

CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Rio de Janeiro

Notas de Física

CBPF-NF-003/11

January 2011

**O Papel das Emulsões Nucleares na Institucionalização da Pesquisa
em Física Experimental no Brasil**

Cássio Leite Vieira e Antonio A. P. Videira

O PAPEL DAS EMULSÕES NUCLEARES NA INSTITUCIONALIZAÇÃO DA PESQUISA EM FÍSICA EXPERIMENTAL NO BRASIL*

Cássio Leite Vieira (*Instituto Ciência Hoje*)
Antonio A. P. Videira (*UERJ e CNPq*)

Resumo: Neste artigo, descrevemos e analisamos a introdução e o uso da técnica das emulsões nucleares no Brasil. Apesar de pesquisas consistentes na área de raios cósmicos terem sido feitas na década de 1940 neste país, os físicos aqui começaram a empregar a técnica depois dos trabalhos de César Lattes em Bristol (Inglaterra) e Berkeley (EUA). Mesmo que a introdução da técnica tenha sido posterior à origem dela – datada do final da década de 1900 –, cientistas brasileiros se familiarizaram rapidamente com o método e o adotaram não só em raios cósmicos, mas também em física de partículas elementares e física nuclear, usando-o até recentemente. Neste artigo, estaremos preocupados com as causas dessa longevidade. Em outras palavras, por que a técnica de emulsões nucleares foi usada por tantos anos no Brasil, mesmo depois de seu abandono em centros de física no mundo? Adiantamos que a resposta para tal pergunta envolve questões históricas relacionadas à formação e à institucionalização da ciência – mais especificamente, da física – no Brasil, bem como razões econômicas, sociais e geográficas.

Palavras-chave: história da física, história da física no Brasil, técnica das emulsões nucleares, método fotográfico aplicado à física.

Abstract: In this paper, we describe and analyze the introduction and the use of the nuclear emulsions technique in Brazil. Even though consistent researches in cosmic ray physics had been done since the forties of the last century in this country, physicists here only began using this technique after Cesar Lattes' works in Bristol (England) and Berkeley (US). Despite being the implantation of the technique in this country posterior to the origin of the method itself – dated from late 1900s –, Brazilian scientists were quickly familiarized with it and adopted it not only in cosmic rays, but also in particle physics and nuclear physics, employing it until recently. In our work, we will be concerned with the reasons of this longevity. In other words, why were the nuclear emulsions technique employed for so many years in Brazil, even after its vanishing in physics researches centers in the world? We advance here that the answer to this question involves the institutionalization of science in Brazil – mainly physics – and economical, social, and geographic reasons.

Keywords – history of physics, history of physics in Brazil, technique of nuclear emulsions, photographic method applied to physics.

INTRODUÇÃO

Neste artigo, descrevemos e analisamos o início, logo após a Segunda Guerra, do uso das emulsões nucleares no Brasil, bem como o emprego dessa técnica – também denominada método fotográfico aplicado à física – pelos quase 50 anos seguintes neste país.

No Brasil, a pesquisa em raios cósmicos se iniciou no começo da década de 1940.¹ Porém, o elemento que impulsionou o emprego das emulsões nucleares por aqui foi outro:

¹ Excluimos aqui breve período de pesquisas teóricas sobre raios cósmicos realizadas pelo físico alemão – naturalizado brasileiro – Bernhard Gross, quando de sua chegada ao Rio de Janeiro, em junho de 1933. Essas pesquisas se estenderam por cerca de um ano, período após o qual Gross passou a trabalhar com física do estado sólido, área na qual obteria reconhecimento internacional, principalmente por seus resultados sobre o estudo de dielétricos. Pouco antes de deixar a Alemanha, Gross trabalhou como físico teórico no grupo de Erich Regener, que estudava a radiação cósmica na estratosfera (cerca de 20 mil metros) e em grandes profundidades de água (250 metros). Mais informações sobre Gross e suas pesquisas sobre raios cósmicos, ver Bustamante e Videira [16].

pesquisadores brasileiros dessa área, bem como de outras duas (física nuclear e física de partículas elementares), passaram a usar essas chapas fotográficas especiais em função do prestígio dos resultados alcançados na época por César Lattes ao empregar esse método:

i) na produção natural do méson pi (ou pión), em 1947, em Bristol (Inglaterra);

ii) na produção artificial dessa partícula, no ano seguinte, em Berkeley (Estados Unidos), com o uso do então mais potente acelerador de partículas do mundo.

Apesar de a implantação da técnica no Brasil ser posterior ao seu surgimento na comunidade científica internacional – suas origens remontam à Europa da primeira década do século passado e têm a ver com a retomada do microscópio como instrumento de pesquisa pelos físicos –, os pesquisadores brasileiros rapidamente se familiarizaram com ela e a adotaram quase concomitantemente para o estudo da física de partículas feita com o auxílio de aceleradores no estrangeiro, bem como para a investigação em física nuclear. Pouco depois, o método foi empregado no estudo dos raios cósmicos, em uma das mais longevas colaborações científicas da física no Brasil, a Colaboração Brasil-Japão, mais conhecida pela sigla CBJ.

Nessas três áreas, a técnica foi empregada por aqui até recentemente, fazendo talvez do Brasil o país em que o uso contínuo das emulsões nucleares se deu por mais tempo no mundo.

Neste trabalho, nosso foco é entender as razões que levaram à adoção dessa técnica por físicos brasileiros, bem como as que propiciaram tal longevidade. Em outras palavras, por que as emulsões nucleares foram empregadas por tantos anos no Brasil, já que, a partir da década de 1960, ela praticamente saiu de cena nos principais centros de pesquisa em física do mundo?

Adiantamos que a resposta para tal pergunta envolve questões históricas relacionadas à formação e à institucionalização da ciência – mais especificamente, da física – no Brasil, bem como razões econômicas, sociais e geográficas.

Acreditamos que, por meio do estudo de uma cultura material da física do século passado² – a saber, a técnica aqui tratada –, podemos entender um pouco melhor como a pesquisa em física se instalou em países periféricos.

PARTE I

SÉCULO 19: OS CIENTISTAS E A FOTOGRAFIA

O método fotográfico aplicado à física – ou também técnica das emulsões nucleares – foi empregado, por cerca de 50 anos, na Europa, nos Estados Unidos e no Japão, por físicos nucleares e, principalmente, de raios cósmicos. Ele atingiu seu auge na segunda metade da década de 1940, com a detecção do méson pi – tanto positivo quanto negativo – na radiação cósmica e no então mais potente acelerador do mundo, em Berkeley, o sincrociclótron de 184 polegadas. O método foi também usado como detector em experimentos que resultaram na descoberta de várias outras partículas, como o pión neutro, os káons, o sigma positivo e o antilambda zero.³

A história que aqui pretendemos contar deve necessariamente se iniciar com a intersecção entre a ciência – mais especificamente, a física – e a fotografia, pois os cientistas desempenharam, na primeira metade do século 19, papel importante nessa invenção.⁴ Com o surgimento da figura do fotógrafo profissional, em meados daquele século, os cientistas –

² Obra de grande fôlego sobre a física de partículas do século passado vista pela perspectiva da cultura material é Galison [25].

³ Ver: i) para os pions na radiação cósmica: Perkins [42]; Occhialini e Powell [40]; Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell [34]; Lattes, Occhialini e Powell [35]; Lattes, Occhialini e Powell [36]; para os pions no acelerador de Berkeley: Gardner e Lattes [26]; Burfening, Gardner e Lattes [15]; iii) para o pión neutro em radiação cósmica: Carlson, Hooper e King [17]; para o sigma positivo: Bonetti et al. [12]; para o antilambda zero: Prowse e Baldo-Ceolin [48]; para os káons em radiação cósmica: Brown et al. [13] e Brown et al. [14]; para o antipróton na radiação cósmica: Amaldi et al. [2].

⁴ Três trabalhos de amplo espectro sobre a intersecção da ciência com a fotografia no século 19 e começo do século passado são Jenkins [32]; Jenkins [33]; Ostroff [41].

principalmente, físicos e químicos – começam a se afastar da área. Talvez, a consequência mais importante desse afastamento tenha sido o fato de as teorias sobre o que mais modernamente se convencionou chamar processo fotográfico⁵ terem permanecido, por quase meio século, restrito à seara dos fotógrafos profissionais. Isso deu margem ao surgimento de uma série de explicações – muitas sem fundamentação científica – para aquele processo, que se acreditava, então, puramente químico.⁶

Ao final do século 19, com o surgimento dos chamados novos fenômenos físicos (raios X, radioatividade, elétrons e ondas hertzianas), ocorreu a retomada da fotografia como detector pelos físicos. O caso emblemático desse uso – e também o mais citado – é o da descoberta da radioatividade por Becquerel. No entanto, a fotografia, classificada naquele momento como de natureza apenas qualitativa, perdeu espaço – por exemplo, no estudo da radioatividade – para as medidas elétricas da ionização do ar, efetuadas por eletrômetros.⁷

OS PIONEIROS

Apesar do emprego da fotografia como detector no final do século 19 e no começo do século passado, ainda faltava agregar a ela um elemento essencial para que ficasse consignado o que aqui denominamos método fotográfico aplicado à física. Essa peça-chave era o microscópio.

Nossas pesquisas nos levaram a deduzir que a união da fotografia e do microscópio⁸ se deu na primeira década do século passado, simultaneamente em três áreas distintas: nas ciências fotográficas, com W. Scheffer, em 1907; na geologia, com O. Mügge, em 1909; e na física, com S. Kinoshita, em 1910.⁹ Interessa-nos mais perto este último, um físico japonês que trabalhou em Manchester, no laboratório de Rutherford. Kinoshita é tido – por autores que arriscaram escrever breves passagens sobre a história da técnica das emulsões nucleares¹⁰ – como o mais importante de um grupo de pioneiros do método fotográfico aplicado à física no início da década de 1910.¹¹

⁵ Basicamente, a formação da chamada imagem latente no grão de um sal de prata (mais comumente, brometo de prata) por meio da passagem por ele de fótons ou partículas subatômicas carregadas eletricamente.

⁶ O processo fotográfico (ou seja, a formação da imagem latente) é físico, mesmo que esse processo seja ainda considerado por muitos como uma alteração fotoquímica. A primeira teoria quântica para esse processo foi publicada no final da década de 1930 por Ronald Gurney e Nevill Mott. Ver Gurney e Mott [28].

⁷ Corroborar essa afirmação a seguinte passagem de Martins [38]: “Logo se tornou claro que os efeitos elétricos da radiação eram muito mais úteis que o uso da fotografia na investigação científica das radiações, pois o estudo da ionização do ar permitia medir a radiação, sendo por isso superior ao uso de chapas fotográficas. O método fotográfico, utilizado por Becquerel nos seus principais estudos, não permitia medidas, sendo puramente qualitativo.” Um caso clássico nesse sentido, são os estudos feitos por Marie Curie para sua tese de doutorado, defendida em 1903 e que levaram à descoberta do polônio e do rádio. Marie Curie empregou aparelho para medida de correntes elétricas fracas, desenvolvido por seu marido, Pierre, e pelo irmão dele, Paul-Jacques

⁸ O físico italiano Giuseppe Occhialini, um dos grandes especialistas na técnica das emulsões nucleares do século passado, prefere se referir a essa união como a retomada do microscópio pelos físicos: “O [microscópio] está em posição desafortunada. É desgraça, e o lado feio dessa situação mostra seus limites em adaptar esse equipamento para esse trabalho [de varredura das chapas reveladas]. O microscópio foi abandonado por muitos anos nas mãos de biólogos e médicos, que não precisavam de medidas precisas. **Mas, agora que os físicos têm-no de novo em suas mãos, é possível se certificar da insuficiência desse equipamento.**” [Destaque nosso]. Ver Gariboldi [27].

⁹ Hipótese interessante seria pensar que os cientistas da área das ciências exatas estavam desejosos de ‘ver’ o fenômeno atômico recém-descoberto, ou seja, a radioatividade. Esse anseio pela visualização, com o auxílio de instrumento que estava no domínio da biologia, nos leva a pensar que a física talvez tenha emulado a metodologia das ciências biológicas.

¹⁰ Ver, por exemplo, Shapiro [55], que traz descrição detalhada dos resultados obtidos por esses pioneiros do método fotográfico aplicado à física. Para uma visão histórica mais ampla sobre a técnica das emulsões nucleares, ver Vieira [61].

¹¹ Entre 1910 e 1917, foi publicada cerca de uma dúzia de artigos científicos que relataram os resultados de experimentos feitos na Europa empregando chapas fotográficas para o estudo da radioatividade.

A partir daquele momento, da união da fotografia com o microscópio, nasce, então, o método fotográfico aplicado à física ou, mais tarde, depois da Segunda Guerra, técnica das emulsões nucleares.

PRÓTONS LENTOS E EMULSÕES ESPESSAS

Os resultados obtidos por aqueles pioneiros foram, de certo modo, esquecidos, em função – é nossa opinião – da Primeira Guerra Mundial. Em parte, esses resultados foram retomados, após o final desse conflito, pela física austríaca Marietta Blau. O emprego do método fotográfico por ela se deu no contexto de uma controvérsia entre o Laboratório Cavendish, em Cambridge (Inglaterra), e o Instituto do Rádio em Viena, onde Blau trabalhava. O tema da controvérsia eram dois modelos sobre a desintegração nuclear, um proposto por Rutherford e Chadwick, e o outro por Petterssen e Kirsch, de Viena. E o método foi trazido à tona como alternativa a outro detector, a câmara de ionização, onde, segundo Cambridge, estaria a origem dos erros experimentais de Viena.¹²



Figura 1. A física austríaca Marietta Blau, que retomou o método fotográfico aplicado à física depois do fim da Primeira Guerra Mundial. (Crédito: desconhecido)

Em seu emprego do método fotográfico,¹³ Blau não resolveu a controvérsia, mas seus experimentos forneceram um dos primeiros resultados importantes do método da década de 1920: a obtenção de trajetórias de prótons lentos (pouco energéticos) nas emulsões.

Outro resultado marcante daquele período veio em 1927, quando os soviéticos Myssovsky e Tschishow publicaram artigo – em alemão – em que afirmavam ter fabricado chapas fotográficas com 50 micrômetros, espessura que seria, após 1945, padrão para as emulsões nucleares. O artigo, no entanto, chama atenção por um segundo fato: a revelação da receita sobre como produzir chapas fotográficas. A surpresa está no seguinte: esse procedimento

¹² Para longa discussão dessa controvérsia, ver, por exemplo, Stuewer [58] e Rentetzi [50], especialmente o capítulo 5.

¹³ Vale ressaltar que Blau já havia anteriormente lidado com o método fotográfico. Ver Blau e Altenburger [11].

ser segredo industrial – pelo menos, no Ocidente – desde a invenção das chapas fotográficas à base de gelatina¹⁴, na segunda metade do século 19.

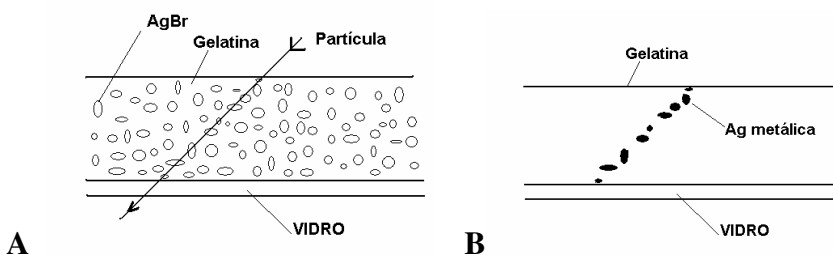


Figura 2. Ao atravessar a emulsão nuclear, um fóton ou partícula eletricamente carregada tornam reveláveis grãos de brometo de prata pelos quais passam (A). No processo de revelação, esses grãos sensibilizados tornam a prata metálica (B), enquanto os não sensibilizados são arrancados da gelatina por reagentes químicos. (Crédito: Cedido pelos Autores)

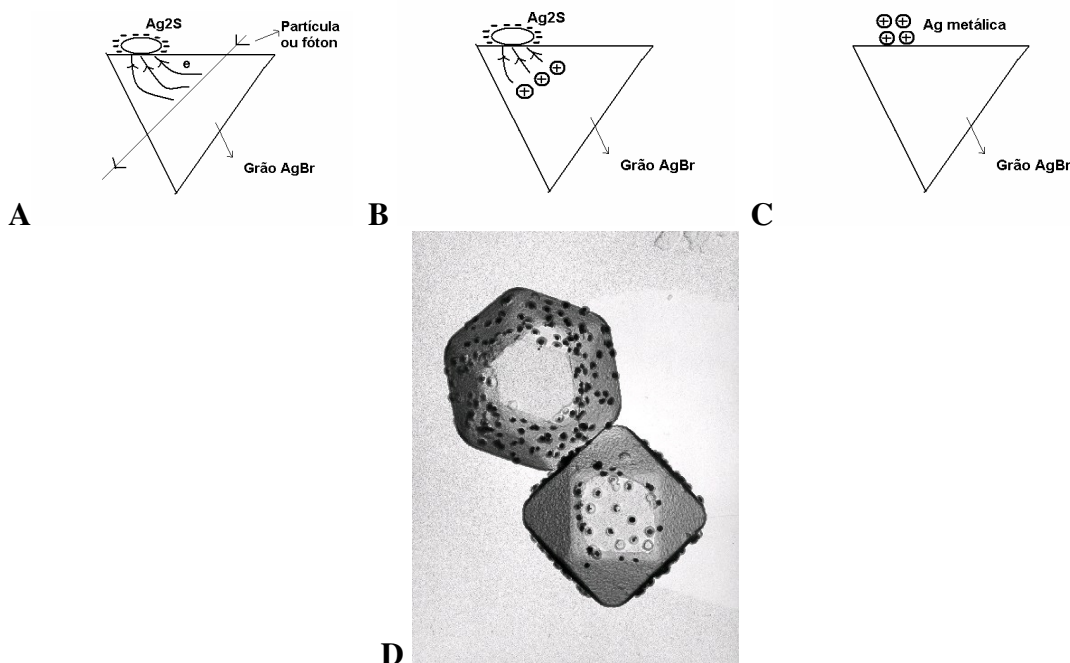


Figura 3. Formação da imagem latente, segundo a primeira teoria, de 1938, a incorporar elementos da física quântica para descrever esse processo (chamado processo fotográfico). Ao passar pelo grão de brometo de prata, um fóton ou uma partícula eletricamente carregada arrancam elétrons da rede cristalina. Estes se deslocam para o chamado centro de sensibilização, formado por sulfeto de prata (Ag_2S) – o enxofre, no caso, vem da constituição da gelatina (A). Essa região, na superfície do cristal, torna-se eletricamente negativa, atraindo para si os íons de prata (B), que podem se deslocar pela rede cristalina. Ao chegar ao centro de sensibilização, cada íon de prata, ao ganhar um elétron, passa a prata metálica (C), tornando-se, por sua vez, centros de revelação (D). A ação do revelador faz a prata metálica se multiplicar, produzindo, para cada átomo de prata metálica, cerca de um bilhão deles. O entendimento do mecanismo do processo fotográfico foi aprimorado nas décadas seguintes, mas mantém-se basicamente o descrito aqui. (Crédito: Cedido pelos Autores)

¹⁴ No caso, a gelatina serve como sustentação para os grãos do sal ativo de prata (brometo de prata, mais comumente).

CETICISMO SOBRE UM RECÉM-NASCIDO

Para o método fotográfico, a década de 1930 foi especialmente rica. Entre os vários fatos que merecem ser destacados, estão dois resultados obtidos por Blau e por sua auxiliar Hertha Wambacher. O primeiro deles foram as trajetórias de prótons rápidos. Isso se deu na tese de Wambacher¹⁵, em 1930, com o uso de um ‘dessensibilizador’ (amarelo de pinacriptol) na emulsão fotográfica para evitar que se formasse imagem de fundo (*background*) muito intensa, o que inviabilizava a visualização de outras partículas. O outro feito importante foi a observação, pela primeira vez em uma emulsão fotográfica, de uma desintegração nuclear, com chapas expostas no monte Hafelekar (Áustria).¹⁶

Vale ressaltar aqui uma inversão interessante ocorrida na década de 1930, quando este período é comparado ao que ocorreu no início do século passado. Na década de 1910, foram os físicos nucleares que adotaram as chapas fotográficas para seus experimentos – vide o exemplo emblemático de Kinoshita –, enquanto os físicos de raios cósmicos (ou cosmicistas) preferiam os eletrômetros como detectores para seus estudos, realizados principalmente por meio de voos de balões. Uma possível explicação para a opção dos cosmicistas está relacionada com o fato de as chapas fotográficas, como foi dito, adentrarem o século passado sob a classificação de detectores de natureza apenas qualitativa. Ao final da década de 1930, a situação se inverteu: são os físicos nucleares que veem o método fotográfico com desconfiança, enquanto os cosmicistas o adotam em seus estudos.

É nesse cenário de ceticismo em relação ao método que as chapas fotográficas passam a ser empregadas por Cecil Powell e colegas¹⁷ para o estudo da radiação cósmica. Os resultados impressionaram esses pesquisadores, e Powell seguiu com o método ao longo da Segunda Guerra, estudando, por exemplo, o espalhamento entre prótons e nêutrons. Em nosso entender, esses trabalhos de Powell¹⁸ foram importantes para que o método sobrevivesse ao conflito e desencadeasse a chamada ‘Era de Ouro’ da física de raios cósmicos, na qual várias novas partículas foram descobertas.



Figura 4. Cecil Powell, responsável por adotar o método fotográfico ao final da década de 1930 e também por experimentos feitos com essa técnica ao longo da Segunda Guerra Mundial. (Crédito: Nobel Foundation)

¹⁵ Orientada por Blau.

¹⁶ Para mais detalhes dessa história, ver, por exemplo, Galison [25] e Strohmaier e Rosner [57]. Vale ressaltar que as primeiras exposições de chapas fotográficas à radiação cósmica ocorreram em voos de balões Explorer II nos Estados Unidos. Para alguns dos resultados desses voos, ver, por exemplo, Wilkins e St. Helens [62].

¹⁷ Powell e Fertel [46]; Heitler, Powell e Fertel [29]; Heitler, Powell e Heitler [30].

¹⁸ Por exemplo, Powell [44]; Powell [45]; Chadwick, May, Pickavance e Powell [18].

ACADEMIA, INDÚSTRIA E ESTABELECIMENTO NUCLEAR

Ao final da Segunda Guerra, a indústria fotográfica inglesa estava prestes a perder parte de seus contratos de guerra com o governo e, assim, procurava novos nichos de mercado. A comunidade dos físicos de partículas, por sua vez, buscava um detector que fosse confiável e, principalmente, barato, dada a falta de verbas para a ciência na Europa após o conflito. De sua parte, o estabelecimento nuclear britânico estava interessado em energia nuclear com propósitos militares.

Nesse cenário, dois grandes painéis foram formados no Reino Unido, sob sugestão de Patrick Blackett ao governo: um voltado para aceleradores e outro para emulsões. Foi neste último, chefiado por Joseph Rotblat, que nasceram – da inter-relação de interesses desse trinômio ‘academia-indústria-estabelecimento nuclear’ – as chamadas emulsões nucleares, chapas fotográficas com camadas de gelatina mais espessas e com maior concentração do sal brometo de prata.

Essas novas chapas expostas à radiação cósmica foram fundamentais, por exemplo, na descoberta do méson pi:

i) na radiação cósmica, em 1947, em voos de avião, por Perkins, do Imperial College, bem como pela equipe de Powell na Universidade de Bristol, no Pic du Midi (França) e, pouco depois, no monte Chacaltaya (Bolívia), por iniciativa de Lattes, então jovem membro da equipe de Powell;¹⁹

ii) no acelerador do Laboratório de Radiação, na Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos), em 1948, pela dupla Lattes e Eugene Gardner, chefe do grupo de emulsões daquele laboratório.²⁰

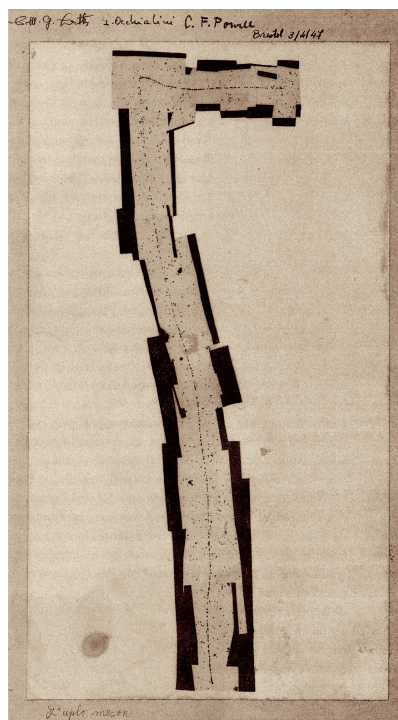


Figura 5. Fotomicrografia do primeiro decaimento observado de um méson pi (traço horizontal, acima) em um múon (traço vertical), obtida pela equipe do Laboratório H. H. Wills, em Bristol, e publicada em *Nature* de 24 de maio de 1947. (Crédito: Alfredo Marques/CBPF)

¹⁹ Ver, por exemplo, Perkins [42]; Occhialini e Powell [40]; Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell [34]; Lattes, Occhialini e Powell [35]; Lattes, Occhialini e Powell [36].

²⁰ Ver, por exemplo, Gardner de Lattes [26]; Burfening, Gardner e Lattes [15].



Figura 6. Lattes (esq.) e Gardner ao lado do sincrociclótron de 184 polegadas na Universidade da Califórnia, em Berkeley, onde os dois detectaram, no início de 1948, os primeiros mésons pi produzidos em aceleradores. (Crédito: Arquivo CBPF)

PARTE II BRASIL: POLÍTICA, CIÊNCIA E EMULSÕES

No Brasil, os feitos de Lattes foram explorados politicamente em uma campanha para a promoção da pesquisa científica. Em torno desse ideal, em um movimento que teve à frente o físico José Leite Lopes, foi criada uma aliança, reunindo intelectuais, militares, industriais, professores universitários, artistas e jornalistas.²¹



Figura 6. A promoção dos feitos de Lattes por Leite Lopes fica clara, por exemplo, no artigo ‘Novos horizontes para a física atômica’, para o suplemento ‘Ciência para Todos’, do jornal *A Manhã*. (Crédito: *A Manhã*)

Lattes, por sua vez, deve ser entendido em um contexto mais amplo da história da física no Brasil, no qual devemos ter como pano de fundo a criação da Universidade de São Paulo, para

²¹ Esse cenário político está relatado com detalhes em Andrade [3].

onde veio o físico ítalo-ucraniano Gleb Wataghin, em meados da década de 1930. Com Wataghin, iniciaram-se as pesquisas com raios cósmicos no Brasil, e foram obtidos os primeiros resultados de repercussão internacional.²²

No entanto, Wataghin realizou observações em raios cósmicos com contadores – ou seja, aparelhagem eletrônica – e não emulsões.²³ O emprego de detectores eletrônicos ocorreu mesmo durante a colaboração de seis anos de Occhialini – que se tornaria um dos maiores especialistas em emulsões nucleares da segunda metade do século passado – com Wataghin aqui no país.²⁴

Ao retomar dos Estados Unidos para o Brasil, em 1949, Lattes trouxe consigo emulsões expostas no acelerador de Berkeley. São essas chapas que deram origem, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), à Divisão de Emulsões Nucleares, cujos dois principais integrantes eram as físicas Elisa Frota-Pessôa e Neusa Amato (então, Margem), que iniciaram estudos sobre as formas de decaimento do pión. Um dos principais resultados dessas primeiras análises foi a determinação, com precisão, do modo preferencial (ou de maior probabilidade) de decaimento do pión positivo.²⁵ A importância desse resultado deve ser entendida no cenário em que os físicos começavam a esboçar uma teoria sobre a universalidade da força fraca, que contou com participação importante do físico brasileiro Jayme Tiomno.²⁶

Paralelamente, as emulsões foram incorporadas à pesquisa em física nuclear e radioatividade por Hervásio de Carvalho. Isso se deu primeiramente no Laboratório de Produção Mineral e, pouco depois, no CBPF, onde os laboratórios nessa linha de pesquisa foram igualmente longevos.²⁷ O principal resultado dessa outra linha se deu em 1975, quando, a partir de uma trajetória observada em uma emulsão carregada com sal de urânio, concluiu-se que núcleos desse elemento químico radioativo emitiriam fragmentos mais pesados que os núcleos de hélio (partículas alfa).²⁸ A partir dessa pressuposição, os membros do laboratório – todos eles

²² Por exemplo, Pompéia, Souza Santos e Wataghin [43]. Nesse artigo, eles defendiam – com base em dados obtidos em experimentos à base de contadores Geiger, circuitos de coincidência e absorvedores de alto número atômico – que a produção de mésons era múltipla (a colisão de dois núcleos produz vários mésons). Outros resultados afirmavam que a produção era plural (o choque de dois núcleos produz apenas um méson) – entre eles, estava o do físico húngaro L. Jánossy. Esses dois modelos poderiam ser testados com a colisão de prótons contra núcleos de hidrogênio, por exemplo, ou seja, prótons contra prótons. Mas a tecnologia da época – no final da década de 1930 – tornava esse tipo de reação nuclear difícil. Para finalizar esta breve contextualização, vale dizer que o desenrolar dos fatos mostrou que o primeiro modelo, o da produção múltipla, era o correto.

²³ Para mais detalhes sobre as pesquisas de Wataghin na área de raios cósmicos, ver Videira e Bustamante [60].

²⁴ É muito provável que a técnica das emulsões nucleares só tenha chamado a atenção de Occhialini com a chegada a Inglaterra, em 1944, e o início de sua colaboração com Powell, em Bristol. Dois artigos e duas entrevistas de Gariboldi sobre a vida e obra de Occhialini estão em Redondi, Sironi, Tucci e Vegni [49]. Nesse amplo volume, está também contribuição de Andrade sobre o período brasileiro do físico italiano.

²⁵ Frota-Pessôa e Margem [23]. Apesar da relevância dos resultados obtidos para uma formulação de uma teoria universal da força fraca, esse trabalho, até onde vai nosso conhecimento, não recebeu a devida atenção internacional, até pelo fato de ter sido publicado nos *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. A publicação nos *Anais* era, para aquela geração, uma forma de fortalecer a comunidade científica brasileira. É interessante notar que, no final da década de 1940, Elisa Frota-Pessôa e Neusa Amato (então, Margem) empregaram, sob sugestão de Lattes, emulsões para o estudo de problemas locais: distância média do voo do mosquito transmissor de doenças. Ver também Aragão, Frota-Pessôa e Margem [7] e [8].

²⁶ Tiomno (morto em janeiro de 2011) e Elisa Frota-Pessôa foram casados desde a década de 1950. Para mais detalhes sobre o papel de Tiomno na universalidade da força fraca, ver Bassalo e Freire Júnior [10] e Freire Júnior e Bassalo [22].

²⁷ Nossas pesquisas mostraram que, ainda em 1947, Lattes deu curso de duas semanas no Laboratório de Produção Mineral, no Rio de Janeiro, o que, acreditamos, motivou Hervásio de Carvalho a usar emulsões nucleares aplicadas a problemas da radioatividade – ver Erichsen [21]. Já em 1949, Hervásio de Carvalho lidava com emulsões do tipo NT4, recém-lançadas na Europa – ver De Carvalho [20] – e, naquele mesmo ano, iniciou seus trabalhos com Herman Yagoda nos Institutos Nacionais de Saúde dos Estados Unidos com emulsões expostas em foguetes.

²⁸ De Carvalho, Martins, Souza e Tavares [19].

experimentais – propuseram uma teoria baseada no efeito túnel para o que se convencionou chamar decaimento exótico, ou seja, emissão de fragmentos mais pesados que as partículas alfa.²⁹

A terceira linha – igualmente com existência prolongada – daria os primeiros passos no final da década de 1950. Ela nasceu do interesse da comunidade japonesa de raios cósmicos de ter acesso a um pico mais elevado que o monte Fuji (cerca de 3,7 mil metros). Essa comunidade pediu a Yukawa que assinasse carta endereçada a Lattes para viabilizar colaboração entre os dois países.

A colaboração, que ganhou o nome Colaboração Brasil-Japão (CBJ), iniciou-se no começo da década de 1960 e ampliou a infraestrutura do chamado Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya. Ao final daquela década, a CBJ havia sido responsável pelas descobertas dos chamados fenômenos exóticos (mirim, açu, guaçu, centauro etc.), ainda hoje mal compreendidos.³⁰

Descritas essas três linhas, podemos agora tentar estabelecer os motivos da adoção e da longevidade da técnica no Brasil.

POR QUE TÃO LONGEVO?

As emulsões nucleares foram introduzidas no Brasil no auge dessa técnica, a saber: nas produções natural e artificial do pión em Bristol e Berkeley no final da década de 1940. O método era barato, relativamente simples e havia atingido sua maturidade em termos de confiabilidade, bem como em relação ao domínio dele pelos físicos experimentais, tanto no que diz respeito à exposição quanto à revelação e observação das chapas ao microscópio. No entanto, pouco mais de uma década depois desse auge, a técnica, nos Estados Unidos e na Europa, ficou praticamente restrita a nichos. Um deles foi a pesquisa com neutrinos, em função da excelente resolução espacial (cerca de 1 micrômetro) das emulsões nucleares, a mais alta entre todos os detectores de partículas construídos até hoje pelos físicos.

Vários fatores colaboraram para o ocaso da técnica. Os principais deles, a nosso ver:

i) a entrada em cena de novos detectores (por exemplo, câmara de bolhas, cintiladores de estado sólido etc.), desenvolvidos para situações específicas de pesquisa, para as quais as emulsões não podiam ser empregadas (por exemplo, o estudo de partículas neutras, como o decaimento do pión neutro em dois fótons);

ii) a reorganização da física tanto europeia quanto norte-americana em torno de aceleradores, nos quais o ‘detector-padrão’ passou a ser a câmara de bolhas, a partir de meados da década de 1950;³¹

iii) a impossibilidade dos físicos que lidavam com a técnica – por vezes, denominados emulsionistas – de adaptar a técnica à grande quantidade de partículas produzidas pelos aceleradores.³² Nesse aspecto, o encontro internacional de Pisa em 1955³³ representa um divisor

²⁹ O decaimento exótico hoje está comprovado para uma série de núcleos, porém não o foi para os núcleos de urânio. Para mais detalhes sobre a descoberta do CBPF e para posteriores comprovações experimentais e avanços teóricos, ver, por exemplo, Tavares, Roberto e Medeiros [59].

³⁰ O experimento Castor (sigla, em inglês, para *Centauro and Strange Objects Research*), um detector do LHC (Cern), tem como objetivo estudar os fenômenos exóticos, como os chamados centauros, detectados pela Colaboração Brasil-Japão na década de 1960.

³¹ As câmaras de bolhas permaneceriam nessa posição na física de partículas por cerca de 30 anos a partir de meados da década de 1950.

³² Exemplo dessas tentativas pioneiras está nos trabalhos de Blau na Universidade de Colúmbia, na década de 1950. Neles, ela e assistentes tentaram implementar a varredura dita semiautomatizada, que, no caso, exigia a presença de motor de passo controlado por pedal pelo operador do microscópio. Ver, por exemplo, Rudin, Blau e Lindenbaum [54]. Mais tarde, essa linha de automatização foi retomada por físicos em Nagoia (Japão) e, posteriormente, empregada no projeto Ópera, voltado para o estudo da oscilação de neutrinos.

³³ Ver *Proceedings of the International Conference on Elementary Particles*, Pisa [47].

de águas na história da física de partículas: foi justamente nesse encontro em que os dados vindos de aceleradores superaram significativamente aqueles vindos de raios cósmicos. Do ponto de vista histórico, é o início do fim da chamada ‘Era de Ouro’ da radiação cósmica.³⁴

É preciso lembrar que a técnica era trabalhosa, necessitando de grandes equipes de microscopistas para investigar o conteúdo das emulsões reveladas. Na Europa e nos Estados Unidos, a contratação desse tipo de profissional – ou seja, sem treinamento específico – foi preterida em favor do técnico profissional.³⁵ Com os aceleradores nos EUA e o CERN, na Europa, a física, na inércia da *Big Science*, passou a exigir graus mais altos de profissionalização do técnico, bem como alguma capacidade de gerenciamento e de liderança do pesquisador.

No entanto, no Brasil, à margem da *Big Science* e dos grandes aceleradores, com uma física ainda feita por vezes em bancadas, com grupos isolados, aos moldes daquele exercida antes da Segunda Guerra, havia espaço para a contratação – a baixos salários – dessas equipes de microscopistas – geralmente, formadas por mulheres³⁶ –, emulando basicamente o modelo empregado no Laboratório H. H. Wills, em Bristol, onde trabalhava Powell. Além disso, a técnica, como dissemos, era barata, portanto apropriada³⁷ para um Brasil em que a pesquisa em física começava a se institucionalizar e não havia financiamento sistemático para a ciência.

Para dois dos laboratórios do CBPF que lidavam com as emulsões – isto é, o Laboratório de Radioatividade e Detecção de Traços, bem como a Divisão de Emulsões Nucleares –, a técnica representava o uso e o domínio de um detector, já que, para um país como o Brasil, não havia nem ambiente, nem conhecimento técnico³⁸ para a construção de grandes máquinas – apesar das tentativas nesse sentido.³⁹ Desse modo, optou-se pela especialização em um detector (barato e simples) em detrimento da (impossibilidade de) construção de máquinas de grande porte. Isso, nos parece, fica demonstrado por meio de uma característica comum a esses dois grupos: ambos costumavam enviar emulsões para serem expostas em aceleradores dos Estados Unidos e da Europa.⁴⁰ Ainda que, na USP, logo após a Segunda Guerra Mundial, tenham sido compradas e instaladas máquinas para pesquisas em física nuclear – como um bétatron e um van

³⁴ O termo aqui representa a detecção das chamadas partículas estranhas, na segunda metade da década de 1940, com câmaras de nuvens em Manchester, por Butler e Rochester – ver Rochester e Butler e Butler [51] –, e a detecção, com emulsões nucleares, em Bristol, de mésons e léptons (múons, píons, káons). Mais recentemente, a expressão ‘Nova Era de Ouro’ da radiação cósmica tem sido comumente aplicada ao início dos trabalhos do chamado Observatório Pierre Auger, instalado nos pampas argentinos.

³⁵ Nos grandes laboratórios da Europa e dos Estados Unidos, a figura do técnico sem formação acadêmica, instruído quase individualmente pelos cientistas para a realização das tarefas, seria substituída pelo engenheiro ou cientista da computação. Preferencialmente, com doutorado.

³⁶ O primeiro fator nos parece ser de cunho financeiro: no CBPF, mulheres recebiam salários mais baixos que os dos homens. Porém, um argumento geralmente apresentado pelos empregadores – no caso, os chefes de laboratório ou das equipes de microscopistas – era o de que as mulheres eram mais pacientes e meticolosas para esse tipo de trabalho.

³⁷ Um dos líderes da linha de pesquisa que empregava emulsões, Hervásio de Carvalho, do CBPF, no Rio de Janeiro (RJ), defendia que o Brasil, país de poucos recursos para a ciência, deveria empregar técnicas adequadas à sua realidade – Odilon Antonio de Paula Tavares, em comunicação pessoal para um dos autores (CLV) deste artigo. O físico austríaco Guido Beck era da mesma opinião, e talvez isso explique o grande incentivo que ele tenha dado aos jovens físicos argentinos, quando de sua estada naquele país, para que lidassem com a técnica das emulsões nucleares, logo depois de tomar conhecimento dos resultados de Lattes na Europa e nos Estados Unidos. Para mais detalhes, ver Nussenzveig e Videira [39].

³⁸ Vale aqui ressaltar que a física de partículas depois da Segunda Guerra passou a contar com três especializações básicas: teóricos, experimentais e construtores de máquinas. O que queremos dizer com isso é que, no Brasil, da década de 1950, quando foi tentada construção de um acelerador de grande porte (400 MeV), não havia entre nós essa terceira categoria. Nem mesmo havia por aqui os equipamentos adequados (por exemplo, tornos de usinagem de grande porte apropriados para o trabalho).

³⁹ Para discussão sobre essas tentativas de construção de aceleradores no Brasil, ver, por exemplo, Andrade e Gonçalves [5]; Andrade e Werneck [6]. Para o contexto dessas iniciativas, ver Marques [37].

⁴⁰ Dado o tamanho reduzido das emulsões, esses envios eram muitas vezes feitos por correio convencional, como era o caso da estratégia adotada pelo grupo liderado por Hervásio de Carvalho, no CBPF.

de Graaff – a interação entre os grupos de emulsões do Rio com essas máquinas de São Paulo foi pouca.⁴¹

A terceira linha⁴², como dissemos, é a Colaboração Brasil-Japão. De todas as iniciativas com emulsões no Brasil, esta é a de maior envergadura em verbas e número de participantes. Vale ressaltar que o projeto, que envolveu a construção de um laboratório de raios cósmicos a 5 mil metros de altitude, ganhou momento na mesma época em que a Europa construía o CERN – e reestruturava sua física – e os Estados Unidos criavam laboratórios de grande porte, o que, vale citar, mudaria o aspecto social da prática científica naquele país e no continente europeu.



Figura 7. O modelo de equipes femininas de microscopistas criado por Powell na década de 1940 foi copiado por outros laboratórios de emulsões nucleares no mundo, inclusive no Brasil. A foto mostra uma equipe do Instituto Max Planck para a Física, então em Heidelberg (Alemanha). (Crédito: Arquivo Pessoal Juan G. e Beatriz Roederer)

⁴¹ Na década de 1980, a Divisão de Emulsões Nucleares do CBPF utilizou o Pélletron do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Porém, a colaboração durou pouco tempo. Especulamos que essas divergências entre a física em São Paulo e no Rio de Janeiro – e que, talvez, possa ser estendida para outras áreas científicas – têm razões que ultrapassam os limites da ciência. É assunto ainda a ser depurado pelos historiadores da ciência. Vale ressaltar que, no CBPF, a colaboração entre os grupos experimentais que empregavam emulsões nucleares foi praticamente nula, resultado de discordâncias pessoais ou ideológicas entre os chefes dessas equipes – também eles membros fundadores daquele centro de pesquisa.

⁴² Há, na verdade, uma 4ª linha de pesquisa no Brasil que emprega emulsões nucleares, a geocronologia, trazida ao Brasil, por Lattes, depois da estada deste na Itália, em meados da década de 1960. Essa linha, sediada no Instituto de Física Gleb Wataghin, da Universidade Estadual de Campina (SP), diferentemente das outras, continua ativa, produzindo resultados de pesquisa e teses de mestrado e doutorado.



Figura 8. Equipe de microscopistas do CBPF. (Crédito: Alfredo Marques/CBPF)

O Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya pode ser visto como um empreendimento de grande porte que talvez só tenha se tornado viável em função do prestígio que Lattes havia obtido na comunidade internacional de físicos e no governo brasileiro com as detecções (natural e, principalmente, artificial) do pión.⁴³ Guardadas as proporções, talvez a instalação de uma câmara de nuvens no monte Chacaltaya, a 5,5 mil de altitude, e, posteriormente, o início da CBJ sejam a primeira tentativa de se fazer *Big Science* no Brasil, pois essas iniciativas exigiram, por parte dos físicos brasileiros, a implantação de infraestrutura considerável na Bolívia, como o melhoramento de estradas até o alto do monte Chacaltaya, a construção de grandes edifícios e a instalação no local de energia elétrica com as características necessárias para o funcionamento dos equipamentos.⁴⁴ Além disso, o Laboratório de Física Cósmica – cuja infraestrutura era também utilizada pela CBJ – foi planejado para ser uma iniciativa de longo prazo, com base no capital financeiro e humano investido nele.⁴⁵

⁴³ Para detalhes sobre o início dos trabalhos brasileiros em Chacaltaya, ver Souza-Barros [56] e Andrade [4].

⁴⁴ Inicialmente, ainda na década de 1950, foi levada para lá uma câmara de bolhas que nunca chegou a funcionar.

⁴⁵ Os autores deste artigo (CLV e AAPV) tratarão em outro trabalho do salto de escala dado pela física experimental brasileira com a iniciativa do Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya.



Figura 9. Vista geral do Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya, na Bolívia. (crédito: Edison H. Shibuya/IFGW/Unicamp)

COMENTÁRIOS FINAIS

No caso das emulsões nucleares, o Brasil adotou uma técnica *pari passu* com a Europa e os Estados Unidos. Os motivos dessa adoção podem ser vistos basicamente como os seguintes:

i) tínhamos um físico brasileiro com bons conhecimentos da técnica – no caso, Lattes – e que havia obtido resultados com repercussão internacional;

ii) o método fotográfico aplicado à física era apropriado à realidade no Brasil, país em que havia se instalado, há pouco, a pesquisa em física de forma sistemática nas universidades e em centros de pesquisa; ou seja, além de relativamente simples, era barato.⁴⁶

O quadro político nacional e internacional também era propício. Como dissemos, as descobertas de Lattes foram capitaneadas por um grupo de cientistas – apoiado por intelectuais, artistas, empresários, jornalistas e militares nacionalistas – cujo objetivo principal era impulsionar a criação de um centro nacional de pesquisa básica em física.⁴⁷ Ainda no plano internacional, é preciso lembrar que a energia nuclear passou a ser vista, depois da Segunda Guerra, como instrumento de poder e autonomia política pelos governos.

Ao adotar a técnica das emulsões nucleares, parte da comunidade de física no Brasil optou pela especialização no detector, sendo que os aceleradores seriam ou as grandes máquinas no exterior, ou a própria natureza (radiação cósmica). Essa adoção foi alavancada aqui pelo fato de haver a possibilidade de contratação de mão de obra não especializada em ciência – o técnico sem formação universitária que deveria ser treinado pelos próprios pesquisadores. Além disso, o treinamento dos microscopistas não era nem complicado, nem longo.

É importante ressaltar que o Brasil acabou ‘contaminando’ outros países com a técnica das emulsões: Argentina, onde um pequeno grupo foi criado na Universidade de Buenos Aires,⁴⁸ e Bolívia, onde se instalou a CBJ. Para ambos, a técnica, barata e simples, era igualmente propícia.

A ciência no pós-guerra sofreu um processo de reestruturação financeira e social que se convencionou chamar *Big Science*. No Brasil, exceção para a Colaboração Brasil-Japão, a física

⁴⁶ Motivos semelhantes impulsionaram o uso da técnica das emulsões nucleares na Itália, segundo Baldo-Ceolin [9]. Vale ressaltar que as equipes de microscopistas de Powell tiveram seu fim ainda em 1957.

⁴⁷ Esse centro (CBPF), no entanto, acabou sendo montado fora da universidade, em função da estrutura arcaica desta, baseada em departamentos estanques. Para ampla descrição desse cenário, ver, por exemplo, Andrade [3].

⁴⁸ Para mais detalhes dessa história, ver Roederer [52] e Roederer [53].

até a segunda metade da década de 1990, quando entrou em funcionamento o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas (SP),⁴⁹ foi feita geralmente em pequenos grupos, seguindo o que foi – como ainda o é – comum em muitos países periféricos.

Flertamos com a possível entrada no Brasil no clube de países que deteriam grandes máquinas, em função do entusiasmo científico e político gerado pelos feitos de Lattes. Isso criou uma tensão entre duas correntes da comunidade brasileira de físicos. De um lado, estavam os que defendiam um ‘Brasil Grande’, membro de um grupo seletivo de países com aceleradores de grande porte e com o possível domínio da geração de energia pela fissão nuclear. De outro, aqueles que percebiam, apesar do entusiasmo inicial do movimento em prol da pesquisa em física no país, as fraquezas e carências inerentes à realidade brasileira.

Colocar o Brasil no seletivo grupo de países com grandes aceleradores estava além de nossas capacidades. Basta lembrar que a própria Europa precisou unir recursos financeiros e humanos de vários países para dar início ao CERN, que começou de forma modesta, quando comparado aos grandes laboratórios nacionais com aceleradores nos Estados Unidos, a partir da década de 1950.

A técnica das emulsões nos possibilitou obter resultados importantes, como o modo de decaimento do méson pi positivo, o decaimento exótico e os fenômenos exóticos na radiação cósmica. Ela teve como berço o CBPF, de onde saiu para ser empregada em outras universidades brasileiras e na América Latina.

A partir da década de 1990, as fontes de verbas para a pesquisa envolvendo emulsões nucleares começaram a se esgotar, até praticamente zerarem. A contratação de técnicos passou a ser por concurso e com a exigência, em geral, de formação universitária. Não havia mais espaço para a ‘informalidade’. Assim, à medida que a ciência também se profissionalizava no Brasil, a técnica das emulsões nucleares foi saindo de cena, permanecendo hoje apenas em nichos específicos, como a geocronologia ou como técnica complementar a outros detectores. No entanto, vista com esse distanciamento de mais de meio século, é possível dizer que foi uma técnica apropriada para a realidade científica brasileira e importante para que a física experimental estabelecesse seu ponto de partida e sua posterior institucionalização neste país.

AGRADECIMENTOS

Um de nós (AAPV) gostaria de agradecer ao CNPq pela bolsa de produtividade, e o outro (CLV), ao Instituto Ciência Hoje. Os autores registram o apoio continuado e eficiente da equipe da Coordenação de Documentação e Informação Científica do CBPF. Um de nós (CLV) gostaria de dedicar este artigo ao Prof. Dr. Odilon A. P. Tavares (CBPF) e ao Prof. Dr. Edison H. Shibuya (IFGW/Unicamp).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. Achinstein e O. Hannaway, *Observation, experiment, and hypothesis in modern physical science*. (MIT Press, Cambridge 1985).

[2] E. Amaldi, C. Castagnoli, G. Cortini, C. Franzinetti e A. Manfredini, *Il Nuovo Cimento* **1**, 492 (1955).

[3] A.M.R de Andrade, *Físicos, mésons e política: a dinâmica da ciência na sociedade* (Hucitec / MAST, São Paulo / Rio de Janeiro, 1999).

[4] A.M.R de Andrade, in: *Ciência, política e relações internacionais*, editado por Marcos Chor Maio (Fiocruz, Rio de Janeiro, 2004).

[5] A.M.R de Andrade e A. de M. Gonçalves, *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* **14**, 3 (1995).

⁴⁹ Para o início da *Big Science* na Argentina e no Brasil, ver Hurtado e Vara [31].

- [6] A. M. R. de Andrade e E. Werneck, *Mésons, prótons, era uma vez acelerador*, Documentário histórico gravado em vídeo (MAST, Rio de Janeiro, 1996).
- [7] M. Aragão, E. Frota-Pessôa e N. Margem, CBPF-Notas de Física, n. 4 (1952).
- [8] M. Aragão, E. Frota-Pessôa e N. Margem, (1955), Proceedings of Geneve Conference on Peaceful Applications of Atomic Energy, 140 (1955).
- [9] M. Baldo-Ceolin, Annual Review of Nuclear and Particle **52**, 1 (2002).
- [10] J. M. F. Bassalo e O. Frere Jr., Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 426 (2003).
- [11] M. Blau e K. Altenburger, Zeitschrift für Physik **12**, 315 (1922).
- [12] A. Bonetti, R. Levi-Setti, M. Panetti e G. Tomasini, Il Nuovo Cimento **10**, 345 (1953).
- [13] R. Brown, U. Camerini, P. Fowler, P. H. Muirhead, C. F. Powell e D. M. Ritson, Nature **163**, p 47 (1949).
- [14] R. Brown, U. Camerini, P. Fowler, P. H. Muirhead, C. F. Powell e D. M. Ritson, Nature **163**, 82 (1949).
- [15] J. Burfening, E. Gardner e C. M. G. Lattes, Physical Review **75**, 382 (1949a).
- [16] M. C. Bustamante e A. A. P. Videira, Quipu **8**, 325 (1991).
- [17] A. G. Carlson, J. Hooper e D. T. King, Philosophical Magazine **41**, 701 (1950).
- [18] J. Chadwick, A. N. May, T. G. Pickavance e C. F. Powell, Proceedings of the Royal Society of London Series A **183**, 1 (1944).
- [19] H. G. de Carvalho, J. B. Martins, I. O. Souza e O. A. P. Tavares, Anais da Academia Brasileira de Ciências **47**, 567 (1975).
- [20] H. G. de Carvalho, Physical Review **76**, 1.729 (1949).
- [21] A. I. Erichsen, *Relatório da diretoria 1947*. Boletim 32. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura / Departamento de Nacional de Produção Mineral / Divisão de Fomento da Produção Mineral (1948).
- [22] O. Freire Jr. e J. M. F. Bassalo, A Física na Escola **9**, 44 (2008).
- [23] E. Frota-Pessôa e N. Margem, Anais da Academia Brasileira de Ciências **22**, 371 (1950).
- [24] P. L. Galison, Physics Today , **50**, 36 (1997).
- [25] P. L. Galison, *Image & Logic* (University of Chicago Press, Chicago, 1997).
- [26] E. Gardner e C. M. G. Lattes, Science **107**, 270 (1948).
- [27] L. Gariboldi, *Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993) – a cosmic ray hunter from Earth* (tese de doutorado defendida na Università degli Studi di Milano, Milão, 2004).
- [28] R. W. Gurney e N. F. Mott; Proceedings Royal Society of London A **164**, 151 (1938).
- [29] W. Heitler, C. F. Powell e G. E. F. Fertel, Nature, **144**, 283 (1939).
- [30] W. Heitler, C. F. Powell e H. Heitler, Nature **146**, 65 (1940).
- [31] D. Hurtado de Mendoza e A. M. Vara, Science, Technology & Society **12**, 27 (2007).
- [32] R. Jenkins, *Some interrelations of science, technology, and the photographic industry in the nineteenth century* (Tese de doutorado defendida na Universidade de Wisconsin, 1966).
- [33] R. Jenkins, *Images and enterprise, technology and the American photographic industry, 1839-1925* (John Hopkins University Press, Baltimore, 1975).
- [34] C.M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini e C. F. Powell, Nature **159**, 694 (1947).
- [35] C.M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini e C. F. Powell, Nature **160**, 453 (1947).
- [36] C.M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini e C. F. Powell, Nature **160**, 486 (1947).

- [37] A. Marques, *CBPF: da descoberta do méson- π aos dez primeiros anos* (Série Ciência e Sociedade, CBPF, Rio de Janeiro, 1997).
- [38] R. de A. Martins, *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* **1**, 29 (2003).
- [39] H. M. Nussenzveig e A. A. P. Videira (eds.), *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **67**, Supl. 1 (1995).
- [40] G. P. S. Occhialini e C. F. Powell, *Nature* **159**, 93 (1947).
- [41] E. Ostroff (ed.), *Pioneers of photography – their achievements in science and technology* (SPSE, Springfield, 1987).
- [42] D. H. Perkins, *Nature* **159**, 126 (1947).
- [43] P. A. Pompéia, M. D. Souza Santos e G. Wataghin, *Physical Review* **57**, 61 (1940).
- [44] C. F. Powell, *Endeavour* **1**, 151 (1942).
- [45] C. F. Powell, *Proceedings of the Royal Society A* **181**, 344 (1943).
- [46] C. F. Powell e G. E. F. Fertel, *Nature* **144**, 115 (1939).
- [47] *Proceedings of the International Conference on Elementary Particles, II* *Novo Cimento* **4**, serie X, supplement, 743 (1955).
- [48] D. J. Prowse e M. Baldo-Ceolin, *Physical Review Letters*, **1**, 179 (1958).
- [49] P. Redondi, G. Sironi, G. Tucci e G. Vegni, *The scientific legacy of Beppo Occhialini* (Bologna/Berlin-Heidelberg Società Italiana di Fisica/Springer, 2006).
- [50] M. Rentetzi, *Trafficking materials and gendered experimental practices: radium research in early 20th century* (Columbia University Press, New York, 2007).
- [51] G. D. Rochester e C. C. Butler, *Nature* **160**, 855 (1947).
- [52] J. G. Roederer, *Ciencia Hoy* **12**, 38 (2002).
- [53] J. G. Roederer, *Physics Today* **56**, 32 (2003).
- [54] R. Rudin, M. Blau e S. J. Lindenbaum, *Review of Scientific Instruments* **21**, 978 (1950).
- [55] M. M. Shapiro, *Review of Modern Physics* **13**, 58 (1941).
- [56] F. Souza-Barros, in: *Os 60 anos do CBPF e a gênese do CNPq*, editado por A. Troper, A. A. P. Videira e C. L. Vieira (CBPF, Rio de Janeiro, 2010).
- [57] B. Strohmaier e R. Rosner (eds), *Marietta Blau – estrellas de desintegración – biografía de pionera de la física de partículas*. (Instituto Politécnico, México D.F., 2006).
- [58] R. Stuewer, in: P. Achinstein e O. Hannaway, *Observation, experiment, and hypothesis in modern physical science*. (MIT Press, Cambridge 1985).
- [59] O. A. P. Tavares, L. A. M. Roberto e E. L. Medeiros, *Physica Scripta* **76**, 375 (2007).
- [60] A. A. P. Videira e M. C. Bustamante, *Quipu* **10**, 263 (1993).
- [61] C. L. Vieira, ... *Um mundo inteiramente novo se revelou: a técnica das emulsões nucleares* (Tese de doutorado defendida no Programa Interdisciplinar de História das Ciências, das Técnicas e Epistemologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009).
- [62] T. R. Wilkins e H. J. St. Helens, *Physical Review* **54**, 783 (1938).

* Artigo aprovado para publicação na Revista Brasileira de Ensino de Física.