

**Instituto Principia
Academia da Escola de Talentos**

Trabalho de Conclusão de Curso

Turma 2022 MagMecânicos

Neutrinos astrofísicos detectados pelo IceCube

Um breve estudo sobre o impacto da energia na reconstrução da
direção do neutrino

Bruno Guimarães Duarte

Orientador: Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda

São Paulo
2024

Neutrino physics is largely
an art of learning a great
deal by observing nothing

Haim Harari

Agradecimentos

Primeiramente, sou extremamente grato à minha mãe, Roberta Guimarães, e ao meu pai, Fábio Francisco Duarte, por todo o apoio que sempre me deram durante toda a minha vida. Se eu tive condições de poder estudar, participar do Instituto Principia e escrever este trabalho, foi graças ao ócio que eles me permitiram ter através do trabalho duro deles. Também sou grato ao meu avô, João Batista Guimarães, uma das primeiras pessoas que fez com que eu despertasse o amor que tenho pela matemática.

Agradeço a todos os professores que tive dentro da Escola de Talentos, Ricardo D' Elia Matheus, Leonardo de Lima e Rickson Coelho Mesquita, professores estes que ministraram encontros maravilhosos durante um ano inteiro. Sou grato também ao professor Marcelo Moraes Guzzo, um dos responsáveis por propiciar este programa que surgiu de forma tão inesperada na minha vida, mas que a influenciou de maneira tão significativa. Agradeço ao Wellington Barbosa, alguém que não somente faz o Instituto Principia funcionar tão bem, mas é uma pessoa incrível, engraçada e que admiro muito.

Sou grato a todas as pessoas que conheci dentro da Escola de Talentos, em especial à Carol, a melhor presidente que esta academia poderia ter; à Luíza, alguém que rapidamente desenvolvi uma amizade e apreço muito grande; ao Arley, com quem eu tive o prazer de estudar sobre neutrinos e passar um bom tempo zoando o Victor; ao Victor, uma das pessoas mais divertidas que já conheci; a Sofia, a primeira pessoa da academia que conversei (de fato) e que, de tempos em tempos, tenho a sorte de encontrar em eventos do Instituto.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda, por todos os nossos encontros e por todo o conhecimento que o senhor me ensinou. A sua didática incrível permitiu que eu pudesse mergulhar nesse universo de neutrinos com muito mais clareza e encanto, compreendendo de maneira muito mais simples vários assuntos complexos. Muito obrigado por todo o tempo que o senhor dedicou e por fazer com que eu me apaixonasse ainda mais pela física.

Não poderia deixar de agradecer os meus professores que tive durante os meus anos de escola. Muito obrigado, em especial, à (ao) Renata Olivier, Ana Cláudia, Daniel Pacheco, Thiago Sorelli, Nicolle Biancardini Reuter, João Quintiliano, Cristiano Hernandez, Danielle Prudente, Pietro Vicari, Paulo Cesar Carraturi.

Também, sou grato ao professor Fabio Fachini, por ter me ensinado muito mais do que português, por ter me ensinado a beleza da vida.

Por último, agradeço a todos os meus amigos com quem dividi desabafos, conquistas, dores:

Obrigado Bárbara, Sofia, Nalu, Carol, Victor, pessoas que de repente se tornaram parte crucial da minha vida e que fazem com que eu seja incapaz de me arrepende de muitas de minhas escolhas.

Obrigado, Bruno Deeke, por todos esses anos de amizade e inspiração. Creio que serão poucas as pessoas em minha vida que poderei ter uma relação tão sincera quanto a que tenho com você, irmão.

Obrigado, Ana, por ser uma das poucas pessoas com quem encontro conforto e posso ser vulnerável, que compartilha os mesmos medos e angústias que eu.

Resumo

Os neutrinos são pequenas partículas muito abundantes no universo que viajam a uma velocidade muito próxima à da luz. Com uma massa desprezível, eles interagem somente com as forças fraca e gravitacional, esta que é irrisória em um contexto quântico. Dessa forma, sua detecção é complexa e, durante muitos anos, os neutrinos só existiram como uma hipótese criada pelo físico Wolfgang Pauli.

Atualmente, um dos principais detectores de neutrinos utilizados para pesquisa é o IceCube, um quilômetro cúbico de gelo repleto de pequenos aparelhos que detectam a luz produzida pela interação de neutrinos com a matéria. Mesmo sendo muito improváveis, interações acontecem graças à enorme quantidade de neutrinos que atravessam a Terra constantemente, isso somado ao grande volume do detector, havendo milhares de detecções de neutrino por ano no IceCube.

Esse “telescópio” tem como principal alvo de estudo os neutrinos altamente energéticos, cuja fonte é além da nossa própria galáxia. Acredita-se que eles têm a mesma origem de raios cósmicos com altas energias e, através dos neutrinos, é possível entender mais a fundo objetos cósmicos capazes de acelerar partículas.

Através de dados do IceCube, é possível observar os efeitos da energia do neutrino na incerteza do cálculo de sua direção e aplicar isso para uma fonte específica de neutrinos de alta energia, a galáxia NGC 1068.

Palavras-chave

Neutrinos; IceCube; Raios Cósmicos; Neutrinos Astrofísicos; Neutrinos Atmosféricos; NGC 1068; Acelerador Cósmico

Abstract

Neutrinos are tiny, highly abundant particles in the universe that travel at speeds very close to the speed of light. With negligible mass, they interact only with the weak gravitational forces, the latter of which is insignificant in a quantum context. As a result, their detection is complex, and for many years, neutrinos existed only as a hypothesis proposed by physicist Wolfgang Pauli.

Currently, one of the main neutrino detectors used for research is IceCube, a cubic kilometer of ice filled with small devices that detect the light produced by the interaction of neutrinos with matter. Although such interactions are highly improbable, they occur thanks to the enormous number of neutrinos constantly passing through the Earth, combined with the large volume of the detector, leading to thousands of neutrino detections per year at IceCube.

This "telescope" primarily studies highly energetic neutrinos, whose sources lie beyond our own galaxy. It is believed that these neutrinos share the same origin as high-energy cosmic rays, and through neutrinos, it is possible to gain a deeper understanding of cosmic objects capable of accelerating particles.

By using data from IceCube, it is possible to observe the effects of neutrino energy on the uncertainty in calculating its direction and apply this to a specific source of high-energy neutrinos, the galaxy NGC 1068.

Keywords

Neutrinos; IceCube; Cosmic Rays; Astrophysical Neutrinos; Atmospheric Neutrinos; NGC 1068; Cosmic Accelerator

Sumário

1. Introdução	7
1.1. História do neutrino	7
1.2. O que é um neutrino?	8
1.2.1. Neutrinos Eletrônicos	9
1.3. Força Fraca	9
2. IceCube Neutrino Observatory	11
2.1. Estrutura	11
2.2. Alvo de pesquisa	12
2.3. Funcionamento	13
2.4. Análise de possíveis fontes de neutrinos astrofísicos	14
3. Conclusão	16
3.1 Galáxia NGC 1068	17
Referências bibliográficas	18

1. Introdução

1.1. História do neutrino

A radioatividade foi descoberta em 1896 pelo físico francês Henri Becquerel, ao deixar dentro de uma gaveta uma chapa fotográfica junto de um composto de urânio. A chapa ficou manchada, como se tivesse sido exposta à luz, dessa forma, Becquerel chegou à conclusão de que o urânio emitiu algum tipo de radiação.

Após isso, diversos outros cientistas iniciaram estudos na área da radioatividade, levando à descoberta de diferentes emissões: partícula alfa (composta de 2 prótons e 2 nêutrons), partícula beta (elétron ou pósitron emitido em alta energia e velocidade) e raio gama (radiação eletromagnética de alta frequência e penetração).

Olhando mais a fundo os dois primeiros tipos de emissão, partículas alfa e beta, sabe-se que raios alfas são gerados por causa da repulsão eletrostática entres os prótons em um núcleo muito grande, responsável por “expelir” matéria (partícula alfa) de modo a se tornar mais estável [2]. Assim, essas partículas possuem uma energia específica de acordo com o isótopo que as emitiu.

Portanto, imaginava-se que os raios-beta, assim como raios-alfa, emitidos por uma fonte radioativa específica teriam a mesma energia. No entanto, em 1911, Otto Hahn e Lise Meitner, junto de Otto von Baeyer, utilizaram um espectrômetro (Figura 1.1) para analisar a velocidade de elétrons (raios beta) emitidos pela mais pura substância que eram capazes de produzir, a fim de evitar qualquer tipo de interferência de outros compostos na energia analisada.

A partir de seus experimentos, verificaram que raios-beta emitidos por uma substância pura adquiriam valores distintos de energia. Poucos anos depois, em 1914, James Chadwick também chegou ao mesmo resultado, concluindo, portanto, que a radiação beta possuía um espectro contínuo de energia.

Durante muitos anos esse fato parecia ir contra o princípio de conservação de energia, tido como uma das bases da física. Em um decaimento beta, a massa do novo núcleo é menor que a massa do núcleo original, o que implica que essa energia, proveniente da massa que “desapareceu”, é convertida em energia cinética, ou seja, movimento do elétron e do núcleo. No entanto, em núcleos específicos, a energia liberada deveria ser sempre a mesma e, portanto, a energia do elétron também, o que não condiz com as observações feitas pelos experimentos da época. Dessa forma, a conservação de energia parecia ser desrespeitada no decaimento beta, e este era um problema que perduraria por alguns anos, levando a diversas hipóteses, como a de Niels Bohr, que propôs abandonar o princípio de conservação de energia a nível quântico.

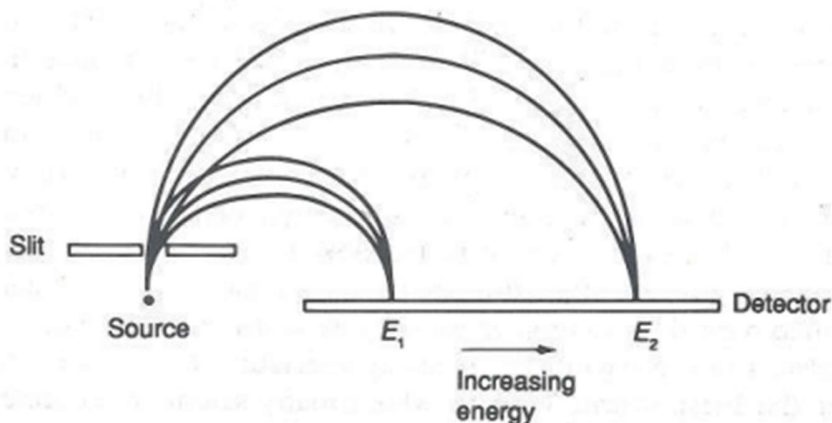


Figura 1.1: este é um exemplo de espectrômetro, em que os elétrons de raios beta, cuja carga é negativa, realizam um trajeto curvo ao passar por um campo magnético. Quanto maior a velocidade da partícula – ou seja, quanto maior a energia – menor é a curvatura. Figura retirada de [1].

Em 1929, o físico austríaco Wolfgang Pauli propôs uma nova partícula, de carga neutra e massa de mesma magnitude que a do elétron, ou, pelo menos, não maior que 1% da massa do próton. Ele nomeou a nova partícula de “nêutron” (*neutronen* em Alemão) – na época a partícula que hoje conhecemos como nêutron ainda não havia sido descoberta – e esta que, posteriormente, viria a ser chamada de “neutrino”, seria emitida junto do elétron, de forma que a soma das energias do elétron e do neutrino seria constante [1].

1.2. O que é um neutrino?

Os neutrinos são partículas elementares classificadas como léptons, caracterizados pelo seu spin $\frac{1}{2}$ e por não interagirem com a força forte, existindo um “sabor”, ou tipo, de neutrino para cada lépton: elétron (neutrino eletrônico), múon (neutrino muônico) e tau (neutrino tauônico), cada um desses neutrinos com suas respectivas antipartículas. Enquanto o elétron, múon e tau possuem carga (léptons carregados) e interagem tanto com a força eletromagnética quanto força fraca, os neutrinos são partículas neutras, interagindo somente com a força fraca (e a gravidade, porém esta é fraca demais para ser levada em conta) e viajando a uma velocidade muito próxima à da luz. Dessa forma, a detecção deles é extremamente complexa e, durante anos, não passaram de uma ideia para solucionar o problema do espectro de energia do decaimento beta, conferindo-lhes o apelido de “partículas fantasmas” [1].

Podendo surgir de diversas fontes diferentes, como estrelas, galáxias, a própria atmosfera terrestre, reatores, o neutrino é a segunda partícula mais abundante em todo o universo, atrás somente do fóton: a cada segundo, atravessam 60 bilhões deles por centímetro quadrado do nosso corpo [3]. Com uma massa quase nula, os neutrinos podem surgir como: neutrinos ou antineutrinos. Os primeiros são caracterizados por um número leptônico [4] positivo ($L = +1$) e uma helicidade [5, 6] (característica relacionada

ao sentido da rotação em relação ao seu deslocamento) negativa ou “left handed” (spin e vetor de momento linear antiparalelos). Já suas antipartículas, os antineutrinos, possuem um número leptônico negativo ($L = -1$) e uma helicidade positiva ou “right handed” (spin e vetor de momento linear paralelos).

1.2.1. Neutrinos Eletrônicos

Analisando mais a fundo o decaimento β^- , o que é gerado, na verdade, não é um neutrino ν_e , mas sim um antineutrino $\bar{\nu}_e$, de forma a garantir a conservação do número leptônico [4]:

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e & (1.1) \\ \text{número leptônico: } 0 &\rightarrow 0 + 1 - 1 \end{aligned}$$

O número leptônico inicial é 0 e o número leptônico final é ($+1 - 1 = 0$), respeitando o princípio de que a soma de ambos deve sempre se manter a mesma.

Em um decaimento β^+ , que ocasiona na formação de uma partícula β^+ , ou seja, um pósitron e^+ ($L = -1$), há a emissão de um neutrino ($L = +1$):

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e. \quad (1.2)$$

Além dessas reações envolvendo neutrinos, há também o decaimento β inverso:

$$\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow n + e^+. \quad (1.3)$$

Nesse exemplo, um antineutrino eletrônico é absorvido por um próton, transformando-se em um nêutron e emitindo um pósitron (antipartícula do elétron). Durante muitos anos, a existência do neutrino não passava de uma solução para um problema, porém, foi a partir dessa reação que, em 1956, os físicos Fred Reines e Clyde Cowan conseguiram detectar, pela primeira vez, um neutrino.

1.3. Força Fraca

A interação dos neutrinos com a matéria se dá pela ação da força fraca, a mais fraca entre as três forças subatômicas (forte, eletromagnética e fraca), e é intermediada pelos bósons W^\pm e Z^0 . Quando um neutrino eletrônico interage com um nêutron, formando um próton e um elétron (umas das interações possíveis),

$$n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-, \quad (1.4)$$

são dois os casos que podem ter ocorrido:

O nêutron emitiu um W^- , absorvido pelo neutrino, e essa emissão fez com que um de seus *quarks down* se transformasse em um *quark up*: nêutron(*udd*), composto de um *quark up* e 2 *quarks down*, virou um próton (*uud*), composto de dois *quarks up* e um *quark down*.

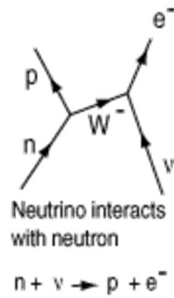


Figura 1.2: Diagrama de Feynman representando a Eq. (1.4) com emissão de um W^- .
Figura retirada de [7].

O neutrino emitiu um W^+ , absorvido pelo nêutron, resultando em um de seus *quarks down* transformado em *quark up*. Ambos os processos possuem o mesmo resultado. A única diferença é o sentido do bóson W e sua carga.

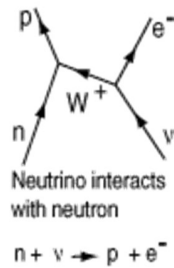


Figura 1.3: Diagrama de Feynman representando a Eq. (1.4) com emissão de um W^+ .
Figura retirada de [7].

Já um exemplo de interação fraca que ocorre a troca do bóson Z^0 , o qual não altera a carga elétrica de partículas, é a interação de um neutrino com um elétron:

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-, \quad (1.5)$$

em que há somente a troca de energia entre as partículas.

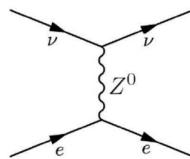


Figura 1.4: Diagrama de Feynman representando a Eq. (1.5) com a troca de um Z^0 entre o neutrino e o elétron.
Figura retirada de [7].

Os bósons W^\pm e Z^0 tem massas na casa dos $80 \text{ GeV}/c^2$, o que não respeita o princípio de conservação de energia. No entanto, segundo o princípio da incerteza de Heisenberg, essa violação pode acontecer em intervalos de tempo muito curtos, seguindo a equação

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (1.6)$$

Por isso, essas partículas podem viajar por cerca de 10^{-18} metros, o que é cerca de 0,1% do diâmetro de um próton. Assim, as interações entre a matéria e neutrinos acabam sendo extremamente raras, já que essa curta distância é necessária para a troca dos bósons de força fraca.

2. IceCube Neutrino Observatory

2.1. Estrutura

O IceCube foi criado com um intuito fazer observações sobre o cosmos, como medições do fluxo de neutrinos altamente energéticos e identificar possíveis fontes dessas partículas. Localizado na Estação Polo Sul Amundsen-Scott, Antártida, é o maior detector/telescópio de neutrinos já criado pela humanidade, com 1km^3 no qual 86 cabos encontram-se enterrados dentro do gelo antártico (opticamente transparente e muito estável), cada um com 60 detectores de luz muito sensíveis, chamados de DOMs [8].

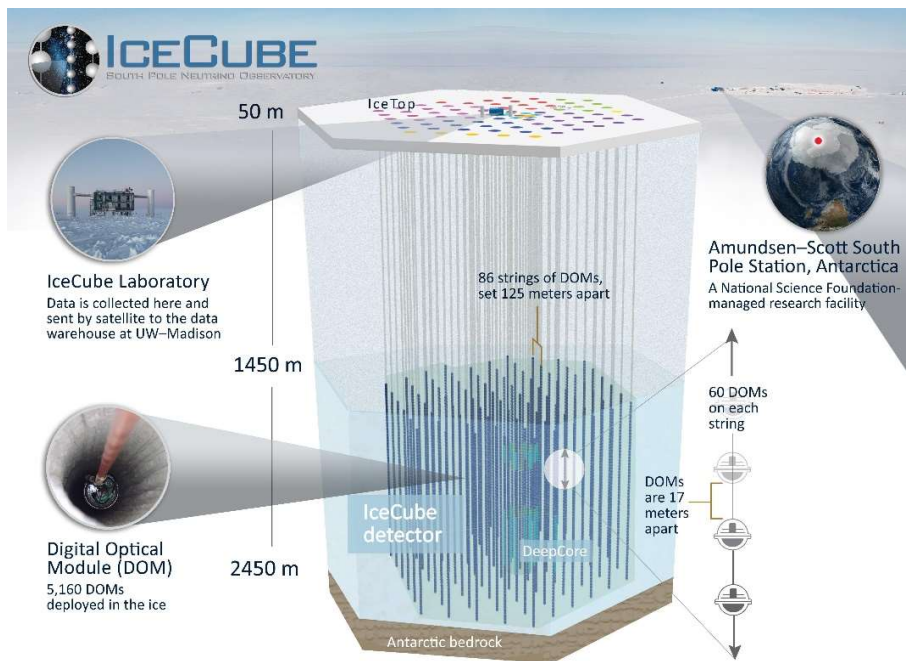


Figura 2.1: Estrutura interna do IceCube.
Figura retirada de [8].

Um módulo digital óptico, DOM, tem um diâmetro de cerca de 30cm, composto de uma camada de vidro resistente a altas pressões, o suficiente para aguentar a pressão de cerca de 400 atmosferas que há dentro do gelo [9]. Em seu interior, tubos fotomultiplicadores (PMTs) são responsáveis por detectar a radiação Cherenkov, emitindo um elétron quando recebem um fóton. Quando uma partícula carregada viaja a

uma velocidade superior à da luz em um meio (no caso do IceCube, no gelo) ela emite fótons azuis e ultravioletas [10], uma luz conhecida como Cherenkov.

Estes sensores começam a partir dos 1450 metros de profundidade e vão até 2450 metros, formando uma galeria de 5160 DOMs. Essa parte interna é chamada de DeepCore, porém, além dela, há também o IceTop, um segundo detector composto de outros 324 DOMs localizado na superfície, responsável por observar a interação de raios cósmicos com a atmosfera [8].

Raios cósmicos são partículas carregadas que viajam pelo universo com velocidades muito próximas à da luz. Eles são majoritariamente prótons e núcleos de Hélio (prótons e nêutrons), porém, podem também ser núcleos mais pesados, elétrons, pósitrons e antiprótons [12].

A construção do IceCube levou sete anos (2004 – 2010) e foi financiada majoritariamente pela agência norte-americana *National Science Foundation (NSF)*. A Universidade de Wisconsin-Madison é a instituição líder do detector, que conta com a participação de aproximadamente 300 físicos de 14 países diferentes [8].

2.2. Alvo de pesquisa

O detector tem como alvo de pesquisa neutrinos astrofísicos de alta energia (entre GeV e PeV+), enquanto neutrinos produzidos por reatores nucleares, pela atmosfera e até mesmo pelo sol são da magnitude de MeV.

Acredita-se que esses neutrinos são produzidos nos mesmos locais que raios cósmicos altamente energéticos: em aceleradores cósmicos. Estes são responsáveis por fazer com que partículas atinjam energias muito altas, milhões a bilhões de vezes superiores às que podemos produzir aqui na Terra ou que são produzidas dentro da Via Láctea [13]. Enquanto os raios cósmicos de baixa energia são, geralmente, produzidos dentro da nossa galáxia, aqueles mais energéticos advêm de locais muito mais distantes [10]. No entanto, a detecção de sua origem é muito difícil, já que eles, por serem partículas com carga, tem sua trajetória até o planeta Terra alterada por campos eletromagnéticos. Os fótons de alta energia poderiam ser uma opção para localizar esses aceleradores, já que quase não são defletidos. No entanto, em energias acima de TeV (10^{12} eV), as ondas eletromagnéticas não conseguem atravessar distâncias cosmológicas [10], como representado na Figura 2.2.

Assim, pelo fato de os neutrinos serem partículas que quase não interagem com a matéria, podem viajar longas distâncias sem serem afetados e, portanto, indicar a fonte desses raios cósmicos muito energéticos. Núcleos ativos de galáxia (AGNs), estrelas de nêutrons, explosões de supernovas e pulsars são exemplos desses aceleradores cósmicos os quais os neutrinos astrofísicos ajudam a localizar [10].

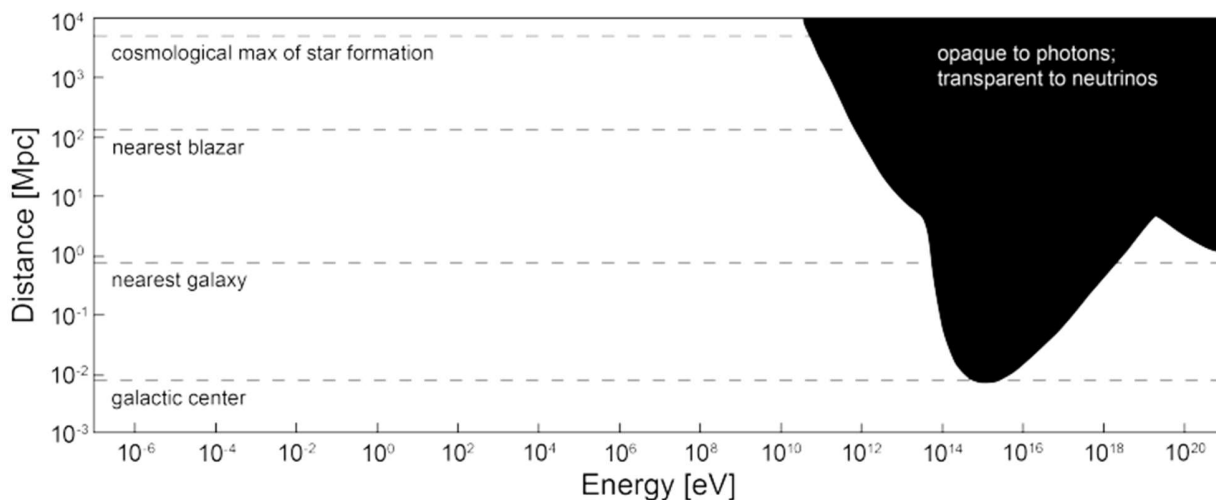
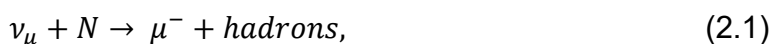


Figura 2.2: 1Mpc, equivalente a cerca de 3 milhões de ano luz x energia de fótons. A imagem mostra como, em altas energias, as ondas eletromagnéticas não são tão eficientes para a observação do universo. Figura retirada de [8].

2.3. Funcionamento

Apesar de o IceCube detectar os três sabores existentes, o neutrino muônico é o mais interessante para um dos propósitos do telescópio: estimar a origem dos neutrinos astrofísicos. Isso porque ele é o único que cria um rastro, enquanto neutrinos tauônicos e eletrônicos criam “cascatas” de luz, que possuem um erro considerável, de cerca de 10° [14]. Quando ele interage com o gelo, gera um múon que, por sua vez, emite um rastro de luz Cherenkov, o qual é detectado pelos tubos fotomultiplicadores dos DOMs. Assim, através de uma grande precisão, é possível estimar a direção de onde veio o neutrino [10].

A interação do neutrino muônico com a matéria pode se dar da seguinte forma:



em que N é um nucleon, um próton ou um nêutron, e, como resultado, há a emissão de um múon e um ou mais hádrons (partícula composta de quarks e que interage com a força forte) graças à alta energia da interação [15].

Dentro dos DOMs, estes capazes de reagir à chegada de um único fóton, os sinais dessas partículas são amplificados e transformados em pulsos elétricos. Cada um desses detectores possui um computador interno, bem como um relógio de alta precisão para medir o tempo de chegada dos fótons (com uma precisão na casa dos 2 nanossegundos, ou $2 \cdot 10^{-9}s$) [16]. Com esses dados, é possível estimar a direção de onde veio o múon e, como consequência, a direção provável de chegada do neutrino.

Além dos neutrinos astrofísicos, o principal alvo de pesquisa do IceCube, neutrinos e múons formados na atmosfera, bem como neutrinos de dentro da nossa galáxia, também são detectados. Apesar de alguns serem refletidos de volta para o

espaço, parte dos raios cósmicos interagem com a atmosfera terrestre, gerando “chuvas” de outras partículas. Quando os raios cósmicos, majoritariamente prótons e núcleos de hélio (partículas α), colidem com átomos de gases atmosféricos – geralmente oxigênio ou nitrogênio – ocorre a produção das seguintes partículas: hádrons, como os píons (π^+ , π^- , π^0) e os káons (K^+ , K^- , K^0) e bárions, como os prótons e nêutrons. Estes últimos, formados na colisão inicial, induzem outras reações dessas e permitem a continuação da “chuva de hádrons” [17].

Por serem partículas muito instáveis, os píons e os káons carregados decaem quase que instantaneamente, produzindo grandes quantidades de múons e neutrinos:

$$\pi^+ = \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.2)$$

$$\pi^- = \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.3)$$

$$K^+ = \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.4)$$

$$K^- = \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (2.5)$$

Os múons formados na atmosfera, assim como seus neutrinos, chegam até o IceCube e compõe o maior número de partículas detectadas. Assim, para evitar que os múons atmosféricos atrapalhem o estudo de neutrinos astrofísicos, limita-se a pesquisa à observação do hemisfério norte, com declinação entre $\delta = -3^\circ$ e 81° . Dessa forma, a Terra é utilizada para barrar múons, agindo como uma espécie de filtro para que a amostra final de eventos seja quase 100% pura – os múons aparecem como cerca de <0,3% do total [10]. Porém, a maioria dos neutrinos que atravessam o planeta são atmosféricos e, para discriminá-los dos neutrinos astrofísicos, leva-se em consideração aspectos como: energia (aqueles provenientes de fontes astrofísicas possuem energias mais elevadas), direção (caso ela coincida com a direção de um provável acelerador cósmico, é provável que seja um neutrino astrofísico) e análise dos dados experimentais em relação a simulações prevendo a quantidade de “eventos de fundo” esperados [10].

2.4. Análise de possíveis fontes de neutrinos astrofísicos

Para encontrar pontos de emissão de neutrinos astrofísicos de alta energia, um estudo utilizando IceCube [10] analisou uma lista de 110 objetos astronômicos, dentre eles: 95 blazars, 5 AGNs e 10 outras galáxias e fontes de TeV raios gama. A partir de simulações e dados experimentais, obtiveram-se os valores de P locais, ou seja, a fração do número de eventos de fundo simulados (neutrinos atmosféricos e astrofísicos isotrópicos, ou seja, aqueles que vêm de fontes dispersas) que produzem dados maiores ou iguais aos obtidos a partir dos experimentos. Quanto menor o valor de P local, menor é a quantidade de valores de simulação que convergem com os dados experimentais, o que indica que estes têm uma maior chance de serem os neutrinos que se procura, portanto, mais significativo é o excesso observado [10].

Posteriormente, para se ter um dado mais confiável, utiliza-se o valor de P global, calculado a partir do valor P local e corrigindo-o de acordo com o teste em múltiplos

locais [10]. Assim, minimiza-se as chances de ocorrerem falsas detecções graças ao grande número de testes realizados.

Em uma determinada fonte pontual de neutrinos, podemos descrever o seu fluxo $\Phi_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}$ a partir da seguinte equação:

$$\Phi_{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}(E_\nu) = \Phi_0 \cdot \left(\frac{E_\nu}{E_0}\right)^{-\gamma}, \quad (2.6)$$

em que $E_0 = 1 \text{ TeV}$ é a energia de normalização, Φ_0 o fluxo de normalização para uma determinada E_ν e γ o índice espectral, um parâmetro livre que é definido de acordo com os dados experimentais, de forma a fazer com que a equação seja o mais verossímil possível com a realidade. A partir da Eq. (2.6), assumindo um valor para γ , utilizando a “área efetiva do detector” A_{eff} [11] (uma medida de sua sensibilidade na detecção de neutrinos) e a partir do valor de E_ν , é possível determinar o número médio de neutrinos astrofísicos detectados vindo de um ponto do universo, μ_{ns} , com a função abaixo, em que d_{src} é a direção da fonte de neutrinos:

$$\mu_{ns} = \int_0^\infty dE_\nu A_{eff}(E_\nu, d_{src}) \cdot \Phi_0 \cdot \left(\frac{E_\nu}{E_0}\right)^{-\gamma}. \quad (2.7)$$

Após a detecção de uma fonte de neutrinos, é possível calcular a distribuição probabilística da distância angular $\hat{\psi}$ da direção construída do neutrino em relação à direção real assumida de sua fonte.

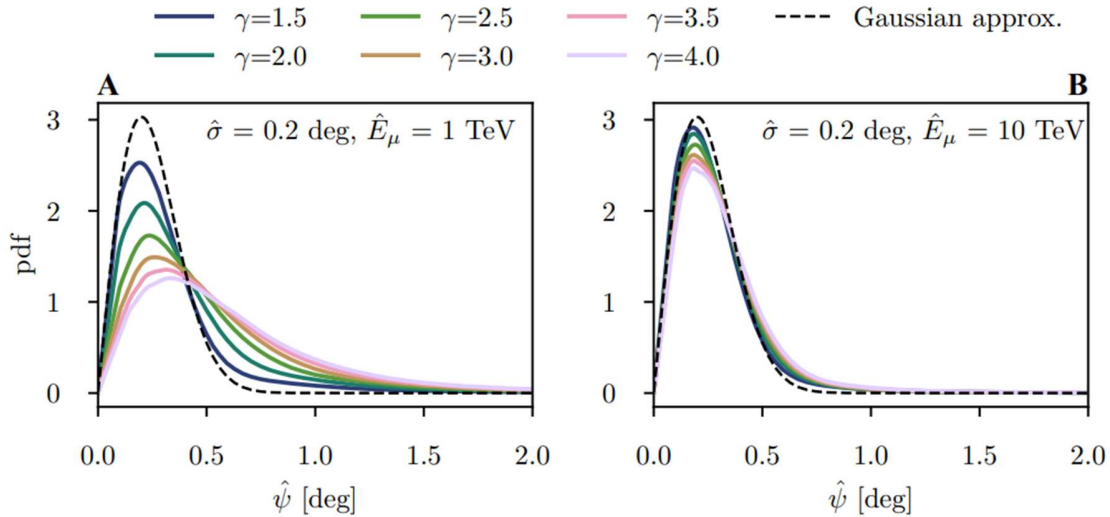


Figura 2.3: Os gráficos mostram a dispersão probabilística da distância angular $\hat{\psi}$, com uma incerteza $\hat{\sigma} = 0,2^\circ$ para cada valor de γ . A) Utiliza uma energia $\hat{E}_\mu = 1 \text{ TeV}$ e B) utiliza uma energia de $\hat{E}_\mu = 10 \text{ TeV}$. Figura retirada de [11].

Nos gráficos, utilizou-se a seguinte relação para definir a função de densidade de probabilidade (pdf) de se obter cada valor de $\hat{\psi}$:

$$\tilde{f}(\hat{E}_\mu, \hat{\psi}, \hat{\sigma}|\gamma) = f_S(\hat{E}_\mu, \hat{\sigma}|\gamma) \cdot \frac{\hat{\psi}}{\sigma_{tot}^2(\hat{E}_\mu, \gamma)} e^{-\psi^2/(2\sigma_{tot}^2(\hat{E}_\mu, \gamma))}. \quad (2.8)$$

Em que $\tilde{f}(\hat{E}_\mu, \hat{\psi}, \hat{\sigma}|\gamma)$ é o valor de pdf e $f_S(\hat{E}_\mu, \hat{\sigma}|\gamma)$ uma função que descreve a dependência da energia reconstruída do múon, \hat{E}_μ , e da incerteza estimada $\hat{\sigma}$ em relação ao índice espectral γ [11].

A função de densidade de probabilidade (*probability density function*, pdf), $f(x)$, descreve a probabilidade relativa de uma variável x , por exemplo, assumir um determinado valor. Esta é uma função integrável que deve assumir sempre valores positivos, $f(x) > 0$, para qualquer valor de x [18]. Ademais, a área debaixo da curva $f(x)$ é igual a 1:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1. \quad (2.9)$$

Além disso, a incerteza total, σ_{tot} , obtida pela Eq. (2.10), é definida a partir da incerteza estimada da reconstrução da trajetória do múon, $\hat{\sigma}$, e o ângulo cinético, σ_{kin} , ou seja, o ângulo de diferença entre a direção original do neutrino e a trajetória do múon. Isso porque, quando o neutrino interage com o gelo e forma um múon, os dois não formam um trajeto congruente, há uma pequena diferença angular.

$$\sigma_{tot}(\hat{E}_\mu, \gamma) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 + \sigma_{kin}^2(\hat{E}_\mu, \gamma)} \quad (2.10)$$

Utilizando os dados da Figura 2.3, é possível calcular os valores de σ_{tot} , bem como σ_{kin} , para cada \hat{E}_μ e γ :

γ	\hat{E}_μ	σ_{tot}	σ_{kin}	\hat{E}_μ	σ_{tot}	σ_{kin}
1.5	1TeV	0.24	0.133	10TeV	0.208	0.057
2		0.29	0.210		0.2122	0.071
2.5		0.35	0.287		0.2225	0.098
3		0.41	0.358		0.232	0.118
3.5		0.45	0.403		0.238	0.129
4		0.48	0.436		0.2448	0.141

Tabela 2.4: Os valores σ_{tot} e σ_{kin} da terceira e quarta coluna são referentes a $\hat{E}_\mu = 1$ TeV, enquanto os da sexta e sétima referentes a $\hat{E}_\mu = 10$ TeV.

3. Conclusão

Analisando os dados da Tabela 2.4, é possível observar que, quanto maior for a energia \hat{E}_μ , menor será o ângulo cinético σ_{kin} . Portanto, neutrinos com energias cada vez maiores terão incertezas quanto à sua direção cada vez menores.

3.1 Galáxia NGC 1068

A galáxia ativa NGC 1068, que possui um núcleo ativo de galáxia (AGN) [22], uma região central da galáxia em que o disco de acreção de um buraco negro supermassivo emite um forte brilho, teve um valor de P local igual a $1 \cdot 10^{-7}$, o menor entre os 110 objetos astronômicos analisados. Corrigindo o valor levando em conta todos os dados estudados, chegou-se a um P global de $1.1 \cdot 10^{-5}$, assim como um número médio de eventos observados $\hat{\mu}_{ns} = 79^{+22}_{-20}$ e um índice espectral $\hat{\gamma} = 3,2^{+0,2}_{-0,2}$ [10]. Adaptando a distribuição probabilística dos valores de $\hat{\psi}$ para a galáxia NGC 1068, temos:

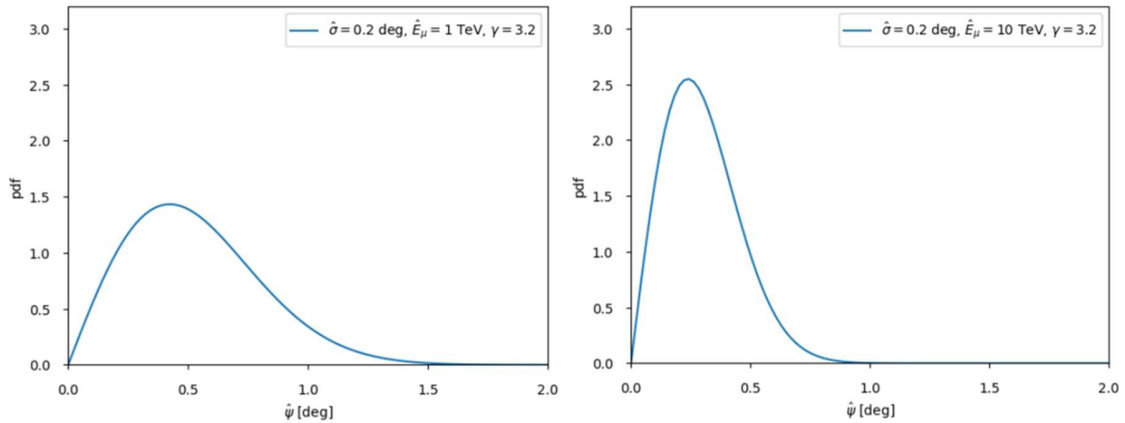


Figura 3.1: Os gráficos mostram a dispersão probabilística da distância angular $\hat{\psi}$, com uma incerteza $\hat{\sigma} = 0,2^\circ$ para o valor de $\gamma = 3,2$. A imagem da esquerda utiliza uma energia $\hat{E}_\mu = 1 \text{ TeV}$ e a da direita utiliza uma energia de $\hat{E}_\mu = 10 \text{ TeV}$

Referências bibliográficas

- [1] SUTTON, Christine. *Spaceship Neutrino*. Cambridge England ; New York, Ny, Usa, Cambridge University Press, 1992.
- [2] IFUSP. “Decaimento Alfa”. Disponível em: <https://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/página-de-livro/decaimento-alfa>. Acesso em: julho de 2024.
- [3] VALDIVIESSO, Gustavo do A.; GUZZO, Marcelo M. Compreendendo a oscilação dos neutrinos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, p. 495-506, 2005.
- [4] UFABC. “NÚMERO LEPTÔNICO E O ANTINEUTRINO”. Disponível em: <https://neutrinos.prog.ufabc.edu.br/index.php/propriedades/antineutrino/>. Acesso em: julho de 2024.
- [5] UFABC. “HELICIDADE E QUIRALIDADE”. Disponível em: <https://neutrinos.prog.ufabc.edu.br/index.php/propriedades/helicidade-quiralidade/>. Acesso em: julho de 2024.
- [6] GÄRTNER, Stefan A. *Neutrino Helicity Measurement*. University of Saskatchewan, 2005.
- [7] Department of Physics and Astronomy, Georgia State University. *HyperPhysics*, 2024. Acesso em: julho de 2024.
- [8] ICECUBE COLLABORATION. *IceCube*, 2024. Acesso em: julho de 2024
- [9] International Center for Hadron Astrophysics, CHIBA UNIVERSITY. “Photodetection Using 5,160 DOMs Buried at the South Pole”. Disponível em: <http://www.icehap.chiba-u.jp/en/icecube/detector/dom.html#:~:text=IceCube%27s%20observational%20apparatus%20is%20made,energy%20neutrinos%20through%20the%20ice/>. Acesso em: julho de 2024.
- [10] ICECUBE COLLABORATION*† et al. Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. **Science**, v. 378, n. 6619, p. 538-543, 2022.
- [11] Supplementary Materials for: ICECUBE COLLABORATION*† et al. Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. **Science**, v. 378, n. 6619, p. 538-543, 2022.
- [12] CHAGAS, Lizandra Mineiro Campos. *Restringindo a Violação do Princípio da Equivalência com Dados de Neutrinos Atmosféricos do IceCube*. 2024
- [13] Zolnerkevic, Igor. “Acelerador Cósmico.” *Revistapesquisa.fapesp.br*, Aug. 2018, revistapesquisa.fapesp.br/acelerador-cosmico/. Acesso: julho de 2024.
- [14] ICECUBE COLLABORATION. “Real-time Alerts”. *IceCube*, 2024. Acesso em: julho de 2024
- [15] FUNCHAL, Renata Zukanovich. *The physics of neutrinos*. 2014.
- [16] DESY. “IceCube: The world’s largest neutrino telescope”. Disponível em: https://astroparticle-physics.desy.de/research/neutrino_astronomy/icecube/index_eng.html. Acesso em: julho de 2024.
- [17] SCIENCE NOTES. “Cosmic Rays Explained”. Disponível em: <https://sciencenotes.org/cosmic-rays-explained/>. Acesso em: julho de 2024.

[18] PENNSTATE. “14.1 - Probability Density Functions”. Disponível em: <https://online.stat.psu.edu/stat414/lesson/14/14.1>. Acesso em: julho de 2024.

[19] UNICAMP. “Mediadoras das interações”. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/3RadioatividadeeParticulas/2QuarksLeptonseMediadoras/Quarksleptonsemediadoras.html>. Acesso em: julho de 2024.

[20] UCHICAGONEWS. “Cosmic rays, explained”. Disponível em: <https://news.uchicago.edu/explainer/what-are-cosmic-rays#:~:text=Trillions%20upon%20trillions%20of%20cosmic,make%20it%20to%20the%20ground>. Acesso em: julho de 2024.

[21] DESY. “Cosmic Particle Accelerators”. Disponível em: https://www.desy.de/school/school_lab/zeuthen_site/cosmic_particles/basics/sources/index_eng.html#:~:text=Cosmic%20accelerators%20could%20be%20pulsars,particles%20to%20such%20high%20energies. Acesso em: julho de 2024.

[22] ESAHUBBLE. “Active Galactic Nucleus”. Disponível em: <https://esahubble.org/wordbank/active-galactic-nucleus/>. Acesso em: julho de 2024.