Parte I - História da teoria quântica – desenvolvimentos e fundamentos

Campos que interagem: física quântica e a transferência de conceitos entre física de partículas, nuclear e do estado sólido

Christian Joas

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Campos que interagem: Física Quântica e a transferência de conceitos entre física de partículas, nuclear e do estado sólido¹

Christian Joas

1 Introdução

Yoichiro Nambu foi recentemente agraciado com metade do prêmio Nobel de 2008, pela sua “descoberta do mecanismo de quebra de simetria espontânea na física subatômica”. Nambu (1960b) propôs que a quebra espontânea de simetria, ideia derivada da física do estado sólido e usada na teoria de transição de fases, pode também ser um conceito útil na Teoria Quântica de Campos de partículas elementares. Ele baseou uma nova teoria do vácuo em uma analogia com o estado supercondutor da matéria e mostrou como partículas podem adquirir massa através de um mecanismo similar ao da formação do *gap* de energia em supercondutores (NAMBU; JONA-LASINIO, 1961a, 1961b). Este ponto de vista engenhoso foi provado frutífero por anos a fio e até hoje permeia todas as teorias, envolvendo o assim chamado modelo-padrão da física de partículas elementares: simetria quebrada espontaneamente possui um papel fundamental no mecanismo de Anderson-Higgs para explicar por que partículas elementares possuem massa.² As ideias de Nambu foram consideravelmente facilitadas

1 Traduzido por Leyla Joaquim e Fábio Freitas. O autor é membro do Projeto sobre História e Fundamentos da Física Quântica, uma colaboração do Instituto Max Planck de História da Ciência e do Instituto Fritz Haber da Sociedade Max Planck em Berlim. O artigo foi desenvolvido a partir de uma palestra realizada em dezembro de 2008, no *workshop* Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais, na Universidade Estadual da Paraíba, em Campina Grande, Brasil.

2 Sobre a importância da quebra espontânea de simetria no modelo-padrão, ver Brown e outros (1997). Pickering (1984, p. 168-173) relata a história da apropriação do conceito de quebra espontânea de simetria por partículas físicas. Kibble (2009) fornece uma abordagem técnica da história convoluta do mecanismo de Anderson-Higgs e sua conexão com a teoria do estado sólido. Ver também Shirkov (2009).

por sua familiaridade com a teoria do estado sólido, devido ao seu trabalho prévio neste campo - particularmente na teoria da supercondutividade - no qual o conceito de quebra de simetria já havia sido desenvolvido no final da década de 50 (NAMBU, 1995). Ele forneceu uma derivação teórica quântica de campos da teoria de supercondutividade de Bardeen-Cooper-Schrieffer (BARDEEN; COOPER; SCHRIEFFER, 1957a, 1957b), baseando-se na invariância de calibre e na teoria da perturbação de Feynman-Dyson, técnica emprestada da eletrodinâmica quântica.³

Tanto a transferência dos métodos teóricos quânticos de campos (tais como o uso dos diagramas de Feynman), das físicas nuclear e de partículas elementares para a física do estado Sólido, quanto a transferência do conceito de simetria quebrada espontaneamente da teoria de sólidos (de Nambu) para a teoria de partículas elementares, são belos exemplos do estabelecimento de elos surpreendentes entre campos de pesquisa aparentemente distantes. Os campos da física do estado sólido, da física nuclear e da física de partículas elementares (ou física da matéria condensada e física de altas energias, para usar seus nomes modernos)⁴ são frequentemente apresentadas como campos amplamente desconectados, compartilhando pouco mais que suas bases conceituais - inicialmente a Mecânica Quântica, e, a partir dos meados da década de 50, também da Teoria Quântica de Campos.⁵ No presente artigo, mostrarei que, ao contrário, a física do estado sólido, a física nuclear e a física de partículas elementares são profundamente emaranhadas, tanto em seus respectivos desenvolvimentos históricos, quanto conceituais. Irei estudar a história das interações entre estes campos desde os primórdios da Mecânica Quântica - período no qual a física do estado sólido, a física nuclear e a física de partículas

3 Antes mesmo de Nambu, Gorkov (1958) derivou a teoria BCS usando a teoria da perturbação diagramática (para uma exposição, ver ABRIKOSOV; GOR'KOV; DZYALOSHINSKI, 1965).

4 Estes nomes devem ser usados com cautela quando se fala do início da história destes campos (ver, por exemplo, a discussão em HUGHES, 2003, p. 370-374).

5 Os físicos do estado sólido da segunda metade do século XX muitas vezes afirmaram perceber uma falta de apreciação pela sua área: a física do estado sólido é comumente considerada inferior em algum aspecto em relação a outros mais "fundamentais" ramos da física. Para uma expressão inicial deste sentimento de inferioridade por um pesquisador do campo da física do estado sólido, ver Pippard (1961). Wolfgang Pauli, supostamente, referiu-se à física de semicondutores como "física suja" (*schmutzphysik*) e Murray Gell-Mann, com desprezo, apelidou a física do estado-sólido de "física do estado esquelético". É interessante notar que, quando procurou por confirmações destes enunciados famosos, o autor se deparou com o fato de que os físicos do estado sólido, quase que exclusivamente, referem-se a eles, mesmo quando defendem a relevância de seu próprio campo e não fornecem referências. A história dos debates sobre a prioridade entre a física de partículas e física do estado sólido é um assunto interessante e essencialmente não estudado, sendo abordado apenas superficialmente no presente artigo. (ver, por exemplo, a nota de rodapé 40)

estavam longe de serem estabelecidas como subdisciplinas da Física - até a década de 60 em diante. Este estudo enfatizará que a história das interações, como a esboçada acima, está intimamente conectada com a história do século XX. Ao longo do curso desse século, os modos de interação entre os campos evoluíram. Esta evolução não se reflete somente nos desenvolvimentos conceituais em Física, como o advento da Mecânica Quântica ou Teoria Quântica de Campos, mas também em fatores externos, como emigrações na década de 30, a Segunda Guerra Mundial ou a Guerra Fria. Estes fatores tiveram efeitos diferentes nos campos em emergência e também nos modos de interação entre eles. Fases de interações mútuas frutíferas foram interrompidas por fases de desenvolvimentos isolados e houve uma fase particularmente interessante na primeira metade da década de 50, na qual a transferência de conceitos e ideias era predominantemente unidirecional.

O artigo é organizado da seguinte maneira: a seção 2 situa a pré-história das atuais físicas de altas energias e da matéria condensada no contexto do advento da Mecânica Quântica: ao contrário de muitas abordagens, que relatam a história da física do estado sólido, nuclear e de partículas, como exemplos de aplicação da Mecânica Quântica a domínios de pesquisa fora da física atômica, irei argumentar que estas (*proto-*) disciplinas formam parte da gênese complexa da Mecânica Quântica e, somente em retrospecto, em grande parte devido a razões contingentes, aparecem como sendo meramente fenômenos secundários relativos à física atômica. A importância dos campos emergentes para a contínua negociação a respeito da Mecânica Quântica, nos anos de 1925-1926, será enfatizada. A seção 3 oferece um breve relato das dinâmicas iniciais e da consolidação das subdisciplinas emergentes da Física. Espero, assim, esclarecer os paralelos e diferenças em suas evoluções até o final da Segunda Guerra Mundial e comentarei sobre os efeitos que isto teve nas interações entre eles. A seção 4 trata de um obstáculo específico encontrado tanto pela física nuclear quanto pela física do estado sólido, o chamado “problema de muitos-corpos”. A necessidade de encontrar abordagens teóricas para lidar com este problema é um dos componentes-chave da interação entre os campos. Na seção 5, são discutidos os modos de interação entre a física de partículas elementares e a física do estado sólido, baseados fortemente na análise da influência da Mecânica Quântica e da Teoria Quântica de Campos em ambos os campos. A seção 6 se constitui mais como um epílogo do que como uma conclusão. Ali, reflito sobre alguns aspectos mais gerais da institucionalização sob a luz do advento de teorias de unificação, tais como a Mecânica Quântica e a Teoria Quântica de Campos. O presente artigo constitui-se um trabalho em desenvolvimento.

2 A mecânica quântica além do átomo

As narrativas da história da Mecânica Quântica frequentemente se baseiam na história da Espectroscopia Atômica e de vários tópicos isolados da Física Estatística, como radiação do corpo negro ou da estatística de gases⁶. As teorias do estado sólido, da ligação química ou do subatômico são apresentadas como meras “aplicações” do novo formalismo a novos domínios. Entretanto, tanto a velha teoria quântica dos anos anteriores a 1925 quanto a Mecânica Quântica dos anos posteriores são entendidas muito além da busca por uma explicação apropriada do espectro do átomo de hidrogênio. As tendências historiográficas são devidas ao fato, ao menos parcialmente, de que outras linhas de desenvolvimento, como o estudo dos sólidos ou do núcleo atômico, não foram estabelecidas como campos propriamente definidos da Física, até décadas posteriores à gênese da Mecânica Quântica em 1925-1927, enquanto que a espectroscopia atômica já era um ofício bem estabelecido. No início do século, os teóricos e com isso também os pais da Mecânica Quântica estavam interessados em uma ampla gama de fenômenos físicos, alguns dos quais, retrospectivamente, podem aparecer como desvios de um caminho reto até a Mecânica Quântica. Werner Heisenberg, ao mesmo tempo em que trabalhava e publicava sobre da Teoria Quântica, escreveu uma dissertação sobre a estabilidade e turbulência de fluidos que fluem (CASSIDY, 1992, p. 150-154). Max Born publicou extensivamente sobre a teoria atômica e as dinâmicas de estruturas cristalinas (ver, por exemplo, BORN, 1915).⁷ Erwin Schrödinger, nos anos de 1910 e 1920, publicou sobre tópicos tais como relatividade, radiação atmosférica, radioatividade e a condução elétrica e estabilidade dos sólidos.⁸ Tanto Einstein (1924, 1925), quanto Schrödinger (1924), ao trabalhar com estatística de gases, tentaram extrair de suas teorias sobre degeneração de gases - as quais Hanle (1971, 1979) identificou como uma importante raiz da mecânica ondulatória - conclusões sobre o comportamento conhecido de metais, o qual não podia ser explicado por nenhuma teoria contemporânea (ECKERT; SCHUBERT; TORKAR, 1992, p. 39-40). Estes poucos exemplos, dentre muitos outros, demonstram que os fenômenos exteriores ao domínio da Física Atômica não estavam nem na periferia da atenção dos físicos teóricos anteriormente ao advento da Mecânica Quântica, nem foram irrelevantes para a sua gênese.

6 Confira, por exemplo, Hendry (1984) e Beller (1999). Ver também Darrigol (2009).

7 Eckert, Schubert e Torkar (1992) fornecem uma abordagem do trabalho de Born com cristais e observa: “[...] Foi precisamente o seu interesse sobre propriedades físicas de cristais que levaram Born primeiro à Mecânica Quântica (leia-se Teoria Quântica) e mais tarde à física atômica, e finalmente ao [...] Dreimänerarbeit.”

8 Assim que novas ideias sobre a estrutura dos sólidos foram possibilitadas pelos experimentos de difração de raio-X de Friedrich, Knipping e Laue, (1912) apresentou uma teoria ambiciosa sobre a estrutura e estabilidade dos sólidos como sua tese de habilitação (Joas e Katzir, não publicado).

A Mecânica Quântica forneceu uma estrutura coerente para que, eventualmente, se construísse uma fundação unificada aos campos nascentes da física do estado sólido, nuclear e de partículas elementares. Pode-se argumentar que as ideias adquiridas na teoria quântica do espectro atômico, assim que eram condensadas na nova mecânica, poderiam finalmente ser empregadas na construção de teorias sobre fenômenos fora do domínio do átomo. Eu pretendo ir além e argumentar que a própria Mecânica Quântica e a interpretação do formalismo quanto-mecânico foram negociadas e moldadas em um diálogo progressivo, que derivou não somente do conhecimento empírico sobre o espectro atômico, mas também do conhecimento daquelas áreas de pesquisa que seriam mais tarde chamadas de física do estado sólido, nuclear e de partículas. A ideia de que a fundação quanto-mecânica da física do estado sólido, de partículas e nuclear não passa de uma mera apropriação de métodos da Mecânica Quântica, por grupos de pesquisadores que trabalhavam na periferia do desenvolvimento, é enganadora. Muito pelo contrário, a história da gênese e interpretação da Mecânica Quântica é fortemente conectada aos problemas que surgiram em diferentes correntes de desenvolvimento, eventualmente combinadas pelos novos campos emergentes, e os protagonistas da gênese da Mecânica Quântica se tornaram frequentemente figuras proeminentes também nos campos nascentes da física do estado sólido, química quântica e física nuclear e de partículas.

Nós já vimos que os pais da Mecânica Quântica, ao mesmo tempo em que ponderavam questões relacionadas aos espectros atômicos, estavam também se dedicando a problemas exteriores à espectroscopia atômica, apesar do papel limitado que estes problemas tiveram no desenvolvimento de fato da nova mecânica. Enquanto o tumulto dos anos 1925-1926 certamente levou a uma parada temporária na maioria das atividades relacionadas aos fenômenos externos à física atômica, o conhecimento empírico e teórico sobre estes fenômenos informou os criadores da Mecânica Quântica e a busca pela explicação destas áreas logo ganhou de novo a atenção dos físicos teóricos. A história da teoria quanto-mecânica de elétrons em metais é uma ilustração disto: em 1926, após conhecer a nova estatística de um gás de partículas obedecendo ao princípio de exclusão de Pauli⁹, Heisenberg (1926) observou que a Mecânica Quântica admitia duas classes mutuamente exclusivas de autoestados em sistemas com mais de uma partícula e relacionou este fato a – então ainda dúbia – hipótese do *spin* do elétron. Mais tarde naquele ano, Wolfgang Pauli (1926) aplicou a estatística de Fermi-Dirac do gás ideal monoatômico à condução de elétrons em metais, com o intuito de explicar seus comportamentos paramagnéticos. Arnold Sommerfeld (1927), então, aplicou a nova estatística na tentativa de explicar a condutividade de metais em uma extensão da teoria clássica de Paul Drude (1900a, 1900b, 1904). Somente

9 Atualmente, esta nova estatística é chamada estatística de Fermi-Dirac, em homenagem aos seus dois descobridores independentes.

quando Felix Bloch (1928) levou em consideração satisfatoriamente a presença de estrutura iônica, “a maquinaria completa da Mecânica Quântica, desenvolvida em 1925 e 1926, tornou-se importante para os sólidos” (HODDESON; BAYM; ECKERT, 1992, p. 89). Muitos ingredientes-chave da moderna física da matéria condensada e de altas energias, bem como da Química Quântica moderna¹⁰, de fato derivaram do trabalho dos protagonistas da Mecânica Quântica que foram produzidos, não depois, mas durante a gênese da Mecânica Quântica. A inspeção mais próxima do conteúdo destas contribuições iniciais revela que conceitos importantes da própria Mecânica Quântica (e. g., a conexão entre *spin* de elétron e a estatística quântica de férmions e bósons, ou a natureza das forças de troca da Mecânica Quântica) resultaram da pesquisa conduzida na época da consolidação da Mecânica Quântica. Adicionalmente, a Mecânica Quântica, em 1927, não foi vista como uma teoria definitiva por seus criadores. Mais notavelmente, a questão da sua extensão relativística confundiu profundamente físicos teóricos e os fez suscetíveis ao estudo de problemas externos à física atômica. Esta questão, de modo amplo, foi negociada com base na Teoria Quântica do núcleo¹¹. Descrever os primórdios da teoria da física do estado sólido ou da física nuclear como meras “aplicações da Mecânica Quântica” é, então, enganador. Conforme será argumentado na seção 5, o fato de que a própria história da Mecânica Quântica está entrelaçada com a história inicial das subdisciplinas emergentes da Física permite desenvolver valiosas ideias sobre os modos de interação entre estes campos em um estágio no qual eles não tinham nenhuma identidade institucional.

3 Campos emergentes: a institucionalização da física nuclear, da física de partículas elementares e da física do estado sólido

Foi somente nas décadas seguintes ao advento da Mecânica Quântica que a física nuclear, a de partículas elementares e a do estado sólido emergiram como campos de pesquisa institucionalizados.¹² Durante a década de 30, alguns físicos gradualmente passaram a se autodenominar “físicos nucleares” (HUGHES,

10 O artigo de “ressonância” de Heisenberg (1926) também possui um papel na história da teoria da ligação homopolar adiantada por Heitler e London (1927) (GAVROGLU, 1995, p. 45). Conforme Hoddeson, Baym e Eckert (1992, p. 108) apontam, o artigo de Heitler e London motivou diretamente Bloch (1928) a se apoiar na ideia de “[...] que Heitler e London usaram em seus diferentes tratamentos da molécula de hidrogênio, de construir funções de ondas de elétrons a partir da base de orbitais do estado-fundamental de átomos-individuais não-perturbados.”

11 Ver nota de rodapé 15.

12 Para a física nuclear, ver Stuewer (1979) e Aaserud (1990); para a física do estado sólido, ver Hoddeson e colaboradores (1992a).

2003). Somente depois da Segunda Guerra, outros físicos começaram a considerar-se “físicos de partículas” ou “físicos do estado sólido”. No caso da física do estado sólido, Weart (1992, p. 617) descreveu este processo da seguinte maneira:

Em 1930 a física do estado sólido não existia. O termo era desconhecido, e não havia qualquer entidade intelectual ou social para a qual o termo poderia ser aplicado. Certamente uma série de especialidades prosperaram, tais como a teoria do elétron em metais e estudos experimentais de ligas magnéticas, as quais eventualmente caíram no campo da física do estado sólido, mas não havia nenhum campo como um todo, não havia nenhuma razão que justificasse uma distinção entre os físicos que estudavam sólidos e o grupo de físicos que estudavam gases, radioatividade ou qualquer outra coisa. Em 1960 a situação mudou completamente. O termo “física do estado sólido” não somente se tornou familiar como poderiam também ser associado a algumas instituições: posições acadêmicas, conferências, periódicos, grupos de pesquisa, mecanismos de financiamentos, até mesmo construções inteiramente destinadas à disciplina. Estas instituições foram unidas em uma comunidade mundial da física do estado sólido. Como um espelho, esta entidade social refletia uma entidade intelectual, o estudo da física do estado sólido.

Nas décadas seguintes ao advento da Mecânica Quântica, áreas aparentemente desconectadas, nos primórdios da pesquisa, tornaram-se progressivamente integradas e consagradas (dialogando com Weart) em entidade social e intelectual e passaram a ser consideradas campos de pesquisa diferentes. Os campos emergentes foram construídos sob intuições de base empírica que já haviam sido alcançadas bem antes que eles pudessem ser considerados subdisciplinas da física por si próprios¹³. Estas intuições empíricas foram encapsuladas em teorias e modelos¹⁴, as quais teriam papéis importantes no estabelecimento dos novos campos emergentes. Antes do advento da Mecânica Quântica, havia nos campos emergentes uma falta de base sistemática, adquirida apenas no curso de apropriação e conseqüente extensão dos métodos mecânicos quânticos que

13 Por exemplo, conhecimentos sobre raio-X ou sobre espalhamento de partículas alfa em átomos para a física nuclear; conhecimento sobre estruturas cristalinas, condutividade elétrica, magnetismo ou calores específicos para a física do estado sólido.

14 O modelo de Rutherford do átomo e modelos nucleares anteriores podem servir como exemplos para a física nuclear. Para a física do estado sólido, a teoria de Laue-Ewald da difração de raios-X em sólidos, a teoria do magnetismo de Curie-Weiss-Langevin e a teoria de Drude da condução elétrica são casos exemplares de teorias anteriores que forneceram intuições empíricas cruciais.

começaram nos anos de 1925-1927. Anteriormente, os fenômenos e teorias mencionados acima não eram vistos, nem apresentados, como elementos coerentes de uma visão unificada. Já durante a sua formulação, a Mecânica Quântica passou a ser vista como um possível formalismo unificado para estas novas áreas de pesquisa. No final da década de 1920 e início da década de 1930, colaboradores dos campos emergentes, embora oriundos de diferentes contextos intelectuais, frequentemente trabalhavam com problemas derivados de diversas áreas que atualmente, em retrospecto, seriam considerados bastante distantes. Tanto a física nuclear inicial quanto a física do estado sólido inicial se baseavam fortemente na mecânica ondulatória e apenas em uma extensão menor, em outras formulações da Mecânica Quântica. O domínio dos métodos da mecânica ondulatória permitiu, assim, que os físicos penetrassem em questões sobre sólidos ou sobre o núcleo, essencialmente com o mesmo arsenal de métodos (por exemplo, teoria da perturbação, efeito tunelamento, estatística quântica). De modo interessante, a dinâmica de institucionalização dos campos emergentes, no entanto, mostrou fortes diferenças em escala, ritmo e implicações sociais, especialmente com respeito aos efeitos da emigração na Europa na década de 1930, da Segunda Guerra Mundial e da era pós-Guerra. Nos seguintes parágrafos, será delineada a história das físicas nuclear e de partículas e da física do estado sólido, a partir de suas origens no início do século XX até as décadas de 1950 e 1960.

3.1 A física nuclear e de partículas

O início da história da física nuclear e de partículas pode ser dividido, grosso modo, em três fases (PAIS, 1986). No início do século XX, os físicos estudaram materiais radioativos e raios cósmicos, focando as propriedades qualitativas da radiação. Nos anos seguintes, a radioatividade foi essencialmente uma ciência experimental, complementada com teorias fenomenológicas simples (HUGHES, 1998). Esta primeira fase, que Pais (1986, p. 297) denomina “[...] física nuclear sem núcleo [...]”, terminou com a análise de Rutherford, em 1911, dos experimentos de espalhamento de partículas α em termos de um modelo atômico que incluía um núcleo. O modelo de Rutherford rapidamente se tornou aceito e provocou investigações sobre as propriedades do núcleo, bem como pesquisas sobre processos nucleares. O terceiro estágio da história inicial do campo coincide com os primórdios da Mecânica Quântica. Este pode ser datado aproximadamente entre 1926-1932. Esta assim chamada “era do paradoxo” foi dominada pela crise do modelo próton-elétron do núcleo e testemunhou as primeiras descrições bem sucedidas dos processos nucleares com os meios da Mecânica Quântica, tais como as teorias de emissões α e γ de Gurney e Condon (1928)¹⁵ e de Gamow

15 Condon (1926, 1928) também trabalhou extensivamente em problemas de física molecular no mesmo período.

(1928), com base na mecânica ondulatória. Logo após o advento da Mecânica Quântica, mesmos os experimentais sentiram necessidade de se tornar familiarizados com a mecânica ondulatória (HUGHES, 1998). O chamado *annus mirabilis* da física nuclear em 1932, com a descoberta do nêutron por James Chadwick, iniciou os “felizes anos 30” (BETHE, 1979). O ano de 1932 marca o ponto de virada da emancipação da física nuclear como um campo distinto de pesquisa: o estudo do núcleo se tornou mais e mais sistematizado, baseado na Mecânica Quântica, e apareceram os primeiros livros e séries de artigos seguindo este programa.¹⁶ Em 1932, Douglas Hartree avaliou a situação neste campo do seguinte modo (HARTREE, 1932):

O considerável avanço recente em nosso conhecimento das propriedades e estrutura do núcleo atômico se deve primeiramente ao desenvolvimento brilhante de idéias e experimentos por Rutherford e outros, e segundo ao passo fundamental, dado independentemente e quase simultaneamente por Gamow e Gurney e Condon, de aplicar os conceitos e métodos da Mecânica Quântica – e particularmente aquela formulação da Mecânica Quântica para a qual o termo mecânica ondulatória é aplicado – no fenômeno nuclear, em primeira instância para aqueles de radioatividade e desintegração artificial.

Da metade em diante da década de 1930, a física nuclear teve sucesso em combinar várias linhas de desenvolvimento do início do século XX, tais como a radioatividade, pesquisa sobre raios cósmicos e aspectos da espectroscopia atômica (por exemplo, a estrutura hiperfina dos espectros atômicos). Ela começa a tomar forma como um campo de pesquisa distinto e de crescimento acelerado.¹⁷ Durante a Segunda Guerra Mundial, torna-se uma disciplina chave na pesquisa do período de guerra, especialmente através do Projeto Manhattan, e foi amplamente responsável por um prestígio sem precedentes da Física como um todo, que por sua vez levou a um rápido crescimento do tamanho da comunidade acadêmica, após a guerra. Foi somente no pós-guerra que a física de partículas

16 Ver Gamow (1931), Heisenberg (1932a, 1932b, 1933), Bethe e Bacher (1936); Bethe (1937); Livingston e Bethe (1936). Os três últimos artigos ficaram conhecidos como “a bíblia de Bethe”. Aaserud (1990, p. 54-55) observa sobre o primeiro artigo da trilogia de Heisenberg: “Como Bohr, [Heisenberg] apresentou o decaimento beta como evidência *contra* a conservação de energia e *a favor* da necessidade de uma física quântica relativística completamente nova. Mesmo no artigo clássico de Heisenberg, então, o os problemas mais básicos do núcleo eram ainda parte de uma busca mais ampla por uma nova física quântica relativística. A física nuclear teórica não era ainda um campo de investigação por si mesmo.”

17 De acordo com Henry Small, citado por Weiner (1972), a proporção de publicações relacionadas à física nuclear na *Physical Review* subiu de 8% em 1932 para 43% em 1940. (BROWN; HODDESON, 1983)

elementares (ou física de altas energias) se consolidou como um campo distinto de pesquisa (PICKERING, 1984). Sua história inicial está intimamente conectada com aquela da física nuclear, frequentemente retratada como sua precursora direta. Entretanto, a física nuclear não sofreu uma mudança de nome na década de 1950; ao invés disto, persistiu ao lado da física de partículas elementares, da qual havia se dividido, principalmente devido ao advento dos aceleradores de partículas e as grandes instalações de pesquisa tais como o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN). Os físicos de partículas e nucleares nas décadas de 1950 e 1960 estavam interessados em questões diferentes: enquanto os físicos de partículas investigavam os constituintes dos núcleons, os físicos nucleares estudavam o comportamento coletivo de núcleons e processos nucleares (HUGHES, 2003, p. 370-374). Nesse contexto, os físicos nucleares encararam o que passou a ser conhecido como o “problema de muitos-corpos”, isto é, o tratamento das interações de um grande número de partículas. Este problema constituiu-se em um gargalo para um tratamento mecânico quântico do núcleo¹⁸. Retornaremos ao problema de muitos-corpos na seção 4.

3.2 A física do estado sólido

Enquanto em princípio seja ainda mais antiga, na medida em que abrange conhecimento de metalurgia e cristalografia (ECKERT; SCHUBERT, 1986; SMITH, 1965), a física do estado sólido durante o século XX combinou diferentes correntes da física do século XIX e início do século XX, tais como a físico-química, criogenia, teoria da elasticidade, cristalografia, eletrodinâmica e termodinâmica, bem como ideias gerais sobre a estrutura e estabilidade da matéria. No século XIX e início do século XX, teorias dos sólidos foram baseadas na Mecânica, na Termodinâmica e no Eletromagnetismo, e estiveram no centro dos debates fervorosos sobre atomismo e a estrutura da matéria. De um lado, havia teorias fenomenologicamente bem sucedidas, descrevendo vários aspectos do comportamento dos sólidos; de outro lado, a teoria cinética era aplicada com bastante sucesso a diversos aspectos isolados. A teoria cinética de metais de Drude (1900a, 1900b, 1904) e a teoria de condução elétrica dela resultante, baseada na identificação de elétrons por J. J. Thomson como carregadores de corrente, é o primeiro exemplo do sucesso da teoria cinética. Outro exemplo é a teoria de Curie-

18 Fischer (1993, p. 141), em um estudo bibliométrico, observa um declínio na física nuclear teórica já no final da década de 1930 e início de 1940. Ele atribui esta queda ao fato de que, apesar dos numerosos esforços, não havia nenhuma Mecânica Quântica do núcleo satisfatória: “[...] embora talvez invisível aos participantes ou observadores medianos, a frente da pesquisa teórica já havia começado a mudar para o que viria a se tornar a ‘física de altas energias’ na década de 50. Com a falta de máquinas para altas energias, contudo, ainda se estava confinado ao estudo dos efeitos das partículas de alta energia que ocorrem naturalmente, tais como raios cósmicos.”

Langevin-Weiss que, explicitamente, usou as ideias de Boltzman para explicar o para- e o ferromagnetismo, ao assumir a existência de moléculas magnéticas dipolares. A óptica ondulatória do século XIX foi a base para a teoria de óptica de cristais de von Laue e Ewald, que seguiu os experimentos de difração de raio-X de Friedrich e Knipping (Cf. FRIEDRICH; KNIPPING; LAUE, 1912). Logo depois da formulação de Planck sobre a hipótese quântica em 1900, o calor específico dos sólidos apresentou uma oportunidade de estender o domínio explicativo das novas hipóteses e formular teorias quânticas do calor específico dos sólidos (EINSTEIN, 1907, 1911a, 1911b) e da dinâmica de estruturas cristalinas (BORN; KARMAN, 1912; DEBYE, 1912b), baseando-se apenas nos graus de liberdade iônicos.¹⁹ Entretanto, durante a velha teoria quântica, a teoria quântica não era necessariamente vista como uma ferramenta indispensável para a descrição dos sólidos e muitos dos pioneiros da física teórica do estado sólidos demonstraram, de certo modo, uma atitude oportunista em relação ao uso das hipóteses quânticas em suas teorias²⁰. Este quadro mudou com o advento da Mecânica Quântica, especialmente com as proposições relacionadas ao princípio de exclusão de Pauli e a natureza fermiônica dos elétrons. Arnold Sommerfeld (1927) estendeu a teoria clássica da condução eletrônica de Drude, levando em consideração o que é atualmente conhecido como estatística de Fermi-Dirac. Contudo, sua teoria falhou em explicar a suposição do movimento eletrônico quase livre. Este mistério foi resolvido quando Bloch (1928) apresentou sua teoria da condução do potencial periódico, explicando o alto caminho médio dos elétrons em metais, ao usar a maquinaria da mecânica ondulatória e intuições do campo emergente da química quântica. Hoddeson e Baym (1980, p. 19) afirmam que:

O artigo de Bloch foi seguido por uma série de desenvolvimentos rápidos na teoria “moderna” dos sólidos entre 1928 e 1933, na qual os fenômenos básicos foram explicados um após outro. Conforme Peierls examinou o estado da teoria dos metais em seu artigo de 1932 (Peierls, 1932): “pode-se ter a impressão de que o problema, de explicar as condições típicas de metais a partir de propriedades moleculares, e derivar as leis quantitativas que existem, está, com exceções [...] resolvido”.

19 Até o advento da Mecânica Quântica, a teoria de Drude-Lorentz, baseada somente no movimento eletrônico (quase livre), e a teoria Einstein-Debye-Born-von Karman, baseada no movimento térmico dos íons e negligenciando os elétrons, permaneceram abordagens essencialmente desconectadas à natureza dos sólidos (HODDESON; BAYM, 1980)

20 Apenas um mês antes de seu trabalho sobre calor específico dos sólidos, Debye (1912a) havia publicado uma teoria de isolantes que se apoiava na mecânica estatística e não fazia nenhum uso da hipótese quântica. Ver também Joas e Katzir, [200?].

O crescimento do número de artigos sobre conceitos teóricos novos referentes a sólidos, no final da década de 1920 e início da década de 1930, não foi limitado à teoria de metais, mas abrangeu muitos outros aspectos, tais como magnetismo e supercondutividade²¹, condução térmica em sólidos não metálicos e a teoria de bandas, bem como a teoria de estruturas (por exemplo, defeitos pontuais). Na metade da década de 1930, um número impressionante de artigos de revisão apareceu sobre esses assuntos²². Em contraste com o desenvolvimento da física nuclear, entretanto, o *momentum* destes anos iniciais não durou até a segunda metade da década de 1930 e a Guerra. Vários fatores levaram a uma desaceleração, de fins dos anos 1930 em diante. Primeiramente, sucessos no campo emergente da física nuclear impulsionaram os físicos para fora da teoria dos sólidos: tantas descobertas fundamentalmente novas foram feitas na física nuclear durante a década de 1930 que o estudo dos sólidos, para cuja prospecção só existia um arsenal de técnicas experimentais um tanto quanto limitadas, tornou-se menos atrativo para os físicos. Esta tendência foi amplificada pelos efeitos da emigração da Alemanha nazista que afetou grande parte dos pioneiros da teoria quântica inicial dos sólidos. Alguns dos personagens principais, quando emigraram para a Grã-Bretanha e outros lugares, começaram a confinar suas atenções à física nuclear²³. Ainda, o centro da teoria de sólidos durante a década de 30, sob a influência da emigração, moveu-se da Alemanha para a Grã Bretanha. O esforço de Guerra reduziu o número de pesquisadores ativos no campo, apesar de que alguns aspectos da física dos sólidos (por exemplo, pesquisa de radar e microondas, semicondutores) foram fortemente investigados devido à sua relevância em implicações militares (ECKERT, 2003). Após a Guerra, o interesse por sólidos cresceu lentamente, mas de modo contínuo, principalmente devido aos avanços tecnológicos e às novas técnicas experimentais para o estudo dos sólidos, resultantes da pesquisa do período de

21 O fenômeno da supercondutividade, entretanto, evadiu aqueles ávidos a seguir a nova abordagem, apesar da esperança levantada pelo sucesso da teoria quântica de metais (JURKOWITZ, 1995; MATRICON; WAYSAND, 2003). Hoddeson, Baym e Eckert (1992, p. 141) escreveram: “[...] entre 1929 e 1933, mais do que uma dúzia de físicos teóricos – incluindo Bohr, Pauli, Heisenber, Bloch, Landau, Brillouin, W. Elsasser, Frenkel e Kronig – armados com os sucessos da teoria quântica de metais e novas observações, estavam otimistas que a nova ferramenta também os ajudaria a explicar supercondutividade”.

22 Hans Bethe, por exemplo, cuja “Bíblia de Bethe” em física nuclear já nos deparamos (nota de rodapé 15), escreveu um influente texto de referência (N do T: *Handbuch*) de mais de 300 páginas com Arnold Sommerfeld. (SOMMERFED; BETHE, 1933)

23 Ao menos parcialmente, isto se deve à tradição da pesquisa nuclear e de radioatividade na Grã-Bretanha e às oportunidades resultantes para físicos procurando emprego após serem forçados a emigrar. Rudolf Peierls, por exemplo, deixou de trabalhar quase exclusivamente com sólidos para trabalhar em física nuclear, quando ele emigrou para a Grã-Bretanha. Hans Bethe é outro exemplo (ver seção 5).

guerra.²⁴ As técnicas novas ou refinadas levaram a uma abundância de novas proposições dentro da rica fenomenologia dos sólidos. Ao contrário da física nuclear, os experimentos eram baratos e podiam ser conduzidos por grupos pequenos. Alguns daqueles que, antes da Guerra, dedicaram tempo a problemas relacionados à física dos sólidos, optaram por retornar aos seus estudos, sob a luz dos experimentos refinados. Outros, treinados em física durante a Guerra, começaram a participar de novas instituições – tanto na academia quanto na indústria – que lidavam com tópicos relacionados aos sólidos.²⁵ Adicionalmente, o número total de físicos cresceu tremendamente nos anos pós-guerra, devido ao aumento de apoio à ciência instigado pelo papel que a Física teve durante a Guerra. Durante a década de 1950 e 1960, a física do estado sólido se tornou, possivelmente, a maior subdisciplina da Física e permaneceu assim desde então, transformando profundamente a tecnologia e exercendo um impacto de longo alcance na sociedade moderna (MOYER, 1985; ECKERT; SCHUBERT, 1986).²⁶ Mesmo físicos que permaneceram no campo durante a Guerra não anteciparam este desenvolvimento. Em sua autobiografia, Frederick

24 Exemplos são as novas técnicas de microondas da pesquisa em radar, métodos de espalhamento térmico de nêutrons devido à disponibilidade de reatores nucleares, técnicas de preparação de amostra de semicondutores desenvolvidas durante a Guerra, a disponibilidade em larga escala de isótopos químicos para dopagem, a partir da separação de isótopos, novos métodos de computação e técnicas de baixa temperatura mais sofisticadas. Ver, por exemplo, Braun, (1992) e Forman (1995)

25 O mais famoso exemplo sendo o grupo de pesquisa do laboratório Bell do qual Bardeen, Shockley e Herring participaram na década de 1940 (HODDESON; DAITCH, 2002). Sua descoberta do transistor de ponto de contato em 1947 marcou o começo da era da moderna eletrônica do estado sólido (RIORDAN; HODDESON, 1998) e começou um “crescimento rápido da pesquisa do estado sólido, tanto em laboratórios industriais, quanto em departamentos universitários” (ECKERT, 2003, p. 422). Ver também Kevles (1995).

26 O termo “física do estado sólido” foi cunhado na década de 1940 (WEART, 1992, p. 629-640). O nome moderno - “física da matéria condensada” - que também inclui o estudo dos líquidos e dos sistemas desordenados, supostamente vem desde P. W. Anderson, que nomeou seu grupo de pesquisa em Cambridge (Mass.), quando ele se uniu ao corpo docente em 1967 (comunicação privada, maio 2009). Weart (1992, p. 651), entretanto, encontrou evidências desse “recente nome popular” já em 1962. Comparada com outros ramos da física do século XX, a física da matéria condensada recebeu pouca atenção de historiadores e filósofos da ciência. Existem, comparativamente, poucos estudos relativos à história da física do estado sólido; e a história da física do estado sólido no pós-guerra permanece essencialmente não estudada. Isto não se deve à falta de fontes. Durante a década de 1980, o Projeto Internacional da História da Física do Estado Sólido localizou um número impressionante de fontes relacionadas à história deste ramo da física (WARNOW-BLEWETT; TEICHMANN, 1992). O projeto também conduziu um grande número de entrevistas orais gravadas, que estão depositadas (muitas delas como transcritos inteiros) na biblioteca Niels Bohr do *American Institute of Physics*, em College Park (MD). O principal resultado do projeto é o livro clássico de história da física do estado sólido (HODDESON et al. 1992a). A maior parte dos trabalhos sobre história da física do estado sólido do autor se constroi baseada nestes recursos.

Seitz (1994, p. 179), autor de um dos primeiros livros textos sobre a teoria quântica dos sólidos (SEITZ, 1940), comentou:

Se, durante a parte final da Segunda Guerra Mundial, alguém tivesse me perguntado o que aconteceria finalmente com o campo da física do estado sólido, eu teria conjecturado que ele teria sido incorporado no que foi então o campo mais geral da físico-química. Na verdade, em certo sentido, aconteceu o oposto. Muitos físico-químicos se tornaram físicos e entraram em departamentos de física ou grupos interdisciplinares. O campo da físico-química foi permanentemente transformado e, em certo nível, reduzido. No meio tempo, a física do estado sólido se tornou parte do amplo campo da física da matéria condensada.

4 O problema de muitos-corpos

Do ponto de vista de um físico teórico, tanto a física do núcleo como a física dos sólidos se preocupam com um grande número de partículas²⁷. Uma solução exata (ou mesmo uma solução numérica aproximada) para a equação de Schrödinger de muitas-partículas revela-se algo impossível²⁸. Em ambos os campos, o sucesso inicial baseado no uso da Mecânica Quântica apoiava-se na validade (e na “eficiência irracional”, tomando emprestado uma expressão cunhada por Wigner para descrever a eficiência da matemática na descrição do nosso mundo) das aproximações para partículas individuais e para valores médios dos campos. Isto é, eram abordagens que negligenciavam a interação das partículas entre si, ou apenas as incluíam como aproximações um tanto quanto cruas²⁹. Tais modelos funcionam surpreendentemente bem em alguns casos³⁰, apesar da presença de fortes interações entre as partículas, mas falham comple-

27 O número de partículas (núcleons) em um núcleo atômico é bem menor que aquelas envolvidas em um sólido. Entretanto, na física de partículas que interagem, qualquer número maior que dois deve ser considerado grande, como ilustra a história da teoria quântica do átomo de hélio.

28 Em sólidos, o número de partículas envolvidas é da ordem de grandeza de 10^{23} . É a interação coulombiana entre as partículas, por exemplo, os elétrons em um gás, que é responsável por uma “catástrofe combinatória” ou “catástrofe de dimensão”.

29 De modo resumido, o teórico assume que o comportamento de uma partícula individual somente depende do valor médio do campo criado por todas as outras partículas de uma maneira estatística.

30 Nós já havíamos encontrado a teoria de Sommerfeld-Drude de elétrons em metais e a teoria da banda de sólidos, bem como a teoria de Weiss do campo molecular em imãs.

tamente em algumas outras³¹. O que motivou este fato só foi compreendido nos anos 1950, após o advento da eletrodinâmica quântica.

Superar as abordagens de partículas individuais requereu o desenvolvimento de métodos que atacavam o problema de muitos corpos e forneciam meios para tratar as correlações entre as partículas em um sistema de muitos-corpos que interagem. Esse era um gargalo essencial para o desenvolvimento tanto da teoria nuclear como do estado-sólido e, após a Guerra, um número crescente de físicos começou a desenvolver um interesse mais amplo nesse problema, buscando por novas técnicas que permitiriam abordá-lo. Conyers Herring (1980, p. 71-72) recorda:

Ainda que as pessoas soubessem desde os primórdios da Mecânica Quântica que a verdadeira função de onda do estado-fundamental de um sistema de muitos-elétrons devesse ser de uma forma mais complicada que um determinante das funções de onda de um elétron, e ainda que a importância da correção da “energia de correlação” para um cálculo com a teoria de banda da energia coesiva de um metal tenha sido claramente reconhecida por Wigner e Seitz em 1933 e 1934³², a dimensão e o papel da energia de correlação permaneceram compreendidos inadequadamente em uma parte considerável da comunidade do estado-sólido por muitos anos. Talvez a complicação do importante artigo de 1934³³ de Wigner, que continha uma estimativa surpreendentemente boa da energia de correlação de um gás de elétrons-livres, criou a esperança enganadora na direção de julgar tais efeitos como sendo menores do que havia sido estimado.

Durante quase duas décadas, a expansão perturbativa da energia de correlação, desenvolvida por Wigner, que Herring menciona na citação acima, permaneceu como o estado-da-arte no problema prototípico de muitos-corpos do gás de elétrons livres. Wigner, entretanto, deixou de notar que a contribuição

31 Por exemplo, a supercondutividade ou o cálculo da energia coesiva de metais (HODDESON et al., 1992b).

32 O trabalho de Wigner e Seitz (1933) sobre o sódio metálico é possivelmente o primeiro exemplo de uma aplicação bem sucedida quantitativamente dos métodos quanto-mecânicos ao comportamento de materiais reais (em oposição aos mais antigos modelos idealizados).

33 Neste artigo, Wigner (1934) estuda a interação de elétrons em um gás de elétrons livres através de uma abordagem variacional (ver, por exemplo, PINES, 1961). A “energia de correlação” introduzida por Wigner é uma contribuição puramente quanto-mecânica para a energia de ligação de elétrons em sólidos (HODDESON et al., 1992b, p. 491). Enquanto, inicialmente, ele apenas conseguiu fornecer estimativas para essa energia de correlação nos limites de baixa-densidade (Cristal de Wigner) e alta-densidade, Wigner (1938) posteriormente estendeu sua teoria ao interpolar os dois limites extremos.

da próxima ordem para sua expansão perturbativa da energia de correlação (ver nota 32) é logaritmicamente divergente, devido à natureza de longo alcance da interação coulombiana. De acordo com David Pines (apud HODDESON et al., 1992b, p. 587), essa divergência desencorajadora “[...] atrasou a aplicação sistemática da teoria perturbativa do gás de elétrons por cerca de 20 anos”.³⁴ Devido à natureza de longo alcance da interação de Coulomb e das divergências resultantes, as abordagens perturbativas, tão bem sucedidas em outras áreas onde a Mecânica Quântica foi usada, tinham que ser complementadas com aproximações um tanto quanto cruas, que resolviam a blindagem da carga eletrônica de um elétron pelos outros elétrons.³⁵ O conceito de blindagem de carga remonta ao trabalho de Debye e Hückel (1923a, 1923b) sobre plasmas clássicos e emergiu no contexto das tentativas de compreender o comportamento de eletrólitos. A física dos plasmas – gases neutros, mas altamente ionizados – era um campo ativo de pesquisa já no início da década de 1920 e ganhou enorme importância durante e após a Guerra, principalmente por sua relevância para separação de isótopos e fusão termonuclear controlada (ECKERT, 2003)³⁶. A inclusão da blindagem de carga em teorias de sólidos, entretanto, permaneceu um tanto *ad hoc* e, até após a guerra, os físicos eram incapazes de fornecer uma explicação microscópica para o funcionamento do mecanismo.

David Bohm, após receber seu doutorado em Física com J. Robert Oppenheimer em 1943, havia trabalhado em física dos plasmas no Radiation Laboratory da Universidade da Califórnia durante os últimos anos da Guerra. (HODDESON et al., 1992b, p. 534-541) Nos anos do pós-guerra, em Princeton, ele continuou seu trabalho sobre plasmas e ficou particularmente interessado no que chamou plasmas quânticos – plasmas muito mais densos que aqueles encontrados em descargas gasosas – a respeito dos quais Bohm tinha esperanças de que pudessem fornecer um modelo para a compreensão do comportamento de elétrons em metais (PINES, 1987). Ele posteriormente afirmou que na conferência de Pocono, em 1948, quando ele ficou sabendo da eletrodinâmica quântica renormalizada de Schwinger, também com raízes no período da Guerra, ele percebeu que a blindagem dinâmica em um plasma quântico

34 Na teoria do calor específico dos sólidos, primeiro Paul Dirac (1930) e posteriormente John Bardeen (1936), um ex-estudante de pós-graduação de Wigner, encontraram divergências logarítmicas similares, decorrentes da mesma fonte (HODDESON et al., 1992b). O artigo de Bardeen é muito importante para a história posterior da supercondutividade.

35 Blindagem é o nome dado ao mecanismo “[...] pelo qual cada elétron mantém os outros distantes de si e assim previne que seu campo coulombiano afete mais de que seus vizinhos imediatos”. (PIPPARD, 1995, p.1361)

36 A física do plasma passou por um processo similar de institucionalização aos da física nuclear e do estado-sólido e desenvolveu muitas interações tanto com a física nuclear como com a do estado sólido.

[...] é basicamente a mesma da renormalização [da carga] na teoria das partículas elementares – quer dizer, a carga real de um elétron é infinita de acordo com aquela teoria, mas ele se encerra em uma nuvem que a torna finita (SCHWEBER, 1994 apud HODDESON et al., 1992b, p. 536);

e que os métodos teóricos quânticos de campos empregados em eletrodinâmica quântica poderiam ser úteis também em teorias do plasma quântico. Pois o advento da eletrodinâmica quântica, em fins da década de 1940, trouxe uma surpresa para os teóricos de partículas: a eletrodinâmica quântica, de certa forma, era também um problema de muitos corpos. O vácuo quântico-eletrodinâmico não é vazio como o vácuo clássico, mas preenchido com uma corrente de pares partículas-antipartículas (AICHISON, 1985). A eletrodinâmica quântica não apenas fornecia os métodos teóricos para lidar com essa polarização do vácuo, mas também técnicas poderosas para lidar com os complicados cálculos perturbativos, que também se inspiraram na interpretação do novo formalismo. (KAISER, 2005)

Durante os anos 1950, a compreensão da conexão entre renormalização da carga, na eletrodinâmica quântica, e a blindagem dinâmica, em sistemas quânticos de muitos corpos, levou Bohm e outros a estabelecer analogias para a Teoria Quântica de Campos das partículas elementares que, no final, ajudaram a resolver o quebra-cabeça da interação de longo alcance coulombiana na teoria de sólidos. Um exemplo para a transferência de métodos teóricos quânticos de campos é o uso de coordenadas coletivas (permitindo a separação de coordenadas através de transformações canônicas), que apareceram de modo independente durante os anos 1950, tanto na teoria de Bohm-Pines do gás de elétrons, como na teoria dos núcleos de Bohr e Mottelson (1953). A separação de variáveis em ambos os casos permitiu o tratamento simultâneo de aspectos coletivos e individuais do comportamento de muitos-corpos e o estudo de suas relações.³⁷ Outro

37 Em sua palestra do Nobel, Mottelson lembra que: “A situação em 1950 [...] era caracterizada pelo fato inescapável que o núcleo às vezes exibía fenômenos característicos do movimento de partículas independentes, enquanto outros fenômenos, tais como o processo de fissão e momentos quadripolos grandes, claramente envolviam um comportamento coletivo do núcleo inteiro.” (MOTTELSON, 1976, p. 375). A teoria de Bohr-Mottelson explicava o espectro de baixa energia do núcleo, através do uso simultâneo de coordenadas coletivas e de partículas individuais. Pines (1987, p.74) escreve sobre a teoria de Bohm-Pines (BOHM; PINES, 1950, 1951; PINES; BOHM, 1952; BOHM; PINES, 1953; PINES, 1953): “A teoria era baseada no nosso reconhecimento de que, assim como no caso clássico, a interação coulombiana entre os elétrons fez surgir as oscilações do plasma. Nós percebemos que as oscilações tinham um papel decisivo [...]. Era necessário, primeiro, encontrar as variáveis coletivas que descreviam as ondas de plasma e, segundo, derivar um formalismo matemático no qual tanto as variáveis coletivas e de partículas individuais aparecessem.” Em ambos os casos, evidência experimental recente foi instrumental para o reconhecimento da importância dos modos coletivos. Ver também Hughes (2006). Kojevnikov (2002) constrói um paralelo entre as ideias coletivistas de David Bohm tanto na Física quanto em sua vida política.

exemplo é a técnica dos diagramas de Feynman (1949), adotada gradualmente em ambos os campos ao longo dos anos 1950. Do início até meados da década de 1950, da mesma forma que nos anos que sucederam o advento da Mecânica Quântica, teóricos equipados com o arsenal dessas novas técnicas de muitos-corpos foram capazes de semear tanto o campo da física do estado sólido, como o da física nuclear, e as interações entre teóricos neste período eram frequentes. Em fins da década de 1950, a engenhosa transferência de métodos teóricos quânticos de campo desenvolvidos na física de partículas e nuclear despertou uma mudança fundamental na abordagem teórica à física dos sólidos.³⁸ De repente, teorias macroscópicas receberam uma justificativa microscópica. A eficiência irracional de modelos de partículas individuais foi explicada ao se adotar ideias de renormalização da Teoria Quântica de Campos. A emergência de teorias efetivas descrevendo sólidos em termos de novas entidades fictícias (quasipartículas e excitações coletivas) era dirigida pelo desejo de se ater ao modelo de partículas individuais.³⁹ O crescimento notável da física do estado sólido como campo de pesquisa, despertado pelos desenvolvimentos experimentais durante a guerra, foi amplificado pelo desenvolvimento de um ponto de vista unificado em relação a

38 Muito do mencionado acima é focado nos desenvolvimentos ocidentais no pós-guerra. Desenvolvimentos similares aconteceram na União Soviética, de modo mais notável no grupo de Landau, representando o caso intrigante de um grupo de pesquisa que vinha trabalhando continuamente em problemas tanto de física de altas-energias, como de matéria condensada, desde fins da década de 1930. Nos primeiros anos da Guerra Fria, as interações entre o Ocidente e Oriente eram raras e o acesso às publicações era severamente limitado (na melhor das hipóteses, traduções mimeografadas de artigos de pesquisa soviéticos estavam disponíveis no Ocidente), se não impossível devido à confidencialidade. Grandes desenvolvimentos, tais como o artigo de Ginzburg e Landau (1950), passaram despercebidos no Ocidente durante anos. Foi somente em meados da década de 1950 que o intercâmbio científico entre Ocidente e Oriente aumentou e, em 1955, o American Institute of Physics iniciou o *Soviet Physics JETP*, tradução de um jornal russo comparável ao *Physical Review* em escopo e relevância (KAISER 2006; AMBEGAOKAR, 2008). Isso teve efeitos no desenvolvimento de teorias de muitos-corpos que vão além do escopo do presente texto. Para uma discussão do espalhamento dos diagramas na União Soviética, ver Kaiser e outros (2004). Da segunda metade de 1950 em diante, o intercâmbio científico no campo da física do estado sólido acelerou a passos rápidos.

39 Esse desejo era alimentado não apenas pela complexidade desafiante de cálculos diretos para problemas de muitos-corpos, a partir das equações de movimento de seus constituintes básicos, mas também da percepção *empírica* de que muitas propriedades dos sólidos, ainda que se refiram a sistemas de muitos-corpos que interagem, devem de qualquer forma ser descritíveis em termos de entidades independentes ou “excitações elementares”. Pines (1958, p. 347) escreve: “Todos nós sabemos o quão crua é a aproximação para um elétron em sólidos; nós também sabemos o quanto ela é bem sucedida. De fato, o experimento pede que haja algo muito parecido com uma excitação de partícula independente como evidenciado, por exemplo, pelo efeito Haas-van Alphen em metais e ressonância cyclotron em semicondutores. Entretanto, a questão é se, à luz do nosso conhecimento atual da interação do elétron nos sólidos, nós podemos entender os elétrons efetivos.” Ver também Hughes (2006).

problemas de muitos-corpos em Teoria Quântica de Campos⁴⁰ e de uma nova heurística intuitiva (a imagem de quasipartículas), que permitiu essencialmente manter os modelos de partículas individuais que haviam sido desenvolvidos anteriormente.⁴¹

5 Campos de interação

Ao longo do século XX, ocorreram interações importantes e fertilizações cruzadas entre física nuclear, de partículas e do estado sólido, desde antes de suas institucionalizações até o presente. Nesta seção, discutirei os modos de interação entre os campos, com ênfase em suas dinâmicas históricas. Um estudo das interações entre física de partículas, nuclear e do estado sólido revela pelo menos dois mecanismos:

- a) Compartilhamento de protagonistas: o treinamento em Mecânica Quântica ou Teoria Quântica de Campos possibilitou que alguns físicos trabalhassem em ambos os campos simultaneamente. Esse mecanismo foi particularmente poderoso em fins de 1920 e início de 1930 e na era pós-guerra, isto é, nos anos após a formulação das teorias fundamentais correspondentes.

40 Ver, por exemplo, Martin e Schwinger (1959).

41 Essa nova heurística iniciou debates sobre as relações interteóricas da física de partículas e do estado-sólido. Muitos físicos mas também alguns historiadores e filósofos da física aceitam um esquema reducionista no qual a física de altas-energias é a teoria fundamental da qual a física atômica e, por sua vez, a física do estado sólido são derivadas ou pelo menos, em princípio, poderiam ser derivadas. Outros desafiaram essa visão e assumem a posição de que não há uma clara relação interteórica (ver ANDERSON, 1972 para a mais famosa exposição de uma visão antirreducionista e HUGHES, 2006, p.515-518, para uma breve discussão). O conceito de emergência em Física, de modo geral, nega à física de altas energias seu papel fundamental na hierarquia de teorias e, pelo contrário, sugere a existência de “camadas” de realidade e teorias físicas em diferentes escalas de energias, ambas independentes em essência. (LAUGHLIN; PINES, 2000) Teorias do estado sólido, de fato, tendem a não ser derivadas do nosso conhecimento sobre partículas elementares contidas em sólidos (elétrons e núcleons) e suas interações básicas. (LEGGETT, 1992) Este não é o espaço para revisar os diferentes argumentos ou a intrigante história dos debates sobre reducionismo e emergência em Física (HOWARD, 2003; KUZEMSKY, 2008; MORRISON, 2006; SCHWEBER, 1993) e em ciência em geral (KIM, 1999), os quais não apenas pertencem às questões básicas sobre a unidade da ciência (CAT, 1998), mas também têm consequências mais amplas em políticas de pesquisa, tais como as relacionadas com o financiamento de colisores de partículas supercondutores. (KEVLES, 1995, p. ix-xlii) Ver também Hartmann (2001).

- b) Fronteiras permeáveis: os métodos e conceitos desenvolvidos em um campo podiam ser transferidos e adaptados para outros, frequentemente por meio do estabelecimento de analogias formais entre dois problemas diferentes.

5.1 Compartilhamento de protagonistas

Nos anos seguintes ao advento da Mecânica Quântica, os campos emergentes da física nuclear e do estado sólido interagiram fortemente através do compartilhamento de protagonistas. Muitos dos pais da Mecânica Quântica e seus estudantes procuravam estender o domínio explicativo da Mecânica Quântica para fenômenos fora do campo da física atômica, com a esperança de que, levando em consideração a rica fenomenologia dos sólidos e do núcleo, poder-se-ia ajudar a avançar a Teoria Quântica ao se testar as limitações da Mecânica Quântica e ao fornecer novas pistas para sua extensão. O conhecimento da velha Teoria Quântica sugeriu a aplicabilidade da Mecânica Quântica a um domínio mais amplo de fenômenos do que aqueles da espectroscopia atômica; e o conhecimento da Mecânica Quântica, especialmente da mecânica ondulatória de Schrödinger, permitiu aos físicos formular novas teorias, tanto para o subatômico como para os agregados de átomos, isto é, moléculas e sólidos. Físicos teóricos dispunham de um conjunto comum de ferramentas e técnicas que poderiam facilmente ser empregadas para o estudo dos núcleos e dos sólidos – o mesmo vale, numa extensão menor, para os experimentais. Experimentais, por outro lado, foram levados um tanto naturalmente para os campos emergentes, já que a espectroscopia não se encerrava nas séries do átomo de hidrogênio. A questão da estrutura hiperfina dos espectros atômicos forçou os físicos a pensar o papel do núcleo.⁴² Na outra ponta do espectro, experimentais estavam interessados nos espectros de moléculas e, assim, tinham que considerar os graus de liberdade rotacionais e vibracionais, bem como as questões de ligação que formaram uma ponte natural para o estudo dos sólidos. Em física teórica, protagonistas das origens tanto da física nuclear como do estado sólido, em fins da década de 1920 e 1930, incluíam nomes tais como Heisenberg, Pauli, Debye, Bloch, Condon, H. London, F. London, Bethe, Wigner, Peierls, Landau, Seitz, Mott, Heitler e Fröhlich. Durante a década de 1930, muitos dos físicos, laborando em ambos os campos simultaneamente, começaram a abandonar um campo ou o outro (ver seção 3). Enquanto parcialmente motivados pela necessidade de acompanhar uma crescente quantidade de literatura especializada nos campos emergentes, o processo de especialização

42 Em fins dos anos 1920, por exemplo, Samuel Goudsmit, um dos descobridores do *spin* do elétron, foi levado naturalmente de experimentos em espectroscopia atômica para experimentos no que hoje nós consideraríamos como física nuclear, guiado por seu interesse em estrutura hiperfina.

frequentemente era reforçado pelas restrições à emigração e pela Guerra, o que levou à prevalência da física nuclear. O treinamento especializado da geração do pós-guerra reduziu ainda mais a permeabilidade das fronteiras disciplinares para cientistas individuais. Entretanto, após a Guerra, alguns dos físicos que já haviam trabalhado em sólidos, em meados da década de 1930, decidiram retornar ao campo e físicos mais jovens gradualmente os acompanharam. Junto de si, eles levaram novas ferramentas – Teoria Quântica de Campos – que eventualmente seria aplicada com sucesso também à teoria dos sólidos.

Um exemplo de compartilhamento de protagonistas entre o início da física do estado sólido e a física nuclear é Hans Bethe. Estudante de Sommerfeld em Munique, Bethe escreveu uma dissertação, em 1926-28, explicando os experimentos de Davisson-Germer, utilizando ideias da teoria de Ewald de óptica em cristais. Após ser agraciado com uma *Rockefeller fellowship* em 1930, ele passou um tempo com Fowler em Cambridge, com Fermi em Roma e como assistente em Tübingen. Em 1933, junto com Sommerfeld, escreveu seu famoso artigo de referência (*Handbuch*) sobre Teoria Quântica dos metais (SOMMERFELD; BETHE, 1933). Emigrou em 1933 e entrou no grupo de Bragg, em Manchester, posteriormente indo para o grupo de Mott em Bristol, em 1934, tornando-se professor em Cornell em 1935. Nesses anos, ele desistiu de seu trabalho em sólidos e focou-se em física nuclear. Posteriormente lembrou:

[...] Eu imagino que provavelmente, após mais alguns anos, eu também teria sido cativado pela física nuclear. Mas aconteceu mais cedo porque eu entrei em contato com pessoas que estavam fazendo física nuclear. A Inglaterra estava cheia de física nuclear quando eu cheguei lá em 1933 e eu acho que isso teve muito a ver com o que aconteceu. De fato, Mott e eu apenas trocamos nossos papéis naquela época. Ele estava em teoria de colisões, colisões de altas energias, efeitos relativísticos em colisões e agora ele havia mudado para estado sólido. E eu fiz o contrário.⁴³

Em 1936-37, Bethe publicou uma série de artigos de revisão sobre física nuclear, que vieram a ser conhecidos como a “Bíblia de Bethe” por uma geração subsequente de físicos.⁴⁴ O trabalho dele durante a Guerra estava relacionado com o radar e, principalmente, com o desenvolvimento de armas nucleares dentro do Projeto Manhattan. Após a Guerra, o físico nuclear contribuiu para a eletrodinâmica quântica, por exemplo, através de sua explicação de 1947 do desvio

43 Entrevista com Hans A. Bethe por Lillian Hoddeson, em 29 de abril de 1981, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA . Disponível em: <<http://www.aip.org/history/ohilist/4505.html>>

44 Ver nota 15.

Lamb no hidrogênio. Na década de 1950, Bethe trabalhou em teorias de muitos-corpos do núcleo (com Keith Brueckner e Jeffrey Goldstone). Posteriormente em sua vida, Bethe foi para a astrofísica e tornou-se um advogado dos movimentos de cientistas contra armas nucleares. Enquanto Bethe nunca retornou à teoria do estado sólido, suas contribuições para a teoria nuclear de muitos-corpos foi de relevância imediata também para a teoria do estado sólido.

Um colaborador próximo de Bethe nos anos 1930, Rudolf Peierls, em suas memórias descreve sua re-entrada no campo que ele havia abandonado, devido à pesquisa relacionada com a Guerra, do seguinte modo:

Antes da Guerra, a maior parte do meu trabalho havia sido em física do estado-sólido, mas havia acontecido uma grande expansão do trabalho em minha área, então eu me senti desatualizado [...] Recuperei minha conexão com a física do estado sólido de um modo incomum. Em 1953 proferi uma série de palestras em física do estado sólido na escola de verão em Les Houches [...] Isso exigiu, de uma vez, notas de aula por escrito, que eu decidi transformar em um livro. Ao escrever as notas, e posteriormente ao revisá-las para o livro, me dei conta que muitos dos problemas que eu considerava em aberto quinze anos atrás permaneciam sem solução. Esses estavam relacionados particularmente a problemas em teoria da condutividade. Eu, assim, decidi retornar a estes problemas e comecei discussões com colegas no departamento. Geoffrey Chester, que ao chegar em 1956 havia trabalhado com hélio líquido (tradicionalmente tratado junto com problemas do estado sólido, ainda que não seja muito sólido!) tornou-se interessado, e da mesma forma Armin Thellung, um visitante da Suíça, e Sam Edwards, que havia vindo em 1953 com experiência em teoria de campos e física nuclear. De seus trabalhos e de vários de seus estudantes resultaram importantes esclarecimentos. (PEIERLS, 1985, p. 229)

Ambas as biografias exemplificam a tendência geral de 1930 a 1950: nos anos 1930 e durante a Guerra, o estudo dos núcleos ganhou *momentum*, enquanto o estudo dos sólidos perdeu o apelo, para ser retomado nos anos do pós-Guerra, fomentado pelos avanços consideráveis tanto no experimento como na teoria.

5.2 Fronteiras permeáveis

As fronteiras entre a física de partículas, a nuclear e a do estado sólido eram não somente permeáveis a cientistas individuais, mas também a um número

de conceitos e técnicas importantes, especialmente com o advento da Teoria Quântica de Campos em fins da década de 1940. O conhecimento sobre métodos teóricos quânticos de campos não viajava facilmente de teórico para teórico (KAISER, 2005). Muito pelo contrário, “tecnologias teóricas” tinham que ser aprendidas em contato com aqueles que já as dominavam ou trazidas por alguém para um novo campo de pesquisa⁴⁵. No início da década de 1950, a transferência de conceitos e métodos era principalmente unidirecional, de física de partículas e nuclear para física do estado sólido⁴⁶. Isso só mudaria em fins da década de 1950. Não somente técnicas formais eram transferidas, mas também a heurística da física do estado sólido era influenciada pelo advento da eletrodinâmica quântica: a abordagem heurística de Feynman (GALISON, 1998), tão bem sucedida em eletrodinâmica quântica, era baseada em evitar equações fundamentais do movimento (por exemplo, a formulação hamiltoniana da eletrodinâmica quântica), em favor de uma abordagem de soluções orientadas espacialmente (por exemplo, usando funções de Green). Uma mudança semelhante no estilo de raciocínio também aconteceu na teoria do estado sólido em fins da década de 1950: o ponto de partida das descrições microscópicas para o comportamento de sólidos se afastou de abordagens construtivas baseadas na equação de Schrödinger de muitos corpos para o uso de propagadores efetivos de partículas individuais. Os novos métodos se espalharam rapidamente e revolucionaram a física do estado sólido. Abrikosov, Gordov e Dzyaloshinski, no prefácio ao seu livro de 1961, *Methods of quantum field theory in statistical Physics*⁴⁷, descreveram esse processo do seguinte modo:

Nos últimos anos, um sucesso notável tem sido alcançado na física estatística, devido ao uso extensivo de métodos emprestados da Teoria Quântica de Campos. O fato de esses métodos serem frutíferos está associado com novas formulações da teoria da perturbação, primariamente ligada com a aplicação dos “diagramas de Feynman”. A vantagem básica da técnica do diagrama está em seu caráter intuitivo: operando com conceitos de partículas únicas, nós podemos usar a técnica para determinar a estrutura de qualquer

45 Ver, por exemplo, a discussão do trabalho de Andrew Warwick e Ursula Klein (KAISER et al., 2004, p. 880-881). Ver ainda Ramsey (2000).

46 Métodos importados de teoria nuclear de muitos corpos (por exemplo, a teoria de muitos corpos de Brueckner) também foram crucialmente importantes para a química quântica. Ver Löwdlin (1995) para uma discussão da história do problema da correlação do elétron em Química.

47 O trabalho Abrikosov, Gor'kov e Dzyaloshinski (1965) é conhecido como AGD para muitos teóricos do estado sólido. Ele possivelmente se constitui como a primeira monografia sobre as novas técnicas teóricas quânticas de campo e foi rapidamente traduzido para o inglês em 1963.

aproximação [...]. Esse novos métodos tornaram possível não somente resolver um grande número de problemas que não se rendiam à antiga formulação da teoria, mas também obter muitas novas relações de caráter geral.⁴⁸

A blindagem dinâmica de cargas em sólidos era explicada microscopicamente usando os métodos de renormalização de carga da eletrodinâmica quântica, principalmente a teoria da perturbação diagramática de Feynman (1949), e se apoiando em esquemas perturbativos, inventados para a aplicação desses métodos em problemas de física nuclear. Keith Brueckner (1955) havia introduzido uma “expansão de núcleos-ligados” para o tratamento da matéria nuclear (ver, por exemplo, BETHE, 1956) e Jeffrey Goldstone (1957), introduzindo a técnica perturbativa e utilizando diagramas como os de Feynman. Com essa abordagem, ele conseguiu mostrar que a expansão de núcleos-ligados de Brueckner é exata para o estado fundamental de energia de um sistema de muitos férmions interagindo, o que permite o tratamento “do estado fundamental de partículas independentes como um ‘estado de vácuo’” (GOLDSTONE, 1957, p. 268), colocando assim a analogia à eletrodinâmica quântica em bases ainda mais firmes. Ao mesmo tempo, Murray Gell-Mann, um teórico de partículas, juntamente com Brueckner, que estava predominantemente interessado em teorias de matéria nuclear, atacaram diagramaticamente o problema do limite de alta densidade de um gás de elétrons os quais interagem entre si e resolveram o quebra-cabeça das divergências que ocorriam em todas as abordagens anteriores para a energia de correlação no gás de elétrons (GELL-MANN; BRUECKNER, 1957). Seu trabalho conjunto, publicado no início de 1957, resultou de uma cooperação com um projeto RAND em fusão termonuclear (HODDESON et al., 1992b, p. 538-539). Eles notaram que as divergências na energia de correlação do gás de elétrons, contida em teorias anteriores, eram consequência de uma soma incompleta das séries de perturbação. Uma soma completa gerava uma série geométrica e as divergências eram canceladas⁴⁹. O trabalho deles e o já mencionado artigo de Goldstone (1957) podem ser considerados como os primeiros exemplos da aplicação de métodos diagramáticos do tipo Feynman em uma área explicitamente conectada à teoria do estado sólido. Hoje, diagramas de Feynman são comuns no campo (ver, por exemplo, MATTUCK, 1967). A teoria da perturbação diagramática é um dos

48 Prefácio dos autores à edição russa de 1961, citado em Abrikosov; Gor'kov; Dzyaloshinski (1965).

49 Usando a teoria da perturbação diagramática, eles provaram que a divergência logarítmica que aparece na ordem mais baixa da expansão perturbativa da energia de correlação é cancelada por divergências similares, em termos de alta ordem e, assim, é uma consequência de não somar as contribuições até a infinitésima ordem. Isso permitiu derivar uma expressão para o estado de energia fundamental do gás de elétrons os quais interagem no limite de alta densidade. Ver, por exemplo, Falicov e Heine (1961, p. 75).

vários elementos que se originaram na Teoria Quântica de Campos de partículas elementares que iniciaram uma mudança fundamental na Teoria Quântica de sólidos. Um grande conjunto de aplicações dos novos métodos teóricos quânticos de campos a problemas em física do estado sólido apareceu rapidamente⁵⁰.

Em fins da década de 1950 e começo de 1960, os métodos teóricos quânticos de campos em física do estado sólido foram estendidos e desenvolvidos, frequentemente de modo independente da física de partículas. Desde então, a física da matéria condensada se tornou uma fonte de novos modelos, métodos e conceitos em Teoria Quântica de Campos em geral. A rica fenomenologia da física do estado sólido – quando comparada à física de partículas e nuclear – implicou em numerosas abordagens engenhosas e uma diversidade de novos conceitos, cujo potencial fertilizou de volta a física de altas energias. Frequentemente, ideias originárias da física de partículas, através de sua adoção na teoria do estado sólido, passaram por refinamento em suas interpretações físicas; e o estabelecimento de analogias entre física de altas energias e da matéria condensada, hoje em dia, é visto geralmente como uma fonte de inovação em ambos os campos. Nós já havíamos mencionado a história do conceito de quebra espontânea de simetria na introdução deste artigo. Um exemplo próximo datado do fim da década de 1950, ressaltando a interação intensa entre teóricos nucleares e do estado sólido baseados na teoria de muitos corpos, é o artigo de Bohr, Mottelson e Pines (BOHR et

50 O artigo de Gell-Mann e Brueckner foi imediatamente seguido por um cálculo do calor específico do gás de elétrons de alta densidade, desenvolvido por Gell-Mann (1957). No mesmo ano, Hubbard (1957a, 1957b), ao introduzir uma interação modificada entre as partículas, seguindo “um processo análogo à eliminação das partes de auto-energia do fóton da matriz S eletrodinâmica”, refinou o tratamento diagramático para incluir os modos coletivos, tais como os plasmons. Sawada, Brueckner, Fukada e Brout demonstraram que a abordagem de Gell-Mann e Brueckner de fato continha as oscilações do plasma que Bohm e Pines (1953) haviam calculado e que a aproximação de fase aleatória de Bohm e Pines é exata no limite da alta densidade (SAWADA et al., 1957). Wentzel (1957), usando as novas técnicas, mostrou que “o diamagnetismo de um gás de elétrons denso é o mesmo que o de elétrons que não interagem”, excluindo assim a explicação da supercondutividade (isto é, o efeito Meissner-Ochsenfeld), baseada somente nas propriedades de um gás de elétrons que interagem (a teoria BCS havia acabado de ser apresentada há cerca de meio ano, mas apenas a nota curta (BARDEEN; COOPER; SCHRIEFFER, 1957a) havia sido publicada). Galitski e Migdal (1958) trataram a teoria da constante dielétrica com uma abordagem de muitos corpos. Já em fins de 1957, Bogoliubov (1958a, b) e Valatin (1958, p. 846, nota) propuseram independentemente uma técnica de transformação canônica, anteriormente desenvolvida por Bogoliubov (1947) para a teoria de superfluidos, para a supercondutividade. Logo após, Gor’kov (1958) e posteriormente Nambu (1960a) desenvolveram a abordagem teórica de campos para a supercondutividade. Beliaev (1958a, 1958b) e Heugenholtz e Pines (1959) estenderam o formalismo para bósons que interagem. Luttinger e Nozières (1962a, 1962b), posteriormente, foram bem sucedidos ao fornecer uma derivação diagramática da teoria de Landau para Líquidos de Fermi (LANDAU, 1956). Muitas das referências nesta nota de rodapé podem ser encontradas como *reprints* em Pines (1961).

al., 1958), que estabeleceu uma analogia entre a supercondutividade e o espectro de baixa energia do núcleo. Em sua palestra do prêmio Nobel, Mottelson (1976, p. 377) lembrou:

Foi uma circunstância afortunada para nós que David Pines passasse um período de diversos meses em Copenhague no verão de 1957, durante o qual ele nos introduziu aos excitantes novos desenvolvimentos da teoria da supercondutividade. Através de discussões com ele, a relevância desses conceitos para o problema da correlação de pares em núcleos se tornou aparente (Bohr et al., 1958). Um componente importante dessas discussões era o fato de que evidências experimentais haviam sido acumuladas para a existência de um gap de energia no espectro de excitação do núcleo remanescente daquele observado em supercondutores.

Outro exemplo relacionado e particularmente intrigante de fertilização cruzada é a abordagem de grupo de renormalização (SHIKOV, 1993, 2009). Originário dos trabalhos iniciais de Teoria Quântica de Campos em partículas elementares (GELL-MANN; LOW, 1954; STÜCKELBERG; PETERMAN, 1953), o grupo de renormalização só chegou à proeminência, na década de 1970, quando Kenneth G. Wilson (1971) e outros, baseados em ideias desenvolvidas em trabalhos anteriores sobre teoria da matéria condensada por Leo Kadanoff (1966) - renormalização em blocos de *spin* - aplicaram de modo bem sucedido esta à teoria da transição de fases e fenômenos críticos e, posteriormente, ao problema de Kondo (WILSON, 1975). O trabalho de Wilson, conforme (SCHWEBER, 1993, p. 150), “[...] deixou claro que a renormalização não era um dispositivo técnico para eliminar divergências, ‘mas uma expressão da variação da estrutura das interações físicas com mudanças na escala do fenômeno sendo testado’ (Gross, 1985)”. O método de grupo de renormalização teve um impacto tremendo em física da matéria condensada e estatística (por exemplo, grupo de renormalização de matriz densidade), mas também em física de altas energias e no modelo padrão (por exemplo, a ideia de usar constantes acopladas), e mesmo na interpretação e desenvolvimento posterior da própria Teoria Quântica de Campos (HARTMANN, 2001; SCHWEBER, 1993, 2007).⁵¹ Este está no coração de debates efervescentes sobre o reducionismo na Física.⁵² O impacto da física da matéria condensada em questões fundamentais da Física tem, entretanto, sur-

51 Um projeto sobre a história das técnicas de escalonamento e da interação entre física de altas energias e da matéria condensada no início dos anos 1970, chamado “Física da escala”, tem sido conduzido, porém, até onde o autor sabe, infelizmente nunca foi concluído. Atualmente, está disponível em: <<http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/renormalization/public/index.html>>.

52 Ver nota 40.

preendido a físicos de altas energias. Até hoje, interações e fertilizações cruzadas entre física de altas energias e da matéria condensada são frequentes e analogias entre a Teoria Quântica de Campos de partículas elementares e fenômenos em física da matéria condensada são abundantes.⁵³

6 Epílogo: mecânica quântica e o crescimento e diversificação da física moderna

Durante o século XX, a Física não somente passou por mudanças conceituais revolucionárias, mas também cresceu significativamente como disciplina científica. Kragh (1999, p. 440-441) estima um aumento por cerca de um fator 100 no número de físicos e na quantidade de publicação ao longo do último século. Isto transformou profundamente o modo pelo qual a pesquisa física é desenvolvida. Exemplos de tais transformações são as mudanças na divisão de trabalho entre teoria e experimento, a emergência da *big science* e da pesquisa em equipe, questões de relevância militar e tecnológica da Física e a diversificação da Física teórica em subdisciplinas especializadas. Enquanto a Física não está sozinha em sua expansão, seu crescimento certamente foi amplificado pelo espalhamento da Mecânica Quântica e pela relevância crescente da Física para o domínio militar e tecnológico⁵⁴. A Mecânica Quântica, e posteriormente a Teoria Quântica de Campos, transformou-se numa estrutura unificadora para a maioria dos físicos. Ingenuamente, é possível esperar que o advento de teorias unificadoras, tais como a Mecânica Quântica e a Teoria Quântica de Campos, levaria a uma integração dos temas, não a uma diversificação acelerada. Entretanto, como foi visto, o completo oposto permanece verdadeiro: em Física, a unificação intelectual não implica integração institucional, mas o contrário – ao longo do século XX, a Física se dividiu em subdisciplinas.⁵⁵ Teria então a Mecânica Quântica agido como uma semente para a diversificação? E, em caso afirmativo, quais mecanismos estavam por trás desse processo?

53 Teorias de campos conforme, estatística aniónica e teoria de campos Chern-Simons para sistemas Hall quânticos, áxions em isolantes topológicos, férmions de Dirac em grafenos, apenas para citar alguns exemplos mais recentes. Ver Fradkin (1991) e Altland e Simons (2006).

54 Ver, por exemplo, Kaiser (2002) para um estudo sobre o aumento da “mão-de-obra” científica nos Estados Unidos no pós-Guerra.

55 John H. van Vleck chamou isso de “balcanização” da Física. Seitz (1994, p. 85) recorda: “Como ele acreditava firmemente que o campo da Física era bastante unificado, van Vleck ficou bastante perturbado quando a *American Physical Society* começou a desenvolver divisões associadas com suas especialidades. Ele chamou isso de “balcanização” da Física e se esforçou ao máximo para retardar esse processo. Infelizmente, o enorme crescimento da sociedade eventualmente requereu algum tipo de quebra organizacional em categorias.”

Uma forma de responder a essa questão é negar que ela esteja bem colocada. Perceber a Mecânica Quântica como um formalismo unificante, desprovido de seu conteúdo, de fato é um exercício sem sentido. A Mecânica Quântica de fato *integrou* correntes aparentemente desconexas de desenvolvimento da Física do século XIX e início do século XX e assim levou à integração da, digamos, pesquisa em radioatividade e raios cósmicos sob o telhado da física nuclear. A Mecânica Quântica usada em física nuclear não é um conjunto fixo de ferramentas, desenvolvido em física atômica e aplicado ao domínio do núcleo, pois a própria Mecânica Quântica se desenvolveu quando fenômenos nucleares e de outras áreas foram incluídos no seu domínio explicativo. Entretanto, em uma perspectiva histórica, não pode ser negado que a subdivisão ou diversificação da Física começou mais ou menos ao mesmo tempo do advento da Mecânica Quântica. A aparente contradição pode ser removida ao se notar que os pais da Mecânica Quântica não eram simplesmente “físicos atômicos” ou espectroscopistas que haviam formulado uma teoria fundamental para descrever a riqueza de fenômenos encontrados nesta área particular da Física. Pelo contrário, muitos dos “mecânicos quânticos” iniciais eram, acima de tudo, físicos teóricos, ao invés de atômicos, nucleares ou do estado sólido. Colocar etiquetas desse tipo sobre os físicos do início do século XX é algo comum, mas altamente problemático. Enquanto o primeiro sucesso da Mecânica Quântica veio com a descrição do espectro atômico, a tradição da velha Teoria Quântica sugeria um alcance explicativo muito mais amplo. Equipados com a confiança no poder da Mecânica Quântica quanto à descrição do espectro atômico, os primeiros mecânicos quânticos começaram a estendê-la para o subatômico (isto é, física nuclear e de partículas) e para agregados de átomos (isto é, física molecular e do estado sólido, Química e, posteriormente, até mesmo Biologia Molecular).

Avanços na experimentação, frequentemente dependentes da Mecânica Quântica, tiveram um papel crucial nas décadas seguintes ao advento da mesma e forneceram uma abundância de fenômenos a serem explicados, tornando extremamente difícil para qualquer indivíduo manter-se a par de todos os desenvolvimentos. Após a Guerra, o crescimento sem precedentes no número absoluto de físicos amplificou essa tendência. Os primeiros protagonistas da “aplicação” da Mecânica Quântica a fenômenos fora do domínio do átomo eram móveis por que tinham um passado na construção da Teoria Quântica que ia bem além das questões de espectroscopia atômica. Em fins dos anos 1920 e início dos anos 1930, eles frequentemente seguiram o desenvolvimento em vários dos campos emergentes. As gerações subsequentes não tinham essa vantagem. A permeabilidade das fronteiras das disciplinas emergentes para pessoas, e também para ideias e conceitos individuais, diminuiu. O modo pelo qual a Física – Mecânica Quântica – era ensinada mudou (ver, por exemplo, KAISER, 2007). Vagarosamente, mas de maneira contínua, campos tais como a física nuclear, de partículas e do estado sólido se consolidaram como subdisciplinas bem definidas da Física em seu próprio direito.

Só o advento da Teoria Quântica de Campos em fins dos anos 1940, suplantando – ou melhor, complementando – a Mecânica Quântica como o formalismo unificador para os campos emergentes durante os anos 1950, aproximou novamente as trajetórias da física nuclear, de partículas e do estado sólido entre si. Conceitos e métodos desenvolvidos para solucionar as aparentes contradições na Mecânica Quântica, quando esta se aproximou do acoplamento ao campo eletromagnético, foram transferidos de física de partículas para física nuclear e do estado sólido. A rica fenomenologia e a fácil acessibilidade experimental dos sólidos levaram a novos conceitos e técnicas que, em fins dos anos 1950 e início dos anos 1960, começaram a fertilização cruzada de volta para a física de partículas e nuclear. Desde então, interações entre os campos são frequentes e férteis. As interações, algumas esboçadas no presente texto, de fato refletem certa integração intelectual devido à Mecânica Quântica e à Teoria Quântica de Campos. Mas elas também se beneficiaram da diversidade de contextos, onde a física quântica é aplicada e estendida. Ao invés de concorrer para uma falta de unidade ou coerência na Física, a diversidade que brota da desintegração institucional da Física durante o século XX parece garantir sua estabilidade e não destruí-la. As origens da divisão fundamental entre os estilos de pensamento em física de altas energias e da matéria condensada e seus efeitos nas interações entre os dois campos, necessitarão de estudos históricos adicionais.

Agradecimento

O autor agradece a Olival Freire Jr. e a todos os organizadores desta conferência, pela hospitalidade, e a Finn Aaserud, Gordon Baym, Silvio Dahmen, Lillian Hoddeson, Don Howard, Anja Skaar Jacobsen, Jeremiah James, Ed Jurkowitz, Leo Kadano, Shaul Katzir, Christoph Lehner, Ben Mottelson, Felix von Oppen, Ingo Peschel, Jürgen Renn, Sam Schweber, Georges Waysand, Spencer Weart, pela suas observações e críticas que auxiliaram os vários estágios deste projeto em andamento sobre o advento dos métodos teóricos quânticos de campo em física da matéria condensada. O autor agradecidamente reconhece concessão de suporte do *Friends of the Center for History of Physics, American Institute of Physics*.

Referências

AASERUD, F. *Redirecting science: Niels Bohr, philanthropy and the rise of nuclear physics*. Cambridge: Cambridge University, 1990.

ABRIKOSOV, A. A.; GOR'KOV, L. P.; DZIALOSHINSKI, I. E. *Quantum field theoretical methods in statistical physics*. Oxford: Pergamon, 1965.

AITCHISON, I. J. R. Nothing's plenty: the vacuum in modern quantum field theory. *Contemporary Physics*, v. 26, p. 333-391, 1985.

ALTLAND, A.; SIMONS, B. *Condensed matter field theory*. Cambridge: Cambridge University, 2006.

AMBEGAOKAR, V. The Landau school and the American Institute of Physics translation program. *Physics Uspekhi*, v. 51, n. 12, p. 1287-1290, 2008.

ANDERSON, P. W. More is different. *Science*, New Series, v. 177, p. 393-396, 1972.

BARDEEN, J. Electron exchange in the theory of metals. *Physical Review*, v. 50, p. 1098-1099, 1936.

BARDEEN, J.; COOPER, L. N.; SCHRIEFFER, J. R. Microscopic theory of superconductivity. *Physical Review*, v. 106, p. 162-164, 1957a.

_____. Theory of superconductivity. *Physical Review*, v. 108, p. 1175-1204, 1957b.

BELIAEV, S. T. Application of the methods of quantum field theory to a system of bosons. *Soviet Physics JETP*, v. 7, p. 289-299, 1958a.

_____. Energy spectrum of a non-ideal Bose gas. *Soviet Physics JETP*, v. 7, p. 299-307, 1958b.

BELLER, M. *Quantum dialogue. The making of a revolution*. Chicago: University of Chicago, 1999.

BETHE, H. A. The happy thirties. In: STUEWER, R. H. (Ed.). *Nuclear physics in retrospect. Proceedings of a symposium on the 1930s*. Minneapolis: University of Minneapolis, 1979. p. 11-26.

_____. Nuclear many-body problem. *Physical Review*, v. 103, p. 1353-1390, 1956.

_____. Nuclear physics. B. Nuclear dynamics, theoretical. *Reviews of Modern Physics*, v. 9, p. 69-244, 1937.

BETHE, H. A.; BACHER, R. Nuclear physics. A. Stationary states of nuclei. *Reviews of Modern Physics*, v. 8, p. 82-229, 1936.

BLOCH, F. Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. *Zeitschrift für Physik*, v. 52, p. 555-600, 1928.

BOGOLIUBOV, N. N. On the theory of superfluidity. *Journal of Physics (USSR)*, v. 11, p. 23-32, 1947.

_____. A new method in the theory of superconductivity. I. *Soviet Physics JETP*, v. 7, p. 41-46, 1958a.

_____. On a new method in the theory of superconductivity. *Il Nuovo Cimento*, v. 7, p. 794-805, 1958b.

BOHM, D.; PINES, D. A collective description of electron interactions. I. Magnetic interactions. *Physical Review*, v. 82, p. 625-634, 1951.

_____. A collective description of electron interactions: III. Coulomb interactions in a degenerate electron gas. *Physical Review*, v. 92, p. 609-625, 1953.

_____. Screening of electronic interactions in a metal. *Physical Review*, v. 80, p. 903-904, 1950.

BOHR, A.; MOTTELSON, B. R. Collective and individual-particle aspects of nuclear structure. *Kongelige Danske Matematisk-fysiske Meddelelser*, v. 27, n.16, p. 1-174, 1953.

BOHR, A.; MOTTELSON, B. R.; PINES, D. Possible analogy between the excitation spectra of nuclei and those of the superconducting metallic state. *Physical Review*, v. 110, p. 936-938, 1958.

BORN, M. *Dynamik der Kristallgitter*. Berlin: Teubner, 1915.

BORN, M.; KARMAN, T. von. Über Schwingungen in Raumgittern. *Physikalische Zeitschrift*, v. 13, p. 297-309, 1912.

BRAUN, E. Selected topics from the history of semiconductor physics and its applications. In: HODDESON, L. et al. (Ed.). *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid-state physics*. Oxford: Oxford University, 1992. p. 443-488, 1992.

BROWN, L. M. et al. Panel session: spontaneous breaking of symmetry. In: HODDESON, L., et al. (Ed.). *The rise of the Standard Model: particle physics in the 1960s and 1970s*. New York: Cambridge University, 1997. p. 478-522.

BROWN, L. M.; HODDESON, L. (Ed.). *The birth of particle physics: based on a Fermilab symposium*. Cambridge: Cambridge University, 1983.

BUECKNER, K. A. Many-body problem for strongly interacting particles. II. Linked cluster expansion. *Physical Review*, v. 100, p. 36-45, 1955.

CASSIDY, D. C. *Uncertainty: the life and science of Werner Heisenberg*. New York: Freeman, 1992.

CAT, J. The physicists' debate on unification at the end of the 20th century. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 28, p. 253-300, 1998.

CONDON, E. U. A theory of intensity distribution in band systems. *Physical Review*, v. 28, p. 1182-1201, 1926.

_____. Nuclear motions associated with electron transitions in diatomic molecules. *Physical Review*, v. 32, p. 858-872, 1928.

DARRIGOL, O. A simplified genesis of quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, p. 151-166, 2009.

DEBYE, P. Einige Resultate einer kinetischen Theorie der Isolatoren. *Physikalische Zeitschrift*, v. 13, p. 97-100, 1912a.

_____. Zur Theorie der spezifischen Wärmen. *Annalen der Physik*, v. 39, p. 789-839, 1912b.

DEBYE, P., HÜCKEL, E. Zur Theorie der Elektrolyte. I. Gefrierpunkterniedrigung und verwandte Erscheinungen. *Physikalische Zeitschrift*, v. 24, p. 185-208, 1923a.

_____. Zur Theorie der Elektrolyte. II. Das Grenzgesetz für die elektrische Leitfähigkeit. *Physikalische Zeitschrift*, v. 24, p. 305-328, 1923b.

DIRAC, P. A. M. Note on exchange phenomena in the Thomas atom. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, v. 26, p. 376-385, 1930.

DRUDE, P. Optische Eigenschaften und Elektronentheorie. I. Teil. *Annalen der Physik*, v. 14, p. 677- 725, 1904.

_____. Zur Elektronentheorie der Metalle: 1. Teil. *Annalen der Physik*, v. 1, p. 566-613, 1900a;

_____. Zur Elektronentheorie der Metalle: 2. Teil. *Annalen der Physik*, v. 3, p. 369- 402, 1900b.

_____. Zur Elektronentheorie der Metalle: Berichtigung. *Annalen der Physik*, v. 7, p. 687-692, 1902.

ECKERT, M. Plasmas and solid-state science. In: NYE, Mary Jo (Ed.). *The Cambridge history of Science*, 2003. p. 413-428. (The modern physical and mathematical sciences, v. 5).

ECKERT, M.; SCHUBERT, H. Kristalle, elektronen, transistoren: von der Gelehrtenstube zur Industrieforschung. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 1986.

_____. Crystals, electrons, transistors: from scholar's study to industrial research. Trans. by Thomas Hughes. Berlin: Springer, 1990.

ECKERT, M.; SCHUBERT, H.; TORKAR, G. The roots of solid-state physics before quantum mechanics. In: HODDESON, L. et al. (Ed.). *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid-state physics*. Oxford: Oxford University, 1992. p. 3-87.

EINSTEIN, A. Die plancksche theorie der strahlung und die theorie der spezifischen wärme. *Annalen der Physik*, v. 22, p. 180-190, 1907.

_____. Eine Beziehung zwischen dem elastischen Verhalten und der spezifischen Wärme bei festen Körpern mit einatomigem Molekül. *Annalen der Physik*, v. 34, p. 170-174, 1911a.

_____. Elementare Betrachtungen über die thermische Molekularbewegung in festen Körpern. *Annalen der Physik*, v. 35, p. 679-694, 1911b.

_____. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Physikalisch-Mathematische Klasse, 1924. p. 261-267.

_____. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. *Physikalisch-Mathematische Klasse*, v. 23, p. 3-14, 18-25, 1925.

FALICOV, L. M.; HEINE, V. The many-body theory of electrons in metal or has a metal really got a Fermi surface? *Advances in Physics*, v. 10, p. 57-105, 1961.

FETTER, A. L.; WALECKA, J. D. Quantum theory of many-particle systems. New York: McGraw-Hill, 1971.

FEYNMAN, R. P. The theory of positrons. *Physical Review*, v. 76, p. 749-759, 1949.

FISCHER, K. *Changing landscapes of nuclear physics: a scientometric study on the social and cognitive position of German-speaking emigrants within the nuclear physics community 1921-1947*. Berlin: Springer, 1993.

FORMAN, P. Swords into ploughshares: breaking new ground with radar hardware and technique in physical research after World War II. *Reviews of Modern Physics*, v. 67, p. 397-455, 1995.

FRADKIN, E. *Field theories of condensed matter systems*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1991.

FRIEDRICH, W.; KNIPPING, P.; LAUE, M. von. Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen. *Sitzungsberichte der Mathematisch-Physikalischen Classe der Königlich-Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München*, p. 303-322, 1912.

GALISON, P. Feynman's war: modelling weapons, modelling nature. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, v. 29, p. 391-434, 1998.

GALITSKII, V.; MIGDAL, A. Application of quantum field theory methods to the many body problem. *Soviet Physics JETP*, v. 7, p. 96-104, 1958.

GAMOV, G. *Constitution of atomic nuclei and radioactivity*. Oxford: Clarendon, 1931.

_____. Zur Quantentheorie des Atomkernes. *Zeitschrift für Physik*, v. 52, p. 204-212, 1928.

GAVROGLU, K. *Fritz London: a scientific biography*. Cambridge: Cambridge University, 1995.

GELL-MANN, M. Specific heat of a degenerate electron gas at high density. *Physical Review*, v. 106, p. 369-372, 1957.

GELL-MANN, M.; BRUECKNER, K. A. Correlation energy of an electron gas at high density. *Physical Review*, v. 106, p. 364-368, 1957.

GELL-MANN, M.; LOW, F. Quantum electrodynamics at small distances. *Physical Review*, v. 95, p. 1300-1312, 1954.

GINZBURG, V. L.; LANDAU, L. D. On the theory of superconductivity. *Zhurnal Eksperimental'noi i Theoreticheskoi Fiziki*, v. 20, p. 1064-1082, 1950.

GOLDSTONE, J. Derivation of the Brueckner many-body theory. *Proceedings of the Royal Society*, A239, p. 267-279, 1957.

GOR'KOV, L. P. On the energy spectrum of superconductors. *Zhurnal Eksperimental'noi i Theoreticheskoi Fiziki*, v. 34, p. 735-739, 1958. Translation in: *Soviet Physics JETP*, v. 7, p. 505-508, 1958.

GROSS, D. On the uniqueness of physical theories. In: DETAR, C.; FINKELSTEIN, J.; TAN, C.-I. (Ed.). *A passion for physics*. Singapore: World Scientific, 1985.

GURNEY, R. W.; CONDON, E. U. Wave mechanics and radioactive disintegration. *Nature*, v. 122, p. 439, 1928.

HANLE, P. A. The coming of age of Erwin Schrödinger: His quantum statistics of ideal gases. *Archive for the History of the Exact Sciences*, v. 17, p. 165-192, 1971.

_____. The Schrödinger-Einstein correspondence and the sources of wave mechanics. *American Journal of Physics*, v. 47, n. 7, p. 644-648, 1979.

HARTMANN, S. Effective field theories, reductionism and scientific explanation. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 32, p. 267-304, 2001.

HARTREE, D. W. Review: The constitution of atomic nuclei and radioactivity by G. Gamow. *The Mathematical Gazette*, v. 16, n. 220, p. 284-285, 1932.

HEILBRON, J. L.; SEIDEL, R. W. *Lawrence and his laboratory: a history of the Lawrence Berkeley Laboratory*. Berkeley: University of California, 1989. v. 1

HEISENBERG, W. Mehrkörperproblem und Resonanz in der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, v. 38, p. 411-426, 1926.

_____. Über den Bau der Atomkerne. I. *Zeitschrift für Physik*, v. 77, p. 1-11, 1932a.

_____. Über den Bau der Atomkerne. II. *Zeitschrift für Physik*, v. 77, p. 156-164, p. 1932b.

_____. Über den Bau der Atomkerne. III. *Zeitschrift für Physik*, v. 80, p. 587-596, 1933.

HEITLER, W.; LONDON, F. Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, v. 44, p. 455-472, 1927.

HENDRY, J. *The creation of quantum mechanics and the Bohr-Pauli dialogue*. Dordrecht: Reidel, 1984.

HERRING, C. Recollections. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, n. 371, (1744), p. 67-76, 10 jun. 1980.

HODDESON, L. et al. (Ed.). *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid-state physics*. Oxford: Oxford University, 1992a.

HODDESON, L. et al. Collective phenomena. In: HODDESON, L. et al. (Ed.). *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid-state physics*. Oxford: Oxford University, 1992c. p. 489-616.

HODDESON, L., BAYM, G. The development of the quantum mechanical electron theory of metals, 1900-28. In: MOTT, N. F. (Ed.). *The beginnings of solid state physics*. London: The Royal Society: Cambridge University, 1980. p. 8-23.

HODDESON, L.; BAYM, G.; ECKERT, M. The development of the quantum mechanical electron theory of metals, 1926-1933. In: HODDESON, L. et al. (Ed.). *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid-state physics*. Oxford: Oxford University, 1992b. p. 88-181).

HODDESON, L.; DAITCH, V. *True genius: the life and science of John Bardeen*. Washington, D. C.: Joseph Henry, 2002.

HOWARD, D. *Reduction and emergence in the physical sciences: some lessons from the particle physics-condensed matter physics debate*. 2003. Unpublished manuscript, available online: <<http://www.nd.edu/~dhoward1/Papers.html>>

HUBBARD, J. The description of collective motions in terms of many-body perturbation theory. *Proceedings of the Royal Society*, A239, p. 267-279, 1957a.

_____. The description of collective motions in terms of many-body perturbation theory. II. The correlation energy of a free-electron gas. *Proceedings of the Royal Society*, A243, p. 336-352, 1957b.

HUGENHOLTZ, N. M.; PINES, D. Ground-state energy and excitation spectrum of a system of interacting bosons. *Physical Review*, v. 116, p. 489-506, 1959.

HUGHES, J. Modernists with a vengeance”: Changing cultures of theory in nuclear science, 1920-1930. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 29, p. 339-367, 1998.

_____. Radioactivity and Nuclear Physics. In: NYE, Mary Jo (Ed.). *The Cambridge history of Science*. Cambridge: Cambridge University, 2003. p. 350-374. (The modern physical and mathematical sciences, v. 5).

HUGHES, R. I. G. Theoretical Practice: the Bohm-Pines quartet. *Perspectives on Science*, v. 14, p. 457-524, 2006.

JOAS, C.; KATZIR, S. *Analogy, extension, and novelty: Young Schrödinger on electric phenomena in solids*. [200?]. Submitted for publication to *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. Unpublished.

JURKOWITZ, E. P. *Interpreting superconductivity: the history of quantum theory and the theory of superconductivity and superfluidity, 1933–1957*. 1995. Thesis (Doctor) - University of Toronto, 1995.

KADANO, L. P. Scaling laws for Ising models Near T_c. *Physics*, v. 2, p. 263, 1966.

KAISER, D. *Drawing theories apart: the dispersion of Feynman diagrams in postwar physics*. Chicago: University of Chicago, 2005.

_____. The physics of spin: Sputnik politics and American physicists in the 1950s. *Social Research*, v. 73, p. 1225-1252, 2006.

_____. Scientific manpower, cold war requisitions, and the production of American physicists after World War II. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 33, p. 131-159, 2002.

_____. Turning physicists into quantum mechanics. *Physics World*, 20, p. 28-33, may 2007.

KAISER, D.; ITO, K.; HALL, K. Spreading the tools of theory: Feynman diagrams in the USA, Japan, and the Soviet Union. *Social Studies of Science*, v. 34, p. 879-922, 2004.

KEVLES, D. J. *The physicists: the history of a scientific community in modern America*. 2nd ed. Cambridge: Harvard University, 1995.

KIBBLE, T. W. B. Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble mechanism. *Scholarpedia*, v. 4, n. 1, p. 8741, 2009.

KIM, J. Making Sense of Emergence. *Philosophical Studies*, v. 95, p. 3-36, 1999.

KOJEVNIKOV, A. David Bohm and collective movement. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 33, p. 161-192, 2002.

KRAGH, H. *Quantum Generations*. Princeton: Princeton University, 1999.

KUZEMSKY, A. L. Works by D. I. Blokhintsev and the development of quantum physics. *Physics of Particles and Nuclei*, v. 39, p. 137-172, 2008.

LANDAU, L. D. The theory of a Fermi liquid. *Zhurnal Eksperimental'noi i Theoreticheskoi Fiziki*, v. 30, p. 1058-1064, 1956.

LAUGHLIN, R. B. *A different universe: reinventing physics from the bottom down*. New York: Basic Books, 2005.

LAUGHLIN, R. B.; PINES, D. The theory of everything. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, v. 97, p. 28-31, 2000.

LEGGETT, A. J. On the nature of research in condensed-state physics. *Foundations of Physics*, v. 22, p. 221-233, 1992.

LIVINGSTON, M. S.; BETHE, H. A. Nuclear physics. C. Nuclear dynamics, experimental. *Reviews of Modern Physics*, v. 9, p. 245-390, 1936.

LÖWDIN, P.-O. The historical development of the electron correlation problem. *International Journal of Quantum Chemistry*, v. 55, p. 77-102, 1995.

LUTTINGER, J. M.; NOZIÈRES, P. Derivation of the Landau theory of Fermi liquids. I. Formal preliminaries. *Physical Review*, v. 127, p. 1423-1431, 1962a.

_____. Derivation of the Landau theory of Fermi liquids. II. Equilibrium properties and transport equation. *Physical Review*, v. 127, p. 1431-1440, 1962b.

MARTIN, P. C.; SCHWINGER, J. Theory of many-particle systems. I. *Physical Review*, v. 115, p. 1342-1373, 1959.

MATRICON, J.; WAYSAND, G. *Cold wars: a history of superconductivity*. New Brunswick, NJ: Rutgers University, 2003.

MATTUCK, R. D. *A guide to Feynman diagrams in the many-body problem*. London: McGraw-Hill, 1967.

MIGDAL, A. Interaction between electrons and lattice vibrations in a normal metal. *Soviet Physics JETP*, v. 7, p. 996-1001, 1958.

MORRISON, M. Emergence, reduction, and theoretical principles: rethinking fundamentalism. *Philosophy of Science*, v. 73, p. 876-889, 2006.

MOTTELSON, B. Elementary modes of excitation in the nucleus. *Reviews of Modern Physics*, v. 48, p. 375-383, 1976.

MOYER, M. History of physics. *Osiris*, 2nd series, v. 1, p. 163-182, 1985.

NAMBU, Y. Axial vector current conservation in weak interactions. *Physical Review Letters*, v. 4, p. 380-382, 1960b.

_____. Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity. *Physical Review*, v. 117, p. 648-663, 1960a.

_____. Research in elementary particle theory. In: EGUCHI, T.; NISHIJIMA, K. (Ed.). *Broken symmetry*. Singapore: World Scientific, 1995. Selected papers of Y. Nambu, p. vii-xiv.

NAMBU, Y.; JONA-LASINIO, G. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I. *Physical Review*, v. 122, p. 345-35, 1961a.

_____. Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. II. *Physical Review*, v. 124, p. 246-254, 1961b.

NOZIÈRES, P.; PINES, D. A dielectric formulation of the many body problem: Application to the free electron gas. *Il Nuovo Cimento*, v. 9, p. 470-490, 1958.

PAIS, A. *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. Oxford: Clarendon, 1986.

PAULI, W. Über Gasentartung und Paramagnetismus. *Zeitschrift für Physik*, v. 41, p. 81-102, 1926.

PEIERLS, R. *Bird of passage: recollections of a physicist*. Princeton: Princeton University, 1985.

_____. Elektronentheorie der Metalle. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, v. 11, p. 264-321, 1932.

PICKERING, A. *Constructing quarks: a sociological history of particle physics*. Edinburgh: Edinburgh University, 1984.

PINES, D. A collective description of electron interactions: IV: electron interaction in metals. *Physical Review*, v. 92, p. 625-636, 1953.

_____. The collective description of particle interactions: from plasmas to the Helium liquids. In: HILEY, B. J.; PEAT, F. D. (Ed.). *Quantum implications: essays in honour of David Bohm*. Henley-on-Thames: Routledge, 1987. p. 66-84.

_____. Electrons and plasmons. *Il Nuovo Cimento*, v. 7, p. 329-352, 1958.
Supplemento 2,

_____. *The many-body problem*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1961.

PINES, D.; BOHM, D. A collective description of electron interactions: II: collective vs individual particle aspects of the interactions. *Physical Review*, v. 85, p. 338-353, 1952.

PIPPARD, A. B. The cat and the cream. *Physics Today*, p. 38-41, nov. 1961.

_____. Electrons in solids. In: BROWN, L. M.; PAIS, A.; PIPPARD, A. B. (Ed.). *Twentieth century physics*. New York: Institute of Physics Publishing, 1995. v. 3, p. 1279-1383

RAMSEY, J. Of parameters and principles: producing theory in twentieth century physics and chemistry. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 31, p. 549-567, 2000.

RIORDAN, M.; HODDESON, L. Crystal fire. *The invention of the transistor and the birth of the information age*. New York: W. W. Norton, 1998.

SAWADA, K. et al. Correlation energy of an electron gas at high density: plasma oscillations. *Physical Review*, v. 108, p. 507-514, 1957.

SCHRÖDINGER, E. Gasentartung und freie Wegl"ange. *Physikalische Zeitschrift*, v. 25, p. 41-45, 1924.

_____. Studien über Kinetik der Dielektrika, den Schmelzpunkt, Pyro- und Piezoelektrizit"at. *Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung 2a*, v. 121, p. 1937-1972, 1912.

SCHWEBER, S. S. Changing conceptualization of renormalization theory. In: BROWN, L. M. (Ed.). *Renormalization: from Lorentz to Landau (and beyond)*. New York: Springer, 1993. p. 135-166.

_____. Postscript. In: GAVROGLU, K.; RENN, J. (Ed.). *Positioning the history of science*. Dordrecht: Springer, 2007. p. 185-188.

_____. *QED and the men who made it*. Princeton: Princeton University, 1994.

SEITZ, F. *The modern theory of solids*. New York: McGraw-Hill, 1940.

_____. *On the frontier: my life in science*. New York: AIP, 1994.

SHIRKOV, D. V. Historical remarks on the renormalization group. In: BROWN, L. M. (Ed.). *Renormalization: from Lorentz to Landau (and beyond)*. New York: Springer, 1993. p. 167-186.

_____. Sixty years of broken symmetries in quantum physics (from the Bogoliubov theory of superfluidity to the Standard Model). *Physics Uspekhi*, v. 52, p. 549-557, 2009.

SMITH, C. S. The prehistory of solid state physics. *Physics Today*, v. 18, n. 12, p. 18-30, 1965.

SOMMERFELD, A. Zur Elektronentheorie der Metalle. *Die Naturwissenschaften*, v. 15, p. 825-832, 1927.

SOMMERFELD, A.; BETHE, H. A. Elektronentheorie der Metalle. In: GEIGER, H.; SCHEEL, K. (Ed.). *Handbuch der Physik*. Berlin: Springer, 1933. v. 24, part 2, p. 333-622.

STÜCKELBERG, E. C. G.; PETERMAN, A. La normalisation des constantes dans la th'eorie des quanta. *Helvetica Physica Acta*, v. 26, p. 499-520, 1953.

STUEWER, R. H. (Ed.). *Nuclear physics in retrospect: proceedings of a symposium on the 1930s*. Minneapolis: University of Minnesota, 1979.

VALATIN, J. G. Comments on the theory of superconductivity. *Il Nuovo Cimento*, v. 7, p. 843-857, 1958.

WARNOW-BLEWETT, J.; TEICHMANN, J. *International catalog of sources for history of physics and allied sciences, report no. 6: Guide to sources for history of solid state physics*. New York: Center for History of Physics/ American Institute of Physics, 1992.

WEART, S. R. The Solid Community. In: HODDESON, L. et al. (Ed.). *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid-state physics*. Oxford: Oxford University Press, 1992. p. 617-669.

WEINER, C. 1932—Moving into the new physics. *Physics Today*, v. 25, p. 40-49, 1972.

WENTZEL, G. Diamagnetism of a dense electron gas. *Physical Review*, v. 108, p. 1593-1596, 1957.

WIGNER, E. Effects of the electron interaction on the energy levels of electrons in metals. *Transactions of the Faraday Society*, v. 38, p. 678-685, 1938.

_____. On the interaction of electrons in metals. *Physical Review*, 46, 1002-1011, 1934.

WIGNER, E.; SEITZ, F. On the constitution of metallic sodium. *Physical Review*, v. 43, p. 804-810, 1933.

WILSON, K. G. The renormalization group: critical phenomena and the Kondo problem. *Reviews of Modern Physics*, v. 47, p. 773-840, 1975.

_____. Renormalization group and critical phenomena. I. Renormalization group and the Kadanoff scaling picture. *Physical Review B*, v. 4, p. 3174-3183, 1971.