



Estudo e Caracterização de PMT's (Photomultiplier Tubes)

Palavras-Chave: Tubos Fotomultiplicadores; Detectores; Neutrinos.

Autores:

Stefany P. Carvalho (aluna), IFGW, UNICAMP - stefanyc@ifi.unicamp.br

Prof. Dr. Ernesto Kemp (orientador), IFGW, UNICAMP - kemp@unicamp.br

Me. Bruno P. Gelli (coorientador), IFGW, UNICAMP - gelli@ifi.unicamp.br

INTRODUÇÃO

Neutrinos, atualmente, são um dos maiores focos da física de partículas, devido ao fato de que sua oscilação evidencia que o modelo padrão de partículas está incompleto. Isto porque o mesmo prevê que neutrinos não devem apresentar massa, contradizendo o resultado experimental, onde sua oscilação implica, necessariamente, a existência de massa. [1]

Para melhor compreender qual a natureza das oscilações do neutrino, melhores medidas devem ser realizadas. Porém, a grande dificuldade em estudar neutrinos está no fato de que esse tipo de partícula, embora muito abundante na natureza (depois dos fótons, é o tipo de partícula elementar mais numerosa do universo), não é de fácil detecção, pois apresenta baixa interação com outros materiais, tendo uma seção de choque muito baixa, e portanto, baixa probabilidade de interação.

Com o intuito de estudar mais a fundo tais partículas, detectores altamente especializados tiveram de ser desenvolvidos. Este é o caso da LArTPC (Liquid Argon Time Projection Chamber), demonstrada na figura 1, uma combinação de detectores tipo TPC, que utiliza um volume de gás imerso em um campo elétrico intenso, para realizar uma reconstrução tridimensional da trajetória de uma partícula; com o argônio líquido no lugar de gás. [2]

A escolha do argônio líquido como meio sensível foi feita a partir das vantagens quando

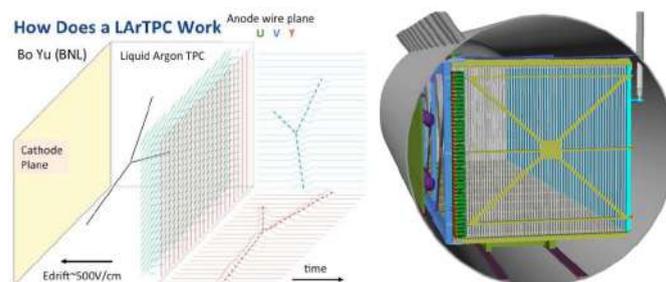


Figura 1: Esboço do funcionamento de uma LArTPC.

o objetivo é detectar neutrinos, tais como: permitir a construção de um grande volume ativo, por ser um elemento nobre e, conseqüentemente, não reabsorver os elétrons produzidos na ionização; ser bastante denso, aumentando a probabilidade de interação com neutrinos, item fundamental para obtermos uma alta taxa de detecção; entre outros, como o custo e facilidade de obtenção na forma empobrecida de isótopos radioativos. Quando um neutrino interage com um átomo de argônio, além do processo de ionização através do qual um elétron é liberado, ocorre também o processo de cintilação, responsável por emitir fótons que serão detectados por fotodetectores posicionados nas extremidades do volume ativo.

Uma fotomultiplicadora (em inglês: *photomultiplier* - PMT), presente na figura 2, é uma excelente candidata para realizar tal detecção. Visto que esses dispositivos multiplicam a corrente produzida pela luz

incidente em até 100 milhões de vezes, em vários estágios de dinodos, permitindo, por exemplo, que fótons individuais sejam detectados mesmo quando o fluxo de luz incidente é baixo. [3] Além disso, o material que compõe o fotocátodo desses dispositivos fornece uma frequência de corte para o experimento, indo de NaCl (150.0 nm) até Ag (1100.0 nm), o que permite seletar os fótons de interesse. [4]



Figura 2: Fotografia de uma fotomultiplicadora.

Neste trabalho, iremos nos dedicar ao estudo do modo de operação e caracterização da tensão de trabalho, um dos parâmetros essenciais para o bom funcionamento deste tipo de fotodetector, presente no Laboratório de Detectores de Partículas (LADEP) - UNICAMP, com o intuito de futuramente utilizá-lo em experimentos de detecção de neutrinos.

METODOLOGIA

Modo de Funcionamento de uma PMT

Uma fotomultiplicadora é um tipo de fotodetector que converte sinais luminosos, geralmente muito fracos, em sinais elétricos com uma intensidade adequada para serem processados em sistemas de contagem ou espectroscopia.

Esses dispositivos podem ter várias formas, mas todos possuem a mesma estrutura básica. Conforme ilustrado na figura 3, eles são compostos por um fotocátodo, um coletor de fotoelétrons (localizado entre o fotocátodo e o primeiro estágio de multiplicação), uma seção de multiplicação de elétrons em vários estágios (conhecidos como dinodos) e um anodo para coletar a carga amplificada.

Quando um fóton atinge o fotocátodo da PMT, o efeito fotoelétrico [5] faz com que ele

remova um elétron do material. Esse elétron é acelerado devido à diferença de potencial presente no interior do dispositivo e é direcionado para o primeiro dinodo. Cada dinodo funciona como um multiplicador: o elétron que sai do estágio anterior é acelerado pelo próximo dinodo, ganha energia e, ao colidir com a superfície do dinodo, arranca um número maior de elétrons. Esses elétrons são atraídos e acelerados para o próximo estágio, e assim por diante. Um conjunto típico de dinodos pode atingir uma multiplicação de um fator de 10^5 a 10^6 , resultando na produção de 10^7 a 10^9 elétrons. Essa quantidade de carga é suficiente para gerar um pulso de tensão quando coletada no anodo da fotomultiplicadora. Esse fenômeno de multiplicação de elétrons pelos dinodos também é conhecido como emissão secundária.

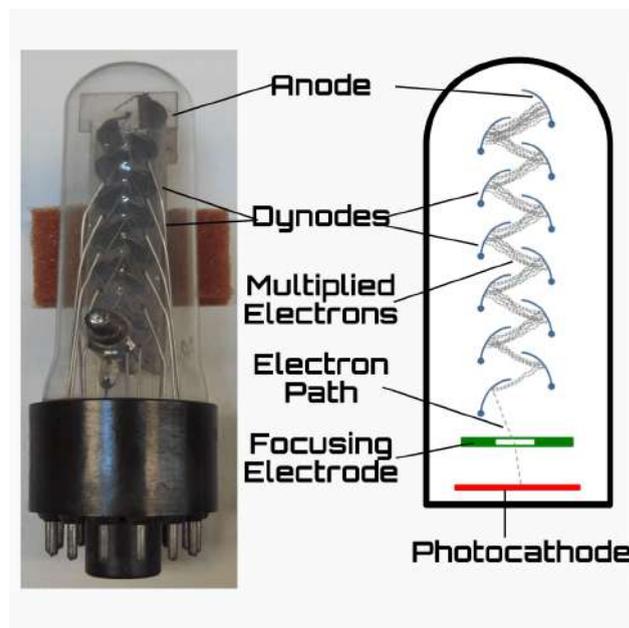


Figura 3: Principais componentes de uma fotomultiplicadora.

O tempo necessário para a fotoemissão no fotocátodo ou para emissão secundária nos dinodos é muito pequeno (cerca de 0.1 ns), e as características de tempo de tubos fotomultiplicadores dependem exclusivamente da trajetória dos elétrons. O tempo de trânsito do elétron em um tubo fotomultiplicador varia de 20 a 80 ns, e é definido como a média da diferença de tempo entre a chegada de um fóton no fotocátodo e a coleta dos elétrons no anodo. Em muitas aplicações esta grandeza

não é um problema pois ela apenas adiciona um atraso constante no sinal. Por outro lado, a dispersão no tempo de trânsito é uma grandeza de maior importância, pois determina a duração do pulso dos elétrons que chegam ao anodo.

Normalmente, as fontes de ruído mais significativas em uma fotomultiplicadora são os elétrons termiônicos emitidos espontaneamente pelo fotocátodo. O pulso gerado nesse processo corresponde a um único fotoelétron, resultando em uma amplitude limitada ao nível mais baixo da escala. Como a maioria das contagens de cintilação é realizada em condições em que o pulso cintilante corresponde a vários fotoelétrons, o ruído térmico pode ser eliminado em grande parte discriminando-se as amplitudes dos pulsos. Em aplicações em que são medidos níveis extremamente baixos de energia ou quando é detectado um único fóton, o sinal real corresponde ao sinal de um fotoelétron, tornando-se indistinguível do ruído térmico. Nesse caso, é importante reduzir o ruído térmico ao máximo, selecionando um tubo com o menor diâmetro possível para a aplicação.

Por fim, é válido ressaltar que uma fotomultiplicadora, assim como qualquer outro fotodetector, deve ser mantida em ambiente escuro quando está ativa em seu modo de detecção. Isso porque a exposição do tubo à iluminação ambiente enquanto estiver alimentado eletricamente pode gerar correntes que excedem seus limites, podendo danificá-lo.

Tensão de Trabalho de uma PMT

A tensão de trabalho de um tubo fotomultiplicador não é a tensão para qual o seu ganho é máximo, mas sim aquela para a qual o dispositivo tem menor susceptibilidade a variações de tensão, logo uma taxa de contagem relativamente constante e, conseqüentemente, um modo de detecção mais confiável.

O valor dessa tensão é determinado através de um gráfico típico de uma pmt, demonstrado na figura 4, do número de contagens de pulsos luminosos registrados conforme o valor de tensão em que ela está ligada. A região circulada representa o platô da

curva, onde o sinal se estabiliza e depois volta a subir. A tensão de trabalho corresponde ao primeiro valor de tensão dessa parte reta do gráfico.

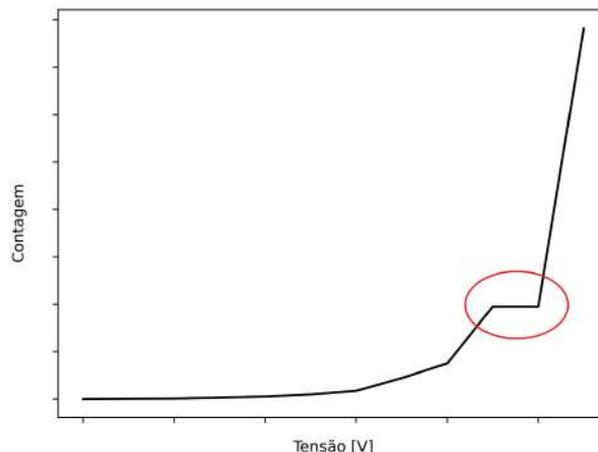


Figura 4: Curva característica de uma fotomultiplicadora - Tensão vs Contagem.

Para mensurar a contagem de fótons realizada pela PMT vamos utilizar um aparato experimental conhecido como “telescópio de partículas”, que consiste em duas fotomultiplicadoras (já caracterizadas e com tensões de trabalho conhecidas) ensanduichando o dispositivo que se pretende caracterizar. Tal arranjo garante que o sinal detectado pela fotomultiplicadora de interesse não seja um sinal de ruído, visto que para ser contabilizado ele também tem que ser detectado pelas demais. Este método de contagem é funcional porque os fótons são partículas se propagam retilineamente e com a velocidade da luz (3×10^8 m/s), então se ele passa por uma PMT, ele passa simultaneamente pela outras, se elas estiverem sobrepostas.

O aparato experimental é conectado à um osciloscópio que irá mensurar o sinal da fotomultiplicadora quando ela detectar um fóton - figura 5, e à um módulo NIM (Nuclear Instrumentation Module) - figura 6, composto por um módulo de tensão (responsável por fornecer altas tensões à PMT), um módulo discriminador (que irá separar o sinal detectado do ruído produzido pelo dispositivo), um módulo de coincidência (para unificar sinais detectados simultaneamente por duas ou mais PMT's) e de

um módulo de contagem (que irá registrar o número de pulsos luminosos detectados em um certo intervalo de tempo).

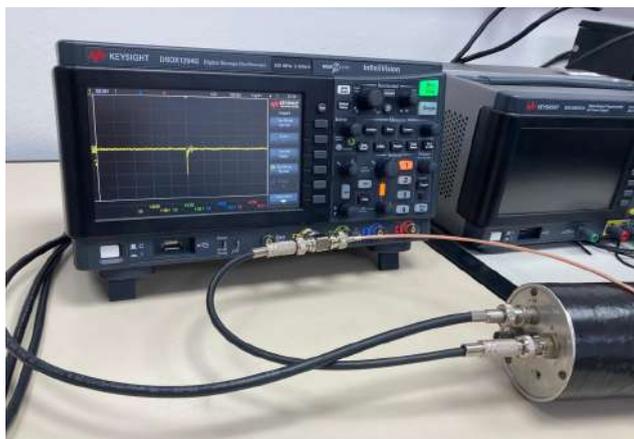


Figura 5: Osciloscópio com sinal característico de uma PMT.

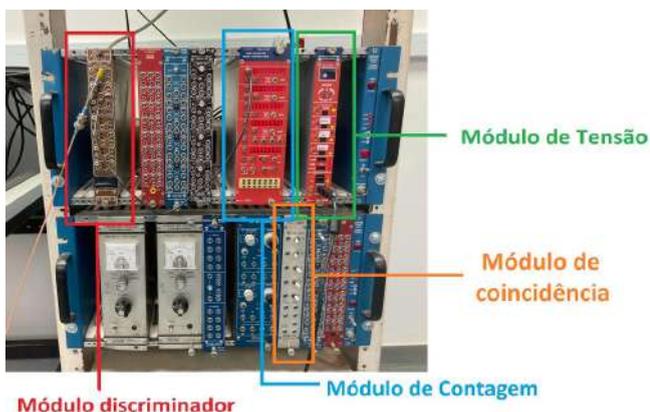


Figura 6: Módulo NIM e seus componentes.

Resumidamente, as PMT's dos extremos serão colocadas em coincidência dupla e, conjuntamente, serão colocadas em coincidência tripla junto à PMT de interesse. Logo, os sinais unificados das coincidências, dupla e tripla, serão enviados para um contador que irá registrar um pulso quando os mesmos forem simultâneos.

Por fim, é válido ressaltar que, durante as medidas, as fotomultiplicadoras foram acopladas em placas cintiladoras, para que as partículas vindas da atmosfera (múons, neutrinos, etc) interagissem com o material e liberassem os fótons que seriam detectados pela PMT. Essa fusão tem o formato de uma raquete, e é completamente privada da luz

ambiente utilizando fita isolante (para não queimar o fotodetector), conforme demonstrado na figura 7.



Figura 7: "Raquete" - Tubo fotomultiplicador acoplado a um material cintilador.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Até o momento da entrega deste resumo, não foi possível obter os resultados desejados sobre o valor da tensão de trabalho das fotomultiplicadoras (PMT's) analisadas, porque os valores de tensão e corrente no dispositivo ainda estão sendo coletados e estudados.

Esse atraso ocorreu porque foi necessária uma mudança no tema do projeto (com a autorização da coordenação do PIBIC), em junho de 2023. Tal modificação se deu porque os detectores que estavam sendo estudados (Silicon Photomultipliers - SiPM's) foram danificados e não havia um prazo definido para o conserto desses fotodetectores, e nem garantia de que o reparo seria bem-sucedido, pois a responsabilidade pela tarefa recairia sobre os membros do próprio grupo.

Até a data de entrega do relatório final (setembro de 2023) e a elaboração do pôster para apresentação no congresso (outubro de 2023), as medidas de tensão e corrente na PMT serão finalizadas e os resultados serão devidamente apresentados.

CONCLUSÃO

Durante a elaboração deste trabalho foi possível estudar e aprender sobre o modo de funcionamento de uma fotomultiplicadora, que é um fotodetector muito usual no ramo de física de partículas e altas energias.

Além disso, a partir do modo de caracterização proposto será possível estimar a tensão de trabalho das PMT's e, assim, tais dispositivos estarão prontos para serem utilizados nos experimentos de detecção de neutrinos de interesse do grupo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Bilenky. Neutrino oscillations: From a historical perspective to the present status. Nuclear Physics. Neutrino Oscillations: Celebrating the Nobel Prize in Physics 2015, pp.2–13., 2016.
- [2] B. Abi et al. “The DUNE Far Detector Interim Design Report, vol. 2: Single-Phase Module”. Em: (2018). arXiv: [1807.10327 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1807.10327).
- [3] William R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, vol.2. Springer-Verlag, 2012.
- [4] C. G. da Silva. Fotomultiplicadores e Superconducting Tunnel Junction (STJ). Instituto de Astronomia e Geociências da Universidade de São Paulo - USP, 2013
- [5] “Efeito Fotoelétrico.” Em: Khan Academy. Acessado: 12-07-2023. URL: <https://pt.khanacademy.org/>.