uncertainty rule.” (Englert, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 108)

fenda, o comportamento ondulatório ocorre quando os caminhos possíveis que uma partícula pode tomar permanecem indiscerníveis, e que o comportamento corpuscular ocorre quando um detector de caminho é introduzido, determinando o real caminho tomado pelo elétron. Estes experimentos recentes mostram que as antigas intuições e alguns experimentos de pensamento (*Gedankenexperimente*) feitos por Bohr indicavam a direção correta, sustentando a posição de Bohr sobre a complementaridade. Podemos observar deste modo a importância da tarefa de acomodar a ideia de complementaridade dentro da descrição formal de teorias físicas.

Outra prova experimental do princípio de Bohr foi feita em 2001 na Áustria onde Nairz relatou que o princípio de incerteza de Heisenberg, que está intimamente ligado ao princípio de complementaridade, demonstrado para um objeto massivo, a saber, uma molécula fulereno  $C_{70}$  a temperatura de 900K. (da Costa, Krause, 2006, p. 108)

[e]xistem boas razões para acreditarmos que as relações de complementaridade e incerteza se manterão para um objeto suficientemente bem isolado do mundo físico e que essas propriedades quânticas são geralmente escondidas somente por ruído técnico para grandes objetos. É portanto interessante observarmos até onde esse fenômeno quântico pode ser experimentalmente estendido ao domínio macroscópico.<sup>95</sup> (Nairz, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 109, tradução nossa)

Estes fatos aparentemente abrem espaço para a aceitação da validade do princípio de complementaridade para o mundo macroscópico. Estes fatos também nos dão fundamento para acreditarmos que a análise dessas implicações é importante para física, cientistas e filósofos preocupados com um exame cauteloso do princípio de complementaridade.

---

<sup>95</sup> “[t]here are good reasons to believe that complementarity and the uncertainty relation will hold for a sufficiently well isolated object of the physical world and that these quantum properties are generally only hidden by technical noise for large objects. It is therefore interesting to see how far this quantum mechanical phenomenon can be experimentally extended to the macroscopic domain.” (Nairz, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 109)

A discussão sobre a necessidade do uso de uma lógica distinta da clássica como lógica subjacente de uma teoria quântica ainda está em aberto, pois a axiomatização de uma dada teoria empírica não está completamente determinada. A base axiomática de uma teoria científica depende de vários aspectos explícitos e implícitos, que devem ser levados em consideração dentro de sua estrutura.

A possibilidade de sistemas não convencionais quando estudamos os fundamentos da física não necessariamente implica que o uso da lógica clássica deva ser evitado ou que a teoria quântica necessite de uma lógica diferente da clássica. O emprego de uma lógica como a paraclássica é em princípio admissível, pois ela trata o domínio do discurso de uma perspectiva diferente. Cientistas que parecem usar a lógica clássica, frequentemente de modo informal, continuarão a fazê-lo, mas isto não significa que outros tipos de lógica não possam nos ajudar a entender melhor certas características de um domínio científico, particularmente o mundo quântico. Como vimos, este tem características como a complementaridade, a qual não pode ser facilmente tratada por meio de dispositivos clássicos. Esperamos que no futuro possamos decidir qual é a melhor solução com estes aspectos irreverentes da física. (da Costa, Krause, 2006, p. 117)

Acreditamos que sistemas lógicos distintos podem ser de extrema utilidade para diferentes abordagens dos aspectos da teoria quântica. Neste amplo campo do conhecimento, assim como em outros, a revisão de conceitos está sempre aberta; como elucidado por Bohr:

Para descrever nossa atividade mental, exigimos, por um lado, um conteúdo objetivamente dado para ser posto em oposição a um sujeito que percebe, enquanto, por outro lado, como já implicado por tal afirmação, uma separação nítida entre objeto e sujeito não pode ser mantida, desde que o sujeito que percebe também pertence ao nosso conteúdo mental. A partir dessas circunstâncias resulta não só o significado relativo de cada conceito, ou antes de cada palavra, o significado dependendo de nossa escolha arbitrária de ponto de vista, mas também precisamos, em geral, estar preparados para aceitar o fato de que uma elucidação completa de um e o mesmo objeto exige diversos pontos de vista os quais definem uma única descrição. De fato, estritamente falando, a análise consciente de

qualquer conceito está na relação de exclusão de sua aplicação imediata. A necessidade de recorrer à uma complementaridade, ou reciprocamente, a um modo de descrição é talvez mais familiar para nós por meio de problemas psicológicos. Em oposição a isso, o aspecto que caracteriza a assim chamadas ciências exatas é, em geral, uma tentativa para atingir uma singularidade evitando toda referencia ao sujeito que percebe. Este esforço é encontrado mais conscientemente talvez, no simbolismo matemático que configura nossa contemplação de um ideal de objetividade para a obtenção dos quais qualquer limite são escassamente postos, contanto que permaneçamos com um campo autônomo de lógica aplicada. Nas ciências naturais propriamente, contudo, não pode haver questão de um campo autônomo de aplicação de princípios lógicos, já que precisamos continuamente considerar o aparecimento de novos fatos, a inclusão dentro do qual o escopo de nossa experiência prévia pode exigir uma revisão de nossos conceitos fundamentais.<sup>96</sup> (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 118, tradução nossa)

---

<sup>96</sup> “For describing our mental activity, we require, on one hand, an objectively given content to be placed in opposition to a perceiving subject, while, on the other hand, as is already implied in such an assertion, no sharp separation between object and subject can be maintained, since the perceiving subject also belongs to our mental content. From these circumstances follows not only the relative meaning of every concept, or rather of every word, the meaning depending upon our arbitrary choice of view point, but also we must, in general, be prepared to accept the fact that a complete elucidation of one and the same object may require diverse points of view which defy a unique description. Indeed, strictly speaking, the conscious analysis of any concept stands in a relation of exclusion to its immediate application. The necessity of taking recourse to a complementarity, or reciprocal, mode of description is perhaps most familiar to us from psychological problems. In opposition to this, the feature which characterizes the so-called exact sciences is, in general, the attempt to attain to uniqueness by avoiding all reference to the perceiving subject. This endeavor is found most consciously, perhaps, in the mathematical symbolism which sets up for our contemplation an ideal of objectivity to the attainment of which scarcely any limits are set, so long as we remain within a self-contained field of applied logic. In the natural sciences proper, however, there can be no question of a strictly self-contained field of application of the

---

logical principles, since we must continually count on the appearance of new facts, the inclusion of which within the compass of our earlier experience may require a revision of our fundamental concepts.” (Bohr, *apud* da Costa, Krause, 2006, p. 118)

## 6 CONCLUSÃO

Pudemos perceber ao longo dos assuntos apresentados nesta dissertação que, quando tratamos de ciência, meta ciência ou de sua filosofia, precisamos ser rigorosos. É importante precisarmos os conceitos com os quais trabalhamos para podermos expor claramente nossas explicações e intenções.

Vimos que existem várias definições para inconsistência, mas para o filósofo da ciência e o lógico que se propõe estudar teorias inconsistentes, sua definição lógica deve ser determinada.

Precisamos ter o cuidado de analisar o desenvolvimento de uma teoria científica em todos seus estágios e apontar, caso haja uma inconsistência envolvida, onde ela se encontra, pois isto será importante para o estudo detalhado desta teoria.

Procuramos evidenciar nossa opinião contrária à filosofia dialeteísta. Esperamos ter expostos exemplos suficientes para confiarmos que a nossa crítica a esta visão tenha fundamento. Seguramente, acreditamos que a realidade não é contraditória, concordamos que a realidade que experimentamos é uma construção mental feita por nós, baseada em nossas experiências.

Tivemos a preocupação de apontar conflitos epistêmicos que tanto cientistas como filósofos se defrontam ao trabalhar com teorias inconsistentes. Porquanto, vimos que às vezes a melhor consideração epistêmica que podemos ter é inconsistente. Em determinado momento, o estado do nosso empreendimento científico pode ser tal que a melhor forma de realizar nossos objetivos é aceitando uma teoria inconsistente. Ainda assim, conseguimos mostrar que esta aceitação é plausível.

Os estudos de caso apresentados mostraram o valor que uma teoria inconsistente pode ter para a ciência, pois ao estudarmos os fenômenos menosprezados pelo seu aspecto inicial de estranheza, podemos chegar a conclusões bastante importantes para o desenvolvimento científico.

Chamamos a atenção para a existência de sistematizações tão boas como as de natureza clássica, mesmo que inconsistentes; algumas delas podendo ser construídas a partir das clássicas, como a lógica paraclássica apresentada. Não devemos, deste modo, deixar de estudá-las; além do, que seu estudo é de grande valia para filosofia, pois, de certa maneira, libertamo-nos da visão clássica.

Notamos que soluções para dificuldades encontradas em nosso trabalho através da via clássica nem sempre são intuitivamente

satisfatórias. Ainda, temos que dentro da história do saber temos nos deparado frequentemente com contradições, elas são eliminadas paulatinamente, mas sempre dão lugar a novas contradições.

Por meio do que foi dito acima, pensamos que foi viável articular um estudo crítico sobre inconsistência em ciência. Levando em consideração que inconsistências em ciência já têm um papel importante dentro do domínio científico e filosófico, mostrou-se oportuno nosso intuito de trabalhar de forma logicamente disciplinada o estudo fundacional de teorias científicas inconsistentes.

Esperamos ter defendido que há boas razões para aceitarmos teorias científicas inconsistentes a partir de considerações lógicas e filosóficas. Para tanto, considerando lógicas paraconsistentes que são bem sucedidas ao lidar com inconsistências e considerando filosoficamente, de forma pragmática, a aceitação de certas teorias inconsistentes, que permitem resolver problemas, fazer previsões e investigações de âmbito científico, além de possibilitar o desenvolvimento de novas teorias – como é o caso da Teoria do Átomo de Bohr.

Com isso podemos olhar para as teorias científicas, como a mecânica quântica, e buscar fundamentação lógica e matemática para elas que sejam condizentes com certos pressupostos básicos de índole filosófica. Assim, tratamos de considerar também o estudo de natureza ontológica das teorias que dispomos, do que existe em seus pressupostos e como “olhar o mundo” tendo-as como lentes. Isto requer, ao que parece obviamente, aplicações da lógica à análise de teorias científicas. Acabamos por buscar motivações dadas pela ciência para a construção de novos sistemas lógicos e matemáticos. Esta é a sugestão de Manin: “O retorno do século XX à escolástica medieval ensinou-nos muito acerca dos formalismos. Provavelmente é tempo de olhar para fora novamente. O significado é tudo o que importa.” (Manin, *apud*, Krause, 2002, p. 183) Uma série de teorias e novos desenvolvimentos se originaram das investigações em lógica e em fundamentos da matemática. A análise lógica da ciência, particularmente da física quântica, pode trazer à tona novas questões e também novas teorias, e este fato já é suficiente para legitimar seu desenvolvimento.

Vimos que quando observamos um campo do conhecimento no sentido de aplicarmos o método axiomático procedemos escolhendo conceitos primitivos, através dos quais definimos outros conceitos e listamos axiomas. Contudo, podemos fazer isto de diversas maneiras, e se o campo for amplo e complexo, nada indica que a escolha dos conceitos e axiomas implicará que estas várias formulações seja

compatíveis entre si. Estes diferentes “modos de tratar” podem não ser consistentes uns com os outros, mesmo se estivermos tratando das mesmas coisas num núcleo mínimo de conceitos e princípios. O cientista, acreditamos, trabalha para obter resultados a partir de um amontoado de dados, conceitos e descrições. A axiomatização de um campo do conhecimento é tomada como uma parte da épura de um objeto tridimensional, que capta um ponto de vista que é determinado pelas conceitos básicos selecionados, delimitando o alcance da teoria desenvolvida. Isto caracteriza o que podemos chamar de perspectivismo em filosofia da ciência, corroborado, por exemplo, por Connes:

Não podemos dizer que o universo é discreto, ou que não é. O que podemos decidir é se nossos modelos têm sucesso ou não, e seria errado dizer que na mecânica quântica qualquer coisa é discreta. Isto é absolutamente errado. Há de fato alguma coisa de discreto em mecânica quântica, mas de outro lado, a questão real surge quando tentamos entender a dualidade entre os aspectos ondulatório e corpuscular. Por exemplo, Newton começou pensando que a luz era feita de corpúsculos, porque havia sombras, e as pessoas, fazendo experimentos, compreenderam que havia um aspecto ondulatório na luz que seria muito difícil descrever como sendo discreto. Então, gradualmente, constatou-se que dois aspectos estavam presentes e que, quando falamos em grandes comprimentos de onda (como ondas de rádio, por exemplo), elas contornam obstáculos, logo [a luz] não pode ser entendida como partículas de fótons. Deste modo, eu acredito que os dois aspectos estão presentes. Eles estão presentes nos modelos, e não deveríamos qualificar o universo. O que temos é um modelo bom, que funciona porque o cálculo diferencial permite-nos computar com o continuum. O que é importante é sermos capazes de fazer alguma coisa com ele. Agora, um modo de mostrar que esses dois aspectos não são diferentes um do outro é a seguinte. Frequentemente, temos uma percepção que é somente bidimensional de um fenômeno de três dimensões. Por exemplo, consideremos uma casca de sorvete: se você a

olha de lado, vê um triângulo, e se olha do topo vê um disco. O que acontece é que a realidade é tão complexa que em alguns casos você a vê [a luz] como feita de corpúsculos, como algo discreto, e em alguns casos a vê como um continuum. E esses dois aspectos não podem ser separados um do outro. (Connes, *apud*, Krause, 2002, p. 195)

Percebemos a posição de Connes, mesmo que fale em um contexto específico. Assumimos que seja ingênuo pensar que um campo do conhecimento bastante amplo possa ser apreendido por apenas uma axiomática que não seja extraordinariamente complexa e, por conseguinte, passível de críticas e dúvidas quanto ao próprio campo de conhecimento que ela descreve (Krause, 2002, p. 195).

Entendemos que a escolha entre lógicas para tratarmos um campo do conhecimento é uma escolha pragmática e que depende de um contexto. Em se tratando de uma lógica paraconsistente, estudada neste trabalho, podemos obter um novo domínio de investigação que é determinado pela formulação desta lógica, um domínio inconsistente.

Sugerimos uma maneira diferente para lidarmos com o a dificuldade encontrada nas inconsistências. A abordagem paraconsistente nos permite explorar novos aparatos que dentro do domínio inconsistente, mas sem sofrermos as dificuldades relacionadas a existência de “objetos inconsistentes” na realidade. Somos agnósticos quanto à afirmação de que o mundo é de fato inconsistente. Ou seja, somos agnósticos quanto à existência de contradições verdadeiras na natureza.

Acreditamos que não exista, pelo menos não podemos afirmar agora, uma lógica que reflita a “lógica do mundo” ou “lógica da realidade”. Podemos selecionar uma lógica pragmaticamente, mas isto não é suficiente para afirmarmos algo permanente sobre o mundo ou a realidade, pois um argumento baseado somente em observações não pode resolver este tipo de questão. Por exemplo, se optarmos por uma lógica que torna as dificuldades de lidarmos com inconsistências menores, não precisamos tomar esta lógica como a “única lógica” ou a “lógica do mundo”. Ora, por que deveria o mundo estar em conformidade com nossas limitações cognitivas? Simplicidade é um critério para fazermos uma escolha, mas nem por isso devemos tomar esta escolha pragmática como a “única escolha”. Todavia, o mundo talvez esteja em conformidade com nossas limitações cognitivas, mas mesmo assim para afirmarmos isto precisaríamos ir além do que

observamos, precisaríamos nos comprometer metafisicamente com a simplicidade da realidade. Este tipo de afirmação é tão forte quanto a afirmação de que existem contradições verdadeiras na natureza, já que são ambas afirmações metafísicas, ambas fazem afirmações sobre o mundo que transcendem observações empíricas.

Como apresentamos neste trabalho, um comprometimento deste tipo não é necessário quando tratamos de inconsistências, pois evitamos a afirmação de que teorias inconsistentes são verdadeiras; são parcialmente verdadeiras (quase-verdadeiras). Precisamos somente determinar sua verdade parcial, proporcionando um alicerce formal para nosso posicionamento agnóstico quanto à existência de contradições verdadeiras. Quando mudamos a noção de verdade para quase-verdade, evitamos o comprometimento com objetos inconsistentes, pois temos várias estruturas (*A-normal*) que descrevem o domínio que estamos estudando e objetos inconsistentes não estão representados em todas elas.

Quando acomodamos inconsistências como parcialmente verdadeiras e afirmamos que somos agnósticos quanto à existência de contradições verdadeiras admitimos um pluralismo que nos permite dar sentido a diversas aplicações de lógicas paraconsistentes sem um comprometimento quanto à existências de objetos contraditórios.

Não precisamos nos comprometer quanto à existência de “entidades inconsistentes”, mesmo quando aplicamos lógica paraconsistente para formular a teoria do conjunto de Russell, pois entidades matemáticas inconsistentes descrevem “o mundo” em termos, no máximo, parcialmente verdadeiros. É possível dar uma formulação inteiramente sintática de uma teoria de conjuntos paraconsistente de modo que o único comprometimento que temos que assumir é com uma linguagem contável. (da Costa, Krause, Bueno, 2007, p. 901).

Por fim, acabamos por sustentar uma noção pluralista das fundações lógicas da ciência. Um amplo campo de conhecimento empírico pode ser teoricamente percebido de diferentes pontos de vista ou perspectivas, cada uma capturando parte do campo de certa forma. Estas perspectivas são geralmente postas informalmente, como o exemplo do modelo matemático, sem axiomatização; ou seja, as teorias físicas quando apresentadas pela primeira vez. Todavia, como vimos, cada teoria informal pode ser axiomatizada e isto pode ser feito de várias maneiras gerando diferente teorias. Além disso, cada teoria axiomatizada pode ter diferentes modelos abstratos. As diferentes perspectivas são geralmente sustentadas por evidências empíricas, e certamente é difícil sustentar uma perspectiva em detrimento de outra.

Diferentes perspectivas invocam aparatos lógicos e matemáticos distintos, porém é difícil argumentar qual perspectiva deva ser a escolhida.

Assim, a respeito da ciência, podemos supor que pontos de vista não-clássicos, baseados em lógicas não-clássicas são, de certa maneira, tão lícitos quanto o clássico. Apenas critérios pragmáticos ou a própria evolução da ciência poderá nos mostrar o caminho que deveremos seguir. Apesar disso, acreditamos que mesmo no futuro não haverá tal “caminho certo” o qual deveremos seguir para teorizar sobre certa área de conhecimento. No entanto, parece-nos difícil lidar com essa superabundância de possibilidades. Em virtude disso, podemos pensar numa meta-regra; que existe certa atividade construtiva na ciência. As diferentes perspectivas podem agir como peças de um mosaico que usamos para cobrir o campo de conhecimento o qual estamos analisando (da Costa, Krause, 2008, p. 15). Para concluir, citamos da Costa e Krause: “Juntamos as peças como uma criança que começa um quebra-cabeça pelos cantos.”<sup>97</sup> (da Costa, Krause, 2008, p. 15, tradução nossa).

---

<sup>97</sup> “We join the parts as a child does with her corner puzzle.” (da Costa, Krause, 2008, p. 15)

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARENHART, Jonas e KRAUSE, Décio. **Indistinguibilidade, não-reflexividade, ontologia e física quântica**. *Scientiae Studia*, 10(1), pp. 41-69, 2012.

ARENHART, Jonas e KRAUSE, Décio e MORAES, Fernando. **Axiomatization and Models of Scientific Theories**. *Found Sci* 16: 363 – 382, 2011.

ARISTÓTELES. **Metafísica**. Volume II. Edições Loyola, 2002.

ARRUDA, Ayda. **A Survey of Paraconsistent Logic. Mathematical Logic in Latin America**. North-Holand publishing Company, 1980;

BOHR, Niels. **On the Constitution of Atoms and Molecules**. *Philosophical Magazine* 26: 1–25, 476–502, 857–75, 1913;

BOHR, Niels. **Niels Bohr Collected Works**. Volume 2, Foundations of Quantum Physics I. North-Holand publishing Company, 1981;

BOHR, Niels. **Niels Bohr Collected Works**. Volume 6, Foundations of Quantum Physics I. North-Holand publishing Company, 1985;

BROWN, Bryson. **How to be realistic about inconsistency in science**. *Stud. Hist. Phil. Sci.*, vol. 21. 1990;

BROWN, Bryson. **Old Quantum Theory: A paraconsistent Approach.** PSA Vol. 2, Philosophy of Science Association: 397-411. 1993;

BUENO, Otávio. **Why inconsistency is not hell.** Knowledge and Inquiry: Essays on the pragmatism of Isaac Levi. Cambridge University Press, 2006;

CASSIDY, David, HOLTON, Gerald and RUTHERFORD James. **Understanding Physics.** Harvard Project Physics. Birkhäuser, 2002;

CRUZ, Frederico F. S., Notas de Aula. **Seminários de Fundamentos da Física,** UFSC, 2013;

DA COSTA, Newton. **On the Theory of Inconsistent Formal Systems.** Notre Dame Journal of Formal Logic 15: 497–510, 1974;

DA COSTA, Newton. **Ensaio sobre os Fundamentos da Lógica.** Hucitec, 2ª edição, 2008;

DA COSTA, Newton e FRENCH, Steven. **Science and partial truth: a unitary approach to models and scientific reasoning.** Oxford university press, 2003;

DA COSTA, Newton e KRAUSE, Décio. **Inconsistency, Quase-Truth and Physics.** 2011;

DA COSTA, Newton and KRAUSE, Décio. **Physics and Non-Classical Logic. Dialogues, Logics, and Other Strange Things: Essays in Honour of Shahid Rahman,** College Pu. 2008;

DA COSTA, Newton, BÉZIAU, Jean-Yves e BUENO, Otávio. **Elementos de teoria paraconsistente de conjuntos**. UNICAMP, 1998;

DA COSTA, N. and KRAUSE, D. and BUENO, O. **Paraconsistent logics and paraconsistency**. Elsevier, 2007;

EISBERG, Robert e RESNICK, Robert. **Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles**. John Wiley & Sons, 2<sup>a</sup> edition, 1923;

FEYERABEND, Paul Karl. **Against Method**. Revised ed. London: Verso, 1988;

FEYERABEND, Paul Karl. **In defense of Aristotle**. Progress and Rationality in Science. Dordrecht: Reidel, 1978;

JAMMER, Max. **Philosophy of Quantum Mechanics**. John Wiley, 1974.

KRAUSE, Décio e Bueno, Otávio. **Scientific theories, models, and the semantic approach**. Principia 11 (2), 2007;

KRAUSE, Décio. **Introdução aos Fundamentos Axiomáticos da Ciência**. São Paulo. EPU, 2002.

KUNEN, Kenneth. **The Foundations of Mathematics**. College Publications, 2009;

LAKATOS, Imre. **The Methodology of Scientific Research Programmes**. Cambridge University Press, 1978;

LUKASIEWICZ, Jan. **On the principle of contradiction on Aristotle.** The review of metaphysics XXIV, 1971;

MORTARI, Cezar. **Introdução à Lógica.** UNESP, 1ª edição, 2001;

POPPER, Karl. **What is Dialectic?** Mind 49, 1940;

PRIEST, Graham. **In Contradiction.** Oxford University Press, 1987;

PRIEST, Graham. **Doubt Truth to be a Liar.** Oxford, 2006.

PRIEST, G and BEAL, J. and ARMOUR-GARB, B. **The Law of non-Contradiction.** Oxford University Press, 2004;

SHAPERRE, Dudley. **Objectivity, Rationality and Scientific Change,** PSA 637 – 63, 1984;

SUPPES, Patrick. **Representation and Invariance of Scientific Theories.** Chicago University Press, 2002.

VICKERS, Peter John. **Bohr's Theory of the Atom: Content, Closure and Consistency.** In: [2007] EPSA07: 1st Conference of the European Philosophy of Science Association (Madrid, 15-17 November, 2007);

VICKERS, Peter John. **Understanding Inconsistent Science.** Oxford University Press, 2013.

Flausino, Joanne Simon Flausino

Inconsistências em Ciência / Joanne Simon Flausino

Flausino ; orientador, Décio Krause - Florianópolis, SC,  
2014.

154 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa  
de Pós-Graduação em Filosofia.

Inclui referências

1. Filosofia. 2. Inconsistência. 3. Teorias Científicas.

4. Lógica Paraconsistente. 5. Teoria do Átomo de Bohr. I.

Krause, Décio. II. Universidade Federal de Santa Catarina.

Programa de Pós-Graduação em Filosofia. III. Título.