

Partículas Elementares para não Especialistas

Assunto bonito demais para ficar restrito aos cientistas

Vera Lúcia Vieira Baltar¹

¹Departamento de Física
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro 22453-900, RJ, Brasil
vera@fis.puc-rio.br

Elementary Particles for non-Experts

Subject matter too beautiful to be restricted to scientists

Abstract. *A brief presentation of the evolution of the ideas about the fundamental constituents of visible matter and their implications to our understanding of the universe.*

Resumo. *Uma breve apresentação da evolução das ideias sobre os constituintes fundamentais da matéria visível e suas implicações para nossa compreensão do universo.*

Perguntas atuais

O espaço-tempo

É possível dividir o tempo em intervalos cada vez menores, arbitrariamente pequenos? Ou há um limite para isso, um intervalo de tempo fundamental, tão pequeno que não é possível dividi-lo em outros intervalos menores? E o espaço? Existe uma distância tão pequena que não possa ser dividida em outras menores?

Essas perguntas são relativamente recentes, surgiram com a revolução científica do início do século XX, quando nossas concepções do mundo em que vivemos foram profundamente alteradas pela relatividade e a mecânica quântica.

Na verdade, para localizar completamente um acontecimento, não basta saber onde ele ocorreu, mas é preciso saber também quando. Com a teoria da relatividade, o espaço e o tempo passaram a ser encarados em pé de igualdade: nós nos localizamos no espaço-tempo. Então: o espaço-tempo pode ser dividido em intervalos arbitrariamente pequenos?

Uma pergunta muito antiga

A matéria

E a matéria, pode ser indefinidamente dividida em partes menores ou há unidades fundamentais que são indivisíveis? Existem elementos básicos que, combinados, constituem toda a matéria? Essa pergunta não tem nada de recente, foi feita há milênios atrás.

Há mais de 500 anos antes de Cristo, os filósofos gregos já estudavam esse assunto. Anaxímenes (585 a.C. – 524 a.C.) sugeriu que o ar é o elemento básico que constitui todas as coisas e tudo que existe são diferentes formas de ar. Demócrito (460 a.C.-370 a. C.) é conhecido por divulgar a teoria atômica, segundo a qual tudo que existe é composto por elementos indivisíveis, os átomos (átomo é a palavra grega para indivisível).

A pergunta através dos tempos

Uma aventura da inteligência humana

Desde esses pioneiros, até hoje, a humanidade não desistiu de tentar entender de que é feita a matéria. Através de milhares de anos, incontáveis pensadores, estudiosos e cientistas, alguns dos maiores gênios que a espécie humana já conheceu, foram, passo a passo, aperfeiçoando o conhecimento e desvendando os mistérios da estrutura da matéria, até chegarmos aos espetaculares resultados dos dias de hoje. Uma aventura com muitas surpresas, belíssima e fascinante.

Desenvolvimentos em épocas mais recentes

Os átomos e os elementos fundamentais mais de 20 séculos depois

Atribui-se geralmente ao pesquisador inglês John Dalton (1766-1844) a criação da primeira teoria atômica moderna. Muito cedo ele evidenciou sua genialidade, tornando-se professor aos 12 anos de idade. De acordo com sua teoria, os elementos são feitos de partículas muito pequenas, que não são criadas nem destruídas numa reação química, mas sim rearranjadas. Muitas de suas hipóteses, mas não todas, foram posteriormente confirmadas por experiências que se tornaram possíveis com o ulterior desenvolvimento da tecnologia. É interessante que Dalton tenha chegado a suas conclusões a partir de pesquisas com as propriedades do ar atmosférico e de outros gases. Impossível não lembrar do pensador grego, Anaxímenes, embora separado do gênio inglês por 23 séculos.

Houve, entretanto, muita divergência na comunidade científica do século XIX em relação à teoria atômica daltoniana. Tentando chegar a um consenso, foi organizado na Alemanha, em 1860, o primeiro grande congresso de química da história da ciência. Embora os cientistas presentes não tenham chegado ao acordo desejado, a primeira impressão de que o congresso foi um fracasso revelou-se equivocada. Ocorre que entre os participantes encontrava-se o russo Dmitri Mendeleev (1834-1905), que passou a trabalhar intensamente sobre os temas ali apresentados, procurando associar as propriedades dos elementos com suas massas atômicas. Um relato deste grande cientista parece confirmar que os sonhos refletem informações guardadas no cérebro: tendo adormecido sobre suas anotações, ele diz (citado em KEDROV, 1967; tradução do inglês pela autora):

“Vi num sonho uma tabela em que todos os elementos se encaixavam como requerido. Ao despertar, escrevi-a imediatamente em uma folha de papel – apenas em um lugar foi necessário uma correção mais tarde.”

Essa tabela mostra um padrão regular de repetição das propriedades dos elementos, quando organizados em ordem crescente de massas atômicas. Nela havia

espaços vazios, sugerindo a existência de elementos ainda desconhecidos, e que foram posteriormente descobertos, com as propriedades previstas por Mendeleev a partir de sua classificação periódica na tabela.

As evidências sobre a realidade dos átomos foram se acumulando, até que, no início do século XX, já se havia chegado ao desejado consenso. No entanto, muitas surpresas ainda estavam por vir.

Divisíveis e indivisíveis

Três partículas elementares

O sucesso de Mendeleev levou a uma teoria atômica calcada nas ideias de Dalton: os elementos que aparecem na tabela periódica são os elementos fundamentais que compõem toda a matéria existente, “os ingredientes do universo” como se dizia. Cada um deles, por sua vez, é formado por átomos, partículas extremamente pequenas, simples, sem estrutura, que não podem ser divididas, criadas ou destruídas.

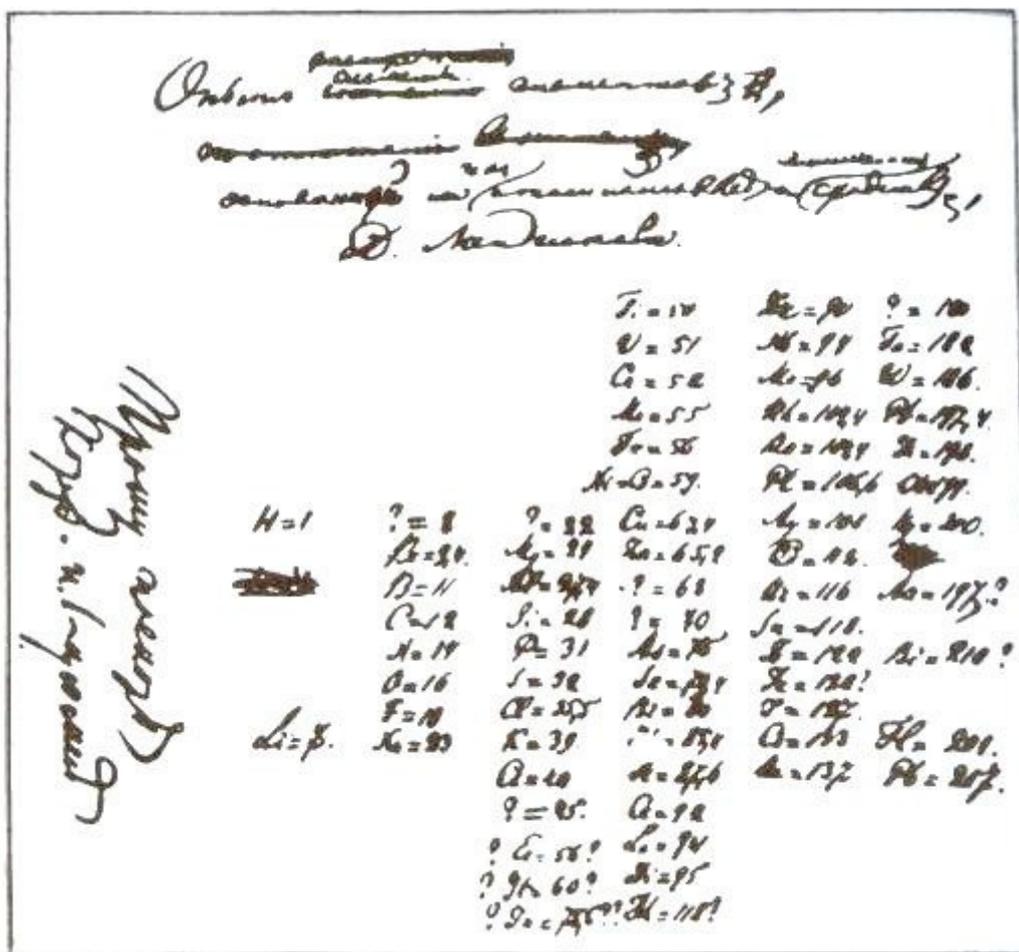


Figura 1: Tabela original de Mendeleev.

Fonte: <http://www.infoescola.com/quimica/classificacao-periodica-de-mendeleev/>

Mas supor que há dezenas e mais dezenas de elementos fundamentais parece contraditório. Já naquela época mais de 60 eram conhecidos, e outros mais foram

descobertos. Além disso, a própria periodicidade sugere que existe uma estrutura interna mais complexa nesses elementos.

E não demorou muito para que o não divisível fosse dividido. Em 1898 J.J. Thompson demonstrou a existência do elétron, como uma partícula constitutiva da menor unidade encontrada em cada elemento, ou seja, constitutiva do átomo. Mostrou assim que justamente a ideia original da indivisibilidade da menor partícula de cada elemento da tabela periódica não é correta. No entanto, a menor unidade de cada elemento manteve o nome de átomo, apesar de ficar demonstrado que, ela também, é formada de partículas ainda menores. Essas então seriam as partículas realmente elementares.

O fato da matéria ser eletricamente neutra e o elétron possuir carga elétrica negativa sugere a existência de carga positiva no átomo. Efetivamente, essa carga positiva foi encontrada e, em 1911, Rutherford, fazendo colidir radiação proveniente do polônio em uma lâmina de ouro muito fina, mostrou que ela está concentrada em uma região pequeníssima, que foi denominada núcleo. Por sua vez, o núcleo também se revelou constituído por partículas menores, os prótons, de carga positiva e os nêutrons, sem carga elétrica. Acrescentando o elétron, haveria então 3 partículas elementares.

A história se repete

O Zoológico subatômico

A experiência de Rutherford mostrou que uma boa forma de estudar as partículas que compõem os átomos é por meio de colisões. Mas é preciso que as colisões sejam de energia muito alta para que possam penetrar no núcleo. Para obter radiação de alta energia os pioneiros nessa área da ciência recorreram aos raios cósmicos, que atingem a Terra vindos de outras partes do universo. Tratava-se de uma espécie de laboratório natural. E a partir dessas colisões foram surgindo outras partículas até então desconhecidas. Logo a engenhosidade humana criou processos controlados para produzir essas colisões e assim muitas novas partículas foram encontradas. Principalmente nas décadas de 50 e 60 do século XX, com o desenvolvimento dos laboratórios colidores, dúzias e mais dúzias de novas partículas foram encontradas em impressionante variedade. Esse grande conjunto foi apelidado de Zoológico de partículas elementares, à semelhança das centenas de espécies encontradas num verdadeiro Zoológico (SCHWARZ, 1997). A situação era extremamente confusa e houve um grande esforço para agrupar todas essas partículas segundo suas propriedades na tentativa de obter algum tipo de padrão. Esse padrão foi encontrado em 1964. Mais uma vez: tão grande número de partículas elementares é uma contradição e o padrão encontrado sugere a existência de uma estrutura interna. Tudo isso levou ao desenvolvimento do modelo de quarks.

O fabuloso século XX

A revolução na física

Foi um período de extremos, quando o melhor e o pior da humanidade se fizeram presentes.

No início desse século houve uma espantosa concentração de gênios da física, que revolucionaram a ciência e mudaram nossa concepção do mundo. Uma das grandes ironias da história é a convicção que havia, na virada do século XIX para o século XX, de que todas as leis da física haviam sido descobertas, nada mais sendo necessário além de fazer medidas mais precisas que confirmariam cada vez mais as teorias existentes. Pois

no último ano do século XIX, [Max Planck](#) (1858–1947) expos a natureza quantizada de energia, surgindo assim a física quântica, que rege os fenômenos em escala muito pequena, como a dos átomos, por exemplo. E pouco depois, em cerca de 10 anos, Albert Einstein (1879–1955) transformou completamente as noções de espaço e tempo, substituiu a gravitação newtoniana e mostrou que a massa é uma forma de energia (EINSTEIN, 1905, 1906, 1907, 1911). Nas três primeiras décadas do século XX desenvolveu-se a física quântica graças aos gênios de Louis de Broglie (1924), Niels Bohr (1913), Werner Heisenberg (1925), Erwin Schrödinger (1926) e Paul Dirac (1928). O princípio de incerteza e a natureza probabilística da medida, introduzidos pela teoria quântica, eliminaram o caráter determinístico que marcava a física até então. Essas teorias científicas do início do século XX estão entre as maiores façanhas intelectuais de todos os tempos.

As novas teorias em ação

Criação e destruição, antimatéria

Como entender a enorme quantidade de partículas produzidas nas colisões, em tal abundância que deram origem ao assim chamado Zoológico subatômico?

No mundo cotidiano, com o qual estamos familiarizados, no bilhar, por exemplo, quando duas bolas colidem no instante inicial, sabemos que haverá duas bolas no instante final, depois da colisão. Mas não é assim no mundo quântico relativístico. Havendo na colisão energia suficiente, ela pode se converter em massa de novas partículas, que são produzidas na interação. E as energias precisam ser muito altas nestas colisões, se queremos, por exemplo, penetrar no núcleo do átomo. A experiência de Rutherford mostrou que a carga positiva do átomo está concentrada em uma região pequeníssima. Ora, a força eletrostática entre cargas com mesmo sinal é repulsiva e proporcional ao inverso do quadrado da distância entre elas. Logo, a força repulsiva entre os prótons do núcleo é imensa, já que a distância entre eles é pequeníssima. Portanto, se o núcleo não se desagrega, tem de haver uma força ainda mais intensa que se sobrepõe à força eletrostática repulsiva e mantém os prótons unidos. Trata-se da chamada interação forte. Assim, é necessária uma enorme energia para separar as partículas que estão unidas no núcleo pela interação forte. Trabalhando com energias muito altas, ocorre a produção de novas partículas, que vão povoar o Zoológico subatômico.

Encontrado um padrão de simetria que agrupa estas partículas de acordo com suas propriedades, surge a ideia de que elas não são elementares, indivisíveis, mas têm uma estrutura interna. São formadas por outras partículas; essas então é que seriam as elementares, as constituintes da matéria; receberam o nome de quarks. Este modelo teórico foi criado na década de 60 do século XX e, nesta mesma década, recebeu comprovação experimental. Se é necessária uma enorme energia para penetrar no núcleo dos átomos, para penetrar nos constituintes do núcleo (nos prótons e nêutrons) é preciso uma energia colossal. Daí a construção de máquinas gigantescas para produzir essas colisões a altíssimas energias, das quais resulta a produção de uma verdadeira chuva de partículas.

Como esses processos ocorrem a velocidades muito próximas da velocidade da luz e em escalas pequeníssimas, é indispensável utilizar a relatividade e a física quântica para estudá-los. Paul Dirac (1902-1984) tratou de criar uma equação única abrangendo tanto a relatividade restrita quanto a mecânica quântica; resultou daí a compreensão de

que para isso não é possível trabalhar com objetos matemáticos que representem uma partícula individual, mas sim com campos, que representam uma coleção de partículas. Nesse formalismo, o número de partículas não é uma constante, pode haver criação e destruição, como se observa experimentalmente nas colisões a altas energias. Dessa forma ele concebeu o instrumental necessário para estudar teoricamente os fenômenos relacionados a partículas elementares (a teoria quântica de campo). Esse trabalho resultou também na audaciosa previsão da existência de antipartículas, que foram experimentalmente detectadas poucos anos depois.

O instrumental abstrato

A Matemática

A construção desses modelos teóricos para descrever fenômenos físicos envolve o uso de recursos matemáticos sofisticados. E é surpreendente a estreita relação que se encontra com grande frequência mesmo entre ramos muito abstratos da matemática e o mundo físico.

É verdade que conceitos de matemática elementar, como por exemplo geometria elementar, originaram-se da observação de objetos concretos encontradas no mundo físico. Mas há formulações matemáticas mais avançadas, que podem resultar somente de um conjunto de axiomas que não têm relação direta com o mundo físico. A partir desses axiomas, e da definição de entidades matemáticas próprias dessa nova formulação, o matemático usa apenas a razão e a lógica para demonstrar uma série de teoremas e propriedades das entidades matemáticas que havia definido, sem recorrer a nenhuma realidade física do mundo real. A habilidade de construir uma longuíssima cadeia de conclusões e verificar ao final que toda essa formulação abstrata desemboca em resultados coerentes com as proposições originais é uma glória de mente humana.

Pois é justamente esta matemática mais avançada e abstrata que tem desempenhado papel extremamente relevante em física, embora não tenha sido criada com este objetivo e, tanto quanto se podia prever por ocasião de sua criação, não teria nenhuma relação com os fenômenos físicos concretos.

Por exemplo: o conceito de grupo, uma estrutura algébrica, teve sua origem nos estudos das raízes de equações polinomiais, sendo a representação a forma de descrever grupos abstratos em termos de operações um pouco mais concretas (em linguagem técnica: transformações lineares em espaços vetoriais).

Aconteceu que, ao tentar escrever a equação que englobava simultaneamente as teorias quântica e relativística, a única forma possível encontrada por Dirac correspondia a uma representação de um grupo fundamental da relatividade (o grupo de Lorentz). Verificou-se, posteriormente, que essa representação está associada a uma quantidade física mensurável, encontrada no mundo real. Dirac não partiu da abstrata teoria de grupos, ele partiu das teorias físicas e acabou “tropeçando” com a representação do grupo, que se revelou associada a uma quantidade física concreta (o spin).

É verdade que nem todas os conceitos matemáticos são usados na física e também é verdade que há teorias e conceitos matemáticos que foram desenvolvidos com o objetivo específico de serem utilizados na física, às vezes até criados independentemente por físicos e matemáticos.

Mas o fato de haver com frequência uma conexão íntima e inesperada, não intencional nem programada, entre a mais abstrata matemática pura e a realidade física concreta é de uma beleza empolgante, é uma glória da criação.

O instrumental concreto

As grandes máquinas

As altíssimas energias necessárias para estudar as partículas elementares levaram à construção de máquinas gigantescas. No interior delas há dois feixes de partículas, que se deslocam em direções opostas e que são acelerados, chegando até a 0,999999991 da velocidade da luz, quando então são provocadas as colisões. Elas resultam na produção de um imenso número de partículas e outras colisões secundárias. Entram em cena então os enormes detectores, capazes de produzir imagens das trajetórias resultantes desses processos. São imagens extremamente complexas, que exigem grande competência e engenhosidade para sua análise e interpretação (Figura 2).

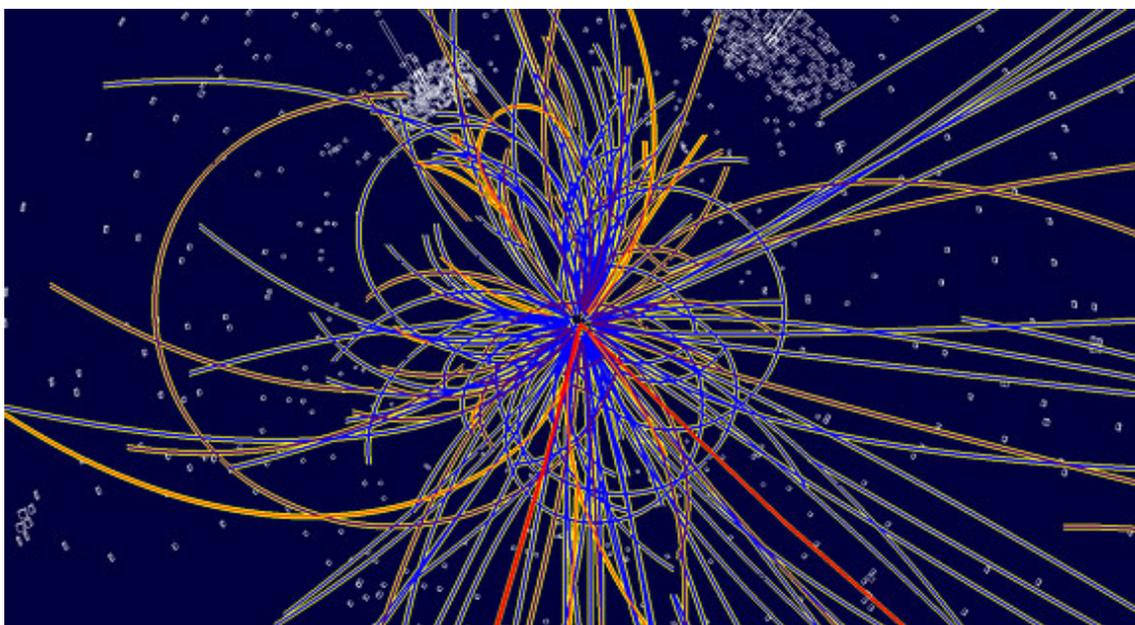


Figura 2: Imagem de trajetórias de partículas após uma colisão a altas energias

Fonte: <http://www.fnal.gov/pub/science/particle-physics-101/worldwide-discoveries.html>

A maior dessas máquinas encontra-se na Suíça, no Centro Europeu de Pesquisa Nuclear (CERN, em francês; <https://home.cern/>). Quando foi criado, em 1954, a pesquisa sobre a estrutura da matéria ainda se concentrava na compreensão do núcleo atômico, daí o nome com que é conhecido até hoje. Mas atualmente nosso conhecimento já foi muito além e a área de interesse já é a de partículas subatômicas, a busca pelas partículas elementares. É lá, no CERN, que se encontra o maior acelerador do mundo atual.

O anel de colisões tem 27 km e nele o vácuo é igual ao do espaço interestelar, para garantir que as interações serão entre os feixes acelerados e não com outras partículas que poderiam, eventualmente, encontrar-se no interior da máquina. Para guiar os feixes ao longo dos anéis de colisões há necessidade de eletroímãs feitos de materiais supercondutores, que conduzem eletricidade sem resistência ou perda de energia. Mas a supercondutividade exige que os ímãs sejam mantidos a $-271,3^{\circ}$ C, temperatura mais baixa que a do espaço intersidereal.

Não deixa de ser paradoxal que, para o estudo da menor quantidade de matéria, seja necessário o uso de máquinas gigantescas.

A nova tabela periódica

O bóson de Higgs

No início do século XX só eram conhecidas a gravidade e a força eletromagnética. Com o desenvolvimento da tecnologia que permitiu melhor conhecimento do átomo, surgiu a hipótese da interação chamada forte, capaz de manter o núcleo agregado, apesar da enorme força elétrica repulsiva entre os prótons. Tornou-se possível também estudar o decaimento de partículas, isto é, a transformação espontânea de uma partícula em outras, como por exemplo o decaimento do nêutron em três outras partículas. Esse fenômeno não pode ser explicado por nenhuma das três interações mencionadas acima. Ele resulta da interação chamada fraca. Assim, em meados do século XX, já eram conhecidas as quatro forças que, segundo nosso atual conhecimento, existem no universo: as interações gravitacional, eletromagnética, forte e fraca.

Na década de 1960, jorrava dos grandes colisores uma enxurrada de novas partículas, que desnorream os pesquisadores. A situação era muito confusa, o desespero chegou ao ponto de haver a sugestão de um prêmio para o físico que *não* descobrisse uma nova partícula. Impossível acreditar que todas essas fossem partículas elementares. Mas já havia o conhecimento de que nem todas participavam das mesmas interações. Assim como um objeto que não tem carga elétrica não participa da interação elétrica, havia partículas que não participavam da interação forte. Essas eram em menor número, e receberam o nome de leptons. As mais numerosas receberam o nome de hadrons; são as que participam da interação forte.

Após anos de grandes esforços por parte de grandes cientistas, finalmente Gell-Mann (1964) e Zweig (1964) encontraram, independentemente, um padrão de simetria para os hadrons, postulando que eles eram constituídos por partículas que Gell-Mann chamou de quarks (como são conhecidas até hoje) e Zweig chamou de azes. Houve muita discussão sobre se os quarks eram partículas físicas reais ou uma abstração matemática. Mas poucos anos depois, um colisor na Universidade de Stanford, na Califórnia, evidenciou a existência de unidades constituintes do interior do próton.

A teoria quântica de campos, formalismo adequado para o estudo das partículas subatômicas, teve importantíssimo desenvolvimento no início da década de 1970, com o trabalho de Gerard t'Hooft (1971), que na época ainda era um estudante de pós graduação. Ele mostrou que, para que os cálculos teóricos pudessem ser comparados com resultados experimentais (em linguagem técnica: para que a teoria fosse renormalizável) ela deveria satisfazer a uma certa simetria chamada calibre (*gauge*). Teorias com essa propriedade têm a característica de prever que a interação entre as partículas de matéria (que são os quarks e os leptons) ocorre por meio de uma troca de partículas que constituem o campo de interação. Por exemplo: a interação eletromagnética entre dois elétrons (que têm carga elétrica negativa) ocorre por meio da troca de um fóton, que é a partícula que, por assim dizer, “carrega” a interação eletromagnética. Analogamente, há partículas correspondentes para a interação fraca e para a interação forte. Todas elas foram previstas teoricamente e suas existências experimentalmente comprovadas. O modelo atual (Modelo Padrão) para a estrutura da matéria estava quase pronto, era capaz de previsões extremamente precisas e era quase todo coerente. Quase. Ele exigia que as massas das

carregadoras de interação fossem nulas, mas o resultado experimental mostrava que havia partículas carregadoras massivas. A solução dessa inconsistência havia sido proposta muito anos atrás (1964), mas ela implicava na existência de mais uma partícula, o bóson de Higgs, que ninguém conseguia encontrar. E, sem ela, o modelo fica inconsistente. Um físico, agraciado com o prêmio Nobel, que trabalhava com o grande colisor dos Estados Unidos, referia-se a ela como “a maldita partícula”. Finalmente, confirmando a previsão teórica do Modelo Padrão e sua consistência, em 2012, no CERN, o bóson de Higgs foi encontrado completando a tabela periódica atual. Ela contém todas as partículas que hoje são tidas como elementares, sem estrutura interna, indivisíveis e que são os blocos constituintes de toda matéria visível que existe no universo.

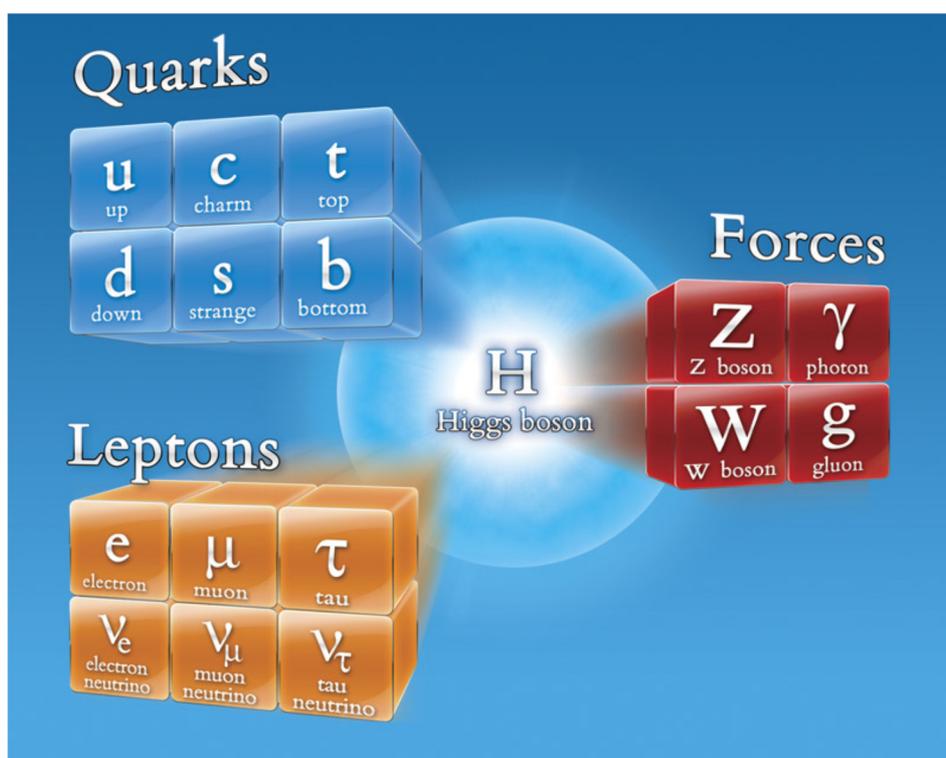


Figura 3: A tabela periódica de 2012.

Fonte: <https://www.fiatphysica.com/blog/learning/particle-primer-physics>

Os quarks e os leptons se distribuem no que se chama de três gerações ou três famílias. Além disso, para cada uma dessas partículas existe também sua antipartícula. A matéria ordinária é formada pelos dois quarks da primeira família (*up* e *down*) e por um lepton da primeira família (elétron). A matéria constituída pelas outras famílias de quarks e leptons só aparece na forma de partículas subatômicas que são produzidas pela colisão de raios cósmicos com nossa atmosfera e também pelas colisões nos grandes aceleradores. Este tipo de partícula, em um ínfimo intervalo de tempo, decai em outras partículas mais comuns. Em vermelho, na figura, aparecem as “carregadoras” das forças. Mas o Modelo Padrão não engloba todas elas: justamente a força que foi estudada há mais tempo, a gravitacional, não é considerada no modelo.

O máximo e o mínimo entrelaçados

O Big Bang e a viagem no tempo

Até o século XX era consensual a ideia de um universo estático, imutável. Mas Alexander Friedmann (1888-1925) demonstrou, em 1922, que as equações de Einstein podiam descrever um universo que evoluiria com o tempo (FRIEDMAN, 1922). A intensa e brilhante produção científica de Friedmann foi interrompida por sua morte prematura, aos 37 anos. Mas o sacerdote jesuíta Georges Lemaître (1894-1966) continuou a trabalhar nesta linha da solução das equações da relatividade geral que descreve um universo em expansão. Einstein concordou com o desenvolvimento matemático de Lemaître, mas recusou a tese da expansão do universo. “Seus cálculos estão corretos, mas sua física é abominável” disse ele. Apesar disso, Pe. Lemaître não abandonou sua linha de pesquisa propondo que, se hoje o universo está se expandindo, com as galáxias se afastando umas das outras, em algum momento do passado elas deveriam ter estado aglomeradas (LEMAÎTRE, 1927, 1931). Em 1929 Edwin Hubble (1889-1953) demonstrou experimentalmente que a distância entre as diferentes galáxias está continuamente aumentando, em concordância com os trabalhos de Pe. Lemaître e Friedmann. Este último, infelizmente, já havia falecido quando surgiu esta comprovação experimental de sua teoria.

A ideia de um começo para o universo não agradou a todos. Na opinião de Stephen Hawking, isso provavelmente aconteceu porque achavam que a ideia implicava em alguma intervenção divina. Fred Hoyle (1915-2001) discordou da interpretação de Hubble e foi o grande defensor da teoria do universo estacionário, que tentava explicar como o universo poderia ser eterno e essencialmente imutável, mesmo com as galáxias se afastando umas das outras. Esta teoria implicava na criação contínua de matéria, uma hipótese certamente estranha, mas segundo ele, não mais estranha do que o surgimento de todo o universo. Grande crítico das ideias de Friedmann e Pe. Lemaître, foi ele que, como zombaria, cunhou a expressão Big Bang, em um programa de rádio da BBC.

Resultados experimentais posteriores, como a descoberta da radiação cósmica de fundo, em 1965, (da qual Pe. Lemaître teve a alegria de ser informado, no hospital em que viria a falecer pouco tempo depois) acabaram por levar a maioria dos cosmólogos a aceitar a teoria do Big Bang. De acordo com ela, nos primeiros instantes após a grande explosão, o universo era inimaginavelmente quente e denso. À medida que ele se expandia e esfriava, surgiram as condições adequadas para que se formassem os quarks e leptons. Alguns milionésimos de segundos depois, os quarks se uniram formando os prótons e nêutrons, que, no intervalo de alguns minutos, se agregaram formando os núcleos. Com a contínua expansão e resfriamento, os processos se tornaram mais lentos, foram necessários 380.000 anos para que os elétrons se ligassem aos núcleos formando os primeiros átomos. Mais de um milhão de anos depois a gravidade, agindo em nuvens de gás, começou a formar as estrelas e galáxias (CERN, 2012).

Portanto, quanto mais altas as energias atingidas nos grandes aceleradores de partículas, mais nos aproximamos das condições existentes no início do universo. Essas grandes máquinas nos levam a uma viagem no tempo, para os momentos iniciais do Big Bang.

E assim chegamos ao ponto em que, para estudar o universo, o maior de todos os sistemas (escala da ordem de $10^{26} m$), precisamos compreender as partículas elementares, a menor das realidades físicas (escala da ordem de $10^{-15} m$). Trata-se de um paradoxo emocionante, que nos leva a refletir sobre a beleza e harmonia da criação, e da nossa

capacidade de perceber como tudo está inter-relacionado, todos os conceitos mais sofisticados que elaboramos para compreender o mundo estão entrelaçados entre si.

Tudo que existe no universo

Matéria escura, energia escura, antimatéria

As estrelas em uma galáxia em espiral descrevem órbitas em torno do centro. Mas a velocidade observada das estrelas mais afastadas do centro é muito diferente da teoricamente prevista. E a velocidade é tão grande que toda a matéria que vemos na galáxia é insuficiente para gerar a atração gravitacional necessária para manter a galáxia agregada. No entanto, como se constata, ela não se desagrega. Esse fenômeno ocorre em muitas galáxias que foram estudadas e ele se repete quando se examinam aglomerados de galáxias: elas têm um movimento orbital dentro dos aglomerados, e com uma velocidade de rotação tão grande que a quantidade de matéria que se vê é insuficiente para impedir que o aglomerado se desfaça.

Supõe-se então a existência de um tipo de matéria invisível, produzindo a atração gravitacional necessária para manter as estruturas que vemos no universo. Outros estudos mais recentes, envolvendo, por exemplo, a radiação cósmica de fundo, supernovas e lentes gravitacionais, também levaram à conclusão de que existe um tipo de matéria que, ao contrário daquela que conhecemos, não interage com a força eletromagnética, o que quer dizer que não absorve, não reflete e nem emite luz, sendo, portanto, dificílima de detectar. Por isso é chamada de matéria escura. Só se pode concluir que ela existe por seu efeito gravitacional sobre a matéria visível, que é a que conhecemos. Todo esforço feito ao longo de tantos anos para saber de que é formada a matéria refere-se apenas àquela que é visível, só a essa temos acesso. Quanto à matéria escura, não se sabe quais são seus constituintes. E a estimativa é de que o universo seja formado de 27% de matéria escura.

As observações astronômicas não só evidenciam que o universo está em expansão, como também se constatou, a partir da década de 1990, que a expansão é acelerada, isto é, cada vez mais rápida. Esse resultado é difícil de conciliar com o fato da força gravitacional ser atrativa. A gravidade deveria frear a expansão. Surgiu então o conceito de energia escura, atualmente a hipótese mais aceita para explicar a expansão acelerada do universo. A ideia é que há uma forma de energia associada ao próprio espaço, isto é, que mesmo na ausência de matéria ou radiação, o espaço vazio contenha uma energia residual, a qual, considerada em uma escala cósmica, leva a uma força que aumenta a expansão do universo (Hubblesite). Supõe-se que a energia escura seja extremamente rarefeita e não interaja com nenhuma das forças fundamentais, exceto a gravidade. Tudo isso faz com que seja muito improvável sua detecção em laboratório. Trata-se de um assunto que é atualmente objeto de intensa pesquisa e muito do que existe e asse respeito ainda é especulação. Há vários modelos de energia escura e também teorias alternativas para a expansão acelerada do universo. Mas evidências obtidas a partir da radiação cósmica de fundo indicam qual deve ser a quantidade de energia escura existente. As estimativas mais recentes indicam que o universo é constituído por 68% de energia escura, 27% de matéria escura e apenas 5% da matéria visível à qual temos acesso e que é descrita pelo Modelo Padrão de partículas elementares.

E a antimatéria, por que é tão rara? Desde que foi prevista por Paul Dirac (1928) e detectada poucos anos depois, ela é rotineiramente produzida nos grandes colisores, já tendo sido até criado o antihidrogênio (<https://home.cern/about/experiments/atrap>). O Big

Bang deveria ter criado quantidades iguais de matéria e antimatéria; então por que há muito mais matéria do que antimatéria no universo?

E a pergunta inicial sobre a divisibilidade do espaço-tempo?

Essa, e algumas das outras questões mencionadas, talvez sejam respondidas quando for possível quantizar a gravidade, isso é, quando for criada uma teoria abrangendo tanto a mecânica quântica quanto a relatividade geral.

Apesar do muito que já foi feito, ainda há muito por fazer.

Isaac Newton (1643-1727), um dos maiores gênios da humanidade expressou-se assim:

“Não sei o que possa parecer aos olhos do mundo, mas aos meus pareço apenas ter sido como um menino brincando à beira-mar, divertindo-me com o fato de encontrar de vez em quando um seixo mais liso ou uma concha mais bonita que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece completamente por descobrir à minha frente.”

Leituras adicionais para os mais interessados

OGURI, V., CARUSO, F. & SANTORO, A. *O que são quarks, glúons, bósons de Higgs, buracos negros e outras coisas estranhas?*, Livraria da Física.

WEINBERG, S. *The Discovery of Subatomic Particles*, Revised Edition. Cambridge : Cambridge University Press (2003).

<https://home.cern>

www.fnal.gov/

Referências

BOHR, N. *Philosophical Magazine*, 26(151)1-24; (153)476-502; (155)857-875 (1913).

DE BROGLIE, L. *Thèse de Doctorat*, Masson et Cie. Paris, 1924.

DIRAC, P. *Proc. Roy. Soc. Lon.* A117, 610, 1930; A126, 360 (1928).

EINSTEIN, A. *Ann.Phys.* **17**, 891-921 (1905) ; **20**, 627-633 (1906) ; *Jahrbuch der Radioaktivitat* **4**, 411-462 (1907) ; *Ann.Phys.* **35**, 898-908 (1911).

FRIEDMAN, A. *Zeitschrift für Physik.* 10 (1): 377–386. (1922).

GELL-MANN, M. *Phys. Rev.* **125**, 1067 (1964).

HEISENBERG, W. *A. Phys.* **33**, 879 (1925).

HIGGS, P. *Phys. Rev. Lett.* 12, 132 ; 13, 509 (1964).

KEDROV, B. M. *On the Question of the Psychology of Scientific Creativity*, *The Soviet Review, A Journal of Translations*, Vol. VIII, no. 2 (1967). Tradução para o inglês de Herbert A. Simon. Disponível em

<http://digitalcollections.library.cmu.edu/awweb/awarchive?type=file&item=33706>.

Acessado em 30/08/2016.

<https://home.cern/about/experiments/atrap>

<https://www.fiatphysica.com/blog/learning/particle-primer-physics>

<http://www.infoescola.com/quimica/classificacao-periodica-de-mendeleev/>

LEMAÎTRE, G. Ann. Soc. Sci. Brux. A 47, 49 (1927).

LEMAÎTRE, G. Mon. Not. R. Astron. Soc., 91, 490 (1931).

SCHRÖEDINGER, E. Ann. Phys. **79**, 361, 489 (1926).

SCHWARZ, C. *A tour of the subatomic zoo: a guide to particle physics* (1997).

https://books.google.com.br/books?id=ff5CabP5wAEC&redir_esc=y&hl=pt-BR.

Acessado em 29/08/2016.

t'HOOFT, G. Nucl. Phys. B33, 173 ; B35, 167 (1971).

The early universe, <https://home.cern/> (2012). Acessado em 29/08/2016.

What is dark energy ? <http://hubblesite.org/>. Acessado em 29/08/2016.

ZWEIG, C. CERN Rep. 8419/TH412 (1964).