

AS INTERAÇÕES FRACAS: UMA INTRODUÇÃO

AS INTERAÇÕES FRACAS: UMA INTRODUÇÃO

José Leite Lopes

Tradução, organização e notas de
F. Caruso, J.A. Helayël & F. Silveira

Copyright © 2020 Editora Livraria da Física
1ª Edição

Direção editorial: José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Projeto gráfico e diagramação: Francisco Caruso e Felipe Silveira

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

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

Lopes, Jose Leite

As interações fracas: uma introdução / Jose Leite Lopes; tradução, organização e notas de F. Caruso, J.A. Helayël, F. Silveira. – 1. ed. – São Paulo: Livraria da Física, 2020.

Título original: Les Interactions Faibles: une introduction

Bibliografia

ISBN 978-65-5563-031-2

1. Física - Estudo e ensino I. Título.

20-48584

CDD-530.7

Índices para catálogo sistemático:

1. Física: Estudo e ensino 530.7

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados 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



EDITORIAL

Editora Livraria da Física
www.livrariadafisica.com.br

A José Leite Lopes,
in memoriam.

Um dia, esse clima de desconfiança e desestímulo vai desaparecer.

J.L.L., 2006

Estas notas reproduzem o curso que dei na Escola de Verão de Física de Partículas Elementares de Giff-sur-Yvette, em setembro de 1974. Aproveitei a ocasião para escrever um curso um pouco mais completo do que aquele que eu deveria ministrar em Giff-sur-Yvette.

Expresso meus agradecimentos ao meu aluno D. Spehler pela ajuda na redação do manuscrito e a Mme. Françoise Ohlmamn pela digitação do texto.

J.L.L.

Sumário

Prefácio	1
Introdução	5
1 O campo eletromagnético como um campo de calibre	11
1.1 Teoria do campo escalar invariante de calibre: eletrodinâmica escalar	11
1.2 Teoria de um campo escalar isovetor invariante de calibre	14
1.3 Teoria de um campo vetorial de Proca invariante de calibre	17
1.4 Teoria de um campo de Proca isovetor invariante de calibre	19
1.5 Teoria de Dirac invariante de calibre	22
2 O campo de calibre de Yang-Mills	23
2.1 Teoria de um campo espinorial isoespinor de Yang-Mills invariante de calibre	23
2.2 Teoria de um campo escalar isovetor de Yang-Mills invariante de calibre	28
3 Algumas propriedades da lagrangiana das Interações Fracas	31
3.1 A lagrangiana efetiva corrente-corrente	31
3.2 Propriedades da lagrangiana fraca para quatro espinores	36

4	Busca da forma das Interações Fracas	51
4.1	As amplitudes de Fermi e de Gamow-Teller	51
4.2	Estudo da desintegração de núcleos não polarizados quando a polarização dos elétrons não é medida	56
4.3	Correlação angular elétron-antineutrino	60
4.4	Polarização longitudinal de elétrons emitidos por núcleos não polarizados	62
4.5	A distribuição angular de elétrons emitidos por núcleos polarizados	63
5	Teoria do neutrino a duas componentes	67
6	As constantes C_V e C_A	75
7	Fatores de forma fracos dos nucleons	79
8	Desintegração do pión	87
9	Correntes e cargas generalizadas	91
9.1	As correntes fracas	91
9.2	Correntes e cargas: Teorema de Noether	92
9.3	A álgebra de Lie das cargas	97
10	O lagrangiano leptônico e a álgebra de cargas leptônicas	101
10.1	Propriedades da lagrangiana leptônica	102
10.1.1	A lagrangiana é invariante por transformação de quiralidade	102
10.1.2	Se fizermos $m_e = m_\mu = 0$, a lagrangiana é invariante em relação ao grupo unitário leptônico $\mathcal{U}_1 \times \mathcal{U}_2$:	103
10.1.3	Universalidade $\mu \rightleftharpoons e$ exceto para os termos de massa . .	103
10.1.4	Conservação dos números leptônicos	104

11 A desintegração do múons e a conservação dos números leptônicos	113
12 Hipótese da conservação da corrente vetorial sem mudança de estranheza	121
12.1 A igualdade aproximada $G_V = G_\mu$	121
12.2 Hipótese da conservação da corrente vetorial (CVC)	123
12.3 Verificação da hipótese CVC	127
12.4 Desintegração beta do pión	132
12.5 Desintegração beta de Σ^+, Σ^-	133
13 O modelo de quarks e o ângulo de Cabibbo	137
13.1 O grupo $SU(3)$ e o modelo de quarks	137
13.2 As correntes vetoriais e axial e as cargas correspondentes no modelo a quarks	146
13.3 O ângulo de Cabibbo e a universalidade das interações fracas . .	150
14 A conservação parcial da corrente axial	157
14.1 A relação de Goldberger-Treiman	157
14.2 A hipótese PCAC	161
14.3 A interação pseudoescalar induzida	163
14.4 Conservação parcial da corrente axial com $\Delta Y = 1$	164
15 A forma algébrica da universalidade	167
15.1 Regras de seleção	167
15.2 Elementos de matriz da corrente entre membros de um octeto . .	170
15.3 O teorema de Ademollo e Gatto	174
15.4 A universalidade como condição algébrica sobre as cargas fracas .	176
16 As dificuldades da Teoria $V - A$ das interações fracas	179
16.1 Os bósons intermediários das interações fracas	179

16.2	Indicações de uma possível unificação das interações fracas e eletromagnéticas	182
16.3	Uma lagrangiana independente de carga e a relação entre g_w e e	183
16.4	Violação da unitariedade	185
16.5	Não renormalizabilidade da teoria $V - A$	187
17	Algumas referências bibliográficas	189
18	Posfácio	191
18.1	Teoria Eletrofraca, Modelo-Padrão e Física de Neutrinos: uma linha do tempo	191
18.2	Quebra Espontânea de Simetria, Teorema de Goldstone e Mecanismo de Higgs	223
18.3	Os <i>papers</i> que assinalaram a descoberta das primeiras partículas sub-atômicas	226
18.4	Bibliografia suplementar	228

Prefácio

José Leite Lopes, nascido em 28 de outubro de 1918, foi, sem dúvida, um dos maiores físicos brasileiros. Além disso, teve um enorme papel na consolidação da atividade científica dentro da Universidade, em particular, e, em todo o país, em geral. Tinha grande preocupação quanto à inserção do Brasil no cenário científico internacional. Na biografia *Leite Lopes*, escrita por Bassalo & Caruso,¹ em 2014, vemos que Leite “dedicou toda sua vida à criação de um ambiente propício ao desenvolvimento científico no Brasil e à construção de um país mais justo, muitas vezes opondo-se ao poder de forma contundente, sem perder a esperança no futuro. Nesse sentido, Leite tinha um espírito bruniano, pois, assim como o pensador italiano Giordano Bruno, não media palavras para combater as autoridades constituídas, as arbitrariedades, a manutenção do *status quo*, tampouco as poupava para defender a verdade, o pensamento científico, a mudança. Desta forma, acreditava ele, contribuía para que o país pudesse vir a se colocar na vanguarda da pesquisa científica”.

Por outro lado, é preciso destacar que, como parte dessa sua estratégia, Leite sempre se preocupou com a formação de jovens físicos. Nesse sentido, fez parte de um grupo de pesquisadores que foi conversar com Darcy Ribeiro, que era então assessor de Cyro dos Anjos e do presidente Juscelino Kubitschek. Integravam esse grupo, além de Leite Lopes: o médico e cientista Walter Oswaldo Cruz, o fisiologista Haity Moussatché, o botânico, especializado em fisiologia animal, Luiz Fernando Gouvêa Labouriau e o físico Jayme Tiomno, todos cientistas de grande expressão. Nessa ocasião, aproveitando a onda de um novo Brasil, sintetizado aqui pelo Projeto de Kubitschek, o grupo propôs que a nova capital brasileira abrigasse uma “*universidade de estilo novo*”, com uma certa ilusão (e a esperança) de que esse novo modelo pudesse contagiar as demais universidades e, eventualmente, levasse à correção de uma série de erros. Era o início da *Universidade de Brasília*. Acatada a proposta, Leite foi o coordenador do grupo de trabalho que discutiu a formação dessa nova Universidade, criada para ser um modelo no País.

¹São Paulo: Livraria da Física.

Nos primeiros tempos do CBPF, dedicava horas de seu dia preparando cursos, dando aulas de Mecânica Quântica e Eletromagnetismo, além de seminários e orientando jovens físicos. Organizou grupos para estudar o clássico livro de Walter Heinrich Heitler, *Teoria Quântica da Radiação*, e o de Gregor Wentzel, sobre *Teoria Quântica de Campos*, como nos relatou uma vez o saudoso colega e amigo Jader Benuzzi Martins. Em paralelo à sua obra científica, Leite devotava muito do seu tempo a escrever livros de texto científicos, livros e artigos de divulgação científica, artigos de política científica e sobre a relação ciência e sociedade.

Impedido de continuar no Brasil pelo AI-5, Leite se exilou em Strasburgo por um longo período, após uma breve passagem pelos Estados Unidos. Lá, continuou a escrever livros e a formar jovens físicos.

Ainda sobre livros, pouca gente sabe que Leite traduziu, com Jayme Tiomno, o famoso livro do Blackwood, *Física na Escola Secundária*, Rio de Janeiro: Ed. Fundo de Cultura, 1961. Este livro teve um papel relevante na melhoria da qualidade do ensino secundário de então. Além disso, Leite escreveu 20 livros, entre livros de texto, em diversos níveis, abordando as áreas de Teoria de Campos, Eletrodinâmica Quântica, Física Atômica, Mecânica Quântica, Gravitação e Relatividade, e outros sobre as relações entre Ciência & Sociedade.² Deles destacamos aqui um dedicado à graduação: seu *Fondements de la Physique Atomique*, que começou a ser escrito no CBPF, foi publicado originalmente no Rio, pela Editora Livro Técnico, e teve essa bela edição revista e ampliada, em francês, quando esteve em Strasburgo, publicada em Paris pela Ed. Hermann. Posteriormente, houve mais três outras edições, em português, com o título *A Estrutura Quântica da Matéria*, todas publicadas pela Editora da UFRJ.

Entretanto, há um curso introdutório que ele ministrou em Giff-Sur-Yvette, sobre *Interações Fracas* que, até onde sabemos, é muito pouco conhecido entre nós. Com a aprovação de Leite, decidimos, então, torná-lo público em língua portuguesa, já que o original é em francês. A tradução foi feita a partir do texto de sua segunda edição, de 1977, que saiu pelo *Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules* e pela *Université Louis Pasteur, Strasbourg*. Nosso objetivo inicial era lançar essa tradução em 2018, como parte das comemorações do centenário de nascimento de José Leite Lopes. Infelizmente, uma série de problemas adiou a publicação, que só agora pode vir à luz.

A reedição desse curso de *Interações Fracas* já se justificaria mesmo que fosse apenas pelo resgate de um documento histórico. No entanto, mais do que isso, entendemos que as escolhas didáticas feitas aqui por Leite Lopes, bem como sua abordagem fenomenológica e histórica são, ainda hoje, muito apropriadas para

²A relação completa de suas publicações pode ser encontrada na já citada biografia de Leite escrita por Bassalo & Caruso.

um curso introdutório. Toda essa parte “pré bósons intermediários” quase não se encontra mais nos livros de texto modernos, embora estejamos convencidos de sua importância para uma compreensão mais ampla de como se deu o desenvolvimento das Interações Fracas.

Conforme já foi dito, trata-se de um curso introdutório, e é exatamente aí que reside seu interesse. Ao fazermos a tradução, optamos por corrigir erros tipográficos, padronizar a notação de algumas partículas e antipartículas e refazer totalmente o *layout* do texto, apresentado agora em L^AT_EX. Alguns valores experimentais que, naturalmente, mudaram ao longo do tempo, foram explicitados como nota de rodapé dos editores (N.E.), bem como algumas referências seminais foram incluídas também como notas. Em outras situações, sugerimos que o leitor consulte o *Particle Data Group* (PDG). Ao final do texto, incluímos um Posfácio dos editores que oferece ao leitor, em síntese, uma linha do tempo dos principais desenvolvimentos no estudo das Interações Fracas de 1974 até os dias de hoje, no qual se fornecem as referências originais que forjaram o conhecimento dessa área e, ao final, uma bibliografia suplementar, contendo apenas livros, que pode ajudar nos estudos introdutórios e mais avançados das Interações Fracas.

Por fim, agradecemos a Francisca Valéria Fortaleza, pela digitação em L^AT_EX da maioria das equações, ao amigo Sebastião Alves Dias, por ter aceito nosso convite para escrever a quarta capa do livro e por sua gentil colaboração na revisão final do texto, e ao José Roberto Marinho, editor da Livraria da Física, por ter tornado esse projeto uma realidade.

Os Editores

Introdução

A – O ideal filosófico dos físicos sempre foi o de reduzir a variedade de corpos materiais às configurações de um pequeno número de objetos fundamentais, *átomos* para os gregos, *partículas elementares*, para os físicos de hoje.

Os 92 elementos de Mendeleev foram explicados a partir de três partículas, o elétron, o próton e o nêutron; esses, assim como os fótons, são responsáveis pela transferência de energia e de *momentum* entre os átomos, sendo os objetos primordiais dos físicos em 1934.

A descoberta posterior dos *píons*, postulados por Yukawa, em 1935, para explicar as interações nucleares, do *múon* e do *neutrino*, dos *kaons* e, sobretudo, dos *hyperons* e das ressonâncias parecia mostrar que a realidade subjacente dos objetos fundamentais é talvez muito rica para ser reduzida a um pequeno número de entidades.

Hoje sabemos que as partículas elementares são classificados como *bósons* (partículas com *spin* inteiro que obedecem à estatística de Bose-Einstein) e *férmions* (partículas de *spin* semi-inteiro que obedecem ao princípio de Pauli).

Tentamos hoje descrever os férmions e os bósons hadrônicos como sistemas compostos de 3 objetos fundamentais ou 3 tripletos (ou 3 quadrupletos) de objetos fundamentais – os *quarks*. Os léptons ainda não foram satisfatoriamente incorporados a tais modelos e a existência do múon e seu neutrino não é compreendida teoricamente. Fora do mundo dos *quarks* haveria não só léptons, mas também fótons (lembremo-nos da tentativa de Louis de Broglie de considerá-los como um sistema neutrino-antineutrino), os mésons leptônicos, se eles existem, W^+ , W^- , Z , os *grávitons*, se eles existirem. Não é impossível que outros léptons, *farouches*,³ talvez com massa grande, tenham escapado até agora da observação, sejam descobertos e que, em seguida, uma certa lei de simetria permita compreender também o que são o múon e seu neutrino.

³fugidios.

Tabela 1: Bósons

Bóson	intervem nas interações	spin	carga	existência
Gráviton ($m = 0$)	gravitacionais	2	0	não observado
Mésons lépticos W^+, W^-, Z	fracas	1	$+, -, 0$	não observado ⁴
Fóton ($m = 0$) γ	eletromagnéticas	1	0	
Mésons hadrônicos $\pi, K, \eta,$ $\rho, K^* \text{ etc.}$ ⁵	fortes	0,1,2	$+, -, 0$	

Tabela 2: Férmions

Férmions	intervêm nas interações	spin
Léptons $e^-, \nu_e,$ μ^-, ν_μ	fracas e eletromagnéticas	1/2
Férmions hadrônicos, nucleons, híperons ressonâncias <i>etc.</i>	fracas, eletromagnéticas e fortes	1/2, 3/2, ...

Talvez não devamos procurar a simplicidade em objetos fundamentais que, uma vez que exercem interações fortes entre eles, dão origem a estruturas que podem igualmente ser consideradas, por sua vez, como objetos fundamentais. Assim, o pión de Yukawa era uma partícula elementar, que era incorporada ou absorvida por um núcleo que se transformava em outro núcleo como:

$$p \rightarrow n + \pi^+$$

O pión de Yang e Fermi, que é claramente equivalente ao de Yukawa, era, por outro, lado concebido como um sistema composto de um par primordial núcleon-antinúcleon:

⁴N.E.: Foram descobertos em 1983, posteriormente a data do livro original.

⁵N.E.: Essa era a visão pré QCD, na qual os bosons intermediários são 8 gluons de spin 1 e carga de cor.

$$\pi^+ \approx (p\bar{n})$$

Talvez devamos procurar uma simplicidade mais profunda dentro da classificação das interações fundamentais indicadas na Tabela 3.

Tabela 3: Interações

Interação	quem se submete	fonte	constante característica
Gravitação	todas as partículas: a matéria e a energia	tensor energia-momentum	$G_{\text{grav}} \frac{m_e^2}{e^2} \simeq 0,2 \times 10^{-42}$
Fracas	leptons e hádrons	correntes fracas	$G_F \frac{m_p^2 c^2}{\hbar^3} \simeq 1,01 \times 10^{-5}$
Eletromagnéticas	partículas dotadas de um momento multipolar, carga ou momento magnético	corrente eletromagnética	$\alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137} \simeq 10^{-2}$
Fortes ⁶	matéria hadrônica		$\frac{g^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \simeq 15$

B – Esta exposição é dedicada a uma introdução ao estudo das interações fracas e deve servir como preparação para apresentações subsequentes destinadas ao modelo de campos de calibre⁷ unificados – tentativa de descrever as interações fracas com uma teoria quântica de campos de calibre, renormalizável, contendo ao mesmo tempo a teoria de interações eletromagnéticas.

Essa unificação das interações fracas e eletromagnéticas, iniciada por Weinberg e Salam, será um evento importante se a teoria for, definitivamente, confirmada pela experiência.

A unificação de conceitos considerados independentes, a síntese de teorias aparentemente não relacionadas, responde ao ideal de unidade dos físicos.

Um esboço dos grandes momentos da História da Física, quando essas unificações foram concebidas, é mostrado na Tabela 4.

⁶N.E.: Atualmente, na QCD, é utilizado $\alpha_s(m_Z)$ que vale aproximadamente 0,1176

⁷N.E.: Ao traduzir o livro, respeitamos a vontade de Leite Lopes, que detestava que se usasse, em português, a palavra *gauge*, insistindo que deveríamos usar a palavra *calibre*.

C - A noção de propagação das interações físicas por um campo, herança de Maxwell e Lorentz, é definida na teoria relativística de campo com Einstein e a partir dele. A construção da teoria relativística da gravitação – talvez a mais bela conquista da física teórica – maximizou o poder de descrição e unificação do conceito de campo, sendo o campo gravitacional identificado com o tensor da métrica de um espaço-tempo riemanniano.

A cada partícula os físicos aprenderam a associar um campo. O número muito grande de partículas elementares nos dias de hoje desencorajou um grande número de físicos na crença do poder unificador da teoria de campo. Os esforços de Einstein para descobrir uma teoria unitária do campo gravitacional e do campo eletromagnético pareciam, para muitos deles, condenados ao fracasso, dada a diversidade de outros campos a serem considerados.

É no domínio das interações fortes que a teoria de campo não foi bem sucedida até agora.

Os esforços atuais na busca de uma teoria unitária de interações eletromagnéticas e interações fracas, como proposto por Weinberg, Salam e Ward, constituem uma vitória para a filosofia da teoria de campo. Eles podem abrir o caminho para uma compreensão global e profunda da natureza das forças de interação e partículas elementares, com as interações fortes incluídas.

No que se segue, o primeiro capítulo será uma exposição das interações eletromagnéticas de campos complexo, escalar, vetorial e espinorial. Mostraremos que o campo electromagnético pode ser considerado como um campo de calibre introduzido na teoria para que ela seja invariante em relação ao grupo de transformações de calibre de segunda classe. Este princípio leva à construção precisa das interações eletromagnéticas.

O segundo capítulo irá expor os campos de Yang-Mills e a teoria de campo invariante em relação ao grupo de transformações de calibres não abelianos. Também mostra a construção, graças a este princípio de invariância, de correntes de isospin conservadas que são associadas com campos de calibre.

Os capítulos seguintes, por outro lado, farão um resumo histórico do desenvolvimento da teoria das interações fracas, inicialmente construída para descrever os processos de decaimento beta e por analogia com a eletrodinâmica. Neles veremos a descoberta extraída, passo a passo, da experiência, de princípios e regras e a violação de princípios como os de invariância no que diz respeito à reflexão espacial e no que diz respeito à conjugação de carga – até a formulação da lagrangiana efetiva de correntes e o estudo da estrutura de correntes fracas.

O mérito de Weinberg, Salam e Ward foi mostrar que é possível construir essa teoria a partir da introdução de campos de calibre e da noção de quebra de simetria espontânea. Este será o propósito das apresentações posteriores dos Srs. Cabibbo e Iliopoulos.

Tabela 4: Momentos históricos da Física

Newton (1686)	A força exercida sobre uma pedra pela Terra é idêntica à força entre a Terra e a Lua: universalidade da força gravitacional.
Maxwell (1855)	O campo elétrico e o campo magnético são partes do campo eletromagnético, acoplado às correntes e densidades de cargas. As ondas de luz são ondas eletromagnéticas de certas frequências. A Óptica é um capítulo da Eletrodinâmica.
Einstein, Lorentz, Poincaré (1905)	O espaço e o tempo são sub-espacos do espaço de Minkowski. <i>Momentum</i> e energia, corrente e densidade de carga são componentes de um único objeto e se transformam umas nas outras sob ação do grupo de Lorentz. Matéria e energia são equivalentes.
Einstein (1915)	O campo de gravitação é o tensor da métrica de um espaço de Riemann a quatro dimensões. Teoria relativística da gravitação.
De Broglie (1924)	A dualidade onda-partícula é verdadeira não apenas para a luz, mas também para toda forma de energia e matéria.
Schrödinger, Heisenberg (1925)	Nascimento da Mecânica Quântica. Todos os sistemas atômicos devem ser descritos pelos vetores de estado que obedecem à equação de Schrödinger.
Pauli (1925, 1940)	O princípio de exclusão e a explicação da estrutura eletrônica dos átomos. Estatística e spin.
Heisenberg, Pauli, Dirac (1929)	Nascimento da teoria quântica dos campos.
Fermi (1934)	Teoria da interações fracas.
Yukawa (1935)	Previsão teórica dos píons como veículos das interações fortes.

Klein, Puppi, Tiomno, Wheeler, Michel, Cabibbo (1949-1964)	Universalidade das interações fracas.
Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson (1949)	Renormalização da eletrodinâmica quântica.
Feynman (1949) (lembrar Stuckelberg)	Os diagramas de Feynman no poder.
Wigner (1927)	As representações do grupo de Poincaré. O papel da paridade e da reversão do tempo. A teoria de grupos e as simetrias em teoria quântica.
Yang, Lee (1957)	Violação do princípio de invariância das leis físicas em relação à reflexão espacial nas interações fracas.
Marshak, Sudarshan, Feynman, Gell-Mann, Zeldovich (1958)	Teoria $V - A$ das interações fracas. CVC.
Sakata, Gell-Mann (1957-1964)	Descrição dos bárions e mésons a partir de três objetos fundamentais. $SU(3)$ e o modelo a quarks.
Gürsey, Radicati, Pais (1964)	$SU(6)$.
Chew, Low, Gell-Mann, Mandelstam, Veneziano, Goldberg, Regge, Omnès, Froissart, Fubini <i>et al.</i> (1954)	Teoria e modelos das interações fortes.
Yang e Mills (1954)	Os campos de calibre generalizados.
Weinberg, Salam, 't Hooft (1967, 1971)	O modelo de campos de calibre unificados – unificação das interações fracas e eletromagnéticas e sua renormalização.
't Hooft, Faddeev, Po- pov, Veltman, B.W.Lee, Bollini, Giambiagi <i>et al.</i> (1967, 1972, 1974)	Quantificação dos campos de calibre e regularização dimensional.