

Majorana

**O oráculo da
física contemporânea**

Carlos Alberto dos Santos



2024

Copyright © 2024 os organizadores e autores
1ª Edição

Direção editorial: Victor Pereira Marinho e José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Projeto gráfico e diagramação: 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)

Santos, Carlos Alberto dos
Majorana: o oráculo da física contemporânea / Carlos Alberto dos Santos. – 1. ed. –
São Paulo: LF Editorial, 2024.

Bibliografia.
ISBN 978-65-5563-496-9

1. Física quântica 2. Físicos - Itália - Biografia 3. Majorana, Ettore, 1906-1938ca. I. Título.

24-229152

CDD-530.092

Índices para catálogo sistemático:
1. Físicos : Vida e obra 530.092

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

LF Editorial

www.livrariadafisica.com.br

www.lfeditorial.com.br

(11) 2648-6666 | Loja do Instituto de Física da USP

(11) 3936-3413 | Editora

7

Majorana, Heisenberg, a interação de troca e o méson de Yukawa: o berço da interação forte *

Nas disciplinas básicas dos cursos de graduação em física há vários momentos nos quais são abordadas duas das quatro interações da natureza, a saber, a interação gravitacional e a interação eletromagnética. As outras duas, a interação fraca e a interação forte, são tratadas muito superficialmente. O decaimento beta é abordado nas disciplinas de física moderna e física nuclear, mas não no contexto da interação fraca, e a interação forte só é abordada como um elemento muito superficial no contexto histórico da física de partículas elementares. Por exemplo, no livro-texto de física quântica mais usado nos cursos de bacharelado e licenciatura em física¹ sequer é mencionado o fato de que a ideia da interação forte surgiu dos estudos de Werner Heisenberg no início dos anos 1930. Todavia, tanto a interação fraca, surgida dos trabalhos de Fermi também no início dos anos 1930, quanto a interação forte, podem ser abordadas por meio de transposições didáticas apropriadas ao nível de conhecimento da física básica, tendo como cenário a transição do modelo de Bohr para as teorias quânticas de Dirac, Heisenberg e Schrödinger. Este é um cenário típico dos cursos de física moderna ofertados no bacharelado e na licenciatura, assim como na disciplina Física Contemporânea do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

O modelo atômico inicialmente proposto por Rutherford em 1911 e formalizado por Bohr entre 1912 e 1913, funcionou perfeitamente bem para o átomo de hidrogênio, mas apresentou inúmeras falhas no tratamento de outros átomos². Entre 1913 e 1925 diversos físicos tentaram consertar o modelo, até que, quase simultaneamente, Heisenberg³, Dirac⁴ e Schrödinger⁵ apresentaram suas abordagens em substituição ao modelo de Bohr. A partir de então essas abordagens passaram a ser conhecidas como a nova mecânica quântica⁶.

Neste cenário de aplicações da nova teoria quântica a problemas de física atômica surgiu a ideia de força de troca. Durante quase uma década, o conceito foi usado em diferentes problemas, mas a sua compreensão era nebulosa, até que em 1935, Yukawa fez uma abordagem mais esclarecedora ao tratar a interação entre partículas elementares, propondo a existência do méson, uma partícula responsável pela mediação da interação forte⁷. Como qualquer tema importante da história da ciência, a evolução do conceito de força de troca

* Versão ampliada de artigo homônimo, publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 46, e20240093 (2024).

até chegar ao conceito de interação forte contou com a colaboração de muitos estudiosos, entre os quais podemos destacar os cinco expostos na Figura 7.1.

Cathryn Carson^{6,8} apresenta um possível detalhamento da Figura 7.1, com vários exemplos do uso do conceito de força de troca no período 1926-1950, entre os quais destacarei aquele considerado como um dos primeiros, e que é bastante usado em livros de mecânica quântica. Trata-se do trabalho de Walter Heitler e Fritz London, publicado em 1927⁹. Farei uma abordagem qualitativa, compreensível para quem já tomou conhecimento da equação de Schrödinger.

Heitler e London pretendiam explicar a ligação entre dois átomos idênticos, como hidrogênios na formação da molécula H_2 , a qual tem dois elétrons movendo-se entre os dois núcleos. Heitler e London consideraram que esse sistema tem dois estados. Em um deles, o *elétron 1* fica próximo do *núcleo a*, e o *elétron 2* fica próximo do *núcleo b*. No outro estado, o *elétron 2* fica próximo do *núcleo a*, e o *elétron 1* fica próximo do *núcleo b*. Usando a notação de função de onda (ver equação de Schrödinger), podemos escrever esses dois estados da seguinte maneira:

$$\text{Estado 1: } \psi_a(1)\psi_b(2) \quad (7a)$$

$$\text{Estado 2: } \psi_a(2)\psi_b(1) \quad (7b)$$

As notações (7a) e (7b) são intuitivas e compreensíveis para quem já estudou a equação de Schrödinger, mesmo que superficialmente. No entanto, o que se segue da sua manipulação para calcular estados degenerados é bastante complicado para quem tem apenas o conhecimento básico, razão pela qual apresentarei o cenário formal em uma linguagem acessível a alunos de graduação.

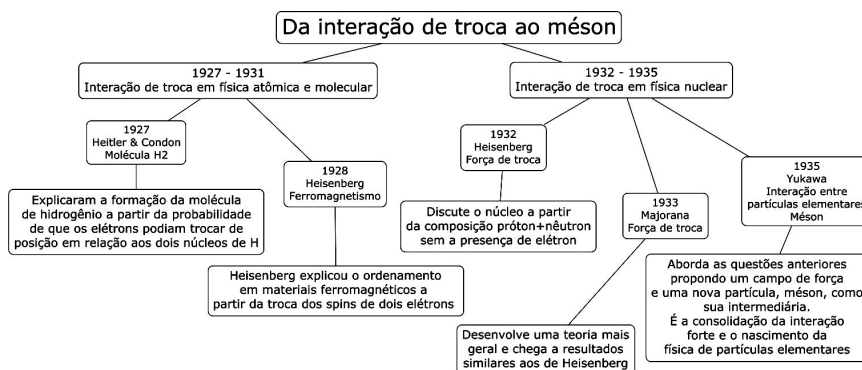


Figura 7.1. Representação simplificada da linha do tempo referente à evolução do conceito de força, da física atômica e molecular até o surgimento do conceito de interação forte mediada pelo méson.

Fazendo uso de um método que é conhecido como teoria da perturbação, Heitler e London calcularam as energias dos dois estados desse sistema e a frequência com a qual os elétrons “trocam” de posição. Ou seja, o *elétron 1* vai para a proximidade do *núcleo b*, e o *elétron 2* vai ficar próximo do *núcleo a*. Eles calcularam essas energias em função das distâncias entre os núcleos de hidrogênio e justificaram a ligação química mostrando que a energia de ligação, é menor do que a energia quando os núcleos estão infinitamente separados. Essa energia é uma espécie de potencial que origina uma *força de troca* entre os dois núcleos. Ainda no final dos anos 1920, essa ideia foi usada por Heisenberg para explicar o fenômeno do ferromagnetismo. Quem chegou a estudar magnetismo em nível de pós-graduação lembra do uso frequente da expressão *energia de troca*. Está aí nesse trabalho de Heitler e London a origem do conceito. Vejamos agora como Heisenberg e Majorana levaram esse cenário para o interior do núcleo atômico, e como Yukawa considerou essas abordagens para consolidar a fase inicial do que hoje conhecemos como física de partículas elementares.

A literatura básica que engloba essa discussão consiste em três artigos de Heisenberg¹⁰⁻¹², um de Majorana¹³ e três de Yukawa e colaboradores^{7,14,15}. A transposição didática aqui apresentada tem como fonte central esses sete artigos. São duas as principais razões para essa escolha. Em primeiro lugar pela definição do contexto histórico. Em segundo lugar, mas não menos importante, pelo caráter sempre instrutivo que permeia os primeiros artigos publicados sobre determinado tema científico. É nas primeiras publicações que os autores precisam colocar clara e pedagogicamente o problema a ser abordado, e as primeiras tentativas para solucioná-lo. Nas publicações seguintes, e mesmo na maioria das publicações de revisão, esses detalhes, muitas vezes sutis, não são explicitados.

A interação de troca de Heisenberg

No famoso artigo de 1932¹⁰, Heisenberg começa mencionando os trabalhos de Irène e Frédéric Joliot-Curie e a interpretação de James Chadwick, publicados alguns meses antes, naquele mesmo ano. Os experimentos do casal Joliot-Curie e a interpretação de Chadwick resultaram na descoberta do nêutron. Tão importante quanto a descoberta, foi a demonstração de que não havia elétrons no interior do núcleo, algo que praticamente toda a comunidade científica imaginava existir. No entanto, durante o fenômeno conhecido como decaimento beta, um nêutron se transforma (decai) em um próton e um elétron, que é ejetado do núcleo sob a forma de uma partícula beta. Investigar essa questão foi o principal objetivo de Heisenberg naquele trabalho de 1932.

Entre as várias suposições feitas por Heisenberg, vamos destacar aquelas que têm a ver com a ideia de força de troca. Ele começa supondo que se prótons e nêutrons estão a uma distância comparável às dimensões nucleares, então, de modo similar ao caso da molécula H_2 , deverá haver uma força de troca entre eles. Inicialmente ele teve essa ideia supondo a existência de um elétron no núcleo, que ficaria mudando de posição entre o próton e o elétron. Mas, já no parágrafo seguinte ele diz que é melhor admitir que essa força de troca, que é representada por uma integral, $J(r)$, que depende da distância entre o próton e o nêutron, é uma propriedade fundamental do par próton-nêutron. Ou seja, não há necessidade de recorrer a movimento de elétron no interior do núcleo. De modo análogo, a

interação entre nêutrons é representada pela integral $K(r)$. Entre os prótons a interação é a repulsão coulombiana.

Para encaminhar a formalização do problema, Heisenberg supôs que $J(r)$ e $K(r)$ tendem rapidamente para zero quando r passa de 10^{-12} cm, ou seja, quando eles estão separados por uma distância 10 vezes maior do que raio do núcleo. Além disso, para valores de r abaixo desse valor, $J(r) > K(r)$. Ou seja, a atração entre prótons e nêutrons é maior do que entre nêutrons. Cada partícula é caracterizada pelas suas posições, x , y e z , pela quantidade de movimento, p_k , pelo spin na direção z , σ^z , e por um número, q^ζ . Quando esse número é igual $+1(-1)$, a partícula é um nêutron(próton). Para definir a função hamiltoniana do núcleo, levando em conta a transição de um próton(nêutron) em um nêutron(próton), Heisenberg usou um complexo artifício matemático baseado em matrizes 2×2 , $q_k^\xi, q_k^\eta, q_k^\zeta, q_l^\xi, q_l^\eta, q_l^\zeta$. Quando há transformação de prótons em nêutrons, ou vice-versa, a diferença de massas aparece na forma de energia, representada pela letra D .

Embora a discussão detalhada da função obtida por Heisenberg esteja fora do escopo do presente livro, por uma questão de completeza e para facilitar a narrativa que se segue, convém fazermos uma apreciação qualitativa da hamiltoniana de Heisenberg:

$$H = \frac{1}{2M} \sum_k p_k^2 - \frac{1}{2} \sum_{k>l} J(r_{kl}) (q_k^\xi q_l^\xi + q_k^\eta q_l^\eta) - \frac{1}{4} \sum_{k>l} K(r_{kl}) \cdot (1 + q_k^\zeta)(1 + q_l^\zeta) + \frac{1}{4} \sum_{k>l} \frac{e^2}{r_{kl}} (1 - q_k^\zeta)(1 - q_l^\zeta) - \frac{1}{2} D \sum_k (1 + q_k^\zeta) \quad (8)$$

O primeiro termo na Equação (8) é bastante conhecido. Trata-se da energia cinética das partículas. O segundo termo representa a energia de troca. O terceiro termo representa a energia de atração entre nêutrons. O quarto termo é a repulsão coulombiana entre prótons, e o quinto termo representa, em unidades de energia, a diferença de massa entre prótons e nêutrons. Quando um nêutron desaparece, surge um próton. A diferença de massa entre eles aparece sob a forma de energia. É exatamente algo assim que acontece no decaimento beta.

Heisenberg inicia sua análise da Equação (8) desprezando os três últimos termos. Ou seja, ele começa considerando apenas a energia cinética das partículas, e a energia de troca na interação entre prótons e nêutrons, para o caso de um núcleo com n partículas, sendo, n_1 nêutrons e n_2 prótons. Sua sofisticada argumentação, que supera o nível de conhecimento que estamos considerando, o conduziu à seguinte conclusão: a situação mais estável desse sistema, aquela que resulta na menor energia, ocorre quando há aproximadamente a mesma quantidade de nêutrons e prótons.

Depois de chegar a essa conclusão, Heisenberg passa a analisar o caso improvável de um núcleo constituído unicamente de nêutrons*. Ele apresenta uma instrutiva discussão, cujos fundamentos básicos podem ser apreciados por quem passou pela disciplina de física moderna da graduação em física. Por causa do terceiro termo na Equação (8), que

* Um sistema assim foi proposto sete anos depois, em 1939, e é atualmente uma realidade no cenário da astronomia com a denominação de estrela de nêutrons.

representa a atração entre os nêutrons, pode-se dizer que esse núcleo é altamente estável, uma vez que teríamos que gastar energia para retirar um nêutron do seu interior. No entanto, ganharíamos energia se colocássemos um próton no lugar do nêutron. É esse tipo de reação que ocorre no decaimento beta. Um nêutron dá lugar a um próton, e uma partícula beta é emitida pelo núcleo. Heisenberg sugere que o fenômeno resulta da ação de um campo de força sobre o nêutron. Talvez seja esta a primeira vez em que alguém sugere a existência de um campo nuclear similar ao campo eletromagnético. A ideia avançaria com os trabalhos de Yukawa^{7,14,15}.

Heisenberg investigou o balanço de energia nesse tipo de transformação de um nêutron em um próton, em função da relação entre o número de nêutrons e o de prótons, n_1/n_2 , e mostrou que se esta razão cai abaixo de determinado valor crítico, a repulsão coulombiana entre prótons atinge um valor tão grande, que o núcleo passa a emitir partículas alfa. Então, em vez de um decaimento beta, teremos um decaimento alfa. Heisenberg determina, empiricamente, a curva n_1/n_2 que representa núcleos estáveis, lembrando que devido a outros detalhes da estrutura nuclear, essa curva tem valor apenas qualitativo na definição dos limites para a ocorrência dos decaimentos alfa e beta:

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,47 + 0,077 \frac{n_2}{\sqrt[3]{n}} \quad (9)$$

Apesar dessa limitação, a discussão que Heisenberg apresenta a partir da Equação (9) é de grande relevância para nossa compreensão a respeito desses dois importantes fenômenos nucleares observados nas diversas séries radioativas¹⁶. Os dois valores mais altos de n_1/n_2 induzem decaimentos beta, depois, quando essa razão diminui, começam os decaimentos alfa, até que o valor de n_1/n_2 volta a atingir o valor crítico para o decaimento beta. Finalmente, o valor de n_1/n_2 atinge o ponto de estabilidade nuclear. Há casos nos quais o núcleo decai emitindo partículas alfa e beta simultaneamente.

No segundo artigo de 1932¹¹, e no de 1933¹², Heisenberg aprofunda as questões discutidas acima. Esses aprofundamentos não serão aqui discutidos porque estão fora do escopo da transposição didática pretendida neste livro.

A interação de troca de Majorana

Antes de apresentar o trabalho de Majorana sobre esse assunto¹³, apresentarei o contexto histórico no qual o trabalho foi realizado. Esse relato mostra bem a complexa e singular personalidade de Ettore Majorana, descrita em extensa literatura¹⁷⁻¹⁹. Logo que tomou conhecimento do artigo publicado por Irène e Frédéric Joliot-Curie, em janeiro de 1932²⁰, Majorana percebeu que o casal francês tinha se equivocado na interpretação do experimento, que consistia, inicialmente, em bombardear berílio com partículas alfa. O resultado foi descrito a partir da reação



Ou seja, o bombardeio resultava na produção de carbono e, na interpretação do casal Joliot-Curie, de raios gama altamente energéticos. O casal Joliot-Curie imaginou que esses raios gama poderiam produzir transmutação. Para testar a hipótese, eles colocaram diferentes materiais na frente dos raios γ e terminaram obtendo a ejeção de prótons de materiais ricos em hidrogênio, como a parafina. Seus cálculos mostravam que prótons de 5 MeV eram espalhados, via efeito Compton, por raios γ de 50 MeV, um valor jamais medido para esse tipo de radiação. Majorana deduziu que o *raio gama* era, na verdade, o *próton neutro*, uma partícula que Rutherford havia prevista em 1919²¹. Fermi insistiu para que Majorana publicasse sua conclusão, mas ele rejeitou a ideia. Alguns dias depois Chadwick publicou o artigo que é considerado como a descoberta do nêutron²².

Majorana continuou analisando a estrutura do núcleo, como sendo composto apenas por prótons e nêutrons^{18,19,23,24}, e em poucos dias elaborou uma teoria para mostrar como prótons e nêutrons interagiam para formar o núcleo. Ele fez isso antes das publicações de Heisenberg. Fermi percebeu a importância daquela teoria e tentou convencê-lo a publicar. Obediente à sua personalidade refratária, Majorana disse que sua teoria nem era tão boa assim, nem estava *madura* para publicação. Desesperado, Fermi perguntou-lhe se podia apresentar seus resultados em uma conferência que estava prevista para o mês de julho, em Paris, cuja temática era o estado atual da física do núcleo atômico. Majorana o proibiu de fazer isso. No início de junho daquele ano, 1932, Heisenberg submeteu seu primeiro artigo à *Zeitschrift für Physik*¹⁰. No início de julho, na conferência de Paris, Fermi ignorou a proibição de Majorana e deu aos presentes o conhecimento dos seus resultados. Deve ter sido ali que ele acertou com Heisenberg e Bohr uma futura visita de Majorana.

No dia 19 de julho de 1932 o artigo de Heisenberg é publicado. Quando Fermi mostra a Majorana a oportunidade que ele perdeu de ter saído na frente, ele ouve do *grande inquisidor*: melhor assim, Heisenberg já fez o serviço, não preciso mais publicar.

A alternativa de Fermi foi convencê-lo a visitar Heisenberg, em Leipzig, e Bohr, em Copenhague. Conseguiu uma bolsa do *Consiglio Nazionale delle Ricerche* para financiar a estadia de Majorana no exterior durante seis meses, começando por Leipzig, aonde ele chegou no dia 20 de janeiro. A autoridade de Heisenberg se impôs, e já em março de 1933 Majorana envia para a *Zeitschrift für Physik* seu trabalho intitulado “Sobre a teoria do núcleo atômico”¹³. Para se ter ideia da importância desse artigo, basta saber que em 1935, Heisenberg publica o artigo “A estrutura dos núcleos atômicos leves”²⁵, no qual faz uma extensa análise do trabalho de Majorana, comparando seus resultados com os de outros pesquisadores da época. Pelo seu complexo nível de detalhamento, esse artigo de Heisenberg não será analisado na presente transposição didática.

O texto de Majorana tem a marca do grande cientista e sábio narrador do seu ofício. A partir de um cenário fenomenológico simples e profundo, ele aborda questões complexas com estratégias inovadoras. Ele começa apresentando o cenário definido por Heisenberg, a partir da discussão dos elementos presentes na Equação (8). Ele mostra que o valor da interação entre prótons e nêutrons é muito maior do que a atração entre nêutrons, e do que a energia resultante da diferença de massa entre prótons e nêutrons. Portanto, essencialmente, o que se deve buscar é a interação entre prótons e nêutrons, que Heisenberg denominou interação de troca, acrescida da energia cinética das partículas e da repulsão

eletrostática entre prótons. Na sua abordagem, Majorana mostra que não há necessidade de se levar em conta o spin das partículas, como fez Heisenberg. Tudo o que é necessário são as coordenadas das partículas.

A partir desse ponto a abordagem de Majorana é bem diferente daquela apresentada por Heisenberg. Enquanto este usa seus cálculos baseados em matrizes, Majorana usa funções de onda, uma abordagem similar à de Schrödinger⁵. Ele define a função de onda do núcleo como sendo o produto das funções de onda dos prótons e dos nêutrons, ambas dependentes exclusivamente nas posições das partículas, Q e q :

$$\psi = \psi_N(Q)\psi_P(q) \quad (11)$$

Majorana mostra que a partir da Equação (11) obtém-se para a interação entre prótons e nêutrons uma expressão similar àquela obtida por Heisenberg, mas com duas diferenças fundamentais:

1. no modelo de Heisenberg, Q e q incluem as posições e os spins das partículas;
2. no modelo de Majorana, há uma saturação na força de troca, de modo que em distâncias próximas aos raios das partículas a força passa a ser repulsiva para resguardar a impenetrabilidade das partículas.

A partir desses princípios, Majorana calcula a energia total do sistema, W , e investiga as condições nas quais ela é mínima:

$$W = T + E + A, \quad (12)$$

onde, T é a energia cinética das partículas, E é a energia de repulsão eletrostática entre prótons, e A é a energia de troca. Para simplificar os cálculos, Majorana considera apenas o caso no qual são pares os números de prótons e nêutrons. Os cálculos de T , E e A envolvem conceitos acima do nível exigido nas disciplinas de graduação em física, de modo que será apresentada apenas uma discussão qualitativa, apropriada para a transposição didática que aqui se propõe. É suficiente aqui destacar os dois resultados fundamentais obtidos por Majorana:

1. a densidade de nucleons (prótons ou nêutrons) é aproximadamente a mesma para todos os núcleos;
2. a energia de ligação por nucleon é aproximadamente a mesma para todos os núcleos.

Esses resultados têm a ver com um processo de saturação de densidade e de energia de ligação, que Heisenberg não percebeu na sua abordagem.

Para além das diferenças formais nas abordagens de Heisenberg e Majorana, há um detalhe que aparentemente passou despercebido por parte dos autores que analisaram os trabalhos de Majorana, excetuando Renato Pucci e colaboradores²⁴ e Salvatore Esposito²⁶. O detalhe refere-se à denominação *força de ressonância*, que Majorana usava, em alguns trechos do seu trabalho, em vez de força de troca. Essa é uma visão do problema que o distingue de Heisenberg e de todos aqueles que abordaram o assunto. Uma busca no Google Acadêmico mostra que a expressão *resonance force* jamais foi usada em estudos referente ao núcleo atômico entre 1930 e 1960.

Heisenberg e Majorana começam estudando o núcleo tendo como modelo o trabalho publicado por Heitler e London⁹ sobre a molécula H_2^+ , conforme detalhamento apresentado na introdução. Majorana viu na forma da abordagem de Heitler e London, uma semelhança com o processo de ressonância atômica, razão pela qual ele eventualmente usava a expressão “força de ressonância”, em vez de “força de troca”²⁶. Inspirado em uma figura publicada por Pucci e Angilella²⁴, montei as ilustrações da figura 7.2 para sugerir as analogias entre física atômica, física molecular e física nuclear referentes ao processo de ressonância.

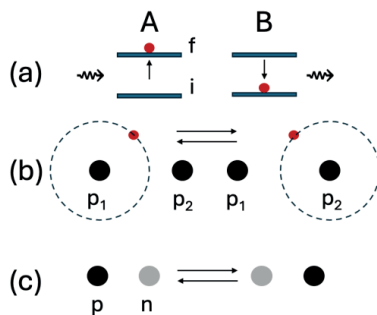


Figura 7.2 – Representação esquemática do fenômeno de ressonância: (a) na física atômica; (b) na física molecular; (c) na física nuclear.

Na figura 7(a), uma radiação com determinada energia induz a passagem de um elétron no estado inicial, i , para o estado final, f , sendo a diferença de energia entre os dois estados igual à energia da radiação. Aproximadamente 10^{-8} segundos depois, o elétron retorna ao estado inicial, e o átomo emite uma radiação com a mesma energia da radiação incidente. Esse é o fenômeno conhecido como ressonância atômica. Na Figura 7(b) tem-se uma representação para o caso da física molecular. Especificamente para o caso da molécula H_2^+ , com dois prótons e um elétron. Em determinado momento o elétron orbita em torno do próton 1; no momento seguinte ele passa a orbitar em torno do próton 2. Ao longo do tempo o elétron fica nesse vaivém entre os dois prótons. O fenômeno é análogo ao caso atômico. No caso nuclear (figura 7c), um próton transforma-se em um nêutron e na sequência esse nêutron pode se transformar em um próton. Não há registro de explicação fornecida por Majorana, mas acredita-se que ele viu nesse processo analogia com a ressonância no

caso da física molecular, razão pela qual ele interpretou a força de troca como sendo uma força de ressonância.

Em 1934 o cenário era basicamente esse apresentado acima. Um cenário que Miller²⁷ classificou como o início da física nuclear. Em novembro daquele ano, Yukawa envia para publicação o primeiro artigo da sua trilogia “Sobre a interação de partículas elementares”, que podemos considerar como o início da física de partículas elementares.

O méson de Yukawa

Será apresentada aqui uma transposição didática a partir de três trabalhos publicados por Hideki Yukawa⁷, Yukawa e Shoichi Sakata¹⁴, e Yukawa, Sakata e Mitsuo Taketani¹⁵. É curioso que Yukawa só vai mencionar Majorana a partir do segundo artigo, e mesmo assim ele não dá a referência do artigo de Majorana. Não se sabe se Yukawa tinha tomado conhecimento do artigo de Majorana quando ele submeteu o seu trabalho, em novembro de 1934.

Os fundamentos da trilogia “Sobre a interação de partículas elementares” são totalmente expostos no primeiro artigo de 1935⁷. Nos dois trabalhos seguintes^{14,15}, Yukawa e colaboradores dedicam-se ao aperfeiçoamento do método e suas aplicações em vários problemas que na época eram objeto de estudo de vários pesquisadores. Pela especificidade e complexidade das abordagens dos dois últimos artigos, tratarei aqui apenas do artigo I.

No artigo I, Yukawa menciona Heisenberg¹⁰ e Fermi²⁸ para dizer que pouco se sabe sobre a natureza da interação de partículas elementares, e que as energias de ligação calculadas pelos dois autores são muito menores do que os valores experimentais. Em função dessa constatação, ele propõe modificar as teorias de Heisenberg e Fermi. Em primeiro lugar ele não considera o nêutron como simplesmente “um nêutron”; o nêutron é uma partícula no estado do nêutron, assim como o próton é uma partícula no estado do próton. Para Yukawa, a transição de uma partícula pesada de um estado para outro, p.ex. de nêutron para próton, e vice-versa, nem sempre é acompanhada pela emissão de partículas leves, p.ex. um neutrino e um elétron, como previsto na teoria do decaimento beta de Fermi. Eventualmente, a energia envolvida na transição aparece sob a forma de outra partícula pesada. Para chegar a essa conclusão, Yukawa elabora sua teoria do campo nuclear. Na verdade, ele não menciona a expressão “campo nuclear” em nenhum dos três artigos. Ele diz que “a interação entre as partículas elementares pode ser descrita por meio de um campo de força, assim como a interação entre partículas carregadas é descrita pelo campo eletromagnético.” A expressão “campo nuclear”, em vez de campo de força, só foi usada em 1938, por Nicholas Kemmer²⁹. Na sequência adotarei a expressão campo nuclear.

Na formalização da sua teoria, Yukawa orientou-se pelo que ele sabia a respeito do campo eletromagnético. Ou seja, o campo nuclear, U , deveria obedecer a uma equação de onda igual àquela obedecida pelo campo eletromagnético:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) U = 0 \quad (13)$$

Por trás da ideia simples tem uma montanha de complexas equações, que Yukawa resolveu para chegar à previsão do méson e ganhar o Nobel de Física de 1949.

Diferentemente do campo eletromagnético, cuja força cai com $1/r^2$, no campo nuclear a força deve ter um componente de curto alcance, que cai mais rapidamente, i.e., com $1/r$. Yukawa modificou a Equação (13) para incluir esse fator de curto alcance:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right) U = 0 \quad (14)$$

A partir da Equação (14), Yukawa fez uma série de complexas considerações quânticas e chegou a um hamiltoniano equivalente àquele obtido por Heisenberg, Equação (8). Na sequência ele mostra que, como prótons e nêutrons obedecem à estatística de Fermi (spin semi-inteiro), o quantum associado ao campo U deverá obedecer à estatística de Bose, com spin inteiro. O quantum associado ao campo eletromagnético é o fóton. Yukawa não deu um nome ao quantum associado ao campo nuclear. Isso foi feito por Bhabha, em 1939³⁰, que o chamou de méson, porque sua massa, $1/10$ da massa do próton, conforme Yukawa mostrara, era intermediária, entre a do elétron e a do próton. Yukawa também mostrou que o méson pode ter carga $+e$ ou $-e$.

Ao discutir a não observação do méson, Yukawa realiza alguns cálculos e sugere que talvez ele não pudesse ser observado fora do núcleo. No entanto, já em 1937, Oppenheimer e Serber propuseram a existência de mésons em raios cósmicos. Dez anos depois eles foram detectados por Lattes e colaboradores em raios cósmicos³¹, e em 1948 Gardner e Lattes produziram o méson-pi em laboratório³². Em 1950, Cecil Frank Powell, líder do grupo que participou da primeira observação em 1947, ganhou o Nobel de Física “pelo desenvolvimento do método fotográfico de estudo dos processos nucleares e pelas suas descobertas sobre mésons feitas com este método”.

Referências

1. Eisberg, R. & Resnick, R. *Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. (Campus, 1986).
2. Grometstein, A. A. *The Roots of Things: Topics in Quantum Mechanics*. (Springer, 1999).
3. Heisenberg, W. Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Phys.* **33**, 879–893 (1925).
4. Dirac, P. A. M. The fundamental equations of quantum mechanics. *Proc. R. Soc. Lond. A* **109**, 642–653 (1925).
5. E. Schrödinger. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Phys. Rev.* **28**, 1049–1070 (1926).
6. Carson, C. The peculiar notion of exchange forces—I: Origins in quantum mechanics, 1926–1928. *Stud. Hist. Philos. Sci. Part B Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.* **27**, 23–45 (1996).
7. Yukawa, H. On the interaction of elementary particles. I. *Proc. Physico-Mathematical Soc. Japan. 3rd Ser.* **17**, 48–57 (1935).
8. Carson, C. The peculiar notion of exchange forces—II: From nuclear forces to QED, 1929–1950. *Stud. Hist. Philos. Sci. Part B Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.* **27**, 99–131 (1996).
9. Heitler, W. & London, F. Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Phys.* **44**, 455–472 (1927).
10. Heisenberg, W. Über den Bau der Atomkerne. I. *Zeitschrift für Phys.* **77**, 1–5 (1932).
11. Heisenberg, W. Über den Bau der Atomkerne. II. *Zeitschrift für Phys.* **78**, 156–164 (1932).
12. Heisenberg, W. Über den Bau der Atomkerne. III. *Zeitschrift für Phys.* **80**, 587–596 (1933).
13. Majorana, E. Über die Kerntheorie. *Zeitschrift für Phys.* **82**, 137–145 (1933).
14. Yukawa, H. & Sakata, S. On the interaction of elementary particles II. *Proc. Physico-Mathematical Soc. Japan. 3rd Ser.* **19**, 1084–1093 (1937).
15. Yukawa, H., Sakata, S. & Taketani, M. On the interaction of elementary particles. III. *Proc. Physico-Mathematical Soc. Japan. 3rd Ser.* **20**, 319–340 (1938).
16. Maddock, A. G. Radioactivity of the heavy elements. *Q. Rev. Chem. Soc.* **5**, 270–314 (1951).
17. Sciascia, L. *Majorana desapareceu*. (Rocco, 1991).
18. Magueijo, J. *A brilliant darkness*. (Basic Books, 2009).
19. Klein, E. *En cherchant Majorana: Le physicien absolu*. (Flammarion, 2013).
20. Nesvizhevsky, V. & Villain, J. The discovery of the neutron and its consequences (1930–1940). *Comptes Rendus Phys.* **18**, 592–600 (2017).
21. Rutherford, E. Bakerian Lecture: Nuclear Constitution of Atoms. *Proc. Roy. Soc. A* **97**, 374–392 (1920).
22. Chadwick, J. Possible Existence of a Neutron. *Nature* **129**, 312 (1932).

23. Recami, E. The Scientific Work Of Ettore Majorana: An Introduction. *Electron. J. Theor. Phys.* **3**, 1–10 (2006).
24. Pucci, R. & Angilella, G. G. N. Majorana: From Atomic and Molecular, to Nuclear Physics. *Found. Phys.* **36**, 1554–1572 (2006).
25. Heisenberg, W. Die Struktur der leichten Atomkerne. *Zeitschrift für Phys.* **96**, 473–484 (1935).
26. Esposito, S. A peculiar lecture by Ettore Majorana. *Eur. J. Phys.* **27**, 1147–1156 (2006).
27. Miller, A. I. Werner Heisenberg and the beginning of nuclear physics. *Phys. Today* **38**, 60–68 (1985).
28. Fermi, E. Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I. *Zeitschrift für Phys.* **88**, 161–177 (1934).
29. Kemmer, N. Nature of the nuclear field. *Nature* **141**, 116–117 (1938).
30. Bhabha, H. J. Classical theory of mesons. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* **172**, 384–409 (1939).
31. Lattes, C. M., Muirhead, H., Occhialini, G. P. & Powell, C. F. Processes involving charged mesons. *Nature* **159**, 694–697 (1947).
32. Gardner, E. & Lattes, C. M. G. Production of mesons by the 184-inch Berkeley cyclotron. *Science (80-.)*. **107**, 270–271 (1948).