



e-Boletim de Física

International Centre for Condensed Matter Physics
Instituto de Física, Universidade de Brasília
Ano III, Agosto de 2014 • <http://www.boletimdafisica.com/> • eBFIS 3 008-1(2014)

A Construção de um paradigma da física teórica: A teoria de Yang-Mills-Shaw (The birth of a theoretical physics paradigm: the Yang-Mills-Shaw theory)

Thales Costa Soares*

IF Sudeste MG - JF, Centro de Ciências UFJF e GFT/JLL.

Humberto Belich

UFES, CLAFEX - CBPF e GFT/JLL.

José Abdalla Helayel-Neto

CLAFEX - CBPF e GFT/JLL.

André Penna-Firme

Fac. Educação e Instituto de Física, UFRJ.

Em 28 de junho de 1954, C. N. Yang e R. Mills apresentam um artigo ao periódico *Physical Review*, uma contribuição estruturante para a 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 Quântica (QED). No presente ano, comemora-se os 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 a Teoria Eletrofraca, o Modelo Padrão da Física de Partículas, inclusive abrangendo teorias que envolvem a gravitação e que descrevem física além do Modelo Padrão. 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 uma física escolar mais próxima de questões contemporâneas. Nesse texto, pretendemos fazer uma incursão aos antecedentes do trabalho de Yang-Mills-Shaw (YMS) e 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, que era inicialmente o problema de YMS; e a retomada por Salam da proposta da teoria de YMS para as interações fracas. Tudo isso, sempre focando nos 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.

In June 28, 1954, C. N. Yang and R. Mills have published a truly fundamental paper on the Physics of Fundamental Interactions in *Physical Review*. At the same time, Ronald Shaw, a Salam's PhD student, develops the same subject in his thesis. In both works, this is the first formulation of a field theory for vector boson mediators with self-interactions, different from the scenario set up by Quantum Electrodynamics (QED). This year, Yang-Mills-Shaw theory is sixty-year old and it sets out as a remarkable contribution to contemporary physics, consolidating the gauge-theory paradigm in many branches of Physics, such as the Electroweak Theory, the Standard Model of Particles Physics, including gravity and other physical landscapes beyond the Standard Model. Our aim in this paper is mainly to present a popularization text, discussing the key contributions of the Yang-Mills set-up, the independent efforts by R. Shaw and the previous works and ideas that influenced the constitution of the gauge-thinking era.

Keywords: Symmetries; Fundamental Interactions; Particle Physics; Gauge Theories.

*tcsoares@gmail.com

I. INTRODUÇÃO

Há muito, discute-se a necessidade de inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio (EM). Isto está muito longe ainda de ser realidade e, dentre várias razões, uma delas está ligada à formação de professores, como aponta Terrazzan [1]. A carência de material didático, seja de apoio, seja formativo, contribui para que essa realidade ainda permaneça inalterada. Temos exceções. Alguns bons textos de divulgação científica já nasceram desse esforço, como, por exemplo alguns voltados para a física de partículas dentre os que destacamos a referência [2], e um pouco mais voltado para formação de professores, [3]. Recentemente, como fruto de um projeto de extensão desenvolvido no Centro de Ciências da UFJF, como parte de um projeto CAPES, apresentamos um texto em [4].

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 os mesmos conteúdos, e sempre 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 a partir da 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 Fundamentais.

Apresentamos alguns antecedentes que prepararam o caminho. Discutimos o texto de Yang-Mills, fazendo uma interpretação e criando um discurso acerca de algumas ideias que permeiam a Física das Interações Fundamentais. Com isso, fornecemos subsídios, tanto de conceitos como de referências, para aqueles professores que desejem alguma informação que possa ser futuramente trabalhada em sala de aula. Por fim, mostramos como o trabalho de Yang-Mills trouxe importantes contribuições, não apenas a partir das respostas contidas nele, mas também acerca de questões que foram formuladas a partir dele, e 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, a 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 deve passear 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.

II. 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 [5]. 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.

No período de 1927 a 1931, Dirac inicia uma série de estudos, que, no fundo, estão todos interligados, e que vão da quantização do campo eletromagnético, à formulação de uma equação relativística para o spin do elétron, o acoplamento do elétron ao campo eletromagnético e considerações sobre uma possível estrutura do elétron, o 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 raiais espectrais do átomo de hidrogênio, eram realizadas como contribuições perturbativas ao tratamento não-relativístico. Mas Dirac acreditava que a Relatividade Restrita, por ser um fundamento, devesse estar presente em uma formulação a priori, e não entrar como correções de 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. Sua teoria trazia alguns resultados embaraçosos que depois passaram a ser o seu sucesso. A descoberta da existência de anti-partículas, previstas pela equação quântico relativista de Dirac, foi um dos grandes feitos extraordinários desse grande físico. A previsão do pósitron, que na verdade é o antieletrón, e a sua confirmação experimental em 1932, foi uma das maiores descobertas de toda a história da física [6]. Além disso, justifica-se o fator giromagnético do elétron e, ainda no contexto do spin, sua formulação permite a compreensão de sua origem.

Na formulação de Dirac, o spin passa a ser uma consequência geométrica, ligada à estrutura e geometria do espaço-tempo. Tecnicamente falando, são o grupo de simetria de Lorentz e a simetria de Yang-Mills-Shaw da Teoria Eletrofraca que nos permitem compreender a

origem da carga elétrica. É interessante observar que a massa e a carga do elétron são propriedades adquiridas dinamicamente, porém o spin é uma propriedade nata: ao surgir no espaço-tempo, o elétron surge sem massa e sem carga elétrica, mas já exibe o seu spin.

E, nesse contexto, em 1932, descobre-se que, no interior do núcleo atômico, também está presente uma partícula sem carga e com spin, que é o nêutron. O núcleo, já se sabia, por previsões feitas por Rutherford, era constituído então de nêutrons, sem carga elétrica, e prótons, dotado de carga elétrica positiva [7]. Era necessário, assim como fez Dirac, que se justificasse, sob as mesmas bases, a origem do spin do nêutron.

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.

A proposta de Heisenberg de trazer o grupo de calibre $SU(2)$ para as interações fortes, será posteriormente retomada por YMS. Sob essa questão há ainda o trabalho de Yukawa [8]. 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 massivos, deveriam ser partículas escalares. Necessariamente os mediadores das interações fortes, por serem de curto alcance, deveriam ser escalares massivos. 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, posteriormente detectados por Lattes [9], um dos maiores nomes da física brasileira.

III. A TEORIA DE YANG-MILLS-SHAW

Como discutido, a passagem para mediadores da interação forte vetoriais não era trivial, pois havia todo um contexto que justificava mediadores escalares. Mas uma importante publicação teórica de Wigner [10] e Cassen-Condou [11], mostram que nos processos de interações nucleares, o spin isotópico total deveria se conservar, fato posteriormente comprovado experimentalmente por Lauretsen [12], e confirmado nos trabalhos de Inglis [13] e Hildebrand [14]. Isso mudava então o cenário para a descrição das interações fortes, pois a formulação de Yukawa não acomodava essa regra de conservação. E ainda, de cunho mais matemático, havia também os trabalhos de H. Weyl, a respeito da importância das teorias

de calibre abelianas.

Portanto, a regra de conservação do spin isotópico, e a existência de três mediadores com três diferentes estados carregados, que se acoplam 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 [15]. 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 já confirmada por essa teoria. 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 dos quanta de ação do campo forte, chegam a um resultado impressionante e inconsistente com o que se precisa para a interação forte, obtendo 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 formalizam um problema importante 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 [16]. 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.

IV. 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 [17] 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 [17] 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 [18] e colaboradores realizam um experimento que comprova a hipótese da violação de paridade nos decaimentos fracos.

O resultado anterior, aparentemente, não tinha uma conexão direta com o conjunto de trabalhos de 1954 de Yang-Mills-Shaw [20, 21]. Quem realiza essa conexão é A. Salam [19]. Ele 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.

V. 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. Várias 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 problema da dimensionalidade do Espaço Tempo.

VI. AGRADECIMENTOS

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

-
- [1] 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;
 - [2] ABDALLA, M. C. B.. O Discreto Charme das Partículas Elementares. 1. ed. São Paulo: Fundação Editora Unesp, v. 3000. 344p, 2006;
 - [3] MOREIRA, M. A. Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011, 149p;
 - [4] COSTA-SOARES, T., HELAYEL-NETO, J. A. , BELICH Jr, H.. A Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais, CAPES, 66p, 2013;
 - [5] 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) HILDEBRAND, R. H. Neutral Meson Production in n.p Collisions Phys. Rev. 89 1090, 1953;
 - [6] Sua formulação trazia soluções de energia negativa que foram interpretadas pelo próprio Dirac como antipartículas. O que parecia ser um furo teórico, acabou sendo um dos seus grande triunfos. Em correspondência privada a N. Bohr, Heisenberg afirma estar triste com esses trabalhos de Dirac, sendo o capítulo mais triste da física contemporânea, motivando-o a mudar de área.
 - [7] Uma denominação bastante usada para os prótons e nêutrons é nucleon.
 - [8] YUKAWA, H. On the interactions of elementary particles, Proc. Phys-Math. Soc. Japan, 17, P.48, 1935;
 - [9] LATTES, C.M.G., MUIRHEAD, H., OCCHIALINI, G.P.S. and POWELL, C.F., Processes Involving Charged Mesons, Nature 159, 694-7, 1947;
 - [10] WIGNER, E. P., On the Consequences of the Symmetry of the Nuclear Hamiltonian on the Spectroscopy of Nuclei, Phys. Rev. 51, 106, 1937;

- [11] CASSEN, B., CONDON, E. U., On Nuclear Forces, Phys. Rev. 50, 846, 1936;
- [12] LAURITSEN, T., Energy Levels of Light Nuclei Ann. Rev. Nuclear Sci. 1 , 67, 1952;
- [13] INGLIS, D. R., The Energy Levels and the Structure of Light Nuclei, Rev. Mod. Phys. 25 390, 1953;
- [14] HILDEBRAND, R. H. Neutral Meson Production in n?p Collisions Phys. Rev. 89 1090, 1953;
- [15] HEISENBERG, W. Gesammelte Werke Collected Works / Original Scientific Papers / Wissenschaftliche Originalarbeiten, Springer; 1 edition (November 11, 1985)
- [16] YANG, C. N., Selected Papers 1945-1980 with Commentary World Scientific, 2005;
- [17] 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;
- [18] WU, C.S., AMBLER, E., HAYWARD, R.W., HOPPES, D.D. and HUDSON, R.P., , Phys. Rev, 105, 4, 1957;
- [19] SALAM A. On Parity Conservation and Neutrino Mass, Nuovo Cimento ser.10, 5, 299-301, 1957;
- [20] YANG, C. N., MILLS, R. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance - Physical Review, 96, 191-195, 1954;
- [21] SHAW, R. ; The problem of Particles Types and other contributions to the theory of Elementary Particles, PhD Thesis, 1955;