

27/10/10 13h LADIF

# A CONSTITUIÇÃO PARTICULADA DA MATÉRIA

Alex Dias de Carvalho

Monografia apresentada para obtenção do diploma de Licenciatura

Instituto de Física

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

Banca Examinadora:

Professora Penha Maria Cardozo Dias (orientadora)

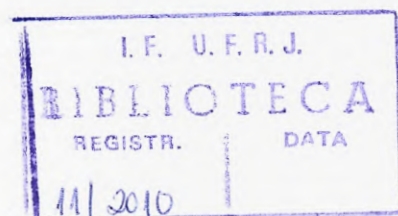
Professora Wilma Machado Soares Santos

Professora Teresinha J. Stuchi

Professora Dora Izzo

2010

**11/2010**



# Agradecimentos

A Deus que mediante o poder de sua palavra criou todas as coisas, visíveis e invisíveis, e que ensina ao homem a humildade diante da excelência de sua obra.

A meus Pais que sempre me foram exemplos práticos de perseverância, amor e respeito.

À professora Penha que orientou este trabalho com indecomponível competência e, sobretudo, presteza, minha eterna gratidão.

Aos professores que na revisão deste trabalho supriram minhas limitações, aperfeiçoando-o, meu muito obrigado.

Aos meus amigos de trabalho que muitas vezes supriram minha parte para que eu pudesse me dedicar a esta obra, meu sincero agradecimento.

# Resumo

O objetivo deste trabalho é reunir um material que mostra a jornada de vários cientistas em busca do coração da matéria e de como foi descoberto que todo o mundo material é constituído por átomos.

Essa história, até onde sabemos, começou com os gregos no século VI a.C. e envolveu cientistas como Dalton, Descartes, Franklin, Faraday, Hertz e muitos outros que utilizaram a química, a física e a filosofia.

Discutimos o trabalho de J.J. Thompson sobre a descoberta do elétron, os trabalhos de Ernest Rutherford sobre a constituição do núcleo.

Discutimos como pesquisas em raios cósmicos levaram além e surpreenderam, mostrando a existência de partículas não necessárias e não imagináveis no contexto da Física no início do século XX. Durante algum tempo, os raios cósmicos foram a única fonte de observação desses entes físicos, até o desenvolvimento dos modernos aceleradores de partículas.

Para uso desse trabalho no ensino médio, adicionamos o conhecido poster de Fernanda Ostermann.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>O Atomismo na Tradição Filosófica</b>	<b>6</b>
1.1	O Atomismo na Filosofia Grega Antiga . . . . .	6
1.1.1	Reação ao “Monismo” . . . . .	7
1.2	A Natureza Particulada na Filosofia Moderna . . . . .	9
1.3	Correntes anti-atomistas no século XIX . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Evidências Empíricas</b>	<b>12</b>
2.1	Dalton e o Peso Atômico . . . . .	12
2.2	Michael Faraday e a Eletrólise . . . . .	13
<b>3</b>	<b>A Hipótese do Elétron</b>	<b>16</b>
3.1	A Natureza da Eletricidade no Final do Século XIX . . . . .	16
3.2	A Natureza da Eletricidade: Raios Catódicos . . . . .	18
3.3	O experimento de J.J. Thomson . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Partículas Atômicas</b>	<b>22</b>
4.1	A Hipótese do Próton . . . . .	22
4.2	A Identificação do Próton . . . . .	23
4.3	O Neutron . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Outras Partículas</b>	<b>27</b>



# Introdução

Imagine uma escola sem muros, onde não há professores nem alunos, tão somente pensadores, investigadores e questionadores do mundo. Assim começou (e continua sendo) a ciência, há milhares de anos, desde quando o homem passou a investigar os fenômenos naturais e a modificar o mundo em que vive. E hoje? Não seria esse o papel da escola? Fomentar o conhecimento e auxiliar as mentes a investigarem as coisas para que as compreendam, inovem e as transformem em benefício de todos como aliás defendem, também, os *Parâmetros Curriculares Nacionais* (PCN), quando diz: “. . . .Trata-se de construir uma visão da Física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade” (PCN+, p.59). No competitivo mundo em que vivemos, onde a escola tem-se tornado um mero pré-vestibular, pecamos ao resumir a ciência a fórmulas e definições, esquecendo-nos de transmitir talvez algo ainda mais importante: a história de seu desenvolvimento.

O objetivo deste trabalho é reunir um material que mostra a jornada de vários cientistas em busca do coração da matéria e de como foi descoberto que todo o mundo material é constituído por átomos, uma história que, até onde sabemos, começou com os gregos no século VI a.C. e envolveu cientistas como Dalton, Descartes, Franklin, Faraday, Hertz, e muitos outros que utilizaram a química, a física, a filosofia e muito empirismo em seus raciocínios e que inúmeras vezes precisaram abrir mão do que acreditavam, em face das novas realidades que se apresentavam o que tornou-se fundamental para a descoberta do elétron por J.J. Thomson, do próton por Rutherford e do nêutron por Chadwick e que os levou além do que podiam imaginar, às sub-partículas e ao estudo de raios cósmicos que foram, durante muito tempo, a única fonte de observação desses entes físicos, até o desenvolvimento dos modernos aceleradores de partículas, como por exemplo, o do CERN, com mais de 27 Km de extensão; uma história que não terminou e que continuará sendo escrita por todos que se dedicarem a ela.

Procuramos apresentar este trabalho não apenas obedecendo à cronologia dos fatos, mas também agrupando e contrastando os diversos pensadores e pesquisadores. Assim:

O Capítulo 1 trata do atomismo em sua concepção filosófica, examinando as escolas de pensamento grego acerca da constituição da matéria como o monismo, o pluralismo e o atomismo

bem como o pensamento Cartesiano do século XVII sobre a existência ou não do vácuo e do átomo e as correntes anti-atomistas do século XIX que buscaram estabelecer uma ciência com bases fenomenológicas, sem fazer hipóteses sem bases empíricas.

O Capítulo 2 apresenta as evidências empíricas sobre a existência de átomos. Inicialmente, discutimos o trabalho de Dalton sobre a *lei das proporções definidas*, que ele explicou, considerando a existência de átomos. Depois, os experimentos de eletrólise, realizados por Michael Faraday, que sugeriam a existência de partículas portadoras de carga.

O Capítulo 3 aborda a hipótese do elétron, partindo do estudo sobre a natureza da eletricidade, no final do século XVIII, com os trabalhos sobre a eletrificação por contato de Steven Gray e Du Fay e que influenciaram os estudos de Benjamin Franklin; em meados do século XIX, o estudo sobre a natureza dos raios catódicos levariam a algumas hipóteses, como a da corrente molecular, por William Crookes e a de ondas por Henrich Hertz. Esses trabalhos foram fundamentais para a descoberta do elétron por J.J. Thomson e a determinação da razão carga/massa.

No Capítulo 4, apresentamos os experimentos de Ernest Rutherford que, com seus assistentes Marsden e Geiger, levaram à descoberta do núcleo atômico e do próton. Apresentamos as considerações que levaram à suspeita da existência de uma partícula neutra, no núcleo e que foi mais tarde, em 1932, descoberta por Chadwick.

No Capítulo 5, por fim, quando já em 1932 o próton, o nêutron e o elétron respondiam pela constituição da matéria e o *fóton* pela radiação, os estudos sobre a ionização da atmosfera levou à descoberta dos raios cósmicos e com o aperfeiçoamento de instrumentos, como a câmara de nuvens e o telescópio de raios cósmicos, inúmeras subpartículas foram identificadas, entre elas o pósitron, a primeira partícula não atômica detectada. Encontra-se também neste capítulo tabelas com as partículas e anti-partículas com existência comprovada denominadas como *modelo padrão*. Para uso no ensino médio e auxiliar na apresentação do material deste trabalho, acrescentamos um poster elaborado por Fernanda Ostermann.



# Capítulo 1

## O Atomismo na Tradição Filosófica

### 1.1 O Atomismo na Filosofia Grega Antiga

Os gregos entenderam que deveria haver algo persistente atrás das mudanças que são observadas na Natureza, o qual conferisse identidade ao mundo e o explicasse.<sup>1</sup> A sugestão foi procurar a identidade na substância-propriedade de que é feito o mundo. A ideia de uma substância-propriedade, entretanto, leva a dificuldades insolúveis. Autores posteriores propuseram, então, outra resposta para essa suposta “persistência”; seria a forma, cujo significado envolve a ideia de estrutura, organização, finalidade. No século VI a.C., Tales, Anaximandro e Anaxímenes — todos da cidade de Mileto, na Jônia — propuseram que a permanência que traz ordem à Natureza deveria ser buscada na matéria ou, mais propriamente dito, na substância de que o mundo é feito. A pergunta colocada foi “de que é feito o mundo?”. Substâncias como água, ar e uma combinação de todas (apeiron) foram propostas, independentemente. Um aspecto dessas substâncias era que “o estofado do mundo era o estofado da vida”. Assim, a “água” era o princípio da vida, como interpretado por Aristóteles; o “ar” era a alma, o sopro da vida. Tales de Mileto teria dito que “tudo está repleto de deuses”, o que foi interpretado por Aristóteles como significando que “a alma está misturada ao todo”. Não existia separação, como hoje, entre matéria e espírito; a Natureza, embora material, era, também, “dotada de espírito e vida”.

O ponto de vista de que uma substância única explicaria tudo sobre o mundo é chamado *monismo*. A redução da explicação a um único conceito — o que se chama “reducionismo” — não é, necessariamente, saudável. No caso em questão, a dificuldade do monismo está nas dualidades *quente x frio, seco x úmido*: A água fria e úmida teria de originar uma substância quente e seca, por exemplo, poeira, fogo. Tentar resolver o problema supondo uma mistura de substância-propriedade não é uma solução viável, pois seria necessário explicar como a

---

<sup>1</sup>Este texto foi transcrito de Dias e Sapunaru, *Formação das Categorias*.

substância-propriedade aparece; e de como as propriedades aparecem com seus opostos.

### 1.1.1 Reação ao “Monismo”

#### O Problema Eleático

Parmênides de Elea nasceu e viveu na cidade de Elea, no sul da Itália; estima-se que tivesse 65 anos por volta de 450 *a.C.*. Parmênides apresenta um silogismo, no qual mostra a impossibilidade do vácuo e do “movimento”. Várias paráfrases do mesmo silogismo são:

1. Premissa maior 1: “O quê é” não pode consistir de “o quê não é”, pois “o quê não é” não existe.

Premissa menor 1: ‘Transformação’ envolve “tornar-se o quê não é”.

Conclusão 1: ‘Transformação’ é irreal ou ‘movimento’ é impossível.

2. Premissa maior 2: O Universo é “o quê é” e não pode consistir de “o quê não é”. O “que é” é matéria.

Premissa menor 2: Espaço vazio só pode ser definido como “onde ‘o quê é’ não é (esteja)”.

Conclusão 2a: Não há espaços vazios no Universo.

Conclusão 2b: Pode-se inferir, novamente, que ‘movimento local’ (deslocamento) não pode existir, pois não há espaços vazios para os quais uma coisa se possa mover.

Desses silogismos, podem ser tiradas várias conseqüências, mas uma é particularmente importante a esse trabalho: O *monismo* é verdadeiro, pois espaço vazio não existe: O Universo é uma massa imóvel, de uma única substância, uma totalidade ou *plenum*. É indivisível, pois não há espaços vazios por onde uma faca (cósmica) pudesse entrar e dividi-lo.

Melisso de Samos pertenceu à Escola Eleática, como são chamados os seguidores das idéias de Parmênides; por volta de 441 *a.C.* seria um filósofo maduro. Em defesa da não existência do vácuo, ele argumentou que o Universo deve ser um *plenum*, isto é, uma totalidade única, sem vazios. Uma paráfrase do argumento é a seguinte: Se o Universo não fosse uma totalidade única, haveria espaços vazios que poderiam ser preenchidos; parece que o ponto é que o preenchimento desses espaços envolve ‘movimento’ interpretado aqui no sentido restrito de “movimento local”, o que era proibido. Analogamente, se fosse uma pluralidade de coisas, cada uma dessas coisas teria de ser uma totalidade, um *plenum*; pois, se alguma não o fosse, aplicação do argumento acima levaria à conclusão absurda de existir “movimento”: “Assim, se houvesse muitas coisas, elas teriam de ser tal como o Um”, disse Melisso.



## Pluralismo e Atomismo

Parmênides lançou um problema sério sobre o dado sensorial. O *pluralismo* nasce em uma tentativa de trazer realidade ao Universo tangível. A idéia é livrar o “materialismo” dos Milesianos de sua dificuldade, o *monismo* (que é, também, uma característica da teoria de Parmênides).

Alguns *pluralistas* notáveis foram: Empédocles de Ácragas (teria vivido entre 492-432 a.C.), Anaxágoras (teria nascido em 500 a.C.), e o atomista Demócrito de Abdera (teria nascido em 460 a.C.). Contemporâneos, esses autores “pós Parmênides” não se colocam em linha sucessória de pensamento; por exemplo, o raciocínio acima, de Melisso, é posterior a Empédocles.

Empédocles liberta o “materialismo” dos Milesianos das dificuldades do *monismo*, declarando que o “vir a ser” não implica destruição “do quê é”, como queria Parmênides. O mundo sensorial resultaria da combinações de quatro elementos *terra, água, ar e fogo*, em proporções numéricas; eles são reais e sempre existiram. Existe “movimento”, mas não é preciso supor espaços vazios; a analogia apresentada foi com o movimento de um peixe que se desloca na água; porém, a analogia não parece clara, pois, para que funcione, tem-se de supor que o peixe deslize sobre a água, sem deslocá-la.

Leucipo, no século V a.C., virou ao avesso o raciocínio de Melisso, usando-o justamente para atacar o *monismo* que Melisso defendia. Leucipo supôs que o Universo fosse constituído de uma infinidade de pequenos *plena*, invisíveis por serem pequenos; cada *plenum* é indivisível (pelo argumento de Melisso) e recebeu o nome de *indivisível* ou, o que significa o mesmo, *átomo*. A matéria do Universo é formada por esses *plena* imersos em um vácuo, pois entre dois *plena* ou há um outro *plena* ou nada. Mas Leucipo não considera a existência do vácuo, para ele só os *átomos* existem.

Demócrito foi pupilo de Leucipo e apresentou uma teoria atomista. As coisas do mundo sensorial resultam de combinações de *átomos*. Os *átomos* seriam “o quê existe”; seriam indivisíveis, muito pequenos para poderem ser vistos, indestrutíveis, diferentes em tamanho e forma; um gosto amargo seria devido a átomos em gancho ou pontudos, que arranhariam a língua; sabor doce seria devido a átomos lisos; maciez, a átomos não muito bem empacotados; cores eram devidas às posições dos átomos na superfície, o que faz com que a luz incidente seja refletida de modos diferentes. Demócrito teve de assumir um espaço vazio, para que os átomos pudessem se mover (“tivessem para aonde ir”). Os átomos mover-se-iam no espaço vazio, sem rumo, colidindo uns com os outros e, então, emaranhando-se em combinações. Com isso, ele atribui existência ao vazio.



## Aristóteles

O Universo de Aristóteles não apresenta espaços vazios, pois ele supunha que o vácuo não existisse. Como já se viu, era difícil para os gregos entender o “nada”, pois o que poderia existir era a matéria e o vácuo — enquanto ausência de matéria — era, de certo modo, uma espécie de “nada”. Aristóteles, apesar de ter respondido ao problema de Parmênides e ter definido a possibilidade de movimento, nega “realidade” ao vácuo.

## 1.2 A Natureza Particulada na Filosofia Moderna

Descartes ressaltou o papel e a força da razão, colocando a *clareza e distinção* — dois novos conceitos — como critérios únicos para se chegar à verdade e mostrou interesse pelas novas ciências da Psicologia e da Física; com isso, Descartes coloca-se como um dos primeiros filósofos a valorizar o desenvolvimento dos princípios metodológicos que caracterizam o pensamento científico-filosófico do mundo moderno e contemporâneo. O pensamento cartesiano influenciou profundamente no humanismo científico, pois foi um dos responsáveis pela inauguração de uma nova idéia e uma nova concepção do ser humano e da Natureza, eminentemente distintas daquelas que prevaleceram durante a Idade Média.

O conceito de ‘movimento’ é entendido pelo conceito de *movimento local*, a simples mudança espacial; a formação dos corpos visíveis dá-se por aglutinação de partes menores da matéria; mas essas partes são infinitamente divisíveis, pois Descartes não aceitou o conceito de átomo e nem o de vácuo. Para Descartes, falar de um movimento local em um Universo é estabelecer os princípios e leis para o movimento da matéria; essas leis são fundamentadas em um conceito metafísico, que estabelece Deus como organizador e criador das leis da Natureza: Deus criou o mundo com matéria em movimento e Ele criou as leis que organizam o Universo. Essas leis explicam tanto o Universo físico, quanto o corpo humano.

Os principais pontos da Filosofia cartesiana são:

1. Descartes criticou a tradição cultural que, a seu ver, levou a muitas dúvidas, pouco saber e opiniões divergentes na Filosofia, porém a verdade deve ser unívoca. É preciso que haja um método (de pensamento ou reflexão filosófica) que possa levar a verdades incontestáveis. Como o homem orienta sua vida por opiniões, cujas validades ele não costuma questionar, o método começa, pois, advogando um questionamento sistemático. Tudo que provenha do conhecimento sensível deve ser colocado em dúvida, porque os sentidos enganam; da mesma forma, na Matemática é preciso haver certeza de que a representação mental de algo corresponde à verdade. Em suma, só é possível ter certeza de que se duvida; é um pressuposto do método que a reflexão só pode levar à certeza (evidência absoluta), se partir da negação absoluta de todas as certezas. Mas, como pode gerar certeza, a dúvida é provisória; quanto mais forte e



radical for a dúvida, maior será a certeza gerada por ela e, assim, é preciso levar a dúvida às suas últimas conseqüências, se se deseja fundamentar a verdade da ciência. Porém, a dúvida é um exercício do pensamento e, portanto, aquele que duvida não pode duvidar do próprio pensamento. Se a dúvida existe, existe o pensamento: “Eu que duvido penso, portanto existo”, pelo menos como ser pensante; daí, o célebre “penso, logo existo” ou, em Latim, *cogito, ergo sum*, o chamado *cogito cartesiano*, a primeira certeza, fundamento da racionalidade cartesiana e do racionalismo moderno.

2. Ao fundamentar a certeza na razão, Descartes postula que só se deve aceitar como verdade ou como uma certeza aquilo que se apresenta ao espírito de forma *clara e distinta*, ou seja, sem dúvidas.

3. Confiante na razão, Descartes pode partir para descobrir outras certezas e partiu para a prova da existência de Deus.

Porque Deus existe, é que existe a idéia de Deus, na mente humana: Como poderia um espírito finito gerar a idéia de infinito? Como poderia um ser imperfeito gerar a idéia de perfeição? A causa dessas idéias só pode ser o próprio Deus, que deixou, no ser criado, a marca de Sua infinitude, a idéia de infinito; também, se existe a idéia de um ser perfeito, é porque Deus existe.

Mas se Deus é perfeito, Ele é bom e não engana; Ele não pode permitir que o espírito humano erre sempre e nem pode permitir a interferência de um gênio maligno. Assim, surgem:

1. O otimismo científico — a crença na possibilidade da ciência.
2. A crença inabalável na razão, como ferramenta de aquisição de conhecimento.
3. Uma conseqüência de fundamentar a certeza na razão é a separação entre o mundo físico (*res extensa*) e o pensamento (*res cogitans*). Ora, se a percepção que se tem do mundo físico decorre dos sentidos, o que garante sua realidade? De novo, dado que Deus tudo pode, é possível existir o mundo criado por Ele. Se uma idéia *clara e distinta* existe no espírito humano, é porque existe na realidade; caso contrário, o espírito do homem teria, por obra de um gênio maligno, tendência ao erro, o que, certamente, é incompatível com a idéia do bom Deus. Logo, porque Deus é bom, as representações do mundo dadas pelos sentidos não são meras ficções: Se Deus existe, o mundo físico também existe e a garantia da sua objetividade é Deus. A evidência ou certeza das idéias *claras e distintas* é o “critério de verdade” do conhecimento, sua certeza.
4. Há, no pensamento, uma idéia *clara e distinta* sobre o mundo físico: É a *extensão*. Para Descartes, a *extensão* é a essência das coisas materiais, as quais apresentam *magnitude e forma*. Basicamente, para que “a coisa” exista, ela tem de ter tamanho e forma. O que



existe é a *substância extensa* e, conseqüentemente, o vácuo não pode existir, não é *claro e distinto*.

### 1.3 Correntes anti-atomistas no século XIX

Wilhelm Ostwald (1853-1932) e Ernst Mach (1838-1916) buscavam estabelecer uma ciência com bases fenomenológicas, sem fazer hipóteses sem bases empíricas. Assim, negavam a existência de átomos, pois, até então, havia poucas provas diretas que sustentassem a sua existência e a de moléculas.

A melhor e mais curta descrição dos princípios da escola por eles fundada foi dada pelo filósofo da ciência Maurice Schlick em um ensaio publicado em Junho de 1926 (Gerald Holton, p.269):

Mach foi um físico, fisiologista e, também, um psicólogo e sua filosofia surgiu do desejo de encontrar o principal ponto de vista a que ele poderia recorrer em qualquer investigação, o qual ele não teria de mudar, quando passasse do campo da física à fisiologia ou psicologia. Tal ponto de vista sólido ele encontrou, voltando-se para o que é dado antes de qualquer atividade de investigação científica, a saber, o mundo das sensações . . . . Como todo testemunho a respeito do assim chamado mundo externo é baseado somente em sensações, Mach afirmou que podemos e devemos tomar essas sensações e complexos de sensações como o único conteúdo desses testemunhos e que, portanto, não é necessário assumir, em adição, uma realidade desconhecida escondida atrás das sensações. [. . .]. Um corpo, um objeto físico, é nada mais que um complexo, um mais ou menos firme padrão de sensações, isto é, de cores, sons, calor, pressão, etc.

A libertação da ciência de qualquer metafísica foi a ambição ao longo da vida de Mach. Ele foi um físico e filósofo importante e também uma figura poderosa na política da vida acadêmica e criou uma escola de pensamento.

Assim, o atomismo na química e na física, era considerado não só desnecessário, mas até mesmo uma perigosa hipótese da metafísica. Os seguidores dessa escola duvidavam da existência do átomo e também de sua viabilidade epistemológica, porque não haviam dados experimentais suficientes para comprová-la empiricamente; eles preferiam uma teoria científica que procurasse explicar os fenômenos a partir do sensorialmente observado. Alguns dos estudantes leais de Mach cuidaram para que sua mensagem tivesse fortes adeptos em universidades, nas quais pudessem participar na escolha dos novos responsáveis.



## Capítulo 2

### Evidências Empíricas

#### 2.1 Dalton e o Peso Atômico





















ELEMENTS					
	Hydrogen	1		Strontian	46
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	56
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

Figura 2.1: Tabela dos elementos químicos e seus respectivos pesos atômicos, proposta por Dalton (Weinberg, p.81).

Muito antes da existência do átomo ser reconhecida, a razão entre as massas dos átomos de diferentes elementos já era conhecida. A determinação dessas razões originou-se com o trabalho de Dalton (1766-1814), no início do século XIX.

Dalton observou que os pesos (estritamente falando, as massas) de elementos químicos necessários para produzir um elemento composto deviam ser misturados sempre na mesma proporção. Assim, ele observou, por exemplo, que, sempre que queimava hidrogênio em presença de oxigênio, precisava usar 5,5 g de oxigênio para cada grama de hidrogênio. Mais especificamente, ele observou que, se se usar mais oxigênio do que as 5,5 g, haverá sobra de oxigênio e, se se usar menos, haverá sobra de hidrogênio, ao final da reação (Weinberg, p.78).

A importância do trabalho de Dalton está na interpretação das medidas, mais do que nas próprias medidas, que podem ser consideradas cruas, para padrões de hoje; por exemplo, hoje se sabe que 8 g de oxigênio reagem com 1 g de hidrogênio (Weinberg, p.79). Para explicar que átomos se combinam em proporções fixas, Dalton imaginou que a matéria fosse composta por átomos, partículas demasiadamente pequenas para serem vistas e que não podem ser divididas. Esses átomos seriam como grãos redondos, que possuiriam o mesmo tamanho em cada substância, mas não o mesmo peso; o mais leve de todos os átomos seria o de hidrogênio, uma vez que era a substância mais leve conhecida. Posto isso, é possível explicar a lei da combinação química, acima: Se a água for formada por partículas, cada uma contendo um átomo de oxigênio e um átomo de hidrogênio, então a razão  $\frac{5,5}{1}$  pode ser explicada, se um átomo de oxigênio pesa 5,5 vezes mais que um átomo de hidrogênio. Na concepção de Dalton, peso atômico significa o peso, ou massa, de um átomo qualquer, em relação ao de hidrogênio (Weinberg, p.80).

Dalton assumiu que a fórmula da água fosse  $HO$ , mas hoje se sabe que é  $H_2O$ , ou seja, dois átomos de hidrogênio combinam-se com um de oxigênio, formando uma molécula. De acordo com a fórmula atual  $H_2O$ , a interpretação de Dalton seria: 1 átomo de oxigênio pesa 5,5 vezes mais do que 2 átomos de hidrogênio ou  $2 \times 5,5 = 11$  vezes mais do que um átomo de hidrogênio, o que o deixa bem perto do valor atual, que é, aproximadamente, 16 (Weinberg, p.80).

## 2.2 Michael Faraday e a Eletrólise

Por volta da década de 1830, supunha-se que a decomposição de uma solução pela qual passa uma corrente fosse devida a forças de atração e repulsão exercida sobre as moléculas da solução pelos terminais metálicos dos quais a corrente entrava e saía da solução. Essas forças haviam sido assumidas por Grothuss, Davy e De La Rive. Grothuss e Davy supunham que havia uma cadeia de decomposição e recomposição do líquido. De La Rive, que as moléculas adjacentes aos terminais eram as únicas a serem decompostas, sendo atribuídos aos seus fragmentos o poder de atravessarem o líquido de um terminal para o outro (Whittaker, v.1, p.177).

Faraday testou essa hipótese. O procedimento era o de eliminar o contato dos terminais com a solução; então, embebeu um pedaço de papel em uma solução salina de iodeto de potássio e colocou, em suas extremidades, sem encostar no papel, duas agulhas bem próximas; quando o gerador de corrente contínua foi ligado, ocorreu uma descarga elétrica, a corrente atravessou o papel, rompendo a resistência do pequeno intervalo de ar entre as agulhas e as extremidades do papel; nessas circunstâncias, ele verificou que o sal sofreu decomposição. Mas não havia terminais metálicos em contato com a solução, logo todas as hipóteses atribuídas à decomposição pela ação do contato dos terminais com a solução tornaram-se insustentáveis (Whittaker, v.1, p.177). Faraday reteve uma das idéias da teoria de Grothuss e Davy, a qual



supunha que houvesse uma cadeia de decomposição e recomposição do líquido, mas não atribuiu os processos à ação dos terminais, mas a uma força possuída pela corrente elétrica, a qual está em todos os lugares através da solução. Exemplificando sua teoria com a eletrólise da água: Antes da passagem da corrente, o hidrogênio de uma molécula  $A$  teria uma ligação mais forte com o oxigênio de  $A$  do que com os átomos de oxigênio das moléculas  $B, C, D, \dots$ ; quando uma corrente elétrica atravessa o líquido, a afinidade do hidrogênio de  $A$  com o oxigênio de  $B$  é reforçada, se  $A$  e  $B$  estiverem ao longo da corrente, enquanto o hidrogênio de  $A$  retira alguns de seus vínculos com o oxigênio de  $A$ . Enquanto o oxigênio e hidrogênio de  $A$  estiverem associados, não há decomposição, porém há uma polarização; mas se o oxigênio e hidrogênio de  $A$  se separarem por não suportarem a pressão, haverá decomposição. A cada troca, um átomo de oxigênio associa-se com um parceiro mais próximo ao terminal positivo, enquanto um átomo de hidrogênio associa-se a um parceiro mais próximo ao terminal negativo. Faraday conclui que os terminais são as superfícies limites para as substâncias decompostas; e, exceto nos terminais, cada partícula encontra outra com que se combine, o que explica porque, em muitos casos, os terminais não retêm os produtos da reação: Os produtos não seriam atraídos pelos terminais, mas expulsos da solução (Whittaker, v.1, p.178). Faraday introduziu uma nomenclatura. Chamou os terminais de entrada e saída de corrente de *eletrodos*: O de elevado potencial, no qual o oxigênio, cloro, ácidos, etc., surgiam, chamou de *anodo* e o de baixo potencial, no qual metais, as substâncias alcalinas e as bases apareciam, de *catodo*. Os corpos decompostos diretamente pela corrente, ele denominou *eletrólitos*. As partes em que são decompostas, chamou de *íons*; os íons ácidos que apareciam no anodo, nomeou *ânions* e os íons metálicos que surgem no catodo, *cátions* (Whittaker, v.1, p.179).

Faraday dedicou-se, então, a testar a validade de uma outra suposição: A taxa com que um eletrólito é decomposto depende unicamente da intensidade de corrente elétrica que passa através dele e não da dimensão dos eletrodos ou da concentração da solução. Faraday realizou a eletrólise de diferentes eletrólitos e encontrou que a massa das substâncias obtidas era sempre proporcional a seu peso atômico e à quantidade de eletricidade consumida pela reação (Whittaker, v.1, p.179).

Faraday pesou as substâncias que surgiam nos eletrólitos, por exemplo, na eletrólise do cloreto de prata ( $AgCl$ ), que se decompõe em  $Ag^+$  e  $Cl^-$ . As reações nos eletrodos são:  $Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$  e  $2Cl^- \rightarrow 2e^- + Cl_2$ ; tomando como unidade de carga a quantidade para produzir um átomo de prata, então para produzir uma molécula de  $Cl_2$ , precisa-se de duas unidades. Faraday não tinha como medir a unidade de carga; porém verificou que uma corrente de 1 A produz  $10^{-6}$  Kg de prata, em 1 s, que se depositam no eletrodo negativo e mais quantidade é depositada proporcionalmente à corrente e ao tempo. Como um átomo de  $Ag$  é produzido para cada unidade de carga, o número de átomos de  $Ag$  em  $10^{-6}$  Kg é igual ao número de unidades



de carga transferidas por um  $1 A$  em  $1 s$ , o que se define como  $1 \text{ Coulomb de carga}$ ; logo, a razão entre a massa de um átomo de  $Ag$  pela unidade de carga elétrica é  $10^{-6} \frac{Kg}{\text{Coulumb}}$ ; como a prata é 108 vezes mais pesada que o hidrogênio, essa razão para o hidrogênio é cerca de 100 vezes menor ou  $10^{-8} \frac{Kg}{\text{Coulumb}}$ . Expressando de outro modo,  $1 mol$  de qualquer substância contém o mesmo número de moléculas, assim a quantidade de carga para produzir um  $1 mol$  de qualquer substância é igual ao número de unidades de eletricidade requerida por molécula, multiplicada por uma constante universal, o *Faraday* (Weinberg, p.92-93).

Faraday via as unidades eletrolíticas de carga como quantidades irredutíveis que se transferiam entre os eletrodos e os eletrólitos. Foi no sentido de unidade básica de carga na eletrólise que o termo *elétron* foi introduzido (Weinberg, p.92-93). Assim, Faraday mostrou como é natural supor que a eletricidade que atravessa o eletrólito é o equivalente exato daquela que possuía pelos átomos separados nos eletrodos, o que implica que existe uma certa quantidade absoluta de energia elétrica associada com cada átomo de matéria (Whittaker, v.1, p.180). Segundo Whittaker (v.1, p.180): “As alegações desta especulação esplêndida [Faraday] defendia com convicção”, dizendo que (*apud* Whittaker, p.180):

A harmonia, com que a teoria das proporções definidas se associam com a afinidade eletroquímica é muito grande. De acordo com isso, os pesos equivalentes dos corpos são simplesmente as quantidades deles que contêm igual quantidade de eletricidade ou têm, naturalmente, igual poder elétrico, sendo a eletricidade que determina o número eqüivalente, pois determina a força de combinação. Se se adota o fraseado da teoria atômica, os átomos dos corpos que são equivalente uns aos outros em sua ação química normal, têm quantidades iguais de eletricidade naturalmente associados a eles. Mas devo confessar que invejo o termo *átomo*, pois embora seja muito fácil falar de átomos, é muito difícil formar uma clara idéia de sua natureza, especialmente quando substâncias compostas estão sob consideração.



## Capítulo 3

# A Hipótese do Elétron

### 3.1 A Natureza da Eletricidade no Final do Século XIX

A propriedade do âmbar, de atrair objetos leves como fios de cabelos era conhecida desde a Antiguidade. Quando inglês William Gilbert(1544-1603) descobriu que outros materiais como o vidro e algumas pedras semi-preciosas possuíam propriedade semelhante, introduziu o termo *elétrico* — da palavra grega para âmbar, *electron* — para designar essa propriedade. As observações desses fenômenos levariam à idéia de que havia algum tipo de fluido que seria produzido ou transferido quando essas materias eram atritados. Em 1729, Steven Gray (1667-1736) observou que essa propriedade podia ser transmitida a outros corpos pelo simples contato entre materias, o que podia significar que a eletricidade poderia ser separada do corpo que a produzia (Weinberg, p.14).

Em 1733, Charles-François de Cisternay Du Fay (1698-1739), estudando os experimentos de Gray, iniciou seu trabalho com eletricidade: Observou que pequenos pedaços de metal que haviam estado em contato com um tubo de vidro eletrificado repeliam-se, porém atraíam pedaços de metal que haviam estado em contato com um pedaço de resina eletrizada. Du Fay supôs que as duas eletricidades eram diferentes: Aquelas semelhantes à produzida pelo vidro ele chamou *vítrea* e à produzida pela resina e pelo âmbar, *resinosa*. Du Fay observou que, quando atritava um lenço de seda no bastão se vidro, este adquiria eletricidade vítrea e aquele, resinosa; quando atritava o âmbar com um pedaço de lã, este adquiria eletricidade resinosa e aquele, vítrea; os pedaços de metal que entravam em contato com o vidro, apesar de se repelirem, atraíam os pedaços tocados pelo âmbar, o que o levou a concluir que as eletricidades diferentes se atraíam, enquanto as iguais se repeliam (Weinberg, p.14-15).

O abade Jean-Antoine Nollet (1700-1770) interpretou a eletricidade de Du Fay como forma de fluidos elétricos, *vítreo* e *resinoso*; essa teoria era consistente com os experimento realizados no século XVIII; mais tarde, a teoria de um único fluido seria proposta, primeiramente, por

William Watson (1715-1787), influenciando Benjamin Franklin (1706-1790) (Weinberg, p.16).

Franklin interpretou a eletricidade como um único fluido composto de partículas, as quais um corpo poderia transferir para outro. Quando o lenço de seda fosse atritado com o vidro, a eletricidade da seda seria transferida para o vidro, logo a seda ficaria com deficiência de eletricidade — o que chamou de *eletricidade negativa* — e que correspondia à eletricidade *resinosa*; o vidro ficaria com excesso de eletricidade — o que chamou de *eletricidade positiva* — que correspondia à eletricidade *vítrea*. Junto com esse raciocínio, Franklin também introduz a hipótese fundamental da conservação de carga, a qual não pode ser criada nem destruída, apenas transferida (Weinberg, p.16).

A hipótese de Franklin explicava a atração entre um material com eletricidade *vítrea* e outro *resinoso* e a repulsão entre dois materiais carregados com eletricidade *vítrea*. Mas não explicava a repulsão entre corpos com falta de fluido, isto é, a repulsão entre dois materiais sem eletricidade ou com eletricidade *resinosa*. Franz Ulrich Theodosius Aepinus (1724-1802) propôs, em 1759, que, havendo ausência de fluido elétrico, a matéria repeliria a si mesma, por não estar eletricamente equilibrada; com esse complemento, a hipótese de um único fluido elétrico conseguia explicar todos os fenômenos que a teoria dos dois fluidos de Du Fay e Nollet explicavam (Weinberg, p.16-18).

Discussões sobre essas duas hipóteses atravessaram o século XVIII. Faraday procurou não emitir opinião, pois ele desejava deixar a questão em aberto para evitar qualquer suposição definitiva (*apud Whittaker*, v.1, p.176):

Após muita consideração sobre o modo como as forças elétricas são organizadas nos vários fenômenos, em geral, cheguei a certas conclusões, que tentarei relatar, sem comprometer-me a qualquer opinião quanto à causa da eletricidade, isto é, quanto à natureza do poder [da eletricidade]. Se a eletricidade existir independentemente da matéria, então penso que a hipótese de um fluido não se mantém face àquela dos dois fluidos. Existem, eu penso, evidentemente, o que posso chamar dois elementos de poder, de forças iguais e que agem um sobre o outro. Mas esses poderes podem se distinguir apenas pela direção e não podem ser mais separados do que as forças norte e sul nos elementos de uma agulha magnética. Podem ser os pontos polares de forças originalmente colocadas nas partículas de matéria.



## 3.2 A Natureza da Eletricidade: Raios Catódicos

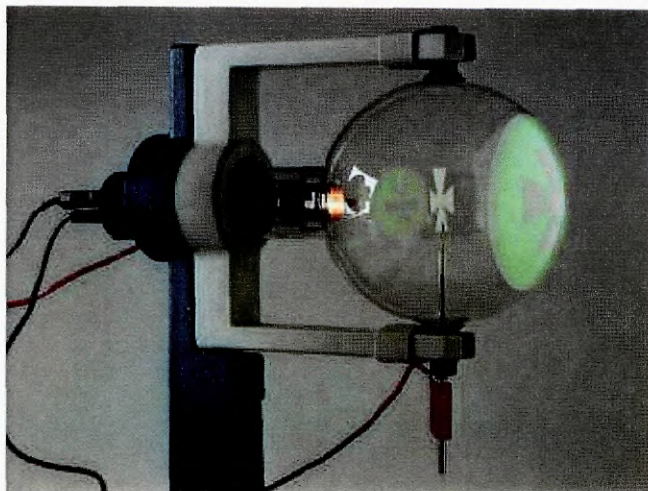


Figura 3.1: Tubo de raios catódicos. A luz verde-clara está na superfície interna do vidro, oposta ao catodo. O eletrodo negativo está na luz laranja. A sombra ocasionada pelo anodo em forma de cruz no centro fornece provas de que o raio é formado por partículas (*The Particle Odyssey*, p.18)

Um dos tipos mais conhecidos de descarga elétrica é o raio. Franklin, em 1752, mostrou que o raio é corrente elétrica; mas descargas de raio são eventos perigosos e esporádicos e não convenientes como ferramenta de investigação (Weinberg, p.20). Em 1709, Francis Hauksbee (1666-1713) observou que vasos de vidro, com ar a pressão de  $\frac{1}{60} atm$ , quando anexados a um gerador de eletricidade friccional, emitem luz, fato que já havia sido notado em barômetros de mercúrio (Weinberg, p.20). O problema da natureza dessa luz atraiu a atenção de muitos pesquisadores da época, que, então, realizaram inúmeros experimentos de estudo sobre correntes elétricas em gases rarefeitos. A importância conceitual do fenômeno, como se sabe hoje, não está na luz em si e na beleza do experimento, mas na corrente elétrica que atravessa o gás (Weinberg, p.22). Em uma metáfora, o experimento permitiu "ver" a eletricidade.

Com o aperfeiçoamento das bombas de vácuo, em 1855, por Heinrich Geissler, um vácuo de cerca de  $\frac{1}{10^4} atm$  pode ser produzido. Julius Plücker (1801-68) notou que, quando se retira quase todo o ar do bulbo de vidro (figura 3.1), a luz quase que desaparece, restando um brilho esverdeado perto do catodo; mas a posição do brilho parece não depender da posição do anodo; portanto, parece que algo vem do catodo, atravessa o tubo e bate no vidro e é coletado no anodo (Weinberg, p.22); esse algo foi denominado *raio catódico*. Plücker observou que a posição do brilho poderia ser alterada, colocando magnetos perto do tubo. Plücker pensou que o raio consistisse de pedaços do material do catodo, pois ao utilizar um catodo de platina, notou que pequenas partículas ficavam depositadas nas paredes do bulbo de vidro, mas hoje se sabe que as partículas resultam de um desgaste do catodo (Weinberg, p.23). Em 1869, um aluno de



Plücker, W. Hittorf (1824-1914), observou que um objeto colocado perto do catodo produzia uma sombra na parede luminosa, o que o fez sugerir que o brilho fosse formado por raios que provinham do catodo em linha reta (Weinberg, p.23).

Em 1876, Eugen Goldstein (1850-1930), estudando as sombras de Hittorf, mostrou, utilizando catodos em formatos diferentes, que os raios catódicos não são emitidos indiscriminadamente em todas as direções, mas que cada parte da superfície do catodo emite raios, que são confinados a uma única direção, normal à superfície; ora, isso marca uma diferença importante entre a emissão de raios catódicos do eletrodo e a emissão da luz (isotrópica) (Whittaker, v.1, p.351).

A questão quanto à natureza dos raios catódicos aumentou nas duas décadas seguintes. No ano seguinte às investigações de Hittorf, Cromwell Varley fez a hipótese de que os raios eram compostos de partículas de matéria projetadas do pólo negativo por eletricidade e, em virtude de suas cargas negativas, seriam influenciadas pelo campo magnético (Whittaker, v.1, p.351). William Crookes (1832-1919) considerou os raios catódicos como uma torrente molecular, onde as moléculas do gás residual, ao entrarem em contato com o catodo, adquiriam uma carga resinosa e imediatamente eram lançados perpendicularmente à superfície, em virtude da repulsão mútua exercida pelos corpos com a mesma carga (Whittaker, v.1, p.352); mas a teoria foi refutada, pois o livre percurso médio de moléculas, no ar, é de cerca de  $0,6\text{ cm}$ , enquanto os raios percorrem cerca de  $90\text{ cm}$  em um tubo rarefeito a  $10^{-5}\text{ atm}$  (Weinberg, p.24; Whittaker, v.1, p.352). No entanto, a hipótese da torrente molecular possibilitou calcular o desvio dos raios catódicos por um campo magnético. Isso foi feito por Eduard Riecke (1845-1915), em 1881, usando as equações do eletromagnetismo.

Uma teoria muito diferente foi desenvolvida por Heinrich Hertz (1857-1894). Em 1883, ele pensou ter mostrado que os raios catódicos não eram apreciavelmente desviados por placas de metais eletrificadas, o que parecia afastar a possibilidade dos raios catódicos serem partículas eletricamente carregadas, pois, nesse caso, as partículas do raio deveriam ser repelidas ou atraídas pela placa. Hertz supôs, então, que os raios fossem uma espécie de onda, como a luz. Mas isso não explicaria a deflexão por um campo magnético; mas como a natureza da luz ainda não era bem compreendida, talvez um desvio magnético fosse possível. Em 1891 Hertz fez outra observação que parecia apoiar a teoria de onda dos raios catódicos: Os raios podiam penetrar finas folhas de ouro e outros metais, do mesmo modo que a luz penetra o vidro (Weinberg, p.24). Na verdade, o experimento de Hertz não foi capaz de detectar o desvio elétrico, porque as partículas do raio se movem muito rapidamente e as forças elétricas aplicadas eram fracas (atenuadas pelos íons do gás residual), causando um desvio muito pequeno. A teoria de Hertz foi refutada por Jean Baptiste Perrin (1870-1942): Em 1895, ele mostrou que os raios não poderiam ser uma forma de luz, pois os raios depositavam carga elétrica negativa em um coletor colocado



dentro do tubo de raios catódicos (Weinberg, p.24).

O raio não é onda, parece ser formado por partículas. Mas não pode ser formado por moléculas, como mencionado acima. O quê é, então?

### 3.3 O experimento de J.J. Thomson

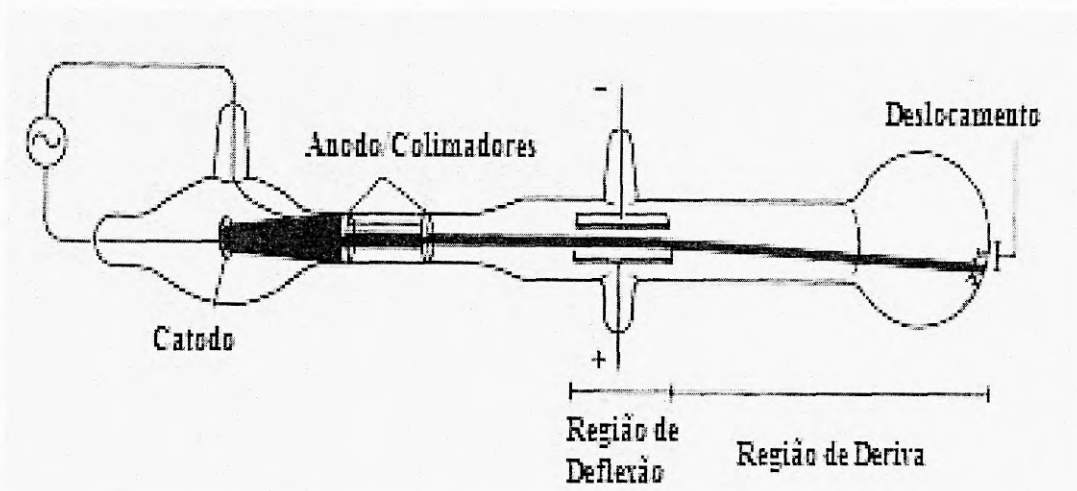


Figura 3.2: Na figura, a partícula que vem do catodo entra em uma região de deflexão, onde é desviada (para baixo) por um campo elétrico e (para a esquerda ou direita) ou por um campo magnético perpendicular ao plano da figura. Ela atinge a parede do tubo em um ponto deslocado do eixo. Thomson mede o desvio em ambos os casos e usa as leis do Eletromagnetismo para calcular a razão  $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$  para dados valores dos campos (Weinberg, p.30)

Em 1894, John Joseph Thomson efetuou uma série de experimentos de desvio de raios catódicos em campos elétricos e/ou magnéticos. Os experimentos de Thomson consistiram em fazer o raio catódico ser desviado por um campo elétrico e um magnético. Calculando o desvio, ele mostrou que a razão  $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$  era constante, independentemente do gás usado no tubo e do material do catodo. Ele achou  $\frac{\text{massa}}{\text{carga}} \approx 10^{-11} \frac{\text{Kg}}{\text{C}}$ . Esses experimentos não provam de forma conclusiva que os raios são partículas, pois os resultados de Thomson apenas estabelecem a ordem de grandeza da razão acima (figura 4.3). Mas, mesmo assim, seu experimento foi melhor que o de Hertz, pois Thomson eliminou os íons residuais que diminuíam o campo elétrico, criando um vácuo muito bom.

O grande mérito de Thomson, mais do que o resultado numérico obtido, foi apostar na identidade da partícula do raio e propô-la como constituinte da matéria (Weinberg, p.56). Thomson tentou conciliar a hipótese da corrente molecular com as observações de Phillip Lenard (1862-1947), segundo as quais, raios catódicos alcançam, ao percorrer um gás, uma distância 1000

vezes mais longe do que moléculas ordinárias; aliás, resultado semelhante já foi mencionado acima, com respeito a Crookes. Thomson supôs que as partículas do raio catódico fossem partículas carregadas, movendo-se a altas velocidades e de tamanho muito menor em relação ao das moléculas da matéria que compunham o gás no tubo (Whittaker, v.1, p.360-361). Isso explicaria porque a deflexão dos raios eram as mesmas, independente da natureza do gás utilizado (Whittaker, v.1, p.360-61).

Muitos físicos não acreditaram no resultado de Thomson (Whittaker, p.364). Mas os resultados foram corroborados pela medida da razão  $\frac{\text{massa}}{\text{carga}}$  em outros experimentos (Whittaker, v.1, p.365).

Gás no TRC	Material do catodo	Campo elétrico (N/C)	Deflexão elétrica (m)	Campo magnético (N/A.m)	Deflexão magnética (m)	Dedução da velocidade do raio de partículas (m/s)	Dedução da razão massa/carga (Kg/C)
Ar	Alumínio	$1,5 \times 10^4$	0,08	$5,5 \times 10^{-4}$	0,08	$2,7 \times 10^7$	$1,4 \times 10^{-11}$
Ar	Alumínio	$1,5 \times 10^4$	0,095	$5,4 \times 10^{-4}$	0,095	$2,8 \times 10^7$	$1,1 \times 10^{-11}$
Ar	Alumínio	$1,5 \times 10^4$	0,13	$6,6 \times 10^{-4}$	0,13	$2,2 \times 10^7$	$1,2 \times 10^{-11}$
Hidrogênio	Alumínio	$1,5 \times 10^4$	0,09	$6,3 \times 10^{-4}$	0,09	$2,4 \times 10^7$	$1,6 \times 10^{-11}$
Dióxido de carbono	Alumínio	$1,5 \times 10^4$	0,11	$6,9 \times 10^{-4}$	0,11	$2,2 \times 10^7$	$1,6 \times 10^{-11}$
Ar	Platina	$1,8 \times 10^4$	0,06	$5,0 \times 10^{-4}$	0,06	$3,6 \times 10^7$	$1,3 \times 10^{-11}$
Ar	Platina	$1,0 \times 10^4$	0,07	$3,6 \times 10^{-4}$	0,07	$2,8 \times 10^7$	$1,0 \times 10^{-11}$

Figura 3.3: Resultado obtido por Thomson em suas medidas (Weinberg, p.54)

Anos depois, a partir de 1906 Robert Andrews Millikan começou experimentos para determinar a carga do elétron. Seu experimento consistia em borrifar óleo com um atomizador em uma câmara com ar sujeita a um campo elétrico na direção da gravidade, o óleo tem baixa evaporação e mantém a massa das partículas constantes durante o experimento. As forças que atuam na gota são: o peso, a força elétrica, o arraste e o empuxo, aplicando a lei de Newton do movimento linear foi possível calcular a carga da gota cujo valor ele descobriu ser múltiplo de um valor fundamental e que ele calculou ser aproximadamente  $1,592 \times 10^{-19}$  coulomb (Weinberg, p.97-98).



# Capítulo 4

## Partículas Atômicas

### 4.1 A Hipótese do Próton

No início do século XX, o raio X já havia sido descoberto por Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923) e J.J. Thomson já havia proposto o elétron como constituinte da matéria. Além disso, a radioatividade também já havia sido anunciada por Henri Becquerel (1852-1908). Ernest Rutherford (1871-1937) distinguiu entre três tipos de radioatividade, os “raios”  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  (Weinberg, p.104-122; *The Particle Explosion*, p.29-36). Hoje se sabe que esses não são constituintes da matéria, mas criados em processos atômicos e/ou nucleares. Mas isso estabeleceu a linha de pesquisa de Rutherford.

Rutherford e Wilhemm Geiger (1882-1945) estavam pesquisando o espalhamento de partículas  $\alpha$ ; segundo o resultado de Geiger, de 1908, o número de partículas espalhadas decrescia rapidamente à medida que o ângulo crescia e não foram observadas partículas espalhadas além de poucos graus (Weinberg, p.124). Em 1909, Rutherford atribuiu a Ernest Marsden a tarefa de descobrir se partículas  $\alpha$  podiam ser desviadas em grandes ângulos (*The Particle Explosion*, p.34).

Marsden utilizou folhas de ouro ao invés de mica e uma tela cintilante para detectar partículas  $\alpha$  espalhadas. A tela podia ser movida e colocada, tanto atrás da tela como dos lados, rodando a fonte radioativa. Assim, foi possível detectar partículas  $\alpha$  refletidas através de todos os ângulos (*The Particle Explosion*, p.34). A contagem de  $\alpha$ s consistia em contar clarões na tela, usando um microscópio de baixa intensidade, focalizado na tela, um pequeno espaço por vez, para cada ângulo. Os clarões eram fracos e o laboratório precisava estar no escuro; cada observador só conseguia contar por poucos minutos e Rutherford precisou ajudar Marsden (*The Particle Explosion*, p.34).

Utilizando esse método de contagem eles acharam que cerca de 1 em 20.000 alfas eram refletidas de volta, isto é por mais de  $90^\circ$ , um ângulo mais de 100 vezes o ângulo mais provável:

Geiger e Marsden haviam encontrado, em outro experimento, que o ângulo mais provável de espalhamento de alfas ao passar por uma lâmina de ouro, de espessura  $4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ , era  $0,87^\circ$ . De acordo com a Teoria das Probabilidades, é possível calcular a probabilidade de um dado o ângulo de espalhamento, resultante de muitos espalhamentos independentes, pequenos, cada um dos quais pode ser em uma direção aleatória; nesse caso (espalhamento múltiplo), a probabilidade de encontrar um resultado mais de 100 vezes maior que o valor médio, é um valor ínfimo,  $3 \times 10^{-2174}$  (Weinberg, p.124-125). Resta a hipótese de um único espalhamento, por uma colisão única com um átomo de ouro (Weinberg, p.125).

As  $\alpha$ 's são emitidas pela mesma fonte, logo com a mesma velocidade e com a mesma energia cinética. A força de espalhamento da  $\alpha$  (carga +2) por outra carga positiva é dada pela força de Coulomb. Ora, a energia cinética inicial deve ser igual ao trabalho feito por essa força para trazer uma  $\alpha$  a uma distância de máxima aproximação da carga positiva. Com isso, foi possível calcular a distância de máxima aproximação (*The Particle Explosion*, p.34-35). Rutherford achou  $10^{-13} \text{ m}$ , cerca de  $10^{-3}$  vezes o tamanho do átomo de ouro, calculado a partir da densidade do ouro (Weinberg, p.127). Significa que a carga positiva é encontrada somente no centro do átomo, não distribuída por todo o átomo, como J.J. Thomson havia suposto (*The Particle Explosion*, p.35).

## 4.2 A Identificação do Próton

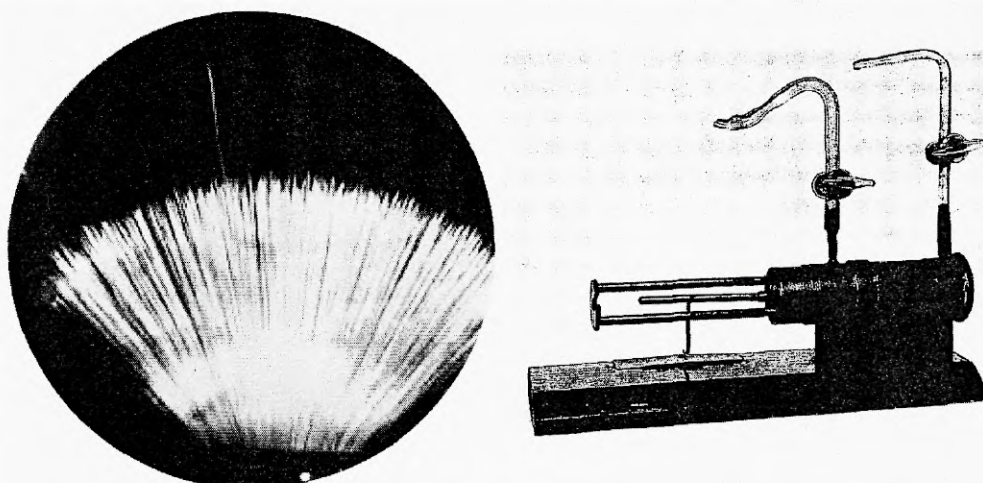


Figura 4.1: A figura da direita mostra a câmara de desintegração usada por Rutherford (Weinberg, p.142). A figura da esquerda mostra o alcance das  $\alpha$ s e o raio de alcance longo (*The Particle Odyssey*, p.28).

Até aqui, Rutherford mostrou que as cargas positivas do átomo devem-se concentrar em seu centro. Mas é necessário investigar se essa carga tem um portador, à semelhança da carga



negativa (que tem como portador o elétron).

Os experimentos de espalhamento de *alphas* pelo núcleo do ouro mostram que o núcleo é pequeno e que uma carga positiva contrária à dos 79 elétrons do ouro deveria estar no centro do núcleo. Essa carga é cerca de 40 vezes a da  $\alpha$ , portanto uma partícula  $\alpha$  que se aproxima do núcleo começa a sentir uma força de repulsão muito tempo antes de atingí-lo. Por outro lado, átomos com núcleos menores, com menos carga positiva, devem ser menos repulsivos e uma partícula  $\alpha$  deve chegar mais próxima do núcleo. Então Rutherford e Marsden começaram a disparar partículas  $\alpha$  através de gás hidrogênio, o elemento mais leve de todos. Eles esperavam que todas as partículas *alpha*, após perderem energia em colisões sucessivas com moléculas de hidrogênio, viessem a parar mais ou menos à mesma distância da fonte radioativa, já que foram emitidas com a mesma energia; assim, as  $\alpha$ s não penetrariam o gás além de certa distância e não atingiriam uma tela de sulfureto de zinco posicionada adiante.

Ora, Marsden e Rutherford verificaram que algumas cintilações ocorriam além do alcance das partículas *alphas* (figura 5.1), apesar destas serem todas emitidas com a mesma energia inicial; as partículas tinham um alcance cerca de 4 vezes maior que o alcance das *alphas* (*The Particle Explosion*, p.35). As partículas possuíam carga elétrica pois podiam ser desviadas por um campo magnético, o qual mostrou, pelo lado para o qual se desviavam, que elas eram partículas positivamente carregadas. Rutherford argumentou que as partículas novas – que ele chamado “partículas H” – seriam núcleos de hidrogênio, deslocados do átomo, pela colisão com uma  $\alpha$ , pois não havia mais nada na câmara de colisão além de hidrogênio e  $\alpha$ s. Como o núcleo de hidrogênio tem carga unitária, enquanto a partícula  $\alpha$ , que é o núcleo de hélio, como Rutherford havia mostrado anos antes, tem o dobro da carga, ele teria um alcance maior (*The Particle Explosion*, p.35-36).

Em experimentos semelhantes, Marsden notou partículas de longo alcance semelhantes quando ele mediu as distâncias que as partículas alfa viajavam no ar, e ele se perguntou se elas também poderiam ser partículas-H. Por volta de 1917, Rutherford concluiu que Marsden tinha, de fato visto partículas-H, retiradas de átomos de nitrogênio do ar, pela colisão com  $\alpha$ s. Para chegar a essa conclusão, Rutherford eliminou outros possíveis candidatos para a partícula de grande alcance. Ele usou partículas  $\alpha$  para obter partículas-H de átomos de seis diferentes elementos, boro, flúor, sódio, alumínio, fósforo e nitrogênio. Assim, concluiu que núcleos de hidrogênio deveriam fazer parte dos núcleos de todos os elementos, por isso os chamou de *prótons*, do grego “primeiro”, porque eram as primeiras partículas constituintes do núcleo a serem descobertas (*The Particle Explosion*, p.36).



### 4.3 O Neutron

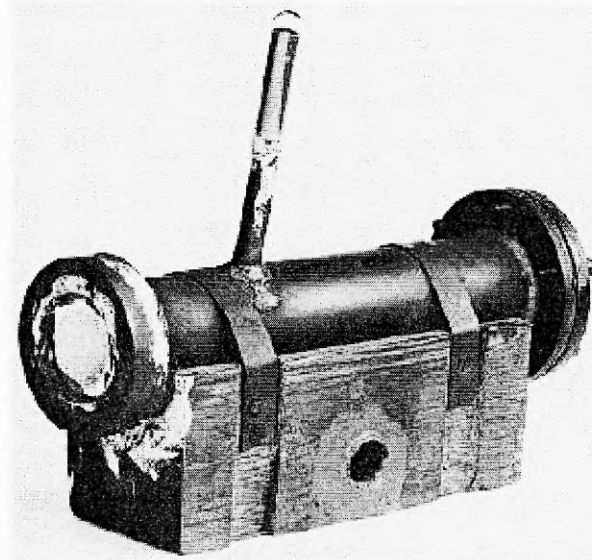


Figura 4.2: Instrumento inventado e utilizado por Chadwick na descoberta do neutron (*The Particle Odyssey*, p.29).

Apesar de Rutherford ter identificado os portadores de carga positiva no núcleo, havia outro problema. O núcleo contém a maior parte da massa do átomo – cerca de 99,95%; assim, os prótons deveriam responder por toda essa massa, por exemplo, um núcleo com duas vezes a carga de outro deveria ter duas vezes a massa daquele. Mas não é assim: Núcleos têm, pelo menos, o dobro da massa devida aos prótons, cujo número é dado pela carga total do núcleo. Para solucionar o problema, Rutherford especulou, em 1920, que existiriam partículas eletricamente neutras dentro dos núcleos — os *neutrons*; mas a teoria corrente entre os físicos era que o núcleo continha duas vezes mais prótons do que elétrons ao redor dele, em órbitas externas; metade dos prótons seriam neutralizados por esses elétrons, enquanto a outra metade seria neutralizada por elétrons dentro do núcleo. O fenômeno do decaimento  $\beta$ , no qual elétrons são emitidos do núcleo, parecia apoiar essa hipótese. Hoje se sabe que as  $\beta$ s são elétrons gerados na reação nuclear, os quais não existem separadamente no núcleo (*The Particle Explosion*, p.39).

Em 1930, Walther Bothe e Herbert Becker bombardearam berílio com partículas  $\alpha$  obtidas do decaimento radioativo do polônio. Eles observaram a emissão de uma radiação neutra, extremamente penetrante, que eles consideraram como raios  $\gamma$ . A experiência foi repetida por Irène Curie e Frédéric Joliot. Eles encontraram a mesma radiação neutra e notaram que ela tinha o poder de retirar prótons de uma cera de parafina, uma substância rica em hidrogênio, usada no experimento com o intuito de absorver a nova radiação (*The Particle Explosion*, p.39). Embora a radiação espalhasse prótons com facilidade, algo mais difícil do que deslocar



elétrons, eles mantiveram a interpretação do raio  $\gamma$  (*The Particle Explosion*, p.39). Por essa ocasião, Rutherford estava orientando James Chadwick e, entre outras investigações, ele fez várias tentativas à procura por nêutrons. Tão logo soube dos resultados de Joliot-Curie, no início de 1932, Chadwick percebeu que a radiação neutra de berílio não era radiação  $\gamma$ , mas neutrons.

Para prová-lo, Chadwick causou colisões de raios de neutrons com uma variedade de gases, hidrogênio, hélio e nitrogênio e observou que átomos de diferentes gases sofriam diferentes recuos: Quanto mais pesado, menor o recuo. Chadwick calculou a massa da radiação neutra para os dados recuos e achou que tinha massa mais ou menos igual à do próton; raios *gamma*, por outro lado, não têm massa. Isso deixou claro que o núcleo contém não só prótons, como carga positiva, mas também neutrons, eletricamente neutros (*The Particle Explosion*, p.39). Sendo neutro, os neutrons podem penetrar no campo elétrico dos átomos e núcleos, em contraste com prótons, que sofrem repulsão pelo núcleo (*The Particle Explosion*, p.39).

## Capítulo 5

### Outras Partículas

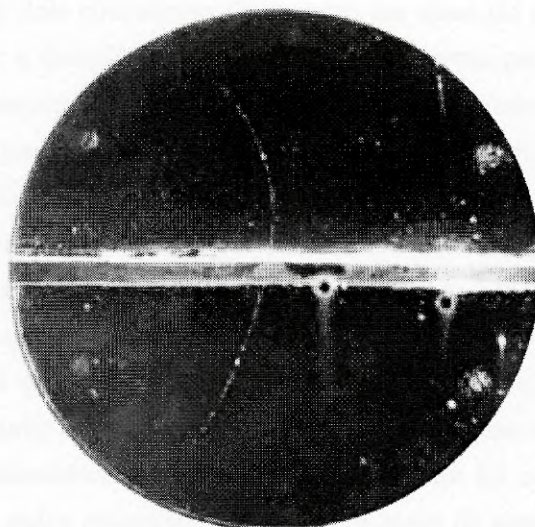


Figura 5.1: O pósitron entra pela parte de baixo da câmara, desvia para a esquerda sob um campo magnético (o que diz que a carga é +, pela montagem do campo). Como se trata de uma partícula carregada em um campo magnético, é possível determinar a massa pelo desvio (*The Particle Odyssey*, p.28).

Até 1932, o *próton* o *elétron* e o *neutron* respondiam pela constituição da matéria. O *fóton*, pela radiação. Mas pesquisas com *raios cósmicos* levariam à descoberta de partículas para as quais não havia “razão de ser”, até então.

A ionização da atmosfera também atraiu a atenção. Para pesquisá-la, Theodor Wulf subiu à Torre Eiffel e achou que esta era maior do que os cálculos previam (*The Particle Explosion*, p.68). Em 1912, Vitor Hass teve a idéia de subir em balões a 5000 *m*; ele achou que a intensidade da radiação crescia rapidamente acima de 1000 *m*, tornando-se 5 vezes maior a 5000 *m*. Robert Millikan enviou balões não tripulados a 30000 *m*. Estavam descobertos os chamados *raios cósmicos*, partículas de alta energia — prótons e outros núcleos atômicos — provenientes do



Nas décadas seguintes, inúmeras partículas foram descobertas, em diferentes laboratórios e usando os grandes aceleradores. Em 1961, Murray Gell-Mann elaborou um modelo matemático que englobasse as partículas em famílias. Para isso, foi necessário supor que partículas pesadas, entre elas prótons e nêutrons, fossem formadas por subpartículas que ele denominou *quarks*.

Inicialmente, há dois grupos, caracterizados por uma propriedade quântica chamada *spin*: A matéria é constituída por partículas de spin semi inteiro, chamadas de *férmions*; a força entre partículas da matéria ou radiação é devida à existência de partículas de spin inteiro, os portadores da força, chamadas *bósons*. Os férmions podem ser partículas elementares, chamadas *léptons* (significando *leves*) ou partículas compostas de *quarks*, chamadas *hádrons*. Os hádrons podem ser *bárions* (significando *pesados*) ou *mésons* (significando de massa intermediária entre léptons e bárions). Essa classificação está resumida nas tabelas abaixo, tiradas de *The Particle Odyssey, pag. 230-233*. A carga é indicada pelo sinal + ou - acima do símbolo; se não há indicação, são neutras.

Tabela 5.1: BÓSONS DE GAUGE

Partícula	símbolo	ano	natureza e função
FÓTON	$\gamma$	1923	portador da força eletromagnética quantum de radiação eletromagnética
W	$W^+$ $W^-$	1983	portadores da força fraca
Z	Z	1983	portador da força fraca
GLÚON	$g$	1979	portadores da força forte (entre <i>quarks</i> )

Tabela 5.2: LÉPTONS

Partícula	símbolo	ano	Natureza e Função
ELÉTRON	$e^-$	1897	constituente da matéria portador de eletricidade
PÓSITRON	$e^+$	1932	antipartícula formado em chuviros de raios cósmicos
MUON ANTIMUON	$\mu^-$ $\mu^+$	1937	ambos são produtos de decaimento de pions, kaons, etc, e são componentes de raios cósmicos
TAU ANTITAU	$\tau^-$ $\tau^+$	1975	ambos surgem da aniquilação elétron-pósitron
NEUTRINO DO ELETRON ANTINEUTRINO DO ELETRON	$\nu_e$ $\bar{\nu}_e$	1956	produzidos nas interações fracas
NEUTRINO DO MUON ANTINEUTRINO DO MUON	$\nu_\mu$ $\bar{\nu}_\mu$	1962	produzidos nas interações fracas
NEUTRINO DO TAU ANTINEUTRINO DO TAU	$\nu_\tau$ $\bar{\nu}_\tau$	2000	léptons de difícil detecção, relacionados ao <i>tau</i>

Tabela 5.3: QUARKS

Partícula	símbolo	carga	ano	Natureza e Função
UP ANTI-UP	$u$ $\bar{u}$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{2}{3}$	1964	constituíntes de prótons, neutrons, etc.
DOWN ANTI-DOWN	$d$ $\bar{d}$	$-\frac{1}{3}$ $+\frac{1}{3}$	1964	constituíntes de prótons, neutrons, etc.
STRANGE ANTI-STRANGE	$s$ $\bar{s}$	$-\frac{1}{3}$ $+\frac{1}{3}$	1964	constituíntes das partículas <i>strange</i>
CHARM ANTICHARM	$c$ $\bar{c}$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{2}{3}$	1974	constituíntes das partículas <i>charm</i>
BOTTOM ou BEAUTY ANTI-BOTTOM	$b$ $\bar{b}$	$-\frac{1}{3}$ $+\frac{1}{3}$	1977	constituíntes das partículas <i>bottom</i>
TOP ou TRUTH ANTI-TOP	$t$ $\bar{t}$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{2}{3}$	1984	constituíntes das partículas <i>top</i>



Tabela 5.4: MÉSONS: Partículas constituídas de 1 *quark* e 1 *anti-quark*

Partícula	símbolo	ano	quark	Natureza e Função
PION-0	$\pi^0$	1949	$u\bar{u}$ ou $d\bar{d}$	envolvido nas ligações das partículas no núcleo. Fonte de raios $\gamma$ cósmicos
PION+	$\pi^+$	1947	$u\bar{d}$	envolvido nas ligações das partículas no núcleo
PION-	$\pi^-$	1947	$d\bar{u}$	
KAON-0	$K^0$	1947	$d\bar{s}$	méson estranho
KAON+	$\pi^+$	1947	$u\bar{s}$	méson estranho
KAON-	$\pi^-$	1947	$s\bar{u}$	
J/Psi	$J/\psi$	1974	$c\bar{c}$	primeiro membro da família <i>charm</i> descoberto
D-0	$D^0$	1976	$c\bar{u}$	méson da família <i>charm</i>
D+	$D^+$	1976	$c\bar{d}$	
YPSILON	$Y$	1977	$b\bar{b}$	primeiro membro da família <i>bottom</i> descoberto
B-0	$B^0$	1983	$b\bar{d}$	mésons <i>bottom</i> ; $B^0$ demonstra a assimetria matéria-antimatéria (violação CP)
B-	$B^-$	1983	$b\bar{u}$	

Tabela 5.5: BÁRIONS: Partículas constituídas de 3 *quarks*

Partícula	símbolo	ano	quark	Natureza e Função
PRÓTON	$p$	1911-19	$u u d$	partícula carregada constituinte do núcleo atômico
ANTI-PRÓTON	$\bar{p}$	1955	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$	antipartícula do próton
NEUTRON	$n$	1932	$d d u$	constituinte do núcleo atômico
ANTI-NEUTRON	$\bar{n}$	1956	$\bar{d} \bar{d} \bar{u}$	antipartícula do neutron
LAMBDA	$\Lambda$	1951	$u d s$	bárion do tipo <i>strange</i>
ANTI-LAMBDA	$\bar{\Lambda}$	1958	$\bar{u} \bar{d} \bar{s}$	antipartícula do lambda
SIGMA+	$\Sigma^+$	1953	$u u s$	bárion do tipo <i>strange</i>
SIGMA-	$\Sigma^-$	1953	$d d s$	bárion do tipo <i>strange</i>
SIGMA-0	$\Sigma^0$	1956	$u d s$	bárion do tipo <i>strange</i>
XI-	$\Xi^-$	1952	$d s s$	bárion do tipo <i>strange</i>
XI-0	$\Sigma^0$	1959	$u s s$	bárion do tipo <i>strange</i>
OMEGA MENOS	$\Omega^-$	1964	$s s s$	bárion do tipo <i>strange</i>
LAMBDA tipo CHARM	$\Lambda_c$	1975	$u d c$	bárion do tipo <i>charm</i>
LAMBDA-B	$\Lambda_b$	1991	$u d b$	bárion do tipo <i>bottom</i>



# Poster para uso no Ensino Médio

Nas figuras 5.2 a 5.12, abaixo, encontra-se reproduzido em partes um pôster elaborado por Fernanda Ostermann (Ostermann, p.13-18), um método proposto para o ensino de física de partículas na escola. Trata-se de uma ferramenta clara, concisa e bem objetiva, criada, segundo a autora, a partir da necessidade de suprir uma grande escassez, em nosso meio, de materiais didáticos sobre temas de física moderna e contemporânea.

**INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS E PARTÍCULAS ELEMENTARES**

**QUARKS**

Quark	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga Elétrica	Carga de Cor
u	~5	2/3	1/3
d	~10	1/3	2/3
s	~150	2/3	1/3
c	~1.50	2/3	1/3
b	~4.50	1/3	2/3

**LEPTONS**

Lepton	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga Elétrica	Carga de Cor
e	~0.511	-1	0
μ	~107	-1	0
τ	~1.780	-1	0
ν <sub>e</sub>	~0	0	0
ν <sub>μ</sub>	~0	0	0
ν <sub>τ</sub>	~0	0	0

**HADRONS**

Nome	Quarks	Massa (MeV/c <sup>2</sup> )	Spin
n	udd	~940	1/2
p	uud	~940	1/2
π <sup>+</sup>	u $\bar{d}$	~140	0
π <sup>0</sup>	u $\bar{u}$ , d $\bar{d}$	~135	0
π <sup>-</sup>	d $\bar{u}$	~140	0
K <sup>+</sup>	u $\bar{s}$	~495	0
K <sup>0</sup>	u $\bar{s}$ , d $\bar{s}$	~495	0
K <sup>-</sup>	s $\bar{u}$	~495	0
Λ <sup>0</sup>	uds	~1115	1/2
Σ <sup>+</sup>	uus	~1115	1/2
Σ <sup>0</sup>	uds	~1115	1/2
Σ <sup>-</sup>	dds	~1115	1/2

**INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS**

Interação	Alcance	Força	Mediadora	Spin
Gravitacional	Infinito	~10 <sup>-39</sup>	Graviton	2
Eléctromagnética	Infinito	~10 <sup>-16</sup>	Fóton	1
Fraca	~10 <sup>-16</sup>	~10 <sup>-16</sup>	W <sup>±</sup> , Z <sup>0</sup>	1
Forte	~10 <sup>-15</sup>	~10 <sup>-13</sup>	Gluon	1

**DESEMPENHO PARA O CLÁSSICO**

Quando se trata de partículas, o desempenho para o clássico é muito bom. Isso porque as partículas são descritas por equações de onda, e não por equações de movimento. Isso significa que as partículas não são descritas por equações de movimento, mas sim por equações de onda.

**A Interação Forte**

A interação forte é a força que mantém os quarks unidos dentro dos hádrons. Ela é mediada por glúons e é a mais forte das quatro interações fundamentais. A interação forte é responsável por a maioria da massa da matéria visível no universo.

Figura 5.2: Visão geral do pôster.





Figura 5.3: Esquema de classificação das partículas fundamentais

QUARKS			Férmions spin semi-inteiro	LÉPTONS		
Símbolo e nome	Massa de repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga elétrica	Símbolo e nome	Massa de repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga elétrica	
<b>u</b> up	~ 5	2/3	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino do elétron	~ 0	0	
<b>d</b> down	~ 10	-1/3	<b>e</b> elétron	0,511	-1	
<b>c</b> charm	1500	2/3	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino do muon	~ 0	0	
<b>s</b> strange	~150	-1/3	<b>μ</b> muon	107	-1	
<b>t</b> top	~174000	2/3	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino do tau	< 70	0	
<b>b</b> bottom	~ 4700	-1/3	<b>τ</b> tau	1777	-1	



 As três cores usadas na tabela acima correspondem às três gerações de partículas fundamentais. A cor mais clara indica a primeira geração, a intermediária a segunda e a mais escura a terceira. A primeira geração constitui a matéria estável do universo.

Figura 5.4: Tabela dos quarks e dos léptons



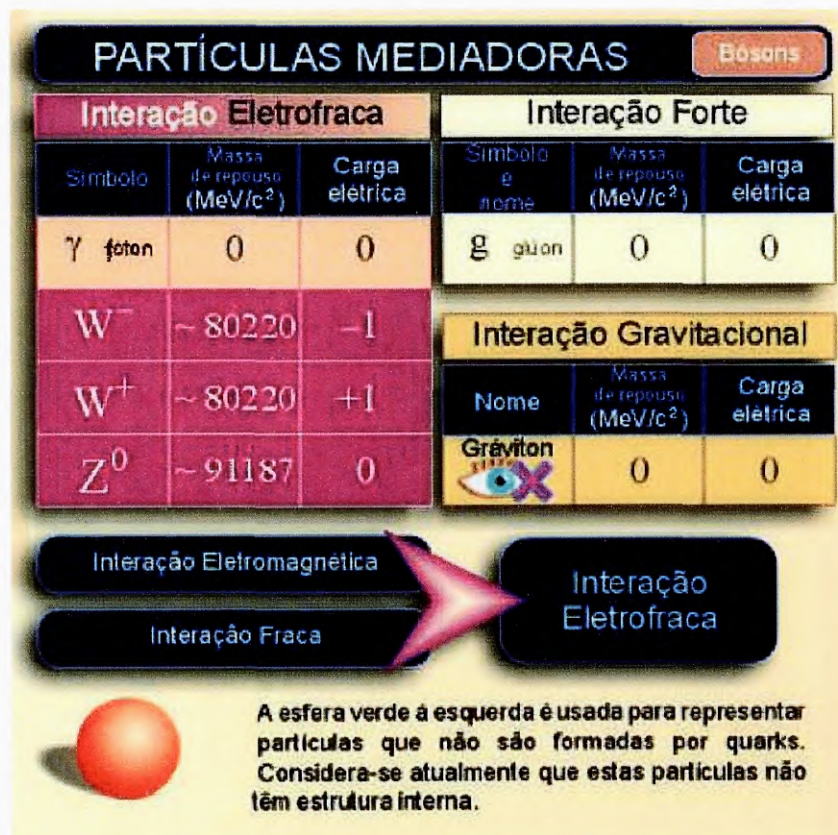


Figura 5.5: Tabela das partículas mediadoras.

HÁDRONS					
BÁRIONS					Férmions
Exemplos de alguns Bárions e Antibárions					
Símbolo	Nome	Composição (Quarks)	Massa de repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga elétrica	Spin
n	nêutron	ddu	940	0	1/2
$\bar{n}$	antineutron	$\bar{d}\bar{d}\bar{u}$	940	0	1/2
p	próton	duu	938	+1	1/2
$\bar{p}$	antipróton	$\bar{d}\bar{u}\bar{u}$	938	-1	1/2
$\Omega^-$	ômega menos	sss	1672	-1	3/2
$\bar{\Omega}^+$	anti-ômega menos	$\bar{s}\bar{s}\bar{s}$	1672	+1	3/2


 O símbolo à esquerda ilustra a composição dos bárions, que são formados por três quarks. Os quarks estão unidos através da troca de glúons (simbolizados por uma espécie de "cola"). Os valores de spin são dados como múltiplos semi-inteiros de  $\hbar$ .

Figura 5.6: Tabela dos bárions



## HÁDRONS

### MÉSONS

Bósons

Exemplos de alguns Mésons e Antimésons

Símbolo	Nome	Composição (Quarks)	Massa de repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga elétrica	Spin
$\pi^+$	pi mais	$u\bar{d}$	140	+1	0
$\pi^-$	pi menos	$d\bar{u}$	140	-1	0
$K^+$	K mais	$u\bar{s}$	494	+1	0
$K^-$	K menos	$s\bar{u}$	494	-1	0
$\rho^+$	rho mais	$u\bar{d}$	770	+1	1
$\rho^-$	rho menos	$d\bar{u}$	770	-1	1



O símbolo à esquerda ilustra a composição dos mésons, que são formados por um quark e um antiquark. Assim como nos bárions, os quarks estão unidos através da troca de glúons. Os valores de spin são dados como múltiplos inteiros de  $\hbar$ .

Figura 5.7: Tabela dos mésons.

O spin é uma propriedade que uma partícula pode ter, assim como a carga elétrica e a massa. A analogia clássica mais utilizada para o spin é a do movimento de rotação da partícula em torno de seu próprio eixo. O seu valor é dado em termos de múltiplos inteiros (bósons) ou semi-inteiros (férmions) da constante de Planck ( $\hbar = 1,0546 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ).

A carga elétrica é dada em unidades da carga do próton.  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

A unidade de energia é o elétron-volt. Essa é a energia ganha por um elétron quando o mesmo é submetido a uma diferença de potencial de 1 Volt. Pela relatividade, existe uma equivalência entre massa e energia. Por esse motivo, a massa é dada em unidades de energia.

$\text{MeV}/c^2$ , onde  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$

$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

$E = mc^2$

$1 \text{ MeV}/c^2 \cong 1,78 \times 10^{-30} \text{ kg}$

Embora não esteja incluído no modelo padrão de partículas fundamentais e interações, o gráviton foi incluído na tabela de partículas mediadoras. Nessa tabela, o símbolo que aparece no espaço do gráviton é usado para indicar que o mesmo ainda não foi observado experimentalmente.

As interações eletromagnética e fraca foram unificadas na chamada interação eletrofraca.

Partículas cujo spin é múltiplo inteiro (0, 1, 2, ...) de  $\hbar$  são classificadas como bósons. Partículas cujo spin é múltiplo semi-inteiro (1/2, 3/2, 5/2, ...) de  $\hbar$  são classificadas como férmions.

Figura 5.8: Textos elucidativos do pôster



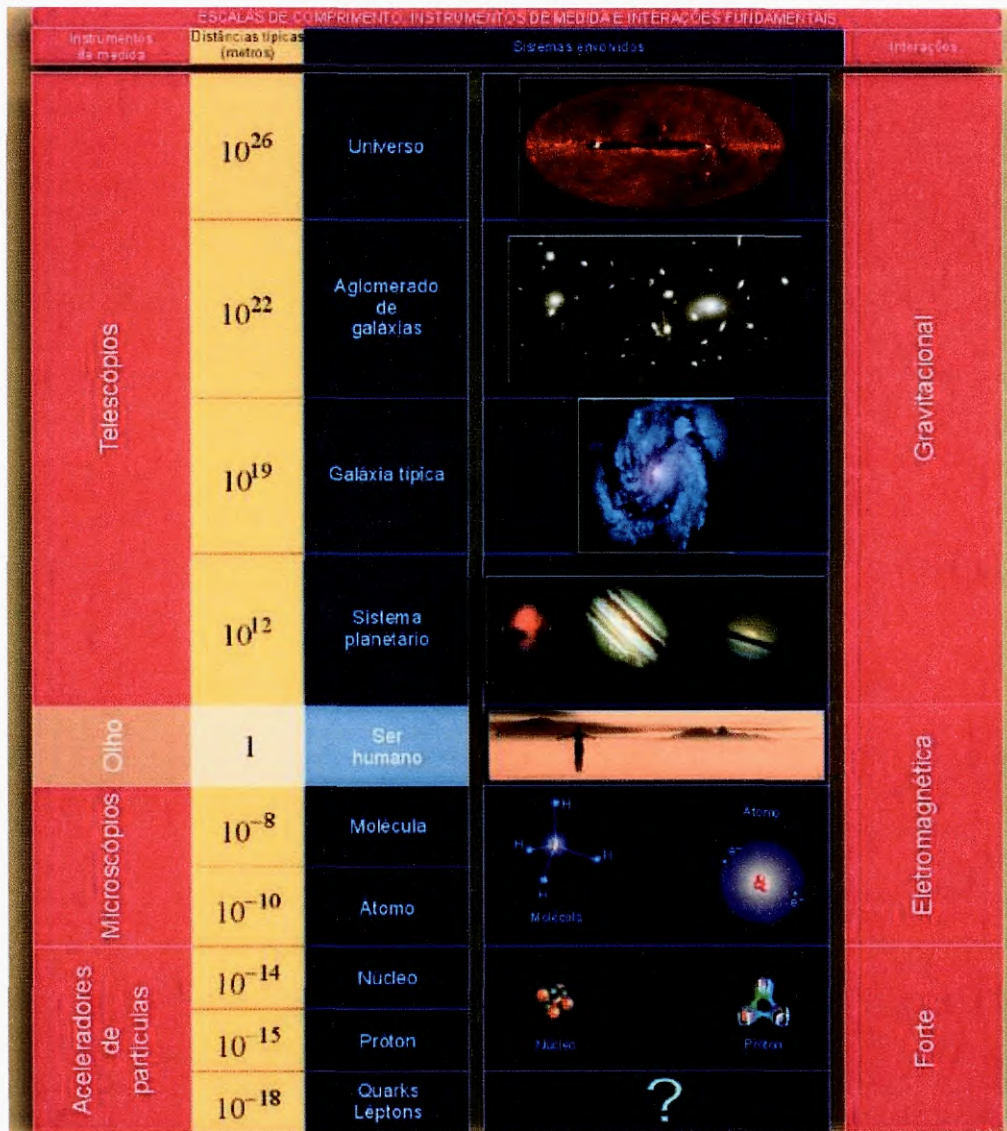


Figura 5.9: Interações fundamentais com suas escalas de comprimento e seus instrumentos de medida.







INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS						
PROPRIEDADES	Gravitacional	Fraca	Eletromagnética		Forte	
			Unificação Eletrofraca		Fundamental	Residual
Atua em	massa ou energia	sabor	carga elétrica	carga de cor		
Quem sofre a ação?	todas as partículas	quarks e léptons	partículas eletricamente carregadas	quarks e glúons	hádrons	
Partícula mediadora	gráviton 	$W^+ W^- Z^0$	$\gamma$ fóton	glúon	méson	
Alcance (metros)	infinito	$< 10^{-18}$	infinito	$\sim 10^{-15}$		
Intensidade relativa	$\sim 10^{-40}$	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-2}$	1  2,4 	0,8	

Figura 5.10: Tabela das propriedades das interações fundamentais.

### A Interação Forte

**carga de**

Cada quark carrega um dos três tipos de carga de cor, chamada também de carga forte. Esta carga não está relacionada ao sentido cotidiano da palavra cor. Assim como na interação eletromagnética as partículas carregadas eletricamente interagem via troca de fótons, na interação forte as partículas com carga de cor trocam glúons. Léptons, fótons, os bósons  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$  não possuem carga de cor e, portanto, não interagem via força forte. Não é possível isolar quarks e glúons, eles estão confinados nos sistemas neutros em carga de cor (sistemas brancos) que são os hádrons. Este confinamento resulta de trocas múltiplas de glúons entre objetos com carga de cor.

**END**




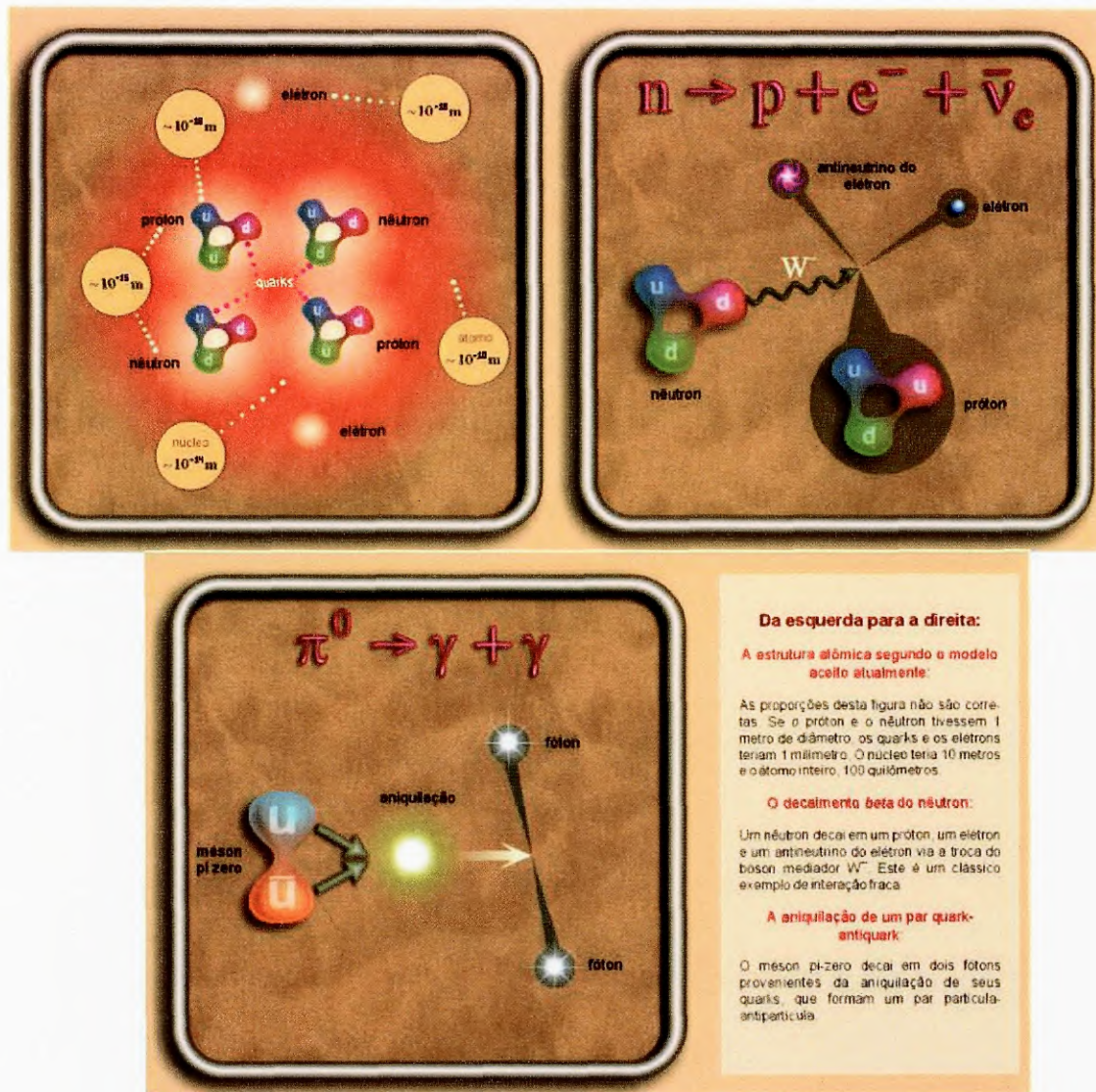
-  **Interação forte residual:** A interação forte que ocorre entre os prótons e nêutrons e devida à interação forte residual entre os seus constituintes, os quarks. Tanto os prótons quanto os nêutrons apresentam *neutralidade* em carga de cor, o que não acontece com os quarks. A interação forte residual é análoga à interação eletrostática residual que liga os átomos eletricamente neutros para formar as moléculas.
-  Dois quarks  $u$  separados por uma distância da ordem de  $10^{-18}$  metros
-  Dois quarks  $u$  separados por uma distância da ordem de  $10^{-17}$  metros

Figura 5.11: Explicações relativas à tabela da Fig.5.10.





**Da esquerda para a direita:**

**A estrutura atômica segundo o modelo aceito atualmente:**

As proporções desta figura não são corretas. Se o próton e o nêutron tivessem 1 metro de diâmetro, os quarks e os elétrons teriam 1 milímetro. O núcleo teria 10 metros e o átomo inteiro, 100 quilômetros.

**O decaimento beta do nêutron:**

Um nêutron decai em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron via a troca do bóson mediador  $W^-$ . Este é um clássico exemplo de interação fraca.

**A aniquilação de um par quark-antiquark:**

O méson pi-zero decai em dois fótons provenientes da aniquilação de seus quarks, que formam um par partícula-antipartícula.

Figura 5.12: Exemplo de decaimentos.



## Referências

BRASIL, Ministério da Educação (2002) *PCN+ Ensino Médio, Orientações Educacionais Complementares aos PCN. Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Disponível em: <http://www.mec.gov.br>. Acesso em: 15 de setembro de 2010.

Close, Frank; Marten, Michael and Sutton, Chistine (1987) *The Particle Explosion*, Oxford University Press.

Close, Frank; Marten, Michael and Sutton, Chistine (2002) *The Particle Odyssey*, Oxford University Press.

Dias, Penha Maria Cardozo e Sapunaru, Raquel Anna (2008) *História da Física I: Formação das Categorias do Pensamento em Física (século VI a.C. — século XVII d.C.)*, CEDERJ.

Dias, Penha Maria Cardozo e Sapunaru, Raquel Anna (2009) *História da Física II: A Estrutura Mecanicista da Natureza*, CEDERJ

Dias, Penha Maria Cardozo, Terrazzan, Eduardo e Hamburger, Ernst Wolfgang (1990) *Exposição Comemorativa do Cinquentenário da Descoberta dos “Chuveiros Penetrantes”*, USP.

Holton, Gerald (1977) “Electrons or subelectrons? Millikan, Ehrenhaft and the role of reconceptions”, in: C. Weiner (editor) *Storia della fisica del XX secolo*, Academic Press.

Ostermann, Fernanda (2001) *Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola*, Revista Física na Escola, v.2, n.1.

Weinberg, Steven (1983) *Discovery of Subatomic Particles*, Scientific American Library.

Whittaker, Edmund (1951) *A History of the Theories of Aether and Electricity*, 2 vols., Philosophical Library Inc.