

O quark como objeto de análise histórica e epistemológica: a Física de Partículas Elementares em uma perspectiva bachelardiana^{†*}

*Renan Milnitsky*¹

Doutorando em Ciências – Programa Interunidades em Ensino de Ciências
Universidade de São Paulo

*Ivã Gurgel*¹

*Marcelo Gameiro Munhoz*¹

Instituto de Física – Universidade de São Paulo
São Paulo – SP

Resumo

Neste artigo o quark foi colocado como objeto central de uma investigação histórica e epistemológica embasada nos fundamentos da epistemologia de Gaston Bachelard sobre a construção do conhecimento da Física no século XX. O trabalho do filósofo francês foi utilizado para refletir sobre a construção deste objeto de estudo que vem sendo amplamente discutido no ensino da Física de Partículas. Os resultados da investigação histórica sobre sua formulação foram organizados em um diagrama de interação histórico-epistemológico, construído em analogia aos diagramas de Feynman. O intuito foi evidenciar a interação de eventos históricos, mediados por movimentos epistemológicos, elucidando como as rupturas e os modos de pensamento teórico e experimental se materializam na evolução e desenvolvimento da Física de Partículas. Com este trabalho, buscou-se colaborar para as recentes discussões sobre o papel desempenhado por debates históricos e epistemológicos no ensino da Física Moderna e Contemporânea, em especial no ensino da Física de Partículas.

Palavras-chave: *Física Moderna; Física de Partículas; Gaston Bachelard; História da Física; Epistemologia Histórica.*

[†] Quark as an object of an historical-epistemological analysis: elementary particle physics on a bachelardian perspective

* *Recebido: 27 de julho de 2020.*

Aceito: 1 de março de 2021.

¹ E-mails: renan.milnitsky@gmail.com; gurgel@if.usp.br; munhoz@if.usp.br

Abstract

In this work, the quark was placed as a central object of an historical and epistemological investigation based on the foundations of Gaston Bachelard's epistemology on the construction of knowledge of Physics in the 20th century. The work of the french philosopher was used to reflect on the historical construction of this object of study that has been widely discussed in the particle physics teaching. The results of the historical study were presented through a historical-epistemological interaction diagram, constructed in analogy to the famous Feynman diagrams. The aim was to show the interaction of historical events, mediated by epistemological movements, elucidating how the ruptures and the modes of theoretical and experimental thinking materializes in the evolution and development of Particle Physics. With this work, we intend to collaborate for the recent discussions about the role played by historical and epistemological debates in the Modern and Contemporary Physics teaching, especially for the Particle Physics teaching.

Keywords: *Modern Physics; Particle Physics; Gaston Bachelard; Epistemology of Science; Historical Epistemology.*

I. Introdução

A década de 90 presenciou movimentos de mudança e renovação curricular em todo o mundo (ROBERTS, 2007; YORE, 2003). Em relação ao ensino de física, os desafios consistiram na elaboração e implementação de currículos mais sintonizados com os avanços científicos e tecnológicos possibilitados pela física ao longo do século XX (TERRAZZAN, 1992). Estes esforços, por sua vez, manifestaram uma diversidade de problemas associados a dificuldades enfrentadas pelo ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC). Após quase uma década de pesquisas sobre este ensino, Pietrocola (2017) classificou a renovação curricular como um problema complexo que deveria ser tratado no âmbito da pesquisa educacional aplicada, rompendo com o estabelecido pela tradição e experiência didática. Em outra publicação, Brockinton, Siqueira & Pietrocola (2017) destacaram que o ensino da FMC deveria passar pela superação de dois obstáculos: os obstáculos didático-pedagógicos e os obstáculos didáticos-epistemológicos².

² Diversos trabalhos tem explorado discussões sobre estas relações entre epistemologia e ensino de FMC. Johansson *et al.* (2016) publicaram estudos evidenciando o caráter instrumentalista do ensino em nível superior. Stapleton (2018) buscou explorar o papel da pluralidade epistemológica no embrião da física contemporânea, apontando potencialidades e desdobramentos para seu ensino. Boe *et al.* (2018) avaliaram a postura de estudantes do ensino médio e apontaram para a existência de obstáculos constituídos a partir das experiências

Revisões sobre o ensino de FMC dos anos 90 e 2000 apontaram a Física de Partículas como uma temática consolidada de fundamental importância, marcando forte presença nas propostas de ensino (OSTERMANN; MOREIRA, 2000; PEREIRA; OSTERMANN, 2009). Ao final da década de 90, Ostermann (1999) contextualizava a falta de material de física de partículas para professores do ensino básico e oferecia uma tradução adaptada de um material originalmente proposto pelo Fermilab e que serviu de inspiração para que Ostermann e Cavalcanti (2001) produzissem as seções constituintes de pôsteres contendo catalogações e informações gerais sobre as partículas elementares. Estes materiais foram fundamentais para que a Física de Partículas ganhasse espaço nas propostas de ensino e se consolidasse como uma temática central de FMC na educação básica, sendo estes dois trabalhos as principais referenciais citadas pelas propostas que surgiram após os anos 2000.

Por outro lado, ainda que tenha exercido papel fundamental na consolidação da física de partículas como objeto de ensino, propostas com caráter informativo se estabilizaram, o que tem revelado a necessidade de pensar outros olhares para o ensino que possibilitem reflexões formativas mais amplas. Em consonância com este contexto, foi possível observar nos últimos anos o surgimento de novas possibilidades de discussão, percebido pelo crescente número de propostas com diferentes abordagens³ e pelo surgimento de eventos de divulgação científica como o Masterclass – Hands On Particle Physics⁴. O auge destas preocupações se materializou com a realização do 1º Encontro sobre Divulgação e Ensino de Física de Partículas, organizado e promovido por um grupo de pesquisadores brasileiros associados ao International Particle Physics Outreach Group (IPPOG) e envolvidos diretamente nas atividades de divulgação e ensino deste campo da FMC.

No entanto, ainda que as reflexões estejam em movimento de ampliação, a utilização de episódios e abordagens históricas permanece em uma posição estática e de pouca relevância, ao contrário do que ocorre com outros campos da física moderna como a Relatividade e a Mecânica Quântica. A Física de Partículas não conta com seu espaço próprio de reflexão histórica e epistemológica dentro da área de ensino, fato que pode ser constatado pela quantidade excessivamente pequena de publicações desta natureza na literatura. A necessidade de discussões históricas encontra respaldo na forma como tradicionalmente se constituíram algumas de suas propostas de ensino. Costumeiramente, elas são guiadas pelo famoso box do Modelo Padrão, que ganha nas propostas o estatuto do grande produto científico da física de partículas. De forma ainda despersonalizada e descontextualizada, os protagonistas são as partículas e não os contextos e cientistas. O quark passa a figurar como um ator central por definir a família dos hádrons, ser constituinte fundamental da matéria

vivenciadas por eles em suas aulas de física e aos modos de pensar a ciência sedimentados ao longo de sua trajetória escolar.

³ Para um panorama de propostas em congressos, teses e dissertações ver Mosinahti & Londero (2015).

⁴ Para discussões sobre os eventos no panorama mundial ver Begalli & Bilow (2019) e para um panorama nacional ver Watanabe, Gurgel & Munhoz (2014).

como a conhecemos e ter sido o último dos férmions descobertos. Como apontado em trabalhos anteriores (MILNITSKY, 2018), isto implica em um grande empobrecimento na apresentação do modelo padrão, fazendo seu ensino se limitar a uma “taxonomia” das partículas elementares⁵.

Este contexto mais amplo da pesquisa e ensino apontam para a necessidade de apresentar a FMC e a Física de Partículas em novas perspectivas epistemológicas que se distanciem de visões instrumentalistas comumente presentes nos currículos escolares, o que nos fizeram questionar neste artigo se as rupturas e embates epistemológicos sofridos pela física ao longo do século XX não seriam também inerentes ao seu próprio ensino. Ao transpor para as salas de aula as teorias da Física Moderna, não deveríamos também transpor suas epistemologias? Partindo de uma resposta positiva a essa questão, buscou-se neste artigo apresentar uma perspectiva epistemológica que possa ser parte constituinte de currículos dedicados à Física de Partículas. Este outro olhar para o conhecimento foi elaborado a partir da obra do filósofo francês Gaston Bachelard e materializado a partir de uma investigação histórico-epistemológica (GAYON, 2003) sobre um objeto de estudo amplamente discutido no ensino de FMC: o quark.

Da mesma forma que foi possível olhar para o quark como um objeto de estudo no interior do Modelo Padrão, talvez seja possível entendê-lo como um produto histórico, fruto de uma convergência das inovações teóricas e experimentais que se constituem na física de partículas ao longo do século XX. Ao promover uma investigação histórica mais ampla sobre quark, acredita-se ser possível evidenciar características da natureza da ciência do século XX e auxiliar na busca por outros olhares em futuras propostas de ensino. Os resultados desta análise histórica foram organizados na forma de um diagrama de interação histórico-epistemológico, idealizado com o intuito de evidenciar como os eventos históricos de suma importância para o desenvolvimento da física de partículas interagiram entre si mediados por movimentos de superação epistemológica. As articulações possibilitadas pelas análises dos episódios históricos e movimentos epistemológicos fizeram emergir não somente aspectos fundamentais sobre a teoria e a prática experimental da física de partículas, mas também possibilitaram enxergar novos aspectos do fazer científico no século XX.

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma leitura bachelardiana para o desenvolvimento histórico da física de partículas que fosse capaz de fornecer subsídios para construção de outros olhares para o seu ensino. A análise histórica contemplou um período de cerca de 50 anos, da experiência de Rutherford à proposição dos quarks. A síntese elaborada buscou representar como se estabeleceu um novo tipo de relação entre teoria e experimento na

⁵ A necessidade de se superar a apresentação do “zoológico de partículas” foi destacada como um desafio importante em uma das plenárias do 1º Encontro sobre Divulgação e Ensino de Física de Partículas. A mesa redonda, que contou com a presença de Fernanda Ostermann, Maurício Pietrocola, e Helio Takai, debateu o estado atual e os desafios do ensino da física de partículas. Ver OSTERMANN, F.; PIETROCOLA, M.; TAKAI, H. A Física de Partículas no Ensino Médio. In: 1º Encontro sobre Divulgação e Ensino de Física de Partículas, 1, 2020, São Paulo. Mesa Redonda. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YxNSKFMLwc8>>. Acesso em: 05 dez. 2020.

primeira metade do século XX. Essa dialética é um elemento central para que se possa compreender quais foram as condições de possibilidade para que se pudesse chegar ao modelo padrão.

II. A Física do século XX segundo a Epistemologia de Gaston Bachelard

Apesar de Bachelard ser uma referência já conhecida e presente na literatura em ensino de ciências, Martins (2006; 2012) tem apontado a necessidade de reavaliar o papel que os trabalhos do filósofo poderiam desempenhar nas pesquisas da área, destacando ser necessário “resgatar criticamente a obra de Bachelard [...] sem que se perca a amplitude de sua proposta epistemológica” (MARTINS 2006, p. 10). Neste sentido, a adoção de Bachelard como referencial teórico veio sustentada por uma necessidade dupla: a releitura de sua epistemologia e a proximidade dos embates filosóficos do autor com problemas enfrentados pelo ensino da FMC.

Ao resgatar os fundamentos da epistemologia bachelardiana foi possível perceber que os problemas enfrentados pelo ensino da FMC têm natureza filosófica semelhante aos apontadas pelo filósofo francês. De um lado, em sua empreitada epistemológica, Bachelard buscou confrontar obstáculos bem sedimentados na cultura científica, na tentativa de compreender o nascimento de um novo espírito científico na física do século XX. Do outro, em sua empreitada educacional, as últimas décadas de pesquisa no ensino da FMC buscaram confrontar obstáculos bem sedimentados na cultura escolar e que construíram um forte movimento de resistência à incorporação desta temática nos currículos da educação básica. Para estabelecer estas relações, foi preciso ler a epistemologia de Bachelard em sua completude, não se restringindo à mera aplicação de alguns de seus conceitos. A partir deste estudo teórico, foi possível extrair aspectos que foram utilizados como parâmetros norteadores da análise histórico-epistemológica da física de partículas e que levaram ao entendimento da construção do quark como objeto de estudo teórico e experimental.

II.1 Os embates com as filosofias de sua época

A filosofia de Bachelard costuma ser associada a uma filosofia da negação (WUNENBURGER, 2003), o que é percebido no título de uma de suas principais obras *A Filosofia do Não* (1978). Lopes (1996) o caracterizou como o filósofo da desilusão, Dagonet (2003) e Zanetic (2006) como o filósofo da ruptura, Bulcão (2009) como o filósofo da descontinuidade criadora e Alunni (2018) como o filósofo do surrealismo, apenas para citar alguns comentadores de sua obra. A negação e o confronto com tradições de pensamento são componentes fundantes da epistemologia bachelardiana e contextualizar suas origens tem uma importância tão grande quanto a extensão de seu próprio trabalho (DAGONET, 2003). Segundo Bulcão (2009), seu trabalho epistemológico aconteceu dentro do ambiente intelectual francês em um contexto mergulhado sob influência de três correntes filosóficas: o

positivismo de Auguste Comte, a epistemologia de Émile Meyerson e o espiritualismo. Muito de sua filosofia também está em diálogo com Henri Bergson, sobretudo em relação à oposição continuísmo/descontinuísmo (WORMS e WUNENBURGER, 2008).

Na obra *Cours de philosophie positive* (2020), Comte apresenta o ideal positivista como uma doutrina inspirada no sucesso alcançado pelas filosofias naturais na modernidade. Preocupado com os problemas enfrentados pelo desenvolvimento da sociedade, Comte buscou construir um conjunto de leis sociais epistemologicamente fundamentadas nas filosofias da natureza. No decorrer de seu trabalho, coloca que o estudo dos fenômenos deve se restringir ao que pode ser verificado objetivamente na realidade. Para Comte é irrelevante o estudo de sua essência, a intimidade da realidade é impenetrável. Não se deve cair na ilusão de descrevê-la, uma vez que não é possível estabelecer qualquer correspondência direta com ela – daí a postura de compreender a realidade de forma positiva. O positivismo, enquanto metodologia, defendia que os fatos rigorosos retirados da experiência deviam ser as únicas bases para a elaboração das leis científicas. Já como doutrina, defendia que o sucesso histórico da filosofia natural garantia a ele as características universais e objetivas de representação realidade. Segundo Bachelard (2000), isto acabou criando um sistema de pensamento fechado, instruído por bases e métodos estáticos e universais que almejavam a construção de conhecimentos objetivos sobre o mundo (RIBEIRO JUNIOR, 1994).

Inspirado pela doutrina positivista, Meyerson construiu uma epistemologia que tinha como objetivo investigar as bases universais da razão que seriam responsáveis pelas características universais e estáticas do pensamento científico (PARROCHIA, 2006). Segundo o epistemólogo, como a filosofia natural trata da realidade em sua forma plena, epistemologia e filosofia se traduzem numa mesma tarefa, não havendo distinção entre ambas. Sendo assim, a tarefa do filósofo/epistemólogo seria identificar as bases e processos universais de construção da ciência que possibilitavam seu pleno progresso de forma contínua. Meyerson não negava a existência de erros na ciência, mas os erros seriam provenientes de métodos poucos rigorosos, falta de apropriação da verdadeira constituição do pensamento científico ou até mesmo ausência de noções epistemológicas mais profundas sobre a base do conhecimento racional (BULCÃO, 2009). A razão para este autor é dada a priori e se mantém a mesma ao longo do processo histórico da ciência, que por meio da lógica busca a produção de conceitos que possuam identidade com o real (WUNENBUGER, 2006).

O espiritualismo era considerado como uma doutrina voltada para a celebração do ser no mundo e privilegiava uma compreensão da natureza que era continuamente construída a partir da relação que estabelecíamos com ela. Por trás da doutrina espiritualista se escondia um pressuposto filosófico de conexão contínua entre senso comum e conhecimento científico, uma ponte que deveria ser construída levando ao limite a plenitude experiência e do contato direto com o mundo cotidiano. (BULCÃO, 2009).

No ensaio Número e Microfísica, Bachelard constrói uma caricatura deste contexto ao afirmar que:

A ciência do século XIX aparecia como [...] a ciência de nosso próprio mundo, no contato da experiência cotidiana, organizada por uma razão universal e estável [...]. O cientista era, no sentido de Conrad, “um de nós”. Vivía em nossa realidade, manipulava nossos objetos, aprendia com nossos fenômenos, encontrava a evidência na clareza de nossas intuições. Desenvolvia suas demonstrações seguindo nossa geometria e nossa mecânica. [...] Dele para nós, a aritmética era naturalmente a mesma. A ciência e a filosofia falavam a mesma linguagem (BACHELARD, 2008, p. 11).

O projeto epistemológico do filósofo francês tinha em suas bases uma proposta de embate contra estas três correntes filosóficas. Em crítica ao positivismo, Bachelard negava um pensamento científico construído sobre estruturas estáticas, imutáveis e de bases universais. Em oposição a Meyerson, Bachelard negava as bases absolutas da razão, defendendo um racionalismo aberto e dinâmico, sujeito constantemente a reconstruções. Com relação ao espiritualismo, Bachelard se mostrava contrário à continuidade entre o comum e o científico, defendendo que o conhecimento se constrói como superação de si mesmo, em um movimento de abandono da realidade primeira, onde o imediato deveria ceder lugar ao racionalmente construído (BULCÃO, 2009).

II.2 O nascimento do Novo Espírito Científico e os fundamentos da análise histórica

Nas origens da epistemologia bachelardiana foi possível encontrar essa profunda oposição às filosofias de sua época. Uma questão que naturalmente surgiu foi: o que fez Bachelard elaborar críticas tão contundentes? O filósofo estava mergulhado em uma era de grandes mudanças científicas e defendia que as tradições filosóficas de sua época não conseguiram acompanhar os avanços que ocorreram no século XX (ALUNNI, 2018). Era preciso romper com uma tradição há tempos sedimentada na cultura científica. Para lidar com a novidade essencial do pensamento científico contemporâneo, Bachelard elaborou na obra *O Novo Espírito Científico* uma proposta de inversão do vetor epistemológico. A ciência não deve ser compreendida como um processo de elaboração de enunciados abstratos para uma realidade preestabelecida, da mesma forma que o trabalho empírico não antecede a formulação racional. Para ele:

O sentido do vetor epistemológico parece-nos bem claro. Ele vai seguramente do racional ao real e de nenhum modo, ao contrário [...] como professavam todos os filósofos, desde Aristóteles até Bacon. [...] Procuraremos, pois, mostrar o que chamaremos de realização do racional ou mais geralmente de realização do matemático (BACHELARD, 2000, p. 13).

A “realização” do racional deve ser interpretada no sentido literal da palavra: a ação de tornar real o pensamento racional. A fuga do imediato, aliada à ascensão de uma concepção onde a realidade é criada pelo pensamento abstrato, demonstravam a necessidade de rever a noção de objetividade científica (WUNENBUGER, 2003). Enquanto a tradição

positivista defendia que os objetos de estudo da ciência são dados pela natureza, Bachelard defendia que na física contemporânea os próprios objetos de estudo são construídos (CHAZAL, 2006; PARROCHIA, 2006). Como consequência disto, leis e teorias científicas não deveriam ser enxergadas como meras descritoras da realidade, o que historicamente deu a elas um estatuto fenomenológico. Elas deveriam ceder lugar a uma perspectiva fenomenotécnica, onde tanto os objetos de estudo, quanto os fenômenos observados, deveriam ser produzidos no âmbito de racionalizações complexas e de realizações experimentais instruídas por ela (DAGONET, 2006). Essa ideia:

[...] esclarece uma fenomenotécnica pela qual fenômenos novos não são apenas encontrados, mas inventados e integralmente construídos. [...] A ciência atômica contemporânea é mais que uma descrição de fenômenos: é uma produção de fenômenos. A Física matemática é mais do que um pensamento abstrato: é um pensamento naturado (BACHELARD, 2008, p. 22).

Como tanto o objeto de estudo da ciência, como sua objetividade são construídos, isso demandava uma vigilância epistemológica constante, entendendo o processo de construção de conhecimento como um contínuo de retificações sobre si mesmo, evidenciando que “é em termos de obstáculos que o problema do conhecimento científico deve ser colocado” (BACHELARD, 1996, p. 17.). A questão dos obstáculos epistemológicos passou a ter papel central no projeto epistemológico de Bachelard a partir da publicação de sua obra *A Formação do Espírito Científico* (1996). Tornou-se também um dos conceitos mais apropriados pelas pesquisas ensino de ciências pelo grande apelo educacional que o filósofo dá a ele em sua obra.

Para Bachelard, os obstáculos seriam como uma espécie de barreira que se constitui entre o sujeito que busca conhecer a realidade e a própria realidade, que resiste em ser conhecida. O real a ser conhecido, para Bachelard, é um mundo que foge às nossas formas imediatas de conhecer. Estas últimas, de alguma forma, eclipsam uma realidade que poderíamos chamar de “2º ordem”, sendo esta o objeto das ciências. Essa barreira provoca uma espécie de inércia epistemológica que impede o avanço de nosso conhecimento sobre o mundo⁶. Um determinado obstáculo é superado quando uma nova forma de pensamento torna inteligível algo que formas anteriores não conseguiam. O interessante é perceber que a ciência

⁶ Para além daquilo que se pode ver escrito nas obras de Bachelard, diversos estudiosos do filósofo vêm apontando para uma verdadeira diversidade de interpretações do conceito. Bulcão (2009) aponta que os obstáculos epistemológicos são a manifestação de uma perspectiva filosófica onde a própria objetividade científica é construída. Segundo Vadée (1975), os obstáculos têm uma essência cognitiva e psicológica, pois, apesar de sua epistemologia ser considerada em uma perspectiva histórica, o sujeito cognoscente bachelardiano é considerado a-histórico. Lecourt (1970) interpreta os obstáculos a partir de uma essência ideológica, pois lida com a manutenção ou ruptura de determinadas posições filosóficas na ciência. É preciso, neste sentido, levar em consideração aquilo que Bontems (1974) denomina como o “bachelardianismo assimilado”, fruto das ascensões, crises e penetrações, que a epistemologia bachelardiana teve nos mais diversos contextos ao longo da história desde sua elaboração.

avança não apenas pela proposição de novos conceitos; uma nova etapa se estabelece quando estes últimos são frutos de novas formas de pensar, isto é, de novas racionalidades.

Bachelard reconhece a existência de dois obstáculos epistemológicos denominados como Gerais e que constituem dois polos opostos da filosofia moderna. De um lado ele apresenta o conhecimento primeiro, obstáculo geral fundado no senso comum e nas primeiras impressões que construímos sobre o mundo. Uma impregnação com o conhecimento primeiro conduziria a um realismo ingênuo, onde se teria a crença de que todos os elementos para um conhecimento completo sobre o universo provêm unicamente da realidade empírica. Do outro lado está a generalização, obstáculo fundado nas criticadas bases universais da razão. Uma impregnação na generalização conduziria a um idealismo ilusório, onde o mundo seria descrito em termos de princípios completamente afastados da realidade.

Entre o conhecimento primeiro e a generalização, se encontravam críticas aos tradicionais programas racionalista e empirista. Uma polarização em qualquer uma destas epistemologias conduziria ou a um realismo ingênuo, ou a um idealismo ilusório, o que fez o filósofo francês sinalizar a necessidade de superação deste embate. O racional precisa se diversificar, de modo a poder se referir a novas realidades e o material precisa se racionalizar, de modo a revelar seus aspectos ocultos (DAGONET, 2006).

Nem racional, nem empírico, a ciência contemporânea é regida por um diálogo filosófico que tem mérito excepcional: o diálogo entre o experimentador dotado de instrumentos rigorosos e o físico-matemático que ambiciona informar de perto a experiência. (BACHELARD, 1949, p. 16)

A partir deste estudo sobre os fundamentos da epistemologia bachelardiana foi possível destacar três aspectos que o filósofo francês faz uso para caracterizar a física do século XX. O primeiro aspecto residia no fato de que a atividade científica contemporânea era caracterizada por uma vigilância epistemológica constante na busca por contradições e polarizações filosóficas (DAGONET, 2006, 2003). Isto se manifestava dentro de um segundo aspecto caracterizado pelo exímio diálogo que se estabelecia entre o racionalista construtor de imagens de realidade e o experimentalista que, instruído por elas, produz fenômenos que tem como intuito manifestá-las. Todo este contexto seria regido por um terceiro aspecto que seriam as reestruturações das bases teóricas e experimentais pelo qual a ciência passou em seu processo de desenvolvimento ao longo do século XX.

A epistemologia de Bachelard tem como foco o sujeito do conhecimento e, assim, compreende a ciência como uma forma inerentemente humana de pensar o mundo. O desenvolvimento do conhecimento científico estaria associado a um processo em que o pensamento busca constantemente se superar. Isto permitia o desapego de uma realidade imediata, possibilitando, por meio de novas construções, adentrarmos em uma realidade menos aparente. Para o autor, a dinâmica histórica associada a este processo poderia ser descrita como uma dialética entre empirismo e racionalismo (WUNENBUGER, 2003). O pensamento racional se refazendo em referência ao mundo, da mesma forma que a

compreensão do real se modificaria pelas novas formas de pensar estabelecidas. Bachelard (1949) elabora uma topologia filosófica em que diferentes epistemologias teriam sua validade avaliada a partir de um centro que caracteriza a síntese desse movimento dialético.



Fig. 1 – Topologia filosófica de Bachelard (BACHELARD, 1949).

Bachelard construiu uma filosofia da ciência que, embora pautada em episódios históricos, não deixa de ser normativa. Ele construiu um modelo para o desenvolvimento das ciências, elaborado com forte inspiração na física do século XX (ALUNNI, 2018). É muito provável que sua epistemologia não possibilite explicações sobre como muitas áreas se constituíram ao longo do tempo (GAYON, 2003). Contudo, a física de partículas, conforme foi possível verificar a partir da análise histórica, se tratou de um caso no qual sua epistemologia iluminou com muita clareza muitos dos aspectos centrais de seu desenvolvimento. Como comenta Chazal (2006, p. 45), a “leitura de Bachelard pode nos ajudar hoje a melhor compreender o jogo filosófico que se encontra a física contemporânea”.

III. Os fundamentos da análise histórico-epistemológica

A análise histórica foi realizada tendo como referência teórica os três parâmetros norteadores extraídos da epistemologia bachelardiana: a vigilância epistemológica, o diálogo racionalismo-experimentalismo e a reestruturação de bases teóricas e experimentais. Ela se constituiu como a etapa mais delicada da pesquisa. A maior dificuldade enfrentada foi a baixa presença de literatura especializada sobre a história e a epistemologia da física de partículas direcionadas ao ensino de física. Há uma gama de trabalhos voltados para os fundamentos da

mecânica quântica, da relatividade, para os primórdios das pesquisas em radiações e para os primeiros modelos atômicos. No entanto, a história e a epistemologia da física de partículas nos anos mais avançados de sua maturidade são pouco discutidas no ensino de física, tanto nos periódicos nacionais, quanto nos internacionais. Por este motivo, esta análise histórica foi construída a partir do resgate, leitura e análise de fontes primárias e de um conjunto de textos provenientes de fontes secundárias que consistem em escritos de físicos, historiadores, sociólogos e filósofos redigidos majoritariamente em língua inglesa e que não possuem qualquer relação com o ensino de ciências – demonstrando maior necessidade de artigos desta natureza no contexto da pesquisa educacional brasileira.

Na etapa inicial da pesquisa, para ter uma noção mais ampla do campo de estudo histórico da física de partículas, foram analisadas as obras consideradas referência neste campo: *Early History of Cosmic Ray Studies: personal reminiscents with old photographs* (1982), *The Birth of Particle Physics* (1983), *The Rise of Standard Model: particle physics in the 1960s and 1970s* (1997), *Pions to Quarks: particle physics in the 1950s* (2009). Além destas obras, também foram consultadas obras de referência nos denominados estudos sociais da física de partículas. Os pormenores de uma nova cultura teórica puderam ser encontrados em obras como *QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger and Tomonaga* (1994) e *Nuclear Forces: the Making of the physicist Hans Bethe* (2012). As condições materiais de uma nova cultura experimental foram discutidas a partir das obras *How Experiments End* (1987) e *Image and Logic: a material culture of microphysics* (1997). A consolidação de uma nova dinâmica científica, influenciada diretamente por interesses e conflitos geopolíticos foi analisada a partir das obras *Constructing Quarks: a Sociological History of Particle Physics* (1984) e *The Mangle of Practice: Time, Agency and Science* (1995). Na leitura destas obras, foi possível identificar eventos históricos que contribuíram fortemente para o desenvolvimento do quark tanto como formulação teórica, quanto como objeto de estudo experimental.

Em seguida, tendo um panorama global dos eventos históricos que contribuíram historicamente para a construção do quark, encaminhou-se uma investigação local, analisando os trabalhos científicos que foram realizados em cada um dos eventos históricos identificados. Para realizar esta análise, foi utilizado o acervo digital organizado em parceria pelo Particle Data Group (PDG) e o Institute of High Energy Physics (IHEP)⁷. O acervo organiza por década, indo de 1890 a 2000, arquivos digitalizados dos artigos publicados em revistas especializadas que contribuíram para a evolução e desenvolvimento da Física de Partículas ao longo do século XX. No contato com os artigos provenientes do acervo, buscou-se um entendimento dos movimentos epistemológicos que conduziram à contribuição dada pelo trabalho que estava em análise. Do ponto de vista teórico, buscou-se identificar as bases teórico-matemáticas utilizadas e associá-las às discussões teóricas existentes na época. Do ponto de vista experimental, buscou-se identificar os aparatos, os arranjos e as técnicas utilizadas,

⁷ O acervo está disponível em: <<http://web.ihep.su/owa/dbserv/hw.part1>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

associando-as aos problemas tecnológicos e as condições materiais dos contextos estudados. Do ponto de vista do contexto mais amplo, seguindo as tendências que tem se consolidado nas pesquisas de história, filosofia e sociologia da ciência no ensino, buscou-se analisar o local da publicação, o grupo no qual o cientista estava vinculado e o contexto no qual o grupo estava imerso e, quando possível, a rede de relações que ele estabelecia, uma vez que a constituição da dinâmica transnacional de colaborações estava em vias de formação. Ao estudar as origens desta dinâmica, foi muito comum se deparar com a circulação de cientistas por diferentes países e grupos de pesquisa, motivada por várias questões que vão desde a falta de estrutura no país de origem, passando pela construção relações constituintes do embrião da teia de colaborações, chegando até justificativas de exílio em função dos grandes confrontos geopolíticos e militares que ocorrem a partir da década de 30.

Tendo em vista que o objetivo deste artigo foi apresentar um panorama da circulação de ideias e problemas que exerceram papel fundamental na constituição do quark, toda a complexidade e minúcias dos atores, contextos, teorias e experimentos deste período não puderam ser aqui contemplados com todo o detalhe necessário, como já era esperado de reconstruções de amplos períodos históricos, o que não significa que não tenham sido levados em consideração no contexto mais amplo da pesquisa. Por este motivo, devido à extensão da análise, foge do escopo deste artigo um detalhamento maior das narrativas históricas em sua totalidade. Tendo isto em vista, este artigo buscou organizar de forma sistematizada episódios históricos aliados às considerações epistemológicas deste processo que puderam ser extraídas tomando como referência os parâmetros norteadores da epistemologia bachelardiana⁸.

IV. Diagrama de interação histórico-epistemológico: o *quark* como construção histórica

A construção da narrativa histórica que levou à formulação do *quark* foi materializada em um diagrama de interação histórico-epistemológico. Este diagrama foi idealizado de forma análoga aos famosos diagramas de Feynman utilizados para representar a interação entre partículas elementares. Com ele buscou-se ilustrar a interação entre eventos históricos, mediados por movimentos epistemológicos, caracterizados por uma forte relação com concepções teórico-matemáticas e fenomenotécnicas, aspectos centrais do diálogo filosófico proposto por Bachelard. Estas concepções estão representadas no diagrama por dois polos: Teórico-Conceitual e Experimental.

Os dois polos foram concebidos numa relação de complementariedade manifestadas em todo o mapa e que conduziam para regiões de interação mais intensa, representadas por vértices de interação. Os vértices foram utilizados para demarcar importantes pontos de inflexão que influenciaram drasticamente na sucessão histórica dos eventos, mudando o rumo

⁸ Para ter acesso à narrativa detalhada e a análise mais minuciosa dos eventos históricos consultar MILNITSKY, 2018. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-10072018-135937/pt-br.php>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

da formulação de mecanismos teóricos e contribuindo para ascensão de novas empreitadas experimentais.

Ao longo do diagrama foram posicionados os diversos eventos históricos que, segundo a análise histórico-epistemológica, influenciaram na formulação do quark tanto como concepção teórica, quanto como objeto de estudo experimental. A localização espacial dos vértices de interação no diagrama foi pensada com o objetivo de elucidar sua proximidade com as perspectivas Teórico-Conceitual e Experimental. Quanto mais ao centro, mais equilibrada foram as contribuições. Quanto mais à esquerda, maior foi a contribuição experimental. Quanto mais à direita, maior foi a contribuição teórica. Da forma como foram inseridos, os eventos históricos podem ser interpretados como pontos no interior de um plano cartesiano no qual o eixo “x” representa posições epistemológicas dentro de um espectro filosófico, que tem em suas extremidades o racionalismo e o empirismo, e o eixo “y” sua evolução temporal. A síntese de sua forma de organização está apresentada na Fig. 2, já o diagrama histórico-epistemológico construído a partir desta análise histórica se encontra na Fig. 3.

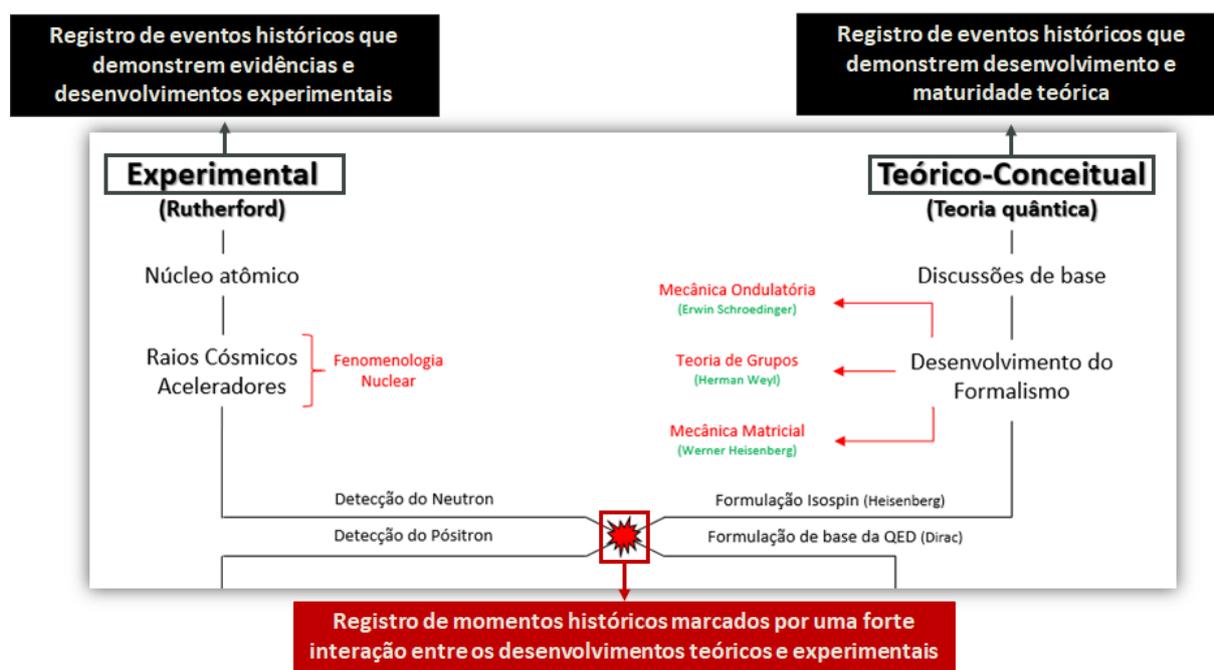


Fig. 2 – Organização do diagrama de interação histórico epistemológico. (Fonte: Produzida pelo autor)

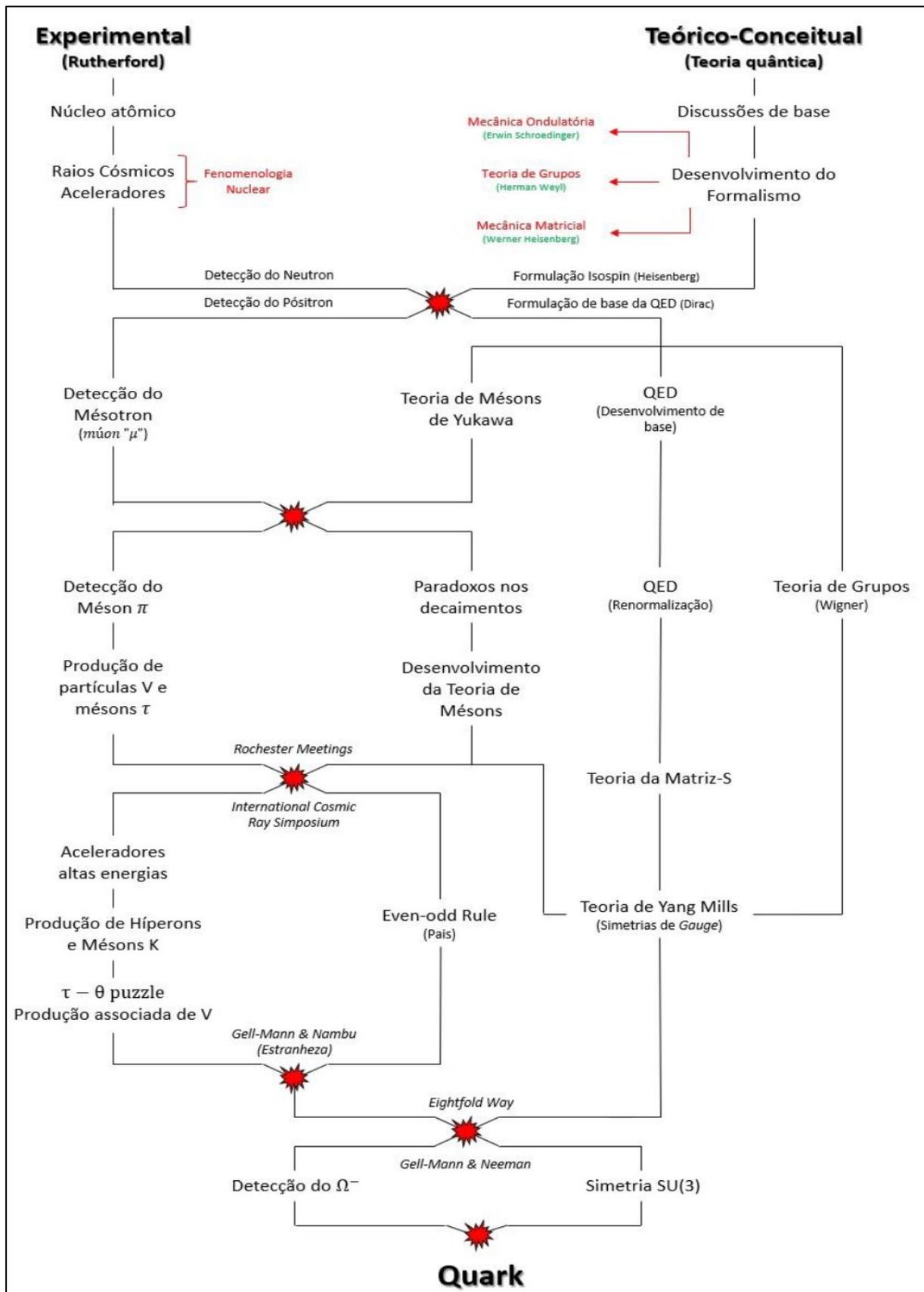


Fig. 3 – Diagrama de interação histórico-epistemológico investigando a formulação do quark como objeto de estudo teórico e experimental. (Fonte: MILNITSKY, 2018, p. 222)

IV.1 O diálogo racional e experimental no desenvolvimento da Física de Partículas

A superação do tradicional embate racionalismo e empirismo foi apontada como uma das características marcantes da física do século XX. Ao mesmo tempo foi eleito também como um dos principais obstáculos epistemológicos enfrentados neste período. Nesta perspectiva, o diagrama de interação histórico-epistemológico foi idealizado com o objetivo de explicitar as relações de complementariedade entre as contribuições racionais e empíricas. Os desenvolvimentos teóricos passaram a se constituir em uma profunda relação com as atividades experimentais, culminando na construção de novas imagens do mundo elementar e explicitando a filosofia dialogada tão defendida por Bachelard.

Para cada um dos polos epistemológicos foram definidos marcos iniciais de análise histórica estabelecidos a partir da conjunção de eventos que desembocaram na formulação do quark na década de 60. Do ponto de vista experimental, foram destacadas as investigações conduzidas pelo grupo de Ernest Rutherford no laboratório de Cavendish, acerca da natureza das radiações e da estrutura atômica da matéria, que conduziram às primeiras técnicas de estudo da fenomenologia nuclear. Do ponto de vista teórico, foram destacadas as discussões de base da teoria quântica que levaram aos desenvolvimentos dos primeiros formalismos matemáticos da mecânica quântica, indo da proposta ondulatória formulada por Erwin Schroedinger à matricial de Werner Heisenberg, permeando o embrião da teoria de grupos idealizado por Hermann Weyl. As discussões deste contexto inicial, que muito se aproxima dos primórdios da teoria quântica, serviram de base teórica e experimental para o que muitos historiadores consideram como o nascimento da física de partículas nos anos 30 (HODDESON; BROWN, 1983).

O primeiro vértice de interação foi pensado a partir da conjunção dos grandes avanços teóricos que aconteceram na década de 20 mobilizados pelos encontros de Solvay, aliados aos avanços experimentais conduzidos pelos grupos de Rutherford na Inglaterra e Robert Millikan nos EUA. Em Cavendish, James Chadwick, que chegava para trabalhar com o estudo das radiações, encontrou as primeiras evidências da existência de nêutrons. Já nos EUA, Carl Anderson, que se aproximou do grupo que fazia estudo dos raios cósmicos com câmaras de nuvem, encontrou as primeiras evidências da existência de pósitrons. A descoberta dos nêutrons mudou o rumo das discussões teóricas sobre a estrutura nuclear, levando Heisenberg a formular um novo formalismo que interpretava prótons e nêutrons como estados diferentes de spin isotrópico de uma mesma partícula: o nucleon. A descoberta dos pósitrons, por outro lado, dialogava com os trabalhos desenvolvidos por Paul Dirac sobre teorias quânticas relativísticas e auxiliaram na construção das bases dos programas de quantização das teorias de campo. Este primeiro movimento foi interpretado como uma abertura do racionalismo a novos formalismos que culminaram na construção de novas imagens do mundo físico, passando a exercer influências diretas no entendimento de técnicas experimentais. As atividades, que até a década de 30 se viam muito concentradas no estudo das radiações e da caracterização dos decaimentos radioativos, se voltavam para estudos da

composição dos raios cósmico, revelando que o mundo das partículas elementares era mais complexo do que se imaginava⁹.

As evidências da existência do nêutron e do pósitron levantaram questões que ampliaram os campos de estudo teórico e experimental que convergiram para o segundo vértice de interação. Com a descoberta do pósitron, diversos grupos ao redor do mundo passaram a estudar os raios cósmicos. No grupo de Cavendish, Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini (1933) esclareceram as propriedades das componentes leves dos raios cósmicos a partir de estudos sobre chuviros cósmicos, caracterizando fótons, elétrons e pósitrons de altas energias. Nos EUA, Seth Neddermayer se juntou ao grupo de Milikan, onde passou a desenvolver estudos, orientado por Anderson. Em 1937, Anderson e Neddermayer encontraram evidências de uma componente pesada nos raios cósmicos, formada por partículas que teriam massas maiores que a dos elétrons e pósitrons e menores do que a dos prótons e nêutrons. Esta massa intermediária levou a dupla a nomear este conjunto de partículas como méstrons¹⁰. As evidências circularam e outros grupos, como o de Street & Stevenson (1937) nos EUA e Nishina (1937) no Japão¹¹, também registraram evidências que apontavam para a existência desta nova componente dos raios cósmicos.

Paralelamente, após a descoberta do nêutron e influenciado pelos estudos sobre radioatividade, Hideki Yukawa (1935) construiu uma teoria para a estabilidade nuclear propondo a existência de uma nova força responsável por mediar a interação entre os prótons e os nêutrons no núcleo atômico. Influenciado pelas discussões de base da teoria quântica, Yukawa propôs a quantização das interações nucleares prevendo a existência de uma partícula mediadora com características muito semelhantes aos mesotrons observados nos raios cósmicos. As associações naturalmente aconteceram, no entanto, havia discrepâncias entre os tempos de vida média, previstos teoricamente por Yukawa, e os observados experimentalmente. A medida do tempo de vida média era um desafio que exigia extrapolação das câmaras de nuvem. As fotografias possibilitavam apenas o estudo da massa

⁹ Paralelamente, a necessidade de feixes artificiais de altas energias já era uma questão experimental posta, apesar de ainda longe de se tornar realidade. Entre as décadas de 20 e 30, os primeiros mecanismos de aceleração de partículas passaram a fazer parte de projetos de laboratórios e universidades, que esbarravam em questões tecnológicas e de financiamento. No campo da tensão contínua se destacam os mecanismos Cockcroft–Walton e Van de Graff. No campo de tensão alternada se destacam os primeiros projetos do LINAC e do Cíclotron. Estas questões impulsionaram os primeiros passos da construção da dinâmica de colaborações. O laboratório de Berkeley, coordenado por Ernest Lawrence na década de 30, se tornou um grande exemplo. Para viabilizar a construção do Cíclotron, Lawrence relata que reuniu orçamentos disponíveis de laboratórios de várias universidades dos EUA para construir o equipamento que passou a ter uso compartilhado por todas elas. Ao longo da década de 30, sua equipe que era inicialmente composta por três pessoas, chega a contar com cerca de 50 integrantes colaboradores de várias universidades. Foi junto a este grupo que Lattes conseguiu produzir em laboratório os primeiros feixes artificiais de píons em meados da década de 50. Para uma discussão mais detalhada sobre a história dos aceleradores entre os anos de 20 e 30 ver Sessler & Wilson (2014).

¹⁰ Partícula que futuramente ficaria viria a ser conhecida como múon “ μ ” e seria classificada como lépton, segundo as organizações definidas nos Encontros de Rochester ocorridos em meados da década de 50. Para um relato dos trabalhos com muons nos EUA ver Anderson (1982).

¹¹ Para um relato dos grupos do Japão ver Haykawa (1983).

e do sinal da carga elétrica das componentes dos raios cósmicos. A inauguração de aspectos não visuais possibilitados por medidas com circuitos eletrônicos foi uma inovação técnica protagonizada por grupos experimentais italianos, como os de Bruno Rossi (1940), exilado nos EUA em função da ascensão do fascismo, e Conversi, Pancini e Piccioni (1946) na Itália, já no período pós-guerra¹².

As evidências experimentais apontavam para um tempo de vida média muito longo, o que indicava que se tratavam de partículas que interagem fracamente com a matéria. Prevendo um comportamento oposto, o méson idealizado pelo físico japonês deveria interagir fortemente e ter um tempo de vida média muito baixo, uma vez que era interpretado como o mediador das forças nucleares. Este paradoxo se estabilizou e teve sua resolução tardiamente adiada em função da circulação de cientistas que ocorre com o início da 2ª Guerra Mundial. A solução que busca conciliar as evidências experimentais e previsões teóricas surgiu a partir da formulação de uma teoria de dois mésons, que defendia que o mesotron na realidade seria um produto do decaimento da partícula proposta por Yukawa. Esta teoria de dois mésons foi proposta paralelamente por Marshak & Bethe (1947) nos EUA, e Sakata & Inoue (1946) no Japão, e exigiu uma inovação técnica que foi protagonizada pelo brasileiro César Lattes que neste momento trabalhava no grupo de pesquisas de raios cósmicos de Cecil Powel, em Bristol na Inglaterra.

Como o segundo méson era uma entidade que deveria interagir fortemente com a matéria e possuir um tempo de meia vida muito curto, sua presença nas câmaras de nuvem ou nos circuitos eletrônicos era difícil de ser percebida, de tal modo que se fez necessário desenvolver mecanismos capazes de intensificar as reações nucleares. Lattes aprimorou as técnicas das placas de emulsão nuclear fazendo uso da alta seção de choque de capturas nucleares por amostras de boro. De posse do novo conjunto de placas, o brasileiro liderou expedições em altas altitudes e revelou não só a existência das partículas idealizadas por Yukawa, denominadas como méson- π , mas também sua cadeia de decaimento composta pelos mesotrons que compunham a componente pesada dos raios cósmicos e vinham sendo estudados ao longo de toda a década de 40¹³.

A descoberta dos píons foi considerada na análise histórica como um marco de transição entre segundo e o terceiro vértice de interação. Bruno Rossi, em seu relato publicado na obra *The Birth of Particle Physics* (1983), definiu este período de estudo dos mésons como “os anos da inocência”, pois acreditava estar lidando com os problemas mais complexos do universo das partículas elementares, sem ainda conhecer os problemas que apareceriam posteriormente na década de 50. Enquanto ainda se tentava assimilar a existência dos mésons μ e π , um novo conjunto de partículas com propriedades peculiares tiveram evidências

¹² Para um relato sobre as medidas do tempo de vida média do múon numa abordagem de estudo dos raios cósmicos alternativa às câmaras de nuvem, ver Rossi (1983).

¹³ Para um relato do trabalho de Lattes com o aprimoramento das placas de emulsão e sua experiência nas observações em altitudes elevadas, ver Lattes (1983).

divulgadas por George Rochester & Clifford Butler (1947). Produzidas duplamente em decaimentos, elas ficaram conhecidas como partículas-V devido à trajetória realizada em sua produção. Diversas outras evidências começaram a surgir reforçando a existência deste conjunto de partículas que apresentavam características que as distinguiam de qualquer outra partícula identificada até este momento da história. O acúmulo de dados experimentais sem qualquer explicação plausível no campo teórico virou a comunidade da física de partículas de cabeça para baixo, culminando em um conjunto de encontros onde as perspectivas teóricas e experimentais foram colocadas em confronto direto constituindo o terceiro vértice de interação: o International Cosmic Ray Symposium e os famosos Rochester Meetings¹⁴.

As discussões nestes encontros buscaram reconciliar os caminhos entre teoria e experimento rumo ao quarto vértice de interação observado no diagrama. Passos nesta direção foram dados devido aos esforços realizados nos Rochester Meetings de organizar as partículas em grupos com propriedades semelhantes de massa, carga e modos de decaimento. Quando perceberam que as partículas-V são produzidas exclusivamente em decaimentos, indicando que provém de uma fraca interação com a matéria, Murray Gell-Mann (1956) nos EUA, e Kazuhiko Nishijima (1955) no Japão, propuseram, independentemente, a existência de um novo número quântico denominado como estranheza. Este número não seria conservado em decaimentos, o que indicava uma possível quebra de simetria provocada pelas interações fracas. Esta aproximação do campo teórico com as evidências experimentais criada com o conceito de estranheza foi identificada como o quarto vértice de interação.

A fórmula de Gell-Mann-Nishijima, no entanto, aparentava ser mais uma solução semi-empírica, do que de uma solução propriamente teórica calcada em princípios mais fundamentais. Estas reflexões nos fundamentos teóricos demandavam uma reaproximação com o polo teórico.¹⁵ Analisando a evolução global do diagrama a partir do primeiro vértice de interação, foi possível identificar como a abertura do formalismo e da técnica iniciou um movimento de polarização. Ao lado esquerdo do diagrama, verificou-se o polo de inovações e evidências experimentais que culminaram na descoberta de um novo conjunto de partículas como os muons, os píons e as partículas-V, que foram constituintes fundamentais do segundo, terceiro e quarto vértice de interação. Paralelamente, ao lado direito do diagrama, houve o desencadeamento de um conjunto de formulações teóricas que culminaram nas primeiras tentativas bem sucedidas de formulação de teorias quânticas de campo: a Eletrodinâmica Quântica. Este afastamento dos campos de trabalho teórico e experimental indicava uma espécie de polarização epistemológica. No entanto, mais adiante foi possível identificar uma reaproximação que muda o rumo das discussões na década de 50. Ela foi mediada pelo

¹⁴ Os Rochester Meetings foram e ainda são considerados eventos de grande importância para a física de altas energias, acontecendo ainda na atualidade com o nome *International Conference on High Energy Physics*. Para mais detalhes dos encontros e da importância deles para a física de partículas na década de 50, ver Marshak (1989).

¹⁵ Para compreender detalhes deste movimento de primeira ordem aproximação com as evidências experimentais e segunda ordem de aproximação com os fundamentos teóricos, ver Gell-Mann (1996).

trabalho teórico dos físicos Cheng Ning-Yang e Robert Mills (1954), que construíram um mecanismo matemático capaz de aliar os formalismos de grupos, desenvolvidos em todo o polo teórico, ao longo as décadas de 30 e 50, com as iminentes simetrias e quebras de simetrias evidenciadas pelo estudo das partículas-V. Esta reaproximação foi fundamental para a formulação do quark no início da década de 60.

Ao perceber a insuficiência das evidências experimentais em esclarecer a diversidade de partículas, e das formulações teóricas em realizar diálogos com os trabalhos experimentais, Gell-Mann (1957) uniu sua proposta semiempírica de estranheza à proposta teórica de Yang-Mills (1954), construindo um mecanismo capaz de avaliar as simetrias exatas e aproximadas do sistema de partículas elementares em interação. Este mecanismo ficou conhecido como Eightfold-Way, dando origem ao quinto vértice de interação, marca de uma forte reconciliação entre os aspectos teóricos e experimentais da época.

Por meio do Eightfold-Way, Gell-Mann (1962) foi capaz de organizar as partículas em grupos de simetria e com eles previu a existência do Ω^- , uma partícula que não havia sido detectada até então. Esta previsão sinalizou para Gell-Mann que talvez alguma estrutura mais fundamental poderia existir e estar associada às simetrias dos grupos organizados e estudados por ele. A detecção do Ω^- já estava num campo de ação muito longe das pesquisas em raios cósmicos e demandou outra inovação técnica no campo experimental. Fontes de alta frequência que não existiam nas décadas de 20 e 30 e impediram a construção de aceleradores de tensão alternada, passaram a figurar no campo experimental da década de 50 com o desenvolvimento da tecnologia radares na 2ª Guerra Mundial. A presença destas fontes possibilitou a construção de mecanismos de aceleração de tensão alternada como o LINAC e um grupo diverso de aceleradores inspirados no Síncrotron. Acolhendo os aceleradores, grandes laboratórios e instituições como o CERN, o Fermilab, o BNL e o SLAC passaram a se constituir como grandes centros de pesquisa em física de altas energias que recebiam cientistas de todo o mundo¹⁶. Fazendo uso de uma câmara de bolhas acoplada ao acelerador de Brookhaven, Barnes (1964) divulgou evidências da existência do Ω^- , o que fortaleceu ainda mais a convicção de que o Eightfold Way revelava detalhes fundamentais sobre a organização das partículas elementares. Como consequência disto, Gell-Mann (1964) e George Zweig (1964) nos EUA e Yuval Ne'eman (1961) em Israel elaboraram uma proposta apresentando os quarks como estrutura elementar capaz de explicar a imensidão de partículas produzidas nos decaimentos estudados ao longo da década de 50 – o que nos conduziu ao sexto e último vértice de interação.

Do início ao fim do diagrama, o primeiro e o último vértice buscaram representar os movimentos de abertura do racionalismo e da inovação técnica e experimental que revelaram novos elementos da realidade física: o papel que as simetrias desempenham na dinâmica das partículas elementares e a função que os experimentos têm em produzir os fenômenos que

¹⁶ Para um estudo mais aprofundado do grupo de aceleradores, instituições e laboratórios que surgem entre as décadas de 40 e 70, ver Sessler & Wilson (2014).

fazem manifestar os inobserváveis, destacando assim o diálogo entre o racional e o fenomenotécnico tão defendido na epistemologia bachelardiana:

Nada de racionalidade no vazio; nada de empirismo desconexo: eis as duas obrigações filosóficas que fundamentam a rigorosa síntese da teoria com a experiência [...] se faltar um dos termos, é certo que se pode fazer experiências, pode-se fazer matemáticas, mas não se participa da atividade da Ciência Física Contemporânea (BACHELARD, 1949, p. 10).

IV.2 A reestruturação de bases como o motor do desenvolvimento da Física de Partículas

A análise global dos vértices de interação foi capaz de expor a presença do diálogo filosófico entre as atividades racional e empírica, mas não foi apenas esta dimensão que o diagrama pôde revelar. Ao voltar os olhos para uma análise local de sua estrutura, foi possível encontrar reestruturações nas bases teóricas e experimentais das microengrenagens epistemológicas que impulsionam o desenvolvimento da Física de Partículas. Para ilustrar essa reestruturação, os fundamentos de base teórica e fenomenotécnica dos diversos períodos históricos analisados ao longo da pesquisa foram sistematizados na Fig. 4.

Contexto Histórico	Fundamentos Teóricos	Fundamentos Fenomenotécnicos
Proposição dos modelos atômicos orbital e nuclear	<ul style="list-style-type: none"> Mecânica e eletrodinâmica clássica Princípios de quantização Mecânica Quântica de Schroedinger 	<ul style="list-style-type: none"> Telas de Cintilação Decaimentos Radioativos
Positron proposition, formulation and discovery	<ul style="list-style-type: none"> Mecânica Quântica Matricial Mecânica Quântica Relativística Primórdios do formalismo de Grupos 	<ul style="list-style-type: none"> Raios Cósmicos Câmaras de Nuvem
Formulação da Simetria de Isospin entre Prótons e Neutrons e estrutura do núcleo atômico	<ul style="list-style-type: none"> Mecânica Quântica Matricial Primórdios do formalismo de Grupos 	<ul style="list-style-type: none"> Decaimentos Radioativos Câmaras de Nuvem Câmaras de Ionização
Quantização das interações nucleares e a descoberta dos múons e píons	<ul style="list-style-type: none"> Mecânica Quântica Relativística e não-Relativística Teoria da Matriz S 	<ul style="list-style-type: none"> Raios Cósmicos Câmaras de Nuvem Circuitos de Coincidência e Anticoincidência Placas de Emulsão Nuclear
Revelação das Partículas-V e ascensão dos grandes laboratórios	<ul style="list-style-type: none"> Princípios de Conservação Mecanismos de Quebra de Simetria Formulação de novas propriedades Quânticas 	<ul style="list-style-type: none"> Cosmic Rays Cloud Chambers Particle Accelerators Bubble Chambers
Eightfold Way, quebras de simetria e o surgimento da ideia de quark	<ul style="list-style-type: none"> Grupos de Simetria Mecanismos de Quebra de Simetria Primórdios das Teorias de Gauge 	<ul style="list-style-type: none"> Aceleradores de Partículas Câmara de Bolhas

Fig. 4 – Reestruturação nos fundamentos de base teórica e fenomenotécnica. (Fonte: produzida pelo autor.)

Na proposição dos primeiros modelos atômicos foi possível perceber a presença de bases teóricas que tomavam como referências a mecânica e a eletrodinâmica clássica. Já como bases fenomenotécnicas, foram identificados os papéis desempenhados pelo uso de telas de cintilação que realizavam contagens da incidência de partículas provindas de materiais radioativos. As primeiras reestruturações teóricas passaram pelo abandono dos princípios clássicos e a adesão de princípios de quantização que conduziram ao formalismo encontrado na mecânica ondulatória de Schroedinger. Da mesma forma, os estudos dos raios cósmicos exigiram reestruturações dos mecanismos experimentais, o que elevou o papel desempenhado pelo uso câmaras de nuvem.

Um novo movimento de reestruturação pôde ser verificado com a ascensão do formalismo matricial da mecânica quântica, aliado ao abandono do hamiltoniano clássico que cedeu lugar ao relativístico. Ele possibilitou não somente o entendimento teórico do pósitron, como também a construção de novas propriedades como o spin e o spin isotrópico. Essa maturidade nos formalismos trouxe consigo novas concepções teóricas que tiveram sucesso no projeto de quantização do eletromagnetismo e originaram a Eletrodinâmica Quântica. No entanto, elas não foram capazes de acompanhar e descrever o acúmulo de evidências experimentais no campo das interações fortes e fracas provindas dos estudos das partículas-V. Evidências estas que só puderam ser estudadas em função de uma reestruturação experimental protagonizada pela ascensão das câmaras de bolha que vieram acompanhadas de aceleradores de partículas que possibilitavam ambientes mais controlados de análise das partículas elementares.

A resolução do mistério das partículas-V exigiu da atividade teórica um abandono dos princípios clássicos de causalidade das interações. Foi somente ampliando o entendimento de que a dinâmica do sistema de partículas elementares poderia ser descrita em termos de simetrias exatas e aproximadas que o quark pôde ser formulado.

A reestruturação das bases teóricas e fenomenotécnicas foram reveladas como elementos fundamentais para o desenvolvimento histórico da Física de Partículas. Para além dos tradicionais rompimentos com a física clássica, esta análise histórica permitiu revelar que movimentos de superação no interior da própria teoria quântica foram necessários para que a descrição das partículas elementares pudesse ser realizada. Bachelard buscou expressar esta revolução filosófica característica da física contemporânea trazendo um relato do encontro entre o Thomson pai, protagonista das evidências do elétron como partícula, e o Thomson filho, protagonista das evidências do elétron como onda:

Era um verdadeiro acontecimento dramático ver o grande velho homem de ciência, que despendeu seus melhores anos afirmando a natureza corpuscular do elétron, cheio de entusiasmo pelo trabalho de seu filho, revelando que os elétrons em movimento constituem ondas. Do pai ao filho pode-se medir a revolução filosófica que reclama o abandono do elétron como coisa. [...] O físico tem sido obrigado três ou quatro vezes nos últimos 20 anos a reconstruir sua razão e, intelectualmente falando, refazer uma vida (BACHELARD, 2000, p. 148, grifo nosso).

V. Considerações Finais

A formulação do quark pôde ser revisitada a partir dos fundamentos da epistemologia bachelardiana que iluminaram com clareza certos aspectos do desenvolvimento histórico da Física de Partículas, unindo as reestruturações de base promovidas pela ascensão da teoria quântica com as perspectivas fenomenotécnicas do estudo experimental das partículas elementares.

Foi destacado no diagrama um conjunto de episódios históricos que problematizaram a ascensão de novas formulações teóricas e discutiram diversos aparatos utilizados na atividade experimental. Espera-se que estes elementos possam ser utilizados para ampliar os olhares para o ensino da Física de Partículas. Não se trata de conduzir propostas de ensino pautadas exclusivamente pela história da física de partículas. Obviamente não se trata também de fazer uma cronologia dela, mas sim de utilizar reflexões de cunho histórico-epistemológico para repensar seus modos de ensino.

Foi contextualizado que muitas propostas de ensino e divulgação da física de partículas se baseiam na apresentação do modelo padrão fazendo uso do emblemático quadro que organiza as partículas em termos dos quarks, léptons e bósons. Este foi um ponto de partida que contribuiu para a consolidação da física de partículas como um dos grandes tópicos de ensino de FMC na educação básica. Contudo, se esta apresentação não for além da nomeação das partículas e de suas famílias de pertença, este processo educativo não ultrapassa o nível informativo. Para isso, é preciso que se debata, primeiramente, quais problemas se busca responder quando se estuda a estrutura da matéria. A partir disso, é preciso colocar em discussão porque quarks, léptons e bósons são os constituintes elementares, o que envolve apresentar não somente o conhecimento em sua forma final, mas debater seu processo de produção.

O diagrama de interação histórico-epistemológico apresentado neste trabalho buscou suprir, mesmo que parcialmente, as necessidades apontadas. Com ele buscou-se sintetizar uma história complexa identificando momentos chaves da constituição do quark ao longo da história da física de partículas, buscando estabelecer uma referência para o ensino desta temática que não separa o conhecimento de sua epistemologia. Cada episódio citado pode ser transposto didaticamente para diferentes níveis de ensino, estabelecendo saberes-a-ensinar adequados à etapa de formação dos estudantes (CHEVALLARD, 1991).

Ademais, a realização de reflexões voltadas para um entendimento mais amplo da história e a epistemologia da Física de Partículas pode auxiliar a pensar novas possibilidades sobre o seu ensino, principalmente por ainda haver uma pequena quantidade de publicações desta natureza no contexto da pesquisa em ensino de ciências. Os benefícios do uso de história e filosofia da ciência nos campos da física moderna já contam com um vasto respaldo na literatura quando analisadas as possibilidades de abordagens que emergiram quando debates sobre os fundamentos da Mecânica Quântica e das origens históricas das Teorias da

Relatividade passaram a figurar ensino, o que mostra que há ainda um grande potencial inexplorado na Física de Partículas.

Por ter se restringido ao estudo histórico do quark e ao campo das interações fortes, muitas outras possibilidades não puderam ser apresentadas neste artigo. As discussões sobre os problemas enfrentados no entendimento das interações fracas e das partículas envolvidas nestas interações. Os conflitos políticos que se originaram de uma dinâmica de ciência em colaboração mundial e que se manifestaram na construção das entidades de pesquisa e dos aceleradores utilizados nelas. Os conflitos de nacionalidades e a pluralidade de escolas de pensamento que permearam as diversas discussões teóricas e experimentais. Para além destas pautas, existem muitas outras possibilidades podem trazer não só ao ensino de Física de Partículas, mas também para o ensino da Física Moderna e Contemporânea no geral, novas contribuições para suas discussões de ensino.

Referências bibliográficas

ALUNNI, C. **Spectres de Bachelard**: Gaston Bachelard et l'École Surrealiste. Paris: Hermann, 2018. 494p.

ANDERSON, C. D. The Positive Electron. **Physical Review**, New York, v. 43, p. 49-55, 1933.

ANDERSON, C. Unraveling the Particle Content of the Cosmic Rays. In: SEKIDO, Y., HARRY E. **Early history of cosmic ray studies**: Personal reminiscences with old photographs. London: Springer Science & Business Media, 1982. p. 117-132.

BACHELARD, G. **A Epistemologia**. Apresentação: Dominique Lecourt. Tradução: Fátima Lourenço Godinho & Mário Carmino Oliveira. Lisboa: Edições 70, 2013. 266p.

BACHELARD, G. **Estudos**. Apresentação: Georges Canguilhem. Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 2008. 86p.

BACHELARD, G. **O Novo Espírito Científico**. Tradução: Juvenal Hahne Júnior. Rio de Janeiro: Edições Tempo Brasileiro, 2000. 151p.

BACHELARD, G. **A filosofia do não**; O novo espírito científico; A poética do espaço. Coleção os Pensadores. Tradução: Joaquim José Moura Ramos *et al.* São Paulo: Abril Cultural, 1978. 354p.

BACHELARD, G. **A Formação do Espírito Científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Tradução: Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. 314p.

BACHELARD, G. **O racionalismo aplicado**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1977. 244p.

BARNES, V. E. *et al.* Confirmation of the Existence of the Ω - Hyperon. **Physics Letters**, New York, v. 12, p. 134-141, 1964.

BEGALLI, M.; BILOW, U. Sharing LHC Research and Discovery with High School Students. In: PIETROCOLA, M. (Ed.) **Upgrading physics education to meet the needs of society**. London: Springer, 2019. p. 68-84.

BLACKETT, P.; OCCHIALINI, G. Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation. **Proceedings of The Royal Society**, London, v. A139, p. 699-709, 1933.

BØE, M. V. *et al.* Actual versus implied physics students: How students from traditional physics classrooms related to an innovative approach to quantum physics. **Science Education**, New Jersey, p. 1-19, 2018.

BONTEMS, V. **Bachelard**. Tradução: Nícia Adan Bonnatti. 1. ed. São Paulo: Estação Liberdade, 2017. 259p.

BROCKINGTON, G.; SIQUEIRA, M.; PIETROCOLA, M. **A Realidade Escondida: A inserção de conceitos de Física Quântica e de Partículas no Ensino Médio**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2017. 126p.

BROWN, L. M.; HODDESON, L. **The Birth of Particle Physics**. London: Cambridge University Press, 1983. 412p.

BROWN, L. M.; DRESDEN, M.; HODDESON, L. **Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s**. London: Cambridge University Press. Janeiro, 2009. 734p.

BULCÃO, M. **O racionalismo da ciência contemporânea: introdução ao pensamento de Gaston Bachelard**. São Paulo: Ideias & Letras, 2009. 232p.

CHAZAL, G. La Physique Contemporaine et la Philosophie de Gaston Bachelard. In : DAMIEN, R. ; HUFSCHEMITT, B. **Bachelard : Confiance Raisonnée et Défiance Rationnelle**. Paris: Presses Universitaires de France-Comté, 2006. p. 35-46.

CHEVALLARD, Y. **La Transposición Didáctica**. Buenos Aires: Aique, 1991. 196p.

COMTE, A. **Cours de philosophie positive (Introduction et commentaires Florence Khoddos)**. Grenoble: PhiloSophie, Édition Électronique, 2020. 775p.

DAGONET, F. Le Relationnel Éclipse le Rationnel. In : DAMIEN, R.; HUFSCMITT, B. **Bachelard: Confiance Raisonnée et Défiance Rationnelle**. Paris: Presses Universitaires de France-Comté, 2006. p. 13-19.

DAGONET, F. Sur une Seconde Rupture. In: WUNENBURGER, J-J. **Bachelard et l'Épistemologie Française**. Paris: PUF, 2003. p. 13-28.

DIRAC, P. A. M. Quantized Singularities in the Electromagnetic Field. **Proceedings of The Royal Society**, London, v. A133, p. 60-69, 1931.

GALISON, P. **Image and logic: A material culture of microphysics**. Chicago: University of Chicago Press, 1997. 949p.

GALISON, P. **How experiments end**. Chicago: University of Chicago Press, 1987. 337p.

GAYON, J. Bachelard et l'Histoire des Sciences. In: WUNENBURGER, J-J. **Bachelard et l'Épistemologie Française**. Paris: PUF, 2003. p. 51-114.

GELL-MANN, M. The Interpretation of the New Particles as Displaced Charge Multiplets. **Nuovo Cimento Supplement**, Bologna, v. 4, p. 848-866, 1956.

GELL-MANN, M. Symmetries of Baryons and Mesons. **Physical Review**, New York, v. 125, p. 1067-1079, 1962.

GELL-MANN, M. A Schematic Model of Baryons and Mesons. **Physics Letters**, New York, v. 8, p. 214-220, 1964.

GELL-MANN, M. Indirect Approaches do Fundamental Theory. In: NEWMAN, H.; YPSILANTIS, T. **History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics**. New York: Plenum Press, 1996. p. 1-7.

HAYAKAWA, S. The development of meson physics in Japan. In: BROWN, L.M. & HODDESON, L. **The Birth of Particle Physics**. Londres: Cambridge University Press, 1983. p. 82-110.

HEISENBERG, W. On the Structure of Atomic Nuclei. **I. Z. Phys.**, Berlin, v. 77, p. 1-9, 1932.

HODDESON, L. *et al.* **The Rise of the Standard Model: A History of Particle Physics from 1964 to 1979.** Londres: Cambridge University Press, 1997. 748p.

JOHANSSON, A. *et al.* "Shut up and calculate": the available discursive positions in quantum physics courses. **Cultural Studies of Science Education**, London, v. 13, n. 1, p. 205-226, 2018.

RIBEIRO JUNIOR, J. **O que é Positivismo.** 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 1994. 74p.

LATTES, C. M. G. *et al.* Processes Involving Charged Mesons. **Nature**, London, v. 159 p. 694-703, 1947.

LATTES, C. My work in meson physics with nuclear emulsions. In: BROWN, L. M.; HODDESON, L. **The Birth of Particle Physics.** Londres: Cambridge University Press, 1983. p. 307-310.

LECOURT, D. **L'epistémologie historique de Gaston Bachelard.** 4. ed. Paris: J. Vrin, 1970. 128p.

LOPES, A. R. C. Bachelard: o filósofo da desilusão. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 13, n. 3, p. 248-273, jan. 1996.

MARSHAK, R. Scientific impact of the first decade of the Rochester conferences (1950-1960). In: BROWN, L.; DRESDEN, M.; HODDESON, L. (Eds.). **Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s.** Cambridge: Cambridge University, 1989. p. 645-667.

MARTINS, A. F. P. Algumas contribuições da epistemologia de Gaston Bachelard à pesquisa em Ensino de Ciências. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, X, 2006, Londrina. **Atas...** Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/vienpec/CR2/p29.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

MARTINS, A. F. P. Sobre obstáculos e perfis: Perspectivas para o ensino de física a partir da epistemologia de Gaston Bachelard. In: PEDUZZI, L. O. P.; MARTINS, A. F. P.; HIDALGO, J. M. **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino.** Natal: EDUFRN, 2012. p. 261-290.

MILNITSKY, R. **Epistemologia e Currículo: reflexões sobre a Ciência Contemporânea em busca de um outro olhar para a Física de Partículas Elementares**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Ensino de Ciências (Física, Química e Biologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-10072018-135937/pt-br.php>>. Acesso em: 05 mai. 2020.

MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 1306.1-1306.11, 2009.

MOSINAHTI, G.; LONDERO, L. A pesquisa sobre o Ensino de Partículas Elementares: panorama e perspectivas. **Revista de Enseñanza de la Física**, Córdoba, v. 27, n. 2, p. 7-16, 2015.

NE'EMAN, Y. Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance. **Nuclear Physics**, London, v. 26, p. 222-230, 1961.

NEDDERMEYER, S. H.; ANDERSON, C. D. Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles. **Physical Review**, New York, v. 51, p. 884-890, 1937.

NISHIJIMA, K. Charge Independence Theory of V Particles. **Progress of Theoretical Physics**, Tokyo, v. 13, p. 285-298, 1955.

OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M.; CAVALCANTI, C. J. H. Tópicos de física contemporânea no ensino médio: um texto para professores sobre supercondutividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 270-288, 1998.

OSTERMANN, F. Um texto para professores do ensino médio sobre partículas elementares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 415-436, 1999.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Física contemporânea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 18, n. 3, p. 391-404, 2000.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. F. Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola. **Física na escola**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 13-18, 2001.

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

OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

PARROCHIA, D. Rationnal, Irrationnal, Surrationnal, en Physique à l'Époque de Bachelard. In: DAMIEN, R.; HUFSCHEMITT, B. **Bachelard: Confiance Raisonnée et Défiance Rationnelle**. Paris: Presses Universitaires de France-Comté, 2006. p. 19-34.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 393-420, 2009.

PICKERING, A. **Constructing quarks: A sociological history of particle physics**. Chicago: University of Chicago Press, 1984. 475p.

PICKERING, A. **The mangle of practice: Time, agency, and science**. Chicago: University of Chicago Press, 2010. 296p.

PIETROCOLA, M. Curricular Innovation and Didactic-Pedagogical Risk Management: Teaching Modern and Contemporary Physics in High Schools. In: PIETROCOLA, M; GURGEL, I. (Orgs.). **Crossing the Border of the Traditional Science Curriculum Innovative Teaching and Learning in Basic Science Education**. Roterdã: Sensepublisher, 2017. p. 1-22.

ROBERTS, D. Scientific Literacy/Science Literacy. In: ABELL, S. K.; LEDERMAN, N. G. (Eds.), **Handbook of Research on Science Education**. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 2007. p. 729-779.

ROCHESTER, G. D.; BUTLER, C. C. Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles. **Nature**, London, v. 160, p. 855-867, 1947.

ROSSI, B.; HOAG, H. The variation of the hard component of cosmic rays with height and the disintegration of mesotrons. **Physical Review**, New York, v. 57, p. 462-469, 1940.

ROSSI, B.; HALL, B. Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum. **Physical Review**, New York, v. 59. p. 100-112. 1941.

ROSSI, B.; NERESON, N. Experimental determination of the Disintegration curve of Mesotrons. **Physical Review**, New York, v. 57, p. 223-228, 1942.

ROSSI, B. The decay of 'mesotrons' (1939-1943): experimental physics in the age of innocence. In: BROWN, L. M.; HODDESON, L. **The Birth of Particle Physics**. Londres: Cambridge University Press, 1983. p.183-205.

SCHWEBER, S. **Nuclear forces: the Making of the physicist Hans Bethe**. Cambridge: Harvard University Press, 2012. 608p.

SCHWEBER, S. **QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga**. New Jersey: Princeton University Press, 1994. 784p.

SESSLER, A.; WILSON, E. **Engines of discovery: a century of particle accelerators**. New Jersey: World Scientific, 2014. 210p.

SEKIDO, Y.; HARRY E. **Early history of cosmic ray studies: Personal reminiscences with old photographs**. Heidelberg: Springer Netherlands, 1982. 431p.

STAPLETON, A J. Imagery, intuition and imagination in quantum physics education. **Cultural Studies of Science Education**, London, v. 13, n. 1, p. 227-233, 2018.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de física na escola de 2^o grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

VADÉE, M. **Bachelard ou le Nouvel Idéalisme Épistemologique**. Paris: Ed. Sociales, 1975. 304p.

WATANABE, G; GURGEL, I; MUNHOZ, M. G. O que se pode aprender com o evento Masterclasses-CERN na perspectiva do ensino de física de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 1-10, 2014.

WIGNER, E.P. On the Consequences of the Symmetry of the Nuclear Hamiltonian on the Spectroscopy of Nuclei. **Physical Review**, New York, v. 51, p. 106-112, 1937.

WORMS, F.; WUNENBURGER, J-J. **Bachelard & Bergson**: Continuité et Discontinuité. Paris: PUF, 2008. 294p.

WUNENBURGER, J-J. Figures de la Dialectique. In: WUNENBURGER, J-J. **Bachelard et l'Épistémologie Française**. Paris: PUF, 2003. p. 29-50.

YANG, C. N.; Mills, R. L. Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance. **Physical Review**, New York, v. 96, p. 191-203, 1954.

YORE, L. D. *et al.* Examining the Literacy Component of Science Literacy: 25 Years of Language Arts and Science Research. **International Journal of Science Education**, London, v. 25, n. 6, 2003.

YUKAWA, H. On the Interaction of Elementary Particles. **Proc. Phys. Math. Soc. Jap.**, Tokyo, v. 17, p. 48-61, 1935.

ZANETIC, J. Física e literatura: construindo uma ponte entre as duas culturas. **História, Ciências, Saúde**, Rio de Janeiro, v. 13, p. 55-70, 2006.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).