

1

Introdução

Embora hoje acreditemos que os primeiros neutrinos “nasceram” logo após o nascimento do universo, há aproximadamente 15 bilhões de anos, e ainda são produzidos em grandes quantidades nos interiores estelares, foi somente no final do séc. XIX, quando Becquerel ¹ e o casal Curie ² descobriram a radiatividade a partir de sais de urânio, que foram dados os primeiros passos, ainda bem distantes, em direção ao conhecimento de sua existência.

Rutherford ³, antes da virada do século, mostrou a existência de 2 tipos de radiação ⁴, α e β . Os primeiros anos do séc. XX tornaram-se uma verdadeira corrida na busca de melhor compreensão dos tipos de radiação, sendo realizados diversos experimentos por inúmeros físicos, até ser de consenso acadêmico que:

1. Radiação Alfa era composta de núcleos de ^4He ;
2. Radiação Beta eram elétrons gerados no núcleo radiativo; e
3. Radiação Gama era um fóton criado pelo núcleo radiativo com energia de alguns poucos MeV.

Assim, acreditou-se que a radiação beta deveria ter seu espectro de energia discreto por consistir de uma única partícula emitida do núcleo radiativo. Entretanto, Meitner, Hahn e Wilson, e von Baeyer e Chadwick, em 1914, de maneira independente, mostraram que o espectro da radiação beta era contínuo. Este resultado, usando técnicas mais modernas, foi confirmado em

¹Antoine Henri Becquerel (1852-1908) foi um físico francês laureado com o Prêmio Nobel de Física pela descoberta da radiatividade ao detectar radiação proveniente do urânio.

²Pierre (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934) foram físicos franceses que tornaram-se conhecidos no meio científico ao conseguirem isolar o elemento rádio, muito mais radiativo que o urânio e também foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física de 1903.

³Ernest Rutherford (1871-1937) foi um físico neozelandês que, entre inúmeros trabalhos, ficou famoso ao descobrir que a carga de um átomo está concentrada em seu centro, e também desenvolveu a moderna concepção de átomo.

⁴A radiação gamma (γ) foi descoberta em 1901 por Villard.

1927 por Ellis e Wooster. Diante de tamanho problema, Niels Bohr chegou a sugerir que a conservação de energia não se mantinha, mas a salvação da ciência - e da conservação da energia - foi a atitude desesperada do físico Wolfgang Pauli ⁵, em 1930, que postulou a existência de uma partícula, que ele chamou de *nêutron*, cujas características eram: tipo fermiônica, neutra e que interagiria muito fracamente, e esta partícula também seria emitida no decaimento beta.

Em 1932, Chadwick descobriu o nêutron conhecido atualmente [1] e o nome da misteriosa partícula de Pauli foi renomeada, por Fermi ⁶, para **neutrino**, que em italiano significa pequeno nêutron. Fermi formulou a teoria do decaimento beta via interação fraca, em 1934, onde a existência de um neutrino se encaixava muito bem, mas até o início da década de 50 tudo que se tinha eram os resultados, consistentes com a existência do neutrino, das medidas de recuo do núcleo durante o decaimento beta. Somente em 1952 é que Reines ⁷ e Cowan ⁸ procuraram um modo de medir o decaimento beta através da detecção de um pósitron (descoberto em 1933 por Anderson⁹) criado por um antineutrino. O experimento proposto foi de colocar um detector, composto de 1,4 mil litros de líquidos cintiladores, próximo de um reator nuclear em Hanford, Washington, no EUA (ver Fig. 1.1). Este foi o primeiro experimento de neutrinos produzidos em reatores e usava a reação $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ como canal principal. Os primeiros resultados [2] vieram no verão de 1953, mas não foram convincentes. O experimento foi refeito em 1956 com maiores cuidados, agora na Carolina do Sul e, com as melhorias principalmente com relação ao ruído, foi encontrada a primeira evidência experimental da existência de neutrinos [3]. Com o conceito de número leptônico conservando-se em interações fracas, introduzido em 1953 por Konopinski e Mahmoud [4] para explicar a não observância de certos modos de decaimento como, por exemplo, $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$,

⁵Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) foi um físico austríaco que, dentre outras importantes contribuições, postulou o princípio de exclusão dos férmions que leva seu nome, recebendo por isso o Prêmio Nobel de Física de 1945.

⁶Enrico Fermi (1901-1954) foi um físico italiano que se destacou pelo desenvolvimento da teoria quântica, na física nuclear, de partículas e mecânica estatística. Recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1938 por seu trabalho em radiatividade induzida.

⁷Frederick Reines (1918-1998) foi um físico norte-americano, laureado com o Prêmio Nobel em 1995 pela detecção do neutrino eletrônico em conjunto com Clyde L. Cowan Jr.

⁸Clyde Lorraine Cowan Jr (1919-1974) foi um engenheiro químico norte-americano cujo principal trabalho foi a detecção do neutrino eletrônico juntamente com Frederick Reines. No entanto, ele faleceu antes deste trabalho ser laureado com o Prêmio Nobel de Física.

⁹Carl David Anderson (1905-1991) foi um físico norte-americano, cujo principal trabalho foi a descoberta do pósitron, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1936.

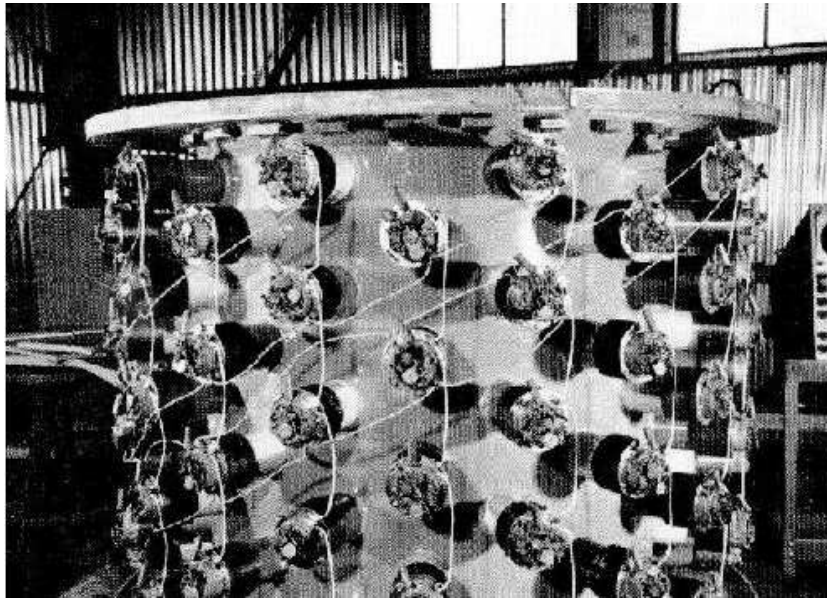


Figura 1.1: Primeiro experimento para detectar neutrinos, em 1953.

foi percebido que os neutrinos ν_e e ν_μ eram partículas distintas. Então, pela reação acima que produz pósitrons, sabemos que o que foi detectado em 1956 foi $\bar{\nu}_e$. A procura pelo ν_μ foi idealizada no começo da década de 60 e em 1962 foi detectado o neutrino muônico [5]. Em 1977 Martin Perl [6] descobre a terceira família dos léptons, o tau, indicando que deveria existir o neutrino do tau, mas esta descoberta só apareceu, experimentalmente, nos anos 2000 [7].

Paralelamente às descobertas de várias partículas, começou no final dos anos 60 a funcionar o primeiro detector para neutrinos oriundos de fontes astrofísicas, que na época significava o Sol. O experimento Homestake [8], localizado na mina de mesmo nome, foi o primeiro do tipo e funcionou por mais de 20 anos, revelando o problema dos neutrinos solares e dando os primeiros indícios de oscilação. Muitos experimentos foram realizados desde então na tentativa de encontrar evidências de oscilação de neutrinos, como o Kamiokande [9], no Japão, ou o IMB [10, 11], no EUA. Os resultados obtidos por KamLand [12] e Super-Kamiokande [13] confirmaram as expectativas a respeito da existência da oscilação de neutrinos, indicando que os neutrinos possuem massa.

Ainda não sabemos quais são os valores das massas, mas temos limites superiores para todas as espécies, que podem ser obtidos por inúmeros e variados experimentos como, por exemplo, o decaimento beta do tritium¹⁰ (${}^3\text{H} \rightarrow {}^2\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$) para o neutrino eletrônico [14], cujo melhor valor

¹⁰Tritium é um isótopo radiativo do hidrogênio, composto de dois nêutrons e um próton.

atualmente é $m_{\nu_e} \leq 2$ eV; o decaimento de píons ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) nos informa que $m_{\nu_\mu} \leq 0.19$ MeV para o neutrino muônico; e o decaimento do tau ($\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \nu_\tau$) revela $m_{\nu_\tau} \leq 18.2$ MeV [15]. Os resultados dos experimentos de oscilação também fornecem informações sobre a massa dos neutrinos mas, neste caso, os limites são inferiores. Utilizando os dados de oscilações de neutrinos atmosféricos ($\Delta m_{23}^2 \sim 2.5 \times 10^{-3}$ eV²), podemos dizer que pelo menos um dos neutrinos (se considerarmos hierarquia normal, o m_{ν_3}) possui $m \geq 0.05$ eV. Para os dados de neutrinos solares ($\Delta m_{12}^2 \sim 8 \times 10^{-5}$ eV²) o valor de um neutrino massivo (m_{ν_2} para hierarquia normal) seria $m \geq 0.01$ eV. Repare-se que conseguimos colocar limites de massa inferiores para dois tipos de neutrinos (m_2 e m_3 para hierarquia normal), mas não podemos dizer nada a respeito do neutrino mais leve (m_1 para hierarquia normal).

A cosmologia também pode nos dar informação sobre o limite superior de massa dos neutrinos, o problema é que os resultados dependem muito do modelo adotado causando grandes imprecisões, mas os resultados atuais dizem que a soma dos três neutrinos ativos tem valor máximo entre 0.17 e 2 eV [15].

Outro método de medirmos a massa do neutrino é calcularmos o tempo que um neutrino leva para percorrer uma distância e compararmos com um fóton (velocidade c). Sabemos que qualquer objeto massivo não pode alcançar a velocidade da luz, mas os neutrinos possuem massa muito próximo de zero, fazendo-se necessário que a distância a ser percorrida seja absurdamente grande para que tenhamos condições de medir atraso em relação ao fóton. O acontecimento da supernova SN1987A, registrado na Terra pelos detectores Kamiokande e IMB, permitiu que fossem feitas as primeiras estimativas de massa do neutrino baseando-se neste princípio, denominado *tempo de vôo* [16], tendo em vista que a distância era de aproximadamente 52 kpc¹¹. Embora os detectores da época tenham captado poucos eventos, foi possível determinar limites superiores para a massa do neutrino eletrônico ($m \leq 12$ eV) [17, 18] considerando os primeiros segundos do sinal observado.

Esta dissertação está dividida da seguinte forma: começamos no cap. 2 com uma breve introdução sobre a história de supernovas para depois explicarmos um pouco da física das estrelas, isto é, como elas nascem, crescem e morrem, nos aprofundando no processo de explosão para estrelas massivas. No

¹¹Parsec (pc) é uma unidade de distância comumente usada em astronomia e seu valor aproximado é de 3.09×10^{16} m. Um múltiplo do Parsec é o quilo-parsec (kpc), que equivale a 1000 parsecs.

cap. 3 temos a física de partículas: explicamos como se comportam os neutrinos e o processo de oscilação, primeiramente, no vácuo, depois na matéria, que é a parte que nos interessa, pois é no interior das estrelas, em regiões de alta e/ou baixa densidades, que ocorrem as oscilações e são alterados os fluxos dos sabores dos neutrinos. Após este primeiro contato com a teoria mais geral, vamos ao cap. 4, onde explicamos a teoria do tempo de vôo, que é de fundamental importância nesta dissertação e as características gerais dos detectores utilizados para este trabalho: Super-Kamiokande e IceCube coletando dados atualmente e Hiper-Kamiokande e TITAND ainda como projetos, mas já com trabalhos na literatura, principalmente o Hiper-Kamiokande. Finalmente, no cap. 5, vamos apresentar os resultados de nossas simulações para os quatro detectores e vermos o que eles seriam/serão capazes de observar em termos de limite de sensibilidade de massa caso ocorra uma supernova na nossa galáxia. As conclusões alcançadas neste estudo estão no cap. 6.