

IFUSP/P-729
B.I.F.-USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PUBLICAÇÕES

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498 - SÃO PAULO - SP
BRASIL

IFUSP/P-729

13 JAN 1989



40 ANOS DE MESON π

E.W. Hamburger

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

(Trabalho Apresentado em Mesa Redonda na Reunião Anual da SBPC, São Paulo, julho de 1988)

Agosto/1988

40 ANOS DE MESON PI
E.W. Hamburger, Instituto de Física da USP
Trabalho Apresentado em Mesa Redonda na Reunião Anual da
SBPC, São Paulo, julho de 1988.

1. A DESCOBERTA DO PION

Há quarenta anos era anunciada a produção artificial de uma nova partícula atômica, o meson pi ou pion, em um laboratório na Califórnia, nos Estados Unidos. Essa partícula tinha sido observada pela primeira vez alguns meses antes, em um observatório no pico do Midi, na França, produzida por raios cósmicos. Um físico brasileiro, Cesar Lattes, participou dos dois experimentos. Vejamos os antecedentes e o significado do trabalho de física mais conhecido realizado por um brasileiro.

A física de partículas se iniciou no Brasil em 1934, quando o professor Gleb Wataghin foi trazido da Itália para fundar o Departamento de Física da nova Universidade de São Paulo. Além de dar aulas, Wataghin imediatamente iniciou um programa de pesquisa sobre raios cósmicos, - que são radiações extra terrestres que bombardeiam continuamente a Terra. Logo reuniu em torno de si um grupo de talentosos e entusiasmados jovens brasileiros com os quais e com Giuseppe Occhialini, também vindo da Itália, fez interessantes descobertas sobre essas radiações.

Os historiadores da ciência consideram quase um milagre o rápido surgimento da física em São Paulo após a chegada de Wataghin e Occhialini: em dois anos já eram publicados trabalhos significativos, em que apareciam os nomes dos primeiros físicos brasileiros: Mario Schenberg, Marcelo Damy, Paulo Bittencourt, Paulus Pompéia e um pouco mais tarde, Cesar Lattes, Oscar Sala, entre outros. Os trabalhos eram realizados em São Paulo (inclusive aproveitando o túnel da Av. 9 de Julho, quando em construção - o túnel servia de local protegido onde poucos raios cósmicos penetravam), em Campos do Jordão, onde a maior altitude fazia aumentar a quantidade de raios, e também em aviões da FAB. Os raios provocavam pequenas descargas elétricas em tubos de gás onde era aplicada uma alta voltagem (contadores Geiger-Mueller).

Quando a guerra terminava, Occhialini foi para a Inglaterra, em Bristol, onde colaborou com Cecil Powell para desenvolver métodos fotográficos para detectar as radiações. Pouco depois, Lattes também foi para Bristol, e os três acabaram identificando o meson em chapas fotográficas especiais expostas no pico do Midi, nos Pirineus. Na montanha os raios cósmicos são mais frequentes do que ao nível do mar, porque o ar atmosférico absorve a maior parte dos raios. As chapas que utilizaram eram bem mais grossas do que as usuais: a camada sensível de um filme fotográfico comum tem alguns milésimos de milímetro de espessura, enquanto os de Lattes, Occhialini e Powell eram umas

cinquenta vezes mais grossas. Powell e seus colaboradores tinham desenvolvido técnicas especiais para revelar filmes grossos.

As pequenas partículas eletricamente carregadas que atravessam o filme fotográfico provocam ionização dos átomos que encontram no caminho, e os grãos fotográficos que contêm estes átomos são modificados do mesmo modo como se tivessem sido expostos à luz. Aliás, a luz age sobre o material fotográfico do mesmo modo, ionizando os átomos. Uma partícula que atravessa o filme deixa um rastro de grãos que ficam pretos quando o filme é revelado. O filme mostra a trajetória por onde passou a partícula, que se chama o "traço" da partícula. Se a partícula tem carga elétrica grande, o traço é mais denso, com os grãos mais juntos uns dos outros; pelo aspecto do traço pode-se saber se a partícula tem carga de um elétron, como o elétron e o próton, ou se tem carga dupla, como a partícula alfa (v. figura).

As chapas do pico do Midi mostravam um raio cósmico de alta energia que sofre uma colisão nuclear dentro do filme: num ponto o traço do raio é interrompido e surgem vários traços saindo deste ponto, cada um representando uma partícula criada na colisão. Uma das partículas oriundas da colisão anda, cerca de um décimo de milímetro no filme e em seguida sofre outra colisão, em que ela desaparece e outras partículas são geradas. Esta partícula é o pion, como veremos adiante.

Lattes, Occhialini e Powell observaram em suas chapas diversos exemplos de traços que eram devidos à nova partícula, o "mesotron pi", hoje pion. A existência dessa partícula já fora prevista por Hideaki Yukawa no Japão. Entretanto havia ainda mistério: se o pion era produzido pelos raios cósmicos, deveria também ser possível produzi-lo nos grandes aceleradores de partículas que estavam sendo construídos justamente para isso. Entretanto, apesar da procura intensa, ninguém ainda tinha conseguido identificar um pion produzido em um acelerador.

No ano seguinte, 1948, Lattes viajou para Berkeley, na Califórnia, onde funcionava o maior ciclotron da época. Levou os seus conhecimentos de como identificar pions em filmes fotográficos e também alguns dos filmes especiais de Bristol. O ciclotron produzia partículas alfa de energia correspondente a 380 milhões de volts. O físico Eugene Gardner, de Berkeley, fizera as alfas colidir com um alvo de carbono, mas não conseguira comprovar a existência de pions. Logo após a chegada de Lattes verificou-se que os pions estavam sendo produzidos.

A descoberta do pion e sua produção artificial constituíram passos decisivos na física. Esclareceram a natureza das forças nucleares, levaram à construção de outros aceleradores e à descoberta de muitas outras partículas novas. Somente nos últimos anos foi achada uma teoria que classifica de um modo simples as diferentes

partículas ditas "elementares", como veremos na próxima seção.

2. AS PARTÍCULAS ELEMENTARES

Há milhares de anos homens e mulheres se perguntam do que é feito o mundo. Na Grécia antiga se acreditava que quatro eram os elementos de que tudo o mais é constituído: terra, água, ar e fogo. Na mesma época aparecia o atomismo, a idéia de que tudo é constituído de pequenas partículas (os átomos) em movimento. Essas idéias avançaram significativamente dois mil anos depois, no século 18, quando as reações químicas foram explicadas supondo que existem substâncias simples (formadas de átomos todos iguais entre si) e substâncias compostas (formadas de átomos diferentes). Descobriram-se dezenas de substâncias simples diferentes, os elementos químicos. Alguns elementos têm propriedades químicas parecidas, e foi possível classificá-los todos em uma "tabela periódica dos elementos". Todos os materiais que conhecemos são formados destes elementos, isto é, dos átomos destes elementos. Atualmente há mais de cem elementos identificados. O mundo é feito de trilhões de átomos e só existe uma centena de tipos de átomos diferentes. Esses átomos seriam os constituintes elementares últimos do universo - aliás a palavra átomo em grego significa "indivisível". Toda a matéria pode ser decomposta em átomos, mas estes seriam indivisíveis.

No fim do século passado J.J. Thomson percebeu que os átomos de qualquer elemento continham uma partícula de carga elétrica negativa, que foi chamada "elétron". O elétron é um constituinte universal de todos os átomos, que não são, portanto, indivisíveis. Poucos anos depois, o sucessor de Thomson em Cambridge, na Inglaterra, Rutherford, descobria que os átomos são formados cada um de um núcleo central de carga elétrica positiva, e onde está concentrada quase toda a massa do átomo, cercado de elétrons cuja carga negativa total compensa a carga positiva do núcleo. A massa total dos elétrons é menos de um milésimo da massa do núcleo, e o raio do núcleo é somente um décimo milésimo do raio do átomo. Quase todo o volume do átomo corresponde à região onde se movem os elétrons, o núcleo quase não ocupa volume, embora tenha quase toda a massa.

Em 1913, pouco depois da descoberta do núcleo atômico, Niels Bohr da Dinamarca detalhou o modelo de Rutherford para os átomos e previu corretamente muitas de suas propriedades, inclusive a tabela periódica. O número de elétrons no átomo é que define a que elemento o átomo pertence, e quase todas as propriedades do elemento são determinados por este número.

Nesta altura os constituintes fundamentais ou elementares da matéria (ou dos átomos) eram os elétrons e os núcleos. Mas os núcleos não são indivisíveis, são formados de partículas menores ainda: os prótons e os neutrons. O próton tem carga elétrica positiva e é o núcleo do átomo

mais leve que existe, do gás hidrogênio. O neutron só foi descoberto em 1932; é uma partícula eletricamente neutra (daí o nome) e cujas outras propriedades são quase iguais às do próton.

Agora os constituintes elementares da matéria, de todos os átomos, eram os elétrons, os prótons e os neutrons. Os núcleos dos átomos são formados de prótons e neutrons, entre os quais agem forças muito intensas. Foi nesta época que Yukawa no Japão lançou a hipótese da existência da partícula que viria a ser chamada pion. Para entender a previsão de Yukawa precisamos falar da luz e da sua partícula, o fóton.

3. O FÓTON: UM LAMPEJO DE LUZ

Há um século atrás foi efetuada uma das mais belas sínteses de toda a ciência: James Maxwell mostrou que eletricidade, magnetismo e luz são três manifestações de uma só coisa, o campo eletromagnético. Sempre que existem cargas elétricas em movimento, há campos elétricos e magnéticos em volta, que se propagam com uma velocidade altíssima, 300.000 quilômetros por segundo. A luz nada mais é do que um campo eletromagnético de frequência enorme, e que se propaga com essa velocidade.

A teoria de Maxwell descreve bem os fenômenos eletromagnéticos e óticos. Ondas eletromagnéticas são campos elétricos e magnéticos alternados (como corrente alternada) e de grande frequência. Para frequências altíssimas trata-se de raios gama, para frequências um pouco mais baixas são raios X, mais baixo ainda é luz ultravioleta, depois luz visível, em seguida luz infravermelha, e para frequências ainda menores microondas e menores ainda ondas de rádio. Todas essas radiações têm a mesma natureza - campos eletromagnéticos que se propagam - e diferem apenas pela sua frequência e comprimento de onda.

A teoria de Maxwell descreve a produção de campos eletromagnéticos continuamente enquanto houver cargas elétricas em movimento. Nos primeiros anos deste século dois físicos na Alemanha, Max Planck e Albert Einstein, perceberam que a emissão de radiação eletromagnética não pode ser contínua, mas deve se dar descontinuamente: em vez de um fecho contínuo de luz, são muitos lampejos descontínuos. Em um gás incandescente, como há na lâmpada de neon, de sódio ou de mercúrio, cada átomo emite um lampejo de luz durante um tempo curtíssimo. Como são muitos e muitos átomos, não percebemos os lampejos de cada átomo, mas só o efeito conjunto de todos eles, que parece contínuo, embora na realidade não seja. Einstein chamou de "fóton" a luz emitida em cada lampejo: é um campo eletromagnético que se propaga no espaço com altíssima velocidade e passa por um ponto em um tempo curtíssimo. Esses fótons parecem partículas: têm energia e quantidade de movimento e se deslocam de um ponto para outro. Diferem de outras partículas porque nunca estão parados: estão sempre em

movimento, e sempre com a máxima velocidade possível, de trezentos mil quilômetros por segundo. Não se conhece nenhuma velocidade no mundo maior do que essa, e acredita-se mesmo que não é possível existir velocidade maior. Somente partículas que não teriam massa se estivessem em repouso podem alcançar essa velocidade limite: partículas que, quando paradas, têm massa, como o próton e o elétron, nunca alcançam a velocidade limite, mesmo quando tem energia muito grande.

O nosso elenco de partículas elementares se enriquece, portanto, de mais uma: além de elétron, próton e neutron, também o fóton, cuja existência Einstein inferiu já em 1905, embora a comprovação experimental definitiva só ocorreu em 1923. A descoberta do fóton levou a uma reformulação da teoria eletromagnética de Maxwell, e se percebeu que a força entre duas cargas elétricas pode ser imaginada como sendo devida à troca, entre as partículas, de fótons emitidos por uma e absorvidas por outra. Para conciliar a imagem de um campo eletromagnético contínuo, ocupando todo o espaço próximo às cargas, com a imagem de fótons cruzando em alta velocidade de um lado para outro, foi possível construir uma imagem composta, contendo os dois aspectos, com a hipótese de emissão e absorção de fótons a toda hora pelas partículas carregadas.

4. OS MESONS

Foi esta imagem de fótons sendo lançados de um lado para outro, causando com isto a força elétrica, que inspirou Yukawa, em 1935 quando ele lançou a hipótese da existência do pion (que não tinha ainda este nome). Se a força entre elétron e próton no átomo pode ser imaginada como devida à troca de fótons, então a força entre neutron e próton no núcleo atômico deve poder ser representada como devida à troca de outra partícula. Em outras palavras, assim como existe uma partícula associada às forças eletromagnéticas - o fóton - deve haver outra partícula associada às forças nucleares que agem entre neutron e próton. As forças nucleares são muito mais intensas do que as eletromagnéticas (as explosões das bombas nucleares nos mostram isso de forma terrível) e também diferem das eletromagnéticas por terem um alcance muito curto, isto é, por agirem somente em distâncias muito curtas, quando as partículas (neutron e próton) estão muito próximas uma da outra, como dentro do núcleo. Yukawa deduziu dessas características que a partícula associada às forças nucleares deveria ter massa de cerca de um sétimo da massa do próton.

Por outro lado, alguns anos antes, outro físico teórico, Paul Dirac, na Inglaterra, tentando reconciliar a existência do fóton e a teoria da relatividade com a teoria eletromagnética, tinha chegado à conclusão que talvez existisse, além do elétron, outra partícula quase igual ao elétron em tudo exceto que sua carga elétrica seria de sinal

positivo (o elétron é negativo). A especulação de Dirac foi confirmada muito rapidamente (1931) por Carl Anderson na Califórnia: ele observara raios cósmicos que pareciam ser "elétrons positivos", hoje chamados positrons. Mais uma partícula elementar para a nossa lista.

O mesmo Carl Anderson descobriu em 1936 uma outra partícula desconhecida, cuja massa era aproximadamente um sétimo da do próton: parecia ser a partícula prevista por Yukawa. Entretanto as propriedades do "Mesotron" de Anderson (assim chamada porque tinha massa intermediária entre elétron e próton - "meso" em grego significa "meio"), não eram as previstas por Yukawa, pois não apareciam as forças intensas previstas entre a nova partícula e os núcleos atômicos formados de neutrons e prótons. Durante dez anos, até 1947, a situação ficou confusa. A descoberta de Lattes, Occhialini e Powell esclareceu a questão: o pion é a partícula prevista por Yukawa, ao passo que a partícula descoberta por Anderson, embora tenha massa parecida com a do pion, é outra partícula, cujas propriedades são semelhantes às do elétron, só que é mais pesada. A partícula de Anderson hoje se chama meson mu (letra grega μ) ou muon.

Os anos seguintes e a década de cinquenta foram de grande entusiasmo na física das partículas. Novos aceleradores entravam em operação e produziam partículas em maior abundância do que nos raios cósmicos. Assim foram descobertas muitas novas partículas em aceleradores. Entretanto as novas descobertas, em vez de esclarecer, complicavam mais a cabeça dos cientistas, que não compreendiam como se relacionavam as novas partículas.

Lattes voltou ao Brasil após a experiência em Berkeley e fundou, no Rio de Janeiro, juntamente com José Leite Lopes, Jayme Tiomno e outros, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, que dividiu com a Universidade de São Paulo as atividades de pesquisa em física no Brasil nos anos seguintes, até o surgimento de outros laboratórios a partir de 1960. As pesquisas de partículas foram continuadas com raios cósmicos nos Andes bolivianos, no laboratório do Monte Chacaltaya, a cinco mil metros de altura.

5. CLASSIFICAÇÃO DAS PARTICULAS

A fig.1 mostra um diagrama das partículas elementares conhecidas em diferentes épocas. Em 1913 eram o fóton γ , o elétron e^- e o próton p . Vinte anos depois, em 1933 já havia, além desses, o neutron n , o positron e^+ e dois neutrinos ν , $\bar{\nu}$, estes de massa nula, como o fóton. Até 1947 foram identificados ainda os mesons μ negativo μ^- e positivo μ^+ , os pions, que podem ter carga elétrica positiva, negativa ou nula - π^+ , π^- e π^0 (o π^0 foi observado bem mais tarde que os π^+ e π^-), e as antipartículas do próton e neutron, indicados com \bar{p} e \bar{n} .

Em 1961 a figura mostra um quadro já bem mais complexo. Os mesons K ou Kaons - K^- , K^0 , K^+ - e o lambda, Λ , ainda foram descobertos em raios cósmicos. As

7

outras partículas, Σ^- , Σ^0 , Σ^+ e Csi, Ξ^- , Ξ^0 , foram produzidas em aceleradores. Nesta época as partículas eram classificadas em 1) bosons, que são intermediárias de campos de força (eletromagnético para o fóton, nuclear para os pions), 2) leptons e antileptons (mesons, elétrons e neutrinos) e 3) bárions e antibárions que são os prótons e nêutrons e as partículas mais pesadas, lambdas, sigmas e csis.

A classificação de todas as partículas em duas grandes chaves, bosons e férmions (que incluem os leptons e bárions e suas antipartículas) se refere às suas propriedades de rotação e a seu comportamento quando muitas partículas estão presentes simultaneamente.

Desde então várias outras partículas foram acrescentadas à tabela, que hoje pode ser representada como na fig.2. Várias categorias novas aparecem. A categoria bosons é subdividida em mesons e bosons de escala ("gauge" em inglês), os quais foram descobertos em 1979 e 1983: as partículas W^+ , W^- e Z têm cada uma massa de quase cem prótons e têm vida extremamente curta - desintegram-se logo que formadas; essas partículas são responsáveis pelas forças fracas que agem entre elétrons, neutrinos e prótons. As forças fortes entre nêutrons e prótons, mediadas pelos pions, acredita-se agora serem devidas à troca de gluons g, que existiriam em oito formas diferentes, com massa zero, como o fóton. Acredita-se que existam os gluons, mas nunca foram observados diretamente.

Uma categoria nova, os quarks, teve sua existência inferida a partir de 1964. Apesar de nunca ter sido observada diretamente, é quase certo que exista de fato. Há seis tipos de quarks e seis tipos de antiquarks, chamados (em parentesis o nome em inglês) cima (up) u, \bar{u} ; baixo (down) d, \bar{d} ; estranho (strange) s, \bar{s} ; charme (charm) c, \bar{c} ; fundo (bottom) b, \bar{b} e alto (top) t, \bar{t} .

Os mesons agora incluem, além de pions e kaons, mais quatro partículas de massas duas a dez vezes a do próton; J/ψ (uma partícula com símbolo composto), D^0 , D^+ e Y (upsilon).

Os leptons incluem agora, além dos pares elétron-positron e μ^- , μ^+ o par de tauons j^+ , j^- com massa dezessete vezes a do muon. Além disso cada um desses pares tem associado um par neutrino-antineutrino (até 1962 acreditava-se que um único tipo de neutrino estava associado a elétrons e muons).

Na tabela de bárions acrescentamos o omega menos, (cuja descoberta em 1983 significou uma confirmação importante da teoria que previa os quarks) e o lambda charmoso, Λ_c .

A figura mostra somente as principais partículas conhecidas, aquelas que de algum modo podem ser chamadas de elementares.

Existem muitas outras, observadas nos laboratórios, que são consideradas como outros estados das

8

partículas da tabela. Por exemplo aparecem também "estados excitados" do próton e do neutron em energias mais altas.

Hoje os mesons são considerados como sendo formados por pares de quark-antiquark, que se atraem dentro do meson por absorção e emissão de gluons. Por exemplo, o pion positivo é a combinação ud, o pion negativo é du, e o pion neutro é uu e dd. A rigor, portanto, os mesons não deveriam mais ser considerados "elementares".

Também os bárions são considerados como compostos de quarks unidos por gluons, mas neste caso são três quarks ou antiquarks em cada bárion. Por exemplo, o próton é a combinação uud, o neutron é ddu, o sigma positivo é uus, e assim por diante.

As únicas partículas "realmente elementares" seriam então os leptons, os quarks e os bosons de escala.

A maioria das partículas da tabela é instável, isto é, se desintegra em fração de segundo. Mesmo partículas "realmente elementares" se decompõem, como o meson, o tau, o W e o Z, cada um dos quais existe somente durante fração de milionésimo de segundo. Na tabela da fig.2 assinalamos em negrito as partículas estáveis: elétron, pósitron, neutrinos, fóton, gluons e o próton.

A estabilidade do próton é um ponto crucial das teorias de partículas: várias teorias prevêm que o próton não é estável, mas que ele deve se desintegrar após muitos anos, transformando-se em partículas mais leves, como pions, elétrons e fótons. Entretanto até hoje não há nenhum indício experimental de que o próton possa se desintegrar. O universo tem uma idade, desde a grande explosão inicial (em inglês, "big bang") estimada em 20 bilhões de anos; já se sabe que o próton pode perdurar mais de mil bilhões de bilhões de vezes a idade do universo! Talvez as teorias precisem ser modificadas.

As descobertas de Lattes em colaboração com os físicos ingleses, italianos e americanos marcaram época. Nenhuma outra investigação de um físico brasileiro desde então teve tanto impacto sobre o desenvolvimento da ciência. Colocou um padrão de comparação alto para os trabalhos posteriores.

REFERENCIAS

A exposição "40 anos de Meson Pi" organizada por Maria Regina Kawamura e Ernst W. Hamburger (IFUSP) mostra em painéis fotográficos muitos dos assuntos tratados neste artigo. Livros recentes para referência incluem "The Particle Explosion" por Frank Close, Michael Marten and Christine Sutton, Oxford University Press, 1987, em bom nível de divulgação; "40 Years of Particle Physics" por B. Foster e P.H. Fowler, editora Adam Hilger, Bristol, que são atas de uma conferência internacional sobre o tema realizado em Bristol, Inglaterra, em 1987; "Inward Bound" por Abraham Pais, Clarendon Press, Oxford, 1986.