

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

ODAIR APARECIDO COSSI JUNIOR

**MATERIAL DIDÁTICO DE APOIO AO PROFESSOR
SOBRE TÓPICOS DE PARTÍCULAS ELEMENTARES PARA
O ENSINO MÉDIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

ODAIR APARECIDO COSSI JUNIOR

**MATERIAL DIDÁTICO COMO APOIO AO PROFESSOR
SOBRE TÓPICOS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS
ELEMENTARES PARA O ENSINO MÉDIO**

Trabalho de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Licenciatura em Física do Departamento Acadêmico de Física – DAFIS - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientadora: Prof. Dra. Luciana Rocha Hirsch

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

ODAIR APARECIDO COSSI JUNIOR

MATERIAL DIDÁTICO COMO APOIO AO PROFESSOR SOBRE TÓPICOS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTARES PARA O ENSINO MÉDIO

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 21 de Março de 2014, horário de início às 15h50min, como requisito parcial para obtenção do título de Licenciado em Física, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr^a Ângela Emília de Almeida Pinto
Coordenador de Curso
Departamento Acadêmico de Física

Prof. Dr^a Noemi Sutil
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso
Departamento Acadêmico de Física

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a Rita Zanlorensi Visneck Costa
UTFPR

Prof. Dr. Marlos de Oliveira Ribas
UTFPR

Prof. Dr^a Luciana Rocha Hirsch
Orientador - UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

À minha família, que sempre acreditou em mim e sempre apoiou as minhas decisões. Por haver me ensinado a ser uma pessoa honesta e solidária.

À minha professora orientadora, pelo seu grande apoio, dicas e sugestões.

À professora Noemi Sutil.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por me propiciar formação profissional.

Enfim, a todos que colaboraram para que este trabalho acontecesse.

RESUMO

COSSI JUNIOR, Odair aparecido. **Material didático como apoio ao professor sobre tópicos de física de partículas elementares para o ensino médio.** 2014. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Licenciatura em Física), Departamento Acadêmico de Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Este trabalho apresenta uma proposta de material didático para o Ensino Médio, também destinado à formação continuada de professores. O objetivo central foi desenvolver um material didático de apoio ao professor, abordando tópicos de partículas elementares para além de uma simples classificação.

Durante a realização do trabalho, percebeu-se haver necessidade real de estabelecer bases que permitam uma compreensão de tópicos de partículas elementares; assim sendo, boa parte do trabalho foi direcionada para conceitos de física moderna, que são os pré-requisitos necessários.

Foi realizada uma pesquisa de procedimentos característicos de estado da arte para identificar trabalhos que apresentassem sugestões de propostas de ensino sobre o tema em questão. Como resultado, na literatura, constam poucos trabalhos neste sentido. Por isso, com esta proposta, apesar de não ter sido aplicada, espera-se introduzir tópicos de Física Moderna e Contemporânea na escola.

Palavras-chave: Partículas Elementares, Ensino de Física, Física Moderna e Contemporânea.

ABSTRACT

COSSI JUNIOR, Odair aparecido. **Didactic Material to support teacher on topics of elementary particles for the middle school.** 2014. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Licenciatura em Física), Departamento Acadêmico de Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This work presents a proposal of didactic material for the high school, also intended for the continuing education of teachers. The central objective was to develop a didactic material to support the teacher, focusing on topics of elementary particles in addition to a simple classification.

During the completion of the work, it became apparent that there is a need to establish real bases that allow for an understanding of topics of elementary particles; therefore, good part of the work was directed to concepts of modern physics, which are the pre-requisites required.

We conducted a survey of procedures which are characteristic of the state of the art to identify jobs that submit suggestions for proposals of teaching on the subject in question.

As a result, in the literature, appearing in a few work in this direction. For this reason, with this proposal, although it has not been applied, waiting to introduce topics of Modern Physics and Contemporary in school.

Keywords: Elementary Particles, Teaching of Physics, Modern Physics and Contemporary.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

CBEF – Caderno Brasileiro de Ensino de Física

CERN – Centro Europeu de Pesquisas Nucleares

DCE – Diretrizes Curriculares Estaduais

EM – Ensino Médio

EPEF – Encontro de Pesquisa em Ensino de Física

FMC – Física Moderna e Contemporânea

IENCI – Investigações em Ensino de Ciências

PCN – Parâmetros Curriculares Nacionais

PCN+ - Parâmetros Curriculares Complementares

RBEF – Revista Brasileira de Ensino de Física

SNEF – Simpósio Nacional de Ensino de Física

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO.....	9
2.0 JUSTIFICATIVA.....	11
3.0 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
4.0 ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	243
5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
6.0 REFERÊNCIAS	343
APÊNDICE.....	37

1.0 INTRODUÇÃO

A escola, como espaço de socialização, tem por finalidade transmitir os conhecimentos produzidos pela civilização, ao longo da História, fazendo parte da cultura humana. Aqui, o conhecimento científico tem um destaque especial. Já são pouco mais de quatro séculos de intenso desenvolvimento científico sem precedentes, desde Galileu Galilei. E, em particular, tem-se o conhecimento Físico.

Esse conhecimento, a partir do século XX, desenvolveu-se de forma espantosamente ainda mais acelerada. Para quem imaginava serem apenas três partículas constituintes do átomo, desde a descoberta do elétron, em 1897, em pouco menos de um século, descobriram-se centenas de outras partículas ainda menores.

As consequências tecnológicas dessas descobertas são inegáveis: aparelhos eletrônicos como TV's, aplicações na medicina (Ressonância Magnética Nuclear, Tomografia por emissão de Pósitrons e de Prótons, Prototerapia, Radioterapia Convencional, Medicina Nuclear), a própria Internet, entre outras.

E, para que estudar Física na escola? A disciplina de Física está vinculada a uma ciência de referência – a Física- cujo corpo se compõe de leis, princípios, conceitos, teorias e ideias que são fundamentais para compreendê-la, e assim, descrever os fenômenos naturais. Busca, desta forma, compreender desde a estrutura mais elementar da matéria até o entendimento da origem do universo.

Segundo DCE's do Paraná (2008, p.50), “o conhecimento científico é uma construção humana com significado histórico e social”. Portanto, entende-se que a cultura científica é necessária para as relações sociais e para a compreensão do que é científico de fato. Também, para se perceber as potencialidades e limites dos modelos em ciência.

Ainda, segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais complementares (PCN+) (2001, p.61) espera-se que o jovem seja

“capaz de lidar com situações reais, crises de energia, problemas ambientais, manuais de aparelhos, concepções de universo, exames médicos, notícias de jornal, e assim por diante”.

Os estudantes que chegam às escolas estão inseridos num mundo cada vez mais dependente da Ciência e da Tecnologia. Eles usufruem dos “milagres” produzidos pela Ciência e, as escolas devem acompanhar essas mudanças, a fim de transmitir os conhecimentos de forma mais atualizada.

Sabe-se, por meio de pesquisas em Ensino de Física nas últimas décadas, que a Física ensinada no Ensino Médio ainda está limitada aos tópicos da Física clássica. Já existem vários trabalhos publicados (teses, dissertações, artigos, etc) que enfatizam a importância da inserção de Física Moderna e Contemporânea¹ (FMC) no EM, porém pouquíssimos apresentam propostas que, de fato, mostrem COMO ensinar FMC.

Conforme Moreira (2011, p.6),

estamos em pleno século XXI, mas a Física ensinada na escola é a do século XIX. Um verdadeiro absurdo. Por mais importante que seja a Mecânica Newtoniana dentro da Física, começar por ela o ensino da Física, e desde uma perspectiva formulista, tem sido um grande fracasso. Só não reconhece quem não quer.

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta didática, ou melhor, um material didático de apoio para o professor do EM, que integre os principais tópicos da Física de partículas, numa perspectiva fenomenológico-conceitual, abordando o estudo das Partículas Elementares para além de uma simples classificação destas partículas.

Busca-se, assim, atender aos PCN e despertar o interesse do jovem pela Ciência. Acredita-se que, para isso, ao se apresentar aspectos da teoria moderna sobre as partículas elementares, isto é, o Modelo Padrão, o estudante poderá tecer juízos ou explicações sobre fenômenos cotidianos e tecnológicos, e, adquirir, portanto, uma visão mais adequada da natureza e da construção da Ciência como um todo.

¹ É considerada Física Contemporânea tudo o que foi feito da década de quarenta até os dias de hoje (OSTERMANN; MOREIRA, 2001, p.138).

2.0 JUSTIFICATIVA

Na perspectiva da inserção de FMC, este trabalho constitui-se numa tentativa de atender o que é exigido nos PCN, com relação ao currículo de Física do EM. Como já atuo na docência em Física na educação básica, sinto a falta de discussões a respeito das partículas elementares e da importância de seu estudo. Como os livros didáticos de EM abordam pouco ou nenhum conteúdo relacionado, proponho uma sequência didática (textos e atividades) sobre Ensino de Tópicos de Física de Partículas.

Existem pesquisas que mostram que o tema Partículas Elementares atrai o interesse dos estudantes e é um bom tópico para se ensinar FMC. Stannard (1990 *apud* OSTERMANN E MOREIRA, 2000, p.24)

justifica a atualização curricular ao relatar um levantamento feito com estudantes universitários que mostrou que é a Física Moderna – relatividade restrita, partículas elementares, teoria quântica, astrofísica - que mais os influencia na decisão de escolher Física como carreira.

Também, aqui no Brasil foi feito um levantamento, por Ostermann & Moreira (2000). Nesse levantamento, os autores entrevistaram 54 físicos, 22 pesquisadores em ensino de Física e 22 professores de Física do EM, para que apontassem quais seriam os tópicos que deveriam ser levados para o EM. Os temas foram:

Efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, leis de conservação, radioatividade, forças fundamentais, dualidade onda-partícula, fissão e fusão nuclear, origem do Universo, raios-X, metais e isolantes, semicondutores, laser, supercondutores, partículas elementares, relatividade restrita, Big Bang, estrutura molecular e fibras ópticas. (OSTERMANN & MOREIRA, 2000, p.138)

Assim, pode-se notar que, nas duas pesquisas citadas, situam-se os temas: relatividade restrita, partículas elementares e astrofísica. Dentre esses, destaca-se, especialmente, o estudo das partículas elementares.

Portanto, acredita-se que esse material será um guia de trabalho para o professor que, muitas vezes, não está preparado tecnicamente e, conseqüentemente, sem condições didáticas para ensinar Física de Partículas.

Existe a possibilidade de a maioria dos cursos superiores não apresentar a disciplina de Partículas Elementares em suas matrizes curriculares. Esse material tem a finalidade de abordar tópicos de Física de partículas na perspectiva de sua evolução histórica e de modelos, suas aplicações e suas últimas descobertas, por meio do laboratório CERN.

Este material, também, poderá ser utilizado como fonte de referências para estudos mais aprofundados pelo professor. Apresenta, ainda, notas que complementam o assunto desenvolvido no tópico, questões de vestibular, sites para acesso às simulações e animações (*applets*).

Busca-se, assim, diminuir a lacuna que existe no ensino da Física no EM, o qual termina nos conceitos de Física Clássica, em grande parte das instituições de EM.. “A grande concentração de tópicos, tratados na Física Escolar, se dá na Física desenvolvida aproximadamente entre 1600 e 1850. Portanto, estamos em débito com nossa juventude ‘sonhando’, no mínimo, vários séculos de Física elaborada”. (TERRAZZAN, 1994, p.42).

Acredita-se, também, que o tema Partículas Elementares pode, de certa maneira dar ao aluno uma visão mais adequada da natureza da Ciência e de seu desenvolvimento, superando, assim, aquela imagem de desenvolvimento linear e cumulativo. A história das descobertas das partículas é um bom exemplo disto.

Além disso, deve-se frisar a importância dos modelos em Ciência. Eles permitem organizar e prever novos fenômenos. Conforme Moreira (2011, p.46),

(...) modelos não são definitivos, nem únicos. É possível explicar determinadas observações, certos resultados experimentais, através de diferentes modelos. Naturalmente, uns são mais adequados do que outros, no sentido de terem maior poder explicativo e permitem uma “melhor ordenação” das observações.

Ainda, para Moreira (1989, p.114)

“o estudo das partículas elementares dá aos alunos uma visão dinâmica da construção do conhecimento físico. Ou seja, o modelo padrão, que é uma teoria, não é definitivo, infalível e acabado”.

A leitura de textos de divulgação científica e análise das notícias veiculadas na mídia são outros aspectos que justificam a inserção da Física de Partículas no EM, pois

Como educadores, não podemos deixar que esses assuntos cheguem aos jovens somente pelos meios de divulgação. Pode-se e deve-se discutir esses assuntos na sala de aula. Desta forma, os jovens, poderão entender melhor os artigos das revistas de divulgação científica e compreenderão porque os cientistas fazem essas pesquisas, tendo um posicionamento mais crítico, perante esses artigos veiculados pela mídia. (SIQUEIRA, 2006, p. 16)

Finalmente, espera-se que esse tema esclareça alguns fundamentos da tecnologia moderna, que permeia o mundo no qual vive o jovem estudante. Neste caso, podem-se trabalhar os princípios das tecnologias já citadas anteriormente.

Dessa maneira, devemos começar a pensar em novas formas de se levar em conta não só o tema Partículas Elementares, mas também tópicos de FMC. Uma Física mais atualizada que desperte, nos jovens estudantes, a vontade de conhecer mais de perto a natureza, e assim, contribuir para atender os PCN e as DCE's.

3.0 REFERENCIAL TEÓRICO

Como já foi destacado, a Física ensinada na Escola ainda está restrita à Física Clássica, e vários trabalhos foram e continuam sendo publicados, relatando-se a necessidade da inserção de FMC no EM. O primeiro artigo a tratar do Ensino de Física de Partículas no Brasil foi “Um Mapa conceitual sobre Partículas Elementares” (MOREIRA, 1989).

O artigo de Moreira (1989) apresenta dois mapas conceituais, cujo objetivo é discutir melhor os conceitos presentes em uma tabela publicada na revista “*The Physics Teacher*”, em dezembro de 1988, sobre partículas e interações.

Desde essa década, já havia a preocupação de inserir assuntos de FMC, poupando alguns assuntos de Física Clássica. Essa tendência iniciou-se nos Estados Unidos, como pressão dos físicos e professores de Física, em “modernizar” o currículo de Física daquele país.

Outros trabalhos sobre Física de Partículas voltados para o EM foram escritos por Ostermann (1999) e Ostermann e Cavalcanti (2001). O primeiro, publicado na RBEF, trata de um texto para professores do EM que traz uma abordagem histórica da Física de Partículas. O segundo, publicado na revista “Física na Escola”, traz um pôster traduzido e adaptado de materiais do “*Contemporary Physics Education Project*” (Califórnia, Estados Unidos, 1998) e do curso “*Topics in Modern Physics*”, organizado pelo Fermi National Accelerator Laboratory (Illinois, Estados Unidos, 1995) para ensinar Física de Partículas. (OSTERMANN E CAVALCANTI, 1999, p. 267).

Para se ter uma visão mais geral do panorama da pesquisa acadêmica já publicada nessa área, foi feito um levantamento, considerando procedimentos característicos de pesquisa estado da arte² nos principais Eventos e Periódicos do País³, no período de 2002 a 2013. Foram encontrados sete artigos que abordam o Ensino de Física de Partículas, efetivamente. Todavia, a análise foi complementada com mais três artigos (que abordam o tema FMC), totalizando, assim, dez artigos. A

² FERREIRA, N.S.A. As Pesquisas denominadas “Estado da Arte”. Educação & Sociedade, anoXXIII, nº79, Agosto, 2002. Disponível em: <http://dafis.ct.utfpr.edu.br/moodle/mod/resource/view.php?id=4349>.

³ **EVENTOS:** SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA (SNEF) E ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA (EPEF)

PERIÓDICOS: REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA (RBEF), CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA (CBEF) E INVESTIGAÇÕES EM ENSINO DE CIÊNCIAS (IENCI).

grande maioria dos trabalhos é oriunda de Eventos (principalmente do SNEF) como se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1: Dados da Pesquisa Procedimentos Característicos de Estado da Arte

(Continua)

Título do Artigo	Evento/ Periódico	Ano
Serão as Regras da Transposição Didática Aplicáveis aos Conceitos de Física Moderna?	IENCI	2005
Ensino de Física de Partículas Elementares no Ensino Médio: As Perspectivas dos Professores em Relação ao Ensino do Modelo Padrão	SNEF	2007
Simulações e Animações: Recursos para o Ensino de Física de Partículas no Ensino Médio	SNEF	2007
Física Moderna no Ensino Médio: O Que Dizem os Professores	RBEF	2007
O Modelo Padrão da Física de Partículas	RBEF	2009
Os Aceleradores de Partículas em Aulas de Física: Dificuldades Encontradas por Professores na		

Elaboração de Propostas	EPEF	2009
A Física, a Cultura e os Aceleradores de Partículas: Articulações Possíveis em Sala de Aula	SNEF	2013
O Ensino de Partículas Elementares por Meio da Leitura de “Alice no País do Quantum”	SNEF	2013
Uma Proposta para Sala de Aula Sobre a Física Nuclear e a Física de Partículas	SNEF	2013
Reflexões Sobre Propostas de Ensino de Física Moderna e Contemporânea para o Ensino Médio	SNEF	2013

FONTE DO AUTOR

Portanto, são recentes as pesquisas em Ensino de Física de Partículas. Após isto, foi feita uma classificação destes artigos em duas categorias: Discussão Teórica (DT) ou Proposta de Ensino (PE). Os artigos que envolvem DT foram subdivididos em: Formação de Professores, Reflexões sobre Propostas e Somente Discussão Teórica. A categoria PE foi dividida em: Proposta Desenvolvida e Proposta Não Desenvolvida em sala de aula.

Do total de dez artigos, cinco envolvem DT e cinco apresentam PE. Dos artigos sobre DT, dois apresentam apenas discussão teórica, dois discorrem sobre formação de professores e um apresenta uma reflexão sobre uma proposta de ensino. Dos artigos sobre PE, três foram desenvolvidas e duas não foram desenvolvidas em sala de aula. Estes dados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Categorias e Subcategorias de classificação dos Artigos listados na Tabela 1

(Continua)

Título do Artigo	Evento/ Periódico	Ano	Subcategorias
Serão as Regras da Transposição Didática Aplicáveis aos Conceitos de Física Moderna?	IENCI	2005	Apenas Discussão Teórica (DT)
Ensino de Física de Partículas Elementares no Ensino Médio: As Perspectivas dos Professores em Relação ao Ensino do Modelo Padrão	SNEF	2007	Formação de Professores (DT)
Simulações e Animações: Recursos para o Ensino de Física de Partículas no Ensino Médio	SNEF	2007	Proposta de Ensino Desenvolvida (PE)
Física Moderna no Ensino Médio: O Que Dizem os Professores	RBEF	2007	Formação de Professores (DT)
O Modelo Padrão da Física de			Apenas Discussão Teórica

Partículas	RBEF	2009	(DT)
Os Aceleradores de Partículas em Aulas de Física: Dificuldades Encontradas por Professores na Elaboração de Propostas	EPEF	2010	Proposta de Ensino Não Desenvolvida (PE)
A Física, a Cultura e os Aceleradores de Partículas: Articulações Possíveis em Sala de Aula	SNEF	2013	Proposta de Ensino Desenvolvida (PE)
O Ensino de Partículas Elementares por Meio da Leitura de “Alice no País do Quantum”	SNEF	2013	Proposta de Ensino Desenvolvida (PE)
Uma Proposta para Sala de Aula Sobre a Física Nuclear e a Física de Partículas	SNEF	2013	Proposta de Ensino Não Desenvolvida (PE)
Reflexões Sobre Propostas de Ensino de Física Moderna e Contemporânea para o Ensino Médio	SNEF	2013	Reflexão sobre Proposta (DT)

FONTE DO AUTOR

Após a leitura destes artigos, selecionaram-se os referenciais teóricos mais frequentes na literatura, que tratam do ensino de Física de Partículas: Terrazan (1994) (*apud* WATANABE *et.al*, 2010) ; Ostermann (1990) (*apud* LOZADA E

ARAÚJO, 2007) ; Brockington e Pietrocola (2005) (*apud* PIETROCOLA et. al.,2007); Ostermann & Moreira (1998,2000, 2001) (*apud* MOREIRA, 2009); Watanabe et. al. (2010); Zanetic, (1980) (*apud* LUZ & HIGA, 2013); Abdalla (2005) (*apud* PEREIRA E LONDERO, 2013) ; Siqueira & Pietrocola (2006) (*apud* PIETROCOLA et. al.,2007) ; Moreira (2009).

Esses pesquisadores concordam que a inserção de FMC é necessária para que os estudantes compreendam os fenômenos cotidianos, contribuindo, assim, para o exercício de sua cidadania. Conforme Terrazzan (1992, p.210 *apud* SIQUEIRA, 2006, p. 4),

a tendência de atualizar-se o currículo de Física justifica-se pela influência crescente dos conteúdos contemporâneos para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a necessidade de formar um cidadão consciente e participativo que atue nesse mesmo mundo.

A seguir, tem-se uma rápida análise de cada artigo.

Brockington e Pietrocola (2005) reconhecem que são poucas as pesquisas relacionadas à implementação de tópicos de FMC. Eles analisam requisitos necessários para a inserção da Mecânica Quântica no Ensino Médio. Esses autores dizem que os temas de FMC não estão presentes no EM apenas pela complexidade do tema, mas também por uma insegurança inerente a qualquer tentativa de mudança no domínio escolar.

Lozada e Araújo (2007) apresentam os resultados de uma pesquisa qualitativa, por meio de questionários, sobre a perspectiva de professores em relação ao Ensino do Modelo Padrão no EM. Revelam que há predisposição dos professores para o ensino deste tópico, porém discutem problemas para esta realização: dificuldades de natureza epistemológica, mudanças no currículo e formação de professores.

Pietrocola et. al. (2007) propõem simulações e animações computacionais, para a compreensão de conceitos abstratos sobre Partículas elementares, embora defendam que os experimentos reais possuam mais *status* educacional. Foi desenvolvida uma atividade em uma turma do 3º ano do EM de uma escola Pública. Porém, os resultados não foram comentados pelos autores.

De acordo com Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007), existem pesquisas que mostram que uma das vertentes para escapar do currículo desatualizado em Física é a introdução de tópicos de FMC na grade curricular do EM Nesse trabalho, é desenvolvida uma pesquisa feita com professores da rede pública e privada, por meio de um questionário sobre a inserção de um tópico de FMC no EM.

Este trabalho mostrou que houve grande aceitação para a introdução do tópico raios X como estratégia metodológica para inserção da FMC. Também, os autores colocam que não basta introduzir novos assuntos que proporcionem análise e estudos de problemas mais atuais se não houver uma preparação adequada dos alunos das licenciaturas para esta mudança.

Em Moreira (2009, p.9), temos uma discussão teórica a respeito do Modelo Padrão. Em seu trabalho, afirma:

“que a superação deste Modelo será uma consequência natural da desilusão que teremos com ele, da necessidade de dizer não a ele se quisermos aprender mais sobre partículas elementares”.

Watanabe *et.al* (2010) apresentam uma proposta de trabalho, voltada para alunos do EM ou visitantes em geral, pautada em visitas a um laboratório científico em atividade, mais especificamente, o acelerador de partículas (*Pelletron*) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Estes autores apelam para uma formação docente que privilegie discussões de cunho social, político e econômico, a respeito da Ciência.

Luz, Watanabe e Gurgel (2013) apresentam as estratégias utilizadas em um curso ministrado a estudantes do ensino médio sobre aceleradores de partículas cuja abordagem priorizou elementos do fazer científico e sua dimensão social em detrimento apenas dos conteúdos científicos. Mais uma vez vê-se a preocupação com a formação de professores, mesmo com outro enfoque.

Pereira e Londero (2013) apresentam o resultado de uma pesquisa com alunos do EM Investigam a possibilidade de Ensino de Física de Partículas por meio da leitura e entendem que a leitura de textos de divulgação científica deveria estar mais presente na sala de aula.

Shino, H.S. *et.al.* (2013) apresentam uma proposta para sala de aula, construída na última série do EM Ela é voltada ao tema energia nuclear, incluindo

aspectos da Física de Partículas. Aqui há, também, a valorização do contexto político e econômico do desenvolvimento científico. Também, há a preocupação em considerar as ideias dos estudantes, antes de aplicar a proposta.

Por fim, Luz & Higa (2013) fazem uma revisão bibliográfica de trabalhos apresentados nos anos de 2006, 2008 e 2010, no Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, especificamente trabalhos sobre sequências didáticas, sobre FMC, aplicadas em sala de aula.

Constataram que há um número muito pequeno de trabalhos sobre propostas de ensino na literatura e o fato de que os tópicos de FMC despertam em muito o interesse dos jovens. Também, a revisão identificou que estes tópicos podem ser desenvolvidos em todas as séries do EM confrontando a ideia injustificada de que apenas devemos inserir FMC no final do EM.

Portanto, percebe-se que há unanimidade entre os autores a respeito da inserção da FMC no EM. A grande maioria parece concordar que há aceitação dos professores em ensinar esses assuntos, porém deve-se investir em formação de professores. A universidade, responsável pela formação inicial e o Estado, responsável pela formação continuada, devem criar condições para que isso aconteça.

Observou-se também um número muito reduzido de trabalhos na área de Ensino de Física de Partículas, que apresentem propostas de ensino. Somente após o trabalho de Ostermann e Cavalcanti (2001), depois de seis anos, é que surge outro trabalho sobre Ensino de Física de Partículas.

Segundo Ostermann e Moreira (2000, p. 27), “têm sido consideradas três vertentes representativas de abordagens metodológicas para a introdução de FMC no ensino médio: exploração dos limites dos modelos clássicos; não utilização de referências aos modelos clássicos; escolha de tópicos essenciais.”

A primeira vertente é de Gil, *et.al*, (1998) (*apud* OSTERMANN E MOREIRA, 2000), segundo os quais, a visão simplista com que a Física Moderna é ensinada nas escolas, sem referências à Física Clássica, provoca sérias concepções alternativas.

Através de um questionário, notou-se que a grande maioria dos alunos ignorava a existência de uma crise no desenvolvimento da Física Clássica, desconhecia a diferença entre Física Moderna e Clássica e apresentava uma série de confusões

conceituais sobre questões acerca da dualidade onda-partícula, equação de Einstein, partícula elementar. (GIL *et.al.* 1998 *apud* OSTERMANN E MOREIRA, 2000, p. 27).

A segunda vertente deve-se à Fischler e Lichtfeldt (1992) (*apud* OSTERMANN E MOREIRA, 2000) defendendo que a aprendizagem de Física Moderna é dificultada porque o ensino, frequentemente, usa analogias clássicas.

Segundo esses autores, as referências à Física Clássica devem ser evitadas; No caso do efeito fotoelétrico, a interpretação deve ser feita a partir das características dos elétrons e não das dos fótons, a interpretação estatística do fenômeno deve ser usada e descrições dualistas devem ser evitadas.

Também, a relação de incerteza de Heisenberg deve ser introduzida no começo (e formulada para objeto quântico). Também deve ser excluído o modelo de Bohr. (FISCHLER E LICHTFELDT, 1992 *apud* OSTERMANN E MOREIRA, 2000, p.28).

Por fim, a última vertente pertence à Arons (1990) (*apud*. OSTERMANN E MOREIRA, 2000). Ele propõe que poucos conceitos de Física Moderna devam ser ensinados no nível médio. Também defende a busca de sustentação na Física Clássica para a abordagem de Tópicos da Física Moderna.

Para Arons (1990 *apud* OSTERMANN E MOREIRA, 2000, p.28), “o importante, em um curso introdutório de Física Moderna, é proporcionar aos alunos “*alguma percepção*” sobre conceitos como: elétrons, fótons, núcleos, estrutura atômica”.

Nesta proposta, devem-se abordar os conceitos relacionados às partículas elementares, e, sempre que possível, utilizar-se-á a Física Clássica. Talvez, deva-se iniciar com conceitos cotidianos, mais “concretos” na vida dos alunos e tratar o Modelo de Bohr. Também, não se terá a pretensão de desenvolver muitos conceitos. Por essas razões, a proposta se aproxima mais da vertente de Arons.

No entanto, existem muitas dificuldades associada ao ensino de Partículas Elementares usando analogias clássicas. Entre essas, situam-se as noções-obstáculos. Moreira (2011, p. 90) destaca duas noções-obstáculo: coisismo e o choquismo.

A primeira noção-obstáculo tende a imaginar as partículas elementares como “bolinhas” minúsculas, com massas muito pequenas e ocupando um lugar no espaço. No entanto, partículas elementares não são corpúsculos, e não podem ser

localizadas com precisão no espaço. Além disso, algumas partículas não tem massa.

A segunda noção-obstáculo costuma representar os choques entre partículas como colisões elásticas ou elásticas entre “bolinhas”. Entretanto, esta representação não dá significado aos processos de criação e aniquilação em um acelerador ou colisor de partículas. (MOREIRA, 2011, p.90-92).

Todavia, a literatura está certa de que é possível, sim, levar a Física de Partículas para o EM. Um exemplo é o trabalho de Siqueira (2006), cuja pesquisa mostrou ser possível levar a Física de Partículas para o EM, transpondo os principais obstáculos apontados pela literatura.

Ainda Moreira (2011, p. 92) afirma que é possível levar a Física dos Quarks no EM:

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

Assim, espera-se que este estudo da literatura auxilie, primeiramente, na construção de algo factível, prático e concreto, e depois, possam-se avaliar caminhos já traçados. Após, espera-se propor novas estratégias, buscando gerar novos resultados.

4.0 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Considerando que a maioria das pesquisas mostra ser possível atualizar o currículo de Física do EM por meio da introdução de tópicos de Física Moderna e Contemporânea, estas não se dedicam a apresentar propostas de ensino, de fato. Ou seja, restringem-se apenas ao “o quê fazer” e não ao “como fazer”.

Por isso, esse trabalho tem por finalidade construir e apresentar uma proposta de Ensino que integre alguns conceitos de FMC ao currículo de Física do EM. Com a elaboração desse texto, espera-se responder à questão: Como seria possível elaborar um material didático para o professor de EM cuja temática fosse Partículas Elementares para além de uma simples classificação?

Tentando responder a questão central deste trabalho, foram analisados minuciosamente, na literatura, todos os trabalhos brasileiros que já apresentaram propostas de ensino, e como já foi visto, são poucos.

Foi elaborado o material didático, o qual se pode chamar de sequência didática, cujo enfoque técnico é dar ao professor noções básicas sobre a classificação das partículas, mas também detalhar suas propriedades fundamentais e suas relações com as interações fundamentais. Como se perceberá, tentou-se obedecer a linha histórica das descobertas em Física de Partículas.

Decidiu-se iniciar a construção do material didático com algum assunto cotidiano tanto do professor quanto do aluno. Analisando-se isto na literatura, percebeu-se que o tema inicial que aparece está relacionado com Radiações. Escolheu-se, então, o tema Raios – X como tópico 1.

Foi feita uma adaptação do texto Radiografia e os raios X, de Maxwell, 2006. O tópico 1 pode ser considerado o início da aventura pelo mundo subatômico. Aqui, com alguma superficialidade, fala-se da descoberta dos raios X, por Roentgen e das aplicações imediatas que isto teve. Quis-se dar ênfase na história da Física deste momento.

Depois, ainda num nível básico, apresenta-se a natureza dos raios X como ondas eletromagnéticas, sua geração como consequência da colisão dos raios catódicos com o alvo do tubo. No texto ainda não se diz nada sobre os raios catódicos. Apenas na nota é que se explica sua natureza e seu processo de geração. Também são propostas 5 questões sobre o texto.

Na seção de atividades, é proposto ao professor analisar, com os alunos, radiografias. Esta atividade prática tem função de despertar o interesse dos alunos em questionar a natureza dos raios X, a geração das radiografias e sua interpretação e/ou explicação em termos de diferenças entre materiais e estruturas.

O tópico 2 é uma continuação das investigações históricas sobre as Radiações. Aqui, apresentam-se outros grandes nomes envolvidos nestas pesquisas: Henri Becquerel, Pierre e Marie Curie. Descreve-se o trabalho de Becquerel com a fosforescência e fluorescência.

É descrita a propriedade eletrostática destes raios provenientes do sal de urânio, a ionização do ar, e a descoberta do elemento rádio por Pierre e Marie Curie, bem como a descrição dos três tipos de radiação, por Rutherford.

Como atividade para complementar este tópico, é sugerido um vídeo curto, muito didático, que explica a história da descoberta da Radioatividade, realizada pela TV Ontário, visando tornar o conteúdo atraente.

A seguir, tem-se quatro questões sobre o texto. A última questão necessita de conhecimento de eletrostática, podendo o professor fazer uma boa revisão desta com os alunos.

No tópico 3, segue-se na sequência das descobertas históricas no campo da Física do final do século XIX. Este tópico, particularmente, é muito importante, pois descreve a descoberta da primeira partícula elementar, o elétron. Também, de forma simples, porém minuciosa, é descrito o experimento de Thomson assim como o tubo de raios catódicos.

Como são necessários conhecimentos de eletromagnetismo para a compreensão deste tópico, teve-se o cuidado de abordar os conceitos de força elétrica e magnética minuciosamente. Deduz-se as equações necessárias para a determinação da razão carga-massa do elétron de maneira simples, tornando possível ao professor trabalhá-las em sala de aula. Deu-se atenção na construção dos esquemas do tubo de raios catódicos, o que permite uma melhor compreensão do equipamento e de seu funcionamento.

No que tange à atividade complementar deste tópico, é sugerido um vídeo elaborado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), descrevendo a descoberta do elétron e suas propriedades, como a carga elétrica.

O próximo tópico é, na verdade, uma complementação do texto anterior. Após ser conhecida a razão carga-massa do elétron, fica muito mais simples determinar a carga elétrica do elétron. Então, é descrito um dos experimentos mais belos da Física: o experimento da gota de óleo de Millikan.

O experimento de Millikan raramente é comentado no EM. Acredita-se que este experimento merece destaque especial nas aulas de Física, pois permite trabalhar vários conceitos concomitantemente: velocidade, aceleração, forças, viscosidade, eletrostática e a quantização da carga elétrica, um conceito fundamental que aproxima o aluno do mundo das partículas. Além disso, o experimento é clássico na História da Física.

Como complementação deste tópico, o próprio autor criou um vídeo, realizado na disciplina de Projetos de Ensino de Física Moderna, do curso de Licenciatura em Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), explicando em detalhes o funcionamento do equipamento que reproduz o experimento de Millikan. Este vídeo pode ser acessado na internet, cujo link de acesso se encontra no material.

O tópico seguinte, A Descoberta do Núcleo Atômico, encerra uma primeira sequência de textos que abordam os conceitos numa perspectiva mais histórica. Neste tópico, o tema central é o experimento de Rutherford. Apresenta-se a superação do modelo atômico de Thomson, descreve-se o experimento de Rutherford.

O texto evidencia a incompatibilidade do modelo de Rutherford com o eletromagnetismo clássico. Aqui é importante perceber a importância dos modelos em Física, como foi discutido no início deste trabalho.

A seguir, apresenta-se outro experimento de Rutherford, a transmutação, que leva à descoberta do próton. Também, enfatiza-se a importância pioneira do experimento de Rutherford para a Física Nuclear e de Partículas: a colisão de um feixe de partículas com outro ou com um núcleo. Como atividades, foram selecionadas três questões de vestibular sobre o assunto.

O tópico 6 introduz um tratamento quântico para as radiações, a partir da lei de Planck. Enfatiza-se a crise da Física Clássica em suas explicações sobre o espectro contínuo de um corpo negro e a solução encontrada por Planck, quantizando os “irradiadores elementares”.

Como sugestão de atividades, propõem-se duas questões e uma sugestão de construção de um espectroscópio. Para isso, é sugerido o vídeo da série Com Ciência, realizado pela TV Escola, disponível na internet, cujo link está no final do tópico.

Os próximos cinco tópicos (7 ao 11) destinam-se a trabalhar conceitos de Mecânica Quântica. Conforme já dito, é necessário o conhecimento destes assuntos para o entendimento das propriedades das partículas elementares. Estes assuntos escolhidos são: efeito fotoelétrico, modelo de Bohr, princípio da Incerteza, dualidade onda-partícula e Spin.

O tópico 7 aborda o efeito fotoelétrico. Aqui se inicia a discussão da dualidade onda-partícula. Apresenta-se rapidamente a discussão histórica sobre o problema do efeito fotoelétrico e a solução proposta por Einstein, adotando o modelo de quantização de Planck. É apresentada a equação principal do efeito fotoelétrico. Neste momento, aproveita-se para discutir a unidade de energia usada frequentemente na Física de Partículas: o elétron-volt, e seus múltiplos.

No final deste tópico, destaca-se o sucesso da teoria quântica em descrever o efeito fotoelétrico, e deixa-se uma situação incômoda: a dualidade onda-partícula, que será discutida mais tarde.

Como atividade complementar deste tópico, é sugerido um *applet*, da universidade do Colorado, muito didático, que simula o efeito fotoelétrico em vários materiais diferentes. O professor pode executá-lo ou baixá-lo livremente. Também, há três problemas envolvendo a equação do efeito fotoelétrico.

No tópico “O Modelo de Bohr”, volta-se à questão do problema do modelo de Rutherford e de outro problema: as linhas de emissão e absorção nos espectros dos diferentes elementos. Para tratar deste outro problema, colocou-se uma nota explicando isto. A seguir, resumem-se os postulados que Bohr teve de adotar e explica-se a razão de cada um. Neste tópico, talvez o conceito mais abstrato para o professor é o momento angular, porque normalmente não é estudado no EM.

Novamente, destaca-se aqui o sucesso do modelo de Bohr em explicar o átomo de Hidrogênio e suas falhas em explicar os espectros dos outros átomos. Também, são apresentadas as equações principais da teoria de Bohr do átomo de Hidrogênio. Como sugestão de atividade, são propostas duas questões de vestibular.

O tópico “Dualidade Onda-Partícula” complementa o tópico o efeito fotoelétrico. Aqui, destaca-se o papel de De Broglie e, com mais propriedade matemática, deduz-se, de maneira simples, a fórmula que descreve a relação entre propriedades corpusculares e ondulatórias. É dado um exemplo de como as ondas de matéria aparecem. A seguir, é descrito o experimento que demonstrou a tese de De Broglie: o experimento de Davison-Germer.

Como complementação do assunto, foi realizado, pelo autor, mais um vídeo, na disciplina Projetos de Ensino em Física Moderna, do curso de Licenciatura em Física, da UTFPR, sobre Difração de Elétrons. Neste vídeo, o autor faz um resumo histórico sobre o tema e reproduz o experimento com um equipamento do laboratório de Física Moderna. Também, são propostos três problemas importantes para a aplicação das equações estudadas neste tópico.

O tópico seguinte traz um dos assuntos mais relevantes no contexto da Física de Partículas: o princípio da Incerteza de Heisenberg. Este texto foi adaptado do livro Leituras em Física, de Richard Feynman. Neste tópico, procurou-se trazer o conteúdo do princípio de forma simples e objetiva, a partir de experiências sobre interferência de ondas e de elétrons. Apresentam-se as equações que o descreve. É proposta uma questão de vestibular e um problema, de outro vestibular, para aplicar as equações.

O tópico 11 trata do Spin, um conceito complexo, mas, ao mesmo tempo, importantíssimo para se compreender as partículas elementares. Procurou-se dar, inicialmente, um tratamento clássico para o spin, e aqui, é importante lembrar o conceito de momento angular, tratado no tópico oito (O Modelo de Bohr). No entanto, tomou-se o cuidado de não fazer analogia do spin com um “movimento de rotação”.

É fornecida e detalhada a equação que relaciona momento angular e momento magnético de uma partícula carregada. Antes de introduzir o spin como um número quântico, é feito um estudo detalhado do significado dos números quânticos e suas relações com a distribuição eletrônica. Após, é fornecida sua verdadeira interpretação e enfatizando-o como propriedade intrínseca das partículas, como a massa e a carga elétrica.

A seguir, é descrito o experimento de Stern-Gerlach, e detalhado como este permitiu a comprovação teórica do spin. Em uma nota, são explicados os números

quânticos e suas relações com a função de onda. É feita uma correlação com a química do EM.

Como atividade, é sugerido um vídeo do instituto de Física da USP, cujo tema é a descrição de propriedades do elétron, entre elas, o spin. Foram elaboradas seis questões que envolvem o entendimento dos números quânticos. São propostas duas simulações, disponíveis na internet, sobre o experimento de Stern-Gerlach e uma simulação sobre a construção de funções de onda, também disponível na internet.

A partir do tópico 12 é iniciado um estudo mais centralizado sobre partículas elementares. Neste tópico, é descrita a descoberta do nêutron e como isto levou à descoberta da Força Nuclear Forte. Aqui é importante o conhecimento do texto sobre Spin.

Destaca-se o papel de Chadwick nos experimentos que levaram à descoberta do nêutron. Também, destacam-se a importância de Yukawa e do físico brasileiro César Lattes na teoria da Força Forte. Ainda não foi objetivo deste tópico descrever a Força Forte. Como sugestão de atividades, são propostas três questões que verificam a compreensão do texto.

No tópico 13 é introduzida a Força Nuclear Fraca, no contexto do problema do decaimento beta. Usando as leis clássicas de conservação, mostra-se a necessidade de uma nova partícula para explicar este decaimento. Destacam-se os físicos Pauli e Fermi na proposta do neutrino. Também, apresenta-se claramente a distinção entre as forças Forte e Fraca. Como atividade, é proposta uma questão de vestibular sobre o neutrino.

O próximo tópico dedica-se a antimatéria. Por ser um assunto complexo, tentou-se discutir o assunto num nível apenas qualitativo. É discutido rapidamente o papel de Dirac e conceitos como energia negativa, mar de elétrons e vácuo. É discutido o princípio da exclusão de Pauli e como este leva à existência das antipartículas.

Destaca-se o papel de Carl Anderson na descoberta do pósitron, usando raios cósmicos e a câmara de nuvens. A seguir, é descrita a descoberta do antipróton e de outras antipartículas. Finaliza-se com a discussão do processo de aniquilação matéria-antimatéria. Como atividade, é proposta uma questão sobre o processo de aniquilação, que remete às leis de conservação.

No tópico 15 inicia propriamente o estudo da Física de Partículas. É apresentada a Física de Partículas e seu objeto de estudo. Já no início deste texto é destacado o conceito de partícula elementar. Isto porque, remetendo-se à *Moreira, 2011*, quer-se romper com os obstáculos epistemológicos de coisismo e choquismo. Remonta-se ao princípio da Incerteza de Heisenberg e à sua importância no mundo subatômico.

A seguir, faz-se um histórico das descobertas de todas as partículas até 1952. Apresenta-se uma primeira classificação das partículas em hádrons e léptons, a partir do spin e da reação à Força Forte.

Também são detalhados os neutrinos e os múons, bem como suas relações e decaimentos. Destaca-se o papel do físico Murray Gell-Mann numa tentativa de classificação de todas as partículas conhecidas. Como atividade, é sugerido um *applet*, disponível na internet, que simula uma câmara de nuvens e decaimentos de partículas.

O próximo tópico é dedicado aos aceleradores de partículas e aos detectores. Devido à extensão deste tópico, foi dividido em quatro subtópicos. No primeiro, discute-se a importância dos aceleradores em estudos de Física de Partículas. Destaca-se o papel do comprimento de onda de De Broglie. No segundo, distinguem-se os dois tipos de aceleradores e são detalhadas suas vantagens e desvantagens.

No terceiro, é explicado minuciosamente o funcionamento de um acelerador tipo colisor, usando formalismo matemático. No entanto, as deduções são muito simples, pois são usados conceitos de mecânica, eletromagnetismo e relatividade especial, perfeitamente acessível ao Ensino Médio. Por fim, o último subtópico descreve, de maneira simplificada, os detectores de partículas, que são a câmara de bolhas e o calorímetro.

Como proposta de atividade, é sugerido mais um *applet*, disponível na internet, que simula um acelerador de partículas e mostra seus princípios básicos de funcionamento. Também foi elaborado um problema como forma de aplicação das equações por trás dos aceleradores.

Finalmente, o último tópico, o mais extenso, trata dos Quarks, das Interações Fundamentais e do Modelo Padrão. Também é composto de quatro subtópicos. O primeiro é uma continuação histórica do tópico anterior. Descreve as partículas

estranhas, seus processos de decaimento e a necessidade de um novo número quântico, introduzido por Gell-Mann: a estranheza.

No próximo subtópico, são apresentados os ingredientes básicos do Modelo Padrão: os quarks e léptons. É discutido o problema da carga fracionada dos quarks e são apresentadas várias tabelas sobre bárions e mésons. Também, é explicada a diferença entre bárions formados pelos mesmos quarks.

No terceiro subtópico, é introduzida a carga Cor. Discute-se o princípio da exclusão de Pauli para os quarks, e como este princípio exige a necessidade de uma nova “carga”.

Finalmente, o tópico é encerrado com as interações Fundamentais da Natureza. Este tópico dá uma explicação detalhada do mecanismo das forças fundamentais a partir das partículas mediadoras. São introduzidos os glúons e os bósons W e Z e é explicado o mecanismo do decaimento beta a partir destes bósons mediadores da Força Fraca.

Para complementar a teoria, é proposta a análise do *applet atom build* destinado a simular a formação de átomos a partir de quarks e léptons. Também, são propostas sete questões para verificar a compreensão do tópico.

Ao final de quase todos os textos foram acrescentadas leituras complementares, destinadas ao professor para um aprofundamento do assunto. Estas leituras são artigos de caráter técnico ou de ensino, de duas revistas importantes no cenário do Ensino de Física no Brasil: A Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) e o Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF). São disponibilizados os endereços eletrônicos para o acesso a esses periódicos.

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este material didático foi concebido pensando ser uma fonte de estudos (e de atualização), para o professor de Ensino Médio, de alguns conceitos básicos sobre Partículas Elementares (e também de Física Moderna), já que na literatura temos poucas propostas de ensino (ou nenhuma, que, de fato, tenha este propósito).

Pensou-se em uma proposta de ensino que comporte uma explicação minuciosa sobre os conceitos por trás da Física Moderna e Contemporânea, sem apelar para fórmulas matemáticas. Procuramos também dar uma abordagem histórica, obedecendo a uma linha de tempo das principais descobertas nesta parte da Física.

Procurou-se também, dar ao professor, sugestões de exercícios, atividades, simulações computacionais e leituras complementares para um devido aprofundamento, tudo isso visando ajudá-lo na preparação e na implementação de suas aulas.

Embora esta proposta de Ensino não tenha sido aplicada em sala de aula, acredita-se que seu uso pode motivar o professor a discutir o devido tema com seus alunos para tornar as aulas mais motivadoras e prolíficas.

Acredita-se que os resultados deste trabalho surgirão, pois estes aspectos deverão ser investigados. Como toda a sequência ficou estruturada, a sua aplicação deve vir confirmar essas hipóteses.

Chega-se à conclusão de que foi possível elaborar um material didático acessível ao professor, e também, ao nível do ensino médio. Apesar de ser um tema bastante complexo, conseguiu-se adaptar este conhecimento sob a luz de referenciais teóricos e de outros trabalhos já realizados.

Segundo Arons (1990), poucos conceitos de Física Moderna devem ser ensinados no nível médio, e defende a busca de sustentação na Física Clássica para a abordagem de Tópicos da Física Moderna. Nessa linha, elaborou-se este material a partir da abordagem de alguns conceitos apenas, pensando na sua aplicação em sala de aula, dando ao aluno, apenas uma percepção sobre conceitos básicos da teoria.

Percebeu-se que é necessária a compreensão de muitos conceitos da Física Moderna, especialmente, de algumas noções de Mecânica Quântica, para se entender um pouco sobre a Física de Partículas. No material didático, por isto, há um predomínio de conceitos da Física Moderna, não específicos de Partículas Elementares.

No que tange às atividades de cada tópico, teve-se que buscar e elaborar situações para problematizar os assuntos. Foram propostas: questões discursivas, visando o entendimento do assunto central, problemas, simulações computacionais e sugestões de leituras complementares. As questões e os problemas são perfeitamente acessíveis ao nível do ensino médio, e acredita-se que eles poderão ser mais profícuos durante as aulas.

Com relação ao formalismo matemático por trás da teoria, teve-se que optar por uma abordagem fenomenológica-conceitual, para adaptar a linguagem matemática em conceitos que tenham rigor próximo ao desta mesma linguagem. Quando julgou-se necessário, introduziram-se equações, cuja demonstração, no entanto, está acessível ao ensino médio.

Buscou-se, com este trabalho, aplicar noções da Ciência atual e fundamental na escola, fazendo o professor perceber a importância dos modelos em ciência e de suas evoluções ao longo da história, além de buscar alterar a visão estereotipada da Ciência, principalmente da Física.

Portanto, espera-se que esta proposta não termine aqui, mas, que ela possa ser aplicada em sala de aula, em breve, e verificar, de fato, sua aplicabilidade. Este material deve atualizar o currículo de Física da escola básica, contribuindo para a formação de um aluno mais participativo e mais consciente de seu papel na sociedade, no que diz respeito à Ciência Contemporânea, aproximando-se desta área do conhecimento.

6.0 REFERÊNCIAS

ABDALLA, Maria Cristina Batoni. **O Discreto Charme das Partículas Elementares**. 1.ed. São Paulo: Editora UNESP. 2005.

BALTHAZAR, W. F.. **Partículas Elementares No Ensino Médio: Uma Abordagem A Partir Do LHC**. 2008. 119f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro. Nilópolis, 2008. Disponível em: <http://www.ifrj.edu.br/webfm_send/3046>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

BROCKINGTON, G. PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de física moderna?. **Investigações em Ensino de Ciências** – V10(3), p. 387-404, 2005. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID136/v10_n3_a2005.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

CARUSO, Francisco. SANTORO, Alberto. **Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais**. 1.ed. São Paulo: Editora LF Editorial. 2012.

Secretaria de Estado de Educação do Paraná (SEED). Diretrizes Curriculares Estaduais, Física. 2008. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/diretrizes/dce_fis.pdf. Acesso em: 10 fev. 2013.

ENDLER, Anna Maria Freire. **Introdução à Física de Partículas**. 1.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2010.

LOZADA, C.O. ARAÚJO, M.S.T. Ensino de física de partículas elementares no ensino médio: as perspectivas dos professores em relação ao ensino do modelo padrão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 17., 2007, São Luis. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2007. Disponível em: <<http://www.cienciamao.if.usp.br/dados/snef/ensinodefisicadeparticul.trabalho.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

LUZ, W.M. HIGA, I. Reflexões sobre propostas de ensino de física moderna e contemporânea para o ensino médio. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 20., 2013, São Pulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2013. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xx/programa/trabalhos.asp?sesId=5>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

MENEZES, Luíz Carlos De. **A Matéria: Uma Aventura Do Espírito (Física Conceitual)**. 1.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2005.

MOREIRA, Marco Antônio. **Física de Partículas: Uma abordagem Conceitual & Epistemológica**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2011.

_____. O Modelo Padrão Da Física De Partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 1306 (2009). Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/modelopadrao.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

_____. Um Mapa Conceitual Sobre Partículas Elementares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 11. 1989. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol11a10.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

OLIVEIRA, F.F et.al. Física Moderna No Ensino Médio: O Que Dizem Os Professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, (2007). Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v29n3/a16v29n3.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

OSTERMANN, F. CAVALCANTI, C.J.H. Física moderna e contemporânea no ensino médio: elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 3: p. 267-286, dez. 2001. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol2/Num1/particulas.pdf>>. Acesso em: 09 abr.2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

OSTERMANN, F. Um texto para professores do ensino médio sobre partículas elementares **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v21_415.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

OSTERMANN, F. MOREIRA, M.A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em Ensino de Ciências** – V5(1), pp. 23-48, 2000. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5_n1_a2.htm>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

_____. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v. 18, n. 2: p. 135-151, ago. 2001. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6676/6144>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

_____. Tópicos de física contemporânea na escola média brasileira: um estudo com a técnica Delphi. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 6., 1998. Florianópolis. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 1998. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6676/6144>>. Acesso em: 05 mar. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

Orientações Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Física. 2001. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: mar. 2013.

Parâmetros Curriculares Nacionais. Ensino Médio. Física. 1998. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>.

PENA, F.L.A. Por que, nós professores de física do ensino médio, devemos inserir tópicos e idéias de física moderna e contemporânea na sala de aula? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 1 -2, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v28n1/a01v28n1.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

PEREIRA, J.M. LONDERO, L. O ensino de partículas elementares por meio da leitura de “alice no país do quantum”. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 20., 2013, São Pulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2013. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xx/programa/trabalhos.asp?sesId=5>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

PINHEIRO, L. A. **Partículas Elementares E Interações Fundamentais No Ensino Médio**. 2011. 313 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/49342/000836027.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 fev. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

RODRIGUES, D.C. et.al. A física, a cultura e os aceleradores de partículas: articulações possíveis em sala de aula. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 20., 2013, São Pulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2013 Disponível em:

<<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xx/programa/trabalhos.asp?sesld=5>>.
Acesso em: 09 abr.2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

SHIINO, H.S. et. al. Uma proposta para sala de aula sobre a física nuclear e a física de partículas (Snef-2013). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 20., 2013, São Pulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2013 Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xx/programa/trabalhos.asp?sesld=5>>.
Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

SIQUEIRA. M.R.P.*et.al*. Simulações e animações: recursos para o ensino de física de partículas no ensino médio. SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 16., 2005. Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2007. Disponível em: <http://www.nupic.fe.usp.br/Publicacoes/congressos/Maxwell_SIMULACOES_E_ANIMACOES.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

SIQUEIRA, M. R. P. **Do Visível Ao Indivisível: Uma Proposta De Física De Partículas Elementares Para O Ensino De Física**. 2006. 257 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Universidade de São Paulo. Instituto de Física e Faculdade de Educação. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.nupic.fe.usp.br/Publicacoes/teses/DissertMAXWELL.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2012. [Atualizado em: 12/03/2014].

TERRAZZAN, E,A. **Perspectivas para a Inserção da Física Moderna na Escola Média**. Tese de Doutorado. São Paulo: FEUSP, 1994.

WATANABE, G. et.al. Os aceleradores de partículas em aulas de física: dificuldades encontradas por professores na elaboração de propostas. Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 12., 2010. Águas de Lindóia. **Anais eletrônicos**. São Paulo: SBF, 2010. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/xii/sys/resumos/T0288-1.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014].

APÊNDICE

MATERIAL DIDÁTICO DE APOIO AO PROFESSOR
SOBRE TÓPICOS DE PARTÍCULAS ELEMENTARES
PARA O ENSINO MÉDIO

Caro Professor,

Este material foi elaborado visando ser uma fonte de estudos sobre Partículas Elementares, em um nível básico. Além disso, este material convida o professor a desenvolver aulas didaticamente acessíveis no Ensino Médio, numa linguagem simples, com sugestões de atividades.

O enfoque técnico deste material é dar um tratamento ao assunto de Partículas Elementares para além de uma simples classificação. O material é composto por textos que aos poucos avança na compreensão da estrutura da Matéria. Traz também atividades em forma de exercícios, sites contendo explicações mais detalhadas dos assuntos e links de vídeos e de simulações (*applets*), questões de vestibular e sugestão de atividades. Procurou-se também dar uma abordagem histórica, quando possível, pois é parte integrante do próprio estudo de Partículas Elementares.

Para introduzir o tema, partimos dos Raios X (tópico 1), pois trata-se de algo cotidiano na vida das pessoas e visa despertar o interesse para começar a aventura pelo mundo das partículas elementares. A seguir, fala-se da radioatividade, de modelo atômico e do experimento de Millikan.

Para se ensinar Física de Partículas Elementares é necessário conhecimento de alguns conceitos de Física Moderna, especialmente de Mecânica Quântica. Muitos trabalhos de pesquisa em Ensino de Física mostram ser possível a compreensão simplificada e qualitativa destes conceitos no Ensino Médio. Por isso, os tópicos de 6 a 10 trazem um apanhado de tais conceitos que serão úteis na aprendizagem deste assunto.

Os próximos tópicos discutem descobertas de algumas partículas, como o próton e o nêutron, as forças nucleares e as antipartículas. A seguir, é realizada uma classificação das partículas, descrevem-se os aceleradores de partículas e enfim, apresenta-se o Modelo Padrão.

Devido ao uso de uma linguagem acessível ao nível do Ensino Médio, sem formalismos matemáticos complicados, este material também pode ser trabalhado com os alunos em sala de aula. Em cada texto, existem as palavras-chaves, que estão em negrito. Nas aulas, deve-se enfatizá-las, pois são as ideias principais da teoria.

Também, pedimos uma atenção especial às notas de rodapé, pois apresentam, na maioria das vezes, explicações complementares, essenciais à compreensão do tópico.

Professor, não é necessário seguir sequencialmente todos os tópicos desta sequência didática. Isto dependerá de seu interesse, do planejamento das aulas e do rendimento das turmas. Portanto, espera-se que este conjunto de textos sirva como uma fonte de estudos e pesquisas e como complemento das aulas de seu curso de Graduação em Física.

SUMÁRIO

1. AS RADIOGRAFIAS E OS RAIOS-X.....	4
2. A RADIOATIVIDADE	9
3. O ELÉTRON: A PRIMEIRA PARTÍCULA ELEMENTAR DESCOBERTA.....	13
4. O EXPERIMENTO DE MILLIKAN.....	16
5. A DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO	18
6. AS RADIAÇÕES E A LEI DE PLANCK.....	22
7. O EFEITO FOTOELÉTRICO.....	25
8. O MODELO DE BOHR.....	28
9. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.....	32
10 O PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG.....	34
10.1 INTRODUÇÃO.....	34
10.2 Uma Experiência com Ondas.....	38
10.3 Uma experiência com elétrons.....	38
10.4 A Interferência de ondas de elétrons.....	39
10.5 Medidas de posição e Momento.....	43
11. O SPIN.....	37
12. A DESCOBERTA DO NÊUTRON E A FORÇA FORTE	42
13. A FORÇA NUCLEAR FRACA.....	46
14. A ANTIMATÉRIA.....	48
15. INICIANDO AS PARTÍCULAS ELEMENTARES.....	51
16. ACELERADORES DE PARTÍCULAS.....	55
16.1 Introdução.....	55
16.2 Tipos de Aceleradores.....	56
16.3 Princípio Físico de um Acelerador Circular.....	58
16.4 Detectores.....	59
17. PARTÍCULAS E O MODELO PADRÃO.....	62
17.1 Partículas Estranhas.....	62
17.2 Classificação segundo o Modelo Padrão.....	64
17.3Um novo Número Quântico: A Cor.....	68
17.4 Interações Fundamentais.....	69
18. REFERÊNCIAS.....	73

1. AS RADIOGRAFIAS E OS RAIOS-X⁴

Há pouco mais de 100 anos, não era possível visualizar o interior do corpo humano. O médico deveria “abrir” o paciente, o que dificultava muito o diagnóstico de doenças e fraturas nos pacientes. Mas em 1895 uma grande descoberta revolucionou a humanidade, principalmente a Física e a Medicina: os **raios X**. Na Medicina, por exemplo, esta descoberta proporcionou diagnósticos não invasivos, muito mais simples e rápidos.

Mas como isso ocorreu?

Na noite de 8 de novembro de 1895 o físico holandês Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), seguindo as tendências de sua época, estava fazendo mais uma experiência com descargas elétricas nos tubos de raios catódicos, estudando o fenômeno da emissão de luz, produzida pelos raios no tubo (fig. 1). Foi quando notou que algo de diferente acontecia. Em sua sala de experiências totalmente às escuras, ele viu a folha de papel, usada como tela e tratada com uma substância química fluorescente (platinocianeto de bário), colocada a certa distância do tubo, emitindo luz. Röntgen espantado imaginou que alguma coisa deveria ter atingido a tela para que ela reagisse dessa forma.

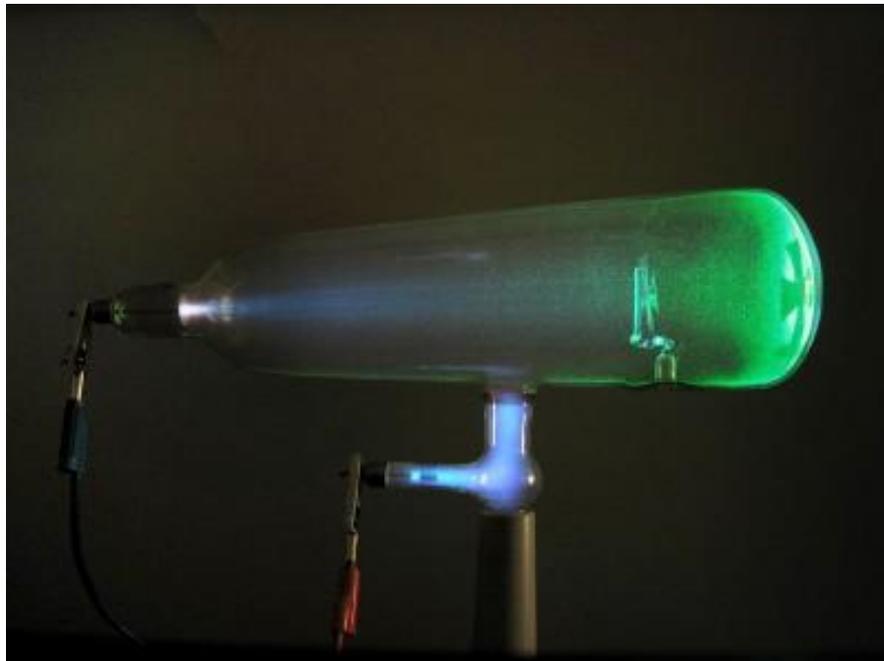


Figura 1: Esquema de um tubo de raios catódicos. Extraído de cienciahoje.uol.com.br/colunas/fisica-sem-misterio/imagens.

O tubo de raios catódicos estava coberto por uma cartolina negra e nenhuma luz ou nenhum raio catódico poderia ter escapado dali para justificar o aparecimento daquela luz. Surpreso e perplexo com o fenômeno, ele decidiu pesquisá-lo mais a fundo. Virou a tela, de modo a que o lado sem a substância fluorescente ficasse voltado para o tubo; mesmo assim, a tela continuava a brilhar. Ele então afastou a tela para mais longe e o brilho persistiu. Depois, colocou diversos objetos entre o tubo e a tela e todos pareceram invisíveis ou transparentes. Na figura 2, tem-se uma mão vista com raios X.

⁴ [Texto adaptado de MAXWELL, 2008]



Figura 2: Radiografia de uma mão. Estruturas como a pele se tornam quase invisíveis e os ossos e o metal do anel são vistos.

Descobriu “um novo tipo de raio”, conforme ele mesmo explicou em seu primeiro trabalho. Röntgen havia ficado tão impressionado com sua descoberta, e teve que analisar e interpretar seus resultados com muito rigor, antes de falar com qualquer pessoa sobre sua descoberta do novo tipo de raio. Trabalhou sozinho durante sete semanas nessa análise, quando finalmente registrou sua descoberta (imagem da mão) em chapas fotográficas, e só então passou a ter certeza de que não estava enganado e de que sua descoberta era realmente importante.

Em 1º de janeiro de 1896, ele distribuiu o relatório preliminar de sua descoberta, o que causou grande repercussão. Sua descoberta não podia ser refutada facilmente, pois havia fotografias dos raios X das mãos de sua esposa, Bertha. No decorrer do mês, a notícia já havia se espalhado por todo o mundo. Pode-se imaginar o deslumbramento em relação a esses raios aos quais tudo se tornava transparente e por meio dos quais todos podiam ver seus próprios ossos. Pode-se ver praticamente os dedos sem os músculos, mas com anéis, como se podia ver também uma bala alojada no corpo. As conseqüências para a medicina foram imediatamente percebidas e provavelmente até comemoradas.

O trabalho experimental de Röntgen sobre os raios X foi perfeito à luz do conhecimento existente em sua época. Mas ele, não conseguiu explicar a natureza dos raios X, ou seja, ele não conseguiu comprovar que se tratava de uma **radiação eletromagnética**. No entanto, ele conseguiu mostrar que os raios podiam atravessar materiais sólidos, podiam ionizar o ar, não sofriam reflexão no vidro e não eram desviados por campos magnéticos, mas não conseguiu observar os fenômenos da refração e da interferência normalmente associados a ondas (ondas eletromagnéticas, neste caso) por isso ficou o nome enigmático de raios X.

Mais tarde sua natureza foi desvendada, mostrando que eles eram conseqüência da colisão dos raios catódicos com a parede do tubo e, por terem comprimento de onda muito pequeno, Röntgen não podia observar os fenômenos necessários para comprovar que os raios-X são ondas eletromagnéticas (radiação eletromagnética) de alta freqüência.

As aplicações dos raios X são as mais diversas possíveis. Elas vão desde “simples” obtenção de chapas fotográficas (radiografias) para detectar uma fratura, uma inflamação ou uma cárie até a Mamografia e a determinação de certa porcentagem de uma substância em um composto, através da difração dos raios X, como é o caso da quantidade de carbono existente no aço. Essa determinação é importante, pois permite que o aço fique mais maleável e conseqüentemente consegue-se produzir chapas mais finas.

Atualmente, os raios X também são utilizados na área de segurança, como é o caso dos aeroportos. Com eles, é possível “ver” dentro das malas e constatar se existem objetos

metálicos e até mesmo se as pessoas carregam algum tipo de arma. Sua utilização também pode ser vista na fronteira dos EUA com o México, onde a polícia o utiliza para inspecionar o interior dos veículos.



Figura 3: Detecção por meio de raios X. Imagem Reconstruída. (Não é “raio X puro”)

NOTA

COMO SÃO GERADOS OS RAIOS CATÓDICOS?

Uma ilustração do equipamento de raios X é mostrada na figura 4.

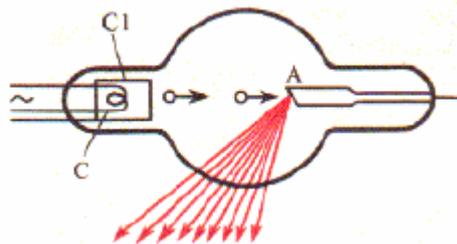


Figura 4: Esquema de um tubo de raios X. Os raios catódicos emitidos do eletrodo de Cl atingem o alvo A. Esta colisão gera raios X. (Extraído de Maxwell, 2008).

*Hoje, sabe-se que os raios catódicos, na verdade, são elétrons, partículas com carga elétrica negativa (vamos estudar isto mais adiante). O processo de geração destes raios catódicos no cátodo do tubo de raios X é denominado **efeito termoiônico**. O efeito termoiônico é definido como a emissão de elétrons por uma superfície metálica aquecida.*

Os primeiros sinais do fenômeno foram observados em meados do século XVIII por Charles DuFay que notou que um gás conduzia eletricidade quando colocado próximo a um sólido aquecido. Após as observações de DuFay, em 1853 o físico francês Edmund Becquerel mostrou que é possível produzir corrente elétrica a partir de um potencial gerado entre dois eletrodos de platina quente com ar aquecido entre estes. Finalmente, em 1883, Thomas A. Edison verificou que elétrons são emitidos quando um metal é aquecido.

Podemos compreender o efeito termoiônico de uma maneira simples. Ao fornecer energia térmica a um material, seus elétrons ganham energia cinética. Haverá, portanto, a emissão desses elétrons se sua energia for suficiente para superar a barreira de potencial da superfície do material.

No cátodo do tubo de vidro, os raios catódicos são inicialmente acelerados, com voltagem de até 100 kV (100.000 V) e, em seguida, são bruscamente freados (há uma colisão dos elétrons com o alvo). Esta energia é absorvida pelo alvo e é reemitida como radiação eletromagnética, com um comprimento de onda muito pequeno (da ordem de 10^{-12} m), que corresponde a radiações de alta frequência. É assim que são produzidos os raios X⁵.

Atividade em Sala de Aula

Analisar radiografias discutindo como são geradas e como são analisadas. Procure entender a relação entre a densidade dos elementos do corpo humano e as impressões na radiografia. Pode-se utilizar também papel fotográfico e objetos para ver as impressões deixadas.

Questões

- 1) O que são os raios X? Como são produzidos?
- 2) Que semelhanças e diferenças têm os raios X e a luz visível?
- 3) Nas radiografias, os contornos dos ossos aparecem bastante claros, sobre o fundo escuro, bem como o contorno de objetos e pessoas (Fig. 2). Analisando o processo de absorção dos raios X, estas regiões mais claras, absorvem mais ou menos raios X do que as outras? Explique sua resposta.
- 4) Os raios X, descobertos em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Rontgen, são produzidos quando elétrons são desacelerados ao atingirem um alvo metálico de alto ponto de fusão como, por exemplo, o tungstênio. Essa desaceleração produz ondas eletromagnéticas de alta frequência denominadas de raios X, que podem atravessar a grande maioria dos materiais conhecidos e impressionar chapas fotográficas. A imagem do corpo de uma pessoa submetida a um exame de raios X representa um processo em que parte da radiação é:
 - a) refletida, e a imagem mostra apenas a radiação que atravessou o corpo, e os claros e escuros da imagem devem-se aos tecidos que refletem, respectivamente, menos ou mais os raios X.
 - b) refletida pelo corpo e parte absorvida, sendo que os escuros da imagem correspondem à absorção e os claros, aos tecidos que refletem os raios X.

⁵ A explicação teórica disso só será discutida nos tópicos 5 e 8.

- c) absorvida pelo corpo, e os claros e os escuros da imagem representam, respectivamente, os tecidos mais e menos absorvedores de radiação.
 - d) absorvida pelo corpo, e os tecidos menos e mais absorvedores de radiação representam, respectivamente, os claros e os escuros da imagem.
 - e) absorvido pelo corpo, e os claros e os escuros da imagem são devidos à interferência dos raios X oriundo de diversos pontos do paciente sob exame.
- 5) Explique por que ocorre o efeito termoiônico.

Leitura Complementar

- *A Descoberta dos Raios X: O Primeiro Comunicado de Röntgen*. Disponível em:
http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v20_373.pdf .

2. A RADIOATIVIDADE

O conhecimento das Radiações levou à concepção atual da estrutura da matéria, com o conhecimento dos constituintes mais elementares de todas as moléculas, de todos os átomos que formam tudo o que existe no Universo: animais, vegetais, minerais, planetas, estrelas. Vamos mostrar como, a partir dos estudos de Radioatividade e dos Raios Cósmicos, nasceu a Física de Partículas Elementares.

A descoberta da **Radioatividade** por Henri Becquerel (1852-1908), em 1896, foi outra grande descoberta da humanidade, pela contribuição ao nosso conhecimento sobre a estrutura da matéria e pelas inúmeras contribuições em campos dos mais variados.



Figura 5: Henri Becquerel. Extraído e traduzido de http://particleadventure.org/decay_start.html.

Becquerel estudava a **fluorescência e fosforescência** dos materiais.

Estes termos, fosforescência e fluorescência, não são sinônimos. Na fluorescência a emissão luminosa ocorre enquanto houver estímulo, a absorção e a emissão ocorrem rapidamente. Na fosforescência, mesmo cessado o estímulo, haverá a emissão, pois o processo de emissão é mais lento que na fluorescência.

Um dia em que o céu estava encoberto, Becquerel expôs um sal de urânio à fraca luz solar e com surpresa verificou que este sal emite radiação espontaneamente, sem fluorescência. Pouco tempo depois, em março de 1896 já descobrira que a radiação emitida pelo sal de urânio não apenas escurecia as chapas fotográficas protegidas, como também ionizava gases, isto é, provocava a libertação de elétrons dos átomos do gás, transformando estes em condutores de eletricidade. A partir daí, era possível “medir a radioatividade” de uma amostra simplesmente medindo a **ionização** que ela produzia.

O instrumento usado para a medição da ionização que o gás sofria era um rústico eletroscópio de lâminas de ouro. Este instrumento é constituído de duas folhas metálicas, neste caso de ouro, finas e flexíveis, ligadas em sua parte superior a uma haste, que se prende a uma placa condutora. Numa situação ideal, não deve haver umidade dentro do frasco de vidro, pois se houver as gotículas de água “roubariam” cargas elétricas. Há também um isolante que impede a passagem de cargas elétricas da haste para o vidro. A figura 6 ilustra um eletroscópio assim.

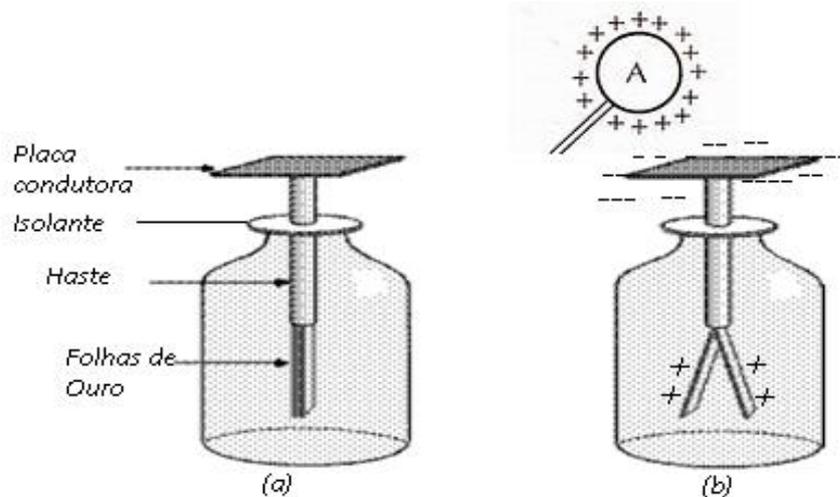


Figura 6: Eletroscópio de duas folhas.

Na situação (a) da figura acima, temos uma situação neutra, ou seja, não há carga elétrica neste sistema. Aproximando-se da placa um tubo A carregado positivamente sem haver contato, haverá eletrização por indução: as cargas positivas de A induzirão cargas negativas na placa condutora. Estas cargas negativas migraram das folhas (e da haste) para a placa. Portanto, as folhas ficam com cargas de sinal positivo, e, como consequência da lei eletrostática de Coulomb, estas cargas se repelem, fazendo com que as folhas se abram. Quanto maior a abertura, maior a quantidade de carga elétrica acumulada nas folhas, como se vê na situação (b).

Suponha agora que uma fonte radioativa ionize um gás no interior deste frasco. Com o gás ionizado, isto é eletrizado, ocorrerá a indução eletrostática. Por exemplo, se o gás estiver carregado negativamente, ele repele elétrons livres das folhas para a placa, fazendo com que elas se abram devido à repulsão. Se o gás estiver com cargas positivas, ele atrai os elétrons livres das lâminas, fazendo também com que elas se abram, novamente, devido à repulsão. A determinação do sinal da carga do gás em teste, que já se sabe estar eletrizado, é obtida carregando-se anteriormente o eletroscópio com cargas de sinal conhecido. Dessa forma, as lâminas terão uma determinada abertura inicial.

Pierre e Marie Curie se interessaram pelo fenômeno e dois anos mais tarde descobriram o elemento rádio, que também emite radiação. Foram eles que inventaram a palavra **radioatividade**.

Em 1903, Ernest Rutherford descobriu a partícula alfa, com carga elétrica positiva. Foi ele quem criou as expressões:

Partícula α : que é o núcleo do átomo de He;

Partícula β : que é o elétron

Partícula γ : que é o fóton, onda eletromagnética.

A radiação beta (o elétron) tem carga negativa e a radiação gama não possui carga elétrica.

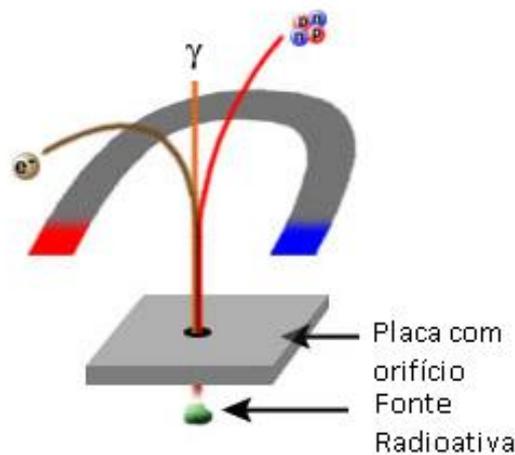


Figura 7: Desvios dos três tipos de radiação conforme sua carga elétrica. Radiação alfa sofre desvio oposto à da radiação beta, ao passarem por um campo magnético⁶. Radiação gama não sofre desvio. Extraído de http://particleadventure.org/radio_part.html.

Nota

Ainda nesta época não se sabia detalhe algum sobre as radiações β e γ , pois não havia ainda ideia alguma sobre modelo atômica ou sobre núcleos.

Abaixo, encontramos alguns exemplos de reações nucleares que envolvem cada uma destas partículas.



Atividade

Vídeo: A descoberta da Radioatividade (TV Ontário) (~09h34min). Disponível no endereço eletrônico: <http://www.youtube.com/watch?v=SIB6fAzPW64>.

Questões

- 1) Qual foi a principal contribuição que os Curie deram para a radioatividade?

- 2) Qual o termo mais adequado para designar as lâmpadas que geralmente iluminam as salas de aula?

⁶ No tópico seguinte será descrita a força magnética, e como ela age em cargas elétricas.

- 3) Se na experiência de Becquerel, ele tivesse colocado entre o filme revelador e o sal de urânio uma placa grossa (~3 mm) de chumbo, conseguiria ver alguma mancha? Por quê?
- 4) Por que a radiação γ não sofre desvio ao passar por uma região de campo elétrico?

Leitura Complementar

- *Como Becquerel Não Descobriu A Radioatividade.* Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10061/14903>.
- *Radioatividade e o Acidente De Goiânia.* Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7842/7213>

3. O ELÉTRON: A PRIMEIRA PARTÍCULA ELEMENTAR DESCOBERTA

A Física das Partículas Elementares no estudo da natureza da matéria e suas interações teve sua origem em 1897, com a descoberta da primeira partícula elementar: o **elétron**.

Anteriormente a 1897, vários estudos tinham sido feitos sobre o comportamento dos **raios catódicos**, na presença de forças elétricas e magnéticas. Os raios catódicos eram desviados pelo campo magnético como se fossem partículas eletrizadas negativamente. Todavia, esses raios, até então, não eram desviados por campos elétricos.

O físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940), em 1897, foi o primeiro a observar a deflexão do raio pelo campo elétrico. A razão dada por Thomson para a ausência do desvio observado por Hertz foi atribuída à baixa qualidade do vácuo no interior do tubo, usado nas experiências anteriores, pois os raios catódicos produzem vários íons no gás, que passam a atuar como uma blindagem para o campo elétrico.

O esquema do aparato utilizado é mostrado na figura 8. O tubo de vidro com gás à pressão reduzida contém o cátodo C e o ânodo A, o qual tem uma pequena fenda através da qual os raios catódicos podem passar. Raios catódicos acelerados de C, em direção a A, após passarem pela abertura em A, movem-se com velocidade constante e emergem do orifício em D, na forma de um pequeno feixe, que gera um pequeno ponto luminoso na extremidade direita do tubo de vidro. Quando uma diferença de potencial V é aplicada entre as placas paralelas F e G, sendo F positiva, o feixe aparece desviado para baixo pelo campo eletrostático (Por quê?)⁷.

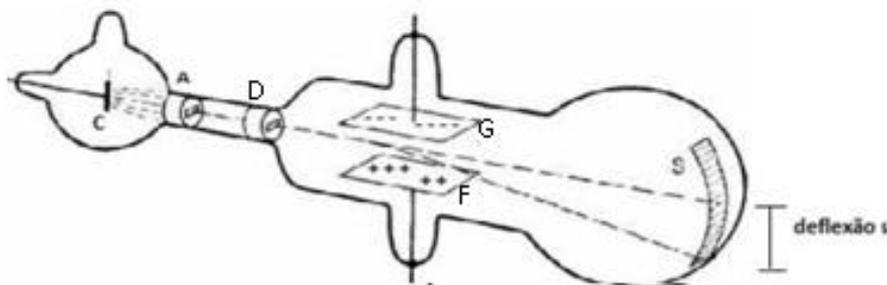


Figura 8. Esquema de um tubo de raios catódicos e o desvio do feixe de raios catódicos devido à atuação do campo elétrico \vec{E} .

Um par de bobinas (não mostradas na figura acima), cujos diâmetros são iguais ao comprimento das placas paralelas e colocadas uma em frente à outra do lado externo do tubo, produzem um campo magnético \vec{B} , perpendicular ao plano da figura. A intensidade deste campo magnético pode ser determinada pelas dimensões das bobinas e pelas correntes através delas. Se desligar o campo elétrico ($\vec{E}=0$) e se for aplicado um campo magnético (apontando da folha para o leitor), o foco de luz será desviado para cima (Por quê?)⁸.

⁷ Como o campo elétrico aponta de F para G, a força elétrica sobre os elétrons é oposta, apontando de G para F.

⁸ Basta lembrar a expressão do módulo de uma força magnética sobre uma carga q positiva, se movendo com velocidade v num campo magnético de módulo B : $F = q.v.B.\sin\theta$. O sentido da força é dado pela regra da mão direita (ou da mão esquerda, dependendo de sua convenção).

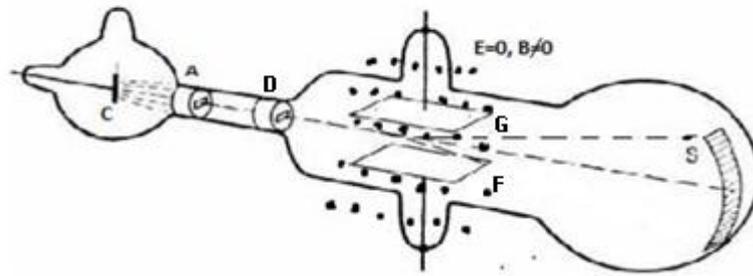


Figura 9: Desvio de um feixe de raios catódicos devido à atuação do campo magnético B perpendicular ao plano do papel e apontando para “fora”.

Por meio de duas observações, Thomson determinou a **razão carga-massa** da partícula. Na primeira, para um dado campo elétrico \vec{E} entre as placas, ajustando-se adequadamente o campo magnético \vec{B} de forma a anular a deflexão s , tornando a força elétrica sobre a carga igual e oposta à força magnética:

$$e.E = e.v.B \quad [\text{Eq. 1}]$$

onde “ e ” é a carga elétrica da partícula, que é desconhecida, e v é a velocidade destas). Desta relação obtemos a velocidade das partículas dos raios catódicos:

$$v = \frac{E}{B} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Tendo-se v , obtém-se a razão carga-massa (e/m) pela segunda observação feita por Thomson, ao determinar a deflexão s , causada apenas pelo campo elétrico, quando $\vec{B} = 0$. Esta deflexão resulta de uma aceleração uniforme igual a $e.E/m$ (Por quê?)⁹ atuando durante o tempo l/v , onde l é o comprimento das placas carregadas. Pelas leis do movimento uniformemente acelerado, obtém-se:

$$s = \frac{1}{2} \frac{e.E}{m} \left(\frac{l}{v} \right)^2 \quad [\text{Eq. 3}]$$

O valor da relação e/m é calculado desta equação onde todas as variáveis são fixadas pelo cientista. Na época, usando este método, Thomson encontrou:

$$\frac{e}{m} = 0,8 \cdot 10^{11} \text{ C/kg} \quad [\text{Eq. 4}]$$

A partir daqui, Thomson então conclui que os átomos não são indivisíveis, pois partículas negativamente carregadas podem ser arrancadas destes por meio de forças elétricas. Além disso, todos estes corpúsculos¹⁰ têm a mesma massa e carregam a mesma quantidade de carga elétrica, não importando de qual átomo foram arrancados!

⁹ Basta aplicar a segunda lei do movimento de Newton: $F = m.a$. Mas, a força é a eletrostática, $F = q.E$. Portanto, levando isto na expressão da segunda lei e calculando para a aceleração, temos $a = q.E/m$.

¹⁰ Estes corpúsculos já tinham o nome de elétron, empregado pelo físico irlandês George J. Stoney, desde 1891, na designação da unidade de carga encontrada nos experimentos de eletrólise.

Atividade

Assistir ao Vídeo *O elétron*, realizado pela USP. Disponível no endereço eletrônico:

<http://www.youtube.com/watch?v=tlx0C7eXwgc>.

Vídeo sobre a razão carga-massa do elétron, realizado na disciplina de Projetos de Ensino em Física Moderna do curso de Licenciatura em Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Disponível no endereço eletrônico:

<http://www.cienciacuriosa.com.br/experimento-da-determinacao-da-cargamassa-do-eletron/>.

Leitura Complementar

- *Conferência Nobel de Thomson sobre a Descoberta do Elétron. Tradução e notas.* Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19_299.pdf.

4. O EXPERIMENTO DE MILLIKAN

Após as observações de Thomson de que todos os elétrons têm o mesmo valor da relação carga-massa, ao assumirmos que todos os elétrons têm a mesma massa teríamos como consequência a mesma carga para todos os elétrons. A medida precisa da carga eletrônica só foi obtida em 1911, pelo físico americano Robert A. Millikan.



Figura 10: Aparelho utilizado por Millikan para a determinação da carga elétrica (Retirado de <http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/PHYSICA/Millikan/millikan.htm>.)

O experimento de Millikan consiste no estudo de gotas (de óleo, usadas por Millikan) microscópicas (gotículas) que são borrifadas entre duas placas de metal, horizontais, de um capacitor. As placas deste capacitor são conectadas a uma fonte de alta tensão para produzirem um campo elétrico, que atua sobre as gotículas carregadas. Para carregar estas gotas, Millikan utilizou raios X, que ionizam o ar ao redor delas, consequentemente, atraindo elétrons e ficando negativas.

Uma chave especial altera o sinal da polaridade de cada placa, e, portanto, o sentido da força elétrica sobre as gotículas, fazendo-as subir ou descer. Uma fonte de iluminação permite iluminar as gotículas, e o feixe luminoso é dirigido por um sistema de lentes, de modo a se concentrar na região do capacitor.

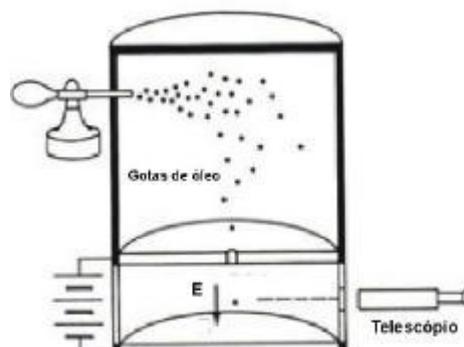


Figura 11: Esquema do experimento de Millikan (Extraído de Maxwell, 2008)

O procedimento do experimento consiste em medir a velocidade de subida (e de descida) de gotículas e o valor do campo elétrico entre as placas do capacitor. Analisando a situação

de equilíbrio¹¹ da gotícula sob a ação das forças a que está submetida, obtém-se a expressão abaixo (um tanto trabalhosa)¹² para o cálculo da carga elétrica q da gotícula.

$$q = \frac{9}{2} \pi \cdot d \sqrt{\frac{\eta^3}{g(\rho_{gota} - \rho_{ar})}} \frac{v_{sub} + v_{desc}}{U} \sqrt{v_{sub} - v_{desc}} \quad [\text{Eq. 5}]$$

onde: d é a distância entre as placas do capacitor; g é a aceleração da gravidade; η é o coeficiente de viscosidade (do óleo, neste caso); ρ é a densidade; U é a diferença de potencial elétrico entre as placas do capacitor.

Fazendo medidas de carga elétrica para milhares de gotículas, Millikan pode notar que a carga destas sempre era múltiplo inteiro de um valor: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$! Pode-se escrever a carga total q de um objeto, então, como:

$$q = n \cdot e \quad [\text{Eq. 6}]$$

onde n é um número inteiro ($n = 1, 2, 3, \dots$). Nada mais é que o número de elétrons.

Dizemos, então, que a carga elétrica é **quantizada**. Esta é a menor carga da natureza: a carga de um elétron!

Portanto, os físicos tiveram a chance de calcular a massa do elétron, pois conheciam o valor da razão carga-massa, da experiência de Thomson. Atualmente, a massa do elétron é $9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, uma massa extremamente pequena. Hoje, acredita-se que o elétron seja realmente elementar, isto é, não possui estrutura interna!

Atividade

Assistir ao Vídeo O experimento da gota de óleo de Millikan (minha autoria), realizado na disciplina de Projeto de Ensino em Física Moderna, do curso de Licenciatura da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Disponível no endereço eletrônico: <http://www.cienciacuriosa.com.br/experimento-de-millikan/>.

Leitura Complementar

- *A participação de Fletcher no experimento da gota de óleo de Millikan*. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a10.pdf>

¹¹ O movimento das gotículas é acelerado no início. Mas, aos poucos as forças se igualam, fazendo a gotícula subir ou descer em Movimento Retilíneo Uniforme (MRU).

¹² Para ver a demonstração desta equação, veja em: <http://www.plnciencia.com.br/routeiros/0238.PDF>.

5. A DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO

Depois da descoberta do elétron por Thomson, em 1897, um novo modelo de átomo chega à comunidade científica, substituindo o modelo de Dalton, que tratava o átomo como uma bolinha maciça e indivisível. O novo modelo teria então, as cargas negativas (os elétrons) distribuídas sobre uma esfera carregada positivamente, sendo o átomo ao todo, neutro. Este modelo ficou conhecido como o modelo do “pudim de passas” (ou ameixas) de Thomson. Porém, este modelo não tardaria para ser substituído.

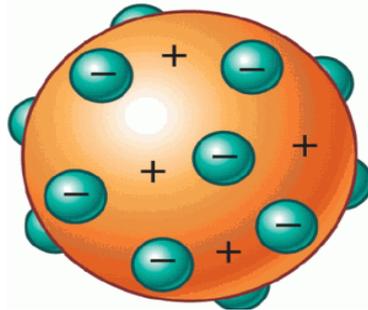


Figura 12: Representação do modelo atômico de Thomson . Extraído de:
<http://entendendoquimica.blogspot.com.br/2012/06/modelo-atomico-de-thomson-e-rutherford.html>.

Já por volta de 1910, o físico e químico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) analisava, com seus alunos, o fenômeno da passagem de **partículas α** (que possuem carga positiva) através da matéria. Ernest Marsden, um de seus alunos, relatou ter observado que vez por outra, partículas alfa sofriam desvios em ângulos consideráveis ao invés de passarem em linha reta, como era esperado.

Em 1911, Rutherford fez incidir um feixe de partículas α sobre uma folha fina de ouro. Ele utilizou um equipamento que está esquematizado na figura abaixo.

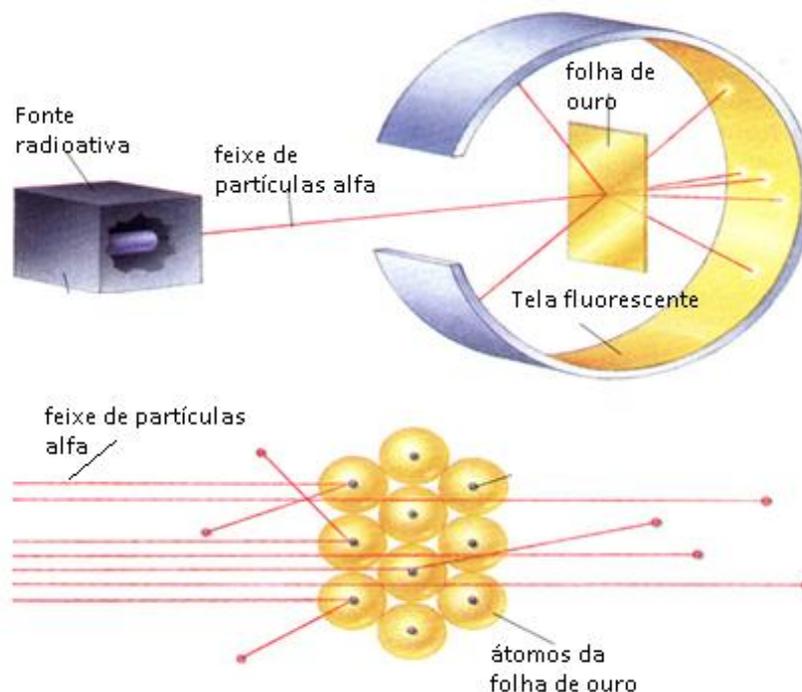


Figura 13: Representação do experimento de Rutherford (Extraído e traduzido de
http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s06.html).

Uma fonte natural de partículas α (como por exemplo, o polônio) é colocada dentro de uma caixa de chumbo no interior da qual é feito vácuo. Um colimador é empregado para obter-se um feixe bem definido de partículas que incidirão sobre uma lâmina fina de ouro. Uma tela móvel revestida de um material que cintila quando atingido por uma partícula espalhada a qualquer ângulo. As centelhas produzidas eram contadas com o emprego de um microscópio.

Rutherford observou que apenas algumas partículas eram defletidas de grandes ângulos, o que não deveria ocorrer caso a carga positiva do átomo estivesse distribuída o modelo de Thomson. Estas deflexões sugeriam que a carga positiva estava concentrada em uma região do átomo. Rutherford propôs, então, um **modelo nuclear** para o átomo.

O átomo, segundo este modelo, consiste de um núcleo carregado positivamente envolto por um sistema de elétrons mantidos juntos devido à força atrativa do núcleo, e, que, a grande parte da massa do átomo encontra-se concentrada no núcleo¹³.

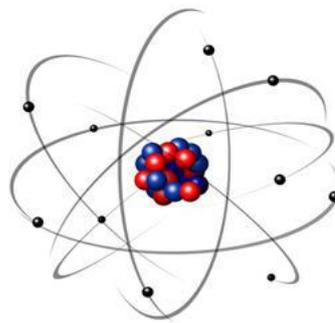


Figura 14: Ilustração do modelo de Rutherford (Extraído de: <http://www.alunosonline.com.br/quimica/o-atomo-rutherford.html>)

No entanto, o modelo de Rutherford apresentava inconsistências com a **teoria do eletromagnetismo clássico**. Como Rutherford havia descrito, os elétrons giravam em torno do núcleo positivo, e, segundo a teoria eletromagnética, cargas elétricas aceleradas¹⁴ devem irradiar, perdendo energia continuamente. Logo, os elétrons colapsariam em direção ao núcleo e essa radiação deveria ter um espectro de emissão contínuo, algo que não era observado. A Física teve que esperar até 1913 para resolver este problema¹⁵.

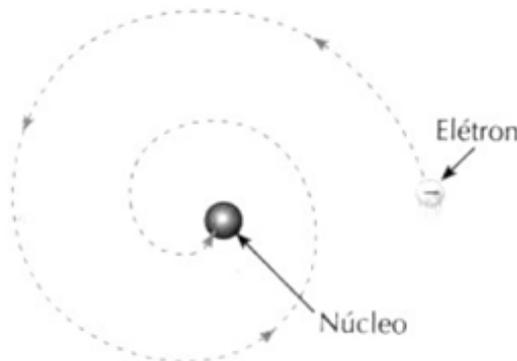


Figura 15: O colapso do elétron no núcleo. Extraído de Maxwell, 2008.

¹³ Didaticamente, pode-se fazer uma analogia deste modelo com o estádio do Maracanã. Se a circunferência média de um átomo fosse semelhante à do Maracanã, seu núcleo seria como uma ervilha e os elétrons seriam como grãos de poeira, situados na última arquibancada.

¹⁴ Pois estão em movimento circular.

¹⁵ A solução deste problema será discutida no tópico 8.

Em 1917, Rutherford realizou outro experimento histórico. Ele fez a primeira reação nuclear de **transmutação**, isto é, transformou um núcleo de um elemento em um núcleo de um elemento diferente. Continuando com as investigações com partículas α , bombardeando agora átomos de nitrogênio (N), observou cintilações¹⁶ que não pareciam ser de partículas alfa e nem de átomo de N. Porém, eram cintilações análogas com as produzidas em colisões com o hidrogênio (H).

Rutherford acreditava que as partículas α arrancavam um núcleo de H do núcleo de N, transmutando-o no oxigênio, segundo a reação

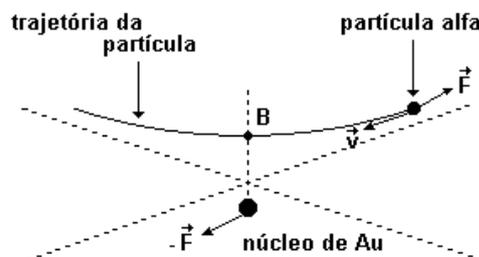


Concluiu que o núcleo não seria indivisível, mas que possuía uma estrutura. Propôs que o núcleo de N tinha núcleo de H, e, este núcleo de H foi chamado **próton** (do grego, o primeiro).

Por meio deste experimento, Rutherford desenvolveu um método experimental usado até hoje em Física Nuclear e em Física de Partículas: fazer um **feixe de partículas** colidir com um núcleo ou com uma partícula.

Questões de Vestibular

- 1) (Unb 97) A figura adiante ilustra uma das experiências mais fascinantes na evolução da teoria atômica da matéria, realizada por Rutherford, ao bombardear finas lâminas de ouro com partículas alfa. Cada partícula alfa nada mais é do que o núcleo de um átomo de hélio ionizado.



A partir do experimento descrito, julgue os seguintes itens e assinale a alternativa correta:

- (1) Por terem carga positiva, as partículas alfa sofrem desvios de trajetória devido à presença dos núcleos atômicos.
- (2) No ponto B da figura, a força entre a partícula e o núcleo é a menor possível, porque ela é proporcional à distância que os separa.
- (3) Rutherford teria obtido os mesmos resultados se, em vez de partículas alfa, tivesse usado nêutrons.
- (4) O experimento de Rutherford usando o estanho, em vez de ouro, seria inconclusivo, em virtude da enorme variação de cargas entre os diversos isótopos do elemento estanho.
- (5) A quantidade de movimento da partícula alfa incidente não varia.

- 2) (UFRGS) Considerando as seguintes afirmações sobre a estrutura nuclear do átomo.

¹⁶ Contador de cintilações é um detector no qual uma partícula carregada, quando o atravessa provoca a emissão de luz.

- I - O núcleo de um átomo qualquer tem sempre carga elétrica positiva.
II - A massa do núcleo de um átomo é aproximadamente igual à metade da massa de todo o átomo.
III - Na desintegração de um núcleo radioativo, ele altera sua estrutura para alcançar uma configuração mais estável.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I. b) Apenas II. c) Apenas I e III. d) Apenas II e III. e) I, II e III.

3) (PUC MG 98) Analise as afirmações a seguir e escolha a opção correta. O modelo planetário de Rutherford foi aceito apenas parcialmente porque:

- I- os elétrons deveriam perder energia orbitando em torno dos prótons.
II- os elétrons não têm massa suficiente para orbitarem em torno dos prótons.
III- os elétrons colidiriam entre si ao orbitarem em torno dos prótons.

- a) se apenas as afirmativas I e II forem falsas.
b) se apenas as afirmativas II e III forem falsas.
c) se apenas as afirmativas I e III forem falsas.
d) se todas forem verdadeiras.
e) se todas forem falsas.

Leitura Complementar

- *As partículas constituintes do átomo.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol02a29.pdf> .

6. AS RADIAÇÕES E A LEI DE PLANCK

A Física Clássica não consegue descrever corretamente os fenômenos em escala microscópica. Segundo a Mecânica Clássica, uma partícula em movimento circular tem aceleração centrípeta e, segundo a Teoria Eletromagnética Clássica, uma partícula carregada, em movimento acelerado, emite continuamente radiação eletromagnética. Portanto, segundo a Física Clássica, os átomos não são estáveis. Este é o problema do modelo de Rutherford, visto anteriormente.

Ora, a experiência cotidiana, de permanência dos objetos, indica o contrário. Esse exemplo já mostra a necessidade de outra teoria para a descrição dos fenômenos atômicos, fenômenos que ocorrem com partículas de massa muito pequena, que se movem em regiões muito pequenas do espaço.

A Física Quântica é a teoria fundamental que descreve os fenômenos em **escala microscópica**. Como essa teoria se baseia em resultados experimentais derivados de eventos que, em sua grande maioria, estão além do alcance dos sentidos humanos, não é de surpreender que ela contenha conceitos e ideias estranhas à experiência cotidiana.

A Mecânica Quântica nasceu em 1900, com um trabalho do Físico alemão **Max Planck** que procurava descrever o **espectro contínuo** de um **corpo negro**. Por espectro, entende-se um conjunto de radiações. O que é um corpo Negro?

Uma amostra metálica como, por exemplo, um prego, em qualquer temperatura, emite radiação eletromagnética de todos os comprimentos de onda. Por isso, dizemos que o seu espectro de emissão é contínuo. Espectros contínuos podem ser produzidos por sólidos, líquidos ou gases incandescentes, estes últimos mantidos a pressões muito altas. A temperatura da fonte pode ser determinada pela análise do espectro.

A figura abaixo traz espectros de alguns elementos químicos.



Figura 16: Alguns espectros de Emissão (Extraído de: http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aula_espec.htm)

Se a amostra está na temperatura ambiente, as radiações eletromagnéticas emitidas na faixa do visível transportam tão pouca energia que não sensibilizam os olhos humanos. Se a temperatura da amostra é elevada até aproximadamente 850 K, apenas as radiações eletromagnéticas emitidas na faixa que corresponde à cor vermelha têm energias suficientes para sensibilizar os olhos humanos e a amostra parece ter uma cor vermelha.

À medida que a temperatura da amostra aumenta, aumenta também a energia das radiações eletromagnéticas, e a amostra apresenta na sequência, depois da cor vermelha, as cores laranja, amarela, verde, azul e finalmente branca. Isto, quando estamos falando de radiações visíveis.

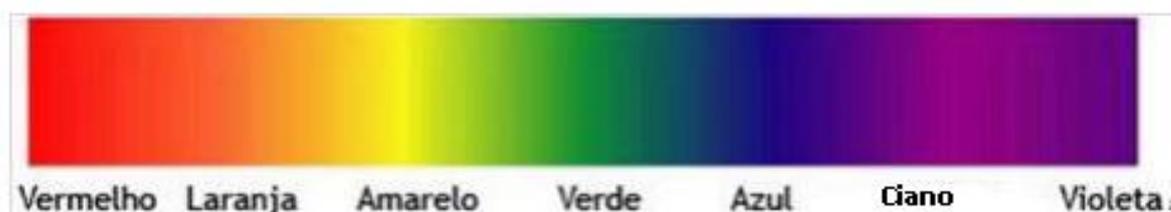


Figura 17: Região visível do espectro eletromagnético. A frequência cresce em direção ao violeta. (Extraído de: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=7378>)

Usualmente, o corpo negro é definido como o corpo que absorve toda radiação que nele incide. Como ele não reflete nada aparece, aos nossos olhos, sem cor alguma (cor negra), e daí vem o seu nome.

Assim como é um absorvedor perfeito, um corpo negro é também um emissor perfeito. O espectro da radiação da cavidade, isto é, o espectro de corpo negro, não depende da substância de que é feito o bloco no qual existe tal cavidade.

Apesar de não existir emissor ou absorvedor perfeito de radiação, existem muitos casos que podem ser aproximados por corpos negros. Uma lâmpada incandescente é formada por um filamento metálico e um bulbo de vidro. A passagem de corrente elétrica pelo filamento provoca um aumento na sua temperatura. A temperatura de operação de uma lâmpada de 100 W com filamento de tungstênio, por exemplo, é de cerca de 2800 K. Suponha que, nesta temperatura, o espectro da radiação emitida pelo filamento pode ser aproximado pelo espectro de um corpo negro, cuja representação se encontra na figura 18.

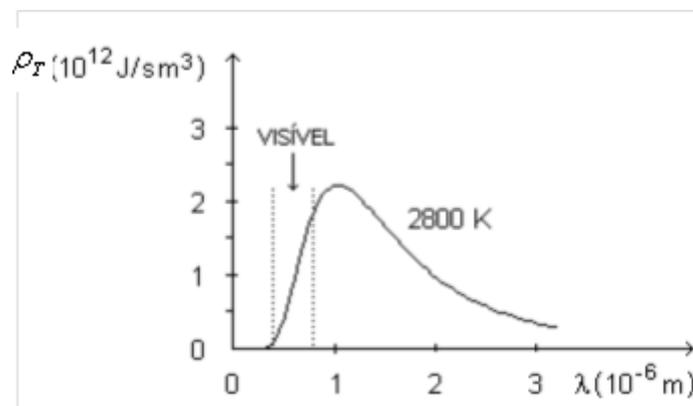


Figura 18: Gráfico representando a taxa de emissão (por tempo e por volume) de radiação em função do comprimento de onda, para uma lâmpada incandescente. Este gráfico também é chamado de Espectro. (Extraído de: http://sandcarioca.files.wordpress.com/2011/01/phys_img039.jpg)

A partir deste gráfico, percebe-se que, da faixa visível do espectro eletromagnético, as radiações que nos parecem verde, azul e violeta (que tem comprimentos de onda menores) transportam uma quantidade de energia bem maior do que as radiações que nos parecem amarela, laranja e vermelha. Isso faz com que o filamento de tungstênio apresente cor amarela nessa temperatura que estamos considerando.

Durante o século XIX havia o problema de como interpretar a energia contida na radiação emitida por um sólido incandescente, a chamada *radiação térmica*. A variação da energia irradiada com a temperatura de um objeto era uma lei bem estabelecida no final do século XIX, chamada de *lei de Stefan-Boltzmann*. Estabelece que a energia total emitida pela radiação, chamada *Radiância*, R , é proporcional à quarta potência da temperatura do objeto, ou seja,

$$R = \sigma \cdot T^4 \quad [E \quad q.7]$$

onde σ é a chamada constante de Stefan-Boltzmann, e vale $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ($\text{W} = \text{watts}$, $\text{K} = \text{Kelvin}$). Esta lei, contudo não diz como a energia está distribuída entre os vários comprimentos de onda (ou frequências) da radiação emitida. No início do século XX, Rayleigh e Jeans encontraram a seguinte equação, usando a teoria eletromagnética clássica:

$$\rho_T(f) = \frac{8\pi f^2 k_B T}{c^3} \quad [\text{Eq. 8}]$$

onde $\rho_T(f)$ mede a quantidade de energia irradiada em uma dada frequência f , quando o corpo negro se encontra a uma dada temperatura fixa. k_B é a constante de Boltzmann e c é a velocidade da luz no vácuo.

Esta equação mostra que, para uma dada temperatura, a energia aumenta com o quadrado da frequência. Isto significa que a energia contida em uma dada frequência será 4 vezes maior do que aquela contida em outra com a metade de seu valor. Como a energia total é igual a soma sobre todas as frequências de zero até infinito¹⁷, esta fórmula prevê que a energia irradiada total será infinita. Quando comparada com dados experimentais (veja a figura 18), houve uma discordância espetacular com a previsão teórica. Este fato ficou conhecido como **catástrofe do ultravioleta!**

Em 1900, Planck mostrou que, para ajustar apropriadamente os dados experimentais, a energia deveria ser **quantizada**. Isto é, ele chegou a uma expressão matemática, que hoje é conhecido com Lei da Radiação de Planck¹⁸, supondo que a energia de cada oscilador harmônico elementar¹⁹ do corpo negro não poderia ter qualquer valor, mas sim um valor que fosse múltiplo inteiro da respectiva frequência de oscilação f , multiplicada por uma constante universal h (hoje conhecida como **constante de planck**):

$$E = n.h.f, \text{ com } n=1,2,3,\dots \quad [\text{Eq. 9}]$$

O valor da constante de Planck atualmente aceito é $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Em outras palavras, Planck mostrou que a energia dos osciladores deveria ser quantizada. Desse modo, um oscilador, vibrando com frequência f , poderia absorver ou emitir radiação eletromagnética desde que a energia dessa radiação eletromagnética fosse algum múltiplo inteiro de **$h.f$** ! Este múltiplo inteiro é chamado "*quantum*" de energia.

No modelo de Planck, a quantização da energia era atribuída apenas aos irradiadores elementares, isto é, os átomos de que era feito o bloco no qual a cavidade estava inserida, e não à radiação eletromagnética que preenchia a cavidade. Em 1905, Einstein estendeu o conceito de quantização à própria radiação eletromagnética, no estudo do efeito fotoelétrico!

Questões

1. Das radiações visíveis, qual aquela que transporta a maior quantidade de energia?

Esta faixa de frequência é uma idealização, pois as frequências de ondas eletromagnéticas são sempre maiores do que zero e menores do que infinito. No entanto, do ponto de vista matemático, é conveniente considerarmos a situação idealizada.

¹⁸ Omitimos esta expressão, pois foge do escopo deste texto. Para um estudo detalhado desta expressão, veja na leitura complementar, o artigo: A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck.

¹⁹ Em 1900 a teoria atômica ainda não estava consolidada, isto é, ainda havia dúvidas sobre a existência dos átomos.

2. O que é um espectroscópio? Construa um a partir de materiais simples (Veja o vídeo Física Moderna, da série Com Ciência, exibido na TV Escola. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.youtube.com/watch?v=qZP03eaLoWk>).
3. Como os astrônomos podem determinar a temperatura e a composição química de uma estrela?

Leitura Complementar

- *A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck*. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf .

7. O EFEITO FOTOELÉTRICO

Em 1887, o físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894) observou que a intensidade da descarga elétrica entre dois eletrodos aumentava quando fazia incidir, sobre eles, radiação ultravioleta.

O efeito fotoelétrico é a ejeção de elétrons de um material, geralmente metálico, por efeito da incidência de radiação eletromagnética. As características do efeito fotoelétrico não podem ser explicadas se a radiação eletromagnética for considerada como sendo uma **onda**, mas sim como um conjunto de partículas, os **fótons** (no sentido de energia localizada em “pacotinhos”).

A figura 19 mostra duas placas metálicas nas quais existe uma diferença de potencial variável V , mantida pela pilha. Sem a incidência de radiação eletromagnética, não existe corrente elétrica no circuito. Com a incidência de radiação eletromagnética na placa da esquerda, mantida num potencial menor do que a outra placa surge uma corrente elétrica que pode ser medida por um galvanômetro. Mesmo que a placa da direita seja mantida num potencial reverso (placa da direita negativa) maior do que a outra, ainda assim pode aparecer corrente elétrica no circuito. A corrente elétrica aparece por causa da radiação eletromagnética, que arranca elétrons da superfície da placa da esquerda.

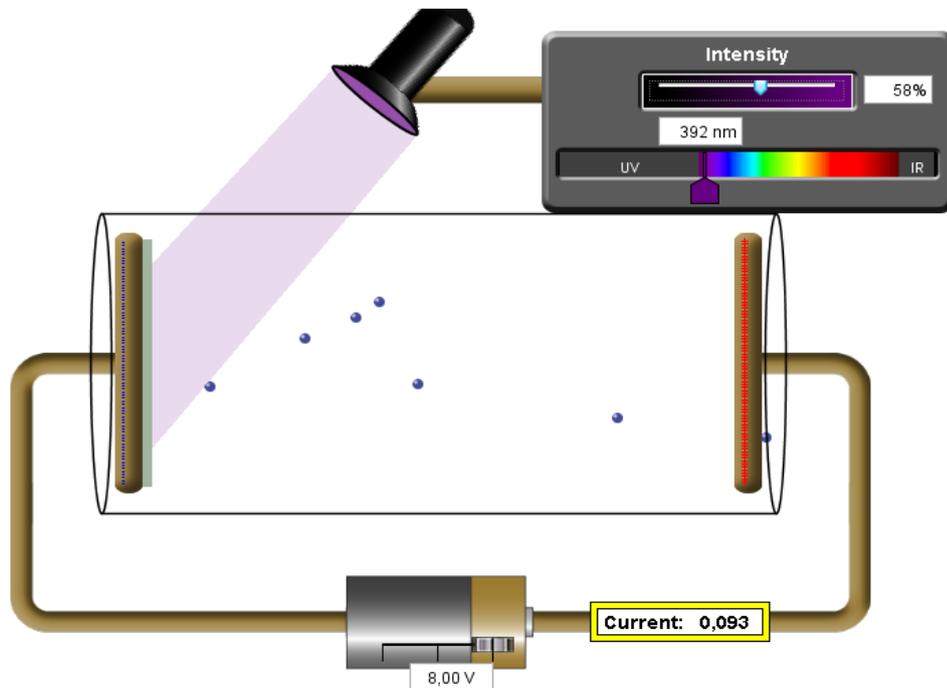


Figura 19: Uma representação do efeito fotoelétrico (Retirado de: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>)

Os resultados experimentais obtidos eram incompatíveis com a teoria eletromagnética clássica. Para a física Clássica, o efeito fotoelétrico deveria ocorrer para qualquer frequência da luz, desde que esta fosse intensa o bastante para dar a energia necessária à ejeção dos elétrons. Entretanto, o efeito era facilmente observado usando-se luz violeta ou ultravioleta, mas não quando se usava luz vermelha. Ou seja, havia uma “*frequência de corte*” para a luz incidente, abaixo da qual o efeito deixa de ocorrer, *independentemente da intensidade do campo elétrico*.

Também, a energia cinética dos elétrons deveria crescer ao se aumentar a intensidade do feixe luminoso. Porém, a energia máxima dos elétrons ejetados não era afetada pela intensidade da luz. Entretanto, havia indicações de que a energia dos elétrons realmente dependia da frequência da luz.

Outro problema era que, de acordo com a Física Clássica, deveria haver um tempo de atraso entre o momento em que a luz é ligada e a ejeção dos primeiros elétrons. No entanto, isto não era afetado pela intensidade ou pela frequência da luz.

Em 1905, Einstein interpretou os resultados experimentais do efeito fotoelétrico através de um **modelo corpuscular** para a radiação eletromagnética, modelo que, como vimos, foi formulado por Planck. Eis um dos primeiros sucessos da quantização da radiação.

Podemos sumarizar a explicação de Einstein nas seguintes observações:

1. Superfícies metálicas emitem fotoelétrons quando iluminados por um feixe de luz com frequência acima de um valor mínimo f_0 , que depende da natureza do metal;
2. A quantidade de elétrons é proporcional à intensidade da luz, quando a frequência for mantida constante;
3. A energia cinética máxima atingida pelos elétrons é independente da intensidade da luz, mas sim proporcional à frequência f ;
4. O efeito fotoelétrico é instantâneo, sem retardo na emissão dos elétrons.

O efeito fotoelétrico é causado pela absorção de toda a energia carregada pelo fóton ($E=h.f$) por parte do átomo (e não do elétron!) e a emissão do elétron deste átomo (que é consequência!). O elétron “paga um preço” ϕ em energia (chamada **função trabalho**, que é o trabalho necessário para o elétron vencer a barreira de potencial coulombiano do metal). A diferença entre estas energias é convertida em energia cinética K :

$$K = h.f - \phi \quad [\text{Eq.10}]$$

sendo a constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ou $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$

Nota

É muito comum, em *Física atômica*, usarmos como unidade de energia o **elétron-volt (eV)**. 1 eV é a energia ganha por um elétron ou por um próton, quando passa por dois pontos cuja diferença de potencial é de 1 volt. Frequentemente se utilizam múltiplos de eV:

10^3 eV	1 quilo elétron volt	1 keV
10^6 eV	1 mega elétron volt	1 MeV
10^9 eV	1 giga elétron volt	1 GeV
10^{12} eV	1 tera elétron volt	1 TeV

Por exemplo, um acelerador de prótons de 1 GeV acelera prótons a uma energia igual à que eles teriam se fossem colocados entre duas placas paralelas com diferença de potencial de 10^9 volts. As relações com as unidades usuais são:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joules} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ J} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ joules}$$

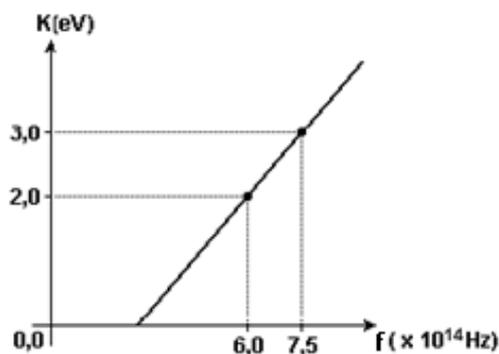
Portanto, a teoria quântica da radiação eletromagnética explica muito bem as características do efeito fotoelétrico. A radiação eletromagnética, que se propaga como uma **onda**, no efeito fotoelétrico, manifesta propriedades inerentes a **partículas**.

Atividade

Utilizar o Applet que simula o efeito fotoelétrico disponível no site:
<http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>

Problemas

- 1) Fótons com energia $E = 6,2$ eV incidem numa placa de tungstênio. Calcule o módulo da velocidade máxima dos elétrons arrancados sabendo que, para o tungstênio, a função trabalho vale $\phi = 4,5$ eV.
- 2) A função trabalho de um dado metal é 2,5 eV.
 - a) Verifique se ocorre efeito fotoelétrico quando sobre este metal incide luz de comprimento de onda $\lambda = 6 \cdot 10^{-9}$ m. Use: constante de Planck: $h = 4,15 \cdot 10^{-15}$ eV.s e velocidade da luz no vácuo: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.
 - b) Qual a frequência mais baixa da luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?
- 3) O gráfico mostrado a seguir resultou de uma experiência na qual a superfície metálica de uma célula fotoelétrica foi iluminada, separadamente, por duas fontes de luz monocromática distintas, de frequências $f_1 = 6,0 \times 10^{14}$ Hz e $f_2 = 7,5 \times 10^{14}$ Hz, respectivamente. As energias cinéticas máximas, $K_1 = 2,0$ eV e $K_2 = 3,0$ eV, dos elétrons arrancados do metal, pelos dois tipos de luz, estão indicadas no gráfico. A reta que passa pelos dois pontos experimentais do gráfico obedece à relação estabelecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, ou seja, $K = hf - \phi$, onde h é a constante de Planck e ϕ é a chamada função trabalho, característica de cada material. Baseando-se na relação de Einstein, o valor calculado de ϕ , em elétron-volts, é:



a)1,3

- b)1,6
- c)1,8
- d)2,0
- e) 2,3

Leitura Complementar

- *Albert Einstein e a Física Quântica.* Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6382/13263>.
- *Física Moderna no Ensino Médio: Um experimento para Abordar o Efeito Fotoelétrico.* Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2012v29n2p313/22920> .

8. O MODELO DE BOHR

Como vimos, o modelo atômico de Rutherford é incompatível com a teoria eletromagnética clássica, pois os elétrons girando em torno do núcleo irradiariam e paulatinamente perderiam energia, colapsando no núcleo. Mas havia outros fatos que ainda não eram compreendidos. Muitas décadas antes de Planck ter deduzido a fórmula para a radiação de corpo negro, sabia-se que os átomos possuem **espectros** de emissão de radiação discretos.

NOTA

Quando um gás é excitado, ele emite radiação com frequência específica e o que se vê são linhas coloridas numa tela. Este fenômeno é conhecido como espectro de emissão. O inverso também ocorre e é chamado espectro de absorção – quando a luz atravessa um gás- o espectro é composto por linhas escuras (linhas faltantes no espectro contínuo).

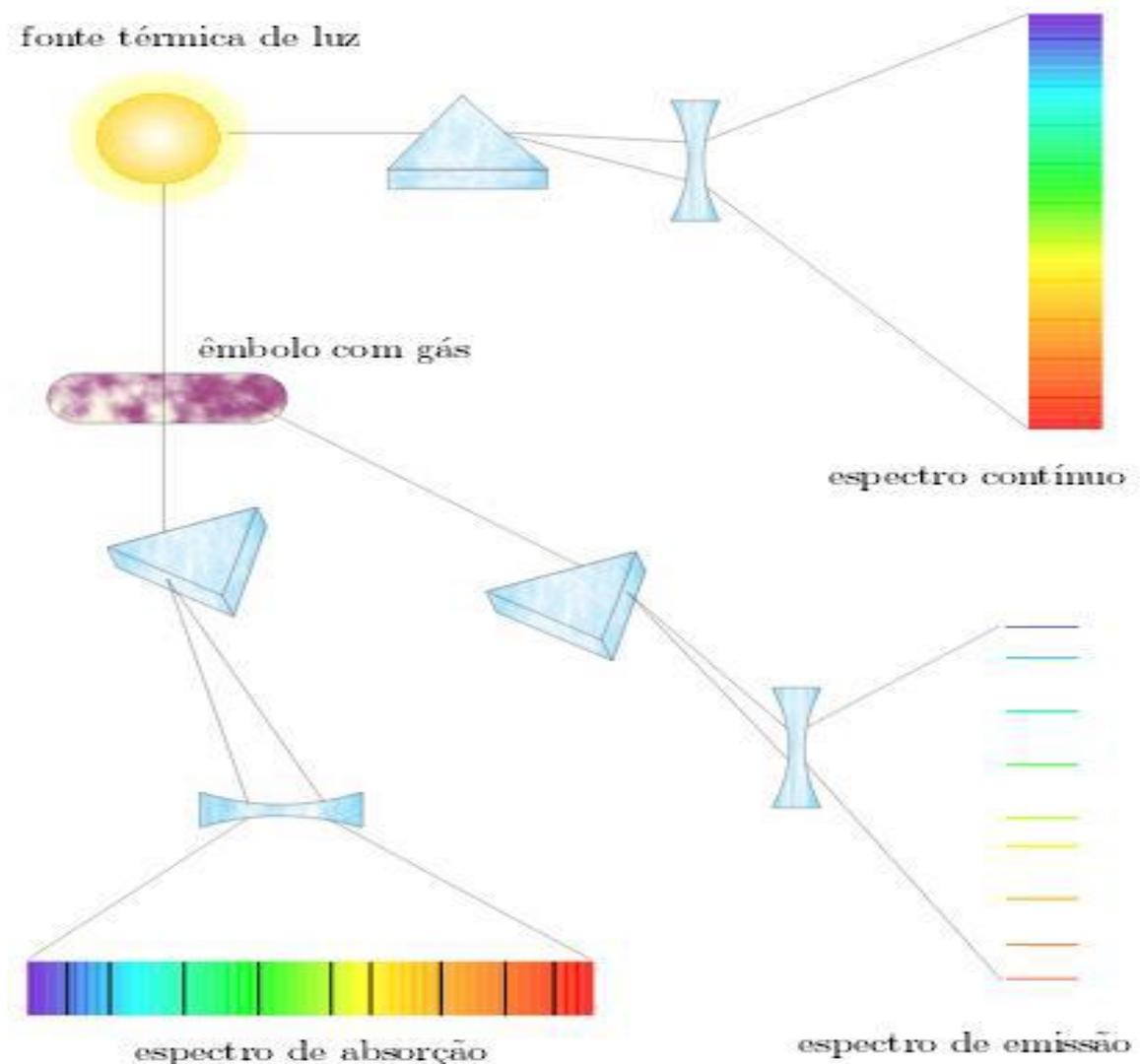


Figura 20: Diferentes espectros de uma fonte de luz e de um gás aquecido. Extraído de: www.fisica.ufmg.br/~carolina/files.

O espectro da fonte é contínuo, porém quando a luz dessa fonte atravessa um gás, observam-se linhas escuras no espectro. Este mesmo gás quando aquecido gera um espectro discreto. Observe que as linhas no espectro de emissão são as que faltam no espectro de absorção.

Repare que o espectro serve como uma “impressão digital” do elemento. Por que cada elemento possui um espectro distinto? Por que surgem as linhas de absorção? Para estas e outras questões não havia respostas.

Em 1913 o físico dinamarquês Niels Bohr tentou aplicar as idéias de quantização de Planck e Einstein ao modelo nuclear de Rutherford. Para tanto, Bohr postulou o que se segue:

1. O movimento do elétron ao redor do núcleo atômico é descrito pelas leis de Newton;
2. O elétron pode ocupar apenas certas órbitas especiais ao redor do núcleo. Estas órbitas especiais são determinadas impondo, como condição, que o momento angular²⁰ do elétron ao redor do núcleo (**momento angular orbital**) só pode ter valores que são múltiplos inteiros da constante de Planck dividida por 2π . Matematicamente:

$$L = n.h / 2\pi \text{ onde } n=1,2,3,\dots \quad [\text{Eq. 11}]$$

3. Essas órbitas especiais são órbitas estacionárias. Isto significa que, quando o elétron ocupa uma delas, ele não emite radiação eletromagnética. Os estados atômicos correspondentes são **estados estacionários**.
4. O átomo pode passar de um estado estacionário para outro por **emissão** ou **absorção** de radiação eletromagnética (figura 21) com frequência dada por:

$$f = \Delta E / h \quad [\text{Eq. 12}]$$

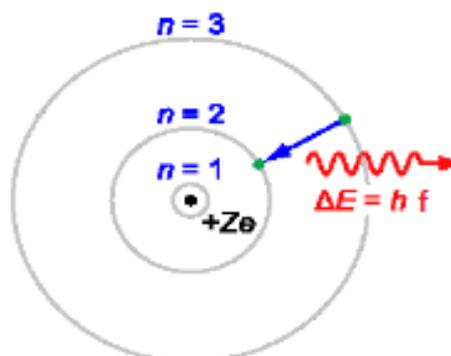


Figura 21: Ilustração do átomo de Bohr (Extraído de: http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_at%C3%B3mico_de_Bohr)

²⁰ Quantidade de movimento análoga à quantidade de movimento na translação (momento linear). O módulo do momento angular \vec{L} é calculado por: $L = m.v.r.\text{sen}\theta$, onde θ é o ângulo entre os vetores raio \vec{r} e velocidade \vec{v} .

A primeira suposição não apresenta qualquer problema de aceitação e estipula, apesar das outras características estranhas do modelo, um comportamento newtoniano clássico usual para o elétron nas órbitas estacionárias.

A segunda suposição não tem qualquer justificativa a não ser o sucesso do modelo.

A terceira suposição aparece para evitar o dilema da emissão de radiação pelo elétron no seu movimento acelerado ao redor do núcleo.

A quarta suposição é a mais estranha à Física Clássica porque não especifica o mecanismo de passagem do elétron de uma órbita estacionária para outra.

O modelo de Bohr descreve muito bem apenas o átomo de hidrogênio e íons hidrogenóides, mas falha ao tentar explicar os outros átomos (com 2 elétrons ou mais)²¹. No modelo atômico de Bohr, surge a noção de **nível quântico** de energia, representado por n , e a ideia de **salto quântico** (transição entre estes níveis quânticos).

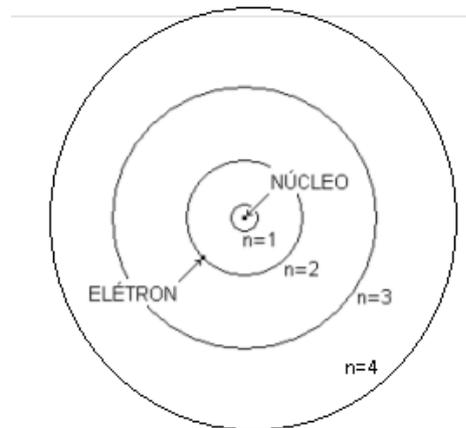


Figura 22: Seis órbitas (níveis de energia!) mais próximas de um átomo de um elétron segundo o modelo de Bohr (Extraído: <http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna08.pdf>)

A energia do elétron no primeiro nível ($n=1$), o **estado fundamental**, é $E_1 = 13,6$ eV, de modo que as energias dos demais níveis é dada por²²:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}, \quad [\text{Eq. 13}]$$

e quando ocorre transição entre estes estados quânticos (saltos quânticos), há absorção ou emissão de fótons (ou *quantum* de radiação). Note que a energia deste *quantum* corresponde à diferença de energia entre os níveis nos quais a transição ocorreu.

O **diagrama de níveis** de energia é uma ajuda importante para a compreensão dos processos de emissão e de absorção de energia pelo átomo. Para o átomo de hidrogênio, o diagrama de níveis de energia é mostrado na figura 23.

²¹ A comprovação experimental do modelo de Bohr só veio em 1914, com o experimento de Frank-Hertz.

²² Para ver a demonstração desta equação, veja o artigo "Os 100 anos do átomo de Bohr", da leitura complementar.

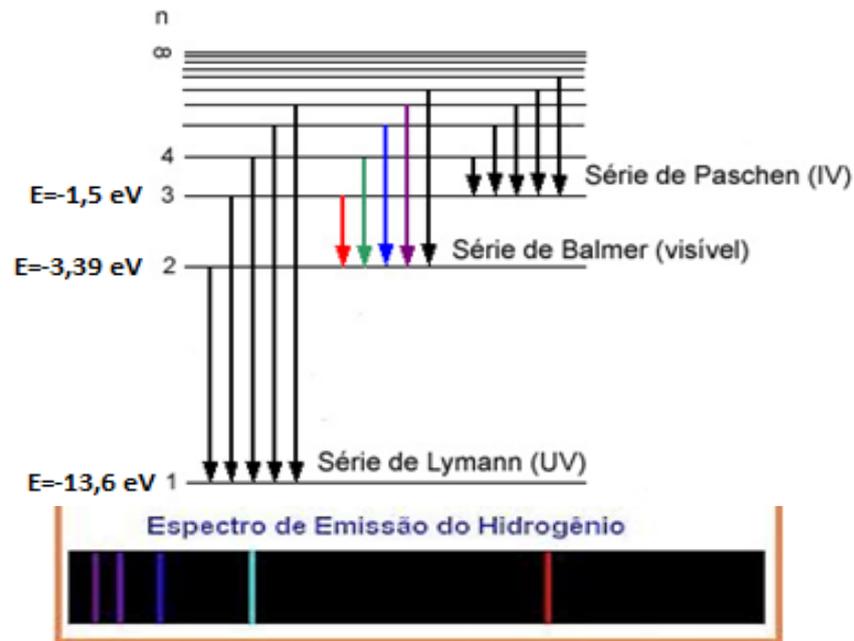


Figura 23: Ilustração dos níveis de energia, para o átomo de Hidrogênio, e do seu espectro da série de Balmer.

A linha (ou raia) vermelha do espectro da figura acima é chamada linha H- α . Ela surge da transição do nível 3 para o nível 2. Esta transição, por ter menor energia, irradia fótons de menor energia, e, conseqüentemente, menor frequência, de acordo com a lei de Planck ($E = h \cdot f$). Portanto, estes fótons visíveis tem maior comprimento de onda, exatamente, igual ao comprimento de onda do vermelho.

Atividade

Assistir ao vídeo Lâmpadas espectrais e decomposição da Luz. Disponível no endereço: <http://www.cienciacuriosa.com.br/>.

Questões de Vestibular

- 1) (UFRGS) Dentre as afirmações apresentadas, qual é correta?
 - a) A energia de um elétron ligado ao átomo não pode assumir um valor qualquer.
 - b) A carga do elétron depende da órbita em que ele se encontra.
 - c) As órbitas ocupadas pelos elétrons são as mesmas em todos os átomos.
 - d) O núcleo de um átomo é composto de prótons, nêutrons e elétrons.
 - e) Em todos os átomos o número de elétrons é igual à soma dos prótons e dos nêutrons

- 2) (UFMG 99) No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, a energia do átomo:
 - a) pode ter qualquer valor.
 - b) tem um único valor fixo.
 - c) independe da órbita do elétron.
 - d) tem alguns valores possíveis.

Leitura Complementar

- *Os 100 anos do átomo de Bohr.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/354301.pdf>
- *Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/342504.pdf>.

9. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Einstein deu uma interpretação corpuscular para as ondas eletromagnéticas (luz). Em 1924, o físico francês Louis De Broglie (1892-1987) cogitou a possibilidade de que os elétrons poderiam apresentar **propriedades ondulatórias** além das suas propriedades corpusculares já bem conhecidas. Esta hipótese se justificava por um a questão de simetria, já que a radiação eletromagnética apresentava, em certos fenômenos, propriedades ondulatórias e, em outros fenômenos, propriedades corpusculares, como vimos no tópico 7. Ainda mais: ele postulou o comprimento de onda associado à partícula.

A proposta de De Broglie para a dualidade onda-partícula para a matéria se estende a toda matéria como prótons, nêutrons, átomos, moléculas e não somente aos elétrons. Eis o problema: qual o comprimento de onda associado a uma partícula para que esta possa ser descrita como onda? Respondendo a esta pergunta, De Broglie sugeriu a relação:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad [\text{Eq.14}]$$

Aqui, h é a constante de Planck, $p = mv$ é o produto da massa pela velocidade da partícula (o momento linear da partícula) e λ é o chamado comprimento de onda de De Broglie.

Em resumo, o Princípio de De Broglie atribui um comprimento de onda de matéria para qualquer massa m com velocidade v . Mas, se a matéria também tem propriedades ondulatórias, porque não as observamos em nosso dia-a-dia (como interferência e difração)?

O cálculo com a relação de De Broglie mostra que uma bola comum (com 0,145 kg) se movendo a 96 km/h (27 m/s) tem comprimento de onda da ordem de 10^{-34} m, valor tão pequeno que não percebemos fenômenos ondulatórios associados. Por outro lado, elétrons se movendo com velocidades fáceis de medir experimentalmente, tem comprimentos de onda da ordem de algumas dezenas de picômetros (10^{-12} m). Portanto, só é possível observar comportamento ondulatório para partículas com massas muito pequenas, como prótons e elétrons, ou, movendo-se a velocidades relativamente altas.

Já em 1913, o físico australiano Willian Bragg teve a ideia de incidir raios X em um cristal e determinar sua estrutura, através do **padrão de difração** gerado. A observação, a partir da interferência dos raios X, é uma evidência direta da estrutura cristalina dos materiais. A ciência da cristalografia já conhecia, a algum tempo, estas estruturas.

Numa rede cristalina, representada na figura 24, os átomos estão regularmente espaçados a distâncias da ordem de 10^{-10} m. Esses átomos podem servir de centros espalhadores para raios X e raios γ , que são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda da mesma ordem de grandeza dessas distâncias.

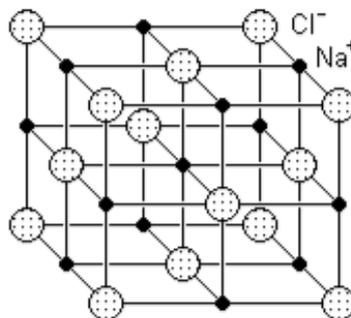


Figura 24: Estrutura cristalina do NaCl (Extraído de: <http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna11.pdf>)

Se a hipótese de De Broglie fosse verdadeira, experimentos de **interferência e difração** poderiam ser realizados com elétrons. Em 1927, Davisson e Germer mostraram experimentalmente que a intensidade de um feixe de elétrons espalhados apresentava o padrão de máximos e mínimos típico do fenômeno da difração.

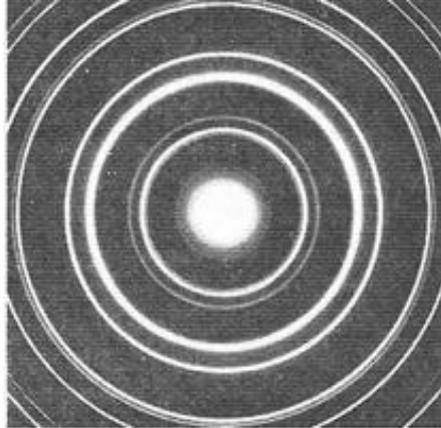


Figura 25: Difração de Raios X em cristais de óxido de zircônio. (Extraído de: Eisberg e Resnick, 1994)

A partir da constatação da difração dos elétrons e, mais tarde, de prótons e nêutrons (apesar de serem bem mais massivos do que o elétron e por isso mais difícil a observação do comportamento ondulatório), concluiu-se que todas as partículas de matéria têm **comportamento dual**.²³

Bohr generalizou o conceito de dualidade através do **Princípio da Correspondência**:

"Os modelos corpuscular e ondulatório são complementares. Se uma medida prova o caráter ondulatório da radiação ou da matéria, então é impossível provar o caráter corpuscular na mesma medida. A compreensão da radiação e da matéria só é completa se levamos em consideração experimentos que provém tanto o caráter ondulatório quanto o caráter corpuscular."

A dualidade impulsionou o desenvolvimento da Física Quântica já que a Mecânica determinística de Newton e o Eletromagnetismo de Maxwell não conseguiam mais explicar o comportamento das entidades físicas microscópicas.

Atividade

Assistir ao vídeo realizado na UTFPR sobre a Difração de Elétrons (minha autoria), realizado na disciplina de Projeto de Ensino em Física Moderna, do curso de Licenciatura da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Disponível no endereço eletrônico: <http://www.cienciacuriosa.com.br/experimento-da-difracao-de-eletrons/> .

Questões

- 1) Uma arma dispara um projétil de 20 g a uma velocidade de 500 m/s. Determine o comprimento de onda de De Broglie associado ao projétil e explique por que o caráter ondulatório não é aparente nessa situação.

²³ No tópico 10, isso será mais bem discutido.

- 2) Um elétron em movimento manifesta uma onda de matéria com comprimento de onda de De Broglie igual a 10^{-10} m . Sendo a massa do elétron igual a $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, sua carga é $1,6 \cdot 10^{-19}$ C e a constante de Planck igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s, qual a d.d.p necessária para acelera-lo do repouso até a velocidade necessária para o efeito? Despreze os efeitos relativísticos.
- 3) Um microscópio eletrônico pode resolver estruturas de pelo menos 10 vezes o comprimento de onda de De Broglie do elétron. Qual é a menor estrutura que pode ser resolvida num microscópio eletrônico, usando elétrons com energia cinética de 10000 eV ?

10. O PRINCÍPIO DA INCERTEZA DE HEISENBERG²⁴

10.1 Introdução

Assim como o modelo de Rutherford, o modelo de Bohr também apresenta muitos problemas. Além das limitações já discutidas, também há outra: a de que o conceito de órbita não pode ser mantido numa descrição quântica do átomo!

O que se pode calcular é apenas a **probabilidade** de encontrar o elétron numa dada região do espaço nas vizinhanças de um núcleo atômico. Na Física Clássica está implícita a ideia de que qualquer grandeza de movimento de uma partícula ou de um corpo extenso, como posição, velocidade ou momento, pode ser medida e descrita de modo exato. No mundo microscópico isto não acontece.

Para entender melhor isto, vamos analisar algumas experiências.

10.2 Uma experiência com Ondas

Vamos considerar uma experiência com ondas de água. O experimento é ilustrado na figura 26.

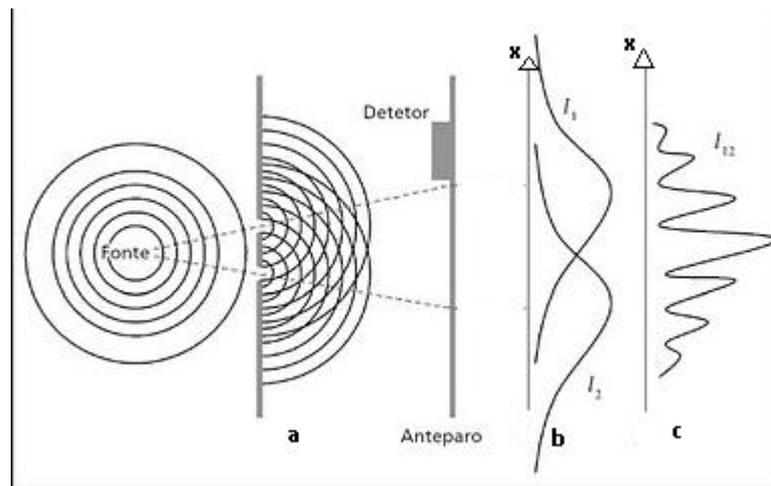


Figura 26: Ilustração do experimento com interferência com ondas de água. Adaptada de: <http://johnmyself.blogspot.com.br/2010/08/funcao-de-onda.html>.

Temos um tanque raso com água. Um pequeno objeto chamado de “fonte de ondas” é balançado para cima e para baixo por um motor e faz ondas circulares. À direita, há dois orifícios e mais adiante existe um anteparo, que para manter as coisas ímples, é um “absorvedor”, de forma que ao há reflexão das ondas que chegam nele.²⁵ Na frente do “absorvedor” colocamos o detector que pode ser movimentado para cima ou para baixo, na direção x . Este dispositivo mede a “intensidade” do movimento ondulatório. Você pode imaginar um aparelho que meça a altura do movimento ondulatório, mas cuja escala seja calibrada proporcional ao **quadrado** da altura real, de forma que a leitura do aparelho é a intensidade da onda. O detector lê então em proporção à **energia** sendo transportada pela onda – ou seja, a taxa com que a energia é levada ao detector.

Com esse aparato de ondas, a primeira coisa percebida é que a intensidade pode ter qualquer valor. Se a fonte se move pouco, por exemplo, então existe apenas um pouco de

²⁴ Texto adaptado de Feynman (2008).

²⁵ Isto pode ser feito construindo um tanque onde o nível da água gradualmente diminui.

movimento ondulatório no detector. Se medirmos a intensidade da onda para diversos valores de x (mantendo a fonte operando sempre da mesma maneira), obtemos a curva interessante chamada de I_{12} , mostrada na parte © da figura 26.

Como já é conhecido da Ondulatória, a onda original é difratada nos dois orifícios e novas ondas circulares surgem de cada orifício. Estas novas ondas interferem construtivamente e destrutivamente, surgindo o padrão de interferência.²⁶ Se num momento, cobrimos um orifício e medimos a distribuição de intensidade no absorvedor, encontramos a curva de intensidade simples mostrada na parte (b) da figura 26. I_1 é a intensidade da onda proveniente do orifício 1 (quando 2 está fechado), e I_2 é a intensidade da onda proveniente do orifício 2 (quando 1 está fechado).

A intensidade I_{12} observada quando ambos os orifícios estão abertos certamente não é a soma de I_1 e I_2 . Dizemos que há interferência das duas ondas. Em alguns pontos, as ondas estão em fase e elas se somam para dar uma amplitude maior, e, portanto, uma grande intensidade. Dizemos que as duas ondas interferem construtivamente. Existirão interferências construtivas sempre que a distância entre o detector e um orifício for um número inteiro de comprimentos de onda da onda!

Nos lugares aonde as ondas chegam ao detector com uma diferença de fase igual a π radianos (ou 180°), haverá interferência destrutiva, pois as ondas estão fora de fase. Dizemos que as ondas interferem destrutivamente. Existirão interferências destrutivas sempre que a distância entre o detector e um orifício for um número semi-inteiro de comprimentos de onda.

A intensidade é proporcional ao quadrado do módulo da amplitude destas ondas, $I \propto |h|^2$.²⁷ Quando os dois orifícios estão abertos, a intensidade da onda resultante é dada pela expressão abaixo:

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad [\text{Eq. 15}]$$

O último termo desta equação é o “termo de interferência”. δ é a diferença de fase entre as ondas.

10.3 Uma experiência com elétrons

Agora vamos imaginar uma experiência semelhante, mas que seja feita com elétrons. Ela é mostrada na figura 27.

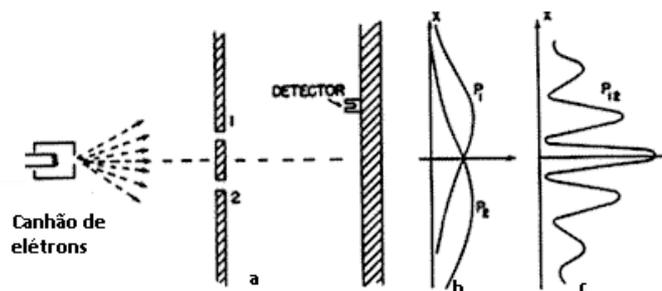


Figura 27: Ilustração do experimento de interferência com elétrons. Adaptada de: <http://johnmyself.blogspot.com.br/2010/08/funcao-de-onda.html>.

²⁶ Ou figura de difração.

²⁷ As duas barras paralelas representa o módulo. h é a altura da onda (neste caso, de ondas na água).

Um canhão de elétrons, que consiste de um filamento aquecido de tungstênio, é enclausurado numa caixa de metal com um orifício. Se o fio tiver uma voltagem negativa em relação à caixa, os elétrons emitidos pelo filamento serão acelerados na direção da parede e alguns passarão pelo orifício. Todos os elétrons emitidos pelo filamento terão a mesma energia. Na frente do canhão temos, mais uma vez, uma parede com dois orifícios, e após, um anteparo. Na frente do anteparo, colocamos um detector móvel.²⁸

A primeira coisa que notamos com a experiência com elétrons é que ouvimos *um clique* sempre que um elétron atinge o detector (um alto-falante, por exemplo). E todos os cliques são iguais. Não existe “meio-clique”.

Quando movemos o detector, a taxa com que os cliques aparecem aumenta ou diminui, mas o volume (altura do som) de cada clique é sempre o mesmo. Se baixarmos a temperatura do filamento do canhão, a taxa de cliques diminui, mas ainda assim cada clique soa sempre da mesma forma. Também, vamos notar que se pusermos dois detectores separados no anteparo, apenas um soaria de cada vez, mas nunca os dois ao mesmo tempo!²⁹

Concluimos, portanto, que o que chega ao anteparo chega em unidades. Todas as unidades tem a mesma forma, e chegam uma de cada vez no anteparo, como se fossem projéteis. Podemos fazer agora a seguinte pergunta: “qual é a probabilidade relativa de que uma ‘unidade’ de elétrons, chegue no detector localizado em diferentes distâncias x com relação ao centro?”. Obtemos a probabilidade relativa observando a taxa de cliques para uma emissão constante do canhão de elétrons. A probabilidade que unidades cheguem em uma posição x é proporcional à taxa média de cliques ouvidos nesse valor da posição x . O resultado de nossa experiência é a interessante curva chamada de P_{12} na parte (c) da figura 27. É dessa maneira que os elétrons vão se comportar!

10.4 A interferência de ondas de elétrons

Vamos analisar a parte (c) da figura 27 para podermos entender o comportamento dos elétrons. A primeira coisa é que os elétrons aparecem em unidades, cada unidade, que podemos chamar um elétron, vem através do orifício 1 ou do orifício 2. Vamos escrever isso na forma de uma proposição:

Proposição A: cada elétron passa ou pelo orifício 1 ou pelo orifício 2.

Assumindo a proposição A, todos os elétrons que chegam no anteparo podem ser divididos em duas classes: (1) aqueles que passaram pelo orifício 1 e (2) aqueles que passaram pelo orifício 2. Então a curva que observamos deve ser a soma dos efeitos dos elétrons que passaram pelo orifício 1 e dos elétrons que passaram através do orifício 2. Vamos medir os elétrons que passaram no orifício 1. Bloqueamos o orifício 2 e contamos os cliques no detector. A taxa de cliques nos dá o valor P_1 na parte (b) da figura 27. Do mesmo modo, medimos P_2 , a distribuição de probabilidade para os elétrons que passaram pelo orifício 2. O resultado desta medida é mostrado na figura.

O resultado para P_{12} , obtido quando os dois orifícios estão abertos, claramente não é a soma das probabilidades de cada orifício separadamente, P_1 e P_2 . Novamente, podemos dizer “existe interferência”.

²⁸ Este experimento nunca foi feito desta forma (é apenas mental). O problema é que o aparato teria que ser feito numa escola muito pequena para poder exibir os efeitos que nos interessa. Sabemos os resultados que seriam obtidos porque existem muitos outros experimentos que já foram feitos, onde a escala e as proporções foram escolhidas para exibir os efeitos que vamos descrever.

²⁹ Exceto quando dois cliques ocorrerem muito próximos e nosso senso auditivo não conseguir distingui-los.

Como essa interferência pode surgir? Talvez devêssemos dizer: “possivelmente não é verdade que as unidades passam ou pelo orifício 1 ou pelo orifício 2, pois se fossem assim, as probabilidades deveriam se somar.

Existem alguns pontos no anteparo aonde poucos elétrons chegam quando ambos os orifícios estão abertos, mas que recebem muitos elétrons quando um orifício está fechado. É difícil explicar os dois efeitos simplesmente propondo que os elétrons viajam em trajetórias complicadas. É tudo muito misterioso. No entanto, a matemática é a mesma para o caso das ondas: a distribuição de probabilidades para P_{12} é o quadrado do módulo da soma das duas amplitudes ϕ .³⁰

Portanto, os elétrons chegam em unidades, como as partículas, e a probabilidade de chegada dessas unidades é distribuída como a distribuição de intensidade de uma onda. É neste sentido que os elétrons se comportam “algumas vezes como partícula e outras como onda”. Esta é a dualidade da matéria, que já foi discutida no tópico anterior.

Mas, como o número de elétron que chega em particular não é igual à soma do número que chega através do orifício 1 mais o número que chega através de 2, então a proposição A é falsa! Não é verdade que os elétrons passam ou através do orifício 1 ou do orifício 2. Mas esta conclusão pode ser testada através de outra experiência.

Vamos agora fazer outro experimento. Ao nosso aparato de elétrons, vamos colocar uma fonte de “luz forte” atrás da parede, entre os dois orifícios. Veja a figura 28. Sabemos que cargas elétricas espalham luz. E, quando um elétron passar, se ele passar, em seu caminho para o detector, ele espalhará a luz para nossos olhos e poderemos ver aonde ele vai.

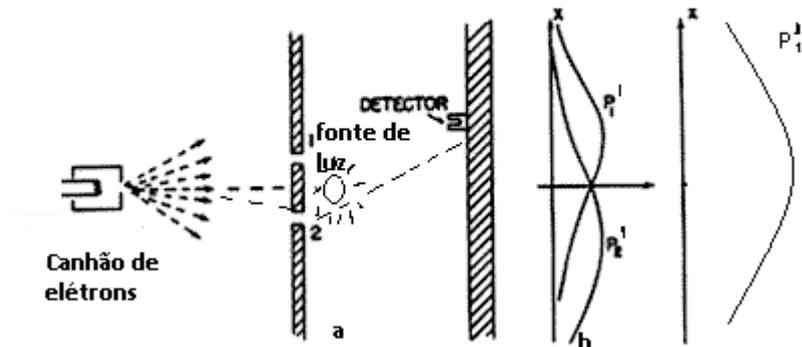


Figura 28: Uma experiência diferente com elétrons. Adaptada de: <http://johnmyself.blogspot.com.br/2010/08/funcao-de-onda.html>.

Isto é o que vemos: toda vez que ouvirmos um clique no detector, também veremos um flash de luz vindo do orifício 1 ou do orifício 2, embora nunca dos dois ao mesmo tempo. Experimentalmente, a proposição A é necessariamente verdadeira. O que está errado com nosso argumento contrário à proposição A? Por que não temos simplesmente P_{12} como sendo igual a $P_1 + P_2$? Voltemos ao experimento! Vamos acompanhar os elétrons e descobrir o que eles estão fazendo. Para cada posição x do detector vamos contar os elétrons que chegam e também acompanhar por qual orifício eles passaram observando os flashes. Isto pode ser feito assim: quando ouvirmos um clique marcaremos na coluna 1 se virmos um flash perto do orifício 1 e marcaremos na coluna 2 se o flash vier de perto do orifício 2. Cada elétron que chega é registrado como uma dentre duas classes possíveis: aqueles que vem do orifício 1 e aqueles que vem do orifício 2. Do número associado à coluna 1, obtemos a probabilidade P_1' que o elétron chegue no detector via orifício 1; e do número associado à coluna 2, obtemos a probabilidade P_2' que o elétron chegue no detector via orifício 2. Se

³⁰ ϕ é um número complexo, que está relacionado à amplitude de probabilidade. Não é mais intensidade I , mas a equação 15 continua válida (apenas substituindo I por P).

repetirmos as medidas para diversos valores de x obteremos a curva para P_1' e P_2' mostrada na parte (b) da figura 28. Tudo isso é similar à discussão anterior.

Mas, o que temos agora para a probabilidade total de que um elétron chegue ao detector por qualquer caminho? Já temos essa informação. Fingiremos que nunca olhamos para os flashes de luz e juntaremos os cliques do detector que temos separados nas duas colunas. Precisamos somar esses números. A probabilidade de que um elétron chegue ao anteparo passando por qualquer um dos dois orifícios será: $P_{12}' = P_1' + P_2'$. Ou seja, embora tenhamos sucedido em observar por qual orifício passam os elétrons, já não obtemos nossa curva de interferência P_{12} , mas sim uma nova P_{12}' , que não apresenta interferência! Se apagarmos a luz, P_{12} será restaurada.

Devemos concluir que, quando olhamos os elétrons, a distribuição deles no anteparo é diferente da distribuição quando não olhamos. Os elétrons podem ser muito delicados e a luz espalhada por eles dá um esbarrão que muda seu movimento. E se não usarmos uma fonte intensa de luz? Ou seja, diminuimos a sua intensidade? Ok, vamos tentar isso. A primeira coisa que observamos é que os flashes de luz espalhados pelos elétrons à medida que eles passam não se tornam mais fracos. Quando diminuimos a intensidade da fonte de luz não mudamos o “tamanho”³¹ do fóton, apenas a taxa com que estão sendo emitidos. Isso explica porque quando a luz é “fraquinha”, alguns elétrons passam sem serem vistos. Não havia um fóton por perto quando o elétron passou. Então, organizemos agora três colunas: na coluna 1 contamos os elétrons que foram vistos pelo orifício 1; na coluna 2 contamos aqueles vistos pelo orifício 2; na coluna 3 contamos aqueles que não foram vistos. E, o resultado é: aqueles “vistos” pelo orifício 1 tem distribuição como P_1' ; aqueles “vistos” pelo orifício 2 tem distribuição como P_2' ; já aqueles que não foram vistos de forma alguma tem distribuição como P_{12} , ou seja, um comportamento ondulatório.

Isso é compreensível. Quando não vemos os elétrons, nenhum fóton o perturbou. Existe alguma forma que possamos ver os elétrons sem perturbá-los? Aprendemos no tópico anterior que o momento linear de um fóton, por exemplo, é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda ($p = h/\lambda$). Certamente o “esbarrão” dado ao elétron quando o fóton é desviado para nossos olhos depende do momento linear que o fóton tem. Se quisermos apenas dar uma sacudida no elétron, não devemos diminuir a intensidade, mas sim sua *frequência* (que é o mesmo que aumentar o comprimento de onda)! Vamos então usar luz avermelhada, por exemplo, e “ver” aonde os elétrons foram com a ajuda de um equipamento que possa “ver” luz de comprimentos de onda maiores.

Vamos continuar repetindo nossos experimentos, mas com comprimentos de onda cada vez maiores. Inicialmente nada parece mudar. Aqui, é necessário lembrar um pouco de Óptica. Há uma limitação de quão próximos dois pontos de luz podem ficar e ainda serem vistos como dois pontos distintos. Esta distância é da ordem do comprimento de onda da luz. Então, agora quando fazermos os comprimentos de onda da luz maiores do que a distância entre os orifícios, veremos um flash borrado quando a luz é espalhada pelos elétrons. Aí não poderemos mais dizer por qual orifício o elétron passou. E é justamente com a luz dessa cor que veremos que o esbarrão dado ao elétron é pequeno de tal forma que P_{12}' começa a parecer com P_{12} – e começamos a obter o efeito da interferência. E é apenas com comprimentos de onda muito maiores do que a separação entre os orifícios, que a perturbação da luz será suficientemente pequena para que tenhamos de novo a curva P_{12} , mostrada na figura 27.

Em nosso experimento vemos que é impossível arranjar a luz de tal forma que seja possível dizer por qual orifício o elétron passou sem ao mesmo tempo não perturbar o resultado final. Em 1927, o físico alemão Werner Heisenberg propôs um princípio geral chamado *princípio da incerteza*, que podemos formular em termos de nossos experimentos da seguinte forma: “É impossível projetar um equipamento que determine por qual orifício o elétron passa sem que ao mesmo tempo não perturbe suficientemente o elétron de tal forma que destrua o padrão de interferência”. A mecânica quântica completa depende de quão

³¹ Entende-se a quantidade de energia carregada no “pacote”.

correto é o princípio da incerteza. Como ela é uma teoria muito bem-sucedida, nossa crença no princípio da incerteza é reforçada.

E o que acontece com a proposição A? É verdadeiro ou não que o elétron ou passa pelo orifício 1 ou pelo orifício 2? A única resposta que pode ser dada é aquela encontrada experimentalmente de que há uma maneira especial que devemos raciocinar de forma a não obter inconsistências. O que devemos dizer é o seguinte: se olharmos para os orifícios, ou mais precisamente, se tivermos equipamento que seja capaz de determinar se os elétrons passam pelo orifício 1 ou pelo orifício 2, então podemos dizer que passa ou pelo orifício 1 ou pelo orifício 2. Entretanto, quando não tentamos dizer de que forma o elétron vai, quando não há nada no experimento para perturbar os elétrons, então não podemos dizer se o elétron vai pelo orifício 1 ou pelo orifício 2.

10.5 Medidas de posição e Momento

Essa foi a maneira que Heisenberg formulou originalmente o princípio da incerteza: se for feita uma medida em qualquer objeto e puder determinar a componente x do seu momento (ou quantidade de movimento) com uma incerteza Δp , não se pode, ao mesmo tempo, saber sua posição x mais precisamente que $\Delta x = h/\Delta p$, onde h é a constante de Planck. As incertezas na posição e no momento de uma partícula em qualquer instante devem ter seu produto da mesma ordem ou maior que a constante de Planck:³²

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h \quad [\text{Eq. 16}]$$

A razão dessa incerteza não é nem um problema do aparato utilizado nas medidas das grandezas físicas nem dos erros das medidas, mas sim a própria natureza da matéria e da luz.

Este princípio fundamental da natureza modifica profundamente nossa compreensão do mundo atômico. Para que o conceito de órbita tenha sentido em escala atômica, deve-se determinar qualquer posição do elétron e a correspondente velocidade instantânea. Como isso não é possível, não se pode estender o conceito de órbita a sistemas atômicos.

Em lugar de órbitas, deve-se falar em **orbitais atômicos!** Orbitais atômicos são regiões do espaço onde há uma probabilidade de se encontrar o elétron³³.

Suponha, agora, que se queira medir não apenas a energia de uma partícula, mas também a duração do intervalo de tempo que ela permanece com esta energia. A relação de incerteza de Heisenberg permanece da mesma forma:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx h \quad [\text{Eq. 17}]$$

em que ΔE e Δt são, respectivamente, as incertezas em energia e no intervalo de tempo.

Uma boa estimativa para o valor máximo de Δt é supor que ele seja da ordem de τ , a vida média do estado. Desse modo, quanto maior a vida média de um estado, menor é a correspondente largura de energia, ou seja, estados mais estáveis tem menores variações de energia (tem energia bem definida).

A vida média do estado fundamental é infinita porque um átomo, neste estado, não pode realizar uma transição para um estado de energia menor. Assim, para o estado fundamental, $\Delta E = 0$. Em palavras: a energia do estado fundamental pode ser determinada exatamente. Diz-se que é um **estado estacionário**.

Atividade

³² Sobre a discussão deste limite, veja o artigo da leitura complementar.

³³ Serão mais bem estudados no tópico 11.

Assistir aos vídeos:

- Experimento de Young – dupla fenda. Disponível no endereço: <http://www.cienciacuriosa.com.br/>.
- Interferência de ondas sonoras. Disponível no endereço: <http://www.cienciacuriosa.com.br/>.

Questões de Vestibular

- 1) (UPE) Sobre o Princípio da Incerteza de Heisenberg, analise as proposições a seguir:

I. Se uma medida da posição for feita com precisão Δx e se uma medida simultânea da quantidade de movimento for feita com precisão Δp , então o produto das duas incertezas nunca poderá ser menor do que $h/4\pi$, ou seja, $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$.

II. Quanto maior a precisão na determinação da posição do elétron, menor é a precisão na determinação de sua velocidade (ou de sua quantidade de movimento) e vice-versa.

III. O princípio afirma que há um limite real para a precisão das medições simultâneas da posição e da quantidade de movimento. Esse limite provém da própria estrutura quântica da matéria e das imperfeições dos instrumentos de medida utilizados.

IV. O princípio fundamenta-se na ação do observador sobre o objeto observado; logo, ele é uma manifestação da impossibilidade de se ignorar a interação entre o observador e o objeto observado.

V. Esse princípio se torna irrelevante na interpretação de experiências que lidam com objetos macroscópicos, mas se torna relevante na interpretação de experiências que lidam com partículas subatômicas, como os elétrons.

Estão CORRETAS

- A) I, II, III, IV e V.
- B) I e II, apenas.
- C) I, II e V, apenas.
- D) I, II, IV e V, apenas.
- E) I, II e IV, apenas.

- 2) (ITA 2005) Num experimento, foi de $5,0 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ a velocidade de um elétron, medida com precisão de 0,003%. Calcule a incerteza na determinação da posição do elétron, sendo conhecidos: massa do elétron $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ e constante de Planck reduzida $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

Leitura Complementar

- *Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg*. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v27_181.pdf.

11 O SPIN

Vamos falar agora de um assunto muito importante para o estudo das partículas elementares: o spin (do inglês, girar). É difícil entender o conceito de spin, apesar de definirmos erroneamente como a rotação de uma bolinha. Assim como as partículas tem massa e carga, elas também possuem um spin. É uma propriedade intrínseca das partículas.

Observando as raia do espectro do hidrogênio com precisão aumentada, notamos que cada raia é formada por duas ou mais raia mais estreitas, muito juntas umas das outras. Esta estrutura de raia mais estreitas, presente no espectro do hidrogênio assim como no espectro dos demais átomos, é chamada de **estrutura fina do espectro**.

Em 1925, o físico austríaco Wolfgang Pauli sugeriu que o elétron deveria ter uma propriedade nova e, associado a essa propriedade, deveria ter um número quântico que só poderia ter dois valores. No mesmo ano, Goudsmit e Uhlenbeck sugeriram que essa propriedade poderia ser um momento angular intrínseco do elétron. Foi denominado **spin** (girar, em inglês).

Os experimentos que permitem medir o **momento angular orbital** do elétron e o seu **momento angular intrínseco** o fazem indiretamente, aproveitando a relação do momento angular com o momento magnético e a interação deste com um campo magnético externo. Sabe-se, da Teoria Eletromagnética Clássica, que uma espira percorrida por uma corrente elétrica (convencional) gera um campo magnético com estrutura semelhante ao de um ímã.

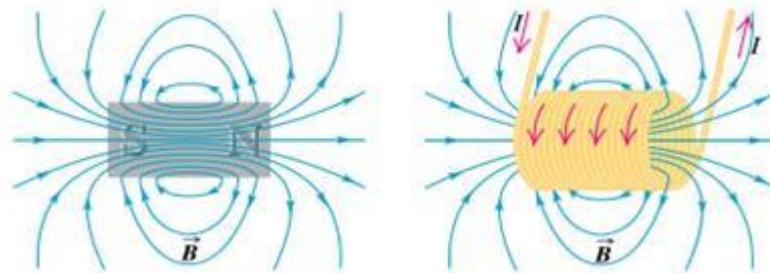


Figura 29: Campo magnético gerado por um ímã e por um conjunto de espiras. (Extraído de educação.uol.com.br)

Também se pode associar à uma espira percorrida por uma corrente elétrica (convencional), um **momento magnético** μ . A direção do momento magnético da espira é perpendicular ao plano da espira. O sentido é dado pela regra da mão direita: com os dedos dessa mão colocados ao longo da espira e no mesmo sentido em que a corrente elétrica a percorre, o polegar indica o sentido do momento de dipolo magnético.

Por outro lado, de acordo com o modelo de Bohr, o elétron se move ao redor do núcleo, ao qual está fixo o referencial, numa órbita circular.

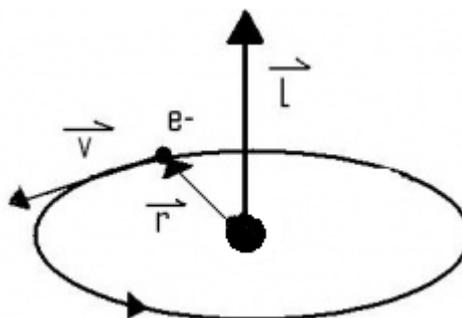


Figura 30: Representação dos momentos magnético e angular de um elétron ao redor do núcleo

Portanto, este elétron possui um momento angular \vec{L} , que está relacionado ao momento magnético conforme demonstra a relação abaixo³⁴:

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m}\vec{L} \quad [\text{Eq. 18}]$$

Esta expressão é importante porque mostra que, ao momento angular (orbital, do elétron neste caso), está associado um momento magnético.

O experimento de **Stern-Gerlach** permitiu medir o momento magnético dos átomos e verificar a quantização espacial. Esse experimento foi realizado, pela primeira vez, em 1922, por Stern e Gerlach, usando átomos de prata. Em 1927, o mesmo experimento foi realizado por Phipps e Taylor, usando átomos de hidrogênio. A razão para isso é que sob determinadas condições, átomos de hidrogênio podem ser produzidos de modo que seu único elétron não possua momento angular, ou seja, o átomo terá $L = 0$, e consequentemente deveria ter momento magnético $\vec{\mu}$ nulo! E qual foi o resultado?

Nos dois casos, um feixe colimado de átomos, produzidos num forno apropriado, atravessa a região entre os pólos de um eletroímã e se deposita numa placa de vidro.

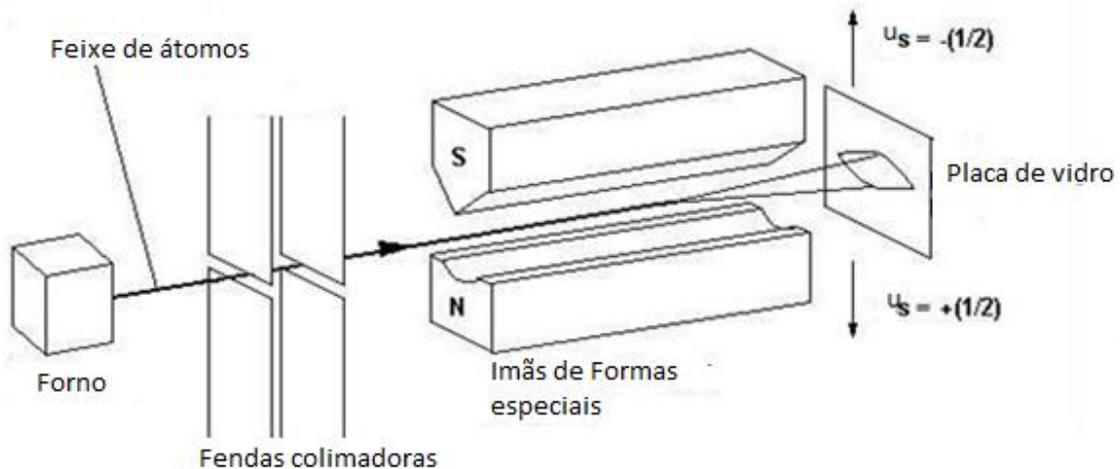


Figura 31: Ilustração do experimento de Stern-Gerlach (Adaptado de: <http://library.thinkquest.org/19662/high/eng/exp-stern-gerlach.html>)

Se o experimento é realizado com o eletroímã desligado, os átomos não são desviados da sua trajetória original e se depositam na placa de vidro formando uma linha estreita (mancha alongada na vertical). Se o experimento é realizado com o eletroímã ligado, o feixe original se divide em dois e os átomos se depositam na placa de vidro formando duas linhas estreitas, separadas e levemente curvadas. Isto não era previsto pela Física Clássica.

De acordo com a Física Clássica, o resultado previsto seria uma única mancha, contínua, sobre a placa de vidro. Isto porque, os átomos deveriam ser submetidos a forças diferentes (pois seus momentos magnéticos estão alinhados aleatoriamente), e, portanto sofrer deflexões diferentes, tanto para cima como para baixo. Como explicar, então, o resultado do experimento?

Os átomos são neutros, de modo que a força de Lorentz não atua sobre eles. Contudo, os átomos têm momento magnético. Portanto, atua, sobre cada átomo, uma força resultante originada da interação do campo magnético associado ao momento do átomo com o campo magnético gerado pelo eletroímã. Mas este momento magnético do átomo não se deve apenas ao momento orbital.

³⁴ Para ver uma dedução desta equação, veja Oliveira (2005), pág. 88.

O experimento de Stern-Gerlach evidencia que, há um momento magnético mais “intenso” do que o momento magnético orbital. A única maneira de explicar o resultado foi imaginar que os átomos possuíam um momento magnético intrínseco, que não estivesse ligado ao movimento orbital dos elétrons. Era este momento que estava interagindo com o campo e provocando a deflexão dos átomos. Por analogia, deveria haver também um **momento angular intrínseco**, o qual foi chamado **Spin**.

O experimento de Stern-Gerlach mede o **momento angular total M** do átomo, isto é, a soma do momento angular orbital L com o momento angular intrínseco (spin) do elétron.

$$\mathbf{M} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \quad [\text{Eq. 19}]$$

Para facilitar a discussão, vamos considerar o experimento feito com átomos de hidrogênio. O estado fundamental do átomo de hidrogênio é caracterizado pelos seguintes números quânticos: $n = 1$, $l = 0$ e $m = 0$.

Nota

Embora as energias dos estados do átomo de hidrogênio possam ser descritas por um único número quântico n (já estudado no tópico 8), as funções de onda³⁵ que descrevem estes estados exigem três números quânticos, correspondentes às três dimensões nas quais um elétron pode se mover. Cada conjunto de números quânticos (n, l, m_l) identifica a função de onda de um estado quântico.

O número quântico n , que é chamado **número quântico principal**, aparece na equação 11, usada para calcular a energia do estado.

O **número quântico orbital** l , é uma medida do módulo do momento angular orbital associado a este estado quântico. Por exemplo: para $n = 4$, os valores de l são 0, 1, 2 e 3, correspondentes, aos orbitais s, p, d e f, respectivamente. As letras s, p, d e f derivam das palavras *sharp*, *principal*, *diffuse* e *fundamental*, que são as denominações dadas a linhas que aparecem no espectro do átomo de hidrogênio.

Cada conjunto de orbitais com os mesmos valores de n e l constitui um **subnível**³⁶ de energia e, para átomos multieletrônicos, a energia do subnível depende de n e l . Por exemplo: para $n = 3$, existem três subníveis: o 3s, que corresponde a $n = 3$ e $l = 0$; o 3p corresponde a $n = 3$ e $l = 1$; e o 3d, correspondendo a $n = 3$ e $l = 2$. As energias destes subníveis crescem na seguinte ordem: $3s < 3p < 3d$.

O **número quântico magnético orbital** m_l está relacionado à orientação no espaço do vetor momento angular. Ele pode assumir $2l+1$ valores distintos, variando de $-l$ a $+l$. Por exemplo, para $l = 2$, os valores de m_l variam de $+2$ a -2 , podendo assumir $2 \cdot 2 + 1 = 5$ valores, que são: $-2, -1, 0, +1, +2$. Como vimos m_l é limitado pelos valores de l . As funções de onda com o mesmo n e l , mas diferentes m_l tem a mesma energia, porém, orientações diferentes.

Os três números quânticos, juntamente com seus nomes e os valores que podem assumir, aparecem na tabela 1.

³⁵ A função de onda é solução da equação de Schrödinger (a equação de movimento da Mecânica Quântica). O significado da função de onda Ψ tem a ver com o fato de que uma onda de matéria (estudada no tópico 10) é uma onda de probabilidade. Na verdade, a probabilidade (por unidade de tempo) de que uma partícula seja detectada em um pequeno volume com centro num dado ponto é proporcional ao valor de $|\Psi|^2$ neste ponto. O quadrado do módulo da função de onda está relacionado à **densidade de probabilidade**.

³⁶ Esta é base da distribuição eletrônica de Linus Pauling, que é estudada rotineiramente em Química no Ensino Médio.

Tabela 1: Números Quânticos e suas relações.

Valores de n $n = 1, 2, 3, \dots \infty$	Valores de l $n = 0, 1, 2, \dots \infty$	Valores de m_l $m_l = -l \dots +l$	Subnível
1	0	0	1s
2	0	0	2s
	1	-1, 0, 1	2p
3	0	0	3s
	1	-1, 0, 1	3p
	2	-2, -1, 0, 1, 2	3d
4	0	0	4s
	1	-1, 0, 1	4p
	2	-2, -1, 0, 1, 2	4d
	3	-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3	4f
5	0	0	5s
	1	-1, 0, 1	5p
	2	-2, -1, 0, 1, 2	5d
	3	-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3	5f
	4	-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4	5g

Tabela extraída de: <http://www.uft.edu.br/fis/static/pdfs>.

Voltando...

O módulo do momento angular orbital do elétron é dado por³⁷:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad [\text{Eq. 20}]$$

de modo que, para $l = 0$ tem-se $L = 0$.

Isto significa que o momento angular total do átomo de hidrogênio é devido apenas ao momento angular intrínseco do elétron, isto é, ao seu spin. Da mesma forma, o módulo do momento angular de spin é dado por:

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar \quad [\text{Eq. 21}]$$

onde s é o número quântico de spin. Do mesmo modo, esta expressão evidencia a quantização do Spin.

Como o feixe original de átomos de hidrogênio se dividiu em dois ao passar pela região de campo magnético não-homogêneo, o spin do elétron só pode ter duas componentes ao longo do campo (ou do eixo Z), isto é, ele pode ser $+1/2$ ou $-1/2$. Diz-se que o spin só pode apontar paralela ou antiparalelamente ao campo. Para átomos com vários elétrons, os spins individuais se somarão e o átomo poderá adquirir valores de spin diferentes de $1/2$, como, por exemplo, $S = 3/2$.

O número quântico de spin das partículas é sempre um múltiplo inteiro ($0, +1, +2, +3, \dots$) ou semi-inteiro ($+1/2, +3/2, +5/2, \dots$) de \hbar . Mas, por conveniência, geralmente se omite \hbar . O spin é uma propriedade muito importante em Física de Partículas, pois permite distinguir dois grupos de partículas: aquelas que possuem spin inteiro (chamadas de **Bósons**) e aquelas que possuem spin semi-inteiro (chamadas de **Férmions**).

³⁷ A demonstração desta equação será omitida, pois foge do nível deste texto. Idem para a equação 21.

Nota

Mesmo em partículas sem carga elétrica, existe spin. Por exemplo, o nêutron tem spin semi-inteiro, ou seja, ele é um Férmion. Ou seja, carga elétrica e spin são propriedades intrínsecas distintas das partículas.

Atividade

Assistir ao vídeo O elétron, disponível no link:

- <http://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=1226>

Simulação das Funções de Onda

- <http://imagem.casadasciencias.org/online/36101206/36101206.php>

Simulações do Experimento de Stern-Gerlach:

- <http://www.if.ufrgs.br/~betz/quantum/SGPeng.htm>
- https://phet.colorado.edu/sims/stern-gerlach/stern-gerlach_en.html

Questões

- 1) Que observação sobre as raias espectrais dos átomos levou à ideia da existência do spin do elétron?
- 2) Na descrição pelo modelo quântico do átomo de hidrogênio, qual o significado físico do quadrado do módulo da função de onda, $|\psi|^2$?
- 3) Em média, que elétron estará mais afastado do núcleo, um elétron num orbital 3s ou outro num orbital 3p? Justifique sua resposta em função da penetrabilidade dos orbitais.
- 4) Quais os números quânticos n e l correspondentes aos seguintes orbitais:
 - a) 4d;
 - b) 3s;
 - c) 4p.
- 5) Quantos subníveis de energia há no nível designado por $n = 4$? Quantos orbitais existem nesse nível? Qual o orbital de maior energia?
- 6) Quantos orbitais existem no subnível f? Quais os valores de m_l para cada um dos orbitais f?

Leitura Complementar

- *O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/332604.pdf>.

12 A DESCOBERTA DO NÊUTRON E A FORÇA FORTE

Vamos agora descrever a descoberta do outro constituinte do núcleo, o **nêutron**, e como isto levou à descoberta da Força Nuclear Forte. Como vimos no tópico 5, em 1917, Rutherford realizou a primeira reação de transmutação que o levou à descoberta do próton. No entanto, para assegurar que o átomo é estável, seria necessário que houvesse elétrons para compensar a repulsão eletrostática entre os prótons. No entanto, isto era incompatível com as **medidas de spin** do núcleo atômico (o spin do núcleo é inteiro³⁸). Rutherford, então, cogitou a existência de um parceiro neutro do próton.

Por volta de 1930, Walter Bothe e Herbert Becker, bombardearam, com partículas alfa, uma amostra de berílio (Be). Nessa experiência, detectaram uma radiação penetrante, que podia atravessar, por exemplo, vários centímetros de chumbo, sem sofrer atenuações, sendo interpretada como uma radiação gama. Porém, essa radiação tinha energia maior do que a radiação alfa incidente, acreditando que essa diferença estava ligada à desintegração nuclear. Estudando a radiação descoberta por Bothe e Becker, o casal Frédéric Joliot e Irène Curie, observou que a radiação podia ejetar prótons da parafina. No entanto, essa observação era muito estranha, porque a massa do próton é muito elevada.

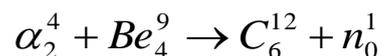
James Chadwick, aluno de Rutherford, que já em 1923 tentou detectar o nêutron, tomou conhecimento da experiência do casal Joliot e Curie e tratou de repetir a experiência, utilizando uma fonte de radiação alfa, que ele fez incidir sobre amostras de hidrogênio, hélio e nitrogênio.



Figura 32: James Chadwick (1891-1974)

Em 1932, Chadwick conseguiu detectar uma componente neutra da radiação, de massa aproximadamente igual à do próton. Estas partículas foram denominadas de nêutrons.

Uma reação observada por Chadwick, realizada com o Berílio, pode ser representada como:



³⁸ Isto por que o núcleo contém, para um determinado número de prótons, o mesmo número de nêutrons. Como prótons e nêutrons são férmions (tem spin semi-inteiro), o spin total do núcleo, que é a soma dos spins de prótons e nêutrons, será inteiro.

Assim, estava resolvido o problema das medidas de Spin do núcleo.

Por exemplo, o núcleo de nitrogênio que, no modelo anterior, deveria conter 14 prótons e 7 elétrons, dando massa atômica igual a 14 e carga positiva igual a 7, apresenta spin fracionário. Com a descoberta do nêutron, o núcleo passou a ser descrito por prótons e nêutrons, dando a massa e a carga do núcleo, e sendo coerente com as medidas experimentais do spin, que passou a ser inteiro.

Assim, a descoberta do nêutron, por Chadwick, resolvia os problemas enfrentados pelo modelo nuclear, constituído por prótons e elétrons, porém levantava novos dois problemas:

- i) Por que a maioria dos núcleos não explode, já que, em núcleos maiores do que o hidrogênio existe uma repulsão coulombiana considerável entre as cargas positivas (prótons)?
- ii) Se não há elétrons no núcleo, como explicar a emissão beta pelos núcleos?

Para responder essas duas questões, foi necessário introduzir duas novas forças além das já existentes (força gravitacional e força eletromagnética).

Para resolver o problema da estabilidade do núcleo, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981), previu, que haveria outra força de intensidade maior do que a repulsão eletromagnética, que seria responsável pela estabilidade do núcleo. Fazendo analogia com o fóton, o quantum da interação eletromagnética, previu um quantum para essa interação nuclear. Com um raciocínio simples envolvendo a Relatividade e o Princípio da incerteza, determinou a massa desse quantum, que deveria ser cerca de 300 vezes maior do que a massa do elétron.

Este quantum, tendo uma massa intermediária entre o elétron e o próton, foi chamado de **MÉSON**. Com uma abordagem mais refinada, Yukawa mostrou, que essa partícula deveria se apresentar em três versões: positiva, negativa e neutra. Mas seu **alcance** é muito **curto**, restringindo-se apenas ao núcleo³⁹.

Apenas no final de 1946 e início de 1947, o físico brasileiro **César Lattes** (1924-2005), juntamente com Cecil Power (1903-1969) e Giuseppe Occhialini (1907-1993), analisando emulsões fotográficas expostas aos **raios cósmicos**⁴⁰, nas altas montanhas da Bolívia, encontraram o rastro de uma partícula que concluíram ter massa de $139 \text{ MeV}/c^2$, sendo identificada como a partícula de Yukawa.

A figura 30 representa vários processos de decaimentos dos raios cósmicos.

³⁹ Na teoria de Yukawa, a massa da partícula que transmite a interação está relacionada com seu alcance. Como a massa dos píons é grande (em relação à do elétron), seu alcance é curto. Para o campo eletromagnético, os mediadores da interação são fótons, de massa nula. Portanto, o alcance da interação eletromagnética é infinito.

⁴⁰ Os raios cósmicos, descobertos em 1911, são núcleos de altas energias que atravessam o nosso universo. Cerca de 87% dos raios cósmicos observados são núcleos de hidrogênio. 12% são núcleos de hélio e o restante é constituído por núcleos mais pesados como ferro e carbono. A origem dos raios cósmicos de altas energias ainda não está bem esclarecida. Raios cósmicos de menor intensidade são provenientes de estrelas. Ao nível do mar, as partículas dominantes são múons e elétrons.

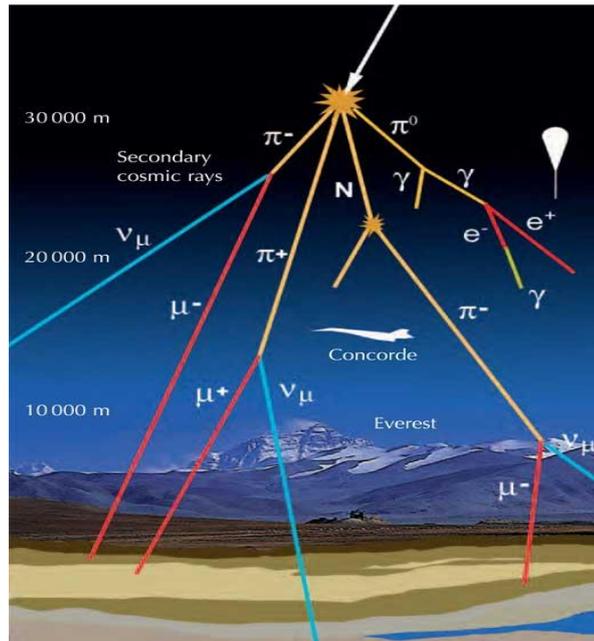


Figura 33: Uma ilustração da formação dos raios cósmicos. Extraído de www.scienceinschool.org.

Hoje em dia, a partícula proposta por Yukawa é chamada de méson pi ou pión (π), que se apresenta em três tipos, conforme sua carga elétrica: π^+ , π^- , π^0 . Em 1948, o pión foi novamente detectado por Lattes, só que agora no acelerador de Berkeley.

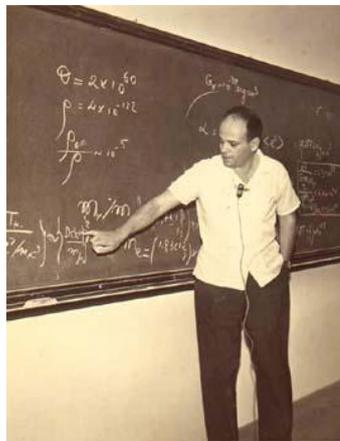


Figura 34: O físico brasileiro César Lattes (1924-2005). Extraído de <http://www.mundofisico.joinville.udesc.br/>.

A teoria de Yukawa, então, foi corroborada e, portanto, explica o mecanismo da estabilidade do núcleo atômico da seguinte maneira: um próton, ao emitir um pión positivo, transforma-se em nêutron; caso este pión positivo seja absorvido por um nêutron, este se transforma em próton. Já o nêutron quando emite um pión negativo, torna-se um próton; se outro próton absorver este pión negativo, ele se transforma num nêutron. Quando dois prótons (ou dois nêutrons) interagem entre si, o pión trocado é o pión neutro. Portanto, o quantum da interação nuclear é uma partícula chamada pión. Essa interação nuclear é a chamada **Força Nuclear Forte**. Mais adiante, vamos esclarecer melhor esta força.

Na verdade, hoje se sabe que os píons não são os verdadeiros mediadores da interação nuclear forte num nível mais fundamental.⁴¹ Mas são eles que agem no

⁴¹ As partículas mediadoras da força forte são os gluons (mediadores entre quarks), que serão discutidos mais adiante.

sentido de **intermediarem** a troca de partículas entre prótons e nêutrons (esta é a chamada força forte residual).

Questões

- 1) Um par de prótons de um núcleo atômico se repelem, mas também se atraem. Explique isso.
- 2) É razoável pensar, que em um intervalo de tempo muito pequeno existam somente prótons ou somente nêutrons dentro do núcleo? Explique sua resposta.
- 3) Qual foi o principal papel do brasileiro César Lattes na detecção dos mésons?

Leitura Complementar

- *Reminiscências de César Lattes.* Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v27_467.pdf .
- *A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/352603.pdf> .

13 A FORÇA NUCLEAR FRACA

No decaimento beta, ocorre a emissão de um elétron. Mas este elétron provém do núcleo !!!

Por exemplo, no decaimento beta do carbono 14, um nêutron decai num próton e num elétron, conforme a equação: ${}_6\text{C}^{14} \longrightarrow {}_7\text{N}^{14} + e^-$.

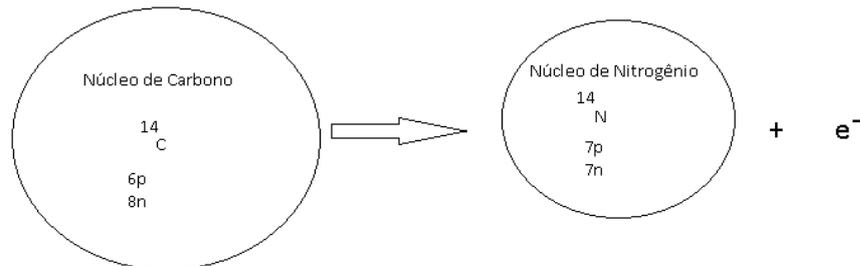


Figura 35: Ilustração do decaimento beta do carbono 14.

Na década de 20, o decaimento beta foi muito estudado, e, os físicos suspeitavam de que a lei de **conservação de energia** não era respeitada.

Em 1930, o físico austríaco Wolfgang Pauli sugeriu, que no decaimento beta, outra partícula, sem carga e com massa praticamente nula, com spin igual ao do próton e do elétron (1/2), seria emitida junto com o elétron. Essa partícula foi chamada por Enrico Fermi de **neutrino**⁴² (o pequeno nêutron, em italiano).

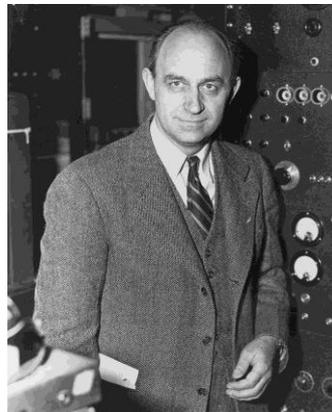


Figura 36: O físico italiano Enrico Fermi (1901-1954).

Além da violação da conservação da energia, o decaimento beta (sem a presença desta partícula) pareceria violar a **conservação da quantidade de movimento**. Portanto, a existência da partícula com as características mencionadas permitiria valer a conservação da quantidade de movimento. Para exemplificar isto, a figura 37 (a) representa os vetores da quantidade de movimento de cada partícula. Esta situação não foi detectada experimentalmente.

A figura 37 (b) representa a situação em que se observa o sentido e a direção da quantidade de movimento das partículas.

⁴² Estudaremos melhor suas propriedades no tópico 15.

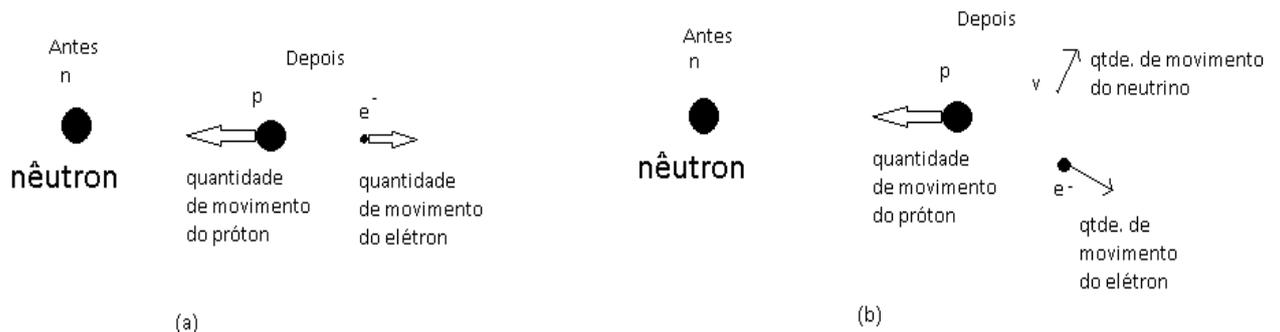


Figura 37: Representação da quantidade de movimento no decaimento beta do nêutron. Em (a) tem-se a situação sem a presença do neutrino. Em (b), tem-se a mesma situação, mas com a presença do neutrino (cujo símbolo, nas reações de produção/decaimento é a letra grega ν).

O neutrino só foi detectado em 1956, em uma experiência onde ocorriam colisões de neutrinos oriundos de um reator nuclear com prótons de um cintilador líquido.

A teoria de Fermi, também propunha que o processo do decaimento beta era devido à manifestação de um campo de força tão fundamental quanto os demais já conhecidos (Gravitação e o Eletromagnetismo). Essa interação é hoje conhecida por **Interação Fraca**⁴³. Esta força, manifestada através dos estudos sobre o núcleo atômico, foi a responsável pela “transformação” de um nêutron em um próton, denominado de decaimento beta. Nesse processo, o nêutron decai em próton, um elétron e em um neutrino⁴⁴.

Portanto, é a força fraca a responsável pelo **decaimento radioativo** das partículas, enquanto que a força forte é responsável pelas suas produções.

Questão

(Unesp 91) Em 1990 transcorreu o cinquentenário da descoberta dos "chuveiros penetrantes" nos raios cósmicos, uma contribuição da física brasileira que alcançou repercussão internacional. [O Estado de São Paulo, 21/10/90, p.30]. No estudo dos raios cósmicos são observadas partículas chamadas "píons". Considere um pión com carga elétrica $+e$ se desintegrando (isto é, se dividindo) em duas outras partículas: um "múon" com carga elétrica $+e$ e um "neutrino". De acordo com o princípio da conservação da carga, o "neutrino" deverá ter carga elétrica:

- $+e$
- $-e$
- $+2e$
- $-2e$
- nula

⁴³ Será mais bem discutida no tópico Interações Fundamentais.

⁴⁴ Na verdade, é um antineutrino do elétron. A reação é representada como: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. As antipartículas serão abordadas no próximo tópico.

14 A ANTIMATÉRIA

A ideia de partículas **quase idênticas** (opostas somente em uma propriedade) começou a ser formulada em 1928, pelo físico inglês Paul Dirac. A equação de Dirac, no caso de partículas livres, tem uma solução com quatro componentes. Duas correspondem a partículas com energia positiva e as outras duas correspondem a partículas com energia negativa, isto é:

$$E^2 = (p.c)^2 + (m_o.c^2)^2 \Rightarrow E = \pm\sqrt{(p.c)^2 + (m_o.c^2)^2} \quad [\text{Eq.22}]$$

Ora, ao contrário dos estados ligados (como é o caso do átomo de hidrogênio), uma partícula livre não pode ter **energia negativa**. Este foi o principal problema enfrentado por Dirac. Por outro lado, a Mecânica Quântica não exclui a possibilidade de haver transição entre estados de energia positiva e negativa. Dirac percebeu que estes estados não poderiam ser desconsiderados, pois a estrutura matemática de sua teoria não permite isto. . Porém, ao não descartar essa parte da solução, ele se confrontou com uma questão.

Para solucionar esse problema, Dirac propôs o conceito de “mar de elétron” (este “mar infinito de elétrons” seria uniforme e por isso não produziria efeitos observáveis), postulando que todos os estados negativos de energia já estariam ocupados por elétrons e, devido ao **princípio da exclusão de Pauli**⁴⁵, os elétrons dos estados positivos não poderiam transitar para os estados negativos já ocupados.

Desta forma, somente seriam observados efeitos, quando um elétron, que ocupa um dos estados negativos, for excitado transitando para um estado positivo, deixando um buraco no mar, que então, poderia ser observado. Esse buraco se comportaria como uma partícula de carga positiva e energia positiva.

O processo de excitação do elétron do estado negativo pode ser descrito da seguinte maneira: um fóton γ atinge um elétron no estado de energia negativa e o promove a um estado de energia positiva, deixando um buraco no mar, com falta de carga negativa. Este buraco é uma partícula com as mesmas características do elétron, exceto o fato de a carga elétrica ser oposta (figura 38).

Esta partícula foi chamada **pósitron** (e^+) ou **antielétron**.

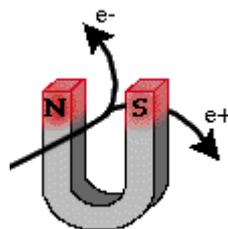


Figura 38: Apenas a carga elétrica distingue o elétron do anti-elétron. Extraído de <http://particleadventure.org/measure.html>

O pósitron foi descoberto em 1932, por **Carl Anderson**, numa experiência sobre raios cósmicos, nos Estados Unidos. Examinando trilhas deixadas por raios cósmicos em uma câmara de nuvens, observaram algumas bifurcações, conforme a figura 39.

⁴⁵ Segundo este princípio, a Natureza não permite que num mesmo sistema (átomo), existam dois elétrons com a mesma energia, em estados em que coincidam todos os números quânticos existentes (principal, secundário, magnético e de spin). O princípio da exclusão de Pauli se aplica somente aos férmions.

Na presença de um campo magnético, essas trilhas bifurcantes se encurvam em sentidos opostos, evidenciando que elas tem a mesma massa e carga elétrica opostas⁴⁶.

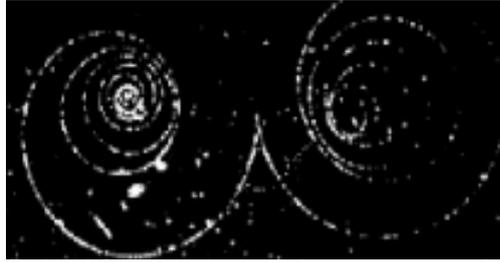


Figura 39 : Trilhas deixadas por um elétron e por um pósitron em uma câmara de nuvens. Extraído de <http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/antimateria/antimateria2.htm> .

Hoje se sabe que para cada partícula existe uma antipartícula associada, com a mesma massa e spin, porém com carga elétrica oposta. Não demorou muito para se descobrirem outras antipartículas. O anti-próton, por exemplo, foi descoberto em 1954, num acelerador chamado BEVATRON de Berkeley, na Califórnia, que acelerava prótons à energia de 6 GeV, conforme a reação $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$. Esta descoberta confirmou a existência da antimatéria. Logo depois foi descoberto o anti-nêutron.

Uma antipartícula importante descoberta em raios cósmicos, pouco tempo depois da descoberta do anti-próton, é o anti-lambda.

A partícula lambda desintegra-se em próton e pión negativo:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^{-}$$

Já a partícula anti-lambda desintegra-se em anti-próton e pión positivo:

$$\Lambda \rightarrow \bar{p} + \pi^{+}$$

Notação

As partículas são indicadas com letras do alfabeto romano ou grego. As antipartículas são indicadas pela mesma letra que a partícula com uma barra acima. Exemplos: próton p , anti-próton \bar{p} ; neutrino ν , anti-neutrino $\bar{\nu}$; lambda Λ , anti-lambda $\bar{\Lambda}$.

A matéria é constituída de partículas, a antimatéria é constituída de suas antipartículas. Uma propriedade importante é a aniquilação da matéria e da antimatéria quando colidem. Se uma partícula colide com a sua antipartícula, as duas “desaparecem”. Durante um intervalo de tempo muito pequeno, não há matéria nem antimatéria, somente existe a energia, soma da energia da partícula e da antipartícula; esse estado sem matéria é chamado **vácuo**. Depois a energia do vácuo é transformada em matéria, com a criação de novas partículas. Por exemplo, a aniquilação próton-anti-próton pode criar vários mésons π (figura 40)

$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^{+} + \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{-}$$

⁴⁶ Isto é uma consequência da força magnética exercida sobre uma partícula carregada, em movimento. No tópico 16.3 isso será bem detalhado.

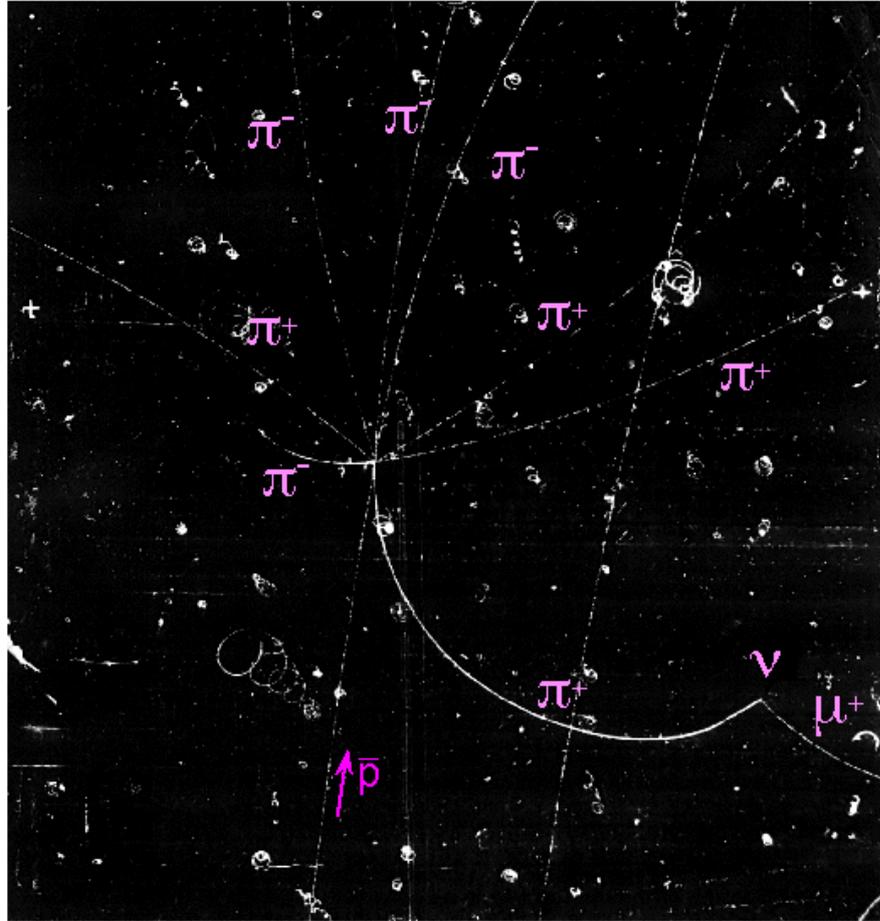


Figura 40: Fotografia de um evento obtido com uma câmara de nuvens, mostrando a aniquilação próton-anti-próton. Extraído de http://particleadventure.org/all_decay.html.

Questão

Os antiprótons quase sempre são aniquilados na reação $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$. Suponha que um próton e um antipróton se aniquilem em repouso. Por que devem ser produzidos dois fótons em vez de apenas um?

Leitura Complementar

Para uma aplicação da antimatéria na medicina, como por exemplo, a tomografia por emissão de pósitrons (PET), veja o artigo:

- *Usando a antimatéria na medicina moderna*. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/060109.pdf>

15. INICIANDO AS PARTÍCULAS ELEMENTARES

A Física das Partículas Elementares tem por objetivo estudar os constituintes fundamentais da matéria e do universo e procura responder a perguntas milenares tais como:

Qual é a origem da massa?

Como foi o princípio do universo?

Como ele evoluirá no futuro?

Por que não temos mais antimatéria no universo?

Estas e outras questões ainda permanecem um enigma para a Física, apesar de já se ter respondido muitas questões nessa direção. Hoje, sabe-se que a matéria é formada por átomos e moléculas. Moléculas são agrupamentos de átomos. Átomos consistem de elétrons, constituindo camadas eletrônicas (responsáveis pela condução elétrica e ligações químicas), e de núcleos, formados por prótons e nêutrons. Após a descoberta do nêutron, em 1932, por muito tempo pensou-se que estas três partículas eram realmente fundamentais. Mas, não durou muito para se descobrir muitas outras partículas, e que, prótons e nêutrons, eram constituídos de partículas ainda menores, os quarks. Isto graças ao advento dos aceleradores de partículas (que serão discutidos no próximo tópico).

MAS, O QUE É UMA PARTÍCULA ELEMENTAR?

Bem, antes de iniciarmos o estudo das partículas elementares, primeiro precisamos desde já fazer uma correção importante: a de que o termo partícula elementar não é adequado para nomear as unidades fundamentais da matéria. No mundo subatômico, partícula não é um corpúsculo, uma bolinha muito pequena. Pensar as partículas elementares como corpos muito pequenos, com massas muito pequenas, ocupando espaços muito pequenos funciona como um obstáculo para compreendê-las de maneira significativa.

Partículas elementares podem, por exemplo, não ter massa (como o fóton, por exemplo); além disso, tais partículas não podem ser localizadas com precisão (devido ao Princípio da Incerteza de Heisenberg). Por isto, neste material, as partículas elementares não serão representadas por bolinhas, como é frequente em muitos textos didáticos sobre este assunto.

Até 1932 só eram conhecidas quatro partículas, consideradas elementares: o fóton, o elétron, o próton e o nêutron, sendo que neste mesmo ano foi descoberta a antipartícula do elétron, o pósitron. O assunto de antipartículas será discutido mais adiante.

A partir das pesquisas baseadas essencialmente no estudo dos raios cósmicos, em 1947 o número de partículas elementares havia saltado para 14, consistindo então de próton, nêutron, elétron, neutrino, muon e suas respectivas antipartículas além do fóton e dos três mésons pi.

Aparentemente tudo se encaixava do ponto de vista das observações e das teorias existentes. No ano de 1947 traços estranhos apareceram nas fotografias dos raios cósmicos e, em 1952, com a entrada em operação do acelerador “cosmotron” no Laboratório Nacional Brookhaven, Estados Unidos, ficou claro que várias outras partículas existiam. Logo ficou evidente que as novas partículas que iam surgindo podiam ser divididas em dois grupos: partículas de spin zero, que foram chamadas de **kaons** (K^+ , K^- , K^0 , \bar{K}^0), e partículas de

spin semi-inteiro, que foram chamadas de **híperons** ($\Lambda^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$), sendo que todas interagem através da força forte.

Nota

Fez-se a convenção de escolher como nome das partículas mais pesadas que o próton o nome de letras gregas maiúsculas: Λ (*lambda*), Σ (*sigma*), Ξ (*csi*), Ω (*omega*).

Após estas descobertas, os físicos começaram a classificar as partículas até então conhecidas em quatro grupos⁴⁷, quanto ao spin e à resposta à força forte:

- 1) **Bárions:** partículas que interagem pela força forte e que possuem spin semi-inteiro (isto é, são férmions) (Não elementares).
- 2) **Mésons:** partículas que interagem pela força forte e que possuem spin inteiro (isto é, são bósons) (Não elementares).
- 3) **Léptons:** partículas que não interagem por interação forte e possuem spin semi-inteiro (são também férmions) (Elementares).
- 4) **Bósons intermediários:** partículas que não interagem por interação forte e possuem spin inteiro (Elementares).

Bárions e Mésons fazem parte do grupo das partículas conhecidas como **Hádrons**, que são todas as partículas que interagem via força forte residual. Os **Léptons**, como o elétron, são partículas “leves”, como o nome já indica, apresentando spin fracionário.

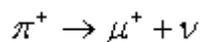
Tabela 2: Uma classificação das partículas (nem todas elementares)

Léptons	Hádrons	
Elétron (e^-)	Bárions	Mésons
Múon (μ^-)	Próton (p)	Píon mais (π^+)
Neutrinos (ν)	Nêutron (n)	Píon menos (π^-)
	E suas antipartículas	Píon neutro (π^0)
Tau (τ)		
Pósitron (e^+)		
E suas antipartículas		

Vamos aqui descrever um pouco sobre os **múons e neutrinos**.

Na procura dos píons, os físicos encontraram outra partícula, com massa 1/9 da massa do próton. Os múons, que são “primos pesados” do elétron, aparecem em dois tipos: um com carga elétrica positiva (μ^+) e outro com carga elétrica negativa (μ^-).

As reações abaixo representam os decaimentos mais prováveis (já que no mundo subatômico só podemos falar em probabilidades!) dos píons e dos múons, respectivamente:



[Decaimento 1]

⁴⁷ Esta classificação, como em Biologia, é chamada Taxonomia.

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu \quad \text{[Decaimento 2]}$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad \text{[Decaimento 3]}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu \quad \text{[Decaimento 4]}$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + 2\nu \quad \text{[Decaimento 5]}$$

onde a letra grega gama γ representa o fóton (luz).

O pión positivo usualmente decai da maneira mostrada primeiro decaimento. Mas, às vezes ele pode sofrer o seguinte decaimento:

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu \quad \text{[Decaimento 6]}$$

Os neutrinos que aparecem não são iguais. O neutrino produzido pelo decaimento do pión em múon é o neutrino do múon (ν_μ). Já o neutrino produzido no decaimento do pión em pósitron é o neutrino do elétron. Na verdade, é mais correto escrever estas equações como:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{[Decaimento 7]}$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e \quad \text{[Decaimento 8]}$$

Deve-se lembrar de também que os neutrinos estão associados ao elétron e ao múon. Então, por exemplo, quando um nêutron interage com um neutrino do múon, o resultado será um múon e nunca um elétron, conforme a equação abaixo:

$$n + \nu_\mu \rightarrow \mu^- + p$$

Idem para a interação nêutron-neutrino do elétron:

$$n + \nu_e \rightarrow e^- + p$$

Na verdade, existe mais um tipo de neutrino, que está associado ao tau (partícula descoberta só em 1975). Portanto, ao todo existem três neutrinos mais seus antineutrinos. Até o início dos anos 1960, novas partículas foram descobertas e, no ano de 1961, um novo modelo foi proposto pelos físicos **Murray Gell-Mann** e **Yuval Ne'eman** para classificá-las.



Figura 41: Murray Gell-Mann, um dos físicos responsáveis pelo Modelo Padrão das Partículas Elementares.
Extraído de: <http://www.nobelprize.org/portugues/physik/gell-mann.htm> .

Com o sucesso deste modelo, a analogia com a tabela periódica de Mendeleev foi imediata. Nos anos 1960-1970, com o desenvolvimento de novos aceleradores de partículas, o número de partículas cresceu de maneira assustadora. Mas, como puderam ser descobertas?

Atividade

Explorar o simulador de uma Câmara de Nuvens disponível no link: <http://www.kcvs.ca/site/projects/physics.html>. Observe os vários decaimentos a partir dos rastros deixados.

Leitura Complementar

- *O Discreto Charme Das Partículas Elementares*. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6284/12773> .

16. ACELERADORES DE PARTÍCULAS⁴⁸

16.1 Introdução

Antes de prosseguir no estudo das próximas partículas, descobertas mais tarde, vamos agora discutir o método experimental de detecção das **partículas subatômicas**. O que permitiu a Física de Partículas Elementares corroborar suas hipóteses? Como foi possível detectar tantas partículas?

No início, a maior parte das informações que tínhamos sobre as propriedades das partículas e dos núcleos vinha do estudo do decaimento de partículas instáveis, de núcleos e das reações entre os mesmos. Os experimentos eram feitos usando-se núcleos radioativos, analisando se as partículas emitidas e os seus espectros de energia. A partir das observações de raios cósmicos, foi possível um grande avanço na área de física de partículas, no entanto, a grande desvantagem na utilização de raios cósmicos é que os experimentos não podem ser controlados.

Mas, numa evolução dos tubos de raios catódicos, onde elétrons produzidos pelo aquecimento de um filamento eram acelerados, Ernest Lawrence, em 1936, inventou o **Ciclotron**, um acelerador de partículas carregadas que utiliza a conjugação de campos elétricos e magnéticos.

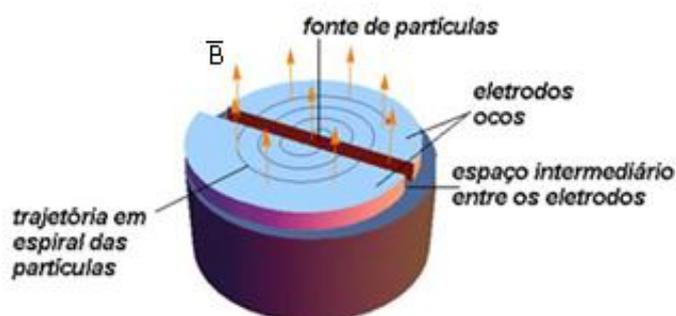


Figura 42: Ilustração de um Ciclotron. Extraído de: <http://www.mundoeducacao.com/quimica/acelerador-particulas.htm>.

A partir dos anos 1950 os aceleradores começam a dominar o campo da Física de Partículas, e novos tipos de detectores foram criados, como a **Câmara de Bolhas**⁴⁹ em 1956, que proporcionou a Donald Glaser visualizar as trajetórias das partículas num meio líquido.

A necessidade dos aceleradores de partículas para a Física de Partículas deve-se a várias razões:

- i) Para estudarmos e observarmos partículas subatômicas, o comprimento de onda de De Broglie ($\lambda = \frac{h}{p}$) deve ser pequeno, o que exige que o momento linear ($p = m.v$) ou, equivalentemente, a energia E das partículas seja grande!⁵⁰
- ii) A massa e a energia cinética das partículas que são artificialmente produzidas nos experimentos são obtidas a partir da energia das partículas participantes das

⁴⁸ Texto adaptado de Avancini e Marinelli (2009).

⁴⁹ Será discutida no próximo tópico.

⁵⁰ Isto se pode deduzir facilmente da relação entre a quantidade de movimento p e a energia relativística E :

$$E^2 = (p.c)^2 + (m_0c^2)^2.$$

- reações e, portanto, quanto maior for a energia, maior o número e tipos de partículas que podem ser criados.
- iii) Quanto maiores as energias envolvidas, mais nos aproximamos do desconhecido e mais exploramos as possibilidades de se encontrar novas partículas, além de testarmos as previsões feitas pelas teorias existentes.

16.2 Tipos de Aceleradores

Apesar de parecerem aparelhos muito complexos a nós (e de fato são), seu princípio físico é muito simples. No dia-a-dia, aceleradores de partículas rudimentares nos cercam: tubo de raios catódicos de televisores, lâmpadas fluorescentes, tubo de raios X.

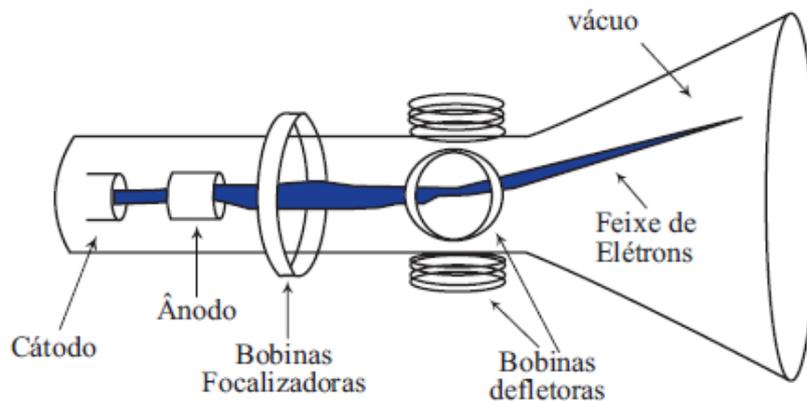


Figura 43: Ilustração de um tubo de raios catódicos.

Um tubo de raios catódicos, representado na figura 43, é um **acelerador de alvo fixo**. Nele, o feixe de partículas é direcionado a um alvo com uma dada energia. A voltagem utilizada em um tubo de TV é da ordem de 20 mil volts. Portanto a energia de cada elétron é da ordem de 20 keV. Isto pode ser comparado com a energia dos elétrons no acelerador LEP-CERN, que atingem cerca de 60 GeV !!!

Num acelerador tipo **Colisor**, dois feixes de partículas viajam em direções opostas para sofrerem uma colisão frontal.



Figura 44: Fotografia do LHC, ou o Grande Colisor de Hádrons, na Suíça. É um Acelerador tipo Colisor. Extraído de <http://physicsact.wordpress.com/2007/10/29/lhc-grande-colisor-de-hadrons>.

Em geral, nos aceleradores as partículas são aceleradas por campos elétricos e são direcionadas através de campos magnéticos. Note que esses campos, como bem sabemos, só vão agir sobre partículas carregadas.

As partículas são produzidas por uma fonte e, então, colimadas e injetadas em uma região onde existem campos elétricos e magnéticos que vão mantê-las nessa região até que obtenham a energia desejada. A fim de que não interajam com outras partículas enquanto estão sendo aceleradas elas são mantidas em regiões onde é feito vácuo.

Os dois tipos de aceleradores mais populares são os lineares e os circulares. Nos aceleradores lineares as partículas se movem em linha reta através de uma série de cavidades aceleradoras. Tais aceleradores têm a óbvia desvantagem de precisar de um longo comprimento para atingir altas energias.⁵¹

Os aceleradores circulares por sua vez aceleram as partículas através de campos elétricos e as curvam por meio de campos magnéticos. A energia desejada é obtida acelerando-se as partículas do feixe, forçando-a a dar várias voltas ao redor da circunferência do acelerador. A grande desvantagem desse tipo de acelerador é a radiação síncrotron. Como se sabe do Eletromagnetismo, toda carga acelerada irradia e, portanto, a partícula tem uma perda de energia devido a essa radiação, que terá de ser compensada acelerando-se ainda mais a partícula.

O exemplo de um moderno acelerador circular é o chamado **Síncrotron**. Neste acelerador as partículas se movem através de câmaras onde é feito vácuo e são mantidas em órbita circular através de ímãs supercondutores. A aceleração é obtida por meio de cavidades de radiofrequência, *RF*, que a cada volta dão um pequeno impulso à partícula, aumentando sua energia. O campo magnético, \vec{B} , é aumentado de maneira sincronizada à medida que a velocidade da partícula aumenta de modo que a partícula seja mantida em uma órbita circular fixa.

Por exemplo, em um síncrotron, prótons dão cerca de 5000 *voltas* e, em cada uma, recebem um incremento de energia da ordem de 0, 1 *MeV* da cavidade de *RF* até atingirem o pico de energia desejado. Na figura abaixo, tem-se uma representação esquemática de um síncrotron.

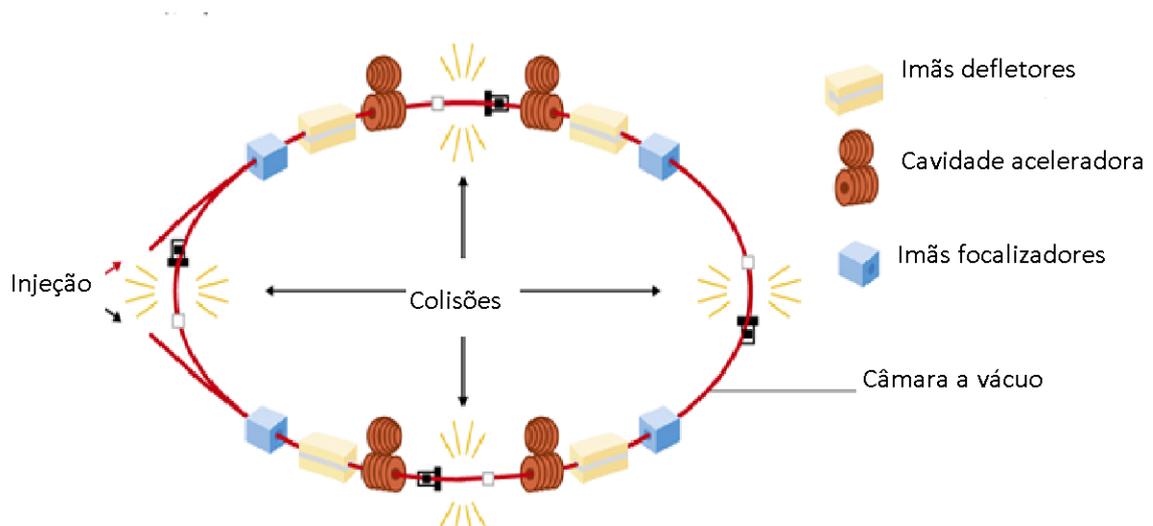


Figura 45: Esquema de um Síncrotron. Extraído e traduzido de <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Electromagnetismo/Electromagnetismo09.htm>.

⁵¹ Um exemplo de acelerador linear é o SLAC (Stanford Linear Accelerator Centre), nos EUA, que tem 3 km de comprimento.

16.3 Princípio Físico de um Acelerador Circular

Sabe-se do Eletromagnetismo Clássico, que toda carga elétrica q em movimento sujeita à ação de um campo magnético \vec{B} , sofre a ação de uma força \vec{F} (figura 46), cuja direção é perpendicular à direção da velocidade \vec{v} e do campo magnético \vec{B} , e cujo sentido é dado pela regra da mão direita⁵².

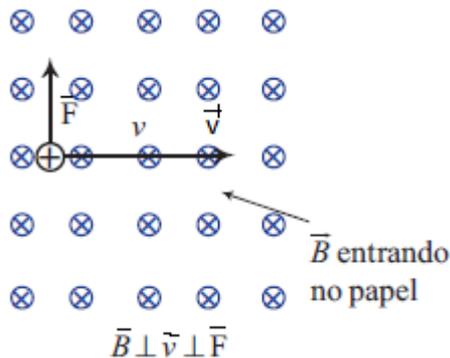


Figura 46: Carga elétrica positiva q submetida à ação de um campo magnético B .

Esta força é chamada **Força de Lorentz** e sua intensidade é calculada por meio da seguinte expressão:

$$F = q.v.B .\text{sen}\theta \quad [\text{Eq. 23}]$$

onde θ é o ângulo entre a direção do vetor velocidade \vec{v} e a direção do vetor campo magnético \vec{B} .

No caso em que a partícula se move perpendicularmente ao campo magnético ($\theta = 90^\circ$), a equação 23 se torna simplesmente:

$$F = q.v.B \quad [\text{Eq. 24}]$$

Como a força é perpendicular à velocidade, a partícula vai descrevendo um movimento circular de raio R , e a força magnética (ou força de Lorentz) desempenha neste caso o papel da resultante centrípeta do movimento. Lembre que, da Mecânica Newtoniana, o módulo da resultante centrípeta é dado por:

$$F_c = m.a_c = \frac{mv^2}{R} \quad [\text{Eq. 25}]$$

Logo, substituindo-se 25 em 24 e isolando R , temos:

$$R = \frac{m.v}{q.B} \quad [\text{Eq. 26}]$$

Aqui, convém expressar o raio da trajetória em função da quantidade de movimento p ($p = m.v$) da carga:

$$p = q.B.R \quad [\text{Eq. 27}]$$

⁵² Esta convenção é válida para carga positiva. Se a carga tem sinal negativo, deve-se inverter o sentido da força.

Portanto, vê-se que quanto maior a quantidade de movimento da partícula (e, portanto, maior sua energia cinética), maior é o raio de seu movimento. E, para mantê-la neste movimento de grandes raios, precisa-se de campos magnéticos mais intensos, o que exige ímãs supercondutores grandes e caros.

Para se ter idéia da dimensão de um acelerador, vamos imaginar que desejamos acelerar um próton até atingirmos a energia cinética de 1000 GeV e, que temos à disposição ímãs supercondutores de 5 *Teslas* (o campo magnético terrestre é da ordem de $0,5 \cdot 10^{-4} T$). Podemos estimar o valor do raio R, para estas condições da seguinte maneira. Multiplicando a equação 27 pela velocidade da luz c, vem:

$$R = \frac{p \cdot c}{q \cdot B \cdot c} \quad [\text{Eq. 28}]$$

Deve-se agora encontrar uma relação entre o raio R e a energia cinética K da partícula. Sabe-se que estas partículas viajam a velocidades muito altas (próximas à velocidade da luz), e, portanto, devem-se levar em conta os efeitos relativísticos. Na Teoria da Relatividade de Einstein, a energia total E de uma partícula é a soma de sua energia cinética com a chamada energia de repouso E_0 ($E_0 = m_0 \cdot c^2$):

$$E = K + m_0 c^2 \quad [\text{Eq. 29}]$$

onde m_0 é a massa de repouso (que é nula para o caso de fótons). Por outro lado, a teoria da Relatividade demonstra também a relação entre a energia total e a quantidade de movimento p:

$$E = \sqrt{(p \cdot c)^2 + (m_0 c^2)^2} \quad [\text{Eq. 30}]$$

Substituindo-se 30 em 29 e isolando o produto p.c, tem-se a seguinte equação:

$$p \cdot c = \sqrt{K^2 + 2m_0 c^2 K} \quad [\text{Eq. 31}]$$

Finalmente, levando 31 em 28, usando o fato de que, para o próton, o termo $m_0 c^2$ vale 938,3 MeV e substituindo-se os outros dados, obtemos para o valor do raio, $R = 670 \text{ m}$!

Nota

O raio do acelerador sincrotron TEVATRON no laboratório FERMILAB, nos EUA, que acelera prótons e antiprótons até energias da ordem de $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$, é de aproximadamente **1 Km.**

16.4 Detectores

Uma vez criadas nos aceleradores, através de colisões, as partículas são observadas nos detectores. Nestes, elas são identificadas através das medidas de suas propriedades, tais como, carga elétrica, spin, paridade, massa etc. Um método que foi, no início, muito utilizado para detectar as partículas é a chamada **câmara de bolhas**, construída em 1956, por Donald Glaser.

Uma câmara de bolhas consiste em um recipiente preenchido por um líquido superaquecido, isto é, um líquido à temperatura maior do que seu ponto de ebulição. O líquido pode ser hidrogênio ou hélio a temperaturas muito baixas, ou o freon ou propano à temperatura ambiente. Quando uma partícula ionizante passa através do líquido da câmara,

ela deixa um rastro de bolhas de gás marcando a sua trajetória com uma linha que pode ser fotografada. A figura 47 mostra um evento obtido com uma câmara de bolhas.

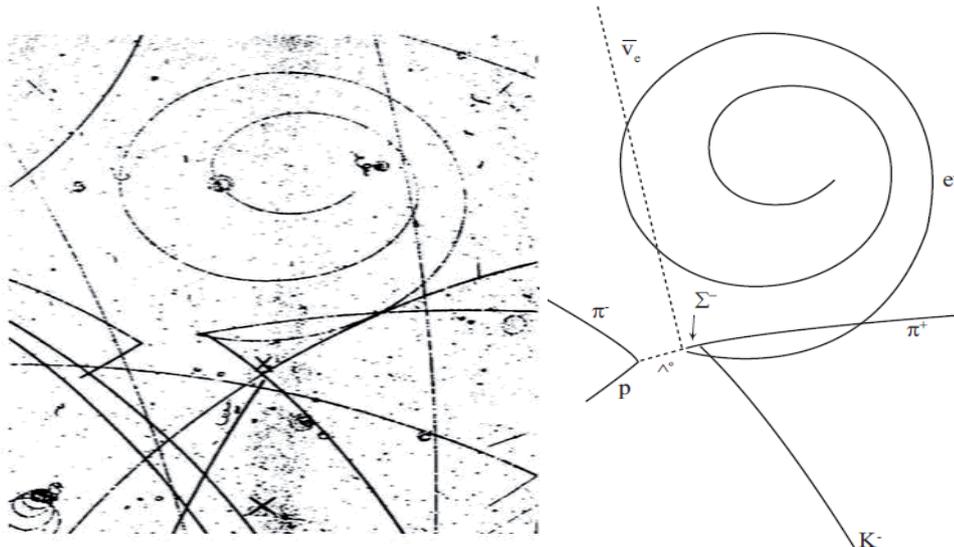


Figura 47: Evento em uma câmara de bolhas. Extraído de teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/.../bubble.ppt.

Hoje em dia a técnica de câmara de bolhas não é mais utilizada nos experimentos de altas energias. Atualmente utilizam-se, entre outras técnicas, os chamados **calorímetros**. O sentido de calorímetro neste caso é de um dispositivo que mede a energia total depositada pela partícula ou chuva de partículas.

Após a absorção da partícula incidente, ocorre a formação de um grande número de partículas secundárias, posteriormente terciárias, e assim por diante. No final, a maior parte da energia da partícula incidente foi transferida ao meio, o que justifica a denominação calorímetro.

Os calorímetros são denominados de acordo com o tipo de partícula que se deseja medir. Por exemplo, o calorímetro eletromagnético é o que mede a energia de fótons e léptons, e o calorímetro hadrônico, o que mede a energia dos hadrons. Um calorímetro típico pode ser feito de placas absorvedoras passivas (*Pb* ou *Fe*) com um material cintilador ativo entre elas, com a finalidade de medir a energia das partículas.

Os materiais cintiladores são certos materiais que emitem luz visível quando são atingidos por partículas carregadas ou fótons. Veja a figura 48.

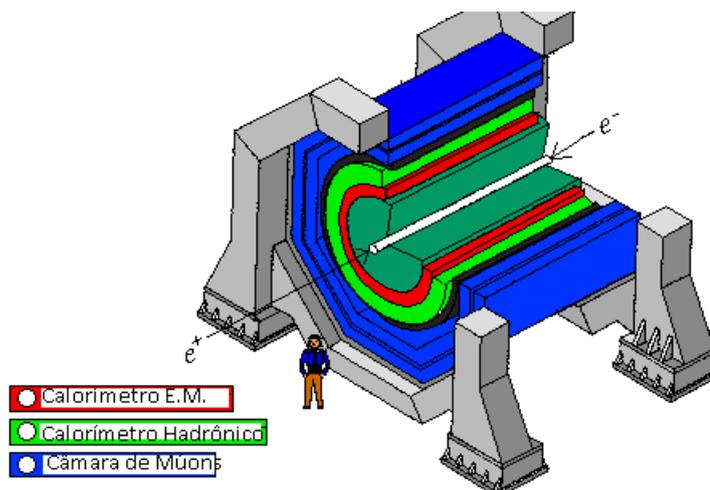


Figura 48: Ilustração de um Colisor e seus detectores (calorímetros eletromagnético e hadrônico e a câmara de múons). Adaptado e traduzido de <http://particleadventure.org/measure.html>.

Nos calorímetros, as partículas ou chuviros de partículas dissipam uma fração de sua energia, que surge como luz cintilante, que é acoplada a um detector de luz, tal como um tubo fotomultiplicador, e a um contador. Através da medida dessa energia dissipada, podemos inferir a energia da partícula, que é o que nos interessa.

Atividade

Essa atividade procura simular o funcionamento dos acelerados de partículas, mostrando os princípios básicos de funcionamento. Essa simulação se encontra no site: http://microcosm.web.cern.ch/microcosm/RF_cavity/ex.html

Questão

Deseja-se acelerar uma partícula até adquirir uma energia cinética de 10^{15} eV, usando um campo magnético de 5T. Determine o raio do movimento se esta partícula for um:

- a) Nêutron
- b) Elétron
- c) Píon

Leitura Complementar

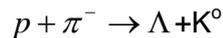
- *Partículas Elementares: Os meios de investigação experimental*. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol05a04.pdf>
- Mais detalhes sobre o LHC em: <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider> .

17. PARTÍCULAS E O MODELO PADRÃO

17.1 Partículas Estranhas

Como vimos, a partir de 1952, os físicos foram descobrindo muitas outras partículas diferentes, os káons e os híperons. Muitas destas partículas apresentavam comportamento muito estranho. Em 1953, três físicos japoneses, Nambu, Nishijima e Yamaguchi observaram o seguinte: o Λ se desintegra em $p + \pi^-$ com vida média de $2,6 \cdot 10^{-10}$ s. Se considerarmos a reação inversa, $p + \pi^- \rightarrow \Lambda$, ela deveria ocorrer num tempo igual, porque duas reações inversas ocorrem durante um mesmo tempo. Mas a reação $p + \pi^- \rightarrow \Lambda$ é uma interação forte, que ocorre durante um tempo de 10^{-24} s. Há, portanto, uma contradição entre o tempo de desintegração do Λ e o tempo para sua criação na colisão $p + \pi^-$. Além disso, elas sempre apareciam aos pares.

Os físicos japoneses sugeriram que a contradição desaparece se houver um mecanismo que proíba a reação $p + \pi^- \rightarrow \Lambda$. Por exemplo, se o Λ não for produzido só, mas associado ao K^0 , isto é, se a produção for



não haverá contradição entre os tempos de produção e de desintegração. Poucos meses depois da proposta, essa reação foi observada num experimento realizado com o acelerador Cosmotron, que acelerava prótons a 3 GeV, em Brookhaven, nos Estados Unidos. A figura 49 mostra a reação acima, observada em uma câmara de bolhas.

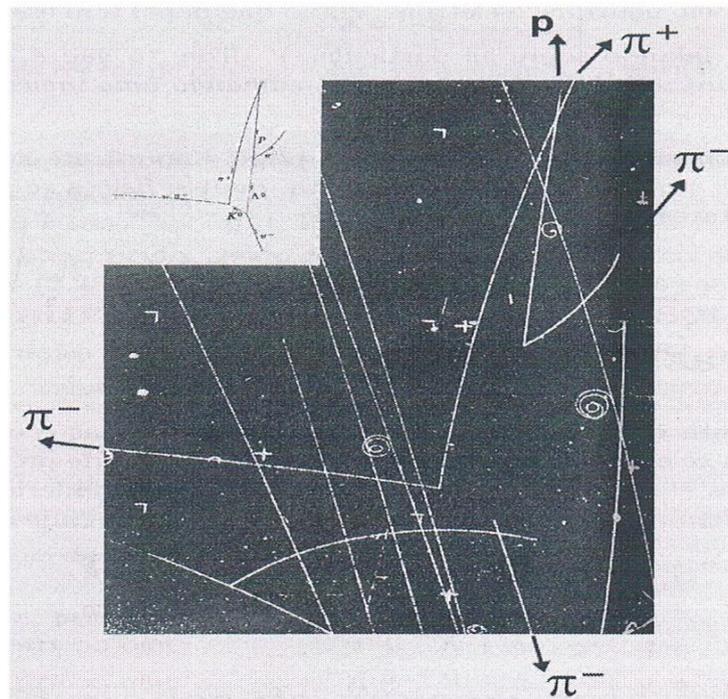
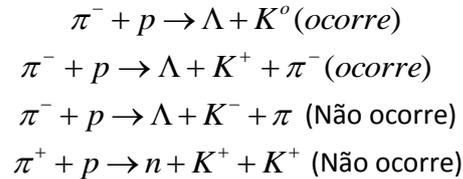


Figura 49: Eventos observados numa câmara de bolhas, mostrando a produção associada $p + \pi^- \rightarrow \Lambda + K^0$, com a desintegração do Λ em $p + \pi^-$ e do K^0 em $\pi^+ + \pi^-$ (fotografia do Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Califórnia). Extraído de CARUSO, F.

Verificou-se experimentalmente que certas reações de produção de partículas estranhas ocorrem na Natureza, e outras, que em princípio poderiam também existir, não ocorrem nunca, isto é, há **reações permitidas** e **reações proibidas**. Exemplos:



A existência de reações permitidas e proibidas leva-nos a pensar que deve haver regras de seleção. De todas as regras de seleção propostas, as que tiveram mais sucesso foram as de Murray Gell-Mann, que introduziu um novo **número quântico**: a **estranheza**.

Os valores da estranheza s propostos por Gell-Mann são dados na tabela 2:

Tabela 3: Valores do número quântico estranheza (s)	
Partículas	Valor de s
Núcleons, píons, léptons, fóton	$s = 0$
K^+, K^0	$s = +1$
K^-, \bar{K}^0	$s = -1$
$\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$	$s = -1$
Ξ^0, Ξ^-	$s = -2$
Ω^-	$s = -3$

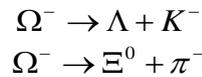
Gell-Mann propôs regras de seleção relativas à estranheza para interações fortes, fracas e eletromagnéticas.

- i) Numa interação forte a estranheza total é conservada
Exemplo: Na reação $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$
os valores de s são: 0 0 -1 +1
Portanto, s é conservado, sendo nulo antes e depois da reação.
- ii) Numa interação fraca a estranheza total varia de $\Delta s = +1$.
Exemplo: na desintegração do Λ , que é uma interação fraca,
$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

os valores de s são -1 0 0
e a variação de s é $\Delta s = 0 - (-1) = +1$.
- iii) Numa interação eletromagnética a estranheza é conservada
Exemplo: Σ^0 se desintegra em Λ e fóton
$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$$

 s se conserva, pois s é: -1 -1 0

Com este novo número quântico, a estranheza, os físicos previam a existência de partículas que ainda não tinham sido descobertas. Por exemplo, Gell-Mann pôde prever os seguintes modos de desintegração do Ω^- :



Por quê? Os sistemas $\Lambda + K^-$ e $\Xi^0 + \pi^-$ tem estranheza -2. Se a estranheza de Ω^- é -3, a regra $\Delta s = +1$ permite a desintegração do Ω^- nestes dois sistemas.

17.2 Classificação segundo o Modelo Padrão

A existência de centenas de novas partículas reforçou a idéia de que essas partículas não poderiam ser elementares e, sim, deveriam ter uma subestrutura que passou a ser procurada pelos físicos. A resposta final para esta confusão inicial foi o **modelo padrão**, desenvolvido nos anos 1970 e, hoje em dia, a **teoria oficial das partículas elementares**. Os seus ingredientes básicos são: **seis quarks**, **seis léptons**, as respectivas **antipartículas** e os **bósons de calibre**⁵³ (γ (fóton), g (glúons), Z e W), interagindo através das forças fraca e eletromagnética que, neste modelo, são descritas de forma unificada através da teoria eletrofraca e da força forte, como discutiremos melhor na seção Interações Fundamentais. Os quarks e léptons e os bósons de calibre (estes sim) são imaginados como as partículas fundamentais ou elementares (neste modelo!).

O modelo padrão, desenvolvido por Gell-Mann e Zweig propõe que os hádrons possuem três componentes, que Gell-Mann chamou **quarks**. Propuseram inicialmente três quarks, chamados **up**, representado pela letra **u**; **down**, representado pela letra **d**; e **estranho**, representado pela letra **s** (de strange).

Mais tarde, os físicos descobriram outros três quarks⁵⁴: **charm (c)**, **bottom (b)** e o **top (t)**, descoberto só em 1995, no grande acelerador do Fermilab, o Tevatron.

Também estão integrados ao modelo padrão os Léptons (elétron, múon e tau) e os seus respectivos neutrinos. A figura 50 apresenta os ingredientes do modelo padrão.

⁵³ Serão discutidos mais adiante.

⁵⁴ Essas formas de quarks são chamadas de sabores. Os Léptons também tem sabores, a saber: elétron, múon, tau, e seus respectivos neutrinos.

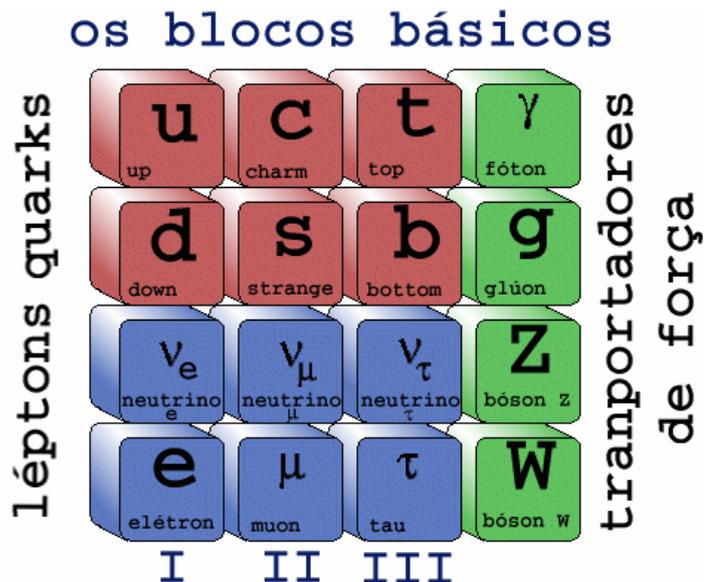


Figura 50: Partículas fundamentais do Modelo Padrão. Extraído de:
<http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm/Glossario/ModelPad.html>.

Este modelo introduziu uma ideia revolucionária, a de carga elétrica fracionada, isto é, a fração $1/3$ ou $2/3$ da carga elétrica do próton ou do elétron. No entanto, a teoria demonstra que os quarks não podem ser encontrados isolados, mas sim estão confinados dentro dos hádrons. Portanto, a carga elétrica fundamental continua sendo a do elétron (ou do próton).

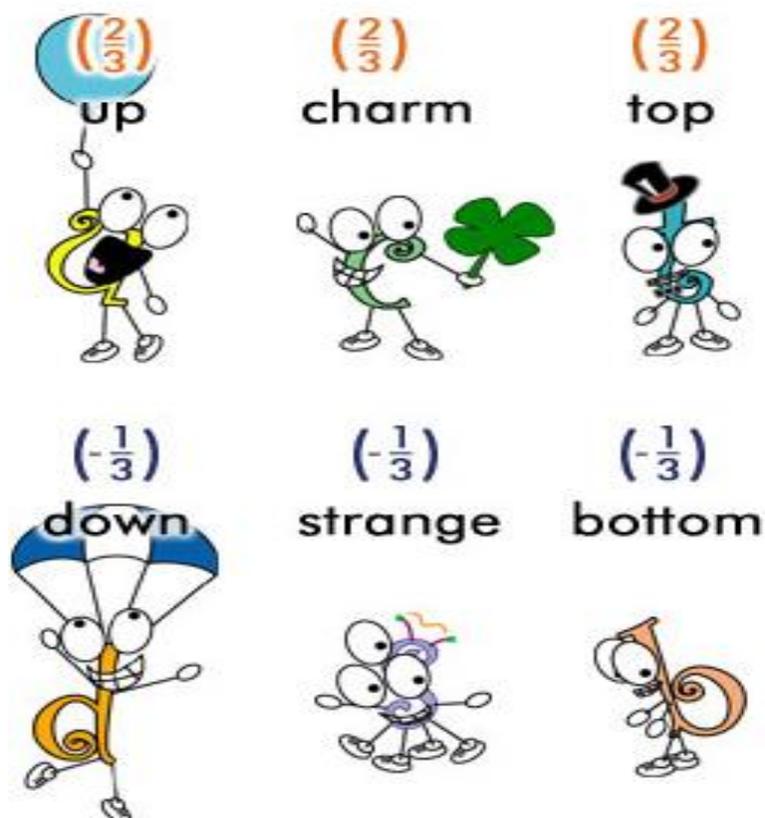


Figura 51: A carga elétrica dos seis quarks da natureza. Extraído de
<http://particleadventure.org/quarks.html>.

Os Quarks possuem spin fracionário (1/2). Logo, são férmions. Possuem estranheza nula ($s = 0$), exceto o quark estranho, que possui estranheza $s = -1$ e o anti-quark estranho, que possui estranheza $s = +1$.

No modelo de Quarks os Hádrons são subdivididos em duas subfamílias:

- i) os Bárions, que são formados por combinações de três quarks;
- ii) os Mésons, formados por um par quark-antiquark.

As tabelas 4 e 5 apresentam exemplos de Bárions e de Mésons, bem como seus símbolos.

Tabela 4: Alguns Bárions

Bárion	Símbolo
Próton	P
Antipróton	\bar{p}
Nêutron	n
Antinêutron	\bar{n}
Lambda	Λ^0
Sigma mais	Σ^+
Sigma zero	Σ^0
Antisigma zero	$\bar{\Sigma}^0$
Sigma menos	Σ^-
Antisigma mais	$\bar{\Sigma}^+$
Ksi zero	Ξ^0
Antiksi zero	$\bar{\Xi}^0$
Ksi menos	Ξ^-
Ômega menos	Ω^-

Tabela 5: Alguns exemplos de Méson

Méson	Símbolo
Pi zero	π^0
Pi menos	π^-
Pi mais	π^+
Rô	ρ^0
Êta	η^0
K mais	K^+
K menos	K^-
D zero	D^0
Anti D zero	\bar{D}^0
J/psi	J/ ψ
Fí	φ
Upsilon	Υ

Na figura 52 tem-se a composição de alguns Bárions.

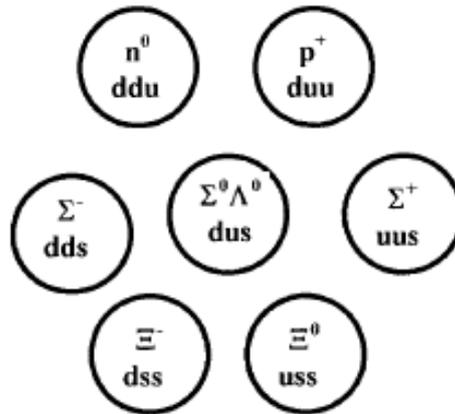


Figura 52: Composição de alguns Bárions.

Já a tabela 6 apresenta a composição de alguns Mésons.

Tabela 6: Composição de alguns Mésons

Mésons	Símbolo	Composição	
		Quark	Antiquark
Pi zero	π^0	u/d	\bar{u} / \bar{d}
Pi menos	π^-	d	\bar{u}
Pi mais	π^+	u	\bar{d}
Ro	ρ	u/d	\bar{u} / \bar{d}
Eta	η	u/d	\bar{u} / \bar{d}
K zero	K^0	d	\bar{s}
Anti K zero	\bar{K}^0	s	\bar{d}
K mais	K^+	u	\bar{s}
K menos	K^-	s	\bar{u}
Fi	ϕ	s	\bar{s}

Nota

Observando-se a figura 49, vê-se que os bárions Σ^0 (sigma zero) e o Λ^0 são formados pelos mesmos três quarks: u, d e s. Mas, como se sabe que, de fato, são partículas diferentes? A resposta é o spin. A figura 53 mostra os estados de spin nestas duas partículas.

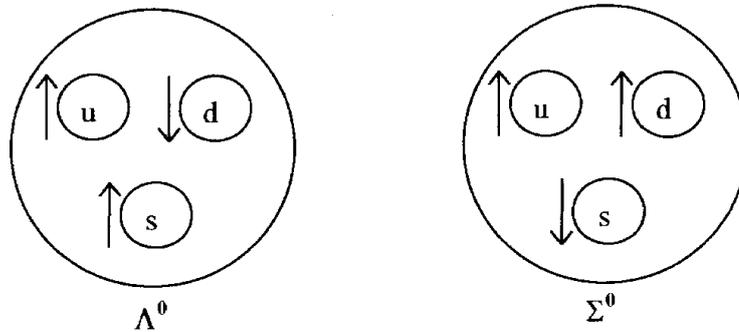


Figura 53: Representação dos spins nas partículas Λ^0 e Σ^0 .

A partícula Λ^0 tem os quarks u e d com spin opostos; o spin total é ainda 1/2. Já Σ^0 tem os quarks u e d com spins iguais. Assim, por suas diferentes configurações de spin de seus quarks, Λ^0 e Σ^0 são, de fato, partículas distintas.

17.3 Um novo Número Quântico: A Cor

Aqui surge um problema. Os quarks são férmions e, portanto, têm que respeitar o **princípio de exclusão de Pauli**, que afirma que dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico. O bárion Δ^{++} é formado por uma combinação de três quarks u e, portanto, vai violar o princípio de Pauli. Afinal, pensava-se que os quarks eram idênticos, porém a existência de certos hadrons indicou que, ou eles não eram idênticos, e haveria uma propriedade física para distingui-los, relacionada com uma das interações fundamentais, ou o princípio de Pauli seria violado e os quarks não poderiam ser férmions.

Neste caso fez-se a hipótese conservadora da existência de uma propriedade física que os distinguiria, a qual denominaram “**cor**” ou **carga de cor**, associada à interação forte. Se tal suposição está correta, então pode-se explicar porque elétrons e neutrinos não interagem via força forte.

A “cor” é similar à carga elétrica, exceto pelo fato de que pode ocorrer em três variedades: Vermelho (VM), Verde (VD) e Azul (AZ). A analogia das cores com as cargas elétricas levou a uma conclusão imediata: cores iguais se repelem; cores opostas se atraem. Assim, dois quarks vermelhos se repelem, enquanto que um quark vermelho e um antiquark antivermelho se atraem. Similarmente, azul atrai anti-azul e verde atrai antiverde.

Isto pode explicar a existência dos Mésons: assim como cargas elétricas positivas e negativas se unem para formar um átomo neutro, cores positivas e negativas, carregadas por quarks e antiquarks, atraem-se para formar **hádrons sem cor**.

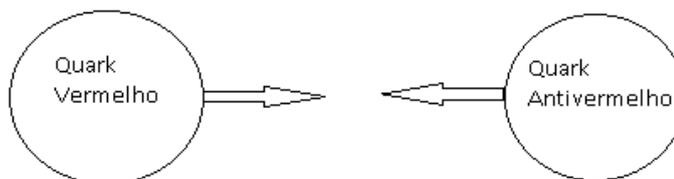


Figura 54: Um Méson é formado por quarks de cores opostas (que se atraem).

Quanto à cor, dois quarks vermelhos têm mesma cor e, portanto, se repelem. Mas, o que dizer sobre um quark vermelho e um quark azul? Foi proposto que estas duas cores diferentes podem atrair-se com uma intensidade menor que a atração entre cores opostas de um quark e um antiquark. Assim, um quark vermelho e um quark azul podem atrair-se, mas a atração é maximizada ao agruparem-se com um quark verde. Vermelho e verde, vermelho e azul, azul e verde atraem-se todos uns aos outros e assim o faz o aglomerado de três quarks que constitui os Bárions.

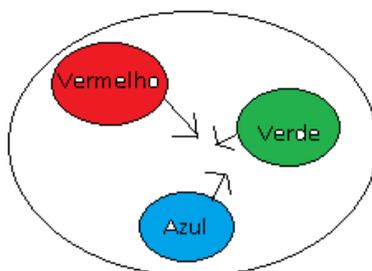


Figura 55: Um Bárion é formado por três quarks de cores distintas.

A interação forte, cuja fonte é a cor, mostra que os aglomerados quark e antiquark de cores opostas ou três quarks de cores diferentes são as duas possibilidades que permitem a formação dos hádrons "sem cor". Sistemas livres só aparecem de forma descolorida". Na natureza, a cor parece estar confinada em aglomerados (os mésons e os bárions) com cor resultante total nula, ou seja, considerados como um todo tais aglomerados não tem cor, são os chamados "sistemas brancos".

17.4 Interações Fundamentais da Natureza

Na natureza existem **quatro interações fundamentais**, das quais duas, as forças eletromagnética e gravitacional⁵⁵, são velhas conhecidas. O modelo padrão descreve as partículas elementares (léptons e quarks) interagindo através das forças forte, fraca e eletromagnética.

A **teoria eletrofraca** trata de forma unificada as forças fraca e eletromagnética do mesmo modo que o eletromagnetismo de Maxwell unifica as forças elétrica e magnética. A força forte é descrita através da teoria chamada **cromodinâmica quântica**. O modelo padrão engloba as teorias eletrofraca e cromodinâmica quântica.

Ainda é um gigantesco desafio para a física atual incluir em um mesmo modelo e, em pé de igualdade, a **força gravitacional** junto com as outras três interações. É evidente, a menos que haja situações extremas como, por exemplo, no momento da criação do Universo, que a interação gravitacional é desprezível no mundo das partículas elementares. A força eletromagnética age sobre todas as partículas carregadas e tem um comportamento que é bem conhecido.

⁵⁵ Ao mesmo tempo é a menos conhecida!

A figura 56 mostra como a matéria é vista de acordo com as dimensões envolvidas. As forças forte e fraca só vão agir quando a distância entre as partículas for da ordem de 10^{-14} m ou menos, por exemplo, no interior do núcleo atômico.

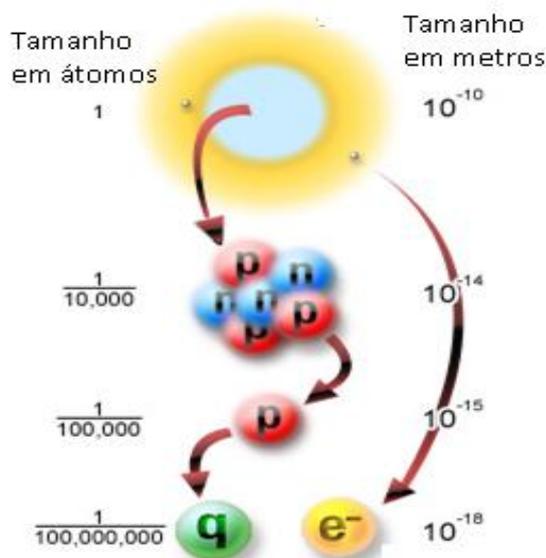


Figura 56: Ilustração das dimensões dos quarks e dos léptons. Extraído de <http://particleadventure.org/scale.html>.

No tópico 10 foi visto que se pode estimar de modo qualitativo as dimensões envolvidas na descrição de um objeto microscópico através do comprimento de onda de De Broglie.

A matéria pode ser vista como formada por átomos e/ou moléculas quando a ordem de grandeza das energias envolvidas é de alguns poucos elétrons-volts. Para os graus de liberdade de quarks se manifestarem, as energias envolvidas devem ser da ordem de GeV 's. A interação forte é de curto alcance, isto quer dizer que apenas a distâncias típicas do diâmetro nuclear, da ordem de 10^{-15} m, ela se faz atuante. A interação forte só age entre os quarks. Os léptons não a sentem, do mesmo modo que objetos neutros não sentem a força eletromagnética. Esta é a razão para se separar as partículas entre quarks e léptons. Se os léptons pudessem interagir fortemente então eles poderiam se ligar formando outras partículas compostas.

É claro que tanto quarks quanto léptons sentem as outras três forças. A força forte é tão intensa que é capaz de ligar os quarks, formando partículas (hádrons). Os quarks têm a peculiaridade de não existirem sozinhos, sempre aparecem em grupos, formando partículas maiores, os hádrons.

Hoje se entende que as forças que ligam os constituintes da matéria surgem de campos de força que estão associados à **troca (emissão-absorção) de partículas**, que são as **mediadoras da interação**. Tais partículas não são observadas e são chamadas de virtuais. No modelo padrão os mediadores são chamados de **bósons de calibre**. O fóton no eletromagnetismo é um desses bósons, e como discutimos no tópico 12, Yukawa imaginou o méson como sendo o mediador da força nuclear.

Viu-se, anteriormente, de que maneira a atração entre os quarks ocorre devido à sua cor. Esta interação ocorre mediada por uma partícula chamada **glúon**. Consistem em 8 partículas, de spin 1, e não tem carga elétrica, mas tem carga de cor. Na realidade, a interação entre quarks no interior dos hádrons ocorre porque estes estão constantemente intercambiando suas cores via troca de glúons. Diz-se que os glúons são uma espécie de "cola", unido os quarks.



Figura 57: Ilustração de um glúon. Extraído de <http://particleadventure.org/strong.html>

A Fig. 58 mostra um quark vermelho transformando-se em um azul através da emissão de um glúon cuja cor é "vermelho menos azul". Portanto, o próprio glúon possui cor.

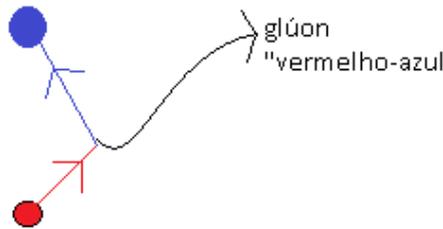


Figura 58: Interação de Quarks via troca de um glúon.

A Força Nuclear Fraca também é de curto alcance e está associada à transformação de partículas de um tipo em outro, como no decaimento beta. É sentida tanto por quarks quanto por léptons e tem uma intensidade muito menor que a força forte.

Por exemplo, sabe-se que um nêutron livre decai em um próton através do decaimento beta. Ao se comparar a vida média do nêutron, que é de cerca de 900 *segundos*, com a vida média de processos envolvendo a interação forte, como o decaimento do bárion Δ , em que tipicamente o tempo de decaimento é da ordem de 10^{-23} *segundos*, pode-se afirmar que o nêutron é praticamente estável.

As partículas mediadoras da interação fraca são os bósons massivos W^+ e W^- , que carregam carga elétrica e o neutro Z^0 . Esses mediadores podem alterar o sabor, isto é, transformar um quark de um sabor em outro, ao contrário da interação forte.

Por exemplo, no decaimento beta, que é um processo devido à interação fraca, o nêutron (udd) se transforma no próton (uud). Na figura 59 tem-se a representação do processo de decaimento beta, no contexto do modelo padrão.

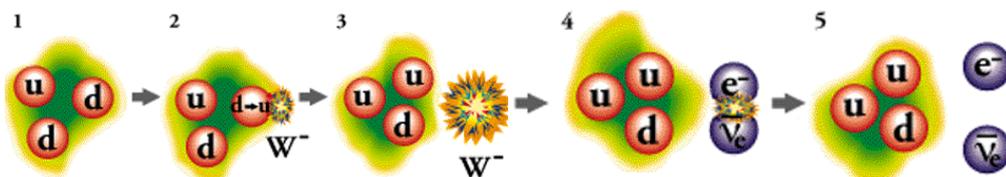


Figura 59: Ilustração do decaimento beta do nêutron. Um quark down torna-se um quark up emitindo o bóson W^- . Este por sua vez decai num elétron e num antineutrino do elétron. Extraído de <http://particleadventure.org>.

Já na figura 60, tem-se um diagrama descrevendo o decaimento beta.

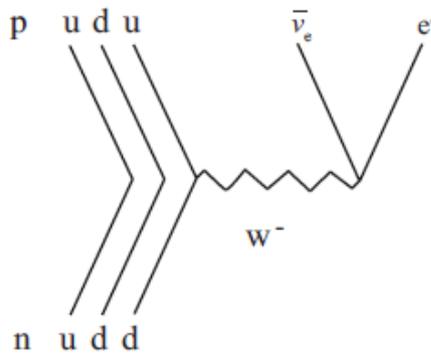


Figura 60: Diagrama representando o decaimento beta do nêutron em um próton, um elétron e um antineutrino do elétron, por meio do bóson W. Extraído de <http://particleadventure.org>.

A figura 61 resume as quatro forças fundamentais da natureza. No entanto, hoje a Gravidade continua sendo um problema para o Modelo Padrão. A suposta partícula mediadora da força gravitacional, o gráviton, ainda não foi observada experimentalmente.

	Gravidade	Força Fraca	Força Eletromagnética	Força Forte
transportada por	Gráviton	Bósons W ⁺ , W ⁻ e Z ⁰ .	Fóton (γ)	Glúon (g)
Age em	Tudo	Quarks e Léptons	Quarks, léptons carregados e bósons W ⁺ e W ⁻	Quarks e Glúons

Figura 61: As quatro forças fundamentais da Natureza. Adaptado de <http://particleadventure.org>.

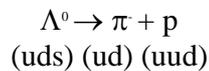
Atividade

- www.pbs.org/wgbh/aso/tryit/atom (atom build) - Simulação dos constituintes das partículas, os quarks, através da formação de alguns átomos.
- Vídeo sobre problemas não respondidos pela Física de Partículas, gravado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Disponível no endereço eletrônico: <http://www.cienciacuriosa.com.br/quais-sao-as-particulas-elementares/>.

Questões

- 1) Qual a interação fundamental responsável por:
 - a) Atrito
 - b) Ligação nuclear
 - c) Órbita dos planetas
- 2) Quais interações agem sobre:

- a) Neutrinos
b) Os prótons de nosso corpo
- 3) Quais os mediadores que não podem ser isolados? Por quê?
- 4) Quais os mediadores que ainda não foram observados? Os glúons foram observados?
- 5) Os glúons são partículas mediadoras da força forte e atuam em partículas que têm carga cor. Sabendo disso, seria possível os glúons interagirem entre si? Justifique.
- 6) Sabendo-se que para um quark mudar sua cor, ele tem que emitir um glúon. Qual é a cor e a anticor do glúon emitido para um quark azul se tornar verde?
- 7) Através do processo da força fraca, tente explicar a reação:



Leitura Complementar

- *Física Moderna E Contemporânea No Ensino Médio: Elaboração De Material Didático, Em Forma De Pôster, Sobre Partículas Elementares E Interações Fundamentais.* Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6795/6275> .
- *O Modelo Padrão da Física de Partículas.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/311306.pdf>.
- *As partículas Estranhas e as Ressonâncias.* Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol03a25.pdf>.

17.0 REFERÊNCIAS

ABDALLA, Maria Cristina Batoni. **O Discreto Charme das Partículas Elementares**. 1.ed. São Paulo: Editora UNESP. 2006.

AVANCINI, S.S. MARINELLI, J.R. **Tópicos de física nuclear e partículas elementares**. Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM, 2009. Disponível em: <http://nead.uesc.br/arquivos/Fisica/fisica-nuclear/topicos-fisica-nuclear-livro-texto.pdf>. Acesso em: fev. 2014.

BALTHAZAR, W. F.. **Partículas Elementares No Ensino Médio: Uma Abordagem A Partir Do LHC**. 2008. 119f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro. Nilópolis, 2008. Disponível em: <http://www.ifrj.edu.br/webfm_send/3046>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014]

CARUSO, Francisco. SANTORO, Alberto. **Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais**. 1.ed. São Paulo: Editora LF Editorial. 2012.

EISENBERG, RESNICK. **Física quântica**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

FEYNMAN, R., LEIGHTON, R., SANDS, M. **Lições de Física**. Edição definitiva. vol.3. Porto Alegre: Bookman, 2008.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos de Física**. 7 ed. vol. 2. Editora LTC, 2009.

MENEZES, Luíz Carlos De. **A Matéria: Uma Aventura Do Espírito (Física Conceitual)**. 1.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2005.

MOREIRA, Marco Antônio. **Física de Partículas: Uma abordagem Conceitual & Epistemológica**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2012.

_____. O Modelo Padrão Da Física De Partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 1306 (2009). Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/modelopadrao.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014]

_____. Um Mapa Conceitual Sobre Partículas Elementares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 11. 1989. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol11a10.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014]

OLIVEIRA, I.S. **Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados**. 1ª ed. vol.1. São Paulo: editora Livraria da Física, 2005.

PESSOA JUNIOR, O. **Conceitos de Física Quântica**. 3ª ed. vol.1 São Paulo: editora Livraria da Física, 2003.

PINHEIRO, L. A. **Partículas Elementares E Interações Fundamentais No Ensino Médio**. 2011. 313 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/49342/000836027.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 fev. 2013. [Atualizado em: 12/03/2014]

SIQUEIRA, M. R. P. **Do Visível Ao Indivisível: Uma Proposta De Física De Partículas Elementares Para O Ensino De Física**. 2006. 257 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Universidade de São Paulo. Instituto de Física e Faculdade de Educação. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.nupic.fe.usp.br/Publicacoes/teses/DissertMAXWELL.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2012. [Atualizado em: 12/03/2014]

Sites

<http://home.web.cern.ch/>. Acesso em: fev. 2014. [Atualizado em: 12/03/2014]

<http://particleadventure.org>. Acesso em: fev. 2014. [Atualizado em: 12/03/2014]

Propriedades detalhadas das partículas. Disponível em: <http://pdg.lbl.gov/>. Acesso em: fev. 2014. [Atualizado em: 12/03/2014]