



IceCube e a astrofísica de multi-mensageiros cósmicos

Palavras-Chave: Neutrinos, Astrofísica de multi-mensageiros, IceCube.

Autores:

Maria Briani Lima, IFGW

Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda (orientador), DRCC - IFGW

INTRODUÇÃO:

Os neutrinos são partículas fundamentais que desempenham um papel essencial na compreensão de processos astrofísicos extremos e da estrutura do universo. Desde sua formulação teórica por Wolfgang Pauli em 1930, essas partículas têm sido amplamente estudadas, impulsionando avanços significativos na Física de Partículas e na Astrofísica. Sua natureza é caracterizada pela ausência de carga elétrica, por uma massa extremamente pequena e por interações limitadas às forças fraca e gravitacional, fazendo com que os neutrinos atravessem grandes distâncias sem interagir com a matéria (GRIFFITHS, 2008). Essa característica torna sua detecção um grande desafio, mas também uma ferramenta valiosa para observações de regiões do universo que seriam inacessíveis por outros meios. O Observatório IceCube, localizado no Polo Sul, é uma das mais relevantes iniciativas para a detecção de neutrinos de altíssimas energias. O experimento consiste em uma rede de detectores distribuídos em um volume de aproximadamente um quilômetro cúbico de gelo glacial transparente, permitindo a observação da luz Cherenkov emitida quando neutrinos interagem com os núcleos atômicos do meio. Desde que entrou em operação em 2010, o IceCube tem sido responsável por uma série de descobertas relevantes, incluindo a identificação de um excesso de neutrinos provenientes da galáxia ativa NGC 1068, também conhecida como Messier 77 (ABBASI et al., 2022).

Este projeto teve como objetivo introduzir a aluna ao ramo de Física de Partículas, investigar os fundamentos teóricos e metodológicos envolvidos na detecção de neutrinos astrofísicos, concentrando-se na metodologia aplicada pelo IceCube e na análise qualitativa dos eventos detectados na NGC 1068.

METODOLOGIA:

A metodologia aplicada neste estudo baseou-se exclusivamente em abordagens teóricas por meio de livros didáticos, revisão bibliográfica e resolução de exercícios. De setembro a dezembro de 2024, foi iniciado um estudo programático em Física de Partículas, abordando os principais aspectos do Modelo Padrão e, em particular, a interação eletrofraca. O estudo baseou-se nos capítulos 1-6 do livro "Introduction to Elementary Particles" de David J. Griffiths e foi conduzido semanalmente por meio de

discussões presenciais sobre o conteúdo abordado e da resolução de problemas propostos. Além disso, através do artigo de Abbasi *et al.* (2022) foi possível estudar superficialmente os métodos estatísticos utilizados na detecção dos neutrinos vindos da NGC 1068.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O estudo introdutório realizado com o livro de Griffiths forneceu uma base essencial para a compreensão da física de partículas elementares, abordando desde conceitos fundamentais até os princípios matemáticos e experimentais que sustentam a teoria. Entre os principais tópicos cobertos, no capítulo 4 foi explorada as simetrias do universo, suas consequências em termos de leis de conservação e a apresentação do conceito de grupos de simetria demonstrado pelo Teorema de Emmy Noether. No mesmo capítulo, vimos que as simetrias, que era acreditado a impossibilidade de violação, podem ser violadas e isso está ligado a propriedade fundamental da força fraca. A paridade é uma simetria que corresponde à inversão espacial das coordenadas, ou seja, uma transformação $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$. Em 1957, o experimento Chien-Shiung Wu apresentou uma violação à paridade quando os elétrons emitidos no decaimento beta apresentaram uma distribuição preferencial em relação ao spin nuclear da amostra, demonstrando que a interação fraca não é invariante sob paridade. Podemos então concluir uma afirmação importante: violação de paridade é a assinatura da força fraca (GRIFFITHS, 2008).

No capítulo 6, foi introduzida a formulação de decaimentos e espalhamento. Foi abordado a taxa de decaimento Γ , que descreve a frequência com que uma partícula instável se desintegra, e a seção de choque σ , que quantifica a probabilidade de um evento de colisão resultar em um determinado processo de espalhamento. Através de fórmulas apresentadas como a Regra de Ouro de decaimento e de espalhamento, pudemos entender explicitamente a dinâmica dos fenômenos.

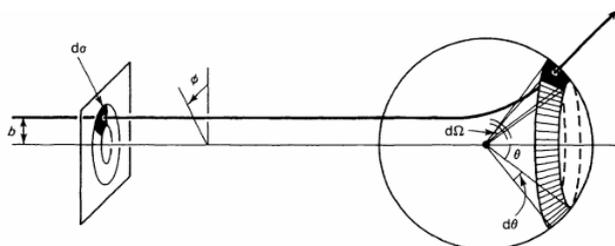


Figura 1: Visualização de uma partícula incidente na área $d\sigma$ que deflete ao ângulo sólido $d\Omega$.

Sobre o Observatório IceCube e sua detecção de neutrinos, foram estudados os métodos de detecção e as estatísticas científicas apresentadas. Os padrões de luz detectados pelos sensores são categorizados em duas topologias principais: trilhas e cascatas (tabela 1). Eventos de trilhas são múons, produzidos por neutrinos muônicos, que atravessam o detector criando uma linha reta de luz e permitindo uma detecção direcional. Já eventos de cascata são cascatas de partículas induzidas por diversas interações de neutrinos eletrônicos ou tauônicos, criando um formato de propagação da luz aproximadamente esférico. Por outro lado, eventos de cascata costumam fornecer uma medida mais completa da energia do neutrino. Como apenas uma pequena porção dos neutrinos detectados origina

de eventos astrofísicos, para diferenciar os eventos, o observatório utiliza o método de máxima verossimilhança (maximum-likelihood method ou MLE) e testes de razão de hipótese de probabilidade (likelihood ratio hypothesis testing ou LRT), baseado na energia, direção e incerteza angular estimados de cada evento.

Topologia	Origem	Característica principal	Precisão direcional	Resolução em energia
Trilha	Neutrinos muônicos	Produção de muón que gera uma linha de luz Cherenkov	Alta	Baixa
Cascata	Neutrinos eletrônicos e tauônicos	Diversas interações com propagação de luz aproximadamente esférica	Baixa	Alta

Tabela 1: Resumo das características dos tipos de eventos detectados no IceCube.

Após mais de 10 anos de coleta de dados, o observatório divulgou o primeiro mapa dos neutrinos ultra-energéticos emitidos em nossa galáxia (ABBASI et al., 2022). A figura 2 foi construída a partir de três varreduras discretas do céu do hemisfério norte considerando diferentes hipóteses para o índice espectral γ (que descreve como a intensidade do fluxo de neutrinos varia com a energia): com γ livre, fixado e fixado em 2.5, a fim de localizar os maiores excessos de eventos de neutrinos de alta energia (ABBASI et al., 2022). Esse estudo foi o primeiro de três apresentados pelo artigo. Os outros dois focaram em 110 fontes astronômicas de raio-gama já conhecidas para classificar o candidato mais significativo em emissões de neutrinos; e avaliar a significância de múltiplas fontes terem excesso de neutrinos através de um teste binomial. Assim, foram reportadas evidências de um excesso de neutrinos vindos da região coincidente com o núcleo da galáxia NGC 1068. A partir dessa detecção, a galáxia se tornou a fonte de neutrinos mais significativa do mapa com uma significância estatística local de 5.2σ .

A possibilidade de correlacionar os dados do IceCube com detectores de fótons, radiação eletromagnética e ondas gravitacionais é um grande avanço para a pesquisa de multi-mensageiros cósmicos (EICHMANN et al., 2022). Especificamente no estudo do NGC 1068, a comparação de diferentes dados é pertinente, visto que os neutrinos astrofísicos de alta energia e os raios gama são produzidos pelo mesmo processo. A produção ocorre em ou ao redor de fontes astronômicas onde há decaimento de mésons carregados (no caso do neutrino) e mésons neutros (no caso do raio gama) produzidos em interações próton-próton ou interações entre prótons e radiação de baixa energia do ambiente (ABBASI et al., 2022). Depois de produzidos, os raios gama ainda são propensos a outras interações dependendo da profundidade óptica do ambiente (fator que determinará quanta radiação passará por um meio), enquanto os neutrinos escapam sem realizar interações. Podemos confirmar este fenômeno quando comparamos a distribuição espectral dos neutrinos detectados com os raios gama detectados. A luminosidade (energia radiada por unidade de tempo) resultante dos neutrinos com energia entre 1.5TeV e 15TeV detectados do NGC 1068 foi de $L_\nu = (2.9 \pm 1.1_{stat}) \times 10^{24} \text{ ergs}^{-1}$ (com

correção de red-shift e assumindo emissão isotrópica) (ABBASI et al., 2022). Este valor é em torno de 18 vezes mais alto do que a luminosidade resultante dos raios gama com energia entre 100 MeV e 100 GeV observados pelo Fermi-LAT, $L_\gamma = 1.6 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ e também mais alto do que o limite superior definido pela colaboração MAGIC (ABBASI et al., 2022). Esses resultados reforçam a importância da abordagem multi-mensageira na astrofísica de neutrinos e evidencia como a comparação entre diferentes sinais cósmicos pode revelar características fundamentais das fontes astrofísicas e dos processos que ocorrem em seu interior.

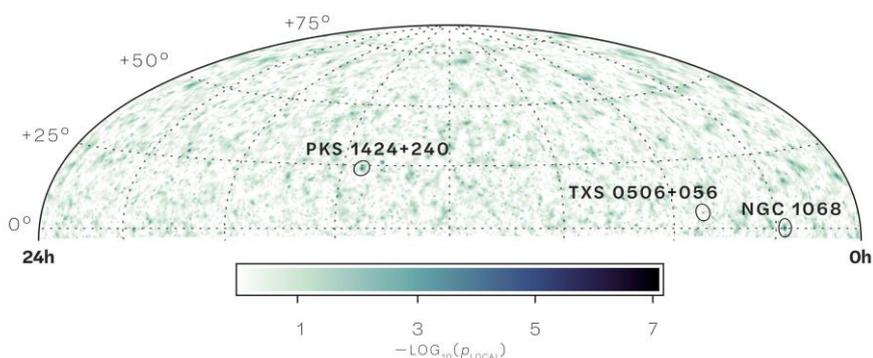


Figura 2: Mapa celeste da varredura de fontes pontuais do Hemisfério Norte. Os círculos pretos indicam os objetos mais significativos da lista de fontes, sendo que o círculo da NGC 1068 coincide com o ponto global com maior densidade de eventos detectados do céu do Norte.

CONCLUSÕES:

O projeto cumpriu com os objetivos de apresentar a aluna a um programa de pesquisa atual e multidisciplinar, cobrindo tópicos em Física de Partículas, Astronomia e Instrumentação e introduziu os métodos e estatísticas utilizados na detecção da NGC 1068. Neste tempo, foi possível abordar interações e propriedades específicas do neutrino, apresentando os cálculos de seções de choque, fundamentais para compreender sua produção em objetos astrofísicos e sua detecção em IceCube. Em uma próxima oportunidade de continuação da pesquisa, pretendemos dar sequência ao estudo qualitativo sobre as informações coletadas pelo Observatório, para estudar como é feita a reconstrução da energia e da direção de chegada do neutrino. Esse estudo envolverá a análise dos dados do IceCube, utilizando métodos estatísticos como a máxima verossimilhança e a razão de hipótese de probabilidade para compreender como a significância da detecção foi estabelecida. Deverá também ser explorada a relação entre a emissão de neutrinos e outros mensageiros cósmicos, com o propósito de compreender a importância da área de multi-mensageiros cósmicos para a física moderna. O projeto deverá incluir uma revisão bibliográfica sobre as técnicas de reconstrução da direção e energia dos eventos detectados e poderá envolver reprodução numérica de resultados do IceCube, permitindo uma melhor compreensão dos métodos empregados na detecção.

BIBLIOGRAFIA

ABBASI et al., Rasha. **Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068**. Science, 2022.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to elementary particles; 2nd rev. version.** Nova York, Wiley, 2008.

EICHMANN et al., Björn. **Solving the multimessenger puzzle of the AGN-starburst composite galaxy NGC1068.** The Astrophysical Journal, 2022.