

# Elétrons livres e coletivismo: sobre o papel epistêmico da diversidade na história da física da matéria condensada

Free electrons and collectivism: on the epistemic role of diversity in the history of condensed matter physics

Climério Paulo da Silva Neto<sup>\*1</sup>, Alexandre Bagdonas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física, Salvador, BA, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Lavras, Departamento de Educação em Ciências Físicas e Matemática, Lavras, MG, Brasil.

Recebido em 21 de outubro de 2023. Revisado em 20 de dezembro de 2023. Aceito em 02 de março de 2024.

Este artigo busca refletir sobre o papel epistêmico da diversidade na física. Partindo de uma discussão de referenciais de filosofia e história da ciência que dão ênfase à natureza social da ciência e veem na diversidade uma forma de fortalecer a objetividade do conhecimento científico, apresentamos um estudo de caso histórico da física na União Soviética, que revela como a diversificação de atores e contextos de desenvolvimento da física do estado sólido, na década de 1930, contribuiu para o surgimento de uma abordagem em termos de fenômenos emergentes conhecidos como excitações coletivas e quasipartículas, que hoje é parte importante da física da matéria condensada. Na sequência, concluímos com uma reflexão sobre as potencialidades da temática para os debates atuais sobre a confiabilidade da ciência e natureza da ciência.

**Palavras-chave:** Diversidade, objetividade, ensino de ciências, natureza da ciência, física da matéria condensada, física soviética.

This article aims to reflect on the epistemic role of diversity in physics. We start with a discussion of works in philosophy and history of physics that, acknowledging the social nature of science, consider diversity as a linchpin of scientific objectivity. We then present a case study from Soviet physics that illustrates how the diversification of actors and places developing solid-state physics, in the 1930s, led to an alternative approach to emergent phenomena that would become an essential part of condensed matter physics. Next, we conclude by discussing how dialogues on the epistemic role of diversity may help in discussions of the reliability of science and the nature of science in classrooms.

**Keywords:** Diversity, objectivity, science education, nature of science, condensed matter, Soviet physics.

## 1. Introdução

Diversidade, equidade e inclusão têm sido bandeiras importantes para universidades e instituições acadêmicas ao redor do mundo. Frequentemente elas são associadas ao combate ao racismo, a partir da compreensão da necessidade de reparação histórica de séculos de opressão e violência perpetrados pelo colonialismo e escravidão. No Brasil, essas bandeiras se traduziram em políticas públicas importantes como as leis das cotas para o ensino superior (A Lei n<sup>o</sup> 12.711/2012) e as leis que regulamentam o ensino de “História e Cultura Afro-Brasileira e Indígena” na educação básica do Brasil (10.639/2003 e 11.645/2008). Entretanto, aqui ainda discutimos pouco uma justificativa comumente utilizada fora do Brasil para promover diversidade, equidade e inclusão, a de que elas trazem benefícios para a ciência. Muitos autores argumentam que a diversidade promove criatividade, inovação e excelência [1, 2]. Instituições de peso, como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças

Climáticas, conhecido como IPCC, têm usado a diversidade como critério para formação de suas equipes para evitar vieses inconscientes, frequentemente presentes em grupos uniformes, buscando assim explorar os benefícios da diversidade de perspectivas para a solução de problemas [3].

Tais perspectivas são amparadas por um volume crescente de pesquisas, tanto teóricas quanto empíricas, em epistemologia social, filosofia e história das ciências [4]. Em uma síntese de pesquisas que tratam sobre o papel epistêmico da diversidade, Rolin [5] concluiu que a diversidade é considerada epistemologicamente benéfica por ao menos quatro motivos: (i) ela gera uma distribuição de esforços de pesquisa, em termos de agendas e abordagens, que é positiva para a comunidade científica porque não há como prever de antemão quais das abordagens ou hipóteses são mais promissoras; (ii) é fonte de perspectivas críticas construtivas que são importantes sobretudo em casos que envolvem questões de valores; (iii) é fonte de criatividade pois gera novas linhas e métodos de pesquisa, novos tipos de evidências hipóteses e teorias; e (iv) facilita a superação de barreiras de relações de poder e desigualdades sociais.

\*Endereço de correspondência: cpsneto@gmail.com

Dada a importância das bandeiras diversidade, equidade e inclusão e o crescente reconhecimento dos benefícios da diversidade para a produção do conhecimento científico, discussões explícitas sobre o papel da diversidade na ciência têm grande potencial de contribuir para reflexões sobre as ciências em sala de aula. Este artigo busca contribuir nessa direção, partindo de estudos sobre história e filosofia da ciência (HFC).

Pesquisas em HFC no ensino apontam há décadas a pertinência de se discutir controvérsias científicas e aspectos da chamada “natureza da ciência” [6–9], que incluem elementos relacionados à diversidade, como os debates sobre as relações entre a ciência e outras formas de conhecimento, a religião [10], conhecimentos de povos indígenas com sua crítica ao eurocentrismo presente na ciência ocidental [11], além da possibilidade de diálogo e intercâmbio durante interações que envolvem uma diversidade de etnias, culturas, gêneros, grupos sociais [12]. Nos últimos anos, há um número crescente de pesquisas em ensino sobre gênero e raça na história das ciências, como [13–16]. Apesar disso, discussões explícitas sobre diversidade ainda estão ausentes de livros introdutórios de filosofia da ciência como [17] e [18], o que, levando em conta a homogeneidade das comunidades de história e filosofia da ciência, não é tão surpreendente.

Neste artigo, utilizamos estudos de história cultural da ciência na União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) para mostrar como a diversidade foi importante para o surgimento de conceitos e modelos de sólidos que fazem parte da física contemporânea. Este estudo de caso complementa e fortalece os argumentos apresentados em um estudo anterior que discutiu o papel epistêmico da diversidade na ciência e suas contribuições para a educação científica, com base em estudos sobre a cosmologia relativística realizados por Alexander Friedmann e as influências do contexto cultural soviético nas primeiras décadas do século XX [19].

A história da ciência na URSS é particularmente interessante para discutir essa temática por várias razões. Primeiro, ao tempo que a URSS se tornou uma potência científica, figurando como um dos países que mais investiu em ciência e tecnologia ao longo século XX, seus cientistas trabalharam em um contexto político, social e cultural notavelmente distinto de outros países com níveis comparáveis de desenvolvimento científico e tecnológico. Segundo, o contato entre cientistas soviéticos e seus pares no exterior passou por altos e baixos, com períodos de relativo isolamento seguidos de períodos de maior integração, o que permitiu o amadurecimento de abordagens idiossincráticas internamente à URSS e posterior inclusão ou integração à prática da física em nível internacional. Por último, há bons estudos sobre história cultural e social das ciências na União Soviética que nos permitem comparar com o desenvolvimento das ciências em outros países [20–22].

Ao discutir um caso sobre a história da física na URSS, além de abordar o papel da diversidade na

física, também buscamos promover uma compreensão mais rica da ciência soviética e de como seu contexto único contribuiu para o desenvolvimento da ciência. Quando falamos de ciência soviética, sem dúvida o caso mais famoso no ocidente é o Lysenkoísmo—a decisão do governo soviético de censurar a pesquisa em genética que foi resultado de uma campanha encabeçada pelo agrônomo Trofim Lysenko (1898–1976) e obteve o apoio de Stalin. No entanto, este não é, nem de longe, o caso mais representativo da ciência soviética. Se olharmos para ela apenas pela ótica do caso Lysenko teremos uma enorme dificuldade de entender como a URSS se tornou uma potência científica, bem como o que Kojevnikov chamou de o paradoxo da ciência soviética:

Muitas das mais importantes realizações da produção do conhecimento na União Soviética ocorreram durante um período que foi extremamente difícil e politicamente destrutivo, mesmo para o padrão do geralmente conturbado século XX. A ciência e a tecnologia soviética de alguma forma obtiveram seus maiores avanços em um tempo em que o país foi atingido pelas duas mais destrutivas guerras mundiais, o levante da Revolução, a violenta Guerra Civil, o governo ditatorial de Stalin e as massivas repressões políticas. Como historiadores que trabalham sobre esse período, nós enfrentamos um desafio: como descrever esse fenômeno sem parecer elogiar a ditadura política [23, p. 6].

Na próxima seção, analisaremos o surgimento de uma abordagem muito comum na física da matéria condensada que explica as propriedades de sólidos e líquidos em termos de excitações coletivas, um fenômeno emergente que resulta da cooperação entre as partículas atômicas, frequentemente representadas em termos de quasipartículas como fônons e plasmons. Veremos como essa abordagem possui raízes profundas no vocabulário político da década de 1930 na URSS e na experiência de coletivização da agricultura que chacoalhou a sociedade soviética na época. Enquanto físicos europeus e estadunidenses viam elétrons em metais como livres, físicos soviéticos, estabelecendo analogias com os acontecimentos que vivenciavam, os viram como coletivizados. Essa diferença de perspectiva foi o ponto de partida para uma nova abordagem dos fenômenos físicos que seria posteriormente adotada por físicos no ocidente, muitos dos quais não fazem ideia das origens da abordagem no vocabulário político soviético [24].

## 2. Coletivismo, Liberdade e a Física Teórica na URSS

A história do século XX teria sido completamente diferente se não fosse pela bem-sucedida revolução que

aconteceu na Rússia em outubro de 1917<sup>1</sup>. O mesmo pode ser dito sobre a história da física. Não apenas porque sem a polarização entre a URSS e os Estados Unidos (EUA) após a segunda guerra mundial não teria havido um longo período de investimento recorde na física, mas também porque, desde o início, na URSS houve uma combinação única de apoio maciço à ciência e tecnologia em um contexto sociocultural muito distinto daqueles dos países da Europa e América do Norte que possuíam comunidades científicas com financiamentos comparáveis.

Após a guerra civil, os físicos russos buscaram reestabelecer contatos com colegas no exterior e se atualizar sobre os desenvolvimentos da física durante o período de quase uma década, pois os cientistas russos ficaram isolados de seus pares por conta da primeira guerra mundial e da guerra civil (1914–1923). Alguns jovens físicos soviéticos que se tornaram internacionalmente famosos, como Iakov Frenkel (1894–1952), Vladimir Fock (1898–1974) e Igor Tamm (1895–1971), passaram temporadas na Alemanha entre 1925 e 1929, em tempo para presenciar o desenvolvimento da mecânica quântica ocorrido entre 1925 e 1927. Apesar de não participarem do desenvolvimento do formalismo da teoria em si, eles contribuíram para a aplicação desta teoria em seus respectivos campos e para divulgar esta nova teoria na URSS<sup>2</sup>.

O caso de Frenkel é particularmente ilustrativo. Após um ano na Alemanha com uma bolsa da Fundação Rockefeller, retornando no segundo semestre de 1926, ele ofertou o primeiro curso de mecânica quântica na URSS e, em 1929, publicou o primeiro livro didático soviético sobre esta teoria. Frenkel divulgou a mecânica quântica na União Soviética, onde ajudou a formar uma nova geração de físicos teóricos como Lev Landau (1908–1968), George Gamow (1904–1968), Dmitri Ivanenko (1904–1994), Matvei Bronstein (1906–1938), conhecidos como a banda de Jazz. No espírito da cultura soviética revolucionária dos anos 1920, que encorajava a rebeldia e o espírito de contestação dos estudantes, a banda de jazz dedicou-se a estudar relatividade e mecânica quântica com grande entusiasmo e passaram a ironizar seus professores, especialistas em temas de física clássica, como autoridades ultrapassadas a serem contestadas. Participando dos seminários de Frenkel, eles começaram a publicar artigos em revistas alemãs sobre mecânica



**Figura 1:** Seminário de Iakov Frenkel. Da esquerda para a direita: L. E. Gurevich, Lev Landau, L. V. Rosenkevich, A. N. Arsenieva, Frenkel, George A. Gamow, desconhecido, Dmitry D. Ivanenko, and G. A. Mandel, Leningrado (São Petersburgo), 1929. AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection.

quântica em uma época na qual a maior parte de seus professores não dominava essa teoria (Figura 1) [28].

No contexto de expansão do complexo científico-tecnológico soviético e da efervescência cultural revolucionária, esses jovens físicos abraçaram as novas teorias e encontraram condições institucionais propícias para o desenvolvimento da física teórica distintamente soviética. Neste contexto também houve períodos de alternância entre isolamento e integração da comunidade soviética de físicos à comunidade internacional. Isso contribuiu, em alguns casos, para o desenvolvimento de abordagens bem idiossincráticas, que inicialmente divergiam bastante das adotadas por físicos ocidentais, mas que foram depois adotadas para além das fronteiras da União Soviética<sup>3</sup>.

Um desses casos foi o desenvolvimento de uma abordagem coletivista para a física do estado sólido, hoje chamada de física da matéria condensada. A experiência vivida por físicos socialistas não-ortodoxos foi fundamental para o desenvolvimento da abordagem que trata os fenômenos como resultado da cooperação entre os átomos que compõem a matéria, e que levou à conceitualização de uma gama de entidades físicas que hoje são chamadas de quasipartículas.

Em 1970, dois físicos estadunidenses decidiram investigar quem havia proposto os conceitos e nomes para os entes físicos microscópicos que possuem comportamento corpuscular, incluindo partículas comuns, como elétrons e prótons, e quasipartículas como o phonon e o polaron [32]. Embora seja questionável o quanto cada autor

<sup>1</sup> A importância da URSS para a história do século XX é evidente, por exemplo, na periodização escolhida por Eric Hobsbawm, que considera a queda da URSS como o ponto final da narrativa sobre o século XX [25]. Outros autores chegaram a dizer, equivocadamente, que a queda da URSS significava o fim da história.

<sup>2</sup> Até o desenvolvimento da mecânica quântica neste período, havia o que hoje é conhecida como velha teoria quântica, ou simplesmente teoria quântica, um conjunto de postulados baseados no modelo atômico de Bohr que serviam para quantizar os níveis de energia associados às órbitas e descrever transições dos elétrons entre esses níveis. Essas aplicações de postulados quânticos foram essenciais para o desenvolvimento da mecânica quântica [26]. Para o primeiro curso sobre mecânica quântica na URSS ver [27].

<sup>3</sup> Exemplos dessa dinâmica são visíveis no desenvolvimento da física de sistemas não-lineares [29], a invenção do maser [30] e o desenvolvimento inicial da cosmologia [31].

**Quadro 1:** Quasipartículas apresentadas em [32, p. 1388]. Até 1950, a abordagem foi desenvolvida principalmente por autores soviéticos. Na coluna 1 estão os nomes atualmente aceitos para as quasipartículas, na coluna 2 os autores dos respectivos conceitos e na coluna 3 as primeiras publicações mencionando os nomes atualmente aceitos.

Quasipartícula	Conceito, autor e ano	Autor e ano da primeira menção em publicação
Phonon	Quantum de ondas elásticas, Tamm, 1930.	Frenkel, 1932
Magnon	Ondas de spin, Bloch, 1930.	Landau, apud Pomeranchuk, 1941
Exciton	Ondas de excitação que viajam por cristais, Frenkel, 1931.	Frenkel, 1936
Polaron	Elétron localizado de uma interação elétron-retículo, Landau 1933.	Pekar, 1946
Roton	Excitação elementar do espectro de vórtex em hélio líquido, Landau 1941.	Tamm, mencionado por Landau em 1941
Plasmon	Quantização de oscilações de plasma, Bohm e Pines, 1951.	Pines, 1956
Polariton	Tratamento quanto-mecânico do acoplamento de campos eletromagnéticos e retículo cristalino, Fano 1956.	Hopfield, 1958

pode ser considerado um “descobridor” individual, analisando os resultados resumidos em um quadro no final do artigo (Quadro 1), notamos que em suas primeiras décadas as abordagens que levaram ao desenvolvimento desses conceitos eram quase que restritas à física da matéria condensada na URSS [24].

Com uma única exceção, o magnon proposto por Felix Bloch (1905–1983) em 1930, todas as quasipartículas propostas até 1950 foram propostas por físicos soviéticos. Além disso, o físico estadunidense David Bohm (1917–1992), que propôs o plasmon em 1951, era comunista e acompanhava atentamente os trabalhos dos físicos soviéticos.

Kojevnikov [24] argumentou que a predominância de físicos soviéticos entre os descobridores das quasipartículas não é obra do acaso. Em suas origens, esta abordagem da física da matéria condensada estava intimamente relacionada a peculiaridades deste contexto sociocultural das primeiras décadas da URSS.

A partir do quadro, pode-se inferir ainda que o desenvolvimento desta abordagem característica da física soviética foi um empreendimento coletivo, com vários

autores contribuindo para seu desenvolvimento. Entretanto, neste artigo focaremos no estudo sobre Frenkel como um caso exemplar, e não excepcional, da influência do contexto soviético na compreensão de fenômenos físicos.

### 3. Origens da Metáfora Coletivista

Em 1921, encarcerado em uma prisão na região da Crimeia, no sul do Império Russo recém colapsado, o físico Iakov I. Frenkel estava estudando o modelo de Drude que explica a condutividade dos metais considerando que os elétrons estão livres e podem ser descritos como um gás ideal que se movimenta livremente pelo metal. Seu pai, Iliá Frenkel, foi um comerciante simpático aos Socialistas Revolucionários (SR), um partido radical não marxista, que ao invés de ter foco no proletariado industrial, era orientado para os camponeses. Também simpático aos SR, Iakov lamentou que a revolução havia sido encabeçada por um partido marxista, mas decidiu se aliar aos bolcheviques como o mal menor<sup>4</sup>. Sua colaboração com os bolcheviques lhe custou sua liberdade, mas ele decidiu que a prisão não seria um empecilho para seu trabalho científico. Em 1919 Frenkel escreveu para sua mãe:

Eu não estou nem um pouco ansioso; em vez disso, estou ocupado lendo Drude e Grave . . . Se a pessoa não se entrega a pensamentos sobre o que poderia ser . . . é como estar em um sanatório. A diferença é que em um sanatório geralmente há quartos que fecham por dentro, e na prisão, as celas fecham por fora.<sup>5</sup>

Sentado atrás das grades, que em russo são chamadas *reshëtka*, a mesma palavra usada para designar a estrutura cristalina dos sólidos (*kristalliticheskaia reshëtka*), Frenkel ficou insatisfeito com o modelo de elétrons livres. Possivelmente sua condição o ajudou a compreender que, assim como ele não estava livre, apesar de poder se movimentar livremente nos limites de sua cela, os elétrons em metais também não poderiam ser considerados livres [24].

Mais tarde, fora da cadeia e com a revolução já consolidada, Frenkel utilizou as ferramentas da teoria quântica para mostrar que elétrons em metais, mesmo os elétrons que podem se movimentar e conduzir corrente elétrica, estão presos ao metal de maneira ainda mais intensa do que elétrons em átomos individuais como

<sup>4</sup> Em 1918, já na Crimeia, mas ainda em liberdade, Iakov Frenkel escreveu para o pai dizendo que era “muito tarde para lutar contra os Bolcheviques; nós temos que ajudá-los a diminuir os resultados negativos de suas políticas e aumentar os positivos. Por outro lado, eu estou muito longe do ativismo político . . . e não estou inclinado a trocar minha ciência por ele. Tradução nossa, como citado em [24, p. 301].

<sup>5</sup> Grave refere-se ao matemático de Kiev Dimitri Grave. Como citado em [24, p. 302], tradução nossa.

os de um gás ideal. A diferença é que em metais a proximidade e a ligação entre os átomos faz com que suas órbitas se sobreponham e os elétrons mais externos deixam de pertencer a um único átomo. Nessas condições, os elétrons de valência podem deslizar de um átomo a outro. Esse foi um dos primeiros trabalhos a aplicar as ideias da teoria quântica para explicar a condução elétrica.

Em seus artigos, publicados em 1924, Frenkel achou no vocabulário político vigente uma palavra que a seu ver descrevia o estado de elétrons em metais mais precisamente do que o adjetivo “livres”. Para ele esses elétrons seriam melhor descritos como “coletivizados”.

Dessa forma, elétrons de valência se tornam elétrons “livres”, contribuindo para a condutividade elétrica dos metais. Deve-se notar que eles não são livres no sentido real da palavra. Ao contrário, eles são ligados mais fortemente ao corpo do metal do que entre os átomos isolados. Entretanto, eles se tornaram emancipados da dominação de átomos particulares; eles não mais pertencem a átomos individuais, mas ao coletivo inteiro formado por estes átomos. O caráter quântico de seu movimento só pode ser descrito, falando estritamente, como “coletivista”.<sup>6</sup>

Kojevnikov [24] argumenta que no modelo de Frenkel, a corrente elétrica num corpo metálico era representada por elétrons que deslizavam de um átomo para outro, passando de um proprietário para outro, como os terrenos numa aldeia comunitária russa, sem pertencer a nenhum proprietário específico. Coletivista e coletivizado eram termos centrais nos debates sobre coletivização da agricultura inspirada nas aldeias comunitárias russas conhecidas como *mir*. Para os SR, filiação política de Frenkel antes da revolução, as *mir*s, não o proletariado, deveriam ser o foco da revolução socialista na Rússia. Esta metáfora, como muitas das metáforas antropomórficas que Frenkel costumava fazer, teria sido esquecida se não tivesse originado modelos que foram aplicados com sucesso por ele e outros físicos soviéticos ou simpatizantes da União Soviética, como o britânico Paul A. Dirac, para explicar fenômenos já conhecidos e outros que seriam descobertos nos anos e décadas seguintes<sup>7</sup>.

#### 4. Desdobramentos e Dispersão

Esse modelo de elétrons como pertencendo aos átomos da estrutura cristalina foi o ponto de partida para

<sup>6</sup> Como citado em [24, p. 302]. Tradução nossa do inglês para português. Kojevnikov traduziu os artigos originais do russo e alemão para inglês.

<sup>7</sup> Essa e outras metáforas antropomórficas de Frenkel ver [24, p. 304]. Para Frenkel física “não é tanto ciência exata, mas ... um drama ou comédia sobre a vida dos átomos e dos elétrons.”

que Frenkel conseguisse desenvolver outro conceito que se revelou muito fértil para a compreensão quântica dos sólidos, o conceito de buraco. Em 1926, refletindo sobre a sugestão de que os átomos da estrutura cristalina poderiam ter certa liberdade de se movimentar para ocupar espaços vazios, Frenkel percebeu que esse fenômeno poderia ser descrito de maneira muito mais simples se, ao invés de tentar descrever o movimento dos muitos átomos que compõem a estrutura cristalina, ele tratasse matematicamente o espaço vazio como um “átomo negativo” ou um íon de “carga oposta.” Em outras palavras, o processo pelo qual um átomo da estrutura cristalina se move para ocupar uma vaga ou buraco na rede cristalina pode ser descrito como se este buraco fosse um átomo de sinal oposto movendo-se na direção oposta<sup>8</sup>. Frenkel mostrou que essas partículas fictícias, que mais tarde ele chamou de buracos (*dyrki*), se moveriam pelo metal da mesma forma que os elétrons coletivizados do modelo de 1924 e contribuiriam para a condução. Neste ponto, no entanto, a analogia com o coletivismo que havia desempenhado o papel heurístico inicial já não era crucial. Uma vez que os conceitos já haviam se mostrado úteis, Frenkel podia falar sobre os buracos sem recorrer à metáfora. Em seus numerosos artigos e livros nos quais discutiu os buracos na física do estado sólido, ele às vezes recorria à metáfora e às vezes não [24].

Em 1927, Frenkel apresentou seu modelo pela primeira vez a uma audiência internacional reunida na conferência de Como, na Itália, a primeira conferência que reuniu físicos alemães, franceses e britânicos após a primeira guerra mundial. Naquela ocasião, ele tentou convencer sua audiência, que incluía o físico Hendrik Lorentz (1953–1928) (Figura 2), famoso por ter estendido o modelo de Drude para explicar a relação entre a condutividade térmica e a condutividade elétrica dos metais, da inadequação do pressuposto básico do modelo Drude-Lorentz:

Na teoria clássica da condutividade dos metais, os chamados elétrons “livres” são tratados como as partículas de um gás, que, além dos choques que sofrem com os íons positivos, se movem com velocidade constante... Mostrei há alguns anos que essa concepção era completamente errônea [33, p. 65].

Após revisitar o argumento de seu artigo que usou a teoria quântica para mostrar como os elétrons ficam presos ao metal de maneira ainda mais intensa do que elétrons de átomos individuais, Frenkel argumentou que

O único tipo de liberdade que os elétrons podem adquirir nessas condições é, por assim

<sup>8</sup> Essa convenção não é tão estranha se levarmos em conta que até hoje convençamos que a corrente elétrica em um condutor segue o sentido do movimento de cargas positivas, que é oposto ao sentido do movimento dos elétrons.



**Figura 2:** Iakov Frenkel (centro) e Hendrik Lorentz (direita) conversando em Como, Itália, 1927. Crédito: Instituto Físico-Técnico de Leningrado, cortesia do AIP Emilio Segrè Visual Archives, Frenkel Collection.

dizer, a liberdade de mudar seu mestre, ou seja, o átomo, ao qual eles podem pertencer. Enquanto no estado gasoso cada elétron pertence a um determinado átomo, no estado sólido ou líquido torna-se escravo do coletivo, formado por todos os átomos, gozando da própria liberdade relativa de passar incessantemente “de mão em mão”, quer dizer, de um átomo para outro [33, p. 66].

Aquela apresentação, impregnada pelo vocabulário político, teve desdobramentos importantes para a física. Frenkel mostrou que seu modelo resolvia a principal limitação do modelo Drude-Lorentz – a explicação dos calores específicos de metais (Figura 3). Entretanto, acabou se tornando mais aceita uma outra teoria semelhante, que foi apresentada naquela mesma conferência, pelo físico alemão Arnold Sommerfeld (1868–1951). Ele utilizou a teoria quântica para propor uma extensão do modelo de Drude e conseguiu explicar a contribuição dos elétrons para o calor específico dos metais usando o princípio da exclusão de Pauli e a nova estatística de Fermi-Dirac ainda considerando que os elétrons em metais eram livres. Por outro lado, apesar de ter menor aceitação que a proposta do alemão, os argumentos apresentados por Frenkel contra a hipótese de elétrons livres foram aceitos por muitos como limitações do modelo de Sommerfeld. Por exemplo, Hans Bethe, um dos estudantes de Sommerfeld que contribuíram para desenvolver seu modelo, externou sua insatisfação com a hipótese nos seguintes termos:

Sommerfeld [...] reconheceu que a principal dificuldade de Drude, o calor específico dos elétrons livres, seria eliminada aplicado a estatística de Fermi [...]. Entretanto, era muito insatisfatório que Sommerfeld tinha que assumir elétrons como completamente



**Figura 3:** Otto Stern, Iakov Frenkel e Adolf Gustav Stephan Smekal em Como, Itália, outubro de 1927. AIP Emilio Segrè Visual Archives, Frenkel Collection.

livres. Como o elétron poderia ser considerado livre na presença das variações obviamente grandes da energia potencial dentro do metal? Eu achava que essa era uma das principais objeções contra a teoria de Sommerfeld; o próprio Sommerfeld estava menos preocupado com isso [34, p. 49–51].

Os buracos de Frenkel foram inicialmente pensados para a física do estado sólido, mas eles tiveram um papel central no desenvolvimento do conceito análogo criado pelo físico britânico Paul A. Dirac (1902–1984), em sua eletrodinâmica quântica. Simpatizante do socialismo e da experiência soviética, Dirac viajou pela primeira vez à URSS para participar de um congresso em 1928 e desde então visitou esta nação praticamente todos os anos, sete vezes no total, até 1936, quando as tensões geopolíticas na Europa e o endurecimento do regime stalinista levaram ao mais longo período de isolamento para os físicos soviéticos [24].

Em 1928, a bordo de um vapor sobre o rio Volga, cenário principal do congresso, ele teve a oportunidade de discutir pessoalmente com Frenkel os buracos ou átomos negativos da física do estado sólido (Figura 4). Naquele mesmo ano, Dirac concebeu a ideia de que o vácuo seria na verdade um mar de elétrons ocupando os níveis de energia negativos que são soluções da equação relativística, que atualmente recebe seu nome, e não são detectáveis. Entretanto, se um desses elétrons for arrancado de um desses níveis negativos para um nível de energia positivo, esse processo daria origem a um par elétron-buraco, este último se comportaria como um elétron positivo (Figura 5).

Entre 1928 e 1931, Dirac desenvolveu uma teoria, que ficou conhecida como teoria do buraco (*hole theory*). Segundo esta teoria, a remoção de um elétron de um dos níveis de energia negativa por um raio gama daria origem a um par elétron e buraco, este último possuindo carga e momentum opostos ao do elétron. O oposto



**Figura 4:** Da esquerda para a direita: Paul Dirac, Iakov Frenkel e Alfred Landé em um vapor no rio Volga, Rússia, junho de 1928. AIP Emilio Segrè Visual Archives, Frenkel Collection.



**Figura 5:** Paul Dirac, Lev Landau, Charles Galton Darwin, Leon Rosenkevich (de pé), Owen Richardson, Dmitry Ivanenko, Iakov Frenkel, Philipp Frank (borrado), Peter Debye e Robert Pohl (cortado), em um passeio de barco no Volga, Rússia, Junho de 1928. AIP Emilio Segrè Visual Archives, Leon Brillouin Collection.

também poderia acontecer, de um elétron e um buraco se recombinarem dando origem a um raio gama cuja energia seria equivalente à soma das massas do elétron e do buraco. O buraco poderia ser considerado então um antielétron, ou seja, ele seria uma antipartícula. O paralelo entre os antielétrons de Dirac e os átomos negativos de Frenkel era tamanho que na União Soviética eles foram rapidamente aceitos. Ambos foram chamados de buracos e considerados como resultantes de processos análogos no vácuo e em sólidos [24].

## 5. Dissociação do Contexto Original

No ocidente, os físicos não simpatizaram com a ideia de um vácuo constituído de um mar de elétrons de energia negativa. A teoria de Dirac e o seu antielétron foram recebidos com ceticismo por figuras proeminentes da revolução quântica como Niels Bohr (1885–1962) e Werner Heisenberg (1901–1976), muitos dos quais só aceitaram a existência do antielétron depois de uma gama de evidências experimentais e sobretudo depois que vários experimentalistas observaram a criação e a aniquilação de pares de elétron e antielétron com técnicas convencionais e bem estabelecidas em pesquisas de radioatividade<sup>9</sup>.

Heisenberg, no entanto, achou que se o modelo elétron-buraco era implausível para o vácuo, ele tinha grande potencial para tratar problemas de aplicação da mecânica quântica em física do estado sólido e o trouxe de volta para a área de origem já reformulado e completamente dissociado de suas origens soviéticas.

Um estudante orientado por Heisenberg, Felix Bloch, resolveu o problema da liberdade dos elétrons em metais desenvolvendo um modelo completamente quântico entre 1928 e 1930. Como no modelo de Frenkel, os elétrons de Bloch não eram nem livres como no modelo de um gás de partícula, nem presos como em um átomo de um gás. Mas enquanto Frenkel tinha calculado o livre caminho médio analisando o espalhamento dos elétrons como uma onda de De Broglie dentro dos metais, Bloch utilizou a equação mais fundamental de Schroedinger para demonstrar de maneira matematicamente rigorosa porque os elétrons conseguiam se mover com relativa facilidade pelos metais, apesar de estarem submetidos a forças intensas. Além disso, ele encontrou uma solução da equação de Schroedinger para potenciais periódicos que resulta em uma estrutura de bandas de espectro de energias. Junto com outro estudante orientado por Heisenberg, Rudolf Peierls, Bloch conseguiu mostrar, por exemplo, que os elétrons conseguiriam passar de um átomo para outro mesmo que suas energias fossem menores que as barreiras de potenciais separando dois átomos, em um fenômeno chamado de tunelamento, e que, ao contrário do que a intuição clássica sugere, havia regiões de altas energias, acima da barreira de potencial, que eram proibidas para os elétrons (bandas proibidas).

As semelhanças deste modelo com o de Frenkel eram tamanhas que a escola de Sommerfeld inicialmente o considerou como o análogo quantum mecânico do modelo de Frenkel. Por sua vez, Frenkel festejou o modelo de

<sup>9</sup> As primeiras observações de pósitrons foram feitas em 1932 por Carl D. Anderson nos EUA e, pouco depois, por Blackett e Occhialini na Inglaterra observando trajetórias de partículas em câmaras de bolhas. Entretanto, Xavier Roqué mostrou que os pósitrons foram aceitos de maneira inequívoca como a antipartícula do elétron só depois que físicos e físicas aprenderam a produzir pósitrons e observar o processo de aniquilação elétron-pósitron em laboratórios utilizando técnicas de radioatividade bem conhecidas [35]. Ver também [36], p. 190–6.

Bloch e Peierls como sendo a prova matemática “de que os elétrons de valência são livres com relação a átomos individuais . . . e ao mesmo tempo são presos em relação ao coletivo formado por todos os átomos.”<sup>10</sup> Entretanto, Bloch aparentemente não aceitou o vocabulário coletivista de Frenkel e evitou definir o estado dos elétrons. Para Peierls, revisando o modelo em 1932, “a diferença entre elétrons ‘livres’ e ‘ligados’, que é importante na teoria clássica e para a qual é decisivo se o elétron tem energia suficiente para superar a barreira de potencial, é praticamente apagada na mecânica quântica.”<sup>11</sup>

Ao longo da década de 1930, à medida que a situação geopolítica na Europa se deteriorava, uma parcela significativa da comunidade de físicos da Europa continental emigrou para o Reino Unido ou para os EUA e continuaram a desenvolver modelos de condução no estado sólido em contextos notavelmente distintos. O modelo de Bloch e Peierls no contexto anglo-saxão evoluiu para o que ficou conhecida como teoria de bandas e os elétrons de valência, aqueles que ocupam a camada mais externa, voltaram a ser considerados como livres. Na União Soviética, entretanto, a teoria de banda foi recebida com ceticismo.

Uma comunidade que divergia em muitos pontos no que tange ao tratamento ideal de elétrons em metais, convergiu na rejeição da hipótese de que elétrons de valência podem ser considerados livres. O físico Lev Landau, por exemplo, proibiu estritamente seus estudantes de considerar os elétrons de valência como livres e, portanto, de utilizar a equação que relaciona a energia e o momento de uma partícula livre ( $E = p^2/2m$ ) para esses elétrons. A abordagem predominante entre aqueles que utilizaram a teoria de bandas na URSS foi de aplicar essa teoria em problemas complexos para explorar seus limites. Como concluiu Kojevnikov, “Ao invés de seguirem a abordagem usual da teoria dos elétrons livres, eles estudaram condições limites e casos nos quais os elétrons se tornavam ligados ou aprisionados e pode-se argumentar que disso vieram suas principais contribuições para a teoria de elétrons em metais durante a década de 1930.” [24, p. 323], tradução nossa.

Entre os sucessos oriundos da abordagem coletivista para a matéria condensada e da recusa de descrever os elétrons como livres estão a descoberta ou conceitualização de uma série de partículas coletivizadas como, além do elétron, o buraco, fônon, polaron, polariton, éxciton e o fônon. Ao longo da segunda metade da década de 30 e na de 40, físicos soviéticos como Igor Tamm<sup>12</sup>,

a escola de Landau e outros que simpatizavam com a abordagem coletivista, como o físico norte-americano comunista David Bohm, desenvolveram novas versões de abordagens coletivistas que eram matematicamente mais sofisticadas e politicamente menos explícitas (ver Quadro 1). O termo partículas coletivizadas foi substituído por quasipartículas e, de maneira geral, o vocabulário dessas abordagens se desconectou do vocabulário político. Entretanto, esses novos modelos também “refletiam outras formas de experiências pessoais como a concepção fenomenológica de liberdade dentro da sociedade totalitária stalinista desenvolvida por Landau e o desejo de Bohm de descobrir “como se participa em um movimento coletivo sem perder a individualidade.”<sup>13</sup>

Boa parte dos desenvolvimentos discutidos no parágrafo acima ocorreram em um período de crescente isolacionismo para os físicos soviéticos que seria revertido apenas na década de 1950. Com exceção de um breve período de colaboração entre os países aliados, os últimos anos da década de 1930 e da década de 1940 foram marcados por tensões geopolíticas e aperto ideológico pelo regime estalinista que na prática impediram os físicos soviéticos de se comunicarem com seus pares no exterior. Quando, em meados da década de 1950, o degelo promovido pelo sucessor de Stalin Nikita Khrushchev promoveu o estabelecimento de laços de cooperação entre os físicos soviéticos e seus pares na Europa e América do Norte, a teoria de bandas começava a apresentar claras limitações e as abordagens coletivistas, despidas de seus links explícitos com o vocabulário político, passou a ser amplamente adotada no ocidente<sup>14</sup>.

## 6. Considerações Finais

Com base no estudo sobre o caso de Frenkel e sua convicção de que elétrons em metais não são livres, mas coletivizados, discutimos como experiências vividas por físicos soviéticos na primeira metade do século XX impactaram na concepção de modelos de física da matéria condensada que se tornou dominante por lá. Entretanto, como o Quadro 1 sugere, há muitos casos que podem ser usados para mostrar como o contexto sociocultural da URSS influenciou a concepção de modelos de matéria condensada<sup>15</sup>.

Estes episódios da história da física nos permitem reflexões importantes sobre como a diversidade pode contribuir para o desenvolvimento da ciência. Primeiro, o modelo de Frenkel, claramente influenciado pelo vocabulário e desenvolvimentos políticos na URSS, foi aceito entre seus pares porque era também fortemente

<sup>10</sup> como citado em [24], p. 311.

<sup>11</sup> [37], p. 265, tradução de [24], p. 311.

<sup>12</sup> Amigo de Frenkel e membro do partido Marxista Menchevique antes da revolução, Tamm também foi preso na Crimeia durante a guerra civil. Sua experiência e a interação com Frenkel foram essenciais para a conceitualização dos fônons, os quanta de som, que foram muito importantes para o desenvolvimento do formalismo de quasipartículas. Entretanto, por questão de espaço, optamos por não discutir em detalhes o desenvolvimento deste caso. Para uma análise desse caso ver [24], p. 312–17.

<sup>13</sup> [24], p. 331. Sobre Landau e sua experiência durante o período stalinista ver [23]. O caso de David Bohm é analisado em mais detalhes em [38].

<sup>14</sup> Para os altos e baixos na comunicação científica entre cientistas na URSS e seus pares estrangeiros ver [39].

<sup>15</sup> Kojevnikov discute também o desenvolvimento dos conceitos de Phonon, Exciton, Polaron e Roton [24].

ancorado no que havia de mais avançado na física teórica da época e conseguia explicar dados experimentais que não eram bem explicados pelo modelo mais bem aceito na época.

Segundo, este modelo muito provavelmente não teria tido os desdobramentos que teve se Frenkel não tivesse as condições materiais e institucionais para desenvolvê-lo e apresentá-lo à comunidade de físicos em artigos, congressos internacionais, aulas e seminários que ajudaram a formar alguns dos mais importantes físicos soviéticos como Landau, Gamow e Ivanenko (Figura 1)<sup>16</sup>. Apesar das vicissitudes que marcaram as primeiras décadas da URSS, o governo investiu pesadamente em ciência e tecnologia como as chaves para a modernização do país. Isto permitiu a formação de uma comunidade científica pujante que desenvolveu e amadureceu suas abordagens mesmo na conturbada década de 1930. Ou seja, os frutos da diversidade de perspectiva promovida pelas experiências soviéticas foram colhidos porque estas perspectivas tiveram espaço nos canais de comunicação da comunidade científica e em instituições de ensino e pesquisa em um contexto de forte apoio à ciência e tecnologia.

Em que medida a diversidade promovida pela inclusão de outros grupos historicamente excluídos ou desfavorecidos na comunidade científica pode contribuir para a ciência? Argumentamos que assim como a experiência soviética ajudou físicos a perceberem a inadequação do conceito de liberdade para descrever elétrons em sólidos, as experiências das populações historicamente excluídas dos espaços de produção de ciência poderão ajudar a estes sujeitos a desenvolverem perspectivas inovadoras sobre os objetos de estudos da ciência. Este estudo aponta para a necessidade de que estes grupos tenham espaço nas instituições científicas e seus canais de comunicação e debates, além dos recursos necessários para o desenvolvimento de abordagens e temas diferentes dos que são hegemônicos na comunidade científica.

A diversidade discutida no caso acima se dá ao longo dos eixos de diversidade regional, cultural, bem como política e racial, dado o contexto e época. Todos esses rótulos são marcadores sociais que se interseccionam influenciando fortemente as experiências de indivíduos em sociedades. Para o leitor brasileiro pode parecer que em termos destes marcadores sociais étnico-raciais não há diferença entre russos, alemães, britânicos ou franceses, todos seriam homens brancos europeus. Entretanto, na Europa da primeira metade do século XX, quando teorias eugenistas ainda tinham grande força no pensamento científico, os marcadores étnico-raciais associados a estes grupos influenciavam profundamente as relações sociais e as identidades dos cientistas.<sup>17</sup>

<sup>16</sup> Contribuições destes físicos soviéticos são abordadas em [28] e [40].

<sup>17</sup> Hoje sabemos que raça é um construto social fluido que não possui lastro na genética, mas neste período acreditava-se que as características fenotípicas, expressas nos traços físicos dos

Como um judeu, Frenkel quase foi impedido de ingressar na universidade por conta de cotas que limitavam o número de judeus ingressantes nas universidades [24].

Nas últimas décadas houve uma diversificação significativa na comunidade científica tanto no nível nacional, quanto em nível internacional. Além disso, há também um crescimento dos estudos de história das ciências lidando com mulheres e personagens de outras populações historicamente sub-representadas nos espaços de produção da ciência. Entretanto, precisamos de mais estudos de história, filosofia e sociologia da ciência, bem como de ensino de ciências, dedicados a refletir sobre o papel da diversidade na ciência para que possamos compreender melhor em que medida a diversificação demográfica promovida por políticas de inclusão contribuíram para a produção do conhecimento científico.

Reflexões sobre o papel da diversidade nas ciências oferecem uma via para a inserção, na educação básica, de discussões mais ricas e diversificadas sobre a natureza da ciência [19]. A partir de estudos que valorizam a diversidade na ciência, podemos problematizar a visão da ciência como um empreendimento neutro, feito por indivíduos homogêneos, fugindo do ainda persistente estereótipo do gênio incompreendido, com dificuldade de aceitação em seu meio social. Em especial, trazendo contribuições da história social e cultural, tratando temas como gênero, raça e o papel das minorias em relação à ciência, tecnologia e sociedade, podemos contribuir efetivamente para uma educação científica mais democrática, inclusiva e que forme cidadãos críticos. É importante ressaltar que tais discussões não são incompatíveis com a defesa da ciência [4, 9]. Pelo contrário, discutir como a diversidade contribui para melhorar a ciência pode estimular estudantes que não se veem representados no estereótipo de cientista a seguirem carreiras científicas.

## Agradecimentos

Agradecemos a Alexei Kojevnikov pelas discussões sobre a ciência na União Soviética e pelo estímulo para escrever este artigo e a Indianara Silva, Letícia Pereira, Heráclio Tavares, Nathan Lima, Fábio Freitas, Angela Bagdonas e a revisores anônimos pelas críticas, comentários e sugestões.

## Referências

- [1] M. McNutt e L. Castillo-Page, *Nature Medicine* **27**, 1864 (2021).
- [2] T.H. Swartz, A.G.S. Palermo, S.K. Masur e J.A. Aberg, *Journal of Infectious Diseases* **220**, S33 (2019).
- [3] A. Standring e R. Lidskog, *Climate* **9**, 99 (2021).
- [4] N. Oreskes, *Why Trust Science?* (Princeton University Press, Princeton, 2019).

indivíduos, eram expressões de diferenças genéticas codificadas nos genes desses grupos.

- [5] K. Rolin, em: *The Routledge Handbook of Social Epistemology*, editado por M. Fricker, P.J. Graham, D. Henderson e N.J.L.L. Pedersen (Routledge, London, 2019).
- [6] A. Bagdonas, I. Gurgel e J. Zanetic, *Revista Brasileira de História da Ciência* **7**, 242 (2014).
- [7] F.P. Martins, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 703 (2015).
- [8] E.F. Rozentalski, *Indo além da Natureza da Ciência: o filosofar sobre a Química por meio da ética química*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo (2018).
- [9] A. Bagdonas, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**, 1250 (2020).
- [10] A. Bagdonas e C.C. Silva, *Science & Education* **24**, 1173 (2015).
- [11] V.F.M. Souza, *O hálito das palavras: ciências (multi)naturais contra o preconceito*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo (2020).
- [12] C.N. El-Hani, *Investigações em Ensino de Ciências* **27**, 01 (2022).
- [13] C. Sepúlveda e I. Silva, em: *Temáticas Sociocientíficas na Formação de Professores*, editado por T. Galeta (Livraria da Física, São Paulo, 2021).
- [14] K.D. Rosa, A. Alves-Brito e B.C.S. Pinheiro, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**, 1440 (2020).
- [15] B.C.S. Pinheiro e K. Rosa, *Descolonizando saberes: a Lei 10.639/2003 no ensino de ciências* (Livraria da Física, São Paulo, 2018).
- [16] C.Q. Santana e L.S. Pereira, *Química Nova na Escola* **43**, 380 (2021).
- [17] A. Chalmers, *O que é ciência, afinal?* (Brasiliense, São Paulo, 1997).
- [18] S. French, *Ciência: conceitos-chave em filosofia* (Artmed, Porto Alegre, 2009).
- [19] A. Bagdonas e C.P. Silva Neto, *Ciência & Educação* **29**, e23029 (2023).
- [20] L.R. Graham, *What Have We Learned About Science and Technology from the Russian Experience?* (Stanford University Press, Stanford, 1998).
- [21] L.R. Graham, *Science and Philosophy in the Soviet Union* (Knopf, New York, 1966).
- [22] A. Bagdonas, I. Gurgel e J. Zanetic, em: *13º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia* (São Paulo, 2012).
- [23] A. Kojevnikov, *Revista Brasileira de História da Ciência* **4**, 6 (2011).
- [24] A. Kojevnikov, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **29**, 295 (1999).
- [25] E. Hobsbawm, *Era dos Extremos: o Breve Século XX. (1914–1991)* (Companhia das Letras, São Paulo, 2011).
- [26] J. James e C. Joas, *Historical Studies in the Natural Sciences* **45**, 641 (2015).
- [27] J. Martinez, em: *The Oxford Handbook of the History of Interpretations of Quantum Physics*, editado por O. Freire Jr., G. Bacciagaluppi, O. Darrigol, T. Hartz, C. Joas, A. Kojevnikov e O. Pessoa Jr. (Oxford University Press, Oxford, 2022).
- [28] A.B. Kojevnikov, *Stalin's Great Science: The Times and Adventures of Soviet Physicists* (Imperial College Press, London, 2004).
- [29] D. Aubin e A.D. Dalmedico, *Historia Mathematica* **29**, 273 (2002).
- [30] C.P. Silva Neto e A. Kojevnikov, *Berichte Zur Wissenschaftsgeschichte* **42**, 375 (2019).
- [31] A. Kojevnikov, em: *Science and Technology in Russia's Great War and Revolution, 1914–1922*, editado por A. Heywood e S. Palmer (Indiana University Press, Bloomington, 2022).
- [32] C.T. Walker e G.A. Slack, *American Journal of Physics* **38**, 1380 (1970).
- [33] I. Frenkel, em: *Congresso Internazionale dei Fisici* (Como, 1927).
- [34] H.A. Bethe, em: *The beginnings of solid-state physics: a symposium*, editado por F.R.S.N. Mott (Royal Society, London, 1980).
- [35] X. Roqué, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **28**, 73 (1997).
- [36] H. Kragh, *Quantum Generations* (Princeton University Press, Princeton, 1999).
- [37] R.E. Peierls, em: *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften* (Springer, Berlin, Heidelberg, 1932), v. 11.
- [38] A. Kojevnikov, *Historical Studies in the Physical & Biological Sciences* **33**, 161 (2002).
- [39] C.D. Hollings, *Scientific Communication Across the Iron Curtain* (Springer, Cham, 2016).
- [40] A. Bagdonas e A. Kojevnikov, *Historical Studies in the Natural Sciences* **51**, 87 (2021).