

Artigos Gerais

A física dos quarks e a epistemologia (*Quark physics and epistemology*)

Marco Antonio Moreira¹

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Recebido em 27/6/2006; Revisado em 23/11/2006; Aceito em 28/11/2006

O objetivo deste trabalho é o de apresentar, conceitualmente, a física dos quarks como um assunto acessível e motivador que ilustra, de maneira inequívoca, a relação teoria e experimentação em física. Conta-se a história dos quarks e utiliza-se essa história para exemplificar questões epistemológicas. Ao longo dessa narrativa, em nenhum momento faz-se uso de imagens de partículas elementares porque acredita-se que, nessa área da física, as imagens apenas reforçam obstáculos representacionais mentais que, praticamente, impedem a aprendizagem significativa.

Palavras-chave: física dos quarks, epistemologia, ensino de física.

The purpose of this paper is to present, conceptually, the physics of quarks as an accessible and motivating subject that shows unequivocally the relationship between theory and experimentation in physics. The quarks' story is told and this story is used to exemplify epistemological issues. Throughout this narrative images are never used because of the author's belief that in this area of physics the use of images may just reinforce mental representational obstacles that can almost hinder meaningful learning.

Keywords: quark physics, epistemology, physics education.

1. Introdução

Pelo que sabemos hoje, léptons e quarks são as partículas fundamentais constituintes da matéria.

Léptons são partículas de spin² $1/2$, sem cor,³ que podem ter carga elétrica ou não (neutrinos). O elétron é o lépton mais familiar. Os demais léptons são o múon, o tau e os três neutrinos (neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau). Seriam, então, seis os léptons, mas para cada um deles existe um antilépton,⁴ de modo que o número total de léptons deve ser igual a doze.

Léptons parecem ser partículas verdadeiramente elementares, quer dizer, aparentemente não têm estrutura interna. As partículas que têm estrutura interna são chamadas hádrons – vem do grego, de *hadros* que significa maciço, robusto, forte. Essa estrutura interna é constituída de quarks. Há dois tipos de hádrons: os bárions, formados por três quarks ou três antiquarks,

e os mésons, formados por um quark e um antiquark. Prótons e nêutrons são exemplos de bárions.

Assim como os léptons, quarks parecem ser partículas verdadeiramente elementares. Por isso dissemos, no início, que a matéria é constituída fundamentalmente por léptons e quarks.

Quarks têm carga elétrica fracionária, $(+ 2/3)e$ para alguns tipos e $(- 1/3)e$ para outros, mas nunca foram detectados livres, estão sempre confinados nos hádrons. Além disso, as combinações possíveis de quarks e antiquarks para formar hádrons são tais que a carga da partícula resultante é sempre um múltiplo inteiro de carga elétrica (e) do elétron. Quer dizer, o quantum da carga elétrica continua sendo a carga do elétron (e) mesmo que os quarks tenham carga fracionária.

Mas os quarks têm outras propriedades, e uma história muito interessante do ponto de vista epistemológico. O objetivo deste trabalho é o de apresentar tais propriedades e contar um pouco dessa história.

¹E-mail: moreira@if.ufrgs.br.

²Spin é o momentum angular intrínseco de uma partícula. O spin das partículas elementares é sempre um número inteiro (0, 1, 2, 3,...) ou meio inteiro ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) de \hbar ($\hbar/2\pi$ onde $h \cong 6,6.10^{-34}$ J.s é a chamada constante de Planck).

³Cor é uma propriedade da matéria, assim como carga elétrica também é uma propriedade da matéria. Não tem nada a ver com significado de cor na óptica ou no cotidiano. Algumas partículas têm essa propriedade outras não. Léptons não têm cor, são “brancos”.

⁴Antilépton é a antipartícula do lépton. Uma antipartícula tem a mesma massa e o mesmo spin da partícula em questão, porém carga oposta. Não são, portanto, partículas completamente diferentes. O antieletron, por exemplo, é o pósitron ou elétron positivo, tem a mesma massa e o mesmo spin do elétron, porém sua carga elétrica é positiva. Analogamente, quarks e antiquarks não são partículas totalmente diferentes.

1.1. Antes dos quarks: múons, mésons e outros hádrons

No começo dos anos trinta do século passado, a estrutura do átomo estava bem estabelecida e a estrutura do núcleo estava sendo muito investigada. Acreditava-se que os componentes básicos da matéria seriam elétrons, prótons, nêutrons e neutrinos – postulados por Wolfgang Pauli, em 1931, para explicar uma perda anômala de energia no decaimento⁵ de nêutrons, e detectados diretamente apenas em 1956. O nêutron, detectado em 1932, havia sido sugerido um pouco antes para explicar a massa nuclear. Antes, pensava-se que o núcleo poderia ser constituído de prótons e elétrons, com excesso de prótons para explicar sua carga positiva. Contudo, medições do spin nuclear descartaram essa possibilidade. No caso do núcleo de nitrogênio, por exemplo, seriam necessários 14 prótons para dar a massa nuclear e 7 elétrons para dar a carga líquida desse núcleo. Mas esse número total ímpar de partículas é inconsistente com o número par necessário para explicar o spin inteiro resultante das medições. Porém, se 7 elétrons e 7 prótons fossem substituídos nesse modelo por 7 nêutrons, a massa e a carga seriam as mesmas de antes e o spin inteiro seria explicado se o spin do nêutron fosse $\hbar/2$ idêntico ao do próton.⁶

Mas a hipótese e a detecção do nêutron colocaram o problema da estabilidade do núcleo: sendo este composto de prótons e nêutrons, como reconciliar a existência de um grande número de prótons, particularmente nos elementos pesados, em um espaço tão pequeno? A repulsão elétrica entre eles seria tão grande que levaria o núcleo a explodir.

Entretanto, em 1935 Hideki Yukawa propôs a existência de uma nova partícula que seria a mediadora da interação que manteria nêutrons e prótons coesos no núcleo. A interação entre prótons e nêutrons deveria ser mediada por alguma partícula, ou seja, prótons e nêutrons interagiriam trocando uma partícula. Esta partícula foi denominada méson π , ou pión. Um pión poderia ser emitido por um nêutron e absorvido por um próton, ou vice-versa, fazendo com que o nêutron e o próton exercessem uma força um sobre o outro. Essa outra força foi chamada de força nuclear e a correspondente interação de interação forte.

Pela previsão teórica de Yukawa, o pión seria mais pesado do que o elétron e mais leve do que o próton. Portanto, ao passar através de uma câmara de bolhas onde houvesse um campo magnético deveria ter uma trajetória menos curva do que a de um elétron, porém mais encurvada do que a de um próton.

Em 1936, os físicos C.D. Anderson e S.H. Neddermeyer encontraram tal trajetória em uma câmara de bolhas, porém a partícula que a havia deixado não era

exatamente a prevista por Yukawa e não era mediadora da força entre prótons e nêutrons (força forte). Tratava-se de outra partícula, que foi chamada de múon, bastante semelhante ao elétron porém 200 vezes mais pesada. A detecção dessa partícula foi um tanto inesperada e permaneceu não explicada por cerca de 40 anos.⁷ O mesmo físico C.D. Anderson havia detectado no *Caltech* (California Institute of Technology), em 1932 (o mesmo ano da detecção do nêutron), juntamente com P. Blackett, na Inglaterra, a primeira antipartícula, o pósitron, ou antieletron. Antipartículas haviam sido previstas por Paul Dirac em 1928. Anderson e Blackett ganharam o Prêmio Nobel alguns anos depois.

A partícula de Yukawa, o méson π ou pión, foi finalmente detectada, em 1947, com a massa por ele prevista, em um laboratório na Universidade de Bristol, em emulsões fotográficas sobre as quais incidiam partículas cósmicas. Em 1948, mésons π^+ e π^- foram produzidos em aceleradores de partículas, na Universidade de Berkeley, e em 1950 foi produzido o méson π^0 , também em colisões provocadas em aceleradores. O brasileiro César Lattes (1924-2005) teve um papel destacado na descoberta do méson π . Para os brasileiros, foi ele quem descobriu o pión, em Bristol, em 1947. Mas para outros⁸ foi C.F. Powel, físico inglês, chefe do laboratório onde Lattes fazia seus experimentos. Também a produção artificial de mésons π no acelerador da Universidade de Berkeley, no ano seguinte, foi obra de Lattes juntamente com o norte-americano Eugene Gardner. Mas quem ganhou o Nobel pelo pión, em 1949, foi Yukawa que o previu corretamente anos antes. De qualquer forma, Lattes é o brasileiro que já esteve mais perto da conquista do Nobel de física.

Nessa época, eram então conhecidas as seguintes partículas: elétrons, prótons, nêutrons, neutrinos, pósitrons, múons e pions. No entanto, à medida que continuaram as pesquisas com raios cósmicos e aceleradores de partículas, o número de partículas proliferou e começaram as tentativas de organizá-las em famílias com propriedades comuns.

Uma dessas classificações é a mencionada no início deste texto: a dos léptons (como os elétrons e os neutrinos) que não experimentam a interação forte (força nuclear) e os hádrons que a experimentam; hádrons se subdividem em duas subcategorias, a dos mésons (como o pión) e a dos bárions (como o próton). Nesta classificação pode-se considerar que o critério básico é o peso. As partículas mais pesadas, como o próton e o nêutron, são chamadas hádrons, subdivididas em bárions e mésons (peso médio) e as mais leves, como o elétron, são denominadas léptons – do grego, *leptos* que significa leve, fino, delgado. Tal critério, no entanto, é anacrônico. Não é exatamente o peso que distingue

⁵Decaimento pode ser interpretado como a passagem de um estado instável para outro mais estável.

⁶Ref. [5] p. 21

⁷Ref. [5] p. 51

⁸E.g., Ref. [5], p. 51.

hádrons e elétrons, mas sim o fato de experimentarem ou não a interação forte, como foi dito no início do parágrafo.

Contudo, a população de partículas continuou a crescer e uma nova maneira de organização se tornou necessária.

1.2. A classificação octal

Em 1960-61, Murray Gell-Mann, um físico do *Caltech*, e Yuval Ne'eman, um físico do *Imperial College* de Londres, desenvolveram, independentemente, uma classificação que foi considerada a primeira tentativa bem sucedida de evidenciar a conexão básica existente entre partículas de diferentes famílias.

Eles verificaram que muitas partículas conhecidas podiam ser agrupadas em famílias de oito partículas com características similares. Todas as partículas dentro de uma família tinham spin e número bariônico⁹ iguais, e todas tinham aproximadamente a mesma massa. Muitos hádrons podiam ser agrupados em conjuntos de oito. Essa maneira de classificar partículas foi chamada de classificação octal.¹⁰

De certo modo, eles fizeram para as partículas elementares o que Mendeleev fez cerca de um século antes para os elementos químicos: criaram uma tabela periódica.

Antes de passarmos a um exemplo dessa classificação, é preciso falar em estranheza. Nos estudos com raios cósmicos a velocidade de decaimento de certas partículas não correspondia às previsões teóricas e, além disso, tais partículas tinham a peculiaridade de serem sempre produzidas em pares. Eram consideradas partículas *estranhas*.¹¹

Murray Gell-Mann, o mesmo físico que mais tarde proporia a classificação octal, sugeriu, em 1953, que certas partículas subatômicas teriam uma propriedade chamada estranheza. É uma propriedade que governa a velocidade com que elas decaem.

A estranheza é uma propriedade da matéria, análoga à carga elétrica, que algumas partículas têm e outras não.

Estranho talvez seja o nome estranheza. Mas é apenas uma questão de nome. Poderia ser outra a palavra que representasse tal propriedade. Carga elétrica também é uma propriedade que não se sabe exatamente o que é mas sabe-se que algumas partículas têm carga

elétrica, outras não.¹² Mas admitindo que existe tal propriedade, é possível explicar, modelar, prever vários processos físicos. Analogamente, há outras propriedades da matéria que não sabemos exatamente o que são, mas que admitindo sua existência os físicos podem, por exemplo, prever o resultado de certos processos. A suposição da estranheza permitiu aos físicos prever, com sucesso, se determinadas partículas seriam produzidas em certas reações, se decairiam em determinado tempo. (A cor, ou carga cor, conceito a ser retomado mais adiante neste texto, é também uma propriedade da matéria que algumas partículas têm e outras não. Também neste caso, é uma questão de nome; o significado não é o do cotidiano).

Vejam agora um exemplo da classificação octal, como indica a Fig. 1. À esquerda há um sistema de eixos, onde a estranheza está no eixo das ordenadas e a carga elétrica no eixo das abcissas. À direita, o mesmo sistema preenchido com mésons K (kaons) e mésons π (píons). Abaixo, na mesma Fig. 1, uma família octal de bárions constituída pelo nêutron, pelo próton e pelas partículas Λ , Σ e Ξ . Neste caso, foi acrescentada uma unidade no eixo da estranheza.

A menos do fato de que no padrão dos mésons há apenas uma partícula no centro e no dos bárions há duas, os padrões seriam idênticos. Para que fossem idênticos seria necessário um méson com carga e estranheza zero. Esse méson chamado eta (η^0), com massa de 550 MeV, sem carga e sem estranheza, foi descoberto em 1961. Esse padrão, uma espécie de tabela periódica para as partículas elementares é chamado de caminho óctuplo.

O caminho óctuplo foi proposto por Gell-Mann e Ne'eman, pouco mais de dez anos após a descoberta da primeira partícula estranha, usando métodos matemáticos conhecidos como teoria de grupos.

1.3. Quarks

Buscando refinar a classificação octal, ou os padrões do caminho óctuplo incorporando não só octetos, mas multipletos de um modo geral, Murray Gell-Mann e outro físico chamado George Zweig concluíram, independentemente, que tais padrões resultariam naturalmente se algumas das partículas fundamentais do átomo fossem formadas por partículas ainda mais fundamentais que ficaram conhecidas como quarks.¹³

⁹Número bariônico é o número total de bárions presente em um sistema menos o número total de antibárions (Fritzsch, 1983, p. 275).

¹⁰Ref. [3], p. 239.

¹¹O adjetivo “estranhas” para essas partículas era devido a que, sendo hádrons, eram produzidas por processos de interações fortes, então seus decaimentos seriam também devido a essa interação. Mas, nesse caso a sua vida média deveria ser muito pequena, da ordem dos 10^{-24} segundos, que é o tempo característico das interações fortes. Elas também eram produzidas aos pares. Para explicar este último fato, primeiro foi introduzido o conceito da “produção associada” e depois o esquema da estranheza (que também explica a não observação de outros decaimentos). Acontece que experimentalmente era medida uma vida média 10^{14} a 10^{16} vezes maior. Depois ficou claro que os decaimentos eram produzidos pelas interações fracas e que estas violavam a estranheza.

¹²É preciso ter cuidado com essa analogia, quer dizer, a estranheza não é bem um análogo da carga elétrica, pois esta está associada a uma das interações fundamentais (a interação eletromagnética) e a estranheza não.

¹³Zweig chamou essas novas partículas de *ases*, mas o nome dado por Gell-Mann, aparentemente tirado de um romance de James Joyce, foi o que se popularizou.

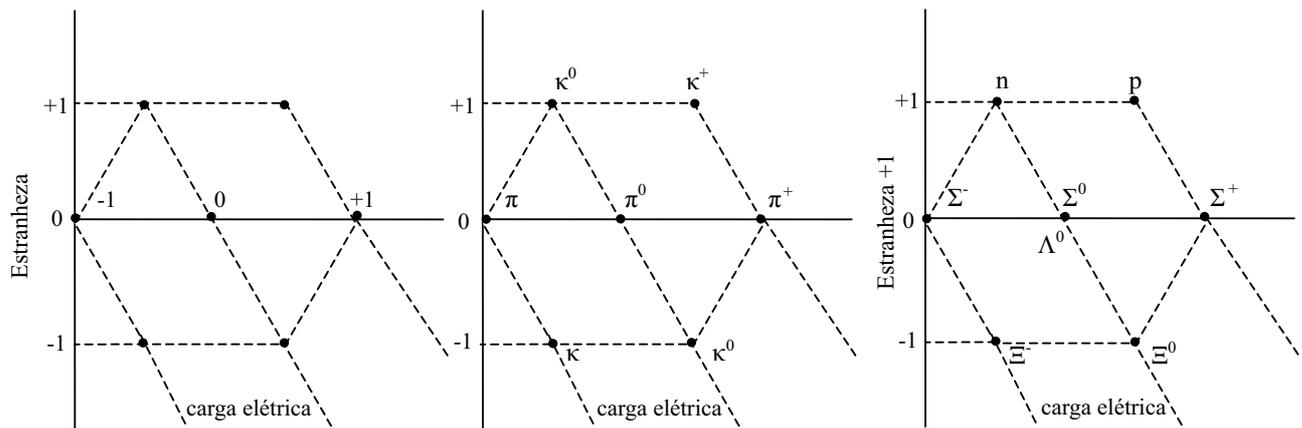


Figura 1 - Padrões hexagonais para mésons e bárions, a partir das propriedades estranheza e carga elétrica, constituindo o chamado caminho óctuplo. A descoberta do méson eta (η^0), em 1961, deixou idênticos os dois padrões.¹⁵

Hoje aceita-se que os quarks, assim como os elétrons, são as partículas verdadeiramente elementares da matéria, uma espécie de tijolos básicos para a construção de toda a matéria, inclusive dos nêutrons e prótons.

Mas em 1964, quando os quarks eram ainda entidades hipotéticas propostas por Gell-mann e Zweig a conjectura era ousada e pouca gente a levou a sério. Ao que parece o próprio Gell-Mann não estava muito confiante tanto é que não tentou publicar no periódico mais reconhecido da área o artigo que propunha essa partícula elementar hipotética. Submeteu-o a outro periódico que talvez não fosse tão exigente.¹⁶

O problema com a teoria dos quarks era que tais partículas tinham propriedades muito peculiares, para não dizer misteriosas: sua carga elétrica seria fracionária ($\pm 1/3e$, $\pm 2/3e$), não existiriam como partículas livres, e constituiriam os hádrons sempre em pares quarks-antiquarks ($q\bar{q}$, mésons) ou em tríades de quarks (qqq , bárions). Por que não existiriam combinações qq (diquarks) ou $qqqq$ (tetraquarks), por exemplo?

Por outro lado, comparando o mundo dos hádrons e o dos léptons, notava-se que havia apenas seis léptons e muitos hádrons. Isso reforçava a hipótese de que estes seriam partículas compostas de outras mais elementares.

A teoria original dos quarks previa a existência de três tipos, ou sabores, de quarks: o quark *up* (u), o quark *down* (d) e o quark estranho (s). Os quarks u e d seriam suficientes para construir a matéria comum – o próton seria constituído de dois quarks u e um quark d e o nêutron seria feito de um quark u e dois quarks d . Observe-se que a carga do próton continuaria sendo $+e$ pois o quark u teria carga $+2/3e$ e o quark d teria carga $-1/3e$ (logo, $2/3e + 2/3e - 1/3e = +e$, carga do próton), enquanto que o nêutron continuaria desprovido de carga

($2/3e - 1/3e - 1/3e = 0$).

O quark estranho foi proposto para incluir o número quântico da estranheza, explicando, assim, porque certas partículas criadas em colisões provocadas em aceleradores de alta energia teriam a estranha propriedade de existir por períodos de tempo mais longos que os previstos teoricamente.

A evidência experimental dos quarks foi considerada convincente apenas na década de 1970, a chamada década de ouro da física de partículas, através de reações de altas energias em aceleradores/colisores de partículas como o acelerador Linear de Stanford, o Tevatron do Fermilab, em Batavia, Illinois e o Grande Colisor Elétron-Pósitron do CERN (Centro Europeu de Física de Partículas). Nos aceleradores/colisores, as partículas são primeiro aceleradas, atingindo energias muito elevadas e velocidades próximas a da luz, e depois levadas a colidir frontalmente com outras partículas que se deslocam em direção oposta. Dessa colisão, ou explosão, podem resultar partículas exóticas que podem ser analisadas e cujas propriedades, em certos casos, podem ser comparadas com as propriedades previstas teoricamente de modo a detectá-las. (Claro que, na prática, as coisas não são tão simples assim, mas a idéia é essa.)

Mas os quarks não foram detectados como partículas livres, assim como não foram descobertos hádrons que não fossem formados por três quarks (bárions) ou por um par quark-antiquark (mésons), tal como previa a teoria original.

Voltando à década de 1960: um segundo neutrino, o neutrino do múon, foi detectado experimentalmente, em 1962, confirmando previsão teórica. Havia, então, quatro léptons: o elétron (e^-), o múon (μ^-), o neutrino do elétron (ν_e) e o neutrino do múon (ν_μ).

Por que não quatro quarks também? Físicos estão sempre buscando simetrias na natureza, ou tentando

¹⁵Ref. [5], p. 63-64.

¹⁶Ref. [3], p. 243.

explicar as assimetrias. Se de fato havia uma certa analogia entre quarks e léptons, como sendo partículas verdadeiramente elementares, a assimetria três quarks versus quatro léptons não fazia sentido. A maneira mais simples de resolver isso era supor a existência de um quarto tipo de quark com carga $(2/3)e$.

Esse quarto quark, denominado quark *c* ou quark charme, foi evidenciado experimentalmente em 1976, indiretamente, através da descoberta de um hádron chamado partícula psi que era uma combinação de quark e antiquark de tipo inteiramente novo.

Mas antes, em 1975, físicos experimentais no Acelerador Linear de Stanford observaram certos efeitos que seriam incompreensíveis sem a existência de um quinto lépton carregado e com massa praticamente o dobro da do próton. Esse lépton foi chamado de tau. Em 1978, resultados experimentais sugeriram que ao lépton tau estaria associado um novo neutrino, o neutrino do tau.^{17,18} Havia, então, seis léptons.

Em 1977, pesquisadores do Fermilab anunciaram o descobrimento do quinto quark o quark *bottom*. O sexto quark, o quark *top*, postulado pelos físicos teóricos há

muito tempo, só foi encontrado pelos físicos experimentais, também do Fermilab, em 1995. A equipe que descobriu o quark *top* incluía brasileiros, sob a liderança de Alberto Santoro, físico que continua liderando uma equipe de pesquisadores do CBPF, da UERJ e de outras universidades brasileiras que colaboram em experimentos do CERN e do Fermilab.¹⁹ Aliás, cabe registrar que as descobertas dos anos 70 em diante introduziram uma nova forma de organização das pesquisas nessa área pois elas passaram a ser feitas por grandes equipes de físicos, de várias nacionalidades, uma vez que o processamento de dados científicos é feito cada vez mais em um formato computacional que permite esse tipo de colaboração.

Completo-se, assim, uma busca de aproximadamente 30 anos, desde a proposta de Gell-Mann e Zweig, em 1964, até a descoberta do quark *top* em 1995.

Recapitulando, há seis léptons (elétron e neutrino do elétron, múon e neutrino do múon, tau e neutrino do tau) e seis quarks (*up*, *down*, estranho, charme, *bottom* e *top*), cada um tendo a antipartícula correspondente. A Tabela 1 apresenta, a título de exemplo, alguns hádrons (mésons e bárions) e sua estrutura de quarks.

Tabela 1 - Alguns bárions e mésons e sua estrutura de quarks.

Bárions	Estrutura	Mésons	Estrutura
p (próton)	<i>uud</i>	π^+ (pi mais)	$\bar{d}u$
n (nêutron)	<i>udd</i>	π^0 (pi zero)	$\bar{u}u/\bar{d}d$
Ω^- (ômega menos)	<i>sss</i>	π^- (pi menos)	$\bar{u}d$
Σ^+ (sigma mais)	<i>uus</i>	J/ψ (jota psi)	$\bar{c}c$
Σ^0 (sigma zero)	<i>uds</i>	κ^- (κ menos)	$\bar{u}s$
Σ^- (sigma menos)	<i>dds</i>	κ^0 (κ zero)	$\bar{s}d$

Mas esta história não acaba com a descoberta do quark *top*. Ao contrário, ela ainda vai longe. Veremos que os quarks se apresentam em três “cores” possíveis e que para explicar como se mantêm confinados no interior dos hádrons foi preciso supor uma nova interação fundamental (a interação forte) e, conseqüentemente, uma nova partícula mediadora (o glúon). A interação forte mediada por glúons é dita fundamental enquanto que a mencionada antes, aquela mediada por mésons, é considerada residual.

Antes disso, no entanto, façamos uma breve digressão epistemológica.

1.4. Quarks e epistemologia

Muitas vezes se pensa que as teoria físicas são elaboradas para explicar observações. Parece lógico: observa-se, faz-se registros (medições, por exemplo) que geram dados e destes induz-se alguma teoria, alguma lei.

Pode parecer lógico, mas não é assim. Há uma interdependência, uma relação dialética, entre teoria e experimentação. Uma alimenta a outra, uma dirige a outra. A física de partículas, em particular a teoria dos quarks, é um belo exemplo disso.

O que levou Gell-Mann e Zweig a postularem a existência dos quarks foi uma questão de simetria (o caminho óctuplo) e o que reforçou a aceitação de sua proposta foi uma questão de assimetria – por que tão poucos léptons (partículas leves) e tantos hádrons (partículas pesadas)?

Mas quando Gell-Mann propôs o conceito de estranheza ele o fez para explicar o comportamento experimental estranho de certas partículas.

Neutrinos foram postulados por Pauli, em 1931, para explicar resultados experimentais anômalos no decaimento de nêutrons, e foram detectados experimentalmente em 1956.

Yukawa propôs o pión (méson π) em 1935 e sua

¹⁷O neutrino do tau foi observado diretamente apenas em 2000 no FERMILAB.

¹⁸Ref. [7], p. 62.

¹⁹Ref. [16], p. 66.

evidência experimental foi obtida em 1947. Os quarks charme e top foram previstos teoricamente e descobertos anos depois.

A física de partículas está cheia de exemplos da interdependência entre teoria e experimentação. Por um lado, postula-se novas partículas para explicar resultados experimentais imprevistos, por outro, procura-se experimentalmente certas partículas previstas teoricamente. Constroem-se máquinas (aceleradores/colisores) para detectar experimentalmente partículas previstas na teoria das partículas. Espera-se, por exemplo, detectar até 2010 uma partícula prevista teoricamente chamada bóson de Higgs. Isso porque somente em 2010 estará em pleno funcionamento no CERN uma máquina capaz de detectá-la, se de fato existir. Se não existir, a teoria terá que ser modificada.²⁰

Outra questão que poderá levar a uma modificação da teoria é a assimetria matéria-antimatéria. A teoria prevê que para cada partícula há uma antipartícula e isso tem sido confirmado experimentalmente, mas no universo (pelo menos o que é de nosso conhecimento) há muito mais matéria do que anti-matéria e isso a teoria ainda não explicou.²¹

A hipótese dos quarks feita por Gell-Mann e Zweig, em 1964, é o que Karl Popper [18] chamaria de uma conjectura audaz. Popper é o epistemólogo das conjecturas e refutações, para ele as teorias científicas são conjecturas, produtos do intelecto humano, necessariamente refutáveis. Segundo ele, pode-se aprender muito mais da confirmação (sempre provisória) de conjecturas audazes do que da corroboração de conjecturas prudentes. A conjectura de Gell-Mann e Zweig foi audaz e os resultados experimentais que, por enquanto, a corroboram trouxeram enormes avanços na compreensão da constituição da matéria.

Aliás, a conjectura foi tão audaz que, como já foi dito, Gell-Mann achou que seu trabalho poderia não ser aceito na revista de física de maior prestígio e o encaminhou a outra. Zweig, por sua vez, relata a reação da comunidade de físicos teóricos da seguinte maneira:²²

A reação da comunidade de físicos teóricos ao modelo de um modo geral não foi boa. Publicar o trabalho na forma que eu queria foi tão difícil que acabei desistindo. Quando o departamento de física de uma importante universidade estava considerando minha contratação, o físico teórico mais sênior desse departamento, um dos mais respeitados físicos teóricos, vetou a contratação em uma reunião de departamento dizendo que o modelo que eu ha-

via proposto era trabalho de um charlatão. A idéia de que os hádrons eram feitos de partículas ainda mais elementares parecia um tanto rica demais. Essa idéia, no entanto, é aparentemente correta.

O que Zweig e Gell-Mann enfrentaram em 1964 é o que o epistemólogo Stephen Toulmin [21] chama de fórum institucional. Esse fórum é constituído pelos periódicos científicos, pelas associações científicas, pelos grupos de referência e por eminentes cientistas como o que vetou a contratação de Zweig. O fórum institucional desempenha um papel importante na consolidação de uma disciplina, mas funciona como filtro e pode bloquear, contrariar, restringir a difusão de, idéias novas como a de Gell-Mann e Zweig.

Zweig perdeu o emprego naquela época, mas acabou vendo sua hipótese confirmada e certamente conseguiu outras posições em boas universidades.

Gell-Mann foi mais feliz. Já era professor do *Caltech* desde 1956 e não foi demitido por suas hipóteses audazes (estranheza, classificação octal, quarks). Ao contrário, ganhou o Prêmio Nobel, em 1969, aos quarenta anos, quando os quarks ainda eram apenas hipotéticos, demonstrados apenas matematicamente, todavia não detectados experimentalmente.

A física dos quarks pode também ser usada para, tentativamente, ilustrar conceitos propostos por Thomas Kuhn [11], talvez o mais conhecido epistemólogo da ciência no século XX: paradigma e ciência normal.

Segundo Kuhn,²³ paradigmas são “realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções exemplares para um comunidade de praticantes de uma ciência”. Kuhn cita²⁴ a física de Aristóteles, a astronomia de Ptolomeu, a mecânica e a óptica de Newton e a química de Lavoisier como exemplos de paradigmas porque “serviram, por algum tempo, para definir implicitamente os problemas e métodos legítimos de um campo de pesquisa para gerações posteriores de praticantes da ciência”. E assim foi porque partilhavam duas características essenciais: suas realizações foram suficientemente sem precedentes para atrair um grupo duradouro de partidários e, ao mesmo tempo, suficientemente abertas para deixar uma variedade de problemas para serem resolvidos por esse grupo.

Ao que parece, a física dos quarks é um bom exemplo daquilo que Kuhn chama de paradigma. Provavelmente outro paradigma virá, não tão revolucionariamente como proporia Kuhn, mas sim de maneira evolutiva. A questão é que as teorias físicas nunca são definitivas, estão sempre evoluindo. Certamente novas idéias, novas conjecturas, surgirão no campo da física de

²⁰Ref. [19] p. 121.

²¹Ref. [19], p. 14.

²²Ref. [7], p. 75.

²³Ref. [11], p. 13.

²⁴Ref. [11], p. 30.

partículas.

A teoria dos quarks também serve para exemplificar, de modo tentativo, o que Kuhn chama de ciência normal: é a atividade na qual a maioria dos cientistas emprega, inevitavelmente, quase todo seu tempo, baseada no pressuposto de que a comunidade científica tem teorias e modelos confiáveis sobre como o mundo é.²⁵ Segundo Chalmers,²⁶ “o cientista normal trabalha confiantemente dentro de uma área bem definida ditada por um paradigma. O paradigma que lhe apresenta um conjunto de problemas definidos juntamente com os métodos que acredita serem adequados para a sua solução”.

Não foi isso que os físicos experimentais fizeram ao construir máquinas cada vez mais potentes para detectar partículas previstas teoricamente? O método que acreditavam ser adequado é o das colisões em aceleradores/colisores de alta energia. E continuam acreditando porque, como já foi dito, um novo acelerador está sendo construído e uma nova partícula, chamada bóson de Higgs, prevista teoricamente em 1963, está sendo buscada obstinadamente.

Por outro lado, físicos teóricos também têm feito ciência normal ao tentarem resolver problemas de natureza teórica do paradigma buscando uma melhor articulação dele com o objetivo de melhorar sua correspondência com a natureza.

Segundo Kuhn, a emergência de outro paradigma levará a outro período de ciência normal. Mas deixemos de lado, por enquanto, a visão epistemológica e voltemos à física dos quarks.

2. Quarks têm cor

Partículas com spin $1/2$ como os elétrons, prótons, nêutrons e quarks obedecem o Princípio da Exclusão de Pauli segundo o qual duas partículas do mesmo tipo não podem ocupar o mesmo estado quântico, ou seja, o mesmo estado de energia e spin. Isso significa que dois ou mais quarks do mesmo sabor (tipo), ou seja, idênticos não podem ocupar o mesmo estado.

Portanto, segundo essa regra uma partícula constituída, por exemplo, por três quarks idênticos não poderia existir. Mas uma partícula chamada Ω^- (ômega menos), prevista teoricamente por Gell-Mann e Ne’eman, em 1962, como elemento faltante de uma família de dez (quer dizer, as famílias não eram só de oito membros como as da classificação octal) foi mais tarde descoberta e era constituída de três quarks estranhos idênticos. Ou seja, não poderia existir com essa constituição, mas existia.

²⁵Ref. [11], p. 24.

²⁶Ref.[4], p. 129.

²⁷Não se deve imaginar, no entanto, quarks como bolinhas, e muito menos coloridas como aparecem nos livros didáticos. Essa imagem dificulta a compreensão do que seja um quark.

²⁸Considerações teóricas, fora do escopo deste texto, limitam esse número de possibilidades.

²⁹Não se deve aqui pensar que quarks sentem apenas a força forte; eles sentem também as demais forças, pois têm a carga elétrica e a fraca e são uma forma de matéria-energia. Contudo, experimentam tais forças em intensidades muito diferentes.

Para resolver esse problema, um físico chamado Oscar Greenberg sugeriu que os quarks possuíam uma outra propriedade, bastante análoga à carga elétrica, mas que ocorreria em três variedades ao invés de duas (positiva e negativa). Mesmo não tendo nada a ver com o significado de cor na óptica, ou no cotidiano, essa propriedade foi chamada cor, ou carga cor, e as três variedades foram denominadas vermelho, verde (ou amarelo) e azul. Quarks têm cores positivas e antiquarks têm cores negativas ou anticores (antivermelho, anti-verde e antiazul).

Cor, então, é uma propriedade da matéria, assim como a carga elétrica é também uma propriedade da matéria. Algumas partículas têm cor outras não. Léptons não têm cor, são “brancos”. Quarks têm cor, são “coloridos”²⁷.

O número total de quarks é, então, 36: os seis quarks (up, down, estranho, charme, bottom e up) podem, cada um, apresentar três cores totalizando 18, mas há também seis antiquarks, cada um podendo ter três anticores, totalizando também 18, de modo que o número total de possibilidades é 36.²⁸

O conceito de cor como uma propriedade que os quarks têm resolve o problema da existência de partículas formadas por quarks idênticos pois com tal propriedade existindo em mais de uma variedade eles deixam de ser idênticos.

Mas surge outro problema teórico: sabe-se na eletrodinâmica que três elétrons nunca formarão um estado ligado, um sistema estável, mas três quarks podem formar um estado desse tipo, como o hádron Ω^- . Como resolver isso? Deve haver uma força atrativa entre os quarks de modo que possam formar hádrons.

Essa força é chamada força forte²⁹ e a teoria das interações entre quarks é a cromodinâmica quântica assim como a eletrodinâmica quântica é a teoria das interações entre elétrons. Mas há uma diferença fundamental: elétrons podem ser observados como partículas independentes, porém quarks não. Como seria então a força entre os quarks?

3. Interações fundamentais

Objetos, corpos, coisas, exercem influência uns sobre os outros produzindo campos de força em torno de si. Há uma interação entre eles. O campo de um corpo exerce uma força sobre outro corpo e vice-versa.

Na natureza há distintas interações consideradas fundamentais, ou distintos campos fundamentais, ou, ainda, distintas forças fundamentais. Não muitas, como veremos.

Começamos com a conhecida interação gravitacional. Um corpo com massa cria em torno de si um campo gravitacional e exerce uma força gravitacional sobre outro corpo maciço, e vice-versa.

Há também outra interação bastante conhecida, a eletromagnética. Um corpo carregado eletricamente produz em torno de si um campo elétrico e exerce uma força elétrica sobre outro corpo eletrizado, e vice-versa. Se esse corpo estiver em movimento aparece também um campo magnético e uma força magnética. Quer dizer, na verdade o campo e a força são eletromagnéticos, e a interação é eletromagnética.

Ou seja, a interação entre corpos com massa é a gravitacional e a interação entre corpos com carga elétrica é a eletromagnética. Carga elétrica e massa são propriedades fundamentais da matéria. Os quarks também têm uma propriedade fundamental, a cor. Como eles estão sempre confinados, deve haver, então, uma força atrativa entre eles, deve haver um campo de forças que os mantém unidos nos hádrons. É a chamada interação forte que se manifesta através da força forte, ou força nuclear forte. Essa interação, como já foi dito, tem origem na proposta de Yukawa, em 1935.

Há ainda uma quarta interação fundamental, a interação fraca. Assim como há uma força nuclear fraca e um campo fraco.

Esta é a mais obscura das interações fundamentais da natureza. Manifesta-se principalmente no decaimento beta, um processo no qual núcleos atômicos instáveis transformam-se através da emissão de um elétron e um neutrino. (Por ser assim tão obscura, talvez seja a mais interessante de todas para a pesquisa em física de partículas.)

Resumindo, as quatro interações fundamentais da natureza são: gravitacional, eletromagnética, forte e fraca. Cada uma delas devida a uma propriedade fundamental da matéria: massa no caso gravitacional, carga elétrica na interação eletromagnética, cor na interação forte (quarks) e no caso da interação fraca uma propriedade chamada carga fraca. Aliás, por que não chamar estas quatro propriedades de cargas: carga gravitacional (ou carga massa), carga elétrica, carga cor e carga fraca.

Haveria então na natureza quatro interações fundamentais, quatro forças fundamentais e quatro cargas (propriedades fundamentais).

Apenas quatro. E talvez menos, pois teoricamente já se interpreta a força eletromagnética e a força fraca como manifestações de uma só, que é a eletrofraca, e busca-se uma unificação ainda maior. Mas fiquemos com as quatro e nos perguntemos quem media essas interações, ou quem transporta essas forças. Haveria também quatro agentes mediadores? Sim, há. São as partículas mediadoras ou partículas de força ou, ainda, partículas mensageiras.

4. Partículas virtuais

Já foi dito, mais de uma vez, que léptons e quarks são, segundo a teoria atual, os constituintes básicos da matéria. Ou melhor, os seis léptons e seis quarks (cada um com suas três cores) e suas antipartículas.

Mas para construir outras partículas a partir dessas, ditas verdadeiramente elementares, é preciso mantê-las juntas de alguma maneira, e aí entram as forças e a idéia de partículas de força ou partículas mediadoras: fótons, glúons, W e Z , e grávitons.

Os fótons são as partículas mediadoras da interação eletromagnética. Suponhamos um elétron e um próton interagindo. Sabemos que têm cargas elétricas de sinais contrários, o elétron é negativo e o próton positivo, portanto, há uma atração entre eles, uma força de atração, mesmo que nessa interação eles sejam apenas desviados de suas trajetórias. Isso se chama espalhamento e nesse processo há uma transferência de energia e momento que pode ser descrita da seguinte maneira: uma das partículas, o elétron, digamos, emite um fóton e a outra, o próton, absorve esse fóton.³⁰

Quer dizer, a interação eletromagnética pode ser explicada em termos de troca de fótons. A rigor, cada partícula carregada interage com o campo eletromagnético, mas este é um campo de fótons. Então, uma partícula carregada interage com o campo sofrendo uma força. Mas quem são os “portadores”, ou os “mensageiros” dessa força? São os fótons. Por outro lado, a partícula carregada também exerce uma força na outra partícula ou, se quisermos, esta partícula também interage com o campo sofrendo uma força que é transmitida por fótons.

Repetindo, é como se houvesse uma troca de fótons e é nesse sentido que os fótons são partículas mediadoras da interação eletromagnética, ou partículas portadoras da força eletromagnética, ou, também, partículas mensageiras dessa força.

Nessa linha de raciocínio, deve haver, então, partículas mediadoras das demais interações fundamentais. Sim, existem, ou deveriam existir; são os grávitons na interação gravitacional, as partículas W^+ , W^- e Z^0 na interação fraca e os glúons na interação forte.

Essas partículas mediadoras são chamadas de quanta dos campos correspondentes. Assim como os fótons são os quanta do campo eletromagnético, as partículas W^+ , W^- , Z^0 são os quanta da interação nuclear fraca, ou do campo da força nuclear fraca. Os índices +, - e 0 referem-se a sua carga elétrica. Todas as três foram detectadas pela primeira vez, em 1983, no colisor próton/antipróton do CERN. Em 1984, Carlo Rubia e Simon van der Meer ganharam o Prêmio Nobel por tais descobertas.³¹

O quantum do campo gravitacional, ou seja, a partícula mediadora da interação gravitacional seria

³⁰Ref. [15], p. 55.

³¹Ref. [19], p. 120.

o gráviton, porém sua existência é, ainda, puramente especulativa. O gráviton ainda não foi detectado. Seria uma partícula sem massa, com spin 2. Mas não há ainda sequer uma teoria quântica da gravidade, quer dizer, uma teoria que faça uso do gráviton para calcular forças gravitacionais. Há, é verdade, muitos físicos teóricos tentando.³²

No caso da interação forte, a partícula mediadora é o glúon. Há oito tipos de glúons. São eles que mediam a força forte, a força que mantém os quarks ligados e confinados nos hádrons. De certa forma, os glúons são a cola da matéria. O campo da força forte é um campo gluônico.

A existência dos glúons foi confirmada, em 1979, em um colisor elétron/pósitron, em Hamburgo, Alemanha. Na época, esse colisor era o único com energia suficiente para detectar tais partículas. Glúon é o termo genérico para os oito tipos existentes. Assim como os quarks, glúons têm cor, e, assim como eles, estão sempre agrupados, de modo que nunca se sabe quais dos oito possíveis quanta do campo da força forte participam de uma dada interação. Glúons são partículas sem massa, com spin 1.

Pode parecer estranho que essas partículas mediadoras possam não ter massa. De todas, apenas as partículas W e Z têm massa. Mas é preciso lembrar que há uma equivalência entre massa e energia; massa é uma forma de energia. Ou seja, podem não ter massa mas têm energia, ou são pulsos de energia.

Diz-se, então, que as partículas mediadoras são reais ou virtuais. Partículas reais podem se deslocar de um ponto para outro, obedecem a conservação da energia e fazem “clicks” em detectores Geiger. Partículas virtuais não fazem nada disso. São uma espécie de construto lógico. Podem ser criadas tomando energia “emprestada” do campo e a duração do “empréstimo” é governada pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg segundo o qual $\Delta E \Delta t \geq \hbar$, o que significa que quanto maior a energia (ΔE) “emprestada” menor o tempo (Δt) que a partícula virtual pode existir para desfrutá-la.³³

As partículas mediadoras podem ser partículas reais, porém mais freqüentemente aparecem na teoria como partículas virtuais, de modo que muitas vezes os dois termos são tomados como sinônimos (*ibid.*). São virtuais as partículas que levam a mensagem da força entre partículas reais. Mas é preciso ter cuidado com essa terminologia pois, se não interagir com outras partículas, uma partícula virtual pode ser real. Fótons, por exemplo, podem ser reais desde que estejam sempre livres.

Resumindo, segundo o que sabemos hoje, há quatro interações fundamentais na natureza (gravitacional, eletromagnética, fraca e forte) devidas a quatro propriedades (cargas) fundamentais atribuídas à matéria (carga gravitacional/massa, carga elétrica, carga fraca

e carga cor), quatro campos de força (campo gravitacional, campo eletromagnético, campo da força fraca e campo da força forte), quatro forças fundamentais (gravitacional, eletromagnética, fraca e forte) e quatro tipos de partículas virtuais mediadoras (grávitons, fótons, W e Z , glúons), sendo que os grávitons são ainda especulação teórica.

5. O modelo padrão

O modelo que tenta descrever a natureza da matéria, ou de que é feito o universo e como se aglutinam suas partes, em termos de quatro forças, quatro partículas (virtuais) mediadoras e doze partículas fundamentais é o chamado modelo padrão.

As doze partículas fundamentais são os seis léptons e os seis quarks; as quatro partículas mediadoras são os fótons, os glúons, as partículas W e Z e os grávitons; as quatro forças são a eletromagnética, a forte, a fraca e a gravitacional.

As partículas fundamentais, ou partículas de matéria, são chamadas de férmions. Léptons e quarks são, portanto, subclasses de férmions. Léptons não são influenciados pela força nuclear forte, não estão encerrados dentro de partículas maiores e podem viajar por conta própria. Elétrons, múons e neutrinos são léptons. Quarks sofrem a força forte e estão sempre confinados em partículas maiores (hádrons).

As partículas virtuais que transmitem as quatro forças da natureza são chamadas bósons. Enquanto os férmions são partículas de matéria, os bósons são partículas de força.

Para completar o modelo, falta ainda a antimatéria: partículas com massa e spin idênticos aos da matéria comum, mas com cargas opostas. Para cada partícula existe a antipartícula correspondente. O antipróton é a antipartícula do próton, o antineutrino é a antipartícula do neutrino e assim por diante. A antimatéria é constituída de antiprótons, antineutrinos e antieletrons (pósitrons). Partículas neutras como os fótons e os mésons π^0 , são iguais as suas próprias antipartículas.³⁴

Há na natureza uma assimetria matéria-antimatéria. Embora já tenha sido produzida experimentalmente, a antimatéria é raramente encontrada na natureza. Explicar esta assimetria é uma das dificuldades da física contemporânea. Conseqüentemente, uma dificuldade do modelo padrão que é a atual explicação da física para a constituição do universo.

A Tabela 2 procura esquematizar a constituição da matéria segundo o modelo padrão. Aí estão as doze partículas fundamentais, as quatro forças e as quatro partículas de força. Hádrons são partículas compostas. No universo há uma assimetria entre matéria e antimatéria, ou entre partículas e antipartículas.

³²Ref. [19], p. 121.

³³Ref. [13], p. 278.

³⁴Ref. [7], p. 275.

Tabela 2 - Uma visão esquemática da constituição da matéria segundo o modelo padrão.

Matéria			
Partículas de matéria			
Léptons (Férmions)		Quarks (Férmions)	
Elétron		Quark up (u)	
Neutrino do elétron		Quark down (d)	
Múon		Quark charm (c)	
Neutrino do múon		Quark estranho (s)	
Tau		Quark bottom (b)	
Neutrino do tau		Quark top (t)	
Hádrons			
Bárions		Mésons	
três quarks		pares quark-antiquark	
Forças (interações) fundamentais			
Eletromagnética		Fracca	
Eletrofraca		Forte	
		Gravitacional	
Partículas de força (Bósons)			
Fótons		W & Z	
		Glúons	
		Grávitons (não detectados)	
Partículas de antimatéria (assimetria)			
Antimatéria (assimetria)			

6. Dificuldades do modelo padrão

O modelo padrão das partículas elementares não é um simples modelo físico, é um referencial teórico que incorpora a cromodinâmica quântica (a teoria da interação forte) e a teoria eletrofraca (a teoria da interação eletrofraca que unifica as interações eletromagnética e fraca). E aí aparece uma grande dificuldade do modelo padrão, talvez a maior: não consegue incluir a gravidade porque a força gravitacional não tem a mesma estrutura das três outras forças, não se adequa à teoria quântica, a partícula mediadora hipotética - o gráviton - não foi ainda detectada.

Outro problema do modelo padrão é o bóson de Higgs. No modelo, interações com o campo de Higgs (ao qual está associado o bóson de Higgs) fariam com que as partículas tivessem massa. Porém, o modelo não explica bem essas interações e o bóson de Higgs está ainda por ser detectado.³⁵

A assimetria matéria-antimatéria também não é explicada pelo modelo padrão. Quando o universo começou, no big bang, a energia liberada deveria haver produzido quantidades iguais de matéria e antimatéria. Por que, então, atualmente, praticamente tudo é feito de matéria? Por que a antimatéria é raramente encontrada na natureza?³⁶

Além dessas, há várias outras dificuldades. Algumas são resultantes das limitações do modelo. Como toda teoria física, esse modelo não pode explicar tudo. Há coisas que o modelo nunca explicará. Outras, como

a do bóson de Higgs, podem levar a modificações na teoria. Se a partícula, prevista teoricamente pelo modelo para explicar a massa das partículas, não for detectada, a teoria terá que ser modificada.

O importante aqui é dar-se conta que o modelo padrão da física de partículas é a melhor teoria sobre a natureza jamais elaborada pelo homem, com muitas confirmações experimentais. Por exemplo, o modelo previu a existência das partículas Z e W , do glúon, dos quarks charme e top que foram todas posteriormente detectadas, com as propriedades previstas. Mas nem por isso, é uma teoria definitiva. Certamente será substituída por outra que dará conta de algumas das dificuldades apontadas, poderá ter algumas confirmações espetaculares, mas terá suas próprias dificuldades. As teorias físicas não são definitivas, ainda que sejam tão bem sucedidas como o modelo padrão.

7. Outra vez os quarks: o pentaquark

Pelo que vimos, as partículas elementares poderiam ser caracterizadas como constituintes (léptons e hádrons) e mediadoras. Os hádrons até agora conhecidos são formados por, no máximo, três quarks. A novidade é que, recentemente, vários grupos de físicos experimentais têm anunciado evidências da existência de uma nova partícula com cinco quarks (mais precisamente, quatro quarks e um antiquark, ou seja, um pentaquark que recebeu o nome de θ^+ teta mais) [20].

Não se trata, no entanto, de nova dificuldade para

³⁵Refs. [9], p. 62; e [10].

³⁶Ref. [6], p. 59.

a teoria, no caso a cromodinâmica quântica, pois não há nela nada que impeça a existência de partículas não tão simples como as formadas por três quarks (bárions) ou por um par quark-antiquark (mésons). Na verdade, era até estranho que desde a década de setenta não tivessem sido detectadas partículas mais exóticas que os bárions e mésons.

Para que uma partícula seja “catalogada” como tal ela deve ter uma vida média (tempo médio que ela dura antes de se desintegrar) suficientemente grande para que dê lugar a efeitos que possam ser observados e medidos nos experimentos.³⁷ Pois bem, além do pentaquark θ^+ , novos resultados experimentais sugerem a existência de outros pentaquarks (o que seria de se esperar pois há várias combinações possíveis de quarks e antiquarks). Contudo, nem todos os pesquisadores estão convencidos da existência dos pentaquarks, pois há vários experimentos que não encontraram evidências dessas partículas.³⁸ De qualquer maneira, a resposta definitiva sobre se existem ou não pentaquarks deverá vir dos dados experimentais.

8. Problemas conceituais e problemas empíricos

Para o epistemólogo Larry Laudan [12] a ciência é, essencialmente, uma atividade de resolver problemas e as teorias científicas são, normalmente, tentativas de resolver problemas empíricos específicos acerca do mundo natural.³⁹ Para ele, se os problemas constituem as perguntas da ciência, as teorias constituem as respostas.

As teorias podem, no entanto, ter dificuldades internas, inconsistências. Tais debilidades, Laudan considera como problemas conceituais.

O modelo de Laudan aconselha preferir a teoria que resolve o maior número de problemas empíricos importantes ao mesmo tempo que gera o menor número de problemas conceituais e anomalias (problemas não resolvidos pela teoria, mas resolvidos por uma teoria rival) relevantes.

Mais uma vez podemos, então, usar a física dos quarks, ou o próprio modelo padrão, para exemplificar questões epistemológicas. Trata-se, seguindo a linha de Laudan, de uma excelente teoria porque resolveu muitos problemas empíricos; todas as partículas previstas foram detectadas em raios cósmicos ou em aceleradores/colisores. Exceto o bóson de Higgs. Porém os físicos continuam buscando essa que continua sendo procurada como partícula mediadora de um novo campo, o campo de Higgs, que explicaria porque as partículas

têm massa. Máquinas estão sendo construídas para detectar o bóson de Higgs e a massa é hoje um tópico rotineiro de pesquisa em física de partículas.⁴⁰ Quem diria, a massa que no espectro epistemológico de Bachelard [2] começa como uma apreciação quantitativa grosseira e ávida da realidade e pode chegar até a massa negativa⁴¹ é agora objeto de pesquisa em física de partículas para saber sua própria origem. Um problema empírico fascinante, um grande desafio para o modelo padrão.

Mas, e o gráviton? Seria também um problema empírico sério para o modelo padrão? Bem, aí o problema parece ser mais conceitual do que empírico porque nesse caso a teoria não consegue incluir a gravidade, quer dizer, a força gravitacional, uma das quatro forças fundamentais da Natureza, ainda não está integrada à teoria quântica. É bem verdade que o gráviton até hoje não foi detectado, mas o problema parece não ser apenas empírico.

8.1. Obstáculos epistemológicos e noções-obstáculo

Podemos aproveitar o modelo padrão para ilustrar também outra faceta epistemológica, com profundas implicações pedagógicas: os obstáculos epistemológicos e as noções-obstáculo, de Bachelard [2].

Para ele, o problema do conhecimento deve ser colocado em termos de obstáculos epistemológicos. O próprio conhecimento atual deve ser interpretado como um obstáculo para o progresso do conhecimento científico. A experiência nova deve dizer não à experiência antiga. Contudo, essa “filosofia do não” surge não como uma atitude de recusa, mas como uma postura de reconciliação. Na perspectiva de Bachelard, certamente uma nova teoria de partículas surgirá dizendo não ao modelo padrão, rompendo com ele, mas, dialeticamente, sem recusá-lo, sem negá-lo.

A idéia de obstáculo epistemológico quando particularizada leva ao conceito de noção-obstáculo. Destacaremos aqui duas noções-obstáculo: o coisismo e o choquismo.

O coisismo, a tendência que temos de coisificar os conceitos nos leva a considerar as partículas elementares como corpúsculos, corpos muito pequenos, ocupando um espaço muito pequeno, com uma massa muito pequena. No entanto, partículas elementares não são corpúsculos, não são corpos muito pequenos. Segundo Bachelard, não se pode atribuir dimensões absolutas ao corpúsculo, somente se lhe pode atribuir uma ordem de grandeza, a qual determina mais uma zona

³⁷Ref. [6], p. 39.

³⁸Ref. [6], p. 40.

³⁹Ref. [6], p. 39.

⁴⁰Ref. [10], p. 57.

⁴¹O que Bachelard chamava de massa negativa, seguindo a teoria relativística do elétron formulada por Dirac, foi interpretado ulteriormente como o pósitron, a primeira das antipartículas.

⁴²Ref. [2], p. 64.

de influência do que de existência. Ou, mais exatamente, o corpúsculo só existe no espaço em que atua;⁴² correlativamente, se não podemos atribuir dimensões ao corpúsculo, tampouco podemos atribuir-lhe forma, mas, nesse caso, também não podemos atribuir-lhe um lugar muito preciso.

Na microfísica, o corpúsculo perde individualidade, podendo, inclusive, anular-se. Essa anulação consagra a derrota do coisismo. É preciso tirar da coisa suas propriedades espaciais. É preciso retirar o excesso de imagem associado ao coisismo.⁴³

Partículas elementares não são corpúsculos, não são coisas, não são as imagens de “bolinhas coloridas” que aparecem nos livros didáticos. Esse coisismo vistoso, essa representação de partículas elementares, quarks por exemplo, como corpúsculos (bolinhas, esferinhas), funciona como obstáculo epistemológico para a compreensão do que são partículas elementares.

Representar partículas elementares como corpúsculos coloridos apenas reforça o coisismo que, naturalmente, já funciona como obstáculo epistemológico para conceptualizar o que seja um quark, ou, de um modo geral, uma partícula elementar. Quarks não são as “bolinhas” que aparecem nos livros didáticos. Como diria Bachelard, o espírito científico deve dizer não a esse tipo de representação. Quarks poderiam ser “cordinhas”, “membraninhas”, ou nada disso. Mas isso é tudo imagismo, outro obstáculo epistemológico que nos leva a querer imaginar coisas que não são imagináveis. Será mesmo necessário imaginar, ou coisificar, um quark para entender o que seja tal partícula?

Associado ao coisismo atribuído às partículas elementares está outro obstáculo epistemológico: o choquismo. As representações didáticas dos choques entre partículas são de choques elásticos entre bolas (bolinhas, melhor dizendo) de bilhar. Uma representação, no mínimo grosseira do que ocorre em um acelerador/colisor de partículas. Para dar significado à criação e aniquilação de partículas em um acelerador/colisor é preciso dizer não ao choque elástico tipo bolas de bilhar. No entanto, os livros didáticos e os aplicativos reforçam essa imagem errada.

Em resumo, para aprender significativamente o modelo padrão é preciso dizer não às representações pictóricas clássicas tão presentes nos livros, nas revistas de divulgação científica e nas aulas de física. As partículas elementares não são corpúsculos e as reações e colisões entre partículas não são choques elásticos ou inelásticos clássicos entre corpos muito pequenos.

9. Conclusão

Este trabalho, assim como outros sobre física de partículas, publicados recentemente em *Física na Escola* – Ostermann [17]; Moreira [14]; Abdalla [1] e He-

layël-Neto [8] – procuram apresentar esse tema de forma acessível a professores e alunos.

Mas será mesmo possível ensinar/aprender física dos quarks no ensino médio? No ensino fundamental? No ensino superior?

Claro que sim! Em qualquer nível, desde que no ensino não se reforce os obstáculos epistemológicos naturais do espírito humano e na aprendizagem se diga não a tais obstáculos. E que se leve em conta que a aprendizagem significativa é progressiva.

Na verdade, não tem sentido que, em pleno século XXI, a física que se ensina nas escolas se restrinja à física (clássica) que vai apenas até o século XIX. É urgente que o currículo de física na educação básica seja atualizado de modo a incluir tópicos de física moderna e contemporânea, como a física dos quarks abordada neste trabalho. O argumento de que tais tópicos requerem habilidades e/ou capacidades que os estudantes de ensino fundamental e médio ainda não têm é insustentável, pois outros tópicos que são ensinados, como a cinemática, por exemplo, requerem tantas ou mais capacidades/habilidades cognitivas do que partículas elementares.

Agradecimentos

O autor agradece aos Professores Eliane Angela Veit e Olival Freire Jr. pela revisão crítica de uma versão preliminar deste trabalho. Agradece também as valiosas sugestões do árbitro que o revisou para a RBEF.

Referências

- [1] M.C.B. Abdalla, *Física na Escola* **6**(1), 38 (2005).
- [2] G. Bachelard, *Epistemologia* (Editorial Anagrama, Barcelona, 1971).
- [3] R. Brennan, *Gigantes da Física. Uma História da Física Moderna Através de Oito Biografias* (Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 2000).
- [4] A.F. Chalmers, *O Que É Ciência Afinal?* (Editora Brasiliense, São Paulo, 1999).
- [5] F.E. Close, *The Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe* (American Institute of Physics Press, Nova Iorque, 1986).
- [6] G.P. Collins, *Scientific American* **June**, 57 (2005).
- [7] H. Fritzsch, *Quarks: The Stuff of Matter* (Basic Books/Harper Collins Publishers, Nova Iorque, 1983).
- [8] J.A. Helayël-Neto, *Física na Escola* **6**(1), 45 (2005).
- [9] G. Kane, *Scientific American* **June**, 56 (2003).
- [10] G. Kane, *Scientific American* **July**, 30 (2005).
- [11] T. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Editora Brasiliense, São Paulo, 2001), 6^a ed.

⁴³Ref. [2], p. 64.

- [12] L. Laudan, *El Progreso y sus Problemas. Hacia una Teoría del Crecimiento Científico* (Encuentro Ediciones, Madrid, 1986). Tradução para o espanhol do original *Progress and its Problems* (University of California Press, Berkeley, 1977).
- [13] L. Lederman, *The God Particle* (Dell Publishing/Bantam Doubleday Dell Publishing, Nova Iorque, 1993).
- [14] M.A. Moreira, *Física na Escola* **5**(2), 10 (2004).
- [15] L.B. Okun, *A Primer in Particle Physics* (Harwood Academic Publishers, Reading, 1987).
- [16] M. Oliveira, *Pesquisa FAPESP outubro*, 64 (2005).
- [17] F. Ostermann, *Física na Escola* **2**(1), 13 (2001).
- [18] K. Popper, *Conjecturas e Refutações* (Editora da Universidade de Brasília, Brasília, 1982).
- [19] B.A. Schumm, *Deep Down Things: The Breathtaking Beauty of Particle Physics* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore & London, 2004).
- [20] N.N. Scoccola, *Ciência Hoje* **35**, 36 (2004).
- [21] S. Toulmin, *La Comprensión Humana - Volumen 1: El Uso Colectivo y la Evolución de los Conceptos* (Alianza Editorial, Madrid, 1977).