

## César Lattes: O Legado de um Brasileiro para a Física de Partículas

*César Lattes: The legacy of a Brazilian for Particle Physics*

Vera Aparecida Fernandes Martin\* e

Paulo César da Rocha Poppe<sup>ORCID</sup>, e Marildo Geraldete Pereira<sup>ORCID</sup>

*Observatório Astronômico Antares, Museu Antares de Ciência e Tecnologia – UEFS  
Rua da Barra, 925, Jardim Cruzeiro, Feira de Santana–BA. 44015-430*

Angela Oliveira Tremarin, Anna Paula de Alencar Lima Pinto, Cyntia Cajado de Souza, Edivane Lima Fonseca Pergentino, Gleide Miriam Falcão Brito, Mirian Almeida de Menezes, Patrícia Ramos Santana, Rafael Jesus Batista, Renata Lima Marinho, Rodrigo de Queiroz Oliveira

*Centro Estadual de Educação Profissional em Saúde do Centro Baiano  
Rua Juracy Magalhães Junior, s/n, Centro, Feira de Santana–BA. 44135000*

Valéria Santos Corbacho, Welberton Rios da Silva

*Centro Integrado de Educação Assis Chateaubriand  
Rua Doutor Arivaldo de Carvalho, s/n, Sobradinho, Feira de Santana–BA. 44028-120*

Maria Amanda Guimarães Santos

*Colégio São Rafael, 152, São Marcos, Salvador–BA. 41253-190*

Nelson Vani Leister

*Departamento de Astronomia – USP  
Rua do Matao 1226, São Paulo–SP. 05508-090*

Maximiliano Faúndez-Abans, Mariângela de Oliveira-Abans

*Laboratório Nacional de Astrofísica – MCTI  
Rua Estados Unidos, 154, Itajubá–MG. 37504-364*

Priscila Freitas-Lemes, Irapuan Rodrigues

*Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP  
Av. Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos–SP. 12244-000*

(SUBMETIDO: [30/10/2024] - ACEITO: [18/03/2025] - PUBLICADO: [07/05/2025])

O ano de 2024 marca o centenário de nascimento (11/07/1924) do ilustre físico experimental que será eternamente lembrado, o curitibano Cesare Mansueto Giulio Lattes, mais conhecido como César Lattes. Seu legado encontra-se vivo não apenas no campo da Física de Partículas, mas também no papel desempenhado como um grande líder acadêmico e científico em nosso país, promovendo a criação de instituições fundamentais como o CBPF (1949) e o CNPq (1951). Esta contribuição descreve parte da brilhante trajetória no campo da Física Experimental, iniciada em 1943 com o bacharelado em Física na FFCL-USP, até a descoberta em 1947 da partícula méson- $\pi$  (píon) no H.H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol (Inglaterra), partícula prevista em 1935 pelo físico teórico japonês Hideki Yukawa. Tal partícula é responsável por mediar a interação entre prótons e nêutrons no núcleo do átomo, mantendo-o coeso.

**Palavras-chaves:** Física Experimental; Raios Cósmicos; Méson  $\pi$ .

The year 2024 marks the centenary of the birth (July 11, 1924) of the illustrious experimental physicist who will be forever remembered, Cesare Mansueto Giulio Lattes, better known as César Lattes, from Curitiba. His legacy lives on not only in the field of Particle Physics, but also in the role he played as a great academic and scientific leader in our country, promoting the creation of fundamental institutions such as the CBPF (1949) and the CNPq (1951). This contribution describes part of the brilliant trajectory in the field of Experimental Physics that began in 1943

with a bachelor's degree in Physics from the FFCL-USP until the discovery in 1947 of the  $\pi$  (pion) meson particle at the H.H. Wills Physical Laboratory of the University of Bristol (England), particle predicted in 1935 by the Japanese theoretical physicist Hideki Yukawa. This particle is responsible for mediating the interaction between protons and neutrons in the nucleus of the atom, keeping it cohesive.

**Keywords:** Experimental Physics; Cosmic Rays; Meson  $\pi$ .

## I. Introdução

Na Itália, Giuseppe Lattes, um jovem de Turim, embarca para o Brasil, Paraná, e começa em 1912 (com 19 anos) a sua modesta vida trabalhando em um banco, seguindo a tradição do seu pai que havia trabalhado e posteriormente herdado um banco em Turim, Banco Lattes [1]. No entanto, sua estadia em Curitiba foi breve. A data de 28 de julho de 1914 dava início ao que ficou conhecido como **Primeira Guerra Mundial**, um conflito bélico global que assolou a Europa e perdurou até o dia 11 de novembro de 1918. Giuseppe e tantos outros voluntários, seguem de navio para a Itália e reforçam o objetivo na época que consistia em expulsar os austríacos que ocupavam a região nordeste do país.

Apesar do contexto bastante adverso, Giuseppe conhece Carolina Maroni, uma jovem de Alessandria, uma comuna italiana da região do Piemonte, que se tornaria a sua futura esposa. O destino poderia manter aquele jovem casal na Itália, mas o pós-guerra italiano foi marcado por um governo liderado por um partido político conservador, radical e de ideologia extrema-direita, o Fascismo.

Com o início das leis raciais, Giuseppe toma a decisão de retornar (com Carolina) para Curitiba e, em 1921, recomeça o seu trabalho como gerente (encarregado do câmbio) do Banco Francês e Italiano [1]. Com a vida segura e organizada, o casal de imigrantes teve dois filhos, Davide Primo Lattes (1923-1999) e Cesare Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), do qual o destino os levariam para a cidade de São Paulo. Em particular, César Lattes obteria a formação básica e seguiria para uma rápida jornada científica iniciada no Curso de Física do Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras (FFCL) da Universidade de São Paulo (USP, criada em 1934).

Em 1943, com 19 anos, concluiria a graduação e iniciaria a trajetória de pesquisa científica no campo da Física Experimental, influenciado pelo físico ita-

liano Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993) [2] que, ao fugir do Fascismo, tornava-se professor na FFCL-USP em 1937. A partir dessa escolha, ou seja, de seguir o viés experimental, César Lattes deixaria para sempre o seu legado na Física de Altas Energias, também denominada de Física de Partículas, com a descoberta do méson- $\pi$  (píon) em 1947 [3], uma partícula subatômica instável (sofre desintegração, ou seja, decaimento píon  $\mapsto$  múon) que desempenha uma função crucial no núcleo atômico como mediador da interação entre prótons e nêutrons.

O impulso necessário para a investigação e a descoberta da partícula méson- $\pi$  teve como pedra fundamental o artigo publicado em 1935 pelo físico teórico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) [4], no qual explicava o curto alcance de uma força nuclear que agia entre os componentes (núcleons [5]) do núcleo atômico. Em seu trabalho, Yukawa postulou a existência de uma partícula, denominada inicialmente de  $U$  (*baryton*, *yukon*, *mésotron* e, mais tarde, *méson- $\pi$*  ou *píon*), com massa da ordem de  $m_U c^2 = \hbar c/r_0 \approx 200$  MeV (com  $r_0$  da ordem de  $10^{-13}$  cm, ou seja, de curto alcance). Em termos da massa do elétron,  $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$  kg, era uma partícula estável, ou seja, com decaimento muito longo, maior que  $6,6 \times 10^{28}$  anos. Em termos da massa, o valor estimado por Yukawa foi de  $m_U \approx 200 m_e$ .

Apesar da descoberta do méson- $\pi$  ocorrer 12 anos após a hipótese de Yukawa e representar um marco fundamental que consolidou a carreira científica de César Lattes aos 23 anos, não devemos apenas associá-lo a um “exclusivo pesquisador de laboratório”, imerso apenas em um mundo de técnicas, análise de dados e arranjos experimentais. Na verdade, existia entre os físicos brasileiros da época um sentimento genuíno que, de acordo com Tavares [6], deve ser interpretado com um *nacionalismo científico*, devidamente ancorado no valor da ciência.

Então, como um verdadeiro líder científico, César Lattes desempenharia um papel crucial no desenvolvimento da pesquisa científica no país. Como professor por onde passou, CBPF, UFRJ, USP e UNICAMP, foi um defensor incansável do investimento em ciência e educação, trabalhando para for-

\* E-mail: vmartin@uefs.br

talecer as instituições acadêmicas e os programas de pesquisas associados em todo o país. Sua liderança e influência foram fundamentais para o crescimento e reconhecimento da comunidade científica brasileira, sendo uma das principais personalidades por trás da criação do CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas) e do importante Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), os quais devemos, dentre outros centros, institutos e universidades, manter vivos e pulsantes contra as ameaças constantes dos descrentes da ciência e dos oportunistas de plantão.

No que segue, apresentamos alguns dos caminhos (um pouco histórico) que permitiram a descoberta do méson- $\pi$  no final da década de 1940, envolvendo uma série de experimentos iniciados com a única fonte disponível de partículas de alta energia até o início da década de 50: a radiação cósmica.

Além das referências bibliográficas que fazem parte desta contribuição, recomendamos fortemente a leitura da série de artigos produzidos pela Revista Ciência & Cultura, “*Centenário de Cesar Lattes (2024)*”, sobre a vida e a carreira científica de César Lattes. A revista é um periódico da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), de acesso aberto (Revista Ciência e Cultura).

Destacamos também o artigo: “*Edição Comemorativa dos 70 anos de Méson- $\pi$  com César Lattes*”, publicado pelo CBPF na revista *Ciência e Sociedade* [7] que trata sobre reflexões, discussões, debates de temas pertinentes à educação, política, memória e humanidades no âmbito da ciência e da cultura. Em particular, também registramos o uso do livro do Prof. Dr. José Maria Filardo Bassalo [8] (1935-), o qual foi de grande importância para a construção cronológica de alguns dos eventos (publicações) que aconteceram no campo da radiação cósmica, desde a descoberta em 1912 dos raios cósmicos até a detecção da partícula méson- $\pi$  em 1947.

## II. Radiação Cósmica: uma Visão Geral

Os raios cósmicos [9] representam partículas subatômicas extremamente rápidas e com grandes energias, oriundas do espaço sideral e que entram continuamente na parte superior da atmosfera da Terra. São, na verdade, íons [10] de átomos diversos cuja abundância reflete a própria composição do Universo.

Os raios cósmicos de baixa energia são gerados nas superfícies das estrelas à medida que as partículas ionizadas são aceleradas pelas ondas de choque e campos eletromagnéticos em rápida expansão associados a erupções de massa coronal. O Sol é uma

fonte extremamente volátil dessas partículas. Durante períodos de alta atividade solar, atualmente estamos atravessando o ciclo solar 25, ou seja, o 25º desde 1755, o fluxo local de partículas carregadas pode aumentar entre 100 e 1 milhão de vezes e durar até vários dias.



Figura 1 – Cometa Halley. Esquerda: registro em 1910. Direita: registro em 1986. Fonte: NASA: “95 Years Ago: Halley’s Comet and the Battle of Hastings”. Veja no link: Halley’s Comet and the Battle of Hastings.

Em geral, prótons e elétrons compõem um fluxo contínuo eletricamente carregado que escapam da atração gravitacional, no qual denominamos de “vento solar”, termo usado pela primeira vez em 1958 pelo astrofísico norte-americano Eugene Newman Parker (1927-2022). O vento solar é responsável pelo fato das caudas dos cometas estarem sempre orientadas na direção oposta ao Sol, como observado na Figura 1, referida ao cometa Halley.

Essas partículas são energizadas por altas temperaturas na Coroa (a camada mais externa do Sol) e são ejetadas com velocidades que variam de 300 a 800 km/s. Anualmente, o Sol libera uma considerável parcela de sua massa (cerca de  $10^{13} M_{\odot}$ ) na forma de vento solar e, ao nível da órbita da Terra, é constituído quase exclusivamente ( $\sim 90\%$ ) de núcleos de Hidrogênio (prótons).

No caso dos raios cósmicos de alta energia, as partículas são aceleradas por fortes campos eletromagnéticos em torno de objetos como pulsares e magnetares, ou por eventos cataclísmicos, como colisões de estrelas, explosões de supernovas, discos de acreção e jatos polares gerados por buracos negros supermassivos em núcleos galácticos ativos (AGN na sigla em inglês). Algumas dessas fontes extragalácticas estudadas foram descobertas pelo Observatório de Raios Cósmicos Pierre Auger (PAO) [11]. Em particular, as explosões de supernovas na Via Láctea podem chegar a  $10^{18}$  eV [12].

Como as partículas de raios cósmicos são carregadas e desviadas pelos campos magnéticos de objetos astrofísicos, a direção da fonte original não pode ser diretamente determinada. Entretanto, vale lembrar que as ondas eletromagnéticas, em todas as frequências, geralmente não são afetadas pelos

campos magnéticos em termos de sua propagação e frequência no espaço livre. Efeitos como a rotação de Faraday e o efeito Zeeman ocorrem sob condições específicas envolvendo interações com materiais ou

partículas carregadas, mas não constituem uma mudança direta na frequência ou velocidade de propagação devido ao próprio campo magnético. Logo, medidas indiretas podem ser realizadas.



Figura 2 – Pacini realizando medidas em 22 de outubro de 1910. Fonte: Wikimedia Commons: CERN Taxonomy.

### A. Eletroscópios e Eletrômetros

O físico francês Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), amplamente conhecido nos Cursos de Física III e Eletromagnetismo pelas descobertas nos campos da eletricidade e do magnetismo, apresentou em 1785 na Academia Real de Ciências da França três relatórios basilares sobre esses dois temas. Em particular, no terceiro memorial, Coulomb ao descrever um experimento quantitativo, uma balança de torção que permitia medir atrações e repulsões elétricas, além de deduzir a lei que as governa, mostrou que o dispositivo descarregava espontaneamente devido à ação do ar, e não devido a um isolamento defeituoso.

Em 1850, o físico italiano Cano Matteucci (1811-1868) e mais tarde (1879) o químico e físico britânico

William Crookes (1832-1919), mostraram que a taxa de descarga espontânea medida por Coulomb diminuía em pressões atmosféricas mais baixas. A procura de uma explicação para a natureza desta descarga espontânea abriu, de certa forma, o caminho para a descoberta dos raios cósmicos, as partículas de alta energia provenientes do espaço sideral.

No final do Século XIX, os físicos alemães Julius Elster (1854-1920) e Hans Friedrich Geitel (1855-1923), ao estudarem a condução elétrica através do ar em 1899, descobriram que, ao envolver um eletroscópio [13] de folha de ouro com uma caixa de metal espessa, a descarga espontânea era reduzida. A partir desta observação, concluíram que a descarga era devida a agentes ionizantes altamente penetrantes e de fora do recipiente. Mas, de onde?

Para testar se a radiação ionizante era originada

fora da atmosfera, em 1901, o físico escocês Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), cujo orientador foi o famoso físico britânico J. J. Thomson (1856-1940), Nobel de Física em 1906, realizou várias medidas da radioatividade natural usando um eletroscópio dentro de um antigo túnel ferroviário na Escócia. De acordo com os resultados esperados, se a origem da radiação fosse externa à Terra, Wilson deveria esperar uma redução significativa dentro do túnel, quando comparado com as medidas de fora,

totalmente expostas. No entanto, não foi percebida tal redução. A comunidade científica, entretanto, rejeitou amplamente a hipótese de uma 'teoria extraterrestre', baseada nas observações de Wilson. Cecil Frank Powell (1903-1969), um dos personagens desta contribuição e Nobel de Física em 1950 pelo desenvolvimento do método fotográfico para estudo de processos nucleares e por descobertas relacionadas aos mésons, foi orientado no doutorado por C.T. Rees Wilson na Universidade de Cambridge.



Figura 3 – As observações de Victor Hess (ao centro no balão) que levaram a descoberta dos raios cósmicos eram feitas em balões equipados com instrumentos muito sensíveis (eletrometros). Fonte: Manchete do jornal *The New York Times*, com o título: *On Its Centenary, Celebrating a Ride That Advanced Physics. Victor Hess and the Cosmic Rays*.

Em 1909, Theodor Wulf (1868-1946), padre jesuíta e físico alemão, projetou e construiu um instrumento que media a carga elétrica quantitativamente, um eletrometro [14], mais sensível e de fácil

transporte do que os eletroscópios de folha de ouro usados na época. De posse do instrumento, Wulf mediu a ionização do ar em vários períodos do dia e locais, concluindo que os seus resultados eram con-

sistentes com a hipótese de que a radiação penetrante era causada por substâncias radioativas nas camadas superiores da crosta terrestre [15].

Wulf começou, então, a medir as mudanças na radioatividade com a altura para compreender a origem da radiação. Sua hipótese era muito trivial: se a radioatividade viesse da Terra, ela deveria diminuir com a altura. Então, em 1909, o eletrômetro foi levado ao topo da Torre Eiffel [16] a quase 330 m de altitude, onde a intensidade da radiação diminuiu para menos da metade ( $3,5 \text{ íons cm}^{-3}$ ) do seu valor observado em solo ( $6,0 \text{ íons cm}^{-3}$ ). Apesar da medida, o valor observado foi muito pequeno para confirmar a hipótese extraterrestre.

De acordo com Longair [17; 18], se a ionização fosse devida aos raios- $\gamma$  originários da superfície da Terra, a intensidade dos íons deveria ter diminuído para metade em torno de 80 m.

Na Itália, Domenico Pacini (1878-1934), professor de Física Experimental da Universidade de Bari, realizou uma série de medidas para determinar a variação da velocidade de descarga de um eletroscópio (e, portanto, da intensidade da radiação) enquanto o mesmo estava imerso em uma caixa no mar perto da Academia Naval na Baía de Livorno (a Marinha italiana apoiou a investigação) [19]. A partir dos resultados, Pacini descobriu que a descarga era significativamente mais lenta do que aquela medida na superfície (veja a Figura 2). Como conclusão, sugeriu que uma porção significativa da radiação penetrante deve ser independente da emissão da crosta terrestre, sendo mais um indício em direção a origem da radiação, ou seja, de fora da Terra.

Então, para medir a radiação ionizante distante da superfície da Terra, a primeira década do século XX foi marcada por pesquisas envolvendo vôos em balões. Um desses pioneiros, o físico alemão Albert Gockel (1860-1927), mediu os níveis de radiação ionizante até uma altura de 3.000 metros e concluiu que a ionização não diminuía com a altura e, conseqüentemente, não poderia ter origem puramente terrestre. O termo “*kosmische Strahlung*”, radiação cósmica, foi então apresentada.

## B. Medidas em Balões

Na mesma linha investigativa de Pacini e Gockel, o físico austríaco-norte-americano Victor Franz Hess (1883-1964) também iniciaria uma série de vôos em balões para medir a taxa de radiação na atmosfera (Figura 3). Seu objetivo consistia em encontrar a fonte de radiação ionizante previamente registrada e discutida até então pelos diversos pesquisadores.

Em um dos vôos realizados em 1911, o balão

atingiu uma altitude de cerca de 1.100 m, mas Hess também não encontrou nenhuma mudança significativa na quantidade de radiação em comparação com o nível do solo. Então, em 17 de abril de 1912, Hess subiu até 5.300 m durante um eclipse parcial do Sol [20]. Como a ionização da atmosfera não diminuiu durante o eclipse, pelo contrário, a corrente aumentou no eletroscópio, ele concluiu que a fonte da radiação não poderia ser o Sol, ou seja, deveria surgir de um lugar mais distante no espaço. Hess também notou que a intensidade desta radiação não era modificada se a medida fosse feita durante o dia ou a noite.

Como a taxa de descarga aumentava à medida que o balão voava em altitudes mais elevadas, ele também concluiu em 1912 que a origem não poderia ser terrestre. Portanto, no alto da atmosfera existia uma fonte natural de partículas de alta energia, a qual denominou de “ultra-radiação”. Hess então comparou e publicou os cálculos teóricos dos coeficientes de absorção da radiação com os valores experimentais medidos no solo e em balões [21]-[23].

Entre 1913 e 1914, um outro físico e compatriota alemão, Werner Heinrich Gustav Kollhörster (1887-1946), repete os experimentos de Victor Hess. Kollhörster subiu de balão a uma altitude ainda maior (cerca de 9 km) e confirmou os resultados anteriores de Hess [24] de que a taxa de ionização dos raios cósmicos era maior naquela altitude do que ao nível do mar (Figura 4). Esta foi uma evidência decisiva de que a fonte desses raios ionizantes surgia acima da atmosfera da Terra.

As investigações foram interrompidas a partir de 28 de julho de 1914 até o término da Primeira Guerra Mundial, em 11 de novembro de 1918.

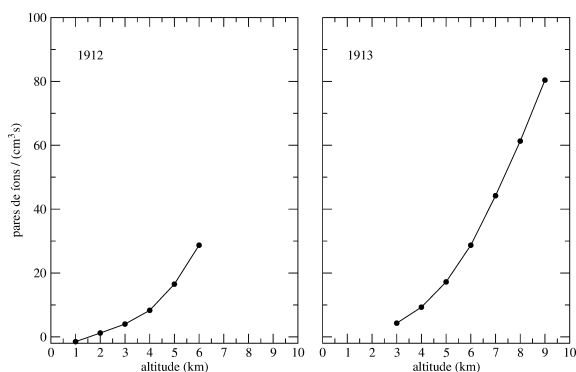


Figura 4 – Medidas realizadas por Kollhörster em diferentes altitudes que ratificaram as observações prévias de Hess. Fonte: Adaptado de Kollhörster (1915) [24].

Em uma série de artigos publicados (12) entre 1926 [25] e 1928 [26], o físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953) [27] investigou

a misteriosa radiação e cunhou o termo “raios cósmicos” para designar as partículas provenientes do espaço sideral.

Existem indícios de que Pacini e Hess conheciam os respectivos trabalhos. Pacini morreu em 1934, dois anos antes do Prêmio Nobel ser concedido a Victor Hess pela descoberta. Embora Hess seja lembrado como o descobridor dos raios cósmicos, a investigação simultânea realizada por Domenico Pacini é, infelizmente, esquecida na história da ciência.

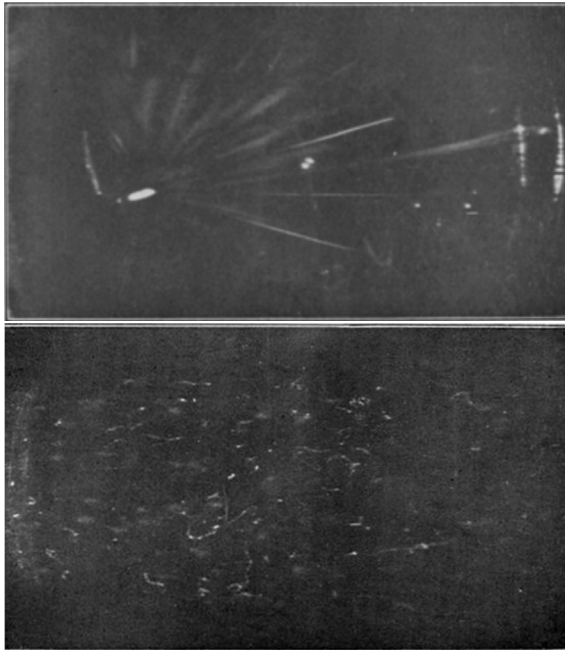


Figura 5 – Superior: rastros deixados na nuvem condensada pela passagem de partículas alfa (com a mesma estrutura de átomos de He). Inferior: imagem comparativa produzida por fontes de raios-X, com pontos totalmente dispersos. Fonte: C.T. Rees Wilson (1911) [28].

### C. A Câmara de Nuvens

A câmara de nuvens foi fundamental na história da Física de Partículas e dos raios cósmicos. Permiteu, pela primeira vez, registrar partículas carregadas individuais nos ‘chuveiros’ de partículas secundárias que são produzidas quando os raios cósmicos atingem as partículas na alta atmosfera da Terra.

Wilson, que já realizava medidas na década anterior da radiação ionizante, desenvolve o dispositivo que, originalmente, empreendeu para estudar fenômenos atmosféricos. Em abril de 1911 [28], apresentou o método e suas primeiras fotografias com os rastros de partículas na Royal Society de Londres (Figura 5). Uma expansão do dispositivo foi

publicada no ano seguinte [29]. Pela invenção, Wilson recebeu o Prêmio Nobel de 1927.

A ideia básica com a câmara de Wilson é utilizar o fenômeno da condensação de vapor para tornar visíveis as trajetórias das partículas carregadas.

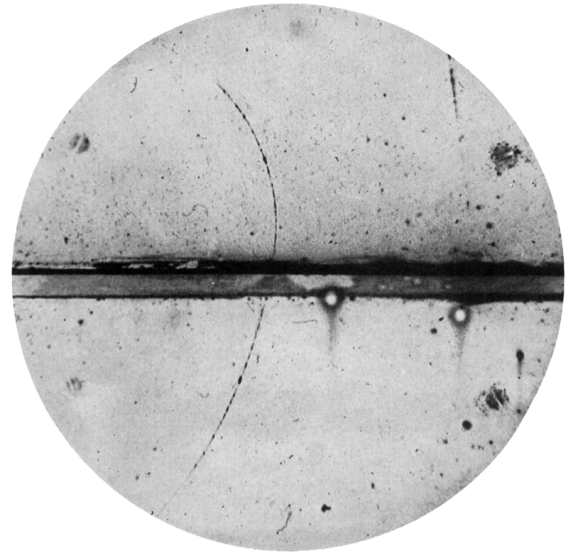


Figura 6 – Imagem usada por Carl Anderson para provar a existência do pósitron na câmara de nuvem. Fonte: C.D. Anderson (1933) [30].

A câmara consiste em um volume hermeticamente fechado e preenchido com gás ou vapor supersaturado, geralmente contendo álcool ou outro líquido volátil. Quando uma partícula carregada passa através do gás, ela ioniza o meio gasoso ao longo de sua trajetória, criando assim uma trilha de íons.

Em condições adequadas de pressão e temperatura, a trilha de íons atua como núcleo de condensação para o vapor na câmara, resultando na formação de uma nuvem de vapor visível. Essa nuvem de vapor segue exatamente a trajetória da partícula carregada, permitindo registros fotográficos ou visualizações diretas das trajetórias das partículas.

Parâmetros como a energia, a massa e a carga podem ser determinadas analisando o comprimento, a densidade e o tipo de traço deixado pela partícula ao atravessar a câmara. Logo, quanto maior e mais denso o traço, mais energética e mais massiva será a partícula. Quanto à carga, esta é determinada observando o desvio sofrido pela partícula na presença de campos elétricos e/ou magnéticos.

O interesse pelos raios cósmicos foi sendo intensificado e passou a ter resultados mais específicos, como a descoberta experimental feita em

1929 pelo físico soviético Dmitri Vladimirovich Skobeltsyn (1892-1990), o qual observou a presença de dois tipos de componentes (dura (*hard*) e mole (*soft*) na radiação [31]. Skobeltsyn foi também um dos pioneiros a usar a Câmara de Wilson no estudo do efeito Compton [32].

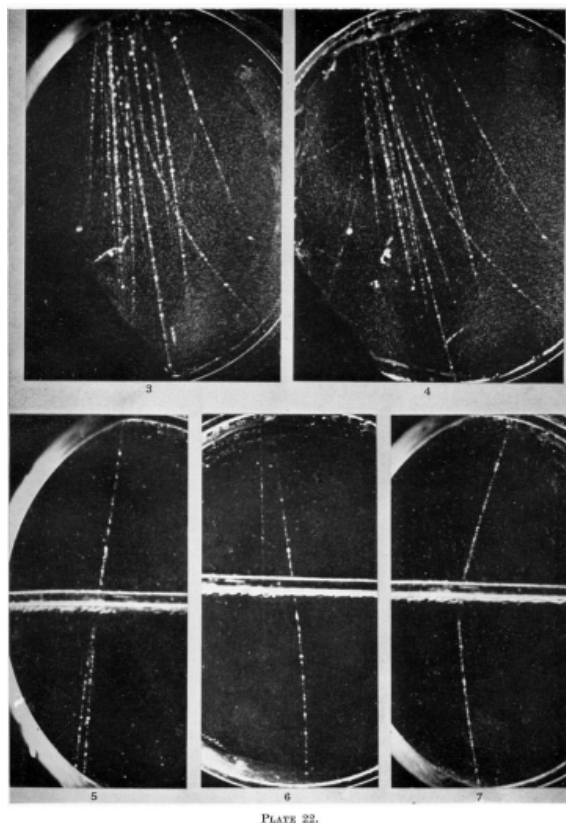


Figura 7 – Fotografia (Placa 22) realizada por Blackett e Occhialini confirmando a detecção de Anderson. Fonte: Blackett & Occhialini (1933) [33].

Durante a primeira metade do século XX, mesmo com as duas guerras mundiais, experimentos envolvendo raios cósmicos e a câmara de nuvens revelaram a existência de várias partículas fundamentais. Um exemplo marcante foi a descoberta em 1932 de uma partícula idêntica ao elétron, porém de carga positiva, o pósitron, a antipartícula do elétron [34; 35], cuja existência foi postulada pela primeira vez em 1927 pelo físico teórico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), Nobel de Física em 1933 e um dos fundadores da Mecânica Quântica e da Eletrodinâmica Quântica, e em 1928 pelo físico italiano Ettore Majorana (1906-1938).

A detecção do pósitron envolveu o estudo do desvio magnético de raios cósmicos depois de atravessarem placas de chumbo colocadas na Câmara de Wilson (Figura 6). A descoberta foi confirmada logo

depois (1933), Figura 7, pelos físicos Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974) e Giuseppe Paolo Stanislaio Occhialini [33], no que conhecemos hoje como ‘produção de pares’

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+, \quad (1)$$

que, de acordo com os autores, poderia ser a origem da ‘componente mole’ dos raios cósmicos de Skobeltsyn. Novas evidências do pósitron foram publicadas em seguida [36; 37].

#### D. O Detector Geiger-Müller

O diâmetro do átomo, no final do século XIX, já era conhecido e estimado em  $10^{-10}$  m. Era eletricamente neutro e possuía partículas leves, os elétrons. Contudo, não havia um modelo satisfatório que o descrevesse, ou seja, que fosse compatível com as fórmulas empíricas apresentadas por Balmer em 1885 [38] e por Rydberg em 1888 [39]. O modelo da estrutura atômica proposto até então era aquele formulado pelo físico britânico J.J. Thomson, referido na literatura como ‘pudim de passas’.

No entanto, tal modelo começou a desmoronar a partir dos experimentos realizados pelo físico e químico neozelandês naturalizado britânico, Ernest Rutherford (1871-1937), um dos discípulos de J.J. Thomson, em parceria com os seus dois estudantes da época: o alemão Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882-1945) e o inglês Ernest Marsden (1889-1970). Em 1909, ao realizarem o experimento da folha de ouro sob a supervisão de Rutherford, no qual dispararam um feixe de partículas alfa (núcleos de hélio) contra camadas de folhas de ouro com um dado número de átomos de espessura, confirmaram os cálculos de Rutherford (variação da probabilidade de espalhamento com o ângulo, a carga do núcleo e a energia cinética das partículas alfa) que iria basear o modelo atômico apresentado em 1911.

Embora o experimento contasse as cintilações produzidas em função dos ângulos de deflexão, via o tubo de Crookes [40], foi mais tarde, em 1929, que Geiger e o compatriota Walter Müller (1905-1979) desenvolveram um detector de ionização mais eficiente, ou seja, um tubo com gás que registrava partículas carregadas individualmente. O dispositivo, contador Geiger-Müller, era ideal para estudar raios cósmicos de alta energia. Por exemplo, dois desses tubos colocados um acima do outro poderiam registrar ‘coincidências’, isto é, quando uma partícula atravessa ambos, permitindo, assim, uma melhor definição do caminho de um raio cósmico.

Então, entre 1928-29, Walther Bothe (1891-

1957), laureado com o Nobel de Física em 1954, associou-se a Kolhörster e juntos usaram o detector Geiger-Muller para demonstrar que os raios cósmicos eram, na verdade, partículas carregadas [41]. A capacidade destas partículas de penetrar na atmosfera da Terra significava que elas deveriam ser altamente energéticas.

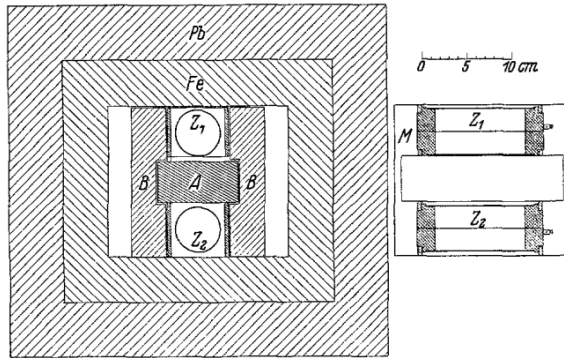


Figura 8 – Esquema do experimento empregado para registrar a coincidência. Fonte: Bothe & Kolhörster (1929) [41].

De acordo com o esquema do experimento proposto por Bothe-Kolhörster, Figura 8, as coincidências observadas entre os contadores  $Z_1$  e  $Z_2$  são produzidas por partículas de raios cósmicos que atravessam simultaneamente os dois contadores. As blindagens adicionais de ferro e chumbo (mais externa) impediam a captura de sinais devido à radioatividade.

No caso específico dos raios gama, esta radiação eletromagnética só dispara um contador Geiger se ela arrancar um elétron de um átomo. Então, nesse caso, a observação de sinais coincidentes sugere que um raio gama cósmico produziu dois elétrons ou que um único elétron disparou ambos os contadores. Para testar se foi de fato um elétron que acionou ambos os contadores, Bothe e Kolhörster colocaram ouro com 4 cm de espessura, escolhido por sua alta densidade, entre os contadores para absorver os elétrons eliminados dos átomos.

No desenvolver do experimento, os resultados apontaram que os raios cósmicos consistiam em partículas eletricamente carregadas, e não de raios gama. A interposição de uma peça de ouro de 4 cm de espessura entre os tubos reduziu apenas ligeiramente a taxa de coincidência, provando que os raios cósmicos contêm partículas carregadas de energia muito mais elevada que os elétrons no experimento de Compton [32], que são produzidos pelos raios gama.

As coincidências foram registradas e fotografadas conectando os fios dos dois contadores a dois eletrômetros de fibra separados. A resolução temporal foi da ordem de  $1/100$  s.

A partir do método publicado por Bothe em 1929 [42] para registrar impulsos simultâneos em dois contadores Geiger com um válvula termoionica de duas grades, o físico experimental italiano Bruno Benedetto Rossi (1905-1993), cujo orientador foi o físico Ettore Majorana, desenvolve em 1930 [43] um circuito mais simples (também a base de válvulas eletrônicas) e com a eficiência de registrar impulsos triplos coincidentes (Figura 9). A geometria dos detectores era triangular, de modo a evitar que os raios cósmicos pudessem atravessar todos os três contadores simultaneamente. Rossi também notou coincidências entre vários contadores colocados num plano horizontal, muito superiores às coincidências casuais.

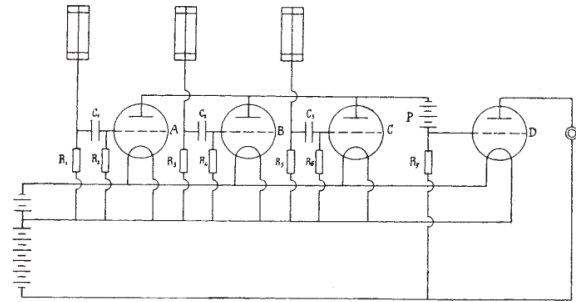


Figura 9 – Esquema do circuito (com válvulas) de Bruno Rossi para o registro de impulsos triplos coincidentes. Fonte: Rossi (1930) [43].

Em seguida, Rossi também demonstrou [44]-[46] a influência do campo magnético da Terra nas partículas carregadas que chegam do espaço sideral. Ainda, descobriu que 60% dos raios cósmicos que passam através de um pedaço de chumbo de 25 cm também poderiam atravessar uma dimensão maior ( $\approx 1$  m). Esta foi a primeira demonstração da produção de ‘chuveiros de partículas secundárias’. Também demonstrou que o fluxo de raios cósmicos contém um componente ‘mole’, facilmente absorvido em alguns milímetros de chumbo, além de um componente ‘duro’ de partículas carregadas com energias acima de 1 GeV. Tal resultado derrubou a teoria de Millikan-Bowen de que os raios cósmicos eram similares aos raios gama [47]. Millikan também publicou um artigo no qual descrevia a pesquisa até então realizada com raios cósmicos [48].

Uma década depois do resultado de Bothe e Kolhörster, o físico francês Pierre Victor Auger (1899-1993) e seus colaboradores observaram, pela

primeira vez, uma distribuição lateral da ultraradiação de Hess [49]. Surge, então, o conceito de “chuveiro atmosférico extenso”, do inglês *Extensive Air Shower*, formado por partículas subatômicas secundárias causadas pela colisão de partículas primárias de alta energia com moléculas de ar. Com base nos registros, Auger concluiu que tinha observado ‘chuvas’ com energias de  $10^{15}$  eV, ou seja, cerca de 10 milhões de vezes mais altas do que qualquer outra fonte conhecida até então.

Ao posicionar detectores de partículas no alto dos Alpes, a cadeia montanhosa mais alta e mais extensa que se encontra inteiramente na Europa, notou que dois detectores localizados a muitos metros de distância sinalizavam a chegada de partículas exatamente ao mesmo tempo. Uma investigação sistemática revelou coincidências entre contadores separados horizontalmente por até 75 m. Embora a taxa de contagem tenha caído drasticamente ao passar de 10 centímetros para 10 m, a taxa diminuiu lentamente em distâncias maiores.

O Observatório Pierre Auger sempre foi um projeto internacional. Atualmente, 17 países são membros oficiais da colaboração e suas bandeiras são exibidas na passarela do centro de visitantes Auger. Uma ilustração de um evento ‘chuveiro’ e a detecção no conjunto de detectores Cherenkov, está ilustrado na Figura 10.

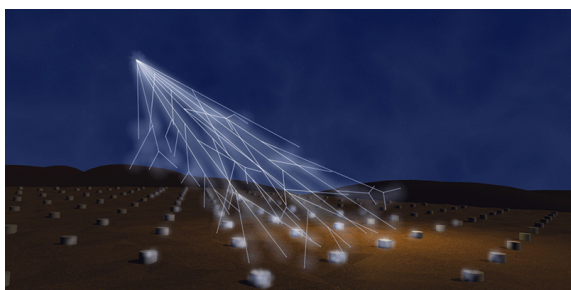


Figura 10 – Ilustração do chuveiro com a respectiva detecção. Fonte: ASPERA/G. Toma/A. Saftoiu. American Physical Society.

### III. Radiação Cósmica Primária e Secundária

Atualmente, o resultado dos estudos observacionais realizados por Victor Hess a bordo de balões consiste no que passamos a denominar de *radiação cósmica secundária*, ou seja, aquela originada nas interações da *radiação cósmica primária* com átomos da atmosfera da Terra.

Entende-se por radiação cósmica primária os núcleos, principalmente de prótons (ou núcleos de hi-

drogênio) que chegam no topo da atmosfera com velocidades relativísticas oriundos de diversas fontes astrofísicas, como o Sol, supernovas, AGN, etc. Tais partículas, agregando aproximadamente 88%, compõem a maior parcela detectada permanentemente em satélites artificiais dotados de instrumentos que permitem analisar a composição, o fluxo e a distribuição em energias cinéticas. Cerca de 10% são núcleos de hélio compostos por dois prótons e dois nêutrons, também conhecidos como partículas alfa. Os 2% restantes seguem essa especificação: 1% são núcleos de elementos mais pesados e complexos da tabela periódica, presentes em aproximadamente a mesma abundância relativa do Sistema Solar, enquanto o outro 1% são formados por elétrons e pósitrons isolados. Raios gama correspondem a uma fração minoritária, mas importante para os processos de alta energia [50]-[52].

No caso particular dos elétrons, não é bem compreendido por que estes são menos acelerados do que os núcleos atômicos carregados positivamente. Uma explicação provável é que os elétrons, com massa e momento muito menor, atingem a Terra em números mais baixos porque são mais facilmente capturados ao redor das linhas do campo magnético que cercam as fontes e permeiam o espaço interestelar, o Sistema Solar e o próprio ambiente imediato da Terra. No processo de espiral em torno das linhas de campo magnético, os elétrons geram radiação síncrotron que é facilmente detectável.

Em média, uma partícula de raio cósmico primário carrega uma energia de  $4,8 \times 10^{-11}$  J, o que corresponde a cerca de  $3,0 \times 10^8$  eV, ou a velocidade da ordem de 2/3 da velocidade da luz. No entanto, poucas partículas se movimentam próximas da velocidade da luz e carregam energias da ordem de  $3,0 \times 10^{20}$  eV. Em comparação, as partículas de maior energia produzidas pelo Grande Colisor de Hadrons – CERN (Large Hadron Collider), encontram-se na faixa de  $13 \times 10^{12}$  eV, cerca de 23 milhões de vezes mais fracas.

A taxa em que os raios cósmicos atingem a Terra é inversamente proporcional aos seus níveis de energia. Enquanto os menos energéticos “chovem” sobre a atmosfera superior em aproximadamente 10 mil partículas por metro quadrado por segundo, os raios cósmicos de alta energia são, felizmente, muito raros, com a incidência estimada de apenas um único evento por quilômetro quadrado da superfície da Terra por século. Apenas cerca de 3% dos raios cósmicos na superfície são de natureza primária.

Os raios cósmicos secundários são formados quando os raios cósmicos primários entram na atmosfera da Terra, colidem com átomos e moléculas

no ar e as separam em um processo chamado de “espalação”, ou seja, um processo no qual fragmentos de material são ejetados de um corpo devido ao impacto ou à pressão.

O ‘chuveiro’ resultante é uma mistura diversificada de núcleos de elementos mais leves, nêutrons e partículas subatômicas de alta energia que, por sua vez, decaem em outras partículas de matéria e antimatéria, e em fótons de raios gama.

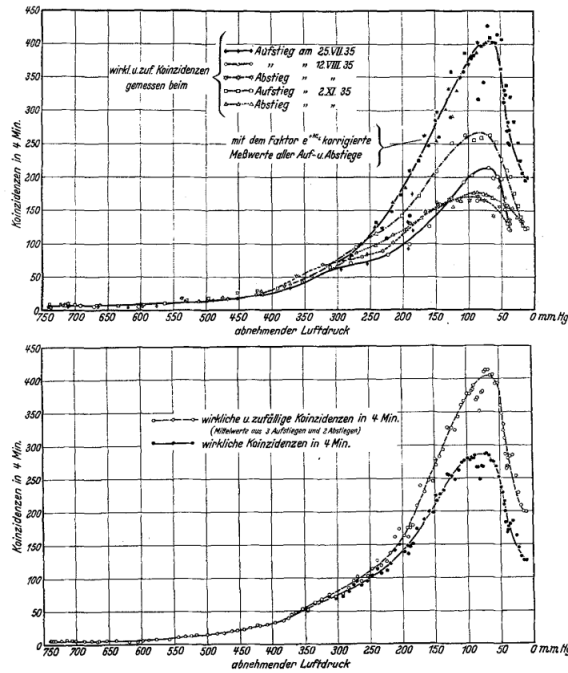


Figura 11 – Intensidade da radiação cósmica secundária em função da profundidade atmosférica. O eixo das abscissas representa a profundidade atmosférica em milímetro de mercúrio (mmHg), e na ordenada as contagens obtidas por minuto registradas por um detector de radiação ionizante. Figura Superior: Respostas diretas às subidas e descidas (curva inferior) e valores reduzidos tendo em conta a probabilidade de resposta (curva superior). Figura Inferior: Valores médios (somado + efetivo). Coincidências de todas as séries de medidas (curva superior) e curva final das coincidências reais no sentido vertical (inferior). Fonte: [53].

A intensidade da radiação cósmica secundária ao penetrar na atmosfera da Terra foi descrita em 1936 no trabalho do físico alemão Georg Pfozter (1909-1981): *Dreifachkoinzidenzen der Ultrastrahlung aus vertikaler Richtung in der Stratosphere* – “Coincidências triplas de ultrarradiação a partir de uma direção vertical na estratosfera” [53]. Desde então, os termos “curva de Pfozter” e “máximo de Pfozter”, relativos à distribuição de partículas carregadas na atmosfera resultantes de raios cósmicos (Figura 11) levam seu nome [54; 55].

De acordo com os resultados experimentais publicados, a intensidade da radiação cósmica secundária é muito fraca no topo da atmosfera, mas aumenta até atingir um máximo em torno de 17 km de altitude. Em seguida, diminui progressivamente em direção ao nível do mar. No entanto, não é completamente anulada.

A conclusão obtida para tal comportamento passa pelo entendimento quanto ao papel que as partículas primárias desempenham: ao penetrarem na atmosfera, iniciam um processo que leva a produção de novas partículas que são incorporadas progressivamente ao fluxo incidente até constituírem uma população máxima de partículas. O processo progressivo de absorção também deve ser levado em conta.

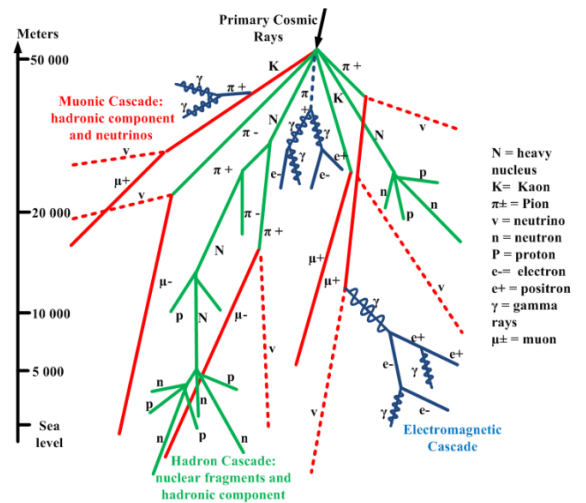


Figura 12 – Representação da cascata de reações a partir dos raios cósmicos com partículas presentes na atmosfera da Terra. Fonte: Adaptado da referência [18]. O eixo vertical representa a altitude em metros, desde o nível médio do mar. Tradução das cores na Figura: Raio Cósmico Primário; Cascata de Múons: componente hadrônica e neutrinos; Cascata de Hádrons: fragmentos nuclear e componente hadrônica; Cascata Eletromagnética. Legendas:  $N$  núcleo pesado;  $K$  (Kaon);  $\pi^\pm$  (Píon);  $\nu$  (Neutrino);  $n$  (Nêutron);  $P$  (Próton);  $e^-$  (Elétron);  $e^+$  (Pósitron);  $\gamma$  (Raio gama);  $\mu^\pm$  (Múon).

A interpretação final do contexto físico descrito acima é conhecida como ‘cascata ou chuva eletromagnética’, ou seja, uma sucessão de eventos onde elétrons de alta velocidade, produzidos em colisões da radiação primária em diferentes camadas da atmosfera terrestre, colidem com núcleos de átomos ou com seus elétrons, emitindo raios-X de alta energia (radiação  $\gamma$ ). O processo avança e o resultado final é a produção de pares elétron-pósitron ( $e^+$ , pósitron;  $e^-$ , elétron),  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ , onde cada um

produz novos raios- $\gamma$  em colisões com outros átomos na atmosfera, de modo que o número de partículas carregadas (intensidade da radiação) cresce de modo contínuo. No entanto, o processo ilustrado na Figura 12 (em azul escuro) perde energia quando os pósitrons e os elétrons passam a ser criados com energia abaixo de um valor crítico, de modo que perdem a capacidade de emitir novos raios- $\gamma$  nas colisões [56].

O processo assim descrito na atmosfera, cascata eletromagnética, representa a “componente mole” da radiação cósmica secundária (elétrons, pósitrons e raios- $\gamma$ ), porque após uma pequena distância percorrida, o processo de multiplicação de partículas atenua-se rapidamente. No entanto, percebe-se ainda na Figura 12 (em azul escuro) que o processo sobrevive e atinge o nível médio do mar (e até ultrapassa). Também são encontradas em minas com alguns quilômetros de profundidade. Nesse caso, a parte da radiação cósmica secundária é identificada como “componente dura” ou “componente penetrante”. Mas, qual seria a partícula constituinte dessa radiação?

#### IV. O Início das Pesquisas no Brasil

Para a Física brasileira, o ano de 1934 pode ser considerado como o marco inicial da pesquisa no campo da Física Moderna, um novo ramo que havia sido inaugurado em 1900 com o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947), Nobel em 1918, pelo trabalho apresentado em 19 de outubro de 1900 na Sociedade de Física de Berlin em que discutia as equações outroras dos físicos alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928, Nobel em 1911) e inglês John William Strutt (Lord Rayleigh, 1824-1908, Nobel em 1904) para a curva de radiação do corpo negro.

Em 11 de abril de 1931, o decreto n° 19.851, conhecido como ‘Estatuto das Universidades Brasileiras’, estabelece os requisitos necessários para a criação das universidades no País e as normas para o efetivo funcionamento. Então, ao findar de quase 3 anos, em 25 de janeiro de 1934, o paulista Armando de Salles Oliveira (1887-1945), na ocasião, interventor Federal do Estado de São Paulo entre 21 de agosto de 1933 e 11 de abril de 1935, assina o decreto n° 6.283 que criaria a Universidade de São Paulo (USP), envolvendo a reunião de instituições já existentes, com as seguintes finalidades:

- a) promover, pela pesquisa, o progresso da ciência;
- b) transmitir, pelo ensino, conhecimentos que

enriqueçam ou desenvolvam o espírito, ou sejam úteis à vida;

- c) formar especialistas em todos os ramos de cultura, e técnicos e profissionais em todas as profissões de base científica ou artística;
- d) realizar a obra social de vulgarização das ciências, das letras e das artes, por meio de cursos sintéticos, conferências, palestras, difusão pelo rádio, filmes científicos e congêneres.

Além das instituições que foram inicialmente agregadas para formar a USP [57], destacamos a Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (FFCL), criada em seguida com uma característica bem particular: um corpo docente formado por europeus, principalmente da França, Itália e Alemanha.

Logo após a criação da USP, uma equipe coordenada pelo professor, matemático, político e administrador Theodoro Augusto Ramos (1895-1937) segue para a Europa com a missão de contratar pesquisadores(as) para somar e reforçar o quadro de professores(as) da USP. No caso da recém criada FFCL, a Faculdade era composta pelas áreas de Filosofia (Filosofia, Filosofia da Ciência, Psicologia), Ciências (Ciências Matemáticas, Físicas, Químicas e Naturais; História e Geografia; Ciências Sociais e Políticas) e Letras (Linguística, Filologia Comparada e Portuguesa, Literatura Luso-brasileira, Língua e Literatura Grega, Latina, Francesa, Inglesa, e Alemã, Técnica e Crítica Literária).

Na Itália, a equipe convida o físico Enrico Fermi (1901-1954) que, ao realizar pesquisas que o levariam em 1938 ao Nobel de Física, declina do convite feito, mas indica para Theodoro Ramos o físico teórico ucraniano naturalizado italiano Gleb Vassilievich Wataghin (1899-1986), que aceita o convite (1934) e o desafio de iniciar um grupo de pesquisa na Física da FFCL-USP. Na época, Wataghin era contratado da Escola Politécnica de Turim. Em seguida, do Instituto de Física em Turim.

Além de Wataghin, o matemático italiano Luigi Fantappiè (1901-1956) também imigrou para o Brasil, ficando responsável de 1934 a 1939 pela cadeira de Análise Matemática e pela organização da subseção de Matemática da recém criada FFCL-USP.

Uma vez instalado em São Paulo, Wataghin não perde tempo e já inicia estudos teóricos e experimentais com partículas elementares[58]-[62], no qual envolve como colaboradores iniciais os recém egressos da USP: o físico Marcello Damy de Souza Santos (1914-2009), estudante da primeira turma do Curso de Física da FFCL-USP (1936) e Paulus Aulus Pompeia (1911-1993), engenheiro elétrico formado pela

Escola Politécnica da USP em 1935. Wataghin já trabalhava com a produção múltipla de partículas a partir de dois caminhos: o Princípio de Incerteza de Werner Karl Heisenberg (1901-1976) e de um comprimento de onda fundamental da ordem de  $10^{-13}$  cm. Em 1940, conseguiu detectar o cascadeamento de partículas (chuveiros penetrantes), fato confirmado em seguida por Jánossy & Ingleby [63].

César Lattes que nascera em 1924, era apenas uma criança com 11 anos de idade.

## V. 1935: Em cena, o Méson

Ernest Rutherford, em 1919, identifica a partícula responsável pela carga positiva do átomo, o próton [64], e apresenta a hipótese (a partir dos resultados experimentais) de que o núcleo deveria acomodar uma outra partícula com carga neutra e massa semelhante à do próton. Em 1932, a partícula (nêutron) foi então descoberta pelo físico inglês James Chadwick (1891-1974) [65]. Porém, ainda não havia a compreensão de como os prótons permaneciam unidos no núcleo, uma vez que estas partículas deveriam sofrer repulsão eletrostática, comprometendo, assim, a coesão nuclear. Apesar do calor das descobertas na Europa e nos Estados Unidos, foi no Japão que a resposta foi apresentada na forma de uma partícula mediadora da interação nuclear forte.

O trabalho do físico teórico japonês Hideki Yukawa, seu primeiro artigo publicado em uma revista científica e que lhe renderia o Prêmio Nobel de Física de 1949 pela teoria apresentada, procurava explicar as forças nucleares de curto alcance que agiam entre prótons e nêutrons, os núcleons, desconhecida na época.

Desde então, sabemos que o núcleo de um átomo é governado por duas forças fundamentais: a força nuclear forte e a força nuclear fraca. A força nuclear forte é responsável por manter os prótons e nêutrons unidos dentro do núcleo, superando a repulsão elétrica entre os prótons carregados positivamente. Por outro lado, a força nuclear fraca é responsável por certos tipos de decaimento radioativo, como o decaimento beta, uma forma de radiação ionizante emitida por determinados núcleos radioativos como o potássio-40, carbono-14, iodo-132, bário-126, dentre outros.

### A. A Hipótese de Yukawa

A teoria central de Yukawa formulada em 1935 [4] se pautava na hipótese de que a força entre os núcleons envolvia a troca de uma partícula (uma nova partícula batizada inicialmente de  $U$ ) com massa da

ordem de 200 massas do elétron, na verdade, intermediária entre as massas do elétron e do próton, razão pela qual a mesma foi denominada, inicialmente, de *mésotron* e, posteriormente, de *méson*.

Yukawa sustentava sua hipótese em uma recente Física que começava a emergir no início do Século XX (a Mecânica Quântica, estabelecida, de fato, por volta de 1925, a partir das dificuldades que a Física desenvolvida até o final do Século XIX apresentava para interpretar, por exemplo, as leis que governam a emissão de radiação associada aos corpos negros, caracterizados por apresentarem um alto coeficiente de absorção de radiações). O argumento básico de Yukawa residia no fato de que as forças eletromagnéticas são melhores compreendidas em termos de campos onde os quanta são os fótons. Logo, nessa perspectiva, a força eletromagnética entre duas partículas carregadas é atribuída, então, a troca exclusiva de fótons. A partir dessa compreensão, Yukawa mostrou que a propriedade associada ao longo alcance das forças eletromagnéticas é o resultado direto da persistência de massa de repouso nula (zero) do fóton. A conclusão levava a compreensão de que haveria uma relação entre o alcance da força eletromagnética e a massa dos quanta do campo magnético responsável pela interação.

Mas, como escrito no artigo ‘A Memória de Yukawa’ pelo professor T. Kodama [66], Yukawa recebeu muitas críticas dos físicos na época pela brihante ideia de propor a existência de uma partícula para explicar a origem das forças nucleares. De fato, foram quase 15 anos para a teoria ser confirmada experimentalmente, a qual ratificou a proposição de associar um campo a uma partícula, hoje de senso comum na área de Física Teórica.

Como visto, antes da proposta de Yukawa, a natureza exata da força que mantinha o núcleo coeso era desconhecida. A repulsão eletrostática entre os prótons positivamente carregados no núcleo sugeria que deveria haver uma força muito poderosa para superar essa repulsão e manter o núcleo estável.

### B. Equação de Onda de Yukawa

O resultado obtido em 1935 por Yukawa [4] deve ser entendido como a “pedra fundamental” para o início do que conhecemos atualmente como Física de Altas Energias, também denominada de Física de Partículas e Campos.

De acordo com Yukawa, a força nuclear, de curto alcance ( $R$ ), independente da carga [67], mas dependente do spin, é uma consequência da troca *virtual* de partículas ( $U$ ) entre os núcleons. Portanto, tais partículas, quando descobertas, passariam a de-

semperhar o mesmo papel que os fótons realizam na interação eletromagnética. A Figura 13 baseada no diagrama espaço-tempo do físico teórico norte-americano Richard Phillips Feynman (1918-1988), laureado com o Nobel em 1965, ilustra a troca de um méson por um par de núcleons.

A virtualidade aqui colocada pode ser entendida na mesma interpretação que a Mecânica Quântica fornece para a carga, ou seja, de que toda carga, mesmo que não se encontre em movimento, está constantemente emitindo e absorvendo *fótons virtuais*, pelo simples fato dessas partículas (quanta da radiação eletromagnética) não serem observadas diretamente.

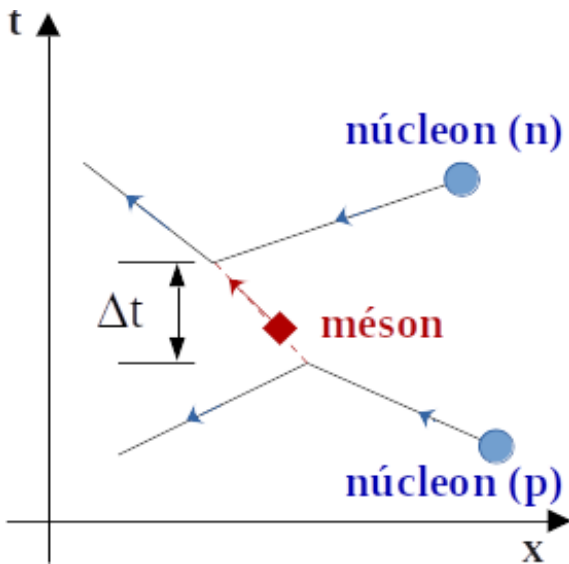


Figura 13 – Esquema ilustrativo da troca de um méson (partícula U, como denominou Yukawa) por um par de núcleons (prótons e nêutrons), baseado no diagrama de Feynman (espaço-tempo). Na ilustração, o méson é emitido pelo núcleo (p) que sofre, como consequência um recuo. Após um intervalo  $\Delta t$ , o méson é absorvido pelo núcleo (n), que também sofre um recuo. Uma interpretação final leva ao cenário no qual passamos a considerar uma interação direta entre os núcleons. Fonte: Autores.

De acordo com um dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, o *Princípio da Incerteza*, formulado em 1927 pelo físico teórico alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976), prêmio Nobel de Física de 1932, existe uma limitação intrínseca na precisão com que é possível medir certos pares de propriedades físicas de uma partícula. Em sua forma mais conhecida, o princípio afirma que é impossível conhecer simultaneamente, com precisão arbitrária, a posição e o momento linear (ou quantidade de movimento) de uma partícula.

Essa limitação não é devido a uma falha experimental ou técnica, mas é uma característica intrínseca do comportamento das partículas quânticas. Ela implica em uma mudança fundamental na maneira como entendemos e modelamos o mundo físico em escalas muito pequenas, onde a Mecânica Quântica é amplamente dominante. Então, uma partícula carregada pode emitir um fóton de energia  $h\nu$  sem perder energia e sem sofrer nenhum recuo; portanto, sem violar as leis de conservação da energia e do momento, desde de que o fóton seja reabsorvido em um intervalo de tempo  $\Delta t$  menor ou igual a  $\hbar/\Delta E$ , onde  $\Delta E = h\nu$  (ver Figura 13).

Quando Yukawa concebeu a teoria, o alcance da força nuclear ( $R$ ) já era conhecida e estabelecida da ordem de 1,5 fm [1 femto (f) =  $10^{-15}$ ]. No entanto, para explicar o curto alcance exigida pela força nuclear, Yukawa fez uma suposição fundamental: a partícula, ao contrário do fóton, apresenta uma massa de repouso diferente de zero. Portanto, a razão da força eletromagnética ter um longo alcance é uma consequência direta da massa de repouso nula do fóton. Desse modo, o alcance de uma força estaria intimamente relacionado com a massa dos quanta do campo responsável pela interação.

Ao fazer um paralelo entre o alcance do fóton, ou seja, a distância percorrida pelo *fóton virtual* no intervalo de tempo  $\Delta t$

$$R = c\Delta t = \frac{c\hbar}{\Delta E} = \frac{c\hbar}{h\nu} = \frac{c}{2\pi\nu} = \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (2)$$

a indeterminação da energia  $\Delta E$  na relação acima teria, para o méson, um limite mínimo ditado pela desigualdade envolvendo a massa  $m$ , ou seja,

$$\Delta E \geq mc^2, \quad (3)$$

onde a quantidade  $mc^2$  é a energia de repouso associada. Do exposto, teremos para o alcance  $R$  do méson e, consequentemente para a força nuclear envolvida

$$R = c\Delta t = \frac{c\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{mc}, \quad (4)$$

lembrando que, embora alta, a velocidade associada não pode ser maior que a velocidade da luz. Então, analisando este particular resultado, verificamos que a quantidade  $h/mc$  é exatamente o comprimento de onda Compton [32],  $\lambda_c$ , de uma partícula de massa  $m$ ; logo, pela Eq.(1):

$$R = c\Delta t = \frac{\lambda_c}{2\pi}. \quad (5)$$

Observe que, para o caso dos fótons, fazendo  $m = 0$  na Eq.(3), teremos como resposta um alcance

infinito para a força eletromagnética.

A partir do conhecimento já disponível na época para o valor de  $R \approx 1,5 \times 10^{-15}$  m, isto é, restringindo apenas ao núcleo atômico, a massa da partícula de Yukawa foi estimada em  $3,5 \times 10^{-28}$  kg, ou seja, cerca de  $380m_e$  (ou  $\approx 200$  MeV/ $c^2$ ).

Qual o significado físico desse resultado? No caso do núcleon interagir com uma partícula, ou mesmo um núcleon que possua energia cinética suficiente (no referencial do núcleon) para fornecer a energia de repouso do méson, o méson virtual (ver Figura 13) pode ser tornar real, sendo, portanto, observado experimentalmente. O momento de recuo do núcleon deve também ser levado em consideração, de modo que a conservação do momento fique garantida.

Em 1937, Yukawa publica com o físico japonês Shoichi Sakata (1911-1970) um refinamento da estrutura teórica inicialmente proposta por Yukawa em seu artigo de 1935, com descrições mais precisas dos mecanismos de interação entre prótons e nêutrons [68].

Vários trabalhos foram publicados na década de 30 envolvendo a Física Atômica e Nuclear. No entanto, ressaltamos um particular resultado experimental que apareceu em 1936 e 1937 com os físicos norte-americanos Carl David Anderson (1905-1991) e o seu primeiro estudante de pós-graduação (PhD em 1935), Seth Henry Neddermeyer (1907-1988).

### C. A Detecção do Méson

Em 1936, Anderson e Neddermeyer publicam os resultados sobre a observação de partículas fortemente ionizantes em raios cósmicos (*Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elevation and Near Sea-Level* – Observações de raios cósmicos na câmara de nuvens a 4300 m de altitude e próximo ao nível do mar) [69].

Na altitude onde o experimento foi realizado, Anderson e Neddermeyer observaram um número maior de interações de raios cósmicos em comparação com observações feitas perto do nível do mar. Isto era consistente com o entendimento de que a intensidade dos raios cósmicos aumentava com a altitude devido ao fato de haver menos partículas atmosféricas para atenuar a radiação que chega do espaço sideral. No ano seguinte, publicaram um segundo artigo (*Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles* – Notas sobre a Natureza das Partículas de Raios Cósmicos) onde os resultados experimentais apontavam para rastros que indicavam a presença de partículas fortemente ionizantes em raios cósmicos [70] com massa entre um elétron e um próton,

portanto, próxima da partícula prevista na teoria da força forte apresentada por Yukawa em 1935.

De maneira independente, a detecção de uma partícula com características compatíveis com aquela apresentada por Anderson e Neddermeyer foi igualmente realizada em 1937 por dois outros grupos: os físicos norte-americanos Jabez Curry Street (1906-1989) e Edward Carl Stevenson (1907-?) [71] e os japoneses Yoshio Nishina (1890-1951), Masa Takeuchi (1911-2001) e Torao Ichimiya (?-?) [72]. Surge então o méson, identificada inicialmente como a partícula prevista por Yukawa.

### D. Seriam os Mésons a partícula de Yukawa?

O título sugerido neste subitem conduz a uma outra pergunta igualmente importante: Que tipo de partícula foi descoberta em 1937?

Os raios cósmicos de alta energia oriundos do espaço sideral entram continuamente e interagem na atmosfera da Terra, provocando um processo de produção de milhares de partículas secundárias em cascata (Figura 12). Os píons neutrons ( $\pi^0$ ) e carregados ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) representam algumas dessas partículas. Os píons carregados interagem com os átomos da atmosfera ou decaem em múons, positivos ( $\mu^+$ ) ou negativos ( $\mu^-$ ), de acordo com os seguintes processos:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ .

Os múons são gerados com energia média da ordem de 6 GeV ( $6 \times 10^9$  eV) a uma altitude de cerca de 15 mil m. Interagem muito pouco com a matéria comum, mas, uma vez que carregam uma carga negativa, perdem energia ionizando os átomos ao longo de seu caminho. Quanto maior o caminho através de um material, maior a perda de energia. Ao nível do mar, onde constituem cerca de metade da radiação natural de fundo, a energia média dos múons é em torno de 4 GeV.

As partículas descobertas em 1937 eram, na verdade, múons (mésons- $\mu$ ), partículas elementares instáveis com uma meia-vida de  $2,2\mu s$  (microsegundos) e uma massa de repouso de  $10^6$  MeV/ $c^2$ . Isso significa que a cada 2,2 milionésimos de segundo, metade de todos os múons decaem espontaneamente em partículas mais estáveis. Logo, durante esse ínfimo tempo, a partícula pode cobrir uma distância da ordem de 660 m, ou seja, praticamente nenhum múon sobreviveria o suficiente para viajar longas distâncias se não fosse pelos efeitos relativísticos da dilatação do tempo [73].

Diante da velocidade adquirida, que está perto da velocidade da luz (0,9998c, onde c é a velocidade da luz no vácuo), o tempo em um múon passa cerca

de 40 vezes mais lentamente do que em nosso quadro de referência, fazendo com que a sua meia-vida seja proporcionalmente maior. Isso permite uma vida útil suficiente para viajar pela atmosfera da Terra e ser detectado em diferentes altitudes (mesmo ao nível do mar). Portanto, na superfície da Terra, as partículas secundárias mais comuns são os múons, classificados como léptons (uma classe de partícula elementar de spin semi-inteiro que não sofre interações fortes). Os múons negativos são semelhantes aos elétrons, mas com massa de repouso maior, cerca de 207 vezes.

Os múons negativos da matéria comum podem seguir um dos dois caminhos: alguns decaem em elétrons, neutrinos e antineutrinos, enquanto outros podem se juntar à matéria capturando órbitas muito apertadas em torno de núcleos atômicos, onde se combinam com um próton para produzir um nêutron e um neutrino. No caso dos múons positivos, por outro lado, decaem 100% do tempo em pósitrons, antineutrinos e neutrinos.

Com a detecção da partícula (múon) por três equipes independentes em 1937, os físicos norte-americanos Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) e Robert Serber (1909-1997) publicam no mesmo ano o artigo *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles* [74], no qual sugerem que a partícula assim descoberta poderia ser aquela prevista por Yukawa em 1935. A mesma sugestão foi apresentada pelo físico suíço Ernst Carl Gerlach Stückelberg (1905-1984) no artigo *On the Existence of Heavy Electrons* [75].

Diante dos registros observacionais e das sugestões apresentadas, Yukawa [76] decide enviar em 1937 um artigo para a revista *Nature* sugerindo que tais partículas poderiam ser os mésons da teoria proposta, onde as massas eram próximas daquela prevista. Contudo, o artigo apresentado foi recusado pela revista.

As partículas recém descobertas com massas intermediárias ( $\approx 176 m_e$ ) entre aquelas dos prótons ( $1,673 \times 10^{-24}$  g) e elétrons ( $m_e = 9,109 \times 10^{-28}$  g) não eram, portanto, a partícula de Yukawa. Uma característica da componente dura da radiação cósmica é o poder de penetração, ou seja, de percorrer toda a atmosfera da Terra e atravessar a crosta terrestre sem ser absorvida em colisões nucleares dentro da matéria. Os múons, como visto, são instáveis e desintegram-se em um elétron e uma (ou mais) partícula(s) neutra(s), portanto, de fraca interação com o material exposto.

No caso da partícula de Yukawa, estando esta diretamente relacionada com a força nuclear forte, deveria interagir fortemente com a matéria. Tratava-

se, portanto, de diferentes partículas. Em 1939, Yukawa e o físico Shoichi Sakata (1911-1970) estimaram a massa do méson entre 100 e 200 vezes a massa do elétron [77].

Destacamos que, na época, a detecção estava baseada na Física das ‘colisões nucleares’. Basicamente, o processo pode ser descrito quando dois núcleos atômicos se aproximam o suficiente para interagirem entre si, resultando em uma série de fenômenos complexos com desdobramentos importantes para o entendimento da natureza atômica da matéria.

Para entendermos a colisão nuclear, parece-nos oportuno descrever as forças fundamentais que atuam dentro dos átomos.

Quando dois núcleos se aproximam, eles podem interagir de várias maneiras, dependendo da energia cinética envolvida e das propriedades específicas dos núcleos em questão. Em alguns casos, a colisão resulta na fusão nuclear, na qual dois núcleos se combinam para formar um núcleo mais pesado, liberando uma quantidade enorme de energia no processo. Este é o princípio subjacente às reações termonucleares que ocorrem no interior das estrelas, incluindo o nosso próprio Sol.

Por outro lado, em certas condições, a colisão nuclear pode levar à fissão nuclear, onde um núcleo pesado se divide em núcleos menores, também liberando uma quantidade significativa de energia. Tal processo representa a base da tecnologia dos reatores nucleares, onde a fissão controlada é utilizada para gerar energia elétrica, a exemplo das usinas em Angra dos Reis no Estado do Rio de Janeiro.

Além dos processos de fusão e fissão, as colisões também podem resultar em outros fenômenos importantes, como a dispersão de nêutrons, prótons e partículas alfa, bem como a emissão de radiação gama.

## VI. Occhialini: Um Novo Reforço na FFCL-USP

No auge das observações que culminaram na detecção dos múons (mésons- $\mu$ ), Gleb Wataghin convidou em 1937 o físico italiano Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993) para integrar o grupo de pesquisa em formação na Física da FFCL-USP. Como veremos, Occhialini terá um papel importante na futura carreira científica de César Lattes, na época, um adolescente com 13 anos de idade.

Além dos físicos já citados, Marcello Damy e Paulus Pompeia, a equipe contará com o pernambucano Mário Schenberg (1914-1990), o ítalo-brasileiro Oscar Sala (1922-2010), o paulista Roberto Salme-

ron (1922-2020) e a parisiense Yolande Monteaux (1910-1998), a primeira mulher a obter a graduação em Física no Brasil e uma das primeiras matemáticas do Estado de São Paulo.

Tratava-se, portanto, de um grupo emergente de peso, pois, como sabemos, consolidaria e abriria perspectivas para o crescimento da Física (grupos de pesquisas) em diversas áreas no país. Mario Schenberg, por exemplo, considerado um dos nossos maiores físicos teóricos, publica com Marcello Damy nos *Anais da Academia Brasileira de Ciências 12*, um estudo sobre processos de absorção do méson produzindo radiação na alta atmosfera. Para explicar a alta absorção desta radiação na região superior da atmosfera e o poder de penetração dos mésons, seria necessário assumir que, pelo menos, **dois mésons sejam criados simultaneamente**.

A contrapartida experimental foi apresentada também em 1940 com Wataghin, Paulus Pompéia e Marcello Damy, ao publicarem os resultados dos experimentos feitos para verificar se chuviscos com duas ou mais partículas penetrantes podem ser encontrado na radiação cósmica [78; 79].

Em relação ao trabalho teórico de Schenberg e Damy de 1940, uma formulação mais abrangente foi publicada em 1942 pelos físicos Shoichi Sakata (1911-1970) e Takesi Inoue (1921-?) [80], como será apresentada na Seção VIII.

## VII. O Avanço da Física no Contexto da Segunda Guerra Mundial

Uma parcela considerável das descobertas científicas, teóricas e experimentais, aconteceram durante as tensões das guerras mundiais, a primeira (1914-1918) e a segunda (1939-1945), envolvendo várias nações e alterando (no mínimo) o andamento de várias pesquisas e, sobretudo, o conhecimento dos resultados obtidos. Por exemplo, como descrito anteriormente, os físicos japoneses Shoichi Sakata e Takesi Inoue publicam a teoria de dois mésons, onde a partícula de Yukawa (associado à interação forte) decaía no méson de Anderson e Neddermeyer (associado à interação fraca): méson  $\rightarrow$  méson. O artigo [81] foi conhecido no Ocidente apenas no pós-guerra (1946). Lattes, Occhialini e Powell publicaram seus resultados experimentais em novembro de 1947.

Pesquisas também aconteciam em países neutros, a exemplo do Canadá, onde o físico italiano Franco Rama Dino Rasetti (1901-2001) que trabalhava na Universidade Laval, Quebec [82]-[84], estimou [82] em 1941 a vida média do méson em  $\tau = (1,5 \pm 0,3) \times 10^{-6}$  s. Dois anos de-

pois, na Universidade de Cornell, New York, os físicos norte-americano Norris George Nereson (1918-2007) e o italiano Bruno Benedetto Rossi (1905-1993) apresentam um valor ligeiramente superior:  $\tau = (2,15 \pm 0,07) \times 10^{-6}$  s [85].

Apesar do contexto de ideologias e de guerras [86] veremos que a década de 40 (espelhada na de 30) foi igualmente profícua para a Física de Partículas e Campos. Um rico detalhamento anual da produção científica pode ser obtido no livro *Nascimentos da Física: 1901-1950* do Prof. Dr. José Maria Filardo Bassalo [8].

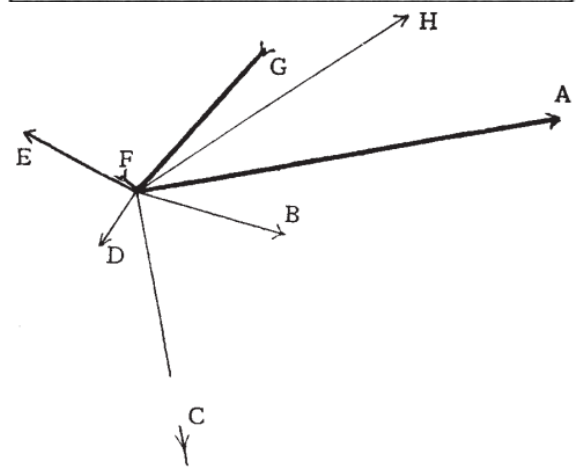
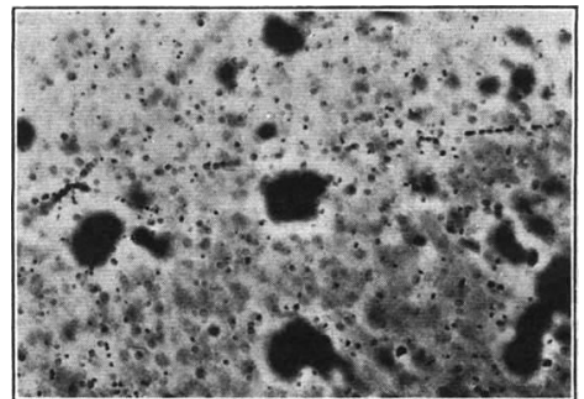


Figura 14 – Emulsão fotográfica revelando a presença de partículas ionizantes e de eventos associados. As setas indicam as direções da superfície da emulsão para o vidro. No caso particular da registro C, a interrupção indica uma trajetória muito maior quando comparada com as demais. Fonte: Blau & Wambacher (1937) [87].

## VIII. O Grupo de Bristol

Em 1943, uma série de eventos ocorridos na Itália derrota o Fascismo, e Occhialini, que estava no Brasil desde 1937 realizando pesquisas em raios cósmicos, retorna à Europa em 1944 e ingressa na

Universidade de Bristol (Reino Unido) onde integra (1945) o grupo do físico experimental britânico Cecil Frank Powell (1903-1969), no H. (Henry) H. (Herbert) Wills Physical Laboratory. Na época, Powell e sua equipe começam a aplicar as emulsões nucleares em pesquisas envolvendo a radiação cósmica.

Contudo, é oportuno mencionar que a emulsão nuclear, ou seja, a emulsão fotográfica destinada à fixação e observação da trajetória individual das partículas ionizantes e os eventos decorrentes destas atividades, é creditado à física austríaca Marietta Blau (1894-1970) pela publicação feita em 1937 [87; 88] com a nova técnica. Blau foi a primeira a usar emulsões nucleares para detectar nêutrons (observando o recuo dos prótons). Blau também desenvolveu um método acurado de estudo das reações causadas por raios cósmicos (Figura 14).

As pesquisas desenvolvidas pelo grupo de Bristol envolviam, não apenas o registro das partículas, mas também a identificação por meio da carga elétrica, da energia cinética e da massa, além da própria melhoria das emulsões nucleares. Era uma corrida contra o tempo.

No Japão, um equipe liderada pelo físico Yoshio Nishina (1890-1951) publica em 1941 na revista *Physical Review* a detecção de raios cósmicos na água, a uma profundidade de 1400 m [89]. No mesmo ano, na França, a equipe de Loius Marie Edmond Leprince-Ringuet (1901-2000) determinam e publicam a massa de repouso do méson ( $240 \pm 20 m_e$ ) descoberto por Anderson em 1937 (méson), registrando o evento em uma câmara de Wilson [90], de acordo com a Figura 15.

No Brasil, em 1943, Lattes obtém o título de Bacharel em Física aos 19 anos pela FFCL da USP e finaliza, em 1945, os estudos com Gleb Wataghin e Mario Schenberg. No entanto, Lattes decide não seguir o viés da Física Teórica e aceita o convite do grupo experimental de raios cósmicos do H. H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol, a partir da indicação feito pelo seu ex-professor da FFCL-USP, Giuseppe Occhialini, que passara a integrar o grupo no pós-segunda guerra.

Destaca-se que Lattes já realizava (com outros colegas) no porão do Departamento de Física da FFCL experimentos com a câmera de Wilson para detectar mésons lentos empregando o método de Occhialini [1]. Tal interesse somado a um conjunto de fotografias contendo traços de partículas alfa e prótons registrados nas novas chapas de emulsão fotográfica enviadas de Bristol em 1946 por Occhialini aceleraram a escolha para o campo experimental. Esta decisão marcaria o futuro do jovem físico Cé-

sar Lattes, na época, com 21 anos (Figura 16).

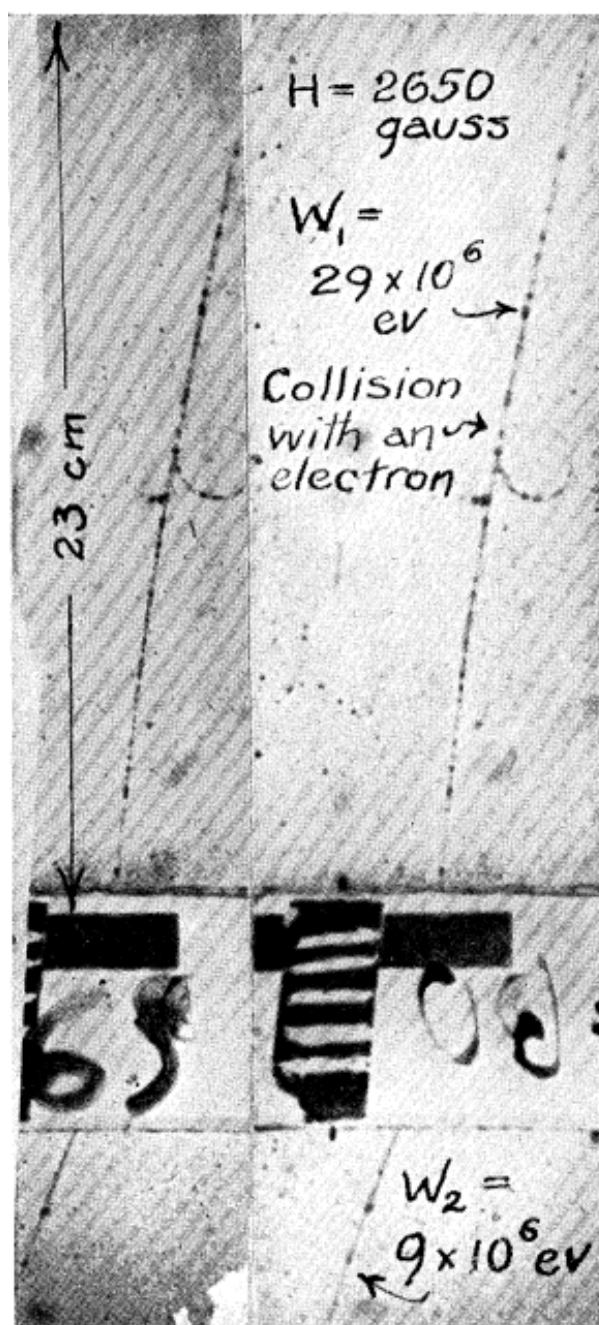


Figura 15 – Imagem estereoscópica, uma técnica usada para se obter informações do espaço tridimensional por meio da análise de duas imagens obtidas em pontos diferentes do mésontron na câmara de Wilson. A medida da massa foi obtida a partir da colisão elástica com um elétron onde havia um campo magnético. Fonte: Leprince-Ringuet *et al.* (1941) [90].



[Fotografia] 1948-1955. Cecil Powell Papers, Special Collections, University of Bristol, DM 1137/A110. With the permission of the University of Bristol Special Collections. Fonte: THE COSMIC RAY GROUP.

Figura 16 – The Cosmic Ray Group - H. H. Wills Physical Laboratory (1948-55). Na segunda fileira, encontram-se sentados Cecil Powell (canto esquerdo) e Cesar Lattes, exatamente ao centro, de camisa branca. Occhialini é o único sentado no terceiro degrau da escada, sozinho, inclinado em direção à Lattes. Nota-se também a presença de jovens mulheres, a exemplo da estudante de Física Sra. Rosemary Brown, também sentada na segunda fileira (canto direito), integradas na equipe para analisar (com microscópios) as emulsões fotográficas. As duas microscopistas que serão responsáveis pelas análises das placas com os dois eventos de desintegração méson  $\leftrightarrow$  méotron foram Marietta Kutz (1º evento), em pé no canto direito da última fileira, e Irene Roberts (2º evento), terceira a partir do canto esquerdo.

#### A. Emulsões de AgBr (brometo de prata) e $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (Bórax)

Em Bristol, o grupo de pesquisa coordenado por Cecil Powell buscava um método diferenciado para detectar as partículas. Portanto, o grupo incluía, além de *experts* no campo da Física, técnicos das empresas Ilford Photo (inglesa) e Eastman Kodak Company (norte-americana), que dominavam na época a produção de químicos, filmes e papel, principalmente material especializado para fotografia em preto e branco. O objetivo era avaliar a viabilidade de aplicar as técnicas fotográficas clássicas

conhecidas no registro visual de trajetórias de partículas ionizantes [91].

A ideia era dispersar pequenos cristais de brometo de prata (AgBr) de forma homogênea em gelatina e depositar a mistura de forma uniforme sobre uma base de vidro plano. O processo seguiria, então, as etapas de preparação, exposição, revelação química, secagem e observação com auxílio de um microscópio óptico. Em outras palavras, buscavam uma técnica alternativa (emulsões fotográficas) à câmara de Wilson, comumente empregada por outros grupos interessados na descobertas de novas partículas. Por exemplo, na França, as pes-

quisas lideradas por Leprince-Ringuet identificam em 1944 a trajetória de uma partícula em uma câmara de Wilson instalada na *Aiguille du Midi*, uma montanha (como uma agulha) localizada no Maciço do Monte Branco, com uma altitude de 3842 m, a mais alta das *Aiguilles de Chamonix*, cuja massa (da ordem de  $990 \pm 12\%$  vezes a massa do elétron) não correspondia à de nenhuma partícula conhecida até então, medida ou prevista [92]. Para os autores, a medida podia ser considerada como a primeira indicação favorável a existência de um méson duro.

Em 1946, Leprince-Ringuet & Lhéritier voltam a publicar os resultados sobre a detecção de uma partícula de alta massa [93], porém, criticado [94] pelo físico germano-norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005), laureado com o Nobel de Física em 1967. De acordo com Bethe, o método usado estaria sujeito a erros devido ao espalhamento múltiplo: (a) na medição do momento da partícula primária, (b) no momento do elétron, (c) no ângulo entre o elétron e a partícula primária no plano perpendicular ao campo magnético, e (d) no ângulo entre essas partículas em um plano paralelo ao campo magnético.

O avanço das pesquisas baseadas na gelatina de AgBr mostrava que apenas o aumento da espessura (já praticada entre 50 e 100 micrômetros) na placa de vidro não era suficiente. Havia, portanto, a necessidade de melhorar a sensibilidade química da emulsão nuclear, além de preservar ao longo do tempo, entre a exposição e a revelação, as imagens registradas de curta e longa duração. Esse era o principal problema a ser resolvido pelo grupo.

A solução veio por meio de um composto conhecido como Bórax (Tetraborato de Sódio), um mineral alcalino (cristais) derivado da mistura de um sal hidratado de sódio e ácido bórico, solúvel em água. Lattes contribuiu nesta etapa onde as emulsões eram então misturadas com essa substância e podiam ser usadas como detectores de nêutrons com energias de até 13 MeV ( ${}^2\text{H} + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{nêutron}$ ). A absorção de nêutrons pelo Boro é acompanhada de uma reação nuclear onde dois fragmentos ionizantes são emitidos:  ${}^7_3\text{Li}_4$  e  ${}^4_2\text{He}_2$ . A partir dessa reação, os nêutrons, invisíveis pela própria natureza elétrica, passam a ser revelados pelos traços desses fragmentos na emulsão.

Uma vez integrado e familiarizado com os procedimentos da técnica fotográfica (Figura 17), Lattes começa as pesquisas e publica em 1946 (ano de chegada ao H. H. Wills Physical Laboratory) os seus primeiros artigos: *On the Abundance of Nuclei in the Universe*, com Gleb Wataghin [95; 96] e *Radioactivity of Samarium*, com Peter Cuer [97]. Em

meados do mesmo ano, Lattes começa a investigar a radiação cósmica com AgBr e Bórax no Pic-du-Mid (Pirineus francês).



Figura 17 – César Lattes em 1949 na etapa de observação no microscópio óptico, fase em que se pode ‘varrer’ a placa em busca de eventos na superfície e/ou na profundidade da gelatina de AgBr, fazer medidas de comprimento dos traços e de densidade de grãos revelados ao longo das trajetórias. Fonte: Arquivo Central/Siarq-Unicamp.

## B. A Teoria de Dois Mésons

Em 1942, os físicos japoneses Shoichi Sakata (1911-1970) e Takesi Inoue (1921-?) publicam na revista japonesa *Bulletin of the Physical and Mathematical Society of Japan* [80] uma teoria envolvendo correlações entre mésons e a partícula de Yukawa. Porém, devido ao conflito mundial, o artigo é desconhecido no Ocidente e, apenas em novembro de 1946, torna-se disponível aos diversos grupos de pesquisa [81].

O estudo dos japoneses versava no trabalho pioneiro de Hideki Yukawa sobre a teoria dos mésons das forças nucleares, sugerindo que estas partículas são os portadores da força nuclear forte, cru-

cial para manter o núcleo unido, superando a força eletromagnética repulsiva entre prótons carregados positivamente. Basicamente, descreviam que o méson de Yukawa de maior massa, aquele relacionado com a interação forte, deveria se desintegrar no méson de Anderson e Neddermeyer [70] descoberto e publicado em 1932, de menor massa e responsável pela interação fraca. Em resumo, Sakata e Inoue haviam proposto o decaimento méson  $\rightarrow$  mésontron.

O artigo de Sakata e Inoue fornece uma análise matemática rigorosa das interações dos mésons, empregando a teoria quântica de campos para descrever as forças de troca mediadas por essas partículas. Os autores empregam a teoria da perturbação para calcular correções ao potencial básico de troca de mésons, considerando interações de ordem superior e o impacto de múltiplas trocas de mésons.

Também exploram funções potenciais e termos de interação que descrevem a dinâmica de troca de mésons. Discutem ainda dados empíricos e previsões teóricas, comparando seus modelos teóricos com fenômenos observados na Física Nuclear. Esta comparação é crucial para validar a teoria dos mésons e compreender as limitações e implicações de seus modelos. No entanto, embora o artigo apresente avanços significativos na correlação de mésons e a partícula de Yukawa, ele é limitado pelos dados experimentais disponíveis na época.

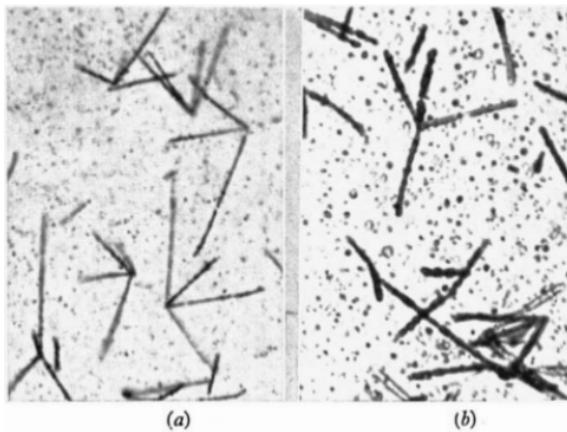


Figura 18 – Fotomicrografias obtidas com uma ocular de 8 mm, apocromática e periplanática. (a) partículas  $\alpha$  de tório; (b) trajetórias semelhantes após a intensificação do urânio. Observe o efeito da profundidade de foco finito, mesmo com uma objetiva de baixo poder. Em todas as fotomicrografias, as reproduções foram feitas sem retoques em nenhuma etapa. Fonte: Powell *et al.* (1946) [98].

Avanços subsequentes na Física de Partículas e medições mais precisas seriam necessárias para refinar ou desafiar algumas das conclusões tiradas por

Sakata e Inoue. Apesar do completo desconhecimento no Ocidente quando da publicação em 1942, a corrida experimental já estava aberta e os resultados iriam testar as previsões do modelo de Sakata e Inoue, particularmente em colisões de partículas de alta energia e experimentos de espalhamento inelástico profundo.

### C. 1946: As Observações Britânicas

As observações realizadas nos últimos meses de 1946 escondem o prenúncio de descobertas. Além do grupo de Bristol liderado por Powell, havia também um outro jovem físico (21 anos) que havia concluído o bacharelado em 1945 e que ingressava no doutorado do Imperial College, concluído em 1948: Donald Hill Perkins (1925-2022). Agora, haviam duas equipes britânicas interessadas na radiação cósmica.

#### 1. Powell, Occhialini, Livesey e Chilton

O laboratório instalado no *Pic du Midi* (Pico do Midi) nos Pirineus francês, uma cordilheira que separa a Península Ibérica do restante da Europa, estendendo-se por mais de 430 quilômetros entre a Espanha e a França e passando de 3400 m de altitude, era um dos locais selecionados que o grupo de Bristol realizavam os experimentos.

Enquanto Lattes investigava novas emulsões a base de Boro, em relação as atuais de Brometo de Prata (AgBr), Powell e parte do seu grupo testavam uma nova emulsão fotográfica a base de Nitrato de Tório, visando experimentos em Física Nuclear – detecção de partículas rápidas. As fotomicrografias publicadas em 1946 [98] revelam as características dos rastros de partículas  $\alpha$  e prótons (Figura 18), além de mostrar que a ‘resolução de energia’ dada pelo método é muito maior em relação aos resultados obtidos anteriormente. Ou seja, havia uma melhor visibilidade dos rastros e a ausência de fundo permitiria uma nova abordagem aos problemas técnicos que dificultavam (i) a busca de eventos raros, (ii) a contagem e medição de um grande número de rastros e (iii) o carregamento de emulsões com outros átomos.

#### 2. Occhialini & Powell

No outono de 1946, Occhialini, fazendo uso de placas com soluções de Boro, observa um grande número de rastros produzidos por partículas que, a princípio, interpretaria como sendo os mésons conhecidos. No entanto, após alguns dias de estudo

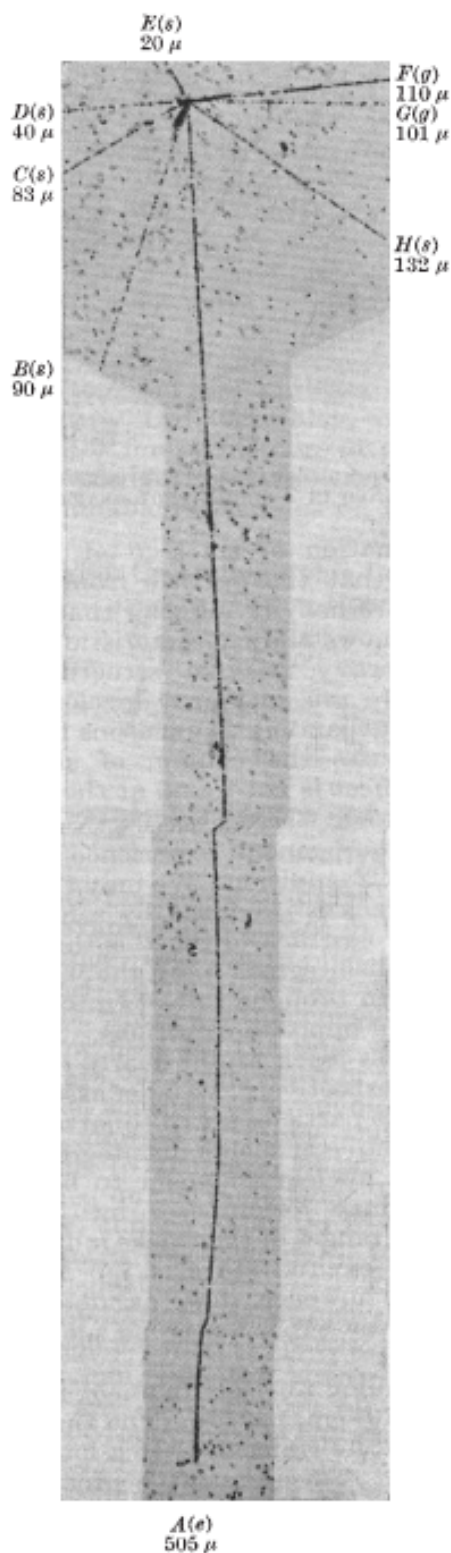


Figura 19 Mosaico contendo 12 microfotografias (em diferentes planos) mostrando a múltipla desintegração de um núcleo de Ag ou Br observada em 1946. Os eventos B(s), C(s), D(s), E(s), G(s) e H(s) são prótons, enquanto os A(s) e F(s) são partículas alfa. Fonte: Occhialini & Powell (1947) [99].

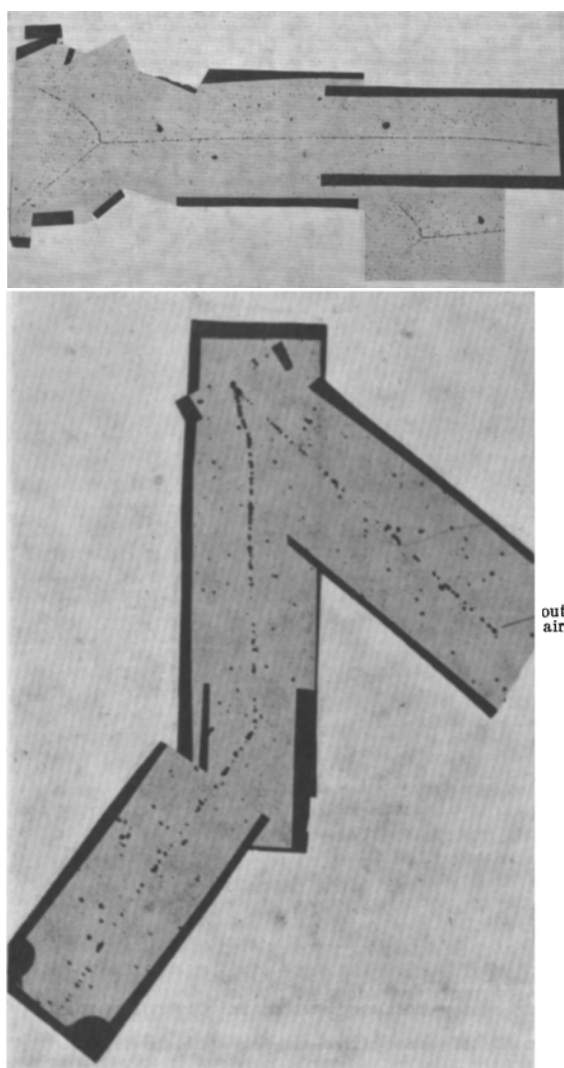


Figura 20 – Emulsões cobertas com Lítio (superior) e Boro (inferior). Na imagem superior, a desintegração nuclear provocada pela absorção de uma partícula carregada de baixa energia e de pequena massa (esquerda, traço mais curvo na parte superior) produz duas outras mais energéticas (traços retilíneos - o mais longo (a) indica uma partícula com carga igual a do próton.) Na imagem inferior, a produção de partículas mais pesadas. Fonte: Occhialini & Powell (1947) [100].

detalhado, percebem (com Powell) duas trilhas especiais de mésons que reduzem gradualmente as velocidades na emulsão até parar. Ao final dessas trilhas, observaram a presença de um novo méson. Qual seria o significado dos registros observados?

Uma possibilidade apontava para uma reação do méson com um núcleo atômico dentro da emulsão de Tetraborato de Sódio ( $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ). Logo, após a interação, o méson poderia ter sido expelido com maior velocidade e provocando a trilha observada. Um outro caminho aventado levava

para algum tipo de transformação, gerando assim um outro tipo de méson.

De qualquer forma, os registros experimentais apontavam para a desintegração de mésons oriundos de raios cósmicos e lhe renderia, com Powell, duas importantes publicações em janeiro [99] e fevereiro [100] de 1947. Eram evidências de mésons negativos de massa inferior a 370 massas do elétron. Os respectivos registros são mostrados, respectivamente, nas Figuras 19 e 20.

Um fato a ser comentado é a ausência do nome de César Lattes em ambos artigos, visto que o mesmo já estava engajado nas pesquisas, quer seja na produção das chapas com as emulsões de Boro ou nas análises das mesmas.

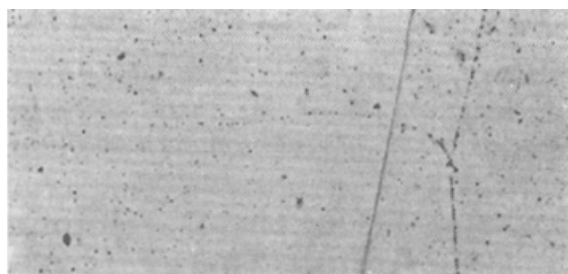


Figura 21 – Microfotografia com o traço de um méson negativo de baixa energia (fraca curva a esquerda). As duas retas angulares seriam prótons. Fonte: Perkins (1947) [101].

### 3. O Méson Negativo de Perkins

O orientador de Perkins era o físico britânico George Paget Thomson (1892-1975), que dividiu o Nobel em 1937 com o físico norte-americano Clinton Joseph Davisson (1881-1958) pela descoberta experimental da difração dos elétrons por cristais. Thomson era filho de Joseph John Thomson (1856-1940), o descobridor do elétron em 1897 (Nobel em 1906 pelas investigações experimentais e teóricas sobre a condutividade elétrica dos gases).

Perkins também estava investigando (provavelmente para o seu doutorado) a radiação cósmica com emulsões da Ilford Photo. No entanto, a vantagem do estudo, em relação ao de Bristol, estava na possibilidade de realizar medidas (exposição das placas de emulsão) em aeronaves que voavam em altitude da ordem de 30 mil pés (cerca de 9 mil m).

No final de 1946, ao analisar as placas obtidas nos vôos, descobre o méson negativo (Figura 21), ou seja, a desintegração de mésons oriundos de raios cósmicos, cuja massa foi estimada entre 100 e 300 massas do elétron. O artigo foi publicado em janeiro de 1947 [101] (mesmo volume do artigo Occhialini

e Powell, mas na edição seguinte). Perkins também obteve medidas nas montanhas (Figura 22). Um recente evento comemorativo ao trabalho científico de Perkins (14/03/2024) foi organizado pelo Departamento de Física da Universidade de Oxford (<https://donperkins.web.ox.ac.uk/>).

No Brasil, Sala e Wataghin realizam observações em São Paulo (750 m), Campos do Jordão (1750 m) e em vôos de avião a 7 mil m de altitude [102]. Os resultados preliminares mostravam que a intensidade das partículas gerando chuvas de raios penetrantes diminuía muito rapidamente com a profundidade na atmosfera (provavelmente seguindo uma lei exponencial). A variação com profundidade podia ser comparada com a variação da abundância de nêutrons e prótons observados com contadores e câmaras de nuvens. Contudo, no caso observado, apenas núcleons com energias maiores que  $10^9$  eV foram considerados. A relação com as partículas primárias e os efeitos de latitude dos chuviros seriam estudados posteriormente.



Figura 22 – Perkins em uma de suas pesquisas de campo. Fonte: Copyright CERN Don.

As desintegrações anunciadas em janeiro pelos dois grupos britânicos foram rapidamente ratificadas por um outro experimento (grupo italiano) em fevereiro de 1947 [103], uma semana antes do se-

gundo artigo de Occhialini e Powell [100], no qual mostrava que os mésonos (negativos) desintegravam ao nível do mar, ou seja, não interagiam fortemente e, sobretudo, não era a partícula de Yukawa.

#### D. Os Experimentos de Roma

No contexto da Segunda Guerra Mundial, a Itália que estava sob o regime ditatorial e fascista de Mussolini, o qual era alinhado aos interesses do líder do partido nazista Adolph Hitler (1889-1945), rompe a aliança estabelecida com a Alemanha em 13 de outubro de 1943 e passa para o lado dos Aliados (Reino Unido, França, União Soviética e Estados Unidos). Apesar dos alarmes e das bombas que caíam regularmente e interrompiam as atividades científicas, o período entre 1943 e 1946 foi marcado, como visto até então, por resultados experimentais de suma importância para a Física de Partículas.

Na teoria formulada por Yukawa, haviam mésons com cargas positivas (+e), negativas (-e) e nulas (0). Analisando em particular o méson -e na condição de repouso em um dado material sólido, a descrição física esperada é a atração do mesmo pelo núcleo mais próximo e, inevitavelmente, a entrada na órbita de menor raio (considerando o modelo do átomo de Bohr [104]). Por exemplo, no caso de elementos pesados, a órbita é muito próxima do núcleo e uma parcela significativa encontra-se dentro da zona nuclear. Então, se o méson- $\mu$  (méson-tron) interagisse fortemente com o núcleo, a probabilidade de ocorrer o decaimento antes da interação seria muito baixa. Dois experimentos realizados pelos físicos italianos Marcello Conversi (1917-1988), Ettore Pancini (1915-1981) e Oreste Piccioni (1915-2002), foram importantes para elucidar a natureza dos mésonos.

No artigo publicado em 1945 [105], constataram que os mésons carregados ao sofrerem colisões com absorvedores de carbono não eram absorvidos e decaíam normalmente. Em 1947, novos resultados experimentais são apresentados sobre a desintegração dos mésons (-e) [103]. Com o elemento químico Carbono, mostraram que uma considerável parcela desses mésons não interagiam com a matéria em questão, mas decaíam naturalmente. Portanto, o experimento mostrava que a interação dos mésons  $\mu$  era muito mais fraca do que a intensidade prevista na formulação de Yukawa. Como conclusão, tais mésons não podiam ser as partículas propostas por Yukawa. Seriam, na verdade, os produtos do decaimento de mésons mais pesados, que teriam as propriedades previstas para o quantum de força nuclear na teoria de Yukawa.

O experimento dos físicos italianos não podia ser realizado em altas altitudes, pois haveria contaminação de radiação nuclearmente ativa dentro da componente dura. Os resultados foram confirmados no mesmo ano pelos físicos Thorbjörn Sigurgeirsson e K. Alan Yamakawa [106] no *Palmer Physical Laboratory*, Princeton University, Princeton, New Jersey. Ainda em 1947, com base nos resultados experimentais assim obtidos, estudos teóricos independentes [107]-[109] foram desenvolvidos e, em particular, o trabalho de Marshak e Bethe [108], no qual apontava para a existência de dois tipos de mésons.

#### IX. 1947: A Detecção do Méson- $\pi$

Os dois grupos britânicos haviam realizados experimentos suficientes que os levariam à detecção da partícula de Yukawa. Era uma questão de tempo e a corrida era intensa.

Na foto do grupo de Bristol (Figura 16), nota-se a presença de jovens mulheres. A microscopista **Marietta Kurz** identificaria pela primeira vez nas placas do Pico do Midi a trajetória de um méson (batizado de  $\pi$ , ou pión) que desacelera, pára e origina um segundo méson (denominado de  $\mu$ , ou múon). Portanto, encontraram evidências experimentais relativas à desintegração méson  $\rightarrow$  méson-tron, tal qual prevista na teoria de Sakata-Inoue de 1942 [80]. Não se tratando de sorte, mas de competência científica, um segundo evento foi encontrado logo em seguida, em uma outra chapa pela microscopista **Irene Roberts**, também identificada na foto de Bristol.

As emulsões com os dois eventos destacados na Figura 23, ambas retiradas de [110], são microfotografias de trechos montados e revelam a presença de partículas que percorriam (trajetórias projetadas no plano) um pequeno intervalo espacial dentro da emulsão nuclear (em microns) com uma característica singular: elas paravam, dissipavam a energia cinética intrínseca e emitiam uma nova partícula.

Esses registros foram os primeiros casos (entre várias observações realizadas) de desintegração do méson- $\pi$  mapeados pelo grupo de Bristol, que levam a assinatura do físico César Lattes como o primeiro autor no artigo científico publicado em 1947 [110]. **No entanto, apesar da identificação feita pelas microscopistas, nenhuma delas figura como coautoras do artigo seminal, salvo nas legendas das figuras.** Mas, qual seria a real diferença em relação aos vários registros efetuados?

Eventos envolvendo outras partículas conhecidas deixavam traços muito bem definidos nas emulsões nucleares.

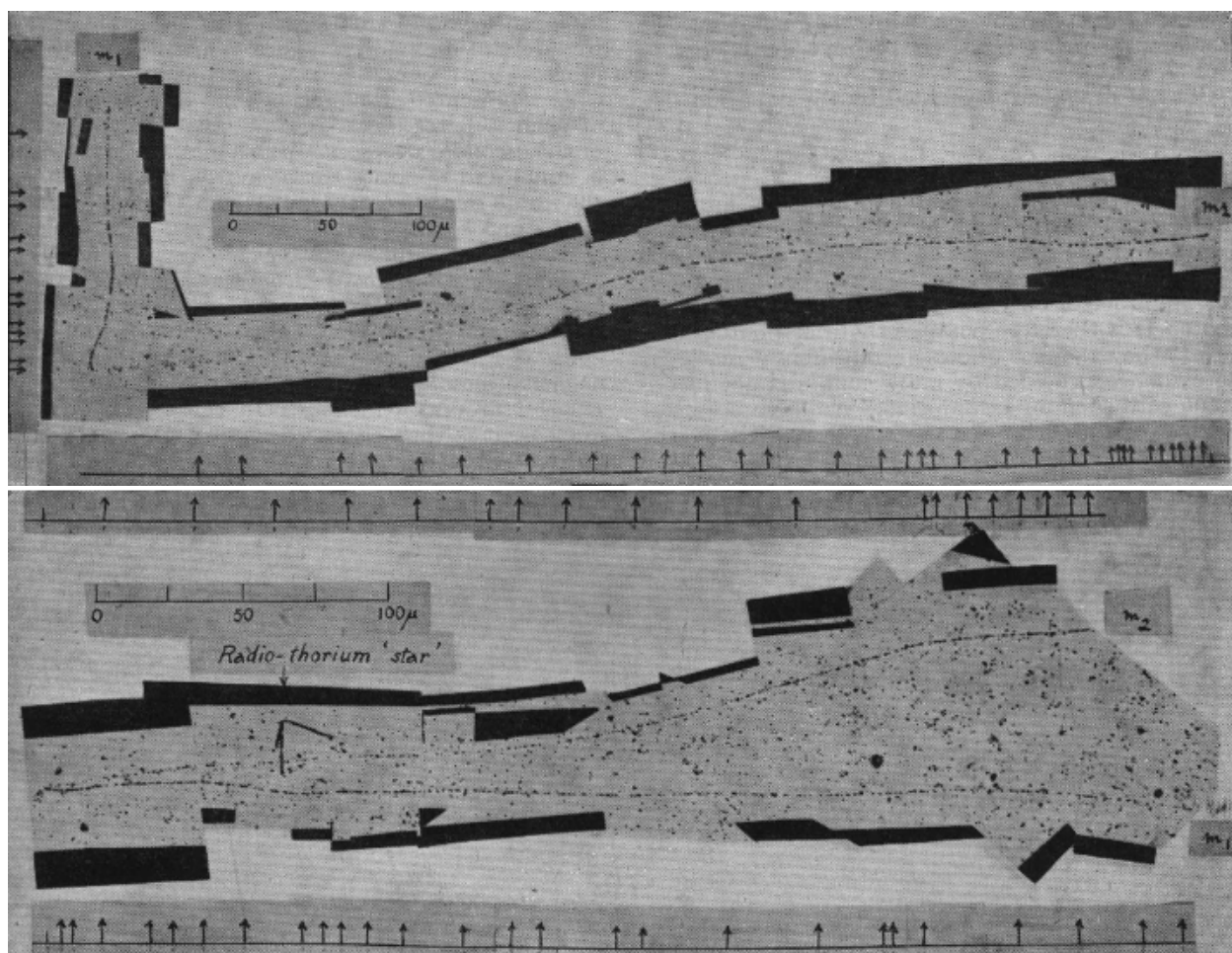


Figura 23 – Figura Superior: Observação feita pela microscopista Irene Roberts. Fotomicrografia com Bórax (Tetraborato de Sódio), desenvolvido pela Ilford Photo. O méson primário é identificado por  $m_1$  (píon); o secundário por  $m_2$  (múon). As flechas indicam pontos onde ocorrem mudanças nas direções superiores a  $2^\circ$ , identificadas à luz de microscópios. A Figura inferior foi observada pela microscopista Marietta Kurz. Nesse evento, o méson secundário ( $m_2$ ) deixa a emulsão. Fonte. Lattes *et al.* (1947) [110].

Por exemplo, os nêutrons, descobertos pelo físico britânico James Chadwick (1891-1974), não deixam trajetórias nas emulsões (são desprovidos de carga elétrica). No caso dos prótons, são partículas estáveis e não produzem desintegração. Os raios-X, descobertos em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) quando trabalhava com um tubo de raios catódicos, ou os raios- $\gamma$ , descobertos em 1900 pelo físico e químico francês Paul Ulrich Villard (1860-1934), também não deixam trajetórias definidas e marcadas, mas pontos isolados sem quaisquer conexões entre si.

No caso dos mésostrons, onde o produto da desintegração são os elétrons, as emulsões empregadas não eram sensíveis a essas partículas.

Tratava-se, portanto, de novas partículas, onde as massas preliminares calculadas,  $m_\pi = 273,13 m_e$  e  $m_\mu = 206,8 m_e$ , ficavam entre aquelas do próton

e do elétron. O valor obtido para a massa do píon concordava muito mais com o valor previsto por Yukawa, quando comparado com aquele estabelecido para o méson- $\pi$ . Outro resultado importante era o fato do méson- $\pi$  existir em duas variantes, positiva e negativa (a componente neutra foi descoberta posteriormente, por outro grupo).

Estava posto que os avanços na compreensão dessas partículas envolvia uma substancial melhoria nas emulsões nucleares. Portanto, logo após tais descobertas, a empresa *Ilford Photo* conseguiu produzir emulsões mais sensíveis, permitindo um melhor registro das trajetórias, inclusive pelos elétrons. Novas expedições foram feitas e foi verificado que o méson- $\mu$  deixava, como subproduto do processo de desintegração, um elétron e pelo menos duas partículas leves e sem carga elétrica.

Pelas características mais precisas fornecidas pe-

las emulsões nucleares, os estudos apontariam que o méson- $\mu$  era a partícula indentificada previamente, ou seja, o méson- $\pi$ .

Atualmente, no campo da Física de Partículas e Campos, o méson- $\pi$  é classificado como um *lépton*, um grupo de partículas leves com fraca interação nuclear ao qual pertencem os elétrons.

Na Figura 23 (superior), a emulsão nuclear vertical (lado esquerdo) representa a trajetória do méson- $\pi$ , evoluindo de cima para baixo. Na Figura 23 (inferior), a trajetória do méson- $\pi$  é a mais retilínea ( $m_1$ ), enquanto a angulada representa a trajetória do méson- $\mu$  ( $m_2$ ), que deixa a emulsão. De acordo com a técnica empregada, o reconhecimento era obtido (i) a partir do aumento observado na densidade de grãos ao longo da trajetória e, também, (ii) pela sinuosidade apresentada.

Analisando os eventos de desintegração em vá-

rias emulsões nucleares, os autores demonstraram que o méson- $\mu$  possuía um comprimento da ordem de 610 micras, indicando que tal partícula era emitida sempre com a mesma energia cinética. Como consequência, a desintegração do méson- $\mu$  estava associada à emissão de duas partículas: uma associada a trajetória deixada e uma neutra que não deixava qualquer assinatura na emulsão. Como dito anteriormente, as emulsões então empregadas não eram sensíveis aos elétrons.

Para obter um número maior de eventos que ratificassem os registros obtidos no Pico do Midi, Lattes planeja e viaja com as novas placas da *Ilford Photo* para a Bolívia, em particular, para o monte Chacaltaya, localizado a cerca de 5.500 m acima do nível do mar.

Nos artigos seguintes, *Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions*,

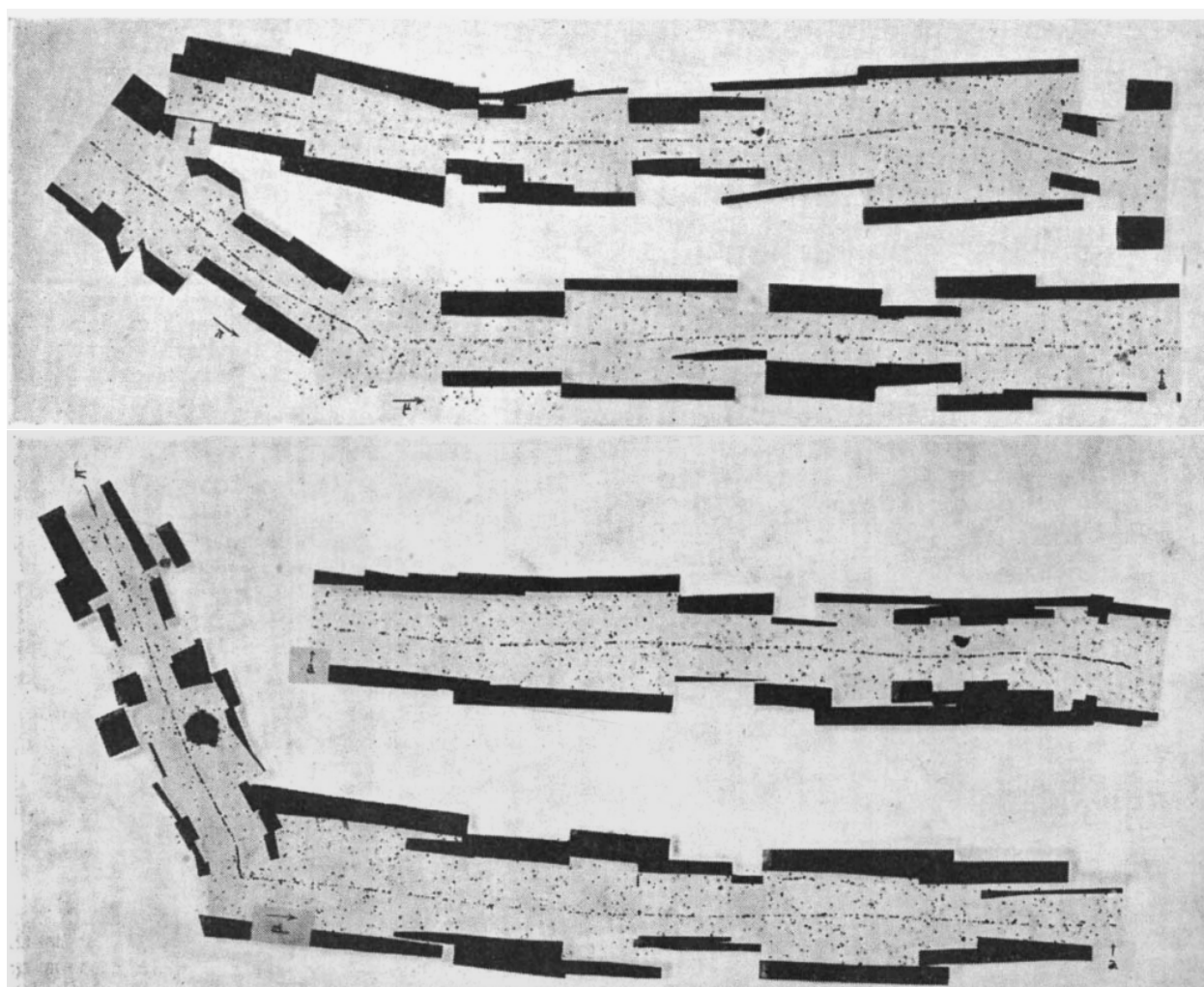


Figura 24 – Dois novos exemplos de mésons secundários. Fonte. lattes et al. (1947). *Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions*. Nature 160 (4067): 486-492.

Lattes *et al.* 1977 [111; 112], um total de 644 traços de mésons foram observados pelo grupo, sendo 451 no Pico do Midi e 193 em Chacaltaya. Neste último observatório, 31 novos eventos do processo de decaimento  $\pi \rightarrow \mu$ . Na Figura 24, dois novos registros de mésons secundários. No primeiro artigo [111], estudo detalhados levaram a determinação das massas dos mésons, onde foi possível estabelecer que existiam, de fato, dois tipos de mésons com massas diferentes. No segundo [112], os autores discutem mais evidências sobre a produção de mésons observados

nas placas fotográficas.

Um dos mésons era cerca de 30% a 40% mais pesado que o outro. O méson mais pesado foi capaz de se desintegrar e produzir o méson mais leve.

A segunda partícula era a já conhecida pelos estudos de Anderson e Neddermeyer de interação fraca. Para diferenciá-la da outra partícula, foi denominada de ‘méson- $\mu$ ’ (múon). O méson primário, por outro lado, era algo novo, desconhecido, e foi chamado de ‘méson- $\pi$ ’. As respectivas designações foram anunciadas em outubro de 1947.

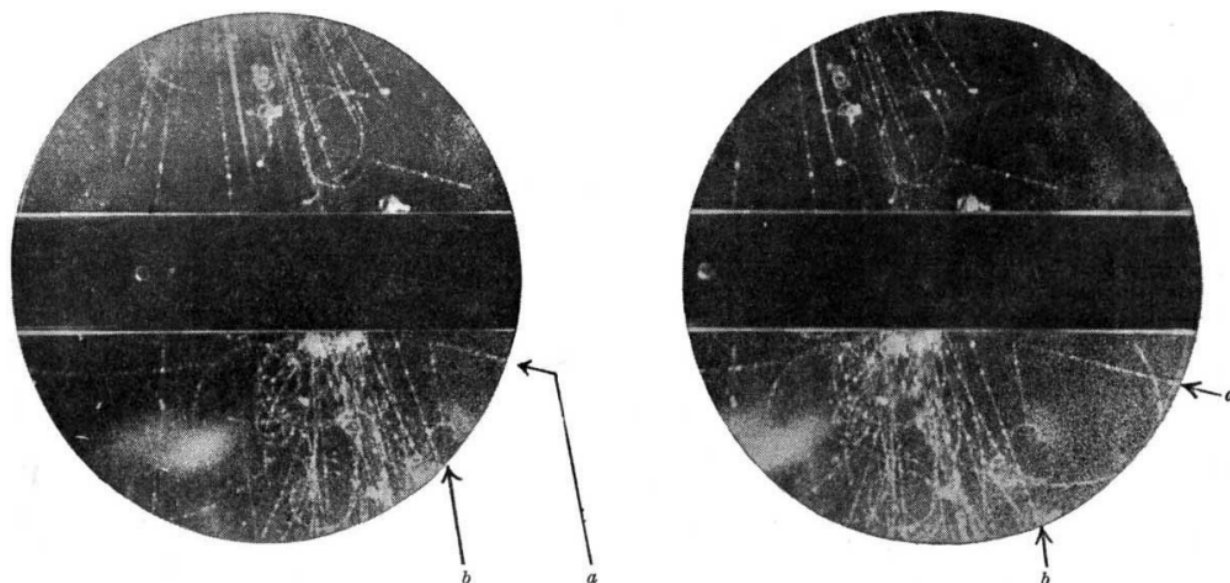


Figura 25 – Fotografias estereoscópicas mostrando uma bifurcação incomum (a,b) no gás. A direção do campo magnético é tal que uma partícula positiva que vem para baixo é desviada no sentido anti-horário. Fonte: Rochester & Butler [115].

Análises posteriores mostraram que o méson- $\pi$  interagiu fortemente com os núcleos e que suas propriedades características eram aquelas exigidas pela teoria de Yukawa. As partículas que mantêm o núcleo unido foram finalmente encontradas.

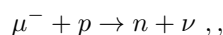
## X. Novas Perspectivas

A descoberta observacional do méson- $\pi$  não representou, apenas, a confirmação experimental de uma teoria proposta na década anterior. Na verdade, a nova sequência de registros fotográficos representavam desdobramentos, possibilidades, novos horizontes para a Física de Partículas e Campos, sendo, a mais óbvia, a conclusão sobre a existência de outras partículas, totalmente desconhecidas, sem quaisquer informações sobre o seu papel fundamental na matéria, ou, de forma mais ampla, no

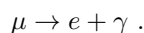
Universo.

A partir da detecção da partícula de Yukawa, muitos resultados teóricos e experimentais foram publicados e ampliaram ainda mais o domínio de conhecimento das partículas. Por exemplo, em julho de 1947, os físicos norte-americanos William George McMillan (1919-2002) e Edward Teller (1908-2003), este último, popularmente conhecido como “o pai da bomba de hidrogênio”, mostraram que na produção de mésontrons por bombardeio nuclear com partículas pesadas e rápidas, o modelo teórico proposto baseado na Física do gás degenerado de Fermi fornecia um limiar de energia incidente da ordem de  $\approx 95$  MeV [113]. O limite é um pouco mais alto para mésontrons positivos do que para os negativos. No tratamento onde os núcleons alvo são considerados em repouso, a energia incidente necessária é de  $\approx 210$  MeV.

No lado experimental, o físico italiano Bruno Pontecorvo (1913-1993) apresentaria no mês seguinte a hipótese [114] de que o méson- $\mu^-$  era um ‘elétron pesado’ e que interagía com o próton em um processo do tipo:



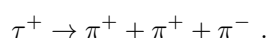
enquanto o processo de decaimento seria do tipo:



Os físicos britânicos da Universidade de Manchester, George Dixon Rochester (1908-2001) e Clifford Charles Butler (1922-1999), publicariam em dezembro os registros mostrando curiosas trilhas “bifurcadas” (Figura 25). Estava descoberto o *kaon*, a primeira partícula estranha, obtida na câmara de nuvens. Tais rastros poderiam ser explicados assumindo a existência de novas partículas neutras (sem carga elétrica) que não produziam rastros e que se desintegravam em uma partícula positiva e outra negativa. A massa estimada era cerca de 200 vezes a massa do próton [115].

Dentre as várias descobertas ocorridas em 1948, Lattes e o físico americano Milton Eugene Gardner (1901-1986), detectaram (não produziram, [1]) artificialmente os primeiros mésons carregados no sincrociclotron de 380 MeV da Universidade de Berkeley [124], na Califórnia, onde bombardearam alvos de vários materiais com partículas alfa. A detecção foi capa da revista *Science New Letter*, Figura 26. Em seguida, Lattes publica com Occhialini e Powell a relação entre as massas dos mésons  $\pi^+$  e  $\mu^-$  [123].

No ano seguinte, com John Burfening (tenente-coronel do exército americano), Gardner e Lattes, anunciaram e publicaram [125] a produção de mésons- $\pi^+$  no Cíclotron de 184 polegadas de Berkeley, Universidade da Califórnia. A equipe formada por Brown, Camerini, Fowler, Muirhead, Powell e Ritson ainda registrariam em placas com emulsões sensíveis aos elétrons [116; 117], o decaimento de uma partícula carregada em, provavelmente, três mésons- $\pi$  (não descartaram, entretanto, a possibilidade de um decaimento em dois mésons- $\pi$  e um méson- $\mu$ , ou ainda em dois méson- $\mu$  e um méson- $\pi$ ). A massa da partícula foi estimada entre 870 e 985 massas do elétron. Tratava-se, na verdade, do primeiro exemplo do decaimento  $\tau$ :



A Física foi então sendo ‘inundada’ progressivamente por partículas, onde o entendimento das propriedades, naquela época, representava um grande

desafio. A partir das detecções dos mésons em Berkeley, o caminho para a construção de aceleradores de partículas, cada um mais potente que o anterior, permitiriam a criação e a investigação dessas partículas em laboratório, possibilitando um estudo mais acurado.

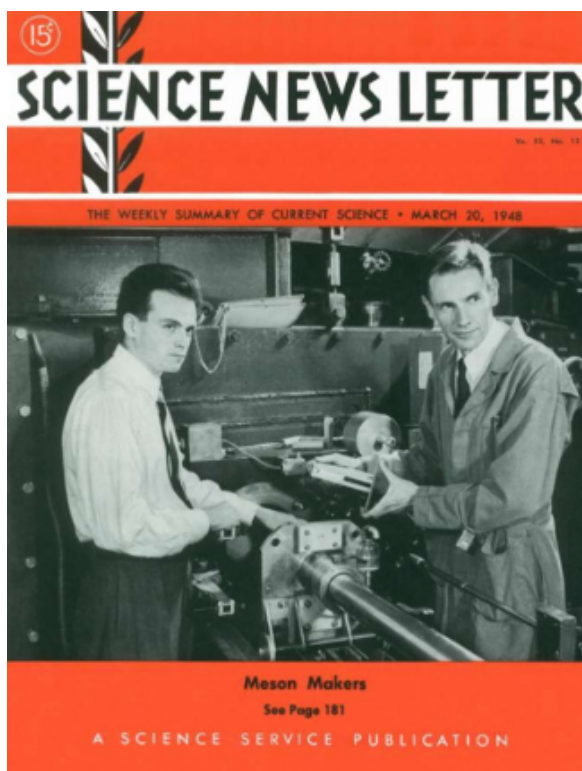


Figura 26 – Capa da revista *Science New Letter* em março de 1948, com os físicos Lattes e Gardner. Fonte: *Science New Letter*.

## XI. Espectroscopia de Galáxias

A Figura 27, repleta de raios cósmicos (pontinhos brancos), representa dois espectros ópticos (tempo de integração de 2400 segundos) de duas galáxias peculiares [118] observadas no Observatório do Pico dos Dias/Laboratório Nacional de Astrofísica (OPD/LNA) com o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) e o espectrógrafo Boller & Chievens (Cassegrain). Para maiores detalhes, indicamos link do projeto ‘AstroPT’: Astronomia com Pequenos Telescópios.

Os mésons- $\mu$  (múons) podem ser detectados com câmaras de nuvens [119], contadores Geiger (que medem certas radiações ionizantes) e detectores cintiladores [120], mas também podem ser registrados em chips do tipo *CCD* (*Charge Coupled Device* [121], *CMOS* (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* [122]) e até em câmeras

digitais comuns que são sensíveis a partículas carregadas.

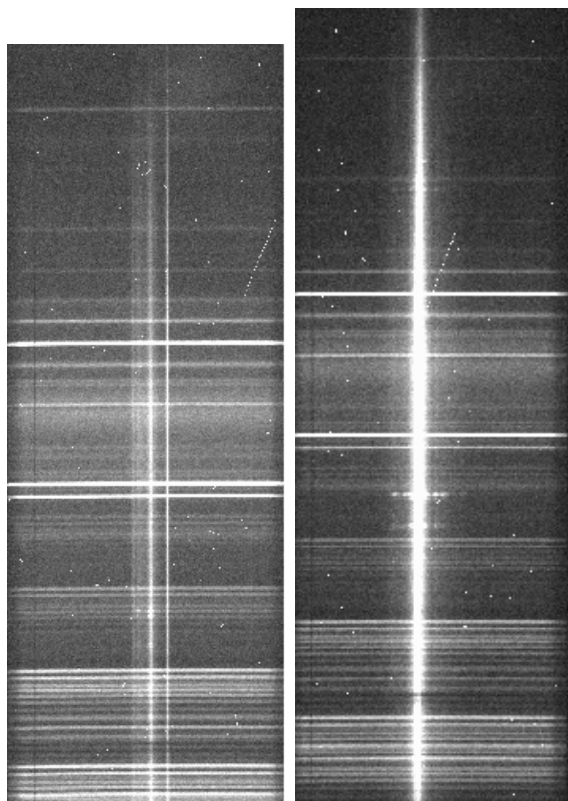


Figura 27 – Espectros ópticos brutos de duas galáxias peculiares observadas em épocas diferente (2024 e 2014) no OPD/LNA contendo mais de 35 mil raios cósmicos (função direta do tempo de integração). Fonte: Arquivo pessoal. Nos vários espectros obtidos em nosso projeto observacional, podemos identificar três tipos principais de rastros deixados nos espectros: partículas alfa, que possuem rastros pequenos e grossos (não presentes nestas imagens); múons, que possuem trilhas finas e longas (canto superior direito); e elétrons, que têm trilhas sinuosas (pequeno círculo superior central observado no espectro esquerdo).

O fluxo de múons na superfície da Terra é, em média, de aproximadamente 1 partícula por centímetro quadrado por minuto. A matriz do sensor da CCD empregada nas observações das galáxias peculiares é de  $2048 \times 2048$  pixels (tamanho da imagem), com pixels quadrados de  $13,5 \times 13,5$  microns. Sendo a área do chip de  $27,6 \times 27,6$  mm ( $\sim 7,2$  cm<sup>2</sup>), significa que podemos esperar, em média, até 7 múons atingindo o sensor durante uma exposição de 1 minuto. Então, podemos esperar nas respectivas imagens, cerca de 280 múons. Uma análise espectral mais profunda, abrangendo um período observacional de 10 anos, será feita em uma outra contribuição científica.

Os múons não sentem a interação forte do núcleo atômico e na sua trajetória perdem energia por ionização até decaírem. Isto faz com que a sua trajetória seja retilínea, como observada na Figura 27.

## XII. Conclusões

A presente contribuição, com alguns registros históricos que remontam aos primeiros estudos (direta ou indiretamente) com a radiação cósmica, objetiva descrever um pouco deste fascinante campo de investigação e, sobretudo, de reviver a contribuição científica deixada pelo físico experimental César Lattes (1924-2005) para a área de Física de Partículas e Campos, no ano em que celebramos o centenário de seu nascimento.

Apesar de haver uma farta produção científica na literatura, julgamos importante escrever sobre o papel que César Lattes teve na descoberta da partícula prevista pelo físico japonês Hideki Yukawa, de modo a manter acessa a importância de se fazer pesquisa no país (teórica e experimental) com o devido fomento das agências governamentais, Federal (CNPq, CAPES e FINEP) e Estadual (Fundações de Amparo à Pesquisa).

Ainda, também representa uma maneira de manter vivo o seu legado no âmbito internacional, sobretudo, pelo fato de ser muito fácil suprimir o seu nome da história.

Por exemplo, em 1987, a Universidade de Bristol, onde Lattes foi recebido em 1947 para, junto com a equipe de Powell, investigar a radiação cósmica com as novas emulsões da *Ilford Photo*, republica um pequeno fragmento de autobiografia como um livro de memórias de Cecil Frank Powell. Neste documento, a única menção feita a César Lattes refere-se apenas a produção artificial com o físico norte-americano Eugene Gardner (1913-1950) dos primeiros mésons (píons) carregados no sincrociclotron de 380 MeV da Universidade de Berkeley, na Califórnia.

Da mesma forma, também devemos sublinhar as ausências nos artigos, pelo menos, das microscopistas Marietta Kurtz e Irene Roberts como coautoras que identificaram, pela primeira vez, as trajetórias dos mésons (píon e múon) nas emulsões com boro expostas no Pic du Midi. Trata-se, na verdade, de mais um exemplo de exclusão do importante papel que as mulheres desempenham na ciência, sem o devido reconhecimento na maioria das vezes.

Ao retornar para o Brasil, Lattes contribuiu diretamente para o desenvolvimento científico da Física no país. Em particular, destacamos a implantação do CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas)

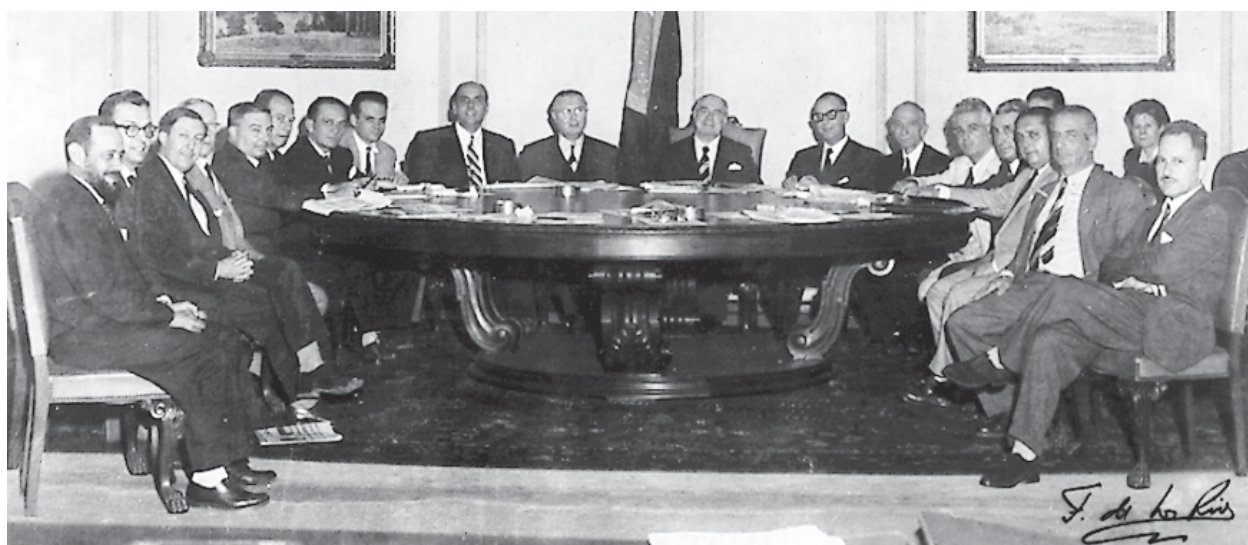


Figura 28 – Primeira reunião do Conselho Deliberativo do CNPq, realizada em abril de 1951, no Rio de Janeiro: divisão entre nacionalistas e não-nacionalistas. Fonte: Jornal da Unicamp. Universidade Estadual de Campinas – 30 de março a 3 de abril de 2005. César Lattes encontra-se no final mesa, lado esquerdo.

sicas), a criação do CNPq (Figura 28), um importante órgão de fomento à pesquisa, e também da própria criação da UNICAMP em torno do Instituto de Física, constituído, inicialmente, pelo seu próprio laboratório.

Lattes recebeu vários prêmios e títulos, no país e no exterior, ratificando o mérito científico obtido ao longo de sua carreira de pesquisador e professor. Soma-se a estes valores, a Lei Federal 14.839 de 2024, que incluiu o físico César Lattes no *Livro dos Heróis e Heroínas da Pátria*, sancionada pelo presidente da República, Luiz Inácio Lula da Silva.

A descoberta do méson- $\pi$  foi algo acima do que encontrar uma partícula prevista em um teoria. A descoberta anunciou o início de uma nova era, baseada em uma revisão dos conceitos sobre a estrutura da matéria.

As sucessivas descobertas de novas partículas desde as primeiras investigações da radiação cósmica, desafiou o próprio conceito de “partícula elementar” e impulsionou a Física para um outro estágio, envolvendo os possíveis tipos de interações, classificação e a constituição das partículas, regras e leis de conservação, princípios de simetria, cinemática relativística, acelerados e detectores.

Ainda, a descoberta inspirou também um dos grandes pintores surrealista do século XX, o espanhol Salvador Dalí Domènech (1904-1989), ao retratar em 1956 a tela *Santo Rodeado por Três Mésons- $\pi$* . Visite o site e confira a obra surrealista.

Finalmente, estimulamos o(a) leitor(a) a visitar o site da SBF e saborear, não apenas os atuais des-

taques dados ao centenário de César Lattes, mas também aos avanços e conquistas da Física brasileira. Continuamos, como mensagem final, na luta pela valorização das Escolas, Universidades, Institutos e Centros de Pesquisas, e de reconhecer o legado de muitos(as) pesquisadores(as) para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil.

## Agradecimentos

Esta contribuição faz parte do projeto de popularização científica financiado pela FAPESB, Termo de Outorga n° APR0012/2023, Pedido N°5466/2023, *Física Moderna na Escola: A Descoberta do Méson- $\pi$  e o Centenário de César Lattes*, desenvolvido no Observatório Astronômico Antares/Museu Antares de Ciência e Tecnologia da UEFS.

## Referências

- [1] M. Nussenzveig, F. de Souza-Barros, C.L. Viera, *Modéstia, Ciência e Sabedoria (Interview with César Lattes)*. Ciência Hoje **19**, 11 (1995).
- [2] A.M.R. de Andrade, *Físicos, Mésons e Política. A Dinâmica da Ciência na Sociedade*. São Paulo: Editora Hucitec (1999).
- [3] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions*. Nature **160**, 453 (1947).

- [4] H. Yukawa, *On the interaction of Elementary Particles*. Proc. Math. Soc. Japan. **17**, 48 (1935).
- [5] NOTA-1: Prótons e neutrons foram termos propostos em 1941 pelo físico dinamarquês Christian Möller (1904-1980).
- [6] H.D. Tavares, *Estilo de pensamento em física nuclear e de partículas no Brasil (1934-1975): César Lattes entre raios cósmicos e aceleradores*. Tese de Doutorado (PPG-HCTE-CCMN-UFRJ). Rio de Janeiro: UFRJ (2017).
- [7] O.A.P. Tavares, *Edição Comemorativa dos 70 anos de Méson- $\pi$  com César Lattes*. Ciência e Sociedade **5**, (3) 1 (2018).
- [8] J.M.F. Bassalo, *Nascimentos da Física (1901-1950)*. Belém: EDUFPA (2000).
- [9] J.F. Ziegler, *Terrestrial cosmic rays*. IBM Journal of Research and Development **40**, (1) 19 (1996).
- [10] NOTA-2: Na forma ionizada, os átomos são suprimidos de um ou mais elétrons, perdendo, desse modo, a neutralidade elétrica. No caso particular do Sol, as altas temperaturas reinantes na região central provoca facilmente a ionização, de tal modo que as energias envolvidas são suficientes para vencer a ligação dos elétrons aos respectivos núcleos, ocasionando, assim, a remoção desses dos átomos. De um modo geral, no interior das estrelas, os átomos encontram-se na forma ionizada (plasma).
- [11] L.A. Anchordoqui, *Ultra-high-energy cosmic rays*. Physics Reports **801**, 1 (2019).
- [12] NOTA-3: Na Física de Partículas, a energia é medida em elétron-volts (eV). Um eV é a mudança de energia em um único elétron à medida que este se move através da diferença de potencial elétrico de 1 Volt. Em unidades do SI:  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Joules (J)}$ .
- [13] NOTA-4: Inventado pelo físico inglês William Gilbert (1544-1603), representa um dos primeiros instrumentos usados para detectar a presença de carga elétrica em um corpo, ou seja, apenas indica, de forma aproximada, a quantidade de carga. A balança de Coulomb é similar, exceto pelo uso de pequenas esferas carregadas.
- [14] T. Wulf, *Allgemeine Theorie elektrostatischer Meßinstrumente mit besonderer Berücksichtigung des Quadrantelektrometers*. Annalen der Physik **335**, (14) 697 (1909).
- [15] NOTA-5: Hess and Wulf.
- [16] T. Wulf, *Observations on the radiation of high penetration power on the Eiffel tower*. Physikalische Zeitschrift **XI**, 811 (1910).
- [17] M.S. Longair, *High energy astrophysics. An informal introduction for students of physics and Astronomy*. Cambridge: Cambridge University Press (1981).
- [18] F.E. Close, *The particle odyssey: a journey to the heart of the matter*. Oxford: Oxford University Press (2002).
- [19] D. Pacini, *La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque*. Il Nuovo Cimento, **3**, (1) 93 (1912).
- [20] NOTA-6: Os eclipses do Sol acontecem quando a Lua, vista da Terra, alinha-se com o Sol. Porém, devido à órbita elíptica da Lua, nem sempre o Sol é totalmente eclipsado. Um eclipse solar pode ser visto apenas em determinadas localidades do planeta (latitudes geográficas).
- [21] V.F. Hess, *Über die Absorption der  $\gamma$ -Strahlen in Atmosphäre*. Physikalische Zeitschrift **XII**, 998 (1911).
- [22] V.F. Hess, *Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballoffahrten*. Physikalische Zeitschrift **13**, 1084 (1912).
- [23] V.F. Hess, *Über den Ursprung der durchdringenden Strahlung*. Physikalische Zeitschrift **XIII**, 610 (1913).
- [24] W. Kolhörster, *Penetrating Radiation at High Altitudes*. Monthly Weather Review **43**, (12) 596 (1915).
- [25] R.A. Millikan, *High Frequency Rays of Cosmic Origin*. PNAS **12**, (1) 48 (1926).
- [26] R.A. Millikan, G.H. Cameron, *High Frequency Rays of Cosmic Origin*. Phys. Rev. **32**, (4) 533 (1928).
- [27] NOTA-7: Robert Millikan foi o primeiro *PhD* (Doutor) em Física pela Columbia University e um dos maiores cientistas experimentais da época, recebendo o Nobel de Física em 1923 pelos estudos realizados na carga do elétron e no efeito fotoelétrico.
- [28] C.T.R. Wilson, *On a Method of Making Visible the Paths of Ionising Particles through a Gas*. Proc. R. Soc. Lond. **A85**, (578) 285 (1911).
- [29] C.T.R. Wilson, *On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and Some Results Obtained by Its Use*. Proc. R. Soc. Lond. **A87**, (595) 277 (1912).
- [30] C.D. Anderson, *The Positive Electron*. Phys. Rev. **43**, (6) 491 (1933).
- [31] D.V. Skobeltsyn, *Über eine neue Art sehr schneller beta-Strahlen*. Zeitschrift für Physik **54**, (9-10) 686 (1929).

- [32] NOTA-8: Efeito atribuído ao físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962), o primeiro a usar o nome ‘fóton’ para o quantum de luz. Também conhecido como espalhamento Compton, o efeito consiste no espalhamento de um fóton por uma partícula carregada, geralmente um elétron, resultando na perda de energia do fóton espalhado, tipicamente na faixa de raios-X ou de raios gama. Compton recebeu o prêmio Nobel de Física em 1927 pela descoberta do efeito, que leva o seu sobrenome.
- [33] P.M.S. Blackett, G.P.S. Occhialini, *Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation*. Proc. R. Soc. Lond. **A139**, (839) 699 (1933).
- [34] C.D. Anderson, *Energies of Cosmic-Ray Particles*. Phys. Rev. **41**, (4) 405 (1932).
- [35] C.D. Anderson, *The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives*. Science **76**, 238 (1932).
- [36] J. Chadwick, P.M.S. Blackett, G.P.S. Occhialini, *New Evidence for the Positive Electron*. Nature **131**, (3309) 473 (1933).
- [37] J. Chadwick, P.M.S. Blackett, G.P.S. Occhialini, *Some Experiments on the Production of Positive Electrons*. Proc. R. Soc. Lond. **A144**, (851) 235 (1934).
- [38] NOTA-9: Johann Jakob Balmer (1825-1898), físico e matemático suíço que determinou o comprimento de onda das linhas espectrais do hidrogênio atômico.
- [39] NOTA-10: Johannes Robert Rydberg (1854-1919), físico sueco cuja fórmula é usada para determinar todo o espectro da luz emitida pelo hidrogênio. Depois, a mesma foi estendida para uso com qualquer elemento a partir do princípio de combinação de Rydberg-Ritz. Walther Heinrich Wilhelm Ritz (1878-1909), físico teórico suíço.
- [40] NOTA-11: Trata-se de um experimento elétrico inventado pelo físico britânico William Crookes (1832-1919) que ocorre em um tubo de descarga com vácuo parcial. Foram nessas âmpolas que os raios catódicos foram descobertos.
- [41] W. Bothe, W. Kolhörster, *Das Wesen der Höhenstrahlung*. Zeitschrift für Physik **56**, (11) 751 (1929).
- [42] W. Bothe, *Zur Vereinfachung von Koinzidenzzählungen*. Zeitschrift für Physik **59**, 1 (1929).
- [43] B. Rossi, *Method of Registering Multiple Simultaneous Impulses of Several Geiger’s Counters*. Nature **125**, (3156) 636 (1930).
- [44] B. Rossi, *On the Magnetic Deflection of Cosmic Rays*. Phys. Rev. **36**, (3) 606 (1930).
- [45] B. Rossi, *Magnetic Experiments on the Cosmic Rays*. Nature **128**, (3225) 300 (1931).
- [46] B. Rossi, *Azione del campo magnetico terrestre sulla radiazione penetrante*. Il Nuovo Cimento **10**, (8) 333 (1933).
- [47] R.A. Millikan, I.S. Bowen, *Similarity between Cosmic Rays and Gamma Rays*. Nature **128**, (3231) 582 (1931).
- [48] R.A. Millikan, *History of Research in Cosmic Rays*. Nature **126**, (3166) 14 (1930).
- [49] P. Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, R.A. Fréon, *Extensive Cosmic-Ray Showers*. Rev. Mod. Phys. **11**, (3-4) 288 (1939).
- [50] T.K. Gaisser, R. Engel, E. Resconi, *Cosmic Rays and Particle Physics*. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press (2016).
- [51] D. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*. 4th Edition. Cambridge: Cambridge University Press (2000).
- [52] A.M. Hillas, *Cosmic Rays. Selected Readings in Physics*. Oxford: Pergamon Press (1972).
- [53] G. Pfozter, *Dreifachkoinzidenzen der Ultrasstrahlung aus vertikaler Richtung in der Stratosphäre*. Physikalische Zeitschrift **102**, 23 (1936).
- [54] T.K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press (1990).
- [55] P.K.F. Grieder, *Cosmic Rays at Earth: Researcher’s Reference Manual and Data Book*. New York: Elsevier Science Limited (2001).
- [56] W. Heitler, *The Quantum Theory of Radiation*. San Francisco: Courier Corporation (1984).
- [57] NOTA-12: Faculdade de Direito, Faculdade de Medicina, Faculdade de Farmácia e Odontologia, Escola Politécnica, Instituto de Educação, Instituto de Ciências Econômicas e Comerciais (concretizada com a instalação da Faculdade de Ciências Econômicas e Administrativas, em 1946), Escola de Medicina Veterinária, Escola Superior de Agricultura e a Escola de Belas Artes, substituída pela Escola de Comunicações Culturais, criada em 1966 e que, em 1969, passa a se chamar Escola de Comunicação e Artes.
- [58] G. Wataghin, *The Thermal Equilibrium of Elementary Particles*. Phys. Rev. **47**, (5) 423 (1935).
- [59] G. Wataghin, *Remarks on the Theory of Protons and Neutrons*. Phys. Rev. **48**, (3) 284

- (1935).
- [60] G. Wataghin, M.D. de Sousa Santos, *A new type of particle counter*. Journal of Scientific Instruments **14**, (12) 421 (1937).
- [61] G. Wataghin, M.D. de Sousa Santos, *Sopra un Nuovo Tipo di Contatore di Corpuscoli*. Il Nuovo Cimento **15**, (2) 104 (1938).
- [62] G. Wataghin, *On Explosion Showers*. Phys. Rev. **56**, (12) 1245 (1939).
- [63] L. Jánossy, P. Ingleby, *Penetrating Cosmic Ray Showers*. Nature **145**, (3674) 511 (1940).
- [64] R. Rutherford, *Collision of  $\alpha$ -Particles with Light Atom, Part IV. Anomalous Effect in Nitrogen*. Philosophy Magazine **37**, 581 (1919).
- [65] J. Chadwick. Proc. Roy. Soc. London **A136**, (830) 692 (1932).
- [66] T. Kodama, *A Memória de Yukawa*. Rev. Bras. Ens. Fis. **12**, 2 1982.
- [67] NOTA-13: Na teoria, Yukawa postulou a existência de três tipos de mésons, com cargas  $+e$ ,  $0$ ,  $-e$ .
- [68] H. Yukawa, S. Sakata, *On the Interaction of Elementary Particles. II*. Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 3rd Series. **19**, 1084 (1937).
- [69] C.D. Anderson, S.T. Neddermeyer, *Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elevation and Near Sea-Level*. Phys. Rev. **50**, (4) 263 (1936).
- [70] C.D. Anderson, S.H. Neddermeyer, *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*. Phys. Rev. **51**, (10) 884 (1937).
- [71] J.C. Street, E.C. Stevenson, *New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron*. Phys. Rev. **52**, (9) 1003 (1937).
- [72] Y. Hishina, M. Takeuchi, T. Ichimiya, *On the Nature of Cosmic-Ray Particles*. Phys. Rev. **52**, (11) 1198 (1937).
- [73] D.H. Frisch, J.H. Smith, *Measurement of the Relativistic Time Dilation Using  $\mu$ -Mesons*. Amer. J. Phys. **31**, (5) 342 (1963).
- [74] J.R. Oppenheimer, R. Serber, *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*. Phys. Rev. **51**, (12) 1113, 1937.
- [75] E.C.G. Stückelberg, *On the Existence of Heavy Electrons*. Phys. Rev. **52**, (1) 41 (1937).
- [76] NOTA-14: Essa fato foi retirado da nota presente no livro *Modern Physics*, Capítulo 11 (Física Nuclear, p. 552), dos autores Paul A. Tipler and Ralph A. Llewellyn (2008).
- [77] H. Yukawa, S. Sakata, *Mass and Mean Life Time of the Mesotron*. Nature **143**, 761 (1939).
- [78] G. Wataghin, M.D. de Souza Santos, P.A. Pompeia, *Simultaneous Penetrating Particles in the Cosmic Radiation*. Phys. Rev. **57**, 61 (1940).
- [79] G. Wataghin, M.D. de Souza Santos, P.A. Pompeia, *Simultaneous Penetrating Particles in the Cosmic Radiation. II*. Phys. Rev. **57**, (4) 339 (1940).
- [80] S. Sakata, T. Inoue, *Chukanshi to Yukawa ryushi no Kankei ni tuite*. Nippon Suugaku-Butsuri Gakkaishi (Bulletin of the Physical and Mathematical Society of Japan) **16**, (232) 194 (1942).
- [81] S. Sakata, T. Inoue, *On the Correlations between Mesons and Yukawa Particles*. Progress of Theoretical Physics **1**, (4) 143 (1946).
- [82] F. Rasetti, *Mean Life of Slow Mesotrons*. Phys. Rev. **59**, (7) 613 (1941).
- [83] F. Rasetti, *Evidence for the Radioactivity of Slow Mesotrons*. Phys. Rev. **59**, (9) 706 (1941).
- [84] F. Rasetti, *Disintegration of Slow Mesotrons*. Physical Review, **60**, 3, 198, (1941).
- [85] N. Nereson, B. Rossi, *Further Measurements on the Disintegration Curve of Mesotrons*. Phys. Rev. **64**, (7-8) 199 (1943).
- [86] NOTA-15: Nas datas de 16 de julho, 6 e 8 de agosto de 1945, os norte-americanos explodiram três bombas atômicas, respectivamente, em Alamogordo, no Novo México, Hiroshima e Nagasaki, no Japão.
- [87] M. Blau, H. Wambacher, *Disintegration Processes by Cosmic Rays with the Simultaneous Emission of Several Heavy Particles*. Nature **140**, (3544) 585 (1937).
- [88] M. Blau, *Photographic Tracks from Cosmic Rays*. Nature **142**, (3586) 613 (1938).
- [89] Y. Hishina, Y. Sekido, Y. Miyazaki, T. Masuda, *Cosmic Rays at a Depth Equivalent to 1400 Meters of Water*. Phys. Rev. **59**, (4) 401 (1941).
- [90] L. LePrince-Ringuet, S. Gorodetsky, E. Nageotte, R. Richard-Foy, *Direct Measurement of the Mass of the Mesotron*. Phys. Rev. **59**, (5) 460 (1941).
- [91] C.P. Powell, *Applications of the Photographic Method to Problems in Nuclear Physics. I*. Proc. Roy. Soc. London **A181**, (987) 344 (1943).
- [92] L. LePrince-Ringuet, M. Lhéritier, *Existence Probable d'une Particule de Masse 990 me dans le Rayonnement Cosmique*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences **219**, 618 (1944).

- [93] L. Leprince-Ringuet, M. Lh eritier, R. Richard-Foy, *Recherches sur les protons de grande énergie et sur les m sotons dans la partie pénétrante du rayonnement cosmique*. J. Physique et le Radium **7**, (3) 69 (1946).
- [94] H.A. Bethe, *Multiple Scattering and the Mass of the Meson*. Phys. Rev. **70**, (11-12) 821 (1946).
- [95] C.M.G. Lattes, G. Wataghin, *Sobre a Abund ncia de N cleos no Universo*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, **17**, (4) 269 (1945).
- [96] C. Lattes, G. Wataghin, *On the Abundance of Nuclei in the Universe*. Phys. Rev. **69**, (5-6) 237 (1946).
- [97] P. Cuer, C.M.G. Lattes, *Radioactivity of Samarium*. Nature **158**, (4006) 197 (1946).
- [98] C.F. Powell, G.P.S. Occhialini, D.L. Livesey, L.V. Chilton, *A New Photographic Emulsion for the Detection of Fast Charged Particles*. J. Scientific Instruments **23**, (5) 102 (1946).
- [99] G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *Multiple Disintegration Processes Produced by Cosmic Rays*. Nature **159**, (4029) 93 (1947).
- [100] G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *Nuclear Disintegrations Produced by Slow Charged Particles of Small Mass*. Nature **159**, (4032) 186 (1947).
- [101] D.H. Perkins, *Nuclear Disintegration by Meson Capture*. Nature **159**, (4030) 126 (1947).
- [102] O. Sala, G. Wataghin, *Showers of Penetrating Particles at Altitude of 22,000 Feet*. Phys. Rev. **70**, (5-6) 430 (1946).
- [103] M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni. Phys. Rev. **71**, 209 (1947).
- [104] NOTA-16: Niels Henrik David Bohr (1885-1962), laureado com o Nobel de Física de 1922 pela contribui o dada   compreensão da estrutura e espectros atômicos.
- [105] M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni. Phys. Rev. **68**, 232 (1945).
- [106] T. Sigurgeirson, K.A. Yamakawa, *Decay of mesons stopped in light materials*. Phys. Rev. **71**, 319 (1947).
- [107] E. Fermi, E. Teller, V. Weisskopf, *The Decay of Negative Mesotrons in Matter*. Phys. Rev. **71**, 314 (1947).
- [108] R.E. Marshak, H.A. Bethe, *On the Two-Meson Hypothesis*. Phys. Rev. **72**, 506 (1947).
- [109] Y. Tanikawa, *On the Cosmic-Ray Meson and the Nuclear Meson*. Prog. Theo. Phys. **2**, 220 (1947).
- [110] C.M.G. Lattes, H. Muirhead, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *Processes Involving Charged Mesons*. Nature **159**, (4047) 694 (1947).
- [111] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions*. Nature **160**, (4066) 453 (1947).
- [112] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions*. Nature **160**, (4067) 486 (1947).
- [113] W.G. McMillan, E. Teller, *On the Production of Mesotrons by Nuclear Bombardment*. Phys. Rev. **72**, (1) 1 (1947).
- [114] B. Pontecorvo, *Nuclear Capture of Mesons and the Meson Decay*. Physical Review, **72**, 3, 246-247 (1947).
- [115] G.D. Rochester, C.C. Butler, *Evidence for the existence of new unstable elementary particles*. Nature **160**, (4077) 855 (1947).
- [116] R. Brown, U. Camerini, P.H. Fowler, H. Muirhead, C.F. Powell, D.M. Ritson, *Observations with Electron-Sensitive Plates Exposed to Cosmic Radiation*. Nature **163**, (4132) 47 (1949).
- [117] R. Brown, U. Camerini, P.H. Fowler, H. Muirhead, C.F. Powell, D.M. Ritson, *Observations with Electron-Sensitive Plates Exposed to Cosmic Radiation*. Nature **163**, (4133) 82 (1949).
- [118] NOTA-17: Uma galáxia peculiar representa uma classe de galáxias com tamanho, composi o e, sobretudo, morfologia, diferenciada quando comparada àquelas que compõem a classifica o de Hubble (elípticas, lenticulares e espirais). Fazem parte do catálogo de Arp & Madore (1987) e são estudantes pelo nosso Grupo de Pesquisa em Galáxias Peculiares (GPGP).
- [119] NOTA-18: Também denominada de câmara de nuvens de Wilson [Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), físico escocês],   um detector de partículas bastante usado para visualizar a passagem da radia o ionizante. Foi fundamental para a confirma o da primeira rea o nuclear produzida artificialmente. Também permitiu provar a existência dos p sitr ns, a estrutura das cascatas eletromagnéticas e de um grande número de partículas elementares. Uma versão didática pode ser construída com materiais de baixo custo para ilustrar a detec o de partículas.
- [120] NOTA-19: Na Física Nuclear e na Física de Partículas e Campos, representa um dos dispositivos de detec o de partículas mais utilizados. Quando certos materiais são atingidos

- por uma partícula nuclear ou por radiação ionizante, emitem um pequeno raio de luz (fóton), ou seja, uma cintilação.
- [121] NOTA-20: Em português, dispositivo de carga acoplada, um sensor semicondutor que permite a captura de imagens. É formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados. Mediante o controle de um circuito externo, cada capacitor pode transferir sua carga elétrica para um outro capacitor vizinho.
- [122] NOTA-21: Apesar de preservarmos a sigla em inglês *CMOS*, significa em português *Semicondutor de Óxido Metálico Complementar*. Trata-se igualmente de um sensor para capturar imagens, com a vantagem de consumir até 100 vezes menos energia que um sensor CCD equivalente. Os sensores CMOS são bastante usados em celulares, porque são menores, dissipam menos calor e gastam menos bateria. O desempenho de imagens dos sensores CMOS é relativamente superior ao CCD.
- [123] C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini, C.F. Powell, *A Determination of the Ratio of the Masses of  $\pi^-$  and  $\mu^-$  Mesons by the Method of Grain-counting*. Proc. Phys. Soc. **61**, (2) 173 (1948).
- [124] E. Gardner, C.M.G. Lattes, *Production of Mesons by the 184-Inch Berkeley Cyclotron*. Science **107**, (2776) 270 (1948).
- [125] J. Burfening, E. Gardner, C.M.G. Lattes, *Positive Mesons Produced by the 184-Inch Berkeley Cyclotron*. Phys. Rev. **75**, (3) 382 (1949).

