



## Simulação de Monte Carlo de um novo dispositivo fotodetector.

Palavras chaves: Detector Cherenkov, Raios cósmicos, Fotodetector

Autores:

Jorge Henrique de Andrade Pacheco Reis (Unicamp)  
Prof. Dr. Anderson Campos Fauth (orientador) (Unicamp)

### 1 Introdução

No estudo da Física de Partículas, em particular no seu estudo experimental, sistemas de detecção são peças fundamentais para a sua execução. Há uma necessidade de desenvolver detectores cada vez mais sofisticados e que sejam mais sensíveis para a produção dos pulsos elétricos (a serem medidos) e cada vez mais versáteis.

Muitos experimentos nesta área, que precisam de detectores de partículas com um grande volume sensível, utilizam o efeito Cherenkov na água como princípio físico da detecção. Chamamos esses detectores de *Water-Cherenkov Detectors* (WCD). São utilizados em vários grandes experimentos, como no Observatório Pierre Auger [1] e no projeto LAGO [2] [3].

A maioria dos detectores faz uso de tubos fotomultiplicadores (as *PMTs*) em seu acoplamento, para que possa converter a produção de fótons em elétrons (por meio do efeito-fotoelétrico, para que possa ser medido). Nesse tubo, ocorre ainda o estágio de amplificação do sinal que, a depender da quantidade de estágios e da tensão aplicada na PMT, fornece um ganho  $G \approx 10^7$  sobre o pulso elétrico. Essas peças precisam de fontes de alta-tensão para poder operar plenamente (com tensões da ordem de  $\approx 2kV$ ). Ambos são de difícil fabricação, sendo que não são produzidos no Brasil, mas sim por poucas empresas ao redor do mundo (como a *Hamamatsu* [4], que é a principal fabricante).

#### 1.1 Formulação do C-Arapuca

Atualmente, está em desenvolvimento (com o apoio da FAPESP) um novo dispositivo fotodetector, o qual tem por objetivo ser uma alternativa viável ao uso das *PMTs*. Esse dispositivo é baseado no conceito do X-Arapuca [4] de detecção de fótons de 127nm dos detectores com argônio líquido, mas com uma modificação para que o detector opere em parte da radiação Cherenkov, que é contínua. Daí, esse novo detector é chamado de C-Arapuca.

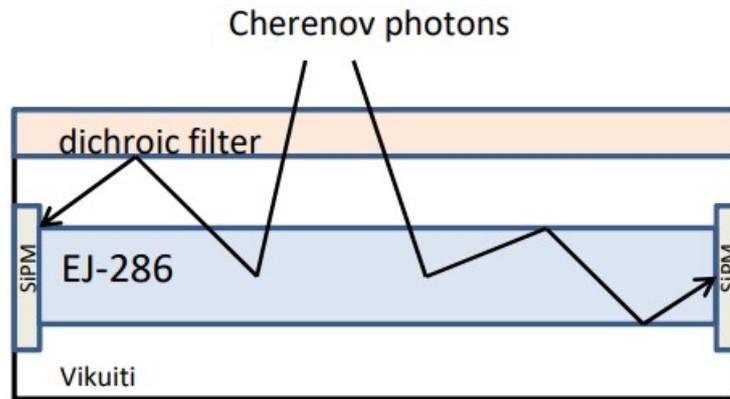
O desenvolvimento do C-Arapuca permitirá a realização de novos experimentos de Astro-partículas, com uma maior eficiência e um custo financeiro menor, além de poder ser produzido no Brasil utilizando predominantemente materiais do mercado nacional.

Este projeto de Iniciação Científica contempla a simulação de Monte Carlo, utilizando as bibliotecas do *Geant4* [5], do dispositivo C-Arapuca, incluindo a sua geometria, filtros ópticos e materiais refletores, sendo muito importante para o bom desenvolvimento desse dispositivo.

### 2 Considerações teóricas e metodologia

#### 2.1 Princípio de funcionamento

O dispositivo C-Arapuca utiliza um filtro óptico dicróico para aprisionar fótons Cherenkov dentro de uma caixa revertida com material refletor e contendo alguns Si-PMs (fotomultiplicadores de silício).

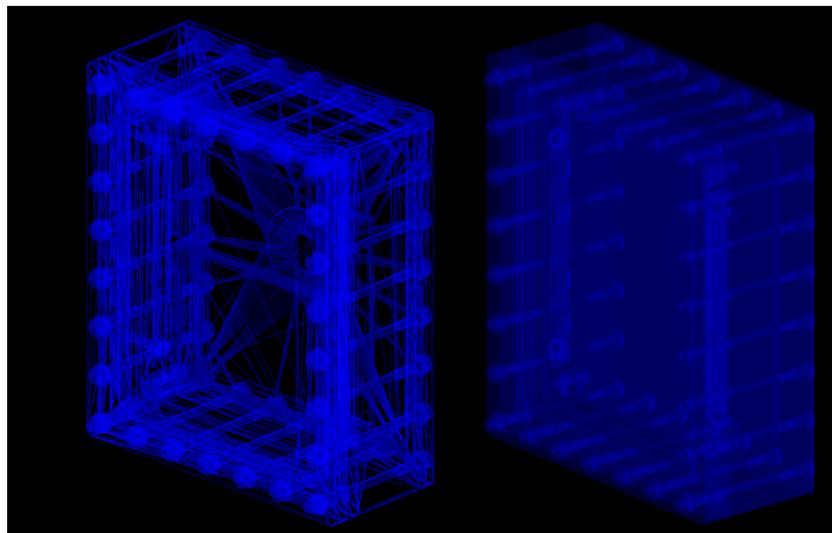


**Figura 1:** Seção transversal do C-ARAPUCA que mostra o seu funcionamento.

Os fótons que entram no C-Arapuca podem ser aprisionados através de três diferentes maneiras, sendo que o mais comum é serem aprisionados pela barra de acrílico. Nessa situação, a barra serve como uma guia de luz. Se o fóton não ficar aprisionado dentro da barra, existe uma probabilidade de que ele atravesse a barra e seja refletido nas paredes internas do C-Arapuca até que seja detectado pela Si-PM. Na Figura 1 vê-se o desenho da seção transversal do C-Arapuca com os seus principais elementos.

## 2.2 Geometria

O módulo C-ARAPUCA atualmente consiste basicamente de uma caixa de aço inoxidável revestida internamente com um material altamente refletivo (no caso, o material utilizado é o *vikuiti*). Na parte mais acima da caixa, temos o filtro dicróico e o guia de luz, com as suas funções anteriormente descritas. Detalhes sobre a geometria do material podem ser encontrados acessando os arquivos CAD dos desenhos no repositório: <https://github.com/jhapreis/carapuca-geant4-simulation/tree/main/data/cad/geometries/assembly>.



**Figura 2:** Diagrama do C-ARAPUCA, feito em CAD e importado para dentro do Geant4.

## 2.3 Detalhamento dos materiais

Esses fótons Cherenkov passarão por um filtro dicróico com comprimento de onda de corte de  $400\text{nm}$ . Os espectros de transmissão e reflexão do filtro dicróico são mostradas na figura 6. Os fótons com comprimento de onda maior do que  $400\text{nm}$  ficarão aprisionados na C-ARAPUCA.

Dentro, os fótons serão levados para o Si-PM pelo guia de luz EJ286 [6], que possui um deslocador de comprimento de onda. Os espectros de absorção e de emissão do guia de luz são mostrados, bem como o espectro de eficiência de detecção de fótons da Si-PM [7] estão na figura 4.

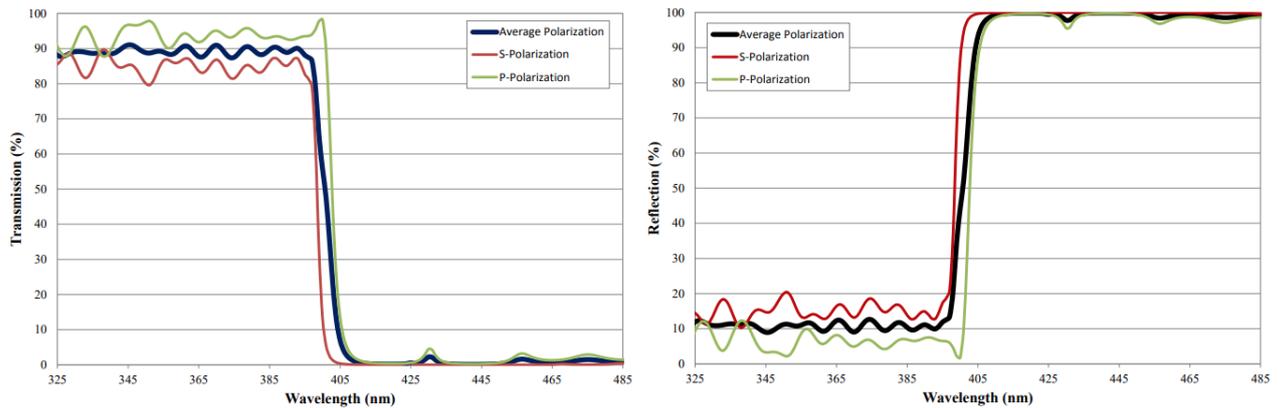


Figura 3: Espectros de transmissão e reflexão dos filtros dicróicos.

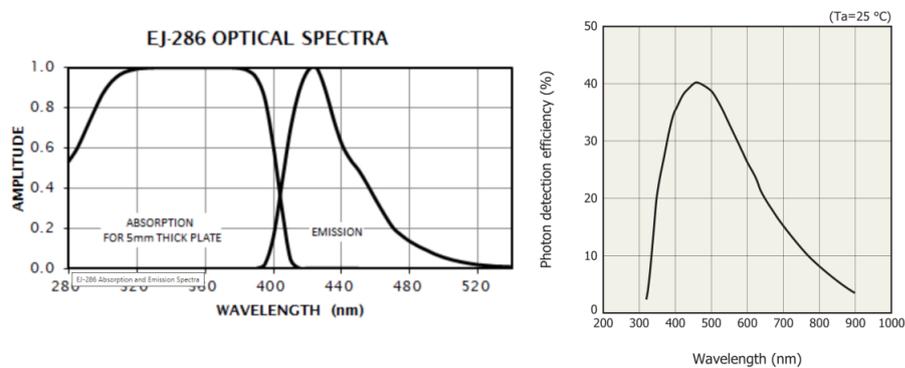


Figura 4: Espectros de absorção e de emissão do guia de luz (na esquerda) e espectro de eficiência de detecção de fótons do Si-PM (na direita).

## 2.4 Utilização do Geant4

Como mencionado anteriormente, as simulações envolvendo o C-ARAPUCA estão sendo desenvolvidas utilizando as bibliotecas do Geant4 e do ROOT [8] (esta para a análise dos dados resultantes das simulações), sendo ambos utilizados em meio de linguagem C++.

Com o Geant4, é possível esquematizar a geometria do detector, definir o meio material, definir as partículas que são alvo do estudo, os níveis de energia, a Física propriamente dita a ser levada em consideração (decaimento, interações eletromagnéticas etc.), a parte sensível e muitos outros parâmetros da simulação. O Geant4 se encarrega de registrar todos os parâmetros relevantes para a simulação, além de contar com uma interface gráfica que permite a visualização dos eventos simulados. O ROOT surge como uma outra ferramenta auxiliar, para armazenamento e análise posterior dos dados resultantes das simulações do Geant4.

## 3 Resultados

A proposta da simulação pode ser dividida em algumas etapas menores, onde cada etapa pode ser entendida individualmente. Após o entendimento de cada etapa, o objeto da simulação pode ser então remontado.

### 3.1 Preparação para a simulação

Antes de começar a realizar as simulações com o Geant4, foi necessário cumprir algumas etapas<sup>1</sup>:

- Instalar uma distribuição do Linux que seja suportada pelo Geant4 (a escolhida foi o Ubuntu 20.04);
- Instalação dos drivers, dependências e bibliotecas gráficas requeridas pelo Geant4;

<sup>1</sup>Para maiores detalhes, visite o guia oficial de instalação em <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/InstallationGuide/html/>.

- 
- Instalação do Geant4 (compilado a partir do código fonte), com suporte à parte gráfica e ao processamento *multithread*;

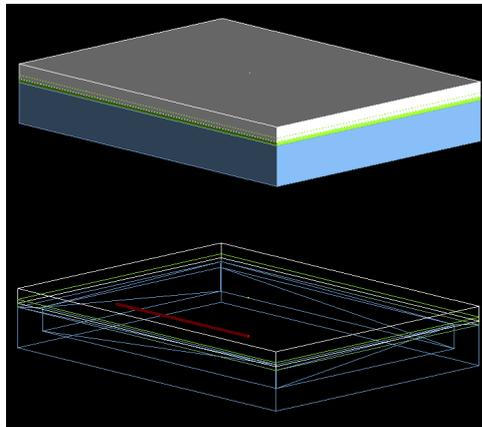
### 3.2 Geometria

Em questão de desenvolvimento de código, o Geant4 oferece uma coleção de métodos e classes para dar suporte à definição da geometria do projeto. Na simulação em questão, a geometria é relativamente, simples, podendo ser resumida a algumas *G4Box* (“caixas” em formato de paralelepípedo), uma sobre a outra.

Na figura [5], podemos ver a representação gráfica da simulação dos componentes, com

- O filtro dicróico
- O guia de luz
- As SiPMs
- O container de aço inoxidável

Cada parte da geometria é definida com as suas dimensões correspondentes e, tão importante quanto, com seus materiais específicos.



**Figura 5:** Exemplificação da construção simplificada do dispositivo. É possível ver cada uma das partes principais do C-Arapuca. De cima para baixo: o filtro dicróico, o guia de luz e o container de aço, conforme a descrição anterior.

### 3.3 Materiais

Após definir as geometrias dos volumes, é necessário definir também os materiais que os compõem. De maneira mais específica, é necessário definir as propriedades dos materiais, para que o Geant4 possa incorporar nas simulações.

Exemplo: ao definir qualquer um dos materiais, precisamos definir os seus índices de refração, espectros de absorção, espectros de emissão, livre caminho médio etc. Ou seja, precisamos definir as propriedades ópticas dos materiais envolvidos.

Essas definições são diferentes para cada valor de comprimento de onda dos fótons (vide como exemplo os gráficos em 4 e 6). Portanto, os valores são transformados em arquivos de texto e, após isso, são incorporados como *arrays* no Geant4, para que, em cada faixa de energia do fóton, o Geant4 possa utilizar o valor correto da propriedade em questão. Para cada material, os valores de suas propriedades estão melhores elencados no repositório: <https://github.com/jhapreis/carapuca-geant4-simulation/tree/main/data/materials>.

### 3.4 Geração

Para a geração de partículas, é necessário levar em consideração diferentes ângulos de incidência para os fótons, assim como diferentes valores para a sua polarização e diferentes valores de energia (de comprimento de onda).

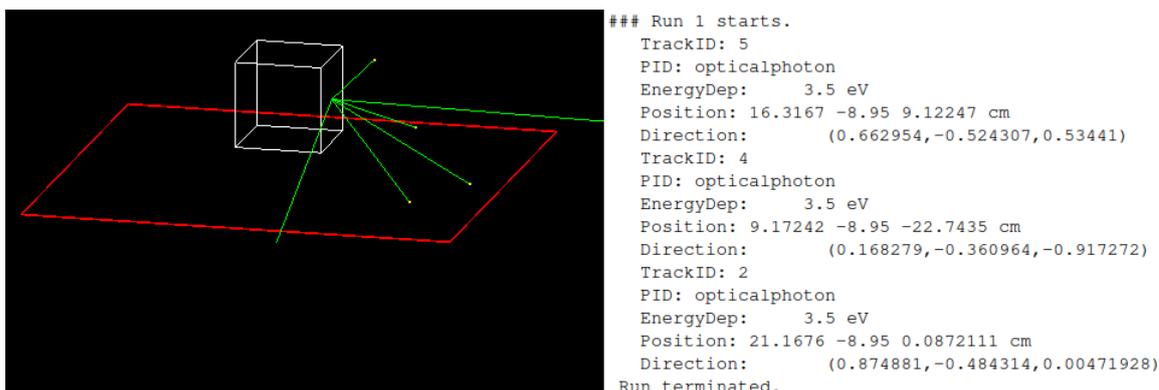
Além disso, a partícula em si a ser utilizada na simulação é o que o Geant4 chama de *optical photon*, que difere da partícula nomeada *gamma*. Isso porque o Geant4 diferencia a partícula para tratar dos fenômenos propriamente ópticos. Dados os parâmetros, o Geant4 se encarrega de acompanhar a energia, a posição etc. daquele evento (bem como das partículas que são geradas a partir dele).

### 3.5 Detecção

Na parte da detecção das partículas, o Geant4 necessita, para implementação via código, que um dos volumes já previamente definidos seja o volume sensível. No nosso caso, o volume sensível seriam as SiPMs.

A solução implementada envolve saber a energia “depositada” dentro de cada SiPM. No caso da nossa simulação, isso significa que um fóton chegou até àquele volume (não que o fóton depositou energia, mas que foi absorvido).

Como resultado, podemos obter a quantidade de fótons que foram de fato absorvidos nas SiPMs. Tendo o número inicial de fótons lançados, podemos ter a eficiência da CARAPUCA.



**Figura 6:** Exemplificação da etapa de detecção dos fótons nas SiPMs. À esquerda, temos a geometria utilizada (um volume refletivo junto com uma placa que simula as SiPMs). À direita, as informações dos fótons que foram absorvidos pelo volume.

## 4 Conclusões

A geometria do dispositivo foi implementada, bem como a parte relativa aos materiais e suas características ópticas, os elementos sensíveis e os demais elementos relativos à simulação.

O trabalho realizado possibilita ao grupo ter uma simulação mais realística dos processos físicos que ocorrem dentro do dispositivo C-Arapuca. A simulação, então, permite uma melhor compreensão dos resultados experimentais que vão ser obtidos na execução agora no segundo semestre de 2023.

Os códigos-fontes desenvolvidos, assim como os dados dos materiais elencados, bem como resultados complementares podem ser acessados no GitHub em <https://github.com/jhapreis/carapuca-geant4-simulation>.

## Referências

- [1] The pierre auger cosmic ray observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 798:172–213, oct 2015.
- [2] Hernán Asorey, S. Dasso, Luis Nunez, and et al. The lago space weather program: Directional geomagnetic effects, background fluence calculations and multi-spectral data analysis. 07 2015.
- [3] Hernan Asorey, Luis A. Núñez, and Mauricio Suárez-Durán. Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain. *Space Weather*, 16(5):461–475, 2018.
- [4] A.A. Machado, E. Segreto, D. Warner, and et al. The x-arapuca: an improvement of the arapuca device. *Journal of Instrumentation*, 13(04):C04026, apr 2018.
- [5] CERN. Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/>. Acessado em julho de 2023.
- [6] Eljen Technology. Ej286. <https://eljentechnology.com/>. Acessado em julho de 2023.
- [7] Eljen Technology. Ej286. [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s13360-2050ve\\_etc\\_kapd1053e.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360-2050ve_etc_kapd1053e.pdf). Acessado em julho de 2023.
- [8] CERN. Root. <https://root.cern/>. Acessado em julho de 2023.