

NEUTRINO: A PARTÍCULA FANTASMA

NEUTRINO: THE GHOST PARTICLE

Wanderlley R. de J. Silva¹; Wesley Lima dos Santos²; Kamila do Carmo Teixeira³; Iranderly Fernandes de Fernandes⁴.

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Física, Introdução à Física Nuclear, Licenciatura e Bacharelado em Física. E-mail: ¹wanderlleyr@gmail.com, ²wesleylsantos05@gmail.com, ³kamilacarte@gmail.com, ⁴irafbear@gmail.com

Este trabalho é um artigo de divulgação científica que busca levar o conhecimento da física de partículas, em particular do neutrino, a quem nunca ouviu falar dele. Abordando a história dos elementos, o desenvolvimento do modelo atômico, o mistério e a proposta do neutrino, além de sua detecção, fontes e influências não só para o modelo padrão de partículas, mas também para o desenvolvimento científico da humanidade.

Palavras-chave: neutrino, história, modelo padrão.

This work is an article of scientific dissemination that seeks to take the knowledge of particle physics, in particular, the neutrino, to someone who has never even heard about it. Addressing the history of the elements, the development of the atomic model, the mystery and proposal of the neutrino, in addition to its detection, sources, and influences for not only the standard model of particles but also for the scientific development of humanity.

Keywords: neutrino, history, standard model.

1. INTRODUÇÃO

Os neutrinos são um tipo de partícula elementar presente no átomo, tão pequena quanto um elétron, com carga nula e que se exibe durante um decaimento β^+ (beta positivo). Mas, o que são neutrinos, partículas elementares e decaimento? E qual a importância de estudar os neutrinos e as consequências de sua descoberta na área de física de partículas como conhecemos hoje?

1.1 Elementos

No período dos filósofos pré-socráticos, discutia-se sobre do que seria formada toda a matéria; após ter observado fósseis de conchas marinhas em uma altitude acima do nível do mar e, também o ciclo da água, Tales de Mileto em cerca do século VI a.C., propôs a ideia de que a água era o elemento fundamental, onde tudo se originou dela [20].

Um de seus discípulos, Anaxímenes de Mileto (588-524 a. C.), o contestou sobre como a água se transformava na matéria, em sua diversidade, propondo que o ar seria o elemento fundamental, sendo a diversidade da matéria evidenciada pelo estado mais ou menos condensado do ar [20].

Embora acreditasse que as diferenças da matéria deveriam ser explicadas, como no pensamento de Anaxímenes, Heráclito de Éfeso (540-470 a.C.), era opositor daquele. Pois via que se o ar se transformava em outra substância, ele deixava de sê-lo; logo, não poderia ser o elemento fundamental. Propôs então, que este deveria ser o fogo, inflamando-se e apagando-se gradativamente (nenhum homem entra duas vezes no mesmo rio) [20].

O filósofo Empédocles (490-430 a.C) reuniu todas as ideias dos seus antecessores, e propôs que todas as coisas eram formadas por diferentes combinações de água, ar, fogo e terra [16].

Ainda no século V a.C., surgiu uma escola chamada de atomismo, oriunda da ideia de Leucipo e seu discípulo Demócrito de Abdera (460-370 a.C.), que propuseram que a matéria era formada por pequenas

partes indivisíveis, as quais ganharam o nome de átomo. Para eles, havia 4 tipos de átomo: arredondados e lisos; com arestas; com ganchos; e pequenos. A combinação destes átomos formaria a matéria [16].

Sabemos hoje, que a matéria é constituída por átomos. Contudo, devido a diversidade e singularidade dos objetos e seres vivos na natureza, houve uma pergunta: há diferenças entre os átomos que constituem a matéria?

O manuseio dos elementos da natureza foi vital para o desenvolvimento da humanidade (ex.: o armamento para a caça, proteção e armazenamento de suprimentos para sobreviver à seca, fome e guerras), durante o processo foi necessário escolher o material mais adequado para fazê-lo, ou seja, precisava testar materiais para saber qual era melhor para tal serviço. Notou-se que alguns materiais brilhavam mais, ou formavam fios mais finos que outros, ou mostravam mais resistência mecânica. Com isso, a curiosidade sobre como são e a estrutura destes materiais apenas aumentava.

Elementos como ferro e prata exibiam diferenças, assim como outros elementos; numerou-se então as peculiaridades de cada um para tentar agrupá-los e organizá-los a partir de suas propriedades intrínsecas, então estava nascendo a tabela periódica.

A tabela periódica feita pelo químico e físico russo Dmitri Mendeleiev (1834-1907), na década de 1860, era organizada em ordem crescente das massas atômicas e por isso havia o problema de elementos diferentes, mas com a mesma massa. Porém, o físico inglês Henry Moseley (1887-1915), na década de 1910, ao estudar os elementos da tabela periódica, notou que os átomos possuíam uma característica que era só dele, como uma identidade, era o número de prótons [18]. Com isso foi proposto que a quantidade de prótons determinava qual elemento químico, tal átomo é, em outras palavras, é o seu número atômico.

1.2 O átomo

Durante milhares de anos, o ser humano se questionou do que eram feitos os objetos, as coisas, a matéria. Até onde se tem registro, os gregos foram os primeiros a tentar explicar a composição da matéria, isso no século V a.C.. Para parte dos gregos, aqueles que seguiam a ideia de Leucipo e Demócrito, a matéria era composta por pequenas partes indivisíveis, que significa átomo em grego; essa ideia veio da noção de que era possível dividir qualquer coisa em partes menores que ela, então se um objeto fosse dividido várias vezes, em algum momento, chegaria em algo que não poderia mais ser dividido, e esta parte foi denominada como átomo, por ser indivisível.

Um pouco mais de 2.000 anos depois, sem avanços na área, o cientista inglês John Dalton (1766-1844), em 1803, propôs que a matéria era constituída por pequenas partículas esféricas, maciças e indivisíveis, as quais ele chamou de átomo, em homenagem a ideia de Demócrito. Por causa disso, o modelo de Dalton ficou conhecido como o *modelo atômico da Bola de Bilhar* [18].

No final do século XIX, o ser humano já dominava o eletromagnetismo; e, já era conhecida a relação da corrente elétrica com o campo magnético, o experimento de Benjamin Franklin, as equações de Maxwell, a lâmpada de Edison e a bobina de Tesla. Estas foram as bases para que em 1897, pelo também cientista inglês Joseph John Thomson (1856-1940), observando as correntes elétricas em gases rarefeitos (raios catódicos), observou que a corrente elétrica era composta por pequenas partículas que tinham massa e carga negativa, as quais ele chamou de elétrons. No ano seguinte, em 1898, Thomson propôs que o átomo era uma esfera, mas agora divisível, com os elétrons em sua superfície, com carga negativa, e na parte interna

dela com carga positiva. Esse modelo atômico, que descrevia o átomo, ficou conhecido como o *modelo atômico do Pudim de Passas* [18], onde as passas seriam os elétrons.

Anos depois, um aluno neozelandês de Thomson, chamado Ernest Rutherford (1871-1937), interessado na estrutura atômica, realizou pesquisas na área, utilizando a radiação emitida por fontes radioativas naturais. Em 1911, como resultado de sua pesquisa, Rutherford constatou que os átomos eram essencialmente vazios, ou melhor, tinham um grande vazio em seu interior.

Para justificar a distribuição da carga elétrica, ele propôs que toda a carga positiva e quase toda a massa do átomo, estava em uma região no centro dele, a qual ele chamou de núcleo, onde deveria ser composto por partículas menores, a qual ele denominou de próton, quanto aos elétrons estariam orbitando o núcleo, igual os planetas orbitam uma estrela. Por isso, este modelo ficou conhecido como o *modelo atômico Planetário* [18].

Um fato interessante é que o diâmetro do átomo varia de 1×10^{-10} m a 3×10^{-10} m, enquanto o diâmetro do núcleo varia de 1×10^{-14} m a 3×10^{-14} m, em outras palavras, o átomo em si, é pelo menos, 10.000 vezes maior que o seu núcleo.

Trabalhando com Rutherford, e juntando as ideias de outros cientistas da época, em 1913, o dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) propôs uma correção do modelo planetário. Nela, os elétrons que orbitam o núcleo deveriam ter níveis de energia bem definidos, também conhecidos como camadas eletrônicas, e os elétrons poderiam mudar de uma camada para outra do átomo ao absorver ou emitir energia. Este modelo é chamado de *modelo atômico quântico de Bohr*.

Ainda no modelo de Bohr, na década de 20, Rutherford observou que a massa do núcleo era muito maior do que a calculada a partir da sua carga (no caso, os prótons) e por isso ele propôs que deveria existir uma outra partícula no núcleo e que esta deveria ter uma massa similar a do prótons, mas com carga nula, e por isso era difícil de ser observada. Só em 1932, um aluno de Rutherford, o inglês James Chadwick (1891-1974), conseguiu provar de forma experimental, a existência dessa partícula, a qual ele chamou de Nêutron [18].

Apesar disso, o modelo de Bohr era incompleto, ele feria o princípio da incerteza de Heisenberg, o qual dizia que a incerteza de uma medida é inevitável, ou seja, é impossível medir a velocidade de uma partícula e a sua posição ao mesmo tempo sem que essa mesma partícula sofra influência do instrumento de medição. Corrigindo o modelo de Bohr, em 1926, o austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) através da equação de Schrödinger, buscava encontrar uma região específica onde o elétron poderia estar, daí surge o *modelo da Nuvem Eletrônica* que tem como principal consequência a constatação de orbitais, que são regiões com uma probabilidade maior de encontrar um elétron.

1.3 Decaimento Radioativo

Após compreender a constituição da matéria, outro ponto que chamou a atenção dos cientistas foi o fenômeno onde um elemento químico se transformava em outro depois de um determinado período de tempo, mesmo estando isolado, e ao observar esse fenômeno em escala atômica, notou-se que o número de prótons do elemento que se modificou, havia se alterado. Este fenômeno foi chamado de decaimento radioativo porque ao sofrer essa variação no número de prótons, o átomo emitia radiação, seja ela α (alfa), β (beta) ou γ (gama).

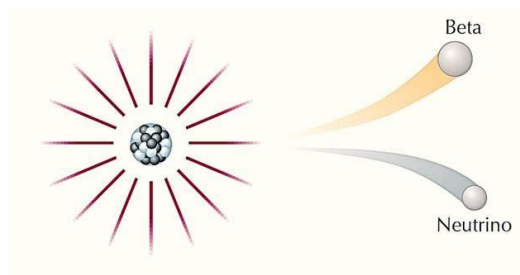
Ao observar a radiação α , notou-se que ela é formada por núcleos de hélio (2 prótons e 2 nêutrons) e, como consequência do seu tamanho, ela tem um baixo poder de penetração, viajando só alguns centímetros após ser emitida [18].

Enquanto que, a radiação β tem um poder de penetração maior que a α , conseguindo penetrar 1 a 2 cm na pele humana e 2 mm no chumbo. Ela pode ser dividida em radiação β^- e β^+ : a radiação β^- acontece quando um nêutron decai, gerando um próton e emitindo radiação β^- , que é formada por um elétron; a radiação β^+ acontece quando um próton decai, se transformando em um nêutron e emitindo radiação β^+ , que é formada por um pósitron (antipartícula do elétron, isto é, uma partícula que é “irmã gêmea” do elétron, mas com carga positiva) [18].

A radiação γ acontece de forma simultânea a radiação α e β . Quando um elemento decai, o núcleo ainda está excitado, com um nível de energia maior que o normal, e para diminuir essa energia, ele emite raios γ , que é uma onda eletromagnética, e por isso possui um grande poder de penetração, podendo atravessar todo o corpo humano e 5 cm no chumbo. Dessas, a radiação β é a mais interessante ao artigo; pois, dela extrairemos o neutrino [18].

Ao calcular e medir a energia do átomo que sofreu o decaimento radioativo, foi notado que havia uma discrepância, a quantidade de energia medida na radiação β era inferior à calculada. Durante anos, esse foi um problema para os físicos, de tal forma que supuseram que a energia não se conservava, violando assim o princípio da conservação da energia. Porém, em 1930, o físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) propôs a existência de uma outra partícula, oriunda do decaimento radioativo, onde ela receberia a energia que estava perdida. Depois, o italiano Enrico Fermi (1901-1954) a chamou de Neutrino, porque ela possuía carga elétrica nula e era muito menor que um nêutron (Figura 1), por estas características, ela era muito difícil de ser observada, tanto que só foi detectada experimentalmente em 1956.

Figura 1: Decaimento beta



Fonte: <https://www.todamateria.com.br/radioatividade/>

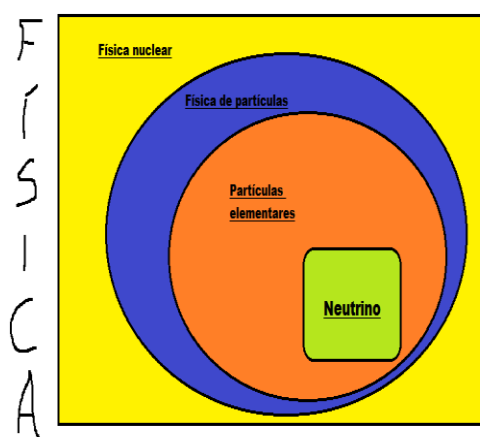
2. A DESCOBERTA DO NEUTRINO

Quando Rutherford estava realizando seu estudo sobre a carga elétrica das radiações, ele notou que um feixe de raios β sofria um grande desvio quando sob a ação de campos elétricos e magnéticos. Com isso, ele constatou que os raios β eram compostos por cargas negativas por serem atraídos por um campo elétrico positivo. Vale a pena ressaltar que a radiação β utilizada na época era a β^- , porque a radiação β^+ é formada por um pósitron, e este existe por um curto período de tempo, pois acaba se aniquilando com a matéria.

Mesmo com a descoberta da composição da radiação β^- , outra coisa continuava um mistério. Ao calcular a energia do sistema, antes e depois do decaimento, ainda existia uma discrepância. Teoricamente, a energia perdida do decaimento deveria ser transferida para o elétron e se apresentar como energia cinética, mas ao medir essa energia, sob as mesmas condições, ela sempre apresentava um valor diferente, variando de 0 à 1,05 MeV [14]. Então como pode o mesmo fenômeno, nas mesmas condições, gerar energias cinéticas diferentes?

Com essa dúvida em mente, mas sem resposta, vários cientistas chegaram a propor que havia uma incoerência no princípio da conservação da energia. Até que em 1930, Pauli propôs a existência de uma partícula, a qual chamou de Partícula X [14], cuja carga seria nula e com dimensões próximas a de um elétron, justificando assim a sua dificuldade em detectá-la (Figura 2).

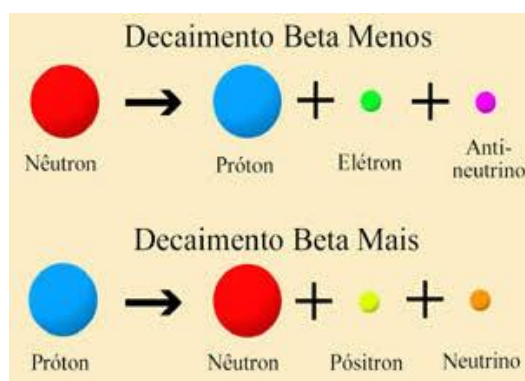
Figura 2: Situando o neutrino na Física



Fonte: própria

Três anos depois, Fermi desenvolveu a ideia de Pauli e a aplicou em uma teoria sobre o decaimento β , explicando a variação da energia cinética e rebatizando a partícula de Pauli como Neutrino, que significa pequeno nêutron em italiano, porque no ano anterior, Chadwick havia descoberto, de forma experimental, o Nêutron, uma partícula no núcleo do átomo, com dimensões similares à do próton.

Na época já sabia que existia dois “tipos” de neutrinos, o próprio neutrino (emitido pelo decaimento β^+) e a sua antipartícula, o antineutrino (emitida pelo decaimento β^-), ambos teorizados por Fermi (Figura 3). Todavia, os cientistas não estão certos sobre as suas diferenças, então muitos livros os tratam como iguais.

Figura 3: Decaimento β^+ e β^- 

Fonte: <https://yuriso.wordpress.com/2012/07/13/a-descoberta-do-seculo-o-boson-de-higgs-parte-2-a-vinganca/>

Cientes de que eles existem e que os mesmos são emitidos pelos reatores nucleares, os estadunidenses Clyde Cowan (1919-1974) e Frederick Reines (1918-1998) realizaram um experimento em 1956 na usina nuclear de Savannah River, localizada no EUA. O experimento consistia em um recipiente com 400 litros de água e cloreto de cádmio que iria capturar os antineutrinos emitidos pelo reator, emitindo assim fótons e estes seriam detectados. Ao comprovar a existência do antineutrino, estaria comprovando a existência do neutrino.

Adentrando as partículas elementares

Já notamos que o átomo é constituído por prótons, nêutrons e elétrons e indo mais fundo, percebemos que o elétron é uma partícula elementar, enquanto que os constituintes do núcleo são partículas compostas, conhecidas como bárions. Os bárions são um dos tipos de hádrons, sendo formados por três quarks, que diferem de outro tipo chamado de mésons, formados por um quark e um antiquark [09].

As partículas elementares se dividem em dois grupos, as que constituem a matéria, os férmions (quarks e léptons), com spin $\frac{1}{2}$, e as que mediam as interações fundamentais (forças fundamentais, toda força é uma interação), os bósons de spin inteiro 1, exceto o bóson de Higgs que tem o spin 0 [09].

Mas o que são essas forças fundamentais? Essas forças são: a Força Gravitacional que é a força de atração mútua entre todos os corpos (ela depende da matéria), e tem um alcance infinito; a Força Eletromagnética que ocorre entre todas as partículas que possuem carga elétrica ou momento magnético, sendo a união das forças elétricas e magnéticas, com também um alcance infinito; a Força Nuclear Fraca é aquela que provoca a instabilidade dos núcleos atômicos, sendo responsável pelo decaimento radioativo e a maior parte das desintegrações radioativas, com um alcance na ordem de 10^{-18} m; e a Força Nuclear Forte que é a força que mantém os prótons e nêutrons unidos no interior do núcleo atômico, com um alcance na ordem de 10^{-15} m.

As interações fundamentais têm partículas que servem como mediadoras (bósons) e para se ter uma ideia da intensidade de uma em relação à outra, tomando como referencial a força nuclear forte, temos a Tabela 1.

Tabela 1: Interações Fundamentais

Interação fundamental	Intensidade	Teoria	Mediador
Nuclear Forte	10	Cromodinâmica Quântica	Glúon
Eletromagnética	10^{-2}	Eletrodinâmica	Fóton
Nuclear Fraca	10^{-13}	Flavordinâmica	$W^{\pm}$ e Z^0
Gravitacional	10^{-42}	Geometrodinâmica	*

*: Não foi descoberto o bóson da interação gravitacional. **Fonte:** <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20032/Humberto/index.html>

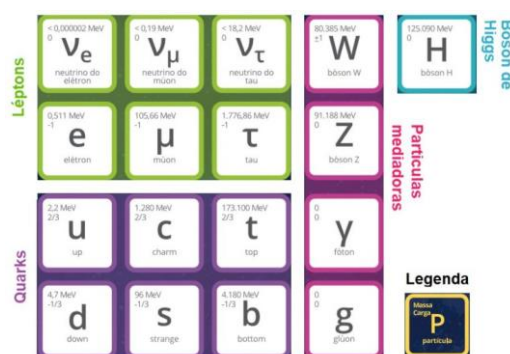
E como “devem funcionar” essas partículas mediadoras?

Assim como um próton atrai um elétron através da Interação Eletromagnética, há troca de fótons entre as 2 partículas, durante o tempo de interação; existem partículas que trocam os glúons e outras que trocam os bósons W ou Z. Os neutrinos só trocam os bósons W ou Z!

“Existe também outra partícula de interação, o Bóson de Higgs. Ele apresenta características um pouco diferentes das outras partículas mediadoras (é um bóson escalar), sendo responsável pelo surgimento das massas das partículas elementares. Curiosamente, dentre todas as partículas, ela foi a última a ser detectada, em 2012, pelo experimento no Large Hadron Collider (LHC), no CERN (Organização Europeia de Pesquisas Nucleares)”. [09].

Enquanto que, os férmions são divididos em quarks e léptons (Figura 4), onde os quarks são divididos em 6 tipos, com cada tipo podendo ter uma cor (vermelho, verde ou azul), e os léptons são o elétron (e), múon (μ), tau (τ) e seu neutrino correspondente. Sendo que, para cada férmion existe uma antipartícula.

Em geral, a partícula e sua antipartícula apresentam algumas propriedades idênticas, como: a massa e o spin. Contudo, nesse artigo não discutiremos sobre as antipartículas, a ênfase será estrita aos neutrinos.

Figura 4: Partículas elementares (Modelo padrão)

Fonte: <https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/neutrinos/index.php/situando/modelo-padrao/>

Tipos de neutrino

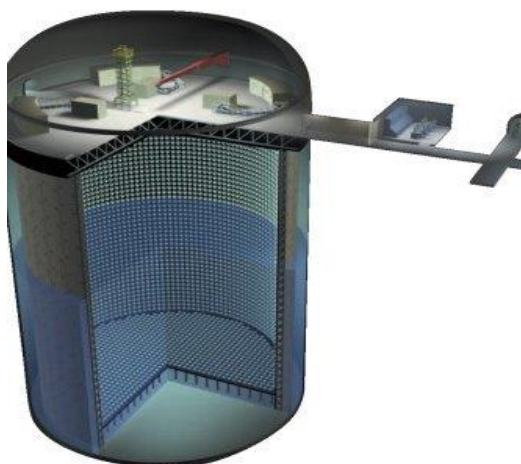
O neutrino se divide em 3 tipos (sabores): o neutrino do elétron (ν_e), o do múon (ν_μ) e do tau (ν_τ) e podem interagir com os bósons característicos da força nuclear fraca, como também podem oscilar os sabores no voo.

3. EXPERIMENTOS DE NEUTRINOS

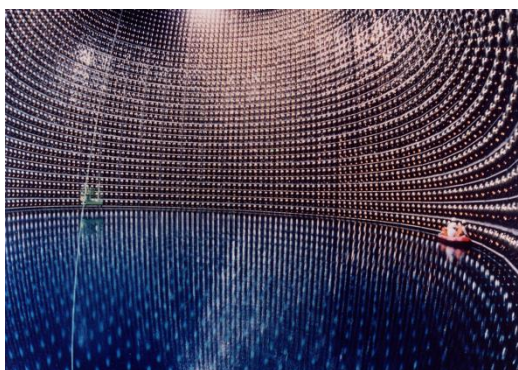
Somente 26 anos depois de ser idealizado pela primeira vez, é que o neutrino foi provado experimentalmente, isso mostra quão rara é a sua interação. A interação dos neutrinos é tão rara que, atualmente na Terra, o fluxo proveniente do Sol é de 40 bilhões de neutrinos por cm^2 , e ao longo da vida humana, somente algumas dezenas de neutrinos irão interagir com nossos corpos, formando um elétron [14].

Hoje em dia, existem diferentes experimentos para detectar um neutrino, mas de um modo geral seguem a ideia do mesmo experimento de Cowan e Reines, onde são construídos grandes reservatórios no subsolo com sensores de luz. Os reservatórios são construídos até 2 km no subsolo, para evitar interferência de raios cósmicos e outras fontes luminosas e são preenchidos com substâncias como água, gálio, argônio líquido, etc. para que estes possam interagir com os neutrinos. Como os neutrinos interagem muito pouco com a matéria, é necessário ter um grande aparelho para medir uma grande área onde possa ocorrer a interação, por isso os reservatórios são grandes, por exemplo, o Super-Kamiokande no Japão, com cerca de 50.000 toneladas de água (Figura 5.a e Figura 5.b). Por fim, as paredes dos reservatórios são preenchidas com milhares e milhares de sensores de luz, porque quando o neutrino interage com o líquido, ele libera um flash de luz que é captado pelos sensores. Esses experimentos permitem saber a fonte do neutrino com base em sua energia [14][15].

Figura 5.a: Super-Kamiokande



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/The-Super-Kamiokande-detector-in-cutaway-showing-the-inner-and-outer-detector_fig1_301344727

Figura 5.b: Super-Kamiokande interno

Fonte: <https://www.symmetrymagazine.org/article/july-2015/underground-plans>

4. FONTES DOS NEUTRINOS

Até onde sabemos, existem 5 fontes naturais e 2 causadas pelo homem.

4.1 Fontes Naturais

Neutrinos Solares: são os neutrinos provenientes do Sol. Dentre as reações termonucleares de fusão no Sol, a predominante é a do ciclo próton-próton, no qual ocorre a fusão de dois prótons, e um dos resultados dessa fusão é um neutrino.

Neutrinos Atmosféricos: são os neutrinos formados na atmosfera terrestre. Quando os raios cósmicos chegam na Terra, eles interagem com o núcleo dos átomos na atmosfera, criando um chuveiro de partículas, porque elas são instáveis e decaem, e nesse decaimento, há a liberação de neutrinos.

Neutrinos de Supernova: são os neutrinos provenientes de supernovas. Quando uma estrela com pelo menos 10 massas solares explode em uma supernova, cerca de 99% de sua energia é liberada como neutrinos.

Geoneutrino: são os antineutrinos provenientes do interior da Terra. Nela, os isótopos radioativos mais abundantes são o ^{238}U , ^{232}Th e o ^{40}K , onde estes ao sofrerem um decaimento radioativo β , liberam um antineutrino.

Neutrinos Cosmológicos: são os neutrinos que se formaram no Big Bang. Da mesma forma que existe radiação cósmica de fundo, onde é medido os fótons, existem também neutrinos cósmicos de fundo.

4.2 Fontes Humanas

Neutrinos de Aceleradores: são os neutrinos formados nos aceleradores de partículas. Neles são provocadas colisões a altas energias, no caso, um próton colide com um alvo à alta energia, como consequência, o neutrino formado possui uma alta energia, com dezenas de GeV.

Neutrinos de Reatores: são os antineutrinos formados em reatores nucleares. Os reatores são as maiores fontes de neutrinos produzidas pelo homem. Os neutrinos nele se formam pelo decaimento β das partes fissionadas em nêutrons nas usinas.

5. CONSEQUÊNCIAS DA DESCOBERTA DO NEUTRINO NA FÍSICA DE PARTÍCULAS COMO CONHECEMOS HOJE

A descoberta do neutrino mudou o modelo padrão da física ao ser introduzido como uma nova partícula fundamental, além de ser uma das mais abundantes no universo. No âmbito do decaimento, a descoberta do neutrino serviu para reforçar o princípio da conservação da energia e explicar de uma forma melhor o fenômeno da radiação β , onde na emissão β^- a partícula emitida junto com o elétron, é um antineutrino, e na emissão β^+ a partícula emitida com o pósitron, é o neutrino (Figura 3).

Algumas curiosidades:

1- Caso a força forte não existisse, a matéria do Universo como conhecemos, também não existiria. Prótons e nêutrons não conseguiriam se formar e, os seres humanos não poderiam existir [07].

2- Com apenas 23 anos, o brasileiro Cesare Lattes (1924-2005), mais conhecido como César Lattes, ao lado do cientista inglês Cecil Frank Powell (1903-1969) e o italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993), descobriu uma partícula no interior do núcleo atômico que garante a coesão do átomo: o méson pi [05].

3- O laboratório de luz síncrotron brasileiro (LNLS) contém o acelerador de partículas SIRIUS que é um acelerador de feixe de elétrons [03].

4- Através de cálculos, os cientistas concluíram que um reator nuclear em atividade emite um fluxo de antineutrinos do elétron diretamente proporcional à quantidade de energia produzida. Quanto mais energia for produzida, maior será o fluxo de antineutrinos saindo do reator.

Quando um detector de neutrinos é direcionado para um reator, podemos estimar o fluxo de antineutrinos e, conseqüentemente, descobrir se há atividade nuclear ou não. Como os neutrinos viajam em velocidades próximas à da luz, a medição do seu fluxo fornece informações em tempo real sobre o reator, permitindo monitorar o funcionamento da usina. [09]

5- O Brasil possui um experimento de detecção de neutrinos gerados pelo reator Angra II, conhecido como “Neutrinos Angra”, ele visa estudar as propriedades do neutrino [09].

6-

“Desde a detecção do pión por Lattes em Bristol e Berkeley, o Brasil tem mantido uma longa tradição na área de física de partículas. Nas últimas décadas, o país vem participando dos principais projetos nos grandes aceleradores, como o Fermilab (Estados Unidos) e o CERN (Suíça). Físicos brasileiros, além de terem proposto a existência de novas partículas, como o Z^0 , participaram de experimentos em que muitas delas – por exemplo, o méson sigma e o quark top – foram detectadas.” [02]

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Os neutrinos apresentam um grande potencial na área de astrofísica, já que uma das maiores fontes de neutrinos do universo são as supernovas, já que 99% da energia dela é transportada por neutrinos. Ao estudar as supernovas é esperado conhecer mais os neutrinos, mas o contrário também é esperado, ao estudar os neutrinos podemos receber informações importantes sobre o ciclo de vida das estrelas e o mecanismo que causa a explosão das estrelas massivas.

Como eles interagem muito fracamente com a matéria, conseguem escapar facilmente das estrelas em colapso, permitindo boas informações sobre estrelas de nêutrons e buracos negros, oriundos de

supernovas. Por isso, muitos detectores de neutrinos já estão conectados desde 2005 pelo projeto Supernova Early Warning System (SNEWS), para detectar os neutrinos oriundos de supernovas (15).

Além da área de astrofísica, os neutrinos abriram um novo campo para geofísica, ao permitir a possibilidade de experimentos que detectem neutrinos de baixa energia, os geoneutrinos, oriundos do material radioativo no núcleo do planeta, permitindo assim, estudar melhor a composição do nosso planeta.

Por fim, essas são só algumas oportunidades que os neutrinos abriram para a ciências, ainda existem muito mais e há ainda aquelas que estão por vir.

7. REFERÊNCIAS

- 01- ANJOS, J.; NATALE, A. A. **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**, 2021. **Partículas Elementares: A (des)construção da matéria pelo homem**. Disponível em: http://www.cbpf.br/~desafios/media/livro/Particulas_elementares.pdf. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 02- ARANTES, J. T. **Nobel de Física Premia Pesquisas que Evidenciaram a Massa do Neutrino**. Agência FAPESP, 2015. Disponível em: <https://agencia.fapesp.br/nobel-de-fisica-premia-pesquisas-que-evidenciaram-a-massa-do-neutrino/22019/>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 03- CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS. **Laboratório Nacional de Luz Síncrotron**, 2021. **Aceleradores**. Disponível em: <https://www.lnls.cnpem.br/aceleradores/>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 04- CONNOR, N. **Radiation Dosimetry**, 2020. **O que é o Decaimento Beta - Beta Radioatividade - Definição**. Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-o-decaimento-beta-beta-radioatividade-definicao/>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 05- CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO. **Plataforma Lattes**, 2021. Disponível em: <http://lattes.cnpq.br/>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 06- CRIBIER, M.; VERKINDT, D.; VIGNAUD, D. **History of Neutrino**, 2021. Disponível em: <https://neutrino-history.in2p3.fr/>. Acesso: 01 de maio de 2021.
- 07- GAROTTI, H. **Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2021. **As Quatro Forças Fundamentais da Natureza**. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20032/Humberto/index.html>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 08- GOMES, R. A. **Neutrinos Em Tudo Que Eu Vejo**. Revista UFG, Goiânia, n. 12, julho de 2012. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/694/o/12_index.html. Acesso em: 12 de março de 2021.

- 09- GOUVEIA DE SOUZA, D. M.; MIZUKOSHI, J. K. **Universidade Federal do ABC**, 2021. Neutrinos. Disponível em: <https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/neutrinos/>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 10- GRIFFITHS, D. **Introduction to Elementary Particles**. 2ª ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- 11- GUZZO, M. M. **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**, 2005. Neutrinos: as misteriosas partículas fantasmas. Disponível em: https://mesonpi.cat.cbpf.br/desafios/pdf/FolderNeutrinos_Baixa-Res.pdf. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 12- INSTITUTO DE FÍSICA-UFRGS. **Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2021. Eletricidade e Magnetismo: Capítulo 8 - O Campo Magnético. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod08/m_s02.html. Acesso em : 12 de março de 2021.
- 13- LICCIARDI, C.A.P.D.B. **Estudo Analítico das Probabilidades de Oscilação de Neutrinos na Matéria em Três Gerações**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 184, 2007.
- 14- LOPES DOS SANTOS, J. M. B. **A Descoberta do Neutrino**. Projecto Faraday, Porto, dezembro de 2003. Disponível em: <http://faraday.fc.up.pt/Faraday.html>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 15- MELCHIOR, A. G. **Oscilação dos sabores de Neutrinos** Amanda Guerrieri Melchior. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).
- 16- MORAIS, A. M. A. **A Origem dos Elementos Químicos: Uma abordagem inicial**. 2ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009.
- 17- OLIVEIRA FILHO, K. S. OLIVEIRA SARAIVA, **Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2018. O Problema do Neutrino Solar. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node11.htm>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 18- PERUZZO, J. **Física & Energia Nuclear**. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012.
- 19- ROCHA, M. **Instituto de Química da Universidade de São Paulo**, 1998. Teoria Atômico Molecular. Disponível em: <http://alchemy.iq.usp.br/metabolizando/beta/01/atomista.htm>. Acesso em: 12 de março de 2021.
- 20- STRATHERN, P. **O sonho de Mendeleev**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Zahar, 2002.
- 21- THOMSON, M. **Modern Particle Physics**. New York: Cambridge University Press, 2013.

22- VERKINDT, D. **Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules**, 2019. History of the Neutrinos.

Disponível em: <https://lappweb.in2p3.fr/neutrinos/aneut.html>. Acesso em: 12 de março de 2021.