

CBPF - CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rio de Janeiro

Ciência e Sociedade

CBPF-CS-004/18

outubro 2018

70 Anos do Méson- π com César Lattes

Odilon A. P. Tavares



CIÊNCIA e SOCIEDADE

www.biblioteca.cbpf.br
www.cbpf.br/cienciaesociedade

Publicação do / Published by
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF

*Edição Comemorativa dos
70 Anos do Méson- π com César Lattes*

Subvencionada por / Supported by



Editores

Nilton Alves Júnior, CBPF, Brasil

Ronald Cintra Shellard, (Editor Adjunto) CBPF, Brasil

Francisco Caruso, CBPF, Brasil

Editores de Seção

Henrique Lins de Barros, CBPF, Brasil

Cássio Leite Vieira, Ciência Hoje, Brasil

Antonio Augusto Passos Videira, UERJ, Brasil

Alberto Passos Guimarães Filho, CBPF, Brasil

Raúl Oscar Vallejos, CBPF, Brasil

Editores de Texto

Aline Dantas

Valéria Fortaleza

Ciência e Sociedade é uma revista oficial do CBPF que publica quadrimestralmente artigos originais sobre reflexões, discussões, debates de temas pertinentes à educação, política, memória, humanidades, no âmbito da ciência e da cultura.

CORPO EDITORIAL:

Editores: Nilton Alves Júnior, CBPF, Brasil (naj@cbpf.br)
Francisco Caruso, (Editor Adjunto), CBPF, Brasil (caruso@cbpf.br)

Assistentes editoriais: Aline Dantas (alinecd@cbpf.br)
Valéria Fortaleza (valeria@cbpf.br)

Para submissão, cópia ou informações sobre esta revista, acessar a página web:

www.cbpf.br/cienciaesociedade

ou entrar em contato com APUB/CDI/CBPF:

Tel.: +55(21)2141-7280/246

70 Anos do Méson- π com César Lattes

Conteúdo

Resumo e Abstract	1
Prólogo	2
Início da pesquisa em Física Moderna no Brasil	3
Hideki Yukawa e a hipótese da força nuclear	4
Descoberta do méson na radiação cósmica	5
Início da carreira científica de Lattes (1943-1946)	6
A motivação que levou Lattes a Bristol (Inglaterra)	7
As emulsões Ilford e a competição nas alturas	8
Donald Perkins e o méson- π negativo	10
Conversi, Pancini e Piccioni: mésons negativos não são os mésons de Yukawa	11
A grande descoberta: desintegração méson $\rightarrow$ méson ($\pi \rightarrow \mu$)	12
A maratona de 1947: Lattes em Chacaltaya	13
Desintegração $\pi \rightarrow \mu$ é confirmada	14
Resumo das investigações sobre mésons em altitudes de montanha	15
Divulgação e visita de César Lattes a Niels Bohr	16
Os ciclotrons da Universidade da Califórnia (Berkeley) na década de 1930	17
Os CALUTRONS e a bomba sobre Hiroshima	18
O ciclotron de 184 polegadas em Berkeley	20
Motivação de Lattes para ir a Berkeley	21
Lattes a caminho de Berkeley	22
Produção de píons em colisões núcleo-núcleo	23
Mésons- π^- no ciclotron de 184 polegadas do UCRL (Berkeley)	26
1948: pioneirismo de Lattes na detecção de píons negativos artificiais	27
Ampla divulgação pela imprensa e nos meios científicos	28
Detecção de píons positivos no ciclotron de 184 polegadas	31
Primeiras medidas de massa dos píons e múons	32
Desdobramentos imediatos e alcance dos feitos de César Lattes	33
Epílogo	35
Bibliografia Geral e Referências citadas	36
Agradecimento	38
Sobre o autor	38
Apêndice A: Como píons são produzidos em colisões núcleo-núcleo	39
Apêndice B: Ganhadores do Prêmio Nobel mencionados neste artigo	42

70 Anos do Méson- π com César Lattes

70 Years of π -Meson with César Lattes

Odilon A. P. Tavares*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTIC,

Rua Dr. Xavier Sigaud 150, Rio de Janeiro, RJ – 22290-180, Brasil

Resumo: Em maio de 1947, o mundo tomou conhecimento da descoberta da partícula elementar batizada como méson- π (ou pión), responsável pela força nuclear que mantém prótons e nêutrons intimamente ligados no núcleo atômico. O personagem central dessa descoberta fundamental para o entendimento da natureza da estrutura da matéria foi o físico brasileiro César Lattes, então com 22 anos, trabalhando no H. H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol (Inglaterra). Um ano depois, duas semanas apenas após sua chegada ao Radiation Laboratory da Universidade da Califórnia (Berkeley, EUA), Lattes detecta pela primeira vez píons negativos no ciclotron de 184 polegadas. Começando das origens da pesquisa em Física Moderna no Brasil a partir de 1934, o autor recorda aqui a trajetória científica seguida por César Lattes até as consequências imediatas resultantes dessa descoberta, como a criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas—CBPF em janeiro de 1949, e do Conselho Nacional de Pesquisas—CNPq em janeiro de 1951, bem como proporcionando desenvolvimento ímpar para a Física no Brasil e na América Latina nas décadas de 1950 a 1980. Lattes foi o pioneiro na detecção dos mésons, tanto os presentes na radiação cósmica em altitudes de montanha (1947) quanto os produzidos com um acelerador de partículas (1948), pelo que se lhe tem dado o título de “nosso herói da era nuclear”.

Palavras chave: Méson- π , César Lattes, Radiação cósmica, Universidade de Bristol, Ciclotron de 184 polegadas, Universidade da Califórnia (Berkeley).

Abstract: In May 1947, the world became aware of the discovery of the elementary particle named meson- π (or pion), responsible for the nuclear force that maintains protons and neutrons closely bound in the atomic nucleus. The central personage of this fundamental discovery for the understanding of the nature of the structure of matter was Brazilian physicist César Lattes, then 22, working at the H. H. Wills Physical Laboratory of the University of Bristol (England). One year later, two weeks after his arrival at the Radiation Laboratory of the University of California (Berkeley, USA), for the first time Lattes detected negative pions in the 184-inch Berkeley cyclotron. Starting from the origins of Modern Physics research in Brazil from 1934, the author recalls here the scientific trajectory followed by César Lattes until the immediate consequences resulting from this discovery, such as the foundation of the Brazilian Center for Physical Research (CBPF) in January 1949, and the National Research Council-CNPq in January 1951, as well as providing important development for physical sciences in Brazil and Latin America in the 1950s to 1980s. Lattes was the pioneer in detecting mesons, both those present in cosmic radiation at mountain altitudes (1947) as the ones produced with a particle accelerator (1948), so he has received the title of “our hero of the nuclear age”.

Keywords: π -meson, César Lattes, Cosmic radiation, University of Bristol, 184-inch cyclotron, University of California (Berkeley).

*Electronic address: optavares@cbpf.br

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

(Fundado em 15 de janeiro de 1949)

EVENTO DE FINAL DO ANO

- 14 de dezembro, 2017 -

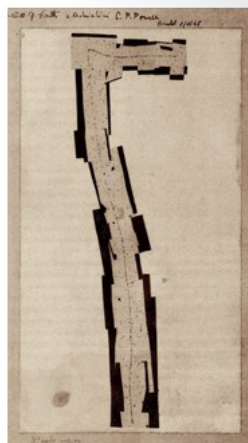
COLÓQUIOS CBPF - 2018

- 16 de outubro, 2018 -



Centro Brasileiro de
Pesquisas Físicas

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



70 ANOS DO MÉSON- π COM CÉSAR LATTES



Odilon A. P. Tavares - CBPF/MCTIC

Prólogo

Em 2017 e 2018 o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF recorda e celebra os 70 anos dos grandes e importantes feitos científicos de César Lattes. Primeiro, em 1947, no H. H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol (Inglaterra), com a bem sucedida descoberta de píons carregados e do decaimento $\pi \rightarrow \mu + \nu$ em eventos colhidos na radiação cósmica em altitudes de montanha. Logo depois, em 1948, com a detecção desses píons produzidos no ciclotron de 184 polegadas do Radiation Laboratory da Universidade da Califórnia em Berkeley (CA, EUA).

Tendo tido a honra de ser convidado pela Diretoria do CBPF para falar em palestras por ocasião da celebração dos 70 anos de ambos os eventos (a primeira acontecida em 14 de dezembro de 2017, e a segunda programada para 16 de outubro de 2018), e atendendo pedidos de colegas, decidi preparar a presente publicação para deixar um registro das palestras mencionadas, podendo assim alcançar um maior número de interessados no tema.

Muitos já ouviram falar da figura de César Lattes e de mésons- π , mas poucos (inclusive físicos) conhecem a história que une o descobridor à sua descoberta. O presente artigo procura traçar a trajetória que levou Lattes a participar (e de forma destacada) dos experimentos que culminaram na identificação da partícula subnuclear responsável por manter a coesão do núcleo atômico, a despeito da repulsão elet-

rostática entre os prótons de carga elétrica positiva.

Conheci César Lattes em 1965–1967 quando estudante do bacharelado em Física na antiga FNFi da Universidade do Brasil (posteriormente UFRJ), e mais de perto no CBPF, nos anos 1980, quando fazíamos parte do então Departamento de Física Nuclear e Altas Energias.

Dele aprendi muitas lições. Aqui, recordo apenas duas delas: a primeira, ele dizia, Física é Natureza, uma investigação constante sobre a natureza do mundo visível e invisível; a segunda, ele insistia em dizer, a história da Física é tão importante quanto a própria Física que fazemos.

Assim, guiado por esses ensinamentos, servindo-me da bibliografia geral (relacionada ao final) como orientação do presente texto, e seguindo estritamente a cronologia dos acontecimentos, preparei as duas palestras alusivas aos 70 anos da detecção dos mésons- π , as quais agora vêm aqui registradas na forma de texto-legenda para a revista de divulgação *Ciência e Sociedade*, editada pelo CBPF.

1934 **Marco da pesquisa em Física Moderna no Brasil**

Jan: Criada em SP a FFCL, semente da futura USP

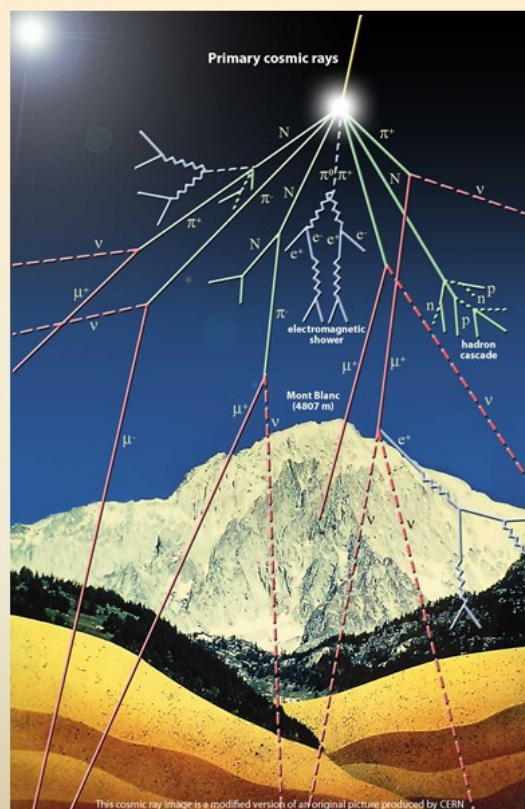
Abril:

- Theodoro Ramos vai à Europa em busca de pesquisadores para formar o DF
- Enrico Fermi declinou do convite de ficar em SP
- Intensifica-se na Europa a perseguição dos nazistas aos judeus
- Por recomendação de Fermi, Gleb Wataghin transfere-se para SP e lá cria o DF-FFCL-USP



Wataghin, pai da moderna física no Brasil, introduz a pesquisa científica sobre raios cósmicos

Gleb Wataghin
Físico russo-italiano
(1899-1986)



Iniciamos essa aventura científica relembrando as origens da Física Moderna no Brasil, a qual despontou em 1934 em São Paulo, com a criação, em janeiro daquele ano, da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras-FFCL, que foi a semente da futura Universidade de São Paulo, a bem conhecida USP.

Para compor o quadro de professores e pesquisadores, o governador do Estado na ocasião, o engenheiro paulistano Armando de Salles Oliveira (1887–1945), designou uma comitativa acadêmica chefiada pelo matemático Theodoro A. Ramos (1895–1937) para ir a Europa com a finalidade de contratar profissionais de grande expressão que se dispusessem a se transferir para o Brasil a fim de formar, entre outros, o Departamento de Física-DF da FFCL em São Paulo.

Com essa missão, Theodoro Ramos e sua comitativa partiram para a Europa em abril. Tão logo chegaram à Itália, foi formulado convite ao físico italiano Enrico Fermi (1901–1954), um dos expoentes da física em Roma. Este, entretanto, declinou do convite, pois naquele momento Fermi e sua equipe estavam envolvidos em experimentos que levaram à descoberta de novos radionuclídeos (radioatividade induzida por nêutrons [1]), inclusive (equivocadamente) aos supostos elementos artificiais transurânicos [2].

Naquele ano de 1934, a Europa vivia um ambiente extremamente hostil e cruel, pois o líder político de origem austríaca Adolf Hitler (1889–1945) havia sido nomeado,

no ano anterior, chanceler do Terceiro Reich na Alemanha, dando início à perseguição implacável dos nazistas aos judeus e àqueles de origem não ariana.

Muitos dos perseguidos conseguiram emigrar, inclusive cientistas de diferentes nacionalidades. Nessas circunstâncias, por recomendação de Fermi, o físico russo-italiano de origem judaica, Gleb Wataghin (1899–1986), decidiu transferir-se para São Paulo, e lá cria o DF-FFCL da futura USP.

Wataghin é considerado o pai da moderna física no Brasil, introduzindo a pesquisa científica sobre raios cósmicos, que haviam sido descobertos em 1912 pelo físico austríaco Victor F. Hess (1883–1964), originalmente chamada de radiação das alturas [3].

Nessa época, César Lattes tinha dez anos de idade. Wataghin, entre outras grandes realizações, formou a primeira equipe de físicos extraordinários, como Mario Schenberg (1914–1990), Marcelo Damy (1914–2009), Paulus Aulus Pompeia (1911–1993), Oscar Sala (1922–2010), Roberto Salmeron (n.1922) e Yolande Monteaux (1910–1998) (primeira mulher a se formar em física no Brasil).

1935

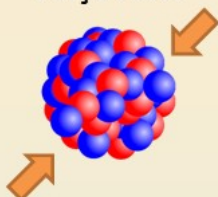
O QUE MANTÉM O NÚCLEO COESO?

Yukawa: hipótese da *força nuclear, forte, de curto alcance*, entre 2 núcleons, e a predição da existência de *mésons*, partículas mediadoras da interação forte e com massa entre a do elétron e a do próton ($\text{elétron} < \text{méson} < \text{próton}$)

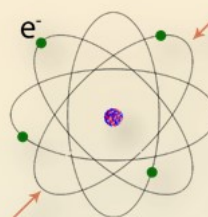


Hideki Yukawa
Físico japonês
(1907 – 1981)

Força Forte



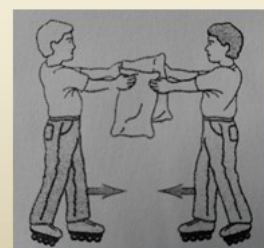
Liga prótons e nêutrons no núcleo
partícula mediadora: **méson**



Força Eletromagnética

Liga elétrons no átomo
partícula mediadora: **fóton**

Força atrativa de curto alcance



Crianças puxam firmemente para si
travesseiros com as mãos



No ano seguinte (1935), surgiu um fato muito importante na física subatômica. Acima e à direita na ilustração está colocada a imagem clássica do átomo devida ao físico neozelandês Ernest Rutherford (1871–1937), o descobridor do núcleo atômico [4].

Já se sabia, desde 1932, que o núcleo atômico era constituído por prótons e nêutrons (os prótons, descobertos por Rutherford em 1919 [5], e os nêutrons, pelo físico britânico James Chadwick (1891–1974) [6] em 1932). Mas não se sabia como essas partículas se mantinham juntas, coesas no núcleo, uma vez que os prótons, com carga elétrica positiva experimentam a repulsão eletrostática, o que comprometeria a coesão nuclear.

Curiosamente, àquela época, nenhum físico europeu, sul- ou norte-americano chegou a pensar seriamente sobre essa questão, e se o fizeram, não registraram a ideia.

Na tentativa de elucidar o mistério da coesão nuclear, entra em cena a figura do físico japonês Hideki Yukawa (1907–1981), quem propôs a existência de uma nova força da natureza [além das bem conhecidas força gravitacional (Newton, Einstein) e eletromagnética (Maxwell)], a força nuclear, forte, de curto alcance, entre dois núcleons (prótons e/ou nêutrons), e a predição da existência de mésons, partículas mediadoras da interação forte e de massa compreendida entre a do elétron e a do próton [7].

A ideia surgira da analogia com a estrutura atômica, na

qual a força eletromagnética mantém os elétrons ligados no átomo, tendo como partículas mediadoras os fótons de luz. Então, por analogia, deveria haver também uma partícula mediadora para a força forte, a que Yukawa chamou de méson por acreditar que essa partícula deveria ter um valor de massa compreendido entre o valor da massa do elétron e a do próton. Abaixo está mostrada a escala de massa em unidades da massa do elétron, m_e ; Yukawa estimou para os mésons uma massa $200 \times m_e$.

Uma imagem que proporciona uma compreensão do papel que desempenha a força atrativa, de curto alcance, está colocada na parte inferior direita da ilustração [7a].

1937: - Físicos norte-americanos, **Anderson e Neddermeyer e Street e Stevenson**, **investigando a radiação cósmica**, descobrem uma partícula do tipo da prevista por Yukawa: **mésotron**, suposta ser a mediadora da força forte

1937: - **Giuseppe Occhialini**, a convite de Wataghin, transfere-se de Florença (Itália) para o DF-FFCL-USP, livrando-se da perseguição dos fascistas italianos

1939: - **Yukawa e Sakata** estimam a massa do mésotron entre 100x e 200x a massa do elétron

- **Início da Segunda Guerra Mundial**

1941: - **Lattes**, então com 16 anos, ingressa no DF-FFCL-USP tendo como mestres Wataghin, Occhialini, Schenberg e Damy



Giuseppe Occhialini
Físico italiano
(1907-1993)



Mário Schenberg
Físico pernambucano
(1914-1990)



Marcello Damy
Físico paulista
(1914-2009)

A primeira indicação da existência de uma partícula subnuclear com características similares àquela postulada por Yukawa surgiu em 1937, quando os físicos norte-americanos Carl Anderson (1905–1991) e Seth Neddermeyer (1907–1988) e, independentemente, Jabez Curry Street (1906–1989) e Edward C. Stevenson, investigando a radiação cósmica, descobriram uma partícula a que foi dado o nome mésotron, suposta ser a mediadora da força forte de Yukawa [8, 9]. Essa descoberta havia sido feita com instrumentos levados em balões, em altitudes das montanhas do Colorado (EUA), e ao nível do mar.

Também, experimentos realizados ao nível do mar pelos físicos japoneses Yoshio Nishina, M. Takeuchi e T. Ishimiya deram conta da existência de uma partícula de massa compatível com valores entre $180 \times$ e $260 \times$ a massa do elétron [10], m_e ($1 m_e = 9,11 \times 10^{-28}$ g). Dois anos depois, suas medições de massa dessa partícula resultaram em $(170 \pm 9) m_e$ [11].

Ainda em 1937, a convite de Gleb Wataghin, o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907–1993) chega a São Paulo, procedente de Florença (Itália), e junta-se a Wataghin no DF-FFCL para continuar as pesquisas sobre raios cósmicos. Desse modo, Occhialini livra-se da perseguição dos fascistas italianos.

Por essa época, Yukawa havia criado um grupo de físicos teóricos na Universidade Imperial de Osaka (Japão). Em 1939, ele e Shoichi Sakata (1911–1970) estimaram a massa do mésotron entre $100 \times$ e $200 \times m_e$ [12].

Na Europa, com a invasão da Polônia pelo exército nazista em 1º de setembro daquele ano, deu-se o início da Segunda Guerra Mundial, interrompendo as comunicações entre os países, criando toda a sorte de transtornos e, em particular, dificultando o desenvolvimento da Ciência.

Lattes tinha então 15 anos, e não sabia que rumo tomar após completar seus estudos no colégio. Seu pai, sendo chegado a Wataghin, comentou com este sobre a indecisão de Lattes sobre que carreira abraçar. Foi aí que Wataghin o convidou para uma conversa, e com isso Lattes se convenceu por optar pela física.

Lattes ingressou, em 1941, aos 16 anos, no DF-FFCL em São Paulo, tendo como mestres Wataghin (seu mentor), Occhialini, o pernambucano Mario Schenberg (formado em Matemática em 1936, e assistente de física teórica na FFCL) e Marcello Damy (formado em 1936 na primeira turma do curso de física criado por Wataghin, de quem se tornou assistente).

Occhialini era um físico essencialmente experimental, bastante criativo. Um tipo que tinha aversão a números, cálculos, fórmulas, equações. Era um físico prático. Damy era também um físico experimental muitíssimo habilidoso, enquanto Schenberg inclinara-se para a física teórica (considerado o maior físico teórico brasileiro).

Como se vê, César Lattes teve a oportunidade ímpar e o privilégio de desenvolver seu talento sob a orientação da, e convivência com, a melhor equipe de professores da época.

1943: Lattes torna-se Bacharel em Física aos 19 anos

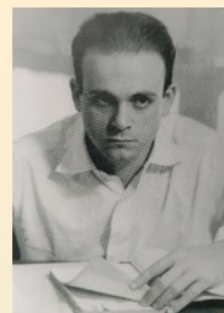
1944, Dez: Com a queda de Mussolini, Occhialini retorna à Europa e é acolhido pela Universidade de Bristol (UK) no grupo do físico britânico Cecil Powell (**junho de 1945**)

1945: Lattes finaliza trabalhos teóricos com Wataghin e Schenberg e se desencanta pela física teórica

1946, Início Jan: - Occhialini envia a Lattes fotos de traços de α 's e p's registrados nas novas emulsões Ilford

Entusiasmado, Lattes decide-se pela experimentação

- Por indicação de Occhialini, Lattes é convidado a juntar-se ao grupo de raios cósmicos liderado por Powell



Lattes aos 19 anos



1946, Meados de Janeiro:

- Lattes (com 21 anos) parte para a Inglaterra no cargueiro Saint Rosario

1946, Final de Fevereiro

- Após 40 dias de viagem, chega a Bristol para investigar a radiação cósmica com as novas emulsões Ilford

Aos 19 anos César Lattes torna-se Bacharel em física pela FFCL da Universidade de São Paulo, e passa a ser assistente de Gleb Wataghin.

Em julho daquele ano de 1943, dá-se a queda de Benito Mussolini (1883–1945) e a rendição da Itália, o que levou Occhialini a decidir-se por retornar à Europa. Ele partiu em dezembro do ano seguinte, sendo acolhido em junho de 1945 pela Universidade de Bristol (Inglaterra), junto ao grupo do físico britânico Cecil F. Powell (1903–1969).

Nessa ocasião, Lattes havia finalizado trabalhos teóricos com Wataghin e Schenberg, e se desencantou pela física teórica. Mas ocorreu que, no início de janeiro de 1946, Occhialini envia de Bristol para Lattes fotografias de traços de partículas alfa e prótons registrados nas novas chapas de emulsão fotográfica fabricadas pela Ilford, sediada em Essex (Inglaterra).

Muito entusiasmado com a novidade, Lattes decide-se pela física experimental, ao mesmo tempo em que, por indicação de Occhialini (seu ex-professor na USP), Lattes recebe convite para juntar-se ao grupo de raios cósmicos no H. H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol, liderado pelo Prof. Cecil Powell.

Imediatamente, em meados de janeiro, Lattes, então com apenas 21 anos, parte para a Inglaterra a bordo do cargueiro Saint Rosario. A viagem havia sido penosa, pois a embarcação era um cargueiro, o primeiro a zarpar da

América do Sul em direção à Europa após o término da 2ª Grande Guerra em agosto de 1945. A comida não era boa, e a cerveja esgotara em poucos dias.

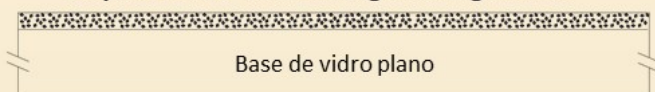
Depois de 40 dias de viagem, finalmente Lattes chega a Bristol no final de fevereiro. Rapidamente ele é inserido no grupo do Prof. Powell, e começa a tomar parte nas investigações sobre a radiação cósmica com as novas emulsões Ilford. Na verdade, Lattes foi puxado para a experimentação por Occhialini. A foto mostra Lattes junto ao grupo do Prof. Powell em Bristol.

O ENTUSIASMO QUE LEVOU LATTES A BRISTOL

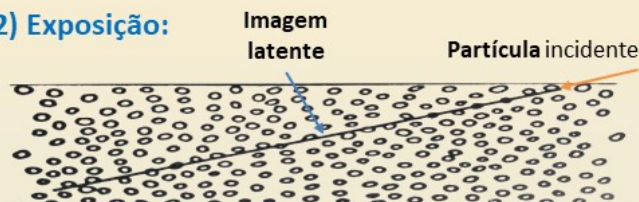
As novas emulsões de traços nucleares da Ilford

1) Preparação:

Dispersão de 4x mais AgBr em gelatina



2) Exposição:



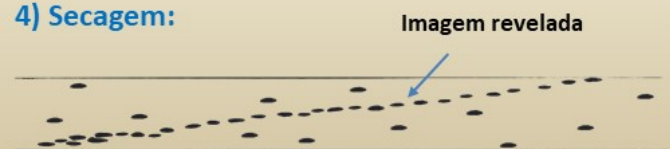
3) Revelação Química:



Revelador: Imagem latente → prata metálica

Fixador: Retira os grãos não sensibilizados

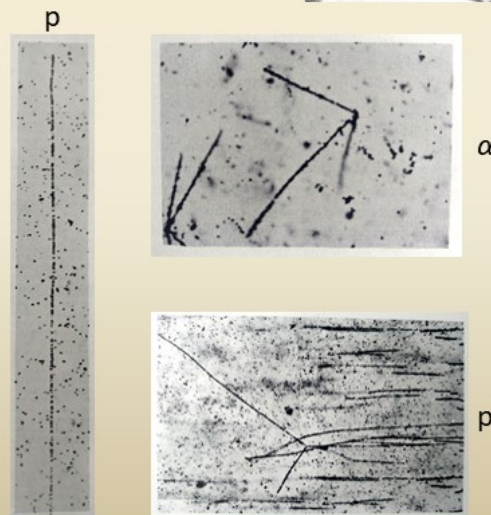
4) Secagem:



5) Observação:

Microscópio Óptico

- Varredura
- Identificação de Eventos
- Medidas



O que levou Lattes a se entusiasmar com as fotografias que Occhialini lhe enviou foram as trajetórias nítidas das partículas nucleares registradas nas novas emulsões que a fábrica Ilford havia preparado, e que podiam ser vistas e fotografadas com auxílio de microscópios ópticos.

Essas emulsões são as mesmas da fotografia ordinária, isto é, uma dispersão de pequenos grãos de cristais de brometo de prata (AgBr) em gelatina depositada de forma uniforme sobre uma base de vidro plano, diferindo apenas pela concentração de AgBr, cerca de 4 vezes maior do que na fotografia comum (etapa 1 na ilustração).

Depois da 2ª Grande Guerra, a Ilford, a pedido do Prof. Cecil Powell, começou a preparar essas emulsões especiais com espessura ~50–100 micrômetros para serem usadas na física nuclear como, por exemplo, na detecção da radioatividade alfa do samário [13], obter os alcances de prótons e partículas alfa e as correspondentes relações alcance-energia [14], identificação de partículas carregadas por contagem de grãos [15, 16], reações nucleares [17, 18] e outros.

Quando uma partícula carregada (ou íon) incide sobre uma placa de emulsão sensível, ela produz, pelo mecanismo de ionização do material sensível (os grãos de AgBr), uma imagem latente (ainda não visível) ao longo do percurso da partícula, criando centros de imagem latente em pequeno número de cristais de AgBr adjacentes, juntos à trajetória da partícula (etapa 2).

Posteriormente, a placa é submetida a um processo de revelação química, onde o agente revelador transforma a imagem latente em prata metálica (imagem patente). Logo em seguida, a placa é imersa em um banho fixador que retirará os grãos não sensibilizados (que são a grande maioria) (etapa 3).

Depois de lavada e seca, obtém-se a imagem revelada que representa a trajetória da partícula carregada (ou do íon) que percorreu a placa de emulsão (etapa 4). Essa técnica permite obter imagens bastante nítidas de traços nucleares contrastando com o “véu de fundo” pouco intenso.

A 5ª e última etapa dessa técnica experimental é a da observação ao microscópio óptico, com o que se pode “varrer” a placa em busca de eventos na superfície e/ou na profundidade, fazer medidas de comprimento dos traços, e de densidade de grãos revelados ao longo das trajetórias.

Novas partículas subnucleares foram identificadas pelo uso da técnica de emulsão nuclear, sobretudo nos anos 1950 [19]. Exemplos de traços de partículas alfa e prótons estão mostrados na ilustração acima. Na segunda coluna à esquerda, vê-se a trajetória de um próton; acima à direita, uma desintegração alfa sucessiva; e abaixo, uma colisão elástica próton-próton, onde se vê claramente o ângulo de 90 graus formado pelas trajetórias após a colisão.

1946: COMPETIÇÃO NAS ALTURAS: BRISTOL VS IMPERIAL COLLEGE

Meados: Investigação de nêutrons na radiação cósmica requeria Boro

Lattes pede à Ilford para incorporar Boro nas emulsões

Out: Donald Perkins, físico do Imperial College, consegue voos da RAF de ~1h para expor as novas emulsões Ilford

Out **Lattes pede a Occhialini que leve emulsões Ilford com e sem Boro ao Pic-du-Midi (Pirineus franceses)**

Nov: Chega ao Ocidente a Teoria dos Dois Mésons dos japoneses Sakata e Inoue (1942): méson de Yukawa (inter. forte) decai no méson de Anderson e Neddermeyer (inter. fraca) [méson → mesótron]

Nov: Das chapas dos voos da RAF, Perkins conclui ter descoberto o méson negativo (100-300 m_e)

Dez: Occhialini notou ótima qualidade das imagens nas chapas com Boro, que mostraram evidências de mésons sendo capturados por núcleos da emulsão, desintegrando-os

“... UM MUNDO INTEIRAMENTE NOVO SE REVELOU”



Entusiasmado com os resultados obtidos com as novas emulsões Ilford, e tendo dominado rapidamente a técnica no uso das emulsões nucleares com o seu primeiro trabalho sobre uma investigação da radioatividade alfa do elemento terrarrara samário (número atômico 62) [18a], a Lattes foi dada, em meados de 1946, a incumbência de investigar a radiação cósmica.

Inicialmente, ele fez medidas de alcance de prótons em emulsão produzidos em reações nucleares com diferentes elementos-alvo (lítio, berílio, boro, níquel) bombardeados com dêuterons (^2H) extraídos do gerador Cockcroft-Walton de Cambridge (Inglaterra).

Ele também havia pedido à Ilford que preparasse placas de emulsão incorporadas com bórax (tetraborato de sódio) para obter nêutrons de até 13 MeV¹ das reações com boro ($^2\text{H} + ^{11}\text{B} \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{nêutron}$). Lattes pensava em investigar nêutrons na radiação cósmica servindo-se da interação dos

nêutrons com o isótopo ^{10}B contido no bórax (na proporção de 20%) cuja reação produz duas partículas alfa e um trício (^3H) ($^1_0\text{n} + ^{10}_5\text{B} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He} + ^3_1\text{H}$).

Então, com esse propósito, e iniciativa própria, Lattes pedira aos técnicos da Ilford para prepararem um bom número de placas de emulsão com bórax (em pequena quantidade de tal modo a não alterar as propriedades de registro) com a finalidade de expô-las em montanha para posteriormente determinar a energia dos nêutrons da radiação cósmica analisando os traços das partículas carregadas registradas.

Começa então, no outono de 1946, uma competição nas alturas entre o grupo de Bristol e um candidato ao Doutorado do Imperial College de Londres, o físico Donald Perkins (n. 1925), que também estava investigando a radiação cósmica com emulsões da Ilford. Perkins era um ano e três meses mais novo que Lattes, e tinha como orientador Sir George Thomson (1892–1975), Prêmio Nobel e filho do físico britânico Joseph J. Thomson (1856–1940), o descobridor do elétron em 1897 [20].

George Thomson era chegado ao Ministro da Real Força Aérea Britânica, e consegue convencê-lo a arranjar para Perkins voos da RAF de ~1 hora em altitudes de 9–14 km para expor suas placas de emulsão. Por outro lado, Lattes pedira a Occhialini (que estava saindo de férias nos Pirineus franceses) que levasse com ele placas de emulsão, com e sem boro, para deixá-las expostas à radiação cósmica no Pic-du-

¹ 1 MeV é uma quantidade de energia muito pequena, equivalente a 1.6×10^{-13} Joule. Equivale à energia necessária para levantar um grão de areia de $\approx 0,1\text{mm}$ a uma altura igual à espessura de uma folha de alumínio caseiro ($\approx 13\mu\text{m}$). Ou ainda, à energia de movimento do mesmo grão de areia deslocando-se a uma velocidade $\approx 57\text{m/h}$. Entretanto, um próton com 1 MeV de energia de movimento teria uma velocidade 4,6% da velocidade da luz no vácuo (30Gcm/s)!

Midi (~ 2800 m de altitude). Occhialini era um bom montanhista, pois havia sido guia de montanha no Parque Nacional de Itatiaia (RJ/MG) em 1942 (como refugiado), pois, quando o Brasil entrou na 2ª Guerra Mundial, Occhialini foi considerado inimigo do Brasil por ser cidadão italiano.

A competição em capturar eventos da radiação cósmica era claramente desleal, pois Perkins se valia de voos da RAF (curto tempo de exposição das chapas a grandes altitudes), enquanto que o grupo de Bristol contava com a caminhada de Occhialini, longa, que alcançava somente altitudes modestas.

Eis que, concomitantemente, os físicos do Ocidente tomaram conhecimento, em novembro de 1946, da teoria dos dois mésons proposta em 1942 pelos físicos japoneses Shoichi Sakata e Takeshi Inoue [21], cujo manuscrito original só havia sido traduzido para o inglês em 1946. Em resumo, eles argumentavam que o méson de Yukawa, de maior massa (o da interação forte), deveria se desintegrar no méson de Anderson, Street e Nishina, de menor massa (responsável pela interação fraca), isto é, Sakata e Inoue haviam proposto o decaimento méson $\rightarrow$ méson.

Voltando às emulsões, das chapas expostas a grandes altitudes nos voos da RAF, Donald Perkins concluiu de sua análise, em novembro de 1946, ter descoberto o méson negativo, cuja massa foi por ele estimada variando no intervalo $(100-300) \times m_e$.

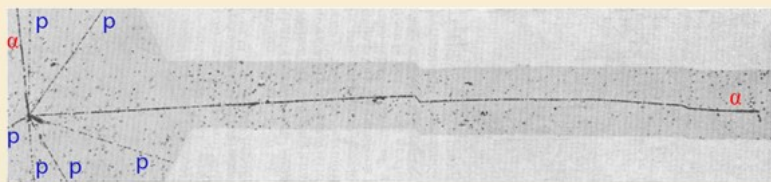
Em dezembro, da observação das chapas expostas no Pic du Midi, Occhialini notou a ótima qualidade das imagens nas chapas onde o boro estava incorporado às emulsões, as quais mostraram evidências de mésons sendo capturados por núcleos dos átomos constituintes da emulsão, desintegrando-os. Essa constatação, que possibilitou chegar à visualização do decaimento méson $\rightarrow$ méson em março do ano seguinte, impressionou a todos do grupo de Bristol, a ponto de o líder do grupo, Cecil Powell, ter afirmado “*...um mundo inteiramente novo havia se revelado.*”[22].

1947: O ANO DA DESCOBERTA

18 de Janeiro: Desintegrações múltiplas produzidas por raios cósmicos

G P S Occhialini e C F Powell

H H Wills Physical Laboratory, University of Bristol (*Nature* **159**, 93)



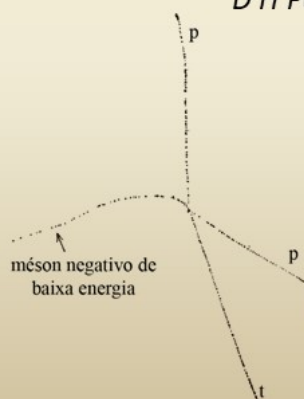
Desintegração de Ag (ou Br) observada por Occhialini, dez. 1946



Cecil F. Powell
Físico britânico
(1903-1969)

25 de Janeiro: Desintegração nuclear por captura de méson

D H Perkins, Imperial College (London), Nature **159** 126



Evento analisado por Perkins em
Janeiro de 1947, suposto méson
negativo de massa $100-300 m_e$



Donald H. Perkins
Físico britânico
(n. 1925)

A divulgação dessas grandes novidades sobre os mésons colhidos na radiação cósmica e suas interações com os núcleos atômicos das emulsões deu-se na 2^a quinzena de janeiro de 1947.

No dia 18, apareceu na revista *Nature* o artigo “Desintegrações múltiplas produzidas por raios cósmicos”, assinado por Occhialini e Powell [23]. Nele se observa eventos característicos da absorção de uma partícula carregada energética por um núcleo atômico da emulsão, desintegrando-o.

Um exemplo de tais eventos está mostrado na fotografia da ilustração, onde se vê claramente a emissão de seis prótons

e duas partículas alfa (uma delas bem mais energética) do mesmo ponto, identificados pelo grau de ionização (densidade de grãos revelados) ao longo de suas trajetórias.

Uma semana depois, veio publicado na *Nature* o artigo de Perkins, intitulado “Desintegração nuclear por captura de méson” [24] onde, pela primeira vez, é registrado um evento de captura de um (suposto) méson negativo de baixa energia provocando uma desintegração nuclear com produção de dois prótons e um trítio, sendo a massa do méson estimada entre $100\times$ e $300\times m_e$.

01 Fev: Divulgado o experimento feito em Roma pelos físicos italianos

“Sobre a desintegração de mésons negativos”

Phys. Rev. **71**, 209 (1947)

Experimento conclusivo sobre que mésons (negativos) desintegram-se ao nível do mar

- Não interagem fortemente
- Não são a partícula de Yukawa



Marcello Conversi
(1917-1988)



Ettore Pancini
(1915-1981)



Oreste Piccioni
(1915-2002)

08 Fev: “Desintegrações nucleares produzidas por partículas carregadas de baixa energia de pequena massa” (*Nature*, **159**, 186)

G P S Occhialini e C F Powell

Evidências de mésons negativos de $m < 370 m_e$ sendo capturados por núcleos da emulsão, desintegrando-os

Cesar Lattes protestou veementemente junto a Occhialini pela não inclusão de seu nome nas publicações



Um resultado importante que chamou a atenção dos físicos naqueles dias, e pôs luz na controvérsia sobre a existência (ou não) de dois mésons como havia sido previsto na teoria de Sakata e Inoue, foi a divulgação, em 1º de fevereiro daquele ano de 1947, das conclusões decorrentes dos experimentos realizados em Roma pelos físicos italianos Marcello Conversi (1917–1988), Ettore Pancini (1915–1981) e Oreste Piccioni (1915–2002).

No período 1943–1946, esses italianos realizaram uma série de experimentos em Roma, onde mediram com grande precisão a vida-média dos mésons, encontrando $(2,33 \pm 0,15)$ microssegundo [25, 26], como também estudaram a absorção desses mésons na matéria [27, 28].

Boa parte do trabalho deles foi realizado em condições muito adversas, pois, durante a Guerra, bombas caíam constantemente sobre Roma, e eles tiveram que montar seus aparelhos em subterrâneos improvisados.

De suas investigações, Conversi, Pancini e Piccioni concluíram, sem sombra de dúvida, que os mésons de carga elétrica negativa desintegravam-se ao nível do mar, significando que esses mésons não interagiam fortemente e, portanto, não poderiam ser a partícula de Yukawa da interação forte [29]. Onde então estariam os mésons de Yukawa?

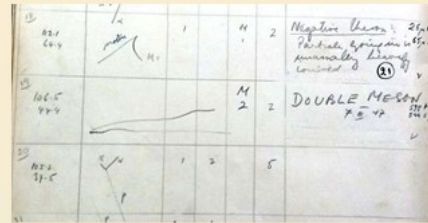
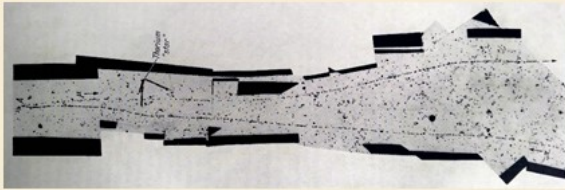
Uma semana depois, surge na *Nature* uma outra publicação de autoria de Occhialini e Powell [30], onde são mostradas novas evidências de mésons negativos de massa menor do que $370 \times m_e$ sendo capturados por núcleos da emulsão, desintegrando-os [um exemplo está mostrado na foto abaixo e à direita, na qual uma desintegração nuclear provocada pela absorção de uma partícula carregada de baixa energia e de pequena massa (traço curvo à esquerda) produz duas outras mais energéticas (traços retilíneos)].

Tanto nesse artigo como no anterior (o de 18 de janeiro) o nome de Lattes não comparecia como coautor, o que o levou a protestar veementemente junto a Occhialini (quem, afinal, o havia puxado para Bristol) por não ter incluído o seu nome nas publicações. Com justa razão, pois além de trabalhar duramente na identificação dos eventos, Lattes havia tomado iniciativa própria em várias etapas decisivas dos trabalhos, sobretudo a ideia de pedir aos técnicos da Ilford para incorporar boro às emulsões.

Das emulsões com Boro expostas no Pic du Midi (~2800 m)

A GRANDE DESCOBERTA

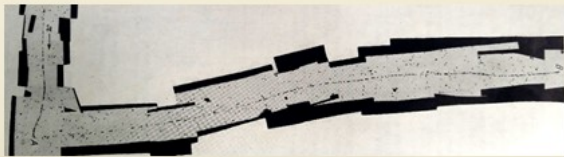
7 Mar 1947: Pela 1ª vez foi visto um méson que para, originando um segundo méson: era a desintegração méson $\rightarrow$ méson (denominaram $\pi \rightarrow \mu$)



1º caso do duplo méson visto em 7 de março

Marietta Kurz
1º $\pi \rightarrow \mu$ visto

8 de Março 1947: Segundo evento de duplo méson ($\pi \rightarrow \mu$)



Irene Roberts
2º $\pi \rightarrow \mu$ visto

- Um novo processo fundamental da natureza: Requeria comprovação com mais dados
- Entusiasmado, Lattes, no Dep. de Geografia, localizou nos Andes bolivianos o Monte Chacaltaya de altitude ~5500 m, de fácil acesso, a 20km de La Paz
- Lattes pede, e consegue, de Powell recursos para viajar à Bolívia

Mas o melhor aconteceu em março. Nas emulsões com boro expostas no Pic du Midi (~2800 m), uma microscopista de nome Marietta Kurz identificou, pela primeira vez, no dia 7, a trajetória de um méson que para, originando um segundo méson: era a desintegração méson $\rightarrow$ méson, da teoria de Sakata e Inoue. Ao primeiro, o grupo de Bristol denominou méson π (ou pión), e ao segundo méson μ (ou múon).

Na parte superior esquerda está reproduzida a fotografia que mostra o primeiro evento $\pi \rightarrow \mu$, onde a trajetória mais retilínea (a de baixo) é a do pión, que se desloca a partir da direita e para, dando origem ao múon (trajetória com curvas, a de cima). Ao lado da foto está o registro feito pela Marietta Kurz desse caso do duplo méson observado pela primeira vez.

No dia seguinte, um segundo evento de duplo méson $\pi \rightarrow \mu$ foi observado pela senhora Irene Roberts. A trajetória dos múons em ambos os eventos foi estimada em seis décimos de milímetro, indicando tratar-se de um decaimento a duas partículas (a segunda, não registrada, era necessária para conservar a quantidade de movimento no processo).

A alta qualidade das imagens foi atribuída à incorporação do bórax nas emulsões (ideia e iniciativa de Lattes). De alguma forma o bórax funcionava de tal modo que não permitia o desaparecimento das imagens latentes por períodos prolongados entre a exposição e a revelação das chapas (mecanismo conhecido por *fading*), isto é, funcionava como um es-

tabilizador da imagem latente. A colocação de bórax nas emulsões foi o que proporcionou a visão clara dos eventos $\pi \rightarrow \mu$, o que consolidou as investigações que estavam em andamento.

Diante dessa realidade, o grupo de Bristol convenceu-se de que estava frente a um novo processo fundamental da natureza e, como tal, necessitava de comprovação com um maior número de evidências.

Foi então que, entusiasmado, Lattes vai imediatamente ao Departamento de Geografia e localiza o Monte Chacaltaya nos Andes bolivianos, a uma altitude de ~5500 m, de fácil acesso por uma estradinha, distante 20 km da capital La Paz.

Com a concordância de Powell e a aprovação do diretor do H. H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol, o físico britânico Arthur M. Tyndall (1881–1961), Lattes consegue o patrocínio para viajar à Bolívia.

RUMO ÀS ALTURAS: MARATONA DE 1947

Abril : Decisão sobre a troca de aeronave
(Início) (da BSAA britânica para PanAir brasileira)

07 Abril: Lattes, com 22 anos, inicia sua maratona:
Bristol → Londres → Dakar → Rio → Corumbá →
S.C. de La Sierra → Cochabamba → La Paz →
Monte Chacaltaya (finalizando em lombo de burro)

Ida e volta 2x a Chacaltaya (~5,5 Km)



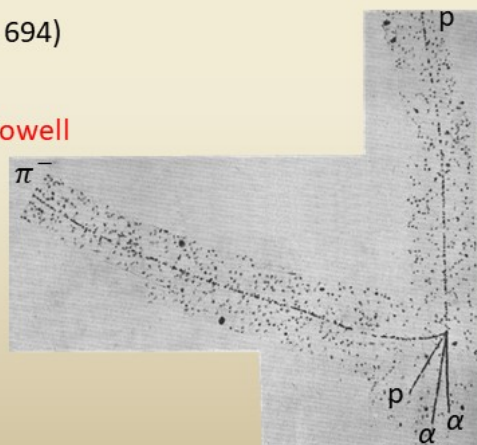
24 Maio: Publicação da descoberta do $\pi \rightarrow \mu$ (*Nature* 159, 694)

Processes Involving Charged Mesons

C M G Lattes, H Muirhead, G P S Occhialini, C F Powell

- Balanço de massa-energia, $m_\pi > 240 m_e$
- Contagem de grãos, $m_\pi = (240 \pm 50)m_e$

Maio: Após 1 mês, Lattes retorna a Chacaltaya
(Final) Em La Paz, revela uma das chapas
e **encontra outros eventos $\pi \rightarrow \mu$**



Tendo conseguido recursos para se deslocar à América do Sul, Lattes realizou uma verdadeira façanha: no curto período de dois meses (meados de abril a meados de junho) ele vai ao Monte Chacaltaya por duas vezes; a primeira para deixar as chapas de emulsão Ilford em exposição aos raios cósmicos, e a segunda para buscá-las de volta e analisá-las.

É importante recordar aqui o que aconteceu às vésperas de sua partida. Lattes teve de decidir sobre qual companhia aérea viajaria, se a BSAA (British South American Airways) ou a Panair do Brasil. Isso porque, no dizer do diretor do laboratório, Dr. A. Tyndall, o dinheiro para a viagem era proveniente dos cofres do Reino, e, como tal, Lattes deveria usar o avião britânico da BSAA.

Mas um seu colega o advertiu dizendo que os aviões britânicos estavam cansados pelo uso na Guerra, com aeromoças feias, e a comida horrível. Essas e outras foram razões que convenceram Lattes a optar pela Panair do Brasil, com aviões novos, confortáveis, aeromoças bonitas e o bife grande e saboroso. Foi a sorte dele, e a nossa também, porque nem aqui estaríamos hoje, pois a aeronave da BSAA acidentou-se na aproximação de Dakar matando quase todos os seus ocupantes.

Em 7 de abril de 1947, Lattes então com 22 anos, inicia sua maratona em direção a Chacaltaya por um extenso itinerário: Bristol → Londres → Dakar → Rio de Janeiro → Corumbá → Santa Cruz de La Sierra → Cochabamba → La Paz →

Monte Chacaltaya, finalizando em lombo de burro.

Em La Paz, Lattes teve o apoio do físico e meteorologista Ismael Escobar, quem havia transformado a antiga estação meteorológica do Monte Chacaltaya (construída em 1941 a ~5200 m) no Serviço Meteorológico da Bolívia, com novas instalações (a ~5600 m), inaugurada em 1943. Foi na antiga instalação que Lattes deixou expostas, por cerca de 40 dias, as placas de emulsão, retornando ao Brasil em seguida.

Nesse meio tempo, é publicado na *Nature* (Londres) o artigo relatando em detalhes a descoberta do méson π e seu decaimento no méson μ , isto é, o processo $\pi \rightarrow \mu$, tendo como primeiro autor o nome do Lattes [31].

Esse foi o artigo que marcou a descoberta do méson π^+ , como também mostrou outras evidências da absorção do méson π^- por núcleos da emulsão provocando a desintegração desses núcleos com a produção de várias partículas carregadas.

Um exemplo pode ser visto na ilustração (fotografia de baixo) na qual um méson π^- (o traço que se curva pouco antes do méson ser absorvido), transfere sua massa-energia para o núcleo que o absorve, desintegrando-o com a produção de dois prótons e duas partículas alfa, e nêutrons (não registrados).

A partir de eventos desse tipo, os autores usaram o balanço de massa-energia para estimar a massa do méson π^- como sendo maior do que $240 \times m_e$. Entretanto, pelo método da

contagem de grãos, eles conseguiram chegar ao resultado $(240 \pm 50) \times m_e$.

Decorrido um mês, Lattes retorna a Chacaltaya, percorrendo no Brasil e na Bolívia aquele trajeto como da primeira vez. No final de maio, as chapas que ficaram expostas foram

recuperadas e, com a ajuda de Ismael Escobar, uma delas foi revelada ainda em La Paz, onde Lattes constatou a presença de outros eventos $\pi \rightarrow \mu$, aumentando ainda mais o seu entusiasmo.

02 Junho: Conferência de Shelter Island (NY)

(1947) R. Marshak (Rochester) e H. Bethe (Cornell) desconhecendo a descoberta em Bristol e a teoria de Sakata e Inoue, apresentam também a **hipótese dos dois mésons**

Junho: • **Voltando de La Paz**, Lattes passa pelo Rio e (1ª quinzena) mostra os **novos eventos $\pi \rightarrow \mu$** a Leite Lopes e Guido Beck, gerando grande entusiasmo

- Lattes retorna a Bristol, e lá se confirma o **decaimento $\pi \rightarrow \mu$ observado em 31 novos eventos**

Julho: • Donald Perkins vê o **$\pi \rightarrow \mu$** em emulsão Ilford a (1947) 4,3km nos Alpes Franceses (Chamonix)

Verão: • Niels Bohr, de Copenhague, envia dois físicos a (1947) Bristol para saber das pesquisas sobre os mésons

- Na volta, eles relatam a Bohr que **“Lattes era quem estava ‘metendo a mão na massa’”,** isto é, trabalhando duro na análise dos eventos.

Universidade de Bristol (UK)
H. H. Wills Physical Laboratory



Torre do Cigarro: Quarto andar do prédio financiado pelo industrial do Tabaco Henry Herbert Wills, onde se confirmou a existência de mésons em altitudes de montanha

No início de junho, houve também um acontecimento relevante relacionado às novas descobertas sobre os mésons relatadas na *Nature* da última semana de maio de 1947. Esse foi a Conferência de Shelter Island, no Estado de N. York (EUA).

No evento, o físico norte-americano Robert Marshak (1916–1992) com o físico alemão-norte-americano Hans A. Bethe (1906–2005), desconhecendo tanto a descoberta do processo $\pi \rightarrow \mu$ em Bristol, como a teoria dos dois mésons de Sakata e Inoue, apresentaram também a hipótese da existência dos dois mésons [32]. O desconhecimento deveu-se à lentidão na circulação das informações nos primeiros anos após o término da 2ª Guerra. Observemos que o trabalho em Bristol era de 24 de maio, e a Conferência de Shelter Island realizara-se em 2 de junho, portanto sem tempo hábil para os participantes tomarem conhecimento.

Voltando de La Paz na primeira quinzena de junho, Lattes passa pelo Rio de Janeiro. Aqui, ele mostra ao seu colega, o físico pernambucano José Leite Lopes (1918–2006), e

ao físico de origem austríaca Guido Beck (1903–1988), os novos eventos $\pi \rightarrow \mu$ registrados numa das chapas expostas no Monte Chacaltaya, gerando, de novo, grande entusiasmo em todos.

Em seguida, Lattes retorna a Bristol, e após a análise das novas chapas trazidas dos Andes bolivianos, foram observados 31 novos eventos do processo de decaimento $\pi \rightarrow \mu$. As trajetórias dos mésons nesses eventos tiveram seus alcances medidos com a precisão permitida pelo método, revelando um valor constante de (614 ± 31) micrômetros para os múons, correspondendo a uma energia de $(4,08 \pm 0,12)$ MeV (esses resultados foram posteriormente enviados à publicação em abril do ano seguinte [15]).

A ilustração mostra a fotografia do H. H. Wills Physical Laboratory da Universidade de Bristol (UK), localizado no quarto andar do prédio conhecido como Torre do Cigarro, financiado pelo industrial do tabaco Henry Herbert Wills, onde se confirmou a existência dos mésons π^+ e π^- em altitudes de montanha.

No mês seguinte (julho de 1947) seu competidor Donald Perkins confirmou o decaimento $\pi \rightarrow \mu$ em eventos que ele observou em chapas de emulsão Ilford que, a seu pedido, haviam sido expostas a 4300 m de altitude nos Alpes Franceses (Chamonix) [33]. Lattes costumava dizer que “*eu colocando boro nas emulsões passei a perna no Perkins e cheguei primeiro*”.

Dada a importância científica da descoberta dos mésons

e sua confirmação, o famoso físico dinamarquês Niels Bohr (1885–1962) enviou dois jovens físicos a Bristol para se inteirarem das pesquisas sobre os mésons. Na volta, eles relataram a Bohr que “Lattes era quem estava metendo a mão na massa”, o que significava que César Lattes estivera trabalhando duro na identificação e análise dos eventos.

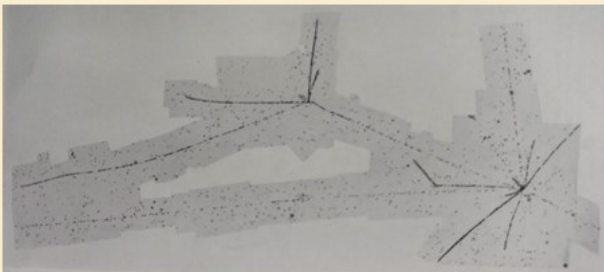
Outubro, 1947: Resumo das Investigações (oito meses de trabalho)

i) Emulsões Ilford com boro; ii) Exposição por 40 dias; iii) Pic du Midi e M. Chacaltaya;

Nature **160**, 453 (04 Out); **160**, 486 (11 Out) + Nature **159**, 694 (24 Mai)

Lattes, Occhialini e Powell dão evidências para:

- 1. A existência dos mésons π (píons) e μ (múons), $m_\pi/m_\mu = 1,33 \pm 0,04$
- 2. O decaimento $\pi \rightarrow \mu$; méson- π identificado como o méson de Yukawa, da interação forte, e o méson- μ como o méson de Anderson e Neddermeyer, de interação fraca
- 3. A existência de duas variedades de píons: π^+ e π^-
- 4. Mésons- π produzem desintegrações nucleares com emissão de partículas carregadas pesadas
- 5. Múons ao nível do mar são provenientes de decaimentos $\pi \rightarrow \mu$ em voo de píons formados nas altas camadas da atmosfera



6. Totalização de dados colhidos

- Nº de mésons: ~ 1200 ; eventos $\pi \rightarrow \mu$: ~ 160 ; mésons π^- : ~ 160 ; área examinada: 800 cm^2
- Estimativa de massa [m_e]

Méson	Lattes et. al. (1947)	Aceito (hoje)	Dif.
π	240 ± 50	273	-12%
μ	180 ± 38	207	-13%
π/μ	$1,33 \pm 0,04$	1,32	

A consolidação dos resultados experimentais das investigações sobre os mésons descobertos nas exposições por ~ 40 dias das chapas de emulsão nuclear com boro em altitudes de montanha, Pic du Midi ($\sim 2800 \text{ m}$) e Monte Chacaltaya ($\sim 5500 \text{ m}$), representaram oito meses de trabalho intenso em Bristol.

À publicação na Nature de 24 de maio de 1947 [31], juntaram-se duas outras, a de 04 e 11 de outubro [34, 35], nas quais Lattes, Occhialini e Powell apresentaram uma análise detalhada dos dados, com fatura de fotografias de trajetórias de partículas carregadas, e mostraram uma série de evidências sobre os dois mésons, o de Yukawa, pión (da interação forte), e o de Anderson, Street e Nishina, múon (da interação fraca), o primeiro decaindo no segundo, ambos claramente visíveis ao microscópio, não deixando dúvidas sobre o processo $\pi \rightarrow \mu$ (como atestam as fotografias).

A razão entre as suas massas fora determinada como $m_\pi/m_\mu = 1,33 \pm 0,04$. Os autores destacaram também a conclusão importante de que os múons detectados ao nível do mar são provenientes do decaimento $\pi \rightarrow \mu$ em voo de píons produzidos nas altas camadas da atmosfera.

Outra evidência relatada foi a de que mésons π provocam desintegrações nucleares com emissão de partículas carregadas pesadas, como se pode ver no exemplo da fotografia excepcional mostrada acima: um méson π^- é produzido de uma interação forte no ponto central da “estrela” à direita, e no final de sua trajetória para cima e à esquerda produz uma segunda desintegração nuclear, no ponto central da outra “estrela” de onde são emitidos prótons energéticos.

Outros dados inéditos extraídos das publicações mencionadas podem ser vistos no item 6 da ilustração.

No decaimento $\pi \rightarrow \mu$, a partir do repouso do pión,

é preciso haver outra partícula emitida em sentido oposto ao do múon, para conservar a energia total e a quantidade de movimento do processo. Essa nova partícula (sem massa) foi posteriormente chamada neutrino-muônico que,

pela conservação da energia e usando os dados da Tabela na ilustração, carrega $\sim 88\%$ da energia total disponibilizada no processo $\pi \rightarrow \mu$.

Outono de 1947: Lattes divulga as novidades em várias palestras

- no Simpósio de Birmingham (UK)
- na École Polytechnique de Paris
- na Universidade de Lund (Suécia)
- em Copenhague:
 - Sociedade Física da Dinamarca
 - Instituto de Física Teórica

Dezembro, 1947: Lattes (então com 23) é recebido, a convite, por Niels Bohr (então com 62) em sua casa, quando relata a este seus **planos de ir a Berkeley** (Ca., EUA) para detectar mésons que poderiam estar sendo produzidos no Sincrociclótron de 184"

Mas essa é uma outra história ...

(para o próximo ano, quando completará 70 anos)

A divulgação da descoberta dos píons e múons e do decaimento $\pi \rightarrow \mu$ não ficou limitada apenas às publicações nos periódicos de ampla circulação nos meios científicos. O próprio Lattes saiu de Bristol pela Europa para divulgar as novidades em inúmeras conferências e palestras.

Assim foi que, no outono de 1947 ele participou do Simpósio de Birmingham (Inglaterra), onde apresentou os resultados sobre os mésons, com certa dificuldade, pois muitos dos presentes permaneciam ainda incrédulos.

Esteve também na École Polytechnique de Paris (França), na Universidade de Lund (Suécia), e realizou duas palestras em Copenhague, uma na Sociedade de Física da Dinamarca e outra no Instituto de Física Teórica.

Aconteceu que, em dezembro daquele ano, Lattes (então com 23 anos) foi recebido, a convite, por Niels Bohr (então com 62 anos) em sua casa, quando relatou ao grande físico dinamarquês sua intenção e seus planos de ir a Berkeley (CA, EUA) para detectar mésons que poderiam estar sendo produzidos no ciclotron de 184 polegadas (maior acelerador de partículas na época) instalado no Radiation Laboratory nas

dependências da Universidade da Califórnia em Berkeley.

Bohr dera-lhe o maior apoio e incentivo para essa nova aventura científica, pois Lattes manifestou total convencimento de que, a despeito da quantidade de energia cinética das partículas alfa disponibilizada pelo ciclotron (380 MeV) não ser aparentemente suficiente para produzir mésons, poderiam haver, sim, eventos favoráveis quando se levasse em conta a energia de movimento dos núcleons (prótons e/ou nêutrons) tanto no projétil (^4He) como no alvo de carbono (^{12}C).

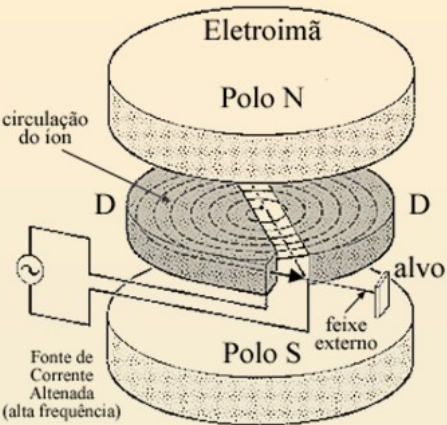
O fato era que píons estavam efetivamente sendo produzidos em Berkeley (ver Apêndice A), mas não se sabia como detectá-los. Lattes sabia. Essa foi sua grande motivação para ir até Berkeley.

Antes, porém, retornando ao Brasil em fins de dezembro, Lattes contraiu núpcias com a pernambucana e matemática Martha Siqueira Netto. Em seguida, com uma bolsa obtida da Fundação Rockefeller, o casal partiu para os EUA, primeiro em lua-de-mel, e depois Lattes apresentou-se, no início de fevereiro de 1948, no Radiation Laboratory.

OS ACELERADORES DE ÍONS LEVES (CÍCLOTRONS) EM BERKELEY

Ano	Diâmetro do eletroímã	Íon e energia cinética (MeV)	Velocidade do íon, $\beta = v/c$	Aumento de massa $\Delta m/m$
1931	4" (10 cm)	próton 0,08	1,3%	~0,01%
1932	11" (28 cm)	próton 1,22	5,1%	~0,13%
1934	27" (70 cm)	dêuteron 5	7,3%	~0,27%
1938	37" (94 cm)	dêuteron 8	9,2%	~0,43%
		alfa 16		
1940	60" (~1,5m)	alfa 40	14,5%	~1,1%

$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ erg}$



Esquema do Ciclotron

Aplicações: - Física nuclear; - Medicina nuclear
[Brasil tem, hoje, 17 pequenos ciclotrons ($\phi \lesssim 60''$)]

1939: Fundação Rockefeller doou à UCRL (Berkeley) um eletroímã de 184" (4,7m) para construção do ciclotron para partículas alfa de 380 MeV ($v = 42\% c$ e $\Delta m/m \approx 10,2\%$)

1º Set, 1939: Começa a **2ª Guerra Mundial** com a invasão da Polônia pelos Alemães



Ernest O. Lawrence
Físico Norte-Americano
(1901-1958)

Iniciamos agora a segunda parte da trajetória científica de César Lattes a partir de sua chegada a Berkeley, em fevereiro de 1948, acompanhado de sua mulher, a jovem senhora Martha Lattes.

Para o leitor co compreender a importância, o significado e o alcance do trabalho pioneiro realizado por Lattes enquanto no Radiation Laboratory-RL, é necessário relembrar aqui os antecedentes que fizeram da Universidade da Califórnia-UC em Berkeley (sede do RL) um dos polos de investigação em física nuclear mais importantes do mundo.

No início dos anos 1930 os físicos norte-americanos Ernest O. Lawrence (1901–1958) e Milton S. Livingston (1905–1986), ambos trabalhando na UCRL, desenvolveram um método inovador de acelerar íons leves sem utilização de grandes diferenças de potencial elétrico [36]. Os equipamentos construídos por eles foram (e ainda são) os famosos ciclotrons, muito difundidos mundo afora.

A tabela da ilustração mostra os primeiros ciclotrons construídos em Berkeley até 1940. Eles são caracterizados pelo diâmetro dos polos do eletroímã que produz intenso campo magnético perpendicular ao plano de duas caixas metálicas adjacentes (chamadas D's do ciclotron), onde é feito o vácuo. Os íons circulam, por ação do campo magnético, adquirindo energia cada vez maior sempre que cruzam o espaçamento entre os D's, que se acham conectados a um oscilador de radiofrequência para produzir um campo elétrico alternado.

O feixe de íons de alta energia assim obtido (feixe externo) pode ser usado para provocar reações nucleares em diferentes alvos (ver esquema do ciclotron na ilustração). Por exemplo, o ciclotron de 60 polegadas, concluído e testado em junho de 1939, fornecia um feixe externo de partículas alfa de 40 MeV, atingindo uma velocidade 14,5% da velocidade da luz no vácuo, c ($c = 30 \text{ Gcm/s}$), com o correspondente aumento relativístico de 1,1% da massa de repouso dessas partículas [37]. Pela invenção, construção, desenvolvimento e inúmeras aplicações, Lawrence recebeu o prêmio Nobel de Física de 1939.

Inúmeros ciclotrons de diâmetro não maiores do que 60 polegadas têm sido construídos e utilizados em muitos países nas pesquisas em física nuclear e na produção de radioisótopos de uso na Medicina Nuclear.

O Brasil acumulou nas últimas quatro décadas um total de dezessete desses ciclotrons, que se acham instalados em oito Estados da Federação e no Distrito Federal (seis em SP, três no RJ, dois no RS, e um em MG, PR, PE, BA, CE e DF), a maioria utilizados como fábrica de radioisótopos para procedimentos de radiodiagnósticos em Medicina Nuclear.

O enorme prestígio conseguido por Lawrence nos meios científico, político e empresarial fez com que a Fundação Rockefeller doasse à Universidade da Califórnia em Berkeley, em 1939, um grande eletroímã, de 184 polegadas (4,7 metros de diâmetro), para construção no RL de um ciclotron

projetado para disponibilizar feixes de partículas alfa de até 380 MeV, correspondendo a uma velocidade 42%*c*, e um aumento de massa das partículas alfa (por conta do efeito relativístico) da ordem de 10%! Entretanto, nesse momento,

em 1º de setembro, a Alemanha nazista invade a Polônia, dando início à 2ª Guerra Mundial, inviabilizando por um bom tempo o projeto do ciclotron de 184 polegadas.

ALGUNS EPISÓDIOS DA 2ª GUERRA MUNDIAL

1941: - Ataque japonês a Pearl Harbor (Hawaii)

(dez) - EUA entram na guerra

- Físicos, químicos e engenheiros se unem no esforço de guerra
- Projeto de construção do ciclotron de 184" é adiado

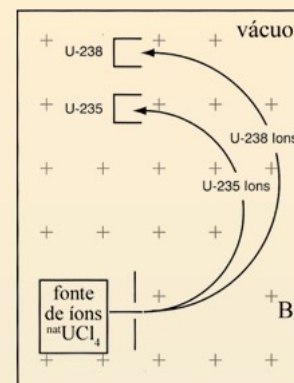
1942: Criado o Projeto Manhattan com o objetivo de produzir armas de alto poder de destruição pelo mecanismo da fissão de núcleos pesados (^{235}U e ^{239}Pu)

1945: - O eletroímã de 184" é deslocado para separação eletromagnética do isótopo ^{235}U a partir de toneladas de ^{nat}U
- Ernest Lawrence desenvolve os espectrógrafos de massa

CALUTRON: { eletroímã de 184"
do ciclotron de 37"

1945: CALUTRONS separam ~50kg de ^{235}U (~2,5L) como matéria prima para a bomba endereçada à Hiroshima (lançada em 6 de agosto)

Lado trágico, triste e lamentável do uso da ciência e da tecnologia para fins bélicos



Espectrógrafo de massa para separação de $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$



Bomba nuclear de 17 GWh sobre Hiroshima

O prenúncio da Guerra na Europa mobilizou, entre outros, um grande número de cientistas e intelectuais que decidiram emigrar para as Américas. Em julho de 1939, cientistas estabelecidos no EUA, liderados pelo físico húngaro Leò Szilard (1898–1964), redigiram a carta assinada por Einstein em 2 de agosto, e endereçada ao Presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt (1882–1945) alertando-o sobre os receios que cientistas na Inglaterra e nos EUA tinham sobre a possibilidade dos alemães fabricarem uma arma de alto poder de destruição com base na enorme quantidade de energia liberada no processo de fissão nuclear descoberto meses antes.

Iniciada a Grande Guerra, no ano seguinte vários outros países da Europa foram igualmente tomados pelas forças nazistas, e em setembro foi criado o Eixo Alemanha-Itália-Japão.

Já no início de 1940, os físicos britânicos Otto Frisch (1904–1979) e Rudolf Peierls (1907–1995) haviam concluído que uma reação em cadeia explosiva seria possível com a fissão do isótopo ^{235}U , e o documento conhecido

como Memorando Frisch-Peierls, de março de 1940 [38], convenceu seus colegas norte-americanos e britânicos de que a bomba atômica era possível e viável. Essa conclusão provocou grande mobilização dos cientistas em direção às pesquisas sobre a fissão nuclear, levando à descoberta dos elementos transurânicos, sendo físsil o isótopo ^{239}Pu .

Esse isótopo foi identificado em maio de 1941 como subproduto do bombardeamento de urânio por nêutrons provenientes da reação nuclear de dêuterons extraídos do ciclotron de 60 polegadas de Berkeley com alvos de berílio [39].

Em dezembro de 1941, em decorrência do ataque surpresa à base naval norte-americana em Pearl Harbor (Havaí) pelos japoneses, os EUA declararam guerra ao Japão e, em consequência, a Alemanha e a Itália declararam guerra aos EUA. A partir daí, no início de 1942, formou-se a frente dos Aliados, inclusive com a incorporação do Brasil, para combater as tropas inimigas na Europa. Também, físicos, químicos, engenheiros e técnicos de diferentes especialidades uniram-se no esforço de guerra para combater o inimigo e, de consequência, cientistas da UCRL decidiram por adiar o projeto

de construção do ciclotron de 184 polegadas.

No início de 1942 foi criado o Projeto Manhattan com o objetivo de produzir armas de altíssima potência de destruição, com base no mecanismo da fissão dos núcleos pesados ^{235}U e ^{239}Pu . As pesquisas em direção a esse propósito intensificaram-se e, em 2 de dezembro, na Universidade de Chicago, Enrico Fermi e sua equipe conseguiram por em funcionamento o primeiro reator nuclear de reação de fissão em cadeia autossustentada, com produção de energia de origem nuclear de forma controlada [40].

Um daqueles artefatos nucleares projetados deveria ser carregado com uma quantidade apreciável do isótopo físsil ^{235}U , necessária para produzir uma grande explosão descontrolada pela fissão nuclear em cadeia. Para se conseguir em tempo hábil todo esse material físsil, o eletroímã de 184 polegadas foi então redirecionado para fazer a separação eletromagnética do ^{235}U a partir de toneladas de urânio natural.

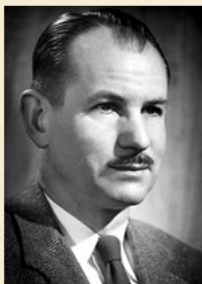
Na primeira metade de 1945, Ernest Lawrence e sua equipe se empenharam no desenvolvimento dos espectrógrafos de massa (ver esquema na ilustração) utilizando os eletroímãs dos ciclotrons da UCRL em Berkeley. Foram os chamados CALUTRON's (nome formado por partes das palavras CALifornia University cicloTRON), um deles construído com o eletroímã do ciclotron de 37 polegadas, e o outro com o de 184 polegadas do futuro ciclotron.

Os CALUTRON's conseguiram separar ~ 50 kg de ^{235}U (aproximadamente 2,5 L) utilizados na preparação da bomba atômica endereçada à cidade de Hiroshima (Japão), sobre a qual foi lançada em 6 de agosto de 1945, com liberação de ~ 17 GWh. Uma verdadeira tragédia sobre a população japonesa, resultado do lado triste e lamentável do uso da energia nuclear para destruição em massa.

O CÍCLOTRON DE 184" EM BERKELEY

1945: - Edwin McMillan (nos EUA) e Vladimir Veksler (na URSS) descobrem o mecanismo “**estabilidade de fase**” nos cíclotrons de alta energia

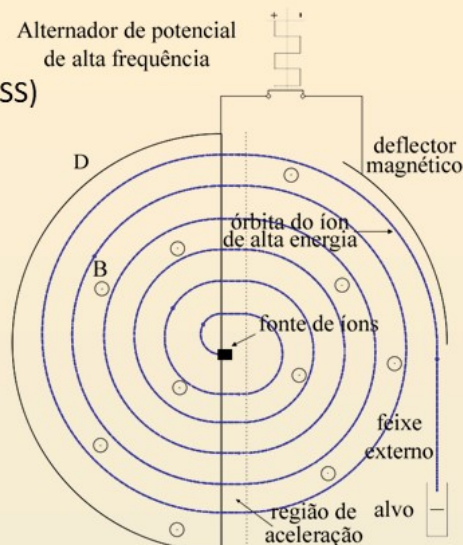
- Ficam superadas as dificuldades técnicas impostas por íons relativísticos
($T_\alpha = 380\text{MeV}$, $v = 42\% c$, $\Delta m/m \approx 10\%$)



Edwin McMillan
Físico Norte-Americano
(1907-1991)



Vladimir Veksler
Físico Ucraniano
(1907-1966)



Alta energia ($T_\alpha \gtrsim 40\text{ MeV}$)
Cíclotron de frequência modulada

$$f = \frac{q}{m_\alpha} \frac{B}{2\pi} \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Com B constante, a frequência é diminuída progressivamente

$$T_\alpha = m_\alpha c^2 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{qBR}{m_\alpha c} \right)^2} - 1 \right]$$

1946: - Concluída a construção do cíclotron de 184"
(out) ao custo de US\$1,7 M
- Eletroímã de 4 mil ton; apenas 1 D conectado ao “terra”; $V = 15\text{kV}$
- Campo magnético, $B = 12\text{kG}$ (1,2 Tesla)
- Frequência decrescente de 11,5 MHz a 9,8 MHz
(1º nov) - Extração dos primeiros feixes de partículas alfa

Pouco antes do término da 2ª Grande Guerra, os físicos da UCRL retornaram sua atenção ao projeto de construção do cíclotron de 184 polegadas. A questão física e técnica fundamental que se apresentava era a de como levar em conta o efeito relativístico do aumento de massa dos íons (agora apreciável), pois eles alcançariam energias mais altas no caso das partículas alfa de até 380 MeV.

A frequência de rotação dos íons, f , decresceria com o aumento da velocidade (ver a fórmula de f na ilustração), e eles chegariam atrasados no espaçamento entre os D's em relação à frequência de oscilação do campo elétrico que os acelerariam nessa região. Ou seja, a frequência de rotação dos íons ficaria defasada em relação à da variação da voltagem aplicada entre os D's (ou entre um D e o “terra”) e, portanto, os íons não poderiam ser acelerados.

Eis que o físico soviético Vladimir Veksler (1907–1966), em 1944, e, independentemente, o norte-americano Edwin McMillan (1907–1991), em 1945, descobriram o modo de superar essa dificuldade pelo mecanismo que ficou conhecido como “estabilidade de fase” nos cíclotrons de alta energia [41, 42]. Os cíclotrons que, a partir daí, passaram a fornecer energias cinéticas maiores do que 10 MeV/núcleon ficaram conhecidos por cíclotrons de frequência modulada, ou sincrocíclotrons.

Mantendo constante a intensidade do campo magnético, B , a frequência de oscilação do campo elétrico era diminuída progressivamente a fim de compensar o decréscimo da frequência com que os íons chegavam à região de aceleração. A última fórmula da ilustração indica que a energia das partículas alfa, T_α , depende unicamente do raio da trajetória circular final, R , por elas alcançado.

Desse modo, a construção do cíclotron de 184 polegadas foi concluída em outubro de 1946, e os primeiros feixes externos de partículas alfa ficaram disponibilizados a partir de 1º de novembro daquele ano [43]. Alguns detalhes técnicos dessa grande máquina de íons leves de alta energia estão mostrados na ilustração.

MOTIVAÇÃO DE LATTES PARA IR A BERKELEY

Ao longo de 1947:

- **Eugene Gardner** (líder do grupo de emulsões no RL-UC) bombardeava alvos de C com feixes de α 's de 380 MeV, e usava emulsões Kodak como detector para os mésons, mas não conseguia identifica-los
- Enviava as placas de emulsão expostas para o grupo de Bristol, mas não conseguia resultados



Eugene Gardner
Físico Norte-Americano
(1913-1950)



- Na época, não se sabia direito em Berkeley o que eram os píons e múons identificados por Lattes em Bristol na primavera de 1947

Energia cinética mínima, $T_{\alpha L}$, para produção de píons por colisões- α em alvos fixos

Alvo	Produtos	$T_{\alpha L}$ (MeV)	Alvo	Produtos	$T_{\alpha L}$ (MeV)
${}^9\text{Be}$	$\pi^+ nn$	218	${}^{59}\text{Co}$	$\pi^+ nn$	161
${}^{12}\text{C}$	$\pi^- pn$	215	${}^{103}\text{Rh}$	$\pi^+ pn$	159
${}^{27}\text{Al}$	$\pi^- pp$	170	${}^{238}\text{U}$	$\pi^- pp$	160

- Embora estivessem sendo produzidos, não se sabia como detectá-los e identificá-los; **Lattes sabia!**

Foi a motivação para Lattes ir a Berkeley

Eugene Gardner (1913–1950) foi um físico norte-americano filiado à Universidade da Califórnia em Berkeley, e o líder do grupo de emulsões nucleares no Radiation Laboratory. Nos anos da Guerra, Gardner adquirira beriliose crônica devido à exposição ao berílio no seu local de trabalho. Berílio era muito usado como elemento alvo para produzir nêutrons em reações nucleares induzidas por dêuterons energéticos extraídos do ciclotron de 60 polegadas em Berkeley. A doença ataca tanto a pele quanto os pulmões, nesse caso dificultando a respiração. Gardner veio a falecer desse mal em novembro de 1950.

Do momento em que o ciclotron de 184 polegadas entrou em funcionamento, Gardner bombardeava alvos de carbono, berílio, alumínio e outros com os feixes de partículas alfa de 380 MeV, e usava emulsões nucleares preparadas pela Kodak como detector para registrar e observar mésons com um microscópio. Porém, não logrou sucesso em identificá-los. Por mais de um ano, Gardner e seu grupo fizeram inúmeras tentativas, inclusive enviava as placas de emulsão para Bristol, mas não conseguia resultados.

Naquela ocasião (o ano de 1947) não se sabia direito em Berkeley o que eram os píons e múons identificados claramente por Lattes em Bristol na primavera de 1947 [31]. O fato era que os píons estavam sendo produzidos, pois a energia cinética das partículas alfa (os 380 MeV) era mais do que suficiente, já que superava o valor da energia mínima necessária para produzi-los (energia limiar, $T_{\alpha L}$) a partir de diferentes núcleos-alvo.

A tabela da ilustração mostra valores de $T_{\alpha L}$ para diferentes reações de produção de píons em colisões de partículas alfa com vários alvos (os dados mostrados nessa tabela foram obtidos com valores recentes das massas das partículas e núcleos). Embora os píons estivessem sendo produzidos, não se sabia, em Berkeley, como detectá-los e identifica-los. Lattes sabia. Essa foi a grande motivação para Lattes ir até Berkeley.

LATTES A CAMINHO DE BERKELEY (1947)

abril/maio: - Passando pelo Rio, **Lattes e Leite Lopes** providenciam junto ao **CMG. Álvaro Aberto** (delegado na CEA-EUA) permissão pela CEA para Lattes poder trabalhar na UCRL (Berkeley) [por causa do sigilo imposto pela 2ª GG (**Projeto Manhattan -> CEA Americana**)]

21 julho: - Carta de Wataghin a Ernest Lawrence apresentando César Lattes

Nov.: - César Lattes recebe bolsa da fundação Rockefeller (**consultant expert of USAEC**) e a autorização para frequentar o UCRL

Dez.: - **Visita de Lattes a Niels Bohr em Copenhagen**

- Lattes mostra seu grande interesse em ir a Berkeley para detectar e “**ver**” os píons produzidos no cíclotron de 184”
- Lattes contava com eventos favoráveis nas colisões α -C quando se leva em conta o **movimento dos núcleons** no projétil e no alvo
- Lattes é **fortemente incentivado** por Bohr no seu projeto de ir a Berkeley



Álvaro Alberto da Motta e Silva
Cientista Brasileiro
(1889-1976)



Gleb Wataghin
Físico russo-italiano
(1899-1986)



Niels Bohr
Físico Dinamarquês
(1885-1962)

Aproveitando sua passagem pelo Rio de Janeiro no período abril–junho de 1947 por ocasião das idas a Chalcatta, César Lattes, com José Leite Lopes, providenciaram junto ao então Capitão de Mar e Guerra Álvaro Alberto da Motta e Silva (1889–1976), na época o delegado do Governo Brasileiro na Comissão de Energia Atômica-CEA dos EUA, permissão pela CEA/EUA para Lattes poder trabalhar na UCRL em Berkeley. Tal providência se fizera absolutamente necessária por causa do sigilo imposto pela Guerra, pois o Projeto Manhattan, criado em 1942 para atender ao esforço de Guerra, transformou-se, em 1946, na CEA norte-americana (USAEC na sigla em inglês), à qual o Radiation Laboratory estava subordinado.

Em julho de 1947, Gleb Wataghin (quem levou Lattes para a USP em 1941) endereçou a carta de apresentação de Lattes a Ernest Lawrence, na qual destacou o brilhantismo de Lattes como ex-aluno do Bacharelado em física, tornando-o seu assistente. Wataghin mencionou também o trabalho de Lattes em Bristol com Powell e Occhialini, como também o conhecimento de Gardner (do UCRL) sobre as atividades de Lattes em Bristol.

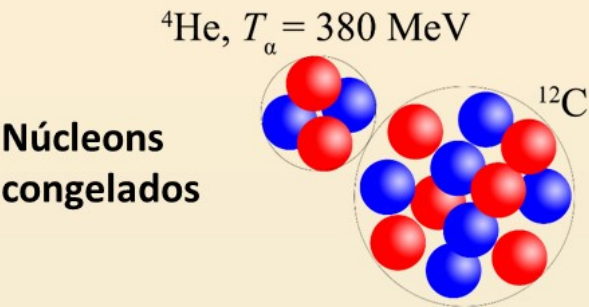
Todo esse empenho fez com que César Lattes recebesse, em novembro, a aprovação da bolsa pleiteada junto à Fundação Rockefeller, recebendo-a na qualidade de “Consultant Expert of USAEC”, bem como a autorização para frequentar o UCRL.

Como mencionado anteriormente, Lattes havia sido convidado por Niels Bohr para visitá-lo em sua casa, em Copenhagen, lá chegando em dezembro daquele ano de 1947. Na conversa com Bohr, Lattes externara seu grande desejo e interesse em ir a Berkeley para detectar e “ver” os píons que estavam sendo produzidos com o cíclotron de 184 polegadas.

De feliz intuição, Lattes contava com eventos favoráveis à produção de píons nas colisões das partículas alfa com alvos de carbono quando se levasse em conta o movimento dos núcleons, tanto no projétil como no alvo (Apêndice A). Bohr dera todo o apoio e incentivo ao projeto de Lattes de ir até Berkeley.

MECANISMO DE PRODUÇÃO DE PÍONS EM COLISÕES NÚCLEO-NÚCLEO

Base: Colisões núcleon-núcleon sem movimento nos núcleos



Colisão primária	T_L (MeV)
$p + n \rightarrow p + p + \pi^-$	287
$n + n \rightarrow p + n + \pi^-$	287
$n + n \rightarrow d + \pi^-$	282
$p + p \rightarrow d + \pi^+$	288
$n + p \rightarrow n + n + \pi^+$	292
$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$	292

$T_L \approx 290 \text{ MeV}$ (limiar)
 $T_p \approx 95 \text{ MeV}$ (disponível)

Como $T_p < T_L$, não pode haver produção de píons

Para o leitor compreender o mecanismo de produção de píons em colisões núcleo-núcleo, como era o que se investigava no Radiation Laboratory em Berkeley em 1947, suponhamos primeiramente que prótons e nêutrons nos núcleos projétil e alvo não possuem movimento algum, isto é, encontram-se “congelados”.

A ilustração acima mostra a colisão ${}^4\text{He}$ (partícula alfa) contra ${}^{12}\text{C}$ (alvo de carbono), estando os núcleons congelados. Píons podem ser produzidos quando um próton ou nêutron do ${}^4\text{He}$ choca-se contra um próton ou nêutron do ${}^{12}\text{C}$ que está em repouso.

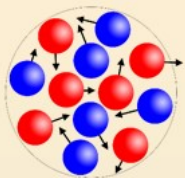
A energia disponível numa tal colisão núcleon-núcleon é tão somente 95 MeV, resultado da divisão dos 380 MeV do ${}^4\text{He}$ incidente pelos quatro núcleons que formam o ${}^4\text{He}$. Entretanto, um cálculo com base na dinâmica relativística de colisões próton-próton, próton-nêutron, nêutron-nêutron

e nêutron-próton, estando o núcleon alvo em repouso [44], indica um valor médio $\approx 290 \text{ MeV}$ para a energia cinética mínima do núcleon incidente necessária à produção de um píon (π^+ ou π^-), a chamada energia limiar, T_L , para produção de píons.

Na tabela da ilustração acima estão colocados os valores de T_L para as diferentes reações primárias de produção de píons em colisões núcleon-núcleon. Como se pode concluir, na suposição de estarem congelados os núcleons no projétil e no alvo, não pode haver produção de píons.

MECANISMO DE PRODUÇÃO DE PÍONS EM COLISÕES NÚCLEO-NÚCLEO

Base: Colisões núcleon-núcleon em movimento nos núcleos

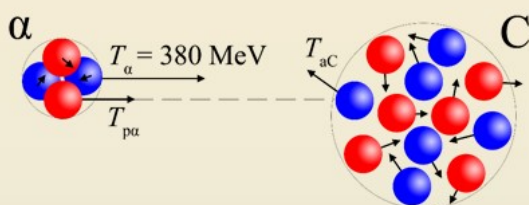
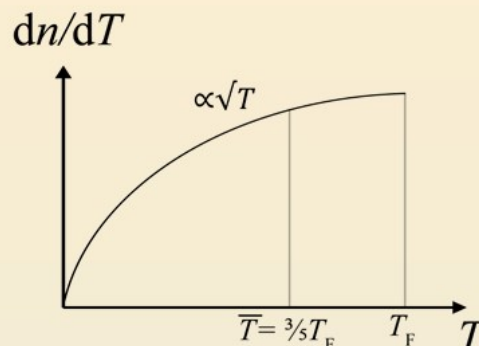


Movimento dos núcleons é descrito pelo Modelo de Gás de Fermi, proposto em 1936 por Hans Bethe

(Resultado da Mecânica Quântica)

$$T_{\max} = T_F = 76,37 N^{2/3} / R^2 \text{ MeV}$$

$$\bar{T} = \frac{3}{5} T_F$$



$$T_{p\alpha} = \frac{3}{5} T_{F\alpha} \approx 15 \text{ MeV}$$

$$T_{aC} = \frac{3}{5} T_{FC} \approx 15 \text{ MeV}$$

Hans Bethe
Físico alemão
norte-americano
(1906-2005)

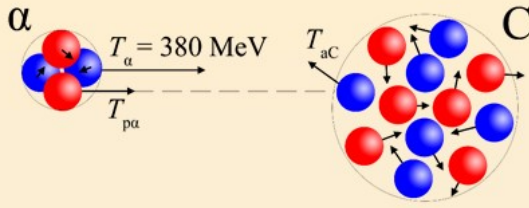


O movimento dos núcleons veio explicado por um modelo que considera o núcleo atômico como um volume de forma esférica, contendo dois gases, um de prótons e outro de nêutrons, onde os núcleons se movimentam livremente, isto é, não sofrem colisões uns contra os outros.

Essa idéia surgiu em 1936, quando o físico alemão-norte-americano Hans Albert Bethe (1906–2005) procurava investigar os níveis de energia dos núcleons na questão da absorção de nêutrons pelo núcleo [45]. O modelo recebeu o nome de Gas de Fermi, porque as partículas obedeciam a estatística de Fermi (na verdade Fermi-Dirac), por isso mesmo chamados férmions, por possuírem número de spin $1/2^+$ e $1/2^-$ (os sinais indicam o sentido de rotação).

Aplicando-se a equação fundamental da Mecânica Quântica de Schrödinger [46] aos núcleons do gás de Fermi, chega-se à distribuição em energia do número de estados quânticos, a qual segue uma curva simples como a mostrada

na ilustração (T é a energia cinética). Em seguida, usando o Princípio de Exclusão de Pauli [47] e a curva acima, são extraídos os valores da energia cinética máxima (conhecida como energia de Fermi, T_F) e a energia cinética média dos núcleons ($\langle T \rangle = 3T_F/5$). Esses valores só dependem do número de partículas e do raio do volume esférico que as contém. Para ^4He e ^{12}C tem-se o resultado $T_F \approx 25 \text{ MeV}$ e $\langle T \rangle \approx 15 \text{ MeV}$ (equações (2) a (6) do Apêndice A). Na ilustração, os símbolos $T_{p\alpha}$ e T_{aC} representam a energia cinética média do núcleon projétil (o da partícula alfa) e do núcleon alvo (o do ^{12}C), respectivamente. Esse é um resultado da Mecânica Quântica da segunda metade dos anos 1920.



T_p resulta da combinação de T_α e $T_{p\alpha}$:

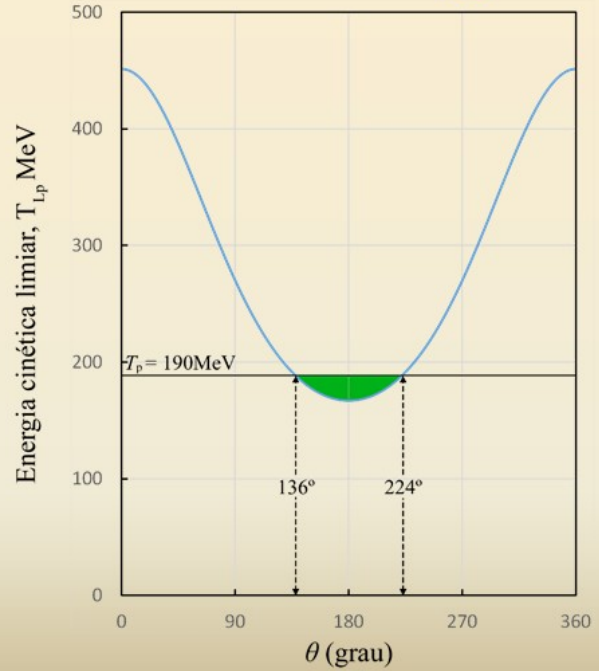
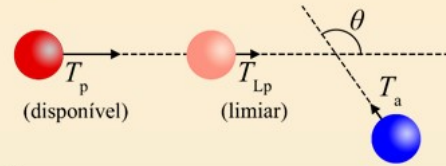
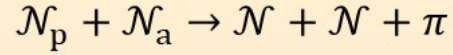
$$T_\alpha = 380 \text{ MeV}, \quad T_{p\alpha} = 15 \text{ MeV}$$

$$\beta_p = \frac{\beta_\alpha + \beta_{p\alpha}}{1 + \beta_\alpha \cdot \beta_{p\alpha}} \rightarrow T_p = 190 \text{ MeV}$$

Píons são produzidos quando $T_p > T_{Lp}$

Para $T_{p\alpha} = T_{ac} = 15 \text{ MeV}$, píons são produzidos para $136^\circ \lesssim \theta \lesssim 224^\circ$

Mecânica Quântica + Relatividade Especial explicam a produção de píons em colisões núcleo-núcleo



De posse do resultado precedente, pode-se encontrar a condição na qual píons podem ser produzidos quando se leva em conta a energia de movimento dos núcleons que estão colidindo uns contra os outros, quando o alvo de carbono é bombardeado por partículas alfa de 380 MeV.

Nesse caso, a energia cinética de que dispõe o núcleon projétil, T_p , resulta da combinação da energia cinética da partícula alfa medida no laboratório ($T_\alpha = 380 \text{ MeV}$) com a energia cinética do núcleon medida na partícula alfa ($T_{p\alpha} \approx 25 \text{ MeV}$ ou $T_{p\alpha} \approx 15 \text{ MeV}$). Como aqui as energias envolvidas produzem efeitos relativísticos, T_p deve ser avaliada pela regra de composição das respectivas velocidades relativísticas, $\beta = v/c$ [48]. O cálculo conduz ao resultado $T_p^{\text{max}} = 224 \text{ MeV}$, ou $\langle T_p \rangle = 190 \text{ MeV}$ (equações (7) e (8) do Apêndice A). Notar que esses valores de T_p são bem maiores do que os 95 MeV, anteriormente mencionados quando se considera os núcleons “congelados”.

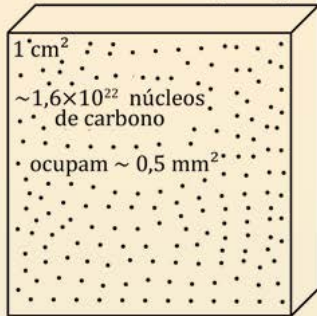
Em seguida, deve-se achar a energia cinética limiar do núcleon projétil, T_{Lp} , e confrontá-la com a energia cinética disponível, T_p , para ver quando se verifica a condição para produção de píons, isto é, $T_p > T_{Lp}$. Essa condição vai depender do ângulo θ formado entre as direções das partículas que irão colidir (ver esquema na parte superior direita da ilustração).

Usando os princípios da cinemática relativística aplicados às colisões núcleon-núcleon que produzem um píon [49], obtém-se a curva T_{Lp} em função de θ , como está mostrada no gráfico. Esse é o resultado obtido quando se considera o caso da energia cinética média dos núcleons, $T_{p\alpha} = T_{ac} = 15 \text{ MeV}$. Observa-se no gráfico que a diferença $T_p - T_{Lp}$ é positiva no intervalo de θ entre 136° e 224° , e é máxima ($\approx 23 \text{ MeV}$) quando $\theta = 180^\circ$, isto é, quando os núcleons se chocam frente a frente, sendo esta a condição de máxima chance para produção de píons (o roteiro para obter T_{Lp} versus θ está dado no Apêndice A, onde também se mostra a situação ainda mais favorável à produção de píons, qual seja, quando a energia de movimento dos núcleons no projétil e no alvo é máxima ($T_{p\alpha} = T_{ac} = 25 \text{ MeV}$), com uma “janela” angular $\approx 156^\circ$ centrada em 180°).

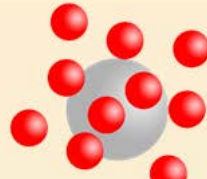
Concluindo, a aplicação da Mecânica Quântica para obter a energia de movimento dos núcleons como dado pelo modelo de Gás de Fermi, em combinação com os princípios da cinemática e dinâmica relativísticas, explica, de uma maneira quantitativa, a produção de píons em colisões núcleo-núcleo.

PRODUÇÃO DE MÉSONS π NO CÍCLOTRON DE 184" DO UCRL (BERKELEY)

Alvo de Carbono ($\rho \approx 2\text{g/cm}^3$)



1,6 mm espessura



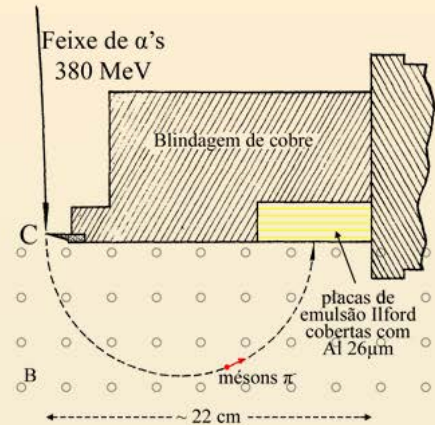
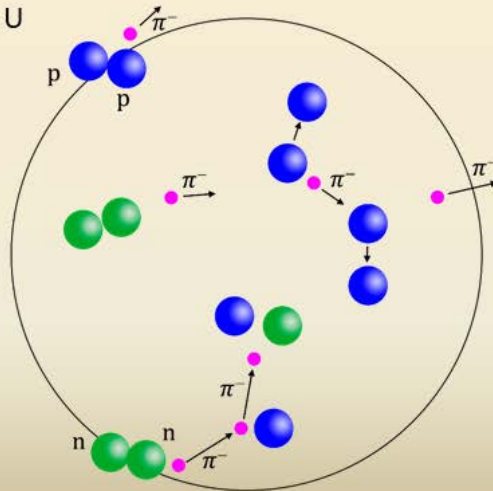
$$R_\alpha \approx 2 \text{ fm}$$

$$R_C \approx 3,2 \text{ fm}$$

Colisões periféricas $\approx 50\%$

Outros alvos usados:

Be, Cu e U



Fluxo de α 's: 18 T α 's / min

- com 300-MeV α + C: redução significativa no número de mésons
- Detector: Placas de emulsão Ilford C2 (50 μm) cobertas com 26 μm de Al (p/ redução da energia)

Nos experimentos conduzidos por Gardner e Lattes junto ao ciclotron de 184 polegadas em Berkeley, foram usados prioritariamente alvos finos de carbono de 1,6 mm de espessura, equivalente a $\sim 1,6 \times 10^{22}$ núcleos de carbono por cm^2 , ocupando uma área $\approx 0,5 \text{ mm}^2$, portanto não havendo superposição dos núcleos-alvo para as partículas alfa que incidiam perpendicularmente à lâmina de carbono. Além de carbono, berílio, cobre e urânio, foram também usados nas irradiações.

A máquina fornecia partículas alfa à razão de 18 trilhões de α 's por minuto, e considerando os raios nucleares aproximadamente iguais a 2 fm e 3,2 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$), respectivamente, para o ^4He e ^{12}C , estima-se que cerca da metade das colisões α -C seriam periféricas. Essa é a condição mais favorável para que mésons π pudessem ser detectados externamente, pois píons produzidos de colisões não periféricas poderiam sofrer espalhamento píon-núcleon e serem reabsorvidos por um par de núcleons no próprio alvo.

Experimentos com alvos de carbono e partículas alfa de 300 MeV mostraram uma redução significativa no número de mésons detectados.

O sistema de detecção consistia de um empilhamento de placas de emulsão Ilford tipo C2, de 50 micrômetros de espessura, cobertas com folhas de alumínio de 26 micrômetros para redução da energia dos píons na incidência quase paralela à superfície dos detectores.

O arranjo experimental utilizado por Gardner e Lattes foi montado como mostra o esquema na parte superior da ilustração [50]. Píons produzidos no carbono (C) descreviam trajetórias semicirculares pela ação do campo magnético, B, (sentido para fora do papel) e atingiam longitudinalmente as placas de emulsão protegidas com blindagem de cobre. Pelo sentido do campo magnético e da trajetória dos píons, tratava-se da detecção de mésons π^- [50].

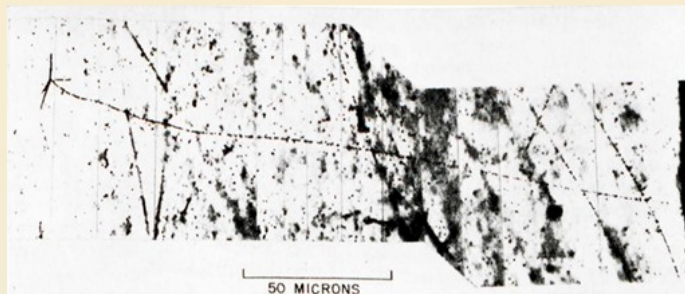
1948: PIONEIRISMO DE LATTES NA DETECÇÃO DE PÍONS ARTIFICIAIS

7 Fev: Lattes chega ao Radiation Laboratory (Berkeley) e junta-se a Gardner

21 Fev: **Lattes observa os primeiros mésons π^-**

30s de feixe α forneceram 100 x mais píons do que as placas expostas por 40 dias em Chacaltaya (eficiência da máquina 11M x maior do que exposições a 5500 m de altitude)

Traço de π^- em emulsão mostrando desintegração ao final da trajetória



Os físicos do RL ficaram surpresos! Lawrence não pode acreditar que Gardner (adoentado) e Lattes (um brasileiro de 23 anos) fossem capazes de detectar mésons em apenas 2 semanas após a chegada de Lattes

César Lattes inaugura a era da Física das partículas elementares com o uso de aceleradores

Lattes, chegando ao Radiation Laboratory em 7 de fevereiro de 1948, juntou-se imediatamente a Gardner, e começaram a planejar todo o experimento objetivando detectar com as emulsões Ilford os mésons que seriam produzidos pela incidência de partículas alfa de 380 MeV do ciclotron de Berkeley em alvos de carbono (ver o arranjo experimental na ilustração anterior).

Em apenas duas semanas de trabalho, Lattes observou os primeiros mésons π^- ao microscópio. Lattes e Gardner avaliaram que, em 30 s de feixe alfa, estavam sendo produzidos 100 vezes mais píons do que por 40 dias de exposição em Chacaltaya, isto é, o ciclotron mostrava uma eficiência de produção de píons onze milhões de vezes maior do que nas exposições na altitude de 5500 metros.

A fotografia mostra um traço típico de um méson π^- provocando uma desintegração nuclear no final de sua trajetória, onde é absorvido por um núcleo da emulsão. Foi um feito pioneiro e extraordinário.

Os físicos do RL ficaram surpresos! Lawrence e outros não puderam acreditar que Gardner (adoentado com beriliose) e Lattes (um brasileiro de 23 anos recém-casado) fossem capazes de detectar mésons em apenas duas semanas após a chegada de Lattes ao Radiation Laboratory.

Ali, em Berkeley, o grupo experimental trabalhara 15 meses sem conseguir resultados. Lattes, ao mesmo tempo e por muitos meses em Bristol ao longo de 1947, havia adquirido perfeita familiaridade no reconhecimento dos traços de mésons nas emulsões. Ele sabia o que procurar nas chapas reveladas em Berkeley. Segundo Gardner, logo após a sua chegada “Lattes havia feito a técnica de Bristol bem sucedida na detecção dos primeiros mésons produzidos pelo homem” [51]. Assim, **César Lattes, por seu pioneirismo em detectar os mésons π^- produzidos no ciclotron de 184 polegadas em Berkeley, inaugurou, em 21 de fevereiro de 1948, a era da Física das Partículas Elementares com o Uso de Aceleradores.**

Um mês depois, seu ex-supervisor, Cecil Powell, e seu ex-professor, Giuseppe Occhialini, reconheceram, de Bristol, em artigo na *Nature* [52], o grande feito de seu ex-assistente César Lattes.

1948: AMPLA DIVULGAÇÃO SOBRE O EXCEPCIONAL FEITO

- 02/Março** • Circulação do *preprint* UCRL-57 relatando em detalhes a detecção dos mésons artificiais
- “Production of mesons by the 184-inch Berkeley cyclotron”*
by Eugene Gardner and C M G Lattes
- (sobre a descrença dos físicos do UCRL): Lattes envia carta a Leite Lopes dizendo **“os mésons são tais e quais os de Bristol”** (e anexa cópia do UCRL-57)
- 09/Março:** • Depois de convencidos, a UCRL e a USAEC, através de coletiva de imprensa à *Associated Press* dada por Lawrence, anunciaram oficialmente a **“detecção de mésons π^- , conseguida pela primeira vez por Gardner e Lattes no ciclotron de 184” e placas de emulsão Ilford**
- No Rio, o jornal A NOITE publica matéria **“Sensacional descoberta de um cientista brasileiro”**
- 10/Março:** • Em A MANHÃ (do Rio): **“A 2ª grande descoberta da ciência moderna”**
- No CORREIO PAULISTANO: **“Descoberta de um cientista brasileiro, Cesar Lattes, da USP. Trata-se do méson, importante componente nuclear”**

O extraordinário feito de César Lattes conseguido no Radiation Laboratory da Universidade da Califórnia em Berkeley teve ampla divulgação, tanto nos meios científicos como na imprensa em geral. Imediatamente, o Preprint UCRL-57 de 02 de março de 1948, detalhando e ilustrando com fotografias de eventos registrados nas chapas de emulsão a detecção dos mésons π^- , começou a circular.

Lattes, reagindo à descrença dos físicos do UCRL, enviou carta a Leite Lopes, no Rio, escrevendo *“os mésons são tais e quais os de Bristol”*, e anexou exemplar do Preprint.

Passado uma semana, depois de convencidas, a UCRL e a USAEC, através de coletiva de imprensa à *Associated Press* dada por Ernest Lawrence, anunciaram oficialmente a “detecção de mésons π^- ”, conseguida pela primeira vez por Gardner e Lattes no ciclotron de 184 polegadas e placas de emulsão Ilford C2. Durante o mês de março de 1948 a imprensa brasileira noticiou em vários jornais e revistas do Rio de Janeiro e São Paulo (ver as manchetes nas ilustrações).

O Professor Adel da Silveira (1924-1986), que foi Pesquisador Titular do CBPF, recorda alguns acontecimentos daquela época que merecem ser aqui mencionados. Segundo ele, Lourenço Borges, do jornal “A NOITE” (Rio de Janeiro), homem de cultura e bem informado sobre assuntos de ciência, foi o jornalista pioneiro em dar grande destaque ao importante trabalho de Lattes em Berkeley. Com a atuação de Lourenço Borges espalhou-se pelo país a figura do personagem César Lattes e de suas realizações sobre os mésons [53]. Adel da Silveira também relata em suas reminiscências que, segundo Nelson Lins de Barros (1920–1966), amigo de Lattes em Berkeley, os brasileiros mais conhecidos na Califórnia eram Carmen Miranda (1909-1955) e César Lattes [53].

Continuando em março de 1948:

Dia 11: • No THE NEW YORK TIMES: **“Artificial Cosmic Rays”**

- Na FOLHA DA MANHÃ (de S. Paulo): **“Considerado o maior acontecimento científico dos últimos tempos: a produção artificial de mésons”**

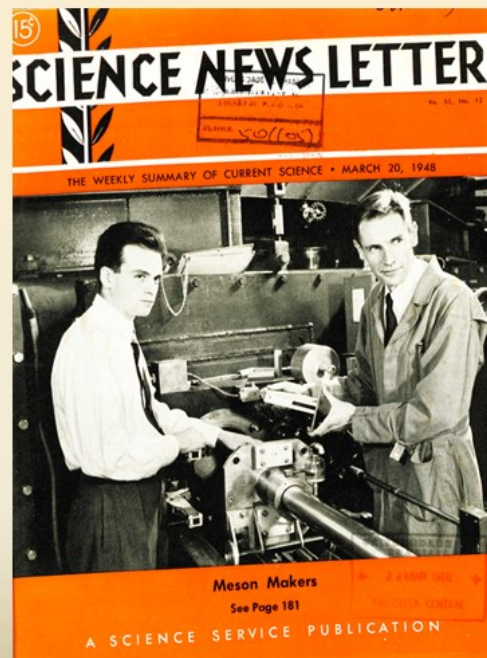
Dia 12: • Publicação do *preprint* UCRL-57 na revista *SCIENCE* 107, 270

Dia 13: • Na SCIENCE NEWS LETTER:
“Atomic particle created”

Dia 20: • Na SCIENCE NEWS LETTER (matéria de capa):
“How mesons were made”

Dia 28: • Em A MANHÃ (suplemento):
“Novos horizontes para a Física Atômica”

Dia 30: • Robert Serber (líder no RL) divulga a descoberta na 2nd Shelter Island Conf. (NY)



Em 11 de março apareceu a matéria “Artificial Cosmic Rays” editada pelo *The New York Times* e, por duas vezes, a revista de novidades científicas *Science News Letters* publicou matéria sobre o assunto, a de 20 de março sendo “de capa”.

O físico norte-americano Robert Serber (1909–1997), que à época era o líder teórico no RL, havia participado da 2^a Shelter Island Conference (N. York) em 30 de março, e lá divulgara oralmente o grande acontecimento daqueles dias em Berkeley a um bom número de físicos participantes da conferência.

Continuando 1948:

- Abril:**
- Na NUCLEONICS:
"First Laboratory-Created Mesons Produced with 4000-ton Cyclotron at UCRL"
 - Conferência dada por Lattes na American Physical Society
- 8/Maio:**
- Na O CRUZEIRO: **"César Lattes, o méson e a ciência no Brasil"**
 (por Mario Camarinha da Silva)
- Junho:**
- Conferência dada por Lattes no Simpósio do CALTECH
Em ~6 meses: 16 apresentações em instituições científicas americanas
- 27/Set:**
- Robert Serber divulga a descoberta no "1st Post-War Solvay-Congress" (Brussels)

Robert Serber
 Físico norte-americano
 (1909-1997)



Nos meses seguintes, novos eventos científicos tiveram lugar nos EUA, e, em dois deles, Lattes deu conferências sobre a detecção dos píons, uma na American Physical Society-APS (abril, 1948), e outra no Simpósio do CALTECH (junho, 1948). Outras quatorze apresentações em instituições científicas norte-americanas foram feitas por Lattes num período de ~ 6 meses.

A prestigiosa revista *Nucleonics* publicou em abril daquele ano artigo extenso onde detalha, inclusive, um pouco da trajetória de Lattes na descoberta e detecção dos mésons, em Bristol e em Berkeley, como também oferece uma explicação

em linguagem acessível a um público maior, da história e da física relacionados aos mésons[54] (talvez, esse seja o relato mais claro e completo, a nível de divulgação, sobre a primeira detecção dos píons produzidos em acelerador).

Robert Serber também comunicara o notável feito de Gardner e Lattes no 1º Congresso Solvay do Pós-Guerra, realizado em Bruxelas no final de setembro, 1948.

1948 (SET): CONSEGUIDA A DETECÇÃO DE MÉSONS POSITIVOS (π^+) PRODUZIDOS NO CÍCLOTRON DE 184" DA UCRL (BERKELEY)

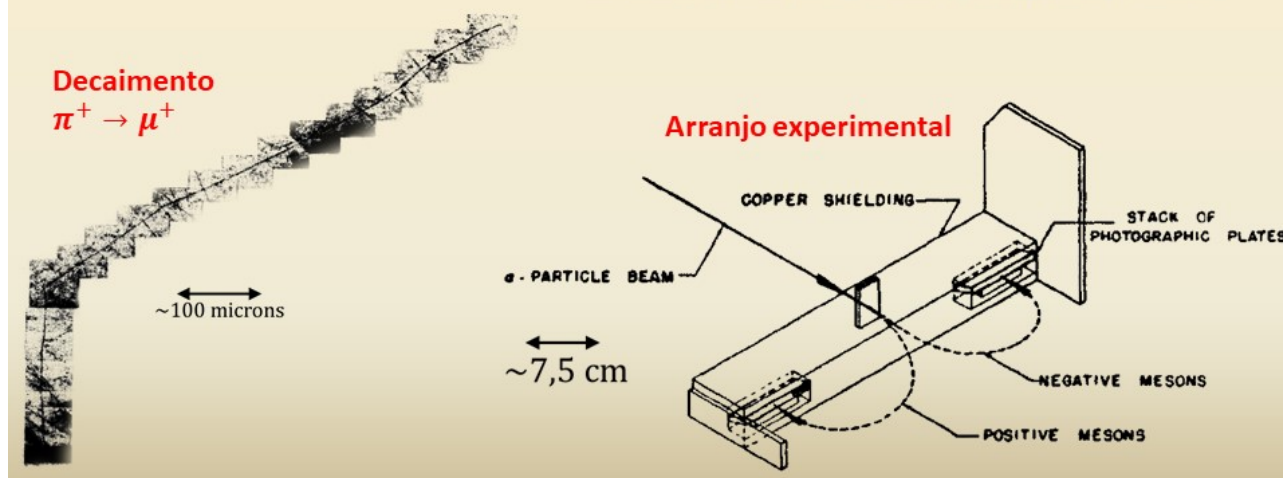
- Feixe de α 's de 380 MeV
- Alvo de C (1,6mm)
- Placas de emulsão Ilford

Publicado em 01 Fev, 1949
Physical Review 75 (3), 382

"Positive mesons produced by the 184-inch Berkeley Cyclotron"

by

J. Burfening, E. Gardner and C.M.G. Lattes
Radiation Laboratory, Univ. of California, Berkeley



Depois do sucesso conseguido na detecção dos mésons π^- artificiais, Lattes, Gardner e o oficial do exército norte-americano John Burfening, que então era orientado de Lattes, empenharam-se no arranjo experimental objetivando detectar também os mésons π^+ .

Tudo fora planejado como no caso dos píons negativos, exceto pelo posicionamento das placas de emulsão Ilford, agora colocadas adequadamente para receber os píons positivos, que iriam girar em sentido contrário devido à mudança do sinal da carga elétrica (ver esquema do experimento).

Em setembro de 1948 os primeiros π^+ puderam ser observados nas emulsões reveladas. Eles eram identificados pelo processo de decaimento $\pi^+ \rightarrow \mu^+$, que ocorria quando o π^+ chegava ao repouso, representado por dois traços, que se distinguiam pelo grau de ionização (contagem de grãos) e pelo espalhamento (mudança de direção). Um exemplo está mostrado na fotografia. Os resultados saíram publicados em fevereiro de 1949 [55].

Uma vez dominado o método de detecção de píons, Gardner e outros, no decorrer de 1949, fizeram uma série de experimentos com as emulsões Ilford C2 para detectar píons negativos e positivos, porém dessa vez usando prótons de 345 MeV extraídos do ciclotron de 184 polegadas² [56].

Lattes havia transferido para Berkeley, no ano anterior, todo o seu conhecimento que havia adquirido em Bristol sobre como identificar nas placas de emulsão os píons e múons. Assim, nesses novos experimentos, a equipe de Gardner pode achar os píons negativos pela desintegração nuclear que produziam (eventos tipo "estrela") após serem absorvidos no final de suas trajetórias. Os píons positivos, por sua vez, eram identificados pelo processo de decaimento $\pi^+ \rightarrow \mu^+$, com alcance do μ^+ aproximadamente igual a seis décimos de milímetro. Tudo acontecia como dissera Lattes: "os mésons são tais e quais os de Bristol".

² Ciclotrons são máquinas adequadas para acelerar íons leves, como prótons (^1H), dêuterons (^2H) e partículas alfa (^4He). Fixada a intensidade do campo magnético, B , o raio máximo da órbita alcançada pelos íons, R_{max} , só depende da razão carga/massa e da energia cinética do íon. Por exemplo, com $B = 15$ kGauss, partículas alfa de 380 MeV ou prótons de 345 MeV atingirão uma órbita de $R_{\text{max}} = 75$ polegadas. No ciclotron de 184 polegadas (diâmetro), B precisava ser no mínimo 12 kGauss.

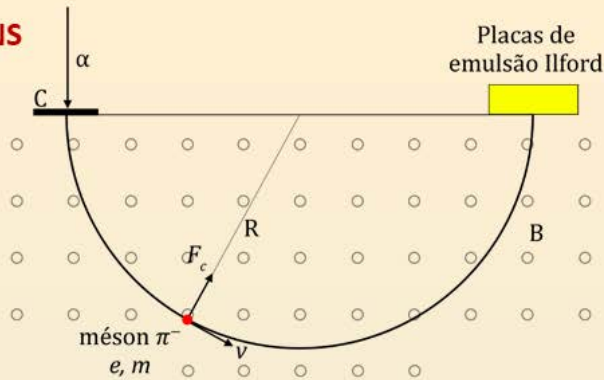
PRIMEIRAS MEDIDAS DE MASSA DOS MÉSONS

Método: Rigidez magnética (BR)
+ Alcance em Emulsão

- Força de Lorentz = Força de Newton:
$$evB = mv^2 / R$$
- Relação momentum-energia relativística:

$$p^2 = 2mT \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{mc^2} \right)$$
$$m_\pi = \frac{T}{2} \left[\left(\frac{3BR}{10T} \right)^2 - 1 \right] \text{ MeV}$$
$$B \approx 12\text{kG}$$
$$R \approx 9\text{cm}$$
$$T = 3,7 - 3,8 \text{ MeV}$$

$m_\pi \approx 138 \text{ MeV} = 270 m_e$



Ano	Método	$\pi^\pm [m_e]$	$\mu^\pm [m_e]$	π/μ
1947	Contagem de grãos	240 ± 50	180 ± 38	$1,33 \pm 0,04$
	Frequência de espalhamento	350 ± 100	≤ 230	$> 1,52$
1948	Contagem de grãos	—	—	$1,62 \pm 0,12$
	Rigidez magnética + alcance em emulsão	313 ± 16	—	—
1949	Contagem de grãos	305	202	1,51
	Rigidez magnética + alcance em emulsão	285	216	$1,32 \pm 0,01$
1950	Rigidez magnética + alcance em emulsão	276 ± 6	210 ± 4	$1,31 \pm 0,03$
Atual		273	207	1,32

Desde a descoberta dos píons em Bristol, grupos experimentais se empenharam para determinar a massa dessas novas partículas elementares. Três métodos foram usados até 1950, todos empregando as emulsões nucleares como detector para essas partículas: *i*) contagem de grãos (grãos revelados por unidade de comprimento ao longo da trajetória da partícula); *ii*) frequência de espalhamentos (mudança de direção da trajetória da partícula); e *iii*) rigidez magnética combinado com alcance (comprimento da trajetória) da partícula. O terceiro método foi o que produziu resultados mais próximos aos valores aceitos atualmente, inclusive para a razão das massas m_π/m_μ (ver tabela de massas na ilustração).

Rigidez magnética é o produto, BR , da intensidade do campo magnético, B , pelo raio da trajetória semicircular, R , percorrida pelos mésons na região de campo magnético. Combinando as forças que atuam na partícula de carga elétrica unitária e massa m_π (a ser determinada) enquanto descreve o movimento circular com velocidade v , e usando a relação relativística entre a quantidade de movimento e a energia cinética [57], obtém-se uma expressão simples para a determinação de m_π (ver na ilustração).

A intensidade do campo magnético era mantida constante (valor típico $B \approx 12 \text{ kGauss}$), portanto duas medidas apenas precisavam ser realizadas: a de R e a da energia cinética, T , da partícula. A primeira era obtida determinando o ponto e o ângulo de incidência da partícula na placa de emulsão (mediante medidas no traço deixado pela partícula), e a segunda era avaliada a partir da medida do alcance da partícula combinada com a relação alcance-energia previamente estabelecida (calibração do detector). Valores típicos de R e T obtidos por esse método estão indicados na ilustração, e forneceram no período 1948–1950 um valor para a massa dos píons $\approx 280 \times m_e$.

Finalizando, o autor gostaria de recomendar, àqueles que desejam obter uma visão panorâmica a respeito da produção e detecção de mésons, a leitura do artigo de revisão escrito àquela época por Joseph M. Keller, intitulado “Mesons Old and New” [58].

DESDOBRAMENTOS IMEDIATOS E ALCANCE DOS FEITOS DE CÉSAR LATTES

1949: • Criação do **CBPF**, que, de imediato, propiciou o ambiente para:

1951: • Criação do **CNPq**

1952: • Criação do **IMPA**

1956: • Criação da **CNEN**

1960: • Criação do **CLAF**

1962: • Criação da **CBJ**



No CBPF cresceram as sementes que derem origem a:

1951: • **Laboratório de Física Cósmica** em Chacaltaya (5200 m), La Paz (Bolívia)

1980: • **LNCC** – Laboratório Nacional de Computação Científica (Petrópolis-RJ)

1986: • **LNLS** – Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (Campinas – SP); hoje integrado ao CNPEM



O enorme impacto produzido pelos extraordinários feitos científicos de César Lattes, seguido de grande admiração, entusiasmo e prestígio, criaram uma onda de otimismo científico que se espalhou pelo Brasil naquela época.

Isso fez com que, não apenas cientistas, mas também jornalistas, políticos, empresários, militares, banqueiros, economistas e personalidades de outras esferas da sociedade comessem a se mobilizar em direção ao antigo desejo de César Lattes. Já em 22 de junho de 1946, de Bristol, em carta endereçada a Leite Lopes, no Rio, Lattes se expressara: “...e ao voltar, colaborando com você e os demais moços capazes e de boa vontade que consigamos arranjar, tentar alguma coisa de sério, isto é, um núcleo em que se faça realmente física” [59].

Lattes havia se tornado rapidamente uma figura muito popular e admirada. A comunidade viu naquele jovem de 24 anos a superação das dificuldades para a criação de um instituto que recebesse pesquisadores de física onde pudessem desenvolver seus trabalhos e cuidar da formação de jovens novos físicos.

Inicialmente, o Ministro João Alberto Lins de Barros (1897–1955) dera todo o apoio à iniciativa de se criar uma tal instituição, divulgando a ideia nas altas esferas da administração pública. Com isso, o futuro CBPF iniciou suas atividades, de forma ainda provisória, em 2 de maio de 1948, no 3º andar do N° 40 na Av. Presidente Vargas, Centro do Rio

[60].

Passando pelo Rio em dezembro de 1948, Lattes e Leite Lopes foram recebidos pelo Ministro João Alberto, a quem relataram as dificuldades para construir as dependências próprias daquela instituição voltada às pesquisas em física, há muito almejada. Com o apoio de um grande número de personalidades, decidiu-se pela fundação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, para a qual ficou estabelecida oficialmente a data 15 de janeiro de 1949.

Logo logo, o recém criado CBPF propiciou o ambiente para o amadurecimento da ideia da criação de um órgão com o propósito de fomentar a pesquisa científica em todas as áreas do conhecimento e a formação de pessoal, desejo antigo da comunidade científica brasileira. O CBPF contribuiu significativamente para que viesse, finalmente, a ser criado o CNPq em 15 de janeiro de 1951.

O CBPF foi o inspirador para a criação de outras instituições e organismos que se seguiram ao CNPq, como listadas na ilustração. Em particular, voltadas para o desenvolvimento da física na América Latina, surgiram o Centro Latino Americano de Física-CLAF, em 1960, com sede no CBPF, e a Colaboração Brasil-Japão-CBJ de Raios Cósmicos, em 1962, reunindo pesquisadores de países vizinhos e do longínquo Japão.

O CBPF também foi o canteiro onde se desenvolveram e cresceram as sementes que deram origem a três grandes

instituições. Primeiro, em 1951, o Laboratório de Física Cósmica em Chacaltaya, a 5200 m, nos Andes bolivianos, vizinho a La Paz, de onde nasceu depois o Instituto de Investigaciones Físicas, ambos ligados à Universidade Mayor de San Andrés [61], onde César Lattes deixou sua influência marcante no desenvolvimento da ciência na Bolívia.

Segundo, o Laboratório Nacional de Computação Científica-LNCC, criado em 1980, com sede em Petrópolis-RJ, voltado ao desenvolvimento e aplicações de modelos e métodos matemáticos e computacionais e processamento de alto desempenho.

Por último, não seria justo deixar de mencionar que, em 1986, foram lançadas e discutidas no CBPF as bases para a criação do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron-LNLS, com sede em Campinas-SP, hoje integrado ao Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais-CNPEN (Campinas-SP).

Pouquíssimos brasileiros deixaram marcas tão profundas na sociedade quanto César Lattes. Houve motivos de sobra para que Lattes tivesse sido escolhido para dar nome à base de dados dos currículos dos pesquisadores das diferentes áreas do conhecimento científico no Brasil.

26 Dez, 1948: *The New York Times*

“A notável conquista científica de 1948 foi a produção de mésons com o ciclotron da Universidade da Califórnia (Berkeley) pelos Drs. Eugene Gardner e César Lattes”

Em carta de 12/Ago/1946, Lattes, de Bristol, escreve a Leite Lopes, no Rio:

“Estou perfeitamente disposto a ir trabalhar aí em condições muito menos favoráveis do que aqui... porque acho que é muito mais interessante e difícil formar uma boa escola num ambiente precário do que ganhar o prêmio Nobel trabalhando no melhor laboratório de Física do mundo”

**CÉSAR LATTES, NOSSO HERÓI NUCLEAR,
VERDADEIRAMENTE UM GRANDE BRASILEIRO**



César M. G. Lattes
(1924-2005)

Epílogo

Para o mundo, a importância do que realizou César Lattes pode ser medida na retrospectiva anual de 1948 pelo conceituadíssimo *The New York Times*, onde se lê, na edição do domingo 26 de dezembro, o destaque “A notável conquista científica de 1948 foi a produção de mésons com o grande ciclotron da Universidade da Califórnia pelos Drs. Eugene Gardner e Cesare M. G. Lattes” [62](na tradução pelo autor).

As realizações científicas de César Lattes no período jan/1946–dez/1948 podem ser resumidas com seu pioneirismo nas três grandes conquistas: *i*) a descoberta do méson de Yukawa (de 1935), o méson π (ou píon) e sua desintegração no méson de Anderson, Neddermeyer, Street, Stevenson, e Nishina *et al.* (de 1937), o méson μ (ou múon) no processo $\pi^+ \rightarrow \mu^+$, como haviam previsto Sakata e Inoue (em 1942); *ii*) o uso das emulsões nucleares na detecção dos mésons π^- e π^+ produzidos no ciclotron de 184 polegadas de Berkeley; e, por isso mesmo, *iii*) a inauguração da era da Física das Partículas Elementares com o Uso de Aceleradores.

Os leitores certamente não de concordar que as contribuições de César Lattes à física bastariam para que ele fosse agraciado com o Prêmio Nobel. Como se sabe, as investigações sobre os mésons conduziram à decisão por dois Prêmios Nobel. O primeiro, concedido a Hideki Yukawa em 1949, pela hipótese da força nuclear e a previsão da existência de mésons, e o segundo a Cecil Powell, no ano seguinte, pelo desenvolvimento do método fotográfico e seu uso nas descobertas sobre os mésons (ver Apêndice B).

Durante décadas, físicos e intelectuais brasileiros têm se perguntado por que tamanha honraria não teria sido concedida a César Lattes, fartamente merecida, em virtude da importância de suas contribuições à física. Lattes, porém, possuía um espírito diferente, como se depreende do que escreveu em 12 de agosto de 1946, de Bristol, a Leite Lopes, no Rio (ler na ilustração).

Lattes, acima de tudo, foi verdadeiramente um grande brasileiro, nosso herói nuclear, orgulho de todos nós e da ciência universal.

BIBLIOGRAFIA GERAL

- *Radioactive Measurements with Nuclear Emulsions*, H. Yagoda, John Wiley (New York, 1949).
 - *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method*, C. F. Powell, P. H. Fowler and D. H. Perkins, Pergamon (London, 1959).
 - *The Particle Explosion*, F. Close, M. Marten and C. Sutton, Oxford University Press (New York, 1987).
 - *Cesar Lattes 70 Anos. A Nova Física Brasileira*, Alfredo Marques (Editor), Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (1994).
 - Modéstia, Ciência e Sabedoria, M. Nussenzveig, F. de Souza-Barros, e C. L. Vieira (entrevista com Cesar Lattes), *Ciência Hoje* **19**, 11 (1995).
 - *Os Cinquenta Anos do Méson π 1947-1958, 1997-1998* (exposição itinerante), Amélia I. Hamburger e Antônio Augusto P. Videira, Instituto de Física, USP, ESTAÇÃO CIÊNCIA (1997).
 - *Físicos, Mésons e Política. A Dinâmica da Ciência na Sociedade*, Ana Maria R. de Andrade. Editora HUCITEC (São Paulo, 1998).
 - *Cesar Lattes, a Descoberta do Méson π e Outras Histórias*, F. Caruso, A. Marques e A. Troper (Editores), Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (1999).
 - *A Descoberta do Méson π* , Alfredo Marques, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (1999).
 - ... *Um Mundo Inteiramente Novo Se Revelou. Uma História da Técnica das Emulsões Nucleares*, Cássio L. Vieira, Editora Livraria da Física (São Paulo, 2012).
 - Carried by History: Cesar Lattes, Nuclear Emulsions, and the Discovery of the Pi-meson, Cássio L. Vieira e Antônio Augusto P. Videira. *Physics in Perspective* **16**, 3 (2014).
-
- [1] E. Fermi, E. Amaldi, O. d'Agostino, F. Rasetti, and E. Segrè: Artificial Radioactivity Produced by Neutron Bombardment, *Proc. Roy. Soc. (London), Series A*, **146**, 483 (1934).
 - [2] E. Fermi: Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92, *Nature* **133**, 898 (1934).
 - [3] V. F. Hess: Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballofahrten [Observações de radiação penetrante em sete passeios de balão gratuitos], *Physikalische Zeitschrift* **13**, 1084 (1912).
 - [4] E. Rutherford: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, *Phil. Mag.* **21**, 669 (1911).
 - [5] E. Rutherford: Collision of α -Particles with Light Atom, Part IV. Anomalous Effect in Nitrogen, *Phil. Mag.* **37**, 581 (1919).
 - [6] J. Chadwick: The Existence of a Neutron, *Proc. Roy. Soc. (London), Series A*, **136**, 696 (1932).
 - [7] H. Yukawa: On the Interaction of Elementary Particles, *Proc. Phys. Math. Soc. Jap.* **17**, 48 (1935).
 - [7a] Douglas C. Giancoli, *Physics: principles with applications*, 5th edition, Prentice Hall (Upper Saddle River, N. Jersey, 1998), Chap. 32, p. 980.
 - [8] C. D. Anderson and S. H. Neddermeyer: Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elevation and Near Sea-Level, *Phys. Rev.* **50**, 263 (1936); *Phys. Rev.* **51**, 884 (1937).
 - [9] J. C. Street and E. C. Stevenson : New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron, *Phys. Rev.* **52**, 1003 (1937).
 - [10] Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya: On the Nature of Cosmic-Ray Particles, *Phys. Rev.* **52**, 1198 (1937).
 - [11] Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya: On the Mass of the Mesotron, *Phys. Rev.* **55**, 585 (1939).
 - [12] H. Yukawa and S. Sakata: Mass and Mean Life Time of the Mesotron, *Nature* **143**, 761 (1939).
 - [13] C. M. G. Lattes, E. G. Samuel and P. Cuer: Radioactivity of Samarium: use of the photographic plate to determine low concentrations of active materials, *An. Acad. Brasil. Cienc.* **19**, 1 (1947).
 - [14] C. M. G. Lattes, P. H. Fowler and P. Cuer: Range-Energy Relation for Protons and α -Particles in the New Ilford 'Nuclear Research' Emulsions, *Nature* **159**, 301 (1947).
 - [15] C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: A Determination of the Ratio of the Masses of π - and μ -Mesons by the Method of Grain-counting, *Proc. Phys. Soc. (London)* **61**, 173 (1948).
 - [16] Y. Goldschmidt-Clermont, D. T. King, H. Muirhead and D. M. Ritson: Determination of the Masses of Charged Particles Observed in the Photographic Plate, *Proc. Phys. Soc. (London)* **61**, 183 (1948).
 - [17] C. M. G. Lattes, P. H. Fowler and P. Cuer: A Study of the Nuclear Transmutations of Light Elements by the Photographic

- Method, *Proc. Phys. Soc. (London)* **59**, 883 (1947).
- [18] C. M. G. Lattes and G. P. S. Occhialini: Determination of the Energy and Momentum of Fast Neutrons in Cosmic Rays, *Nature* **159**, 331 (1947).
- [18a] P. Cüer and C.M.G. Lattes: Radioactivity of Samarium, *Nature* **158**, 197 (1946).
- [19] M. B. Ceolin: The Discreet Charm of the Nuclear Emulsion Era, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **52**, 21 (2002).
- [20] J. J. Thomson: Cathode Rays, *Phil. Mag.* **44**, 293 (1897).
- [21] S. Sakata and T. Inoue: On the Correlations between Mesons and Yukawa Particles, *Prog. Theor. Phys.* **1**(4), 143 (1946).
- [22] Cecil Powell: *Fragments of Autobiography* (University of Bristol, 1987), pag.19; Cássio L. Vieira: ... *Um Mundo Inteiraemente Novo Se Revelou. Uma História da Técnica das Emulsões Nucleares*, Editora Livraria da Física (São Paulo, 2012).
- [23] G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: Multiple Disintegration Processes Produced by Cosmic Rays, *Nature* **159**, 93 (1947).
- [24] D. H. Perkins: Nuclear Disintegration by Meson Capture, *Nature* **159**, 126 (1947).
- [25] M. Conversi e O. Piccioni: Misura diretta della vita media dei mesoni frenati, *Nuovo Cimento* **2**, 40 (1944).
- [26] M. Conversi and O. Piccioni: On the Mean Life of Slow Mesons, *Phys. Rev.* **70**, 859 (1946).
- [27] M. Conversi and O. Piccioni: On the Disintegration of Slow Mesons, *Phys. Rev.* **70**, 874 (1946).
- [28] M. Conversi, E. Pancini and O. Piccioni: On the Decay Process of Positive and Negative Mesons, *Phys. Rev.* **68**, 874 (1945).
- [29] M. Conversi, E. Pancini and O. Piccioni: On the Disintegration of Negative Mesons, *Phys. Rev.* **71**, 209 (1947).
- [30] G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: Nuclear Disintegrations Produced by Slow Charged Particles of Small Mass, *Nature* **159**, 186 (1947).
- [31] C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: Processes Involving Charged Mesons, *Nature* **159**, 694 (1947).
- [32] R. E. Marshak and H. A. Bethe: On the Two-Meson Hypothesis, *Phys. Rev.* **72**, 506 (1947).
- [33] D. Perkins: The Discovery of the Pion in Bristol in 1947, *CBPF-Ciência e Sociedade*-**032/97** (1997).
- [34] C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions, *Nature* **160**, 453 (1947).
- [35] C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions. Part 2: Origin of the Slow Mesons, *Nature* **160**, 486 (1947).
- [36] E. O. Lawrence and M. S. Livingston: The Production of High Speed Light Ions without the Use of High Voltages, *Phys. Rev.* **40**, 19 (1932).
- [37] E. O. Lawrence, L. W. Alvarez, W. M. Brobeck, D. Cooksey, D. R. Carson, E. M. McMillan, W. W. Salisburg, and R. L. Thornton: Initial Performance of the 60-Inch Cyclotron of the William H. Croker Radiation Laboratory, University of California, *Phys. Rev.* **56**, 124 (1939).
- [38] O. Frisch and R. Peierls, Frisch-Peierls Memorandum: On the Construction of a “Super-Bomb” based on a Nuclear Chain Reaction in Uranium (March, 1940), atomicarchive.com.
- [39] J. W. Kennedy, G. T. Seaborg, E. Segrè, and A. C. Wahl: Properties of 94(239), *Phys. Rev.* **70**, 555 (1946) (recebido para publicação em maio de 1941).
- [40] H. D. Smith: Atomic Energy for Military Purposes, *Rev. Mod. Phys.* **17**, 351 (1945), Cap. VI. Ver também: Odilon A. P. Tavares: Controlada a Energia Liberada na Fissão Nuclear, *CBPF-Ciência e Sociedade*-**014/12** (dezembro de 2012).
- [41] V. I. Veksler: A New Method of Accelerating Relativistic Particles, *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **43**, 346 (1944); tradução em *J. Phys. (USSR)* **9**, 153 (1945).
- [42] E. M. McMillan: The Synchrotron—A Proposed High Energy Particle Accelerator, *Phys. Rev.* **68**, 143 (1945).
- [43] W. M. Brobeck, E. O. Lawrence, K. R. MacKenzie, E. M. McMillan, R. Serber, D. C. Sewell, K.M. Simpson, and R. L. Thornton: Initial Performance of the 184-Inch Cyclotron of the University of California, *Phys. Rev.* **71**, 449 (1947).
- [44] W. H. Barkas, Threshold Energy for Meson Production, *Phys. Rev.* **75**, 1109 (1949).
- [45] A. H. Bethe, An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus, *Phys. Rev.* **50**, 332 (1936).
- [46] J. J. O’Connor and E. F. Robertson: Erwin Schrödinger and Quantum Wave Mechanics, *Quanta* **6**, 48 (2017) (aqui o leitor encontrará as referências originais do trabalho de Schrödinger); ver também: R. M. Eisberg, *Fundamentals of Modern Physics* (1st Edition, 2nd Printing), John Wiley, N. York (1965); Cap. 12, Seção 6.
- [47] W. Pauli: Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren [Sobre o contexto da conclusão dos grupos de elétrons no

- átomo com a estrutura complexa dos espectros], *Z. Physik* **31**, 765 (1925).
- [48] R. Resnick (com tradução de S. Watanabe): *Introdução à Relatividade Especial*, Editora Polígono S. A. (São Paulo, 1971), Cap. 2.
- [49] J. Beringer *et al.*: Review of Particle Physics, *Phys. Rev. D* **86**, 010001 (2012), Sub-seção 43.2: Center-of-mass energy and momentum.
- [50] Eugene Gardner and C. M. G. Lattes: Production of Mesons by the 184-Inch Berkeley Cyclotron, *Science* **107**, 270 (1948).
- [51] Cássio L. Vieira, *op. cit.* (Ref. [22]), pag. 193.
- [52] G. P. S. Occhialini and C. F. Powell: The Artificial Production of Mesons, *Nature* **161**, 551 (1948).
- [53] Adel da Silveira: A Física Moderna no Rio de Janeiro: Reminiscências, *CBPF-Ciência e Sociedade* N° 1 (1984).
- [54] Nucleonic Events: First Laboratory-Created Mesons Produced with 4000-Ton Cyclotron at University of California, *Nucleonics*, April (1948) 71.
- [55] J. Burfening, E. Gardner, and C. M. G. Lattes: Positive mesons produced by the 184-inch Berkeley Cyclotron, *Phys. Rev.* **75**, 382 (1949).
- [56] E. Gardner, W. H. Barkas, F. M. Smith, and H. Bradner: Mesons Produced by the Cyclotron, *Science* **111**, 191 (1950).
- [57] R. Resnick, *op. cit.* (Ref. [48]), Cap. 3.
- [58] Joseph M. Keller: Mesons Old and New, *Am. J. Phys.* **17**, 356 (1949).
- [59] J. Leite Lopes: Cesar Lattes, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e a Nova Física no Brasil, em *Cesar Lattes 70 Anos. A Nova Física Brasileira*, Alfredo Marques (Editor), CBPF, Rio de Janeiro (1994).
- [60] Alfredo Marques: CBPF: da Descoberta do Méson π aos Dez Primeiros Anos, *CBPF-Ciência e Sociedade*-**031/97**, Rio de Janeiro (1997).
- [61] Carlos Aguirre Bastos: Formación del Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya, em Cesar Lattes, a Descoberta do Méson π e outras Histórias, F. Caruso, A. Marques e A. Troper (Editores), Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro (1999).
- [62] Cássio L. Vieira, *op. cit.* (Ref. [22]), pág. 208.

Agradecimento

Imenso prazer tenho, assim como o dever, de agradecer imensamente a José Guilherme T. Monteiro, por não ter medido esforços empenhando-se com sua competência

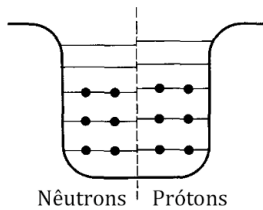
e esmero na preparação das ilustrações de qualidade ímpar que tanto enriqueceram essa publicação. O autor sente-se também extremamente grato ao Dr. Antônio F. F. Teixeira pela leitura crítica e cuidadosa do texto original, essenciais para a apresentação primorosa da versão final. Por fim, a insuperável qualidade da composição gráfica pela Francisca Valéria é grandemente reconhecida pelo autor.

Sobre o autor: Odilon A. P. Tavares (75) é Doutor em Física pelo CBPF (1978) onde é Pesquisador Titular desde 1985. Liderou e/ou participou de vários projetos de pesquisa científica em colaboração com instituições brasileiras e estrangeiras. É autor em cerca de 130 publicações, 100 delas em revistas de circulação internacional, sobre temas relacionados à radioatividade natural e artificial (desintegração por emissão de 1-próton, 2-prótons, partículas alfa, clusters nucleares mais pesados e fissão) e reações nucleares de fissão, “spallation” e íons pesados. Um dos descobridores, em 1975, da radioatividade exótica, na qual o núcleo atômico emite fragmentos nucleares mais pesados do que a partícula alfa, atualmente é pesquisador colaborador vinculado à Coordenação de Cosmologia, Astrofísica e Interações Fundamentais—COSMO do CBPF/MCTIC.

Apêndice A: Como píons são produzidos em colisões núcleo-núcleo

Por ocasião da visita de Lattes a Bohr em Copenhague (dezembro de 1947), Lattes mostrou seu grande interesse em ir a Berkeley (CA, EUA) para detectar e “ver” nas emulsões Ilford os píons que estariam sendo produzidos no ciclotron de 184 polegadas. Ele acreditava que o movimento dos núcleons tanto no carbono (núcleo alvo) quanto na partícula alfa (núcleo projétil) pudesse levar a eventos favoráveis à produção de píons nas colisões primárias núcleo-núcleo. Isso porque, se os núcleons estivessem “congelados” na partícula alfa, os 95 MeV de energia cinética de cada núcleon incidente ($380 \text{ MeV} \div 4$) não seriam suficientes para produzir píons nas colisões com os núcleons-alvo igualmente “congelados” nos núcleos alvo de carbono em repouso (seriam necessários 290 MeV!). No que se segue, o autor, servindo-se de dados nucleares atualizados, oferece uma explicação de como píons podem ser produzidos levando-se em conta o movimento de prótons e nêutrons nos núcleos que colidem.

A energia de movimento dos núcleons pode ser avaliada a partir do modelo nuclear do Gás de Fermi, descrito pela primeira vez pelo físico teórico alemão-norte-americano Hans A. Bethe (1906–2005) [1], e também usado pelo físico teórico austríaco-norte-americano Victor F. Weisskopf (1908–2002) para explicar a condução de elétrons nos metais [2]. Em resumo, para os núcleos atômicos, o modelo do Gás de Fermi considera *i*) prótons e nêutrons movimentam-se livremente no núcleo, *i. e.*, não experimentam colisões uns contra os outros; *ii*) os núcleons na superfície do núcleo sofrem atração de seus vizinhos, forçando aqueles a permanecerem confinados no volume esférico de raio R (R_p para o gás de prótons e R_n para o gás de nêutrons); *iii*) tanto para o gás de prótons quanto para o de nêutrons, aplica-se a equação de Schrodinger da Mecânica Quântica para uma partícula livre, obtendo-se a distribuição em energia do número de estados quânticos das partículas confinadas no volume esférico de raio R ; *iv*) pelo Princípio de Exclusão de Pauli [3], no máximo dois núcleons (dois prótons ou dois nêutrons) podem ocupar o mesmo estado quântico de energia (recordar que prótons e nêutrons são *férmions*, *i. e.*, partículas de número de spin $+1/2$ e $-1/2$);

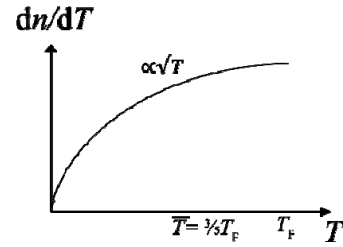


v) para um sistema de N partículas férmions, a energia cinética total mais baixa do sistema é obtida quando houver duas partículas em cada estado de energia, preenchendo os níveis de energia desde $T = 0$ até o nível de energia máxima, T_F , conhecida como energia de Fermi (T representa energia cinética), como ilustrado no diagrama.

A partir das considerações acima, pode-se mostrar que a distribuição dos estados de energia cinética dos núcleons

num Gás de Fermi no estado fundamental é obtida como [4]

$$dn/dT = C \times T^{1/2}, \quad C = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{m^{3/2}V}{\pi^2 \hbar^3} \quad (1)$$



onde m é a massa do núcleon, $V = (4/3)\pi R^3$ é o volume esférico de contenção dos núcleons, $\hbar = h/2\pi$ é a constante de Planck, e T_F (na figura ao lado) é a energia de Fermi, o nível de energia mais alto para alocar núcleons. T_F pode ser avaliado somando os níveis de energia de 0 a T_F , e igualando o resultado a $N/2$ (pois há duas partículas por nível de energia). A soma é obtida aproximadamente pelo integral de (1), porque o número de partículas é bem pequeno (dois prótons e dois nêutrons na partícula alfa, e seis prótons e seis nêutrons no núcleo de carbono). A rigor, o integral em (1) deve ser substituído por somatório, uma vez que os níveis de energia se distribuem de forma discreta. O resultado aproximado é então

$$\begin{aligned} \frac{N}{2} &= \int_0^{T_F} \left(\frac{dn}{dT} \right) dT = C \int_0^{T_F} \sqrt{T} dT \\ &= \frac{2}{3} C T_F^{3/2} \therefore T_F = \left(\frac{3}{2} \right)^{4/3} \pi^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m} \frac{N^{2/3}}{R^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Por outro lado, a energia cinética média dos núcleons é obtida aproximadamente de (1) como

$$\bar{T} = \int_0^{T_F} T \left(\frac{dn}{dT} \right) dT / \int_0^{T_F} \left(\frac{dn}{dT} \right) dT \therefore \bar{T} = \frac{3}{5} T_F \quad (3)$$

Introduzindo os valores das constantes físicas em (2), e expressando o raio em fm ($1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$) e energias em MeV, obtém-se

$$T_{max} = T_F = 76,37 \times N^{2/3} / R^2 \text{ MeV} \quad (4)$$

Para núcleos pequenos, como ^4He e ^{12}C , o número de prótons (Z) é igual ao número de nêutrons e , nesse caso

$$\begin{aligned} T_{max}^n &= T_{max}^p = 76,37 \times Z^{2/3} / R^2 \text{ MeV} \text{ e} \\ \bar{T} &= 45,82 \times Z^{2/3} / R^2 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (5)$$

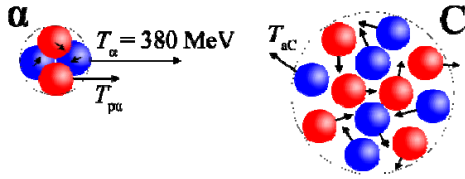
Adotando para ^4He e ^{12}C o raio médio quadrático equivalente, $R = (5/3)^{1/2} \langle r^2 \rangle^{1/2}$, tem-se, com $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 2,45 \text{ fm}$ para ^{12}C [5] e $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 1,70 \text{ fm}$ para ^4He [6], a energia cinética máxima e média dos núcleons na partícula alfa e no

núcleo de carbono avaliadas como

$$T_{\max}(^4\text{He}) \approx T_{\max}(^{12}\text{C}) \approx 25 \text{ MeV e } \bar{T}(^4\text{He}) \approx \bar{T}(^{12}\text{C}) \approx 15 \text{ MeV} . \quad (6)$$

Esse é um resultado da Mecânica Quântica, estabelecida na segunda metade dos anos 1920.

Agora vejamos as implicações desse resultado sobre a energética de produção de píons nas colisões núcleo-núcleo. Como se sabe, o mecanismo de produção de píons é o das colisões núcleon-núcleon considerados em movimento. Na situação mostrada na figura, a energia cinética média (máxima) disponível para o núcleon projétil, T_p , resulta da combinação da energia cinética da partícula alfa,



$T_\alpha = 380 \text{ MeV}$ (no sistema de laboratório) com a energia cinética média (máxima) do movimento do núcleon na partícula alfa, $T_{p\alpha}$, como dado por (6). Como as energias cinéticas aqui são relativísticas, T_p deve ser obtido a partir da composição das respectivas velocidades relativísticas, $\beta = v/c$ (c é a velocidade da luz no vácuo $\approx 30 \text{ Gcm/s}$), *i. e.*,

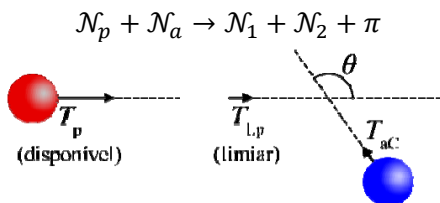
$$\beta_p = \frac{\beta_\alpha + \beta_{p\alpha}}{1 + \beta_\alpha \cdot \beta_{p\alpha}} \quad (7)$$

o que dá como resultado

$$\bar{T}_p = 190 \text{ MeV e } T_p^{\max} = 224 \text{ MeV} \quad (8)$$

(cf. com os 95 MeV do núcleon projétil e os 290 MeV mínimos necessários para produção de píons no caso de não se considerar movimento dos núcleons (pág. 23)).

Por outro lado, os núcleons-alvo no carbono (que está em repouso no laboratório) também se movimentam com energia cinética média (máxima), T_{aC} , como dado por (6). É bastante, pois, achar a energia cinética mínima do núcleon-projétil (o limiar de energia, T_{Lp}) e confrontá-la com a energia disponível, T_p , para que haja produção de píons, isto é, a situação em que $T_p > T_{Lp}$,



o que dependerá do ângulo θ formado entre as direções das partículas que estão colidindo (ver figura). Sendo o valor médio da massa de repouso dos núcleons $m = 1/2(m_{\text{próton}} + m_{\text{nêutron}}) = 1,00800 \text{ u}$, a massa de repouso dos píons (carregados eletricamente) $m_\pi = 0,1498 \text{ u}$ [1 u (unidade de massa atômica) $= 1,66 \times 10^{-24} \text{ g}$], e o fator de conversão massa-energia $F = 931,494 \text{ MeV/u}$, a energia cinética limiar do núcleon projétil, T_{Lp} , para produção de píons numa colisão núcleon-núcleon é obtida da condição de ser a energia total no centro-de-massa igual à soma das energias de repouso dos produtos da reação, *i. e.*,

$$E_{\text{total}}(\text{CM}) = \sum m_i c^2, \quad i = N_1, N_2, \pi \text{ (como na figura)}. \quad (9)$$

A condição acima é escrita como

$$2m^2 c^4 + 2E_{Lp} E_{aC} (1 - \beta_{Lp} \beta_{aC} \cos \theta) = (2m + m_\pi)^2 c^4, \quad (10)$$

onde $E_{Lp} = mc^2 + T_{Lp}$, $E_{aC} = mc^2 + T_{aC}$, $\beta_i = v_i/c$ ($i = Lp, aC$) são as velocidades, e θ o ângulo entre as direções dos núcleons que colidem. Como T_{aC} é conhecido, deve-se achar T_{Lp} de (10) como função de θ . O resultado é

$$T_{Lp} = \frac{k + Fma^2}{1 - a^2} \left[1 \mp \sqrt{1 - \frac{1 - a^2}{\left(1 + \frac{Fma^2}{k}\right)^2}} \right], \quad (11)$$

$$a^2 = \left[1 - \left(1 + \frac{T_{aC}}{Fm} \right)^{-2} \right] \cos^2 \theta, \quad (12)$$

$$k = \frac{Fm\pi \left(\frac{m_\pi}{2m} + 2 \right) - T_{aC}}{1 + \frac{T_{aC}}{Fm}}. \quad (13)$$

Observar que se o núcleon alvo estivesse em repouso ($T_{aC} = 0$), ter-se-ia $a = 0$ e $T_{Lp} = k = Fm\pi[1/2(m_\pi/m) + 2] \approx 290 \text{ MeV}$ que é justamente o valor da energia cinética limiar para produção de píons com núcleon-alvo em repouso.

O resultado expresso pelas equações (11) – (13) pode ser colocado num gráfico T_{Lp} contra θ , facilitando assim a comparação entre a energia cinética disponível do núcleon projétil, T_p , e a energia limiar para produção de píons, T_{Lp} .

No gráfico da figura 1, duas situações são mostradas: *i*) em vermelho, o caso em que a energia cinética do núcleon-projétil na partícula alfa e do núcleon-alvo no núcleo de carbono é 15 MeV; *ii*) e em azul, a condição mais favorável para produção de píons, qual seja, quando a energia de movimento dos núcleons no núcleo projétil e no alvo é a energia de Fermi, como dada em (6) ($T_{p\alpha} = T_{aC} = 25 \text{ MeV}$). Em ambas as situações o máximo da diferença $T_p - T_{Lp}$ ($\sim 23 \text{ MeV}$ no caso *i*, e $\sim 86 \text{ MeV}$ no caso *ii*) é obtido para $\theta = 180^\circ$, ou seja, nas colisões frontais. E a maior chance de produção de píons (maior intervalo de θ no qual $T_p > T_{Lp}$) é verificada quando a energia cinética máxima (energia de Fermi) de movimento dos núcleons for 25 MeV, correspondendo a

uma janela $\Delta\theta = 156^\circ$ centrada em 180° .

Concluindo, a combinação de princípios das duas teorias da Física Moderna (Relatividade Especial de 1905 e Mecânica Quântica de 1926) dá conta de explicar a produção de mésons- π eletricamente carregados em colisões núcleo-núcleo *via* o mecanismo de colisão núcleon-núcleon. Esses mésons foram brilhantemente detectados por César Lattes, então com 23 anos, em fevereiro de 1948, após duas semanas apenas da sua chegada ao Radiation Laboratory da Universidade da Califórnia (Berkeley). Sua intuição estava absolutamente correta.

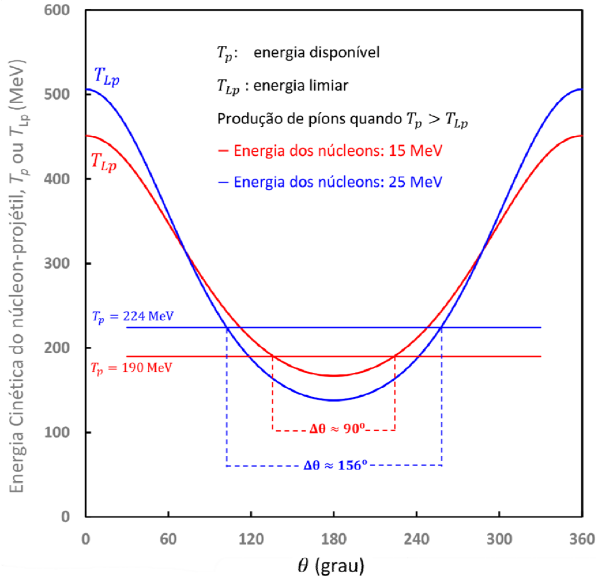


Figura 1. Energética de produção de píons por incidência de partículas alfa de 380 MeV em alvo fixo de carbono.

Referências para o Apêndice A

- [1] A. H. Bethe, An Attempt to Calculate the Number of Energy Levels of a Heavy Nucleus, *Phys. Rev.* **50**, 332 (1936).
- [2] V. F. Weisskopf, On the Theory of the Electron Resistance of Metals, *Am. J. Phys.* **11** (1), 1 (1943).
- [3] Princípio da Mecânica Quântica, formulado, em 1925, pelo físico teórico austríaco-norte-americano Wolfgang E. Pauli (1900–1958): “Dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente.”
- [4] R. M. Eisberg, *Fundamentals of Modern Physics* (1st Edition, 2nd Printing), John Wiley, N. York (1965); Cap. 12, Seção 6; and Cap. 16, Seção 7.
- [5] W. Reuter *et al.*, Nuclear charge distribution and rms radius of ^{12}C from absolute elastic electron scattering measurements, *Phys. Rev. C* **26**, 806 (1982).
- [6] I. Sick *et al.*, Charge density of ^4He , *Phys. Lett.* **64B**, 33 (1976).

Apêndice B: Ganhadores do Prêmio Nobel mencionados neste artigo

(em azul Física, em verde Química)

Nome	Ano	País	Contribuição
Joseph J. Thomson	1906	Reino Unido	Condutividade elétrica dos gases
Ernest Rutherford	1908	Nova Zelândia	Química dos radioelementos
Albert Einstein	1921	Alemanha, Suíça	Lei do efeito fotoelétrico
Niels Bohr	1922	Dinamarca	Estrutura e espectros atômicos
Erwin Schrödinger	1933	Áustria	Teoria Quântica dos átomos
Paul Adrian Dirac	1933	Reino Unido	Teoria Quântica dos Átomos
James Chadwick	1935	Reino Unido	Descoberta do nêutron
Carl D. Anderson	1936	EUA	Descoberta do pósitron
Victor F. Hess	1936	Áustria	Descoberta da Radiação Cósmica
George Thomson	1937	Reino Unido	Difração de elétrons em cristais
Enrico Fermi	1938	Itália	Reações induzidas por nêutrons
Ernest Lawrence	1939	EUA	Criação do ciclotron
Wolfgang Pauli	1945	Áustria	Princípio de exclusão
Hideki Yukawa	1949	Japão	Força nuclear e previsão de mésons
Cecil F. Powell	1950	Reino Unido	Emulsões nucleares e os mésons
Glenn Seaborg	1951	EUA	Onze elementos transurânicos
Edwin McMillan	1951	EUA	Dez elementos transurânicos
Emilio Segrè	1959	EUA	Descoberta do antipróton
Hans A. Bethe	1967	EUA	Produção de energia nas estrelas
Luis W. Alvarez	1968	EUA	Técnica de uso da câmara de bolhas

NOTAS TÉCNICAS é uma publicação de trabalhos técnicos-científicos.
Pedidos de cópias desta publicação devem ser enviados aos autores ou ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brasil
E-mail: socorro@cbpf.br/valeria@cbpf.br
http://www.biblioteca.cbpf.br/index_2.html

NOTAS TÉCNICAS is a journal of technical reports.
Requests for copies of these reports should be addressed to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Área de Publicações
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4^o andar
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ
Brazil
E-mail: socorro@cbpf.br/valeria@cbpf.br
http://www.biblioteca.cbpf.br/index_2.html