

# Aula 11

## A busca pelo Méson de Yukawa: A detecção dos múons e a cadeia de decaimento dos píons

Renan Milnitsky  
Marcelo Gameiro Munhoz  
Julien Minerbo

Yukawa propôs uma solução elegante para resolver o problema dos decaimentos e das interações nucleares ao propor a quantização do campo nuclear introduzindo uma nova partícula, um quantum da interação responsável por mediar a interação como mostrado na Figura 1.

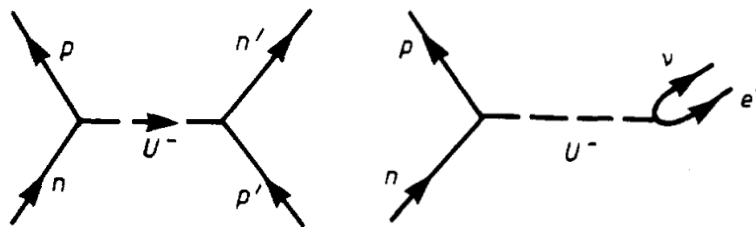


Figura 1 - Interações e decaimentos nucleares mediadas pela ação do méson  $U$ , o quantum do campo nuclear.

Para além de propor o méson  $U^-$ , o físico teórico japonês também conseguiu apresentar quais deveriam ser as características esperadas para sua massa, estimando valores da ordem de  $200 \text{ MeV}/c^2$ . Acontece que, como o próprio Yukawa aponta ao final de seu artigo publicado em 1935, até este momento da história “nenhum quantum com tais propriedades foi encontrado por experimentos.” (Yukawa, 1935, p.12).

Será que o méson previsto por Yukawa realmente existe? Se existir, será que ele realmente consegue ser utilizado para descrever, em termos fundamentais, as interações nucleares?

### 1. Câmara de Nuvem, Perda de Energia e a Descoberta do Múon ( $\mu$ )

O sucesso dos trabalhos de Carl Anderson nos EUA com o pósitron o fez dedicar mais esforços na caracterização das partículas provenientes de raios cósmicos.

Utilizando-se agora de um método diferente de seus primeiros estudos em câmaras de nuvens, que buscou caracterizar propriedades como a carga e momento das partículas partir de uma análise dos raios de curvatura, Anderson agora se dedicava a realizar uma caracterização das partículas baseada nas propriedades de perda de energia provenientes das interações com o gás que compõe as câmaras.

Estudos da época sobre interação da radiação com a matéria revelavam que diferentes partículas depositam diferentes quantidades de energia em seu processo de interação. Era clara, por exemplo, a distinção entre o perfil de interação de prótons e elétrons/pósitrons com a matéria. Como a interação predominante é eletromagnética e ambas as partículas

possuem a mesma carga elétrica, a diferença de massa se torna fator predominante neste processo. Este estudo de perda de energia ( $-dE$ ) é realizado avaliando a quantidade de ionizações provocadas por unidade de comprimento ( $dx$ ), possibilitando medidas da perda de energia por unidade de comprimento ( $-dE/dx$ ). Ele pode ser utilizado tanto para caracterizar partículas desconhecidas que passam por um material conhecido, quanto o processo inverso, o de usar partículas conhecidas para caracterizar materiais desconhecidos. Nesta época, estas caracterizações eram amplamente realizadas por Bethe e Heitler, que conseguiram criar equações semi-empíricas para descrever a perda de energia de partículas em suas interações com a matéria.

O gráfico da Figura 2 ilustra o comportamento comparativo de perdas de energia de prótons e elétrons em função de diferentes energias incidentes.

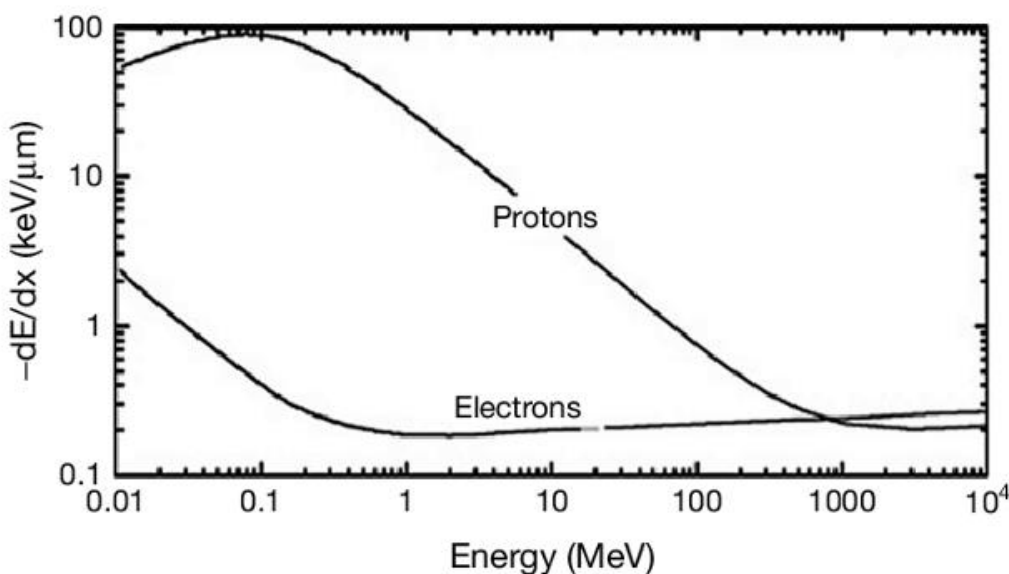


Figura 2 - Comparação da perda de energia por unidade de comprimento ( $-dE/dx$ ) entre prótons e elétrons.

Analisando o gráfico, é possível verificar que em energias elevadas, na ordem de 1000 MeV, devido a alta velocidade das partículas, ambas possuem um perfil muito semelhante de perda de energia, da ordem de algumas unidades de keV/μm. No entanto, à medida que são freadas, a perda de energia para o próton se intensifica muito mais rapidamente do que para o elétron, fato que pode ser explicado por sua massa excessivamente maior.

Isto faz com que os traços deixados por prótons e elétrons sejam facilmente diferenciados em câmaras de nuvens, uma vez que quanto maior for a perda de energia, maior será a ionização provocada pela passagem da partícula pelo material e, por conseguinte, maior será a espessura e a visibilidade do rastro deixado na câmara. A Figura 3 ilustra exatamente como estas propriedades se materializam em uma observação em câmaras de nuvem. Observando a imagem fica evidente a diferença entre o rastro de prótons e elétrons, onde o rastro de maior espessura está associado ao próton em função do maior número de ionizações em comparação com os elétrons, que promove um número muito menor devido a sua baixa massa.

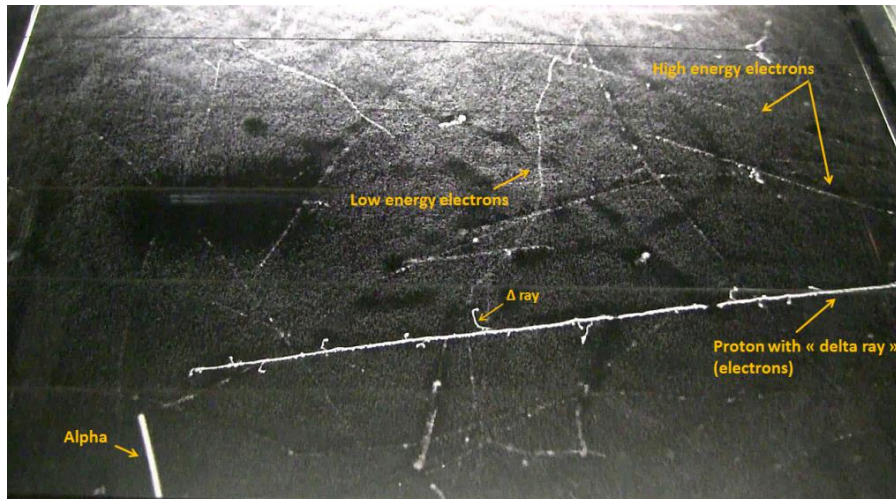


Figura 3 – Diferenças na espessura dos rastros deixados pela interação de diferentes partículas com a matéria.

Complementarmente ao estudo de perda de energia, Anderson também fez uso de estudos da caracterização do *range* das partículas de raios cósmicos em determinados materiais, isto é, sua capacidade de penetrar diferentes camadas antes de serem completamente freadas pelo material. Como em regime de baixas energias a perda de energia para elétrons é menor, ele possui maior capacidade de penetração em comparação com prótons. O gráfico mostrado na Figura 4 apresenta comparativamente a capacidade de penetração em  $\mu\text{m}$  de prótons e elétrons em uma camada de chumbo. O estudo da penetração era bastante útil para filtrar a passagem de determinadas partículas que se desejava estudar e um dos principais campos de estudo de Anderson na época era a caracterização da energia de chuveis de elétrons e pósitrons. Avaliando o gráfico da Figura 4, para feixes de elétrons e prótons de 1 MeV, por exemplo, a utilização de camadas de chumbo superiores a 10  $\mu\text{m}$  podem ser utilizadas para filtrar a passagem de prótons, facilitando o estudo de chuveis cósmicos de elétrons e pósitrons.

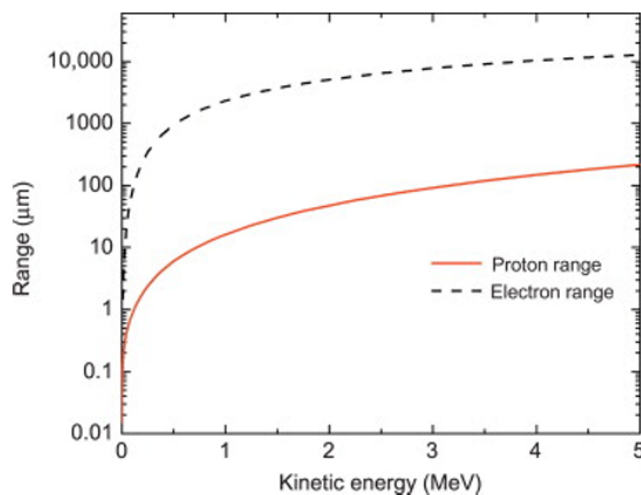


Figura 4 - Penetração de prótons e elétrons em diferentes espessuras de chumbo.

Carl Anderson utilizou estudos de perda de energia para fazer a caracterização dos espectros de energia de partículas provenientes de raios cósmicos como elétrons, prótons e pósitrons e se tornou capaz de identificar estas partículas com bastante precisão. Em um relato de seu trabalho ele rememora os estudos da época:

Após a descoberta do pósitron, Neddermeyer e eu continuamos a estudar os raios cósmicos usando a mesma câmara de nuvem magnética na qual ele foi descoberto. Nestes experimentos, encontramos que a maioria das partículas de raios cósmicos a nível do mar eram altamente penetrantes no sentido de que podiam atravessar altas espessuras de materiais pesados como o chumbo e perder energia somente pela ionização direta produzida, que contávamos ser algo em torno de 20 MeV por cm de chumbo. (ANDERSON, 1985, p.123)

Foi exatamente esta precisão que o fez a levantar a possibilidade da existência de uma nova partícula. Nas investigações conduzidas por ele e Neddermeyer, começaram a ser identificadas radiações de alto poder de penetração. Algumas delas possuíam carga elétrica positiva e outras carga negativa. A princípio, acreditaram se tratar de prótons, elétrons e pósitrons, as únicas partículas de matéria eletricamente carregadas e conhecidas até o momento. No entanto, começaram a aparecer dificuldades em interpretar os resultados segundo o comportamento das partículas conhecidas.

Os cálculos de Bethe e Heitler para a perda de energia de elétrons e pósitrons levaram à conclusão de que em regimes de altas energias eles deveriam perder grandes quantidades de energia pela produção de radiação, enquanto as partículas que identificamos não apresentaram este comportamento. [...] As novas partículas penetrantes somente poderiam encontrar uma explicação atraente em termos de elétrons e pósitrons se os dados experimentais revelassem que, de fato, elas sofressem grandes perdas radiativas em altas energias como exigido pela teoria mencionada acima, o que não parecia ser o caso. (ANDERSON, 1985, p.124, grifo e tradução nossa)

Como a incidência de partículas providas de raios cósmicos é muito diversa, Anderson e Neddermeyer buscaram fazer uma distinção entre as partículas originalmente providas dos raios cósmicos daquelas produzidas em chuviros a partir da interação com nossa atmosfera. O objetivo era identificar como se originava a partícula desconhecida – se era provida diretamente do espaço ou se era uma produção secundária originada de um chuviro cósmico. Para fazer esta caracterização, os cientistas realizaram um estudo sobre a perda de energia das partículas no interior das câmaras de nuvem e os resultados são revelados na Figura 5.

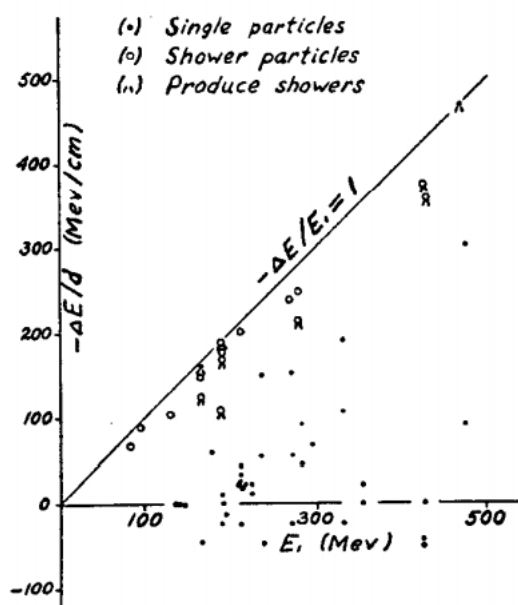


Figura 5 - Gráfico da perda de energia por cm de penetração em camadas de chumbo. A reta com inclinação de 45° com faz uma comparação da perda de energia com a energia inicial dos feixes incidentes. (Fonte: Neddermeyer & Anderson, 1937)

De acordo com a legenda, podemos ver que os pontos vazados são partículas do chuveiro cósmico e os pontos sólidos são as novas partículas analisadas isoladamente. É possível perceber no gráfico que as partículas do chuveiro estão muito próximas da região na qual a perda de energia é total ( $-\Delta E/E = 1$ ), evidenciando que elas depositam praticamente toda sua energia no aparato experimental. Por outro lado, o novo componente aparece numa região afastada e abaixo da região de perda total, depositando sua energia parcialmente na passagem pela câmara e parecendo ser, portanto, mais penetrantes que elétrons e pósitrons. Neddermayer e Anderson interpretaram estas duas regiões como sendo dois conjuntos de partículas diferentes, sendo o primeiro conjunto ( $-\Delta E/E = 1$ ) composto por elétrons e pósitrons provenientes de chuveiros cósmicos em função da semelhança do comportamento teórico previsto Bethe e Heitler. Restava saber se o segundo conjunto ( $-\Delta E/E < 1$ ) poderia ser composto como prótons ou se seriam realmente novas partículas. A possibilidade de serem prótons foi rapidamente excluída pelo espectro da energia dos elétrons produzidos pela ionização destas novas partículas com a matéria:

A objeção mais importante à identificação com prótons residia no fato de que os elétrons secundários produzidos no impacto direto com a câmara possuíam energias altas demais para o que se esperava se partículas como prótons fossem responsáveis pela produção. [...] Por outro lado, o espectro seria muito mais consistente se as partículas que estivessem produzindo estas ionizações fossem muito mais leves do que o próton, apesar de serem mais pesadas que elétrons e pósitrons. (ANDERSON, 1985, p.123)

O espectro de energia das produções secundárias era contraditório com os espectros esperado se a incidência fossem feixes de prótons. Além do mais, como esta radiação se tratava de partículas eletrizadas com ambas as cargas, positiva e negativa, era preciso admitir a existência de prótons negativos, o que não havia se observado até então. Buscando verificar a validade de suas observações, Anderson busca uma colaboração com os cientistas Street & Stevenson, solicitando que os colegas verifiquem em experimentos independentes a razoabilidade ou não da existência deste novo componente de partículas nos raios cósmicos. Os resultados de Street & Stevenson apontam para o fato de que:

as partículas do chuveiro são claramente elétrons ou pósitrons, a teoria que descreve suas perdas de energia é satisfatória. Já as partículas que ocorrem isoladamente não são elétrons. Os experimentos de Anderson & Neddermayer mostraram, a partir de considerações sobre ionizações secundárias, que as partículas dos novos raios penetrantes também não podem ser prótons. (Street & Stevenson, 1937, p.1003)

Estava claro para Anderson e Neddermayer que as partículas em questão não poderiam se tratar nem de prótons, uma vez que seus espectros de emissão de partículas eram coerentes com partículas mais leves do que ele, nem de elétrons ou pósitrons, uma que vez era previsto uma grande perda radiativa que não se percebia nas observações, levando-os a trabalhar em cima da hipótese de que se tratava de uma partícula nova. Em experimentos realizados no topo do monte Pikes, Street & Stevenson perceberam a ejeção de diversos prótons e também da ejeção de tais partículas onde, devido às ionizações e os raios de curvaturas medidos, constatou-se se tratar de uma espécie mais leve do que o próton e mais pesada que o elétron. Tendo uma massa intermediária, ela foi denominada à época por Anderson e Neddermayer como mesotron, mas atualmente a conhecemos como múons ( $\mu$ ). A Figura 6 apresenta duas fotografias comparando o raio de curvatura e a quantidade de ionizações provocadas por um feixe de prótons (Track A) e um feixe de múons (Track B).



Track A.



Track B.

Figura 6 - Trajetórias de duas partículas A e B. À esquerda temos um feixe que produz uma grande quantidade de ionizações e é pouco curvado pela ação do campo magnético. À direita temos um feixe que produz menos ionizações e é mais curvado que o feixe produzido em A. (Fonte: Street & Stevenson, 1937)

O feixe A produz uma grande quantidade de ionizações e tem sua trajetória pouco defletida pela ação do campo magnético. Já o feixe B tem menor quantidade de ionizações e uma curvatura maior. Estando o campo magnético apontando para fora da folha de leitura e considerando a direção de incidência das partículas, pode-se concluir, a partir de suas curvaturas, que ambas estão carregadas positivamente. No entanto, a partícula A possui uma massa consideravelmente maior do que B, uma vez que seu raio de curvatura é menor. Segundo Street & Stevenson,

Temos duas trajetórias interessantes obtidas, uma vez que apresentam densidade de ionização maiores que o usual: uma em A, acreditamos ser devido a passagem de um próton e a outra em B de uma partícula com massa de aproximadamente 200 vezes a massa de repouso de um elétron [100 MeV/c<sup>2</sup>]. (Street & Stevenson, 1937, p. 1006, tradução e grifo nosso)

## 2. Paradoxo nos Decaimentos: dos Múons ( $\mu$ ) aos Píons ( $\pi$ )

Será que a nova partícula detectada por Anderson se tratava da partícula prevista por Yukawa? O físico teórico japonês sabia que sua ideia seria meramente especulativa se não tivesse o suporte experimental. Rememorando suas pesquisas em um relato feito em 1985, o cientista aponta:

Me sentia muito confiante sobre a teoria dos mésons e falei sobre a nova teoria no Laboratório de Kikuchi na Universidade de Osaka. Prof. Kikuchi afirmou “se for uma partícula carregada, então deverá ser pega nas câmaras de nuvem” e respondi “Sim, talvez poderia ser encontrada nos raios cósmicos”. [...] Depois disso, diversas pessoas descobriram novas partículas penetrantes experimentalmente nos raios cósmicos. **A primeira informação que recebi foi a descoberta de Anderson, pelo qual fui informado por uma carta enviada por ele antes mesmo que pudesse ver seu artigo.** (YUKAWA, 1985, p.132, tradução e grifo nosso)

A colaboração entre Anderson & Neddermayer e Street & Stevenson puderam revelar a existência de uma nova partícula produzida nos raios cósmicos: os múons ( $\mu$ ). Esta nova partícula era mais pesada que elétrons e pósitrons e mais leve do que prótons, assim como Yukawa postulava em sua teoria para as interações nucleares. A comparação entre os múons de Anderson e os mésons de Yukawa se tornaram inevitáveis. Sua massa estimada por experimentos era da ordem de  $100 \text{ MeV}/c^2$ , o que era diferente do valor previsto por Yukawa. No entanto, como mostra a Figura 7, o múon curiosamente tem uma cadeia de decaimento que produz elétrons e neutrinos, semelhante ao que se observa no decaimento  $\beta$ , o que criava uma conexão muito forte com fenômenos de natureza nuclear – seria apenas uma coincidência?

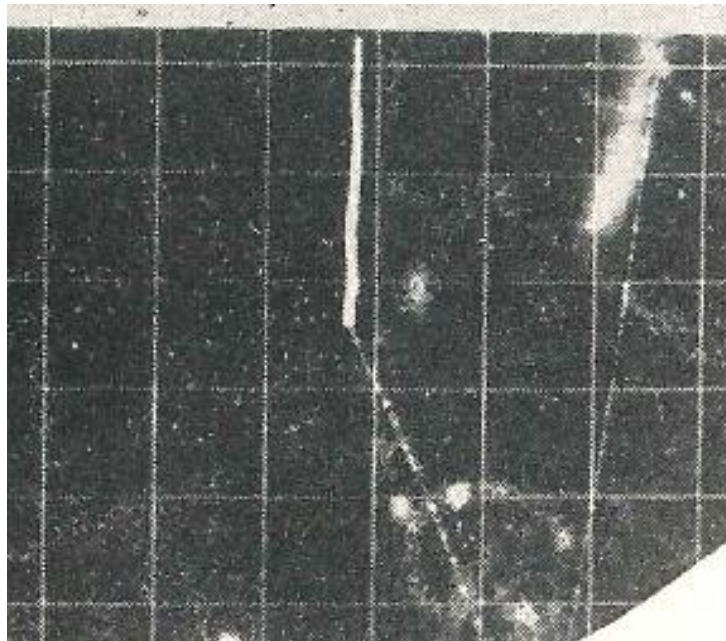


Figura 7 - Decaimento de um múon ( $\mu$ ) registrado em uma fotografia de câmara de nuvens. O traço de maior espessura representa o múon ( $\mu$ ) que decaí espontaneamente em um traço de menor espessura que representa um elétron ou pósitron ( $e$ ), acompanhado de trajetórias não visíveis na câmara de nuvem que podem ser associadas a neutrinos ( $\nu$ ).

Havia um comportamento crucial para que a nova partícula detectada por Anderson se adequasse ao *quantum* de Yukawa – por ser mediador das forças nucleares, ela precisava interagir fortemente com os núcleos atômicos da matéria. Se o múon realmente fosse uma partícula de Yukawa, o múon negativo  $\mu^-$  ao ser levado ao repouso num material, seria atraído em direção ao núcleo atômico e cairia na órbita de Bohr de menor raio. Esta órbita, para elementos muito pesados, se encontra muito próxima dos núcleos, em alguns casos até dentro dele, fazendo com se viabilizasse interações nucleares e não criasse possibilidades de sofrer decaimentos. No entanto, Anderson também havia verificado experimentalmente a existência de um múon positivo  $\mu^+$ . Tomonaga e Araki, colegas da física teórica japonesa de Yukawa, propuseram uma teoria comparando o comportamento de múons negativos e positivos, no qual os múons negativos seriam predominantemente capturados pelos núcleos atômicos dos materiais, enquanto os positivos seriam repelidos e seguiriam suas cadeias naturais de decaimentos – nesta suposição, Tomonaga e Araki acreditavam que o múon realmente se tratava da partícula de Yukawa e interagia fortemente com a matéria. Segundo os físicos,

Como consequência da atração coulombiana, a probabilidade de captura para múons negativos irá crescer, enquanto para os positivos ela será profundamente reduzida. A competição entre a captura nuclear e a desintegração espontânea deverá, desta forma, ser diferente para [múons] positivos e negativos. (TOMONAGA & ARAKI, 1942, p.212)

Tomonaga e Araki estavam propondo uma forma de testar a paridade do múon com a partícula de Yukawa e para fazer isso sugeriam experimentos que deveriam comparar o comportamento múons negativos e positivos ao penetrar diferentes materiais. Foi exatamente isto que Conversi, Pancini e Piccioni (1946) fizeram. Utilizando um conjunto de eletroímãs, os cientistas italianos utilizaram camadas de chumbo para filtrar a passagem de elétrons, pósitrons e prótons e selecionar apenas os múons positivos e negativos provenientes dos raios cósmicos, o arranjo está apresentado na Figura 8. O aparato consistia de grandes blocos de ferro acompanhados da aplicação de campos magnéticos que possibilitam que partículas positivas e negativas realizem diferentes movimentos convergindo ou divergindo – podendo assim selecionar um determinado tipo de partículas (positivas ou negativas) e encaminhá-las para uma câmara onde seria medida uma contagem para inferir se elas estariam decaindo espontaneamente ou se seriam capturadas pelo núcleo dos átomos do material – a contagem era feita por um conjunto de detectores do tipo Geiger posicionados após a passagem pelo material em análise.

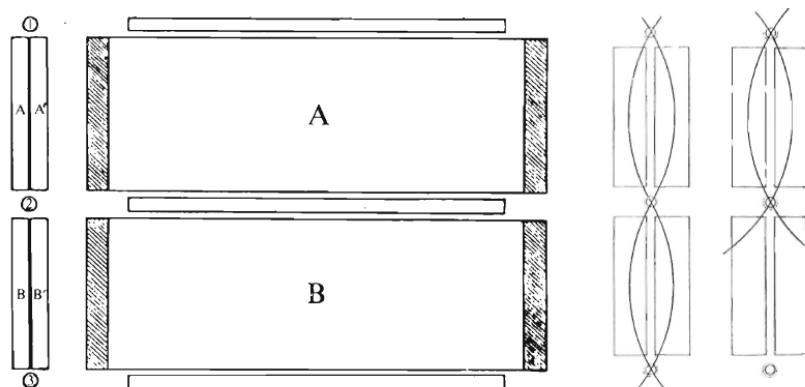


Figura 8 - Aparato utilizado entre 1940 e 1945 para comparar a produção de múons positivos e negativos. A orientação dos campos magnéticos era pensada de tal forma que, a curvatura realizada provocaria a convergência de uma carga elétrica e a divergência da oposta, permitindo a análise de uma carga de cada vez. (Conversi, Pancini e Piccioni, 1946)

Os resultados obtidos pelo grupo italiano foram cruciais para apontar que o múon não se tratava, de fato, da partícula de Yukawa. Ao comparar as desintegrações produzidas em camadas de Ferro e Carbono, ilustradas na Figura 9, eles perceberam diferenças significativas na contagem das versões positivas e negativas do múon, sendo a negativa praticamente zero para camadas de ferro de 6 cm de espessura. No entanto, ao comparar com as desintegrações produzidas em amostras de carbono, onde se esperava um comportamento semelhante, perceberam que a diferença já não se tornava tão significativa a ponto de afirmar que os múons não detectados realmente estavam interagindo nuclearmente o núcleo atômico – eles atribuíram as diferenças entre o Ferro e o Carbono como sendo meramente fruto da interação coulombiana, que é muito maior no Ferro pela maior presença de carga elétrica, não acreditando haver influência da interação nuclear nos resultados obtidos. Em síntese, para o grupo experimental italiano, os múons não realizam interações nucleares, seus comportamentos indicavam apenas uma forte influência da interação eletromagnética.

carica dei muoni fermati	assorbitore	frequenza di disintegrazione (eventi / 10 ore)
positiva	5 cm Fe	$6.7 \pm 0.65$
negativa	5 cm Fe	$0.3 \pm 0.25$
positiva	4 cm C	$3.6 \pm 0.45$
negativa	4 cm C + 5 cm Fe	$2.7 \pm 0.35$
negativa	6.2 cm Fe	0

Figura 9 - Resultado do grupo italiano para a comparação das desintegrações observadas em múons positivos e negativos. (Conversi, Pancini e Piccioni, 1946)



Apesar da massa intermediária que fizeram com que muitos cientistas acreditassem que o múon realmente fosse a partícula prevista por Yukawa, o grupo italiano revelava que ela não interagira fortemente com a matéria e este era o requisito crucial para que ela se adequasse ao cargo – se os múons não são as partículas previstas por Yukawa, será que elas realmente existem? Pensando neste problema, Marshak e Bethe (1947) publicaram um artigo intitulado *On the Two Meson Hypothesis* (Sobre a Hipótese dos Dois Mésons) no qual afirmavam que o múon, de fato, não era a partícula prevista, no entanto, estava correlacionada por meio de uma cadeia de decaimento. Nesta proposta, o méson de Yukawa sofreria um decaimento produzindo um múon e as similaridades que enxergamos nele até este momento seriam provenientes desta correlação na cadeia de decaimento – o múon seria uma partícula secundária proveniente de um méson primário que finalmente seria aquele previsto por Yukawa. A hipótese trazia um grande problema uma vez que, se os múons eram detectados na superfície terrestre, os mésons primários seriam produzidos somente em altitudes elevadas e teriam um tempo de meia vida consideravelmente menor. O método usual de investigação dos raios cósmicos com câmaras de nuvem tornaria difícil a detecção destes mésons primários e é por este motivo que ele acontece sob outra perspectiva.

Paralelamente aos trabalhos com câmaras de nuvem, um grupo de Bristol na Inglaterra investia em outro método de investigação baseado na utilização de placas fotográficas como a mostrada na Figura 10. Nestas placas, uma substância é inserida no interior de uma placa gelatinosa disposta sobre um papel e uma fina camada de vidro. A passagem de radiação ionizante provoca uma reação química que deixa os traços no papel provocados por uma reação de emulsão nuclear.

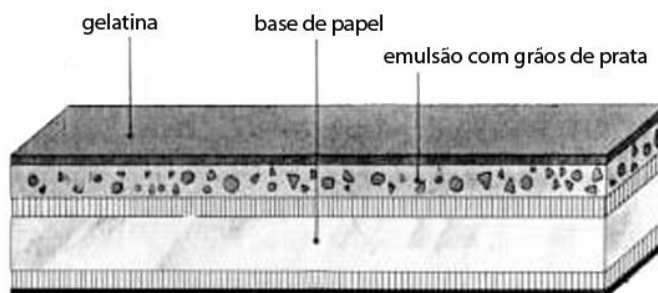
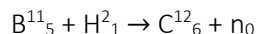


Figura 10 - Composição básicas de placas fotográficas utilizadas em processos de emulsão nuclear.

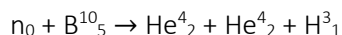
Nesta época, as placas de emulsão apresentavam problemas que dificultavam sua utilização como método experimental de identificação e caracterização de partículas, sendo o maior empecilho o fato de apresentarem baixa sensibilidade para a ionização. Como a vida média dos mésons previsto do Yukawa era muito baixa, da ordem de  $10^{-8}$  s, cerca de 100 vezes menor do que os  $10^{-6}$  s detectado com múons, sua passagem não duraria muito tempo. Sem sensibilidade suficiente, mesmo que ela passe pela placa de emulsão, ela não poderia ser detectada.

É neste momento que entram as contribuições do físico brasileiro César Lattes. Percebendo a utilização das novas técnicas de emulsão, Lattes solicitou a Occhialini, até então trabalhando conjuntamente no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, que pudesse se dedicar no aprimoramento das técnicas de emulsão nuclear em colaboração com o grupo de Bristol. Lattes utilizou das técnicas que Chadwick havia utilizado na década anterior para estudar e evidenciar a existência do nêutron. Curie e Joliot haviam demonstrado que alvos de Berílio, quando bombardeados por partículas  $\alpha$ , emitiam uma radiação neutra misteriosa que mais tarde Chadwick evidenciou como sendo o nêutron. Lattes utilizou a mesma reação para produzir nêutrons a partir do Berílio, e utilizava a energia destes nêutrons para bombardear uma substância contendo Boro, chamado de Bórax.

No mesmo experimento, coloquei placas tratadas com bórax, que Ilford tinha preparado a meu pedido, na direção do feixe de nêutrons produzidos na reação:



que dá um pico de nêutrons em aproximadamente 13 MeV. A ideia, que funcionou bem, era obter a energia e o momento dos nêutrons, independentemente de sua direção de chegada (que não era conhecida), pela reação



(LATTES, 1984, p.2)

A ideia de Lattes era intensificar e aumentar o número das reações de emulsão nuclear para tornar mais visível a passagem de partículas sobre a placa. Buscando avaliar o comportamento de suas placas, Lattes e Occhialini levaram chapas para o monte Pic-du-Midi a uma altitude de 2900 m. Algumas delas continham sua adaptação com a introdução de bórax e outras chapas eram as normalmente utilizadas pelo grupo de Bristol. As chapas normais serviriam para estudar raios cósmicos de baixa energia, enquanto as chapas de Bórax serviram para, inicialmente, buscar a existência de nêutrons em raios cósmicos e, também, para comparar sua eficiência de produção de imagem com as demais placas. Ao voltar para Bristol, o brasileiro analisou as placas e se surpreendeu com a potencialidade do Bórax:

Quando Occhialini revelou a emulsão depois de sua recuperação, na mesma noite em que foram recebidas em Bristol, tornou-se claro que as emulsões tratadas com bórax tinham muito mais eventos do que as sem bórax; de alguma forma, o bórax impedia a imagem latente de se esvanecer; as placas normais utilizadas em Bristol tinham um forte esvanecimento. (LATTES, 1984, p.4)

Guiado pelas novas revelações trazidas com a introdução do bórax, Lattes percebeu novos traços que demandavam esforços investigativos. Após dias de investigação sobre as placas, Lattes e Occhialini encontraram o que pareciam traços de uma cadeia de decaimento com três partículas carregadas distintas participando. Conduziram em seguida novas expedições agora ao Mt Chacaltaya na Bolívia a 5000 m de altitude que revelaram realmente o novo universo de traços. Pela espessura, granulação e visibilidade dos traços, Lattes aponta que muito possivelmente se tratavam de três partículas com massas decrescentes, sendo a mais leve delas um elétron, pelo traço menos visível, e a intermediária como sendo múons, com traços medianamente visíveis. A partícula com traço de maior espessura poderia ser associada a prótons, no entanto, ela decaía muito rapidamente para ser associada ele, fazendo Lattes propor se tratar e uma nova partícula mais pesada do que os múons – o méson  $\pi$ . Os mésons  $\pi$  eram facilmente discerníveis de prótons “por causa de seu espalhamento muito maior e sua variação de densidade de grãos com o alcance.” (1984, p.3). A Figura 11 apresenta os registros fotográficos captados pelas placas de emulsão desenvolvidas por Lattes. O primeiro traço na cascata, vista de baixo para cima, se tratava do méson  $\pi$ , a partícula prevista por Yukawa. Em seguida ela decaí produzindo os múons  $\mu$  descobertos por Anderson na década passada e o terceiro traço seriam elétrons ou pósitrons provenientes do decaimento dos múons.

Estabeleceu-se o entendimento da existência de uma cadeia de decaimento de píons, que ocorriam em tempos de vida média próximos de  $10^{-8}$  s e se manifestavam da seguinte forma



Da mesma forma, estabeleceu-se também o entendimento da cadeia de decaimento de múons, que ocorria com uma vida média da ordem de  $10^{-6}$  s e se manifestavam com uma misteriosa emissão de duplos neutrinos da seguinte forma



Successive decay of the  $\pi$ -meson,  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$

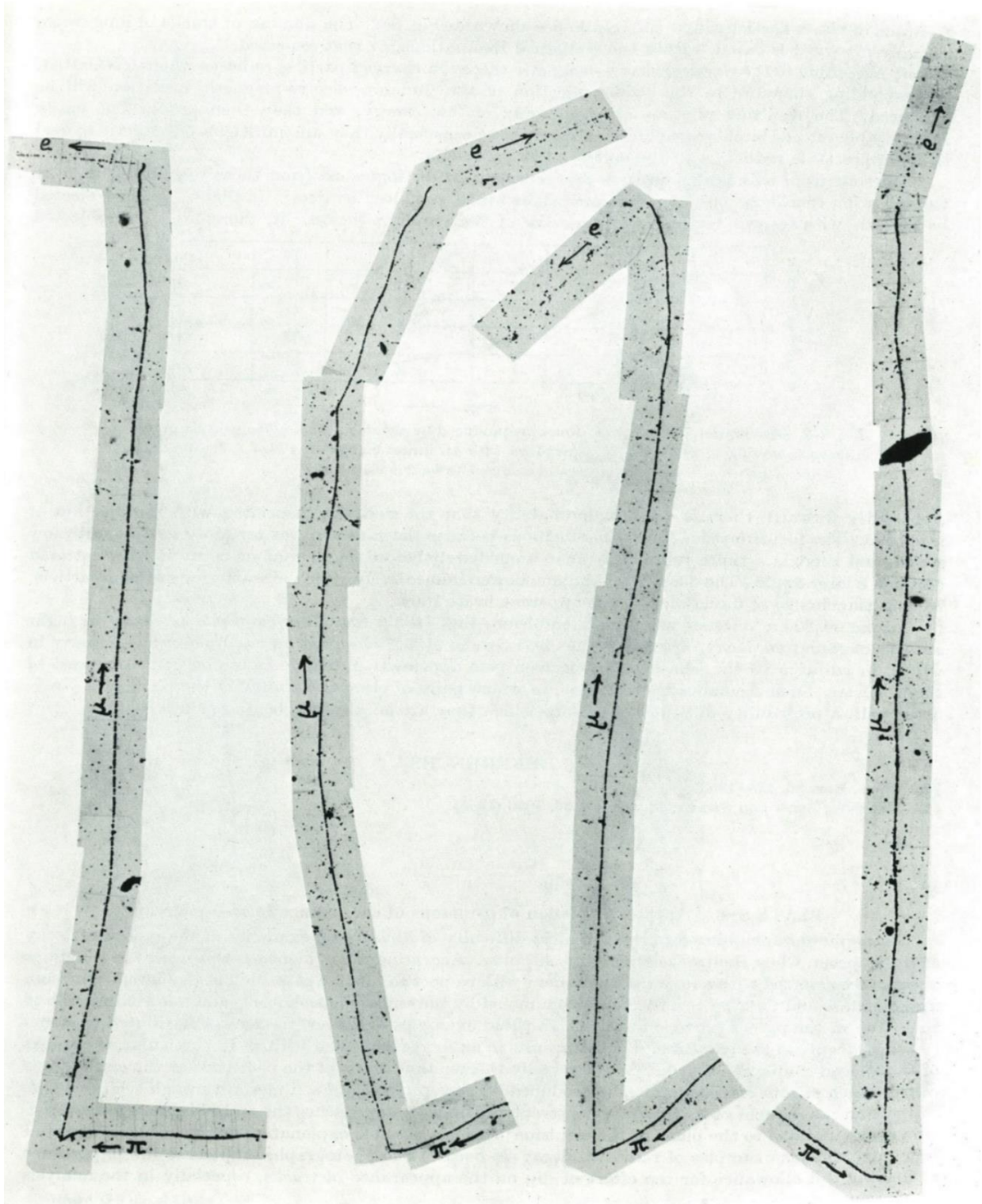


Figura 11 - Cadeia de decaimento sucessivos  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$

O fortalecimento para finalmente identificar os píons como os mésons previstos por Yukawa vieram a partir da associação de seus modos de produção com interações nucleares envolvendo nêutrons e núcleos atômicos. As fotografias apresentadas na Figura 12 revelam a produção de chuveis cósmicos de onde se originam a produção de píons associados a interação de nêutrons provenientes de raios cósmicos, assim como também das reações nucleares envolvendo núcleos como os de nitrogênio.

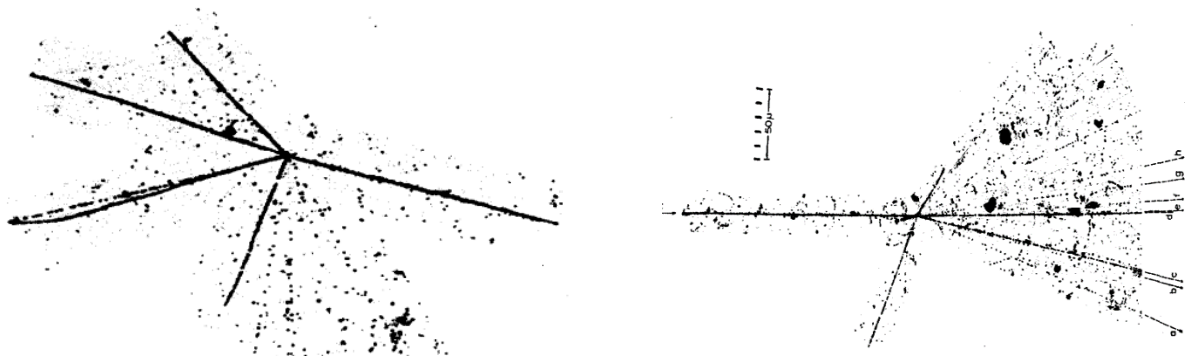


Figura 12 – Esquerda: desintegrações provocadas por nêutrons de altas energias. Direita: chuva de desintegrações provocadas por reações nucleares envolvendo núcleos de nitrogênio. (Fonte: Powell, 1947)

A caracterização da produção de píons e sua associação com as interações nucleares foram fundamentais para estabelecê-lo como os mésons previstos por Yukawa para mediar as interações nucleares, esforço que rendeu ao físico teórico japonês o Premio Nobel de Física de 1949. Com os avanços experimentais possibilitados pelo uso das placas de emulsão nuclear, a composição dos raios cósmicos também se torna mais clara, ampliando a visão do início dos anos 30 que remetia apenas a presença de fótons, elétrons, pósitrons e prótons, introduzindo uma nova componente composta por píons e múons e por uma diversidade de reações nucleares envolvendo prótons, nêutrons e núcleos de gases presentes na atmosfera. Uma síntese da forma como os raios cósmicos passam a ser vistos é apresentado na Figura 13.

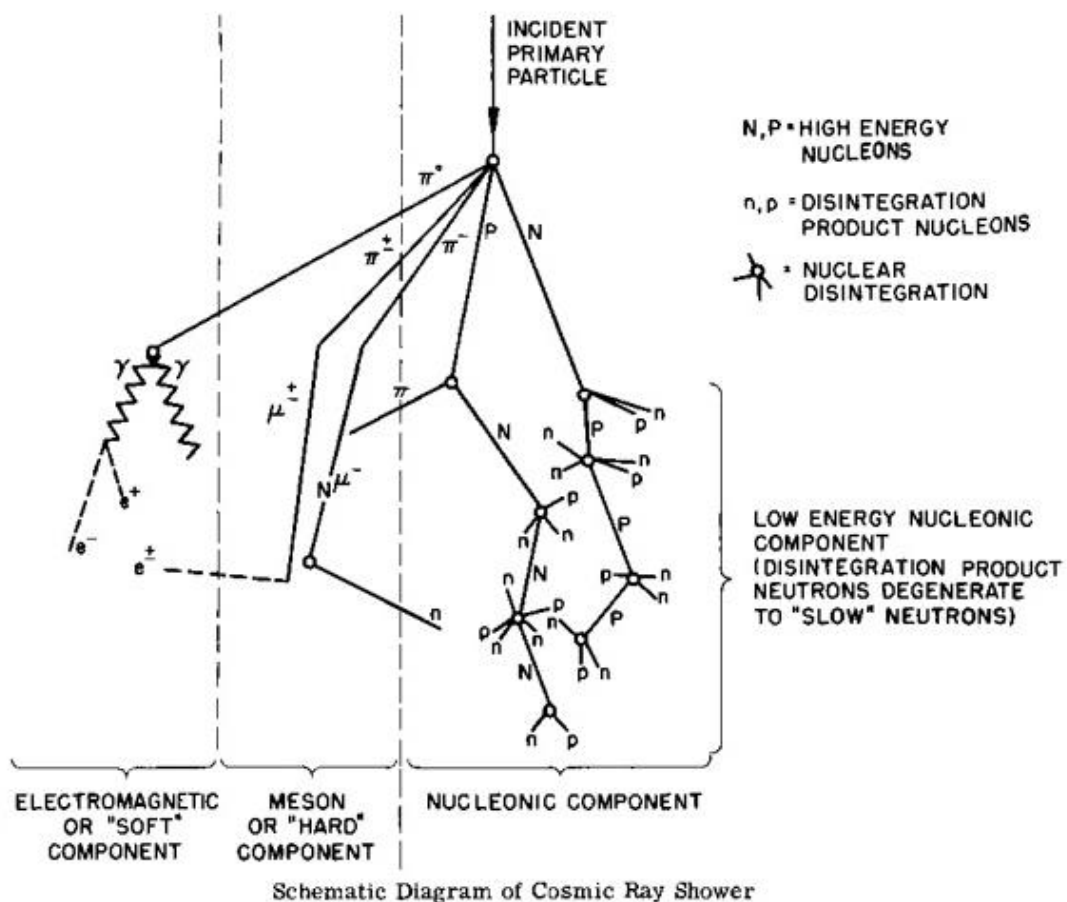


Figura 13 - Composição dos raios cósmicos em meados de 1949. Ela é composta por uma componente "leve" que contém fótons, elétrons e pósitrons. Uma componente "pesada" composta por píons e múons. Uma componente nuclear composta pelas reações nucleares envolvendo prótons, nêutrons e núcleos de Nitrogênio.