

Relatório Final para a disciplina F590

Professor: J. J. Lunazzi

Orientador: Marcelo Guzzo

Lucas David Feitosa Campos RA 073367

“O conceito de átomo dentro da física e suas consequências históricas e epistemológicas”

Introdução

O objetivo deste projeto é discutir, de modo inicial, o conceito de *átomo* dentro da física mediante uma abordagem histórica e epistemológica. Para isso, iniciamos a discussão voltando à Grécia Antiga, passando pela idade moderna e chegando à física do século XX. Nosso principal objetivo é descrever como o pensamento sobre o átomo e, por conseguinte, seus constituintes mudaram ao longo da história. Por fim, voltamos atenção a uma família das partículas elementares – os léptons.

A concepção atômica e suas origens

Quando pensamos sobre a origem da concepção ou ideia atômica, sempre voltamos à Grécia antiga. No entanto, o que parece é que tal discussão sempre se dá de um modo superficial ou resumido. Por um lado, talvez pela falta de informações disponíveis ou, por outro, por mero pragmatismo. O fato é que sempre se remonta a Leucipo ou a Demócrito, filósofos gregos, a origem da concepção atômica. Há uma certa polêmica sobre os dois pensadores, pois alguns pensam que Leucipo era apenas um pseudônimo para Demócrito, enquanto outros já afirmam que Leucipo foi, na verdade, mestre de Demócrito. De uma forma ou de outra, a eles é atribuída a primeira tentativa de se formular uma teoria material de se explicar o universo e sua constituição, dessa forma sem recorrer a entidades divinas ou misteriosas. Hoje, talvez, isso pode parecer algo de pequena importância, mas, num mundo – o antigo – em que o místico tinha um papel preponderante desde longa data, tal tentativa tem importância especial. Fundamentalmente, tal teoria propõe que o universo é constituído por duas coisas, nomeadamente os átomos e o vácuo, ou seja, a totalidade, ou, mais prosaicamente, aquilo que vemos ao nosso redor, é formado por agregados de matéria e por

“vazios”. A ideia era que, se submetêssemos um agregado qualquer de matéria a sucessivos processos de divisão, haveria um limite, um ponto após o qual o processo não mais se verificaria, devido à mera impossibilidade de efetuar tal divisão. O que tornava as diversas substâncias diferentes entre si era o fato de que tal limite, tal matéria indivisível, era diferente para cada substância. Da mesma forma, houve uma especulação, partindo-se dessa “matéria indivisível”, sobre os estados da matéria, por exemplo. Acreditava-se que quando estes componentes materiais básicos do universo estão próximos, tem-se o estado sólido. À medida que a distância entre os componentes ia aumentando, teríamos, progressivamente, o estado líquido e o estado gasoso.

O termo *átomo* foi introduzido por outro filósofo, Epicuro, apenas algum tempo depois de Leucipo e Demócrito. O pensamento de Epicuro e sua, digamos, “física”, está bem ilustrado em uma carta dele a Heródoto. Analisemos, por exemplo, o seguinte trecho:

“Nada vem do nada ou do que não existe, pois, do contrário, tudo existiria sem a necessidade de suas próprias sementes. Se aquilo que se destrói não passasse a ser outra coisa, passando, assim, à não-existência, tudo já teria se acabado. Além disso, a totalidade das coisas sempre foi como é agora e desta forma irá permanecer, pois fora dessa totalidade não há nada em que ela própria possa vir a se transformar ou aquilo com o qual ela possa ser trocada.”¹

É claro que a ciência tal qual a concebemos hoje é bem diferente daquilo que era feito, então, pelos gregos na antiguidade. Não cabe, nesse momento, discutir se aquilo era ou não ciência, mas, no entanto, já podemos ver algum embrião de uma ciência que somente viria à tona muitos séculos depois. A introdução de termos e conceitos materiais, em oposição a termos e conceitos místicos ou divinos, foi marcante, embora, claro, não tenha sido suficiente, como já sugerido, para a criação de uma ciência que desfrute do mesmo status desfrutado pela ciência contemporânea. Vemos, mesmo que de forma, assim se diga, rudimentar e usando termos mais filosóficos que científicos (“tudo”, “não-existência”, entre outros) alguma ideia que remonta, por exemplo, à conservação de energia. “*Se aquilo que se destrói não passasse a ser outra coisa (...) tudo já teria se acabado*”, ou seja, há, simplesmente, algo que é transformado em outra coisa, mas, ainda assim, essa nova “coisa” terá um “papel” no universo. Vejamos, também, a seguinte passagem:

“Alguns corpos são compostos e outros simples e estes podem também vir a formar corpos compostos. Esses corpos simples são indivisíveis e imutáveis e não podem passar, de modo algum, à não-existência, de sorte que permanecem eternamente estáveis, sem a possibilidade de serem dissolvidos por forma alguma. Segue, portanto, que os

1 “Nothing comes into being out of what is non-existent. For in that case anything would have arisen out of anything, standing as it would in no need of its proper germs. And if that which disappears had been destroyed and become non-existent, everything would have perished, that into which the things were dissolved being non-existent. Moreover, the sum total of things was always such as it is now, and such it will ever remain. For there is nothing into which it can change. For outside the sum of things there is nothing which could enter into it and bring about the change”. (Trecho extraído do site www.epicuro.net devido à dificuldade de se achar a carta).

constituintes intrínsecos e fundamentais da natureza devem ser entidades corporais indivisíveis”²

No trecho citado fica clara a alusão ao conceito de átomo. Vê-se que, não importa o processo ou transformação pela qual um corpo irá passar, haverá uma estrutura diminuta, um corpo simples que não será destruído ou dividido e que, além disso, compõem os corpos ditos compostos. Da mesma forma, essas estruturas diminutas podem interagir de diversas formas de modo a formar novas estruturas, porém já não mais elementares.

Para a investigação do desenvolvimento da ideia de átomo, devemos também levar em consideração os escritos do poeta romano Lucrecio, o qual reproduziu em seu livro “*De Rerum Natura*” as ideias dos atomistas gregos citados até aqui. Talvez, para que tenhamos mais elementos, seja interessante fazer esta inclusão no relatório final. Porém, isso deverá ser decidido no decorrer da pesquisa.

O Conceito Moderno de Átomo

A ciência como um todo sofreu mudanças marcantes ao longo da idade moderna. Podemos tomar como exemplo o caso do modelo de Ptolomeu, no qual a Terra seria o centro do universo tendo ao seu redor o Sol e os outros planetas. Na modernidade chegou-se à conclusão de que, na verdade, a Terra, juntamente com os outros planetas, era que girava em torno do Sol, pondo um fim na ideia ptolomaica. É certo que uma mudança paradigmática como esta não ocorre de modo simples, tendo uma recepção unânime pela sociedade. Há influências sociológicas, culturais, entre outras, que fazem com que o processo de mudança de paradigma se dê de modo peculiar. Tomemos o seguinte trecho para analisar como o conceito de átomo entraria nessa discussão:

“Os pensadores da antiguidade, presumindo um limite para a divisibilidade das substâncias, tentaram descobrir um fundamento para compreender as características de permanência exibidas pelos fenômenos naturais, a despeito de sua multiplicidade e variabilidade. Embora as ideias atomistas tenham contribuído de maneira cada vez mais fecunda para o desenvolvimento da física e da química desde o Renascimento, elas foram consideradas uma hipótese até o início deste século. Na verdade, presumia-se que nossos órgãos sensoriais, eles mesmos compostos de inúmeros átomos, eram toscos demais para observar as partes mais diminutas da matéria” (BOHR pág 105-106)³

O que vemos no fragmento é muito importante para entender aquilo que existia na discussão

2 “Again, of bodies some are composite, others the elements of which these composite bodies are made. These elements are indivisible and unchangeable, and necessarily so, if things are not all to be destroyed and pass into non-existence, but are to be strong enough to endure when the composite bodies are broken up, because they possess, a solid nature and are incapable of being anywhere or anyhow dissolved. It follows that the first beginnings must be indivisible, corporeal entities”. (idem)

3 BOHR, N., *Física Atômica e o Conhecimento Humano: ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro. Contra-ponto, 1995

sobre a hipótese atômica e aquilo que estava por vir. Na antiguidade Grega, os filósofos que se dedicavam a pensar uma teoria atômica dificilmente imaginariam que aqueles *corpos* indivisíveis, imutáveis e eternamente estáveis poderiam ser vistos. Da mesma forma, não havia naquele momento uma ideia mais moderna de ciência associada à experimentação, a qual veio apenas com a modernidade. Assim, usando a frase de “Galileu, segundo a qual a explicação dos fenômenos deveria basear-se em quantidades mensuráveis” (BOHR, pág 106), como seria possível mensurar alguma propriedade relativa aos átomos? Daí, entendemos o por quê de Bohr falar sobre o fato de que, até o começo do século XX, tudo aquilo envolvendo átomos era apenas uma hipótese. “Até o século XVII não houve tentativas sérias de confirmar esta especulação [hipótese atômica] através de observações experimentais. Pierre Gassendi (...) e Robert Hook (...) tentaram explicar os estados da matéria e as transformações entre esses estados usando um modelo segundo o qual a matéria era composta por objetos sólidos indestrutíveis, de pequenas dimensões, que estavam em movimento constante”. (TIPLER, pág 77)⁴. Vê-se, portanto, que ocorreram tentativas de dar embasamento experimental à ideia atômica. Porém, adiante, TIPLER alerta “Entretanto, foi a hipótese de Avogadro, formulada em 1811, de que todos os gases a uma dada temperatura contêm o mesmo número de moléculas por unidade de volume, que levou à uma aceitação geral (embora não unânime) da teoria molecular da matéria” (idem, pág 77). Apesar de um certo êxito da hipótese de Avogadro, muitas partes da física eram extremamente bem-sucedidas sem levar em consideração a natureza mais elementar da matéria, ou seja, sem levar em consideração os constituintes básicos e elementares da matéria – a termodinâmica talvez seja o melhor exemplo. Até o começo do século XX, a física estava firmemente atrelada ao paradigma Galileu-Newtoniano. “Nos **Principia** de Newton, lançaram-se as bases de uma descrição determinista que permitia, a partir do conhecimento do estado de um sistema físico num dado momento, prever seu estado em qualquer momento posterior” (BOHR, pág 106). Portanto, de acordo com o paradigma vigente, esperava-se que fosse possível, também, determinar qualquer estado futuro de um átomo, uma vez conhecido seu estado inicial. Porém, até o final do século XIX, a própria hipótese atômica não era muito bem estruturada no que diz respeito sobretudo à sua composição⁵, de tal forma que seria complicado aplicar o paradigma determinista de Galileu-Newton sobre algo que não era sequer bem estruturado em seus detalhes mais fundamentais.

No entanto, no final do século XIX e início do século XX, alguns experimentos fizeram com que a hipótese atômica ficasse cada vez mais bem estruturada. J.J. Thomson, fazendo experimentos usando um tubo de raios catódicos, observou que a razão entre a carga e a massa das partículas que constituíam esses raios era bem definida. Além disso, também foi por ele observado que, se a carga em questão fosse igual à carga mínima e , a qual já tinha sido medida anteriormente, a massa da

4 TIPLER, P. A., *Física Moderna* – Rio de Janeiro: LTC, 2006.

5 A hipótese de Avogadro não tratava da composição dos átomos em si.

partícula, calculada através do conhecimento da razão, seria muito pequena. O elétron acabou assim sendo “descoberto”. A partir dos resultados de suas experiências, Thomson chega inclusive a propor um modelo atômico que leva seu nome. O modelo, todavia, mostrou-se, com o passar do tempo, inadequado. O modelo consistia em um átomo maciço, tal qual aquele proposto por Leucipo ainda alguns séculos antes de Cristo, porém já não mais indivisível, dada a descoberta do elétron. Os elétrons ficariam encrustados em uma espécie de pasta, uma distribuição contínua, a qual deveria ter, em oposição à carga negativa do elétron, carga positiva, para que, assim, o átomo como um todo fosse neutro. A descoberta de que o elétron era uma parte do átomo foi apenas o início de uma era em que se verificou que o átomo é formado por vários componentes.

O Espalhamento de Rutherford e o Átomo Nuclear.

Apesar de sua importante descoberta, a qual, inclusive, como sugere Griffiths, pode ser considerada como o “nascimento” da física de partículas, Thomson enfrentou alguns problemas relacionados ao seu modelo. No final do século XIX já havia uma quantidade razoável de dados espectroscópicos – os chamados espectros – e o fato era que, valendo-se do modelo atômico de Thomson, não era possível explicar certas características dos espectros observados. Esse foi um dos motivos para que seu modelo começasse a cair em descrédito. Porém, um motivo ainda mais decisivo veio por meio de uma série de experimentos feitos, por volta de 1910, por dois estudantes até então desconhecidos: Geiger e Marsden. Os dois estavam sobre a orientação de Ernest Rutherford, o qual estudava a radioatividade natural. Em poucas palavras, a radioatividade é uma propriedade através da qual amostras de certos elementos – os chamados radioativos – se desintegram espontaneamente gerando alguns tipos de partículas secundárias. Inicialmente verificou-se que duas partículas em especial estavam em jogo, as quais foram chamadas de partículas α e β . Através de experimentos semelhantes ao de J.J. Thomson, foi possível medir as razões entre carga e massa para essas partículas. Chegou-se, posteriormente, à conclusão de que as partículas β eram, na verdade, elétrons, enquanto que as partículas α eram núcleos do elemento Hélio. Tipler nos relata:

“Rutherford e seus colaboradores (...) deixaram uma amostra de uma substância radioativa (o rádio) se desintegrar, emitindo partículas α em uma câmara previamente evacuada; em seguida, submeteram o conteúdo da câmara a uma descarga elétrica e observaram as linhas do espectro do Hélio. Percebendo que as partículas α , por possuírem alta energia e uma massa relativamente elevada, seriam um ótimo instrumento para “sondar” o interior de outros átomos, Rutherford iniciou uma série de experimentos com este objetivo” (TIPLER⁶, pág 104).

6 TIPLER, P. A., *Física Moderna* – Rio de Janeiro: LTC, 2006.

A equipe de Rutherford usou uma fonte de partículas α fazendo que tais partículas incidissem sobre uma folha de ouro extremamente delgada. Para que eventuais deflexões de partículas fossem registradas, o alvo – folha de ouro – foi envolto, claro que não completamente, por material fluorescente. Através da análise do espalhamento das partículas α , Rutherford chegou à conclusão de que, em vez de estar espalhada uniformemente por todo o átomo, a carga positiva está concentrada em uma região extremamente diminuta, a qual passou a ser considerada o núcleo do átomo. Foi verificado, assim, que muitas partículas não sofriam desvios substanciais. No entanto, algumas poucas partículas α eram fortemente desviadas – o que seria consequência de uma interação mais “direta” com o núcleo, muito embora não houvesse, necessariamente, um contato de fato. Tudo poderia ser entendido se pensando na repulsão coulombiana que se dava entre o núcleo e a partícula alfa, já que ambas as entidades estão carregadas positivamente.

Rutherford estudou exaustivamente o modo como se dava o espalhamento das partículas alfa na experiência em questão e, por fim, chegou a uma nova formulação de modelo atômico. “A conclusão de Rutherford foi que as partículas alfa tinham encontrado algo muito pequeno, muito rígido e pesado”⁷(GRIFFITHS, pág 13). Nesse momento já podemos falar em duas regiões especiais em um átomo, ao contrário do que acontecia em Thomson, quando, embora tivéssemos a hipótese da existência de duas entidades⁸, tínhamos apenas uma região maciça. Para Rutherford, o átomo era formado por um núcleo extremamente pequeno onde estaria concentrada, além de toda sua carga positiva, praticamente toda sua massa. Em torno do núcleo formava-se aquilo que ficou conhecido por eletrosfera, lugar onde, como sugere-se, orbitavam os elétrons. “Ao núcleo do átomo mais leve, o hidrogênio, Rutherford deu o nome de próton”⁹

O modelo de Rutherford pode explicar uma série de questões que, até então, eram incompreensíveis. Houve realmente uma quebra de paradigma ao se concluir que, na verdade, o átomo possui um grande espaço vazio, sendo sua massa concentrada em um pequeno ponto. Entretanto, algumas coisas continuavam sem explicação, entre elas a instabilidade que a física clássica previa para o modelo de Rutherford e a estabilidade que, na prática, era associada a átomos em geral. Se o elétron girasse realmente em torno do núcleo atômico, em poucas palavras, de acordo com a teoria eletromagnética então vigente, deveria haver uma emissão de radiação. Por conservação de energia, o elétron deveria ocupar uma órbita mais interna, continuando, ainda assim,

7 “Rutherford’s Conclusion was that the α -particles had encountered something very small, very hard, and very heavy” (GRIFFITHS, pág 13) GRIFFITHS, D. J., *Introduction to elementary particles*.1987, John Wiley & Sons.

8 Usa-se aqui o termo “entidades” para diferenciar a parte positiva do átomo e a parte negativa. Obviamente, a parte positiva do átomo não era a vista com a parte negativa, a qual era representada pelo elétron. A parte era, na verdade, uma distribuição de carga, não um corpúsculo mais ou menos definido.

9 “The nucleus of the lightest atom (hydrogen) was given the name *proton* by Rutherford” (GRIFFITHS, pág 13)

a emitir energia, já que havia um movimento. Esse processo seguia até que o elétron, através de uma trajetória espiral, finalmente encontraria o núcleo, criando assim um colapso.

Um Problema Sem Solução na Física no Final do Século XIX e a Hipótese de Planck

No final do século XIX existiam alguns fenômenos que a física não conseguia explicar. O seguinte trecho nos dá uma ideia sobre um desses fenômenos sem explicação:

“A ORIGEM da teoria quântica está ligada a um fenômeno bem conhecido que não pertencia às partes centrais da física atômica. Qualquer pedaço de matéria, quando aquecido, torna-se incandescente, primeiramente avermelhado e esbranquiçado a temperaturas mais elevadas. Sua coloração não depende muito de sua superfície e, para um *corpo negro*, ela depende somente da temperatura em que se encontra. (...) Trata-se de um fenômeno simples que deveria ter uma explicação, igualmente simples, em bases às leis clássicas conhecidas da radiação e do calor. As tentativas feitas no fim do século XIX por Lord Rayleigh e Jeans, todavia, malograram e vieram revelar sérias dificuldades” (HEIZENBERG¹⁰, pág 9)

Era o famoso problema do espectro de emissão de um corpo negro. Havia profundas discrepâncias entre o que se verificava na prática por meio de medições e aquilo que era esperado, pensando-se em uma teoria. Das medições verificava-se que a frequência na qual a radiância máxima ocorre aumentava linearmente com a temperatura. Para frequências maiores que aquela que se relacionava ao máximo de radiância, verificava-se um decrescimento da radiância, o qual tinha caráter assintótico e tendia a zero para valores de frequência que tendiam a infinito. A teoria clássica quando aplicada a tal questão levava a absurdos, como o que ficou conhecido como “a catástrofe do ultravioleta”. Nesta situação, haveria uma relação de proporcionalidade direta entre frequência e radiância. Assim, seria esperado para frequências altíssimas, como, por exemplo, a zona ultravioleta, radiâncias igualmente altas, o que, no limite, levaria a energias que tendiam a infinito quando a frequência, da mesma forma, tendia a infinito. Era um absurdo.

A solução desse problema foi dada, finalmente, por um físico cujas ideias foram extremamente importantes para a nova física que estava ali em estado inicial. Max Planck era o físico em questão. Não pretendemos aqui descrever em detalhes o que Planck fez, queremos apenas usar isto como complemento para entender o desenvolvimento posterior dos modelos atômicos seguintes ao de Rutherford, bem como as partículas elementares. Grosso modo, Planck, iniciou suas pesquisas nesse domínio procurando dar ênfase não à radiação em si, mas ao átomo radiante. Isto é, seu enfoque foi na maneira de como se dava a emissão dessa radiação por parte do átomo, e não na composição da emissão em si. O trecho a seguir, encontrado em um livro de Heizenberg intitulado

¹⁰ HEIZENBERG, Werner. *Física e filosofia*. Trad. De Jorge Leal Ferreira. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1981.

“*Física e Filosofia*”, é bem esclarecedor no sentido de entender a proposta de Planck:

“Pelo fato de Planck poder, em base ao seu trabalho anterior, traduzir facilmente sua fórmula em termos do átomo radiante (o assim chamado *oscilador*), ele deve ter logo descoberto que sua fórmula parecia revelar que tudo se passava como se o oscilador só pudesse emitir *quanta* com energias discretas – um resultado tão diferente de tudo que se conhecia na física clássica, que ele certamente deve tê-lo, de início, rejeitado. Mas, em um período de intenso trabalho, no verão de 1900, finalmente convenceu-se que não havia como escapar de sua conclusão” (HEISERBERG¹¹, pág 9, 10)

Vê-se, assim, o caráter inesperado contido na ideia de Planck. Naturalmente, como deve ter acontecido inclusive com o próprio Planck, a ideia sofreu uma grande rejeição nos seus primeiros anos de vida, porém, depois, se mostrou como uma suposição teórica que resolvia um número sem igual de questões.

Einstein e o Efeito Fotoelétrico

Além da questão sem solução citada na seção anterior, outro fenômeno que continuava sem solução no começo do século XX era o efeito fotoelétrico. Tal efeito consistia na emissão de elétrons por parte de uma superfície metálica, por exemplo, uma vez que nela se incidisse luz – onda eletromagnética. Acontece que o efeito não se verificava para qualquer tipo de luz. O efeito se dava apenas quando a luz tinha uma frequência maior do que um valor crítico mínimo. Abaixo dessa frequência, não importando qual fosse a intensidade da luz, verificava-se que nenhuma corrente de elétrons era criada. Para valores acima desta frequência crítica mínima verificava-se, no entanto, que havia uma corrente eletrônica e que, além disso, a energia dos elétrons “arrancados” do metal era diretamente proporcional à frequência da luz incidente. Variações na intensidade da luz incidente ocasionavam mudanças apenas na corrente elétrica, ou seja, mudava-se a quantidade de carga que fluía por unidade de tempo, mas não havia mudança na energia de movimento desses elétrons componentes desta corrente. Baseado naquilo que se conhecia da física clássica, não havia solução para esse problema.

Foi Albert Einstein, outro físico que, junto com Max Planck e outros, teve grande importância na mudança de paradigma que aconteceu na virada do século XIX para o XX, que forneceu uma solução satisfatória do problema do efeito fotoelétrico. Mais uma vez podemos usar as palavras de Heisenberg para ilustrar o que aconteceu:

11 IDEM

“Einstein pôde explicar tal resultado meramente interpretando a hipótese de Planck como significando que a luz consiste de quanta de energia que se propagam através do espaço. Ademais, a energia de um único quantum deve, de acordo com as hipóteses feitas por Planck, ser igual ao produto da frequência da luz pela constante de Planck” (HEISENBERG¹², pág 10)

Com esta hipótese, Einstein conseguiu explicar os dados experimentais para o efeito fotoelétrico. Cabe sublinhar aqui o quão estranha era a suposição usada. Se a luz consistia de *quanta* de energia, como supôs Einstein, significava dizer que ela não é, na verdade, uma onda eletromagnética, como propunha a bem sucedida teoria de Maxwell? Einstein, de fato, sabia da existência dos fenômenos de difração e interferência, os quais são característicos de sistemas que possuem caráter ondulatório. Portanto, a hipótese de Maxwell e toda sua teoria ondulatória da luz não estavam, de modo algum, negadas. Ao que parece, um novo aspecto da natureza da luz havia sido descoberto. Discussões mais profundas sobre esse caráter dual da luz, em primeira análise, assim como, em última instância, como veio a ser sugerido posteriormente, de qualquer coisa que existe ao nosso redor, foram de grande número e aconteceram nas décadas seguintes às descobertas de Planck e de Einstein.

Bohr e o Uso de Ideias Quânticas para o Átomo Nuclear

Niels Bohr, outro nome de peso da física do século XX, estava na segunda década deste século perfeitamente ciente das limitações apresentadas pelo modelo de Rutherford. Utilizando a hipótese discreta (daqui para frente chamada de *hipótese quântica*) de Planck, Bohr sugeriu um modelo para o átomo de hidrogênio no qual o elétron orbitava o próton único no núcleo, tal qual no modelo de Rutherford. A diferença é que, já que agora se usava a hipótese quântica, o problema da instabilidade do átomo estava resolvido. Bohr propôs que o elétron poderia assumir apenas certas órbitas especiais, quantizadas, e que, uma vez o elétron em tais órbitas, não haveria tendência a emitir radiação eletromagnética, muito embora houvesse movimento por sua parte. Com tais suposições foi possível explicar, em grande parte, características do espectro do hidrogênio. No entanto, o modelo de Bohr não obteve igual sucesso para átomos mais pesados e com mais elétrons, pois as massas desses átomos aumentavam mais do que o que se esperava com a suposição de que eles continham um número de prótons igual ao número de elétrons. “*Infelizmente, o átomo imediatamente mais pesado (hélio), embora tenha dois elétrons, pesa quatro vezes mais que o hidrogênio, e o lítio (com três elétrons) é sete vezes mais pesado que o hidrogênio*”¹³ (GRIFFITHS,

12 IDEM

13 “Unfortunately, the next heavier atom (helium), although it does indeed carry two electrons, weighs *four* times as much as hydrogen, and lithium (three electrons) is *seven* times the weight of hydrogen”.

pág 13). Havia, portanto, muito provavelmente, alguma outra contribuição para a massa do átomo.

Antes de seguir para o próximo item, seria interessante fazer uma rápida comparação entre as primeiras seções desse trabalho e o estágio em que nos encontramos agora. No momento, estamos em Bohr, com seu modelo atômico funcionando muito bem para o átomo de hidrogênio – embora não explicando rigorosamente todas suas características. Além disso, já existem duas partículas, no mínimo, que compõem o átomo – nomeadamente o próton e o elétron. Há, no entanto, a suspeita de que, no núcleo, exista algo mais, já que o aumento da massa não ocorre proporcionalmente ao número de prótons contidos no núcleo do átomo. Parece haver, portanto, apenas um fato poderoso que liga tais ideias, então, modernas, ao pensamento grego: o fato de que existem partículas diminutas que compõem a matéria como um todo. Como neste momento pode ser notado de forma óbvia, diferentemente de como pensavam os gregos, os átomos não são indivisíveis, mas, ainda assim, existem estruturas diminutas que compõem, grosso modo, tudo. A seguir iniciaremos uma seção que versa sobre o fato de que, realmente, os átomos não têm nada de “indivisíveis”, ou seja, a quantidade de partículas que constitui estes, ou mesmo certos tipos de radiação e outras, digamos, “entidades”, não é nada pequena.

Um Caminho às Partículas Elementares – os léptons.

Nesta seção daremos um esboço sobre a questão das partículas elementares na física focando uma classe especial dessas partículas – os léptons. A ideia não é, de modo algum, dar profundos detalhes sobre como tais partículas são produzidas, bem como sobre a maneira através da qual elas interagem. O foco será principalmente descritivo, mostrando que a questão dos componentes elementares vai muito além do “próton”, “elétron”, “nêutron”. Basicamente, podemos dizer que as partículas elementares são aquilo, ou imagina-se que sejam aquilo, que forma tudo que existe no universo. Como poderá ser concluído no que será exposto adiante, muitas partículas que os cientistas pensavam ser elementares, na verdade não eram. Portanto, para um primeiro trabalho sobre o tema, será satisfatório se atravessarmos, na medida do possível, a barreira das três partículas mais conhecidas citadas acima.

A problemática sobre o aumento da massa do átomo em uma proporção não exatamente igual ao aumento da quantidade de prótons foi definitivamente resolvida por James Chadwick em 1932. Evidências existiam a favor da existência de uma partícula de mesma massa que o próton, porém de carga elétrica neutra. Esta foi denominada *nêutron*. Tal partícula, como se imaginava, ocupava também o núcleo do átomo. Verificou-se, além disso, que um mesmo átomo poderia ter diferentes números de nêutrons e que, ainda, os diferentes números de nêutrons estavam ligados à estabilidade ou não do átomo. Assim, o conceito de isótopos – átomos que contêm o mesmo número

de prótons, porém diferentes número de nêutrons – veio à tona. É importante dizer que a ideia de que no núcleo atômico existiam apenas prótons sempre foi de complicada sustentação, mormente para átomos mais pesados, ou seja, para átomos multieletrônicos. O motivo é que, naturalmente, prótons sofrem repulsão mútua entre si. Logo, como um arranjo de vários prótons – caso de um átomo multieletrônico – seria estável em um espaço tão pequeno? O nêutron, de alguma forma, fez com que houvesse um entendimento mais simples e menos contraditório sobre esse fato, uma vez que tais entidades também estariam no núcleo e, portanto, era de se supor que não existe somente um tipo de interação naquela região. Ainda assim, o entendimento completo dessa estabilidade só veio depois.

Uma partícula que há muito tempo já é conhecida e ainda hoje se firma como partícula elementar é o elétron. Até hoje não foi encontrada nenhuma evidência que mostre que o elétron possui componentes mais fundamentais. Isso não é o que ocorre, por exemplo, com o próton e o nêutron, considerados muitas vezes, em conversas baseadas no senso comum, como os constituintes básicos da matéria. O elétron, no entanto, muitas vezes é acompanhado por uma partícula especial chamada neutrino, sobre a qual voltaremos a falar posteriormente.

Outra partícula de especial importância é o fóton. Ele, como já foi aqui sugerido, segundo um ponto de vista corpuscular, é o componente da radiação eletromagnética. Porém, além disso, ele age como intermediário de qualquer força eletromagnética à distância. Sendo assim, ao invés de entendermos a interação à distância via um campo, entendemos via troca de partículas. Os fótons são essas partículas trocadas entre os corpos que interagem à distância¹⁴.

Pouco acima, mencionamos o fato de que o nêutron deveria, de alguma forma, mediar a forte repulsão que era esperada entre os prótons contidos num espaço extremamente pequeno como é o núcleo atômico. E, de fato, era isso que acontecia. Imaginava-se que haveria uma força suficientemente forte que anulava a repulsão entre os prótons – uma força de atração, portanto. Tal força tornaria o sistema estável e foi chamada de *força forte*. Assim, da mesma forma que o *fóton* era o mediador, em sentido moderno, da força eletromagnética, deveria haver um mediador de tal força forte. “*A primeira teoria significativa sobre a força forte foi proposta por Yukawa em 1934. Yukawa assumiu que o próton e o nêutron se atraíam por algum tipo de campo (...) Esse campo deveria ser adequadamente quantizado, e Yukawa fez a pergunta: quais devem ser as propriedades do quantum desse campo – a partícula (análoga ao fóton) da qual a troca é responsável pelas características da força forte?*”¹⁵ (GRIFFITHS, pág 17). Yukawa, a partir do cálculo de qual massa

14 “Para a gravidade, [o fóton] é chamado de graviton (embora uma teoria quântica da gravidade totalmente bem-sucedida não tenha sido ainda desenvolvida e, talvez, demorem séculos até que alguém detecte um gráviton experimentalmente”. “For gravity, it is called the *graviton* (though a fully successful quantum theory of gravity has yet to be developed and it may well be centuries before anyone detects a graviton experimentally”. (GRIFFITHS, pág 16.)

15 “The first significant theory of the strong force was proposed by Yukawa in 1934. Yukawa assumed that the proton and neutron are attracted to on another by some sort of field (...) This field should properly be quantized, and

tal “quantum” deveria ter, chegou a conclusão de que ele era algo intermediário entre o nêutron e o próton. Assim, tal quantum foi nomeado “méson”, o que significa algo de massa mediana. No entanto, naquela altura, a tal partícula proposta por Yukawa nunca havia sido detectada em laboratório, o que gerou certa desconfiança, embora, claro, do ponto de vista teórico sua existência fizesse sentido. Porém, nas décadas de 30 e 40, muitos estudos sobre raios cósmicos¹⁶ estavam sendo feitos e o méson acabou sendo achado por alguns grupos independentes. O interessante foi que, na verdade, inicialmente se achou apenas um tipo de méson. Pouco depois, outro méson foi achado, o que levou à necessidade de diferenciá-los. O méson proposto por Yukawa foi chamado méson π , também conhecido com “píon”, enquanto o outro ficou conhecido por méson μ , conhecido por “múon”. O píon, segundo o entendimento atual, não é considerado uma partícula elementar, pois é formado por outros componentes, os quais não serão objeto de estudo neste trabalho. O múon, por sua vez, é considerado uma partícula elementar da família dos léptons, grupo este que será estudado neste trabalho. Da mesma forma que o elétron, o múon, em geral, aparece acompanhado por outra partícula, a qual também é um neutrino, porém diferente do neutrino em questão para o caso do elétron.

O neutrino já previamente citado – ou os neutrinos, se considerarmos que fizemos uma diferença entre o neutrino associado ao elétron e o neutrino associado ao múon – surgiu a partir da necessidade de justificação de um dado fenômeno, da mesma forma que o méson proposto inicialmente por Yukawa. Claro, daquilo que discutimos na seção sobre o conceito de ciência moderna, uma hipótese em física só faz sentido se ela for comprovada experimentalmente. Do contrário, ela não passa de especulação, por mais que, a princípio, faça sentido. Pois bem, o neutrino entrou em cena quando cientistas, por volta da década de 30, estudavam um decaimento especial – o decaimento β . Em um decaimento deste tipo, um núcleo é transformado em outro núcleo ligeiramente mais leve juntamente com a emissão de um partícula beta – que é um elétron. Acontece que imagina-se que tal transformação, a qual é uma reação nuclear, da mesma forma que uma reação química qualquer, deve seguir o princípio geral da conservação de energia. No entanto, considerando apenas que, junto com a produção do novo núcleo, era produzido um elétron, tal conservação de energia não se verificava. Isso foi um grande problema. Alguns cientistas chegaram a duvidar sobre a validade do princípio da conservação da energia.¹⁷ Contudo, surgiu uma hipótese, inicialmente sugerida por Pauli, que deveria haver uma outra partícula emitida juntamente com o elétron, à qual poderíamos associar a energia restante, de tal forma que o princípio da conservação

Yukawa asked the question: What must be the properties of its *quantum* – the particle (analogous to the photon) whose exchange would account for the known features of the strong force?”(GRIFFITHS, pág 17)

16 Os raios cósmicos são partículas de alta energia que atingem a terra vindo do espaço. Não se sabe, ao certo, qual a origem desses raios.

17 “Niels Bohr (não pela primeira vez) estava decidido abandonar a lei de conservação de energia”. “Niels Bohrs (not for the first time) was ready to abandon the law of conservation of energy” (GRIFFITHS, pág 23).

da energia não fosse violado. Fermi, desenvolveu uma teoria para o decaimento beta ainda na década de 30 e usou a hipótese de Pauli. “*Em terminologia moderna, então, o processo de decaimento beta fundamental é:*

$$n = p^+ + e^- + \nu^-$$

”(GRIFFITHS, pág 24)

Ou seja, temos um nêutron se transformando em um próton mais um elétron mais um antineutrino.

O neutrino, portanto, assim como o antineutrino, é eletricamente neutro. A diferença entre um neutrino e um antineutrino será apresentada mais à frente, porém sem grandes detalhes. A suposição da existência do neutrino também foi útil para explicar a diferença entre os decaimentos dos dois mésons já citados neste trabalho. Enquanto o píon decaía em um píon mais um neutrino, o múon decaía gerando um elétron e dois neutrinos. Porém, como será mostrado adiante, esses dois neutrinos do decaimento do múon são, na verdade, um neutrino e um antineutrino. A explicação mais elaborada para o porquê desta diferença também será omitida.

A prova experimental da existência do neutrino foi por muito tempo alvo de extensas pesquisas. A mesma apareceu apenas em meados da década de 1950. Tal demora em muito se deveu pelo fato de que o neutrino é uma partícula que interage de modo muito fraco com a matéria, pois, além de ser neutro, sua massa é extremamente pequena.

Voltando à questão da diferença entre o neutrino e o antineutrino, a mesma foi “solucionada” ao se associar a cada um deles um novo número, chamado número leptônico. Ao neutrino foi associado o número leptônico “+ 1”, enquanto que ao antineutrino foi associado o número leptônico “-1”. Para que fosse possível saber qual das duas partículas seria produzida em um dado processo, era necessário fazer uma conservação do número leptônico antes e depois do processo. Assim, “(...) Associaram número leptônico $L = +1$ ao elétron, ao múon e ao neutrino, e um $L=-1$ para o pósitron, múon positivo e para o antineutrino (Para todas as outras partículas restantes o número leptônico era zero)”¹⁸. Porém, mais à frente, surgiram outras dificuldades que levaram à hipótese da existência de dois tipos de neutrinos diferentes e à consequente criação de mais dois números, os quais ficaram conhecidos como número muônico e número eletrônico. A regra de conservação do número leptônico agora tinha dois aspectos, os quais precisavam ser satisfeitos ao mesmo tempo, ou seja, era necessária tanto a conservação do número muônico quanto a conservação do número eletrônico. Assim, a um dos neutrinos estava associado o número muônico +1 e o número eletrônico zero. Ao outro neutrino associava-se o número muônico zero e o número eletrônico + 1. “O

¹⁸ IDEM, pág 26.

*primeiro teste experimental da hipótese de dois neutrinos (e a conservação separada do número muônico e eletrônico) foi conduzida em Brookhaven em 1962*¹⁹. Assim, grosso modo, podemos dizer que existe um neutrino associado ao elétron e outro associado ao múon, ou seja, os neutrinos também seria partículas elementares que sempre apareciam com seus, digamos, companheiros.

Por fim, apenas citaremos a última partícula elementar que compõe, segundo os padrões atuais, a família dos léptons. Trata-se da partícula tau, representada pela letra grega τ , a qual foi descoberta em 1975²⁰. Da mesma forma que o múon e o elétron, o tau também tem seu “neutrino”. Assim, fechamos esse trabalho tendo conhecimento das seis partículas elementares que compõem a família dos léptons: o elétron, o múon, o tau e os seus respectivos neutrinos.

Considerações Finais

Com este trabalho podemos ver, embora de modo extremamente resumido, qual grande foi progresso da ciência ao longo da história. É certo que abordamos as partículas elementares apenas em um tópico e que, além disso, tratamos apenas de uma das famílias – os léptons. No entanto, já é possível ver a complexidade e, ao mesmo, tempo a beleza do estudo das partículas elementares. Esperamos que esse trabalho possa ter uma continuidade no futuro de forma a englobar não somente as outras classes de partículas elementares, mas também detalhes relacionados à Grécia antiga e ao desenvolvimento da mecânica quântica, abordando, claro, aspectos epistemológicos de forma mais profunda.

Parecer do Orientador

O Relatório reflete de maneira clara o envolvimento sério do Lucas neste período em que se dedicou ao desenvolvimento do seu projeto. O tema foi bem abordado e mostra de maneira sucinta o desenvolvimento da ideia atomista até os dias atuais.

19 IDEM, pág 28

20 IDEM, pág 44.

Bibliografia

- BOHR, Niels., *Física Atômica e o Conhecimento Humano: ensaios 1932-1957*. Rio de Janeiro. Contra-ponto, 1995
- GRIFFITHS, D. J., *Introduction to elementary particles*. 1987, John Wiley & Sons.
- HEIZENBERG, Werner. *Física e filosofia*. Trad. De Jorge Leal Ferreira. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1981.
- TIPLER, P. A., *Física Moderna* – Rio de Janeiro: LTC, 2006.

Endereço eletrônico acessado: www.epicuro.net