

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Filosofia
Programa de Pós-Graduação em Filosofia

Arnaldo de Souza Vasconcellos Júnior

**O Princípio de Conservação de Energia e a Descoberta do Neutrino: uma
análise lakatosiana**

Brasília

2019

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Filosofia
Programa de Pós-Graduação em Filosofia

**O Princípio de Conservação de Energia e a Descoberta do Neutrino: uma
análise lakatosiana**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção ao título de Mestre em Filosofia pelo
Programa de Pós-Graduação em Filosofia da
Universidade de Brasília

Arnaldo de Souza Vasconcellos Júnior

Área de concentração: Filosofia

Linha de Pesquisa: Epistemologia, Lógica e Metafísica.

Brasília

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V331p

Vasconcellos Júnior, Arnaldo de Souza
O Princípio de Conservação de Energia e a Descoberta do
Neutrino: uma análise lakatosiana / Arnaldo de Souza
Vasconcellos Júnior; orientador Samuel Simon. -- Brasília,
2019.

113 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Filosofia) --
Universidade de Brasília, 2019.

1. Imre Lakatos. 2. Princípio de Conservação de Energia.
3. Programas de Pesquisa. 4. Realismo Científico. 5.
Neutrino. I. Simon, Samuel, orient. II. Título.

Arnaldo de Souza Vasconcellos Júnior

**O Princípio de Conservação de Energia e a Descoberta do Neutrino: uma
análise lakatosiana**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção ao título de Mestre em Filosofia pelo
Programa de Pós-Graduação em Filosofia da
Universidade de Brasília.

Brasília, _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Samuel Simon
(PPG-FIL)

Professor Dr. Rodrigo Freire
(PPG-FIL)

Professor Dr. Ademir Eugênio de Santana
(Instituto de Física e Centro Internacional de Física)

AGRADECIMENTOS

Gostaria muito de deixar aqui os meus agradecimentos a algumas pessoas, que foram importantes ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Obrigado à EAPE – Atualmente denominada como Centro de Aperfeiçoamento dos Profissionais de Educação – que compõe a estrutura da SEEDF e que concedeu o afastamento para que eu pudesse cursar o Mestrado no Programa de Pós-Graduação do Departamento de Filosofia da Universidade de Brasília.

Agradeço fortemente ao meu orientador, professor Dr. Samuel Simon, cujas orientações sempre são muito pertinentes e que possibilitaram um aprendizado imenso nessa trajetória, destaco ainda seu cuidado, sua paciência e seu conhecimento. Agradeço aos professores Dr. Ademir Eugênio e Dr. Rodrigo Freire, que foram componentes da banca de qualificação e fizeram preciosos comentários e recomendações.

Gostaria também de deixar registrado os meus agradecimentos à minha família: à minha esposa e amiga, Beatriz, pelo apoio dado desde quando decidi ingressar nessa pós-graduação e pela leitura da dissertação revisando minha escrita – o apoio que recebi perdurou durante todos os momentos e sou extremamente grato. Também agradeço aos meus filhos: Alice e Lorenzo, embora ainda pequenos, já entendem a necessidade e a vontade que seu pai tem de estudar; aos meus pais: Arnaldo e Neiva, quando, numa aula ou outra, precisava de alguém para ficar com meus filhos; a Luiz Afonso, a Marileide e à Gersica pelo mesmo motivo; à Fátima, que mesmo estando longe, torceu por mim, e sou grato por isso. Tenho agradecimentos à minha irmã Angélica e ao meu cunhado, e amigo, André: ambos sempre se mostraram empolgados com meu desenvolvimento e sempre deram apoio. Agradeço ainda à minha irmã Caroline.

Agradeço a Francinete Pereira, colega de profissão, pela leitura recente de parte da dissertação para o melhoria da escrita em nossa língua.

Agradeço todo o serviço cordial do Departamento de Filosofia pelos diversos atendimentos, muito marcado em minha memória nas pessoas da professora Dra. Cecília Almeida, da Nádia e da Andreia; sempre foram solícitas e muito eficientes. Embora não me lembre do nome de todo pessoal, deixo aqui meus agradecimentos.

A todas as pessoas envolvidas nessa minha jornada, agradeço cordialmente.

DEDICATÓRIA

Para meus filhos e minha esposa, com carinho e dedicação.

“A filosofia da ciência sem a história da ciência é vazia; a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega.”

Imre Lakatos

RESUMO

O presente trabalho versa sobre a descoberta e desenvolvimento do conceito da partícula chamada de *neutrino*, dentro de uma perspectiva da filosofia da ciência de Imre Lakatos, perfazendo uma análise historiográfica e epistemológica sobre a prática científica, que culminou com sua formulação, bem como desenvolvimentos posteriores.

Neste sentido, o trabalho faz uma reconstrução racional a respeito do programa de pesquisa que a formulação e descoberta do neutrino participa, bem como o *princípio de conservação* de energia pode ser entendido como uma parte fundamental dos pressupostos metodológicos de tal programa.

Palavras-chave: Imre Lakatos, Princípio de Conservação de Energia, Programas de Pesquisa, Realismo Científico e Neutrino.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1. Justificativa..... | 11 |
| 2. Objetivos gerais e Metodologia..... | 12 |
| 3. Estrutura..... | 13 |
| CAPÍTULO I – Os Programas de Pesquisa Científica sob a óptica lakatosiana..... | 14 |
| 1. Sobre Imre Lakatos..... | 14 |
| 2. Breve história da filosofia da ciência no século XX..... | 15 |
| 3. A Síntese Lakatosiana..... | 18 |
| 4. Outras epistemologias para Lakatos..... | 21 |
| 5. A Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica..... | 26 |
| 6. Dinâmica dos Programas de Pesquisa..... | 30 |
| 7. A Metodologia de Programas de Investigação Historiográfica..... | 34 |
| 8. Críticas à filosofia lakatosiana..... | 36 |
| CAPÍTULO II – A proposta do neutrino e a história de seu PPC..... | 38 |
| 1. Aspectos históricos do surgimento do conceito de neutrino..... | 38 |
| 2. Outras histórias dos neutrinos..... | 47 |
| 2.1. Velocidade dos neutrinos..... | 48 |
| 2.2. Breve histórico da oscilação dos neutrinos e os neutrinos solares..... | 49 |
| 3. Considerações lakatosianas acerca da história dos neutrinos..... | 52 |
| CAPÍTULO III – O princípio de Conservação de Energia..... | 54 |
| 1. Apresentação..... | 54 |
| 2. Conservação de Energia e múltiplos Programas de Pesquisa..... | 55 |
| 3. Descartes e os princípios cartesianos..... | 66 |
| 3.1. Os princípios cartesianos..... | 67 |
| 4. A <i>vis viva</i> leibniziana..... | 71 |
| 5. Do flogisto ao calórico e à termodinâmica..... | 77 |
| 6. Simetria e Teorema de Noether..... | 84 |
| 7. A conservação de energia como núcleo duro..... | 87 |
| CAPÍTULO IV – Posicionamento epistemológico..... | 90 |
| 1. Realismo científico e não-realismo..... | 90 |
| 2. Posicionamento de Pauli..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| 3. Bohr <i>versus</i> Einstein – o posicionamento epistemológico de Bohr..... | 96 |
| CONCLUSÃO..... | 104 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 107 |

INTRODUÇÃO

1. Justificativa

O neutrino é uma partícula cuja história é muito interessante, do ponto de vista do desenvolvimento científico. Foi proposta para explicar o decaimento beta – a transformação de um núcleo atômico em outro pela emissão de uma partícula beta – preservando o princípio científico da conservação de energia: tal princípio proíbe, *grosso modo*, que num determinado sistema, energia seja criada ou destruída; mantendo a quantidade de energia presente no sistema analisado. Para corrigir algumas discrepâncias observacionais, o neutrino foi proposto por W. Pauli por volta de 1930.

O estudo exaustivo sobre a natureza dos neutrinos versa tanto sobre velocidade quanto sua oscilação e massa. A observação e o entendimento das características de tais partículas envolvem o desenvolvimento de grandes máquinas – sejam aceleradores de partículas com detectores específicos ou somente detectores de partículas oriundas de reações estelares, como é o caso Super Kamiokande japônês.

A compreensão do surgimento e da manutenção teórica do neutrino requer não só uma análise da história como também dos princípios, que estão envolvidos em sua estrutura teórica.

Ainda sob o aspecto histórico do neutrino, é interessante citar que sua observação era de grande importância, visto que, anos antes, durante a sugestão de sua existência, houve cientistas, que propuseram a violação do *princípio de conservação de energia* (propondo assim novas leis); como foi o caso de Niels Bohr. A consolidação de um modelo teórico descritivo do neutrino e a emissão beta associada a ele, aperfeiçoada por Fermi e corroborada com sua observação experimental na década de 1950, fortaleceu mais ainda a ideia de um princípio da conservação de energia – o que, lakatosianamente, poderíamos verificar como sendo um possível candidato ao núcleo duro de um programa.

Neste momento, ao citar o filósofo Imre Lakatos, é importante demonstrar sinteticamente sua perspectiva de como se dá a prática científica: a história das ciências para este filósofo é muito mais rica do que a descrição de como essa prática ocorre. Uma análise lakatosiana deve ser feita de forma que se possa extrair um funcionamento racional; apenas

desse modo pode-se verificar se há ou não um progresso no conteúdo do conhecimento científico.

Para Lakatos, é muito difícil que a história das ciências se dê entre sucessão de teorias meramente falsificadas de acordo com algum nível mais simples de falseacionismo: a existência de experimentos cruciais, que derrubam teorias inteiras, não seria um bom modelo racional de como se dá as ciências como um todo. Uma teoria participaria de todo um programa, denominado de Programa de Pesquisa Científica, que funciona como um conjunto metodológico para a construção das teorias que o compõe.

O Programa de Pesquisa Científica é composto por uma série de asserções que são imutáveis dentro daquele sistema de produção científica; é o núcleo duro do Programa. Em volta desse núcleo duro há um cinturão protetor, que é formado pelas hipóteses auxiliares, as quais podem ser modificadas, sendo que, além de tais hipóteses, há a ação de heurísticas (positiva e negativa). Vale lembrar que o termo “*heurística*” tem raiz na palavra grega correspondente a nossa palavra “descoberta”. E é possível analisar racionalmente o progresso, segundo Lakatos, de tais Programas. Uma análise lakatosiana levaria em consideração, portanto, o aspecto histórico do programa (ou dos programas).

Deste modo, a análise lakatosiana deve esmiuçar os pontos metodológicos do Programa, ou programas; se atentando sempre a uma análise historiográfica e epistemológica.

2. Objetivos gerais e Metodologia

Por metodologia de pesquisa, foi adotada uma análise historiográfica dos neutrinos, embasada na filosofia da ciência de Imre Lakatos. Por isso foi necessária a apresentação da filosofia da ciência lakatosiana; o que se deu a partir dos seguintes escritos: “*O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica*”, presente no livro “*A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*”, organizado por ele e por Alan Musgrave; e “*História da Ciência e suas reconstruções racionais*” de Imre Lakatos.

Em relação a análise historiográfica, trazemos um histórico do conceito de neutrinos, desde sua proposta e posterior detecção, até as descobertas mais recentes de suas características. Para este levantamento utilizamos revisão bibliográfica, desde o próprio Lakatos, até outros autores que comentam a história da física e dos neutrinos, bem como dos

próprios cientistas envolvidos. O levantamento das tecnologias e metodologias empregadas neste processo fazem parte da descrição historiográfica que foram feitas.

A partir da delimitação da estrutura do *programa de pesquisa* trabalhado, também foi efetuado um levantamento histórico do princípio de conservação de energia com o intento de pautá-lo dentro da filosofia lakatosiana e demonstrar sua participação no *programa de pesquisa* investigado.

Foi realizada uma análise final sobre o posicionamento epistemológico dos cientistas envolvidos no processo criativo da história dos neutrinos e na defesa – ou ataque – ao *princípio de conservação de energia*.

Por fim, esta dissertação se orienta em estudar a *prática* científica ocorrida com o surgimento e desenvolvimento do conceito de neutrino, utilizando uma análise historiográfica e epistemológica – cuja base é a filosofia lakatosiana.

3. Estrutura

O primeiro capítulo descreve a filosofia da ciência de Imre Lakatos, sobre seu conceito de Programas de Pesquisa Científicas; apresentando-o como uma síntese a respeito de outros dois grandes filósofos da ciência, porém com possibilidade historiográfica mais rica e ampla.

O segundo capítulo levanta um histórico a respeito da concepção e descoberta dos neutrinos, até os estudos atuais.

O terceiro capítulo faz um percurso histórico do *princípio de conservação de energia*, visto que este se encontra como uma possível parte constituinte do *programa de pesquisa* dos neutrinos. E, por fim, um quarto capítulo desenvolve uma exposição do posicionamento epistemológico dos cientistas envolvidos contra e a favor da constituição do conceito de neutrinos, fundado no princípio de conservação de energia, a fim de enriquecer a análise filosófica em torno do tema.

CAPÍTULO I – Os Programas de Pesquisa Científica sob a óptica lakatosiana

1. Sobre Imre Lakatos

Imre Lakatos nasceu em Debrecen, uma cidade húngara, com o nome de Imre Lipschitz (Cf. KADVANY, 2001, p. 286). Teve uma juventude envolvida em estudos marxistas e participou de grupos secretos com intuítos revolucionários (Cf. Ibid., p. xvi). Alterou seu nome em função de perseguição dos nazistas, que acabaram por levar sua família a campos de concentração (Cf. Ibid., p. 287).

Sua história, quando jovem, foi marcada pelos seus estudos secretos sobre o marxismo, numa época em que isso era uma atividade arriscada e por uma obscura passagem: seu grupo de revolucionários decidiu que uma componente deveria cometer suicídio. Lakatos foi quem teria sugerido que Éva Izsák deveria se matar para evitar que o grupo fosse descoberto (Cf. KADVANY, p. 288), pois, segundo o próprio grupo, ela ofereceria risco por sua dificuldade de esconder as atividades.

Anos depois alterou novamente seu nome, adotando assim o “Lakatos”. Mais tarde ao morar em Budapeste, foi participante de grupos marxistas e membro ativo no Partido Comunista. Num momento posterior foi preso (Cf. Ibid., p. 258) ao tentar denunciar József Révai, político húngaro, de não ser bastante stalinista. Da sua história também se sabe sobre sua atividade como informante à polícia secreta húngara; delatando sobre aqueles que estavam no meio acadêmico e que eram reacionários.

Posteriormente, obteve contato com a filosofia de Popper, no qual se tornou um grande crítico e seguidor (KADVANY, 2001, p.1). Também passou a discordar do marxismo stalinista e em 1957 estava morando na Inglaterra, com uma bolsa no King’s College. Na década de 1960 trabalhou na London School of Economics; nesta década também foi publicado o livro “*A Estrutura das Revoluções Científicas*” de Thomas Kuhn, que se tornou grande sucesso acadêmico. Em 1965 esteve na organização do Colóquio Internacional de Filosofia da Ciência, onde vários filósofos debateram sobre as inovações trazidas por Kuhn.

Resumidamente podemos entender a história de vida de Lakatos como envolvida em seu início numa grande influência do marxismo e do hegelianismo (MUSGRAVE; PIGDEN, 2016) e mais tarde, por não mais compartilhar de seus ideais de juventude, tendo desenvolvido sua mais notável epistemologia.

Apesar de sua história social e política completa de meandros ser possivelmente importante para delinear um contexto de criação de suas obras, neste capítulo explicaremos a filosofia da ciência lakatosiana na forma introduzida pela óptica de Feyerabend – que o coloca como uma síntese entre outros dois grandes filósofos da ciência. Entenda-se este cenário de síntese não apenas como uma mera abreviação de duas grandes filosofias, mas sim como uma importante resposta a duas importantes epistemologias.

Desta forma, faremos um levantamento rápido da história da filosofia da ciência no século XX e depois passaremos à apresentação sintética de Feyerabend. Por fim, conduziremos uma exposição das obras lakatosianas em português; além das críticas levantadas pelos opositores a Lakatos.

2. Breve história da filosofia da ciência no século XX

O século XX foi marcado por uma gama de realizações científicas, como o desenvolvimento das teorias da Relatividade, da Mecânica Quântica, a descoberta da radioatividade no limiar entre os séculos XIX e XX, descoberta dos cromossomos e mais tarde do DNA dentre outras inovações científicas e técnicas.

Na história da filosofia do século XX podemos fazer um recorte de alguns dos desdobramentos da filosofia da ciência e, neste aspecto, levantamos então um breve histórico perpassando introdutoriamente pelo *Círculo de Viena*, *Popper*, *Kuhn* e *Feyerabend*; a fim de apresentar o contexto envolvido no desenvolvimento das ideias epistemológicas de Lakatos.

O interesse em trabalhar o que são as ciências, não foi uma atividade filosófica restrita no século XX, mas podemos delinear uma série de atividades que mostram tal importância deste questionamento em tal século.

No raiar do século XX surgiu um grupo de filósofos e cientistas dispostos a estudar as características científicas e delimitar o que são as ciências, chamado de *Círculo de Viena*. Dentre seus participantes podemos destacar Rudolf Carnap, Moritz Schlick, Otto Neurath, Hans Hahn, Kurt Gödel, dentre outros. Popper não pertenceu ao círculo e Wittgenstein se encontrou algumas vezes com os membros do *Círculo de Viena* – deve-se destacar que o livro de Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, foi discutido em reuniões e que Popper também foi um grande crítico de algumas suposições sobre as ciências levantadas pelo

Círculo de Viena. Os membros do grupo foram inspirados em outros filósofos como Hume, Comte, Poincaré, Duhem etc. (Cf. HAHN et al, 1929, p. 8).

Tal grupo discutia sobre assuntos como filosofia, metafísica e filosofia da ciência. Antes da Primeira Guerra Mundial, o grupo já se encontrava num estágio embrionário, que depois seria conhecido como o *Círculo de Viena*. Já em 1929 esse grupo de discussão foi oficializado com um manifesto chamado de “*A concepção científica do mundo*” e mais tarde com a criação de uma revista com a função de propagar seus desenvolvimentos.

Os membros do Círculo criticavam a metafísica dentro da filosofia, assumiam a relação dos problemas de linguagem como problemas da filosofia e pressupunham o formalismo lógico. Alguns membros, como Otto Neurath, eram extremamente críticos à metafísica e Carnap, por exemplo, tinha em mente uma linguagem fisicalista universal à ciência.

Caracterizamos a concepção científica do mundo essencialmente mediante duas determinações. Em primeiro lugar, ela é empirista e positivista: há apenas conhecimento empírico, baseado no imediatamente dado. Com isso se delimita o conteúdo da ciência legítima. Em segundo lugar, a concepção científica do mundo se caracteriza pela aplicação de um método determinado, o da análise lógica. O esforço do trabalho científico tem por objetivo alcançar a ciência unificada, mediante a aplicação de tal análise lógica ao material empírico. Do mesmo modo que o sentido de todo enunciado científico deve poder ser indicado por meio de uma redução a um enunciado sobre o dado, assim também o sentido de cada conceito, pertencente a qualquer ramo da ciência, deve poder ser indicado por meio de uma redução gradativa a outros conceitos, até aos conceitos de grau mínimo, que se relacionam ao próprio dado. Caso se empreendesse tal análise para todos os conceitos, estes se enquadrariam em um sistema de redução, em um “sistema de constituição”. As investigações visando a um tal sistema de constituição, a teoria da constituição, configuram, assim, o quadro em que se aplica a análise lógica pela concepção científica do mundo. (HAHN et al, 1929, p. 12).

Uma das ideias do *Positivismo Lógico*, criada pelo Círculo de Viena, afirmava que as asserções científicas são *verificáveis* do ponto de vista empírico (Cf. Ibid., 1929, p. 12). Portanto, haveria um divisor entre as proposições que seriam ou não científicas: como as proposições metafísicas e religiosas. Este é, portanto, um critério de demarcação científica.

Mais tarde o grupo se dispersou por consequências da perseguição nazista, em 1938 – antes disto, porém, Hans Hahn veio a falecer e Schlick foi assassinado.

Em relação ao critério de *verificabilidade*, já mencionado, Popper fez duras críticas e seu conceito de *falseacionismo* como critério científico contornava alguns problemas que o

verificacionismo não poderia resolver de forma satisfatória. Em 1934 publicou “*A lógica da pesquisa científica*” onde compila e explica o seu *falseacionismo*.

Basicamente a visão popperiana de um critério de demarcação é a aplicação de uma lógica dedutiva nas teorias científicas; neste sentido aplica-se uma dedução do tipo “Se teoria T então previsão P; não P, logo não T”, chamada de *modus tollens* (Cf. POPPER, 2013, p. 67). Com a aplicação de um critério dedutivo como este, evita-se a indução – que é o raciocínio onde, a partir de elementos particulares, faz-se asserções universais – e seus problemas correlatos: em outras palavras, o problema da indução, que é fundamentalmente um problema sobre as garantias do conhecimento (Cf. Ibid., pp. 27-28), seria contornado. Outro problema, que Popper procurou solucionar com seu critério de *falseabilidade*, era a demarcação – como demarcar o conhecimento científico.

O uso de critérios dedutivos sobre a teoria originária, desta forma, algumas implicações interessantes. A primeira é que o abandono de critérios de *verificabilidade* e a aceitação de uma *falseabilidade* permitem saber quando uma teoria é científica: a teoria falseada não teria condições empíricas para ser considerada verdadeira; enquanto uma teoria que passe pela experiência, seria *corroborada* (Cf. Ibid., p. 32). O peso lógico de *corroboração* não permite dizer que é verdadeira, mas sim que passou pelo crivo do falseamento. Vale lembrar, quando falamos em testar a teoria é levar sua previsão a teste.

Uma teoria científica seria, portanto, *falseável*, enquanto uma teoria pseudocientífica não teria esta qualidade. Uma pseudociência poderia comprometer-se em alterar suas teorias de acordo com os testes efetuados. A proposta de Popper resolveria os problemas da indução e da demarcação.

Em 1962 Thomas Kuhn, físico e filósofo, publicou seu “*A estrutura das revoluções científicas*” onde explicou a atividade científica como pertencente a uma estrutura orientada em paradigmas: os paradigmas orientam a visão de ciência e *como* fazer esta ciência (Cf. KUHN, 1998, p. 13). Há um período, chamado de *Ciência Normal*, onde a ciência se desenvolve centrada em tal *paradigma*, numa atividade em estilo de solução de quebra-cabeças (Cf. Ibid., p. 30), no entanto há casos de *anomalias*, discrepâncias, que aparecem (Cf. Ibid., p. 78). Inicialmente tais *anomalias* não oferecem risco ao *paradigma* vigente, mas podem avolumar e provocar uma ruptura no paradigma, criando uma *crise* na ciência (Cf. Ibid., p. 95): instalando-se assim a *ciência extraordinária*, onde há novas descobertas e um

novo paradigma aparece. Com seu amadurecimento, novo período de *ciência normal* entra em vigor.

O modelo de Thomas Kuhn ofereceu uma nova visão sobre o funcionamento científico em relação ao modelo proposto pelo *falseacionismo* de Popper, pois as *anomalias* ocorram, as mesmas não possuem uma força de abandono imediato das teorias; revelando a força dos paradigmas (Cf. *Ibid.*, p. 186). Neste sentido, Kuhn entende que a formulação popperiana ocorreria apenas em alguns momentos de revolução científica.

Outro importante filósofo da ciência foi o austríaco Paul Feyerabend, que concebeu a ciência como uma prática cujos métodos são limitados (Cf. FEYERABEND, 1985, p. 450). Feyerabend alegou haver dentro do desenvolvimento da ciência uma regra maior, *tudo vale* (*Ibid.*, p. 36).

A visão de Feyerabend introduz uma diminuição da proposta racionalista, alegando que não há um explícito método para garantir o progresso científico. Fez críticas aos posicionamentos de Kuhn e Popper, além de contra-argumentar com o posicionamento lakatosiano. Em 1975 publicou seu “*Contra o método*”, que desenvolve o conceito de “*anarquismo*” dentro de sua epistemologia.

3. A Síntese Lakatosiana

Para Paul Feyerabend (1979, p. 261), crítico do método científico, Lakatos representava uma boa alternativa para os problemas originados nos debates presentes entre a visão de Ciência de Thomas Kuhn e Karl Popper.

Feyerabend e Lakatos correspondiam-se mantendo um debate filosófico sobre suas apresentações a respeito da ciência – o que pode ser facilmente comprovado na dedicatória e num pequeno prefácio de “*Contra o método*”. Neste livro, Feyerabend desenvolveria sua teoria anarquista da ciência e Lakatos responderia com seu racionalismo.

Este ensaio é a primeira parte de um livro a propósito do anarquismo que seria escrito por Lakatos e por mim. Cobia-me atacar a posição racionalista; Lakatos, por seu turno, reformularia essa posição, para defendê-la e, de passagem, reduzir meus argumentos a nada. Juntas, as duas partes deviam retratar nossos longos debates em torno desse tema — debates que tiveram início em 1964, prosseguiram em cartas, aulas, chamadas telefônicas, artigos, até quase o último dia de vida de Imre, e se transformaram em parte de minha rotina diária (FEYERABEND, 1985, p. 7).

Feyerabend entendia que, perante os problemas presentes nas críticas da filosofia de Thomas Kuhn, o modelo de *mudança científica* de Lakatos era uma alternativa relevante – embora também fosse um crítico ao racionalismo lakatosiano. Ao entender como resposta aos problemas kuhnianos, Feyerabend acaba por apresentar a filosofia lakatosiana como uma *síntese* entre a discussão crítica de alternativas presente em Popper e a tenacidade¹ abordada por Thomas Kuhn.

Essa imagem é a síntese das duas descobertas seguintes. Primeiro, contém a descoberta de Popper de que a ciência progride pela discussão crítica de visões alternativas. Segundo, contém a descoberta de Kuhn da função da tenacidade que ele expressou, erroneamente a meu ver, mediante o postulado da existência de períodos de tenacidade. A síntese consiste na afirmação de Lakatos (desenvolvida em seus próprios comentários sobre Kuhn) de que a proliferação e a tenacidade não pertencem a períodos sucessivos da história da ciência, mas estão sempre co-presentes. (FEYERABEND, 1979, p. 261).

Esta justaposição explicativa sobre a alternativa lakatosiana aparece no ensaio “*Consolando o especialista*” presente no livro organizado por Lakatos e Musgrave “*A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*” e Lakatos também assume essa perspectiva como uma solução dos problemas dos outros dois filósofos (Cf. LAKATOS, 1998, p. 16). Após esta difusão sobre lakatos, Feyerabend apresenta a existência de uma noção de Ciências presente em Kuhn, que seria como uma práxis de solução de enigmas: Feyerabend não considera a abordagem mais adequada, pois afirma que o crime organizado também se encaixa neste tipo de abordagem (Cf. FEYERABEND, 1979, pp. 247-248). Feyerabend utiliza o exemplo do arrombador de cofres, que se especializa em aperfeiçoar métodos para solução de arrombamento – nos mesmos moldes de solução de enigmas, que o cientista, na visão kuhniana teria. Neste sentido, aponta a filosofia de Kuhn como *desviada da análise funcional da ciência* – afirma, por exemplo, que há um problema em transitar entre ciência normal e as revoluções, como se as revoluções fossem desejáveis. Entende que há, portanto, problemas metodológicos.

Pois tudo indica que o crime organizado é a solução de enigmas *par excellence*. Todo enunciado feito por Kuhn a respeito da ciência normal permanece verdadeiro quando substituímos ‘ciência normal’ por ‘crime organizado’; e todo enunciado que ele escreveu acerca do ‘cientista’

1 O princípio de tenacidade pode ser resumido como a persistência de teorias frente a elementos falseadores. Pode ser tomada como irracional, por um falseacionista ingênuo, como veremos mais a frente, conforme afirma Lakatos.

individual aplica-se com a mesma força, digamos, ao arrombador de cofres individual (FEYERABEND, 1979, pp. 247-248).

Feyerabend também aborda sobre o princípio da tenacidade, cujos proponentes se fixam em uma teoria, sendo essa uma regra para aperfeiçoamento de teorias; e por este motivo pode ser considerada racional (Cf. Ibid., pp. 252-253). Este argumento gira em torno do que Feyerabend entende como uma crítica funcionalista à teoria kuhniana: há razões que fazem com que cientistas se mantenham na chamada *ciência normal*² e depois releguem estas mesmas razões num momento de *revolução* (Cf. Ibid., p. 251).

Kuhn, segundo ele, “ênfatiza com firmeza os traços dogmáticos, autoritários e tacanhos da ciência normal, o fato que ela conduz a um temporário ‘fechamento da mente’” (FEYERABEND, 1979, pp. 254-255). Feyerabend, questiona, enfim a real existência da ciência normal, pois “não é sequer um fato histórico” (Cf. Ibid., p. 256). Para este problema, descreve o modelo lakatosiano de mudança científica como mais próximo da realidade, como uma síntese ao falseacionismo popperiano e as revoluções científicas de Kuhn – embora critique a noção de um programa de pesquisa e da própria racionalidade na ciência, mostrando que a ciência é mais irracional do que Lakatos consegue admitir. (Cf. Ibid., pp. 265-266). Concorda com uma noção de incomensurabilidade entre os paradigmas da ciência (Cf. FEYERABEND, 1979, p. 271), embora possa-se admitir um progresso entre as predições teóricas.

Apesar de demonstrar ser crítico com a teoria lakatosiana³, pois assume um papel mais “anárquico” em relação à disposição do método na ciência – ele reduz a importância do método –, Feyerabend consegue resumir⁴ adequadamente uma excelente apresentação síntese, que a filosofia lakatosiana é em relação aos problemas levantados por Popper e Kuhn. Utilizamos o termo síntese, para descrever como Lakatos consegue abranger dois grandes aspectos de duas importantes epistemologias, já apresentadas; no entanto John Kadvany (2001) coloca como incompleta esta ideia, no sentido em que Lakatos não se reduz a apenas uma síntese – isso esconderia o caráter radical também presente em Lakatos (Cf. KADVANY, 2001, p. 2).

2 A seguir faremos uma pequena exposição do que se trata a *ciência normal* dentro da filosofia kuhniana.

3 Lakatos informa que tanto Kuhn, quanto Feyerabend “tentaram imediatamente ‘falsificar’, por seu lado, a minha metodologia melhorada” (LAKATOS, 1998, p. 53). Outra crítica é em relação à aos programas: Lakatos entende a dinâmica científica ocorrida entre programas de pesquisa e não apenas em teorias – para Feyerabend isto é um erro.

4 Vale lembrar que Feyerabend afirmaria que Lakatos possui uma filosofia mais liberal, “porque é um *anarquismo disfarçado*” (FEYERABEND, 1985, p. 283).

E como uma síntese entre a filosofia kuhniana e popperiana, é preciso saber que a aplicação falseacionista está presente na Metodologia de Programas de Pesquisa de Lakatos. Lakatos entende que sua metodologia pode resolver problemas de ambos citados filósofos, bem como oferecer um suporte melhor para o que ele chama de *reconstrução racional*.

4. Outras epistemologias para Lakatos

Com Popper há uma clara distinção do que é científico, através de um critério de demarcação, que pode ser chamado de *falseabilidade*, onde as teorias devem ter a possibilidade de falseamento para que sejam consideradas científicas. Lakatos afirma que isto envolve um problema no sentido em que não é assim que a ciência efetivamente trabalha – no qual explicaremos adiante sobre esta asserção. Para este problema, ele desenvolve um falseacionismo metodológico sofisticado. Mas, antes de falar de tal falseacionismo, convém explicar o percurso que Lakatos faz ao criticar a forma mais simples do falseacionismo: o falseacionismo dogmático. Para explicar o percurso argumentativo de Lakatos às críticas ao falseacionismo e a proposição de sua Metodologia de Programas de Pesquisa, utilizamos um recorte expositivo da argumentação lakatosiana presente em “*O Falseamento e a metodologia dos Programas de Pesquisa Científica*”, contida no livro “*A crítica e o desenvolvimento do conhecimento*”, organizado por ele e por Alan Musgrave. Por vezes também faremos uso de sua “*História da Ciência e suas Reconstruções Racionais*”⁵.

Para desenvolvimento de sua metodologia, Lakatos faz críticas ao falseacionismo em suas várias vertentes. Mas, antes de suas críticas às gradações dos falseacionistas, ele começa a reconstruir alguns argumentos sobre o funcionamento da ciência e, em seguida, descreve o justificacionismo e como este foi contraposto por um tipo de ceticismo. Ceticismo que abriria margem para um irracionalismo. Posteriormente descreve a adoção de um neojustificacionismo (probabilismo) na história da filosofia da ciência que, em sua visão, também tem problemas em relação a aquisição do conhecimento.

5 “A crítica e o desenvolvimento do conhecimento”, como supracitado, foi organizado por Lakatos e Musgrave, sendo extraído do Seminário Internacional de Filosofia da Ciência, ocorrido em 1965 em Londres. Este livro contém além do texto utilizado aqui como base para extração da filosofia da ciência lakatosiana, também contém artigos de Kuhn, Popper, Feyerabend, dentre outros.

O outro livro utilizado aqui para delineamento da filosofia lakatosiana, “História da Ciência e suas reconstruções racionais” foi originado de uma palestra transmitida via rádio. Ambos textos estão presentes num outro volume único, disponível em língua inglesa e espanhola (“*The Methodology of Scientific Research Programmes*”, publicada pela Cambridge University Press em sua versão inglesa e pela Alianza Editorial pela espanhola).

Para Lakatos, no justificacionismo “o conhecimento científico consistia em proposições demonstradas” (LAKATOS, 1979, p. 113), ou seja, “identificação do conhecimento com o conhecimento provado” (Ibid.). Este tipo de pensamento, segundo Lakatos, foi corrente durante muito tempo e viu no ceticismo uma importante crítica sobre a obtenção do conhecimento – embora Lakatos afirme que o ceticismo não negou “o justificacionismo: apenas asseverava que não havia (e nem poderia haver) conhecimento provado (...)” (Ibid.). De forma breve, Lakatos descreve uma espécie de “colapso” do justificacionismo, que muito tempo depois haveria de ter dado abertura para um pensamento falseacionista.

Lakatos faz uma distinção bem delineada entre alguns tipos de falseacionismo: dogmático, metodológico – ingênuo – e o metodológico sofisticado. Coloca como o falseacionismo metodológico ingênuo pode ser colocado em contraposição ao dogmático – e como se dirige as regras de aceitação entre ambas. Essa distinção entre tipos de falseacionismo é baseada numa análise tripartite a partir dos argumentos de Popper (Cf. LAKATOS, 1979, pp. 224-225), representada na distinção de Popper₀, Popper₁ e Popper₂.

Popper₀ representaria o falseacionista dogmático – que não seria de fato o Popper, mas sim um “homem palha”⁶, conforme o próprio Lakatos explica. O falseacionismo dogmático seria a visão mais simples e difícil de sustentar do falseacionismo. Constituiria a visão no qual o falseamento deve dirigir *necessariamente* à exclusão da Teoria dentro do páreo científico.

O falseacionismo dogmático é, portanto, uma posição dogmática porque simplesmente adota a visão que a aplicação de um *modus tollens* é capaz de resolver objetivamente quando uma teoria ainda é válida ou não. Não vislumbra que há possibilidade de correção em determinados casos, e este tipo de correção seria visto como ações abomináveis por adeptos deste posicionamento.

Na sequencia Lakatos descreve o falseacionismo metodológico de Popper, que segundo ele, inicialmente foi um falseacionista dogmático e que não teria publicado neste período. Lakatos diz que Popper, no sentido dogmático, foi levantado primeiramente por A. J. Ayer para construção de uma crítica. (Cf. LAKATOS, 1979, p. 225). Entendemos que este

6 “Homem palha” pode se referir à falácia do espantalho, ou também chamado de falácia do homem palha. Neste tipo de argumentação há alteração do teor argumentativo apresentado por alguém, por outro argumento semelhante que possa ser facilmente criticado. Não supomos que esta seja uma crítica de Lakatos dirigida a destruir o falseacionismo ingênuo, mas sim de demonstrar que ele não se sustenta de forma alguma, a ponto de ninguém o adotar; e assumir um Popper baseado neste contexto, seria sim um Popper não real.

tipo de abordagem pode representar uma *falácia do espantalho*, visto que esta não é a posição defendida por Popper.

O falseacionismo metodológico, *ingênuo*, aceita como teorias científicas aquelas que podem ser falseáveis – que podem passar pelo crivo do *modus tollens*. Lakatos afirma que o seu falseacionismo metodológico sofisticado aceitará caso seja “corroborado de conteúdo empírico em relação à sua predecessora (ou rival), isto é, se levar à descoberta de fatos novos” (LAKATOS, 1979, p. 141).

Vale lembrar que para Lakatos o falseacionismo, mesmo o metodológico ingênuo, não se sustenta, pois é “falseado” como historiografia da ciência; utilizando como argumento principal uma retroaplicabilidade do falseacionismo – neste sentido, a historiografia da ciência, não sustenta o falseacionismo metodológico, visto que a grande maioria da história da ciência não encontramos a ação de um falseacionismo.

Proponhamos, (...) a título experimental, que, se *um critério de demarcação se mostra inconsistente com as apreciações ‘básicas’ da elite científica, deveria ser rejeitado.*

Ora, se aplicarmos este metacritério quase empírico (que rejeitarei mais tarde), o critério de demarcação de Popper – isto é, as regras de Popper para o jogo da ciência – tem de ser rejeitado. (LAKATOS, 1998, p. 47).

O falseacionismo metodológico ingênuo, além de não ser condizente com uma historiografia que preze por um racionalismo – por uma reconstrução racional mais eficaz – também é problemática, segundo Lakatos, com sua noção de experimento crucial.

Uma reconstrução racional é uma reconstrução histórica, utilizando a *história da ciência*, para explicar como procede racionalmente o desenvolvimento científico. Desta forma, uma reconstrução histórica deve ser precedida “de um estudo heurístico” (LAKATOS, 1979, p. 169).

Ao redigir o estudo de um caso histórico deve-se, creio eu, adotar o seguinte procedimento: (1) faz-se uma reconstrução racional; (2) tenta-se cotejar essa reconstrução racional com a história real e criticar tanto a reconstrução racional por falta de historicidade quanto a história real por falta de racionalidade. Dessa maneira, todo estudo histórico deve ser precedido de um estudo heurístico: a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega (LAKATOS, 1979, p. 169).

Pode-se fazer uma distinção entre *história externa e interna*, que diz respeito à construção racional da história da ciência: uma determinada forma epistemológica de entender

a ciência permite reconstruir como ocorreu a prática científica. Desta forma, é possível descrever uma história *interna* da prática científica, por meio da epistemologia adotada – aquilo que está para além da descrição de uma história interna de uma posição filosófica, fica a cargo de uma explicação da *história externa*.

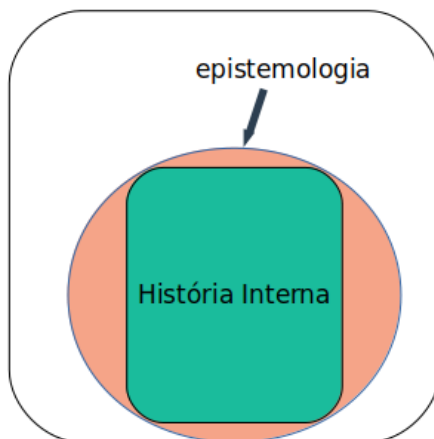


Fig. 1 – Diagrama mostrando como seria uma concepção entre metodologia (que chamamos aqui de epistemologia) e a *história interna*. Comparar com a figura a seguir, sobre a *história externa* [Diagrama nosso].

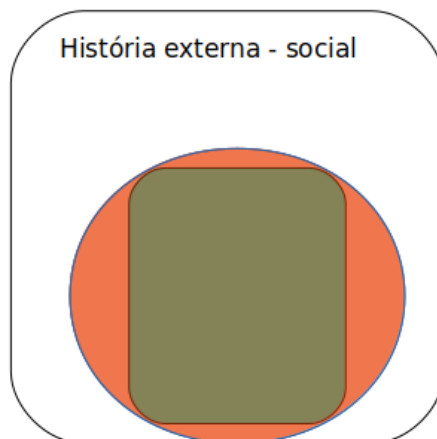


Fig. 2 – Diagrama que representa a *história externa* em relação à *história interna*, apresentada na figura anterior. [Diagrama nosso].

Feyerabend critica esta posição, afirmando ser a história interna, aquilo que se passa como uma convergência de atos, visto que constantemente há atos que desobedecem à metodologia que definem tal história interna – sendo, portanto, uma ilusão epistemológica. Em outras palavras a definição de uma *história interna* de acordo com uma epistemologia é

sempre descumprida por atos considerados como *história externa* (Cf. FEYERABEND, 1977, pp. 316-317). Apesar desta crítica, Lakatos entende que os desenvolvimentos de uma história externa compreendem aos atributos que poderiam ser descritos como o segundo mundo popperiano – das coisas subjetivas.

Outra questão analisada por Lakatos é o problema de epistemologias como o convencionalismo, o indutivismo e falseacionismo. Para Lakatos a reconstrução racional derivada das mesmas gerará uma história da ciência malfeita para que se encaixe às suas respectivas epistemologias, ou admitirá uma irracionalidade no percurso histórico da ciência – e ele alega que Popper fez a primeira alternativa, enquanto Feyerabend utilizou-se da segunda.

Se a metodologia de um historiador fornece uma reconstrução racional pobre, ele pode ou interpretar mal a história, de tal modo que esta coincida com a reconstrução racional, ou decidir que a história da ciência é muito irracional. O respeito de Popper pela grande ciência fê-lo escolher a primeira opção, enquanto o irreverente Feyerabend escolheu a segunda (LAKATOS, 1998, p. 50).

Lakatos também dirige críticas ao posicionamento popperiano nos quais teorias são postas a prova – entende que este tipo de processo se dá no nível de Programas de Pesquisa, que abordaremos a seguir. Portanto, para Lakatos não são teorias que “duelam”, mas programas. Além disso, compreende que os experimentos cruciais são raros ao levantarmos uma historiografia da ciência e nem sempre são falseadores. Para ele, portanto, não há um experimento que *a priori* possa ser considerado como experimento crucial – isso sempre é colocado após o Programa de Pesquisa estar em descrédito (Cf. LAKATOS, 1979, p. 195).

Vale lembrar que Lakatos interpreta Kuhn como correto em seu questionamento sobre o falseacionismo ingênuo, sobre a indicação da tenacidade e da continuidade das teorias científicas, mas entende que ele estaria errado ao supor que a eliminação do falseacionismo suprimiria toda a sorte de falseacionismo. Lakatos supõe que Kuhn deixa de lado qualquer possibilidade de reconstrução racional do crescimento da ciência (Cf. LAKATOS, 1979, p. 220).

Contra uma psicologia da ciência, Lakatos afirma que ela pode revelar verdades importantes, mas não tem certa autonomia (Ibid., p. 223), pois o crescimento da ciência se dá no terceiro mundo; de Platão e Popper, enquanto a compreensão da história da ciência se dá na interação destes três mundos (Ibid., p. 224). Terceiro mundo refere-se a distinção, criada por Popper, de três níveis de mundo onde ocorre o conhecimento: segundo Lakatos em sua

nota de rodapé 337, “o primeiro mundo é o mundo material, o segundo é o mundo da consciência, o terceiro é o mundo das proposições, da verdade, dos padrões: o mundo do conhecimento objetivo.” (LAKATOS, 1979, p. 223).

Após descrever os falseacionismos dogmáticos e ingênuos, Lakatos desenvolve o falseacionismo metodológico sofisticado – que é a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica.

5. A Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica

A Metodologia dos Programas de Pesquisa é o que Lakatos chama de Falseacionismo Metodológico Sofisticado. Ele entende que o falseacionismo popperiano deve ser aperfeiçoado e por isso desenvolve a noção que a dinâmica científica está para além dos embates entre teorias: compreende que há Programas de Pesquisa que criam *modelos* científicos e estes programas, rivais, é que disputam entre si. Desta forma, faz sentindo o pressuposto que não há experimentos cruciais para teorias, pois estas podem seguir novos modelos teóricos de acordo com o programa que está a desenvolvê-las.

Em primeiro lugar, reivindico que a unidade descritiva típica das grandes realizações científicas não é uma hipótese isolada, mas antes um programa de investigação. A ciência não é simplesmente ensaio e erro, uma série de conjecturas e refutações. (...) A ciência newtoniana, por exemplo, não é simplesmente um conjunto de quatro conjecturas – as três leis da mecânica e a lei da gravitação. Estas quatro leis constituem apenas o ‘núcleo’ do programa newtoniano. Mas este núcleo é tenazmente defendido da refutação por uma vasta ‘cintura protectora’ de hipóteses auxiliares. E, mais importante ainda, o programa de investigação tem também uma ‘heurística’, isto é, um poderoso mecanismo para solucionar problemas que, com a ajuda de técnicas matemáticas sofisticadas, digere anomalias e até as transforma em comprovações (LAKATOS, 1998, p. 16).

Vale ressaltar que Lakatos tem em mente que a estruturação da historiografia da ciência, por meio de Programas de Pesquisa, explica melhor como é o funcionamento científico, utilizando da noção de uma racionalidade na ciência. E esta explicação é sempre *posterior*. É, portanto, contra uma *racionalidade instantânea* (Cf. LAKATOS, 1979, p. 216).

À luz de minhas considerações, a idéia da racionalidade instantânea pode ser vista como utópica. Mas essa idéia utópica é a marca registrada da maior parte das epistemologias. Os justificacionistas queriam que as teorias científicas fossem provadas antes até de ser publicadas; os probabilistas

esperavam que uma máquina pudesse dar instantaneamente o valor (grau de confirmação) de uma teoria, em fase da evidência; os falseacionistas ingênuos esperavam que a eliminação fosse ao menos o resultado instantâneo do veredito da *experiência*. Espero haver demonstrado que *todas essas teorias da racionalidade instantânea — e de aprendizado instantâneo — fracassam*. Os estudos de casos desta seção mostram que a racionalidade trabalha muito mais devagar do que a maioria das pessoas tende a pensar e, mesmo assim, falivelmente. A coruja de Minerva voa ao cair da noite. (LAKATOS, 1979, p. 216).

Os Programas de Pesquisa Científica são séries teóricas orientadas por um núcleo com processos heurísticos – positivo e negativo. Em outras palavras, não há apenas teorias soltas, mas séries teóricas produzidas de acordo com *modelos* orientados por verdadeiros Programas de Ciência. Os programas concebem a transferência de problemas às teorias que podem ser de ordem progressiva ou regressiva – conforme conseguem apresentar novas problemáticas, previsões, ou se necessitam de conformar as anomalias. Em torno do núcleo de um programa há o *cinturão protetor*, composto de hipóteses auxiliares.

As *heurísticas* são processos metodológicos que normatizam o que deve, ou não ser seguido. A heurística negativa fornece os caminhos a serem evitados, enquanto a heurística positiva informa quais são os novos caminhos a seguir.

A heurística negativa ainda informa que não se deve dirigir o *modus tollens*⁷ ao núcleo duro de um programa de pesquisa. Portanto, se no falseacionismo metodológico de Popper o *modus tollens* é dirigido às teorias, no falseacionismo metodológico sofisticado de Lakatos há alguns pressupostos que norteiam os Programas e que não têm o *modus tollens* aplicado. Isso ocorre por uma decisão metodológica. Vale lembrar que as hipóteses e teorias compostas no *cinturão protetor* podem receber a aplicação de *modus tollens*.

Todos os programas de pesquisa científica podem ser caracterizados pelo ‘núcleo’. A heurística negativa do programa nos proíbe dirigir o *modus tollens* para esse “núcleo”. Ao invés disso, precisamos utilizar nosso

7 Uma implicação, no estilo “Se P então Q” pode ser descrita como $S \rightarrow P$. A partir daí podemos montar um argumento, logicamente válido – ou seja, bem construído logicamente – no qual:

$$\begin{array}{l} P \rightarrow Q \text{ (se P então Q)} \\ \sim Q \text{ (não Q)} \\ \hline \sim P \text{ (não P)}. \end{array}$$

Este tipo de argumento utilizando uma implicação é chamado de *modus tollens*, ou seja, emprega-se uma negação. O falseacionismo utiliza este recurso para falseamento de teorias. Para mais detalhes a respeito de implicação, consulte COPI, I. *Introdução à Lógica*, páginas 234-248 e, também, MORTARI, C. *Introdução à Lógica* páginas 17-21 para validade e forma.

engenharia para articular ou mesmo inventar “hipóteses auxiliares”, que formam um cinto de proteção em torno do núcleo, e precisamos re-dirigir o *modus tollens* para elas. É esse cinto de proteção de hipóteses auxiliares que tem de suportar o impacto dos testes e ir se ajustando e reajustando, ou mesmo ser substituído, para defender o núcleo assim fortalecido. O programa de pesquisa será bem-sucedido se tudo isso conduzir a uma transferência progressiva de problemas, porém malsucedido se conduzir a uma transferência degenerativa de problemas. (LAKATOS, 1979, p. 163).

Os programas com suas heurísticas produzem, portanto, uma cadeia de *modelos teóricos* que são seguidos pelos participantes de um determinado programa de pesquisa. Cada modelo aprimora-se em complexidade, podendo aumentar o conteúdo preditivo.

A heurística positiva do programa orienta o cientista para que ele não se “confunda no oceano de anomalias” (Ibid., p.165), através dos modelos, centrando a atenção do cientista com as instruções que estão na parte positiva do programa. Portanto, os modelos surgem de acordo com as instruções da heurística positiva. Desta forma, podemos afirmar que neste ponto se especifica o contexto de criação das teorias existentes nos Programas de Pesquisas.

A heurística negativa especifica o “núcleo” do programa, que é “irrefutável” por decisão metodológica dos seus protagonistas; a heurística positiva consiste num conjunto parcialmente articulado de sugestões ou palpites sobre como mudar e desenvolver as ‘variantes refutáveis’ do programa de pesquisa, e sobre como modificar e sofisticar o cinto de proteção “refutável” (LAKATOS, 1979, p. 165).

O princípio de tenacidade pode ser entendido como o fato em que muitas vezes o cientista, mesmo de posse do falseamento de sua teoria, se mantém “fiel” tenazmente. Em Lakatos a tenacidade ocorre como forma de se manter perante o “oceano de anomalias” e para evitar a aplicação do *modus tollens* ao núcleo duro do programa de pesquisa. Lakatos afirma que a heurística positiva pode atuar como uma espécie de princípio “metafísico” (Cf. LAKATOS, 1979, p. 167), e é em geral mais flexível que a negativa. E algumas vezes, heurísticas positivas pode fazer “programas com transferência criativa” em degenerescência possam voltar a uma fase de progresso (Cf. Ibid., p. 168).

A heurística positiva pode iniciar-se com poucas dificuldades dentro de um programa – para dificuldades, entenda como *anomalias*. Como *anomalias*, devemos entender, no vocabulário lakatosiano, como os fatos que não se encaixam nos processos criativos dos Programas, e que poderiam, num falseacionismo mais simples, serem falseadores através da aplicação de um *modus tollens*.

Afirmamos, logo acima, que as heurísticas podem fazer voltar ao progresso um programa que se encontra degenerativo: para Lakatos os Programas concorrem entre si e podem apresentar progressos, ao aperfeiçoarem suas predições, desenvolverem e apresentarem novas problemáticas ou se mostrarem degenerescentes quando os “*factos novos*” não puderam ser previstos e foram tomados como anomalias. O progresso e a degenerescência dos programas são *avaliações* que podem ser feitas mesmo depois que um programa foi eliminado (Cf. Ibid., p. 168). Essa avaliação gira em torno da atuação das *heurísticas* – Lakatos admite que essa avaliação também ocorre em relação à importância (“estímulo”) dada à matemática, permitindo a avaliação de programas que são em grande parte teóricos.

Podemos avaliá-los também pelo estímulo que dão à matemática. As dificuldades reais para o cientista teórico nascem mais das dificuldades matemáticas do programa do que das anomalias. A grandeza do programa newtoniano procede, em parte, do desenvolvimento — por newtonianos — da análise infinitesimal clássica, pré-condição crucial do seu bom êxito (Ibid., p. 168).

Estas avaliações são sempre *posteriores* a atuação e representa um dos pressupostos lakatosianos de *como* ocorre a reconstrução racional. Tais reconstruções são vistas como uma análise historiográfica e permite ver *como* ocorreu um determinado programa. Assim como esta análise se dá num caso pretérito, não é possível prever *quando* um programa que está em uma situação de degenerescência volverá para um caso progressivo. Supomos que o exemplo utilizado por Lakatos da desintegração beta – onde o neutrino foi concebido para explicar uma anomalia⁸ – como um caso de um programa que volta a possuir capacidade progressiva, devida a transferência progressiva teórica e empírica.

A avaliação de um programa *progressivo* encerra ainda duas possibilidades de progresso; a primeira trata-se de programas *teoricamente progressivos* e a segunda de *empiricamente progressivos*. Os *teoricamente progressivos* são aqueles que as teorias que resultem do modelo teórico tenham mais conteúdo empírico que as teorias anteriores da série; e os *empiricamente progressivos* são aqueles que os conteúdos empíricos a mais passarem pelo crivo da corroboração (Cf. Ibid., p. 144).

O fato de uma *racionalidade* pretendida por Lakatos não ser instantânea, e as avaliações dos programas serem *posteriores* assim como a sua avaliação ser *racional*, é possível entender a *tenacidade* de cientistas aos seus programas como atitudes racionais e

8 O exemplo é dado por Lakatos, páginas 207 a 214, como uma argumentação contra o experimento crucial.

válidas para o desenvolvimento científico. Essa possibilidade seria impossível para um falseacionista ingênuo, bem como poderia passar como *irracional* – visto que sua tenacidade poderia ser considerada como uma “aposta” explicável pela psicologia ou sociologia da ciência, sem uso de uma racionalidade: para Lakatos este cenário pode ser corretamente representado como uma aposta racional. Da mesma forma, esta suposição corrobora com o que já expomos a respeito do experimento crucial; para ele não há experimentos cruciais de fato – os experimentos cruciais que são selecionados por determinadas historiografias, são cruciais *depois* de algum tempo e que no momento apresentado não foi encarado como crucial, e sim como uma anomalia a ser trabalhada pelas heurísticas de algum programa. Este é o caso, por exemplo, do experimento de Michelson e Morley, que só foi considerado como “crucial” algum tempo depois da proposição e sucesso da Relatividade Estrita.

A experiência de Michelson-Morley foi a tentativa de detectar o éter através de fontes de luz espelhadas a fim de medir a velocidade do suposto éter. A experiência não detectou éter, mas foi interpretada a modo acolher uma ou outra explicação pré-relativística. Os programas atuantes na época adaptaram-se à ausência ocorrida nos experimentos de Michelson-Morley e somente foram entendidos como *evidência* negativa *após* o progresso do programa Einsteiniano (Cf. LAKATOS, 1979, pp. 196-204).

6. Dinâmica dos Programas de Pesquisa

Como já afirmado, em Lakatos o confronto científico não acontece em nível de teorias, mas de Programas, que são capazes de produzir seus *modelos*. Para Lakatos o funcionamento de tais Programas ocorre por uma *dialética* entre as heurísticas positiva e negativa – dialética no sentido de *contrapartidas* das atuações entre tais processos metodológicos. Entendemos que este processo não se dá necessariamente uma após a outra, mas no sentido de poderem atuar de formas *complementares*.

O funcionamento dos programas se dá em nível de verificação. Para ele a “‘verificação’ da enésima primeira versão do programa é uma refutação da enésima versão” (Cf. LAKATOS, 1979, p. 168). Portanto, mesmo com os problemas que surgem, o programa continua a funcionar. Este tipo de proposta seria inconcebível para um falseacionista ingênuo, mas traduz o espírito do cientista que trabalha num programa mesmo face a um determinado problema. E esta verificação demonstra a força heurística (Cf. *Ibid.*).

A heurística positiva seleciona os problemas que são considerados como importantes para um determinado programa, permitindo que certas anomalias possam ficar em segundo plano – ou desconsideradas. Nesta seara, Lakatos entende que a produção de *modelos* através de uma heurística positiva, é capaz de fornecer critérios para o entendimento de anomalias que possam ser trabalhadas, ou deixadas de lado – em outras palavras, entendemos que esta apresentação permite ao cientista decidir se uma anomalia representa uma *evidência* ou não para o desenvolvimento de seu programa.

Os problemas racionalmente escolhidos por cientistas que trabalham em poderosos programas de pesquisa são determinados pela heurística positiva do programa, muito mais do que pelas anomalias psicologicamente preocupantes (ou tecnologicamente urgentes). Embora arroladas, as anomalias são postas de lado na esperança de que se transformem, com o tempo, em corroborações do programa. (LAKATOS, 1979, p. 168).

O caso de um programa *degenerativo*, ou em casos de cientistas que trabalhem no formato “ensaio e erro”, é que as anomalias começam a apresentar-se como problemas suficientes à manutenção do *programa* (Cf. Ibid., p. 169).

Com base nas explicações sobre a heurística positiva, podemos entender a importância de seu funcionamento dentro de um programa: Lakatos compreende, portanto, que o enfraquecimento deste tipo de heurística permite a ação das anomalias (Cf. LAKATOS, 1998, p. 32) porque diante da ação da heurística positiva o cientista seguirá suas recomendações, em vez de fazer das anomalias, *evidências* falseadoras.

Outro importante ponto em relação à dinâmica dos programas é o fato que eles podem ser *enxertados*:

alguns dos mais importantes programas de pesquisa da história da ciência enxertavam-se em programas mais antigos com os quais eram francamente incompatíveis. Por exemplo, a astronomia copernicana foi “enxertada” na física aristotélica; o programa de Bohr foi enxertado no programa de Maxwell. Tais “enxertos” são irracionais para o justificacionista e para o falseacionista ingênuo, nenhum dos quais aprova o crescimento sobre fundamentos incompatíveis. Por isso são habitualmente escondidos por estratégias *ad hoc* — como a teoria de Galileu da inércia circular ou a correspondência de Bohr e, mais tarde, o princípio da complementaridade — cujo único propósito era esconder a “deficiência”. À medida que o jovem programa enxertado se fortalece, a coexistência pacífica chega ao fim, a simbiose torna-se competitiva e os defensores do novo programa tentam substituir completamente o velho programa. (LAKATOS, 1979, p. 174).

Desta forma, programas mais novos podem usufruir da estrutura de rivais – perfazendo a rivalidade quando mais amadurecidos em seu funcionamento. Este é o caso apontado por Lakatos em relação ao programa quântico de Bohr⁹. Este tipo de proposta pode parecer irrazoável aos falseacionistas mais ingênuos, porém dentro da perspectiva metodológica sofisticada dos programas de pesquisa é completamente plausível.

É possível distinguir posicionamento entre os cientistas que compõem os programas; e em relação aos que são enxertados, Lakatos explica que há posições conservadoras, anárquicas e racionais. Descreve, por exemplo, Bohr como possuidor de um posicionamento anárquico, enquanto Newton deveria ter sido mais no estilo “racional”. Propõe que a Mecânica Quântica pós 1925 tinha um posicionamento mais voltado para o anárquico – representada mais pela Escola de Copenhague, que foi criticado por Einstein (Cf. Ibid., p. 179).

Lakatos aponta que o trabalho teórico é relativamente autônomo em relação do trabalho experimental, pois o teórico, por vezes, acaba por “explicar” ao experimentador detalhes de sua própria experimentação – defende que esse foi o caso com o programa de Bohr, reconhecendo a riqueza de tal programa. Uma das características existentes nesse programa é a capacidade de efetuar *ajustamentos-monstros*: para Lakatos, o ajustamento-monstro é a alteração do que é considerado como evidência¹⁰, com a finalidade de alterar uma ou outra evidência contrária como evidência em *prol* ao programa.

As dialéticas entre os programas de pesquisa são variadas e complexas – ocorrem transferências progressivas entre hipóteses, criação de consecutivas hipóteses e hipóteses que podem ser criadas sem transferência empírica.

Lakatos entende a história da ciência sendo mais rica do que a forma defendida por Kuhn, principalmente nos períodos em que Kuhn estabelece como *ciência normal* – Lakatos vê um monopólio de um programa quando este se comporta como *ciência normal*, fazendo mais sentido para ele os confrontos entre programas de pesquisa e, sendo assim, a história da ciência como a história de confrontos entre programas de pesquisa (Cf. LAKATOS, 1979, p. 191): a ocorrência de um período de ciência normal, para Lakatos, não passaria de um programa em estágio de monopólio. No entanto, de acordo com levantamentos

9 Sugerimos que este também seja o caso do programa do Neutrino, que vai além da descoberta do mesmo pela ocorrência do decaimento beta.

10 Confronte a nota 218, da página 183 da Crítica e desenvolvimento do conhecimento, onde Lakatos explica o ajustamento-monstro e indica passagem do “Provas e Refutações”.

historiográficos, é possível assumir isso como um caso incomum – o mais comum seria o confronto entre programas.

Neste embate entre programas, pode-se considerar que um programa sucede ao outro quando explica fatos antigos, com bom conteúdo preditivo e está bem desenvolvido (Cf. *Ibid.*, p. 193).

Um questionamento razoável a se fazer é quando um programa se torna *saturado*. Em outros termos, quando um programa passa a estar em fase degenerativa de forma irremediável. Para Lakatos, é difícil determinar um ponto “natural” de saturação (Cf. *Ibid.*, p. 195), visto que isto depende da dinâmica das heurísticas – se este possui mais alterações *ad hoc*¹¹: um programa em degeneração pode persistir e uma revolução em suas heurísticas *pode* ocorrer, sem uma previsão do epistemólogo a observar determinado programa.

Mas se o programa derrotado for um programa jovem, que se desenvolve depressa, e se decidirmos dar suficiente crédito aos seus êxitos pré-científicos, experiências pretensamente cruciais dissolver-se-ão uma depois da outra na esteira da sua investida. Mesmo que seja um programa velho, estabelecido e ‘cansado’, perto do seu ‘ponto natural de saturação’, o programa derrotado pode continuar a resistir por muito tempo e a manter-se com engenhosas inovações aumentadoras de conteúdo, ainda que estas não sejam com o sucesso empírico (LAKATOS, 1979, p. 195).

Estes argumentos sustentam a posição, já citada, em que não há experimentos cruciais – estas são consideradas *a posteriori*, quando um programa é abandonado. Outra importante observação a se fazer é em relação a associação que o leitor pode criar entre a degeneração de programas – e sua eliminação – com a crise de paradigmas kuhniano: neste sentido, cabe ilustrarmos na posição lakatosiana que o embate entre programas deve fornecer razões objetivas melhores que as *sociopsicológicas* presentes, segundo Lakatos, na filosofia kuhniana.

A idéia de programas de pesquisa científicas concorrentes conduz-nos ao problema: *como são eliminados os programas de pesquisas?* Transpirou de nossas considerações anteriores que uma transferência degenerativa de problemas não é uma razão mais forte para eliminar um programa de pesquisa do que uma “refutação” antiquada ou uma “crise” kuhniana. *Pode haver alguma razão objetiva* (em oposição às razões sociopsicológicas) *para rejeitar um programa, isto é, para eliminar-lhe o núcleo e o programa a fim de construir cintos protetores?* Nossa resposta, em linhas gerais, resume-se nisto: uma razão objetiva dessa natureza é proporcionada por um programa de pesquisa rival que explica o êxito anterior de seu rival e o suplanta por uma demonstração adicional de *força* heurística (LAKATOS, 1979, p. 191).

11 Alterações que ocorrem para corrigir hipóteses e teorias, após novos fenômenos detectados.

Essa perspectiva de Lakatos de um *princípio de racionalidade* é uma marca para sua filosofia da ciência, visto que entende como as transformações científicas podem ocorrer sob a luz da racionalidade e não apenas de critérios de uma sociopsicologia (como ocorre a dinâmica científica); como poderiam ocorrer ao utilizarmos a teoria kuhniana. Podemos entender que para ele o *princípio de racionalidade* tem domínio de atuação superior ao dos critérios sociopsicológicos – inclusive utiliza em sua nota 319 de um exemplo dado por Popper, para exemplificar a atuação de um psicólogo da ciência; o uso chega a ter uma semelhança com uma *evidência anedótica*.

Lakatos admite que há racionalidade no dogmatismo e na tenacidade da *ciência*, sendo a *ciência* um *campo* de batalha de programas de pesquisa. Neste sentido, a prática científica é composta por programas, em vez de simples teorias isoladas – este fato ocorre facilmente na ciência madura, enquanto a ciência imatura é mais voltada para ensaio e erro. A ciência madura tem força heurística que é capaz de tornar a ciência teórica autônoma, sendo assim, a reconstrução racional lakatosiana pode ser utilizada como requisito para avaliação do crescimento contínuo (Cf. LAKATOS, 1979, p. 217). Pode ser usado como avaliação do crescimento, pois permite avaliar um programa que se apropria de anomalias para explicações posteriores sem antecipar *atos novos* (Cf. Idem) e do uso do que ele chama de “ajustamentos empíricos” (Cf. LAKATOS, 1979, p. 218) nos quais podem fazer uso de “técnicas estatísticas”, que trariam “sementes sem importância de verdade”, que não teriam *forças heurísticas* e não representariam “um autêntico programa” (Cf. Idem).

Lakatos é contra uma *racionalidade instantânea*, assim como contra uma *eliminação instantânea* de programas – segundo ele é um processo longo e, enfatiza, a sua reconstrução racional ocorre *a posteriori* (Cf. Ibid., p. 222).

7. A Metodologia de Programas de Investigação Historiográfica

Em sua obra “História da Ciência e suas Reconstruções Racionais” (1998), Lakatos desenvolve uma argumentação que expõe o uso de metodologias em análises historiográficas, para uma confrontação das mesmas enquanto *reconstruções racionais* (Cf. Ibid., p. 53). Desta forma, é possível a verificação de metodologias por meio de comparações históricas – introduzindo, assim, uma forma de refutabilidade de metodologias que estão em desacordo

com a historiografia científica. O falseacionismo, por exemplo, seria falseado ao ser adotado como critério de comparação metodológico.

Da mesma forma que Lakatos argumenta que o critério de um falseacionismo dogmático falha para os programas científicos, com anomalias que por vezes não são critérios suficientes para falseamento, isso ocorre para análises historiográficas. Através de uma aplicação da Metodologia de Programas de Pesquisa Científica, ele recorre a uma argumentação onde as metodologias podem ser encaradas como Programas, no entanto, com o intuito de uma verificação historiográfica: Metodologias podem se mostrar mais ou menos eficazes em reconstruir racionalmente a história da ciência.

Desta forma, as metodologias verificadas com suas anomalias históricas podem sugerir melhorias metodológicas. Estas melhorias são responsáveis por direcionar à própria Metodologia de Programas de Pesquisa Científica, no qual ela melhor se adapta, dentro da visão lakatosiana, à historiografia da ciência.

Lakatos nomeia de *Metodologia de Programas de Investigação Historiográfica*¹² a forma de verificar cada metodologia que versa sobre a ciência (Cf. LAKATOS, 1998, p. 54). É o caso da metodologia de Karl Popper, que embora tenha sido fonte de progresso na reconstrução racional da ciência, falha historiograficamente com diversas teorias que, segundo seu critério, deveriam estar fora do que é considerado, ao que chamamos, de um comportamento normal da ciência (Cf. Ibid., p. 55): muitas teorias conseguem sobreviver mesmo perante a supostos falseamentos. De um ponto de vista do falseacionismo dogmático essa aplicação resultaria numa eliminação do próprio falseacionismo dogmático, enquanto o falseacionismo de Popper não precisa ser necessariamente descartado em sua totalidade por conta de suas anomalias historiográficas – essa é uma linha argumentativa defendida por Lakatos para mostrar que seu falseacionismo sofisticado, ao ser adotado como uma Metodologia de Pesquisa de Investigação Historiográfica, retorna uma melhor adequação ao conteúdo historiográfico, e ainda reconhece o progresso normativo da teoria popperiana (Cf. Ibid., p. 55). Demonstra, portanto, que o falseacionismo popperiano não é o mais adequado (Cf. Ibid., p. 49), e que todas as metodologias podem ser levadas ao crivo deste falseamento (Cf. Ibid., p. 50).

12 Para a Metodologia Historiográfica, utilizamos a nomenclatura que consta na obra “História da Ciência e suas Reconstruções Racionais”, que está em Português de Portugal; por isso utilizamos Metodologia de Programas de Investigação Historiográfica.

Este ponto da argumentação é importante, porque Lakatos sugere que uma metodologia supera outra quando possui uma explicação racional melhor que a sua antecessora. Ele chama isso de um critério “quase empírico” (Cf. Ibid., p. 54).

A *Metodologia de Programas de Investigação Historiográfica* é, portanto, uma aplicação da própria *Metodologia de Programas de Pesquisa Científica*, como meio análogo de corroborar seu funcionamento e uma aproximação epistemológica sobre como deve funcionar a ciência – que é basicamente a sua *reconstrução racional*. Essa *reconstrução racional* da história submete as metodologias como um teste (Cf. Ibid., p. 61) e permitindo o seu aperfeiçoamento metodológico. Torna-se claro, nesta construção argumentativa, que a distinção entre *história interna* e *história externa* são dependentes da metodologia adotada para a *reconstrução racional* – neste sentido, o recurso teórico desta dicotomia permite notar o afastamento de uma metodologia para com a história da ciência, pois uma metodologia que se afaste da história da ciência acaba por recorrer a conduzir seus conteúdos da *história interna* para a *história externa*. Vale lembrar, que para Lakatos a história da ciência sempre tem uma riqueza mais profunda que a *reconstrução racional* (Cf. Ibid., p. 40).

8. Críticas à filosofia lakatosiana

Embora comecemos este capítulo com apontamentos sobre a consideração feyerabendiana em que Lakatos representa uma interessante síntese entre os posicionamentos de Kuhn e Popper, Feyerabend também teceu críticas a Lakatos. Feyerabend argumentava contra o racionalismo presente em Lakatos, mesmo que fosse um racionalismo em um sentido mais liberal.

Sabendo que Feyerabend era um crítico do racionalismo como fonte operativa de um método, ou seja, não entendia uma *normatividade* específica para erigir a ciência, contra-argumenta constantemente com Lakatos. Para Feyerabend o liberalismo de Lakatos esconde seu verdadeiro “anarquismo”, dada sua extrema flexibilidade (Cf. FEYERABEND, 1985, p. 285). Entende, mesmo assim, que Lakatos chegou a conclusões parecidas com a dele em relação às críticas às outras metodologias (Cf. Ibid., p. 286); vê, portanto, que a metodologia lakatosiana não difere de seu anarquismo – possuindo muitas semelhanças, sendo a falha de Lakatos “uma terminologia ambígua” (Cf. Ibid., p. 304). Compara a metodologia lakatosiana como um “cavalo de Tróia” (Cf. Ibid., p. 305) inserindo o anarquismo epistemológico.

Thomas Kuhn, também fez críticas a Lakatos, referente ao aspecto flexível lakatosiano em relação à demarcação de um programa que começa a se tornar estagnado ou irracional (KUHN, 1979, pp. 294-295).

Lakatos rebate esta crítica dizendo que há racionalidade em assumir o risco de estar em um programa estagnado (Cf. LAKATOS, 1987, p. 38). Lakatos não qualifica sua metodologia como uma forma de dizer ao cientista o que deve ser feito, e sim como uma caracterização posterior da operação racional que houve na atividade científica. Neste sentido, entende que há racionalidade em propor-se trabalhar em um programa degenerando-se. Diz que é “perfeitamente racional participar de um jogo arriscado: o que é irracional é iludirmo-nos sobre o risco” (LAKATOS, 1998, p. 39).

Outra crítica de Kuhn também se dirige à distinção entre história interna e externa. Para Kuhn, a história lakatosiana é uma espécie de “filosofia que inventa exemplos” (KUHN, 1987, p. 89).

Kuhn também faz crítica a forma em que Lakatos conduz a noção de racionalidade e códigos de honra (Cf. Ibid., pp. 91-93), dizendo que esta forma de teorizar aproxima muito à sua própria teoria. Sendo que esta foi duramente criticada por Lakatos, como uma “psicologia de multidões” (Cf. LAKATOS, 1974, p. 221).

Lakatos assume uma postura cuja descrição de sua racionalidade age de forma *posterior*. Ela não é instantânea. Afirma que, apesar de Kuhn supor que ele não delimita critérios, ele confirma definir – embora tais critérios, para ele, não sejam combinados com um limite temporal. Portanto, seus critérios metodológicos *não especificam* um limite temporal.

Apesar de tais críticas, parece-nos razoável a proposta de uma metodologia de programas de forma que, neste sentido, entendemos como uma sofisticada e rica forma de reconstruir racionalmente a prática científica. Endossando, desta forma, os argumentos apresentados por Imre Lakatos.

CAPÍTULO II – A proposta do neutrino e a história de seu PPC

1. Aspectos históricos do surgimento do conceito de neutrino

A cada segundo o Sol, nossa estrela mais próxima, emite trilhões de neutrinos dos quais uma grande quantidade atinge o nosso planeta e, conseqüentemente, perpassa nossos corpos; no entanto não temos nenhuma sensação deste ocorrido e muito menos sofremos alguma influência por causa de tal “bombardeio” (Cf. GUZZO; NATALE, 2005, p. 193). Isto se deve as qualidades de tal partícula: o neutrino é atualmente descrito como uma partícula que quase não possui massa, sem carga e que tem pouca interação com a matéria; por não possuir carga, não interage, portanto, eletricamente. Os neutrinos são emitidos em reações solares e em processos de radioatividade que envolve o decaimento beta.

O decaimento beta é um dos tipos de decaimentos provenientes da radiação nuclear: o núcleo de um átomo quando instável é capaz de emitir radiações para tornar-se mais estável, ocasionando a mudança de elemento que o átomo pertence – a isto se chama de decaimento. Existem três tipos de radiações nucleares que são denominadas *alfa*, *beta* e *gama*.

A radiação da partícula *alfa* é a emissão de um núcleo inteiro de hélio estável, de dois prótons e dois nêutrons. A radiação *gama* compreende a emissão de um fóton, ou seja, um *quantum* de energia da radiação eletromagnética – *quantum* é a quantidade fundamental de energia. A radiação *beta*, por sua vez é a emissão de um elétron ou pósitron pelo núcleo: o pósitron é a antipartícula do elétron, sendo, portanto, semelhante a este, mas com carga elétrica positiva. A radiação *beta* além do elétron ou do pósitron, emite consigo um neutrino – ou um antineutrino, que seria sua antipartícula¹³: no entanto esta partícula não era conhecida até 1933.

No decaimento beta, um núcleo radioativo A é transformado em um núcleo B ligeiramente mais leve, com a emissão de um elétron (...). A conservação de carga requer que B carregue mais uma unidade de carga positiva que A. [Agora percebemos que o processo fundamental aqui é a conversão de um nêutron (em A) em um próton (em B), mas lembre-se que em 1930 o nêutron ainda não havia sido descoberto.] (GRIFFITHS, 2004, p.20) [tradução nossa]¹⁴.

13 Partículas e antipartículas são partículas semelhantes em várias características que os físicos mapeiam, mas possuem cargas contrárias. No caso os neutrinos não possuem cargas e há suspeitas que possam ser partículas majoranas – cuja antipartícula são as próprias partículas. Os neutrinos são emitidos em decaimentos betas com a emissão de pósitrons (antipartícula do elétron) e os antineutrinos são emitidos em decaimentos betas com a emissão de elétrons.

Basicamente, o decaimento beta pode ser de três tipos: o primeiro em que um nêutron se decompõe em um próton no núcleo, emitindo um elétron e um antineutrino. Ou ainda em que um próton se decompõe em um nêutron no núcleo, emitindo um pósitron e um neutrino. É possível um terceiro tipo, no qual o elétron mais próximo ao núcleo (camada K) se combina com um próton surgindo assim um nêutron e liberando um neutrino (Cf. WILLIAMS, 2008, pp. 68-69).

Becquerel já havia iniciado os estudos sobre os fenômenos de radioatividade no final do século 19 e em 1914 James Chadwick detectou as emissões beta, embora o fenômeno já estivesse em estudo anos antes (Cf. JENSEN et al, 2000, pp. 2-3), como foi o caso de Becquerel em 1900 e Rutherford em 1908.

Os casos de decaimento beta representavam um desafio para o entendimento de seu processo, visto que não parecia seguir o *princípio de conservação de energia*¹⁵ (Cf. GRIFFITHS, 2004, p. 23), afinal ao detectar a energia do elétron ao ser emitido, este se mostrava alternável, representando um espectro contínuo. Pelo *princípio de conservação de energia*, deveria obter-se a energia cinética do elétron compatível com a energia existente no decaimento, o que se apresentaria num gráfico com valores discretos. As análises de outras radiações, como a alfa, mostram compatibilidade com o princípio de conservação de energia; então o decaimento beta era entendido como uma anomalia para este processo.

14 In beta decay a radioactive nucleus A is transformed into a slightly lighter nucleus B, with the emission of an electron (...). Conservation of charge requires that B carry one more unit of positive charge than A. [We now realize that the underlying process here is the conversion of a neutron (in A) into a proton (in B), but remember that in 1930 the neutron had not yet been discovered.] (GRIFFITHS, 2004, p.20).

15 O princípio de conservação de energia, é um dos princípios mais importantes da física (Cf. PAIS, 1988, pp. 107-108) no qual se fundamentam diversas teorias e o funcionamento de diversas áreas da física e da química. Segundo este princípio, a energia existente num determinado sistema analisado não pode ser aumentada ou diminuída; o cálculo que fazemos da energia deste sistema permanece constante, levando em consideração todas as transformações energéticas que ele contém. Por meio do *princípio de conservação de energia*, fundamenta-se noções científicas e técnicas, como por exemplo a geração de energia elétrica baseada em determinada matriz energética calculada a partir de seu potencial – um gerador elétrico por meio da queima de um combustível, calculada as perdas energéticas em outras formas têm o potencial de converter uma quantidade específica. Em outro capítulo analisaremos mais detalhadamente como este princípio surgiu e quais são suas metafísicas associadas.

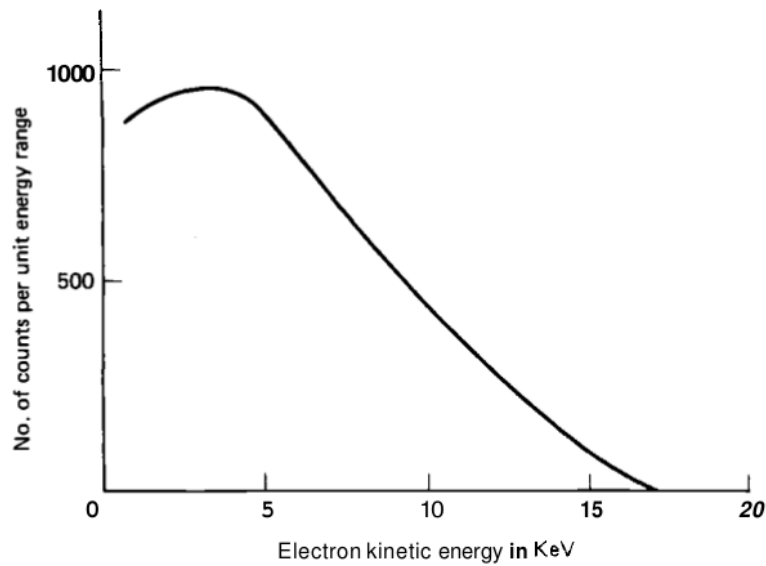


Fig. 3 (GRIFFITHS, 2004, p. 23) – Espectro da energia cinética do elétron emitido a partir do decaimento beta do trítio (isótopo do hidrogênio com um próton e dois nêutrons) em hélio.

A partir do cálculo da fórmula $E = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 + m_e^2}{2m_A} \right) c^2$ (Cf GRIFFITHS, 2004, p.

23) é possível saber a energia esperada do elétron entre o núcleo A e depois B. A variável m_A representa a massa do núcleo pai A, m_B a massa do núcleo filho B, e m_e a massa do elétron; c é a velocidade da luz (Cf. GUZZO; NATALE, 2005, p.194).

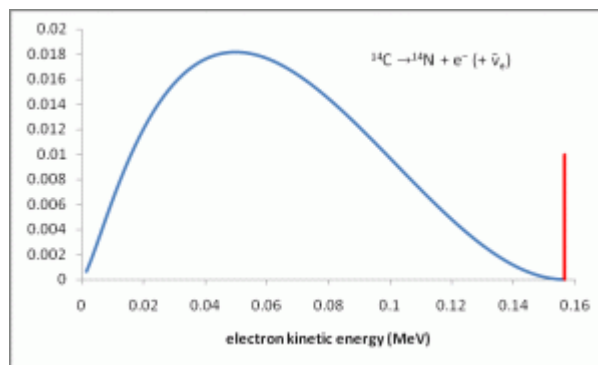


Fig. 4.¹⁶ – Espectro da energia cinética do elétron obtido no decaimento *beta* do carbono 14 produzindo nitrogênio. A linha vermelha indica a energia esperada, caso fosse emitido apenas o elétron.

¹⁶ Figura retirada do site do experimento T2K, Tokai to Kamioka, em <http://t2k-experiment.org/neutrinos/a-brief-history/>.

Outro problema vigente na época era a estabilidade nuclear, pois para manter-se neutro o átomo precisa de quantidade igual de elétrons e prótons. A quantidade maior de massa no núcleo fazia supor haver mais prótons, e, portanto, afetaria o equilíbrio atômico. Este problema em específico foi resolvido com a descoberta do nêutron em 1932 (Cf. BILENKY, 2018, p. 13).

Por volta de 1922, foram feitos experimentos que visaram estabelecer a natureza da emissão *beta*. A experiência liderada por L. Meitner apontava uma suposta ação de elétrons na parte eletrônica e outros “elétrons primários do núcleo” (LAKATOS, 1979, p. 208). As experiências conduzidas por C. D. Ellis sugeriam que os elétrons eram primários (Ibid.). Segundo Lakatos (1979), apesar de ambas teorizações levantarem hipóteses, não foram conclusivas em explicar o fenômeno.

De acordo com a Srta. Meitner, os elétrons eram, em parte, elétrons primários do núcleo e, em parte, elétrons secundários da envoltória eletrônica. De acordo com o Sr. Ellis, eram todos elétrons primários. Ambas as teorias continham sofisticadas hipóteses auxiliares, mas ambas predisseram fatos novos. Os fatos preditos se contradisseram uns aos outros e o testemunho experimental sustentou Ellis contra Meitner. (LAKATOS, 1979, p. 208).

Durante algum tempo essa inexplicável inconsistência de dados, a respeito da conservação de energia, foi entendida como uma perda de energia do elétron, no entanto a continuidade das medições logo dissolveu esta possibilidade ainda na década de 1920:

Por muitos anos os espectros β contínuos foram interpretados como o resultado da perda de energia dos elétrons no alvo. Entretanto, em 1927 Ellis e Wooster realizaram um experimento crucial de decaimento β calorimétrico. Eles mediram a energia total (...) que foi colocada dentro de um calorímetro. Para o decaimento β de ^{210}Bi , a liberação total de energia é $Q = 1,05 \text{ MeV}$. No experimento de Ellis e Wooster, verificou-se que a energia média por um decaimento β é igual a $(344 \pm 34) \text{ keV}$, que está em concordância com a energia média dos elétrons (390 keV). **Desta forma, ficou provado que a energia transportada pelo elétron do decaimento β era menor que a energia total desprendida** (BILENKY, 2018, p. 11) [grifos e traduções nossas]¹⁷.

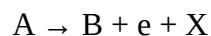
17 For many years continuous β spectra were interpreted as the result of the loss of energy of electrons in the target. However, in 1927 Ellis and Wooster performed a crucial calorimetric β -decay experiment. They measured the total energy (...) which was put inside of a calorimeter. For the β -decay of ^{210}Bi the total energy release is $Q = 1.05 \text{ MeV}$. In the Ellis and Wooster experiment it was found that the average energy per one β -decay is equal to $(344 \pm 34) \text{ keV}$ which is in an agreement with the average energy of the electrons (390 keV). Thus, it was proved that the energy carried by the β -decay electron was smaller than the total released energy (BILENKY, 2018, p. 11).

Segundo Bilenky (2018, pp. 11-12), havia duas possibilidades que poderiam explicar os dados. A primeira seria assumir que uma partícula não detectada é produzida, enquanto a segunda reconhecer que a energia no decaimento beta não era conservada.

Bohr, que já trabalhava no uso estatístico do princípio de conservação de energia (Cf. LAKATOS, 1979, pp. 208-209) passou a entender que o decaimento beta violaria o princípio de conservação de energia (Cf. GRIFFITHS, 2004, p. 23); ao menos da sua forma clássica. Para entender o posicionamento de Bohr é necessário saber que ele pertencia a outro Programa de Pesquisa que se desenvolvia: a Mecânica Quântica. A Mecânica Quântica fundamentava-se cada vez mais em revisões dos modelos físicos clássicos, visto que os mesmos modelos não funcionavam dentro da perspectiva subatômica. O pleno desenvolvimento da Mecânica Quântica, enquanto um novo Programa de Pesquisa, encorajava o questionamento de bases mais clássicas.

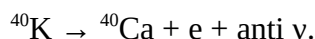
A trajetória de Bohr sobre a interpretação, por vezes negativa, sobre o princípio de conservação de energia foi no mínimo curioso: inicialmente, por volta de 1924, sugeriu a substituição do princípio de conservação de energia por um modelo que explicasse de uma forma estatística (Cf. LAKATOS, 1979, p. 208) – Bohr aludia prudencialmente que não se podia desistir do princípio enquanto não houver dados, mas que *poderia haver* surpresas neste assunto futuramente (Cf. PAIS, 1988, p. 313); posteriormente afirmou que tal lei deveria ser substituída no campo da física nuclear (Cf. LAKATOS, 1979, p. 209). Em 1932 Bohr tinha a esperança na falha do *princípio de conservação de energia* (Cf. PAIS, 1988, p. 317).

Wolfgang Pauli, um físico austríaco, teria postulado a presença de uma partícula, baseado na concepção que, ao existir tal partícula, ela explicaria o decaimento do núcleo *A* para *B* mantendo o princípio de conservação de energia. Como Guzzo e Natale demonstram (Cf. GUZZO; NATALE, 2005, p.195), tal processo poderia ser descrito como:



Sendo “*A*” o núcleo antes do decaimento, “*B*” o núcleo após o decaimento mais a emissão de um elétron “*e*” e *X* uma partícula sem massa e indetectável aos equipamentos da época (Cf. Ibid., p. 195).

Como exemplo, poderíamos descrever o decaimento de potássio em cálcio, no qual o Potássio decai em Cálcio emitindo elétron e um antineutrino, representado pela letra grega ν :



Justamente por conta do problema da conservação de energia no decaimento beta, tal partícula foi proposta: Wolfgang Pauli buscou solucionar o desajuste em relação à quantidade de energia emitida durante a emissão beta e a sugestão de uma partícula, sem massa e sem carga, salvaria o *princípio de conservação de energia* (Cf. FERMI, 1962, p. 540). A sugestão de uma partícula com estas características, além de preservar o *princípio conservação de energia*, estaria embasada no *princípio de conservação do momento angular* (Cf. DAVIS JR, 2002, p. 59).

Em uma carta destinada a uma conferência sobre radioatividade Pauli escreveu:

Caros senhores e senhoras radioativos, encontrei uma saída desesperada em relação às estatísticas “erradas” dos núcleos N- e Li-6, assim como ao espectro β contínuo, a fim de salvar a “lei da alternância” das estatísticas e da lei da energia. (...)

Admito que minha saída talvez não pareça muito provável, a priori, **visto que, provavelmente os neutrons já teriam sido encontrados há muito tempo, se eles existirem**. Mas só quem desafiar ganha, e a seriedade da situação em relação ao contínuo do espectro β é iluminada pelo meu honorável antecessor, o Sr. Debye, quem recentemente disse em Bruxelas: “Oh, é melhor não pensar sobre isso em tudo, como com novos impostos”. É necessário, portanto, discutir seriamente todo caminho para a salvação. - Assim, caros radioativos, examinem e julguem (...) (PAULI, apud PAIS, 1988, p. 315) [grifos e traduções nossas]¹⁸.

Para salvar o princípio de conservação da energia, a proposta de Pauli chocou-se com as propostas existentes na Física Quântica que tinha Niels Bohr como um dos importantes cientistas a defendê-la. Pauli teria agido de forma corajosa ao admitir uma partícula ainda não detectável, embora essa ousadia seja considerada por Lakatos (1979) como decorrência de “méritos metodológicos” ou ainda um “anseio mefistofélico”.

18 Dear radioactive ladies and gentlemen, I have come upon a desperate way out regarding the “wrong” statistics of the N- and the Li 6-nuclei, as well as to the continuous β -spectrum, in order to save the 'alternation law' of statistics and the energy law. (...) I admit that my way out may not seem very probable a priori since one would probably have seen the neutrons a long time ago if they exist. But only he who dares wins, and the seriousness of the situation concerning the continuous β -spectrum is illuminated by my honored predecessor, Mr. Debye, who recently said to me in Brussels: “Oh, it is best not to think about this at all, as with new taxes”. One must therefore discuss seriously every road to salvation.—Thus, dear radioactive ones, examine and judge(...) (PAULI, apud PAIS, 1988, p. 315).

Não é muito difícil entender o problema que eles tinham e perceber a **ousadia** de Pauli. **A experiência mostrava um núcleo A decaindo num núcleo B mais um elétron. Nada mais era visto.** Mantendo o núcleo pai A em repouso, isto é, com velocidade nula em relação ao laboratório, a lei de conservação de energia prediz que o núcleo B e elétron aparecerão movimentando-se com a mesma direção e sentidos opostos, afastando-se do ponto onde se encontrava A. (Cf. GUZZO; NATALE, 2005, p. 194) [grifos nossos].

Pauli chegou a cogitar que sua solução não fosse definitiva, embora defendesse que devia ser verificada, ou refutada por completo:

(...) Pauli acrescenta: “pensamos sobre uma falha da lei de energia no caso da ideia de nêutrons possa estar errada. Não que ele parasse de pensar em sua própria proposta”.

Um mês depois, ele escreveu a Klein: “Eu não acredito que a existência de nêutrons é definitiva, mas acho que essa hipótese deveria ser seriamente checada ou definitivamente desaprovada. Eu ficaria muito feliz se o balanço de dinâmica dos processos individuais β pudesse ser explorado de maneira direta. A dificuldade reside, é claro, na determinação do momento do átomo de recuo. Isso definitivamente esclareceria a existência de nêutrons. Mas como proceder na prática?” (PAIS, 1988, p. 316) [tradução nossa]¹⁹.

A partir de 1933, Enrico Fermi, utilizou as descrições de Pauli e começou a pesquisar sobre os neutrinos, que até então era chamado de “nêutron” por Pauli. O termo “neutrino” foi cunhado por Fermi, visto que o nêutron, partícula nuclear de fato, foi descoberto em 1932 por Chadwick. Em 1934 Fermi elaborou equações que demonstravam o funcionamento do decaimento beta: ao considerar a massa do neutrino o mais próximo de zero o tornava mais conforme com os experimentos do decaimento beta (Cf. FERMI, 1962, p. 543). Atualmente os físicos entendem que há algumas forças fundamentais que são as interações da matéria²⁰: tais forças são a *força fraca, a eletromagnética, a gravitacional e a força forte*. Vale lembrar

19 (...) Pauli adds: ‘been thinking about a failure of the energy law in case the neutron idea might turn out to be wrong’. Not that he stopped brooding about his own proposal.

A month later he wrote to Klein: “I do not believe that the existence of neutrons is definite, but do think that this hypothesis should be seriously checked or definitely disproved. I would be very happy if the momentum balance of individual β -processes could be explored in a direct way. The difficulty lies of course in the determination of the momentum of the recoil atom . that would definitely clear up the existence of neutrons. But how to proceed in practice?” (PAIS, 1988, p. 316).

20 A atuação da força fraca está presente, por exemplo na radiação beta e corresponde à força que emite partículas do núcleo. Esta por sua vez está incorporada à força elétrica, numa só força chamada de eletrofraca. (Cf WILLIAMS, 2008, p. 183-184) A força forte é a que mantém o núcleo unificado, *grosso modo*. A eletromagnética explica os fenômenos eletromagnéticos e a gravitacional seria interação com maior de alcance; porém a mais fraca de todas; embora ainda não quantizada de forma a ser explicada por alguma versão quântica. (Ibid., pp. 186-187).

que cada uma das forças fundamentais é explicada dentro de alguma das teorias da física atualmente (Cf. GRIFFITHS, 2004, p. 55), sendo a *interação fraca* introduzida por Fermi em 1933.

Ainda em 1932 Bohr acreditava em uma falha do princípio de conservação, tendo escrito uma carta para Rutherford demonstrando confiança em futuramente resolver a respeito deste assunto (Cf. PAIS, 1988, p. 317). É importante citar que a controvérsia entre Bohr e Pauli gira em torno da manutenção do princípio de conservação de energia, visto que a proposta do neutrino permite manter o princípio mencionado em funcionamento. Em 1933, Pauli discorda do posicionamento estatístico de Bohr sobre o princípio de conservação de energia, como apresentado por Ellis durante a Conferência de Solvay (Cf. PAIS, 1988, p. 318).

Até 1936, as hipóteses de Bohr tiveram sobrevida: embora em 1933 ele já afirmasse de forma cautelosa que sem dados experimentais não poderíamos desistir das leis, mas acreditava que surpresas poderiam vir (PAIS, 1988, p. 319). É importante trazer à tona que Paul Dirac havia criticado a ideia de neutrino no período de 1936 (LAKATOS, 1979, p.212): Dirac sugeria que o decaimento beta era uma evidência contra a ideia tradicional do princípio da conservação de energia. A crítica de Dirac, por exemplo, se dirigiria à suposta inobservabilidade do neutrino.

Em 1936, Bohr finalmente partiria em defesa do neutrino (PAIS, 1988, p. 320), contrariando a crítica de Dirac; dissolvendo assim o questionamento sobre o princípio de conservação de energia no caso do decaimento beta.

Observe-se que as razões para dúvidas sérias no tocante à rigorosa validade das leis da conservação no problema da emissão dos raios beta dos núcleos atômicos foram agora em grande parte removidas pelo acordo sugestivo entre a prova experimental, que aumenta rapidamente, tocante aos fenômenos dos raios beta e as consequências das hipóteses do neutrino de Pauli, tão notavelmente desenvolvidas na teoria de Fermi (BOHR, 1936, *apud* LAKATOS 1979, p. 212).

Com o desenvolvimento teórico de Fermi, o neutrino seria entendido como relacionado à força eletrofraca, presente no núcleo. Lakatos (1979) afirma que, neste ponto, Fermi começou um novo programa de Mecânica Quântica, explicando o decaimento beta por meio de outros produtos da física.

O criativo Fermi juntou todas essas ideias (o neutrino, a descoberta do nêutron, a Mecânica Quântica, criação e destruição de partículas) numa única teoria para descrever o decaimento beta. Usando sua teoria, Fermi demonstrou que poderia descrever o espectro de energia do decaimento beta

para o caso de massa nula ou muito pequena em relação à massa do elétron. A teoria de Fermi também é capaz de descrever como deve ser a modificação do espectro em questão quando o neutrino possui uma pequena massa (Cf. GUZZO; NATALE, 2005, p.196).

Em 1956 através de um engenhoso experimento montado por Frederick Reines e Clyde Cowan, detectaram-se neutrinos originados num reator nuclear, num projeto que eles mesmos chamaram de Projeto Poltergeist, em alusão à detecção de uma partícula até então considerada “fantasma”, por sua quase impossível observação. Foi utilizado o reator nuclear de Savannah River Site no estado de Carolina do Sul, nos EUA, para a produção de cerca de 10^{13} antineutrinos por centímetro quadrado por segundo.

Os antineutrinos são produzidos em um decaimento β do reator de núcleos, ricos em nêutrons, produtos da fissão de urânio e plutônio. As energias dos antineutrinos de um reator são menores que ~ 10 MeV. Por volta de $2,3 \times 10^{20}$ antineutrinos por segundo foram emitidos pelo reator de Savannah River. O fluxo de $\bar{\nu}$ nos experimentos de Reines e Cowan foi de cerca de $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (BILENKY, 2018, p. 25) [tradução nossa]²¹.

Este experimento foi primeiramente idealizado por Bruno Pontecorvo, físico italiano, em 1946: onde o neutrino, ao passar num tanque com isótopo de cloro 37, seria detectado gerando argônio 37. No experimento de Reines e Cowan utilizaram cloreto de cádmio (Cf. BILENKY, 2018, p. 26) ocasionando, *grosso modo*, clarões luminosos conhecidos como efeito Cherenkov, capturados por fotomultiplicadores. Ao utilizar um reator nuclear para gerar neutrinos, eles puderam ser, desta forma, “observados” no experimento descrito que visava sua captação.

(...) capturando neutrinos com a reação: $^{37}\text{Cl} + \nu_e \text{ Ar } ^{37}\text{Ar} + e^-$. O pequeno trabalho de Bruno Pontecorvo foi bastante detalhado, e o método que ele descreveu, removendo o argônio fervendo o tetracloreto de carbono e contando ^{37}Ar em um contador cheio de gás, tem muitas semelhanças com as técnicas que eu eventualmente usei.

(...) No método Pontecorvo, a captura de neutrinos no ^{37}Cl faz com que o ^{37}Ar , um isótopo radioativo que decai de volta para ^{37}Cl pelo inverso do processo de captura com uma meia-vida de 35 dias. O limiar para a reação de captura é de 0,814 MeV, o que significa que neutrinos com energias de menos de 0,814 MeV não serão capturados. Existem duas fontes potenciais de neutrinos, reatores de fissão e o Sol, ambos sugeridos como possíveis

21 Antineutrinos are produced in a reactor β -decays of neutron-rich nuclei, products of the fission of uranium and plutonium. The energies of antineutrinos from a reactor are less than ~ 10 MeV. About 2.3×10^{20} antineutrinos per second were emitted by the Savannah River reactor. The flux of $\bar{\nu}$'s in the Reines and Cowan experiment was about $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (BILENKY, 2018, p. 25).

fontes por Pontecorvo (1946). (DAVIS JR, 2002, pp. 59-60) [tradução nossa]²².

Embora o histórico do neutrino comece como uma solução do decaimento beta, e depois perpassa pela criação de um programa que relate as interações fundamentais, como foi iniciado por Fermi, sua história não fica restrita a estes pontos. A seguir faremos uma descrição a respeito de mais desdobramentos acerca de tal partícula.

Há três tipos²³ de neutrinos existentes; o neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau. Cada tipo leva o nome da partícula em que está envolvida em sua emissão. Todos os neutrinos são *léptons*, com o elétron, o tau e múon. Os léptons são partículas elementares que não sofrem ação da força forte – o que é responsável pela manutenção de partículas ao núcleo atômico. O neutrino do elétron foi o primeiro a ser teorizado – em 1930, por Pauli, quando a partícula foi proposta. O neutrino do múon foi descoberto em 1962 (Cf. BILENKY, 2018, p. 27), embora já suspeitasse de sua existência desde a década de 1940. O neutrino do tau foi teorizado na década de 1970 e descoberto em 2000 no Fermilab nos EUA; sendo que a partícula *tau* foi descoberta em 1975.

Em 1962, então, a família lépton cresceu para oito: o elétron, o múon, seus respectivos neutrinos e as correspondentes antipartículas. (...) Os léptons são caracterizados pelo fato de não participarem de interações fortes. GRIFFITHS, 2004, p. 28) [tradução nossa]²⁴.

2. Outras histórias dos neutrinos

Além da história do surgimento do conceito de neutrino, bem como sua controvérsia a respeito da manutenção do *princípio de conservação de energia*, depois sua efetiva detecção em 1956, há outros meandros históricos que valem a pena serem tangenciados. Dentre alguns dos aspectos históricos da produção científica sobre os neutrinos, mencionaremos um rápido

22 (...) capturing neutrinos with the reaction: $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. Bruno Pontecorvo's short paper was quite detailed, and the method he described, removing argon by boiling carbon tetra-chloride and counting ^{37}Ar in a gas-filled counter, has many similarities to techniques I eventually used.

(...) In the Pontecorvo method, neutrino capture on ^{37}Cl makes ^{37}Ar , a radioactive isotope that decays back to ^{37}Cl by the inverse of the capture process with a half-life of 35 days. The threshold for the capture reaction is 0.814 MeV, meaning that neutrinos with energies of less than 0.814 MeV will not be captured. There are two potential sources of neutrinos, fission reactors and the Sun, both of which were suggested as possible sources by Pontecorvo (1946). (DAVIS JR, 2002, pp. 59-60).

23 Normalmente os tipos são chamados de “sabores”.

24 By 1962, then, the lepton family had grown to eight: the electron, the muon, their respective neutrinos, and the corresponding antiparticles.(...) The leptons are characterized by the fact that they do not participate in strong interactions.(GRIFFITHS, 2004, p. 28).

histórico sobre o estudo da velocidade e do fenômeno da oscilação dos neutrinos; expostos nos itens 2.1 e 2.2.

2.1. Velocidade dos neutrinos

Em 1987 uma supernova, chamada de SN 1987A decorreu de uma estrela gigante que entrou em colapso ejetando uma enorme quantidade de material estelar, na nebulosa da Tarântula, presente na Grande Nuvem de Magalhães. A partir dessa súbita explosão uma quantidade enorme de neutrinos foi liberada, visto que as reações estelares também são responsáveis pela produção de neutrinos. Neste mesmo período um detector de neutrinos no Japão, o Kamiokande II, pôde coletar dados da detecção dos neutrinos emitidos por esta supernova. A comparação entre a chegada da luz emitida pela supernova e os neutrinos poderia sugerir uma velocidade dos neutrinos ligeiramente maior que a luz, visto que os neutrinos chegaram antes do espectro luminoso – que se confirmado em outras observações, resultaria num problema por ser contrário a um dos pressupostos mais basilares da Teoria da Relatividade Especial: a velocidade da luz no vácuo não pode ser ultrapassada. No entanto, no caso desta observação, a diferença foi possivelmente causada pelo escape de neutrinos sem interação do núcleo da estrela, antes dos fótons que seriam gerados no colapso estelar²⁵, i.e., os neutrinos puderam ser ejetados livremente enquanto a luz ainda deveria ser gerada e talvez passar por meios mais opacos.

Medidas da velocidade dos neutrinos no Fermilab, na década de 1970, já demonstravam compatibilidade com a velocidade levemente abaixo da luz (Cf. WILLIAMS, 2008, pp. 318-319).

No ano de 2007 o experimento MINOS, no Fermilab, publicou resultados de estudos com medições da velocidade dos neutrinos mostrando-se de acordo com a velocidade próxima à da luz (Cf. ADAMSON, 2007, p.072005-5). Anos mais tarde, em 2012, o sistema de medida foi reformulado e o resultado refinado, mostrando que a velocidade dos neutrinos é equivalente com uma velocidade ligeiramente menor que a da luz.

Em 2011 houve um acontecimento com grande repercussão. Neste período o CERN – Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, anteriormente conhecida como Conselho Europeu para Pesquisa Nuclear, laboratório pertencente a vários países da União Europeia –,

²⁵ Para detalhes sobre a supernova SN1987A consulte WILLIAMS, 2008, pp. 364-368.

através da experiência OPERA (Oscillation Project with Emulsion-t Racking Apparatus)²⁶ divulgou um artigo com resultado de medições no qual os neutrinos poderiam ter velocidades maiores que a luz.

A apresentação do artigo foi recebida com desconfiança por uma parcela da comunidade científica, enquanto outros pesquisadores trabalharam repentinamente com a hipótese de o neutrino possuir, de fato, velocidade supraluminosa. Tão logo o artigo foi publicado, surgiu a preocupação com a teoria da relatividade que pressupõe a velocidade da luz como limite de velocidade praticável – se a informação da velocidade do neutrino fosse correta, seria uma anomalia a ser tratada por *heurísticas*; sendo ainda, a preocupação em manter a velocidade da luz uma constante inabalada, uma proteção equivalente ao que ocorre nos processos da heurística *negativa*. Posteriormente, o CERN admitiu um erro de medida causado pelo sistema de sincronia do GPS, o que corroborou com a suspeita de boa parte da comunidade científica.

Vale lembrar que a velocidade do neutrino está condicionada a sua massa, pois contendo massa, mesmo que muito pequena, deve manter velocidade abaixo da luz. Não possuindo massa seria possível, em um cenário teórico, sua velocidade igual à da luz.

Portanto, a pesquisa sobre a velocidade dos neutrinos, bem como a de sua massa estão relacionadas, pois a determinação de uma massa dirige a uma interpretação para buscas de velocidades subluminares.

2.2. Breve histórico da oscilação dos neutrinos e os neutrinos solares

A análise histórica do desenvolvimento do conceito de neutrinos não se encerra apenas na concepção como partícula, mas também em desenvolvimentos posteriores, para uma análise acerca da prática científica envolvida ao longo de seu percurso. Neste sentido, outra importante descoberta foi a oscilação dos neutrinos. De acordo com o *modelo solar padrão*, que explica o funcionamento do Sol, bem como é capaz de prever alguns detalhes – por exemplo, a emissão de certas partículas pela atividade solar –, teoriza-se a quantidade de neutrinos que devem ser emitidos através das reações nucleares. Por este modelo, sabe-se que uma grande quantidade de neutrinos do elétron é emitida.

²⁶ O projeto OPERA é controlado com o projeto CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso – que é um projeto do CERN com o Laboratório Nacional de Gran Sasso).

No Sol, os neutrinos são produzidos em algumas seqüências de reações, as quais podem ser divididas em duas grandes seqüências. Uma delas, a CNO, é responsável por menos de 1.5% do fluxo que atinge a Terra (...). A outra grande seqüência pode ser dividida em três grupos menores. Destas reações, apenas algumas produzem neutrinos (GUZZO; VALDIVIESSO, 2005b, p. 496).

No Sol ocorre a seguinte reação que utiliza o hidrogênio:



que é capaz de liberar neutrinos. Segundo GUZZO e VALDIVIESSO as reações chamadas de pp^{27} , pep , Hep , ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$ descrevem as emissões do neutrino do elétron oriundas da fonte solar (Cf. GUZZO; VALDIVIESSO, 2005b, p. 496).

Após a quantificação teórica do fluxo emitido de neutrinos, passou-se a sua observação por detectores. O Super Kamiokande, por exemplo, entrou em funcionamento em 1996. A observação do fluxo de neutrinos solares não se reservou apenas ao final da década de 1990, tendo sido observados também em 1966 em diante. Alguns exemplos de detectores que ao longo de algumas décadas analisaram o fluxo de neutrinos solares são o Super Kamiokande²⁸, o SAGE (Soviet-American Galium Experiment), Observatório de Sudbury e Gallex (Cf. GUZZO; VALDIVIESSO, 2005b, p. 497).

Quando os detectores projetados para estudar os neutrinos solares – que se acreditava ser em grande parte emitidos como neutrinos dos elétrons – entravam em prática, mostravam um resultado abaixo do previsto. Este tipo de detecção representa um problema, que pode ser descrito da seguinte forma: ou é um problema do modelo que teoriza sobre como o Sol funciona, ou é um problema da medição – e talvez como essa medição poderia não estar de acordo com o que ocorre – ou ainda haveria um problema em relação aos comportamentos dos neutrinos. (Cf. GUZZO; VALDIVIESSO, 2005b, p. 496).

A *oscilação dos neutrinos* propõe que a quantidade de *neutrinos do elétron* detectados abaixo do esperado, através do modelo solar padrão, deve-se a mudança de tipo: como os detectores antigos estavam prontos para capturar um tipo específico, o *neutrino do elétron*, então havia déficit na detecção. Neste aspecto, oscilariam entre os tipos de *neutrino do elétron*, *neutrino do tau* e *neutrino do múon*. A primeira proposta de *oscilação de neutrinos* foi feita por Bruno Pontecorvo em 1957 e detectada em 1998 com os dados obtidos

27 Mais detalhes sobre as reações acima listadas podem ser acompanhados em BERGER, V. et al, 2012, pp. 46-48.

28 Que é um aperfeiçoamento do Kamiokande. O Super Kamiokande utiliza um grande tanque com água ultrapura, capaz de produzir, em determinadas situações, luminosidades do efeito Cherenkov. O tanque é rodeado de milhares de fotomultiplicadores e está abaixo do solo a 1 km, situado numa antiga mina.

pelo Super Kamiokande e do SNO – Sudbury Neutrino Observatory – no Canadá, em 2002 (Cf. Ibid., 2005b, p. 496) e, posteriormente com o projeto OPERA do CERN.

A *oscilação de neutrinos* seria colocada como uma combinação entre tipos de neutrinos com determinadas características diferentes.

O sentido de estado misto que exploramos aqui é o de *superposição de estados quânticos*. Ou seja, o que “vemos” e identificamos como o neutrino ν é nada mais do que uma superposição dos neutrinos físicos. (Ibid., 2005b, p. 498).

A combinação entre características do neutrino pode ser descrita como estados em que os neutrinos podem assumir de acordo com a expressão dada pela matriz:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Fig. 5 – matriz que representa a mistura de características dos neutrinos (Cf. Ibid., 2005b, p. 498), sendo U coeficientes de mistura, indicando os estados quânticos da partícula e ν representa neutrinos físicos com massas m .

Guzzo e Valdivieso afirmam que não há como determinar simultaneamente os dados de massa e tipo (GUZZO; VALDIVIESSO, 2005b, p. 498).

Em torno de 2001, após anos de observações de diversos detectores com lacunas das quantidades previstas dos neutrinos solares de um sabor específico, a hipótese de Pontecorvo finalmente foi aceita, como já citado, e fundamentada com as detecções dos observatórios de Sudbury e Super Kamiokande. Sabia-se, portanto, que neutrinos poderiam oscilar entre *neutrino do elétron*, do tau e do múon conforme vagam pelo espaço²⁹: e uma das suspeitas que este processo poderia ser induzido por sua massa, o que é irônico para uma partícula que inicialmente foi proposta como sendo *sem massa*. (Cf. GUZZO; VALDIVIESSO, 2005b, p.497).

Outro fenômeno interessante a citar é o efeito URCA, descrito por Mario Schönberg, físico brasileiro, e George Gamow; onde a emissão de neutrinos ocasiona diminuição da energia dentro da estrela que a produziu (Cf. GUZZO; NATALE, 2005, p. 204) – o nome do fenômeno foi dado em alusão a um cassino que funcionava no Rio de Janeiro, onde Gamow e

29 Mais detalhes sobre oscilação dos neutrinos ver também em SOLER, F. et al (orgs) Neutrinos in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology, Boca Raton: CRC Press (2009).

Schönberg afirmavam que o dinheiro tinha capacidade de sumir tão depressa da mesa assim como a energia escapava com os neutrinos da estrela.

3. Considerações lakatosianas acerca da história dos neutrinos

Em um dos pontos já expostos no nosso primeiro capítulo, sobre a filosofia lakatosiana, mostramos como uma análise baseada na metodologia de programas de pesquisas necessitam de um olhar historiográfico, embasado numa visão epistemológica. Baseado nessa premissa, fizemos um levantamento histórico do surgimento do conceito de neutrino, bem como sua detecção, a controvérsia envolvida em sua proposta inicial e os desdobramentos posteriores sobre suas características peculiares.

De acordo com a história do estudo dos neutrinos, podemos delinear que sua proposição encerra a agência de heurísticas de um PPC, pois a proteção de um dos princípios (como o princípio de conservação de energia), conforme explicamos, evidencia decisões metodológicas. Neste sentido, é possível demarcar que o nascimento do neutrino está envolvido em algum tipo de PPC, no qual propomos o *princípio de conservação de energia* como possível participante do *núcleo duro*.

Em contrapartida, estabelecemos que, conforme afirma a teoria científica lakatosiana, há disputa entre PPCs concorrentes, o que pode ser demonstrado pela atitude de Niels Bohr (e outros) em propor alterações severas na forma conhecida do princípio de conservação de energia – visto que o cientista pertenceu a outro *Programa* que estava em franca construção, que era a Mecânica Quântica. É interessante destacar como houve diversas problematizações a respeito do neutrino, enquanto uma partícula de difícil detecção – caso apontado, por exemplo, por Dirac.

A controvérsia entre Wolfgang Pauli, que concebeu a partícula e Niels Bohr, defensor de uma nova formulação do princípio de conservação, encerra em si um debate rico do início do século XX, que também suscitou novos caminhos: como ocorrido com Fermi, ao adotar a ideia de tal partícula e desenvolver um novo programa dentro da física. Com este histórico do estudo dos neutrinos, endossamos como o desenvolvimento dos cálculos a respeito da atuação dos neutrinos, por Fermi, representam o nascimento de outro PPC – que Lakatos afirma ser o PPC da física de interações, com a fundamentação, por exemplo, do que é a *força fraca*.

O posterior reconhecimento de Bohr acerca da manutenção do princípio de conservação de energia, bem como a detecção do neutrino em 1956, fortaleceu mais a presença desse elemento teórico, o neutrino, em *programas* bem estabelecidos ou em crescimento.

A descoberta de outros tipos de neutrino, sua oscilação e aumento de detectores – que perpassou por algumas gerações de aparatos desde a detecção de neutrinos solares e, posteriormente, de outros tipos, como também a observação de neutrinos da supernova SN 1987A – ajudou aos cientistas a compreensão cada vez mais profunda desta partícula e a atuação dos programas ao qual tal elemento teórico foi ou é constituinte.

Como uma análise lakatosiana pressupõe o aspecto histórico associado ao epistemológico para levantamento das partes constituintes do programa, faremos a seguir no próximo capítulo um levantamento historiográfico e epistemológico do *princípio de conservação de energia*.

CAPÍTULO III – O princípio de Conservação de Energia

1. Apresentação

O princípio da conservação de energia pode ser considerado como um pressuposto que fundamenta uma grande quantidade de teorias dentro das Ciências; auxilia a compreensão na Química e na Física sobre os processos de transformações de energia, bem como orienta o entendimento da nossa natureza.

O desenvolvimento da ideia de um princípio da conservação de energia não se deu de forma instantânea: seu desenvolvimento perpassou muitas mentes e muitas formas de se atribuir um padrão de constância na natureza – foi um processo histórico.

Desde a antiguidade, filósofos pensaram sobre a natureza e certas permanências em oposição as mudanças incessantes, mostradas pelos sentidos. Essa ideia básica, de forte cunho metafísico, esteve presente nesses primeiros filósofos.

A concepção de que a “energia num determinado sistema não pode ser criada e nem destruída e sim modificada”, ou ainda “que num sistema específico a quantidade de energia permanece” – como é essa aceção mais moderna – não foi desenvolvida por um só cientista. Também não implica apenas a ideia de uma simples transformação de um tipo de energia em outra; como veremos. Em alguns momentos, a concepção de um princípio, que declare a conservação de energia em sistemas específicos, foi entendido como uma quantidade de força preservada num sistema, ou ainda, em fenômenos.

Neste sentido, falaremos da multiplicidade de cientistas, filósofos, engenheiros que formularam experimentos e conceitos que, ao longo do amadurecimento das concepções científicas, geraram o que hoje chamamos como o *princípio da conservação de energia*: perpassando por conceitos como *vis viva* de Leibniz e aos aspectos históricos como a conversão de formas de energia.

A ideia de que a energia se transforma dentre tipos variados foi elaborado longamente entre diversas áreas, dos quais podemos destacar: James Watt com a transformação térmica em cinética, Alessandro Volta com a transformação química em elétrica, Oersted de magnética a elétrica, Faraday de magnética para elétrica e Joule de elétrica para térmica.

Se, por um momento da história temos cientistas trabalhando em conceitos de alterações de tipos de energia, houve também a concepção de uma força que permaneceria entre sistemas, como é o caso da *vis viva* de Leibniz. Em última instância é necessário verificar uma *ontologia do princípio de conservação*.

Este é um capítulo cuja metodologia é o levantamento historiográfico do conceito de *conservação de energia*. Faremos exposições dos conceitos existentes em Descartes e Leibniz, bem como dos cientistas citados. Por fim, faremos uma análise a respeito da possibilidade deste princípio fazer parte do *núcleo duro* do programa envolvido na concepção do conceito de *neutrino*.

2. Conservação de Energia e múltiplos Programas de Pesquisa

Ao verificar o conteúdo semântico de qualquer lei de conservação, uma das primeiras coisas que podemos notar é a sua clara referência a uma busca por padrão. A busca de padrão como uma procura científica pode ser estabelecida historicamente desde os primeiros filósofos da antiguidade, perpassando por toda a história das ciências, como já afirma Ponczek em seu “*Deus ou seja a natureza*” (Cf. PONCZEK, 2009, p. 123). No entanto, a concepção pontual de um *princípio de conservação de energia* tem uma complexa e específica história, no qual se dá depois de diversos meandros entre concepções que explicavam fenômenos físicos e químicos.

Em *Energy, Force, and Matter – the conceptual development of Nineteenth-Century Physics*, Harman analisa o conceito de energia nas ciências da física e a ideia de conservação. Demonstra como a ideia de *energia* veio a ocorrer devido a uma “nova e unificada moldura”, que forneceu um modo de ver os fenômenos da natureza sob a uma ótica da mecânica (HARMAN, 1982, pp. 1-2).

Segundo Harman (1982) a formulação do *princípio de conservação de energia*, na década de 1840, ocorreu junto com a unificação de áreas da física. Tal façanha relacionou os fenômenos do calor, luz, eletricidade e magnetismo dentro de posturas mecânicas. Afirma, por exemplo, que Oersted e Faraday trabalharam na questão da conversão entre magnetismo e eletricidade, enquanto Joule estabeleceu a equivalência do calor e do trabalho mecânico; já Helmholtz demonstrou a relação entre mecânica, calor, luz, eletricidade e magnetismo,

resultando numa conservação de energia como um viés mecânico e matemático. Tal viés seria embasado numa visão mecânica da natureza. (Cf. *Ibid.*, pp. 3-4).

Para Harman, durante o século XIX o estudo entre mecânica e calor foi muito importante para o desenvolvimento do *princípio de conservação de energia* (Cf. *Ibid.*, p. 4). Afirma que, no entanto, durante o século XVIII os físicos consideraram fenômenos mecânicos e não mecânicos como coisas distintas³⁰. Porém, destaca Harman, em 1840 os trabalhos de Joule e a “formulação do *princípio de conservação de energia* estabeleceram a unificação dos processos mecânicos e térmicos”. (HARMAN, 1982, p. 4).

Harman deixa claro que no século XVIII, os desenvolvimentos do “estudo do magnetismo (...) e da eletricidade eram muito qualitativas”; “mas ao fim do século houve um tratamento matemático”. (*Ibid.*, pp. 14-15).

No artigo “A conservação de energia como exemplo de descoberta simultânea”, presente no livro “A tensão essencial”, Thomas Kuhn faz uma análise como a noção de *conservação de energia* surgiu praticamente de forma simultânea, embora em diversas vertentes científicas e com autores que, em muitos casos, não tiveram amplo acesso entre alguns trabalhos científicos elaborados por seus contemporâneos.

No início de seu artigo, Kuhn demonstra como por volta dos anos 1840 quatro cientistas chegaram a conclusões sobre algum nível deste *princípio* (Cf. KUHN, 2011, pp. 89-90) e relata como boa parte dos cientistas analisados trabalharam em problemas de *conversão de energia*, que é a possibilidade de conversão de energia em outro tipo (Cf. *Ibid.*, p. 90). Cita basicamente Mohr, Grove, Faraday, Liebig, Mayer, Joule, Colding, Helmholtz, Carnot, Séguin, Holtzmann e Hirn que através de seus trabalhos chegaram a alguns pontos ao que hoje temos como *princípio de conservação*. Argumenta, por exemplo, que embora possamos descrever essa suposta simultaneidade, as descobertas são pontuais em suas áreas e não tão gerais; salvo um ou outro caso e por isso não deve ser “tomada ao pé da letra” (KUHN, 2011, p. 94).

30 É interessante citar a ressalva de Harman a respeito do termo física newtoniana, que ele sugere como um termo incorreto para afirmar as teorias anteriores ao século XX.

Harman (1982) argumenta que “a imagem da física clássica como algo monolítico, formando uma visão de mundo unificado, ignora os desenvolvimentos no século XVII e XIX” (HARMAN, 1982, p. 11). Advoga “clássico” como um termo mais apropriado, que, segundo ele demonstrariam a mudança entre as teorias da Física desenvolvidas nos séculos anteriores e as do século XX.

É necessária grande habilidade para selecionar e lidar com excertos para, por exemplo, fazer a defesa da teoria dinâmica do calor empreendida por Mohr se mostrar semelhante à discussão sobre as limitações intrínsecas do motor elétrico conduzida por Liebig. **Um diagrama das passagens que se sobrepõe nos artigos elaborados pelos pioneiros da conservação da energia seria algo como um jogo de palavras inacabado.**

(...) Em suma, embora indique o tema central deste artigo, a expressão “descoberta simultânea” não o descreve, caso seja tomada ao pé da letra. Mesmo para o historiador familiarizado com os conceitos envolvidos na conservação de energia, os pioneiros não comunicam todos a mesma coisa. Naquela época, em geral não havia nenhuma comunicação entre eles. **O que percebemos em seus trabalhos não é realmente uma descoberta simultânea da conservação de energia, mas, ao contrário, a rápida e por vezes desordenada irrupção de elementos conceituais e experimentais com base nos quais a teoria seria em breve composta.** (KUHN, 2011, pp. 93-94) [grifos nossos].

Kuhn argumenta inicialmente que desses “elementos” (Ibid., 2011, p. 94) não se pode anotar com precisão da razão deles passarem a ser em tão pouco tempo “acessíveis e reconhecíveis” (Ibid., p. 95), ao menos numa primeira visão. A partir de então, Kuhn cita fatores que, em seu levantamento, puderam influenciar a confluência das pesquisas. Tais fatores eram “‘disponibilidade dos processos de conversão’, ‘interesse pelas máquinas’ e ‘filosofia da natureza’” (Ibid., 2011, p. 96). Dentre os fatores citados, o terceiro é mais uma suspeita levantada do que um fator mais concreto – porém poderia revelar uma fonte de conceitos *metafísicos* que orientaram as descobertas envolvidas no desenvolvimento do *princípio de conservação de energia*. Tais fatores seriam, para Kuhn, como vieses para a produção científica; embora a questão da *filosofia da natureza* seja abordada de forma um pouco mais como suspeita, em um grau de confiança menor.

É interessante também citar que Harman levanta o *princípio de conservação de energia* como um princípio de *interconversão* natural entre forças (Cf. HARMAN, 1982, p. 37).

Em relação aos *processos de conversão*, Kuhn demonstra como a invenção da pilha, por Alessandro Volta, transformando a energia química em elétrica suscitou uma série de descobertas (Cf. KUHN, 2011, pp. 96), assim como em 1820 houve a demonstração de conversão do magnetismo em corrente elétrica. Kuhn relata sobre o galvanismo, as conversões acerca da corrente elétrica em magnética, assim como a conversão térmica pela elétrica, feita por Seebeck em 1822. Kuhn deixa claro que a conversão não foi exclusiva deste período, como é o fato que houve descobertas de conversões de movimento em eletrostática

anterior a este período. No entanto, Kuhn argumenta como em torno de 1830 esses processos foram centrais em quantidade maior de pesquisas científicas (Cf. Ibid., 2011, p. 97).

De certa forma a *disponibilidade dos processos de conversão* resultaram num *modelo* de como a pesquisa científica poderia trabalhar naquele momento – o que podemos descrever como uma orientação pragmática da ciência. Esse modelo de ciência “revelou-se uma das principais condições para o aparecimento da noção de conservação de energia” (Ibid., 2011, p. 98). Kuhn alega, portanto, que a *disponibilidade dos processos de conversão* deu suporte para uma espécie de formalização teórica. Certos fenômenos obtidos laboratorialmente estavam apontando essa característica (Cf. Ibid., pp. 98-99). Mesmo aqueles que ignoraram os processos de conversão, como Carnot, Seguin, Holtzman e Hirn, segundo ele, puderam trabalhar em conceitos de *conservação de energia* baseados em trabalhos de Joule, Helmholtz e Colding.

Além de tais condições dos processos de conversão, Kuhn descreve como Mohr e Colding partiram também de uma ideia metafísica, portanto sugerindo a existência de um viés *ontológico* (Ibid., p. 99).

A importância da *disponibilidade dos processos de conversão* seria tão grande, na descrição kuhniana, a ponto que Mohr e Goove utilizarem tais tipos de conceitos de conversão para dar suporte aos seus ideais metafísicos (Cf. Ibid., p. 100). Neste sentido, o trabalho de Joule, como baseado em demonstração do *processo de conversão* foi de grande importância, conseguindo unificar o trabalho de outros autores.

Ao longo de seu ensaio, Kuhn demonstra como os processos de conversão fundamentaram as ideias de conservação, como no caso de Faraday e Grove (Cf. Ibid., p. 101), quando por exemplo, Faraday alega que uma força se cria na exaustão de outra (Cf. Ibid., p. 103). Ainda descreve que embora tais ideias de conversão tenham sido importantes, a matematização da conservação era uma tarefa de difícil solução (Cf. Ibid., p. 105). Uma das vertentes explicativas para a simultaneidade se dá no *modus operandi* da engenharia da época – e suas máquinas a vapor, que são máquinas de conversão – como a utilização de conceitos como *trabalho* (Cf. Ibid., p. 112) e *rendimento* (Cf. Ibid., p. 114).

Em relação a *vis viva* leibniziana, Kuhn alega que muitos historiadores da história ou da “pré-história” (KUNH, 2011, p. 106) da conservação de energia colocam a *vis viva* como um importante passo pioneiro; sobretudo o seu papel na *dinâmica*, que teria influenciado inclusive Helmholtz e Carnot. No entanto, sua análise se dá na simultaneidade das ideias

desenvolvidas de conservação, que ocorreu em meados do século XIX. A ideia de *vis viva* tem a importância tanto pela concepção pioneira de uma conservação, embora longe do foco kuhniano de simultaneidade, e pelo caráter metafísico que a coloca num patamar que descrevemos como mais uma fundamentação *ontológica* da *conservação de energia*³¹. A *vis viva*, embora presente em alguns pioneiros como a noção de uma força indestrutível, foi a ocorrência dos fatores mencionados que conferiu uma certa simultaneidade. Este é o mesmo argumento que utiliza sobre a influência das pesquisas da impossibilidade do moto-perpétuo: que ele descreve como um pensamento “endêmico” (Ibid., p. 123) porém insuficiente para a simultaneidade.

Na explicação kuhniana, entre *os processos de conversão e o interesse pelas máquinas* dada pelos contextos científico e tecnológico da época, há uma lacuna que deve ser explicada por um componente mais filosófico; que entendemos ser uma suposição também de ordem *ontológica*. Kuhn afirma que a *Naturphilosophie* foi supostamente um elemento de influência neste processo. A *Naturphilosophie* é o nome dado a uma tendência do *idealismo alemão*, onde um dos representantes era Schelling. A influência da *Naturphilosophie* poderia descrever um anseio *ontológico* em alguns pesquisadores na busca de uma força conservada (Cf. Ibid., 2011, p. 119-120).

Ao colocar o organismo como a metáfora fundamental de sua ciência universal, os seguidores da *Naturphilosophie* buscavam sempre um princípio unificador para todos os fenômenos naturais. Schelling, por exemplo, sustentava “que os fenômenos magnéticos, elétricos, químicos e, finalmente, até mesmo os orgânicos deviam se entrelaçar, formando uma grande associação... [que] se estende por toda a natureza”.
(...) Como um *Naturphilosoph*, Schelling sempre procurou nas ciências de sua época processos de transformação e conversão (KUNN, 2011, p. 120).

Kuhn descreve a atração de Schelling pela química e os processos de galvanização. Neste ponto, argumenta como a filosofia da natureza de Schelling poderia ser um dos processos que ajudaram a criar um contexto científico, juntamente aos *processos de conversão e o interesse pelas máquinas*. Entretanto Kuhn deixa claro que a influência da *Naturphilosophie* é uma suspeita que ajuda a explicar a simultaneidade das ideias de *conservação de energia*.

A partir da leitura do artigo de Kuhn podemos nos questionar quanto a possibilidade de uma *ontologia do princípio de conservação de energia*, devido as suas suspeitas sobre a

31 Veja a nota “40” de KUNN no referido livro “A Tensão Essencial”, página 107, em que afirma a *vis viva* ter sido enunciada por uma vasta literatura, sendo esta uma força metafísica.

influência da *Naturphilosophie*. Thomas Kuhn não demonstra ostensivamente uma referência a paradigmas. Demonstra como confluências podem ter levado para uma diversidade de trabalhos que em maior ou menor medida relacionaram-se com uma definição mais geral do *princípio de conservação*.

No entanto, podemos associar tais confluências aos conceitos kuhnianos de paradigma. Se encaramos o momento do desenvolvimento do *princípio de conservação* como envolvido em uma estrutura *paradigmática*, podemos também entender por extensão como resultado de programas de pesquisa – visto o caráter da filosofia lakatosiana poder abarcar a sistemática paradigmática com mais sofisticação.

Neste sentido, associar a multiplicidade de desenvolvimentos como fruto de Programas de Pesquisa, permite compreender como diversas pesquisas puderam aflorar, dentro de suas áreas da Ciência.

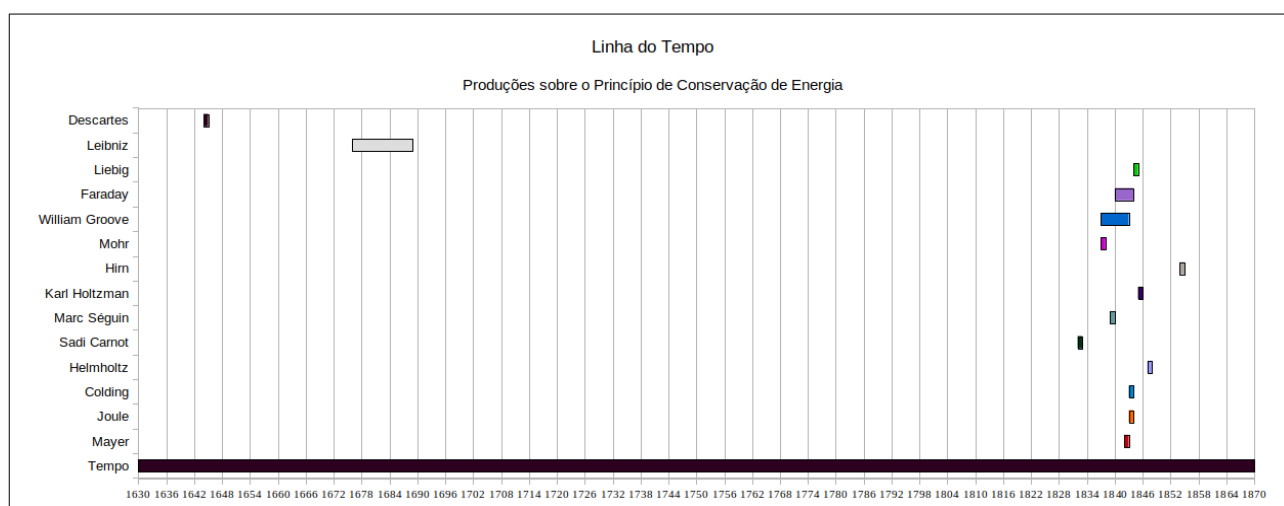


Fig. 6 – Gráfico representando aparição das ideias de *conservação de energia* entre os anos de 1630 e 1870. [Gráfico nosso].

Julgamos que o conceito lakatosiano de programa de pesquisa ajuda a ilustrar a questão da simultaneidade levantada por Kuhn: os contextos de *interesse pelas máquinas*, *disponibilidade de conversão* e a suposta influência de *Naturphilosophie* perfazem condições possíveis de programas de pesquisa. A influência da *Naturphilosophie*, descrita por Kuhn e Harman em alguns dos autores citados, delimita uma visão *ontológica* que pode indicar um arcabouço similar ao funcionamento do núcleo duro lakatosiano. Da mesma forma, a disponibilidade de conversão dada pelo desenvolvimento da engenharia e da ciência na época permitiram o que Kuhn (2011) chamou, no artigo, de pano de fundo.

No fim do século XVIII houve uma série de explicações para os fenômenos físicos, segundo Harman, muitos apelando para fluidos imponderáveis:

No final do século, foram empregados fluidos imponderáveis para explicar a eletricidade, o magnetismo, a luz e o calor. Embora muitos teóricos invocassem uma multiplicidade de fluidos para explicar esses diferentes fenômenos – um ou dois fluidos para eletricidade, um para calor, “flogístico” como o princípio imponderável da combustão – outros propuseram uma teoria unificada do éter, na qual os fluidos imponderáveis eram considerados como várias modificações do éter; Nessa visão dualista do mundo, as transformações de uma substância etérea, ativa e repelente equilibravam o poder atrativo da matéria ordinária (HARMAN, 1982, p. 14) [tradução nossa]³².

Ao passo que, durante o século XIX, explicações diversas tenham ocorrido pelos elementos que elencamos acima. A seguir veremos quais eram as pesquisas e os programas, de alguns dos cientistas envolvidos no desenvolvimento da *conservação de energia*.

Sadi Carnot, por exemplo, foi responsável pela teorização de máquinas a vapor. Carnot estabeleceu a conceitualização que a geração do trabalho na máquina a vapor depende da diferença de temperatura entre o corpo frio e o quente (Cf. HARMAN, 1982, pp. 4-5). Pode ser considerado como um dos fundadores da termodinâmica, sendo responsável pelo que conhecemos como *Segunda Lei da Termodinâmica* (Cf. PAIS, 1988, p. 106), que basicamente especifica a dinâmica da transferência de energia térmica, onde a energia térmica sempre procede do corpo mais quente para o mais frio. Carnot trabalhou a questão da eficiência das máquinas a vapor, estabelecendo que a máxima eficiência depende da diferença de temperatura no motor (Cf. ASIMOV, 1982, p. 332). Assim, como no caso das rodas d’água, que dependem da altura entre o reservatório inicial e o final, a máquina a vapor dependeria da diferença de temperatura; inclusive esta seria uma analogia que originara a sua suposição da eficiência térmica (Cf. BASSALO, 2005, pp. 21-22). Desta forma, o trabalho seria executado pela diferença entre temperaturas até o equilíbrio térmico (Cf. CARNOT, 1897, p. 49). Rudolf Clausius utilizou a teoria de Carnot para o desenvolvimento da termodinâmica e podemos

32 By the end of the century, imponderable fluids were employed to explain electricity, magnetism, light, and heat. Although many theorists invoked a multiplicity of fluids to explain these different phenomena – one or two fluids for electricity, one for heat, 'phlogiston' as the imponderable principle of combustion - others proposed a unified ether theory, in which the imponderable fluids were regarded as various modifications of the ether; in this dualistic world view the transformations of an ethereal, active, repellent substance balanced the attractive power of ordinary matter (HARMAN, 1982, p. 14).

ainda lembrar que Thomson (Lord Kelvin) utilizou o conceito de irreversibilidade do processo de dissipação térmica entre corpos, trazendo o princípio da entropia.

Mayer foi outro pensador a respeito da *conservação de energia*. Foi um médico alemão que desenvolveu interesse por questões da física, trabalhando com a questão do calor animal, causado pela oxidação. Seu estudo influenciou o desenvolvimento de outros como Helmholtz e Joule. Pesquisou o calor específico e associou o calor ao trabalho mecânico. Supôs a indestrutibilidade das forças naturais (Cf. HARMAN, 1982, p. 63).

Podemos também destacar Liebig, um químico que contribuiu para o estudo de compostos químicos na fisiologia (Cf. HARMAN, 1982, p. 41). Liebig foi responsável por inventar fertilizantes para plantas e acreditava numa *força vital* atuando nos compostos orgânicos, bem como compreendia que o calor corporal e toda a sorte de energia empregada em atividades vitais eram oriundas da oxidação dos alimentos, ocorrida no organismo (Cf. ASIMOV, 1982, p. 352).

Helmholtz interessou-se pela fisiologia e foi influenciado pela filosofia do idealismo alemão. Desenvolveu “uma formulação matemática para o *princípio de conservação de energia*” (HARMAN, 1982, p. 41). Segundo Harman (Cf. Ibid), a sua formulação do *princípio* deu-se, inicialmente, pela via da fisiologia e do calor animal – tendo sido influenciado por Liebig, que trabalhou na questão dos fenômenos químicos e físicos na fisiologia, estipulando como conversíveis e não destrutíveis.

Para Helmholtz as forças naturais dos seres vivos não seriam estritamente *dos seres vivos*. Tais forças teriam a possibilidade de transformação entre diferentes tipos forças, sem serem anuladas; embora não tenha abandonado totalmente a noção de força vital, presente em Liebig. Seu trabalho ajudou a negar a noção de um *moto-perpétuo* e essa negação estava de acordo com sua crítica a noção de força vital – pois uma força vital deveria ser autoperpetuante. A visão de Helmholtz abrangia uma noção *ontológica* de energia, que deveria ser conservada (Ibid., p. 44) e ainda negou a teoria calórica, preferindo uma visão relacionada à ideia de transmissão do calor. Para seus trabalhos com a *conservação de energia* fez uso das noções metafísicas de Kant (Cf. HARMAN. 1982, p. 43), onde há fundamentações *a priori* para as leis. Desta forma, apesar de procurar um embasamento empírico para suas asserções, considerava haver uma realidade física para a força. Fez uso de termos que podem ser correspondidos à energia cinética e potencial – que chamou de “força

viva” e “força tensional”. Sua noção de *conservação de energia* foi usada, por exemplo, contra os vitalistas (Cf. ASIMOV, 1982, p. 412).

Podemos sintetizar e definir o vitalismo como um conjunto de ideias, onde os seus pensadores propunham que seres vivos deveriam ter propriedades exclusivas e intrínsecas – como é o caso de uma força vital.

Outro importante cientista a citar foi Joule, pois seus foram de importantes para o desenvolvimento do conceito do *princípio de conservação de energia*: foram decisivos para o estabelecimento dos processos de conversão entre calor e trabalho, o que trouxe experimentação de tais processos de conversão, o que baseia o funcionamento das máquinas a vapor. Embora figure com importante para posteriores desenvolvimentos, “Joule não foi o primeiro a estabelecer o equivalente mecânico do calor (ASIMOV, 1982, p. 399) [tradução nossa]³³. Afirmou que as forças na natureza são indestrutíveis, o que nos permite concluir uma noção *ontológica* das forças na natureza.

Outros cientistas também contribuíram com a formulação do *princípio de conservação*: como Grove ao relacionar diferentes tipos de energia. Para Grove os processos de conversão foram fundamentais também (Cf. HARMAN, 1982, p. 35); Colding, carpinteiro dinamarquês também formulou uma lei de conservação (Cf. ELKANA, 1974, p. 118); Oesterd que ficou conhecido por experiências que correlacionavam eletricidade ao magnetismo – este, por exemplo, descobriu como a corrente elétrica age no magnetismo, demonstrando a correlação entre fenômeno elétrico e magnético (Cf. HARMAN, 1982, p. 30).

Oesterd teve na *Naturphilosophie* uma importante orientação: a interpretação do mundo numa natureza diante das forças. Fez uso também da noção em que as propriedades da matéria seriam criadas por “conflitos entre forças de atração e repulsão” (HARMAN, 1982, p. 31)[tradução nossa]³⁴.

Podemos ainda citar que Faraday também foi influenciado por tal filosofia, conforme nos afirma Harman (Cf. Ibid). Faraday conhecia as explicações de Oersted e Ampère a respeito da propagação das forças eletromagnéticas (Cf. HARMAN, 1982, p. 33) e tinha como parte central do seu estudo, o conceito de conversão, como nos afirma Harman (Ibid., p. 35).

33 “Joule was not the first to determine the mechanical equivalent of heat” (ASIMOV, 1982, p. 399).

34 “(...) natural phenomena in terms of a conflict between the forces of attraction and repulsion” (HARMAN, 1982, p. 31).

Portanto, a história do *princípio de conservação de energia* não repousa somente em um cientista. Em certa medida é possível afirmar que há *paradigmas* envolvidos em tais desenvolvimentos. Neste caso, preferimos supor *programas de pesquisa* atuando de formas distintas e independentes: como é o caso de alguns pensadores orientados pela *filosofia alemã da natureza*, outros por um pano de fundo relacionado ao desenvolvimento dos estudos na fisiologia e ainda, como afirma Elkana, por ambos casos. Neste sentido, estabelecer os programas de forma exata traduz um enorme trabalho historiográfico, ao passo que também se mostra como os diversos casos resultam numa gama de possibilidades de programas específicos: portanto, o termo *programa de pesquisa* é encarado aqui como estruturador de estudos que tentam tornar evidentes grandes correntes que categorizaram tais desenvolvimentos da ideia de *conservação de energia*.

A noção de como o calor pode ser representado mecanicamente na matéria também influenciou no *pano de fundo* de teorias que explicaram a conversão e a conservação de energia:

Por volta de 1840, a equivalência quantitativa de trabalho mecânico e calor foi explicitada por vários físicos e engenheiros, que calcularam o coeficiente de conversão de calor e trabalho, o “equivalente mecânico” ou “valor mecânico” do calor. A clarificação do conceito de trabalho mecânico e a demonstração da equivalência quantitativa de calor e trabalho foram fatores importantes na enunciação, demonstração experimental e conceituação matemática do princípio da conservação de energia. A asserção da equivalência de trabalho e calor trouxe explicitamente processos mecânicos para a rede de processos de conversão discutidos pelos físicos. A lei da conservação da energia forneceu uma conceituação desta moldura de explicação: um princípio universal da interconversão de forças naturais, com uma medida quantitativa de quantidades físicas conservadas. O estabelecimento da lei de conservação de energia também foi associado à enunciação da teoria mecânica do calor, a teoria de que o calor era o resultado da vibração das partículas dos corpos, que forneceu uma base explicativa para a interconversão e equivalência do trabalho mecânico. e calor.

Uma ontologia mecanicista da matéria em movimento forneceu uma base explicativa para a conversão de poderes naturais e a conservação de energia. (HARMAN, 1982, p. 37) [tradução nossa]³⁵.

35 By the 1840s the quantitative equivalence of mechanical work and heat had been made explicit by several physicists and engineers, who calculated the conversion coefficient of heat and work, the ‘mechanical equivalent’ or ‘mechanical value’ of heat. The clarification of the concept of mechanical work and the demonstration of the quantitative equivalence of heat and work were important factors in the enunciation, experimental demonstration, and mathematical conceptualization of the principle of the conservation of energy. The assertion of the equivalence of work and heat brought mechanical processes explicitly into the network of conversion processes discussed by physicists. The law of the conservation of energy provided a conceptualization of this framework of explanation: a universal principle of the interconversion of natural powers, together with a quantitative measure of conserved physical quantities. The establishment of the law of energy conservation was also associated with the enunciation of the mechanical theory of heat, the theory that

Elementos diversos, como os desenvolvimentos tecnológicos, confluências de desenvolvimento de áreas científicas distintas e determinadas ontologias foram importantes para o desenvolvimento das noções de *conservação de energia*; como foi o caso em Thomson supondo que a ação divina que poderia criar ou destruir energia, ou ainda para Faraday e Joule que entendiam a indestrutibilidade da energia como uma *providência divina* (Cf. HARMAN, 1982, p. 69).

Dentre os diversos meandros confluentes de ciências teóricas e práticas, as ideias de força e energia, que durante um tempo eram confundidas entre si, ao tomarem conceitualmente corpo definido, também ajudaram na conceituação de uma conservação de um elemento com existência específica – a energia:

A declaração de Rankine³⁶ da lei da conservação de energia em 1853 forneceu uma síntese das teorias de conservação na física. A lei da conservação da vis viva (força viva) tinha sido um princípio estabelecido da mecânica por um século, seu uso claramente distinto do significado de “força” como definido pelas leis do movimento de Newton; e Helmholtz havia enunciado seu princípio de conservação da força como uma generalização do princípio da conservação da força viva. A doutrina da convertibilidade de poderes naturais ou indestrutibilidade de forças tinha procurado formular um conceito de equilíbrio de agentes naturais, sem uma definição precisa do tipo de equivalência quantitativa prevista. A demonstração experimental de Joule da equivalência de calor e trabalho mecânico forneceu uma medida quantitativa da relação entre poderes naturais; e a afirmação de Helmholtz dos princípios matemáticos da teoria da conservação da energia havia destacado a ambigüidade da noção da indestrutibilidade ou constância da força, e a ambigüidade do termo “força” como descritiva das grandezas físicas conservadas. O uso de “energia” por Thomson resolveu essas confusões terminológicas e conceituais, e sua ênfase em diferentes manifestações de energia como formas diferentes de “energia mecânica” enfatizou o papel unificador do conceito de energia dentro de uma teoria da explicação mecânica dos fenômenos. Os argumentos de Rankine forneceram uma síntese e uma explicação conceitual dos princípios da teoria da energia, e Helmholtz ressaltou as implicações conceituais e terminológicas do novo uso ao responder à introdução de Rankine da expressão “a conservação da energia”. Embora a expressão “conservação de força” permanecesse como uma designação apropriada da indestrutibilidade e transformabilidade dos agentes naturais, referindo-se à “conservação de energia”, descrevia-se com precisão as quantidades conservadas. Dentro da estrutura de uma teoria matemática da conservação de energia, tornou-se importante expurgar a doutrina da conversão de forças

heat was the result of the vibration of the particles of bodies, which provided an explanatory basis for the interconversion and equivalence of mechanical work and heat.

A mechanistic ontology of matter in motion provided an explanatory foundation for the conversion of natural powers and the conservation of energy. (HARMAN, 1982, p. 37).

36 William Rankine, engenheiro escocês que contribuiu no desenvolvimento da termodinâmica.

da teoria física, distinguindo o princípio da energia do conceito de força como definido pelas leis do movimento de Newton (Ibid., p. 60) [tradução nossa]³⁷.

Encarando desta forma, podemos destacar os casos em que um ideal metafísico causou alguma influência, assim como estudos influenciados a partir da fisiologia e, como argumentou Elkana, os casos de ambas influências. E, neste amplo cenário, torna-se evidente como o contexto tecnológico das máquinas a vapor também foi um catalisador para diversas pesquisas acerca da *conservação de energia*, ao menos num período específico da história da *conservação de energia*: uma complexa trama de pano de fundo, ao qual o funcionamento da prática científica revelou-se um desenvolvimento análogo a processos dialéticos – onde podemos supor e reduzi-los a ações de verdadeiros e numerosos *programas de pesquisa*.

3. Descartes e os princípios cartesianos

Descartes associava o movimento com uma razão metafísica: argumentava que o movimento é causado, primariamente, por Deus. A Primeira Lei cartesiana sobre o movimento, lembra a lei newtoniana da inércia – que foi posterior.

(...) que cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. Por conseguinte, se vemos que uma parte da matéria é quadrada, ela permanecerá assim se

37 Rankine's statement of the law of the conservation of energy in 1853 provided a synthesis of theories of conservation in physics. The law of the conservation of vis viva (living force) had been an established principle of mechanics for a century, its usage clearly distinct from the meaning of 'force' as defined by Newton's laws of motion; and Helmholtz had enunciated his principle of the conservation of force as a generalisation of the principle of the conservation of living force. The doctrine of the convertibility of natural powers or indestructibility of forces had sought to formulate a concept of the balance of natural agents, without a precise definition of the kind of quantitative equivalence envisaged. Joule's experimental demonstration of the equivalence of heat and mechanical work had provided a quantitative measure of the relationship between natural powers; and Helmholtz's statement of the mathematical principles of the theory of the conservation of energy had highlighted the ambiguity of the notion of the indestructibility or constancy of force, and the ambiguity of the term 'force' as descriptive of conserved physical quantities. Thomson's use of 'energy' resolved these terminological and conceptual confusions, and his emphasis on different manifestations of energy as different forms of 'mechanical energy' stressed the unifying role of the energy concept within a theory of the mechanical explanation of phenomena. Rankine's arguments provided a synthesis and conceptual explication of the principles of energy theory, and Helmholtz underscored the conceptual and terminological implications of the new usage in responding to Rankine's introduction of the expression 'the conservation of energy'. Although the expression 'conservation of force' remained an appropriate designation of the indestructibility and transformability of natural agents, referring to the 'conservation of energy' gave a precise description of the quantities conserved. Within the framework of a mathematical theory of the conservation of energy, it became important to expurgate the doctrine of the conversion of forces from physical theory, distinguishing the energy principle from the concept of force as defined by Newton's laws of motion (Ibid., p. 60).

nada vier alterar a sua figura; e se estiver em repouso, nunca se moverá por si mesma; mas, uma vez posta em andamento, também não podemos pensar que ela possa deixar de se mover com a mesma força enquanto não encontrar nada que atrase ou detenha o seu movimento. De modo que, se um corpo começou a mover-se, devemos concluir que continuará sempre em movimento [e que nunca parará por si próprio]. Mas como habitamos uma Terra cuja constituição é de tal ordem que os movimentos que acontecem à nossa volta depressa param e muitas vezes por razões que os nossos sentidos ignoram, desde o começo da nossa vida pensamos que os movimentos que assim terminava – por razões que desconhecíamos –, o faziam por si próprios. (DESCARTES, 1997, p.76).

A quantidade de movimento, portanto, seria conservada. Essa quantidade seria equivalente ao produto da massa pela velocidade – embora a consideração algébrica seja um anacronismo.

Outro anacronismo em mv e mv^2 é o uso de símbolos em tudo. Até o cálculo ter assumido durante o século XVIII, as quantidades não eram representadas por símbolos algébricos, mas por constructos geométricos como linhas e áreas, e as relações entre as quantidades eram expressas não como equações, mas como proporções. As duas quantidades que entraram originalmente na disputa *vis viva* foram “movimento” sendo considerado o produto de volume e velocidade ou velocidade, e, seguindo Leibniz, *vis viva*, o produto de volume e velocidade ao quadrado (SMITH, 2006, p.31) [tradução nossa]³⁸.

3.1. Os princípios cartesianos

O ideal cartesiano de uma *quantidade de movimento* tem uma fundamentação teológica em sua filosofia. Para Descartes há uma influência perene de Deus para manter a matéria – o que o leva a um pressuposto de conservação de movimento e do repouso.

Esta regra, tal como a precedente, depende de facto de Deus ser imutável e de conservar o movimento na matéria por uma operação muito simples. Com efeito, Deus não o conserva como poderia ter sido anteriormente, mas sim como é precisamente no momento em que o conserva. (DESCARTES, 1997, p. 77).

É importante destacar que Descartes rompeu com as doutrinas escolásticas, embasadas nos fundamentos aristotélicos do movimento, como destaca Barra (2003):

Os Princípios podem ser encarados como a mais pretenciosa tentativa empreendida nas primeiras décadas do século XVII de suplantarem o

38 The other anachronism in mv and mv^2 is the use of symbols at all. Until the calculus took over during the 18th century, quantities were represented not by algebraic symbols but by geometric constructs like lines and areas, and relationships among quantities were expressed not as equations but as proportions. The two quantities originally entering into the *vis viva* dispute were ‘motion’ taken to be the product of bulk and velocity or speed, and, following Leibniz, *vis viva*, the product of bulk and speed squared. (SMITH, 2006, p.31).

aristotelismo escolástico enquanto uma explicação abrangente da totalidade dos mecanismos causais presente na natureza. Descartes acredita que em, pelo menos, três aspectos suas explicações suplantam o padrão explicativo da filosofia natural da tradição aristotélico-escolástica. (...) somente as causas eficientes são relevantes para as explicações físicas. Causas finais e toda sorte de considerações teleológicas devem ser banidas da filosofia natural, de tal modo que as explicações possam omitir qualquer referência a conformidade a fins e a propósitos presentes na natureza. (BARRA, 2003, *Ibid.*, p. 300).

Em 1600, um médico inglês, William Gilbert, defendeu a ideia que a Terra atuava como um objeto magnético gigante (Cf. PUMFREY, 2002, p. 6). Além dos fenômenos magnéticos também teria observado fenômenos elétricos. Descartes adotou esta visão e desenvolveu a ideia que haveria vórtices de matéria muito sutil entre os polos magnéticos, bem como os movimentos planetários se davam também por uma movimentação de matéria sutil no sistema solar.

Deve-se lembrar que Descartes fez parte de uma importante época que marca o final da cultura do Renascimento e início de uma filosofia moderna, cujo desenvolvimento da atual cosmologia se deu, assim como o desenvolvimento de uma série de áreas da física. Descartes teria desenvolvido um pensamento que explicaria a dinâmica de certos corpos, através das leis de movimento que enunciou.

Elaborou em seu escrito “Princípios da Filosofia” leis que demonstrariam como se dá o movimento, a conservação de tais movimentos e o repouso dos corpos. Com suas leis do movimento, anteciparia, por exemplo, as ideias de Isaac Newton a respeito da inércia e da conservação do movimento.

Diz a Primeira Lei cartesiana da natureza:

Como Deus não está sujeito a mudanças, agindo sempre da mesma maneira, podemos chegar ao conhecimento de certas regras a que chamo as leis da Natureza, e que são as causas segundas, particulares dos diversos movimentos que observamos em todos os corpos [e daí a importância dessas leis]. A primeira é que cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. (DESCARTES, 1997, p.76).

Em outro trecho, Descartes afirma:

(...) todos os corpos que se movem continuem a mover-se até que o seu movimento seja travado por outros corpos. É evidente que o ar e os outros corpos líquidos, nos quais vemos estas coisas moverem-se, gradualmente diminuem a velocidade do seu movimento. (DESCARTES, 1997, p. 77).

Com base nestas leis, Descartes rompe com as noções de movimento baseadas no aristotelismo, adotadas pela Igreja – que por sua vez era oficialmente a visão ptolomaica de como se dava o universo.

O desenvolvimento de seus pensamentos na área da *dinâmica* foi responsável pelo surgimento e franco desenvolvimento do viés *mecanicista*. Vale ressaltar que o mecanicismo não precisa ser entendido como totalmente materialista, embora compreenda que há forças mecânicas, materiais, atuando no mundo como uma complexa máquina – a filosofia cartesiana é mecanicista, mas não exclui uma ontologia. Tal doutrina considerava a sucessão de efeitos, num cunho determinista, governando os fenômenos do mundo.

O mecanicismo cartesiano, por exemplo, era capaz de admitir as trajetórias copernicanas sem as considerar como mera abstração geométrica – a abstração geométrica foi o argumento utilizado pela Igreja. O mecanicismo serviria de base para os desenvolvimentos da física e estaria em oposição ao animismo (concepções em que haveria uma alma no mundo, por exemplo). O mecanicismo cartesiano consideraria o movimento como a translação entre corpos de forma contígua.

O movimento é a translação de uma parte da matéria ou de um corpo da proximidade daqueles que lhe são imediatamente contíguos – e que consideramos em repouso – para a proximidade de outros. (DESCARTES, 1997, pp.69-70).

É importante ressaltar que, como já citado, a física cartesiana deve ser compreendida dentro de seu arcabouço metafísico – levando em consideração que combatia as múltiplas explicações escolásticas, por uma visão mais simples, extinguindo as quatro causas aristotélicas e privilegiando uma causa puramente eficiente.

Descartes substituiu a multiplicidade de substâncias aristotélicas, cada qual dotada de sua forma própria e distintos comportamentos característicos, por uma concepção unitária da matéria que preenche uniformemente todos os espaços do universo e comporta-se em todas as partes de acordo com as mesmas leis. (BARRA, 2003, p. 301).

É possível admitir em sua filosofia e física a ação de uma entidade divina na manutenção do movimento, da matéria e do repouso no mundo.

Em relação ao movimento, Descartes desenvolvera, sob esta ótica mecanicista, a noção que o movimento é um atributo da matéria.

Descartes adverte inicialmente que o movimento não deveria comportar em si mesmo nenhuma outra natureza além daquela que fosse compatível com a sua descrição como um dos modos da matéria extensa. (BARRA, 2003, p. 302).

Ainda no *Princípios da Filosofia* encontramos a explicação para o movimento:

O movimento é a translação de uma parte da matéria ou de um corpo da proximidade daqueles que lhe são imediatamente contíguos – e que consideramos em repouso – para a proximidade de outros. **Por corpo ou parte da matéria entendo tudo aquilo que é transportado conjuntamente**, ainda que seja composto de várias partes que [com a sua ação] desencadeiam outros movimentos (DESCARTES, 1997, pp. 69-70). [grifos nossos].

Deve-se ressaltar que ele entende como corpo: tudo aquilo que possui uma extensão e é transportado de forma conjunta.

Enquanto para a tradição escolástica se tem o movimento como uma mudança, ou seja, a passagem de atributos em relação à substância.

Para Descartes, o movimento é denominado aquilo que move e não o que faz mover:

Digo que é a translação e não a força ou a ação que transporta, pois o movimento está sempre no móbil e não naquele que se move, e habitualmente ninguém emprega o cuidado necessário ao distinguir estas duas coisas. (DESCARTES, 1997, p.70).

Descartes atribui a mesma origem ontológica entre o repouso e o movimento – diz que não é “requerida mais ação para o movimento do que para o repouso” (Idem).

E o princípio metafísico, uma causa primária, envolvido em tal manutenção é tido como a existência divina; mesmo dentro do viés mecanicista:

(...) a física cartesiana incorpora um novo princípio metafísico, admitido como o único princípio dinâmico responsável pelos diversos estados em que a matéria extensa se encontra atualmente disposta (BARRA, 2003, p. 305).

Sobre isso podemos pinçar de Descartes:

(...) Deus, cuja onipotência deu origem à matéria com o seu movimento e o repouso das suas partes, conservando agora no universo, pelo seu concurso ordinário, tanto movimento e repouso como quando o criou. Com efeito, dado que o movimento não é mais do que um modo na matéria que se move, tem por isso uma certa quantidade que nunca aumenta nem diminui, se bem

que em algumas das suas partes umas vezes haja mais e outras menos (DESCARTES, 1997, p.75).

Portanto, em Descartes, a conservação do movimento é dada por um princípio metafísico, que é o da existência divina. Nas leis cartesianas a conservação do movimento é entendida como uma decorrência da imutabilidade da vontade de Deus. Essa conservação se dá com a mesma força da criação, diferenciando-se apenas no sentido de sua razão.

Através de uma sucessão de matéria, que não possuiria espaços vazios, visto que é composto por matéria em tudo, de forma contígua, o movimento é comunicado mecanicamente entre toda sua matéria. Para Descartes a quantidade de movimento, e de repouso, se conserva em toda a matéria mecanicamente, tendo sua origem em Deus. A conservação pode ser interpretada como sendo análoga a uma força de criação contínua.

Em sua mecânica a atuação das forças se dá entre coesão, fluidez, repouso e movimento. É importante ressaltar que o movimento se dá como uma *tendência* do objeto a executar tal movimento.

Julgamos que esta asserção metafísica da conservação nasce, portanto, associada ao pressuposto ontológico em Descartes.

4. A *vis viva* leibniziana

Leibniz criticou a noção da quantidade de movimento cartesiana, elaborando a noção de uma força viva, a *vis viva*: uma força que seria equivalente ao que entendemos hoje como energia cinética.

Algebricamente a *vis viva* é representada pela expressão $m.v^2$, depois da matematização feita por Émilie du Châtelet. Posteriormente foi chamada de *energia cinética* (Cf. PONCZEK, 2000, p. 344).

Como já afirmado, a noção cartesiana de quantidade de movimento era oriunda da noção onde Deus causaria o movimento, através de uma ação mecanicista, e o conservaria, bem como o repouso. Embora não o tenha escrito de forma algébrica, o conceito cartesiano pode ser interpretado como $m.v$ (Cf. ILTIS, 1971, p.21) – a interpretação de tal tipo de expressão pode ser compreendida a partir do trecho dos *Princípios da Filosofia*, onde Descartes diz:

Por conseguinte, quando uma parte da matéria se move duas vezes mais depressa do que outra – sendo esta duas vezes maior do que a primeira-,

devemos pensar que há tanto movimento na mais pequena como na maior, e que sempre que o movimento de uma parte diminui, o da outra aumenta proporcionalmente. (DESCARTES, 1997, pp. 75-76).

Leibniz iniciou argumentações contra as ideias cartesianas a respeito da quantidade de movimento em publicações por volta de 1686. As argumentações leibnizianas contra os cartesianos descreviam a superioridade da adoção de sua *vis viva*, em detrimento da noção de quantidade de movimento (*m.v*).

Do ponto de vista metafísico, Leibniz levantava a hipótese de que a força era de fato conservada na natureza e que a *vis viva*, representada posteriormente por $m.v^2$, correspondia fisicamente a esta conservação entendida metafisicamente.

Em 1686, Leibniz publicou na revista *Acta Eruditorum* o artigo *Brevis demonstratio* e mais tarde no *Discours de metaphysique* diferenciou a noção de uma força motriz do conceito de quantidade de movimento. A força motriz leibniziana seria equivalente ao que chamamos atualmente de energia potencial. Leibniz teria feito uma distinção entre a energia potencial – força motriz – e a energia cinética, *vis viva*. Embora tenha feito tal distinção entre energia potencial e cinética, tanto Leibniz quanto seus contemporâneos não elaboraram uma distinção de massa e peso³⁹.

É possível explicar a visão de Leibniz com um objeto, como um pêndulo, em queda de uma certa altura, produzindo um movimento – baseado na força motriz. Esse objeto possui força suficiente para tornar a levantar; levando em consideração que não haveria retirada de uma “força” (como poderia ocorrer com o atrito) nem adição de nova força no sistema estudado.

Em seus primeiros artigos não estabelecera ainda o nome *vis viva*, embora já estivesse presente a noção do qual o conceito se refere. Descreveu que os cartesianos confundiram *quantidade de movimento* com a *força do movimento* – no qual a força de um objeto não é necessariamente a sua quantidade de movimento. E não é a quantidade de movimento que seria conservada, mas sim uma energia potencial – força motriz – em uma *vis viva* – energia cinética.

Leibniz fundamentou suas ideias de conservação em um âmbito metafísico – o que era comum com outros filósofos do período, por exemplo Descartes.

Tal componente metafísico fazia com que Descartes tomasse como correta a conservação de movimento, mesmo antes das leis formuladas experimentalmente como o caso

39 Tal distinção, podemos destacar, ocorreu com clareza na física newtoniana.

das leis da termodinâmica. É importante informar que a *quantidade de movimento* não correspondia a uma lei experimental.

Enquanto Descartes desenvolveu uma filosofia dualista, Leibniz descreveu um pensamento monista no qual as *mônadas*, unidades fundamentais, representariam seu monismo. Essas não eram as únicas querelas entre ambos, pois a consideração da representação da *força* era diferente entre os dois.

Em sua *Brevis demonstratio* argumenta sobre a *vis viva* como uma transmissão entre uma força viva de corpos em colisão. Através da pressuposição em que não há um movimento perpétuo, o que se resulta da dissipação das forças por atrito. Diz em seu *Discurso de Metafísica*:

(...) aos fenômenos, observa-se claramente que o movimento mecânico perpétuo não ocorre, pois deste modo a força de uma máquina que sempre diminui um pouco pela fricção e que logo termina, se restabeleceria e em consecuencia aumentaria por si mesma sem um novo impulso externo. E se observa também que a força de um corpo não diminui sem ser na medida em que se entrega a outros corpos contíguos ou a suas próprias partes, em que elas possuam um movimento separado (LEIBNIZ, 1982, p. 299) [tradução nossa]⁴⁰.

Seus principais interlocutores cartesianos foram *Abbé Catalan* e o cientista inglês *Denis Papin*. Estes levantavam hipóteses sobre como manter a noção de quantidade de movimento, identificada como *m.v*.

Leibniz, por sua vez, rebatia seus interlocutores cartesianos, sendo que em síntese, suas contra-argumentações a Papin, por exemplo, giravam em torno de demonstrar como *m.v* não correspondia a uma ideia de conservação.

A disputa entre Leibniz e os cartesianos ultrapassaria a querela física ou matemática e estaria embasada também numa disputa no contexto filosófico, como argumenta Carolyn Iltis, em relação à natureza da força:

Na origem de sua controvérsia com Descartes e seus seguidores não repousa uma mera disputa matemática quanto à medida da “força” em $m|v|$, ou $m.v^2$, mas um desacordo fundamental da verdadeira natureza da força em si (ILTIS, 1971, p.32) [tradução nossa]⁴¹.

40 (...) a los fenómenos se observa claramente que el movimiento mecánico perpetuo no tiene lugar porque de ese modo la fuerza de una máquina que siempre disminuye un poco por la fricción y pronto debe terminar, se restablecería y en consecuencia aumentaría por sí misma sin un nuevo impulso exterior. Y se observa también que la fuerza de un cuerpo no disminuye sino en la medida en que se entrega a otros cuerpos contiguos o a sus propias partes en tanto que ellas poseen un movimiento aparte (LEIBNIZ, 1982, p. 299).

41 At the root of his controversy with Descartes and his followers lies not a mere mathematical dispute as to the measure of “force” $m|v|$, or $m.v^2$, but a fundamental disagreement as to the very nature of force itself. (ILTIS,

O ataque ao cartesianismo, quanto aos seus princípios, pode ser acompanhado inclusive no seu posterior *Princípios da Filosofia ou Monadologia*. Entre Descartes e Leibniz há diferença na interpretação do universo dentro de um âmbito ontológico e epistemológico. Enquanto Descartes desenvolve um dualismo com a ideia de substância pensante e outra extensa (possuindo como um dos princípios a extensão – uma ideia inata), Leibniz descreve seu monismo em que o ato tem um *status* de realidade. Esse monismo é sintetizado posteriormente em sua filosofia na ideia de mônada. Sobre as mônadas, Leibniz afirma:

1. A mônada de que falamos aqui não é senão uma substância simples que integra os compostos; simples, em outras palavras, sem partes (...) 11. Do que acabamos de dizer se segue que as alterações naturais das mônadas vêm de um princípio interno, já que em seu interior não poderia influenciar uma causa externa (LEIBNIZ, 1982, pp. 607-609) [tradução nossa]⁴².

De certa forma, pode-se assumir que a força tem para Leibniz um estatuto de realidade. Supôs que o estudo de impacto de objetos sugere a razão pelo qual a força atuaria. Neste sentido, afirmou que a força deveria ser expressa de forma que um corpo com massa quatro vezes menor, mas caindo quatro vezes a altura corresponde a mesma força de outro corpo quatro vezes a massa, mas caindo a um quarto da altura; nesse caso o que representamos algebricamente por mv^2 .

1971, p.32).

42 “1. La mónada de que hablaremos aquí no es sino una substancia simple que integra los compuestos; simple, es decir, sin partes (...) 11. De lo que acabamos de decir se sigue que los cambios naturales de las mónadas provienen de un principio interno, ya que en su interior no podría influir una causa externa” (LEIBNIZ, 1982, pp. 607-609).

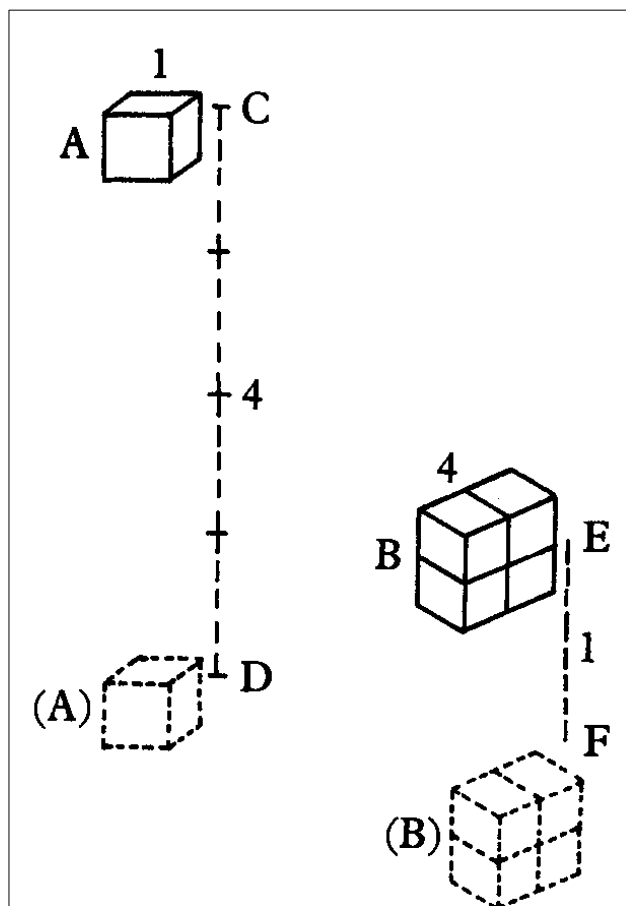


Fig. 7 – Representação gráfica da atuação da *vis viva*, onde o a queda de B para (B) ocorre na distância EF, com efeito final igual a distância CD do corpo A para (A). (LEIBNIZ, 1989, p. 50).

Em *Dynamics: On Power and the Laws of Corporeal Nature*, Leibniz nega a *conservação de movimento* (cartesiano) como *uma força* que deveria ser conservada – com argumentos contra o movimento perpétuo, pois entenderia que a conservação de movimento resultaria em uma possibilidade de movimento perpétuo.

Eu descobri que o poder [potentia] dos corpos não consiste na quantidade de movimento, ou seja, no produto do peso vezes a velocidade (como é comumente acreditado), e na transferência de poder de corpo para corpo, a mesma quantidade de o movimento não é conservada (como os cartesianos estão grandemente persuadidos). Além do mais, descobri que essa lei da natureza mantém, em vez disso, que todo o efeito tem o mesmo poder que sua causa plena, do qual não se pode obter movimento perpétuo, sem violar a ordem das coisas através de um incremento do poder do efeito além de sua causa. (LEIBNIZ, 1989, p. 106) [tradução nossa]⁴³.

43 I have discovered that the power[potentia] of bodies does not consist in quantity of motion, that is, in the product of weight times velocity (as is commonly believed), and that in transferring power from body to body, the same quantity of motion is not conserved (as the Cartesians are greatly persuaded). Furthermore, I have

Em *On nature itself* admite, por exemplo, uma conservação da força:

O fundamento das leis da natureza, dentre outras coisas, fornece uma indicação notável disso. Esse fundamento não deveria ser buscado na conservação da mesma quantidade de movimento, como pareceu para a maioria, mas sim no fato de que é necessário que a mesma quantidade de força viva seja preservada, de fato (algo que eu descobri acontecer por uma razão mais bela) que a mesma quantidade de ação motora também seja conservada, uma quantidade cuja medida é muito diferente daquela que os cartesianos entendem como quantidade de movimento (LEIBNIZ, 1989, p. 157). [tradução nossa]⁴⁴

Leibniz entende que a quantidade de movimento não é uma grandeza conservada, como defendido pelos filósofos cartesianos. Compreende que há uma força transferida, a *força viva*, que não corresponde a medida de uma *quantidade de movimento*.

Leibniz chega a fazer uma distinção da força em ato, a *vis viva*, que mais tarde seria chamada de *energia cinética* e uma força *potencial* quando prestes a exercer a ação, uma *força morta*.

A partir disto segue que a força também é dupla. Uma força é elementar, que eu também chamo de força morta, visto que o movimento [motus] ainda não existe nela, mas apenas uma solicitação ao movimento [motus], como com a bola no tubo, ou uma pedra na atiradeira enquanto ela ainda está sendo segurada por uma corda. A outra força é a força ordinária, unida ao movimento real, que eu chamo de força viva (LEIBNIZ, 1989, p. 121) [tradução nossa]⁴⁵.

Para Bassalo (2005) a *força-viva* ao ser executada, como no caso de uma queda, “se transforma em *força-morta* representada pelo próprio peso” (BASSALO, 2005, p. 8). Ainda, segundo Bassalo, essa ideia representa um estágio embrionário do *princípio de conservação de energia*. O que nos sugere a amplitude do pioneirismo de Leibniz, pois além do “embrião” (Ibid) do *princípio de conservação de energia* como salientado por Bassalo, também há uma noção antecipadora das *transformações de energia*.

discovered that this law of nature holds instead, namely, that the whole effect has the same power as its full cause, só that one cannot obtain perpetual motion, without violating the order of things through an increase in the power of the effect beyond that of its cause. (LEIBNIZ, 1989, p. 106).

44 The foundation of the laws of nature, among other things, provides a notable indication of this. That foundation should not be sought in the conservation of the same quantity of motion, as it has seemed to most, but rather in the fact that it is necessary that the same quantity of active power be preserved, indeed (something I discovered happens for a most beautiful reason) that the same quantity of motive action also be conserved, a quantity whose measure is far different from that which the Cartesians understand as quantity of motion (LEIBNIZ, 1989, p. 157).

45 From this it follows that force is also twofold. One force is elementary, which I also call dead force, since motion [motus] does not yet exist in it, but only a solicitation to motion [motus], as with the ball in the tube, or a stone in a sling while it is still being held in by a rope. The other force is ordinary force, joined with actual motion, which I call living force (LEIBNIZ, 1989, p. 121).

Tal estágio embrionário também teve desenvolvimento em outros pensadores, como é o caso de Huygens, cientista holandês. Sobre Huygens, Leibniz escreveu:

Huygens, que iluminou nossa época com suas excelentes descobertas, parece ser a primeira pessoa que conheço que chegou à verdade pura e clara sobre essa questão, e o primeiro a ter libertado esse assunto dos paralogismos através de certas leis que certa vez ele publicou (LEIBNIZ, 1989, p. 123) [tradução nossa]⁴⁶.

Huygens chegou à noção de conservação do produto da massa multiplicada pelo “quadrado da velocidade” (BASSALO, 2005, p. 8) ao estudar o choque de corpos. Vale lembrar que sua obra, sobre esta noção de conservação, foi publicada postumamente.

5. Do flogisto ao calórico e à termodinâmica

Um levantamento historiográfico sobre o *princípio de conservação de energia* nos leva à apresentação de um panorama do conceito de *energia*. O conceito de *energia*, empregado na forma atual, surgiu com Thomas Young (Cf. PAIS, 1988, p. 107), substituindo termos anteriores que carregavam conotações em distintos sistemas filosóficos. Como é o caso dos conceitos *impetus*, *conatus*, *movimento*, *inércia*, *flogisto* e *calórico* – cada um destes termos com histórias específicas e associadas a uma diversidade de filosofias.

Para Bassalo (2005), *impetus* descreve um tipo de inércia (Cf. BASSALO, 2005, p. 3) e está associada a um questionamento da filosofia aristotélica por Philoponos. Tal conceito teria sido utilizado por diversos outros pensadores perpassando Tartaglia, Leonardo da Vinci e até mesmo Galileu. *Conatus*, por sua vez, foi utilizado por diversos filósofos como Hobbes, Descartes, Spinoza e Leibniz, para descrever determinadas tendências.

O flogisto, hipótese propagada inicialmente por Stahl por volta 1659, foi baseada nas ideias de Joachim Becher e depois adotada por diversos outros. Sugeriu que haveria uma substância, o flogisto, responsável pela combustão dos elementos. O flogisto estaria, segundo seus adeptos, presente no metal e teria a capacidade de se dissipar no ar. Tal hipótese seria utilizada por volta dos anos de 1700 para explicar como se dá o processo da queima e embora fosse aceita dentro do meio em que a ciência se desenvolvia, possuía diversos problemas –

46 Huygens, who illuminated our age with his excellent discoveries, seems to be the first person I know of to have arrived at the pure and clear truth on this matter, and the first to have freed this subject from paralogisms through certain laws he once published (LEIBNIZ, 1989, p. 123).

que eram ignorados por seus proponentes, visto que não era considerado grandes entraves. A forma como se desenvolveu a ideia do flogisto ilustra consideravelmente, por exemplo, a teoria kuhniana a respeito da ciência:

Quando, a partir de 1770, Lavoisier iniciou suas experiências com o ar, havia tantas versões da teoria do flogisto como químicos pneumáticos. Essa proliferação de versões de uma teoria é um sintoma muito usual de crise. (KUHN, 2006, pp. 98-99).

Lavoisier por volta de 1770 questionou a hipótese do flogisto, sofisticando experimentos. Baseou-se nas ideias já iniciadas por outros, como Priestley e utilizou medida de massas através de balanças mais precisas. Usou instrumentações para precisar o quanto de massa existiria antes e depois da queima. Perante a Academia de Ciências de Paris, Lavoisier comprovaria que a queima necessitaria de um outro elemento – o oxigênio – com o combustível da queima para que se possa proceder com o processo da combustão.

Introduziu o estanho, previamente pesado, num balão cujo peso havia sido igualmente determinado. Fechando o recipiente hermeticamente, pesou o conjunto. Procedeu seguidamente à calcinação do metal, que terminou após um certo tempo, não tendo conseguido prosseguir o processo. Pesou então novamente o conjunto, constatando que o seu peso mantivera-se. Retirado o produto da calcinação verificou que o seu peso era ligeiramente superior ao do estanho inicialmente introduzido. Como evidentemente o peso do próprio balão não se alterara, concluiu que o aumento do peso do metal calcinado só poderia ser originado pela combinação do metal com uma certa parte do ar contido no recipiente. Repetiu os ensaios com outros materiais, com o chumbo, enxofre e fósforo. (BRITO, 2008, p.54).

Se por um lado a derrocada da hipótese do flogisto tenha contribuído para uma ideia central da conservação de massa, outro princípio fundamental das Ciências, também contribuiria, para uma noção crescente da *conservação de energia* – como conhecemos atualmente – através do desenvolvimento da ideia do calórico e seu posterior abandono. Sobre a importância do flogisto, Bassalo afirma:

Apesar das contradições, o flogístico stahliano dominou o pensamento científico por todo o século XVIII, principalmente na Química, uma vez que os gases descoertos neste século tinham seu nome ligado ao flogístico. Por exemplo, em 1772, o químico escocês Daniel Rutherford (1749-1819) observou que no ar totalmente viciado pela respiração de ratos ou por sua queima havia, além do **ar fixo**, um outro **ar irrespirável**, denominado por ele de **ar flogisticado** (hoje, nitrogênio – N), já que não servia mais à

respiração e à combustão, dois processos que dependem da emissão do flogístico. (BASSALO, 2005, p. 16).

Lavoisier, embora tenha negado o flogisto, ajudara a suscitar a noção que o calor dos corpos era oriundo na preservação de outro elemento – o calórico. O calórico seria uma substância que estaria presente nos corpos, e quanto mais quente mais calórico presente. Tal substância não poderia ser criada e nem destruída, **mas transferida**; de forma que haveria a necessidade da existência de um elemento que corresponderia ao fenômeno do calor.

A hipótese do calórico necessitava de uma substância com propriedades peculiares, como é o caso da imponderabilidade – ou a incapacidade de se pesar, enquanto elemento.

O calórico poderia ser capaz de entrar em todo tipo de espaço e substâncias (Cf. BASSALO, 2005, p. 17); tendo sido chamado de calórico por Lavoisier numa obra de 1787 e posteriormente descrita com mais detalhes em seu *Tratado Elementar de Química*, com o *princípio da conservação da matéria*. O fato de não se conseguir pesar esse fluido com características tão peculiares e pelo fenômeno da água aumentar o volume ao congelar (Cf. Ibid., p. 18) não corroboravam o calórico como fluido necessário para causação do fenômeno térmico.

No século XIX a hipótese do calórico já estava em descrédito, sendo criada a termodinâmica. A termodinâmica se desenvolveu em grande medida no século XIX, embora com ideias precursoras no século XVIII questionando o fenômeno do calor – além de casos no século XVII com invenções primordiais de máquinas a vapor (como Denis Papin ao desenvolver uma inicial máquina a vapor⁴⁷). Boyle foi outro precursor ao descrever a relação entre pressão, volume e temperatura.

Podemos destacar Sadi Carnot como um dos grandes pioneiros da termodinâmica ao trabalhar eficiência de motores a vapor no século XIX, embora também utilizasse a teoria do calórico (Cf. BASSALO, 2005, p. 21). As constantes e diferentes melhorias das máquinas a vapor culminaram com a ciência da termodinâmica. O desenvolvimento das máquinas a vapor basearam em pressupostos de transformações de tipos de energia, favorecendo respostas científicas e tecnológicas para problemas vigentes na época.

Dentre os cientistas envolvidos no desenvolvimento da termodinâmica temos o já citado Sadi Carnot, mas também Thomson, Clausius, Maxwell, Boltzman e outros.

47 Chamada de “marmita de Papin”, pois consiste numa espécie de panela de pressão pioneira.

A termodinâmica estabelecida da forma moderna pressupõe princípios, leis. Dentre eles, na primeira lei chegamos ao enunciado moderno do *princípio de conservação de energia*. A partir da termodinâmica conclui-se atualmente que a quantidade existente de energia térmica é necessariamente a quantidade de energia cinética das moléculas – e que a energia contida pode ser convertida em outras.

Com as pesquisas de Joule sobre a agitação de fluídos, ficou mais clara a noção de uma energia térmica explicada como um processo mecânico. Podemos também destacar William Thomson, conhecido por Lord Kelvin, por ter criado a escala que leva seu nome⁴⁸ e pressupõe o momento de zero absoluto. Rudolf Clausius enuncia o princípio da entropia, que versa sobre a irreversibilidade dos processos térmicos. Já Maxwell em 1859 desenvolve a lei de distribuição de velocidades de moléculas em gases, mais tarde Boltzman estuda a entropia de forma mais estatística (Cf. BASSALO, 2005, p. 22). Muito próximo deste período, Helmholtz utiliza o conceito de energia livre contida internamente num corpo, que pode ser convertida em trabalho.

Podemos destacar que, posteriormente, Max Plank escreve sobre a termodinâmica destacando o processo de irreversibilidade e a entropia. Vale lembrar que as três leis – e posteriormente a lei zero – foram desenvolvidas entre o século XIX e XX.

Contemporaneamente, a termodinâmica é fundamentada em quatro leis. A Primeira Lei da Termodinâmica é um dos sabores enunciativos do *princípio de conservação de energia*.

Wolfgang Pauli define em seu *Lectures on Physics – Thermodynamics and the kinetic theory of gases* a Primeira Lei como:

A primeira lei fornece uma conexão entre calor e outras formas de energia (...).

A Primeira Lei da Termodinâmica: se um sistema é levado de um estado 1 para um estado 2, então a soma do calor adicionado ao sistema e o trabalho realizado no sistema é independente do caminho que leva de 1 a 2. (PAULI, 1973, p. 5-6) [tradução nossa]⁴⁹.

48 Na escala Kelvin, o zero corresponde ao zero absoluto, onde não há movimentação das moléculas.

49 The first law gives the connection between heat and other forms of energy (...). The first Law of Thermodynamics: If a system is taken from a state 1 to a state 2, then the sum of the heat added to the system and the work done on the system is independent of the path which leads from I to 2.

Através da Primeira Lei pode-se destacar como aplicação para definição de um gás ideal e do *calor específico* (Cf. PAULI, 1973, pp. 10-13) – sendo que *calor específico* é a quantidade de *calor* necessário para alteração de um grau em determinada substância.

Pode-se definir a Primeira Lei como “A energia interna de um sistema isolado é constante” (ATKINS et al, 2012, p. 40), de modo que se pode utilizar tal formalização matemática:

$$\Delta U = q + w$$

Fig. 8 – Representação matemática possível da Primeira Lei.

Sendo, ΔU , a energia interna do *sistema*, q representa o *calor* transferido e w o *trabalho* realizado no *sistema* (Cf. Idem).

Nesse sentido é necessário definir o que é *sistema físico*. Para Atkins (2012):

(...) **sistema** é a parte do universo em que estamos interessados (...) as **vizinhanças** são a parte externa do sistema (...). Se a matéria pode ser transferida através da fronteira entre o sistema e as suas vizinhanças, o sistema é classificado como **aberto**. Se a matéria não pode passar através das fronteiras, o sistema é **fechado**. Os sistemas abertos, e também os fechados, podem trocar energia com as suas vizinhanças. (...) Um **sistema isolado** é um sistema fechado que não tem contato mecânico nem térmico com suas vizinhanças. (ATKINS et al, 2012, p.36).

Além de *sistema* devemos definir, de forma rápida, também o que é *calor* e *trabalho*. Em Atkins *et al* (2012) há a definição **molecular** de calor como a “transferência de energia que utiliza um movimento caótico das moléculas”, sendo a energia de um sistema “capacidade de efetuar trabalho” (ATKINS et al, 2012, p. 37). Para Zemansky calor é “aquilo que é transferido entre um sistema e seu meio exterior em virtude de uma diferença de temperatura” (ZEMANSKY, 1978, p. 69) e o trabalho, num conceito **operacional**, seria a realização de um movimento “contra uma força que se opõe ao deslocamento” (ATKINS et al, p. 37, 2012), “sendo a quantidade de trabalho igual ao produto da força pelo componente paralelo à força” (ZEMANSKY, 1978, p. 48).

Em Atkins além da definição **molecular** de calor, também é possível encontrar uma definição **operacional** que afirma: “quando a energia de um sistema se altera como resultado da diferença de temperatura entre o sistema e suas vizinhanças, dizemos que a energia foi transferida em forma de calor” (ATKINS et al, 2012, p. 37). Há também uma definição

molecular de trabalho em Atkins: “é a transferência de energia que utiliza um movimento ordenado” (ATKINS et al, p. 36, 2012).

Em relação a Segunda Lei da Termodinâmica, esta estabelece uma relação de rendimento de máquinas térmicas – entendendo que máquinas térmicas reais não podem ter rendimento ideal. A conversão entre o calor e o trabalho nunca é total, havendo parte não usada.

Segundo Carnot não existe máquina térmica perfeita, pois nem toda máquina térmica consegue converter o calor em trabalho de forma completa. Carnot introduz a noção que a máquina térmica trabalha em função da diferença de temperatura até alcançar o equilíbrio térmico (Cf. CARNOT, 1897, p. 49).

Outro modo interpretativo decorrente da Segunda Lei é que dois corpos com temperaturas diferentes postos em contato terão a energia térmica fluindo do corpo com mais energia térmica para o de menor energia, até o equilíbrio térmico – e as máquinas térmicas fazem uso deste fato para gerar trabalho. Em outras palavras, é possível dizer que a Segunda Lei define a direção em que a energia térmica flui.

Pauli (1973) afirma que a Segunda Lei “distingue calor de outras formas de energia. Indica uma direção no tempo e mostra que o calor é uma forma desordenada de energia” (PAULI, 1973, p. 17)[tradução nossa]⁵⁰.

A forma da expressão na Segunda Lei pode ser de várias formas (Cf. ATKINS, 2012, p. 78), de modo que podemos utilizar o conceitual de Lord Kelvin citado por Atkins “Não é possível um processo que tenha como o único resultado a absorção do calor de um reservatório e sua completa conversão em trabalho” (Idem).

Há outras formas de interpretação dessa lei, de forma a utilizar a *entropia* como forma do enunciado, introduzindo uma noção de irreversibilidade. A reversibilidade trata da possibilidade fenômenos voltarem ao estado original antes das transformações associadas a eles; já a irreversibilidade é relacionada aos fenômenos que não podem voltar ao estado original – como é o caso da propagação do calor do corpo com mais energia térmica para o com menos energia. Com a Segunda Lei da termodinâmica entende-se que não se pode fluir energia térmica do corpo com menor energia para o maior: dá-se o contrário e de forma

50 The second law distinguishes heat from the other forms of energy. It indicates a direction in time and makes apparent that heat is a disordered form of energy (PAULI, 1973, p. 17).

irreversível. Segundo Zemansky (1978) “todos os processos naturais espontâneos são irreversíveis” (ZEMANSKY, 1978, p. 178), como é o caso dos processos biológicos.

A *entropia* mede o quanto, por exemplo, um processo pode ser irreversível. Há fenômenos cuja entropia não permite a reversibilidade. Zemansky (1978) define entropia como “uma função das coordenadas termodinâmicas” (Ibid., p. 196). Segundo Atkins “a Segunda Lei (...) se exprime em termos de uma função de estado, a **entropia**. (...) a Segunda Lei usa a entropia para identificar as *mudanças espontâneas* entre as mudanças permitidas” (ATKINS et al, 2012, p. 80). Ainda diz sobre a entropia: “Como ressaltamos, o calor estimula o movimento aleatório nas vizinhanças. Por outro lado, o trabalho estimula o movimento ordenado dos átomos nas vizinhanças e não altera sua entropia” (Idem).

No caso da *Terceira Lei*, precisamos utilizar o *Teorema do Calor de Nernst*, ou ainda o *enunciado Nernst-Simon* (Cf. ZEMANSKY, 1978, p. 455), visto que foi enunciado por este por volta de 1906. Pelo Teorema do Calor de Nernst, quando a temperatura se aproxima de zero, a entropia também se aproxima de zero nas transformações (Cf. ATKINS et al, 2012, p. 91). Desta forma, podemos definir a Terceira Lei da termodinâmica como “a entropia de todos os cristais perfeitos é zero em $T = 0$ ” (Ibid., p. 92).

Ainda há uma lei denominada *Lei Zero*, que temporalmente não é anterior às outras e que define o equilíbrio térmico entre corpos distintos, enunciando por sua vez o conceito de temperatura (Cf. ATKINS et al, 2012, p. 17); por este motivo se encontra como fundamental. Nesta lei, um corpo X em equilíbrio térmico com Y e Y com Z, podemos afirmar o equilíbrio térmico entre X e Z.

Fica claro, através do desenvolvimento da Termodinâmica, a importância da *conservação de energia* como algo crucial para diversos fenômenos físicos e químicos. Não é difícil perceber, portanto, o grau de importância deste princípio para diversas áreas da ciência, ou ainda para diversos *Programas de Pesquisa Científica* – inclusive para o Programa de Pesquisa que a Termodinâmica corresponde, o *princípio de conservação* é tão basilar que se compõe como uma *Lei*.

6. Simetria e Teorema de Noether

Se com o desenvolvimento da termodinâmica o *princípio de conservação de energia* demonstrou-se central para fundamentação de diversos processos físico e químicos, então podemos supor que a descrição de Emmy Noether aponta como tal princípio é de fato basilar.

Emmy Noether foi uma importante matemática que utilizou do conceito de simetria matematizando o *princípio de conservação de energia* bem como outros *princípios de conservação* (Cf. BASSALO, 2005, p. 12) – como é o caso da conservação do momento angular e do momento linear – dentro de um arsenal matemático, criando uma prova matemática (por este motivo o nome *teorema*).

Noether publicou um artigo chamado *Invariante Variationsprobleme* em 1918, onde explicava como toda simetria tem associação com uma lei conservativa. Deste modo, todas as leis de conservação estão associadas em si através de eventos de simetria. Noether utiliza a mecânica lagrangiana⁵¹ para descrever como todo princípio conservativo está associado a uma simetria.

Neste sentido, simetria seria a ação de uma transformação e obtenção de um resultado conservado, por exemplo, como ocorre com a energia. Portanto, quando há ação de transformação e o resultado é similar, há simetria no sistema estudado e por sua vez há a ação de uma conservação associada ao tipo de simetria verificada.

Uma simetria em relação ao deslocamento de um objeto, por exemplo, seria associada a uma conservação do *momentum*, e a simetria rotacional à conservação do momento angular. Desta maneira, quando um sistema permanece com a mesma energia através do tempo, associa-se essa simetria à conservação de energia.

O que Noether faz é justamente criar uma sólida estrutura matemática para representar tais associações entre as simetrias e os princípios de conservações, deixando mais patente o quanto as leis de conservação são arraigadas no funcionamento do universo.

O contexto da criação dos *Teoremas de Noether* (ela possui outro teorema posterior, denominado *segundo teorema de Noether*) foi a então recente publicação da Teoria da Relatividade Geral, como fonte de sua inspiração (Cf. KOSMANN-SCHWARZBACH, 2011,

51 Mecânica Lagrangeana é uma formalização da mecânica criada por Joseph Lagrange e pretende resolver problemas mecânicos com variáveis escalares.

pp. 26-27). E Einstein⁵² teve acesso aos *teoremas*, visto que recebeu de Noether um artigo e elogiou como algo impressionante (Cf. BYERS, 1994, p. 9) numa carta a Hilbert. Pauli também poderia ter conhecido, pois como afirma Byers (1994), ele teria citado Noether no artigo sobre Relatividade na *Encyklopaedie der mathematischen Wissenschaften*. Embora Kosmann-Schwarzabach informe que a citação não estava relacionada diretamente com o *princípio de conservação de energia* (Cf. Kosmann-Schwarzabach, 2011, p. 94) e se refere ao artigo *Invarianten beliebiger Differentialausdrücke*. Esta citação está presente no livro *Theory of Relativity* de Pauli – tal livro é o artigo sobre *relatividade* extraído da *Encyklopaedie der mathematischen Wissenschaften* (Cf. PAULI, 1958, p. 48). Há também outra citação em Pauli referenciando Noether, mas trata-se da referência a um artigo de seu irmão, também matemático, F. Noether.

Byers diz ainda que o trabalho de Noether foi pouco citado no período das décadas de 20 e 30, visto que a Teoria da Relatividade Geral e até mesmo o *princípio de conservação de energia* “não estavam firmemente estabelecidas” (Ibid., p. 11). A questão da *conservação de energia* era questionada “não a nível macroscópico” (Idem), mas o seu funcionamento dentro do mundo quântico. E mesmo com a proposta do neutrino a conservação de energia não foi vista, num primeiro momento, como “fundamental” (Idem). Foi exposto no capítulo sobre os neutrinos como as propostas de Bohr foram no sentido de reavaliar o *princípio de conservação de energia* atuando no meio quântico.

Embora o *teorema de Noether* seja visceral ele não teve, para diversos físicos, a devida importância e sucesso que poderíamos esperar. Isto provavelmente se deve tanto a uma questão social quanto aos comprometimentos em relação ao caráter basal do *princípio de conservação de energia*: na época, fenômenos novos precisavam ser explicados e dependendo das afiliações de Programas de Pesquisa cada programa poderia sugerir, ou não, modos de explicar tais fenômenos, como foi o caso de Bohr. Além do fato das afiliações aos programas que julgamos ser importantes nesse aspecto, Kosmann-Schwarzabach afirma que possivelmente ela não foi devidamente lida pela comunidade física, que se relaciona ao supracitado caso social:

52 É importante levantar neste ponto, que o famoso $E=mc^2$ associa elegantemente a energia com a massa. Desta forma uma conservação de massa também tem relação com uma conservação de energia.

A partir do silêncio dos físicos, deduzimos que, embora os resultados de Noether possam ter sido conhecidos por alguns deles, de uma forma geral, esses resultados não foram citados porque nenhum deles realmente leu o artigo. **Claro, alguns matemáticos e físicos estavam cientes do trabalho de Noether e o citaram.** Nós temos um exemplo.

Após a Segunda Guerra Mundial, na Universidade de Bonn, o matemático Wolfgang Krull, que estudou com ela em Göttingen em 1920-1921, “citou Noether tanto em suas palestras sobre o cálculo das variações quanto em suas lições sobre álgebra”[Carta de Dr. Henri Besson] (KOSMANN-SCHWARZABACH, 2011, p. 86) [tradução e grifos nossos].⁵³

Mesmo que não tenha sido devidamente citada, o que não deixa de ser uma injustiça a manchar a história da ciência, seus teoremas são de uma profunda importância e ajudaram a compreensão do funcionamento de nossa natureza – perpassando desde a teoria da relatividade até a física de partículas.

53 From the silence of the physicists we deduce that, although Noether’s results may have been known to some of them, in a general way, those results were not cited because none of them had actually read the article. Of course, some mathematicians and physicists were aware of Noether’s work and cited it. We have one example. After the Second World War, at the University of Bonn, the mathematician Wolfgang Krull, who had studied with her in Göttingen in 1920–1921, “cited Noether both in his lectures on the calculus of variations and in his lessons on algebra” (KOSMANN-SCHWARZABACH, 2011, p. 86).

7. A conservação de energia como núcleo duro

O princípio de conservação de energia pode ser tomado como o núcleo duro de *programas de pesquisa*, como é a defesa que fazemos em relação ao programa em que Pauli participava. Apesar dessa possibilidade nada difícil, nem sempre tal princípio foi entendido como um elemento científico caro a ser preservado – em certas ocasiões, foram fortemente presentes os questionamentos de sua funcionalidade em determinados aspectos da natureza. Ainda durante toda sua tortuosa história que culminou como *um princípio*, podemos notar que não ocupava necessariamente o lugar de um *núcleo duro*.

Em determinadas épocas, o que se entende como *princípio de conservação* foi um produto de Programas de Pesquisas, que tinham outras asserções como *núcleo duro*. Como foram os casos no século XIX, em que determinados fatores já descritos, influenciaram na concepção simultânea de variações do *princípio de conservação de energia*. Se analisarmos as *asserções nucleares*⁵⁴ prováveis em Leibniz temos concepções ontológicas – metafísicas – assim como em Descartes também encontramos possibilidades ontológicas e teológicas. Já nos cientistas do século XIX, encontramos: a) *fatores tecnológicos que impulsionaram as pesquisas*, como também b) *a ideia de conversibilidade* e c) *a influência de filosofias da natureza que pregavam unicidades na natureza*. Encontramos buscas por padrões explicativos na natureza em cada um dos casos. No entanto em todos eles o *princípio de conservação* foi produto operado por programas, que continham conceitos específicos atuantes como *núcleo duro*.

Esse produto – o *princípio de conservação de energia* – nem sempre foi um *núcleo duro* em determinados *programas*, seu questionamento quanto a sua validade é possível. Neste aspecto, podemos citar *a crise do princípio de conservação de energia*. Diz Abraham Pais sobre a crise que a noção de *conservação de energia* passou três vezes, dentro do período de 1898 a 1930:

Entre 1898 e o início dos anos 1930, aconteceu três vezes que as descobertas de novos fenômenos naturais foram tão inquietantes que fizeram com que os físicos proeminentes hesitassem em sua fé na validade universal da lei de conservação de energia. A primeira dessas crises, (...), dizia respeito à radioatividade.

Trinta anos depois, foi a radioatividade novamente (mais especificamente, decaimento beta), que causou dúvidas temporárias em alguns setores sobre a conservação de energia. Nesse entremeio, tentativas agonizantes de conciliar

54 Referimos como asserções nucleares os candidatos a núcleo duro dos *Programas de Pesquisa Científica*.

efeitos quânticos com o raciocínio clássico levaram, também, e novamente brevemente, a sugestões de que a conservação de energia não poderia ser sustentada estritamente (PAIS, 1988, p. 105) [tradução nossa]⁵⁵.

Uma das crises citadas, é justamente o episódio do desacordo científico entre Bohr e Pauli, onde Bohr fez a defesa de uma reconsideração a respeito do funcionamento do *princípio de conservação de energia*.

No período que a radioatividade foi descoberta, o brilho do rádio parecia ser uma fonte que subvertia o *princípio de conservação de energia*, embora a suspeita não fosse aceita de forma geral (Cf. PAIS, 1988, p. 111). Este seria também outro episódio do questionamento da conservação de energia como algo basilar. Os avanços da mecânica quântica também forneceram questionamentos contra a conservação de energia.

Tais crises, demonstradas por Pais, denotam como em determinados *programas de pesquisa*, a *ideia de conservação de energia* pôde ser colocada em xeque. Em todos estes casos, o princípio não pode ser considerado como um *núcleo duro* em *Programas* que ele aparecia, pois não houve a proteção metodológica.

Mas em outros *programas*, o *princípio de conservação de energia* assume uma posição mais básica, que não pode ser questionada. É o caso da termodinâmica, onde uma das leis representa um dos elementos centrais a ser protegido, sob o risco do não funcionamento de tal área científica – que é um *programa*.

A atitude de Pauli em sugerir uma partícula, já abordada no capítulo anterior, se parece como um exemplo de uma proteção ao *princípio de conservação de energia*. É uma proteção de um elemento escolhido metodologicamente: a sugestão de uma nova e até então indetectável partícula representa um episódio claro de proteção ao *princípio de conservação de energia*.

Levantamos na seção anterior o questionamento quanto ao conhecimento de Pauli sobre os artigos de Noether. Embora não tenha citado diretamente o artigo responsável pela associação de simetrias às leis de conservação, sua defesa ao *princípio de conservação* parece demonstrar noção da questão das simetrias. É válido lembrar ainda que o artigo citado por Pauli, mesmo não sendo o que versa sobre simetria de Noether, está no mesmo periódico que

55 Between 1898 and the early 1930s it happened three times that the discoveries of new natural phenomena were so unsettling as to make prominent physicists waver in their faith in the universal validity of the law of conservation of energy. The first of these crises, (...), concerned radioactivity. Thirty years later it was radioactivity again (more specifically b-decay) which caused temporary doubt in some quarters about energy conservation. In between, agonizing attempts to reconcile quantum effects with classical reasoning led likewise, and again briefly, to suggestions that energy conservation might not hold strictly (PAIS, 1988, p. 105).

o outro artigo que trata sobre as simetrias. Desta maneira podemos supor o conhecimento de Pauli da importância do *princípio de conservação* a partir da óptica matemática de Noether – o que é uma suposição, não algo mais reforçado que isso.

Além do possível conhecimento do teorema de Noether, o seu profundo conhecimento de termodinâmica⁵⁶ pode ser fator decisivo na escolha metodológica em manter o *princípio de conservação de energia* como um elemento preservável, levando-o a deduzir o neutrino a partir da suposição da manutenção da *conservação de energia*.

Essa decisão metodológica de Pauli pode também refletir uma visão *ontológica* de uma conservação de energia; em outras palavras, sugerir a ideia de algo real a ocorrer como fenômeno físico. Neste sentido, Pauli teria um posicionamento realista, o que examinaremos no próximo capítulo.

Niels Bohr, por sua vez, estava associado a outro *programa de pesquisa* que, embora também desenvolvesse a Mecânica Quântica (tal como Pauli), estava menos comprometido com a tentativa de associar fenômenos quânticos com o comportamento esperado em outras áreas da ciência – em outras palavras, Bohr não tinha preocupação em revisitar o conceito de *conservação de energia* por entender o funcionamento quântico como algo novo e diferente do habitual nível macroscópico.

As crises do *princípio de conservação de energia* analisadas no início desta seção, além da imbricada história do surgimento do *princípio de conservação de energia* sugeriu aos diversos cientistas uma conduta questionadora sobre a validade de tal princípio. Bohr era mais um cientista envolvido no desenvolvimento da Mecânica Quântica, numa linha em que a sugestão da especificidade dos fenômenos quânticos poderia ser além dos fenômenos macroscópicos.

Desta forma dois cenários foram construídos: por um lado as crises do *princípio de conservação de energia* definiram decisões metodológicas que o afastava de um *núcleo duro*⁵⁷ e por outro, a possibilidade de tal princípio fazer parte de uma asserção a não ser descartada. Essa asserção metodologicamente protegida foi influenciada pelos motivos de conhecimento profundo da termodinâmica, assim como da importância matemática presente entre leis de conservação e simetrias que ancoram uma noção do princípio como fato no mundo.

56 Veja *Lectures on Physics – Thermodynamics and the Kinetic Theory of Gases*, de Pauli. Tal obra demonstra seu conhecimento em termodinâmica.

57 Em outras palavras, da mesma forma que na história da Física foi possível observar momentos que o *princípio de conservação* foi considerado como *núcleo duro*, também é razoável encontrar períodos de questionamento: como foram os casos das *crises do princípio*, informado por Pais.

CAPÍTULO IV – Posicionamento epistemológico

1. Realismo científico e não-realismo

Este capítulo não pretende dissecar toda controvérsia entre o realismo científico e o antirrealismo, mas objetiva-se como um apêndice demonstrativo de como Bohr e Pauli mantinham posturas epistemológicas dentro do debate entre a existência ou não do *princípio de conservação de energia* como elemento real.

Utilizaremos como definição para *posicionamento epistemológico* o fato do cientista assumir uma postura que define a sua compreensão dos elementos científicos (teorias ou conceitos): se encara tais elementos como coisas reais ou se os entende como descrições funcionais. Neste caso, assumimos que o *posicionamento epistemológico* poderá corresponder a algum tipo de realismo científico ou alguma noção antirrealista. Para este fim, é necessário demonstrar o que é o realismo, definindo assim o que é um realismo de entidades e um realismo de teorias. Em seguida, demonstraremos o que é o antirrealismo.

O realismo científico corresponde a posição em que entidades científicas – como elétrons – ou teorias podem corresponder a elementos reais, descrevendo-os com determinada precisão. Seriam, portanto, boas representações da realidade ou ainda se aproximam de boas representações. Assim, as descrições a respeito do mundo são reais, pois ao serem bem-sucedidas descrevem bem as coisas do mundo – como o caso de teorias, ou ainda os elementos inobserváveis. Entende-se como elementos inobserváveis aqueles não se observam diretamente, mas pode-se manipular dados relacionados aos mesmos.

O realismo científico e suas nuances pode ter diversas respostas para questões sobre as *teorias, elementos observáveis e os inobserváveis*. Diversas respostas também são dadas pelo antirrealismo e seus sabores.

Realistas podem entender que teorias são reais porque não é possível que o sucesso da ciência seja dado por milagre e sim por uma representação da realidade – para os realistas da ciência, se tais elementos científicos não podem ser reais então o sucesso científico deveria ter explicações miraculosas. Esta é uma interpretação do chamado *Argumento do Milagre* que se encontra em Hilary Putnam (Cf. SILVA, 2016, p. 17). Para os antirrealistas esse argumento é rebatido no sentido em que fenômenos podem ser explicados por diferentes teorias ou

conjuntos teóricos, sendo, portanto, difícil definir a veracidade delas. Há também questionamentos do *argumento do milagre* em torno de uma interpretação estatística, que relaciona o argumento com o uso de uma falácia estatística (Cf. Ibid., pp. 49-50).

Em relação à parte inobservável da natureza, há divergências se estes elementos podem ser reais ou não, visto que há elementos teóricos que por vezes os sustentam e que podem ser alterados, mas mantendo os elementos inobserváveis. Argumentos antirrealistas podem fazer uso do termo kuhniano de *incomensurabilidade*, onde períodos distintos de *ciência normal* podem ser *incomensuráveis* dentro da perspectiva de Thomas Kuhn. No entanto, realistas entendem que o termo pode ter distintas aplicações linguísticas, de forma que é possível advogar um elemento racional na ciência. De certa forma, pode-se definir que há um ceticismo no antirrealismo, que orbita a questão sobre a melhor explicação como uma explicação de *fato* correspondente ao que é real.

Outra forma de controvérsia entre realismo e antirrealismo pode seguir a seara de teorias que se apoiam no desenvolvimento tecnológico. Para realistas este é um motivo para definir como elementos científicos são reais, o que podemos reduzir como um tipo de argumento do milagre. Enquanto para os antirrealistas tais tecnologias também podem ser suportadas por diversas explicações que simplesmente *estão* funcionando.

Em *Representar e Intervir*, Ian Hacking descreve que o realismo da seguinte forma:

O *realismo científico* diz que as entidades, os estados e os processos descritos por teorias corretas realmente existem. Os prótons, fótons, os campos de força e os buracos negros são tão reais quanto as unhas dos pés, as turbinas, os redemoinhos de uma corrente e os vulcões. Interações fracas na física de partículas elementares são tão reais quanto se apaixonar. Teorias sobre a estrutura das moléculas que carregam o material genético são verdadeiras ou falsas, e uma teoria genuinamente correta seria uma teoria verdadeira (HACKING, 1996, p. 39) [tradução nossa]⁵⁸.

E o antirrealismo da seguinte:

O *antirrealismo* nos diz o oposto: não há coisas como elétrons. Certamente há fenômenos elétricos e, de legado, o que fazemos é construir teorias sobre estados, processos e entidades diminutas, somente para ter a capacidade de prever e procurar eventos que nos interessam. Os elétrons são fictícios. As

58 El *realismo científico* dice que las entidades, los estados y los procesos descritos por teorías correctas realmente existen. Los protones, los fotones, los campos de fuerza y los hoyos negros son tan reales como las uñas de los pies, las turbinas, los remolinos de una corriente y los volcanes. Las interacciones débiles de la física de partículas elementales son tan reales como enamorarse. Las teorías acerca de la estructura de las moléculas que transportan el material genético son o bien verdaderas o bien falsas, y una teoría genuinamente correcta sería una teoría verdadera (HACKING, 1996, p. 39).

teorias sobre eles são ferramentas de pensamento. As teorias são adequadas, ou úteis, ou admissíveis, ou aplicáveis, mas não importa o quanto admiremos os triunfos especulativos e tecnológicos das ciências naturais, não deveríamos considerar verdadeiras até mesmo suas teorias mais reveladoras. Alguns antirrealistas hesitam porque crêem que as teorias são ferramentas intelectuais que não podem ser entendidas como declarações literais sobre como é o mundo. Outros dizem que as teorias devem ser aceitas literalmente – não há outra maneira de entendê-las (Idem) [tradução nossa]⁵⁹.

Hacking descreve, ainda, como o realismo possui três ingredientes (Cf. HACKING, 1996, p. 46), que é o esquema Newton-Smith: um ingrediente ontológico, um causal e um epistemológico. O ontológico diz que teorias ou são verdades ou falsidades porque são descrições do mundo. O causal diz que se as teorias são verdadeiras, os termos teóricos que as teorias falam são causadores dos fenômenos descritos por tais teorias. E o elemento epistemológico versa sobre a possibilidade de termos justificações para as teorias ou suas entidades.

Um realismo pode ser a nível teórico, assumindo teorias como elementos reais e por sua vez suas entidades como extensivamente verdadeiras, ou pode ser um realismo de entidades. No realismo de entidades as teorias não devem ser entendidas como reais, como ocorre com as entidades.

Ian Hacking assume um realismo de entidades, ou seja, compreende que os elementos que são as entidades científicas, como nêutron ou a célula, ou as turbinas, são reais. Em contrapartida tem uma postura antirrealista em relação as teorias. Uma das formas de se entender o realismo de entidades, em Hacking, é compreender o que são as representações e depois compreender o que são as intervenções.

Para Hacking, a representação é fundamentada nas semelhanças entre os objetos representados, de forma que perspectivas diferentes podem trazer semelhanças diferentes entre as representações e os objetos representados. Neste sentido, a representação é sempre possível de formas distintas e todas elas se relacionam ao objeto com aproximações. Assim é possível entender a representação como um aspecto de aproximação da realidade. É

59 El *antirrealismo* nos dice lo opuesto: no hay cosas tales como electrones. Seguramente hay fenómenos eléctricos y la herencia, pelo que hacemos es construir teorías acerca de estados, procesos y entidades diminutas, unicamente para tener la capacidad de predecir y producir sucesos que nos interesan. Los electrones son ficticios. Las teorías acerca de ellos son herramientas del pensamiento. Las teorías son adecuadas o útiles o admisibles o aplicables, pero no importa qué tanto admiremos los triunfos especulativos y tecnológicos de las ciencias naturales, no deberíamos considerar verdaderas ni siquiera sus teorías más reveladoras. Algunos antirrealistas vacilan porque creen que las teorías son herramientas intelectuales que no pueden entenderse como enunciados literales acerca de como es el mundo. Otros dicen que las teorías deben aceptarse literalmente – no hay otra manera de entenderlas (Idem).

compreensível, neste viés, supor que a realidade seja algo para além da representação. As representações que temos é que constroem o nosso conceito de realidade, segundo tal filósofo.

As teorias seriam representações complexas, onde seria cada vez mais complicada a tarefa de decidir quando são verdadeiras ou falsas, de modo que Hacking assume um posicionamento não realista em nível de teoria.

Hacking (1996) assume uma visão realista onde as entidades podem ser descritas como possíveis entidades reais. A argumentação que desenvolve está relacionada ao fato que analisar as experimentações pode trazer luz à reconstrução da atividade científica: a intervenção. Ao experimentar, o cientista intervém na natureza. A intervenção permite uma representação mais fidedigna à realidade, pois o que se pode “intervir é real” (Ibid.), o que é o caso das entidades.

Hacking desenvolve, portanto, uma defesa da experimentação científica como uma prática que não é necessariamente posterior à teoria, mas pode ocorrer antes da própria teorização. Para Hacking, se se pode intervir, é real. A defesa de um realismo para Hacking está indubitavelmente na defesa de um realismo de entidades baseado no conceito de que as entidades são elementos que podemos intervir: a intervenção é um critério para definir a possibilidade da realidade. Diz, por exemplo, que “O árbitro final da filosofia não é o que pensamos, mas o que fazemos” (HACKING, 1996, p. 50)[tradução nossa]⁶⁰.

Representar e intervir são dois aspectos da ciência, e que por vezes são complementares: por vezes representamos e depois fazemos intervenções, e outras fazemos intervenções com base em representações prévias (Cf. Ibid).

Já para Nancy Cartwright, outra filósofa adepta do realismo de entidades, as leis que descrevem os fenômenos são verdadeiras, já por outro lado as teorias não podem ser consideradas como reais. Esta autora divide as leis em dois modelos: as leis que descrevem uma ação empírica, ou fenomenológicas, que são para ela verdadeiras e as leis teóricas que têm o âmbito mais generalista e possuem a capacidade de concatenar os resultados de leis empíricas. Estas últimas, as leis teóricas, são mais como *constructos* e neste sentido não representam necessariamente leis reais.

60 El árbitro final en filosofía no es lo que pensamos, sino lo que hacemos (HACKING, 1996, p. 50).

2. Posicionamento de Pauli

Quando Pauli escreveu pela primeira vez sobre o neutrino para a conferência, que ele não iria para comparecer a um baile, deixou-nos uma pista sobre sua visão sobre a realidade de uma partícula que não poderia, até o momento, ser observada (Cf. PAIS, 1988, p. 315).

Propor uma partícula parecia para ele uma alternativa nova, que *funcionava* em relação a outras explicações que poderiam ameaçar o *princípio de conservação de energia*. Num aspecto era *funcional* e em outro salvava um *princípio* que ele estaria tão comprometido. Embora *funcional*, o que poderia designar uma visão *pragmática* de como o seu modelo científico deveria ser encarado, observamos também critérios que assumem que Pauli tinha um *compromisso* com o desenvolvimento de um conceito de uma partícula existente – real.

Para delinear o posicionamento de Pauli, faremos o seguinte roteiro: primeiro, ele consideraria o *princípio de conservação de energia* como algo real? Se sim, isso estaria relacionado a qual filiação científica? Sua proposta de neutrino seria considerada como um elemento funcional teórico ou como um elemento real?

Deve-se ter claro que Pauli tinha um conhecimento muito sólido na termodinâmica de sua época, tendo escrito um livro como um manual sobre termodinâmica, onde descrevia sobre esta área da física. Neste sentido, Pauli tinha sistemática compreensão do *princípio de conservação de energia* como elemento funcional e importante da termodinâmica (Cf. PAULI, 1973, pp. 5-13).

A proposta de uma partícula como o neutrino explicaria a discrepância entre os resultados obtidos na energia cinética e o esperado de acordo com a *conservação do momento angular* e do *princípio de conservação de energia*. Em outras palavras, a proposta de uma partícula como esta, *salva* o princípio e é *funcional*. Neste sentido há uma proposta *pragmática* para resolver um problema imediato em relação a emissão beta.

Lakatos (1979) descreve, como já apresentamos, a proposta de Pauli como dotada de *méritos metodológicos* onde podemos interpretar como “mérito metodológico” o fato que a manutenção de tal princípio encerra uma possibilidade metodológica do programa que poderia se encontrar em degenerescência, mas passaria a progressivo. Não é proibitivo para Lakatos que um *programa* se atenha a elementos – *núcleo duro* – que orientem o desenvolvimento de seus modelos teóricos; e neste sentido o *anseio* de Pauli era, para Lakatos, um mérito.

Desta forma, a manutenção do princípio de conservação de energia por Pauli encontra-se como uma ação metodológica para Lakatos, onde possivelmente a sua proteção pode ser apontada como a proteção de um *núcleo duro* de um programa em atuação na criação de modelos científicos. Neste sentido, a proposta pode ser entendida como *funcional*, pois mantém em funcionamento todo um *programa* de ciência. Apesar dessa face pragmática, não podemos admitir que um uso pragmático, neste sentido específico, seja elemento que refute uma aceção realista. A escolha de elementos como *núcleo duro* pode representar visões realistas de ciência. O ato de pragmaticamente utilizar-se da heurística de um programa não inviabiliza o fato que uma asserção é tomada como *núcleo duro* por tê-la como algo real.

Portanto, se conjecturarmos que Pauli entendia o princípio como um fenômeno real, a sua proposta de um neutrino mesmo pragmático, representou (ao cabo da atuação do programa em que atua) como algo real no mundo.

Para esta conjectura, podemos ressaltar o fato que Pauli se questionava se a proposta poderia ser real – ele não excluía a possibilidade dela estar errada (Cf. PAIS, 1988, p. 316). Neste sentido, isso pode ser compreendido como uma suposição que a partícula não deveria ser apenas entendida como uma solução pragmática – embora tenha o sido em algum grau no momento de sua formulação. Portanto, mesmo uma solução prática, deveria ser compreendida como algo existente – e propor uma partícula fantasma o deixou em dúvida quanto a sua suposta existência. Este posicionamento descreve algum tipo de realismo (dentro do espectro realista que explicamos anteriormente).

Portanto, podemos tirar alguns pontos: Pauli solucionou *pragmaticamente* um problema enunciando o neutrino como partícula envolvida no processo de emissão beta e envolveu-se em controvérsia com Bohr justamente pelo *princípio de conservação de energia* pois o neutrino *salvava* tal princípio. Embora o tenha feito de forma pragmática, este fato estaria associado ao fato de compreender o *princípio* como elemento fundamental do programa em que estaria envolvido – o que pode denotar uma escolha realista da *conservação de energia* como um fenômeno. Este fato estaria de acordo com o seu sólido conhecimento da termodinâmica, como expusemos⁶¹.

61 Embora os argumentos apresentados apontem possibilidades de interpretações realistas ao núcleo duro, é possível que uma escolha metodológica de asserções como núcleo duro também possa ocorrer àqueles que entendem que um núcleo duro simplesmente funciona – é possível o entendimento não realista de um núcleo duro, num nível pragmático.

Outro ponto que poderia ajudar a determinar se este caso é de um realista ou não, seria a análise em relação ao conhecimento da simetria dos princípios de conservação: o teorema de Noether.

Como já foi exposto, o teorema de Noether sobre as simetrias dos princípios de conservação inserem uma sólida base matemática para a compreensão dos princípios de conservação. No entanto, não podemos apontar que esse seria um elemento crucial para Pauli entender o *princípio de conservação de energia* como um fenômeno intrínseco à natureza: não se pode concluir que a sua defesa ao princípio tenha ocorrido por conhecer o teorema de Noether, pois a pouca citação que temos do material não permite concluir que ele de *fato* conhecia. Entretanto, como já afirmamos em capítulo anterior, Pauli citou um dos artigos de Noether; embora não tenha sido o artigo que delineava a simetria dos princípios, mas estava na mesma edição do periódico.

Apesar de não podermos apontar essa relação direta com o teorema de Noether, o que nos daria contexto significativamente realista, Pauli demonstrava que entendia a necessidade de propor uma partícula existente⁶², além de possuir profundo conhecimento matemático. O seu questionamento em propor uma partícula existente, por si, está associada a uma conduta que poderíamos reconhecer em um realista. Tal atitude associada ao seu conhecimento sólido da termodinâmica, nos sugere que propor o neutrino foi um ato de um realista: era necessário que esta fosse uma partícula real e compreendia que a *conservação* era um fenômeno de fato – e essa visão estaria de acordo com algum nível realista (não de entidades, pois o *princípio de conservação de energia* não corresponde a uma entidade na física, mas de uma teoria mais fenomenológica).

Não teríamos problemas em revisar a nossa aposta no posicionamento epistemológico de Pauli, mas com os elementos que temos em mãos é possível apostar na delimitação de um realista, ou alguém transitando em tal espectro.

3. Bohr versus Einstein – o posicionamento epistemológico de Bohr

Bohr não considerava o *princípio de conservação de energia*, em seu modo tradicional, como algo intocável conforme podemos verificar ao longo da exposição sobre a controvérsia entre Bohr e Pauli. Não postulava, portanto, a existência real do *princípio de*

⁶² O episódio da proposta de uma partícula que, a princípio, *funcionava* suscitou em Pauli o questionamento se essa era uma partícula real ou não. Sua preocupação é uma pista de seu posicionamento.

conservação de energia. No entanto, para conceituar um posicionamento de Bohr é necessária uma apresentação de outras perspectivas para além da questão do *princípio de conservação de energia*.

Como já abordado, a controvérsia de Bohr e Pauli reside no fato em que Bohr propôs uma versão do *princípio de conservação de energia* de forma mais estatística, devido aos desenvolvimentos da Mecânica Quântica. Era pertencente ao que podemos chamar de Escola de Copenhague, onde compreendia, segundo Lakatos (1979), que a linguagem da física clássica era insuficiente para a descrição de certos fenômenos quânticos – para Lakatos isso instaurou, inclusive um culto anárquico na ciência.

Nesta controvérsia, Bohr sugeria que o funcionamento do *princípio de conservação* deveria ser de forma estatística, deixando de lado uma visão mais determinista clássica. Einstein foi um dos críticos desta interpretação da Mecânica Quântica, e foi por muitos considerado como desenvolvedor de uma visão *realista*. Einstein e Bohr também travaram uma importante controvérsia sobre a Mecânica Quântica.

A controvérsia entre Bohr e Einstein se dá na interpretação da incerteza, e pode ser descrita no experimento mental chamado de Einstein-Podolsky-Rose. O paradoxo questiona se a Mecânica Quântica, como trazida pela interpretação de Copenhague, era um sistema completo com certa autossuficiência, ou se deveria conter determinadas *variáveis ocultas*. No paradoxo, a emissão de partículas num decaimento poderia fazer surgir partículas com características similares, que de certa forma são comunicáveis independente da distância, o que fere o limite da velocidade da luz no vácuo como um limite no universo. Neste sentido a EPR questiona se a Mecânica Quântica da interpretação de Copenhague possui necessidade de um aperfeiçoamento explicativo, apelando para uma espécie de *argumento do milagre*⁶³: onde tais fenômenos deveriam ser explicados por *variáveis ocultas* pelo modelo de Copenhague.

Neste sentido, Einstein desenvolvia uma visão claramente mais realista, onde necessita delimitar o estado das coisas em suas variáveis como *fatos* que ocorrem e que poderiam ser descritos pela prática científica. O realismo de Einstein fica mais patente na sua famosa frase “Deus não joga dados no universo” dito ao físico Max Born, encerrando uma

63 Como já foi exposto: o argumento do milagre é um argumento *pró-realismo* onde o sucesso de explicações científicas, se não forem reais, devem corresponder a certos *milagres explicativos*. Neste sentido, consideramos a suposição da existência de variáveis ocultas como um recurso argumentativo para demonstrar que, caso não existam variáveis ocultas, os resultados obtidos pela Mecânica Quântica na interpretação da Escola de Copenhague devem ser entendidos como resultados *miraculosos*.

crítica à Mecânica Quântica. Crítica que concernia a sua interpretação à questão probabilística da Mecânica Quântica (Cf. SALMERON, 2012, p. 182).

Diz Abraham Pais sobre a controvérsia entre Bohr e Einstein:

No caso de Einstein e Bohr, não se pode dizer que o trabalho de um tenha induzido maiores progressos no do outro (...) Durante quarenta anos, é certo, houve influências mútuas intensas, mas situadas num plano distinto. Num espírito de amizade e de heróico antagonismo, estes dois homens debateram questões de princípio. O mais importante debate entre estes dois homens, sobre os fundamentos da mecânica quântica, começou em 1927. Sobre estes temas, a resistência intelectual e a oposição de um contra as visões mais básicas sustentadas pelo outro continuaram intactas até a morte de Einstein. Estavam em discussão os critérios pelos quais se deveria julgar a descrição mais acabada do universo físico. Estas discussões não afetaram a evolução da teoria física, mas serão lembradas como um dos grandes debates sobre os princípios científicos entre duas figuras contemporâneas dominantes. (PAIS, 1995, p. 429).

Einstein exibia um realismo que poderia ser classificado como um realismo de ordem fenomênica, chamado de *enteorético*, onde corresponde a uma forma metodológica de realismo, de como a ciência deve proceder. Diz Lehner:

Arthur Fine havia proposto que Einstein “enteoriza” o realismo, significando que o realismo de Einstein não é uma tese epistemológica sobre a relação entre a ciência e a realidade independente da mente, mas sim uma tese metodológica sobre a correta estrutura interna da ciência e a escolha de seu aparato metodológico. (...) a teoria deve falar sobre objetos independentes de observação, deve representá-los em um quadro espaço-temporal, deve consistir de leis deterministas. (...) Einstein se apegava a um conjunto de exigências a priori sobre a física e está disposto a descartar todo o bem-sucedido campo da Mecânica Quântica porque este não se encaixa nessas exigências (LEHNER, 2011, p. 189).

Neste sentido, o realismo de Einstein desenvolve uma diferença entre a realidade que se apresenta via a experiência e a realidade que Lehner chama de “realidade física” (Ibid., p. 191).

O questionamento de Einstein sobre a Mecânica Quântica tem como grande importância as dúvidas sobre o modo de interpretação a mesma (Cf. LEHNER, 2011, pp. 222-223).

No caso de Bohr, para Mackinnon, não era necessariamente um antirrealista, mas sim possuía uma visão não ontológica.

Bohr não era anti-realista. Mas ele era fortemente anti-ontológico (...). Ele estabeleceu os limites para o que poderia ser dito de forma significativa sobre estados atômicos e processos de partículas. Qualquer tentativa de ir além desses limites deve, ele insistiu, levar a contradições e incoerência. As tentativas de ir além desses limites são amplamente ontológicas. Encontramos uma maneira de comparar o que a física quântica diz sobre a realidade com a realidade como ela existe objetivamente (...) Tal questão pressupõe que é possível dizer algo verdadeiro e significativo sobre a realidade quântica além ou diferente da informação permitida pela interpretação de Copenhague. **Em qualquer perspectiva em que tais questões são aceitas como significativas, a posição de Bohr é adequadamente categorizada como anti-realista** (MACKINNON, 1994, p. 290) [tradução e grifos nossos]⁶⁴.

Essa visão o coloca, na prática, como um não realista, embora Mackinnon defenda que ele possua uma antiontologia.

Niels Bohr descreve em seu livro *física atômica e o conhecimento humano*, uma coletânea de ensaios, alguns de seus posicionamentos epistemológicos em relação a temas correlatos no desenvolvimento da física quântica. No ensaio *Luz e Vida*, proferido em 1932 na abertura do Congresso Internacional sobre terapia através da Luz, descreve como a noção de complementaridade é essencial para a compreensão do modelo quântico:

Essa aparente incompletude da análise mecânica dos fenômenos atômicos provém, em última instância, de desconhecermos a reação, inerente a qualquer mensuração, do objeto aos instrumentos de medida. Assim como o conceito geral da relatividade expressa a dependência essencial de qualquer fenômeno em relação ao sistema de referência usado para sua descrição no espaço e no tempo, **a noção de complementaridade serve para simbolizar a limitação fundamental, encontrada na física atômica, da existência objetiva de fenômenos independentes dos meios de sua observação** (BOHR, 1995, p. 10) [grifos nossos].

64 Bohr was not anti-realist. But he was strongly anti-ontological (...). He set the limits to what could be meaningfully said about atomic states and particle processes . Any attempt to go beyond these limits must, he insisted, lead to contradictions and incoherence.

Attempts to go beyond these limits are broadly ontological. One finds some way of comparing what quantum physics says about reality with reality as it exists objectively (...) Such a question presupposes that it is possible to say something true and meaningful about quantum reality beyond or different from the information allowed by the Copenhagen interpretation. In any perspective in which such questions are accepted as meaningful, Bohr's position is properly categorized as anti-realist (MACKINNON, 1994, p. 290).

Bohr, “*nega a validade de qualquer descrição espaço-tempo das leis matemáticas*” (LEITE, 2012, p. 170). Neste sentido, Bohr apresenta o *princípio de complementaridade*, em 1928, onde a natureza é dual, apresentando comportamento complementar de onda e partícula e não contraditória. Bohr supõe que a dependência dos instrumentos pode ocasionar uma mudança na perspectiva determinista. Desta forma, onde os fenômenos não dependem dos instrumentos, a aplicação do determinismo clássico pode ser entendida como possuidora de certa validade. Em casos onde o comportamento dos objetos e os meios de observação são dependentes – como é na ação do *quantum*, descoberto por Planck – esse determinismo não é compatível. Esta abordagem epistemológica demonstra também um questionamento da questão ontológica.

Essa questão referente à limitação fundamental que Bohr descreve, gerou o que ele chama de *mal-estar* que foi difundido pelo caráter abstrativo no formalismo da Mecânica Quântica (Cf. BOHR, 1995, p. 49) e Lakatos critica esse fato, como já exposto, como um culto a um comportamento anárquico na Mecânica Quântica pós 1925 (Cf. LAKATOS, 1979, p. 179).

Bohr entendia que a linguagem empregada, na física clássica, até então não era suficiente para elucidar como o mundo quântico se comporta (Cf. LAKATOS, 1979, 185). Neste mesmo sentido diz:

Assim, uma frase como “não podemos conhecer o momento e a posição de um objeto atômico” desde logo levanta questões relativas à realidade física desses dois atributos do objeto, as quais só podem ser respondidas mediante uma referência às condições do uno inambíguo dos conceitos espaço-temporais, de um lado, e às leis de conservação dinâmicas de outro. (...) Na física atômica, a necessidade de um exame renovado das bases do uso inambíguo de ideias físicas elementares lembra, de certa maneira, a situação que levou Einstein a sua revisão original da base de toda a aplicação dos conceitos de espaço-tempo, que, por sua ênfase na importância primordial do problema observacional, emprestou tamanha unidade à nossa imagem de mundo (BOHR, 1995, p. 52).

A suposição dos limites da linguagem da física clássica também estão expressas em seu ensaio *A unidade do conhecimento*, de 1954, onde descreve a linguagem como uma das ferramentas utilizadas pelos cientistas e que por vezes está adaptado à experiência do dia a dia, necessitando, por vezes, de um aperfeiçoamento dessa linguagem para descrever outros âmbitos da natureza (Cf. Ibid., p. 85). Bohr admite, portanto, como abstrações matemáticas

podem ajudar a formalização da compreensão de fenômenos, como ocorreu com a relatividade ao aperfeiçoar uma bagagem de conceitos (Cf. *Ibid.*, p. 88-89).

Há, para além da questão da linguagem, um entendimento de Bohr como a estrutura da observação pode afetar o item observado, devido à natureza dos limites que o mundo quântico oferece – neste sentido, salienta, que não somente o reconhecimento das limitações experimentais forneceram aumento do conhecimento sobre o mundo quântico, mas “também nos forçou, na ordenação da experiência, a prestar a devida atenção às condições de observação” (BOHR, 1995, p. 94).

No ensaio *O debate com Einstein*, que foi publicado originalmente em 1949 afirma ao descrever o experimento da *dupla fenda*⁶⁵:

Do ponto de vista das leis de conservação, a origem dessas incertezas que entram na descrição do estado da partícula depois de sua passagem pelo orifício pode ser rastreada até as possibilidades de troca de momento e energia com o diafragma ou o obturador (...) O problema levantado por Einstein foi, então, saber até que ponto um controle de transferência de energia e de momento, envolvida numa localização da partícula no espaço e no tempo, poderia ser usado para uma especificação adicional do estado da partícula depois de ela atravessar o orifício. Aqui, convém levar em consideração que a posição e o movimento do diafragma e do obturador, até este ponto, foram presumidos como exatamente localizados no referencial espaço-temporal. Esse pressuposto implica, na descrição do estado desses corpos, uma incerteza essencial quanto ao seu momento e energia, que obviamente não precisam afetar de maneira expressiva as velocidades, se o diafragma e o obturador forem suficientemente pesados. Entretanto, tão logo queremos conhecer o momento e a energia dessas partes do dispositivo de mensuração, com precisão suficiente para controlar a troca de momento e energia da partícula investigada, perdemos, de acordo com as relações gerais de indeterminação, a possibilidade de localizá-la exatamente no espaço e no tempo. Logo, **temos que examinar até que ponto essa circunstância afetará o uso pretendido de todo o dispositivo e, como veremos, esse aspecto crucial destaca claramente o caráter complementar dos fenômenos** (BOHR, 1995, pp. 55-56) [grifos nossos].

Em relação ao caráter complementar, Bohr afirma que tais fenômenos são “fenômenos individuais, e que nossas possibilidades de manejar os instrumentos de medida só nos permitem fazer uma escolha entre os diferentes tipos complementares de fenômenos que queremos estudar” (*Ibid.*, p. 64).

65 Experiência que demonstra a dualidade onda-partícula num feixe de elétrons perpassando sistemas de anteparos.

O mundo quântico questiona o que ele chama de *descrição pictórica determinista* (Cf. Ibid., p. 90). Neste sentido, ao entender a natureza específica do mundo quântico, Bohr compreende que seria necessária “uma revisão radical dos fundamentos da descrição e da compreensão da experiência física” (BOHR, 1995, p. 91). Essa revisão poderia, segundo ele, abarcar desde conceitos de espaço-tempo em algum nível teórico – o que claramente é uma referência à teoria da relatividade – ou “de leis dinâmicas de conservação” (Ibid., p. 92).

Portanto a visão de Bohr poderia demonstrar como fenômenos no mundo atômico poderiam não corresponder como ocorrem nas descrições clássicas do determinismo. Isso parece nos sugerir que a sua visão estaria completamente aberta tanto para questionamento do funcionamento determinístico clássico quanto das leis de conservação a nível da estrutura atômica.

Levando em consideração a controvérsia com Pauli, já descrita em outro capítulo, Bohr poderia ser entendido como transitando no espectro do não-realismo. Em tal controvérsia, Bohr negaria o *princípio de conservação* como um fenômeno – contestando, portanto, a realidade fenomênica de tal princípio.

A posição de negar tal princípio poderia ser decorrente de critérios antirrealistas ou realistas. No caso de um realista corresponde a alguém que tem renúncia a existência ontológica do fenômeno ou elemento. No caso de um antirrealista, entenderia que o funcionamento de tal princípio poderia falhar.

A partir do exposto, podemos categorizar Bohr como um não-realista ao delinear que sua posição alinha-se com a suposição da não existência real do *princípio de conservação*. Bohr entendia o *princípio de conservação* como um *elemento funcional de certos modelos científicos*. Além desta visão, possuía o posicionamento em que há insuficiência da linguagem da física tradicional para a descrição dos fenômenos quânticos – essa insuficiência aponta para a necessidade de linguagens mais precisas, mais funcionais.

De certa forma, Bohr assinala a especificidade teórica em nível quântico, o que poderia deixar mais de acordo com a afirmação que ele é contra uma certa *ontologia*. No entanto, por vezes, Bohr parece assumir tanto essa inexistência ontológica, como também entender que certas explicações científicas simplesmente *não funcionam*. Portanto, por vezes, Bohr parece orbitar um certo antirrealismo, enquanto Einstein assumiu uma versão mais realista num nível metodológico.

Em resumo, torna-se visível que programas possam fazer uso de artifícios realistas ou não realistas em suas estruturas metodológicas – leia-se *núcleo duro e/ou suas heurísticas*. Desta forma, é completamente plausível vermos usos realistas e não realistas na história da ciência. O caso do neutrino e a defesa do *princípio de conservação de energia* apontam práticas de um realismo científico, assim como as propostas de uma superação do *princípio de conservação de energia* demonstram atuação de posicionamentos antirrealistas em certa medida. Neste sentido, tanto o uso de elementos de um realismo científico, ou de um antirrealismo, são plausíveis em um desenvolvimento científico racional sob a luz de uma filosofia lakatosiana.

CONCLUSÃO

A história do neutrino está diretamente associada a história do *princípio de conservação de energia*, de forma que este princípio é preservado através da suposição da existência de tal partícula. Desta feita, pode-se observar uma controvérsia entre Pauli, que propôs o neutrino e Bohr que trabalhava em uma versão estatística do *princípio de conservação de energia*.

A condição de uma partícula indetectável foi tema de questionamento sobre sua existência em certo período da referida controvérsia. No entanto, desenvolvimentos teóricos demonstraram coerência com os dados experimentais até então obtidos para a permanência do *princípio de conservação de energia*. Posteriormente o neutrino pôde ser detectado numa engenhosa experimentação (batizada de projeto *Poltergeist*).

Apontamos na história do neutrino a atuação programática de pesquisa, evidenciado pelo estudo da filosofia lakatosiana. Neste sentido, partimos do pressuposto que a Metodologia de Programas de Pesquisa é um formato mais sofisticado para o levantamento historiográfico do estudo de caso analisado.

Para isto, assumimos a racionalidade lakatosiana como funcional, apesar das críticas feyerabendianas, e empreendemos uma busca historiográfica e epistemológica.

Descrevemos que o *princípio de conservação de energia* tem características muito fortes para ser considerada como *núcleo duro* do programa em que o neutrino foi concebido – e fortes características para o colocar numa heurística *positiva* de programas, como o caso de Bohr.

Para tal descrição historiográfica, assumimos o pressuposto da filosofia lakatosiana como funcional. Esta funcionalidade se deve basicamente a uma comparação de tal epistemologia a outras epistemologias, revelando-a como uma poderosa síntese entre o pensamento kuhiano e popperiano – embora não se deva reduzir a uma mera filosofia sintética. Neste íterim expomos os argumentos de Lakatos para a sua Metodologia de Programas de Pesquisa Científica, onde propõe sua sofisticação em relação ao falseacionismo dogmático e ao ingênuo.

Para detalhes do funcionamento da filosofia lakatosiana, foi exposto como a Metodologia de Programas de Pesquisa Científica se baseia na compreensão de uma

reconstrução racional, que Lakatos frisa não ser instantânea. Em outras palavras, a reconstrução da prática científica se dá posteriormente aos acontecimentos científicos. Para este fim, Lakatos faz uso dos conceitos dicotômicos de história interna e externa.

Delineamos como a Metodologia de Programas de Pesquisa Científica se estrutura – sendo o programa uma série teórica, composta de um núcleo duro e de heurísticas que orientam a produção de modelos teóricos e a atuação prática científica. Neste sentido, foi necessária a descrição das dinâmicas dos Programas de Pesquisa, que podem resultar em programas progressivos – teórica ou empiricamente – ou programas degenerescentes.

Com base no conceitual epistemológico lakatosiano, analisamos a proteção do *princípio de conservação de energia* como uma ação metodológica, assim como ocorre nos *programas de pesquisa* onde o *núcleo duro* é protegido de modificações. Em contrapartida, o *princípio* não representava importância crucial para o *programa* quântico desenvolvido pela interpretação de Copenhague (o que ajudou suscitar a controvérsia acerca da existência do neutrino).

Em seguida, um panorama sobre a história do *princípio de conservação de energia* foi apresentado, demonstrando o desenvolvimento de tal princípio: apresentamos a moldura presente no século XIX, onde ocorreu uma unificação de várias áreas da física – como no caso dos fenômenos de luz, calor, eletricidade etc.

Além da questão da unificação, houve também a ocorrência da disponibilidade tecnológica de máquinas a vapor, interesses por máquinas e influências de filosofias com ontologias que moldaram o *modus operandi* de diversos cientistas em áreas diferentes das ciências em geral – como demonstrou Thomas Kuhn.

Por outro lado, também apresentamos o pioneirismo de Leibniz ao propor o conceito de *vis viva*; onde procurava demonstrar a conservação de uma energia cinética com conceito mais adequado que a noção cartesiana de *quantidade de movimento*. Uma apresentação da concepção de fluídos imponderáveis também foi efetuada.

Sugerimos como a multiplicidade de desenvolvimentos que convergiram no *princípio de conservação de energia* representam desenvolvimentos de vários *Programas de Pesquisas* e que cada caso pode ser encarado dentro da perspectiva lakatosiana. O produto de tais programas desenvolvidos em grande parte no século XIX resultaram no princípio que pôde figurar como *núcleo duro* de outros programas – após passar por período de

convergência e de determinadas crises, como bem ventilado por Abraham Pais no que ele chama de *crises do princípio*.

É possível observar a consolidação do *princípio de conservação de energia* na forma conhecida atualmente a partir do amadurecimento do programa da termodinâmica. Para além do desenvolvimento de tal princípio, também apresentamos o trabalho de Emmy Noether, que associou os *princípios de conservação* a processos de *simetria*, matematizando-os dentro da mecânica Lagrangiana. Os trabalhos de Noether foram muito importantes em demonstrar como os *princípios de conservação* podem ser considerados como elementos viscerais de nosso universo e no desenvolvimento de trabalhos secundários, no entanto não gozaram de um amplo reconhecimento da comunidade científica de sua época – com as devidas citações à Noether.

A transformação, do *princípio de conservação de energia*, de um produto de *programas de pesquisa* para uma asserção candidata a *núcleo duro* perpassa duas possibilidades: **ter se tornado um elemento ontológico, ou ser considerado um elemento plenamente funcional**. Na primeira alternativa é possível que seja objeto de compreensão dentro de uma postura do *realismo científico*, e na segunda dentro de um pragmático antirrealismo.

Por fim, descrevemos de forma breve as posturas do espectro do *realismo científico* e do *antirrealismo* onde analisamos os posicionamentos de Pauli e Bohr. Verificamos um posicionamento mais aproximado de um *realismo científico* em Pauli e uma aproximação ao não-realismo em Bohr – principalmente quando comparado com o realismo de Einstein.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, P. *Imagens da Natureza*. Campinas: Editora Papirus, 1998.

ATKINS, P.; PAULA, J. *Físico-Química – Volume 1*. 9ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

ADAMSON, T. et al. *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam*, 2011. In: arXiv.org [arXiv: 1109.4897v1/hep-ex].

ARAGÃO, M. *História da Química*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008.

ASIMOV, I. *Asimov's biographical encyclopedia of science and technology*. New York: Doubleday, 1982.

BARGER, V. et al. *The physics of neutrinos*. New Jersey: Princeton University Press, 2012.

BARRA, E. A metafísica cartesiana das causas do movimento: mecanicismo e ação divina. In: *Scientiae Studia*, Volume 1, Número 1, pp. 299-322, 2003.

BASSALO, J. M. F. O cenário da Física antes de 1900. In: *Partículas elementares – 100 anos de descoberta*. pp.1-42, 2005.

_____. Nascimentos da Física. In: *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 20. n.1, março, 1998.

BILENKY, S. *Introduction to the physics of massive and mixed neutrinos*. Vancouver: Springer, 2018.

BOHR, N. *Física atômica e conhecimento humano – ensaios 1932 – 1957*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

BORNHEIM, G (Org). *Os filósofos pré-socráticos*. São Paulo: Editora Cultrix. 9ª Edição, 1998.

BRITO, A. “Flogisto”, “Calórico”, & “Éter”. In: *Ciência e Tecnologia dos materiais*, Volume 20, Número 3/4, pp. 51-63, 2008.

BYERS, N. *Contributions of Emmy Noether to Particle Physics*, 1994. In: arXiv.org [<http://arXiv.org/abs/hep-th/9411110v2>],

CARNOT, S. *Reflections on the Motive Power of Heat*. New York: John Wiley & Sons, 1897.

CARUSO, F. et al. *Partículas Elementares: 100 anos de descoberta*. Manaus: EDUAM, 2005.

CHAKRAVARTY, A. “Scientific Realism” In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2017. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/scientific-realism>>.

COPI, I. *Introdução à lógica*. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1981.

DAVIS JR, R. *A half-century with solar neutrinos: nobel lecture*, 2002.

DESCARTES, R. *Princípios da Filosofia*. Lisboa. Edições 70, 1997.

ELKANA, Y. *The Discovery of the Conservation of Energy*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1975.

FAYE, J.; FOLSE, H. *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Boston: Springer, 1994.

FERMI, E. *Collected Papers – Note e Memorie – Volume I*. Roma: Accademia Nazionale dei Lincei, 1962.

FEYERABEND, P. Consolando o especialista. In: *Crítica e Desenvolvimento da Ciência*, pp.245-281, 1979.

_____. *Contra o método*. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves Editora, 1985.

FEYNMAN, R. *Sobre as Leis da Física*. Rio de Janeiro. Ed. PUC Rio, 1ª Edição, 2012.

FRANCO, H. A mecânica e a cosmologia no Renascimento. In: *Apostila de Evolução dos Conceitos da Física*. Publicação IFUSP 1336/98. 2ª Edição, 2002.

FREIRE JR., O.; PESSOA JR., O.; BROMBERG, J. (Orgs). *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*. Campina-Grande/São Paulo: eduepb, 2011.

GRIFFITHS, D. *Introduction to Elementary Particles*. Mörlenbach: WILEY-VCH, 2004.

GUZZO, M.; NATALE A. Introduzindo os neutrinos. In: *Partículas elementares – 100 anos de descoberta*. pp.193-208.

GUZZO, M.; VALDIVIESSO, G. Compreendendo a oscilação dos neutrinos. In: *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 4, pp. 495-506, 2005b.

HACKING, I. *Representar e Intervenir*. Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autonoma de México, 1996.

HAHN, H et al. A concepção científica do mundo – O Círculo de Viena. In: *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Campinas, v. 10, pp. 5-10, 1986.

HARMAN, P. *Energy, Force, and Matter – the conceptual development of nineteenth-century physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

HARMAN, P.; MITTON, S. (orgs). *Cambridge Scientific Minds*. Cambridge: 2002.

ILTIS, C. Leibniz and Vis Viva controversy. In: *Isis*, Volume 62, Número 1, pp. 21-35, 1971.

JENSEN, C. et al. *Controversy and Consensus: Nuclear Beta Decay 1911-1934*. Berlim: Springer Basel AG, 2000.

KADVANY, J. *Imre Lakatos and the Guises of Reason*. Durham: Duke University Press, 2001.

KUHN, T. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Editora Perspectiva, 1998.

_____. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo. Editora Perspectiva: 9ª edição, 2006.

_____. Reflexões sobre meus críticos. In: *Crítica e Desenvolvimento da Ciência*, pp. 285-342, 1979.

_____. Notas sobre Lakatos. In: *Historia de la Ciencia y sus reconstruciones racionales*. Madrid, pp. 81-95, Tecnos, 1987.

_____. *A tensão essencial*. São Paulo. Editora Unesp, 2011.

LAKATOS, I; MUSGRAVE, A. (org). *A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*. São Paulo: Editora Cultrix, 1979.

LAKATOS, I. Falseamento e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica In: *Crítica e Desenvolvimento da Ciência*, pp. 109-237, 1979.

_____. *História da Ciência e suas reconstruções racionais*. Lisboa: Edições 70, 1998.

_____. *Historia de la Ciencia y sus reconstruciones racionales*. Madrid: Tecnos, 1987.

LEHNER, C. *O realismo de Einstein e sua crítica da Mecânica Quântica*. In: *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*, pp.181-228, 2011.

LEIBNIZ, G.W. *Escritos de dinâmica*. Madri: Editorial Technos S.A., 1991.

_____. *Escritos filosoficos*. Buenos Aires: Editorial Charcas, 1982.

_____. *Philosophical Essays*. Indianapolis e Cambridge: Hackett Publishing Company, 1989.

LEITE, Patrícia K. *Causalidade e teoria quântica*. In: *Scientiae Studia*, v.10, n.1 pp. 165-77.

MACKINNON, E. Bohr and the realism debates. *In: Niels Bohr and contemporary philosophy*, pp.279-302, 1994.

MORTARI, C. *Introdução à lógica*. São Paulo: Editora UNESP, 2001.

MURDOCH, D. The Bohr – Einstein dispute. *In: Niels Bohr and contemporary philosophy*, pp.303-324.

MUSGRAVE, A.; PIGDEN, P. “Imre Lakatos” *In: The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2016. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/lakatos/>>. Acessado em: Julho de 2017.

NÓBREGA, M. L.; FREIRE JR. O.; PINHO, S.T.R. Max Planck e os enunciados da Segunda Lei da termodinâmica. *In: Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 2, pp. 3601-9.

NOETHER, E. *Invariant Variation Problems*, 2005. In: arXiv.org [<http://arXiv.org/abs/physics/0503066v1>].

PAIS, A. *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford: Oxford University Press, 1988.

_____. *Niels Bohr's Times – In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford: Clarendon Press, 1991.

_____. *Sútil é o senhor – a ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1995.

PAULI, W. (Org). *Niels Bohr and the development of physics*. Londres: Pergamon Press, 1955.

_____. *Lectures on physics – thermodynamics and the kinetic theory of gases*, vol. 3. Massachusetts: MIT Press, 1973.

_____. *Theory of Relativity*. London: Pergamon Press, 1958.

POPPER, K. *A lógica da pesquisa científica*. São Paulo: Editora Cultrix, 2013.

PORTOCARRERO, V. (org) *Filosofia, história e sociologia das ciências I: abordagens contemporâneas*. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 1994.

PUMFREY, S. William Gilbert. In: *Cambridge Scientific Minds*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

PONCZEK, R. A Polêmica entre Leibniz e os cartesianos: MV ou MV²?. In: *Caderno Brasileiro do Ensino de Física*, v.17, n. 3, p. 336-347, 2000.

_____. *Deus ou seja a natureza: Spinoza e os novos paradigmas da física [online]*. Salvador: EDUFBA, 2009.

RESCHER, N. G. W. *Leibniz's Monadology: an edition for students*. São Petesburgo: University of Pittsburgh Press, 1991.

ROONEY, A. *La historia de la física*. Distrito Federal – México: Grupo Editorial Tomo, 2013.

SALMERON, R. *Homens que nos ensinaram a concepção do mundo*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2012.

SILVA, Ana Paula Bispo; SILVA, Jamily Alves da. A influência da Naturphilosophie nas ciências do século XIX: eletromagnetismo e energia. In: *História, Ciências, Saúde – Manguinhos*, Rio de Janeiro, v.24, n.3, p.687-705, jul.-set. 2017.

SILVA, B. M. *O argumento do milagre em prol do realismo científico*. Porto Alegre: UFRGS, 2016.

SMITH, G. The vis viva dispute: A controversy at the dawn of dynamics. In: *Physics Today*, 59, 10, 31, pp. 31-36.

KOSMANN-SCHWARZBACH, Y. *The Noether Theorems – Invariance and Conservation Laws in the Twentieth Century*. New York: Springer, 2011.

THOMAS, J.; VAHLE, P. (Orgs). *Neutrino Oscillations: Present Status and Future Plans*. Singapura: World Scientific, 2008.

WILLIAMS, W. *Nuclear and Particle Physics*. Oxford: Oxford University Press, 2008.

ZEMANSKY, M. W. *Calor e Termodinâmica*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1978.