

1.05.99 - Física.

## PROCURA DA MATÉRIA ESCURA POR MEIO DA DETECÇÃO DIRETA: TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE EVENTOS

Luis Eduardo F. de M. França<sup>1\*</sup>, Luana Cantarim<sup>1</sup>, Nicolas Moretto Ferreira de Aguiar<sup>1</sup>, Fernando de Almeida Passos<sup>1</sup>, Bruno Basso Manzato<sup>1</sup>, Ricardo Laranjeira Couto Pitta<sup>1</sup>, Nelson Carlin Filho<sup>2</sup>

1. Estudante do Instituto de Física da USP (IFUSP)

2. Professor do IFUSP – Departamento de Física Nuclear/Orientador

### Resumo

O experimento *COSINE-100* utiliza cristais de NaI(Tl) na procura, por meio da detecção direta, de *WIMPs* (*Weakly Interacting Massive Particles*), um dos principais candidatos à matéria escura. Um dos maiores desafios dos experimentos que procuram pela matéria escura através da detecção direta é separar sinais provenientes de diferentes fontes, de forma que seja possível identificar um eventual sinal da matéria escura dentre inúmeros outros relacionados ao fundo. Dessa maneira, é muito importante o estudo e desenvolvimento de técnicas de seleção dos eventos observados no detector. Assim, foram estudadas técnicas de seleção de eventos utilizadas no experimento *COSINE-100* usando um cintilador líquido, cristais de NaI(Tl) e BaF<sub>2</sub> e cintiladores plásticos existentes em nosso laboratório.

**Palavras-chave:** *COSINE-100*; *WIMPs*; Cintiladores.

**Apoio financeiro:** FAPESP.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** USP.

### Introdução

Várias observações astronômicas apontam a existência da matéria escura, como a alta velocidade de rotação de galáxias; a anisotropia da radiação cósmica de fundo e o estudo do efeito de lentes gravitacionais.

Muitos modelos tentam explicar a natureza da matéria escura, sendo os *WIMPs* (*Weakly Interacting Massive Particles*) um dos candidatos mais aceitos pelos cientistas.

Uma das maneiras de detectar a matéria escura é através da detecção direta, a qual consiste na observação da interação entre partículas de matéria ordinária e de matéria escura, e é foco de estudo deste trabalho.

Alguns modelos sugerem que seja possível detectar os *WIMPs* ao observar uma modulação anual na taxa de eventos ligados à interação do núcleo dos cristais de detectores com os *WIMPs*, a qual seria gerada pelo movimento da Terra em relação ao halo da galáxia<sup>[1]</sup>. O experimento italiano *DAMA/LIBRA*, utilizando cristais de NaI(Tl), obteve resultados positivos para a modulação anual de eventos, contradizendo resultados negativos de outros experimentos. Entretanto, em nenhum destes demais experimentos foram utilizados os mesmos materiais e métodos empregados no *DAMA/LIBRA*. Essa controvérsia é a principal motivação para a construção do experimento sul-coreano *COSINE-100*, que procura assemelhar-se o máximo possível ao *DAMA/LIBRA*.

O experimento *COSINE-100* consiste de 106 kg de cristais de NaI(Tl), imersos em 2200 l de cintilador líquido, que por sua vez, é cercado por uma camada de cobre, uma de chumbo e uma de cintiladores plásticos<sup>[2]</sup>.

Nos experimentos relacionados à detecção direta de matéria escura é imprescindível o conhecimento da radiação de fundo, tanto interna aos detectores utilizados, como do ambiente, já que sinais provenientes do fundo poderiam ser confundidos com sinais gerados por *WIMPs* na escala energética de interesse (abaixo de 30 keV)<sup>[3]</sup>. Assim, é importante o desenvolvimento de técnicas cujo objetivo é separar os sinais gerados nos detectores devidos aos recuos nucleares (possivelmente gerados por *WIMPs*) dos sinais devidos aos recuos eletrônicos (em geral, gerados pelo fundo).

O objetivo deste trabalho foi analisar técnicas de seleção de eventos utilizadas no experimento *COSINE-100* por meio de cintiladores plásticos, um cintilador líquido e cristais de NaI(Tl) e BaF<sub>2</sub>.

### Metodologia

Inicialmente, com o objetivo de detectar os múons provenientes de raios cósmicos e separá-los dos eventos relacionados ao fundo, foram tomados espectros em energia da radiação de fundo, utilizando-se dois cintiladores plásticos existentes em nosso laboratório. Os cintiladores plásticos foram separados por uma distância de aproximadamente 30 cm, e então, como critério de seleção de eventos, foram medidos apenas os eventos coincidentes em ambos os cintiladores, utilizando um módulo lógico. Dessa maneira, foram selecionadas apenas partículas que atravessaram a região dos detectores, cruzando, necessariamente, os dois cintiladores plásticos. A Figura 1 abaixo mostra um esquema do arranjo experimental utilizado.

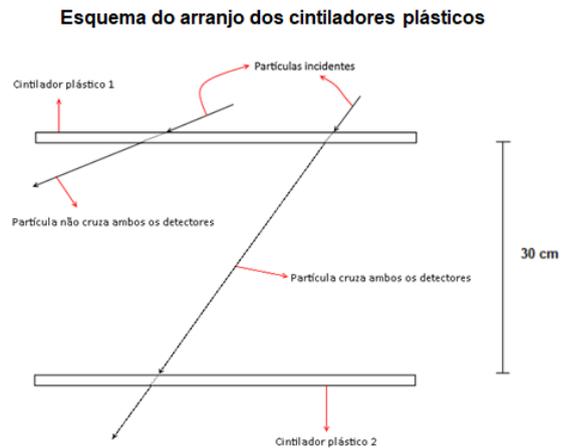


Figura 1: Esquema do arranjo experimental dos cintiladores plásticos utilizados.

Em seguida, com o objetivo de separar eventos relacionados aos recuos eletrônicos de eventos gerados por recuos nucleares, foram obtidos espectros bidimensionais em energia de uma fonte de nêutrons de AmBe e da radiação de fundo, utilizando um cristal de BaF<sub>2</sub> e um cintilador líquido. Foi, então, aplicada uma técnica de PSD (*Pulse Shape Discrimination*) para separar recuos nucleares de recuos eletrônicos, a qual consiste na análise das componentes rápida e lenta dos sinais dos cintiladores.

Por fim, utilizando-se um cristal de NaI(Tl), foi calculada a energia e a assimetria dos sinais da radiação de fundo, com o objetivo de diferenciar eventos provenientes de ruídos das fotomultiplicadoras de eventos gerados por cintilações. Foi feito, então, um gráfico da energia dos sinais em função de suas assimetrias.

## Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra os espectros em energia unidimensionais da radiação de fundo obtidos para cada um dos cintiladores plásticos, assim como um espectro bidimensional cujo eixo y é referente ao sinal do cintilador 1 e o eixo x é referente ao sinal do cintilador 2.



Figura 2: Espectros em energia para o cintilador 1 (esquerda), para o cintilador 2 (centro) e espectro bidimensional relacionado aos sinais de ambos cintiladores (direita).

Pode-se identificar, nos espectros unidimensionais, um vale relacionado à energia mínima de ionização que o múon deve depositar no detector para que seja detectado no cintilador plástico utilizado (cerca de 2 MeV, já que os cintiladores utilizados possuem 1 cm de espessura<sup>[4][5]</sup>). Assim, é possível inferir que os eventos localizados antes do vale são, majoritariamente, devidos à radiação gama e ao ruído; bem como os eventos localizados após o vale são, em maioria, devidos aos múons. Esse fenômeno pode ser visualizado no espectro bidimensional por uma separação entre eventos mais próximos aos eixos do espectro (predominantemente radiação gama e ruído) e eventos localizados mais ao centro do espectro (predominantemente múons).

É importante ressaltar que a grande taxa de eventos da radiação gama de fundo ofusca o número de contagens relacionadas aos múons no espectro bidimensional, dificultando a visualização da separação entre os raios gama e os múons.

A Figura 3 exibe os espectros bidimensionais obtidos com o cintilador líquido para a radiação de fundo (esquerda) e para a fonte de nêutrons de AmBe (direita). Os eixos x dos espectros são proporcionais à carga referente à componente lenta dos sinais, enquanto os eixos y são proporcionais à componente rápida dos sinais.

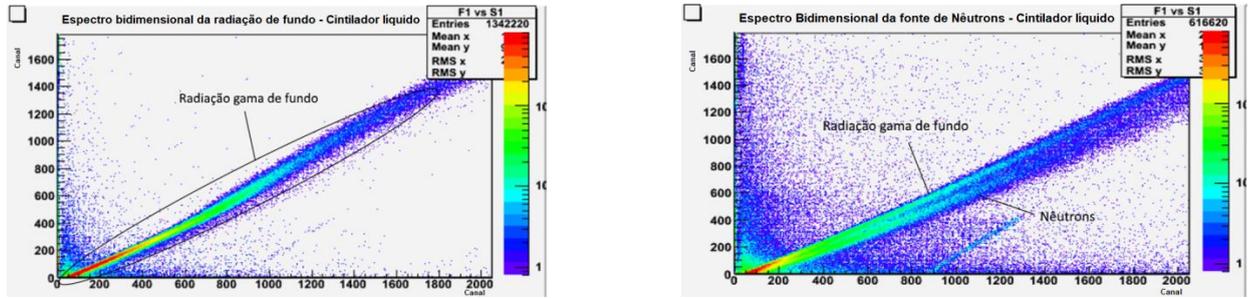


Figura 3: Espectros bidimensionais da radiação de fundo (esquerda) e da fonte de nêutrons de AmBe (direita) obtidos com o cintilador líquido.

É possível identificar, no espectro da fonte de AmBe, duas retas com inclinações diferentes. Sabendo-se que sinais provenientes de recuos nucleares possuem uma componente lenta com maior amplitude que sinais provenientes de recuos de elétrons, ao comparar ambos os espectros, pode-se afirmar que a reta com menor inclinação está relacionada aos recuos nucleares (resultantes de interações com nêutrons), e a reta com maior inclinação está relacionada aos recuos de elétrons (resultantes de interações com a radiação gama).

A Figura 4 apresenta os espectros bidimensionais obtidos com o cristal de BaF<sub>2</sub> para a radiação de fundo (esquerda) e para a fonte de nêutrons de AmBe (direita).

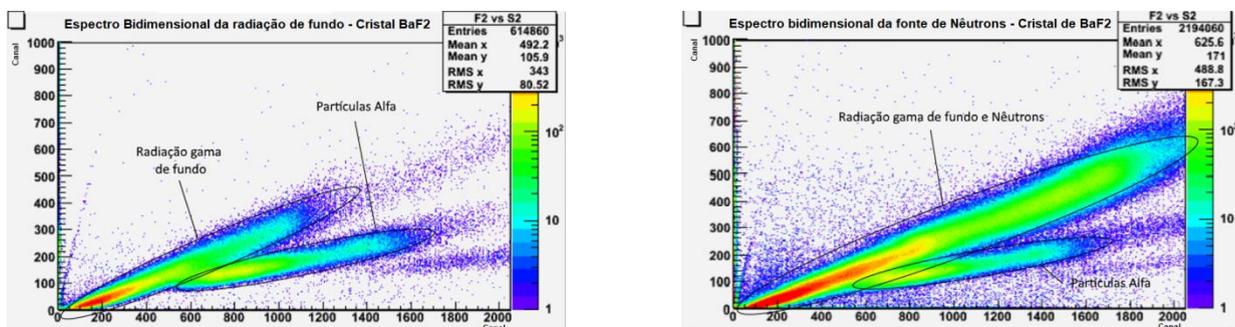


Figura 4: Espectros bidimensionais da radiação de fundo (esquerda) e da fonte de nêutrons de AmBe (direita) obtidos com o cristal de BaF<sub>2</sub>.

A partir dos resultados obtidos com a fonte de AmBe, utilizando o cristal de BaF<sub>2</sub>, percebe-se que não é possível distinguir a reta relacionada a sinais provenientes de interações nucleares da reta relacionada a sinais provenientes de interações com elétrons. Além disso, é possível identificar uma segunda reta com inclinação menor em ambos os espectros.

Sabe-se que átomos de <sup>226</sup>Ra estão presentes como impureza no cristal de BaF<sub>2</sub><sup>[6]</sup>. Assim, como os átomos de <sup>226</sup>Ra emitem partículas alfa, e sabendo-se que sinais provenientes de interações do detector com partículas alfa possuem uma componente lenta com maior amplitude que sinais provenientes de interações com nêutrons ou radiação gama, pode-se inferir que a reta com menor inclinação está relacionada às interações com as partículas alfa oriundas das impurezas de <sup>226</sup>Ra do cristal de BaF<sub>2</sub>.

A Figura 5 mostra o gráfico de energia em função da assimetria dos sinais da radiação de fundo tomados com o cristal de NaI(Tl). Espera-se que, devido ao comprimento do cristal de NaI(Tl) utilizado, as assimetrias dos sinais relacionados a cintilações devam possuir um valor mínimo e máximo iguais a -0.147 e 0.147, respectivamente.

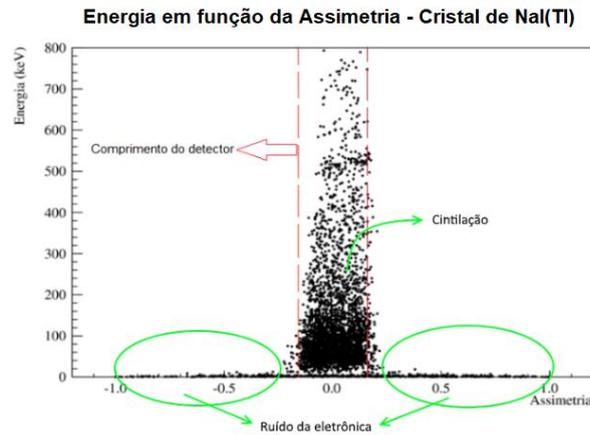


Figura 5: Gráfico da energia em função da assimetria dos sinais referentes à radiação de fundo, detectados com o cristal de NaI(Tl). As linhas tracejadas em vermelho estão relacionadas aos valores mínimo e máximo teóricos da assimetria, delimitados pelo comprimento do detector utilizado.

É possível observar que boa parte dos eventos está localizada na região delimitada pelo comprimento do detector, assim como há eventos de baixas energias localizados além da região delimitada. A partir disso, pode-se inferir que a maior parte dos eventos localizados próximo ao centro do histograma é referente a cintilações do detector, e eventos de baixas energias com valores de assimetria menores que -0.147 e maiores que 0.147 são relativos a ruídos da eletrônica.

Também pode-se perceber que os eventos provenientes de cintilações parecem deslocar-se levemente para a direita, especialmente para energias mais altas. Isso ocorre, pois pequenos erros na calibração das fotomultiplicadoras podem causar o deslocamento dos eventos, assim como observado. Outro fator que pode causar esse efeito é o fato do coeficiente de atenuação do cristal não ser constante em todo cintilador, devido a impurezas e imperfeições do detector.

## Conclusões

Conseguiu-se detectar múons provenientes de raios cósmicos, assim como separar os eventos relacionados à radiação gama dos relacionados aos múons, utilizando dois cintiladores plásticos.

Também foi possível, utilizando o cintilador líquido, separar sinais oriundos de recuos nucleares de sinais oriundos de recuos de elétrons. Entretanto, com o cintilador de BaF<sub>2</sub>, não se conseguiu realizar tal separação. Esse resultado pode ser explicado pela maior sensibilidade do cintilador líquido aos nêutrons, já que sua grande concentração de átomos de hidrogênio faz com que os nêutrons deixem mais energia em suas colisões, devido ao valor de massa semelhante entre o átomo de hidrogênio e o nêutron<sup>[7]</sup>.

Por fim, a partir da análise da assimetria do cristal de NaI(Tl), foi possível separar eventos relacionados a ruídos da eletrônica utilizada dos eventos referentes a cintilações no detector. Percebeu-se que havia pequenos erros na calibração das fotomultiplicadoras, e que o coeficiente de atenuação não é o mesmo para toda extensão do cintilador.

De maneira geral, as técnicas de seleção de eventos utilizadas no experimento *COSINE-100* funcionaram bem para os detectores presentes em nosso laboratório.

## Referências bibliográficas

- [1] R. J. Gaitskell, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 54:315–59 (2004).
- [2] G. Adhikari et al., *Eur. Phys. J. C* 78:107 (2018).
- [3] L. Baudis, *Physics of the Dark Universe* 1:94-108 (2012).
- [4] H. Prihadi et al., *JINST* 13 T02007 (2018).
- [5] <http://pdg.lbl.gov/2015/AtomicNuclearProperties/HTML/polyvinyltoluene.html> (09/04/2018).
- [6] R. Beyer et al., *A DAQ Scheme for BaF<sub>2</sub> Detectors*.
- [7] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement". 3.ed. John Wiley & Sons, p. 816 (2010).