

OS CINQUENTA ANOS DA
DESCOBERTA DO PÍON

CAROLA DOBRIGKEIT

DEPARTAMENTO DE
RAIOS CÓSMICOS E CRONOLOGIA

INSTITUTO DE FÍSICA
"GLEB WATAGHIN"

UNICAMP

notas de física ifgw

OS CINQUENTA ANOS DA
DESCOBERTA DO PÍON

CAROLA DOBRIGKEIT

DEPARTAMENTO DE
RAIOS CÓSMICOS E CRONOLOGIA

INSTITUTO DE FÍSICA
"GLEB WATAGHIN"

UNICAMP

OS CINQUENTA ANOS DA DESCOBERTA DO PÍON

CAROLA DOBRIGKEIT

INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN
UNICAMP
1997

OS CINQUENTA ANOS DA DESCOBERTA DO PÍON

Carola Dobrigkeit
Instituto de Física Gleb Wataghin
Unicamp

Estamos comemorando em 1997 o cinquentenário da descoberta do pión pelo grupo chefiado por Cecil Powell na Universidade de Bristol, Inglaterra. Nesta ocasião convém lembrar a importância desta descoberta, e qual a sua contribuição para o nosso entendimento das partículas elementares, bem como das forças entre os constituintes do núcleo atômico.

Eu gostaria de abordar aqui, em ordem aproximadamente cronológica, a proposta original da existência de mésons por Hideki Yukawa, entre 1934 e 1935, as muitas experiências feitas nos anos subsequentes, que procuraram ser interpretadas à luz dos mésons de Yukawa, experiências essas que culminaram com a comprovação, em 1947, da existência dos píons por Powell e seus colaboradores, e posteriormente, resumir o papel que o pión desempenha atualmente na física das partículas elementares.

A PROPOSTA DE YUKAWA

Em 1911, a experiência de Ernst Rutherford revelava a existência de um núcleo atômico, de dimensão cerca de quatro ordens de grandeza menor que a dimensão do átomo e responsável praticamente pela totalidade da massa do átomo. Pensando-se em prótons (núcleos do átomo de hidrogênio) como constituintes dos núcleos atômicos, e

responsáveis pela sua carga positiva, já surgia inevitavelmente a pergunta: o que impede esses prótons de se repelirem, e faz com que eles permaneçam ligados no interior do núcleo?

Igualmente, com as evidências indiscutíveis da existência, no interior no núcleo, dos neutrons propostos por James Chadwick em 1932, não se conseguia ainda responder à pergunta acima. Que força manteria os nucleons, conforme são chamados os prótons e neutrons, unidos no núcleo do átomo? Assim, percebia-se logo a necessidade de se introduzir forças nucleares específicas, que não pudessem ser reduzidas a interações eletromagnéticas entre partículas carregadas.

O físico Hideki Yukawa conta, em sua palestra quando recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1949, reproduzida no livro de sua autoria [1], que a teoria do méson nasceu de uma extensão do conceito de campo de força de maneira a incluir, além das forças eletromagnéticas e gravitacionais, também as forças nucleares.

Do ponto de vista prático, a idéia da troca de partículas com massa como um ponto de partida para descrever a interação nucleon-nucleon foi introduzida por Yukawa em 1935 [2]. Estas partículas desempenhariam para as forças nucleares exatamente o mesmo papel que os fótons desempenhariam nas interações eletromagnéticas. No contexto da teoria quântica do campo eletromagnético, os fótons representam o papel de quanta do campo. De maneira análoga, a nova partícula proposta seria o quantum da interação nuclear. Já se sabia, então, que o quantum do campo deveria ser um bóson, ou seja, ter spin inteiro, pois apenas bósons podiam ser criados e aniquilados singularmente.

Entretanto, a força nuclear apresenta características marcadamente diferentes das da interação eletromagnética. A principal diferença é no tocante ao alcance das duas interações. Ao contrário do alcance infinito da interação eletromagnética, a força nuclear caracteriza-se por seu curto alcance, da ordem do raio nuclear, ou seja, da ordem de fermi ($10^{-15} m$).

Assim, Yukawa supôs que as forças nucleares fossem descritas por um campo escalar U , que satisfizesse uma equação semelhante à equação do campo eletromagnético no vácuo, porém tendo um termo adicional :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - k^2 \right) U = 0$$

Nesta equação, k é uma constante com dimensão de inverso de um comprimento. Assim, o potencial estático entre dois nucleons a uma dada distância r é proporcional a $\exp(-kr)/r$ e o alcance das forças seria dado por $1/k$.

Ainda de acordo com o princípio geral da teoria quântica de campo, o campo U teria a ele associado uma nova partícula, ou quantum do campo, que teria a massa $\mu = k \hbar / c$ e spin 0. Vemos, aqui, que k representa o inverso do comprimento de onda Compton associado a essa nova partícula.

A massa dessa nova partícula pode, então, ser estimada, supondo o alcance conforme acima mencionado. Para um alcance de 1 fermi, chega-se a uma massa da ordem de 200 MeV/c², maior, portanto, que a massa do elétron, porém, menor que a do próton. Por essa razão, a nova partícula foi chamada “mésotron”, depois simplificado para “méson”.

Ainda para obter as forças de troca, Yukawa assumiu que os mésons se apresentariam em estados de carga elétrica $+e$ e $-e$. Desta maneira, Yukawa visualizou que um méson positivo seria emitido quando o nucleon passa de próton a neutron, enquanto um méson negativo seria emitido quando o neutron passa a ser um próton. Assim um neutron e um próton poderiam interagir trocando mésons, da mesma forma que duas partículas carregadas interagem trocando fótons. Yukawa também estava interessado em descrever o decaimento fraco do neutron resultando em um próton, um elétron e um antineutrino, interação esta também envolvendo no vértice um neutron e um próton, como havia feito Fermi em seu modelo do decaimento beta. Entretanto, esta é uma outra história, e não a abordaremos aqui, por envolver a descrição da interação fraca.

Mas como descrever, dentro deste modelo, a interação entre dois prótons ou entre dois neutrons? Sabia-se, dos resultados experimentais de espalhamento próton-próton, que a interação entre eles era de magnitude semelhante à entre próton e neutron,

se fosse descontado o efeito da repulsão coulombiana. Para responder a esta pergunta, parecia ser necessário assumir a existência adicional de mésons neutros, que deveriam ter massa igual, ou aproximadamente igual, à dos mésons carregados, ter também spin inteiro, e deveriam interagir com os nucleons tão intensamente quanto os carregados.

Estava criado o cenário para os mésons previstos serem descobertos experimentalmente.

AS DESCOBERTAS EXPERIMENTAIS

A década de trinta caracterizou-se por um nível bastante intenso de experimentos envolvendo o estudo das partículas da radiação cósmica. Em muitas dessas experiências procurava-se identificar essas partículas, utilizando como detectores contadores Geiger e também câmaras de nuvens.

Uma descoberta importante feita em 1932 por Carl Anderson [3] revelou a existência do pósitron, a antipartícula do elétron. No mesmo ano, Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini [4] concluíram, a partir de suas observações em câmaras de nuvens, expandidas após um sinal de coincidência em dois contadores Geiger colocados estrategicamente acima e abaixo da câmara, que os pósitrons eram produzidos na atmosfera pelas próprias partículas da radiação cósmica.

Porém estas não foram as únicas descobertas reveladas nessas experiências. Foram observados também os “chuveiros”, em que, em um curto intervalo de tempo, um conjunto de partículas atravessavam o detector. As evidências experimentais foram mostrando que esses chuveiros eram constituídos por elétrons, pósitrons e fótons de altas energias (gamas), e que essas eram partículas secundárias criadas nas interações das partículas primárias de altas energias da radiação cósmica com os núcleos na parte superior da atmosfera. Estes chuveiros, compostos por elétrons, pósitrons e fótons de alta energia (gamas) constituíam a chamada componente “mole” da radiação cósmica, devido ao fato de ser facilmente absorvida ao atravessar meios materiais densos e de número atômico elevado.

Entretanto, Anderson e Seth Neddermeyer observaram com sua câmara de nuvens alguns traços deixados por partículas que apresentavam um poder de penetração bem maior do que os da componente mole, constituída de elétrons, pósitrons e gamas. Em 1936, convencidos de que estavam lidando com uma partícula nova, apresentaram as suas evidências de que a massa da nova partícula era intermediária entre as massas do elétron e

do próton, com um valor bem próximo àquele predito por Yukawa para o méson mediador da força nuclear [5].

Praticamente simultânea à observação de Anderson e Neddermeyer, J. C. Street e E. C. Stevenson publicaram resultados semelhantes [6], logo depois aprimorados. Para determinar a massa da partícula por eles descoberta, procuraram medir ao mesmo tempo seu momento e a ionização por ela causada. Como a ionização é função da velocidade, as duas medidas permitiriam, em princípio, estimar a massa. Entretanto, a ionização depende fracamente da velocidade, a não ser a velocidade relativamente baixas, ou seja, quando a partícula está prestes a parar no detector. Street e Stevenson utilizaram então uma técnica de coincidência e anticoincidência, inventada por Blackett e Occhialini, para selecionar partículas que entravam na câmara de nuvens e não saíam dela. Adicionalmente, colocaram também uma placa de chumbo para servir de blindagem para a componente eletromagnética da radiação cósmica. Com esses aperfeiçoamentos, puderam detectar uma partícula que ionizava mais que um elétron com o momento por eles medido, mas tinha um alcance maior do que se fosse um próton. Sua estimativa da massa foi de aproximadamente 130 massas eletrônicas, que, embora não muito precisa, a colocava claramente entre as massas do elétron e do próton.

É oportuno lembrar que, também ao final da década de trinta, os físicos Wataghin, Damy e Pompeia realizaram em São Paulo vários experimentos subterrâneos comprovando a existência dos chuviscos altamente penetrantes da radiação cósmica [7].

Parecia tentadoramente simples identificar a partícula descoberta por Anderson e Neddermeyer com o méson de Yukawa. Em 1940, os físicos japoneses Tomonaga e Araki [8] mostraram que os mésons de Yukawa positivos e negativos deveriam se comportar de maneira bem diferente quando freiados na matéria. Essencialmente, as partículas de carga negativa poderiam ser capturadas em orbitais atômicos, em substituição a um elétron. Como a massa do méson é maior que a do elétron, os raios médios da órbita do méson seriam menores que os do elétron, acarretando, assim, uma sobreposição maior da sua função de onda com o núcleo do átomo. Dado que o méson deveria mediar as forças entre os nucleons, ele iria muito provavelmente interagir rapidamente com o núcleo, sendo assim absorvido antes de decair.

Uma vez absorvido pelo núcleo, poderia causar a desintegração deste, com a subsequente emissão de outras partículas. Já os mésons positivos não teriam este comportamento, sendo simplesmente freitados pelos núcleos dos átomos e vindo então a decair. Um estudo sobre o comportamento das partículas penetrantes detectadas experimentalmente quanto à sua absorção e seus decaimentos poderia vir a confirmar estes comportamentos.

Várias medidas das vidas médias das partículas penetrantes foram feitas, revelando tempos entre $1,5 \times 10^{-6} s$ e $2,2 \times 10^{-6} s$. Os trabalhos dos italianos Conversi, Pancini e Piccioni [9], investigando os decaimentos das partículas penetrantes positivas e negativas em vários materiais, confirmaram que as positivas de fato decaíam, como haviam previsto Tomonaga e Araki, porém as negativas apresentavam um comportamento inesperado: se o absorvedor fosse de ferro, as partículas negativas não decaíam, e eram absorvidas pelos núcleos, mas se o absorvedor fosse de carbono, elas decaíam. Isso significava que a previsão feita não se aplicava às partículas penetrantes da radiação cósmica, e que essas partículas não podiam ser as previstas por Yukawa!

De fato, já em 1942 Tanikawa e Sakata [10] propuseram uma nova hipótese, segundo a qual os mésons que constituem a componente penetrante da radiação cósmica ao nível do mar não eram diretamente ligados às forças nucleares, mas eram produzidos pelo decaimento de mésons mais pesados que interagiam fortemente com os nucleons. A hipótese da existência de dois tipos de mésons também ocorreu a Marshak e Bethe [11], independentemente dos físicos japoneses mencionados. Mas faltava ainda a comprovação experimental dessa teoria dos dois mésons.

Deve ser dito que ao final da década de quarenta um detector de partículas carregadas apresentou um grande aprimoramento, e desempenhou um papel importante na descoberta de novas partículas. Trata-se de um tipo especial de emulsões fotográficas, que consistem de uma gelatina carregada com grãos de brometo de prata, depositada sobre uma base sólida transparente. Quando uma partícula carregada passa por uma tal emulsão, o brometo de prata é ionizado. A revelação química da emulsão consiste, em essência, em uma reação de oxi-redução, em que a prata ionizada se torna prata metálica. O trajeto da partícula carregada fica observável ao microscópio pela sequência de grãos, contendo prata metálica, ao longo de seu percurso. Emulsões desse tipo já vinham sendo utilizadas

desde os primeiros estudos sobre a radioatividade, porém não eram sensíveis para registrar a passagem de partículas de alta energia. Era necessário conseguir traços mais densos nas emulsões, o que significava carregar a gelatina com mais brometo de prata, e esta era a maior dificuldade, levando várias décadas sendo melhorada. As emulsões com este aumento na quantidade de brometo de prata ficaram sendo conhecidas como emulsões nucleares.

Um entusiasta da técnica de utilizar emulsões para registrar partículas foi Cecil Powell, que desde 1935 pesquisava colisões nucleares na Universidade de Bristol, Inglaterra, e, após a 2a. Guerra Mundial, investigou emulsões que eram particularmente sensíveis a partículas subatômicas altamente energéticas. Uma ajuda especial veio dos pesquisadores ligados à empresa fotográfica Ilford Ltd, que conseguiram aumentar a densidade de brometo de prata de um fator da ordem de seis. Pode-se ter uma idéia do aumento da sensibilidade, comparando os traços de partículas alfa deixados em emulsões de diferentes sensibilidades conforme mostram as Figuras 1a e 1b. As emulsões concentradas registram a partícula com um traço bem mais grosso.

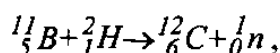
Estas emulsões foram imediatamente exploradas pelo grupo de Powell, contando com a inestimável experiência de dois pesquisadores vindos do Brasil. Um deles foi Cesare Mansueto Giulio Lattes, e o outro, o italiano Giuseppe Occhialini, que passara vários anos no Brasil, trabalhando com o Prof. Gleb Wataghin na Universidade de São Paulo. Tanto Lattes, quanto Occhialini vinham estudando chuveiros da radiação cósmica utilizando câmaras de nuvens.

Durante os tempos de guerra, Occhialini teve que abandonar temporariamente seus trabalhos, devido a seu passaporte italiano, e, após o término da guerra, foi o primeiro a se juntar ao grupo de Powell. Logo percebeu o alcance das observações utilizando emulsões e mandou a Lattes uma amostra de fotografias de traços de prótons e partículas alfa, obtidas com as novas emulsões nucleares. Lattes imediatamente notou a excelente qualidade dos traços registrados e decidiu se juntar ao grupo, o que veio a acontecer no início de 1946.

Inicialmente, Lattes estudou reações nucleares com as novas placas concentradas, com o objetivo de estimar o fator de encolhimento da emulsão após a

revelação química. Expondo as emulsões no acelerador Cockroft-Walton, de Cambridge, sua intenção era utilizar as partículas produzidas artificialmente nas desintegrações como testes para o fator de encolhimento.

Além de obter adicionalmente a relação alcance-energia para prótons até 10 MeV, que veio posteriormente a ser utilizada nas pesquisas futuras, Lattes chegou a uma outra observação, que também resultou em um importante aperfeiçoamento das emulsões. A seu pedido, a companhia Ilford carregou emulsões com bórax, material químico contendo boro ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$). A idéia era expor tais emulsões na direção do feixe de neutrons produzidos na reação



que dava um pico de neutrons de energia aproximadamente 13 MeV. A intenção era de, com as novas placas, obter a energia e o momento dos neutrons produzidos na reação acima, independentemente de sua direção, que era desconhecida, fazendo-os induzir a reação



Vale ressaltar que os neutrons não são registrados na emulsão, já que não ionizam o brometo de prata. Apenas as partículas alfa e o trítion podiam ser observados e deles era deduzida a caracterização do neutron.

As emulsões carregadas com bórax, após reveladas, demonstraram apresentar boa qualidade de imagem, e quando Lattes e Occhialini decidiram expor as novas emulsões concentradas do tipo B1 da Ilford à radiação cósmica, decidiram utilizar algumas normais (sem boro) e também algumas daquelas carregadas com bórax. As placas normais deveriam servir para estudar os raios cósmicos de baixa energia e, a título de controle, pesquisar se estavam sendo criados neutrons.

Foi Occhialini, alpinista entusiasta, quem levou as novas placas de emulsões para serem expostas à radiação cósmica nos Pireneus franceses, em especial, no Pic du Midi (2850 metros acima do nível do mar).

Qual não foi a surpresa, após a revelação química das placas expostas durante um mes, ao observar que as emulsões carregadas com bórax apresentavam muito mais eventos! Não apenas a quantidade era maior, mas a qualidade dos traços deixados também era aumentada em emulsões contendo boro. Os dois físicos observaram, assim, que a adição do composto de boro fazia com que a emulsão tivesse a qualidade de maior estabilidade da imagem latente. Em outras palavras, quando o brometo de prata é ionizado pela passagem de uma partícula carregada, e não é logo revelada, há uma tendência dos íons se recombinarem e, com isso, o registro ser perdido com o tempo. Este fato é conhecido como perda da imagem latente, e é sensivelmente reduzido quando à emulsão é adicionado o boro.

A observação das emulsões revelaram evidências de um novo tipo de partículas, também de massa intermediária entre a do elétron e a do próton.

Segundo Lattes, as novas partículas eram facilmente distinguíveis de prótons na emulsão utilizada, pois os traços apresentavam um espalhamento maior e uma variação da densidade de grãos ao longo do traço, em razão de seu freiamento.

Após alguns dias de observação ao microscópio, dois eventos, contendo traços de duas partículas, foram observados. Em um desses eventos duplos, o traço da partícula produzida no decaimento da primeira não parava na emulsão, mas, estudando sua ionização através do método da contagem de grãos, podia-se extrapolar seu alcance e assim obter um valor da ordem de 600 micra. No outro evento, uma partícula deixava seu registro, e, após ser freiada na emulsão, decaía, e a partícula produzida deixava um traço de alcance também de cerca de 600 micra. Esses dois eventos “duplos” são reproduzidos nas Figuras 2a e 2b [12].

Os resultados de suas medidas levaram ainda a uma estimativa das massas das partículas envolvidas, sendo a primeira de massa maior que a da partícula descoberta por Anderson, e que, adicionalmente, podia ser vista decair, após percorrer aproximadamente seis décimos de milímetro na emulsão, em uma partícula secundária, de massa concordante com a de Anderson.

A fim de conseguir observar mais eventos deste tipo, Lattes teve a idéia de expor emulsões carregadas com bórax em um local ainda mais alto, e em sua procura por

uma montanha encontrou o Monte Chacaltaya na Bolívia, a vinte quilômetros de La Paz, e a 5220 metros acima do nível do mar. No local funcionava uma estação de observação meteorológica, e o acesso era relativamente fácil. Diga-se ainda que o fluxo de partículas de alta energia da radiação cósmica é consideravelmente superior nessa altura, quando comparado com o no Pic du Midi. O próprio Lattes levou as emulsões para exposição e, após o tempo combinado de um mes, revelou uma placa ainda em La Paz. Embora as condições da água não eram as mais apropriadas e a emulsão ficasse manchada, foi possível para ele observar um evento completo duplo, em que o alcance da partícula secundária era também da mesma ordem. Quando da revelação das demais placas, já na Inglaterra, puderam ser observados trinta eventos completos, ou seja, com os traços da partícula mais pesada e da mais leve contidos na emulsão.

É importante ressaltar que, sem o perceber, o grupo de Bristol participava, em 1947, de uma corrida pela descoberta do méson de Yukawa. Donald Perkins, do Imperial College of Science and Technology, de Londres, também expunha emulsões Ilford tipo B1 à radiação cósmica em aviões voando várias horas a cerca de dez mil metros de altura, obtendo também o registro direto de eventos com resolução extremamente fina. Um evento por ele observado mostrava uma partícula negativa lenta que era freiada e interagia com um átomo leve, provavelmente de carbono, nitrogênio ou oxigênio. Após ser absorvida pelo núcleo, este se desintegrava, e tres fragmentos podiam ser observados na emulsão. Este evento aparentava o comportamento predito por Tomonaga e Araki para os mésons de Yukawa negativos.

Pode-se, assim, dizer que nesta competição dois fatores tiveram contribuição decisiva a favor do grupo de Bristol: o carregamento das emulsões com o bórax, que estabilizava a imagem latente, e a exposição dessas emulsões no Monte Chacaltaya, a uma altitude maior. Igualmente, nesses dois fatores a contribuição de Lattes foi decisiva.

Lattes, Occhialini e Powell publicaram vários trabalhos [12] [13], e puderam estabelecer que havia de fato duas partículas, uma decaindo na outra, e o produto do decaimento parecia ter um alcance fixo na emulsão, da ordem de 600 micra. Ou seja, da relação entre alcance e energia, percebia-se que o decaimento envolvia apenas

duas partículas finais, e não mais. Por ser neutra, a segunda partícula não deixa registro na emulsão, e a precisão na determinação das massas das partículas não permitiu afirmar-se a sua massa era pequena, ou nula. Porém deixava clara a seguinte descrição: o pión, conforme os autores já chamam o méson mais pesado na primeira parte do trabalho [13], decaía em um múon (a partícula penetrante descoberta por Anderson) e uma partícula leve, presumivelmente um neutrino de Pauli. O pión seria, então, a partícula com as características da partícula mediadora da interação forte, proposta por Yukawa.

No trabalho [12] já foram apresentadas estimativas das massas do pión e do múon, a partir da contagem de grãos observados na emulsão. As estimativas para suas massas permitiram colocá-las corretamente entre as massas do elétron e do próton. Para o pión o valor era entre 330 e 350 massas eletrônicas. Ainda era observado que a diferença entre as massas do pión e do múon não poderia ser maior do que 100 massas eletrônicas.

Faltava ainda um detalhe para tornar a descoberta do pión um sucesso: demonstrar que se podia produzi-los também artificialmente em aceleradores de partículas.

Mais uma vez a contribuição de Lattes foi essencial. Com sua intuição brilhante e o cálculo adequado, Lattes mostrou que o acelerador de partículas alfa que tinha sido construído recentemente naquele ano, o ciclotron de 184 polegadas do Berkeley Laboratory, na Califórnia, Estados Unidos, teria energia suficiente para produzir píons artificialmente. A energia cinética das partículas alfa do feixe era de 380 MeV (correspondente a 95 MeV/nucleon) era ainda insuficiente para produzir os píons, caso se considerasse os nucleons em repouso no interior dos núcleos do alvo. Lattes visualizou que os nucleons estariam em movimento no interior dos núcleos, e se o movimento relativo do nucleon do projétil fosse na direção contrária ao do nucleon do alvo, em condições favoráveis a energia total poderia ser suficiente para produzir os píons. Bastava, portanto, levar em consideração a energia de Fermi no interior dos núcleos, da ordem de 25 MeV, e esperar que alguns casos favoráveis fossem observados.

Ao final de 1947 Lattes foi, então, para os Estados Unidos, e junto com Eugene Gardner, logo pode publicar dois trabalhos com as evidências de produção de píons quando o feixe de partículas alfa do acelerador incidia no alvo (foram utilizados alvos principalmente de carbono, mas também de berílio, cobre e urânio)[14] [15]. No

primeiro trabalho mostrava-se a detecção de píons negativos, e no segundo, de píons positivos. As estimativas das massas dos píons produzidos eram da ordem de 313 ± 16 massas eletrônicas.

O conhecimento de Lattes das técnicas de detecção com emulsões nucleares e os valores estimados por ele foram essenciais para o experimento ser bem sucedido. Os píons eram defletidos por um campo magnético, e paravam na emulsão após passar por uma camada de absorvedor. Utilizando o alcance dos píons e a curvatura de sua trajetória devido ao campo magnético, foi possível estimar as suas massas conforme mencionado acima.

Antes de retornar ao Brasil, Lattes ainda atendeu ao pedido de Edwin McMillan de observar placas expostas ao feixe de raios gama do sincrotron de 300 MeV, e com sua larga experiência em identificar traços de píons nas emulsões, logo pode comprovar que os traços estavam registrados também nessas placas, encontrando perto de uma dúzia de traços, tanto de partículas positivas, quanto de negativas. Assim, Lattes fez a primeira observação da fotoprodução artificial de píons em aceleradores.

Uma última palavra deve ser dita sobre os estados de carga dos píons observados por Lattes e seu grupo. Os píons negativos eram facilmente observados, e apresentavam o comportamento descrito por Tomonaga e Araki de serem incorporados aos átomos e poderem interagir com seus núcleos, fragmentando-os. Na emulsão podia-se observar que vários traços emergiam de um mesmo ponto, formando o que se conhece por “estrela”. Também píons positivos foram observados, caracterizados por seu decaimento em múons. Nos primeiros decaimentos observados não era possível observar os elétrons provenientes do decaimento desses múons, pois as emulsões ainda não eram suficientemente sensíveis para registrá-los. Apenas com os aperfeiçoamentos das técnicas de fabricar as emulsões, foi possível aumentar sua sensibilidade e permitir visualizar as três partículas: o pión, o múon originado de seu decaimento, e também o elétron, proveniente do decaimento do múon. Exemplos dessas observações são apresentados na Figura 4.

O PÍON HOJE :

Uma pergunta que pode ser feita é sobre o papel que o pión, o mediador da interação nuclear na visão original de Yukawa, desempenha na Física de Partículas Elementares atual.

Após a descoberta experimental do pión e da interpretação correta de seu decaimento em múon, muitas outras partículas foram descobertas, que, assim como o pión, apresentavam um spin inteiro.

Já no ano de 1944, os físicos Leprince-Ringuet e L'héritier [16] relataram na Academia de Ciências francesa, a observação em eventos produzidos pela radiação cósmica, de uma partícula carregada positivamente, de massa aproximadamente igual a $990 m_e$.

Em 1946 e 1947, Rochester e Butler [17] relataram em suas observações de chuveiros penetrantes da radiação cósmica com câmaras de nuvens a existência de partículas instáveis mais pesadas do que o pión, que viriam posteriormente a serem chamados káons. Em uma de suas fotografias observaram um evento batizado como “evento V” devido a sua aparência, que foi por eles interpretado como devido ao decaimento de uma partícula neutra em duas outras, carregadas eletricamente. Análises posteriores revelaram que o decaimento observado poderia ser interpretado como $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. Igualmente, estes pesquisadores observaram decaimentos de partículas de massa semelhante, porém com carga elétrica, resultando em um múon e uma partícula neutra (não observada). A partícula observada por Rochester e Butler apresentava uma massa muito similar à da partícula anteriormente relatada por Leprince-Ringuet e L'héritier. Naquela época a observação de vários modos de decaimento de partículas de massas semelhantes gerou certa confusão, pois inicialmente a tendência era interpretar cada novo modo de decaimento como advindo de uma nova partícula, e não simplesmente como um decaimento alternativo de uma partícula que já tinha sido anteriormente observada.

Simultaneamente, o grupo de Bristol relatava a observação de um decaimento de uma partícula carregada pesada em três outras, também carregadas, e logo interpretadas com sendo píons.

Estava aberta a sessão de caça a outras partículas! Até o início da década de sessenta já eram conhecidos os quatro káons, de massa aproximada $495 \text{ MeV}/c^2$, a partícula η (549), ρ (770), ω (783), entre outras, todas elas bósons, ou seja, com spins inteiros. Ao longo dos anos muitas mais foram descobertas, e rapidamente percebeu-se que algumas delas tinham massas maiores que a massa do próton. A partir deste momento a designação coletiva do nome “méson” perdeu a sua caracterização original de partículas com massa intermediária entre a do elétron e a do próton, passando a caracterizar uma família de partículas que interagiam fortemente e que apresentavam spins inteiros. Igualmente, com a descoberta de partículas mais pesadas que o próton, com spins semi-inteiros e também interagindo fortemente, passou-se a designar esta família coletivamente com o nome “bárions”.

Em 1961, Murray Gell-Mann, e independentemente, Yuval Ne’eman, estudando os mésons e bárions conhecidos na época, chegaram a agrupar estes mésons e bárions em sub-famílias, cada qual caracterizada por um certo valor de spin. Surgiram, assim, o octeto de bárions (formado pelos oito bárions de spin $1/2$ de menor massa), o decuplete de bárions (formado pelos dez bárions de spin $3/2$ de menor massa) e o “octeto” de mésons (spin 0). Estas sub-famílias permitiram a visualização de simetrias nas diversas classes de partículas, culminando com o Modelo a Quarks, que Gell-Mann, e independentemente George Zweig, propuseram em 1964. Segundo este modelo, podia-se entender os misteriosos arranjos das partículas em sub-famílias considerando que tanto mésons, quanto bárions, eram formados por constituintes mais elementares, os quarks, e suas antipartículas, os antiquarks, todos eles férmions de spin $1/2$. Os mésons seriam estados ligados de um quark e um antiquark, os bárions, estados ligados de três quarks, e os antibárions, estados ligados de três antiquarks. Os trabalhos originais a respeito do Modelo a Quarks foram agrupados e publicados por Gell-Mann e Ne’eman em forma de um livro [18].

Neste modelo, o pión corresponde ao estado ligado quark-antiquark de menor energia: entrariam em sua constituição os quarks mais leves, o u e o d , da chamada primeira geração, com seus spins antiparalelos e em um estado caracterizado por um momento angular orbital zero. Desta forma, resultaria para o estado ligado correspondente um momento angular total nulo, ou seja, o spin do pión seria zero.

Os demais mésons poderiam ser interpretados como estados ligados quark-antiquark em que poderiam entrar quarks mais pesados, e/ou os spins dessas duas partículas fossem paralelos, e/ou as partículas estivessem em estados excitados, de momento angular orbital diferente de zero. Chega-se, assim, a uma verdadeira espectroscopia de mésons, e também bárions, em analogia à espectroscopia atômica, porém, em que cada estado excitado havia sido interpretado como uma nova partícula “elementar”.

Poder-se-ia agora pensar que o pión teria perdido, de certa forma, o seu status importante de mediador da interação forte, e passaria a ser apenas um entre muitos mésons. Tal impressão não corresponde à verdade, pois ele continua a ser o estado fundamental, de menor energia (massa), dos mésons e ainda hoje se fala em troca de píons.

Para exemplificar, vamos resumir uma descrição das forças entre os nucleons, como é vista atualmente, e como é, por exemplo, apresentado de maneira didática no livro de Samuel S. M. Wong [19].

Aplicando-se, então, a idéia original de Yukawa da troca simples de um pión à força nuclear, chegou-se à conclusão que se poderia explicar com ela apenas os dados experimentais de espalhamentos nucleon-nucleon relativos a distâncias internucleônicas maiores do que 2 fermi (fm). Tal fato não constitui, em princípio, nenhuma surpresa, já que Yukawa havia previsto uma massa para o pión exatamente utilizando um alcance médio para as forças nucleares entre 1 e 2 fm.

A distâncias menores, no entanto, contribuições de outras fontes além da troca de um único pión devem ser levadas em conta, a fim de interpretar os dados experimentais.

Na visão moderna, podem ser visualizadas três regiões de distâncias em que o comportamento do potencial nucleon-nucleon é razoavelmente distinto. Estas três regiões estão esquematizadas na figura 5.

A região de longo alcance ($r > 2 \text{ fm}$) é dominada pela troca de um único píon. Porém, é claro que, se a troca de um único píon é importante, não se pode, por alguma razão, excluir a possibilidade de trocas de dois ou mais píons, ou ainda, de mésons mais pesados do que os píons! O alcance da força associada à troca desses mésons de massas maiores seria então correspondentemente menor, e exatamente por esta razão, na região intermediária de distâncias ($1 \text{ fm} < r < 2 \text{ fm}$) as forças nucleares seriam descritas supondo troca de mais de um píon ou de outro méson mais pesado. Na parte central, dura, correspondente a distâncias menores que 1 fm , entrariam trocas de mésons ainda mais pesados, troca de múltiplos mésons além de efeitos da cromodinâmica quântica.

Sabe-se já desde o final da década de cinquenta, que a forma mais geral de se escrever o potencial nucleon-nucleon consiste em considerá-lo formado por uma soma de doze termos [20]. Nestes termos entrariam, além de funções dependentes da distância entre os nucleons, informações relativas a seus spins, isospins e momentos angulares orbitais. Uma vez escrita esta expressão mais geral, uma postura seria a de tentar ajustar, de maneira semi-empírica, as dependências dessas funções desconhecidas comparando com dados experimentais obtidos em espalhamentos próton-próton ou neutron-próton, ou ainda, indiretamente e com alguns recursos adicionais, neutron-neutron, a diferentes energias. Uma tal postura foi, basicamente, a seguida pelos grupos de Paris [21] e Bonn [22]. Tais grupos adotaram uma estratégia semi-empírica pois consideraram as partes do potencial devido à troca de um ou dois píons conhecida e utilizaram técnicas diferentes para ajustar os termos menos conhecidos do potencial, referentes à parte de curto alcance.

As considerações acima permitem ver que o papel importante desempenhado pelo píon no entendimento das forças nucleares de maneira nenhuma pode ser considerado terminado. Ainda, se conseguirmos, em determinadas condições de energias ou distâncias, tratar com a Cromodinâmica Quântica as interações entre quarks, mediante a troca de glúons, as forças entre os nucleons, das quais falamos acima, poderiam ser encaradas como as forças residuais de muitas forças quark-quark. Uma

analogia poderia ser feita com as forças entre átomos, para formar as moléculas. Em um nível elementar, tem-se forças eletromagnéticas entre os constituintes dos átomos e, quando se fala das moléculas, referimo-nos às forças de Van der Waals, que seriam as forças resultantes de muitas interações eletromagnéticas dos constituintes, ou seja, também uma força residual.

Portanto, o pión ainda mantém o seu papel de um dos atores principais no nosso cenário da Física das Partículas Elementares!

AGRADECIMENTOS:

Meus agradecimentos vão para os Professores Antonio Edson Gonçalves, Hiromi Iwamoto e Valdir Casaca Aguilera-Navarro, pela oportunidade de participar da III Semana de Física da Universidade Estadual de Londrina e apresentar uma palestra sobre o este tema.

Muita ajuda também tive do colega de departamento e amigo Professor Edison Hiroyuki Shibuya, a quem devo agradecer a fornecimento de muito material fotográfico e várias sugestões para o texto. Ao Professor Yoichi Fujimoto gostaria de agradecer em especial a utilização de transparências por ele apresentadas na 5a. Reunião Anual da Sociedade Brasileira dos Pesquisadores Nikkeis, em Águas de Lindóia, durante agosto de 1997.

Gostaria de agradecer também ao Sérgio Barroso, pela prestimosa ajuda com as figuras e à Juliana Fleitas, sempre solícita para acudir nos apuros.

Por último, gostaria de agradecer em especial ao Professor Lattes, meu professor durante muitos anos, de quem tanto aprendi, e que muitas vezes ouvi contando os acontecimentos sobre os quais procurei escrever. A ele dedico este texto, com as devidas escusas pelas imprecisões históricas que, porventura, eu tenha cometido.

FIGURAS

Figura 1a: Traços de partículas alfa emitidas de amostra radioativa colocada sobre a superfície de uma placa coberta com emulsão fotográfica comum, segundo registro de Kinoshita e Ikeuti, em 1915.

Figura 1b: Traços de partículas alfa emitidas de uma pequena amostra de sal de rádio, colocada sobre a superfície de uma placa coberta com uma emulsão nuclear de sensibilidade aumentada (emulsão Ilford tipo B). As partículas alfa são carregadas eletricamente e deixam o registro na emulsão na forma de linhas escuras formadas na emulsão revelada. O centro da mancha é de aproximadamente um décimo de milímetro [23].

Figura 2a: Fotomontagem dos primeiros eventos duplos de desintegração de um pión observado em emulsões nucleares por Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell [12]. A trajetória do pión se desenvolve de baixo, à esquerda, para cima, até o ponto A, ao alto, quando essa partícula decai em um múon e um neutrino. A trajetória do múon é vista desenvolvendo-se em sentido oposto ao do pión e o neutrino não é registrado. As emulsões nucleares dessa época ainda não eram sensíveis a partículas de ionização mínima e não registravam o traço do elétron proveniente do decaimento do múons. Pode-se observar nesta figura a formação de uma “estrela” de tório, em que três partículas alfa são emitidas. A emulsão é Ilford tipo C2, carregada com boro.

Figura 2b: Fotomontagem dos dois primeiros eventos duplos observados em emulsões nucleares por Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell [12]. O traço deixado pelo pión é visto no canto inferior esquerdo, indo até o ponto A, onde o pión decai em um múon e um neutrino. Este último não é detectado na emulsão. A trajetória do múon é registrada até o

ponto B, onde ele vem a decair. O elétron originado não deixa registro nessa emulsão, porque não há sensibilidade suficiente. A emulsão é Ilford tipo C2, carregada com boro.

Figura 3: Fotomontagem de um evento observado por Perkins em 1947, mostrando um méson negativo que vem a parar na emulsão, interagindo com o núcleo e provocando sua desintegração em três partículas carregadas [24]

Figura 4: Eventos em que píons decaem em múons, e estes, em elétrons. A emulsão, de fabricação Ilford do tipo G5, é sensível também à ionização provocada pelos elétrons, razão pela qual podem ser observados os três traços [25].

Figura 5: Esquema representando o comportamento do potencial entre dois nucleons, em função da distância entre eles [19].

BIBLIOGRAFIA GERAL

Muitos dos tópicos aqui abordados foram extraídos de relatos pessoais do Professor Cesar Lattes, reproduzidos nos dois volumes editados em comemoração ao seu sexagésimo aniversário : “Topics on Cosmic Rays - 60th Anniversary of Prof. C. M.G. Lattes”, vol.1,2- Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1984. No volume 2 encontram-se reproduzidos alguns dos trabalhos de Lattes, principalmente os citados aqui.

Também foram de grande valia os escritos do Professor Edison Hiroyuki Shibuya e Professor Yoichi Fujimoto, por ocasião da comemoração do cinquentenário da descoberta do píons pelo Prof. Lattes.

BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA

- [1] H. Yukawa, “Creativity and Intuition”, Kodansha International Ltd., Tokyo, 1973
- [2] H. Yukawa, Proc. Phys.-Math. Soc. Japan, 17 (1935) 48
- [3] C. D. Anderson, Phys. Rev. 43 (1933) 491
- [4] P.M.S. Blackett e G.P. Occhialini, Proc. Roy. Soc. A139(1933)699
- [5] S.H. Neddermeyer e C. D. Anderson, Phys. Rev., 51 (1937) 884
- [6] J. C. Street e E. C. Stevenson, Phys. Rev., 52 (1937) 1002
- [7] G. Wataghin, M.D. de Souza Santos, P. A. Pompeia, Phys. Rev. 57 (1940) 61 e 57 (1940) 339
- [8] S. Tomonaga e G. Araki, Phys. Rev. 58 (1940) 90
- [9] M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni, Phys. Rev. 68 (1945) 232, Phys. Rev. 71 (1947) 209
- [10] Y. Tanikawa, Progr. Theor. Phys. Kyoto, 2 (1947) 220 e S. Sakata e K. Inoue, Progr. Theor. Phys. Kyoto, 1 (1946) 102
- [11] R. E. Marshak e H. A. Bethe, Phys. Rev. 72 (1947) 506
- [12] C. M.G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell, Nature, 159 (1947) 694
- [13] C. M.G. Lattes, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell, Nature, 160 (1947) 453 (Parte

I) e 486(Parte II)

- [14] E. Gardner e C.M.G.Lattes, Science, 107 (1948) 270
- [15] J.Burfening, E. Gardner e C.M.G.Lattes, Phys. Rev. 75 (1949)382
- [16] L. Leprince - Ringuet e M. L'héritier , Comptes Rendus Acad. Sciences de Paris, séance du 13 Dec. 1944, página 618
- [17] G.D. Rochester C.C. Butler , Nature, 160(1947) 855
- [18] M . Gell-Mann e Y. Ne'eman , The Eightfold Way, New York, Benjamin, 1964
- [19] Samuel S.M.Wong, Introductory Nuclear Physics, Prentice-Hall International, Inc. 1990
- [20] Okubo e Marshak, Ann.Phys. 4 (1958)166
- [21] R. Vinh Mau, Mesons in Nuclei, edição M.Rho e D.H.Wilkinson, North-Holland, Amsterdam, 1979
- [22] R. Machleidt, K.Holinde, Ch. Elster, Phys. Rev. 149 (1987)1
- [23] F. Close, M.Marten e C. Sutton, "The particle explosion", Oxford University Press, 1987
- [24] D. H. Perkins, Nature, 159 (1947) 126
- [25] C. F.Powell, P. H. Fowler e D. H. Perkins, "The study of elementary particles by the photographic method", New York, Pergamon, 1959

FIGURAS

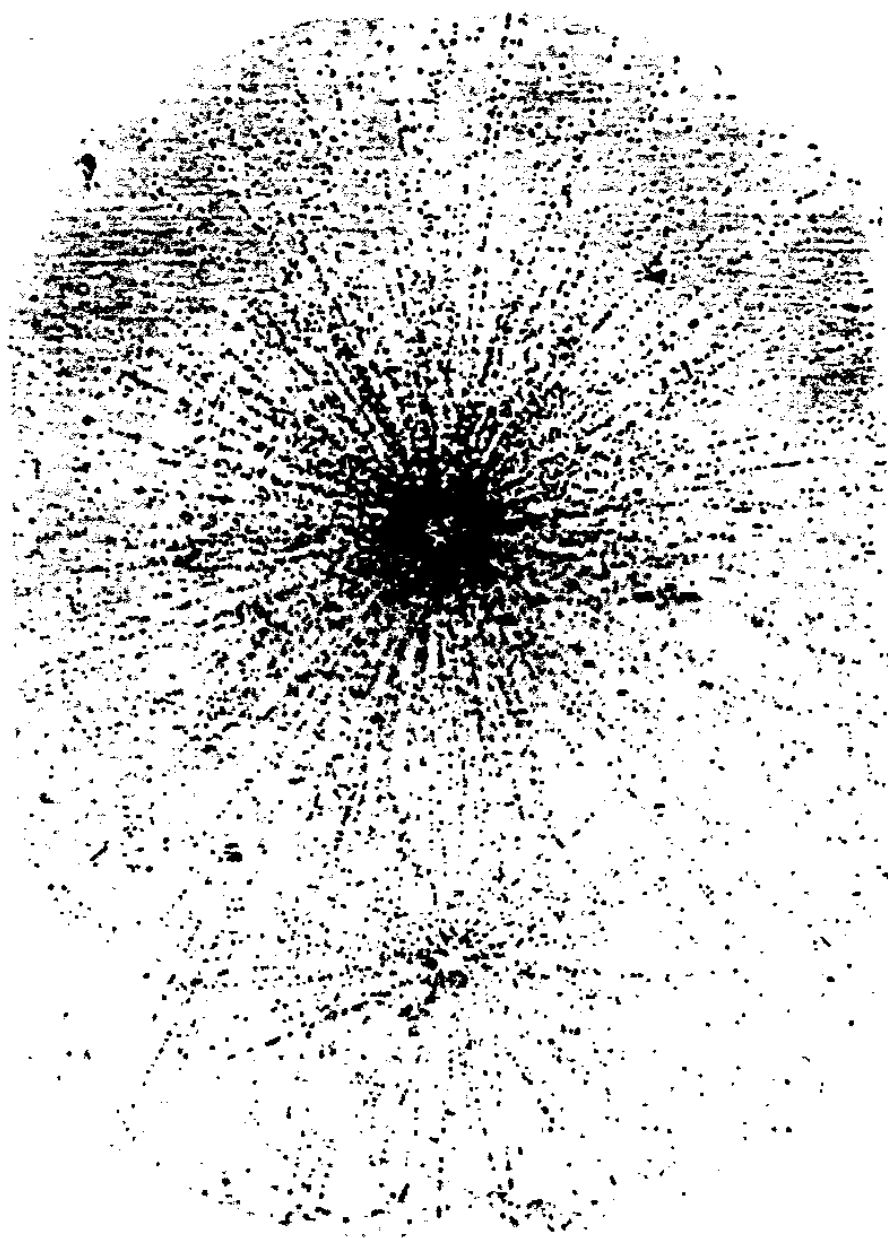


PLATE 1-5

Figura 1a: Traços de partículas alfa emitidas de amostra radioativa colocada sobre a superfície de uma placa coberta com emulsão fotográfica comum, segundo registro de Kinoshita e Ikeuti, em 1915.

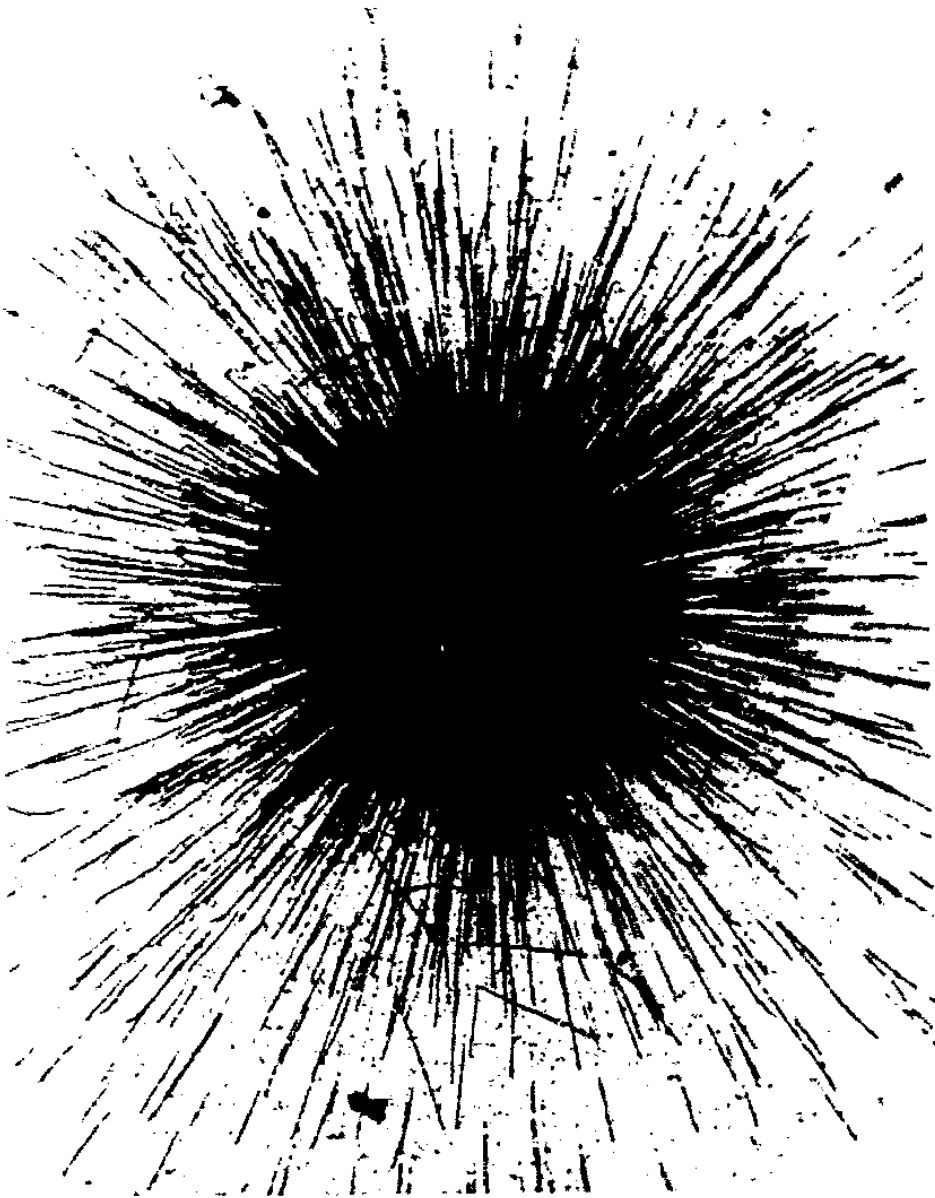


Figura 1b: Traços de partículas alfa emitidas de uma pequena amostra de sal de rádio, colocada sobre a superfície de uma placa coberta com uma emulsão nuclear de sensibilidade aumentada (emulsão Ilford tipo B). As partículas alfa são carregadas eletricamente e deixam o registro na emulsão na forma de linhas escuras formadas na emulsão revelada. O centro da mancha é de aproximadamente um décimo de milímetro [23].

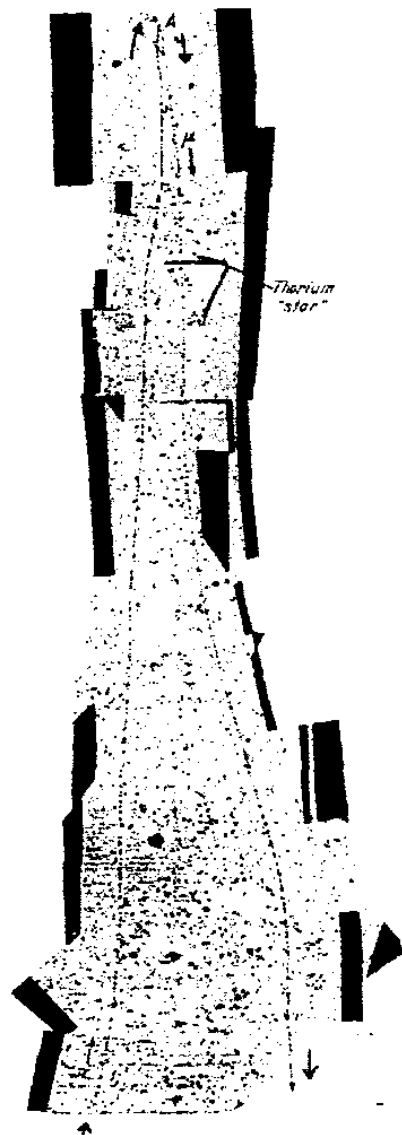


Figura 2a: Fotomontagem dos primeiros eventos duplos de desintegração de um pión observado em emulsões nucleares por Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell [12]. A trajetória do pión se desenvolve de baixo, à esquerda, para cima, até o ponto A, ao alto, quando essa partícula decai em um múon e um neutrino. A trajetória do múon é vista desenvolvendo-se em sentido oposto ao do pión e o neutrino não é registrado. As emulsões nucleares dessa época ainda não eram sensíveis a partículas de ionização mínima e não registravam o traço do elétron proveniente do decaimento do múons. Pode-se observar nesta figura a formação de uma “estrela” de tório, em que três partículas alfa são emitidas. A emulsão é Ilford tipo C2, carregada com boro.

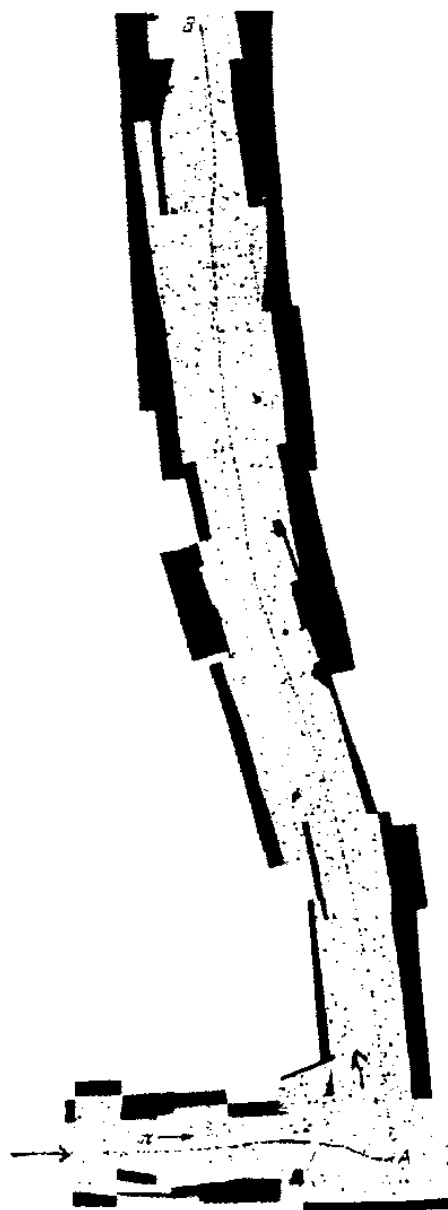


Figura 2b: Fotomontagem dos dois primeiros eventos duplos observados em emulsões nucleares por Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell [12]. O traço deixado pelo pión é visto no canto inferior esquerdo, indo até o ponto A, onde o pión decai em um múon e um neutrino. Este último não é detectado na emulsão. A trajetória do múon é registrada até o ponto B, onde ele vem a decair. O elétron originado não deixa registro nessa emulsão, porque não há sensibilidade suficiente. A emulsão é Ilford tipo C2, carregada com boro.

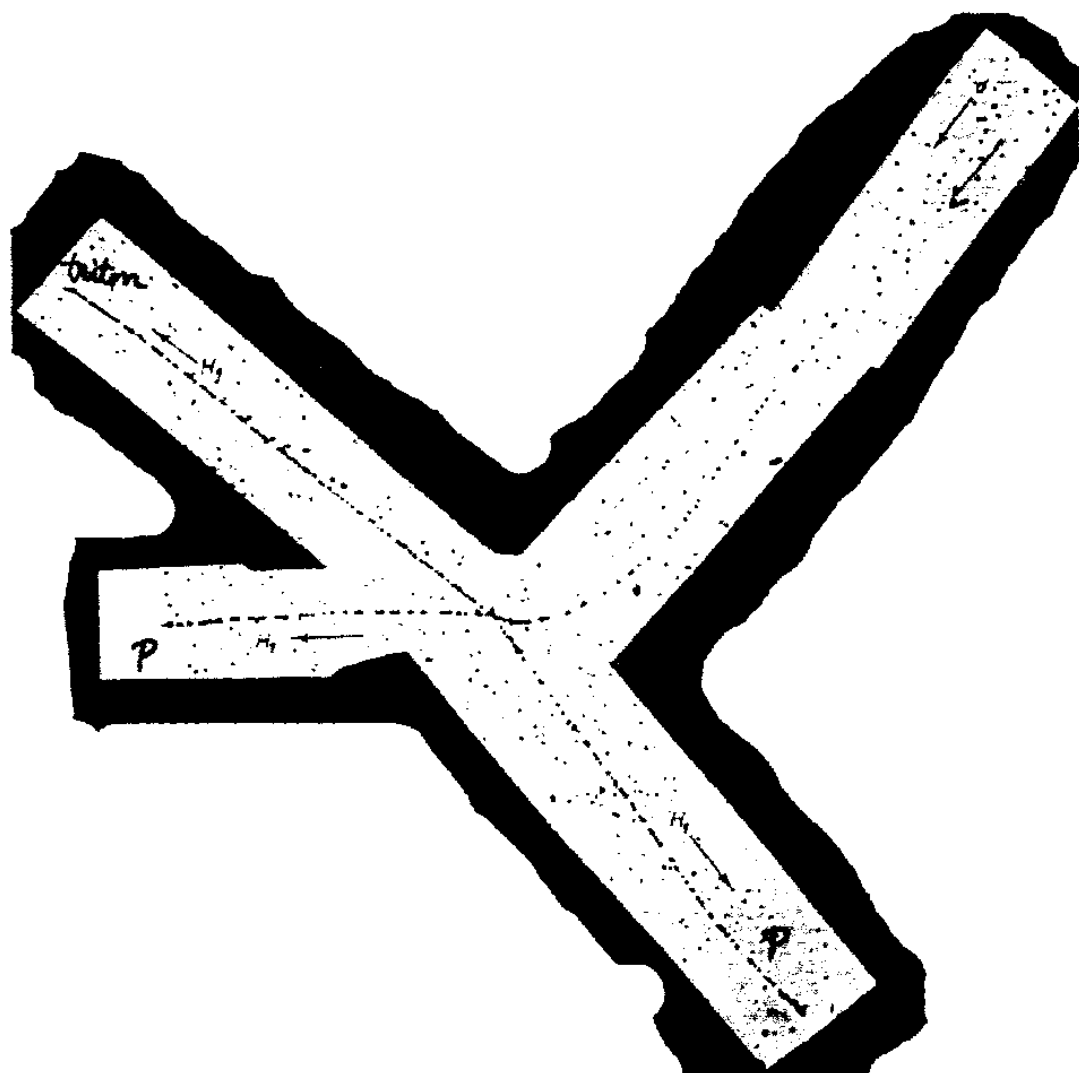


Figura 3: Fotomontagem de um evento observado por Perkins em 1947, mostrando um méson negativo que vem a parar na emulsão, interagindo com o núcleo e provocando sua desintegração em três partículas carregadas [24].

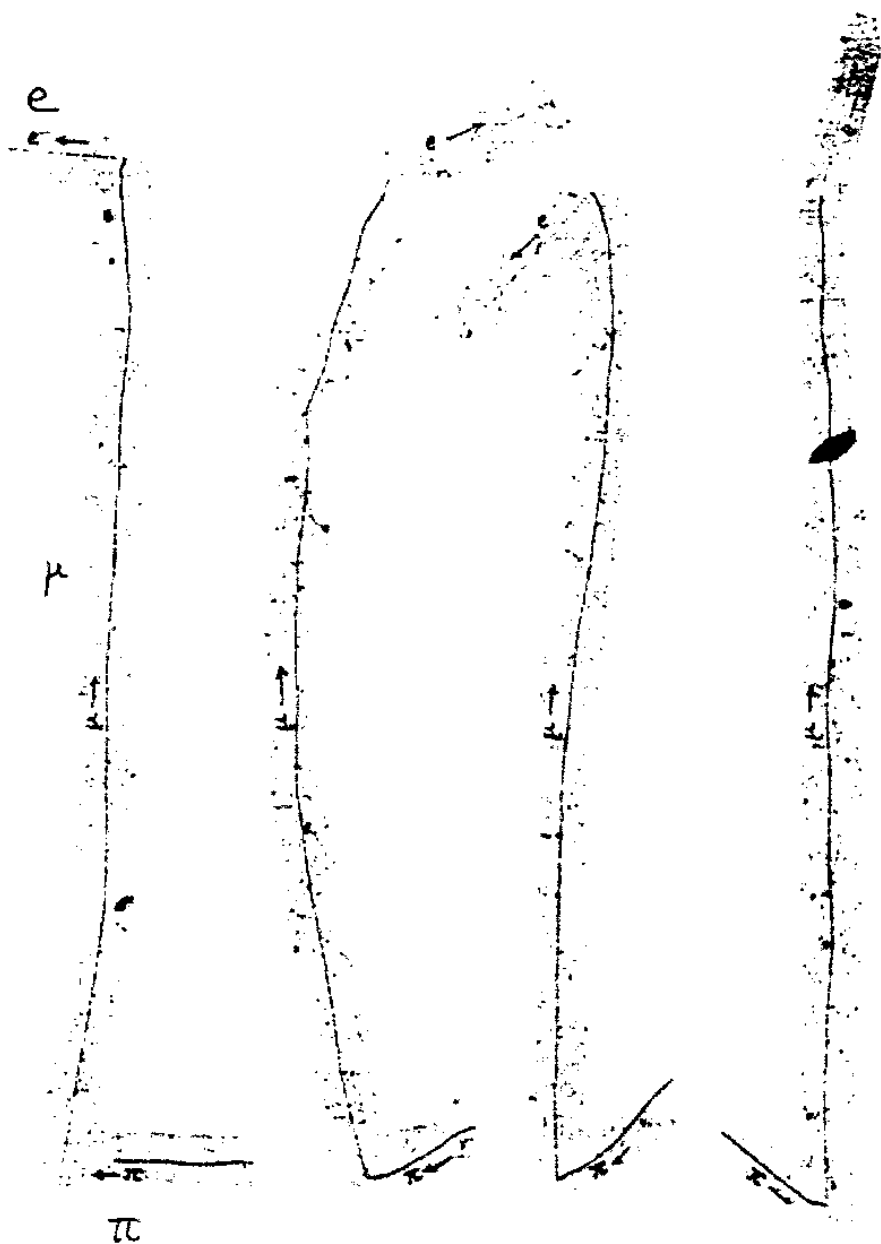


Figura 4: Eventos em que píons decaem em múons, e estes, em elétrons. A emulsão, de fabricação Ilford do tipo G5, é sensível também à ionização provocada pelos elétrons, razão pela qual podem ser observados os três traços [25].

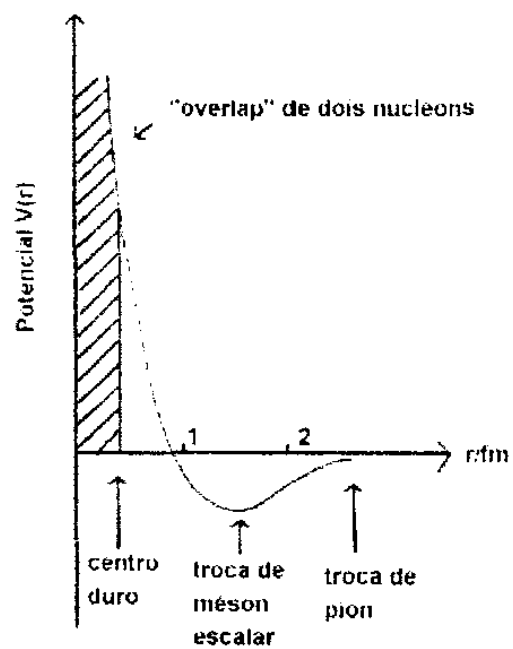


Figura 5: Esquema representando o comportamento do potencial entre dois nucleons, em função da distância entre eles [19].