

Thales Costa Soares
Humberto Belich Jr.
José Abdalla Helayel-Neto
 $z(1, 3)$

“Física de partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores” é o segundo livro proposto pelos professores Thales Costa Soares, Humberto Belich Júnior e José Abdalla Helayel-Neto como resultado dos Cursos tratando desta temática realizados no Centro de Ciências da UFJE, através do Programa Novos Talentos da CAPES. Neste novo livro, temos a introdução de dois novos capítulos, que ampliam o alcance da possibilidade de tratar da Física de Partículas no Ensino Médio, contribuindo assim de forma decisiva para que um assunto tão importante e presente no dia-a-dia, possa assim se tornar um conhecimento acessível aos estudantes deste nível de Ensino. Este livro é também material de apoio para professores de Física da Educação Básica, frente a sua linguagem clara e acessível, colaborando para sua formação continuada e a aplicação dos conceitos envolvidos em sala de aula. Temos a convicção de que é fundamental a atualização dos temas de Física trabalhados no Ensino Médio em nosso País. “Física de partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores” tem papel relevante na realização desta tarefa.

Eloi Teixeira César
Diretor Geral do Centro de Ciências

Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores



ISBN 978-85-7861-526-0



9 788578 615260

Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores



$$\log(2) = \lambda_0 \log(2) + i_2(2i\pi)$$

**Física de Partículas vista pelas
Interações Fundamentais e
Formação de Professores**





Thales Costa Soares
Humberto Belich Jr.
José Abdalla Helayel-Neto

Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores

Ilustrações: Adriano dos Santos
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Centro de Ciências - UFJF
Grupo de Física Teórica José Leite Lopes
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Universidade Federal do Espírito Santo



Copyright © 2018 Editora Livraria da Física
1ª Edição

Direção editorial
José Roberto Marinho

Capa
Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Soares, Thales Costa

Física de partículas vista pelas interações fundamentais e formação de professores / Thales Costa Soares, Humberto Belich Jr., José Abdalla Helayel-Neto; ilustração Adriano dos Santos. – 1. ed. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018.

Bibliografia
ISBN 978-85-7861-526-0

1. Física nuclear 2. Partículas (Física nuclear) 3. Professores - Formação I. Belich Junior, Humberto. II. Helayel-Neto, José Abdalla. III. Santos, Adriano dos. IV. Título.

18-12579

CDD-539.72

Índices para catálogo sistemático:

1. Física de partículas 539.72

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sem a permissão da Editora.

Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



Editora Livraria da Física
www.livrariadafisica.com.br

Agradecimentos

- Ao povo brasileiro, que, através da CAPES, financiou esse projeto.
- Ao professor e grande colaborador Sebastião Alves Dias, grande amigo e uma referência na formação de novos pesquisadores no CBPF.
- Ao professor Frederico Firmo de Souza Cruz, por sua dedicação na formação de professores e na luta em projetos para inserção da FMC no EM, que nos enriqueceu muito com referenciais teóricos que ajudaram no desenvolvimento do curso.
- Ao professor e Diretor do Centro de Ciências da UFJF Elói Teixeira César, coordenador do projeto, que realiza um belíssimo trabalho no Centro, de grande visibilidade, e nos mostra, a cada dia, com seu trabalho, a importância da divulgação científica.
- Ao incansável professor Ildeu de Castro Moreira, uma inspiração para a divulgação científica.
- Aos muitos professores que realizaram palestras nos cursos, todas inesquecíveis, especialmente: Emanuel

A. de Freitas, Sebastião Alves Dias, Ricardo Sibanto Simões.

- Ao Prof. Edson Reinher, que nos brindou com Bachelard, autor que muito nos influenciou na escrita do texto.
- Aos que nos ajudaram no desenvolvimento do curso, especialmente os professores Tancredo, Cyro, Alan, Gilberto, Breno e Rubinho e as estudantes Walquíria de Joyce.
- Ao amigo José Amâncio pela grande ajuda na finalização do Latex

a todas as crianças, em especial Anita e Antônio



Sumário

Introdução	7
1 A Física de Partículas vista Pelas Interações Fundamentais	11
1.1 Resumo	12
1.2 Introdução:	12
1.3 Metodologia	16
1.4 Resultados e conclusões	20
2 As Partículas Elementares e as Interações Fundamentais	23
2.1 Partículas Elementares	23
2.2 O Átomo	25
2.3 O Interior do Átomo	28
3 Rediscutindo as Interações	31
3.1 Uma Visão Contemporânea	31
3.2 Um pouco mais de QED	39
4 Partículas Elementares e Modelo Padrão	45
4.1 Bósons e Férmions	45
4.2 Partículas Elementares	47
4.3 Os Decaimentos Nucleares	48
4.4 O decaimento- α	51
4.5 O decaimento- β	52
4.6 Outros decaimentos	54
5 Modelo Padrão da Física de Partículas	65

5.1	Modelo Eletrofraco	71
5.2	Interações Fortes	77
6	A Construção de um paradigma da física teórica: A teoria de Yang-Mills-Shaw.	83
6.1	Resumo	84
6.2	Introdução	85
6.3	Antecedentes da Teoria de Yang-Mills-Shaw	86
6.4	A teoria de Yang-Mills-Shaw	89
6.5	Os desdobramentos da teoria de Yang-Mills-Shaw	91
6.6	Comentários Finais	93
6.7	Agradecimentos	93
6.8	Referências	93
7	Os Autores	95
7.1	José Abdalla Helayel-Neto	95
7.2	Thales Costa Soares	97
7.3	Humberto Belich Jr	98

Introdução

A INTRODUÇÃO À FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA no Ensino Médio tem sido buscada há algumas décadas. Em particular, alguns trabalhos abordam a Física das Partículas Elementares do ponto de vista acadêmico, e alguns poucos textos em livros didáticos estão dedicados ao Ensino Médio. Entretanto podemos observar que, apesar de as pesquisas apontarem para a necessidade de uma nova Física no Ensino Médio, em que a FMC tenha um papel relevante na formação básica, percebemos que ela ainda se encontra muito distante de se tornar uma área de conhecimento a ser trabalhada nessa modalidade de ensino. Muitos são os motivos. Pesquisas revelam que esses conhecimentos não são trabalhados de maneira satisfatória nos cursos de formação de professores, e precisam urgentemente de reformulação. Para tentar reduzir esse hiato, têm sido implementadas muitas ações coordenadas por órgãos estaduais e federais, como ministérios, secretarias e seus órgãos de apoio e fomento, como CAPES, CNPq, FAPEMIG, FAPERJ, FAPESP, entre outros. No mesmo esforço, sociedades, como a Sociedade Brasileira de Física (SBF), centros de divulgação científica e ações de demanda induzidas foram criados com o objetivo de aproximar os centros de pesquisa e seus pesquisadores dos professores e estudantes do Ensino Básico.

Vale lembrar que, de uma ação induzida, como a que nos referimos, surgiu esse texto, fruto de dois cursos oferecidos no Centro de Ciências da UFJF. O primeiro curso, um curso de Física de Partículas para estudantes de escolas públicas de Juiz de Fora e Região, e um segundo curso, oferecido como formação continuada, para professores de Ensino Médio de escolas públicas de Juiz de Fora e Região. O nosso projeto foi fomentado pela CAPES através do Edital Novos Talentos, como parte do projeto “Novos Caminhos para o Ensino de Ciências”.

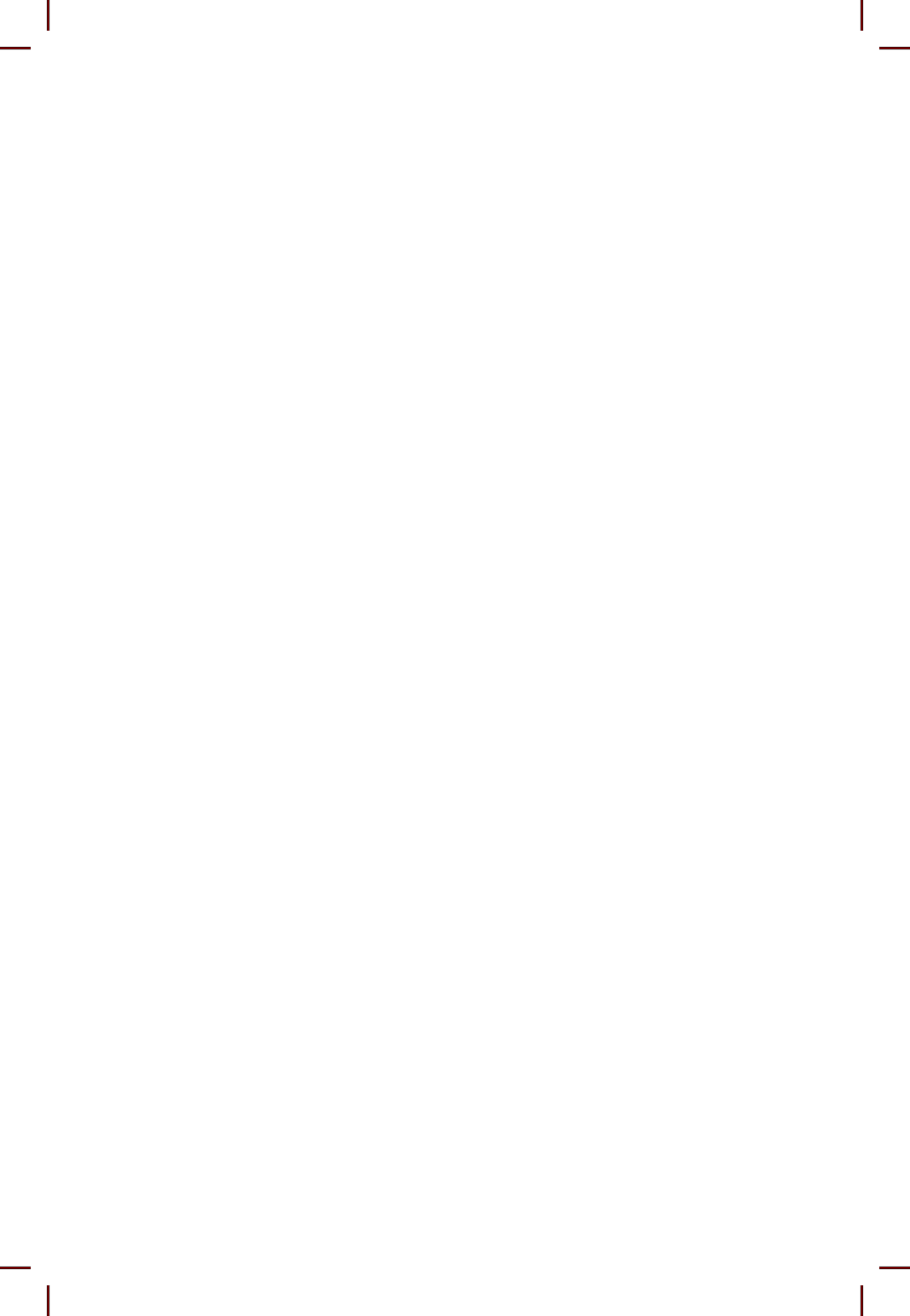
Este texto final é fruto das experiências trocadas nesses cursos. Na verdade, esse trabalho não se encerra aqui, apenas abre caminho para novas propostas. Buscamos, aqui, apenas sintetizar algumas ideias que trabalhamos ao longo do curso por meio de discussões interessantes nas aulas. Este não tem a pretensão de ser um texto final de aplicação no Ensino Médio, tampouco para formação de professores, mas um instrumento auxiliar a ser visto como uma espécie de trabalho de divulgação científica. Incompleto do ponto de vista da divulgação de uma visão teórica, de uma teoria física, mas que entendemos ter sua relevância, na medida em que foi gerado a partir da experiência didática, de nosso sentimento do que foi produtivo em nossas discussões junto aos estudantes do Ensino Básico e junto aos professores que participaram do curso. É um trabalho pautado na experiência, e as discussões incluídas foram aquelas que geraram uma boa resposta em nossas turmas.

Nosso texto é norteado pelo programa mais bem sucedido da Física Teórica de Altas Energias, conhecido como o Modelo Padrão da Física de Partículas, tendo sido o mesmo foco dos nossos cursos. O Modelo Padrão da Física de Partículas trata dos constituintes Fundamentais da matéria, as Partículas Elementares e das Interações a que essas partículas estão sujeitas.

A partir do modelo, pode-se compreender como estruturas mais complexas se formam na natureza, bem como processos de decaimento, muito comuns para a Física de Altas Energias. Nosso texto está dividido em duas partes. A primeira trata das partículas, suas características e propriedades básicas. A segunda parte trata das Interações Fundamentais e do papel dessas interações para compreensão do mundo subatômico. Temos, ao longo do texto, uma abordagem não de história da ciência, mas uma abordagem que se apoia no curso da história de textos que foram de reconhecida importância para a Física de Altas Energias e que consolidaram nossa visão acerca da Física Contemporânea. Ressaltamos que essas duas partes não são marcadas em forma de subdivisões do texto discutidas em separado, mas elas se entrelaçam o tempo todo para mostrar suas interconexões.

Esperamos poder, de alguma forma, contribuir com uma linha de debate tão rico e importante que é o trabalho de conteúdos de FMC no Ensino Médio.

Boa leitura, e, por favor, para sugestões e críticas ao texto, enviar e-mail aos autores.



CAPÍTULO

1

A Física de Partículas vista Pelas Interações Fundamentais

Reproduzimos aqui parte do que foi apresentado no EPEF como proposta de um curso voltado para professores em serviço visando atualização no tema. Hoje entendemos que nossa proposta de abordagem de Física de Partículas no Ensino Médio deveria ser pelo programa das Interações Fundamentais. O Objetivo desse capítulo é de discutir tanto os princípios que nortearam a nossa proposta bem como mostrar como o curso foi estruturado.

1.1 Resumo

Esse trabalho é parte de um projeto de inserção de Física de Partículas no Ensino Médio. Em 2011, iniciamos como um projeto de divulgação científica financiado pela CAPES-Novos Talentos, chamado novos caminhos para o ensino de ciências, em que apresentamos um curso de física de partículas para alunos do ensino médio das escolas públicas de Juiz de Fora e região. A partir desse curso, entendemos que nossa atuação também deveria se estender aos professores, que formados no tema, tornar-se-iam multiplicadores. Com isso, apresentamos um curso de extensão para professores do ensino médio das escolas públicas de Juiz de Fora e Região.

Como linha de abordagem, utilizamos o programa teórico da Física das Interações Fundamentais como fio condutor para explorarmos o tema das partículas elementares. Abordamos alguns conceitos-chaves dentro da física de altas energias, como as simetrias e leis de conservação, fundamentais para a construção da visão teórica acerca do desenvolvimento dessa área da física. Seguimos a linha histórica, por entendermos que os problemas apresentados ao longo do seu desenvolvimento permitem melhor compreensão do que são os seus conceitos e princípios fundamentais. Nesse trabalho pretendemos relatar o desenvolvimento do curso.

Palavras-chave: Modelo Padrão, Interações Fundamentais, Epistemologia Bachelardiana

1.2 Introdução:

A introdução de Física de Partículas no Ensino Médio se insere em um esforço conjunto de transposição didática de conteúdos de Física Contemporânea para o ensino médio. O grande volume de publicações que a justificam como po-

demos encontrar no trabalho de revisão de Pantoja (2011), dispensa, nesse trabalho, argumentação inicial, e o coloca já no contexto de sua necessidade. Partindo dessa premissa, nossa escolha pela física de partículas é feita em função da nossa formação em pesquisa aprofundada nessa área de conhecimento e o sentimento que podemos prestar alguma contribuição em tema tão necessário: a formação inicial e continuada de professores de Física.

Partindo da leitura de trabalhos pioneiros, como o de Moreira (2011) e Ostermann (1999), encontramos lá toda nossa inspiração e o fio condutor de nossa proposta, e na obra de Bachelard a justificativa do nosso curso e de sua organização.

No texto “Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica”, Moreira (2011), fazendo uma revisão de trabalhos anteriores seus e de colaboradores, propõe uma abordagem dos conceitos de Física de Partículas e Interações Fundamentais consistente com o Modelo Padrão da Física de Partículas, bem como a sua fundamentação didático-pedagógica.

Entretanto, o tema de Física de Partículas e das Interações Fundamentais é muito rico e cheio de nuances. Trata-se da visão teórica de física mais rica do século XX e lançadora de grandes questões teóricas, experimentais, etc..., tornando-se uma fonte inesgotável de discussões. Dessa forma, os trabalhos anteriormente citados devem ser visto como um grande projeto a ser ainda mais detalhado, o que tornaria essa uma tarefa hercúlea para poucas pessoas, e que podemos prestar alguma contribuição nessa área.

Entendemos, portanto, que o nosso projeto trabalho, a nossa linha de pesquisa, está inserida no mesmo referencial teórico, em que podemos pontuar a nossa contribuição científica no detalhamento de conceitos importantes para a compreensão aprofundada do tema, sem perder o horizonte

de que a nossa proposta se apresenta na forma de um curso de formação inicial e/ou continuada de professores.

Além dos referenciais acima, também trouxemos a epistemologia de Bachelard como um importante referencial estruturante da nossa abordagem e discussão acerca do desenvolvimento histórico da Física de Partículas.

A Física de Partículas Vista Pelas Interações Fundamentais – Referencial Teórico

Para a discussão do nosso referencial teórico, intencionalmente introduzimos os conceitos abordados. Isso porque a nossa escolha, de introdução da Física de Partículas via Interações Fundamentais, tem seu fundamento na Epistemologia de Bachelard, sobretudo em sua visão de como a Física Contemporânea se desenvolve.

A imensa obra de Gaston Bachelard vem lentamente ganhando terreno entre epistemólogos e educadores em Ciências. Diferentemente das epistemologias das escolas anglosaxãs, a epistemologia histórica de Bachelard é também uma psicanálise do conceito e uma pedagogia, no momento em que considera que não há uma racionalidade anterior que valide o conhecimento científico. O epistemólogo investiga a racionalidade regional própria de cada ciência após seu desenvolvimento, construindo uma racionalidade a partir do conhecimento construído por aquela ciência.

Diferentemente de outros trabalhos, as reflexões de Bachelard sobre a ciência contemporânea, desenvolvidas a partir de “O Novo Espírito Científico” serão essenciais para guiar este curso de Física de Partículas. Já após a descoberta das primeiras partículas atômicas, Bachelard renega as concepções substancialistas destas partículas (coisismos) e a firma que a nova Física realiza, mais do que descobre estas partículas. Esta realização das partículas é consequência das teorias que as predizem. Neste sentido, a ciência contemporânea é

uma ciência de “efeitos”, ou seja, uma ciência em que suas teorias são capazes de prever uma ação. Esta ação da teoria, é realizadora de um efeito mais do que descobridora de um fato. Cada partícula é “realizada”, ou seja trazida ao real, de antemão por uma teoria, diferentemente da ciência clássica onde relações empíricas ficavam a espera de uma teoria. Esta capacidade frutífera da teoria, em gerar fenômenos a partir de suas próprias relações matemáticas, Bachelard dá o nome de fenomenotecnia. Para ele: “Na fenomenotécnica, nenhum fenômeno parece naturalmente, nenhum fenômeno é de primeiro aspecto, nenhum é dado.” (G. Bachelard, 1965)

São vários os exemplos da Física de Partículas que corroboram essa visão. Como nossa justificativa da Física de Partículas é feita a partir das Interações Fundamentais, o momento em que isso fica mais claro, é a partir da Teoria Quântica de Dirac para a interação eletromagnética, em que se constitui o paradigma contemporâneo da Eletrodinâmica Quântica (QED). Um dos resultados desta teoria é a previsão da existência do pósitron.

Até Dirac lançar as bases da QED, sua busca era construir uma teoria quântica para o elétron em que a teoria da relatividade restrita estivesse incorporada desde a sua formulação, e não entrasse na teoria como uma correção apenas, como fazia Schroedinger. A sua abordagem era fundamentada em princípios filosóficos e matemáticos de simetria e de teoria de grupos. A sua visão epistemológica de Física era muito distinta de visão de Heisenberg. Enquanto Dirac defendia que os princípios matemáticos deveriam nortear uma formulação teórica, Heisenberg defendia que os observáveis deveriam ser os guias de uma teoria física.

Uma das consequências da formulação formalista e matemática de Dirac era a previsão de uma partícula, na verdade uma anti-partícula. Se inicialmente esta era um problema

de sua teoria, transformou-se mais tarde em seu triunfo. E desse triunfo, uma forma de fazer física então se consolidava, podendo sua metodologia ser estendida e gerar muitas outras concepções teóricas promissoras, como a Interação Nuclear Forte, a Interação Nuclear Fraca, os Píons de Yukawa, os Quarks de Gell-Mann, os mediadores das interações forte (gluons), fraca (W^+ , W^- , e Z^0) e a previsão de existência de muitas outras partículas.

Boa parte dessas discussões podemos encontrar nos trabalhos de Moreira e Ostermann. Mas nós entendemos que muitos pontos precisam ser detalhados para uma compreensão mais profunda, em se tratando de cursos de formação.

Portanto nossa proposta foi, partindo das interações fundamentais, destacar os conceitos que são chaves para compreensão do mundo subnuclear, dos constituintes mais elementares da matéria, nos amparando em uma perspectiva Bachelardiana. Elaboramos um curso para professores do Ensino Médio das Escolas Públicas de Juiz de Fora e região cujo objetivo era introduzir a Física de Partículas não de uma maneira informativa, mas tratando os conceitos matemáticos, transpondo-os e tornando acessíveis à realidade de professores em exercício

1.3 Metodologia

O curso apresentado foi dividido em duas partes. A primeira parte do curso revisava conteúdos matemáticos necessários à compreensão do tema. Uma pequena introdução à teoria de grupos foi apresentada, a partir dos axiomas básicos que definem um grupo. Os conceitos de geradores de um grupo e de suas representações também foram abordados. Usamos como exemplos de aplicação os grupos $U(1)$, $SU(2)$ e o $SU(3)$.

Esses grupos foram estudados bem como as suas álgebras correspondentes. O Grupo de Lorentz também foi discutido, assim como a forma de obtenção das transformações de Lorentz.

A formulação Lagrangiana da mecânica foi discutida conceitualmente para que se ficasse contextualizada a ação e o lagrangiano em uma teoria de campos, sendo possível a compreensão do que seja um lagrangiano escalar sob as transformações de Lorentz, fundamental para a compreensão da física das interações fundamentais.

Dos três grupos discutidos, uma ênfase especial foi dada ao grupo $SU(2)$, por estar relacionado ao spin de uma partícula, ao grupo de simetria das interações fracas, a relativa facilidade em que se obtém os geradores desse grupo e a possibilidade de facilmente fazer a sua ligação dos geradores com os mediadores das interações fracas.

Uma observação importante, para os não familiarizados com a teoria de grupos, que se trata de uma matemática bastante acessível, que pode ser verificada em nossa avaliação no questionário qualitativo respondidos pelos professores que frequentaram o curso. E a boa compreensão desses conceitos, favorecem a compreensão do programa da física das interações fundamentais desenvolvidos por Moreira e Ostermann, novamente verificados nos questionários qualitativos.

A partir da formação dessa base conceitual matemática, partimos para a construção do discurso do programa da Física das Interações Fundamentais, partindo da equação relativística do elétron e posteriormente do acoplamento do elétron com o campo eletromagnético, dando origem a eletrodinâmica quântica (QED).

Boa parte do curso foi dedicada à compreensão da QED porque entendemos que essa teoria forma a base de compreensão de elementos que são essenciais ao Modelo Padrão

da Física de Partículas (MPFP). São cinco estes elementos essenciais:

1. o papel de uma simetria de calibre e os mediadores das interações em uma teoria;
2. os geradores de uma interação fundamental;
3. o que é uma interação fundamental;
4. a natureza do spin de uma partícula;
5. a renormalização de uma teoria física .

A partir dessa discussão, entendemos que a QED lança as bases para se discutir as próximas interações que serão úteis para a compreensão do MPFP.

A questão da estabilidade nuclear entra como o elemento de inserção das novas interações fundamentais, tanto a interação forte quanto a fraca. A coesão do núcleo, composto por partículas que, vistas apenas pela interação eletromagnética, não a possibilitam, induzem a descoberta do nêutron, cuja massa é muito próxima do próton. A interação forte é colocada dentro do mesmo contexto da QED, como uma interação de calibre com os nucleons ocupando um dublete de $SU(2)$. A maior novidade da nossa discussão está na ligação que estabelecemos com a natureza do spin das partículas nucleares e essa nova interação, fato que é pouco explorado e percebido nos textos didáticos, inclusive aos direcionados para a formação de pesquisadores em Física. Fazemos esta conexão, discutindo um artigo de Heisenberg de 1932 (HEISENBERG, 1932).

No curso, a discussão da interação forte passa pela teoria de Yukawa, mas sempre sob o prisma da formulação de calibre, que em nosso entendimento foi o fio condutor que mais influenciou o desenvolvimento dessa Física.

Em Yukawa (YUKAWA, 1935), discutimos a inserção dos mediadores escalares massivos, devido ao curto alcance da interação forte e como ele calculou a massa desses mediadores

bem como a necessidade de se apresentar em três variedades de cargas elétricas para que a interação forte nuclear fosse sempre atrativa. A questão experimental também é tratada e um destaque é dado às contribuições de Cesar Lattes.

No curso também discutimos como a retomada da ideia de Heisenberg é feita em 1954 por C. N. Yang e R. Mills (YANG-MILLS, 1954). Discutindo o artigo de Yang-Mills, abre-se a discussão, que na verdade se inicia na década de 30, das interações nucleares fracas, proposta por Fermi no estudo do decaimento beta.

Nesse ponto, voltamos a década de 30 e as contribuições a respeito da proposta de uma nova partícula para que o decaimento beta fosse compreendido, que são os neutrinos. Nesse ponto, o curso passa ter um foco um pouco diferente, dado aos experimentos de alta energia, dando ênfase às novas partículas que vão surgindo e os processos de decaimentos nucleares e suas regras de conservação. Com toda a discussão anteriormente feita, a questão das regras de conservação e os grupos de simetria já estão estabelecidos, podendo mostrar como ideias fundamentais, como a proposta dos quarks que são medidos experimentalmente, podem surgir de bases teóricas.

As interações fracas, e os decaimentos nucleares, são desenvolvidos dentro de uma perspectiva histórica, mostrando as novas descobertas, até novamente se chegar na década de 50, com A. Salam (SALAM, 1957) retomando a ideia de Yang-Mills para as interações fracas.

Nesse ponto, o curso agora, já trabalha com as duas interações simultâneas e as descobertas que vão surgindo, até que se construa a Teoria Eletrofraca e o Modelo Padrão da Física de Partículas.

1.4 Resultados e conclusões

O curso apresentado foi desenvolvido no Centro de Ciências da UFJE, como parte do projeto “Novos Caminhos para o Ensino de Ciências”, na chamada CAPES – Novos Talentos. Tratava-se de um curso de extensão para atualização de professores da rede Pública de Juiz de Fora e Região.

Presentes no curso foram no total de 6 professores que se apresentam sem que tenham qualquer redução de carga de trabalho ou recebimento de alguma remuneração. Dos presentes, todos os professores eram do gênero masculino, o que nos mostra a questão de gênero ainda fortemente presente. Dos 6 professores presentes, dois professores atuam exclusivamente em escola pública, e os demais atuam também na rede particular. Apenas uma pergunta foi feita em que eles tinham um espaço livre para resposta, e foram selecionadas três respostas ilustrativas. Percebemos, tanto pela enquete como pela nossa convivência semanal que os professores recentem muito da pouca atualização curricular nos cursos de licenciatura em física, fortemente voltada para o ensino da mecânica clássica (Mecânica newtoniana, Termodinâmica Óptica e Eletromagnetismo) e pouquíssimo contato com a física contemporânea. Esse fato está sendo explorado em um trabalho que estamos desenvolvendo junto a esses professores de avaliação qualitativa.

Agradecimentos: os autores agradecem à CAPES-Novos talentos e ao CNPq pelo apoio financeiro

Referências

BACHELARD, G. *L'Activité Racionaliste da Phisique Contemporaine*. PUF, 1965.

BACHELARD, G. *O novo espírito científico. Os pensadores.* / trad. Joaquim José Moura Ramos. São Paulo: Abril Cultural, 1979, p. 89-179.

COSTA-SOARES, T., BELICH Jr, H., HELAYËL-NETO, J. A. . A Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais, CAPES, 2013, 66p.

DIRAC, P. M. A. , The Collected Works of P. A. M. Dirac: Volume 1: 1924-1948.

MOREIRA, M. A. Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011, 149p;

OSTERMANN, E. Um texto para professores do ensino médio sobre partículas elementares. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 21, n.03, p. 415-436, 1999.

PANTOJA, G. C. E.; MOREIRA, M. A., HERSCOVITZ, V. E. . Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, v. 4, p. 1-34, 2011.

SALAM A. On Parity Conservation and Neutrino Mass, Nuovo Cimento ser.10, 5, 299-301, 1957;

TERRAZZAN, E. A.. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de segundo grau. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, SC, Brasil, v. 9, n.3, p. 209-214, 1992;

YANG, C. N., MILLS, R. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance – Physical Review, 96, 191-195, 1954;

YANG, C. N., LEE, T. D., Question of parity conservation on weak interactions, 1956, 104, 254-258; Parity non conservation and two components theory of the neutrino, 1957, Physical Review, 106, 1671-1675;

YANG, C. N., Selected Papers 1945–1980 with Commentary World Scientific, 2005;

YUKAWA, H. On the interactions of elementary particles, Proc. Phys-Math. Soc. Japan, 17, P.48, 1935;



CAPÍTULO 2

As Partículas Elementares e as Interações Fundamentais

2.1 Partículas Elementares

O que é elementar? Essa pergunta nos remete à Grécia Antiga. A partir da formulação do problema “o que é movimentar-se, transformar-se”, os gregos, ainda antes da Era Cristã, iniciaram um debate que gerou conceitos que influenciaram toda a humanidade e pensadores. Muitos livros datam essa época como o nascimento da Filosofia e da Física ocidental, com Tales de Mileto e os pensadores Monistas, a Escola Pitagórica,

Parmênides e Heráclito e seus paradoxos, Leucipo e Demócrito e os atomistas, até o ápice dessa época com Aristóteles. Mas justamente da escola atomista que podemos fazer um paralelo com a busca da Física Contemporânea: a busca da elementaridade. Leucipo e Demócrito acreditavam que a compreensão do movimento estava associada a constituintes indivisíveis da matéria, o átomo, e à existência de espaços vazios, o chamado vácuo, impensável para as outras escolas do pensamento grego.

Longe de ser a mesma estrutura do pensamento da Física Contemporânea, o fato é que o atomismo tem sua gênese ainda antes da Era Cristã. O átomo, o indivisível, e os espaços vazios, o vácuo, não são suficientes para termos a compreensão da origem do universo e de sua evolução. Na Física Contemporânea, também são necessárias as Interações Fundamentais, junto de toda a sua estrutura matemática e conceitos importantíssimos para entendermos a evolução: as simetrias.

Esse seria um novo paradigma da Física Contemporânea: os constituintes elementares, as interações e as simetrias matemáticas. O que seriam os constituintes mais elementares da matéria de hoje? Como esses constituintes interagem? Qual a estrutura matemática subjacente aos constituintes elementares da matéria e suas interações? Que dinâmica gera o Universo de hoje a partir de seus constituintes fundamentais e de suas interações? Existe o vazio? Essas são apenas algumas questões da Física Contemporânea que geram um dos modelos físicos mais bem sucedidos do século passado, século XX, tanto do ponto de vista teórico como experimental: o Modelo Padrão da Física de Partículas, cuja discussão faremos nesse livro.

2.2 O Átomo

O átomo quer dizer o indivisível. Significa que, se imaginarmos um objeto que, aos nossos olhos, se apresenta como uma distribuição contínua de matéria, e, a partir dessa distribuição, subdividirmos esse objeto em partes cada vez menores, em algum momento, estaremos diante de algo que não mais se subdivide. No século XIX, a Química prestou uma grande contribuição ao descobrir a existência do elemento químico, por exemplo, oxigênio, carbono, hidrogênio, ferro, dentre muitos outros, e havia entendido a formação da matéria como uma combinação de elementos químicos. A água, por exemplo, nada mais era que a combinação dos elementos de oxigênio e hidrogênio. O ápice dessa contribuição científica foi a geração da tabela periódica dos elementos químicos, quando Mendeleev percebeu que esses elementos poderiam se organizar a partir de propriedades semelhantes.

Mas, no final do século XIX e início do século XX, esses elementos se apresentavam estruturados internamente, ou seja, subdivididos em estruturas ainda menores. Com a descoberta do elétron, em 1897, por J. J. Thomson, e do núcleo atômico em 1911, por E. Rutherford, o átomo tornava-se divisível. Dessa forma, a estruturação do átomo passa a ser um dos grandes problemas científicos do início do século XX.

O próprio Thomson sugere que o átomo deveria ser composto das partículas de carga negativa, o elétron, embebido em uma massa de carga positiva. A descoberta do elétron foi medida a partir da relação de carga e massa dessas partículas em um experimento de tubo de raios catódicos, chegando-se à conclusão de que o elétron era um constituinte de todos os átomos, uma vez que os resultados independiam do material utilizado. Assim, Thomson mostrava que o átomo era composto por elétrons, carregados negativamente, e, além

disso, precisava de algo no interior do átomo, carregado positivamente, para que, ao fim, tivesse uma distribuição neutra de carga. Dessa forma, Thomson propôs que o átomo fosse uma distribuição contínua de carga positiva onde partículas de cargas negativas estivessem distribuídas, como em um pudim de ameixa, onde a massa do pudim fosse a distribuição positiva de carga, e as ameixas, os elétrons. Esse modelo é, de fato, conhecido na história da Física como o Modelo do Pudim de Ameixas. É importante destacar que a suposição de Thomson é bastante razoável, uma vez que a matéria é por nós percebida de forma contínua, sem espaços vazios. Para perceber esses espaços, é necessário o avanço de técnicas experimentais, sobretudo de aceleração de partículas.

E foi isso que fez E. Rutherford em 1911, ao interpretar um resultado experimental obtido por Geiger e Marsden, que acelera partículas α , que são núcleos de hélio, para bombardearem uma lâmina muito fina de ouro. O resultado, não entendido via modelo de Thomson, é que algumas partículas eram detectadas, mantendo-se a sua direção original de movimento, e algumas eram defletidas, formando um ângulo bastante grande em relação à sua direção original de movimento, como se, no caminho, houvessem encontrado uma concentração localizada de carga. A interpretação dada por Rutherford é que a distribuição de carga positiva do átomo deveria estar concentrada em uma pequena região do espaço, e o resto deveria ser praticamente vazio. Assim, ele cria um modelo para o átomo diferente do modelo de Thomson, que é uma espécie de caroço onde se concentra toda a sua carga positiva e elétrons orbitando em torno do caroço, como uma espécie de modelo planetário.

O modelo planetário, construído no início do século XX, traz uma séria contradição com uma outra teoria física, do final do século XIX, de muito sucesso, que é o Eletromagne-

tismo de Maxwell-Hertz. Para o Eletromagnetismo, qualquer partícula carregada, quando acelerada, irradia e perde energia, o que levaria ao colapso do próprio átomo. Isso faz com que Bohr, a partir de resultados do espectro atômico, e também com os resultados de uma nova Física nascente, a Física Quântica, reinterprete o átomo e postule que as órbitas dos elétrons sejam fixas e saltem apenas quanticamente, com papel fundamental exercido pela constante de Planck, em que as energias das órbitas têm a mesma forma tal como se apresentam no problema da Radiação de Corpo Negro e no Efeito Fotoelétrico, $E = h\nu$, onde h é a chamada constante de Planck.

Esse modelo, na verdade, um passo importantíssimo para os desenvolvimentos posteriores, abriu espaço para a forma como entendemos hoje ser o átomo. A partir da hipótese ondulatória da matéria, em 1923, apresentada na tese de doutorado de Louis de Broglie, o átomo passou a ser visto com um núcleo e as órbitas dos elétrons vistas como vibrações de ondas estacionárias em que a energia era proporcional ao comprimento de onda da vibração. Mais tarde, essa proposta foi desenvolvida em uma equação ondulatória para matéria em suas várias interpretações, como a Mecânica Quântica de Schrödinger, Heisenberg, Dirac e outros.

Não devemos esquecer também que a estrutura atômica não para nos prótons e elétrons; há, nesse caminho, a descoberta de outra partícula constituinte do núcleo atômico, que é o nêutron. Assim, nosso "indivisível" estaria, até a década de 30, dividido em um núcleo, composto de nêutrons e prótons, e o elétron.

2.3 O Interior do Átomo

No início do século XX, o átomo encontra-se subdividido em três outros constituintes fundamentais, somando-se a esse grupo, após sua descoberta em 1932, o nêutron. Podemos, dessa forma, visualizar, segundo a imagem mais próxima do modelo atômico de Bohr, que o átomo é composto de elétrons, em camadas denominadas eletrosfera, e prótons e nêutrons confinados em uma pequena região do espaço, que chamamos de núcleo atômico. Essas partículas são dotadas de massa e carga elétrica, portanto, devem interagir por duas das interações até então conhecidas, Gravitacional e Eletromagnética. O elétron, a partícula mais leve das três, e o nêutron, a mais pesada, com massa ligeiramente maior que o próton. Quanto à carga elétrica, o elétron e o próton têm a mesma intensidade, porém de sinais opostos, já o nêutron não tem carga elétrica

$$\begin{pmatrix} & q & m \\ e & -1,6 \times 10^{-19} C & 9.10953 \times 10^{-31} kg \\ p & 1,6 \times 10^{-19} C & 1.67265 \times 10^{-27} kg \\ n & 0 & 1,675 \times 10^{-27} kg \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Quando lidamos com as partículas elementares, se usarmos as unidades de medidas de nosso cotidiano, o quilograma, por exemplo, percebemos que o valor dessas massas é descrito por números muito pouco usuais. Em Física de Partículas, é mais conveniente utilizarmos unidades de massa em eletronsvolts.

Em eletronsvolts, a tabela das massas das partículas acima é

$$\begin{pmatrix} & m \\ e & 0,511 MeV/c^2 \\ p & 938 MeV/c^2 \\ n & 940 MeV/c^2 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo.

Todas as partículas que têm massa são sujeitas à Interação Gravitacional. A Interação Gravitacional, que aprendemos desde a Física de Newton, é aquela em que massa sempre atrai massa. A intensidade da Interação Gravitacional é dada pela expressão abaixo:

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.3)$$

ou seja, é uma interação entre massas, sempre atrativa, dita de longo alcance, pois ela é nula apenas quando r é muito grande. Seu comportamento gráfico está dado abaixo:

O valor da constante da gravitação, em unidades do Sistema Internacional, é

$$G = 6,67428 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2. \quad (2.4)$$

A segunda interação encontrada no átomo se dá pelo fato de algumas de suas partículas terem carga elétrica. Partículas com carga elétrica estão sujeitas à Interação Eletromagnética. A Interação Eletromagnética tem uma forma matemática bastante parecida com a Gravitacional, mas natureza bastante diferente. Enquanto a massa é o gerador da interação na Gravitação, no Eletromagnetismo, é o fato de as partículas terem carga elétrica que faz com que elas interajam. A intensidade da Interação Eletromagnética é dada pela expressão

$$F_{EM} = K \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (2.5)$$

Trata-se, também, de uma interação de longo alcance entre partículas que têm carga elétrica, podendo ser tanto atrativas quanto repulsivas, dependendo das cargas que estiverem interagindo. Dentro da mesma perspectiva da Interação Gravitacional, temos que uma carga elétrica gera um campo no

seu entorno, e que uma outra carga elétrica sofre a influência desse campo.

Podemos dizer que, até o início da década de 30, esse era basicamente o conhecimento que se tinha a respeito da natureza elementar da matéria e a quais interações elas estariam submetidas. Com esse conhecimento, conseguiu-se, razoavelmente, a explicação física da tabela periódica e de como estruturas, como moléculas e a matéria, se constituem. Todavia, cabe a questão que foi uma das centrais para o desenvolvimento do modelo que hoje temos como paradigma da Física de Altas Energias: com essas duas interações, como se explica a estabilidade nuclear, uma vez que o interior do núcleo é composto por partículas sujeitas à interação elétrica repulsiva, os prótons, e outras que não sentem a interação elétrica, os nêutrons? Essa foi uma discussão posta pela Física de Partículas, que vem desde a proposta do núcleo atômico, mas que começa a se delinear no início da década de 30. No próximo capítulo, aprofundaremos essa discussão.

Rediscutindo as Interações

3.1 Uma Visão Contemporânea

Do ponto em que estávamos, até início da década de 30, a Física se estruturava a partir de duas Interações, Eletromagnética e Gravitacional, e três partículas que estariam sujeitas a essas interações. Para estarem sujeitas à Interação Eletromagnética, as partículas devem ter carga elétrica e gravitacional, as partículas devem ter massa. Uma questão importante é que, com apenas essas duas interações, como seria possível a estabilidade nuclear? No interior do núcleo, temos em uma região de aproximadamente $10^{-15}m$, confinados, prótons e nêutrons. Os nêutrons não sentem a Interação Eletromagnética, apenas os prótons devem se repelir por apresentarem

cargas elétricas de mesmo sinal. Todavia, todas essas partículas devem se atrair gravitacionalmente.

Apenas para termos uma ideia das ordens de grandezas das interações envolvidas, apresentamos a questão: será que essa atração poderia ser a responsável por superar a repulsão eletromagnética entre os prótons? Uma conta bastante simples nos revela que não, pois, se tomarmos como referência as Interações Eletromagnética e Gravitacional entre dois prótons, percebemos que a primeira é muitas ordens de grandeza maior que a segunda.

Como, na natureza, as partículas, em geral, apresentam massa e carga elétrica, essas duas forças coexistem¹. E elas precisam ser ponderadas para sabermos qual delas é mais relevante quando se analisa um problema físico real. Nesse sentido, as constantes de cada interação, que recebem o nome de constantes de acoplamento da interação, G e K , fornecem essa informação.

Para se ter uma ideia das diferenças de intensidade de cada interação, tomemos, como exemplo, dois prótons. Cada próton tem massa de repouso² $m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (ou $938,3 \text{ MeV}/c^2$) e carga elétrica $p^+ = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Ao colocarmos esses valores nas equações (2.3) e (2.5), obtemos a razão entre as forças

$$\frac{F_G}{F_{EM}} = 10^{-36}, \quad (3.1)$$

ou seja, nesse caso, a Interação Gravitacional é da ordem de 10^{36} vezes menor que a Interação Eletromagnética³. Com isso, podemos constatar que a Interação Eletromagnética é muito

¹ Falamos, em geral, porque temos partículas que não têm massa, como, por exemplo, fótons e neutrinos, assim como partículas de carga nula.

² Falamos massa de repouso porque, de acordo com a Relatividade Restrita, a massa apresenta uma dependência com a velocidade.

³ Esse número se escreve assim: 0,0001

maior que a Interação Gravitacional; apenas com essas duas interações, não se justifica a estabilidade nuclear.⁴

Uma outra questão também bastante interessante: já que a Interação Eletromagnética é muito maior que a Gravitacional, e toda a matéria é composta pelos prótons e elétrons, por que seus efeitos não se estendem para o universo? A resposta é ainda mais interessante que a pergunta. Acima, destacamos que a Interação Gravitacional é sempre atrativa, ao passo que a Eletromagnética pode ser tanto atrativa como repulsiva, dependendo da carga elétrica. A composição da matéria, em geral, é eletricamente neutra, havendo equilíbrio entre as cargas positivas e negativas, tornando o efeito da Interação Eletromagnética, no exterior da matéria, nulo. É o que chamamos de "blindagem" da interação. Assim, em grande escala, a Interação Gravitacional domina.

Essas duas interações organizaram o conhecimento a respeito da natureza até a década de 30 do século passado. Com elas, achávamos que tínhamos um conhecimento razoável a respeito dos fenômenos de grande escala de comprimento no Universo, bem como na escala microscópica ou atômica. O mundo atômico estava organizado pela existência das partículas: elétrons, prótons e nêutons, e que interagem eletromagneticamente pela troca de fótons. Somado a isso, mediante um princípio conhecido como princípio de exclusão de Pauli, e uma propriedade magnética do elétron, conhecido como *spin*, "entendíamos" como os elétrons se distribuíam no átomo, através de um diagrama de energia, e também a formação de estruturas de matéria mais complexas, como,

⁴ Essa discussão é ilustrativa. Ressaltamos que, na história da Física, não se cogitou a possibilidade de a estabilidade nuclear ser dada pela atração gravitacional. Essa questão, nesse trabalho, tem sua relevância porque, com ela, conseguimos comparar as intensidades de interações diferentes com interações que nos são mais familiares.

por exemplo, as moléculas.

Mas devemos fazer uma enorme ressalva. A forma descrita acima é o que chamamos de forma clássica dessas interações. Elas precisam ser quantizadas para estar de acordo com as teorias do século XX. A maneira como enxergamos essas interações, nos dias de hoje, é bem diferente de como proposto por Newton, pela Teoria Eletromagnética de Maxwell, e mesmo a Teoria da Gravitação de Einstein, que ainda é uma teoria clássica, ou melhor, não quântica ou quantizada. A quantização da Teoria da Gravitação ainda é um problema em aberto da Física Teórica, mas a Teoria Eletromagnética, em sua expressão quântica, foi desenvolvida na primeira metade do século XX, iniciada nos trabalhos de Dirac, através da Teoria Relativística do elétron e seu acoplamento ao Eletromagnetismo em 1928. Posteriormente foi desenvolvida por Fermi, Majorana, Pauli e Weiskopff, e, mais tarde, por Tomonaga, Feynman e Schwinger, que deram forma final ao trabalho iniciado por Dirac, a conhecida Eletrodinâmica Quântica (QED)⁵. O sucesso da formulação da QED foi enorme, dando um dos resultados mais precisos de coincidência entre uma teoria e o resultado experimental⁶ em uma parte em 10^{10} . A essa forma moderna de descrever a interação eletromagnética, chamamos na Física de Teoria Quântica de Campos.

Dessa formulação, a Física Contemporânea se reinterpreta, e o campo passa a ser visto como ente mais fundamental. Como é gerada e feita a propagação dessas interações? Usando a linguagem da Física das Interações Fundamentais: uma carga gera um campo, por exemplo, eletromagnético, e qualquer outra carga que entre no raio de ação desse campo sofre a sua influência. A influência é exercida pela chamada

⁵ QED é a sigla em inglês - Quantum Electrodynamics

⁶ Essa comparação pode ser feita em vários resultados obtidos pela QED, por exemplo, na previsão do momento magnético anômalo do elétron.



- Paul Dirac.jpg

Figura 1 – Dirac (*Dirac foi um importante físico teórico do Século XX. Para muitos físicos contemporâneos, a visão de Física das Interações Fundamentais é um legado do Dirac. Muitos dos seus contemporâneos relatam que Dirac era um professor muito educado e gentil, e muito tímido também. Tinha enorme apreço pela beleza matemática das teorias físicas e acreditava que essa beleza era traduzida no conceito de simetria. Uma anedota bastante contada no meio científico era chamar Dirac de "Homem Equação". Dirac contribuiu muito para o desenvolvimento da Mecânica Quântica e considerado, por muitos, como o fundador da Teoria Quântica de Campos. Porém, seu trabalho era tão inovador que, de início, não foi muito bem recebido pelos seus colegas, a ponto de Heisenberg, em cartas privadas a Bohr, referir-se a Dirac como o "capítulo mais triste da Física Moderna". A história mostrou que Heisenberg estava errado, e, posteriormente, o próprio Heisenberg reconheceu sua importância.*).

partícula mediadora da Interação Eletromagnética, o fóton. A mesma interpretação também pode ser dada para a Interação Gravitacional, em que uma massa gera um campo que se propaga no espaço. A partícula mediadora da Interação Gravitacional é o chamado gráviton. Nesse sentido, uma visão teórica começa a se consolidar: uma partícula gera um campo; esse campo se propaga; propagação da interação se dá ao que chamamos de partículas mediadoras das interações. Novamente há uma similaridade muito grande entre as duas interações,

Gravitacional e Eletromagnética, pelo fato de serem de longo alcance. Nesse caso, as partículas que medeiam interações de longo alcance são partículas sem massa. No caso gravitacional, o gráviton ainda não foi detectado, sendo apenas uma possibilidade entre várias teorias gravitacionais. E, no caso do eletromagnetismo, é o conhecido fóton, o quantum de ação do campo eletromagnético. Para toda formulação teórica das Interações Fundamentais deve-se incorporar a relatividade restrita de Einstein, pois a interação não pode se propagar instantaneamente.

Portanto, temos o seguinte ponto de vista: para cada interação, temos um gerador, que está associado à sua natureza. E cada interação é mediada por uma partícula mediadora. A partícula que medeia uma interação tem propriedades que a classifica como bóson. A partícula geradora da interação é chamada de férmion. Adiante, definiremos melhor o que se entende por um bóson e um férmion.

Até o momento, só discutimos duas interações. E como fica a estabilidade nuclear? Em 1932, depois do sucesso da teoria relativística do elétron, de Dirac, e da descoberta de uma partícula prevista pela sua teoria, o pósitron, Heisenberg entendeu que a origem de uma propriedade magnética nuclear não era a mesma origem dessa propriedade para o elétron. Essa propriedade magnética a que nos referimos é o spin de cada uma dessas partículas. Spin, fisicamente falando, é um campo magnético intrínseco que algumas partículas carregam. Para o elétron, Dirac entendeu que o seu spin era gerado pelo fato de ele ter carga elétrica e devido às propriedades do espaço-tempo. Mas Heisenberg se questionou: o que geraria o spin do nêutron, uma vez que essa partícula não tem carga elétrica? Sua conclusão é de que uma nova carga, mais tarde identificada como carga forte, deveria ser responsável pela geração do spin das partículas nucleares, e o spin dessas

partículas ficou sendo chamado de isospin nuclear.

Para a compreensão da Interação Forte, um físico japonês, chamado Hideki Yukawa, teve contribuição muito importante, quando entendeu que essa força deveria ser percebida apenas pelas partículas nucleares, nêutrons e prótons, sendo sempre atrativa e de curto alcance, restrita ao núcleo atômico, sendo cerca de 100 vezes mais intensa que a Interação Eletromagnética. Tentando descrevê-la dentro do paradigma da QED, teve um sucesso parcial. Ele entendeu que seria necessária uma partícula mediadora dessa interação, com um potencial dado por $V \sim \frac{e^{-mr}}{r}$, e o alcance da interação $r \sim 10^{-15} m$. Mostrou que essa partícula mediadora da Interação Forte deveria ter uma massa da ordem de $m \sim 130 MeV$. Pelo fato de a massa dessa partícula ser intermediária entre a massa do elétron e do próton, Yukawa chamou essa partícula de méson, precisamente o *meson*- π ou pión. Essas partículas propostas por Yukawa, em três variedades de carga elétrica, π^+ , π^- e π^0 , conseguiram justificar que as interações nucleares entre os constituintes do núcleo atômico, que já eram chamados de nucleons, seriam sempre atrativas. Quando acima falamos que seu sucesso foi parcial, referimo-nos ao fato de que, para estar dentro do paradigma da QED, esses mediadores deveriam ser partículas vetoriais, e não escalares como os píons propostos por Yukawa.

Essa é uma questão central para as Interações Fortes. O estudo dos mediadores escalares dentro do paradigma da QED, de uma teoria de calibre, foi feito por Salam em sua tese de doutorado, mas foi revisitada em 1954 por C. N. Yang e R. Mills, quando, finalmente, se faz uma teoria de calibre com mediadores vetoriais, ainda incompleta, mas que a coloca em sintonia com todo o conhecimento teórico produzido pela QED.

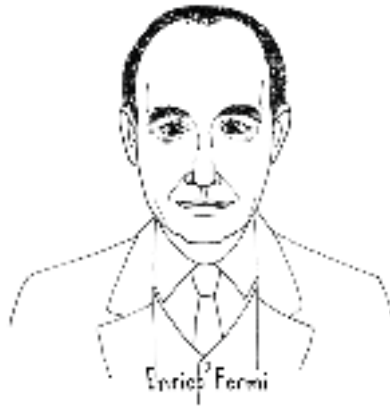
Paralelo a isso, em 1932, Pauli, e em 1933, Fermi, estudam



- Hideki Yukawa.jpg

Figura 2 – Yukawa (Yukawa foi um físico japonês que estudou as Interações Fortes, propondo uma expressão matemática para essa interação, conhecida como Interação de Yukawa. É uma interação de curto alcance, restrita ao núcleo atômico. Essa expressão permitiu calcular as massas das partículas mediadoras dessa interação, os chamados mésons- π ou píons, partículas que, mais tarde, foram detectadas por um físico brasileiro, Cesar Lattes.).

um decaimento espontâneo de núcleos, conhecido como decaimento- β , que estudaremos em outro capítulo. Para explicar tal decaimento, Fermi viu ser necessária a inclusão de uma nova interação, chamada hoje de Nuclear Fraca, pois ele precisava de alguma interação que fosse responsável em trazer alguma instabilidade nuclear e que alguns núcleos, espontaneamente, decaíssem em outros. Além disso, para o entendimento completo desse decaimento, Pauli e Fermi mostraram a necessidade de uma nova partícula, o neutrino, para que não ficasse comprometido o princípio da conservação da energia.



- Enrico Fermi.jpg

Figura 3 – Fermi (*Fermi foi um físico italiano que se naturalizou americano no período da guerra. Além de laureado com o Prêmio Nobel de Física, orientou grandes físicos do século XX, muitos deles também laureados*).

3.2 Um pouco mais de QED

A década de 20 foi responsável por nos oferecer uma das teorias mais importantes do século XX, a Mecânica Quântica. Essa Física tratava de descrever o comportamento ondulatório da matéria, por exemplo, dos elétrons, submetido à presença de potenciais. Mas era uma teoria formulada a baixas velocidades. Não devemos esquecer que temos, nesse contexto histórico, a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Os efeitos relativísticos eram discutidos na Mecânica Quântica como perturbações do sistema, e tinham acordo bem satisfatório com os resultados experimentais. Um dos físicos que ajudou muito no desenvolvimento da Mecânica Quântica, que, hoje, classificamos como não relativística, foi Dirac.

Mas Dirac tinha uma postura teórica que valorizava muito o papel que a Matemática deveria desempenhar nas teorias



- Wolfgang Pauli.jpg

Figura 4 – Pauli e Fermi (*Fermi foi um dos mais brilhantes físicos do Século XX. Um físico com grande intuição fenomenológica e uma formação teórica muito sólida, contribuindo em várias áreas da Física. Além de ser um grande cientista, trabalhou em grandes projetos, como o projeto Manhattan. Junto com Majorana, desenvolveu a Física das Interações Fracas, com importantes contribuições. Era um grande professor e com preocupações didáticas, dedicando-se também em produzir textos didáticos para vários níveis de ensino, inclusive para o ensino básico. Recebeu o prêmio Nobel de Física em 1938. Pauli foi um físico austríaco que deixou também seu nome na Física do século XX. Foi o primeiro a propor a existência dos neutrinos, em uma ousadia que lhe rendeu duras críticas, inclusive de Niels Bohr, depois tornando-se grandes amigos. Pauli também formulou o princípio da exclusão, que hoje leva o seu nome, e a teoria não relativística para o spin dos elétrons. Recebeu prêmio Nobel de Física pelo desenvolvimento da Mecânica Quântica em 1945. Nessa época, em Princeton, orientava vários estudantes de doutorado, entre eles, o físico brasileiro José Leite Lopes.*).

físicas, e, seguindo essa postura, buscou formular uma teoria quântica para o elétron, em que a relatividade estivesse incorporada em sua construção. Para que isso fosse possível, ele incorporou as teorias de grupos matemáticos na formulação de teorias físicas. Esse caminho trilhado por Dirac se inicia em 1927, com seu trabalho sobre o Eletromagnetismo de Maxwell, em 1928, na formulação da Teoria Relativística do Elétron, em que aparece a famosa Equação de Dirac, e, em seguida, em 1929 e 1930, quando estuda o elétron relativístico acoplado ao campo eletromagnético e, posteriormente, o próton.

Desses trabalhos, surge a QED, com suas contribuições efetivas no que diz respeito ao entendimento de resultados da Mecânica Quântica não relativística, bem como algumas "inconsistências" apontadas pelo próprio Dirac e outros físicos da época. A primeira delas, percebida por Pauli e Majorana, e pelo próprio Dirac, foi a presença de soluções de energia negativa na teoria, posteriormente conhecida como as antipartículas ou antimatéria. Na verdade, essa aparente inconsistência se transformou, nos dois anos seguintes, em 1932, em um dos seus grandes triunfos, quando foi medida, experimentalmente, essa antipartícula, que hoje chamamos de pósitron.

Outra questão importante na QED, apontada também por Fermi, Majorana, Pauli e Weisskopf é que correções perturbativas não apresentavam contribuições finitas na teoria, por exemplo, ao se corrigir as contribuições de energia do espectro do hidrogênio; em vez de se encontrar um valor muito pequeno, como correção, o resultado obtido apresentava-se divergente (infinito). Isso ficou conhecido na história da Física como o problema da renormalização da QED⁷. Essa questão

⁷ Uma teoria física deve ser capaz de calcular correções perturbativas. Quando essas correções, que deveriam ser pequenas, aumentam sempre,

foi resolvida no final da década de 40 com as teorias de renormalização.

As teorias de renormalização consistem em tornarem finitas as contribuições da QED, em palavras mais coloquiais, tornar a teoria bem comportada. Isso foi feito em 1948 e em 1949 com Schwinger, Tomonaga e Feynmann. Após ser renormalizada, o sucesso da QED foi estrondoso, pois ela passou a ter um acordo entre o resultado teórico e a medida experimental de 1 parte em 10 bilhões, sendo até então a teoria física mais precisa.

Constituiu-se, assim, um paradigma que começa a se consolidar, o paradigma da QED. Uma teoria física, constituída em bases matemáticas fundadas nos grupos matemáticos e renormalizável. Esses grupos matemáticos estão ligados a propriedades de simetria que uma teoria tem. E uma busca por teorias para as demais Interações Fundamentais se inicia a partir da década de 50.

Entretanto, renormalizar uma teoria quântica, para cada uma das Interações Fundamentais, não é tarefa das mais simples. Dessa formulação, podemos entender o motivo de conseguirmos uma descrição quântica para três das quatro Interações Fundamentais, ficando de fora apenas a Gravitacional.

Do ponto de vista de Teoria Quântica de Campos, como já esboçado em parágrafos anteriores, temos uma partícula que gera a interação, que é propagada até a outra partícula, com velocidade finita, por uma partícula que podemos chamar, para efeitos de maior compreensão, de mensageira da interação, ou ainda, de partícula mediadora da interação. No caso da QED, as partículas geradoras são as cargas elétricas, e as mediadoras, os fótons. A intensidade, não apenas dessa

até o ponto de se tornarem infinitas, dizemos que essa teoria precisa ser renormalizada. Renormalizar uma teoria significa tornar essas contribuições finitas.



- Feynman.jpg

Figura 5 – Feynman (*R. Feynmann foi um físico bastante interessante. Não só pela sua genialidade e contribuições, mas, também, pelo seu comportamento. Uma pessoa bastante peculiar, Feynmann, repetindo José Leite Lopes em conversas privadas, era um "bon vivant". De um senso de humor refinado, bem articulado e extrovertido, também sabia se comunicar com o grande público. Feynmann teve passagens pelo Brasil, a convite de José Leite Lopes, onde iniciou trabalhos importantes como a sua Teoria para o Hélio Líquido, na década de 50. Feynmann, na época, também, fez críticas ao sistema educacional brasileiro de ensino superior, como podemos ver em alguns de seus livros de divulgação. Ele também era conhecido por ser um excelente professor, e seus textos serem uma forma bem peculiar de apresentar a Física, fugindo das abordagens convencionais. Defendia que a Física teórica pode ter seu desenvolvimento independente dos experimentos, mas que há a necessidade de que esse encontro entre a teoria e o experimento é essencial. Junto com Tomonaga e Schwinger, recebeu o prêmio Nobel de Física de 1965.*).

interação, como de qualquer interação, é mensurada pelo que chamamos de constante de acoplamento da interação. Quanto maior o valor da constante de acoplamento, maior é a intensidade da interação. Abaixo, relacionamos o valor de cada constante de acoplamento:

$$\begin{aligned}\alpha_{EM} &= \frac{1}{137} \\ \alpha_{forte} &= 14 \\ G_{fraca} &= 1,02 \times 10^{-5} / M_p^2 \\ G_{Newton} &= 5,9 \times 10^{-39} / M_p^2\end{aligned}$$

A grande dificuldade de renormalizar as demais interações é que contribuições perturbativas são mais significativas quanto maior a constante de acoplamento. Hoje, o modelo padrão da Física de Partículas já conseguiu produzir uma teoria renormalizável para as Interações Fundamentais, exceto a Gravitação.

Partículas Elementares e Modelo Padrão

4.1 Bósons e Férmions

Para darmos sequência a nossa discussão, a primeira classificação que usaremos para uma partícula, seja ela elementar ou não, está ligada a uma propriedade física bem pouco usual, se pensarmos em propriedades clássicas, o chamado spin da partícula. Essa propriedade, em termos mais técnicos, é conhecido como momento angular intrínseco da partícula, pode ser entendido por uma imagem de uma partícula carregada, girando em seu próprio eixo, produzindo, assim, campo magnético. Essa imagem é bastante imprecisa, pois viola alguns princípios de Física, bem como não é geral, pois conhecemos algumas partículas, como o neutrino, por exemplo, que não tem carga, mas tem spin. Em outras palavras, spin é a propri-

idade que algumas partículas têm de interagir com o campo eletromagnético, um grau de liberdade de rotação que tem alguns valores associados de momento angular, um momento de dipolo magnético intrínseco que algumas partículas têm.

Quando as partículas apresentam quantum de spin semi-inteiro, ou seja, número quântico de spin dado por

$$s = \frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar, \dots, \quad (4.1)$$

dizemos que são partículas que obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, ou também chamadas de Férmions. Essas partículas nunca podem ocupar o mesmo estado quântico. Apesar de parecer bem pouco usual essa propriedade, na Química ela é bastante utilizada quando fazemos os diagramas de energia de Linus Pauling. Esse princípio é bastante importante na Física, pois, junto da Interação Eletromagnética, ele organiza a tabela periódica dos elementos químicos. Ao fazermos a distribuição eletrônica nos níveis e subníveis de energia, jamais colocamos dois elétrons ocupando o mesmo estado quântico; quando esses ocupam o mesmo número quântico principal, o de energia, o mesmo estado de momento angular orbital, não ocupam o mesmo estado de spin.

Quando as partículas apresentam quantum de spin inteiro,

$$s = 0, 1\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots, \quad (4.2)$$

essas partículas são chamadas de bósons, e não obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, e, como consequência, dois ou mais bósons podem ocupar o mesmo estado quântico. Podemos experimentalmente comprovar que várias partículas bosônicas podem ocupar o mesmo estado quântico, com o surgimento de um novo estado da matéria, conhecido como Condensado de Bose-Einstein, com várias propriedades interessantes.

4.2 Partículas Elementares

As partículas elementares seriam os constituintes mais fundamentais da matéria composta presente no universo. Seria o "átomo" da atualidade, lembrando que a ideia de átomo surgiu ainda na Grécia antiga está relacionada ao constituinte indivisível da matéria. Hoje, entendemos que, para a compreensão da constituição da matéria, é preciso, além de seus constituintes fundamentais, as interações que os governam.

O átomo, que foi conhecido no início do século XX, era composto por três partículas que se acreditava elementares, pois não seriam subdivididos: os elétrons, com carga elétrica negativa e $\text{spin} = 1/2$, e um núcleo constituído por prótons, partículas carregadas positivamente e $\text{spin} = 1/2$ e nêutrons, que não experimentavam a Interação Eletromagnética e tinham também $\text{spin} = 1/2$. Todas essas partículas são do tipo fermiônicas.

Da necessidade de compreensão de como o núcleo poderia se manter coeso e dos decaimentos nucleares, decaimento- β , decaimento- α e emissão- γ e da certeza de que as Interações Gravitacional e Eletromagnética não poderiam dar conta dessas questões, surgiu, a partir das duas novas Interações Nucleares, o Modelo Padrão da Física de Partículas, que, com outras partículas que foram descobertas, forma, hoje, nossa visão acerca do mundo subnuclear, e nos permitiu entender que os prótons e nêutrons não são elementares, mas partículas compostas.

Dessa composição, entendemos que os constituintes elementares que conhecemos hoje podem ser divididos em três grandes grupos. Os léptons, inicialmente classificados assim por acreditar-se que seriam as partículas mais leves encon-

tradas na natureza¹. O grupo de quarks, que se reunirá para compor as demais partículas, os hádrons, que se subdividem em dois outros grupos, os bárions e os mésons, formando as partículas nucleares ou nucleons, e os mediadores das Interações Fundamentais. Os dois primeiros são exemplos de férmions, enquanto os mediadores das Interações Fundamentais são bósons.

Acima falamos apenas das partículas. Mas não podemos esquecer que, em 1928, Dirac uniu duas grandes teorias do século XX, a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade, que têm como consequência a existência das antipartículas. Assim, para cada partícula, existe uma correspondente antipartícula.

4.3 Os Decaimentos Nucleares

Para entendermos o que é o decaimento de um núcleo, precisamos ainda introduzir alguns conceitos importantes. Estamos falando de partículas, e as partículas se diferenciam em vários aspectos. Mas, dentro de toda a diversidade, buscamos sempre encontrar propriedades que são comuns entre elas, pois isso facilita o nosso entendimento. Dentro de toda essa diversidade, a Física conseguiu dividir dois grupos onde todas as partículas são classificadas, que são os bósons e os férmions.

Acima falamos no princípio da exclusão de Pauli. A esse princípio estão subordinadas todas as partículas que chamamos férmions. Uma partícula quântica é sempre caracterizada por um estado quântico. Um estado está relacionado às suas grandezas físicas, como, por exemplo, sua posição no espaço,

¹ Mais tarde, foram descobertos léptons com massas maiores que muitos mésons, e essa classificação não foi mantida em função das massas, mas em função das estruturas de simetria da teoria.

sua velocidade, seu momento angular, seu momento angular intrínseco (spin) etc. Dois férmions são proibidos de ocuparem o mesmo estado físico. As partículas que obedecem a esse princípio são partículas de spin semi-inteiro ($\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2} etc$), enquanto os bósons são partículas que podem ocupar o mesmo estado físico, pois têm spin inteiro ($0, \pm 1 etc$).

Para baixas velocidades, como anteriormente dissemos, a Física Quântica de Schrödinger e Heisenberg apresentou grande sucesso. Entretanto, a incorporação da relatividade restrita na descrição dos fenômenos quânticos ainda não havia sido incorporada à Física. Foi em 1927 e 1928 que Dirac incorporou a relatividade restrita de Einstein para o movimento de elétrons com velocidades muito próximas a da luz. A equação de energia para uma partícula que se movimenta a uma velocidade próxima a da luz, também chamada de relação de dispersão, é dada por:

$$E^2 = P^2 c^2 + m^2 c^4 \left\{ \begin{array}{l} E = (P^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2} \\ E = -(P^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2} \end{array} \right\}, \quad (4.3)$$

onde E é a energia da partícula, P o momento linear da partícula e c a velocidade da Luz. Da equação acima, podemos observar que ela tem duas soluções, uma de energia positiva e outra de energia negativa. A presença dessa energia negativa causou estranheza na época em que foi proposta, mas Dirac deu uma interpretação a essa solução que resumimos aqui por meio da proposta de existência da chamada antipartícula. No caso de essa partícula ser o elétron, a sua antipartícula deveria ter mesma massa, porém carga oposta ao elétron, chamada, então, de pósitron. Cabe aqui um destaque, uma vez que nunca tinha se pensado na possibilidade da existência da antipartícula, e foi a teoria de Dirac que teoricamente propôs

sua existência que foi posteriormente confirmada². Assim, surge um novo paradigma da Física, em que, para cada partícula, exista a sua antipartícula³, bem como de uma postura de se fazer Física, em que princípios matemáticos norteiam a descrição de uma teoria física. As antipartículas, quando se encontram, se aniquilam, produzindo luz, um processo conhecido em Física como aniquilação de pares. A notação de uma antipartícula é representada por uma barra (\bar{X}). Podemos representar uma reação entre duas partículas, da maneira abaixo

$$\begin{aligned}
 A + B &\rightarrow C + D \\
 A &\rightarrow \bar{B} + C + D \\
 A + \bar{C} &\rightarrow \bar{B} + D \\
 \bar{C} + \bar{D} &\rightarrow \bar{A} + \bar{B}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Algumas reações apresentadas acima podem não ser permitidas, caso violem algum princípio físico, como o princípio de conservação da energia. Alguns exemplos reais que acontecem na natureza são o espalhamento Compton

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^- \tag{4.5}$$

e aniquilação de pares

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \tag{4.6}$$

Falaremos abaixo de dois tipos de decaimentos nucleares bastante conhecidos, o decaimento- α , o decaimento- β . Cada processo desse que ocorre no interior do núcleo está

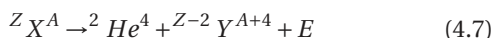
² O pósitron foi medido experimentalmente em 1932, por Anderson.

³ Em 1955, o antipróton também é observado no acelerador de partículas de Berkeley, o Bevatron.

diretamente associado a uma instabilidade nuclear, que, geralmente, ocorre em núcleos de número atômico elevado. Todo decaimento está associado a um estado excitado de um nucleon que compõe o núcleo. O núcleo que se encontra em um estado instável é frequentemente chamado de núcleo radioativo, e o seu decaimento, de radioatividade.

4.4 O decaimento- α

O decaimento- α consiste na emissão de um núcleo de hélio ${}^2\text{He}^4$, por um núcleo instável, transformando-se em um átomo de núcleo estável, por ser energeticamente mais favorável. Esse tipo de decaimento pode ser observado em aceleradores de partículas, mas também pode ocorrer naturalmente, frequentemente observado em núcleos nos quais o número atômico é maior que $Z = 82$. Uma reação de decaimento pode ser representada por



onde as massas dos núcleos atômicos obtidos obedecem à equação

$$m_X > m_{\text{He}} + m_Y \quad (4.8)$$

A redução da massa deve-se à redução da interação de natureza eletromagnética no interior do Núcleo. A diferença entre as massas obtidas é explicada pela energia cinética adquirida pela partícula α emitida do núcleo X , dada pela expressão

$$E = [m_X - (m_Y + m_{\text{He}})]c^2 \quad (4.9)$$

Nesse ponto, cabe uma pergunta. Se essa emissão se faz por ser mais energeticamente favorável a um núcleo, outras

partículas também poderiam ser emitidas, não apenas átomos de hélio. Por que não poderiam emitir núcleos com menor número atômico, como, por exemplo, hidrogênio, ou de maior número atômico, como carbono, por exemplo? Para isso, devemos entender como essas partículas são ejetadas do núcleo que as origina. Se são ejetadas dentro do núcleo, é porque estavam lá! E para estarem lá, é necessário um potencial que as mantenha ligadas ao núcleo, mas que tenham energia suficiente para, em algum momento, saírem. O processo físico que torna isso possível é um processo puramente quântico, chamado de tunelamento. Apesar de as partículas que o compõem estarem ligadas, elas têm energia que permite uma probabilidade não nula de, em algum momento, encontrarem-se fora do raio nuclear. Emissão de partículas com menor número atômico não tem energia suficiente para penetrar a barreira de potencial e tunelar. Contrariamente, pode ser energeticamente favorável a emissão de partículas com número atômico elevado, e esse processo não é incomum na natureza. Ele é conhecido como Fissão espontânea.

4.5 O decaimento- β

O decaimento- β tem uma importância crucial para o entendimento das Interações Nucleares. É por aí que a história começa e se desenvolver. Ele consiste na emissão de um elétron do interior de um núcleo radioativo. Sem dúvida, esse decaimento causa muita estranheza para o entendimento da composição nuclear, pois um elétron de origem nuclear contrariaria toda a visão de que os prótons e os nêutrons pudessem ser partículas elementares. A representação de um decaimento- β é dada pela equação abaixo

$$A \rightarrow B + e^{-} \quad (4.10)$$

Suas primeiras interpretações, ainda a partir dos prótons e nêutrons, foram feitas por Pauli, quando propôs a existência de uma nova partícula, o neutrino, no intuito de se preservar o princípio da conservação de energia e a primeira teoria, incluindo uma nova interação, ainda na década de 30, por E. Fermi. Esquemáticamente, o decaimento- β está representado abaixo

$$n \longrightarrow p + e^{-} + (\bar{\nu}_e). \quad (4.11)$$

E na transformação do núcleo por

$${}_{6p8n}C^{14} \rightarrow {}_{7p7n}N^{14} + e^{-} \quad (4.12)$$

Para entendermos a necessidade do neutrino nessa reação, basta olharmos o princípio da conservação da energia, lembrando que o mesmo deve ser usado em sua versão relativística. A massa de repouso do nêutron é cerca de $989\text{MeV}/c^2$, a massa de repouso do próton, cerca de $938\text{MeV}/c^2$, e a massa de repouso do elétron, $0.511\text{MeV}/c^2$. Ao se medir a energia cinética quando o elétron era ejetado do núcleo de C^{14} , por exemplo, o balanço da energia não era respeitado, perdendo-se parte dela. Pauli propôs que uma partícula neutra, para que não se violasse o princípio de conservação da carga elétrica, e de massa muito pequena, deveria existir, para que a energia, por fim, se conservasse. Fermi depois chamou-a de neutrino. Ele entende que esse decaimento deveria ser uma instabilidade nuclear provocada por uma nova interação de curtíssimo alcance, restrita ao núcleo do átomo. Uma observação interessante é que a Interação Fraca foi proposta na história da Física, no rastro da Eletrodinâmica Quântica, em 1933, por Fermi, antes mesmo da Interação Forte, que foi proposta por Yukawa, em 1935.

4.6 Outros decaimentos

Na Década de 30, o conhecimento a respeito do átomo e do seu núcleo coloca questões necessárias de serem entendidas. Como apresentamos anteriormente, para que o núcleo se mantenha coeso, é necessária a inclusão de uma nova interação, que tenha uma natureza diferente da Gravitacional, da Eletromagnética e mesmo da Fraca, pois prótons e nêutrons estão formando uma estrutura estável. Após o trabalho de Dirac, uma nova maneira de se entender as interações é posta. Dessa maneira, trabalha Fermi para entender o decaimento- β , e, na mesma linha, Hideki Yukawa propõe uma nova Interação Nuclear capaz de explicar a coesão atômica, chamada de Interação Nuclear Forte. Antes ainda, em 1931, uma questão de grande importância é trazida por Heisenberg. Observando o trabalho de Dirac, em que se entende que o spin do elétron está ligado às propriedades do espaço-tempo, através da relatividade restrita e da carga do elétron, Heisenberg observa que o mecanismo que gera o spin do nêutron não pode ser o mesmo, e introduz um novo número quântico, que ele chama de isospin, mais tarde também chamado de spin isotópico, introduzindo o conceito de nucleon. Esse fato é de relevância para que Yukawa entenda que a Interação Forte seja uma interação restrita às partículas que estão no núcleo atômico, os nucleons, e seja sempre atrativa, sendo então de curtíssimo alcance. Dentro do paradigma da QED, uma interação de curto alcance deve ser mediada por uma partícula massiva, e, colocando os dados do alcance, Yukawa calcula a massa dos mediadores $m_\pi = \frac{1}{7} m_p$. Esses mediadores, para que a interação seja sempre atrativa, deveriam existir em três variedades de carga: π^+ , π^- e π^0 , e ele os chamou de píons. Essas partículas lhe valeram prêmio Nobel em 1949, após a descoberta experimental. Um físico brasileiro, Cesar Lattes,

foi essencial na descoberta. Vale destacar que sua teoria não estava completamente dentro do paradigma da QED, por não ser ainda uma teoria de calibre.

Os píons são partículas instáveis, ou seja, decaem em outras partículas. Mas sabemos que os píons não são mediadores das Interações Fortes, que são os glúons. Por esse fato, podemos classificar a Interação Forte subdividindo-a entre fundamental (entre os Quarks) e residual (entre os nucleons).

$$m_{\pi} \sim \hbar / r c \quad (4.13)$$

O decaimento do pión é descrito abaixo:

$$\pi^{-} \longrightarrow \mu^{-} + \bar{\nu} \quad (4.14)$$

$$\pi^{+} \longrightarrow \mu^{+} + \nu \quad (4.15)$$

A partícula em que o pión decai é chamada de μ - múon. Historicamente, o múon foi descoberto antes do pión, e, inicialmente, se pensava ser o pión previsto por Yukawa. O múon, na verdade, não é um méson, e sim uma partícula classificada como lépton. O múon também é uma partícula instável, que decai em

$$\mu^{-} \longrightarrow e^{-} + \bar{\nu} + \nu. \quad (4.16)$$



Cesar Lattes e José Leite Lopes (Cesar Lattes foi um físico brasileiro de grande expressão no cenário internacional. Teve contribuição decisiva para a descoberta dos píons previstos na teoria de Yukawa. Tinha uma grande reputação internacional a ponto de

muitos dizerem que justiça maior seria Lattes estar entre o grupo de vencedores do Prêmio Nobel de 1950 Além de sua importância científica, Lattes foi muito importante para a Física brasileira. Ao lado de outros grandes físicos brasileiros, ajudou a desenvolver uma infraestrutura de pesquisa que, até hoje, tem sua marca. Foi fundador e primeiro diretor do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, fundador do CNPq, da Universidade de Brasília, entre outras grandes contribuições. Sem dúvida, um dos maiores nomes de nossa ciência.)

Até o momento, podemos perceber que o número de partículas cresceu significativamente. Além dos prótons, elétrons e nêutrons, que se pensava, inicialmente, serem as únicas partículas existentes no átomo, encontram-se, agora, neutrinos, píons e múons. Isso sem falar em suas antipartículas. Para facilitar a visualização dessas partículas e a que interações elas estão submetidas e suas propriedades físicas (números quânticos), elas serão classificadas em dois grupos: os léptons (e, μ, ν) e os hádrons, divididos em bárions (p, n) e os mésons (π). Outras partículas surgirão e serão classificadas nesses grupos.

No capítulo anterior, pudemos discutir como o trabalho de Dirac sobre a QED influenciou decisivamente a maneira como a Física das Interações Fundamentais se desenvolveu. Quando nos aproximamos da década de 50, podemos ver como o cenário de conhecimento experimental, que tem como base a Física das Interações Fundamentais, seguiu seu rastro. Mas há uma questão muito importante ainda não encontrada. O pósitron foi encontrado cerca de 4 anos após sua previsão. Os píons, cerca de 15 anos após sua previsão, e os múons, uma surpresa nessa estrada. Mas o neutrino, já cerca de 20 anos sendo previsto, mas ainda não tinha sido encontrado. Foi em 1950 que Cowan e Reines propuseram o decaimento- β inverso

$$p + \bar{\nu} \longrightarrow e^+ + n \quad (4.17)$$

e se confirmou a sua existência.

E para o neutrino, quem é o seu antineutrino? As reações de decaimento devem respeitar algumas regras de conservação. A conservação da energia, a conservação da carga elétrica, esses são princípios familiares. Mas com a introdução de novas interações, novas regras de conservação também aparecem na Física de Partículas. Em 1916, uma matemática chamada Emmy Noether mostra que, para cada lei de conservação, existe uma transformação de simetria associada. E, através da descrição teórica das Interações Nucleares, as transformações de simetria nos dão novas regras de conservação.

Os léptons, além das Interações Eletromagnética e Gravitacional, também são sensíveis à Interação Fraca. Com isso, um novo número quântico, que deve ser conservado em reações de decaimento de partículas, devido à Interação Fraca, é proposto. Esse número quântico é definido como sendo $L = +1$ (e, μ^-, ν) para léptons, e $L = -1$ ($e^+, \mu^+, \bar{\nu}$) para os antiléptons. Por essa razão, desde o decaimento- β , insistimos em escrever o antineutrino, para respeitar a conservação do número leptônico, uma vez que o decaimento- β é devido a Interação Fraca, ou seja, o $\bar{\nu}$ e o ν se distinguem por número leptônico.

Se utilizarmos as regras de conservação conhecidas, como energia, carga elétrica e número leptônico, o decaimento

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \gamma \quad (4.18)$$

conserva todas essas regras. Entretanto, o mesmo não ocorre. Isso levou ao conhecimento de que, para cada lépton, existe o seu neutrino associado, ou seja, para o elétron, existe o neutrino do elétron, para o múon, existe também o neutrino do múon, podendo definir o número muônico $L_\mu = -1$ ($\mu^+, \bar{\nu}_\mu$) e $L_\mu = +1$ (μ^-, ν_μ).

O conhecimento contemporâneo a respeito de todos os léptons são:

$$\begin{aligned} &(e, e^+, \nu_e, \bar{\nu}_e) \\ &(\mu^-, \mu^+, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu) \\ &(\tau^-, \tau^+, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau), \end{aligned} \quad (4.19)$$

em que todos são partículas de spin- $\frac{1}{2}$, não interagem via Interação Forte, e interagem via Interação Fraca e Eletromagnética.

A descoberta dos píons, através de pesquisas em raios cósmicos por Cesar Lattes, Cecil Powel e seu grupo, trouxe, junto dessas pesquisas, algumas novidades, e também das pesquisas realizadas por Rochester e Butcher, também em 1947: analisando partículas de raios cósmicos, detectou-se uma partícula neutra que decaía em duas carregadas, o káon:

$$K^0 \longrightarrow \pi^- + \pi^+ \quad (4.20)$$

e 1949: Cecil Powel

$$K^- \longrightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^+ \quad (4.21)$$

Os káons se comportam como píons pesados e foram incluídos na família dos mésons, que depois ainda tiveram outros descobertos (η, ϕ, ω, ρ). Como disse o professor Sebastião Alves Dias, do CBPF, em vídeo de divulgação da escola do CBPF sobre a Cromodinâmica Quântica: na década de 50, parecia que, cada vez que se aceleravam e colidiam partículas nos aceleradores, novas partículas eram encontradas. Em seu discurso de Nobel, Lamb diz que o pesquisador que descobrisse uma nova partícula deveria pagar um imposto à comunidade. E as descobertas não param. Em 1950, no Cal Tech, uma nova

partícula e um novo decaimento são descobertos:

$$\Lambda \longrightarrow p^+ + \pi^- \quad (4.22)$$

Λ foi incluída na categoria dos Bárions.

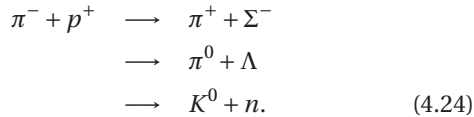
Vendo tantos decaimentos e com as regras de conservação conhecidas, cabe a pergunta de por que o próton é estável, uma vez que o decaimento $p \longrightarrow e^+ + \gamma$ não violaria as regras de conservação conhecidas mas nunca se observava tal decaimento.

Quando, em Física de Altas Energias, uma reação de decaimento não ocorre é porque existe algum princípio físico de conservação. Nesse caso, o número quântico não conservado para o decaimento do próton em pósitron e radiação é o número bariônico, que é $A = 1 \longrightarrow$ para todos os bárions e $A = -1 \longrightarrow$ para todos os antibárions.

A descoberta de novas partículas trouxe ainda um cenário de conhecimento desafiador. Algumas dessas foram descobertas em aceleradores de partículas. Elas eram instáveis, portanto decaíam em outras partículas. É uma propriedade bastante curiosa, que os físicos resolveram chamar de estranheza. A produção dessas partículas nos aceleradores, governadas pela Interação Forte, envolvia escalas de tempo da ordem de $10^{-23} s$, enquanto os decaimentos governados pela Interação Fraca eram da ordem de $10^{-10} s$. São 13 ordens de grandeza de diferença. Essas partículas estranhas são sempre produzidas em pares. Abaixo, ilustramos alguns exemplos da produção de pares dessas partículas estranhas através da colisão de um pión e um próton,

$$\begin{aligned} \pi^- + p^+ &\longrightarrow K^+ + \Sigma^- \\ &\longrightarrow K^0 + \Sigma^0 \\ &\longrightarrow K^0 + \Lambda \end{aligned} \quad (4.23)$$

ao passo que, na colisão entre píons e prótons, jamais se observava



Foi por essa razão que, em 1953, Gell-Mann e Nishijima, independentemente, propuseram uma nova regra de conservação, ou seja, um novo número quântico a ser conservado em processo envolvendo a Interação Forte, chamado estranheza. Porém os decaimentos, governados pela Interação Fraca, não conservam esse número quântico. A estranheza é uma simetria da Interação Forte.

A descoberta desse novo número quântico foi essencial para que, posteriormente, Gell-Mann e Zweig, independentemente, propusessem a não elementaridade dos hádrons. A proposta de uma teoria de calibre para as Interações Fortes, em 1954, por C. N. Yang e R. Mills, a partir de um grupo de simetria $SU(2)$, remeteu a Gell-Mann a questão de que esse novo número quântico não poderia ser acomodado por essa descrição de calibre. A conservação da estranheza e do spin isotópico levava à necessidade de um novo grupo de simetria para as Interações Fortes, onde uma nova partícula nuclear deveria então surgir. Diante da diversidade de partículas, Gell-Mann e Zweig entenderam que os hádrons deveriam ser partículas compostas. O nome dado por Gell-Mann foi o que a história consolidou. Pela primeira vez, apareceram os quarks em três tipos ou sabores: *up*, *down* e *strange*, com propriedades de cargas, tanto elétricas, como cargas de sabor e spin que seriam combinadas, dando os hádrons já conhecidos e organizados nos octetos propostos anteriormente por Gell-Mann. No próximo capítulo, detalharemos como as partículas

seriam compostas a partir dos quarks.

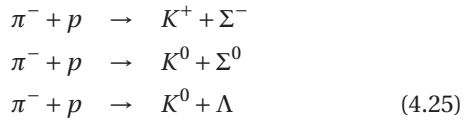


(C. N. Yang e T. D. Lee descobriram a quebra da paridade das Interações Fracas, propondo um experimento que foi realizado no ano seguinte à sua proposta por Mme Wu. Tamanha a importância desse trabalho, que abre caminho para Salam entender a unificação no modelo eletrofraco, e após um ano da proposta, a Academia Sueca de Ciências já premiava essa descoberta com o Nobel de 1957. Entre tantas outras contribuições, um outro artigo muito importante que influencia toda uma visão da Física do século XX foi o trabalho que ele desenvolveu com R. Mills em 1954, que, hoje, conhecemos como as Teorias de Yang-Mills.)

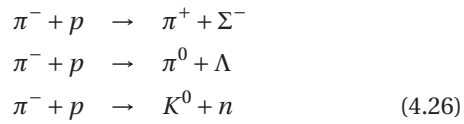


(Murray Gell-Mann propôs, junto a Nishijima, que os hádrons fossem partículas compostas, ao mesmo tempo que Zweig. Mas quem batizou essas partículas por Quarks foi Gell-Mann. Foi prêmio Nobel de Física de 1969.)

As reações abaixo são observadas experimentalmente:



entretanto, não são observadas as as reações seguintes:



Observe que as reações acima conservam L , A e carga. Já as reações descritas em 4.26 não ocorrem porque não conservam a estranheza.



Modelo Padrão da Física de Partículas

Como dissemos no capítulo anterior, Murray Gell-Mann propôs a não elementaridade dos hádrons. E foi fundamental o conhecimento de uma nova regra de conservação nos processos envolvendo as Interações Fortes, a estranheza. O período de 1954 a 1957 foi marcado pela proposta de Yang e Mills para as Interações Fortes, mas com duas grandes questões ainda em aberto. Os próprios autores do trabalho que inclui o grupo $SU(2)$ para as Interações Fortes percebem algumas limitações do modelo, principalmente o fato de os mediadores das Interações Fortes obtidos em sua teoria não terem massa, o que seria contraditório com o curto alcance dessa interação. Mas, em 1957, o próprio C. N. Yang, agora em parceria com T.D. Lee, faz um trabalho que, no ano seguinte, faria jus ao prêmio Nobel, sobre a violação de Paridade. No mesmo ano,

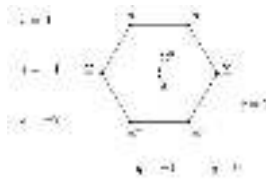
A. Salam percebe a importância desse trabalho para as Interações Fracas, uma vez que a única maneira de se introduzir o calibre para essas interações, sem violar a simetria da relatividade restrita, seria a partir do grupo $SU(2)$, proposto por Yang e Mills para a Interação Forte. A questão da massa para os mediadores torna-se o grande problema da década de 60.

Paralelo ao desenvolvimento da Física de Partículas, um grande problema da matéria condensada e um fenômeno que despertava muito interesse da comunidade de Física, a supercondutividade, daria a grande ideia para a geração das massas dos mediadores das Interações Fracas. O fenômeno da supercondutividade era entendido a partir de uma interação efetiva entre os elétrons de condução de um metal e as vibrações da rede, como uma transição de fase em que esses elétrons formavam pares. Esses pares eram descritos por um campo escalar que gerava um salto de energia responsável pela supercondutividade.

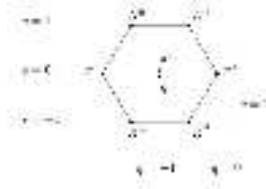
Y. Nambu trouxe essa ideia para a Física de partículas, argumentando que um campo escalar poderia ser responsável pela geração de massa dos mediadores, incorporando o mecanismo em que isso acontecia na matéria condensada na Física de altas energias. Esse mecanismo é conhecido como quebra espontânea da simetria de calibre (QES) de uma teoria, que, após a ideia seminal de Y. Nambu, foi desenvolvida por muitos físicos tendo em P. Higgs a proposta de uma partícula escalar capaz de gerar a QES. Essa partícula é buscada até hoje nos aceleradores e, em 2012, o LHC, no CERN, anunciou a sua possível detecção.

Murray Gell-Mann, fazendo uso de um princípio matemático ligado às regras de conservação, entende que o grupo de simetria de $SU(2)$, proposto por Yang-Mills, não é suficiente por acomodar a conservação do spin isotópico e a conservação da estranheza, estendendo para o grupo de simetria

SU(3). A partir do grupo de simetria de SU(3), Gell-Mann iniciou uma organização das partículas conhecidas em arranjos geométricos chamados de octetos e decupletos bariônicos e mesônicos, como ilustra a figura a seguir, onde cada vértice da figura representa propriedades como carga elétrica e estranheza que a partícula possui. A partir desse arranjo e de uma propriedade do grupo de simetria, ao fazer isso, surge a necessidade de uma nova partícula de mesma massa, um novo nucleon, que não se conhecia, para que se completasse o triplete de SU(3). Gell-Mann entendeu que os hádrons poderiam ser partículas compostas de outras elementares, de três variedades (ou sabores), chamando essas partículas elementares de quarks, nos sabores *up*, *down* e *strange*. Essas partículas se arranjariam para formar os hádrons, de forma que três sabores de quarks formariam um bárion, três antiquarks formando um antibárion, e um par de quark e antiquark formando um méson.



e



Os arranjos com esses sabores de quarks, ao se combinarem, produziriam as partículas conhecidas, e também algumas foram previstas a partir das propriedades desses quarks.

Nas figuras apresentadas anteriormente, os bárions e os mésons estão dispostos em arranjos geométricos de acordo com a sua carga e a sua estranheza. Os oito bárions mais leves se arranjam de forma hexagonal, com duas partículas no centro. É importante destacar que, assim como Mendeleev, na classificação de Gell-Mann em seus arranjos geométricos, partículas foram previstas pelo modelo, o que aumentou a confiabilidade da proposta.

Essa classificação, junto à compreensão da conservação da estranheza e da necessidade de se estender o grupo de simetria das Interações Fortes para $SU(3)$, a não elementaridade das partículas hadrônicas, foi proposta em 1962, com o surgimento dos quarks, em três sabores diferentes: *up*, *down* e *strange*, (u, d, s). O fato de ter sido proposto em três sabores é uma consequência da simetria $SU(3)$.

A tabela a seguir ilustra alguns desses hádrons:

Hádron	Quarks	Quarks	Quarks
Δ^{++}	u	u	u
Δ^+	u	u	d
Δ^0	u	d	d
Δ^-	d	d	d
Σ^+	u	u	s
Σ^0	u	d	s
Σ^-	d	d	s
Λ^0	u	d	s
Ξ^0	u	s	s
Ξ^-	d	s	s
Ω^-	s	s	s

e a primeira geração de quarks e suas propriedades

Table 1.1: Quantum numbers of quarks.

Quark	Charge	Color	Spin
u	2/3	3	1/2
d	1/3	3	1/2
s	1/3	3	1/2
c	2/3	3	1/2
b	1/3	3	1/2
t	2/3	3	1/2
l	1	1	1/2
ν _l	0	1	1/2

O decaimento- β , visto agora sob a perspectiva das partículas elementares, é descrito como

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e \quad (5.1)$$

O interessante dessa época, até chegarmos ao modelo padrão, é vermos como o conhecimento a respeito das Interações Nucleares Fraca e Forte estão uma influenciando a outra. Ainda na década de 60, A. Salam entende a importância do grupo $SU(2)$ para as Interações Fracas. E esse grupo permite-nos olhar o decaimento- β descrito da forma acima, classificando os quarks dois a dois e os léptons também dois a dois. Tecnicamente, dizemos que os quarks e os léptons estão descritos em dubletes de $SU(2)$, para as Interações Fracas. E, nessa descrição, até o final da década de 60, eram conhecidas duas famílias de léptons que poderiam ser acomodadas em dois dubletes de $SU(2)$, mas se conheciam apenas três quarks, porque, como proposto por Gell-Mann, pelas Interações Fortes, deveriam estar classificados em um triplete de $SU(3)$, ou seja, a simetria $SU(3)$ exigia um grupo de 3 partículas.

Foi pelo estudo das Interações Fracas que, em 1964, S. Glashow propôs, por uma questão de simetria, no caso de $SU(2)$ para as Interações Fracas, que deveria existir um novo sabor de quark completando o segundo dublete, ou a segunda

família de quarks, como acontecia para os léptons, ficando

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

O sabor de quark proposto por Glashow foi o quark *charm*, e com ele também o número quântico de *charm*, que discutiremos na próxima seção

Isso ampliaria o número de hádrons conhecidos, trazendo uma nova geração de bárions conhecidos como bárions charmosos. Para a grande surpresa, o méson charmoso J/ψ foi medido nos aceleradores do SLAC e de BNL em 1974, confirmando a proposta de Glashow.

Com isso, o conhecimento a respeito das Interações Nucleares vai se ampliando. A questão da geração de massa para os mediadores das Interações Fracas foi resolvido por Salam, introduzindo a QES nas Interações Fracas, unificando-a com a eletromagnética. Glashow também contribuiu para a descrição matemática das Interações Fracas e o papel de todas as simetrias envolvidas e da unificação com a Interação Eletromagnética, e Weinberg no entendimento das propriedades dos mediadores das interações. Consolida-se, então, a descrição do que hoje chamamos de teoria eletrofraca ou teoria de Salam-Weinberg-Glashow, que teve seu reconhecimento maior com o Prêmio Nobel de 1979.

Uma questão importante foi negligenciada até o momento. Na composição dos bárions, Gell-Mann propôs que fossem compostos por três quarks. Há bárion, por exemplo, o próton, formado por uud . Os quarks são férmions, portanto obedecem ao princípio da exclusão de Pauli. Mas há dois quarks, nesse caso u , no mesmo estado, o que viola o

princípio da exclusão. Essa questão também é resolvida com a compreensão maior da Interação Forte e de seu grupo de simetria, uma modificação do grupo $SU(3)$ de Gell-Mann, chamado de grupo de cor. Os sabores de quarks passam a ter um novo número quântico, o número quântico de cor. São elas: azul, vermelho e verde, e seus respectivos estados de cor.

5.1 Modelo Eletrofraco

Em 1954, Yang e Mills escreveram um artigo seminal que trazia novamente o papel da simetria descrita pelo grupo $SU(2)$ para as Interações Nucleares. Com isso, colocaram questões para os desenvolvimentos seguintes que culminaram na Teoria Eletrofraca e, posteriormente, o Modelo Padrão da Física de Partículas. O artigo publicado na *Physical Review* tem como título "*Conservation of Isotopic-spin and Isotopic Gauge Invariance*".

C.N Yang e R. L Mills publicam um trabalho cuja tentativa era descrever a Interação Forte dentro da mesma visão da QED, uma teoria de calibre renormalizável. A Interação Forte foi introduzida na Física em 1935 pelo físico Japonês Hideki Yukawa, como apresentamos no início desse texto. No trabalho seminal de Yukawa, o autor introduz uma nova interação na Física capaz de justificar a coesão nuclear; essa interação deveria ser de curto alcance e sempre atrativa para as partículas que compõem o núcleo atômico; na época, conheciam-se os prótons e nêutrons. Dentro da visão que começou a ser construída a respeito da QED, essa interação deveria ser mediada por partículas escalares massivas, os píons. O fato de os mediadores serem escalares vinha da necessidade de a Interação Nuclear Forte ser sempre atrativa, e a única maneira encontrada por Yukawa foi introduzir essas partículas em

três variedades de carga elétrica, positiva, negativa e neutra. Nesse sentido, Yukawa rompia com a hipercarga forte introduzida por Heisenberg em 1932, por meio do grupo de simetria $SU(2)$.

No trabalho de Yang Mills, os autores chamam a atenção para o conceito de spin isotópico, que são estados quânticos carregados, descritos por partículas nucleares, nêutrons e prótons, da mesma forma que é apresentado no trabalho de Heisenberg.

Conhecendo, depois, a contribuição de Yukawa, que as partículas nucleares interagem fortemente, Wigner, em 1927, e, independentemente, Cassen e Condon em 1936, mostram que, na interação entre as partículas nucleares, o spin isotópico total deveria se conservar, fato que foi comprovado experimentalmente antes do importante trabalho de Yang-Mills, em 1954. Nessa época, o resumo do cenário para as Interações Fortes aponta para a conservação do spin isotópico e para a questão de as massas dos nucleons serem as mesmas do ponto de vista da Interação Forte, que precisa ser justificada dentro da teoria de calibre da Interação Forte.

Uma descrição teórica da regra de conservação do spin isotópico para as Interações Nucleares mostra que o modelo de Yukawa, onde os mediadores são partículas escalares, está em desacordo com tal regra de conservação. Yang e Mills mostram que mesmo os mediadores das interações fortes também deveriam obedecer a essa regra. É nesse ponto que uma mudança importante acontece na interpretação das Interações Fortes. O fato de, em todas as reações, haver a necessidade de ser obedecida a regra de conservação do spin isotópico e de existirem 3 estados carregados diferentes para os píons, que se acoplam individualmente ao campo do nucleon, leva à conclusão de que esses píons deveriam ter spin-1, e não serem escalares como os píons de Yukawa, ou seja, deveriam

ser bósons vetoriais.



Higgs e Nambu (Peter Higgs é um físico conhecido pelo grande público. O bóson de Higgs, que foi previsto por ele, é seguramente uma partícula pop. Já recebeu alguns apelidos interessantes, inclusive a ponto de ser chamada de Partícula de Deus pela grande mídia. Recentemente, o maior acelerador e colisor de partículas do mundo, o LHC, anunciou sua provável descoberta. Ele está bem próximo de ser descoberto e pode ser que, daqui a alguns meses da publicação desse livro, ele já tenha sido oficialmente anunciado. Higgs ficou bastante emocionado em uma conferência que anunciava que o Bóson de Higgs estava muito próximo de ser encontrado. O Mecanismo de Higgs, de onde surge essa partícula, é a chave para a geração das massas das partículas. Nambu foi pioneiro em trazer algumas ideias da Física da Matéria Condensada para a Física das Interações Fundamentais, o chamado mecanismo de quebra espontânea da simetria, posteriormente usado por Higgs. Pela descoberta da quebra espontânea de simetria na Física sub atômica, Nambu recebeu o Prêmio Nobel de 2008.)

É a partir desse ponto que Yang e Mills inserem, como grupo de transformações de simetria para as Interações Fortes, o grupo $SU(2)$, como grupo de calibre, buscando a analogia com o campo eletromagnético, mostrando que a conservação do spin isotópico está relacionado a esse grupo.

O campo de calibre da Interação Forte, na verdade, o potencial dos “campos físicos”, novamente em analogia com o

caso da QED, tem a mesma abordagem, obtendo os tensores de campo, suas equações dinâmicas e, posteriormente, a sua quantização, de onde sairão os mediadores vetoriais da Interação Forte, que são os campos de spin-1 em autointeração, tal como na QED. Vale a pena destacar a frustração de Yang e Mills, descrita no próprio artigo, diante do fato de que, apesar de terem uma teoria de calibre, renormalizável, constataram que os mediadores das interações não têm massa. A geração de massa dos mediadores vai ser um problema de grande importância para o final da década de 50 e início da década de 60, só sendo resolvido por meio do mecanismo de Higgs.

Na década de 50, já com o conhecimento da regra de conservação da estranheza em decaimentos nucleares, temos ainda um outro grande resultado anunciado por Lee e Yang, que foi a descoberta da violação da paridade nas Interações Fracas. Isso teve um grande impacto sobre Salam, que o utilizou para reavaliar o artigo de Yang-Mills de 1954, levando-o a propor a ideia da simetria quiral. Lee e Yang propõem a violação da paridade em trabalho teórico, baseando-se na análise dos dados experimentais sobre os decaimentos fracos até então conhecidos. Em seu trabalho teórico, propõem um experimento que se poderia detectar diretamente da violação de paridade. No ano seguinte, em 1956, Mme. Wu verifica experimentalmente a violação de paridade a partir dessas propostas.

O grande impacto sobre Salam faz com que seja revisto o artigo de Yang-Mills de 1954, quando Salam entende que a única forma de introduzir a violação de paridade para os decaimentos fracos, preservando a invariância de Lorentz, é introduzir a simetria $SU(2)$ para as Interações Fracas. Mas o problema das massas dos mediadores ainda permanece em aberto.

Em 1960, inspirado na supercondutividade, Y. Nambu e,

em 1961, Y. Nambu e Jona- Lasinio trazem uma ideia a partir de uma analogia da formação de um estado supercondutor, para a Física de partículas. Essa será, posteriormente, elaborada por Salam, Goldstone e Weinberg, mas terá, de fato, resolução pelo conhecido mecanismo de Higgs, em 1964, em três importantes publicações. De forma independente, também trataram desse mecanismo Guralnik, Hagen e Kibble, Gilbert e Englert e Brout.



Salam, Weinberg e Glashow(*Físico paquistanês, professor Salam se preocupou muito com o desenvolvimento da Física em países pobres. Usou seu prestígio de grande cientista para, junto a UNESCO, fundar o Centro Internacional de Física Teórica em Trieste, na Itália. Esse centro contribui até hoje com o desenvolvimento da Física em países pobres, financiando a visita de físicos desses países, passando temporadas no ICTP, tendo contato com os mais renomados e importantes físicos do mundo, participando de escolas de formação, congressos, workshops e visitas científicas de pequena e longa duração. Junto a Weinberg e Glashow, Salam desenvolveu a teoria Eletrofraca, que unificava a Interação Eletromagnética e a Interação Fraca, os três recebendo o Prêmio Nobel de 1979. Salam foi o primeiro Muçulmano a receber o prêmio.))*

O mecanismo de quebra espontânea de simetria consiste no acoplamento dos campos que descrevem as partículas com um campo escalar. Esse campo torna-se responsável em determinar um estado fundamental, também chamado de vácuo, que fará com que a simetria de calibre seja quebrada,

conferindo massa aos campos. Isso resolveria a frustração que Yang e Mills tiveram quando propuseram o grupo SU(2) para a Interação Forte. Apesar de essa não ser uma simetria da Interação Forte, esse trabalho foi fundamental para que a Teoria Eletrofraca se desenvolvesse.

Mas o que é então a Teoria Eletrofraca? Essa grande contribuição para a Física, a caminho da unificação das Interações Fundamentais, foi elaborada, principalmente, por Salam Weinberg e Glashow. Nesse modelo, as Interações Elétrica e Nuclear Fraca estão unificadas, e o mecanismo que gera as massas, a quebra espontânea da simetria, é o mesmo responsável em desacoplar as duas interações em baixas energias.

Essa descrição, além de uma grande conquista teórica, traz grandes previsões que culminarão na descoberta de novas partículas hadrônicas. Pelo fato de se conhecer 4 léptons, o elétron e seu neutrino e múon e seu neutrino, cada dupla é acomodada conjuntamente em um mesmo objeto matemático, chamado dublete, sensível às Interações Fracas. O decaimento- β , por exemplo, é um decaimento fraco que pode ser descrito em termos dos quarks da seguinte maneira:

$$d \rightarrow u + e + (\bar{\nu}_e). \quad (5.3)$$

Podemos olhar a equação acima dupla a dupla, ou seja, dois quarks e dois léptons. Como ao todo temos 4 léptons, Glashow introduz, utilizando argumentos bem técnicos de teoria de grupos, a necessidade de um quarto sabor quark para completar os dubletes de SU(2), chamando esse sabor de charm. Surge toda uma nova série de hádrons, que passam a ser procurados e detectados nos aceleradores de partículas.

Em 1964, Cronin e Fitch descobrem, experimentalmente, violação de CP nos decaimentos fracos dos káons neutros, resultado que anunciam em Dubna, na 12th ICHEP. Por esse resultado de grande impacto, recebem o Nobel de 1980. Esse

resultado experimental foi crucial para o trabalho posterior (1973) de Kobayashi e Maskawa, que, adotando a Teoria Eletrofraca de Salam, Glashow e Weinberg, observam que, para acomodar a violação de CP, é preciso introduzir uma terceira geração de quarks. Com essa previsão, verificada posteriormente com a descoberta dos sabores *bottom* e *top*, recebem o Nobel de 2008.



5.2 Interações Fortes

Como vimos na seção anterior, as descobertas recentes da estrutura mais elementar da matéria vai se confundindo com o desenvolvimento das Interações Fundamentais. O desenvolvimento das Interações Fracas nos deu a quebra espontânea da simetria e a geração das massas das partículas, a terceira geração de quarks, a partir da quebra de paridade da Interação Fraca, o quark *bottom*, conforme vimos na seção anterior, entre outras contribuições, gerando o reconhecimento maior da comunidade científica por meio de muitos prêmios, inclusive o Nobel. Para as Interações Fortes, não foi diferente. Por exemplo, recentemente, a Fundação Nobel anunciou a atribuição do Prêmio Nobel de Física de 2004 aos pesquisadores D. J. Gross, do Kavli Institute for Theoretical Physics (Santa Bárbara, Califórnia), H. D. Politzer, do CALTECH (Pasadena, Califórnia), e F. Wilczek, do MIT (Cambridge, Massachusetts),

pela descoberta da propriedade de liberdade assintótica na teoria formulada para a descrição das Interações Nucleares Fortes. Quatro trabalhos são citados em conexão com esse Prêmio Nobel e, bastante peculiar, dois deles, publicados por diferentes autores, aparecem no mesmo volume do periódico *Physical Review Letters*, um em seguida ao outro. A contemporaneidade dos resultados anunciados no Volume 30 dessa prestigiosa revista científica é um indicador da extrema relevância da questão no início dos anos '70. Na verdade, as três publicações pioneiras que revelam a liberdade assintótica na Teoria das Interações Fortes datam de 1973.

Como discutimos ao longo do nosso texto, a Física Contemporânea sistematiza e articula a sua descrição e compreensão dos fenômenos naturais em termos de quatro campos básicos de força, aos quais nos referimos correntemente como as quatro Interações Fundamentais. Em nosso texto, não abrimos uma discussão da visão contemporânea da Interação Gravitacional, por entendermos que nosso objetivo é discutir elementos do Modelo Padrão da Física de Partículas. Mas uma discussão em que se incluía a Interação Gravitacional é de extrema importância, pois estaríamos discutindo o desenvolvimento da Física Teórica contemporânea no seu mais alto grau de atualidade. Porém, está fora dos objetivos desse texto. Nossa intenção aqui foi a de explorar duas interações pouco conhecidas do grande público e muito pouco trabalhadas no ensino básico, as duas forças que atuam somente na escala subatômica; na verdade, em escala nuclear, portanto, a distâncias tão pequenas como o décimo do trilionésimo do centímetro, o que corresponde ao centésimo de milésimo da escala atômica ou à milionésima parte da nanoescala.

As Interações Nucleares Forte e Fraca restringem-se aos domínios nuclear e subnuclear, a Interação Forte respondendo pela coesão dos prótons e nêutrons no interior dos

núcleos atômicos, e a Interação Fraca sendo a responsável pelas instabilidades ou desintegrações nucleares, que se dão por processos radioativos, como aquele a que nos referimos usualmente como decaimento-beta, através do qual nêutrons decaem, transformando-se em prótons e emitindo elétrons e antineutrinos, bastante discutidos na seção anterior.

As Interações Fundamentais são descritas por um corpo teórico que se denomina Teoria Quântica de Campos, mais especificamente pelas Teorias Quânticas de Campos de Calibre; a mais fundamental delas, a Eletrodinâmica Quântica, valeu a R. P. Feynman, S. I. Tomonaga e J. S. Schwinger, em 1965, o Prêmio Nobel de Física pela sistematização das Interações Eletromagnéticas e pela abertura que propiciaram a compreensão do mundo das chamadas partículas elementares. Quatorze anos depois, em 1979, S. L. Glashow, Abdus Salam e S. Weinberg receberam o Prêmio Nobel de Física pela formulação, em trabalhos publicados entre 1961 e 1968, de uma Teoria de Campos, que não só sistematizava a fenomenologia conhecida para as Interações Fracas, mas que, sobretudo, indicava uma origem comum para as Interações Eletromagnéticas e fracas. Referimo-nos a esse último fato como uma unificação de campos de força, e a teoria formulada por Glashow, Salam e Weinberg é denominada Teoria Eletrofraca. A esse ponto, cabe ressaltar que o programa de unificação dos quatro campos de força é uma das atividades centrais da atual Física Teórica de Altas Energias.

Vista a relevância da formulação das Interações Fundamentais em termos de uma teoria quântica de campos de calibre, seria, agora, a vez das Interações Fortes. Ainda, em 1967, experimentos realizados no SLAC, o acelerador linear em Stanford, Califórnia, indicaram a presença de estruturas fundamentais no interior dos prótons e nêutrons – os quarks – e, mais ainda, revelaram uma característica específica das

Interações Fortes em regime de altas energias – a propriedade de “scaling” – a qual se mostrou, logo a seguir, determinante para a construção de uma teoria quântica para as Interações Fortes baseada na propriedade de liberdade assintótica. Aqui, seria oportuno um esclarecimento: Gross, Politzer e Wilczek receberam o Nobel de 2004, não pela proposição da ideia de liberdade assintótica, mas, sim, por terem demonstrado que a teoria elaborada para a descrição das Interações Fortes – a Cromodinâmica Quântica – revela, naturalmente, a propriedade de liberdade assintótica, elemento-chave para a compreensão do fenômeno de “scaling”, descoberto no SLAC.

Na verdade, foi o físico alemão Kurt Symanzik quem propôs, em 1970, que somente uma teoria física com a propriedade de liberdade assintótica poderia naturalmente descrever o comportamento de “scaling” observado nas Interações Fortes. A liberdade assintótica é uma característica que não percebemos em nosso mundo macroscópico, dominado pela gravitação e pela Interação Eletromagnética. Esses dois campos de força caracterizam-se pela propriedade de tornaram-se fracos à medida que os objetos que interagem se afastam, ao passo que as forças se intensificam à medida que os mesmos se aproximam. Conhecimentos da Física estudada no Ensino Médio apontam que essas duas forças comportam-se de forma inversamente proporcional ao quadrado da distância.

A liberdade assintótica indica um regime oposto ao descrito acima: a força cresce à medida que a distância aumenta e cai praticamente a zero quando os objetos em interação se aproximam, daí a terminologia: liberdade (força praticamente nula, objeto livre de interação) assintótica (variável distância aproximando-se de zero). Tal comportamento, tão peculiar, levou à crença de que a liberdade assintótica era completamente inconsistente com o consolidado formalismo das teorias quânticas de campos. Esse era o panorama contur-

bado em 1971, quando, então, os físicos teóricos holandeses G. 't Hooft e M. Veltman, que receberam o Prêmio Nobel de 1999, demonstraram que uma classe especial de teorias quânticas de campos de calibre, as chamadas Teorias de Yang-Mills (ou Teorias de Calibre Não Abelianas), formuladas em 1954, por C. N. Yang (Prêmio Nobel de 1957) e R. Mills, e já utilizadas por Glashow, Salam e Weinberg, na construção da Teoria Eletrofraca, satisfaziam a uma série de requisitos de consistência que as legitimavam como o melhor cenário teórico, até então concebido, para a descrição das Interações Fundamentais.

Nesse conjunto de circunstâncias, com o status adquirido pelas teorias não Abelianas, após os trabalhos de 't Hooft e Veltman, e com a ideia de que cada um dos quarks, que formam as partículas subnucleares que sofrem Interação Forte (os chamados hádrons), aparece em três estados diferentes, chegou-se a uma formulação teórica para as Interações Fortes entre os quarks. Dessa formulação, as Interações Fortes foram concebidas como portadas por mediadores denominados glúons, que aparecem em oito diferentes estados. Essa teoria – a Cromodinâmica Quântica – formulada após a grande sensação dos resultados de 't Hooft e Veltman apresenta naturalmente a peculiar propriedade de liberdade assintótica: isso foi demonstrado por Gross em parceria com Wilczek, então seu estudante de doutoramento, e, independentemente, por Politzer. O trabalho de Gross e Wilczek encontra-se publicado no periódico *Physical Review Letters*, volume 30 (ano 1973), nas páginas 1343-1346; o artigo de Politzer vem imediatamente após este, nas páginas 1346-1349. Tendo mostrado o regime de liberdade assintótica na Cromodinâmica Quântica, os condecorados de 2004 mostraram que liberdade assintótica e Teoria Quântica de Campos são consistentes e sistematizaram também a compreensão do “scaling”, exatamente como Symanzik já havia preconizado em 1970.

Percebe-se, através do desenvolvimento dos fatos expostos previamente, que o estudo teórico das Interações Fundamentais tem sido um eixo de investigação que vem merecendo grande atenção por parte da comunidade física; a cada interação sistematizada e com uma formulação teórica que incorpora a fenomenologia revelada pelos experimentos, um Prêmio Nobel é atribuído. Foi assim com a Eletrodinâmica Quântica, com a Teoria Eletrofraca e com a liberdade assintótica na teoria fundamental para as interações fortes.

CAPÍTULO

6

A Construção de um paradigma da física teórica: A teoria de Yang-Mills-Shaw.

Thales Costa Soares¹, Humberto Belich Jr², José Abdalla
Helayel-Neto³

André Penna-Firme⁴

¹IIF Sudeste MG – JE, Centro de Ciências UFJF e GFT/JLL,
tcsoares@gmail.com

²CLAFEX – CBPF e GFT/JLL, helayel@cbpf.br

³UFES, CLAFEX – CBPF e GFT/JLL. belichjr@gmail.com

⁴Fac.Educação e Instituto de Física, UFRJ.

penna.firme@globo.com

6.1 Resumo

Em junho de 1954, C. N. Yang e R. Mills apresentam um artigo a *Physical Review* muito importante à física das interações fundamentais. Paralelamente, R. Shaw, estudante de doutorado de A. Salam, desenvolve o mesmo assunto em sua tese. Trata-se da primeira formulação de uma teoria de campos para mediadores vetoriais em auto-interação, diferente do que se tinha até então com a eletrodinâmica (QED).

Esse ano se comemora 60 anos desse feito importante para a física contemporânea e que consolida uma forma de fazer física que se estende a várias outras teorias modernas, como o modelo eletrofraco, o modelo padrão da física de partículas, inclusive em teorias que envolvam a gravitação

Nossa intenção nesse trabalho é produzir um texto de divulgação, particularmente voltado para os cursos de Formação de Professores e ao mesmo tempo contribuir para a discussão dos caminhos de um física escolar mais próxima de questões contemporâneas. Nesse texto, pretendemos uma incursão nos antecedentes ao trabalho de Yang-Mills-Shaw (YMS) que influenciaram os autores; apresentar uma pequena discussão sobre a QED e a constituição de seu paradigma, no que for relevante à discussão específica do trabalho de Yang-Mills-Shaw; Introduzir o problema da interação nuclear forte, inicialmente o problema de YMS; e a retomada por Salam da proposta da teoria de YMS mas para as interações fracas. Isso, sempre focando em princípios físicos e matemáticos importantes contidos em seu bojo, e que possa ser utilizado em cursos de formação de professores.

Palavras-chave: Simetrias, Interações Fundamentais,
Partículas Elementares, Teorias de Calibre.

6.2 Introdução

Há muito se discute a necessidade de inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio (EM). Muito longe ainda se ser realidade, entre várias razões, está ligada à formação de professores, como apontam Terrazzan - 1992. A carência de material didático, seja de apoio, seja formativo, contribui para que essa realidade ainda permaneça inalterada. Temos algumas exceções, alguns bons textos de divulgação científica já nascem desse esforço, como por exemplo voltado para a física de partículas destacamos Abdalla – 2006, e um pouco mais voltado para formação de professores, Moreira – 2011. Recentemente, como fruto de um projeto de extensão desenvolvido no Centro de Ciências da UFJE, como parte de um projeto CAPES, apresentamos o texto em Costa – Soares-2013.

Os cursos de formação de professores, ainda ligados ao que se pratica no ensino médio, pouco avançam para a FMC, ficando restritos, em sua maioria, aos cursos de Física Moderna, ou estrutura da matéria, que no fundo abordam a mesma coisa, e presos a livros textos da década de 70, 80, com raras exceções.

A reversão desse quadro requer esforços grandes e conjuntos, pois a solução está longe de ser trivial. Nossa intenção nesse texto é apenas contribuir com a nossa experiência na área de física de altas energias produzindo textos que sirvam como material auxiliar à professores que trabalham diretamente com formação de professores.

Para esse fim, apresentamos esse texto que comemora os 60 anos das Teorias de Yang-Mills-Shaw, divulgando alguns aspectos históricos e conceitos que foram importantes no desenvolvimento de um dos mais bem sucedidos programas da Física Teórica do Século XX, a Física das Interações Funda-

mentais.

Apresentamos alguns antecedentes que prepararam o caminho; discutimos o texto de Yang-Mills, fazendo a interpretação, criando discurso acerca das ideias que permeiam essa Física das Interações Fundamentais, e fornecendo subsídios para os professores tanto de conceitos como de referências para aqueles que desejaram alguma informação que possa ser futuramente trabalhada em sala de aula; e mostramos como o trabalho de Yang-Mills trouxe importantes contribuições não a partir das respostas contidas nele, mas também de questões que são formuladas a partir dele, que culminaram no mais bem sucedido modelo da Física Teórica do século XX, o Modelo Padrão da Física de Partículas. Resgatamos também uma contribuição um pouco esquecida pela história da física, do estudante de doutorado de A. Salam, Ronald Shaw, que tratou do mesmo problema em sua tese, mas que não enviou seu trabalho para publicação.

Acreditamos que um texto comemorativo dos 60 anos da Teoria de Yang-Mills passeia por várias questões teóricas importantes que influenciaram a Física do século passado e continuam a influenciar a física do século XXI. Nossa sugestão não é de aplicação direta em sala de aula, mas que os professores possam, a partir dele, selecionar caminhos que tornem esses conhecimentos contemporâneos mais próximos da realidade do EM.

6.3 Antecedentes da Teoria de Yang-Mills-Shaw

Podemos começar a nossa discussão dos antecedentes da Teoria de YMS com a formulação e consolidação da eletrodinâmica quântica e da teoria relativística do elétron. Ou ainda, com Paul M. A. Dirac. A partir da formulação da mecânica

quântica, a questão das contribuições advindas do comportamento relativístico do elétron bem como da natureza do seu spin, inquietavam Dirac e outros, como W. Pauli.

Do período de 1927 à 1930, Dirac inicia uma série de estudos, que no fundo estão todos interligados, que vai da quantização do campo eletromagnético, a formulação de uma equação relativística do (spin) elétron, e o acoplamento do elétron ao campo eletromagnético que influenciou toda a física do século XX.

Até Dirac, toda a contribuição relativística do elétron em uma descrição quântica, por exemplo na descrição das raias espectrais do átomo de hidrogênio, eram realizadas como contribuições perturbativas. Mas Dirac acreditava que a relatividade restrita, por ser um fundamento, devesse estar presente em uma formulação a priori, e não entrar como correções em uma teoria. Em termos matemáticos, seria incorporar a simetria relativística do espaço-tempo na própria formulação da mecânica quântica.

Outra grande contribuição de Dirac foi a quantização do campo eletromagnético, que muitos físicos apontam como o nascimento da Teoria Quântica de Campos, que junto ao trabalho que acopla o campo eletromagnético ao elétron, introduzindo também a simetria de calibre, no caso o grupo de simetria $U(1)$, são lançadas as bases para uma nova física.

Dessa série de trabalhos, que inicialmente recebe várias críticas, inclusive de Heisenberg, Dirac começa a colecionar alguns resultados importantes. Como resultado, sua teoria trazia alguns resultados embaraçosos que depois passaram a ser o seu sucesso. A descoberta da existência de antipartículas, previstas pela equação quântico relativista de Dirac, foi uma dos grandes feitos extraordinários desse grande físico. A previsão do pósitron, que na verdade é o antieletron, e a sua confirmação experimental em 1932, foi uma das maiores des-

cobertas de toda a história da física. Além disso, justifica-se o fator giromagnético do elétron e também para essa discussão um ponto muito importante, entende a origem do spin do elétron.

Na formulação de Dirac, o spin passa a ser uma consequência geométrica, ligada à estrutura e geometria do espaço-tempo, e tecnicamente falando, ao grupo de simetria de Lorentz, e a invariância de calibre da eletrodinâmica quântica, que dá origem à carga elétrica. Ou seja, pelo fato do elétron ter uma carga, que tem a sua origem a partir do grupo de simetria da eletrodinâmica quântica, e também por respeitar a invariância da relatividade restrita, faz com que o elétron tenha spin.

É preciso ainda dizer mais do mesmo, porque é desse fato que muito do que se constrói na teoria de YMS está ligado ao grau de liberdade de spin. Para que uma partícula tenha spin, é necessário que tenha uma carga. A carga, está ligada a uma interação fundamental. Uma interação, respeita uma(s) transformação (ões) de simetria.

E nesse contexto, em 1932, se descobre que no núcleo atômico também tem presente uma partícula sem carga e com spin, que é o nêutron. O núcleo, já se sabia, era constituído então de nêutrons, sem carga elétrica, e prótons, dotado de carga elétrica positiva. Era necessário, assim como fez Dirac, que se justificasse, sob as mesmas bases, a origem do spin do nêutron.

Seguindo o mesmo raciocínio, não havia motivo para se abrir mão da invariância da relatividade restrita, mas pelo fato do nêutron não interagir eletromagneticamente, não poderia ser pela carga elétrica a origem do seu spin. Seria necessária uma nova carga responsável pelo spin do nêutron. Como se tratavam de coisas distintas, Heisenberg chamou o spin dos nucleons de isospin ou spin isotópico.

Havia ainda o problema da estabilidade nuclear. Portanto, uma nova interação, restrita ao núcleo atômico, entre os seus constituintes, era necessária tanto para justificar a sua coesão, como a origem do spin isotópico, esse último, pouquíssimo explorado nos livros textos. Heisenberg estruturou essa nova interação em um grupo de simetria chamado $SU(2)$, colocando os prótons e nêutrons no que chamamos de um dublete de massa, pois eles têm massas muito próximas.

Mas a proposta de Heisenberg de trazer o grupo de calibre $SU(2)$ para as interações fortes, que será posteriormente retomada por YMS, será desenvolvida por Yukawa. Mas, com os trabalhos de Dirac e de Klein-Gordon, havia uma visão na física de que os mediadores das interações, quando vetoriais, no caso da interação eletromagnética via fóton, eram mediadores sem massa. E para mediadores de interação massivo, deveriam ser partículas escalares. E necessariamente os mediadores das interações fortes, por serem de curto alcance, pensava-se em mediadores escalares. E essa foi uma grande influência incorporada no trabalho de 1935 de Hidek Yukawa para a interação forte mediada por partículas escalares massivas. As massas eram fundamentais para justificar o curto alcance da interação nuclear forte. A partir desse alcance, Yukawa estimou as massas desses mediadores, posteriormente conhecidos como os píons de Yukawa ou mésons Pi, que foram posteriormente detectadas por Cesar Lattes, um dos maiores nomes da física brasileira.

6.4 A teoria de Yang-Mills-Shaw

Como visto anteriormente, a passagem para mediadores da interação forte vetoriais não era trivial, pois havia todo um contexto que justificava mediadores escalares. Mas uma im-

portante publicação teórica de E. Wigner, em 1937 e Cassen e Condon em 1936, mostram que nos processos de interações nucleares, o spin isotópico total deveria se conservar, fato posteriormente comprovado experimentalmente por. Isso mudava então o cenário para a descrição das interações fortes, pois a formulação de Yukawa não acomodava essa regra de conservação. E ainda, só de cunho um pouco mais matemático, havia também os trabalho de H. Wyl, a respeito da importância das teorias de calibre não abelianas.

Portanto, a regra de conservação do spin isotópico, e a existência de três mediadores com três diferentes estados carregados, que se acoplem individualmente ao campo do nucleon, imediatamente exige que essa mediação seja realizada por mediadores vetoriais, de spin-1, e não escalares como os píons de Yukawa.

Isso trazia novamente, como grupo de simetria apropriado, o grupo SU(2) proposto por Heisenberg em 1932. A partir de então, o trabalho de Yang-Mills consiste na formulação de uma teoria de campos, para spin-1, em auto interação.

Como o ponto de partida dos autores é a QED, eles buscam toda a consistência que a QED já traz. Além de obterem a conservação do spin isotópico, também descrevem as transformações de calibre bem como as equações que conferem a dinâmica dos campos fortes; quantizam os campos e discutem, apesar de não realizarem os cálculos, a possibilidade de se obter uma teoria renormalizável.

Ao discutirem as propriedades do quanta de ação do campo forte, chegam a um resultado impressionante e inconsistente com o que se precisa para a interação forte, com mediadores sem massa. Obviamente, essa questão não passa sem sentimento por eles, pois sabem que é preciso de mediadores massivos, para justificarem o curto alcance da interação. Mas em 1954, ainda não era possível a solução desse problema,

pois é através do mecanismo de geração de massa, o chamado mecanismo de Higgs, que esse problema é solucionado. Em termos epistemológicos, podemos dizer que as teorias de Yang-Mills colocam um problema fundamental para a física das interações fundamentais.

Por outro lado, e de forma independente, Ronald Shaw, não tão conhecido nessa história, abordava o mesmo problema em sua tese de doutorado, orientada por A. Salam. R. Shaw, na primeira parte de sua tese, estudava os vários tipos de partículas em conexão com as representações do grupo de Lorentz. E na segunda parte da sua tese, Shaw discute a invariância frente as transformações gerais do spin isotópico.

As conclusões e resultados obtidos por Shaw, apesar de caminhos um pouco diferentes, são as mesmas obtidas por Yang-Mills. Inclusive algumas limitações, como o problema das massas dos mediadores. Isso fez com que Shaw, a revelia de Salam, não enviasse o trabalho, finalizado em janeiro de 1954, para publicação. Mas mesmo assim, Salam, em sua Nobel Lecture e em outras passagens, sempre destacou a contribuição independente de Shaw.

6.5 Os desdobramentos da teoria de Yang-Mills-Shaw

Apesar da grande importância da teoria de Yang-Mills-Shaw, não foi propriamente a sua formulação inicial, através do grupo $SU(2)$ para as interações fortes, que a consagrou. Inclusive não é o grupo de simetria $SU(2)$ o adequado para essa interação. Mas, a partir de mais um importante artigo, tendo C. N. Yang como um dos autores, agora em parceria com T. D. Lee em 1956 em uma conferência em Seattle, A. Salam mostrará que a formulação original para o spin-1 deve ser aplicada

para as interações fracas.

Yang e Lee, mostram que, para preservar a simetria de Lorentz, ou seja, a relatividade restrita, é necessário que as interações fracas violem a simetria de paridade. Posteriormente, Salam generaliza para o conceito de simetria quiral, uma generalização da simetria de paridade.

Então, Yang e Lee, mostram que nos decaimentos radioativos, como o decaimento β , deveria haver um desbalanceamento entre neutrinos com quiralidade à esquerda e neutrinos com quiralidade à direita. O artigo contendo esses resultados foi publicado na edição da *Physical Review* de 1957 e no mesmo ano, Mme Wu realiza um experimento que comprova a hipótese da violação de paridade nos decaimentos fracas.

O resultado anterior, aparentemente, não tinha uma conexão direta com o trabalho de 1954 de Yang-Mills-Shaw. Quem realiza essa conexão é A. Salam. Salam percebe que o setor de massa de uma teoria permite o acoplamento de setores com diferentes quiralidades, sem que se viole a simetria de Lorentz, sendo possível a sua realização por um campo escalar. Entretanto, a única forma de se acomodar a violação da paridade, sem que se acople setores de quiralidades diferentes e ao mesmo tempo preserve a simetria de Lorentz, seria através de um campo vetorial, ou no caso, um spin-1. Isso tornava necessária à sua descrição o grupo SU(2) antes proposto por Yang-Mills-Shaw para as interações fracas, ou seja, Salam percebe que o verdadeiro ambiente de aplicação do SU(2) não seria para as interações fortes, mas as interações fracas, e inicia a partir dessa formulação, a sua jornada de desenvolvimento do modelo eletrofraco.

Restava ainda o problema das massas dos mediadores. Ao compreender que ao campo escalar deveria estar associado o setor de matéria, de massa, de uma teoria, e que os mediadores vetoriais eram a única forma de interagir preservando

a simetria de Lorentz, e ao mesmo tempo violar a paridade, um resultado também experimental, Salam, em parceria com Weinberg e Goldstone iniciam uma nova jornada a respeito do papel do campo escalar e as massas dos mediadores, que tem como final dessa história, o famoso mecanismo de geração de massa, Nobel em 2013, que é o mecanismo de Higgs.

6.6 Comentários Finais

Nesse trabalho, motivados pelos 60 anos de um dos modelos teóricos mais importantes de toda a história da física, e considerando o seu papel fundamental e paradigmático na formulação das modernas teorias de Campos, procuramos fazer um breve relato histórico, discutindo pontos importantes da assim chamada física teórica de altas energias. Varias ideias novas e ao mesmo tempo importantes surgiram a partir desse modelo, como por exemplo o papel exercido pelas simetrias da natureza na formulação de uma teoria física. Além dessa, muitas novas questões foram surgindo, como o problema do confinamento dos quarks no interior dos nucleons, o problemas da dimensionalidade do Espaço Tempo.

6.7 Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES – Novos talentos e ao CNPq pelo apoio financeiro.

6.8 Referências

ABDALLA, M. C. B.. *O Discreto Charme das Partículas Elementares*. 1. ed. São Paulo: Fundação Editora Unesp, 2006. v. 3000. 344p .

Costa-Soares, T., Helaýel-Neto, J. A. , Belich Jr, H.. A Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais, CAPES, 2013, 66p.

Dirac, P. M. A. , The Collected Works of P. A. M. Dirac: Volume 1: 1924-1948.

Heisenberg, W. *Gesammelte Werke Collected Works / Original Scientific Papers / Wissenschaftliche Originalarbeiten*, Springer; 1 edition (November 11, 1985)

MOREIRA, M. A. Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica. São paulo: Editora Livraria da Física, 2011, 149p

SALAM A. On Parity Conservation and Neutrino Mass, 1957 *Nuovo Cimento* ser.10, 5, 299-301.

Shaw, R. – 1955; The problem of Particles Types and other contributions to the theory of Elementary Particles, PhD Thesis,

TERRAZZAN, E. A.. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de segundo grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, SC, Brasil, v. 9, n.3, p. 209-214, 1992.

Yang, C. N., Mills, R. 1954 Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance – *Physical Review*, 1954, 96, 191-195

C. N. Yang and T. D. Lee, Question of parity conservation on weak interactions, 1956, 104, 254-258; Parity non conservation and two components theory of the neutrino, 1957, *Physical Review*, 106, 1671-1675

C. N. Yang, *Selected Papers 1945–1980 with Commentary* (World Scientific, 2005)

YUKAWA, H. On the interactions of elementary particles, *Proc. Phys-Math. Soc. Japan*, 1935 17, P.48

Os Autores

7.1 José Abdalla Helayel-Neto

José Abdalla Helayel-Neto é Pesquisador Titular do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. José Helayel é doutor em Física pela International School for Advanced Studies (SISSA) em Trieste - Itália, onde trabalhou no Grupo do Prof. Abdus Salam sob a orientação do Prof. J. J. Strathdee. Foi pesquisador em várias instituições internacionais, como as conceituadas The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP) e European Organization for Nuclear Research (CERN), Suíça. É autor de mais de 200 artigos em periódicos de circulação internacional de prestígio, como a *Physical Review*, *Physics Letters B*, *Nuclear Physics*, entre outras, e autor de 4 livros. Além de ser um grande pesquisador, o Prof Helayel é conhecido por ser um grande professor em várias modalidades de ensino, com reconhecidos cursos de Pós-Graduação

que ministra no CBPF e em outras instituições brasileiras que têm colaborações científicas, mas também no ensino superior e básico. No ensino básico, ministra cursos em pré-vestibulares comunitários, com metodologias inovadoras, as quais já foram objeto de estudo em duas teses de doutorado em educação. Já orientou 30 dissertações de mestrado e 42 teses de doutorado, tendo participado de mais de 300 bancas de avaliação entre mestrado, doutorado e concursos públicos. É membro fundador do Grupo de Física Teórica José Leite Lopes. Já organizou diversos eventos nacionais e internacionais. Professor Helayel é também líder do Grupo de Pesquisa de Teoria Quântica de campos do CBPF.



7.2 Thales Costa Soares

Thales Costa Soares é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais. Prof. Thales é licenciado em Física pela UFRJ, Mestre em Física pela UFSC e doutor em Física pelo CBPF, com dois estágios de pós-doutorado, no CBPF e na UFF. Realiza pesquisas na área de Teoria Quântica de Campos no tema Quebra da Simetria de Lorentz e na área de Ciências dos Materiais - Magnetismo. Em ensino, também realiza pesquisas voltadas para formação de professores e inserção de Física de Partículas no Ensino Médio. Prof. Thales coordenou a implementação do curso de Licenciatura em Física no IF Sudeste MG, sendo o seu primeiro coordenador. Desenvolve, além de trabalhos de pesquisa, trabalhos de divulgação científica, realizando cursos e palestras para alunos e professores do Ensino Médio, com interesse especial na Física de partículas e na divulgação das oportunidades de formação em licenciatura em Física. Foi coordenador estadual da Olimpíada Brasileira de Física entre os anos de 2009 e 2010.



7.3 Humberto Belich Jr

Humberto Belich Jr é Professor da Universidade Federal do Espírito Santo. Fez sua graduação na USP, mestrado e doutorado no CBPF. Realizou vários estágios de pós-doutorado, inclusive no CBPF, Centro Internacional de Física da Matéria Condensada em Brasília, Centro Internacional de Física em Natal, ICTP e na UFES. Trabalha em várias linhas de pesquisa em Física, sendo que sua atuação vai da Física Teórica de Altas Energias à Física Experimental da Matéria Condensada. É autor de vários artigos de impacto em revistas de prestígio internacional.



Bibliografia

ABDALLA, M. C. B.. O Discreto Charme das Partículas Elementares. 1. ed. São Paulo: Fundação Editora Unesp, 2006. v. 3000. 344p .

Costa-Soares, T., Helaÿel-Neto, J. A. , Belich Jr, H.. A Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais, CAPES, 2013, 66p. Dirac, P. M. A. , The Collected Works of P. A. M. Dirac: Volume 1: 1924-1948.

Heisenberg, W. Gesammelte Werke Collected Works / Original Scientific Papers / Wissenschaftliche Originalarbeiten, Springer; 1 edition (November 11, 1985)

MOREIRA, M. A. Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica. São paulo: Editora Livraria da Física, 2011, 149p

C. N. Yang, Selected Papers 1945–1980 with Commentary (World Scientific, 2005)

