

# Contribuições pioneiras à Física de Plasmas no Brasil

Pioneer contributions to plasma physics in Brazil

Ricardo Luiz Viana<sup>\*1,2</sup>, Iberê Luiz Caldas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná, Departamento de Física, Curitiba, PR, Brasil.

Recebido em 14 de janeiro de 2023. Revisado em 08 de março de 2023. Aceito em 10 de abril de 2023.

A Física de Plasmas é um ramo relativamente recente da Física, e no Brasil teve contribuições pioneiras nas décadas de 1950 e 1960, em instituições paulistas de ensino superior. Apresentamos, de forma breve, os trabalhos em Física de Plasmas produzidos por três destes pioneiros: David Bohm, Walter Schützer e Gabriel Freire, destacando as contribuições realizadas durante suas carreiras no Brasil.

**Palavras-chave:** Física de Plasmas, David Bohm, Walter Schützer, Gabriel Freire.

Plasma physics is a relatively recent branch of Physics and, in Brazil, it has received pioneer contributions in the 1950's and 1960's, in higher education institutions of the State of São Paulo. We present, in a brief way, the works on plasma physics produced by three of these pioneers: David Bohm, Walter Schützer, and Gabriel Freire, emphasizing their contributions while working in Brazil.

**Keywords:** Plasma Physics, David Bohm, Walter Schützer, Gabriel Freire.

## 1. Introdução

O termo *plasma* foi cunhado em 1929, por Irving Langmuir, no curso de suas pesquisas sobre condução elétrica em tubos de vácuo [1]. As propriedades físicas dos plasmas começaram a ser sistematicamente investigadas, durante a década de 1930, no estudo da propagação de ondas eletromagnéticas na ionosfera [2]. As pesquisas astrofísicas sobre a constituição e a evolução estelar também contribuíram para o desenvolvimento da Física de Plasmas a partir dos anos 1940 [3]. Hannes Alfvén recebeu o prêmio Nobel de Física em 1970 pelas suas investigações pioneiras sobre plasmas cósmicos, em especial sobre um tipo de onda magnetohidrodinâmica que leva seu nome [4].

Após a Segunda Guerra Mundial, cujo desfecho foi decisivamente influenciado pela criação da bomba atômica (empregando fissão nuclear), começou a ser investigada a produção de fusão termonuclear com objetivos bélicos. Ao longo da década de 1950 um grande esforço foi feito por pesquisadores norte-americanos, soviéticos e ingleses, no sentido de desenvolver uma bomba a fusão [5]. Paralelamente a este desenvolvimento, devido à possibilidade de empregar a fusão nuclear na geração de energia, começaram a ser estudadas configurações de confinamento magnético de plasmas termonucleares (de altas temperaturas) [6].

Físicos soviéticos, entre eles Andrei Sakharov e Igor Tamm, criaram o conceito da máquina Tokamak, um acrônimo que, em russo, significa “câmara toroidal com

bobinas magnéticas” [7]. As pesquisas em fusão termonuclear controlada, que eram classificadas durante os anos 1950, foram finalmente tornadas públicas após a conferência “Átomos para a Paz”, ocorrida em Genebra no ano de 1958 [8], o que impulsionou o desenvolvimento de pesquisas em plasmas de fusão em muitos países. Na atualidade, as pesquisas nesta sub-área da Física de Plasmas objetivam demonstrar a viabilidade da fusão para a produção de energia em grande escala, para atender às prementes necessidades mundiais. Os conceitos e métodos desenvolvidos na Física de Plasmas encontram diversas aplicações ligadas não só à fusão nuclear controlada, mas também à astrofísica e geofísica, bem como a plasmas de interesse tecnológico [9].

No Brasil, a Física de Plasmas teve seu efetivo início na década de 1970, a partir de iniciativas tomadas em diferentes estados, tanto por Universidades como Institutos de Pesquisa [10, 11]. Entretanto, houve contribuições pioneiras à Física de Plasmas no Brasil já nas décadas de 1950 e 1960, relacionadas aos trabalhos de três cientistas – David Bohm, Walter Schützer e Gabriel Freire – que, em diferentes épocas e contextos, desenvolveram suas pesquisas em instituições de ensino superior do estado de São Paulo. O objetivo deste trabalho é apresentar, de forma breve, alguns aspectos da vida e obra destes pioneiros da Física de Plasmas no Brasil.

## 2. David Bohm

David Joseph Bohm (20/12/1917 – Wilkes-Barre, EUA; 27/10/1992 – London, UK) é um dos nomes de maior

\*Endereço de correspondência: [viana@fisica.ufpr.br](mailto:viana@fisica.ufpr.br)



**Figura 1:** David Bohm em 1949. Créditos da figura: Library of Congress, New York World – Telegram and Sun Collection, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives.

destaque na Física Teórica do Século XX, sendo bastante lembrado pelas suas contribuições à Teoria Quântica [Fig. 1]. O presente trabalho nem de longe almeja historiar as suas inúmeras contribuições, tanto à Ciência como à Filosofia [12]. Além das biografias escritas por F. David Peat [13] e, mais recentemente, por Olival Freire Jr. [14], as contribuições filosóficas de Bohm podem ser encontradas, de forma resumida, na Referência [15]. A obra de Bohm é colocada num contexto cultural mais amplo, o das relações em fenômenos individuais e coletivos, pelo trabalho de Kojevnikov [16]. A etapa brasileira da carreira acadêmica de David Bohm está detalhada nos trabalhos de Freire Jr., Paty e Rocha Barros [17], e Freire Jr. [18] de modo que vamos nos limitar, aqui, aos pontos mais relevantes deste recorte histórico, em termos das suas contribuições à Física de Plasmas.

Bohm completou em 1943 seu doutorado na Universidade da Califórnia em Berkeley, onde permaneceu até o final da Segunda Guerra Mundial. Seu trabalho de doutorado, sobre colisões entre prótons e dêuterons, teve a orientação de J. R. Oppenheimer. Em 1946 Bohm foi contratado como Professor Assistente na Universidade de Princeton, onde trabalhou em vários assuntos relacionados à Teoria Quântica e Física de Plasmas. Neste período Bohm escreveu seu famoso livro-texto de Mecânica Quântica [19].

Os trabalhos sobre Física de Plasmas de Bohm, iniciados ainda enquanto trabalhava em Princeton, trataram de oscilações eletrônicas em plasmas. Resumidamente, um plasma é um gás ionizado que consiste em uma mistura de elétrons livres e íons positivos. Os plasmas

possuem propriedades coletivas devidas ao longo alcance das interações eletromagnéticas entre as suas partículas. Uma destas propriedades é a quase-neutralidade, ou seja, os campos elétricos efetivamente anulam-se no seu interior devido à blindagem eletrostática das partículas a distâncias maiores do que um comprimento característico (comprimento de Debye).

Se algum processo físico, no entanto, causar uma separação momentânea das cargas positivas e negativas, um campo elétrico muito intenso será produzido localmente, exercendo forças eletrostáticas sobre as partículas, e que tendem a restaurar a quase-neutralidade original. No entanto, como num sistema massa-mola, a inércia das partículas (sobretudo os elétrons, de menor massa) faz com que elas oscilem em torno de sua posição de equilíbrio, com uma frequência característica denominada *frequência de plasma* [20]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (1)$$

onde  $n_e$  é a densidade de elétrons (número de elétrons por metro cúbico),  $e$  e  $m_e$  representam o módulo da carga e a massa dos elétrons, respectivamente, e  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo<sup>1</sup>.

Num plasma “frio”, ou seja, um plasma em que efeitos de temperatura podem ser desprezados, e a temperatura pode ser considerada efetivamente nula, estas oscilações de plasma ocorrem apenas localmente, sem influenciar a vizinhança do meio. No entanto, devido à temperatura finita dos plasmas (medida em termos da energia cinética média das partículas), as oscilações eletrônicas do plasma propagam-se na forma de ondas progressivas, de frequência  $\omega$  e vetor de onda  $\mathbf{k}$ . Em seu primeiro trabalho sobre o assunto, publicado em 1949 [21], Bohm e seu estudante de doutorado E. P. Gross (1926–1991) deduziram a relação de dispersão para estas ondas,

$$\omega^2 = \omega_p^2 + \left( \frac{3k_B T_e}{m_e} \right) k^2, \quad (2)$$

onde  $\omega_p$  é dada por (1),  $k_B$  é a constante de Boltzmann, e  $T_e$  é a temperatura eletrônica. A dedução original de Bohm e Gross foi feita com base na Teoria Cinética; uma demonstração simples envolvendo equações de fluidos pode ser encontrada, por exemplo, em [22].

Num segundo trabalho, publicado imediatamente na sequência do primeiro, Bohm e Gross consideraram os fenômenos de excitação e amortecimento de oscilações eletrônicas num plasma infinitamente extenso [23]. O terceiro trabalho de Bohm e Gross versou sobre os efeitos de condições de contorno sobre as oscilações de plasma, como por exemplo a reflexão destas ondas por paredes metálicas, levando em conta a região de bainha que separa o plasma da parede [24].

<sup>1</sup> Estamos empregando o sistema internacional (MKSA) de unidades.

Outra importante contribuição de Bohm à Física de Plasmas foi a descoberta de que a difusão de partículas carregadas em plasmas magnetizados diminui com o módulo do campo  $B$ , ao invés do seu quadrado ( $B^2$ ), como predito pela teoria de difusão baseada em colisões Coulombianas entre as partículas [25]. Este processo, conhecido como difusão de Bohm, limita o confinamento magnético de plasmas e, conseqüentemente, tem impacto no desenvolvimento de reatores a fusão nuclear baseados em plasmas magneticamente confinados, exigindo campos magnéticos mais intensos do que aqueles previstos na ausência deste efeito [22].

Por volta dessa época, a Comissão de Atividades Anti-Americanas do Congresso Estadunidense promoveu forte perseguição política sobre Bohm, assim como sobre outros físicos que haviam trabalhado em Berkeley durante a guerra. Devido a essa perseguição, Bohm perdeu sua posição em Princeton. Sem condições de continuar trabalhando nos Estados Unidos, Bohm transferiu-se para a Universidade de São Paulo, como resultado de uma complexa negociação envolvendo diversos personagens, desde Albert Einstein até o governador paulista, passando por vários físicos brasileiros de renome [14, 17].

Bohm permaneceu em São Paulo de outubro de 1951 a janeiro de 1955, como Professor da Cátedra de Física Teórica e Física Matemática da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (FFCL-USP). Durante sua estada em São Paulo, Bohm desenvolveu atividades de ensino e pesquisa, além de ministrar diversas conferências. Os dois célebres artigos, onde Bohm propõe a interpretação da Teoria Quântica em termos de variáveis ocultas, foram ambos publicados em 15 de janeiro de 1952, já mencionando seu vínculo com a Universidade de São Paulo [26, 27]. Além disso, foi durante seu período Brasileiro que ele escreveu seu famoso livro sobre causalidade e acaso na Física [28].

Menos conhecida, porém ainda muito importante, é a contribuição de David Bohm à Física de Plasmas,

continuada durante sua estada no Brasil. Esta etapa do trabalho envolve a tese de doutorado de David Pines (1926–1991), que a defendeu em Princeton em 1950, sob a orientação de Bohm, e que pode ser encarada como uma extensão das investigações prévias de Bohm e Gross sobre oscilações em plasmas, agora sob o ponto de vista de uma descrição coletiva em uma teoria clássica de muitos corpos, mais apropriada para plasmas com alta densidade de elétrons. O primeiro trabalho desta nova linha de pesquisa foi publicado em 1o. de junho de 1951, contendo ainda o endereço de Princeton [29]. Nele, Bohm e Pines desenvolvem uma transformação canônica para a descrição coletiva de plasmas densos no caso clássico e a posterior quantização da Hamiltoniana obtida usando operadores de criação e destruição, restringindo a análise às interações magnéticas entre os elétrons.

O segundo trabalho de Bohm e Pines, publicado em 15 de janeiro de 1952, ainda contém a afiliação anterior de Princeton, mas já menciona o endereço permanente de Bohm como sendo a Universidade de São Paulo [30]. Neste artigo, o formalismo desenvolvido no trabalho precedente é estendido ao caso de um gás de elétrons, onde as flutuações são representadas por componentes de Fourier da densidade eletrônica. Esta última pode ser separada em duas partes: uma oscilação coletiva com a frequência de plasma dada por (1), e outra associada ao movimento térmico das partículas individuais. Os métodos desenvolvidos neste segundo trabalho podem aplicados a plasmas astrofísicos ou de laboratório, bem como a um gás de elétrons em um metal. Sob este ponto de vista, este artigo pode ser considerado uma das primeiras contribuições à área de plasmas quânticos, que atualmente é objeto de intensa investigação [31–34].

O terceiro trabalho de Bohm e Pines, publicado em 1o. de novembro de 1953, é bastante significativo pois já contém o endereço paulista de Bohm [35] [Fig. 2]. Nele, os autores estendem o formalismo delineado nos dois primeiros trabalhos para incluir o caso de interações

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 92, NUMBER 3

NOVEMBER 1, 1953

### A Collective Description of Electron Interactions: III. Coulomb Interactions in a Degenerate Electron Gas

DAVID BOHM, *Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil*

AND

DAVID PINES, *Department of Physics, University of Illinois, Urbana, Illinois*

(Received May 21, 1953)

The behavior of the electrons in a dense electron gas is analyzed quantum-mechanically by a series of canonical transformations. The usual Hamiltonian corresponding to a system of individual electrons with Coulomb interactions is first re-expressed in such a way that the long-range part of the Coulomb interactions between the electrons is described in terms of collective fields, representing organized "plasma" oscillation of the system as a whole. The Hamiltonian then describes these collective fields plus a set of individual electrons which interact with the collective fields and with one another via short-range screened Coulomb interactions. There is, in addition, a set of subsidiary conditions on the system wave function which relate the field and particle variables. The field-particle interaction is eliminated to a high

degree of approximation by a further canonical transformation to a new representation in which the Hamiltonian describes independent collective fields, with  $n'$  degrees of freedom, plus the system of electrons interacting via screened Coulomb forces with a range of the order of the inter electronic distance. The new subsidiary conditions act only on the electronic wave functions; they strongly inhibit long wavelength electronic density fluctuations and act to reduce the number of individual electronic degrees of freedom by  $n'$ . The general properties of this system are discussed, and the methods and results obtained are related to the classical density fluctuation approach and Tomonaga's one-dimensional treatment of the degenerate Fermi gas.

Figura 2: Excerto do terceiro trabalho de Bohm e Pines na Physical Review [21].

Coulombianas entre as partículas de um gás de elétrons degenerados. A interação onda-partícula é eliminada por uma transformação canônica, tal que na nova representação a Hamiltoniana tem um termo que descreve campos coletivos independentes e outro para um sistema de elétrons interagindo por forças eletrostáticas com alcance da ordem da distância entre os elétrons. O Hamiltoniano quanto-mecânico do sistema descreve campos coletivos, representando oscilações de plasma, mais um conjunto de elétrons individuais que interagem tanto com os campos coletivos como mutuamente, por meio de interações Coulombianas blindadas, ou seja, de curto alcance.

Bohm e Pines mencionam que a primeira análise dos aspectos de plasma num gás de elétrons é devida a Kronig e Korringa, num trabalho de 1943 que, no entanto, descreve o gás de elétrons como um fluido clássico, com um termo fenomenológico introduzido *ad hoc* para representar efeitos internos de dissipação [36]. É feita, também, uma comparação com um trabalho de S. Tomonaga, que investigou oscilações longitudinais num gás de elétrons degenerados no caso unidimensional [37].

Há, ainda, um quarto e último trabalho desta notável sequência, apenas com a autoria de Pines, e que detalha a aplicação das técnicas no gás de elétrons em metais [38]. Na sequência do seu trabalho de doutoramento, Pines tornou-se um dos mais importantes especialistas em teoria de muitos corpos, tendo publicado diversos trabalhos de grande relevância [39].

As contribuições científicas de Bohm, durante sua estada brasileira, estiveram mais concentradas em temas ligados à sua reinterpretação da teoria quântica [17]. Bohm interagiu com diversos físicos importantes, como R. Feynman, L. Rosenfeld, e J. P. Vigiér, que o visitaram em São Paulo em diferentes épocas. Além disso, Bohm trabalhou com colegas brasileiros, como Jayme Tiomno, R. Schiller e Walter Schützer. Embora sua estada na FFCL-USP pudesse ter sido prolongada (seu contrato havia sido renovado até 1957), David Bohm optou, em janeiro de 1955, por transferir-se para Israel, onde trabalhou no Technion, em Haifa. Em 1961 ele foi para o Birkbeck College da Universidade de Londres, onde permaneceu até seu falecimento, em 1992.

### 3. Walter Schützer

Os trabalhos de Bohm e Pines influenciaram, no Brasil, a trajetória científica e acadêmica de Walter Schützer. Uma terna biografia foi escrita por sua mãe, anos após seu falecimento [40]. Walter de Camargo Schützer nasceu em São Carlos/SP, em 28/12/1922, cidade em que iniciou seus estudos.

Em 1935 mudou-se com a família para a capital paulista, onde fez o curso ginásial na Escola Caetano de Campos. Em 1940 ingressou no curso de Física da FFCL-USP, recebendo os títulos de Bacharel e Licenciado



**Figura 3:** Em pé, da esquerda para a direita: Walter Schützer, Hideki Yukawa, César Lattes. Agachados: Jayme Tiomno, José Leite Lopes, Hervásio de Carvalho. Universidade de Princeton, janeiro de 1949. Fonte: internet.

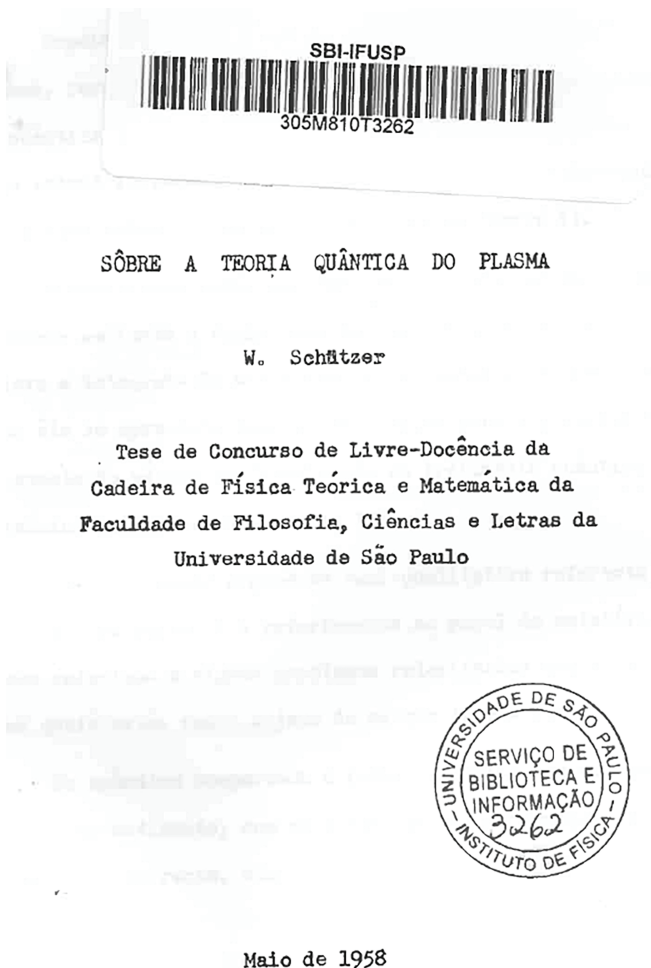
em 1942 e 1944, respectivamente. De 1944 a 1950 foi Assistente da cadeira de Mecânica Racional e Celeste da própria FFCL, transferindo-se na sequência para a cadeira de Física Teórica e Matemática.

Entre 1947 e 1949, Schützer estudou na Universidade de Princeton, com uma bolsa da Fundação Rockefeller, sob a orientação de John Wheeler, onde também estudaram outros brasileiros, como Jayme Tiomno e José Leite Lopes [Fig. 3]. Em Princeton ele obteve o mestrado em 1948, mas sua tese de doutoramento foi defendida já na FFCL, em novembro de 1950, versando sobre as singularidades da matriz de espalhamento e sua relação com propriedades de causalidade [41]. Walter permaneceu como regente da cátedra de Física Teórica e Matemática durante toda sua carreira. Realizou, nas décadas de 1940 e 1950, trabalhos com Mário Schenberg, César Lattes e Jaime Tiomno [42, 43].

Schützer foi um dos colaboradores mais próximos de David Bohm durante o seu período na FFCL-USP. Em 1955 eles publicaram um artigo sobre aspectos probabilísticos da Física [44]. Além deste trabalho, Schützer estudou, com Bohm, a teoria desenvolvida nos trabalhos anteriores com Pines, visando descrever o plasma de forma semi-clássica [45]. O resultado destes esforços materializou-se na Tese de Livre-Docência para a Cátedra de Física Teórica e Matemática, que defendeu em maio de 1958 [46] [Fig. 4].

Na sua tese de livre-docência, com o título “Sobre a Teoria Quântica do Plasma”, Schützer demonstrou que a teoria de Bohm-Pines poderia ser expressa com grande simplicidade usando o formalismo da segunda quantização. A partir deste procedimento, Walter obteve integrais aproximadas do movimento para um plasmas eletrônico. Notamos, na leitura de seu trabalho, que





**Figura 4:** Folha de rosto da Tese de Livre-Docência de Walter Schützer, defendida na FFCL-USP [46].

Schützer empregou conceitos e técnicas adquiridas em seus primeiros trabalhos na área de teoria quântica realizados antes e durante o doutoramento [47].

Uma das contribuições relevantes do trabalho de Schützer foi esclarecer o papel das coordenadas coletivas  $q_k$  usadas na representação de Fourier das quantidades físicas que representam o plasma, na teoria de Bohm-Pines. A argumentação de Schützer demonstra o domínio que ele possuía, tanto da técnica matemática, como da própria interpretação física dos resultados [cf. [46], pg. 11]:

*A demonstração desenvolvida na parte II serve também para preencher uma lacuna inerente à teoria clássica (...) As coordenadas  $q_k$  (...) são introduzidas ad hoc. É claro que se pode sempre recorrer a artifícios matemáticos numa teoria física. Mas aqui de novo pode-se observar que é estranho que uma propriedade básica entre na descrição mediante um artifício. Embora seja possível modificar ligeiramente a formulação clássica,*

*para tornar a introdução dos  $q_k$  muito plausível, é no formalismo da segunda quantização que se vê que na própria teoria há lugar para as coordenadas coletivas. Elas não precisam vir de fora. A comparação da parte II com a teoria clássica mostra que esta é, por assim dizer, um reflexo daquela.*

É oportuno registrar que Walter estava ciente das limitações do método por ele empregado em plasmas eletrônicos. Nas conclusões da sua tese de livre-docência ele aponta que [cf. [46], pg. 42]:

*(...) a introdução das coordenadas coletivas não esgota o problema da formulação de uma teoria quântica do plasma. Mas há indicações de que ela constitui um ponto de partida para isso. O análogo quântico das ondas de plasma (que são substancialmente descritas pelas coordenadas  $q_k$  (...) na formulação de Bohm-Pines) seriam estados próprios da Hamiltoniana do gás de elétrons com energia da ordem de  $\hbar\omega_p$ . Como não sabemos resolver esse problema, devemos procurar superposições de determinantes de Slater que correspondam a energias dessa ordem.*

Além disso, Schützer apontava diversas extensões futuras de seu trabalho, tanto na análise de plasmas quânticos, como até mesmo da matéria nuclear, citando trabalhos recentes do próprio Pines [48], bem como de Murray Gell-Mann [49].

Neste período [Fig. 5], Schützer planejava realizar um estágio de pós-doutorado em Copenhague, no Instituto de Física Teórica liderado por Niels Bohr, para onde viajou em setembro de 1960, com bolsa da Comissão Nacional de Energia Nuclear. No entanto, já nesta época, ele começou a apresentar problemas sérios de saúde, que agravaram-se após o seu retorno a São Paulo, dez meses depois. A sua morte prematura, em 29/06/1963, interrompeu uma brilhante carreira científica e acadêmica.



**Figura 5:** Walter Schützer em 1959. Fonte: Referência [40].

#### 4. Gabriel Freire

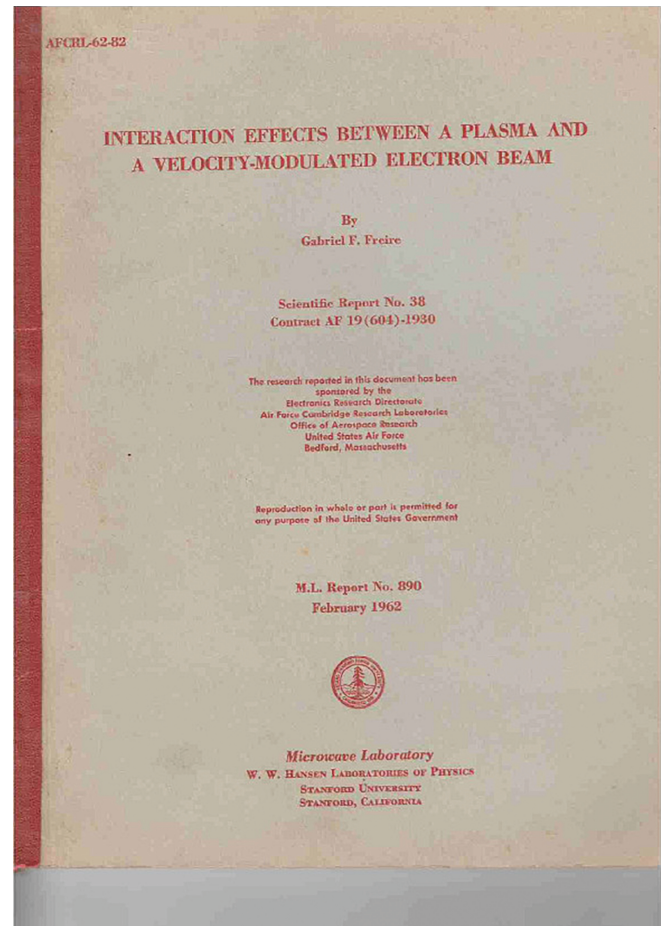
Gabriel Felisberto de Oliveira Freire nasceu em 17 de março de 1929, no Rio de Janeiro, cidade em que cursou a Escola Nacional de Engenharia da Universidade do Brasil (atual UFRJ), graduando-se em 1951 Engenheiro Eletricista [Fig. 6]. No ano seguinte, ele foi contratado como engenheiro no recém-criado Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), para trabalhar no projeto do síncro-cíclotron, com apoio financeiro do Conselho Nacional de Pesquisas, atual CNPq. Em 1955 ele passou a integrar o corpo docente do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (São José dos Campos-SP), então em seus primeiros anos de funcionamento, junto à Divisão de Eletrônica [50].

Dois anos depois, com uma bolsa de estudos do CNPq, Freire embarcou para os Estados Unidos, onde realizou mestrado e doutorado na Universidade de Stanford. Sua tese de doutorado, com o título “Interaction effects between a plasma and a velocity-modulated electron beam”, foi orientada por Marvin Chodorov, um dos pioneiros nas pesquisas com klystrons, e defendida em abril de 1962 no Departamento de Engenharia Elétrica. O texto da sua tese de doutorado foi publicado como um relatório interno do Laboratório de Microondas da Universidade de Stanford [Fig. 7] [51]. Acreditamos que seja a primeira tese de doutoramento em Física de Plasmas defendida por um pesquisador brasileiro.

Em seu trabalho de doutoramento, Freire estudou teórica e experimentalmente a interação entre um feixe modulado de elétrons e uma coluna de plasma estacionária, na ausência de campos magnéticos. Especificamente, foram estudados fenômenos de amplificação e geração de harmônicos no plasma. Por exemplo, observou-se um nível máximo de interação quando a frequência de modulação do feixe de elétrons era igual ou próxima à frequência característica de plasma  $\omega_p$ , com expressões



**Figura 6:** Gabriel Freire, em seu gabinete no ITA, na década de 1980. Créditos: arquivo pessoal.



**Figura 7:** Tese de doutoramento de Gabriel Freire, defendida em 1962 na Universidade de Stanford [51].

diferentes para elétrons e íons. Não por acaso, os três trabalhos de Bohm e Gross [21, 23, 24] são citados na Introdução em sua tese.

Após o seu retorno ao ITA, Freire deu início a um intenso trabalho de pesquisas nas áreas de micro-ondas e Física de Plasmas [50]. Já em 1963 ele publica um artigo teórico no Proceedings of the IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sobre o efeito do movimento iônico nas oscilações de plasma [52]. Foram nele obtidas expressões aproximadas para as frequências de plasma eletrônica e iônica como função da razão entre as massas dos elétrons e dos íons positivos. Em 1964, outro artigo foi publicado, explorando uma analogia entre um feixe modulado de elétrons, propagando-se num plasma frio, e uma linha de transmissão [53].

Uma contribuição bastante interessante, datada de 1966, trata de uma aplicação da magnetohidrodinâmica (MHD) aos chamados campos magnéticos “force-free” [54]. Neles, a densidade de corrente elétrica é paralela ao campo magnético, de modo que a força magnética é nula. Este tipo de configuração é bastante comum em plasmas de fusão e astrofísicos. Neste trabalho Freire estuda configurações “force-free” geradas



por dois sistemas de correntes elétricas mutuamente ortogonais.

Outro trabalho em Física de Plasmas, publicado na década de 1960 em coautoria com R. Scarabucci, trata da emissão de radiação por um dipolo elétrico imerso em um plasma anisotrópico homogêneo e ilimitado, quando são levadas em conta perdas devido a colisões entre as partículas [55]. A partir do início da década de 1970 Freire passa a investigar plasmas de estado sólido, como plasmas semicondutores, e os diversos tipos de interação entre ondas nestes meios [56, 57]. Nesta altura, os seus interesses também voltaram-se para a fotônica de microondas, onde sua atuação foi importante na consolidação do respectivo grupo de pesquisas no ITA [50].

Desde seu retorno do doutorado, em 1962, Freire colaborou de forma regular na formação de estudantes de graduação e pós-graduação. Publicou, em 1973, em coautoria com Aroldo B. Diniz, um livro-texto (“Ondas Eletromagnéticas”) bastante utilizado por estudantes de engenharia no Brasil [58] [Fig. 8]. Já em 1968 ele registra em seu *currículum vitae* a publicação de uma apostila sobre “Introdução à Física de Plasmas e Magnetohidrodinâmica”, disciplina esta que lecionou no ITA de 1962

a 1970, na graduação e na pós-graduação. Seu primeiro aluno de mestrado, Aroldo Borges Diniz, defendeu em 1963 uma dissertação sobre a propagação de ondas eletromagnéticas em guias com plasmas, e que foi a segunda tese defendida em todo o ITA. Posteriormente, na década de 1980, Prof. Freire concentrou as suas atividades de pesquisa na área de microondas fotônicas, tendo criado um laboratório no ITA dedicado a essas investigações [50].

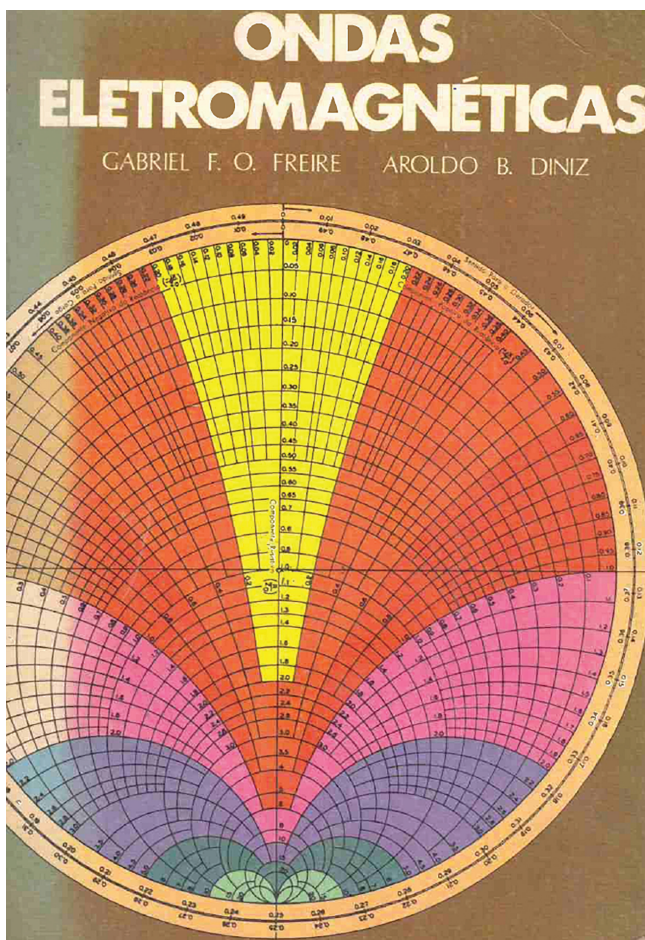
No total, Freire orientou onze dissertações de mestrado e duas teses de doutoramento, tanto no ITA como no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP), além de diversos estudantes de iniciação científica. Alguns de seus estudantes, como José Pantuso Sudano, José Busnardo Neto, e Paulo Hiroshi Sakanaka, tiveram um papel destacado na primeira geração de físicos de plasma no Brasil. Gabriel Freire tornou-se professor titular do ITA em 1967, onde atuou como chefe da divisão de engenharia eletrônica entre 1966 e 1967. Foi, ainda, um dos fundadores da Faculdade de Engenharia de São José dos Campos, bem como seu primeiro diretor (1968–1971). Faleceu em 07/08/1992, no Rio de Janeiro.

## 5. Considerações Finais

As contribuições à Física de Plasmas de David Bohm são muito importantes, e já seriam suficientes para garantir a ele uma posição destacada entre os maiores teóricos deste assunto. Durante o atribulado período de sua vida que abrange o final de seu contrato em Princeton e o início do seu trabalho na Universidade de São Paulo, Bohm e seu estudante David Pines desenvolveram uma teoria de muitos corpos para plasmas eletrônicos, que ainda hoje é a base teórica para a descrição de um gás de elétrons em metais.

Em particular, Bohm e Pines resolveram um enigma da mecânica quântica: como a teoria quântica dos elétrons em metais é capaz de prever seu comportamento de forma adequada, mesmo não levando em conta a repulsão entre as partículas. Na teoria de Bohm e Pines, os elétrons de um plasma quântico oscilam sob a influência atrativa dos íons positivos da rede cristalina, e ao mesmo tempo são repelidos mutuamente pelas forças Coulombianas. Os *quanta* das oscilações da densidade eletrônica, chamados plásmos, suavizam as forças repulsivas entre os elétrons, explicando assim por que a teoria funciona tão bem para o gás de elétrons em metais [59].

Observamos que, dos três trabalhos publicados no Physical Review contendo os elementos da teoria de Bohm e Pines, o primeiro deles (junho de 1951) contém endereços americanos para ambos os autores. Já no segundo artigo (de janeiro de 1952), o endereço permanente de Bohm já é o brasileiro. Finalmente, o terceiro artigo (de novembro de 1953) contém a Universidade de São Paulo como endereço definitivo de Bohm. Este



**Figura 8:** Livro-texto sobre Ondas Eletromagnéticas, escrito por Gabriel Freire e Aroldo Diniz [58].

notável conjunto de artigos científicos foi analisado num trabalho recente na área de filosofia da ciência, como exemplo da chamada “prática teórica” [60].

A influência dos trabalhos de Bohm foi determinante, durante sua estada brasileira, para o direcionamento da pesquisa realizada por seu assistente Walter Schützer. Devido a seu falecimento prematuro, entretanto, essa influência se restringiu à tese de livre-docência na FFCL-USP. Como ela foi defendida cerca de três anos após a partida de Bohm, é notável a capacidade de Schuster de compreender e estender o trabalho de seu mentor.

Já a contribuição de Gabriel Freire, mais recente que a dos dois precedentes, tem um caráter distinto, pois relaciona-se a um plasma “clássico”, para o qual efeitos quânticos são usualmente negligenciados. Sob este ponto de vista, os trabalhos de Freire durante a década de 1960, estão mais alinhados aos temas classicamente pertencentes à Física de Plasma. Em especial, Freire estudou teoricamente e experimentalmente (em Stanford) a interação entre plasmas e feixes eletrônicos.

Em seu retorno ao Brasil, Freire deu andamento a trabalhos teóricos, bem como contribuiu decisivamente para a formação de vários pesquisadores. Pelas informações que temos de ex-alunos seus, Freire construiu um aparato de pequeno porte para gerar plasmas de baixas temperaturas, para suas concorridas aulas sobre ondas eletromagnéticas. Alguns destes ex-alunos do ITA integraram-se à nascente comunidade brasileira de físicos de plasma, a partir da década de 1970.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Professora Maria Cristina Machado Freire, do Museu de Arte Contemporânea da Universidade de São Paulo, e filha do Professor Gabriel Freire, pela cessão de valioso material iconográfico e bibliográfico. Também à Cibele Trauci, da Biblioteca do IFUSP, pelo auxílio na localização da tese de livre-docência de W. Schützer. O presente trabalho teve suporte financeiro parcial das seguintes agências governamentais: FAPESP (2018/03211-6, 2022/04251-7), CNPq (304616/2021-4, 403120/2021-1, 3010191/2019-3, 302665/2017-0), e CAPES.

## Referências

- [1] L. Tonks e I. Langmuir, *Phys. Rev.* **33**, 195 (1929).
- [2] S. Chapman, *Proc. Phys. Soc. London* **43**, 26 (1931).
- [3] S. Chandrasekhar, *MNRAS* **105**, 124 (1945).
- [4] H. Alfvén, *Nature* **150**, 405 (1942).
- [5] R. Rhodes, *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb* (Simon and Schuster, New York, 1996).
- [6] D. Clery, *A Piece of the Sun: The Quest for Fusion Energy* (MIT Press, Cambridge, 2014).
- [7] V. Shafranov, *J. Russian Acad. Sci.* **44**, 835 (2001).
- [8] R. Herman, *Fusion – the search for endless energy* (Cambridge University Press, Cambridge, 1990).
- [9] R.L. Viana, em: *Sociedade Brasileira de Física, 50 Anos (1966–2016)*, editado por M. Knobel (Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2017).
- [10] I.L. Caldas, D. Dillemburg, G. Ludwig e O.H. Sakanaka, em: *A Física no Brasil: A Próxima Década*, coordenado por G.C. Marques e S.M. Rezende (Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 1990).
- [11] I.L. Caldas, M.V. Alves, M. Roberto, M. Machida e E. del Bosco, em: *Física 2011: O estado da arte, perspectivas para os próximos cinco anos*, organizado por S. Nogueira e T. Romero (McHilliard, São Paulo, 2011).
- [12] D. Bohm, *Wholeness and the implicate order* (Routledge, London, 1983).
- [13] F.D. Peat, *Infinite potential: the life and times of David Bohm* (Addison Wesley, Reading, 1997).
- [14] O. Freire Jr., *David Bohm: A Life Dedicated to Understanding the Quantum World* (Springer, New York, 2019).
- [15] L. Nichol, *The Essential David Bohm* (Routledge, London, 2003).
- [16] A. Kojevnikov, *Historical Studies in Physical and Biological Sciences* **33**, 161 (2002).
- [17] O. Freire Jr., M. Paty e A.L. Rocha-Barros, *Estudos Avançados* **8**, 53 (1994).
- [18] O. Freire Jr., *Circumscribere: International Journal for the History of Science* **25**, 40 (2020).
- [19] D. Bohm, *Quantum Theory* (Dover, New York, 1951).
- [20] J.A. Bittencourt, *Fundamentals of Plasma Physics* (Springer, New York, 2004), 3 ed.
- [21] D. Bohm e E.P. Gross, *Phys. Rev.* **75**, 1851 (1949).
- [22] F.F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (Plenum Press, New York, 1984).
- [23] D. Bohm e E.P. Gross, *Phys. Rev.* **75**, 1864 (1949).
- [24] D. Bohm e E. P. Gross, *Phys. Rev.* **79**, 992 (1950).
- [25] D. Bohm, em: *Qualitative Description of the Arc Plasma in a Magnetic Field*, editado por A. Guthrie e R.K. Wakerling (McGraw-Hill, New York, 1949).
- [26] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 166 (1952).
- [27] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 180 (1952).
- [28] D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics* (University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1971).
- [29] D. Bohm e D. Pines, *Phys. Rev.* **82**, 625 (1951).
- [30] D. Bohm e D. Pines, *Phys. Rev.* **85**, 338 (1952).
- [31] A. Serbeto, *Phys. Plasmas* **6**, 2943 (1999).
- [32] F. Haas, *Quantum Plasmas: An Hydrodynamical Approach* (Springer Verlag, New York, 2011).
- [33] Z.A. Moldabekov, M. Bonitz e T.S. Ramazanov, *Phys. Plasmas* **25**, 031903 (2018).
- [34] M. Bonitz, Z.A. Moldabekov e T.S. Ramazanov, *Phys. Plasmas* **26**, 090601 (2019).
- [35] D. Bohm e D. Pines, *Phys. Rev.* **92**, 609 (1953).
- [36] R. Kronig e J. Koringa, *Physica* **10**, 406 (1943).
- [37] S. Tomonaga, *Prog. Theor. Phys.* **5**, 544 (1950).
- [38] D. Pines, *Phys. Rev.* **92**, 626 (1953).
- [39] D. Pines, *The Many-Body Problem* (W.A. Benjamin, New York, 1961).
- [40] I.B.C. Schützer, *Walter, como ele foi. Memórias* (Imprensa Metodista, São Paulo, s/d).

- [41] W. Schützer, *Singularidades da Matriz S e Causalidade*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo (1950).
- [42] C.M. Lattes, M. Schenberg e W. Schützer, *Anais da Acad. Bras. de Ciênc.* **19**, 193 (1947).
- [43] W. Schützer e J. Tiomno, *Anais da Acad. Bras. de Ciênc.* **19**, 333 (1947).
- [44] D. Bohm e W. Schützer, *Nuovo Cimento Suppl.* **2**, 1004 (1955).
- [45] W. Schützer, *Anais Acad. Bras. Ciências* **28**, 419 (1956).
- [46] W. Schützer, *Sobre a teoria quântica do plasma*. Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, São Paulo (1958).
- [47] W. Schützer e J. Tiomno, *Phys. Rev.* **83**, 249 (1951).
- [48] D. Pines, *Rev. Mod. Phys.* **28**, 184 (1956).
- [49] M. Gell-Mann, *Phys. Rev.* **106**, 369 (1957).
- [50] J.E.B. Oliveira, em: *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)* (Belém, 2009).
- [51] G.F.O. Freire, *Microwave Laboratory Scientific Report no. 38*, Stanford University, Stanford (1962).
- [52] G.F.O. Freire, *Proceedings of the IEEE* **51**, 1790 (1963).
- [53] G.F.O. Freire, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **12**, 360 (1964).
- [54] G.F.O. Freire, *Am. J. Physics* **34**, 567 (1966).
- [55] G.F.O. Freire e R.R. Scarabucci, *Int. J. Electronics* **22**, 65 (1967).
- [56] G.F.O. Freire, *Proceedings of the IEEE* **58**, 482 (1970).
- [57] G.F.O. Freire, *Int. J. Electronics* **28**, 1 (1970).
- [58] G.F.O. Freire e A.B. Diniz, *Ondas Eletromagnéticas* (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1973).
- [59] P. Coleman e L. Greene, *Nature* **560**, 432 (2018).
- [60] R.I.G. Hughes, *Perspectives on Science* **14**, 457 (2006).