

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

Camila Kamis da Rocha Cardoso

**SIMULAÇÃO DA DETECÇÃO DE MÚONS POR RADIAÇÃO CHERENKOV NO
GEANT4**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Porto Alegre

2021

Camila Kamis da Rocha Cardoso

**SIMULAÇÃO DA DETECÇÃO DE MÚONS POR RADIAÇÃO CHERENKOV NO
GEANT4**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Gil da Silveira

Porto Alegre
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ricardo da Rocha Cardoso e Rossana Cristine Kamis, por todo apoio e carinho durante a minha graduação.

Agradeço aos meus amigos de curso, que estiveram comigo em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Gil da Silveira, pelo apoio, paciência e ensinamentos compartilhados.

RESUMO

Durante o desenvolvimento de um aparato de detecção, é importante testar seu conceito realizando simulações que verifiquem sua eficiência e analisem diferentes geometrias. O trabalho tem como objetivo simular computacionalmente o efeito Cherenkov em determinados materiais, o qual é utilizado para detecção de múons provenientes do chuveiro atmosférico. Pretende-se realizar a simulação de duas propostas de detecção de múons: a primeira utilizando tanque de água e a segunda um cintilador plástico. Serão estudados os melhores parâmetros de construção dos detectores e os sinais dos fótons, variando a geometria do detector e a incidência de partículas. As simulações são feitas utilizando o pacote de ferramentas Geant4.

Palavras-chave: Radiação Cherenkov. Detecção de Múons. Raios Cósmicos. GEANT4.

ABSTRACT

During the development of a detection apparatus, tests of its concept with simulations are important to verify its efficiency and to analyze different geometries. This work aims to computationally simulate the Cherenkov radiation in certain materials, which are used to detect muons coming from the air shower. The simulation of two different proposals of muon detection are performed: the first using a water tank and a second one with a plastic scintillator. The best construction parameters of the detectors and the photon signals will be studied, varying the detector geometry and the direction of the incident particles. The simulations are made using the Geant4 toolkit.

Keywords: Cherenkov Radiation. Muon Detection. Cosmic Rays. GEANT4.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Protótipo do tanque de água do projeto CosmicPampa	2
Figura 2 – Distribuição de energia dos raios cósmicos	4
Figura 3 – Chuveiro Atmosférico	5
Figura 4 – Efeito Cherenkov em reatores nucleares	6
Figura 5 – Radiação Cherenkov	7
Figura 6 – Espectro da radiação Cherenkov na água	8
Figura 7 – Tanque de água do Observatório Cherenkov de Alta Altitude	9
Figura 8 – Efeito Cherenkov no cintilador plástico	10
Figura 9 – Esquema do detector de múons CosmicWatch	11
Figura 10 – Visualização da aplicação do tanque de água no Qt	13
Figura 11 – Tanque de água no GEANT4. À esquerda, o tanque totalmente preenchido com água e à direita, o tanque preenchido com água até 26 cm	16
Figura 12 – Múons (em vermelho) incidindo no detector perpendicularmente à tampa e no centro, gerando fótons Cherenkov (em verde), para o caso do tanque totalmente preenchido com água	16
Figura 13 – Múons (em vermelho) incidindo no detector perpendicularmente à tampa e na borda, gerando fótons Cherenkov (em verde), para o caso do tanque totalmente preenchido com água	17
Figura 14 – Múons (em vermelho) incidindo no detector em um ângulo qualquer em relação à tampa, gerando fótons Cherenkov (em verde), para o caso do tanque totalmente preenchido com água	17
Figura 15 – Mapas de calor para múons incidindo perpendicularmente à tampa e no centro do detector. À esquerda, o tanque totalmente preenchido com água e à direita, o tanque preenchido com água até 26 cm	18
Figura 16 – Mapa de calor para múons incidindo perpendicularmente à tampa e na borda do detector, para o caso do tanque totalmente preenchido	19
Figura 17 – Mapa de calor para múons incidindo em um ângulo qualquer em relação à tampa do detector, para o caso do tanque totalmente preenchido	19
Figura 18 – Cintilador acoplado à SiPM no GEANT4	20
Figura 19 – Múon (em vermelho) incidindo perpendicularmente à face de 100x100 mm do detector e gerando fótons Cherenkov (em verde)	21

Figura 20 – Mapa de calor para o detector cintilador plástico + SiPM para múons incidindo no centro, perpendicular à face de 100x100 mm 22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Raios Cósmicos	4
2.2 Efeito Cherenkov	6
2.3 Detecção de Múons	8
2.3.1 Tanque de Água	9
2.3.2 Cintilador Plástico	10
3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	12
3.1 GEANT4	12
3.2 Tanque de Água no GEANT4	13
3.2.1 Resultados	18
3.3 Cintilador Plástico no GEANT4	20
3.3.1 Resultados	21
4 CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

Na física de partículas, dispositivos são utilizados para detectar partículas ionizantes, tais como as produzidas pela radiação cósmica ou por reações em um acelerador de partículas. É possível medir a energia das partículas e seus atributos, como momentum e carga, determinar seu tipo, além de meramente registrar a sua presença. Com isso, realiza-se estudos em diversas áreas.

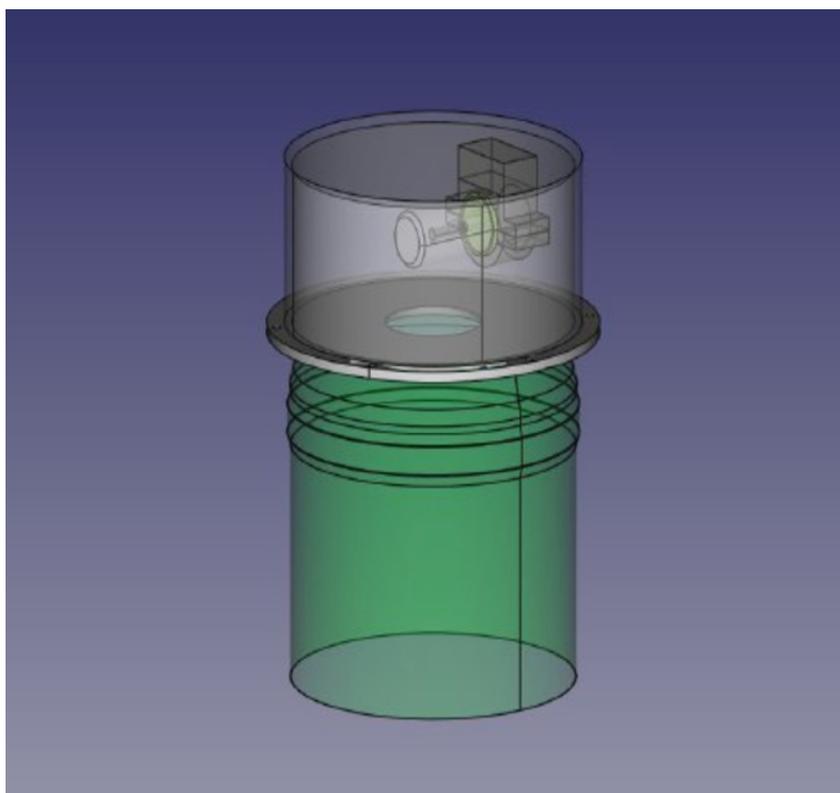
Em particular, a detecção de múons pode ser utilizada para diferentes aplicações. Uma delas é no estudo de raios cósmicos, visto que os múons são parte do chuva atmosférico e podem ser facilmente detectados na superfície terrestre. Detectores de partículas com essa finalidade existem em diversos lugares, sendo o Observatório Pierre Auger, na Argentina, a maior instalação voltada para detecção e estudo de raios cósmicos, no qual é utilizado um sistema de alta tecnologia com tanques de água para detectar múons por radiação Cherenkov. Outra aplicação conhecida da detecção de múons é o detector Solenóide de Múon Compacto (CMS)¹ do Grande Colisor de Hádrons (LHC)², no qual são utilizadas diferentes tecnologias para garantir alta eficiência na determinação da energia e momentum dos múons frente à grande deterioração dos sensores pela radiação. Neste cenário, tanques de água ou cintiladores plásticos não seriam capazes de operar em alta eficiência por muito tempo. O CMS é utilizado para testar o modelo padrão das partículas elementares e também investigar evidências de novas teorias da física.

O Centro de Tecnologia Acadêmica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul está realizando atividades experimentais na área de física de altas energias cujo objetivo é a construção de aparatos de detecção de raios cósmicos empregando *software* e *hardware* livres. O projeto chamado CosmicPampa visa construir um tanque de água para detectar múons por radiação Cherenkov, semelhante ao que é feito no Observatório Pierre Auger, porém em menor escala, como mostra a Figura 1. Futuramente, pretende-se utilizar cintiladores plásticos para a detecção de múons para tornar o detector mais móvel. Portanto, simular a passagem de um múon no interior do tanque e verificar a geração de radiação Cherenkov poderia auxiliar na sua construção de forma mais eficiente.

¹ Do inglês, *Compact Muon Solenoid*.

² Do inglês, *Large Hadron Collider*.

Figura 1 – Protótipo do tanque de água do projeto CosmicPampa.



Fonte: CTA (2021)

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista as diferentes aplicações dos detectores de múons e os tópicos de engenharia envolvidos no desenvolvimento dos mesmos, como eletrônica e programação, o projeto visa fazer a simulação computacional da detecção de múons através da radiação Cherenkov gerada pela interação da partícula com o meio. Este trabalho foi motivado pelas atividades experimentais que estão sendo realizadas no Centro de Tecnologia Acadêmica e poderá servir como material de auxílio na construção dos detectores de raios cósmicos. Os principais objetivos do trabalho estão listados abaixo:

- Realizar a simulação no GEANT4 de um tanque de água, no qual ocorre efeito Cherenkov quando há passagem de múons;
- Realizar testes para verificar a eficiência do detector variando a altura da água, a posição da fotomultiplicadora e os ângulos de incidência dos múons;

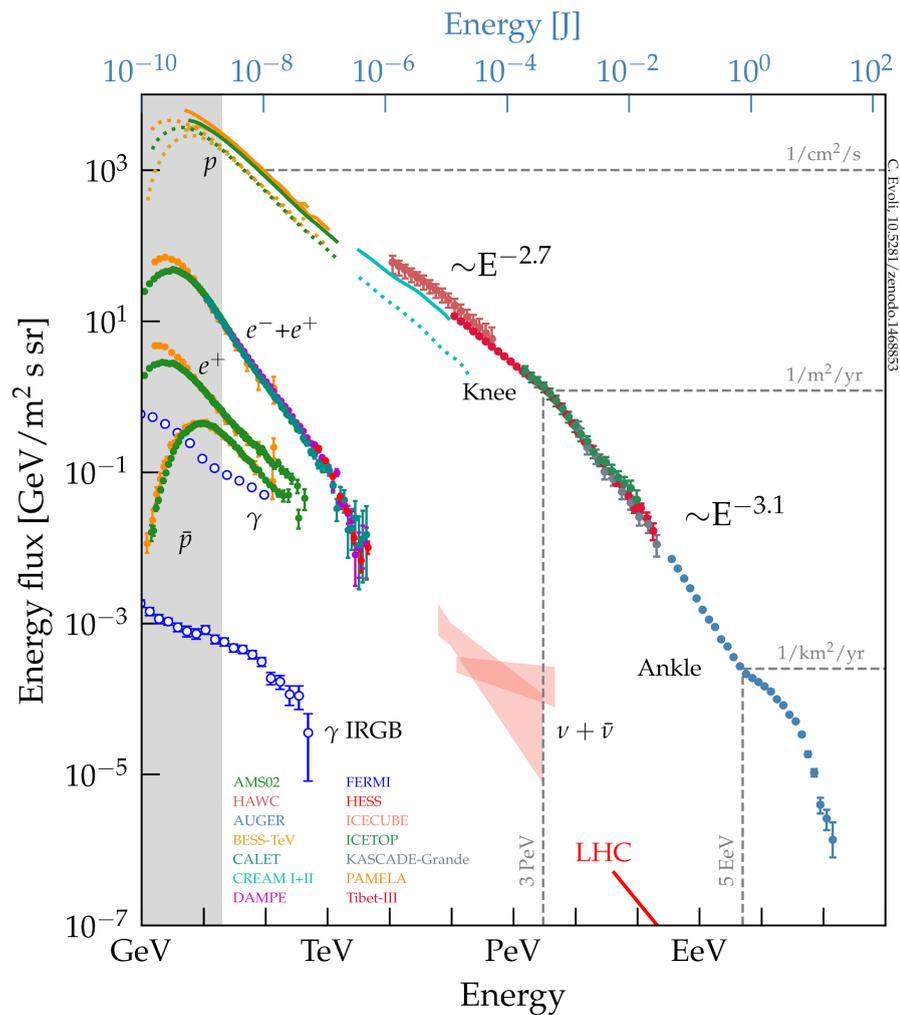
- Avaliar graficamente a produção de fótons e a detecção dos mesmos através de mapas de calor, para verificar a eficiência do detector;
- Realizar a simulação no GEANT4 de um detector mais compacto que consiste em um cintilador plástico acoplado a uma fotomultiplicadora de Silício, no qual ocorre efeito Cherenkov quando o múon atravessa o material;
- Avaliar graficamente a produção de fótons e a detecção dos mesmos através de mapas de calor, variando os ângulos de incidência dos múons, para verificar a eficiência do detector.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RAIOS CÓSMICOS

Raios cósmicos são partículas altamente energéticas, da faixa de 10^9 a 10^{21} eV, que chegam à Terra vindas do espaço. Os raios cósmicos primários são formados em sua maior parte de prótons: estima-se que cerca de 90% são prótons, sendo o restante composto por outros núcleos atômicos e uma pequena porcentagem de elétrons, pósitrons, antiprótons, neutrinos e fótons gama.

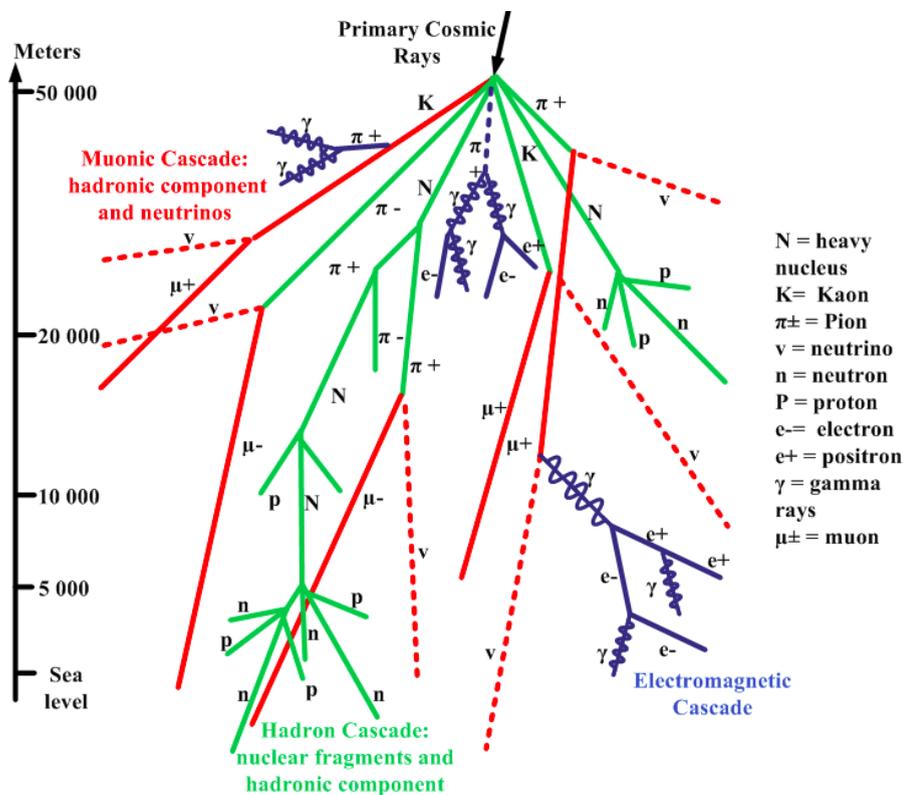
Figura 2 – Distribuição de energia dos raios cósmicos.



Fonte: EVOLI (2018)

Esses raios cósmicos primários que têm origem cósmica e, por viajarem próximos da velocidade da luz, penetram nas altas camadas da atmosfera e chocam-se com os átomos da mesma, a cerca de 10 mil metros acima da superfície, dando origem a uma produção em cascata de partículas menos energéticas, chamadas de raios cósmicos secundários. A nível do mar, chegam, em média, uma partícula por segundo em cada centímetro quadrado. Essa produção de partículas em cascata é denominada chuva atmosférica e está ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Chuveiro Atmosférico.



Fonte: GOMEZ TORO (2014)

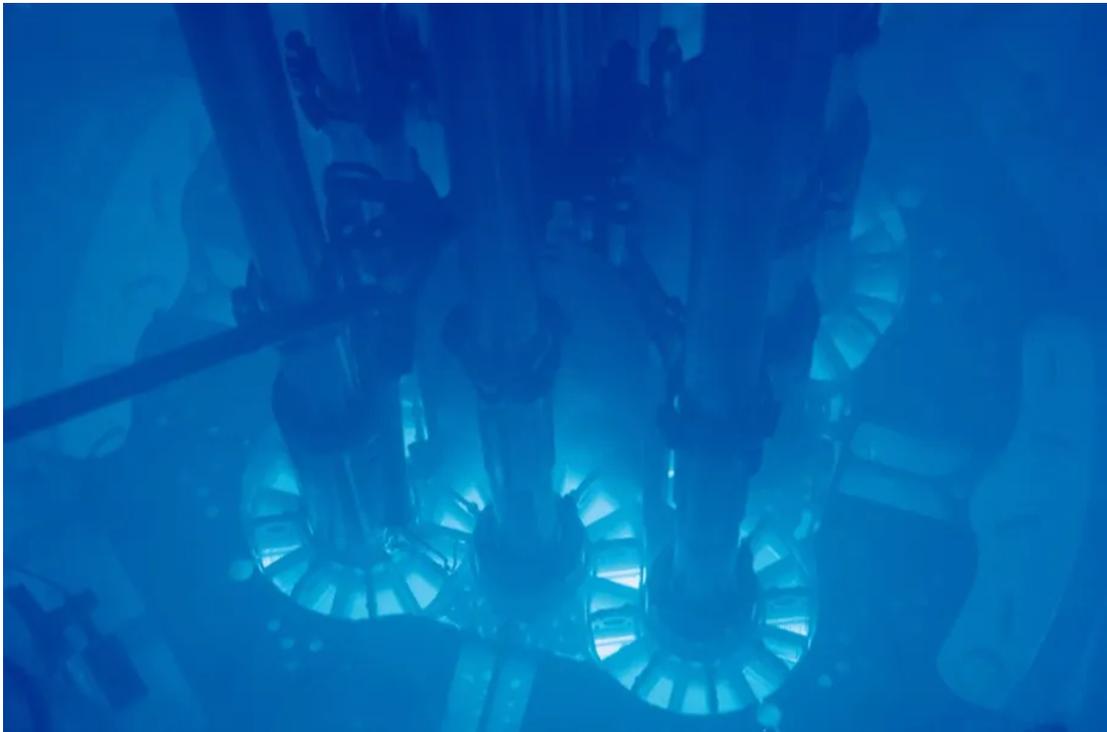
Muitas partículas foram descobertas com a observação dos raios cósmicos, como a descoberta do múon por Carl Anderson em 1936. O múon, partícula de interesse deste trabalho e a parte do chuva atmosférica mais observada a nível do mar, é gerado pelo decaimento dos píons. Os múons são muito parecidos com os elétrons, com carga elétrica $-e$, só que possuem massa cerca de 200 vezes maior ($105.6583715(35) \text{ MeV}/c^2$) e vida média curta ($2.1969811(22) \mu\text{s}$) (TANABASHI, 2018), seu decaimento gera um elétron e dois neutrinos. Devido à sua maior massa, múons não são fortemente acelerados quando se deparam com campos eletromagnéticos e não emitem tanta radiação por *Bremsstrahlung*,

como ocorre com os elétrons. Isso permite que os múons de uma certa energia penetrem mais profundamente na matéria do que os elétrons. O fluxo de múons que chega à superfície terrestre é maior do que o esperado, visto que sua vida média é curta. A detecção de partículas de vida média curta e alta velocidade é explicada pela dilatação relativística do tempo.

2.2 EFEITO CHERENKOV

O efeito Cherenkov ocorre quando uma partícula eletricamente carregada atravessa um meio a uma velocidade superior à da luz neste meio, fazendo com que seja emitida radiação eletromagnética, que pode ser na faixa visível. A luminosidade azul, característica de reatores nucleares, deve-se à radiação Cherenkov, ilustrada na Figura 4. O nome desse efeito é em homenagem ao cientista soviético Pavel Cherenkov, vencedor do Prêmio Nobel de Física de 1958, que primeiro estudou e caracterizou este fenômeno (CHERENKOV, 1934).

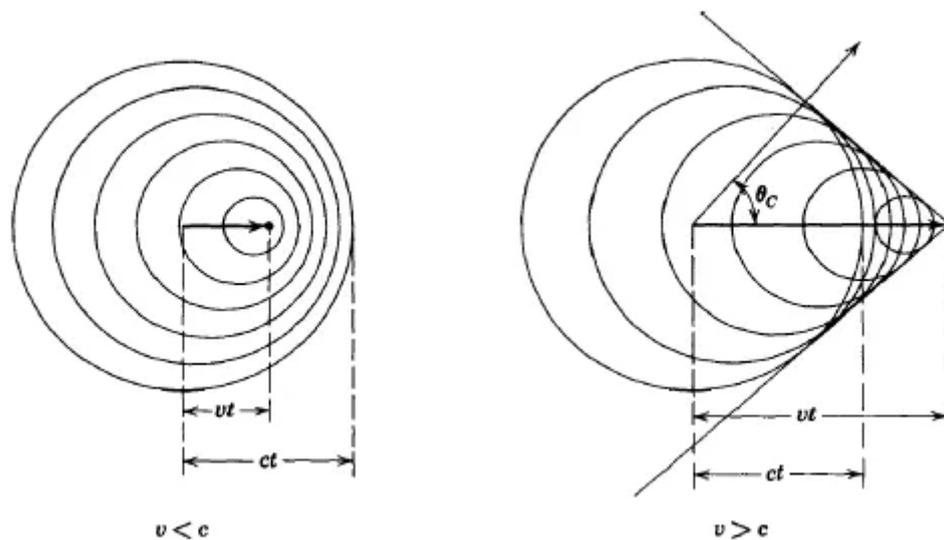
Figura 4 – Efeito Cherenkov em reatores nucleares.



Fonte: ATR (2021)

Quando uma partícula carregada se movimenta em um meio, acaba excitando as moléculas do mesmo. Estas, por sua vez, emitem radiação eletromagnética quando retornam ao seu estado fundamental. As ondas emitidas se espalham de forma esférica e acabam se adicionando quando a velocidade da partícula (v) é maior do que a velocidade da luz (c) no meio, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Radiação Cherenkov.



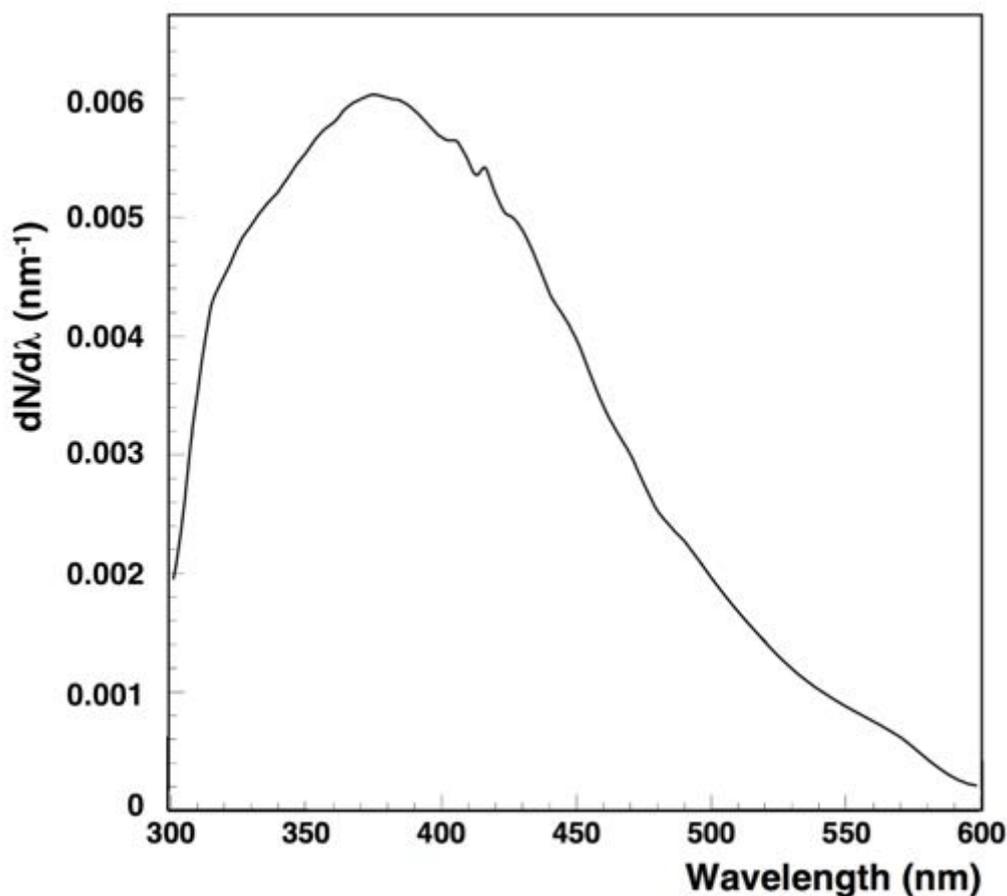
Fonte: JACKSON (1962, Capítulo 14)

- Se a velocidade da partícula for muito inferior à da luz, o campo elétrico da partícula vai distorcer os átomos e polarizar o meio nesta região. Quando a partícula passar para outra região, os átomos voltam à posição anterior. Devido à simetria do campo de polarização ao redor da partícula, não haverá campo resultante e nem radiação emitida.
- Se a velocidade da partícula for próxima à da luz, o campo de polarização não será completamente simétrico, resultando em um campo dipolar e, assim, cada elemento vai irradiar um curto pulso eletromagnético.
- Se a velocidade da partícula é mais alta que a velocidade da luz, nesse caso haverá um campo resultante. A radiação será observada a um ângulo particular com respeito à trajetória da partícula, segundo a Equação 2.1, em que $\beta = v/c$ e n é o índice de refração no meio:

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\beta n} \right) \quad (2.1)$$

A radiação Cherenkov consiste em um espectro contínuo de comprimentos de onda que se estendem da região ultravioleta até a parte visível do espectro, com pico em cerca de 420 nm. Esta radiação possui diversas aplicações, como na medicina, para detectar pequenas concentrações de biomoléculas, em reatores nucleares, nos quais a intensidade dessa radiação está relacionada à frequência dos eventos de fissão, e em experimentos de astrofísica e física de partículas, para detecção de partículas.

Figura 6 – Espectro da radiação Cherenkov na água.



Fonte: FERNANDEZ (2017)

2.3 DETECÇÃO DE MÚONS

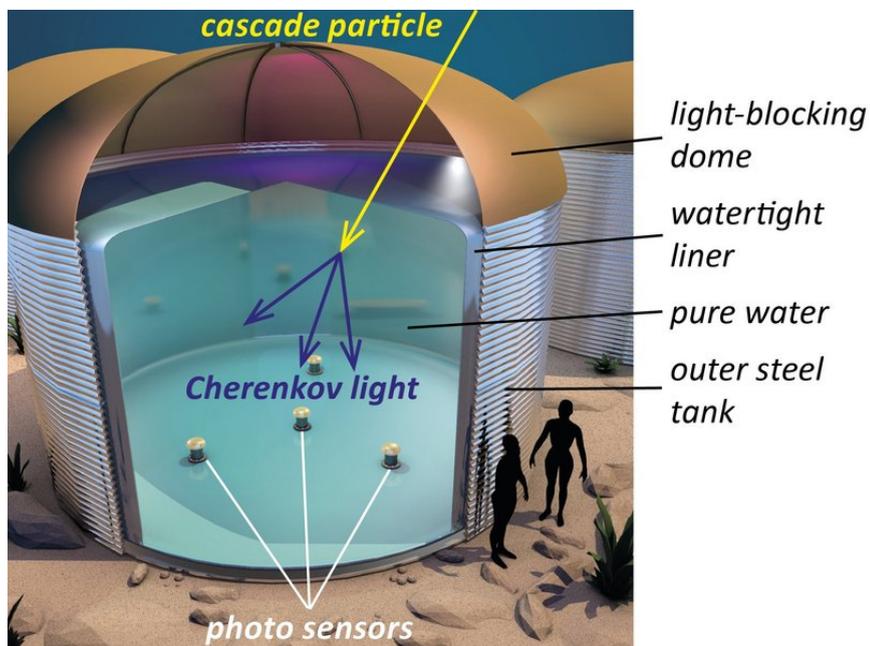
Os múons originados no chuvaire atmosférico podem ser detectados de diferentes formas. Serão explicados os dois tipos de detectores de partículas utilizados neste trabalho: tanque de água e cintilador plástico.

2.3.1 Tanque de Água

Este detector é composto por um cilindro com paredes internas reflexivas e preenchido por água pura para reduzir perdas por espalhamento. A maior parte dos múons que chegam à superfície terrestre possuem uma velocidade muito próxima da velocidade da luz no vácuo, portanto, quando penetram o interior do cilindro com a velocidade superior à da luz na água, geram radiação por efeito Cherenkov.

A radiação emitida é detectada por uma fotomultiplicadora de tubo (PMT)³, que a converte em sinal de corrente, analisado posteriormente por um sistema de aquisição de dados. A PMT possui ampla resposta espectral, indo do ultravioleta até o infravermelho. Como exemplo, o modelo Hamamatsu R446 que será utilizado no detector do Centro de Tecnologia Acadêmica possui resposta espectral de 185 nm a 870 nm. Dessa forma, é possível obter uma variedade de informações a respeito da radiação incidente. Este detector está ilustrado na Figura 6, que corresponde ao esquema do tanque de água do Observatório Cherenkov de Alta Altitude, localizado no México.

Figura 7 – Tanque de água do Observatório Cherenkov de Alta Altitude.



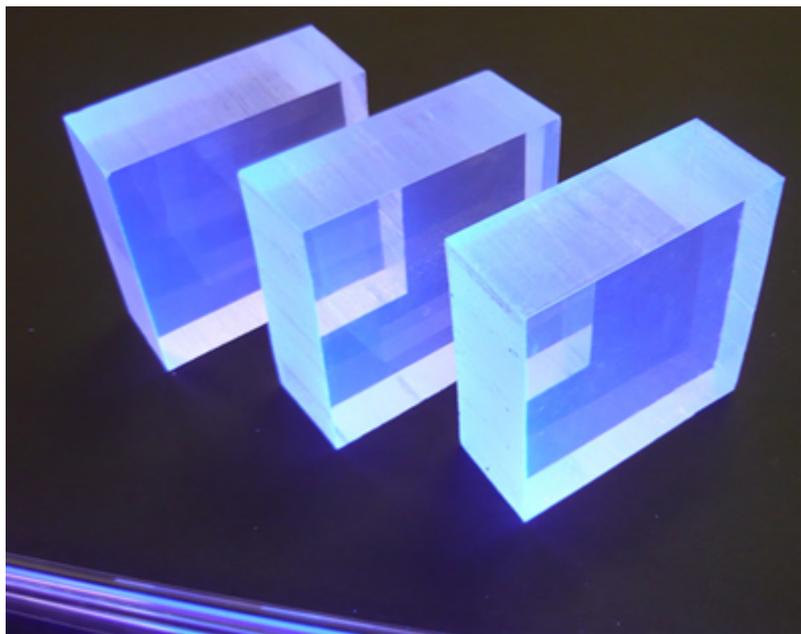
Fonte: HAWC (2021)

³ Do inglês, *Photomultiplier Tube*.

2.3.2 Cintilador Plástico

Este tipo de detector consiste em um material plástico cintilador acoplado a uma fotomultiplicadora de Silício (SiPM)⁴. Os materiais cintiladores, quando atingidos por uma radiação ionizante, como o múon, geram fótons de comprimento de onda no visível ou no ultravioleta próximo, servindo para o processo de detecção. Isto ocorre porque o material absorve parte da energia da partícula incidente pelo mecanismo de excitação atômica, emitindo fótons em número proporcional à energia da partícula incidente. O efeito Cherenkov no cintilador plástico BC412 de PoliVinilTolueno pode ser observado na Figura 7. Um dos fornecedores deste material é a empresa francesa Saint-Gobain, com custo aproximado de 2000 dólares por metro quadrado.

Figura 8 – Efeito Cherenkov no cintilador plástico.



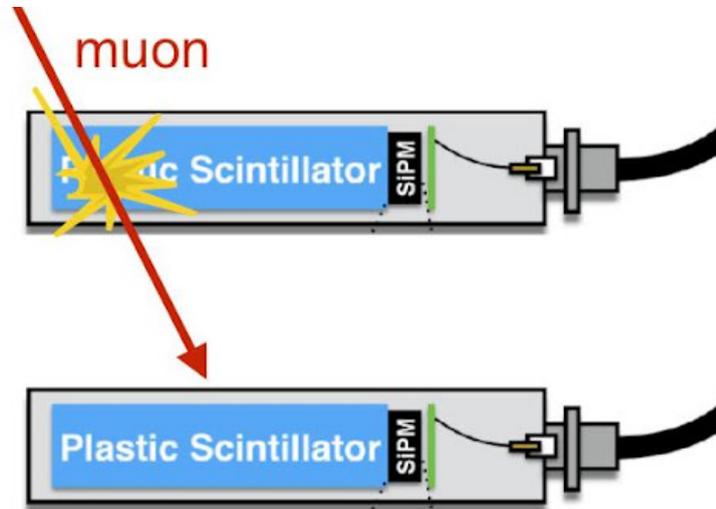
Fonte: HARDHACK (2021)

Os fótons são detectados pela SiPM e convertidos em sinal elétrico, posteriormente analisados por um sistema à parte. Este detector é mais robusto e versátil em relação ao tanque, além de possuir fácil manuseio para aplicações em diferentes experimentos ou equipamentos. Este tipo de detector é ilustrado na Figura 8, que corresponde ao esquema do

⁴ Do inglês, *Silicon Photomultiplier*.

CosmicWatch, um detector de múons portátil desenvolvido no Instituto de Tecnologia de Massachusetts.

Figura 9 – Esquema do detector de múons CosmicWatch.



Fonte: COSMICWATCH (2021)

3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

3.1 GEANT4

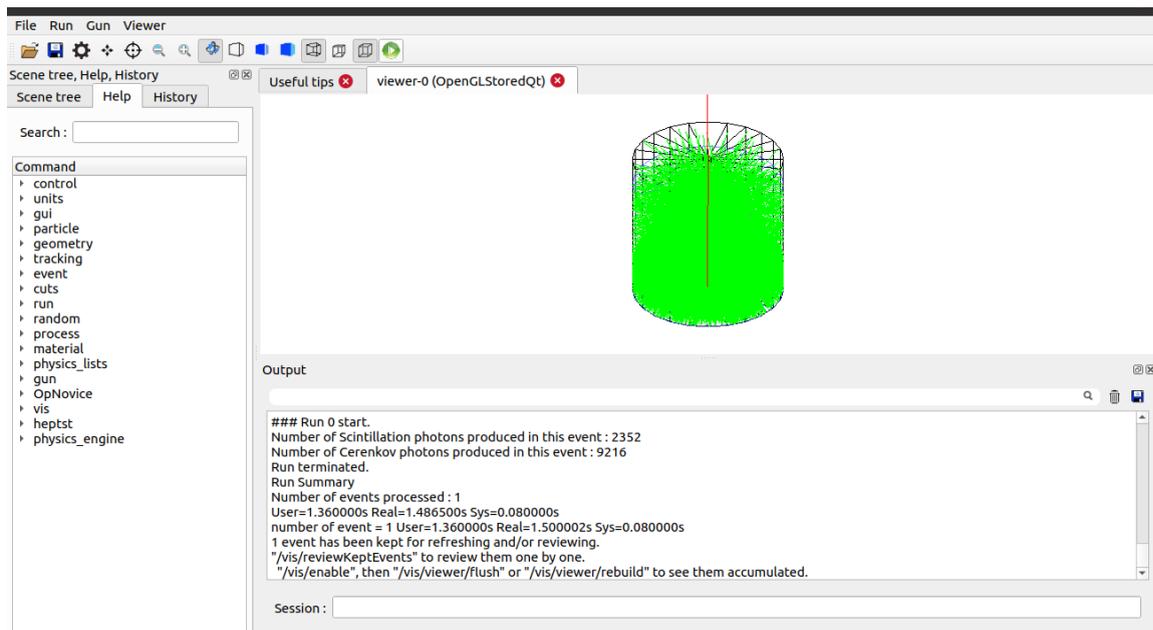
GEANT4 (de *GEometry ANd Tracking*) é uma plataforma para a simulação da passagem de partículas pela matéria usando métodos de Monte Carlo, muito utilizada na área de física de altas energias e física médica.

O GEANT4 não é um programa executável, mas sim um pacote de ferramentas que permite a criação de aplicações que envolvam o transporte de partículas na matéria. Ele é composto de classes escritas em C++. Com as ferramentas básicas do GEANT4 é possível realizar:

- Descrição de geometrias;
- Descrição de materiais;
- Escolha da fonte de partículas que estarão presentes na simulação;
- Escolha de processos físicos a serem usados para a interação das partículas com os materiais;
- Visualização da geometria e dos caminhos das partículas.

O pacote contém exemplos em diversas áreas que podem ser utilizados como ponto de partida para criar uma nova aplicação. É possível visualizar a geometria e os eventos das aplicações em interfaces gráficas, como o Qt, como mostra a Figura 9.

Figura 10 – Visualização da aplicação do tanque de água no Qt.



Além disso, o GEANT4 possui bibliotecas, já disponíveis na sua instalação, em que já são pré-definidos elementos químicos, partículas, fenômenos físicos, geometrias, etc.

3.2 TANQUE DE ÁGUA NO GEANT4

Utilizou-se como base para a construção desse detector o exemplo Novice N06, disponibilizado pela própria ferramenta, em que é construído um tanque de água quadrado com uma bolha de ar dentro dele, no qual ocorre o efeito Cherenkov pela passagem de uma partícula.

Construiu-se um cilindro de 32 cm de altura e 32 cm de diâmetro com paredes reflexivas e preenchido com água pura. O índice de refração da água variou de 1,3435 a 1,3608 e o comprimento de absorção do fóton, que é a distância na qual a radiação é absorvida, variou de 0,69 cm a 2,90 m (VÁSQUEZ-RAMÍREZ).

A estrutura do código para o tanque de água, que é escrito em C++, consiste nas seguintes classes:

- `DetectorConstruction`: Definição do mundo, objetos (sólidos), materiais e posições, como mostram os exemplos a seguir de trechos retirados do código.

Trecho do código em que são definidos os materiais utilizados no tanque de água:

```
// ----- Materials -----
  G4double a, z, density;
  G4int nelements;

// Air
  G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", "N", z=7 ,
a=14.01*g/mole);
  G4Element* O = new G4Element("Oxygen" , "O", z=8 ,
a=16.00*g/mole);
  G4Material* air = new G4Material("Air", density=1.29*mg/cm3,
nelements=2);
  air->AddElement(N, 70.*perCent);
  air->AddElement(O, 30.*perCent);

// Water
  G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", "H", z=1 , a=1.01*g/mole);
  G4Material* water = new G4Material("Water", density= 1.0*g/cm3,
nelements=2);
  water->AddElement(H, 2);
  water->AddElement(O, 1);
```

Trecho do código em que é definida a geometria do tanque de água:

```
// The Water Tank

G4Tubs* waterTank_box = new G4Tubs("Tank",
    innerRadius,
    outerRadius,
    fTank_z,
    startAngle,
    spanningAngle);

G4LogicalVolume* waterTank_log
    = new G4LogicalVolume(waterTank_box,water,"Tank",0,0,0);

G4VPhysicalVolume* waterTank_phys
    = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0,0,0),waterTank_log,"Tank",
    expHall_log,false,0);
```

- `PrimaryGeneratorAction`: Definição das partículas primárias (feixe, fonte radioativa), suas energias, direções de propagação e posições, como mostra o exemplo a seguir de um trecho retirado do código.

Trecho do código em que é definida a partícula incidente, direção, posição e energia:

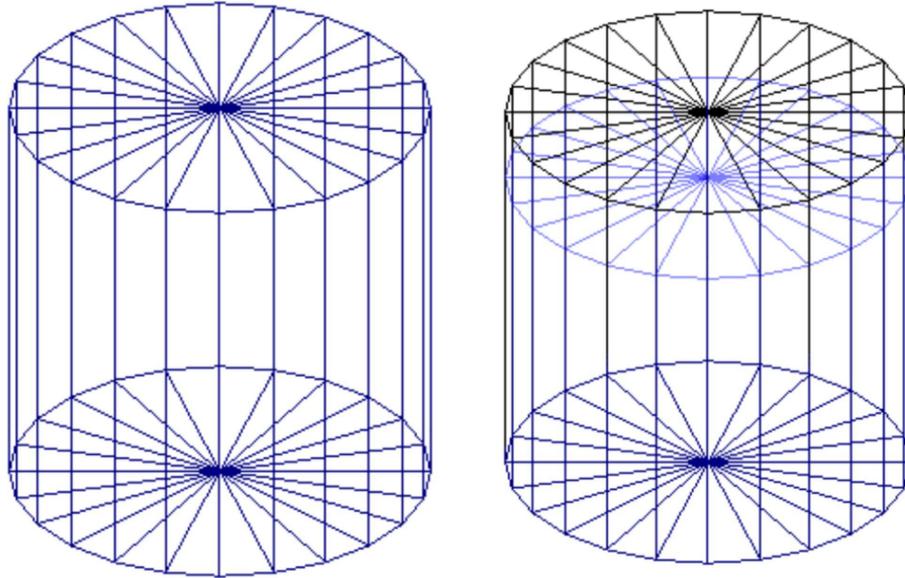
```
G4ParticleDefinition* particle = particleTable->FindParticle("mu-");

fParticleGun->SetParticleDefinition(particle);
fParticleGun->SetParticleTime(0.0*ns);
fParticleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(0.0*m,0.0*cm,0.35*m))
;
fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,0.,(-1)*1
.));
fParticleGun->SetParticleEnergy(2.0*GeV);
```

- `RunAction`, `StackingAction` e `SteppingAction`: Definições e controles para a execução, como a inicialização da execução, cálculos das grandezas de interesse, impressão dos resultados, etc.

Foram feitos testes com o tanque preenchido com água até 26 cm de altura e o restante preenchido com ar (70% Oxigênio e 30% Nitrogênio) e, também, com o tanque totalmente preenchido com água. Essas modificações foram feitas na classe `DetectorConstruction`.

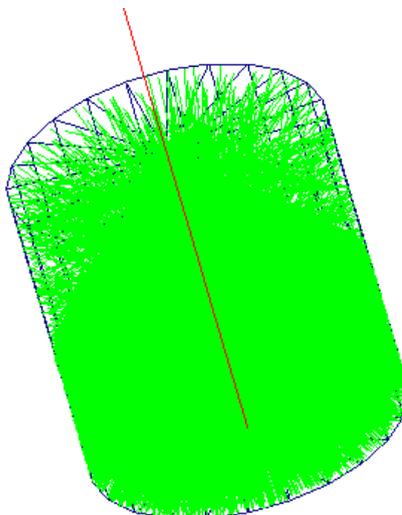
Figura 11 – Tanque de água no GEANT4. À esquerda, o tanque totalmente preenchido com água e à direita, o tanque preenchido com água até 26 cm.



Para a simulação, tanto para o tanque totalmente preenchido com água quanto para o tanque preenchido com água até 26 cm, definiu-se na classe `PrimaryGeneratorAction` a incidência de múons de 2 GeV em três direções para avaliar a distribuição de fótons dentro do tanque e melhor posição para a PMT:

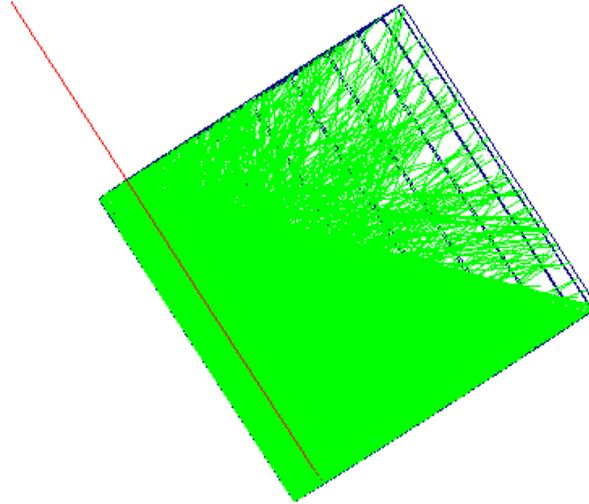
- Perpendicular à tampa e no centro do detector

Figura 12 – Múons (em vermelho) incidindo no detector perpendicularmente à tampa e no centro, gerando fótons Cherenkov (em verde), para o caso do tanque totalmente preenchido com água.



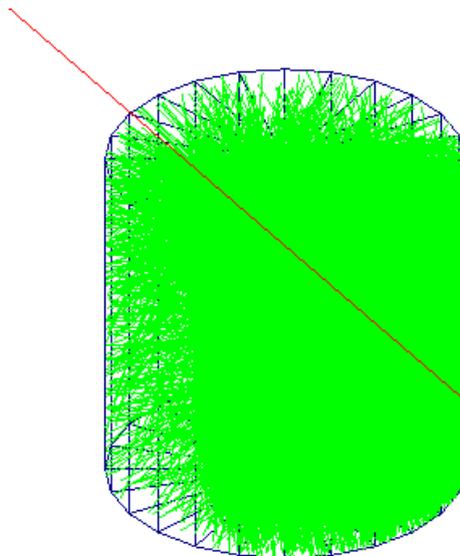
- Perpendicular à tampa e na borda do detector

Figura 13 – Múons (em vermelho) incidindo no detector perpendicularmente à tampa e na borda, gerando fótons Cherenkov (em verde), para o caso do tanque totalmente preenchido com água.



- Em um ângulo qualquer em relação à tampa

Figura 14 – Múons (em vermelho) incidindo no detector em um ângulo qualquer em relação à tampa, gerando fótons Cherenkov (em verde), para o caso do tanque totalmente preenchido com água.



Nas figuras anteriores, o detector foi levemente rotacionado para melhor visualização do efeito Cherenkov, pois é possível visualizar o cone que é formado após o múon atravessar o tanque, característica típica desta radiação.

3.2.1 Resultados

Foi definida uma região sensível de formato cilíndrico de 2 cm de altura e 2 cm de diâmetro, representando a fotomultiplicadora. Posicionou-se essa região sensível ao longo do detector, com o intuito de ver a contagem de fótons Cherenkov nesta região em diferentes posições e definir qual seria a melhor posição para a fotomultiplicadora. Para isso, a cada posição da região sensível, a simulação era executada e registrava-se a contagem do número de fótons Cherenkov na mesma.

Na aplicação real, para o caso do tanque preenchido com água até 26 cm, a fotomultiplicadora ficaria posicionada na tampa do cilindro sem contato com a água. Já para o tanque completamente cheio de água, a fotomultiplicadora ficaria submersa, envolta em um material transparente que a protegesse.

Com os resultados obtidos para as três direções de incidência dos múons, foram plotados mapas de calor. Nos mapas de calor, o eixo vertical refere-se às regiões de 2 cm variando em relação à altura do tanque, e o eixo horizontal, em relação à largura.

Figura 15 – Mapas de calor para múons incidindo perpendicularmente à tampa e no centro do detector. À esquerda, o tanque totalmente preenchido com água e à direita, o tanque preenchido com água até 26 cm.

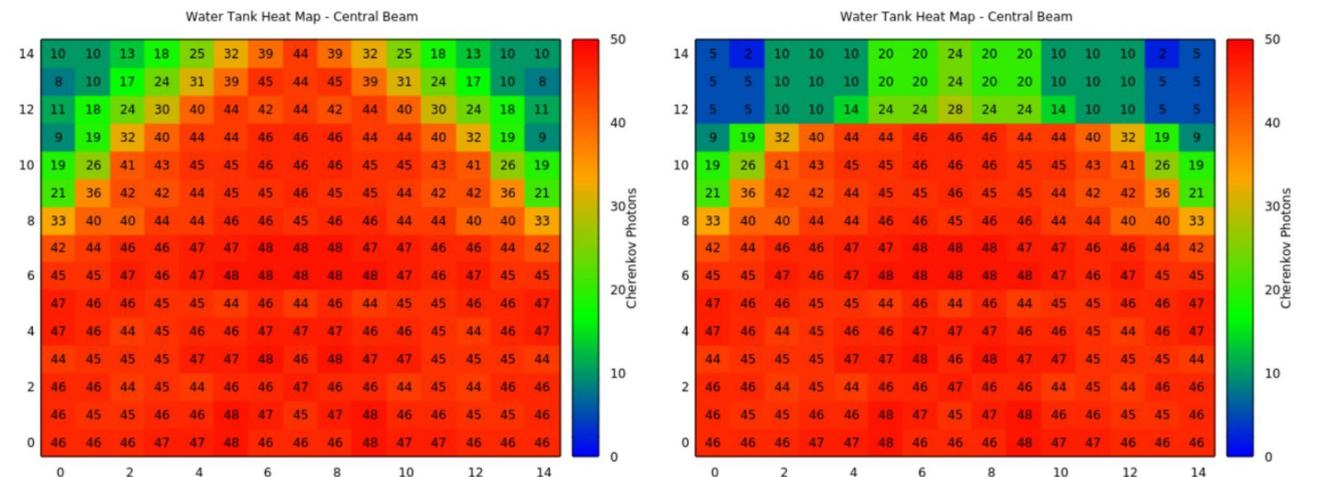


Figura 16 – Mapa de calor para múons incidindo perpendicularmente à tampa e na borda do detector, para o caso do tanque totalmente preenchido.

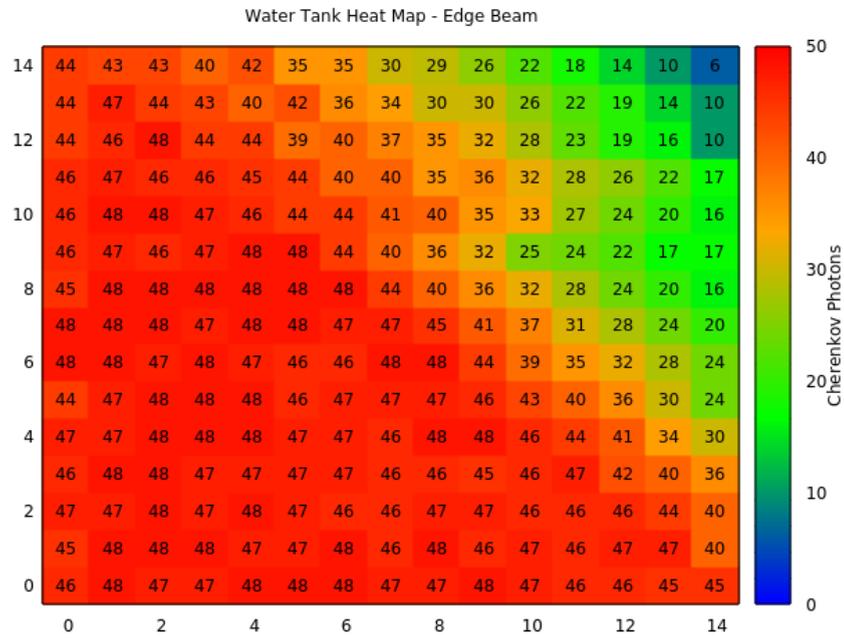
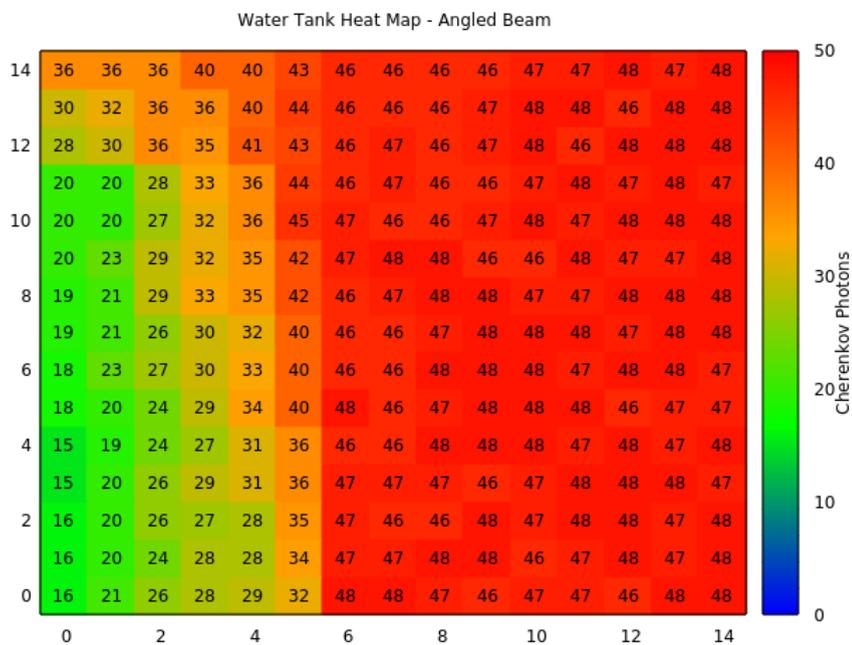


Figura 17 – Mapa de calor para múons incidindo em um ângulo qualquer em relação à tampa do detector, para o caso do tanque totalmente preenchido.



3.3 CINTILADOR PLÁSTICO NO GEANT4

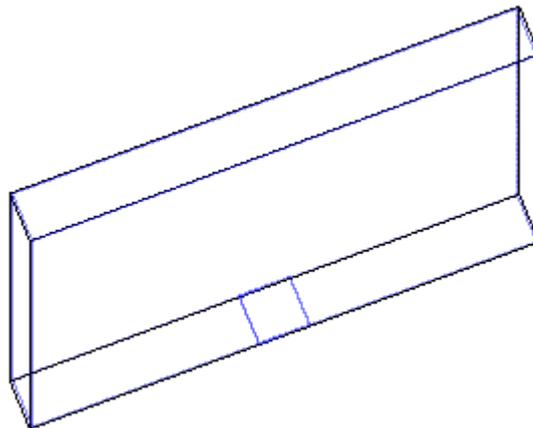
A estrutura do código nessa aplicação foi idêntica à anterior, possuindo as classes:

- `DetectorConstruction`: Definição do mundo, objetos (sólidos), materiais e posições.
- `PrimaryGeneratorAction`: Definição das partículas primárias (feixe, fonte radioativa), suas energias, direções de propagação e posições.
- `RunAction`, `StackingAction` e `SteppingAction`: Definições e controles para a execução, como a inicialização da execução, cálculos das grandezas de interesse, impressão dos resultados, etc.

Definiu-se na classe `DetectorConstruction` um material cintilador plástico de 100x100x10 mm, composto de PoliVinilTolueno ($[CH_2CH]_n$), com um índice de refração de 1,58 e comprimento de absorção do fóton de 5,5 cm (VÁSQUEZ-RAMÍREZ), acoplado a uma fotomultiplicadora de Silício (SiPM).

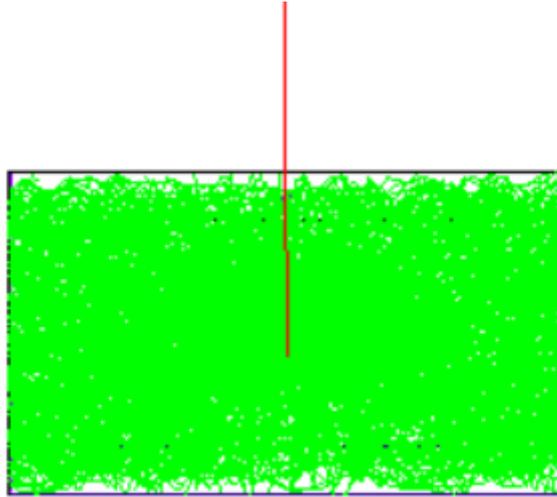
As paredes também foram consideradas reflexivas, pois em aplicações reais costumam envolver o detector em folhas de alumínio para minimizar a perda de fótons por transmissão.

Figura 18 - Cintilador acoplado à SiPM no GEANT4.



Para essa simulação, também foi definida, na classe `PrimaryGeneratorAction`, a incidência de múons de 2 GeV no detector:

Figura 19 – Múon (em vermelho) incidindo perpendicularmente à face de 100x100 mm do detector e gerando fótons Cherenkov (em verde).

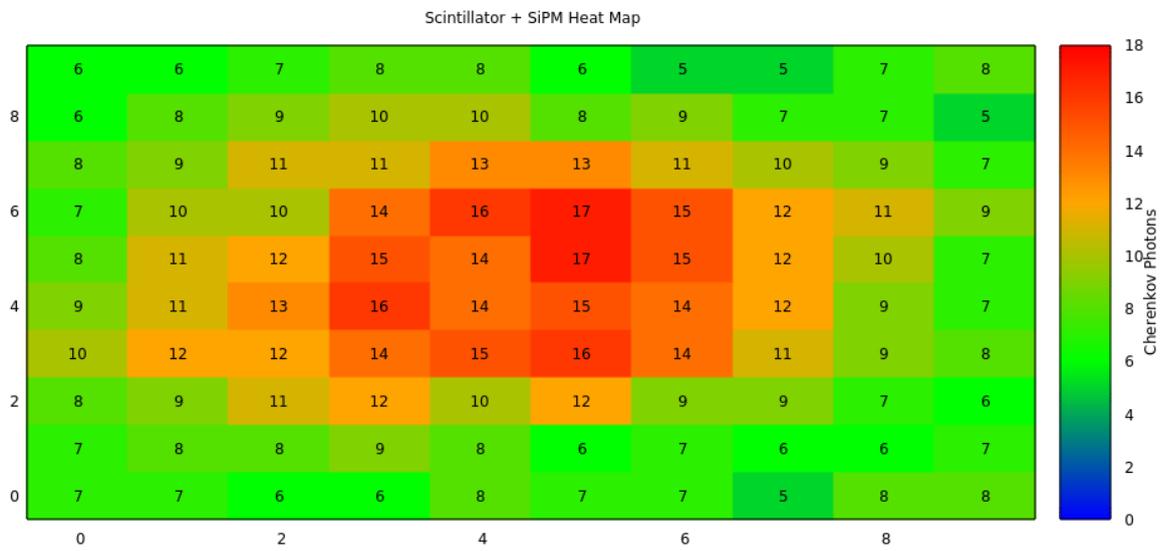


3.3.1 Resultados

Foi definida uma região sensível de formato quadrado de 10x10 mm. Posicionou-se essa região sensível ao longo do detector, com o intuito de ver a contagem de fótons Cherenkov nesta região em diferentes posições. Para isso, a cada posição da região sensível, a simulação era executada e registrava-se a contagem do número de fótons Cherenkov na mesma.

Com os resultados, foi realizado um mapa de calor para o detector de cintilador plástico + SiPM com os múons incidindo no centro, perpendicularmente à face de 100x100 mm. As regiões foram posicionadas ao longo desta face, conforme mostrado a seguir:

Figura 20 – Mapa de calor para o detector cintilador plástico + SiPM para múons incidindo no centro, perpendicular à face de 100x100 mm.



4 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe a simulação da radiação Cherenkov em meios utilizados para detector de raios cósmicos. Em particular, este trabalho se dedicou a estudar meios como água pura e cintilador plástico como radiador de fótons oriundos da radiação Cherenkov. O pacote de ferramentas GEANT4 foi utilizado para a construção da geometria do detector e simulação da passagem de múons de alta energia. Como resultados, foram obtidas a visualização geométrica da passagem de múons nesses meios e a contagem de fótons gerados.

A conclusão mais significativa é que, pelas simulações feitas, é possível desenvolver detectores de múons com as dimensões e materiais que estão sendo utilizados na construção dos detectores do Centro de Tecnologia Acadêmica, e obter sinais de fótons para múons incidentes com energia em torno de 2 GeV.

Com os mapas de calor apresentados, é possível concluir que a melhor posição para a fotomultiplicadora nos tanques de água é submersa e com o tanque completamente preenchido por água, pois existe uma diferença significativa em relação à contagem do número de fótons Cherenkov para o caso em que a fotomultiplicadora é posicionada na tampa e sem contato com a água, tanto para múons incidindo perpendicular à tampa no centro, quanto perpendicular à tampa na borda e com um ângulo em relação à tampa, o que abrange a maioria dos casos.

No caso do detector de cintilador plástico, como a SiPM será posicionada em uma das faces 10x100mm, não há diferença significativa em relação à posição devido à sua geometria quadrada. Sua vantagem é ser um detector mais compacto e robusto em relação ao tanque de água, além de ser de fácil manuseio.

REFERÊNCIAS

ATR - Advanced Test Reactor. Documento eletrônico. Disponível em <<https://inl.gov/atr/>>. Acesso em 01 nov. 2021.

CHERENKOV, P. A. Visible Emission of Clean Liquids by Action of γ Radiation. **Doklady Akademii Nauk SSSR**, 2, 451-454, 1934.

CLAY, R.; DAWSON, B. **Cosmic Bullets: High Energy Particles in Astrophysics**. Nova Iorque: Basic Books, 1999.

COSMICWATCH: catch yourself a muon. Documento eletrônico. Disponível em <<http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/>>. Acesso em 28 out. 2021.

CTA - Centro de Tecnologia Acadêmica. Documento eletrônico. Disponível em <<https://cta.if.ufrgs.br/capa/>>. Acesso em 01 nov. 2021.

DIETZ-LAURSONN, E. et al. GODDeSS: A Geant4 extension for easy modelling of optical detector components. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 12, P04026, 2017. Disponível em <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/04/P04026>>.

DOS ANJOS, J.; SHELLARD, R. C. **Raios Cósmicos: Energias extremas no universo**. Documento eletrônico. Disponível em <http://www.cbpf.br/~desafios/media/livro/Raios_cosmicos.pdf>. Acesso em 28 out. 2021.

EVOLI, C. The Cosmic-Ray Energy Spectrum. **Zenodo**, 2018. Disponível em <<http://doi.org/10.5281/zenodo.2360277>>.

FERNANDEZ, P. **Neutrino Physics in Present and Future Kamioka Water-Cherenkov Detectors with Neutron Tagging**. Tese de Doutorado - Faculty of Sciences of University Autonomous of Madrid, 2017.

GEANT4: A simulation toolkit. Documento eletrônico. Disponível em <geant4.web.cern.ch/>. Acesso em 03 nov. 2021.

GOMEZ TORO, D. **Temporal Filtering with Soft Error Detection and Correction Technique for Radiation Hardening Based on a C-element and BICS**. Tese de PhD - Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Télécom Bretagne; Université de Bretagne Occidentale, 2014.

HAMAMATSU Photomultiplier Tube R446. Documento eletrônico. Disponível em <<https://dtsheet.com/doc/749817/hamamatsu-r446>>. Acesso em 01 dez. 2021.

HARDHACK. Documento eletrônico. Disponível em <<https://www.hardhack.org.au/>>. Acesso em 01 nov. 2021.

HAWC: the High-Altitude Water Cherenkov Observatory. Documento eletrônico. Disponível em <<https://www.hawc-observatory.org/>>. Acesso em 28 out. 2021.

JACKSON, J. D. **Classical Electrodynamics**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962.

JELLEY, J. V. **Cerenkov Radiation and Its Applications**. London: Pergamon Press, 1958.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 3rd ed., 2000.

L'ANNUNZIATA, M. F. **Handbook of Radioactivity Analysis**. Academic Press, 3rd ed., 2012.

NAVE, R. Muon Experiment in Relativity. Documento eletrônico. Disponível em <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Relativ/muon.html>>. Acesso em 16 nov. 2021.

OBSERVATÓRIO Pierre Auger. Documento eletrônico. Disponível em <<https://www.auger.org/>>. Acesso em 28 out. 2021.

TANABASHI, M. et al. Particle Data Group. **Phys. Rev. D** 98, 030001, 2018.

VÁSQUEZ-RAMÍREZ, A. et al. Simulated response of MuTe, a hybrid Muon Telescope. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 15, P08004, 2020. Disponível em <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/08/P08004>>