

NEUTRINOS SOLARES
E O MÉTODO CIENTÍFICO



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Reitor

ANTONIO JOSÉ DE ALMEIDA MEIRELLES

Coordenadora Geral da Universidade

MARIA LUIZA MORETTI



Conselho Editorial

Presidente

EDWIGES MARIA MORATO

ALEXANDRE DA SILVA SIMÕES – CARLOS RAUL ETULAIN

CICERO ROMÃO RESENDE DE ARAUJO – DIRCE DJANIRA PACHECO E ZAN

IARA BELELI – IARA LIS SCHIAVINATTO – MARCO AURÉLIO CREMASCO

PEDRO CUNHA DE HOLANDA – SÁVIO MACHADO CAVALCANTE

PEDRO CUNHA DE HOLANDA

NEUTRINOS SOLARES
E O MÉTODO CIENTÍFICO

EDITORIA
UNICAMP

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP
DIVISÃO DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO
BIBLIOTECÁRIA: ERICA CRISTINA DE CARVALHO MANSUR – CRB-8ª / 6734

H689n Holanda, Pedro Cunha de, 1973-
 Neutrinos solares e o método científico / Pedro Cunha de Holanda.
 – Campinas, SP : Editora da Unicamp, 2022.

1. Neutrinos solares. 2. Sol. 3. Ciência - Metodologia. 4. Física.
5. Ciência - Filosofia. I. Título.

CDD – 523.76
 – 523.7
 – 501
 – 530
 – 501

ISBN 978-85-268-1552-0

Copyright © Pedro Cunha de Holanda
Copyright © 2022 by Editora da Unicamp

As opiniões, hipóteses, conclusões e recomendações expressas
neste livro são de responsabilidade do autor e não
necessariamente refletem a visão da Editora da Unicamp.

Direitos reservados e protegidos pela lei 9.610 de 19.2.1998.
É proibida a reprodução total ou parcial sem autorização,
por escrito, dos detentores dos direitos.

Impresso no Brasil.
Foi feito o depósito legal.

Direitos reservados à

Editora da Unicamp
Rua Sérgio Buarque de Holanda, 421 – 3ª andar
Campus Unicamp
CEP 13083-859 – Campinas – SP – Brasil
Tél.: (19) 3521-7718 / 7728
www.editoraunicamp.com.br – vendas@editora.unicamp.br

Dedicatória

Dedico este livro à Mariana, minha esposa e companheira de uma vida, e às nossas filhas, Irene e Carolina.

Agradecimentos

As universidades públicas brasileiras compõem uma rede de instituições pensadas e construídas com a missão de promover o pensamento crítico e a excelência acadêmica, incluindo todos os que buscam entender um pouco mais nosso mundo. Não foi uma tarefa fácil, e parece que os desafios para a manutenção dessas conquistas nunca cessam. Agradeço a todos os que lutaram e lutam para manter a excelência e a abrangência do ensino superior público em nosso país.

Do ponto de vista pessoal, agradeço a todos os colegas com quem tive o privilégio de compartilhar meu desenvolvimento acadêmico. Não os nomeio aqui individualmente, para não cometer a injustiça de deixar alguém de fora, mas também porque a construção do conhecimento científico nunca é uma atividade apenas individual, mas se faz em discussões em grupos, compondo uma rede de conexões, na qual a dúvida de um alimenta a curiosidade do próximo, e a ideia de um resolve o problema do outro. Portanto meu muito obrigado a todos os colegas de profissão que generosamente me incluíram nessa rede.

Agradeço também ao meu pai, Frederico, e ao meu amigo Harry, pela leitura cuidadosa e atenta do manuscrito e pelas discussões que se sucederam.

Sumário

Introdução	11
1 Neutrinos	15
1.1 Velhos conhecidos	15
1.2 Os neutrinos	20
1.3 Hipóteses na ciência	25
1.4 Detectando neutrinos	29
1.5 Neutrinos são observados ou detectados?	34
1.6 Quantos neutrinos?	39
2 Física do Sol	43
2.1 Geração de energia	43
2.2 Qual a fonte da energia solar?	45
3 O Problema dos Neutrinos Solares	53
3.1 O primeiro experimento	55
3.2 Primeiros dados experimentais	59
3.3 Falseabilidade	63
3.4 Tese de Duhem-Quine	67
4 Oscilação de sabor	73
4.1 Oscilação no vácuo	74
4.2 Solução <i>just-so</i>	80
4.3 Oscilação na matéria – efeito MSW	82

4.4	Valores na ciência	90
5	Enfim, a detecção!	95
5.1	Homestake	96
5.2	Kamiokande-II	103
5.3	GALLEX e SAGE	109
5.4	Super-Kamiokande	112
5.5	SNO	114
5.6	Subdeterminação de teorias	116
6	KamLAND	121
6.1	Revisão de expectativas	124
6.2	Uma abordagem bayesiana	127
6.3	Resultado definitivo	135
6.4	Experimento crucial existe?	138
7	Novos problemas	141
7.1	Previsões $\times$ Explicações	142
7.2	Tensão entre KamLAND e neutrinos solares	145
7.3	Outros problemas no mundo de neutrinos	146
	Conclusão	149
	Referências bibliográficas	153

Introdução

O desenvolvimento do método científico é possivelmente uma das maiores conquistas intelectuais da humanidade. É muito fácil enxergar a marca inconfundível da ciência na forma como nossa sociedade se estrutura. A aplicação do método científico é um ingrediente fundamental para a criação de novas tecnologias computacionais, pesquisas em medicamentos, sistemas de geração de energia, criação de novos materiais, desenvolvimento de plantas resistentes a doenças ou pesticidas, criação de armas nucleares, vacinas. A lista é longa. O acúmulo do conhecimento se deve também à aplicação do método científico de investigação em áreas como o entendimento de nossa sociedade, o desenho urbano de nossas cidades, as formas de organização da força de trabalho, os conflitos sociais, os modelos econômicos e os estudos da linguagem.

Embora seja fácil identificar a onipresença da ciência, descrever o que é método científico não é tarefa simples. Afinal, método científico é um instrumento de investigação desenvolvido pela humanidade, não um conjunto de regras autoevidentes ou reveladas, aceitas de forma dogmática. Cada uma de suas regras tem uma história de debates e justificativas que, de maneira simultânea ao próprio desenvolvimento da ciência, foi sendo incorporada a essa forma de investigação do mundo natural.

Simplificadamente, pode-se dizer que fazem parte do método científico alguns procedimentos. Inicia-se o processo com a identificação, a partir de observações do seu objeto de estudo, de um

fenômeno a ser explicado ou mais bem compreendido. Uma hipótese, que pode ser uma lei fundamental ou uma propriedade geral, é proposta como explicação do fenômeno. É desejável que seja possível extrair de tal hipótese previsões para experimentos controlados que possam corroborá-la ou falseá-la. Caso as previsões sejam confirmadas, a hipótese aumenta seu *status* de explicação válida, e, caso não o sejam, pode-se reavaliar a hipótese inicial, incluindo hipóteses auxiliares, modificações, ou novas hipóteses diferentes, e recomeçar o ciclo de investigação.

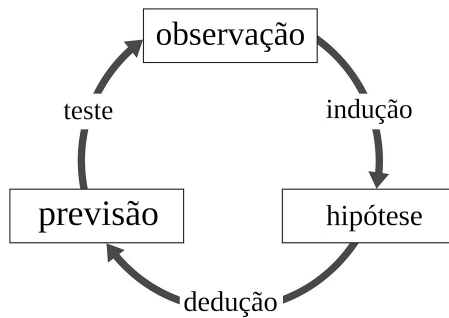


Figura 1: Diagrama do método científico como processo iterativo.

É comum representar essas ideias em um diagrama como o da figura 1, que contém os elementos fundamentais discutidos acima, ressaltando que a ciência é um processo iterativo em que novas descobertas alimentam novas observações e novas hipóteses. O diagrama ajuda a ilustrar alguns conceitos caros aos cientistas, porém não esgota a atividade científica. Serve, quando muito, como um primeiro esqueleto a partir do qual se pode começar uma reflexão. Por exemplo, o parágrafo acima sugere uma ideia de sequência cronológica nos diferentes passos do procedimento científico. Entretanto, muitas vezes as hipóteses podem anteceder a observação, ou os resultados experimentais podem ser inconclusivos, o que pode gerar novas hipóteses ou novas sugestões de montagens experimentais. Ou ainda, resultados experimentais inesperados podem aparecer e

gerar na comunidade científica, em vez de hipóteses, desconfiança em relação à forma pela qual o experimento foi conduzido.

Além disso é necessário quantificar o que significa confirmar uma hipótese, ou rejeitá-la, e entender como os cientistas normalmente atuam entre os dois extremos de uma rejeição ou confirmação clara. Outras sutilezas estão presentes na atividade científica. Geralmente, um programa de pesquisa científica avança em um mar de idas e vindas, ceticismos e desconfianças, tentativas frustradas, avanços pontuais e inesperados, até que, finalmente, toma corpo uma explicação científica mais ou menos coerente, que segue se aprimorando e revisitando os pontos frágeis com novas investigações, com mais pesquisa teórica e experimental, até que um consenso na área é formado. Esse consenso, suprimidas as polêmicas, os becos sem saída, as fragilidades iniciais, é o que normalmente é apresentado em livros-textos ou em textos de divulgação científica, o que, embora permita ao leigo ter acesso à melhor explicação disponível de um fenômeno físico, pouco esclarece sobre o processo altamente não linear da atividade científica.

Este livro apresenta um programa científico que ilustra bem a forma de atuação dos cientistas, ao qual me dediquei nos primeiros anos de profissão: o problema dos neutrinos solares. Tentarei não apresentar a solução do problema juntamente com a sua descrição. Em vez disso, comentarei os principais passos tomados pela comunidade científica até o estabelecimento de um consenso. Para quem já quiser saber a solução, uma rápida busca na internet dará a resposta. Para quem experimentar adiar esse momento, este livro pode ser lido como uma espécie de roteiro de um livro de mistério, no qual as pistas vão sendo construídas aos poucos, e o desfecho, apresentado após um longo processo de investigação.

Em paralelo, quando for possível me estenderei um pouco sobre algumas controvérsias e debates acerca do método científico. Acredito que o programa de pesquisa em neutrinos solares fornece exemplos interessantes sobre algumas dessas controvérsias, e que

podem enriquecer tal debate. Este livro tem portanto dois enfoques paralelos, intercalando a apresentação histórica do programa de pesquisa em neutrinos solares com algumas discussões a respeito de Filosofia da Ciência. O programa de pesquisa em Física de Neutrinos Solares pode colaborar para a compreensão da aplicação do método científico e fornece exemplos que podem enriquecer e ilustrar os debates que acompanharam o seu desenvolvimento pela Filosofia.

Capítulo 1

Neutrinos

Neste capítulo apresentarei o que é o neutrino, como e por que ele foi introduzido no modelo da Física de Partículas Elementares, além de apresentar as principais técnicas de detecção dos neutrinos que serão relevantes para os capítulos seguintes.

Tendo o neutrino como contexto científico, apresentarei também algumas reflexões sobre o papel da formulação de hipóteses na ciência e mostrarei como a existência do neutrino pode ser discutida a partir de uma oposição entre realismo e antirrealismo de entidades não observáveis.

1.1 Velhos conhecidos

Neutrinos são partículas fundamentais da natureza, ou seja, são partículas que, até onde sabemos, não são formadas por entes ainda mais fundamentais. São como elétrons, *quarks* (que compõem prótons e nêutrons) ou fótons (as partículas que compõem a luz). Não possuem carga elétrica, e sua massa é muito pequena, mais de um milhão de vezes menor que a massa do elétron.

São emitidos ou absorvidos em processos radioativos, como nas reações que ocorrem em usinas de fissão nuclear ou na fusão nuclear

no interior de estrelas. Porém, não fazem parte do nosso dia a dia, como fótons, elétrons, ou prótons e nêutrons. A razão disso é que neutrinos quase não interagem com a matéria. Enquanto os prótons e nêutrons formam os núcleos atômicos através de interações muito intensas, que chamamos de Força Forte, e os elétrons e prótons interagem através dos campos elétricos e magnéticos, a única interação que o neutrino sente, além da onipresente interação gravitacional, é uma interação muito pouco intensa, que leva o nome de Interação Fraca.

Porém, apesar das diferenças, em muitos aspectos podemos estabelecer uma correspondência entre os neutrinos e a luz e apresentar a emissão dos neutrinos a partir de uma analogia com a emissão de fótons. Como os fótons são parte do nosso cotidiano, talvez a analogia ajude a traçar alguns paralelos entre o que já conhecemos e essa elusiva partícula. Então, vou iniciar essa discussão pela emissão dos fótons, para, em seguida, fazer a analogia com os neutrinos.

Mas como fótons são emitidos? Qual o processo físico pelo qual objetos emitem luz? Na grande maioria dos processos do nosso cotidiano, a emissão de luz acontece associada a uma transição do estado de elétrons dentro dos átomos. Como aprendemos na Química, os átomos são formados por seus núcleos, prótons e nêutrons, concentrados em uma região muito pequena do átomo, e elétrons. Esses elétrons circundam os núcleos atômicos e obedecem a algumas regras muito específicas quanto a sua energia. Normalmente aprendemos essas regras no Ensino Médio quando estudamos como fazer a distribuição dos elétrons nas camadas eletrônicas.

Tomemos por exemplo o átomo de Carbono, com seus seis elétrons. Dois desses elétrons estão na camada K , menos energética, e quatro estão na camada L , mais energética. Essa camada, por sua vez, poderia acomodar até oito elétrons, e portanto está apenas parcialmente preenchida. São essas lacunas que podem ser preenchidas em ligações químicas entre átomos diferentes, com o compartilhamento de elétrons entre dois átomos (daí a piada: “quando

um átomo de Carbono é preso, ele tem direito a quatro ligações”).

Cada uma dessas “localizações” do elétron se relaciona com a sua energia, e trocar um elétron de lugar está associado ao fornecimento ou à emissão de energia ao átomo. Quem carrega essa energia para dentro ou para fora do átomo é o fóton, a partícula de luz. Quando um objeto recebe, por exemplo, luz solar, os fótons são absorvidos pelos átomos, fazendo com que seus elétrons saltem para níveis energéticos mais altos. E, quando esses elétrons voltam ao seu nível original, um fóton é emitido. Resumindo, podemos escrever que emissão ou absorção de fótons por átomos se relaciona com mudanças nos níveis energéticos dos elétrons desses átomos. Esquemáticamente podemos escrever:

$$X + \gamma \rightarrow X^*,$$

onde X representa um átomo que, ao absorver um fóton, representado pela letra grega γ , é convertido para um nível de energia excitado, representado por X^* . Da mesma forma a reação

$$X^* \rightarrow X + \gamma$$

representa o átomo excitado X^* , que, retornando ao seu nível energético anterior, emite um fóton. Convém destacar que no primeiro caso, o da absorção, o fóton deixa de existir. E no segundo caso, o da emissão, o fóton não existia e é produzido no processo de desexcitação do átomo.

Um exemplo desse processo são as lâmpadas de sódio, comumente usadas para iluminação de ruas públicas. Nessas lâmpadas, um vapor de sódio é continuamente excitado pela corrente elétrica e, ao voltar ao estado fundamental, emite uma luz amarelo-alaranjada. Uma característica desse tipo de iluminação é a emissão monocromática. Ao contrário de uma lâmpada incandescente, na qual o processo de emissão de luz é caótico, em uma lâmpada de sódio somente uma transição energética acontece (na verdade duas, mas

com energias muito similares), e todos os fótons são emitidos com a mesma energia de 2,24 eV.¹ A energia de um fóton tem uma correspondência direta com a frequência da luz, e, nesse caso, a luz emitida apresenta uma frequência de $5,1 \times 10^{14}$ Hz (ou comprimento de onda $\lambda = 589$ nanômetros, ou aproximadamente meio milésimo de milímetro), o que a localiza na faixa visível amarelo-alaranjada. Por emitirem luz somente com uma frequência, essas lâmpadas são indicadas em situações nas quais a poluição luminosa pode ser um problema, como em observatórios astronômicos ou ambientes ecológicos.

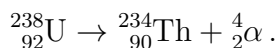
Nessas transições a estrutura do núcleo atômico continua inalterada, e a emissão acontece somente nas camadas mais externas do átomo, ou seja, em sua *nuvem eletrônica*. Toda a química é baseada nessas transições, onde rearranjos da estrutura eletrônica de átomos ou moléculas são associados à emissão ou absorção de energia. Se analisarmos as ações do nosso cotidiano a partir do ponto de vista do transporte de energia, perceberemos que praticamente todo o processo ocorre com reconfigurações de nuvens eletrônicas, sem mudanças no núcleo atômico. A energia utilizada e produzida em nossas células, em nossa alimentação, em plantações, ventos e tempestades, motores elétricos, como liquidificadores, ou motores a combustão, como motores de carro, todos esses processos preservam a estrutura nuclear e são baseados em trocas e rearranjos de elétrons entre átomos.

Mas átomos podem também sofrer transições dentro de sua estrutura nuclear. O produto emitido como resultado dessas transições é o que chamamos de radiação nuclear. As primeiras medidas de radiação nuclear ocorreram no final do século XIX. Em

¹O Elétron-volt (eV) é uma unidade de energia conveniente para lidarmos com processos atômicos. Consiste na energia adquirida por um elétron submetido a uma diferença de potencial de 1 Volt percorrendo uma distância de 1 metro.

1896, Henri Becquerel descobriu que núcleos de Urânio espontaneamente emitiam alguma forma de radiação. Estudos posteriores conduzidos por J. J. Thomson (o proponente do modelo atômico ensinado como “pudim com passas”) conseguiram identificar duas formas de radiação, distinguíveis por determinadas características em sua absorção. O primeiro tipo era facilmente absorvido por folhas de alumínio, e, utilizando a primeira letra do alfabeto grego, foi chamado de radiação alfa, ou radiação α . O segundo tinha um poder de penetração muito maior, e foi chamado de radiação beta, ou radiação β , seguindo o alfabeto grego. Em uma sequência lógica para a escolha de nomes, quando um terceiro tipo de radiação ainda mais penetrante foi descoberto, deu-se o nome da terceira letra do alfabeto grego, radiação gama, ou radiação γ . Eram nomes adequados quando se ignoravam os componentes dessa radiação, pois os modelos nucleares ainda estavam sendo desenvolvidos, e não havia por que esperar o completo entendimento de tais radiações para nomeá-las.

Em termos de seus constituintes elementares, sabemos hoje que a radiação alfa é composta por núcleos de Hélio, ou seja, 2 prótons e 2 nêutrons ligados. A radiação beta é formada por elétrons, e a radiação gama, por fótons (razão pela qual geralmente se utiliza a letra γ para designar fótons, mesmo em reações químicas), todos emitidos em processos de transição nuclear. Por exemplo, a emissão de uma partícula alfa por um átomo de Urânio pode ser representada da seguinte forma:



Lembrando da notação utilizada para caracterizar átomos, a expressão acima indica que um núcleo de Urânio, formado por 92 prótons e 146 nêutrons (totalizando 238 nucleons, nome genérico para prótons ou nêutrons), converte-se em um núcleo de Tório, formado por 90 prótons e 142 nêutrons, com a emissão de uma partícula alfa.

Como em transições eletrônicas análogas (por exemplo, a transição das lâmpadas de sódio descritas anteriormente), a partícula alfa é emitida com uma única energia. Podemos calcular essa energia utilizando a correspondência entre massa e energia fornecida por aquela que é talvez a mais famosa equação da Física:

$$E = mc^2 ,$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo. Essa equação nos diz que é possível converter massa em energia, ou criar massa a partir de energia. No processo de emissão de radiação α que estamos considerando, a partir das diferenças entre as massas do núcleo de Urânio e das massas somadas do núcleo de Tório e da partícula α , podemos calcular a energia cinética com a qual a partícula α é emitida. Para essa reação em particular, temos que:

$$m \left({}^{238}_{92}\text{U} \right) - \left[m \left({}^{234}_{90}\text{Th} \right) + m \left({}^4_2\alpha \right) \right] = 4,27 \text{ MeV}/c^2 .$$

A unidade MeV (Megaelétron-volt), igual a um milhão de elétrons-volts, é a unidade natural para lidar com transições nucleares, assim como a unidade eV (elétron-volt) é a unidade natural para transições nas órbitas eletrônicas. Ou seja, tipicamente, transições nucleares envolvem energias milhões de vezes maiores que transições químicas.

1.2 Os neutrinos

No decaimento beta, a radiação emitida consiste em elétrons. Por analogia, tanto com emissão de luz quanto com emissão de partículas alfa, era razoável esperar que a energia do elétron seria única, dependendo exclusivamente da diferença de massas entre o núcleo inicial e o núcleo final. Com surpresa e algum ceticismo percebeu-se que em um decaimento beta o elétron é emitido com uma distribuição contínua de energias. A previsão calculada a partir das diferen-