

DISSERTAÇÃO

**Simulações Monte Carlo de um Instrumento
Detector de Raios Gama Atmosféricos**

Artur Castelo Branco Santos Serra

Brasília, Dezembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

“Simulações monte carlo de instrumento detector de raios gama atmosféricos.”

Por

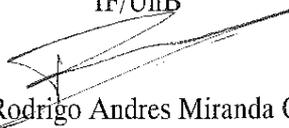
Artur Castelo Branco Santos Serra.

Dissertação submetida ao Instituto de Física da Universidade de Brasília como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Física.

Aprovada por:



Prof. Ivan Soares Ferreira
IF/UnB



Prof. Rodrigo Andres Miranda Cerda
FGA/UnB



Prof. Geraldo José da Silva
IF/UnB

Prof. Dr. Geraldo Magela e Silva
Coordenador de Pós-Graduação
Instituto de Física

FICHA CATALOGRÁFICA

SERRA, ARTUR CASTELO BRANCO SANTOS

Simulações Monte Carlo de um Instrumento Detector de Raios Gama Atmosféricos [Distrito Federal] 2017. xvi, 70 p., 210 x 297 mm (IFD/UnB, Mestre, Mestrado em Física, 2017).

Dissertação - Universidade de Brasília, Instituto de Física.

1. Detector Altas energias

2. CubeSats

3. TGFs

4. Dissertações da PG-IFD

I. IFD/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SERRA, A. (2017). *Simulações Monte Carlo de um Instrumento Detector de Raios Gama Atmosféricos*. Dissertação, Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Artur Castelo Branco Santos Serra

TÍTULO: Simulações Monte Carlo de um Instrumento Detector de Raios Gama Atmosféricos.

GRAU: Mestre em Física ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Artur Castelo Branco Santos Serra
Instituto de Física - IFD
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Agradecimentos

Eu gostaria de dedicar este trabalho, primeiramente, ao meu professor e orientador, Ioan Soares Ferreira, que apesar dos meus vários sumiços e tentativas de desistir várias vezes da pós-graduação, teve paciência desde os tempos da graduação e me ajudou a concluir essa etapa tão importante na minha vida.

Também dedico aos meus pais, Andreia Castelo Branco Santos Serra e Dionísio Carvallhedo Barbosa, que mesmo distantes em outro estado, sempre estiveram ao meu lado quando eu atingia o meu limite e precisava de apoio, me ensinando que eu era capaz de coisas que minha mente teimava em dizer que não. Dedico também à minha namorada, Jéssica Machado, que entrou na minha vida em um dos seus momentos mais complicados e, mesmo assim, teve paciência e me mostrou o verdadeiro valor do companheirismo, me apoiando mesmo quando eu só via dificuldade em tudo.

Dedico também a todos os meus amigos das várias cidades em que morei, assim como os que fiz quando me mudei para Brasília, mais especialmente aos que conheci na Universidade de Brasília ao longo desses anos, sendo da física ou de outros cursos, como Lucas Monteiro, Suzane, Uendel, Flávio, Lucas Loureiro, Lucas Camacho, e muitos outros. Dedico também aos meus amigos do módulo 3 da pós-graduação em física, popularmente conhecido como Caverna do Dragão, Ítalo, Everton, Antônio, Alan, Renan, Eduardo (Jack) e em especial ao Arlon, que infelizmente teve a vida interrompida de forma bruta duas semanas antes da defesa deste trabalho e não pôde a esta comparecer. Nessas semanas finais você era um dos que mais ouvia minhas lamentações com os prazos apertados. Um agradecimento em especial à Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal, FAP-DF, pelo apoio financeiro e pelo seu trabalho no fomento à pesquisa de pós-graduação stricto sensu no Distrito Federal.

Artur Castelo Branco Santos Serra

RESUMO

Emissões rápidas de altas energias originadas na atmosfera da Terra são um fenômeno novo e ainda pouco estudado. Conhecidas como Terrestrial Gamma-ray Flashes, o estudo das suas correlações com descargas elétricas que atravessam a atmosfera durante tempestades, assim como da possível causa relacionada com a interação entre raios cósmicos, as partículas carregadas e o campo elétrico das tempestades são bastantes empolgantes. No presente trabalho, estudaremos os diferentes mecanismos de ignição, assim como plataformas alternativas para a implantação de detectores espaciais, tais como os CubeSats. A interação da radiação com a matéria, a retirada de informações importantes dessas interações e as características dos diferentes tipos de detectores também serão abordadas. O uso da ferramenta de simulação computacional por meio do código Monte Carlo, Geant4, será o foco do trabalho, e dele serão retiradas algumas conclusões sobre a geometria de um detector voltado para o estudo destes eventos.

MONTE CARLO SIMULATIONS OF AN ATMOSPHERIC GAMMA RAYS DETECTION INSTRUMENT

ABSTRACT

Fast high-energy emissions from Earth's atmosphere are a new phenomenon with several unknowns. Typically named Terrestrial Gamma-ray Flashes, the study of their correlations with electrical discharges from thunderstorms, as well as of their possible cause by interaction between cosmic rays, particles and the electric field inside the thunderstorms are quite exciting. In the present work, we will study the different ignition mechanics, as well as alternative platforms for the implantation of space detectors, such as CubeSats. The interaction of radiation with matter, the removal of important information from these interactions and the characteristics of different types of detectors will also be addressed. The use of the computer simulation tool through the Monte Carlo's simulation code, Geant4, will be the focus of the work, from which the conclusions about the geometry of a detector will be drawn.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	TERRESTRIAL GAMMA -RAY FLASHES	4
	O CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL.....	4
	MECANISMOS DE PRODUÇÃO DE TGFS.....	7
2.2.1	RAIOS.....	8
2.2.2	RAIOS CÓSMICOS E RREA	11
2.3	TGFS.....	13
3	PLATAFORMA CUBESAT S	15
3.1	INTRODUÇÃO.....	15
3.2	HISTÓRIA	16
	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	17
	PANORAMA COMERCIAL E CIENTÍFICO DOS CUBE SATS	20
4	DETECTORES DE ALTAS ENERGIAS	23
4.1	RADIAÇÃO	23
	RADIAÇÃO IONIZANTE.....	23
	RADIAÇÃO NÃO -IONIZANTE	23
	INTERAÇÕES DAS RADIAÇÕES COM MATÉRIA.....	24
	EFEITO FOTOELÉTRICO	25
	ESPALHAMENTO COMPTON.....	26
	ESPALHAMENTO THOMPSON	26
	ESPALHAMENTO RAYLEIGH.....	27
	PRODUÇÃO DE PARES.....	27
	PASSAGEM DOS FÓTONS ATRAVÉS DA MATÉRIA.....	28
	MEDINDO O COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO.....	29
	MISTURAS E MATERIAIS COMPOSTOS	29
4.4	DETECTORES.....	30
	DETECTORES PREENCHIDOS POR GASES.....	30
	DETECTORES PREENCHIDOS POR LÍQUIDOS.....	31
	DETECTORES DE ESTADO SÓLIDO.....	31
	DETECTORES CINTILADORES	32
5	MÉTODO NUMÉRICO	40
5.1	O GEANT 4	40
	MÉTODO MONTE CARLO.....	40

DEFINIR UM CONJUNTO DE CONDIÇÕES INICIAIS E CONTORNO PARA O SISTEMA	41
ALEATORIAMENTE GERAR ENTRADAS NO SISTEMA E COMPUTAR OS DADOS	42
UNIFICAR OS RESULTADOS COMPUTADOS INDIVIDUALMENTE EM UM RESULTADO FINAL	42
5.3 O NÚCLEO DO GEANT 4.....	42
5.4 GEOMETRIA	44
5.5 TIPOS DE SÓLIDOS.....	45
5.6 MATERIAIS.....	45
5.7 OS DETECTORES.....	47
5.8 PARTÍCULAS	47
O RASTREIO DAS PARTÍCULAS	48
EVENTOS E RODADAS	48
PROCESSOS FÍSICOS DO GEANT 4	48
5.11.1 ELETROMAGNÉTICA	49
5.11.2 HADRÔNICA	49
5.11.3 DECAIMENTO	49
5.11.4 PROTOLEPTON -HADRON.....	49
5.11.5 ÓPTICO.....	49
5.11.6 PARAMETRIZAÇÃO	50
5.11.7 TRANSPORTE	50
5.12 INTERFACES DE USUÁRIOS , VISUALIZAÇÕES E FERRAMENTAS DE ANÁLISES	50
6 GEOMETRIAS ESTUDADAS	52
6.1 GEOMETRIA	52
6.2 CASOS SIMULADOS	52
6.2.1 BARREIRA ANTICOINCIDÊNCIA	53
7 RESULTADOS	55
7.1 SIMULAÇÕES	55
7.2 DISCUSSÃO	64
8 CONCLUSÕES.....	65

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquema do Circuito Elétrico Global.	5
	Processos de uma descarga de retorno desde a ruptura preliminar (a) e (b) até a segunda descarga de retorno (g). O canal no interior da nuvem, a partir de (c), pode ser tanto horizontal quanto vertical. Fonte: Adaptada de Ogawa (1995)	8
	Distribuição espacial de: (a) elétrons; (b) fótons; (c) pósitrons; (d) nêutrons e (e) prótons para 1 μ s de início da descarga. Os gráficos são projeções do plano xz, e a linha preta indica o líder simulado. Fonte: Köhn et al. (2017).....	10
	Fluxo de raios cósmicos em função da energia das partículas.	11
	Perda de energia por unidade de comprimento em função da energia do elétron livre se movendo em um ambiente. FONTE: Dwyer et al. 2004	12
	TGFs captados pelo satélite RHESSI. FONTE: Smith et al. 2005	13
	Seção de choque total para os processos de interação do fóton com o nitrogênio para o intervalo de 0-100MeV. Fonte: Köhn, 2014.	13
3.1	Modelo de um CubeSat 3U com sem lançador P-POD.....	16
3.2	Número de CubeSats lançados por ano no período entre 2005 e 2015 e as aplicações genéricas para as quais foram destinados, de acordo com o banco de dados de CubeSats da Saint Louise University.....	21
	Esboço de uma configuração simples para determinar o coeficiente de atenuação no material. As intensidades incidentes e transmitidas (I_0 e I) são medidas por dois detectores antes e depois da placa do material cujo coeficiente será determinado	30.
	Princípio da produção de luz cintilante rápida e atrasada pela radiação incidente	34
	Princípio da luminescência exciton de um exciton parcialmente ligado em um cintilador orgânico.	36.
	Densidade ρ , comprimento de onda da emissão máxima λ_{max} , tempo de decaimento τ e rendimento luminoso dN/dE de alguns cintiladores inorgânicos comuns. 37	
	Diminuição do ganho de um detector baseado em CsI não dopado.	38
5.1	Estrutura hierárquica do núcleo do Geant4.....	43
	Hierarquia dos volumes no Geant4, sendo os volumes mais externos os Volumes Mães dos mais internos.	44
	Diferentes casos de volume se sobrepujando no geant4.....	44
5.4	Código do Geant4 e o sólido gerado pelo mesmo.	45
5.5	Sólido Booleano.	46.
5.6	Sólidos gerados por CADs.	46
5.7	Sólidos repetidos.....	47.

5.8	Do lado esquerdo, a definição de um único elemento (He). Do lado direito, definição de um elemento composto (Água).	47
5.9	Ferramenta de visualização QT.....	51
5.10	Exemplos de ferramentas de visualização e análises.	51
6.1	Raio incidindo diretamente no detector do sistema estudado.	53
	Raio incidindo direto no detector sem as barreiras de proteção.	57
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira de BaS.	57
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira de Plexiglass.	57
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.	58
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.	58
	Raio incidindo direto no detector sem as barreiras de proteção.	58
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira de BaS.	59
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira de Plexiglass.	59
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.	59
	Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.	60
	Raio incidindo direto no detector sem as barreiras de proteção.	60
	Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira de BaS.....	60
	Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira de Plexiglass	61
	Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.	61
	Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.	61
	Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD, sem as barreiras de proteção.	62
	Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira de BaS.	62
	Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira de Plexiglass.	62
	Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.	63
	Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.	63

LISTA DE TABELAS

7.1	Raio incidindo direto no detector.	56
7.2	Raio incidindo atrás do CubeSat.	56
7.3	Raio incidindo do lado do CubeSat e detector.	56
7.4	Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com ACD.	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

eV	Electronvolt
V	Volt
C	Capacitância
R_1	Raio da Terra mais a camada atmosférica
R_2	Raio da Terra
A_T	Área de um raio individual
z_i	Altitude a ser estudada
J	Densidade de corrente
W	Watt
e^+	Positron
e^-	Eletron
E_λ	Energia para determinado comprimento de onda
E_γ	Energia de um fóton gama
c	Velocidade da luz
I	Intensidade do feixe
N	Número de átomos por unidade de volume
N_A	Número de átomos por unidade de volume do material A
A	Número atômico
h	Constante de Planck
r_e	Raio do elétron clássico

Símbolos Gregos

	Permissividade elétrica do vácuo
β^-	Radiação Beta-menos
β^+	Radiação Beta-mais
σ	Condutividade elétrica
ν	Frequência do fóton
λ	Comprimento de onda da luz
σ_{th}	Seção de choque do espalhamento Thompson
σ_{ry}	Seção de choque do espalhamento
σ_{pair}	Seção de choque da produção de pares
μ_t	Coeficiente total de atenuação linear
ρ	Densidade do material

Constantes Adimensionais

π pi Constante

Acrônimos

TGF Terrestrial Gamma-ray Flashes
MC Monte Carlo
GEANT4 Generation and Tracking 4
BATSE Burst and Transient Source Experiment
NASA National Aeronautics and Space Administration
RHESSI Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscope
RREA Relativistic Runaway Electrons Avalanche
NaI:Tl Iodeto de Sódio dopado com Tálcio
CsI:Tl Iodeto de Césio dopado com Tálcio
CsI:Na Iodeto de Césio dopado com Sódio
BaS Sulfeto de Bário
BGO Germanato de Bismuto
CEG Circuito Elétrico Global
AMAS Anomalia Magnética do Atlântico Sul
AGILE Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero
Cal Poly California Polytech State University
OPAL Orbital Picosatellite Automatic Launcher
DARPA Defense Advanced Research Projects Agency
JUSTSAP Japan-United States Science, Technology and Space Applications Program
P-POD Poly-Picosatellite Orbital Deployer
LEO Low Earth Orbit
INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
UNB Universidade de Brasília
AEB Agência Espacial Brasileira
TFM Tubo Fotomultiplicador
HEP High energy Physics
LHC Large Hadron Collider
CERN Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CAD Computer Aided Design
ACD Anticoincidence

1 INTRODUÇÃO

O uso de observatórios espaciais para a detecção de raios gama tem seu início na década de 1960, quando as grandes potências os usavam para monitorar explosões de bombas nucleares detonadas na superfície da Terra, visto que as mesmas tinham como subproduto uma grande quantidade de radiação gama. Contudo, com o passar dos anos, esses mesmos detectores espaciais começaram a detectar radiação gama vinda do espaço, e não da superfície do nosso planeta. Após ficar constatado que esses flashes de grande intensidade tinham como origem algum fenômeno fora do sistema solar, mais detectores sensíveis foram lançados ao espaço nas décadas seguintes para seu estudo.

No ano de 1994, no entanto, com detectores cada vez mais sensíveis, flashes de radiação gama muito curtos foram detectados tendo como origem a atmosfera da Terra. Ao procurar por explosões de bombas nucleares, até então a única fonte aceita de produção de tantos raios gama na atmosfera, nada foi encontrado.

Os primeiros *Terrestrial Gamma-ray Flashes* (TGFs), como ficaram conhecidos, foram detectados pelo *Burst and Transient Source Experiment* (BATSE), instalado no observatório espacial Compton da NASA (Fishman et al., 1994). Estudos subsequentes da Universidade Stanford (Inam et al., 1996) foram os primeiros a correlacionar emissões de TGFs a relâmpagos individuais na atmosfera terrestre.

Apesar dessa descoberta, BATSE conseguiu detectar somente um número pequeno desses eventos ao longo de quase uma década de funcionamento, já que seu propósito inicial não era detectar flashes de raios gama vindos da Terra, mas sim do espaço. Posteriormente, o satélite europeu Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscope, RHESSI detectou TGFs com energias muito superiores às do BATSE e um número muito maior de TGFs por dia. Entretanto, esta taxa de TGFs/dia é muito menor do que a de descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, que é da ordem de milhões de eventos.

O mecanismo por trás da produção dos TGFs na atmosfera terrestre ainda é um mistério. Há duas explicações mais aceitas pela comunidade científica:

- *Relativistic Runaway Electrons Avalanche* (RREA), em que elétrons altamente energéticos, provenientes de raios cósmicos, são a semente para a produção de elétrons secundários fortemente acelerados nos altos campos elétricos presentes nas nuvens de tempestade, fazendo com que superem a energia de fricção da atmosfera e posteriormente, promovam o efeito cascata.
- O acúmulo de cargas na ponta dos líderes negativos dos relâmpagos que, ao interagirem com os átomos da atmosfera terrestre, emitem radiação por meio de *bremmstrahlung*.

A partir de modelos de como funcionam o ambiente das tempestades é possível estimar as condições iniciais a serem estudadas nas simulações Monte Carlo usadas nas tentativas de se modelar estes eventos. Elas se mostraram muito úteis, visto que seus resultados batem com os observados pelos experimentos, mas suas aplicações não ficam restritas somente à modelagem da atmosfera. Podemos usar os mesmos algoritmos para estudar o comportamento de instrumentos detectores construídos para interagir com tais partículas de altas energias.

Dentre os vários algoritmos de simulações Monte Carlo existentes, optou-se pelo *GEneration ANd Tracking 4* (GEANT4) neste trabalho.

O Geant4 é um código Monte Carlo orientado a objetos, baseado na linguagem de programação C++, que descreve as interações das partículas com a matéria. Foi desenvolvido pelo CERN e é aberto a contribuições de terceiros. Geant4 é amplamente utilizado em pesquisas de radiações, de física de altas energias, de física médica e espacial, graças a sua robusta lista de processos físicos implementados no código e a uma avançada funcionalidade gráfica, podendo modelar detectores de geometrias complexas com alta precisão.

Esta dissertação tem como objetivo utilizar a ferramenta de simulações Monte Carlo Geant4 no estudo de um detector baseado em um cristal Cintilador de iodeto de sódio dopado com tálio (NaI:Tl) para raios gama em uma plataforma CubeSat. Nas simulações foram utilizadas barreiras com diferentes materiais para a blindagem, assim como diferentes configurações de incidência da radiação gama na plataforma, com energias que variavam de 50 keV a 1 GeV. Para a diferenciação dos raios gama produzidos por eventos secundários dos raios incidentes, foi utilizada uma barreira feita de germanato de bismuto (BGO) como o material de anticoincidência.

Todo este estudo prevê a construção de um instrumento a ser colocado no espaço. Um dos fatores que tornam a ciência espacial muito custosa e com poucos experimentos são os altos custos que envolvem o desenvolvimento de observatórios espaciais. São testados e simulados ao extremo antes de serem lançados, visto que não há a possibilidade de manutenção. Logo precisam ter uma confiabilidade muito grande. Para agravar ainda mais, por serem muito pesados, precisam de veículos muito caros para serem inseridos em suas órbitas finais.

Uma alternativa viável que tenta contornar essas dificuldades são as plataformas CubeSats, pequenos satélites de baixo custo que utilizam equipamentos eletrônicos que podem ser encontrados em lojas acessíveis a toda a população. Essas plataformas pesam no máximo alguns quilos, com dimensões que não passam de dezenas de centímetros. São altamente modeláveis e por serem uma proposta relativamente nova, estão em alto crescimento no mundo, seja no âmbito educacional (para o qual foram originalmente propostos) ou comercial. Outra característica dessas plataformas é o fato de poderem ser acopladas a balões meteorológicos, sem a necessidade de serem colocadas no espaço e com uma precisão bastante satisfatória em termos científicos, sendo perfeitas para países onde o orçamento da ciência é reduzido, como é o caso do Brasil.

Assim, o desafio do presente trabalho é mostrar que um detector cintilador pode ser usado com sucesso em conjunto com uma plataforma CubeSat, de geometria bastante restrita.

Essa dissertação está organizada em 8 capítulos. O capítulo 2 mostra os aspectos gerais dos TGFs, como seus mecanismos de produções e a física de suas fontes. O capítulo 3 aborda as plataformas CubeSats e suas características. No capítulo 4 são abordados os aspectos gerais dos detectores, como as interações da radiação com a matéria, os mecanismos pelos quais é possível retirar resultados dos mesmos e as características gerais dos vários tipos de detectores. O capítulo 5 trata da plataforma de simulação Monte Carlo, Geant4, utilizada neste trabalho. O capítulo 6 aborda as configurações utilizadas nas simulações. O capítulo 7 abrange os resultados das simulações e por fim, a conclusão é apresentada no capítulo 8.

2 TERRESTRIAL GAMMA-RAY FLASHES

Neste capítulo abordaremos o fenômeno dos lampejos ultra rápidos de raios gama provenientes da atmosfera terrestre ou, como são chamados na literatura, *Terrestrial Gamma-ray Flashes* (TGFs). Duram em média entre 0,2 e 3,5 milissegundos, com energias que podem chegar a 20 milhões de elétrons-volts. Em 1996, um estudo da Universidade Stanford relacionou TGFs com raios individuais de tempestades, ocorrendo milissegundos antes da detecção do TGF (Inan et al., 1996).

Este foi o primeiro passo na tentativa de explicar o fenômeno. Neste capítulo veremos uma explicação geral deste processo começando pelo Circuito Elétrico Global (CEG), que é um modelo abrangente que relaciona os processos elétricos da atmosférica com componentes de um circuito elétrico habitual. A partir da descrição do CEG, veremos como surgem os mecanismos mais aceitos de produção de TGFs, ou seja, as descargas elétricas nas tempestades assim como características próprias dos TGFs.

O CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL

O Circuito Elétrico global é um modelo terrestre que visa explicar os fenômenos elétricos do planeta a partir do funcionamento de um grande circuito RLC entre o solo condutor, a baixa atmosfera, a ionosfera e a magnetosfera terrestre. Nesse circuito, a atmosfera age como um grande resistor, o capacitor é modelado como um capacitor esférico, sendo um condutor o solo e o outro a ionosfera. Os indutores são os tubos de plasmas existentes ao longo das linhas do campo magnético terrestre. Há outros componentes, como por exemplo fontes de corrente provenientes dos *double-layers* formados na ionosfera entre as linhas de campo magnético, que é responsável por acelerar as partículas que darão origem às auroras.

O modelo de CEG mais utilizado na literatura foi proposto por Rycroft et al. (2007), composto de uma fonte de corrente e elementos passivos associados. Nesse modelo, as correntes de condução acima das tempestades têm como papel manter a diferença de potencial entre a crosta e a ionosfera em aproximadamente 300 kV, produzindo um campo elétrico em áreas com o clima equilibrado, ou como usado na literatura, *fairweather*.

A figura 2.1 é um bom diagrama para explicar o funcionamento do CEG. Nela, a atmosfera é dividida em três partes (baixa, média e alta atmosfera). A baixa se estende desde o nível do mar até uma altitude que varia entre 12 km e 15 km, composta majoritariamente por nitrogênio e oxigênio, sendo responsável por manter a diferença de potencial entre a crosta e a ionosfera quase constante, o que implica que, mesmo com o *fair weather*, ainda haverá uma diferença de potencial e uma corrente elétrica entre a crosta e a ionosfera. A média atmosfera vai dos limites da baixa até o final da ionosfera, onde há uma grande ionização devido a partículas carregadas

que a atingem, oriundas da radiação solar. A alta atmosfera é formada pela magnetosfera, uma região acima das camadas mais densas e formada predominantemente por partículas que sofrem grande influência do campo magnético terrestre e do vento solar. Essas partículas são encontradas em altitudes que variam entre 3000 km - 16000 km.

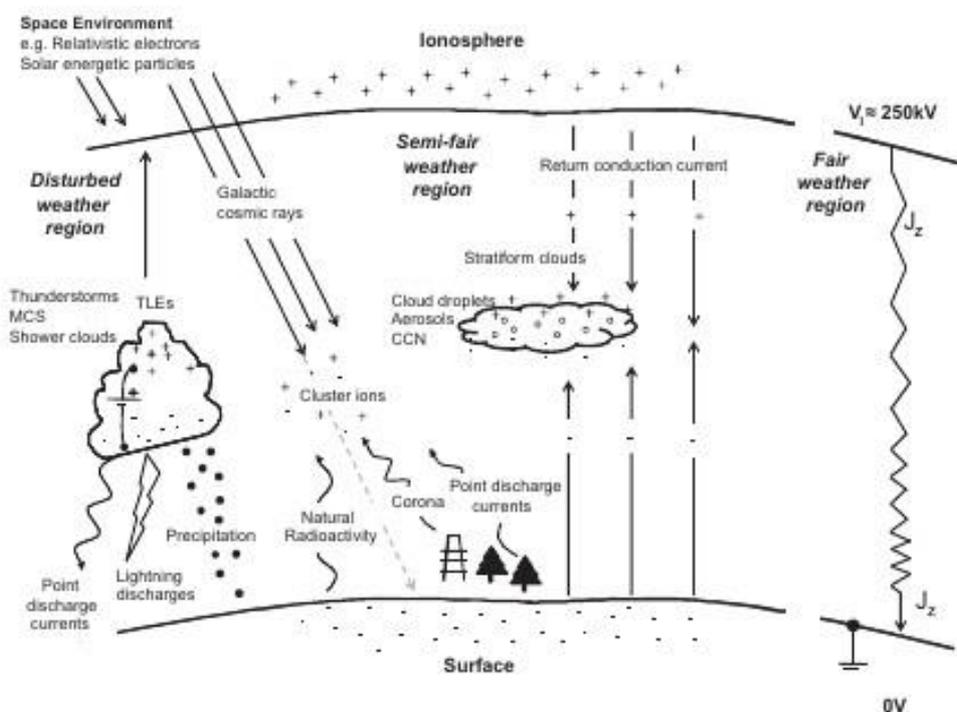


Figura 2.1: Esquema do Circuito Elétrico Global.

Para que esse modelo funcione da forma como foi pensado, deve-se considerar um evento de tempestade isolado no circuito e, posteriormente, modelar a produção das descargas elétricas. A conexão deste pequeno circuito local com o circuito global se dá como uma associação de resistores e capacitores em paralelo, determinando seus valores dadas as condições iniciais e finais do sistema entre a crosta terrestre e a ionosfera durante uma tempestade.

Para termos uma estimativa da capacitância do capacitor principal do CEG, pensemos no capacitor de duas esferas concêntricas, onde a crosta da Terra é a esfera interna e a ionosfera, a externa, possuindo polaridades opostas, sendo que, por convenção, a crosta da Terra terá cargas positivas e a ionosfera, cargas negativas. A capacitância aproximada é calculada perante a diferença de potencial entre as duas esferas concêntricas, usando a equação da capacitância:

$$C = 4\pi \epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \quad (2.1)$$

Onde ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, R_1 é o raio da Terra mais a camada atmosférica até a ionosfera (6371 km + 80 km) e R_2 é o raio da Terra (6371 km).

A capacitância durante uma tempestade pode ser calculada com base na equação proposta por Rycroft et al. (2007), onde um conjunto de sete capacitores em série são utilizados.

$$C_{Ti} = \frac{\epsilon_0 A_T}{z_i - z_{i-1}} \quad (2.2)$$

em que A_T é a área de um raio individual (aproximadamente 314km^2) e z_i é a altitude a ser estudada na coluna vertical entre $0,35\text{km}$ a 80km .

Assim, baseado nas equações 2.1 e 2.2, encontramos que a capacitância em cada elemento do conjunto de sete capacitores é de aproximadamente $57,1\mu\text{F}$.

A principal fonte para abastecer o CEG e deixá-lo permanentemente eletrificado são as tempestades elétricas, movimentando uma imensa quantidade de cargas elétricas localmente e uma quantidade ainda maior na atmosfera do planeta como um todo. Essa movimentação ocorre quando há raios entre as nuvens e o solo, entre o solo e as nuvens, entre as nuvens e das nuvens à ionosfera terrestre.

A atmosfera do planeta pode ser aproximada ao comportamento de uma resistência elétrica de aproximadamente 300Ω . Dessa resistência, pode-se calcular a condutividade elétrica da atmosfera, uma característica muito importante no contexto do CEG. A condutividade elétrica será crucial na determinação da resistência e da capacitância da coluna vertical de ar durante uma tempestade.

As resistências para as diferentes colunas de ar podem ser calculadas tendo como base Rycroft et al. (2007):

$$R_{Ti} = \frac{1}{A_T} \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{dz}{\sigma(z)}, \quad (2.3)$$

onde usamos os mesmos valores da equação 2.2 para A_T e z_i [1].

A corrente elétrica do CEG pode ser aproximada pela densidade de corrente, $J = \sigma E$, e usando a Lei de Ohm, com os resultados da equação 2.3, podemos achar as diferentes correntes que compõem a corrente vertical da crosta para a nuvem carregada. Diversos componentes de densidade de corrente contribuem para a densidade de corrente total:

$$J_S = J_C + J_W + J_T + J_P \quad (2.4)$$

Essas densidades de corrente representam parâmetros fundamentais que devem ser levados em conta no contexto do CEG:

- Correntes de Turbulência (J_T):

Ocorrem devido ao movimento térmico dos gases na atmosfera, causadas pela diferença de pressão e temperatura nas áreas polares e tropicais da Terra. São formadas por ventos de alta e baixa velocidade.

- Correntes de Descarga (J_C):

São geradas nos raios, podendo chegar a até 30 KA.

- Correntes de Precipitação (J_p):

Correntes carregadas pelas gotas de água das chuvas.

- Correntes de Wilson (J_w):

São correntes tangenciais ao campo magnético presente na magnetosfera terrestre. Ocorrem nas tempestades e percorrem todo o caminho das nuvens até a ionosfera e/ou magnetosfera pelas linhas do campo geomagnético, percorrendo o caminho ao hemisfério oposto a que foram criadas.

Um indutor é caracterizado por ser um dispositivo passivo de um circuito elétrico que armazena energia nas linhas de seu campo magnético, induzido pela corrente elétrica do circuito. Não há modelos que representem de forma concisa um indutor na atmosfera, porém o que mais se aproxima é a magnetosfera terrestre. Levando em consideração as correntes de Wilson citadas anteriormente e como elas seguem as linhas de campo, a magnetosfera se encaixa perfeitamente na ideia de um circuito RLC para o CEG (Turquetti e Ferreira, 2015).

MECANISMOS DE PRODUÇÃO DE TGFS

A produção de raios gama na atmosfera terrestre é, em sua maioria, consequência de radiação por bremsstrahlung de elétrons. No entanto, não há um entendimento de quais mecanismos promovem elétrons altamente energéticos. Campos elétricos gerados presentes nas nuvens de tempestades não são capazes, por si só, de acelerarem elétrons a energias suficientes para a produção de raios gama. Logo, duas são as teorias mais aceitas que tentam explicar a multiplicação de elétrons energéticos e, por consequência, a produção de fótons por bremsstrahlung:

1. A aceleração térmica de elétrons nas pontas dos líderes de cada descarga elétrica e a subsequente aceleração durante cada passo que o líder dá na busca do melhor caminho (Moss et al., 2006; Williams et al., 2006; Dwyer, 2008, Carlson et al., 2009, 2010; Chanrion and Neubert, 2010; Celestin and Pasko, 2011; Xu et al., 2012).
2. A incitação de elétrons altamente energéticos por partículas geradoras, como os raios cósmicos e a subsequente multiplicação e aceleração desses elétrons por meio do processo da Avalanche de Elétrons Relativísticos Desenfreados (do inglês, RREA) no campo elétrico da nuvem de tempestade (Gurevich et al., 1992). E posteriormente, multiplicação dos RREA por fótons e pósitrons de retrodifusão, que é um mecanismo de feedback (Dwyer, 2003, 2007; Dwyer and Babich, 2011; Dwyer, 2012).

Com isso em mente, as próximas subseções abrigam os aspectos básicos dos relâmpagos e dos raios cósmicos que vão fazer o papel de sementes para as RREAs.

Raios

Os relâmpagos são os fenômenos atmosféricos de descargas elétricas mais comuns e conhecidos. Eles ocorrem quando as distribuições de cargas dentro de nuvens de tempestades se organizam de tal maneira que um forte campo elétrico dentro da nuvem é formado. A partir disso, por um mecanismo ainda pouco compreendido, chamado de quebra de rigidez preliminar e caracterizado por várias descargas fracas entre os centros de cargas positivas e negativas dentro da nuvem, a rigidez dielétrica do ar é quebrada e ramificações de descargas elétricas começam a se formar. Essas ramificações, chamadas de *branches*, são regiões da atmosfera em que a rigidez dielétrica é quebrada e as cargas elétricas conseguem prosseguir, formando um caminho condutivo de plasma pelo qual as cargas elétricas podem circular livremente, formando um raio.

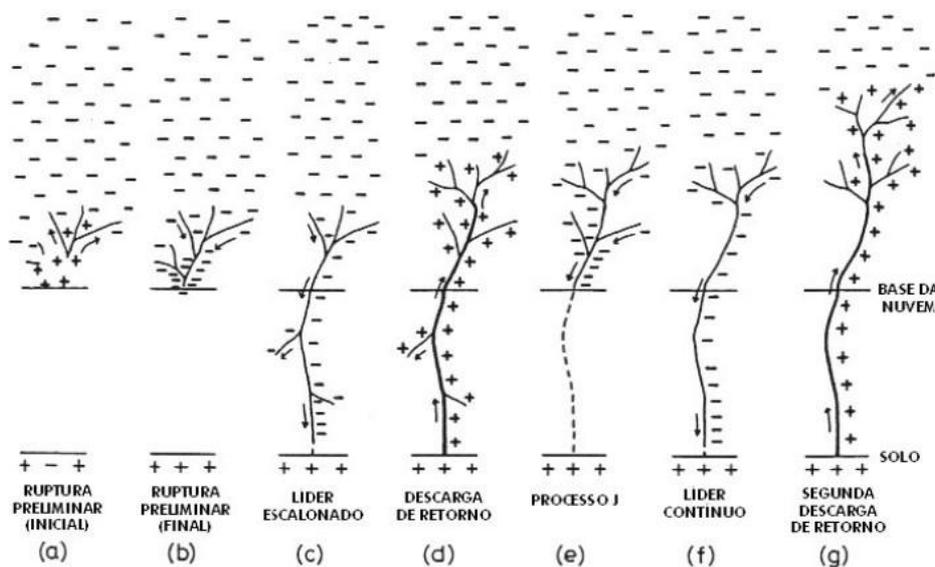


Figura 2.2: Processos de uma descarga de retorno desde a ruptura preliminar (a) e (b) até a segunda descarga de retorno (g). O canal no interior da nuvem, a partir de (c), pode ser tanto horizontal quanto vertical. Fonte: Adaptada de Ogawa (1995)

Os relâmpagos podem ser de 4 diferentes tipos:

1. Descarga negativa nuvem-solo

Após a quebra da rigidez dielétrica do ar, a partir da região carregada negativamente no interior da nuvem, surge um canal de plasma pelo qual as cargas irão fluir livremente. Este canal é formado por várias ramificações que avançam em passos de 50 metros de comprimento a cada 50 microssegundos, sendo as ramificações que vão em direção ao solo chamadas de *stepped-leader*.

As ramificações mais próximas ao solo têm uma concentração de cargas negativas em suas pontas e são chamadas de *leader-tips*. Devido a essa concentração de cargas, uma diferença de potencial da ordem de 10^6 V é formada em relação ao solo e induz, em qualquer superfície ou objeto condutor, uma concentração de cargas que podem dar origem a líderes

ascendentes positivos, chamados de líder conectante (*upward connecting leader*), promovendo uma descarga conectante.

Quando o contato é feito, os elétrons movem-se violentamente em direção ao solo, produzindo intensa luminosidade a partir do ponto de conexão. Conforme os elétrons do canal principal e das ramificações passam a ganhar velocidade e seguem rumo ao solo, todo o caminho ionizado se ilumina. Toda a carga negativa, inclusive proveniente da nuvem, dissipa-se no solo num fluxo que dura alguns microssegundos. Neste intervalo, contudo, a temperatura no interior do canal chega a mais de 30000K.

Usualmente ocorrem em média três ou quatro eventos de descarga em um mesmo raio, mas podem chegar a até 20 vezes, denominadas descarga de retorno subsequentes, separadas entre si por um intervalo de aproximadamente cinquenta milissegundos. Normalmente essas descargas têm uma corrente da ordem de algumas dezenas a centenas de milhares de amperes. No caso em que há mais cargas negativas disponíveis na nuvem, surge uma nova descarga subsequente, denominada "líder contínuo", que se desloca mais rapidamente que o canal precursor inicial, seguindo o caminho ionizado deixado pelas outras descargas, chegando ao solo em poucos milissegundos.

2. Descarga positiva nuvem-solo

Alguns raios se formam nas regiões de cargas positivas das grandes nuvens de tempestades Cúmulo-Nimbus. As descargas surgem no topo dessas nuvens e se estendem horizontalmente pela mesma. Com uma ocorrência relativamente mais rara que os negativos, os raios positivos possuem características interessantes. Diferente do que ocorre em uma descarga negativa, o canal precursor nas descargas positivas é uniforme e, ao se estabelecer o contato, somente uma única descarga de retorno ocorre, cujo pico de corrente chega a mais de 100 kA, muito maior do que a média dos raios negativos e mantendo-se constante por alguns milissegundos.

3. Descarga intra-nuvem

Caracterizam-se por serem a maior parte das descargas elétricas que ocorrem na atmosfera terrestre. Ocorrem quando um canal precursor da descarga surge no núcleo negativo da parte inferior da nuvem e segue para cima, onde a concentração de cargas positivas é maior e mais comum. Existem descargas que duram tipicamente 0,2 segundo e apresentam um brilho quase contínuo, marcado por pulsos possivelmente atribuídos às descargas de retorno. Elas possuem uma carga total transferida da mesma ordem das descargas nuvem-solo.

A descarga começa quando cargas negativas se movimentam de baixo para cima numa nuvem por um canal precursor que dura entre 10ms a 20ms e se estende por alguns quilômetros de comprimento. Chegando na parte superior da nuvem, o canal se divide em vários ramos horizontais, a partir dos quais ocorrerá a transferência de elétrons da base da nuvem para seu topo. A descarga acaba quando a ligação entre as partes inferior e superior da nuvem é interrompida.

4. Descarga solo-nuvem

Ocorrem a partir de estruturas altas e topos de montanhas, onde canais precursoros da descarga surgem e seguem em direção vertical até a nuvem, com um fluxo de cargas negativas em direção ao solo ou, mais raramente, o fluxo de elétrons em direção à nuvem. O canal precursor surge normalmente de um único ponto na superfície e ramifica-se em direção vertical rumo à nuvem. As estruturas metálicas, como edifícios e torres de comunicação, são um dos fatores mais importantes nesses eventos, já que suas alturas que chegam a mais de algumas centenas de metros e cujas pontas são capazes de potencializar o campo elétrico induzido são capazes de dar início a uma descarga precursora que, ao ser estabelecida, promove a ocorrência de descargas de retorno de forma semelhante às descargas negativas nuvem-solo.

Como visto, o líder de um relâmpago negativo, por suas dimensões pequenas na ordem de centímetros, concentra uma enorme quantidade de cargas negativas em sua ponta por conta de sua propagação em passos, onde há aceleração e freamento de cargas e por consequência, emissão de radiação intensas por causa do acúmulo de cargas na ponta dos líderes. Esse processo está de acordo com as energias observadas de TGFs na literatura, obtidas por meio de simulações Monte Carlo (Köhn et al., 2015), contribuindo para o seu favorecimento como fonte primária. A difusão das partículas a partir da fonte do líder é ilustrada pela figura 2.3.

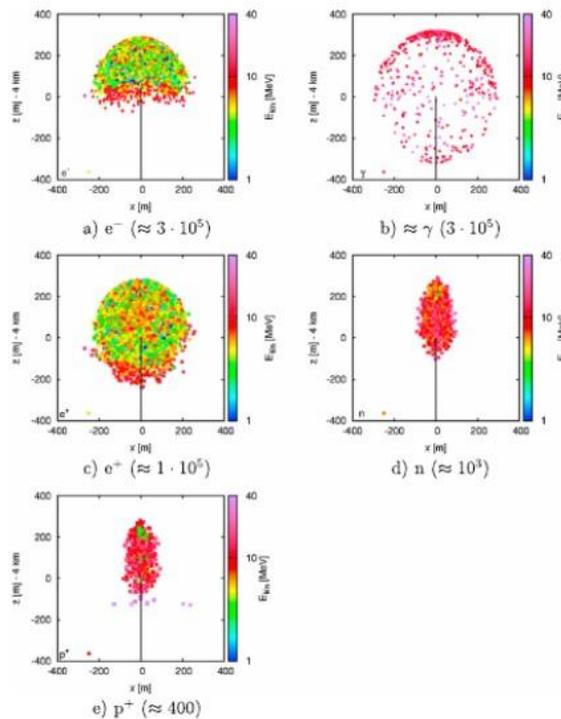


Figura 2.3: Distribuição espacial de: (a) elétrons; (b) fótons; (c) pósitrons; (d) nêutrons e (e) prótons para 1 μ s de início da descarga. Os gráficos são projeções do plano xz, e a linha preta indica o líder simulado. Fonte: Köhn et al. (2017)

Raios cósmicos e RREA

Nesta sessão, abordaremos os conceitos básicos sobre os raios cósmicos e um efeito subsequente seu nas nuvens de tempestades onde o campo elétrico é relativamente alto, as avalanches de elétrons relativísticos acelerados. Seus efeitos na produção de TGFs serão discutidos na próxima sessão, quando a base dos fenômenos produtores estiver estabelecida.

Raios Cósmicos

Raios cósmicos são radiações de alta energia originadas, em sua maioria, de fora do sistema solar ou até de outras galáxias. São compostos primariamente de prótons altamente energéticos (90%), núcleos atômicos (9%) e elétrons livres (1%). Dados mais recentes de observatórios como o telescópio espacial Fermi levam a crer que a fonte primária dos raios cósmicos sejam em eventos como as explosões de supernovas e núcleos de galáxias ativas.

Apesar do nome "Raios cósmicos", quando esse termo é usado, refere-se exclusivamente a partículas massivas. Fótons energéticos de origem semelhante aos raios cósmicos são chamados por seus nomes padrão, como raios-X ou gama.

A partícula de raio cósmico mais energética detectada até o presente momento tinha uma energia da ordem de 3×10^{20} eV, enquanto que os fótons de raio gama mais energéticos observados têm energia da ordem de 10^4 eV. Contudo, a grande maioria dos raios cósmicos apresentam energias que chegam até a ordem dos GeV.

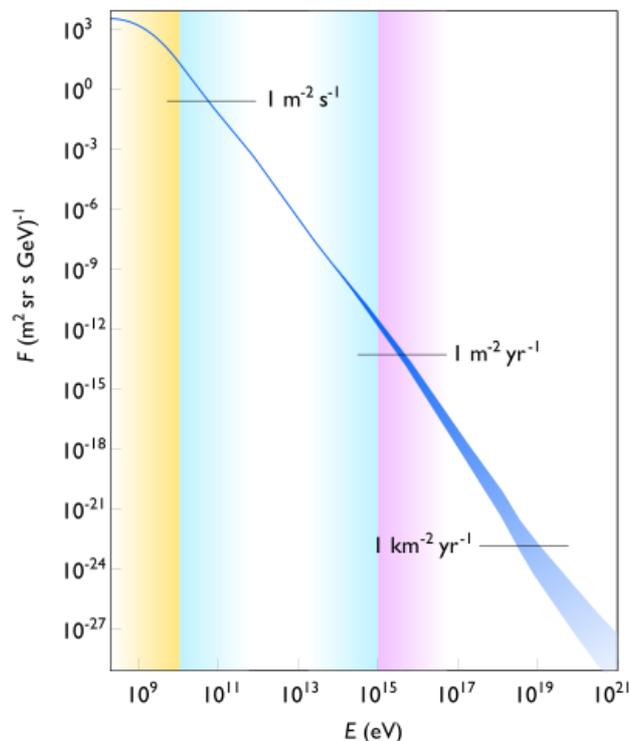


Figura 2.4: Fluxo de raios cósmicos em função da energia das partículas.

Quando os raios cósmicos atingem a atmosfera terrestre, produzem um efeito cascata de produção de partículas secundárias menos energéticas, chamado de chuva. Nêutrons, elétrons, múons, píons, partículas alfa, raios-X e prótons são partículas criadas nesses eventos.

A partir das partículas secundárias que atingem o solo, como os múons, é possível traçar suas trajetórias e energias a um único evento primário e assim determinar sua energia e o fluxo com que essas partículas atravessam a atmosfera terrestre. Com isso, percebe-se que raios cósmicos com níveis de energia mais baixo são mais comuns, enquanto os de maiores energias são mais raros, como mostrado na fig 2.4.

Relativistic Runaway Electrons Avalanche

A avalanche de elétrons é um processo no qual elétrons livres em um meio são sujeitos a uma grande aceleração por campos elétricos superando a rigidez dielétrica e subsequentemente colidindo com átomos desse mesmo meio, podendo causar a ionização nos mesmos.

Para que uma RREA se forme, os elétrons precisam estar sujeitos a um grande campo elétrico e a espalhamentos elásticos de altas energias do tipo elétron-elétron, formando uma avalanche antiparalela às linhas do campo.

Contudo, para que essa energia seja atingida e o processo se inicie, uma condição inicial precisa ocorrer. Uma sugestão para essa condição inicial que dará início à avalanche são elétrons muito energéticos oriundos de raios cósmicos (Carlson et al., 2008).

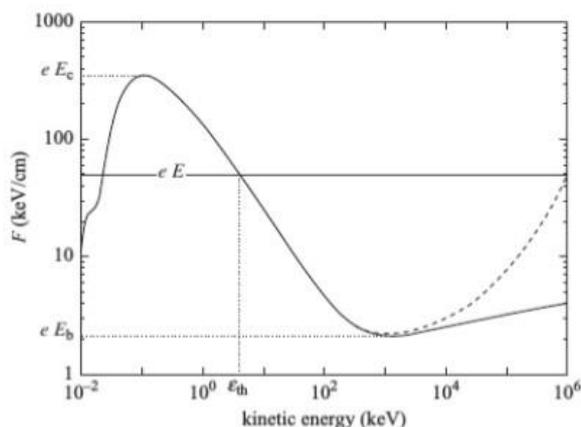


Figura 2.5: Perda de energia por unidade de comprimento em função da energia do elétron livre se movendo em um ambiente. FONTE: Dwyer et al. 2004

Durante essa avalanche, elétrons viajando para cima, na direção oposta ao campo elétrico da nuvem, produzirão muitos fótons energéticos por bremsstrahlung. Alguns desses fótons irão ou espalhar por espalhamento Compton ou produzirão pares de elétrons e pósitrons. Se os fótons espalhados tiverem energia suficiente para produzir mais elétrons que superem a rigidez dielétrica do meio, podem produzir avalanches secundárias. Se pares de elétrons e pósitrons são produzidos, os pósitrons serão acelerados rapidamente pelas linhas do campo elétrico para baixo na

nuvem, na direção oposta dos elétrons e, se não forem aniquilados no meio do caminho, podem também induzir a avalanches secundárias por meio de espalhamentos elásticos. Esse mecanismo de produção de avalanches secundárias é conhecido como feedback.

Uma característica interessante dos RREA produzidos por raios cósmicos é que eles podem ser os precursores da quebra de rigidez dielétrica do ar que dará origem aos raios.

TGFS

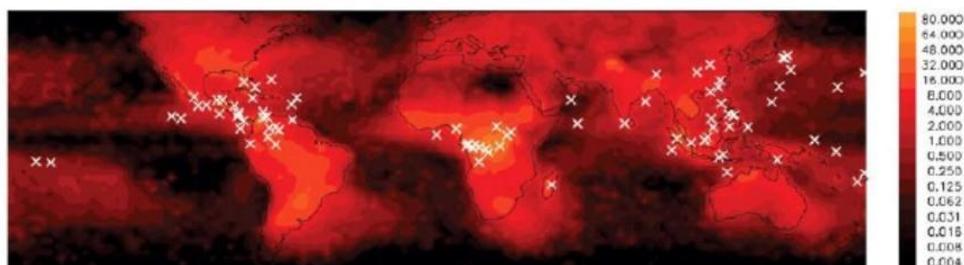


Figura 2.6: TGFs captados pelo satélite RHESSI. FONTE: Smith et al. 2005

TGFs concentram-se nas regiões equatoriais do planeta, onde a ocorrência de tempestades é muito maior. Como visto na figura 2.6, a ausência de TGFs na região do Brasil provavelmente se dá por conta da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), uma região onde a parte mais interna do cinturão de Van Allen tem a máxima aproximação com a superfície da Terra, fazendo com que a intensidade da radiação nessa região do planeta seja maior do que em outras.

Ao atravessar a AMAS, muitos satélites são colocados em modos *stand-by*, pois passam vários minutos expostos a grandes quantidades de radiação que ali existem. Esse é um dos motivos que levaram ao pensamento do projeto desta dissertação, ao se usar CubeSats que podem ser acoplados em balões meteorológicos ou em órbitas baixas, visto que seus custos são muito mais baixos que grandes satélites.

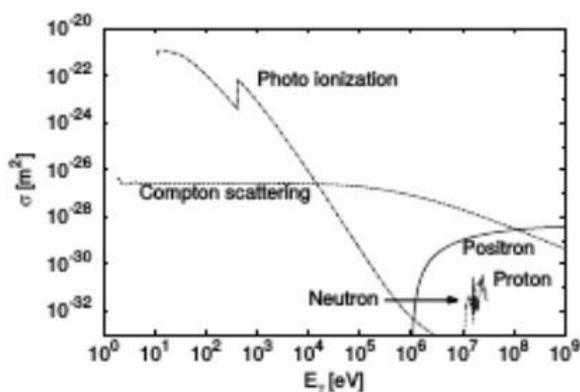


Figura 2.7: Seção de choque total para os processos de interação do fóton com o nitrogênio para o intervalo de 0-100MeV. Fonte: Köhn, 2014.

Observações do satélite Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscope Imager (RHESSI) permitiu a medida de um espectro dos TGFs que chegava a 20 MeV (Smith et al., 2005), espectro que foi estendido em outras observações, chegando até a 100 MeV pelas observações do Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero (AGILE) - (Tavani et al., 2011).

Os processos de fótons mais importantes no intervalo de 1 eV a 100 MeV são resumidos na figura 2.7.

3 PLATAFORMA CUBESATS

INTRODUÇÃO

CubeSats, acrônimo em inglês para Cube (Cubo) + Satellite (Satélite), é um tipo de satélite de pequeno porte em forma de cubo, com lados de 10 cm, podendo ser formado apenas por um cubo (denominada 1U) ou por junções de vários (2U, 3U, 6U, etc.). Um CubeSat pesa em média em torno de 1,3 kg por unidade, e comumente utiliza componentes eletrônicos já prontos, que podem ser encontrados em quase todas as lojas eletrônicas. Contudo, quanto mais sofisticado for o CubeSat, as especificações podem ficar mais restritas. CubeSats normalmente são postos em órbita por dispositivos na Estação Espacial Internacional, ou como *payloads* secundários em algum veículo lançador, cuja órbita da carga primária seja compatível.

Em 1999, California Polytech State University (Cal Poly) e a Stanford University desenvolveram as especificações padrões do que viriam a ser os CubeSats afim de promover e desenvolver as habilidades necessárias para projetar, confeccionar e testar satélites de pequeno porte para a órbita terrestre baixa. Suas especificações são de domínio público, de forma que qualquer pessoa que queira confeccionar um CubeSat pode acessá-las no site da Cal Poly.

Por serem desenvolvidos com uma arquitetura aberta para seus requisitos mais básicos, o empacotamento destes é um fim comum, de modo que o uso de módulos padrões para o desenvolvimento de missões e lançamentos ao espaço é bastante facilitado. Essa padronização simplifica a metodologia dos testes, das formas de lançamento e, por consequente, o preço final é bem mais baixo, chamando a atenção de investidores dos mais variados mercados, já que o período de desenvolvimento pode ser inferior a 18 meses e custar menos de 100 mil dólares.

Os CubeSats foram primariamente desenvolvidos com uma motivação educacional, de modo que alunos de graduação e pós-graduação pudessem ter a experiência de participar de projetos espaciais e passar por todos os níveis de produção, em uma escala adequada a suas capacidades. Em parte, para que esse objetivo pudesse ser posto em prática, visto que os custos das missões espaciais são bem elevados e restritos, fez impor um limite para a massa do satélite na ordem de 1 a 3 kg. Essa restrição de peso fez com que o uso de equipamentos leves e de pouco consumo de energia, fosse vital para que a abordagem geral do CubeSat fosse possível. Logo depois, ficou provado que esses satélites em miniatura poderiam servir a um propósito maior do que meramente educacional, algo mais abrangente, como os de maior porte.

Nos últimos anos, os CubeSats estão sendo adotados nos mais diversos setores, com aplicações civis, militares e de ciência espacial, como desenvolvimento de novas tecnologias, sensoria-mento remoto e climático.

HISTÓRIA

Como dito anteriormente, seu desenvolvimento primário foi uma forma de permitir que alunos de graduação pudessem participar de uma missão espacial por completo, mas de baixa escala e economicamente viável. Sendo assim, os professores Jordi Puig-Suari da Cal Poly e Bob Twiggs, da Universidade de Stanford, propuseram o primeiro design para referência.

A necessidade de um satélite em miniatura só ficou aparente em 1998, como resultado do trabalho de estudantes do Stanford University's Space System Development Laboratory (SSDL) em um lançador automático de picosatélites orbitais (ou OPAL, em inglês), desenvolvido desde 1995. O desenvolvimento do OPAL para lançamento de picosatélites resultou em um lançador incrivelmente complicado que funcionava com uma taxa de sucesso nada confiável. Com o projeto atrasando, Twiggs buscou financiamento na DARPA, a agência de projetos de pesquisa avançada de defesa do governo dos Estados Unidos, resultando num replanejamento no mecanismo de lançamento, agora apenas uma placa plana que empurrava o satélite para fora de um recipiente com trilhos e uma porta.

Como o desenho original dos picosatélites que o OPAL carregaria (10,1 x 7,6 x 2,5 cm) não era suficiente para ser coberto com células fotovoltaicas para a geração de energia, Twiggs propôs um cubo de 10 cm de lado como primeira tentativa de projeto para o que viria a ser chamado de CubeSat. Um modelo de lançador foi desenvolvido para o novo satélite, tendo como base a placa que empurrava desenvolvida em conjunto com a DARPA. Twiggs apresentou a ideia a Puig-Suari no verão de 1999 e, posteriormente, na conferência Japan-U.S. Science, Technology and Space Applications Program (JUSTSAP) em novembro de 1999.

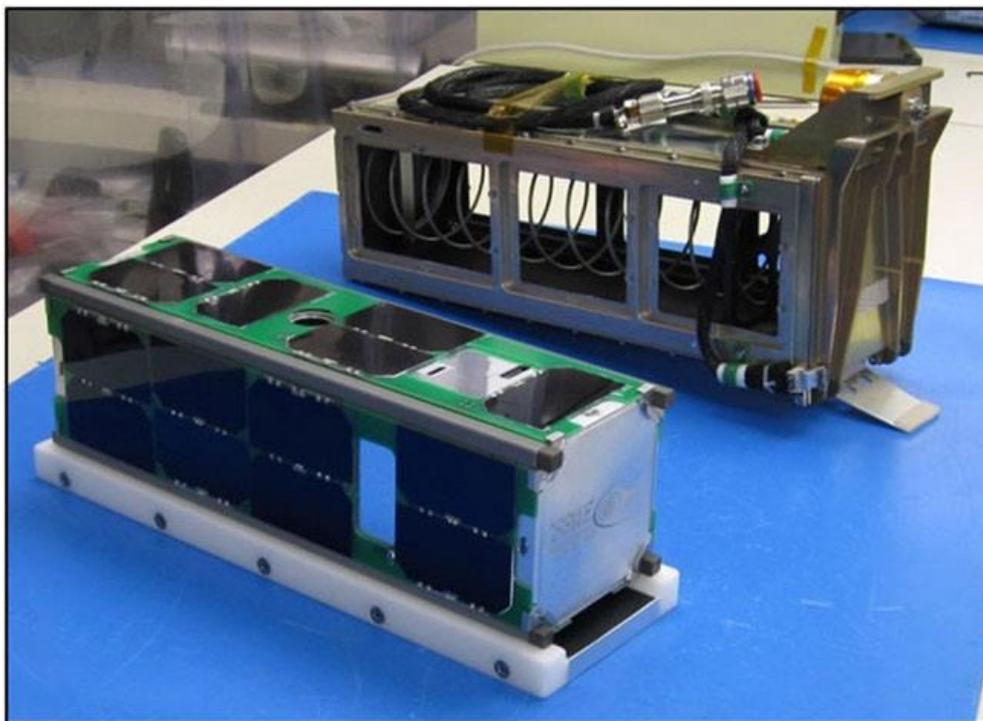


Figura 3.1: Modelo de um CubeSat 3U com sem lançador P-POD.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Uma das maiores especificações que os CubeSats abrangem é a miniaturização de quase todos os elementos que um satélite de grande porte teria, reduzindo o custo de desenvolvimento e lançamento, já que também podem ser lançados em múltiplos, utilizando a capacidade que muitos lançadores grandes têm. Esse design também diminui os riscos à carga principal do lançador e ao veículo em si, diminuindo as chances de rejeição ao lançamento que o operador da carga principal teria devido a danos. O encapsulamento do CubeSat diminui consideravelmente o trabalho de se achar uma carga primária compatível para o mesmo lançador. Essa compatibilidade propicia mudanças não previstas nas cargas e uma oportunidade de lançamento de mais fácil acesso do que se não fosse padronizada.

CubeSats por padrão são feitos de unidades de 10x10x11,35 cm projetadas de forma ao satélite ter um volume de 1 L e não pesar mais que 1,33 kg por unidade. O menor tamanho padrão é 1U (uma unidade), enquanto 3U+ é o maior, sendo composto por três unidades (10x10x30 cm). Mais recentemente, com o aumento da utilização dos CubeSats, outros modelos foram propostos, sendo 6U (10x20x30 cm) e 12U (20x20x30 cm) os mais comuns, de forma que a capacidade de execuções de tarefas dos CubeSats aumentou, abrangendo mais nichos do que simplesmente a academia e aplicações de tecnologias para algo mais complexo como ciência de ponta e defesa nacional.

Aproveitando de seu formato padronizado, todos os CubeSats podem ser lançados a partir de uma plataforma em comum, chamada Poly-Picosatellite Orbital Deployer, ou só P-POD, desenvolvida e construída pela Cal Poly.

Componentes eletrônicos não seguem um protocolo específico, contudo um cuidado maior deve ser levado em conta dependendo do tipo da missão, visto que eles serão expostos a um ambiente com radiação. Para órbitas do tipo LEO (do inglês Low Earth Orbit), onde normalmente a reentrada na atmosfera ocorre em alguns dias ou semanas, a preocupação com a radiação é mínima e eletrônicos de níveis domésticos podem ser usados sem preocupações. Para órbitas do tipo LEO em que há controle e manutenção de altitude, onde a missão pode durar meses ou anos, o risco de defeito nos componentes por causa da radiação ou simplesmente por falha é maior. Para esses casos, somente aparelhos projetados e testados para ambientes com radiação são aceitos.

Há diferentes categorias de satélites em miniaturas baseadas em suas massas. CubeSats do tipo 1U fazem parte dos picosatélites, os 3U e 6U dos nanosatélites, e os 12U+ pertencem à classe dos microsatélites.

1. Minisatélite (100-500 kg)
2. Microsatélite (10-100 kg)
3. Nanosatélite (1-10 kg)

4. Picosatélite (0.1-1 kg)
5. Femtosatélite (0.01-0.1 kg)

O número de unidades ao longo de um eixo classifica o tamanho do CubeSat das formas padrões, 1U, 2U, 3U, sendo todas as outras junções das padrões, como 6U (dois 3U conectados por outro eixo) e 12U. Os materiais usados na estrutura do satélite devem ter o mesmo coeficiente de expansão térmica que o lançador P-POD, assim como a superfície que entra em contato com ele deve ser ionizada, a fim de prevenir a solda fria. Especificamente, os materiais permitidos são quatro ligas de alumínio: 7075, 6061, 5005 e 5052. Além da solda fria, devemos levar em consideração materiais que podem ser utilizados no vácuo.

Protuberâncias além das dimensões máximas são permitidas até 6,5 mm além de cada lado, de modo que elas não devem interferir no lançamento, entrando em contato com o P-POD. Normalmente essas protuberâncias são antenas ou painéis solares. Para satélites do tipo 3U, há um limite adicional que o P-POD suporta, na forma de um cilindro de raio 3,2cm e altura 3,6cm. Normalmente esse espaço extra é preenchido com sistemas de propulsão ou antenas que não caibam no tamanho do padrão 1U.

Como os CubeSats são guardados e lançados a partir de uma carcaça, o P-POD, o nível de exigências que sua estrutura é obrigada a ter é pequena, já que essa carcaça age como um mecanismo de segurança. Dessa forma, os testes de vibração e estruturas não são tão rigorosos, sendo que, em alguns casos, é possível lançar um CubeSat sem passar por nenhum desses testes.

Como são menores e podem utilizar componentes de fácil acesso ao público, os CubeSats normalmente utilizam sistemas que já vêm com um próprio computador interno. Todavia, o uso de um computador central, para coordenar as várias tarefas que o satélite pode ter, ainda é essencial. Com o advento de várias tecnologias portáteis ao longo dos últimos anos, é possível montar um computador da mesma forma que alguém montaria em casa, mas que cabe dentro de um cubo de 10cm. Dependendo da aplicação, esse computador interno pode abranger mais que uma unidade, fazendo com que um satélite básico só de 1U não seja possível.

As tarefas a que o computador central do CubeSat está sujeito incluem a compressão, o processamento e a análise de dados, assim como o controle de altitude, manobras orbitais, controle térmico e energético. Para missões com alto risco é sugerido o uso de componentes específicos ao ambiente espacial, além do uso de redundância nos componentes eletrônicos, visto que os mesmos estão sujeitos à mais radiação que a superfície da Terra.

Durante sua deposição em órbita, os CubeSats normalmente saem girando, algumas vezes de forma coordenada, outras não. Dependendo do uso com que foi desenvolvido, ele pode operar normalmente nessa forma desgovernada ou necessita de algum dispositivo de controle. Esses sistemas que realizam o controle da órbita e orientação podem ser:

- Propulsores;
- Rodas de reação;

- Giroscópios;
- Magnetorques;
- Rastreadores de estrelas;
- Sensores de taxas angulares;
- Receptores de GPS;
- Antenas.

Os CubeSats cujo tempo de missão são mais longos precisam de um sistema de propulsão para serem mantidos no curso correto. Nesses casos, sua principal carga útil é o sistema de propulsão, ocupando um grande espaço no satélite e merecendo um cuidado especial quanto ao seu manuseio na hora do lançamento para não haver danos.

Diferente dos satélites de grande porte que requerem sistemas de propulsão espaciais que utilizam combinações de altas pressões, grande densidade de energia e materiais perigosos, os CubeSats têm especificações limitadas. As Especificações de Projetos de CubeSats (CDS em inglês) limitam essas combinações a pressões de 1,2 atm, 100 Wh de energia química e elementos perigosos.

As tecnologias mais empregadas e que mais evoluíram em uso no CubeSats são:

1. Aceleradores por Gás Frio

- Onde um gás inerte, como o nitrogênio, é posto em um tanque pressurizado e ejetado a partir de uma tubeira, produzindo aceleração.
- São bastante seguros, pois não utilizam de gases perigosos em sua grande maioria.
- Contudo, como sua performance é baixa, seu uso como sistema de propulsão primário é limitado, sendo mais usado para controle de altitude.

2. Propulsão Química

- Onde uma reação química produz um gás com alta pressão e temperatura que ao ser ejetado, produz aceleração.
- O propelente pode ser líquido, sólido ou um misto dos dois.
- Tendem a ter um grande empuxo, sendo de baixa complexidade e relativamente pequenos.
- No entanto, estão sujeitos a mais restrições devido ao caráter perigoso de seus propelentes.

3. Propulsão Elétrica

- Utilizam energia elétrica para acelerar o propelente a altas velocidades, resultando num grande impulso específico.
- Boa parte desses sistemas podem ser diminuídos à escala do CubeSat sem perder eficiência.
- Nessa classe estão incluídos os motores de Efeito Hall, de Ions, Plasma Pulsado, Resistojets e electrosprays (ou Acelerados Coloidais).
- Podem levar CubeSats a órbitas além da terrestre, contudo seu consumo de energia é alto, comprometendo grande parte do CubeSat a somente elementos provedores de energias, como painéis solares.

4. Vela Solar

- Utilizam apenas a radiação solar que incide em espelhos ultrafinos, impulsionando-o a grandes velocidades sem a necessidade de propelentes.
- Como requerem velas com uma grande área para serem eficientes, comprometem grande parte do satélite somente para isso.
- Por serem estruturas, que ao serem liberadas necessitam de um grau de complexidade alto, estão sujeitas a falhas mais comuns e ao aumento do custo do projeto.

A fonte primária de energia dos CubeSats vem de células solares, que convertem a luz solar em energia elétrica, também alimentando baterias de íons de lítio para o satélite utilizar quando ficar eclipsado pela Terra ou durante picos de processamento. Como a área superficial dos CubeSats é limitada para o uso somente dos painéis solares, as baterias de íons de lítio são perfeitas para eles, pois entregam uma razão de massa-energia muito alta.

Devido ao fato de sua energia disponível ser limitada, a potência utilizada por suas antenas de comunicação é limitada a 2W. Elas podem usar as bandas VHF, UHF, L-, S- e C- para comunicações em órbitas baixas e a Banda-X e a Banda Ka, para missões em órbitas de espaço profundo, necessitando de antenas maiores e mais potentes, assim ocupando um espaço maior no CubeSat. Novos estudos estão sendo realizados para melhorar a eficiências dessas antenas.

PANORAMA COMERCIAL E CIENTÍFICO DOS CUBESATS

Mesmo que historicamente o primeiro CubeSat lançado ao espaço tenha sido em 2003, podemos adotar o ano de 2005 como o início oficial da era dos CubeSats. De 2005 a 2012, com o advento de tecnologias outrora complexas demais mas que agora estavam acessíveis a uma grande parcela da população e cada vez mais compactas, houve uma época de experimentação dos dispositivos nos CubeSats, resultando em quase um lançamento por mês durante todos esses anos. Entre 2013 e 2015, o número de CubeSats lançados teve um crescimento quase exponencial se comparado ao período anterior. Isso fica evidente quando olhamos para a figura 3.2, que fornece o número de lançamentos por ano divididos por categorias de especificidade.

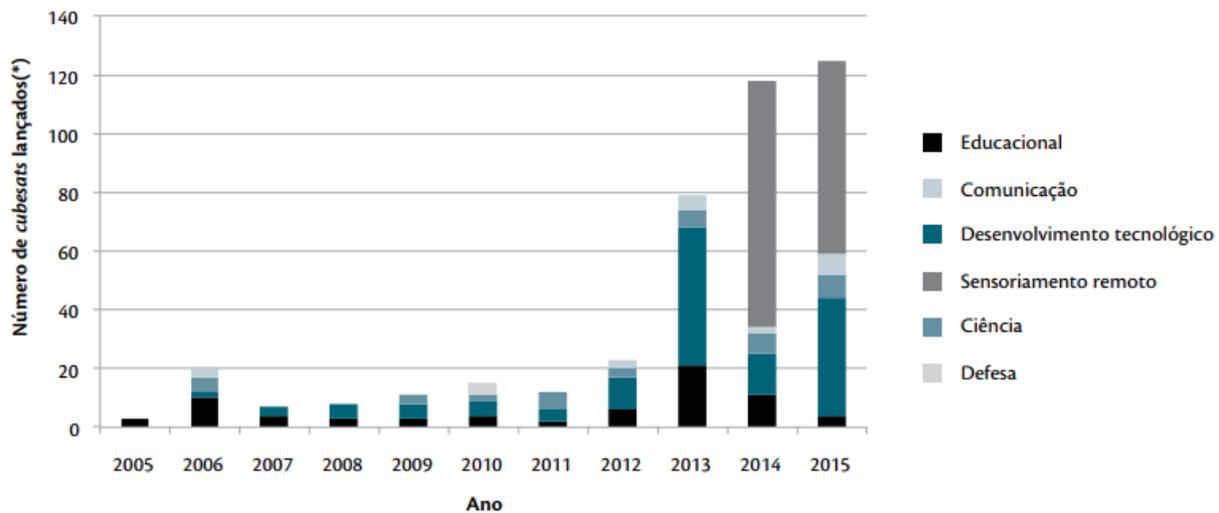


Figura 3.2: Número de CubeSats lançados por ano no período entre 2005 e 2015 e as aplicações genéricas para as quais foram destinados, de acordo com o banco de dados de CubeSats da Saint Louise University.

Nesta sessão serão abordadas as atividades técnico-científicas relacionadas aos CubeSats no período entre 2005 e 2015, fundamentadas na base de dados públicos da Saint Louis University, dos EUA, uma das mais completas e confiáveis acerca do tema.

Com 76% dos lançamentos até 2015, os Estados Unidos, são por uma grande margem, os maiores líderes do setor, sendo seguidos por países como o Japão, Dinamarca, Alemanha, Singapura, China e mais de 30 países. O Brasil até 2015 havia lançado 3 CubeSats, sendo o primeiro em 2014, com outros em desenvolvimento.

O NanoSatC-Br1, do tipo 1U, lançado em 2014, foi o primeiro CubeSat brasileiro lançado ao espaço. Foi desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) com a finalidade de de treinar os estudantes, com um desenvolvimento tecnológico que não havia no país e com aplicações científicas, como o estudo da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e testes de circuitos integrados que foram projetados no país.

O AESP-14 foi o segundo cubesat brasileiro desenvolvido e mandado ao espaço. Foi lançado a partir da Estação Espacial Internacional no começo de 2015, no entanto uma falha no sistema de abertura de uma antena de transmissão impediu o seu funcionamento.

O Serpens, do tipo 3U foi o terceiro CubeSat brasileiro lançado ao espaço em agosto de 2015 a bordo de um veículo japonês H-IIB, tendo como objetivo primário a qualificação de engenheiros e estudantes brasileiros, envolvendo diversas universidades brasileiras (entre elas a UnB), uma espanhola e duas dos Estados unidos, além da Agência Espacial Brasileira, AEB. Ficou operacional até março de 2016.

Outros CubeSats estão em desenvolvimento no país para lançamentos futuros e, embora seja bastante discreto, é um cenário parecido com o dos Estados Unidos no começo das missões por lá. Apesar das universidades continuarem sendo as maiores forças no setor, várias empresas dos

mais variados setores já investem nesse novo mercado, totalizando algo em torno dos 40% da frota total dos CubeSats. No Brasil, os principais desenvolvedores dessas tecnologias são organizações governamentais como o Inpe e a AEB e instituições de ensino superior.

Mesmo que o crescente uso e pesquisa em CubeSats tenha crescido muito ao longo da última década, a desconfiança a cerca desses artefatos ainda é grande, visto que uma grande quantidade de defeitos ainda ocorrem, seja quando são inseridos em suas órbitas onde 30 % não cumpriram de maneira satisfatória suas missões, seja quando são lançados, onde o número de perdas é muito grande devido ao fato de vários serem lançados no mesmo veículo, visando uma diminuição de custo.

Entre os anos de 2005 e 2015, o aumento das produções técnico-científicas vem aumentando de forma que mais de 1300 documentos em diferentes áreas de conhecimentos foram lançados, sendo engenharia com o maior número, seguida por ciências da Terra, física e astronomia, computação, ciência dos materiais e outras. Nessa mesma época também fica evidente o aumento de patentes do setor, sendo os Estados Unidos os maiores detentores com 87 %, seguido da China com 4% e o restante, distribuído por vários países. Dessas patentes, percebe-se que quase metade é de empresas privadas do setor de defesa ou aeroespacial, comprovando a solidez dessa nova área.

4 DETECTORES DE ALTAS ENERGIAS

Para falar dos detectores, precisamos primeiro estabelecer o que ele detecta. Descreveremos o que é radiação, como ela se manifesta, meios em que é transportada, fontes primárias, interações com diferentes tipos de materiais e, por fim, os detectores. Nesse capítulo, veremos esses conceitos básicos até chegar a algo mais específico.

RADIAÇÃO

Radiação ionizante

Uma radiação é dita ionizante quando tem energia suficiente para retirar um elétron da nuvem eletrônica de um átomo. Alguns tipos de radiação ionizantes são:

1. Radiação Gama, que consiste de fótons com energias maiores que 50 KeV, com alto poder de penetração e de ionização do meio.
2. Radiação Beta-minus (β^-), que é um elétron energético, gerado normalmente em decaimento radioativo de nêutrons em prótons em núcleos atômicos, liberando um elétron e um antineutrino. Beta-plus (β^+) é a emissão de um pósitron, a antimatéria de um elétron, que ocorre em um processo de neutronização.
3. Radiação Alfa, núcleos de Hélio-4 que, por causa da carga e massa combinada das partículas, interage fortemente com a matéria.
4. Radiação de Nêutrons consiste em nêutrons livres, categorizados pela sua energia/velocidade e são produzidos a partir de decaimento natural de determinado elemento ou em reações de fissão ou fusão nuclear. São de grande poder de ionização e penetração, requerendo barreiras densas. São o único tipo de radiação que pode tornar um outro material radioativo.
5. Radiação ultravioleta e raios-X, ou seja, fótons com energia entre dezenas de eV e 50 keV.
6. Como dito no capítulo 2, raios cósmicos, por serem muito energéticos, podem ser enquadrados na categoria de radiação ionizante. Normalmente são prótons ou partículas alfas.

Radiação não-ionizante

Do outro lado do espectro eletromagnético, temos as radiações não ionizantes, cuja energia é pequena ao ponto de não conseguir produzir íons quando interage com a matéria. Seus fótons têm energia suficiente apenas para mudar as configurações rotacionais, vibracionais ou da camada eletrônica de valência.

Como exemplo dessas radiações temos a luz visível, infravermelha, micro-ondas e as ondas de rádio.

4.2 INTERAÇÕES DAS RADIAÇÕES COM MATÉRIA

Toda radiação transporta energia e para essa energia ser detectada, ela precisa interagir com algum meio, depositando um pouco ou toda a energia da partícula fonte no meio. Esse depósito nada mais é do que uma forma excitação do material, podendo ser ionizante ou não. É essa excitação que, a partir do tipo da física envolvida, pode ser analisada com detalhes por meio de algum processamento eletrônico.

Como exemplo dos mecanismos mais usados na detecção de partículas, temos a ionização e a cintilação. Nesses dois mecanismos, temos os seguintes modos de interações entre a partícula e o material do detector:

1. Espalhamento Elástico

- Processo onde a partícula incidente, ao interagir com o alvo, espalha de uma maneira que toda a energia do sistema continue constante.
- Há ocasiões especiais onde a partícula incidente transfere nada ou quase nada de energia para o alvo, sendo o espalhamento de Rayleigh um exemplo.

2. Espalhamento Inelástico

- Neste processo, a energia do sistema continua constante, todavia a energia cinética não é conservada, porque parte dela vai para o processo de excitação.

3. Aniquilação

- Quando uma partícula interage com sua antipartícula, resultando na aniquilação de ambas e gerando novas partículas, cujas energias são a soma das duas primárias.
- O tipo mais comum é a aniquilação de elétron-pósitron.
- Pode ocorrer mesmo quando as partículas estão em repouso.

4. Bremsstrahlung

- Vem do alemão para "radiação de frenagem".
- É o processo no qual partículas carregadas desaceleram emitindo radiação.
- Todas as partículas, se tiverem energia suficientemente maior que sua energia de repouso, emitirão esse tipo de radiação quando passam por um meio.

5. Radiação Cherenkov

- Quando uma partícula carregada com massa de repouso diferente de zero tem energia grande o suficiente para viajar mais rápido que a luz em um determinado meio, como a água, haverá a emissão de radiação de Cherenkov.
- É emitida na forma de um cone de luz.

Em especial, neste trabalho abordaremos apenas as interações de fótons com a matéria, deixando de lado as interações das outras partículas, visto que o objetivo primário da pesquisa é a interação de raios gama com seu detector.

Fótons podem interagir primariamente com o meio em três diferentes possibilidades: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Todavia, outros tipos de interação podem ocorrer, como o Rayleigh. Esses mecanismos de interações têm diferentes limiares de energia e regiões de grandes seções de choque para materiais diferentes. Como nem todos os fótons que atravessam o meio irão interagir da mesma forma, devemos explorar o problema por um viés estatístico, levando em consideração o peso que cada interação terá em determinado meio.

Efeito fotoelétrico

É um efeito bem simples que ocorre quando uma luz é incidida em um material, emitindo elétrons. Essa emissão de elétrons não depende da intensidade da luz, mas sim de sua frequência. Se ela for mais baixa que um certo valor característico de cada material, não ocorrerá a emissão de nenhum elétron.

A energia do fóton incidente é dada por:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

onde ν e λ são a frequência e o comprimento de onda da luz respectivamente c é a velocidade da luz no vácuo. Como os elétrons do material são ligados, para liberá-los a energia incidente do fóton tem que ser maior ou igual à energia de ligação, assim:

$$E_{\gamma} \geq \phi \quad (4.2)$$

Um aspecto curioso do efeito fotoelétrico é que se o fóton incidente tiver energia suficiente para superar a energia de ligação de um elétron de camada mais interna, esse elétron será emitido deixando uma vacância para trás. Essa vacância pode ser preenchida por um elétron de camada mais externa para estabilizar o átomo, emitindo um fóton com energia igual a diferença de energia entre as duas camadas. Esse fótons normalmente são de raios-X e são chamados fótons fluorescentes.

Espalhamento Compton

É um espalhamento inelástico de fótons por elétrons livres ou fracamente ligados que estão em repouso. Os fótons emitidos neste processo têm um comprimento de onda diferente do incidente e essa diferença pode ser explicada pelo elétron ejetado do átomo.

Em elementos com baixo número atômico, a energia de ligação é da ordem de alguns eV, sendo que fontes de raios-X usadas em experimentos em laboratórios é da faixa de centenas de keV. Essa diferença faz com que os elétrons sejam considerados quase livres e em repouso em respeito ao fóton incidente.

É possível derivar a relação entre os comprimentos de onda incidentes e espalhados pelas leis de conservação de momento linear e de energia.

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) \quad (4.3)$$

Em que λ_0 e λ representam os comprimentos de onda incidente e espalhado respectivamente, m_0 é a energia de repouso do elétron e θ é o ângulo entre o fóton incidente e o espalhado.

Em termos das energias dos fótons, a equação anterior pode ser escrita como:

$$E_\gamma = E_{\gamma 0} \left[1 + \frac{E_{\gamma 0}}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta) \right]^{-1}, \quad (4.4)$$

onde a relação $E_\gamma = hc/\lambda$ foi utilizada.

Essa relação nos diz que a energia do fóton espalhado depende não só da energia do fóton incidente mas também do ângulo de espalhamento, ou seja, há uma dependência direcional de modo que o processo não é isotrópico.

Espalhamento Thompson

É um espalhamento inelástico da mesma forma do espalhamento Compton, no entanto, ocorrem em energias muito baixas, onde os efeitos quânticos não são significantes, podendo derivar suas propriedades a partir da teoria eletromagnética clássica.

A seção de choque diferencial e total são dadas por:

$$\frac{d\sigma_{th}}{d\Omega} = r_e^2 \sin^2\theta \quad (4.5)$$

e

$$\sigma_{th} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 6.65 \cdot 10^{-29} \text{m}^2, \quad (4.6)$$

em que θ é o ângulo de espalhamento do fóton com respeito a sua direção original e r_e é o raio do elétron clássico.

Espalhamento Rayleigh

É um processo elástico, aplicável quando o raio do alvo é muito menor do que o comprimento de onda do fóton incidente. Um fóton de espalhamento Rayleigh tem quase o mesmo comprimento de onda do fóton incidente, o que implica que a energia transferida no processo é quase nula.

A seção de choque nesse caso é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda incidente e pode ser escrita como:

$$\sigma_{ry} = \frac{8\pi a^6 h^2 \pi n_m^4}{3 \lambda_0^4} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \quad (4.7)$$

Onde λ_0 é o comprimento de onda do fóton incidente, a é o raio da partícula alvo que irá interagir com o fóton incidente e $m = n_s/n_m$ é a razão do índice de refração da partícula alvo com o meio que a envolve.

Produção de pares

Podemos pensar na produção de pares como um efeito inverso da aniquilação elétron-pósitron, contudo há uma diferença que deve ser levada em conta. A produção de pares só ocorre se houver outra partícula na vizinhança do evento para garantir a conservação do momento enquanto que a aniquilação não necessita disso para ocorrer.

Partindo do pressuposto que a energia é convertida em duas partículas que têm massas discretas, então deve haver uma energia mínima necessária para esse processo ocorrer. Neste caso, o fóton deve ter energia equivalente a pelo menos as massas de repouso de dois elétrons.

$$E_{\gamma, \text{thresh}} \geq 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad (4.8)$$

Onde m_e é a massa do elétron ou pósitron.

A seção de choque da produção de pares para fótons de alta energia, ou seja, $E > 20 \text{ MeV}$, tem uma dependência de Z^2 , onde Z é número atômico do material. Isso nos diz que para elementos mais pesados, a seção de choque para a produção de pares é bem maior do que para elementos mais leves.

$$\sigma_{\text{pair}} \propto Z^2 \quad (4.9)$$

PASSAGEM DOS FÓTONS ATRAVÉS DA MATÉRIA

Sabendo os processos aos quais os fótons estão sujeitos ao interagirem com a matéria, devemos saber como retirar as informações necessárias de um feixe incidente em algum detector.

Um feixe de fótons consiste num número grande de fótons movendo em linha reta, monocromático ou não, e com uma energia variando ao redor de um valor médio. Dependendo da energia individual do fóton, cada um dos processos citados na seção anterior podem influenciar de maneira distinta. Assim, torna-se quase impossível de afirmar com absoluta certeza que um fóton com determinada energia irá interagir de uma maneira específica com um átomo. Um modo de contornar esse fato é que quando uma quantidade grande de fótons interagem com algum meio, podemos prever, com certa precisão, os mecanismos envolvidos nos processos por meio de quantidades estatísticas como a seção de choque.

Em medidas de radiação, um feixe de fótons é relativamente fácil de se lidar do que com partículas massivas, visto que as interações dos fótons com a matéria são localizadas e discretas. Ou seja, um fóton que não interagiu com nenhuma outra partícula não perderá sua energia e permanecerá parte do feixe. Isso quer dizer que a energia de todos os fótons que não interagem no feixe continuarão constantes enquanto o feixe atravessa o material, mas a energia dos que interagem diminuem e a intensidade total do feixe pós evento também diminuirá.

Sabendo que a intensidade do feixe, em qualquer ponto do material atingido, decresce por unidade de comprimento e depende da intensidade naquele ponto, ou seja:

$$\frac{dI}{dx} \propto -I \Rightarrow \frac{dI}{dx} = -\mu_t I, \quad (4.10)$$

onde dI é a variação na intensidade do feixe enquanto ele atravessa o meio através de uma profundidade dx , μ_t é o coeficiente total de atenuação linear, que depende do tipo de material e da energia do fóton. Integrando a equação anterior, teremos:

$$I = I_0 e^{-\mu_t x}, \quad (4.11)$$

onde I_0 é a intensidade do feixe de fótons logo antes da interação ocorrer e I é a intensidade numa profundidade x .

O coeficiente de atenuação total linear das relações anteriores determina quão rápido ou devagar um feixe de fótons terá sua intensidade atenuada enquanto passa por um meio, sendo uma função que não depende apenas da energia do feixe, mas também do tipo e da densidade do material. Fazer uma tabela levando em conta esses três parâmetros seria um problema, tendo que testar quase todas as possibilidades possíveis, então em vez do coeficiente de atenuação linear total, usamos uma quantidade relacionada ao mesmo, o coeficiente de atenuação da massa, definido por

$$\mu_m = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (4.12)$$

onde ρ é a densidade do material. Utilizar μ_m é melhor, porque é um coeficiente que não depende do estado do material, assim o coeficiente de atenuação linear pode ser deduzido simplesmente pela densidade do material.

O coeficiente de atenuação caracteriza a probabilidade de interação de fótons em um meio e, como a seção de choque também caracteriza isso, as duas quantidades podem ser relacionadas. Podemos fazer isso escrevendo μ_t em termos de σ_t

$$\mu_t = \sigma_t N = \sigma_t \frac{\rho N_A}{A}, \quad (4.13)$$

Onde N representa o número de átomos por unidade de volume no material com número atômico A e ρ , sua densidade.

Com isso em mente, como determinar o coeficiente de atenuação para um determinado material? Podemos fazer isso somando as seções de choque que os diferentes processos citados anteriormente contribuirão, já que há uma relação direta entre o coeficiente de atenuação e as seções de choques, assim 4.13 fica:

$$\mu_t = \sigma_t N = \sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_{\gamma} + \sigma_{pair} + \dots \frac{\rho N_A}{A} \quad (4.14)$$

Medindo o coeficiente de atenuação

Da equação 4.11, podemos ver que o coeficiente de atenuação linear total pode ser escrito como

$$\mu_t = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I} \quad (4.15)$$

Tendo isso, para determinar μ_t precisamos medir a radiação incidente e a radiação pós interação com o material do feixe de fótons que passa através de um profundidade d . Um esquema desse experimento é mostrado na figura 4.1. Devido à dependência da energia no coeficiente de atenuação, ou a fonte deve ser capaz de enviar um feixe monocromático ou alguma configuração que deixe o feixe monocromático deve ser usada.

Misturas e materiais compostos

Para obtermos o coeficiente de atenuação de algum composto ou mistura, devemos levar em conta a média ponderada das componentes individuais de acordo com

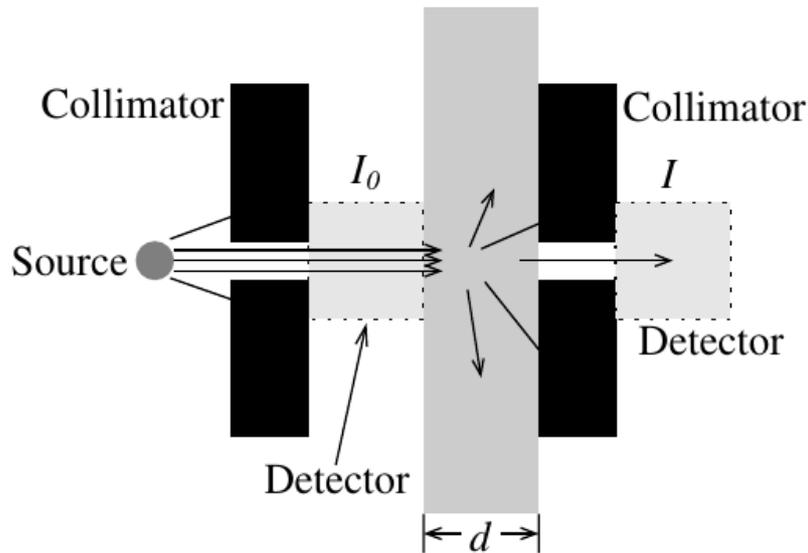


Figura 4.1: Esboço de uma configuração simples para determinar o coeficiente de atenuação no material. As intensidades incidentes e transmitidas (I_0 e I) são medidas por dois detectores antes e depois da placa do material cujo coeficiente será determinado.

$$\mu_t = \sum_i \omega_i \mu_t^i \quad (4.16)$$

e

$$\mu_m = \sum_i \omega_i \mu_m^i, \quad (4.17)$$

onde ω_i é o peso da fração do i -ésimo elemento na mistura ou composto usado, tendo coeficientes de atenuação total linear e total de massa μ_t^i e μ_m^i , respectivamente.

DETECTORES

Sabendo os processos aos quais um feixe de fótons está sujeito ao interagir com o meio e como retirar informações desse feixe após essa interação, com um meio, podemos começar a montar especificações diferentes de detectores. Esses detectores podem ser gases, líquidos de estado sólido ou cintiladores.

Detectores preenchidos por gases

Como configuração básica um detector gasoso consiste de um recipiente preenchido com algum gás entre dois eletrodos. Aos eletrodos são aplicadas diferenças de potencial da ordem de pouco menos de 100 volts a alguns milhares de volts, dependendo do design e de seu modo de operação. A criação e o movimento de pares carregados devido à passagem de radiação no

gás perturba o campo elétrico externo aplicado no gás pelos eletrodos, produzindo um pulso nos mesmos. Esse pulso nos eletrodos pode ser medido e assim serem extraídas informações acerca do feixe como sua energia e/ou sua intensidade.

Os tipos mais básicos de detectores são:

- Câmaras de ionização
- Contadores Proporcionais
- Tubos de Geiger-Müller

Detectores preenchidos por líquidos

Funcionam de maneira análoga aos detectores gasosos, ou seja, quando um feixe de radiação passa por ele, um par carregado é produzido e pode ser detectado através de eletrodos que produzem pulsos elétricos. Contudo, diferente dos gases, a energia necessária para criar pares carregados depende do tipo do líquido.

O princípio básico da criação de pares carregados em um líquido é o mesmo que em um gás. No entanto, os estados energéticos no estado líquido são diferentes daqueles no estado gasoso, tornando o processo nos líquidos um pouco mais complicado. Deve-se notar que os níveis de energia em um gás são discretos enquanto que em líquidos, pelas moléculas estarem mais próximas, os níveis de energia formam uma banda de valência e condução. Em líquidos, a diferença entre a parte inferior da banda de condução e a superior da de valência é o intervalo da banda, que determina a energia requerida por um elétron na banda de valência para pular para a banda de condução e se tornar livre para se mover. Em um gás, esse intervalo é muito maior e, portanto, requer mais energia para forçar um elétron a um dos níveis de energia de valência para tornar-se livre.

Os tipos mais básicos de detectores são:

- Câmaras preenchidas por líquidos
- Contadores proporcionais líquidos
- Detectores Cherenkov
- Câmaras de bolhas
- Detectores de líquidos cintiladores

Detectores de estado sólido

Para conseguir uma boa medida para produções de pares carregados cuja energia é baixa, necessitamos de detectores de estado sólido, cuja densidade é maior do que a de líquidos e gases.

Há diferentes tipos de detectores e como não são nosso foco desse trabalho, citaremos apenas o básico deles.

1. Semicondutores

- São basicamente sólidos cristalinos nos quais átomos são mantidos juntos por forças covalentes.
- São chamados assim porque sua condução elétrica fica em um meio termo entre os isolantes e os condutores.
- São vulneráveis a danos por radiações indesejadas.

2. Diamantes

- A energia necessária para criar um buraco de pares de elétrons em diamantes é muito maior do que em silício, um material comum de semicondutores, devido a uma diferença no intervalo da banda maior.
- O sinal de saída será significativamente menor do que em um semicondutor, implicando em um ruído menor e, por consequência, um sinal melhor.
- Outro ponto positivo é a baixa constante dielétrica do diamante, o que implica numa capacitância menor se comparada ao silício

3. Termoluminescentes

- Detectores que emitem luz a partir de estimulação térmica.
- Um material termoluminescente é um tipo de dispositivo de memória que é capaz de reter informação sobre doses de radiação por um longo tempo ou até sua temperatura ser aumentada acima de um certo nível.

Detectores cintiladores

Nosso foco será nesse tipo de detector, visto que foi o usado no trabalho em questão. Tem como característica básica a emissão de fótons quando alguma radiação interage com os átomos do material cintilador que forma o detector e transfere alguma energia. Essa radiação incidente excita os átomos, levando-os a um breve estado excitado, e quando voltam ao seu estado natural emitem fótons, em sua maior parte no visível e no ultravioleta.

Os passos básicos que envolvem a detecção de radiação em cintiladores são:

- Interação da radiação com o material cintilante.
- Transferência de energia aos estados ligados do material.
- Relaxamento dos estados excitados para os estados fundamentais resultando em emissões de fótons.

- Coleta de fótons por um fotodetector
- Detecção do sinal do fotodetector por circuitos eletrônicos no dispositivo.

A eficiência que um material cintilador típico tem em emitir luz após absorver radiação varia entre 10% e 15%, o que leva a crer que a cintilação não é um processo eficiente. Contudo, uma maneira de contornar esse fato é usar um detector de fótons que tenha uma eficiência grande em coletar e contar os fótons. Esses detectores podem ser tubos fotomultiplicadores ou fotodiodos.

O princípio básico de um tubo fotomultiplicador ou TFM consiste na conversão do fóton cintilante em um elétron, e então, a multiplicação desse elétron em um número muito grande de elétrons. Essa conversão de fótons em elétrons ocorre em um material chamado de fotocátodo. Os elétrons produzidos no fotocátodo são acelerados em direção a uma estrutura metálica chamada **dynodo** que libera um grande número de elétrons por causa do impacto, Esses elétrons secundários são então acelerados em direção a outro **dynodo**, o que também multiplica seus números. Esse processo é repetido diversas vezes ao se deixar os elétrons passarem por uma série de **dynodo**s, resultando em um pulso de saída com uma amplitude muito maior e mais fácil de ser detectado que o incidente. O ganho de um TFM pode ser maior que 10^5 . O ponto negativo é a baixa eficiência quântica do processo de conversão fóton-elétron, que para um fotoeletrodo típico é da ordem de 20%, implicando no fato de que 80% dos fótons cintilantes são perdidos.

Outro tipo de detector, o fotodiodo, pode ser usado para detectar fótons produzidos por materiais cintilantes. Um fotodiodo é feito de um material semicondutor dopado intencionalmente. Nesse tipo de detector, os fótons cintiladores produzem pares de buracos de elétrons em vez de apenas elétrons como no TFM. A eficiência quântica de um fotodiodo pode ser maior que 80%, tornando-o atrativo para ambientes de baixo nível de radiação. Para medidas muito sensíveis em campos de baixa radiação, um outro tipo especial de fotodiodo é usado, o fotodiodo de avalanche, onde os pares de buracos de elétrons produzidos pela radiação incidente são multiplicados através de um processo de avalanche. Esse processo é análogo à multiplicação de elétrons em um TFM exceto que neste caso não há um mecanismo de **dynodos** envolvidos, tornando o sistema menos suscetível a danos causados por choques mecânicos. O resultado da multiplicação dos buracos de elétrons é a transformação de um sinal fraco em um pulso largo o suficiente para ser medido por componentes eletrônicos.

O mecanismo de cintilação

Quando uma radiação atravessa um material cintilador, ela deixa parte de sua energia nas partículas no caminho traçado. Se a energia for maior que o intervalo da banda do material, elétrons na banda de valência pulam para a banda de condução. A vacância deixada pra trás na banda de valência pelos elétrons produz um efeito de carga positiva chamada **buraco**. Ambos o elétron na banda de condução e o buraco na banda de valência são livres para se mover ao redor do material. Eventualmente o elétron na banda de condução cai a um nível de energia abaixo do nível da banda de condução. Se essa energia for o centro luminescente do material, o elétron pula

mais abaixo até o centro luminescente mais baixo e/ou emite um fóton cintilante ou dissipa sua energia através de meios não radiantes. Daí, o elétron pula para a banda de valência e combina com o buraco.

O elétron na banda de condução também pode pular para uma chamada armadilha de elétrons. Essas armadilhas são estados de energia metaestáveis que são formados por impurezas e/ou defeitos. Um elétron aprisionado pode ficar lá por um período de tempo que pode ser longo como uma hora e curto como um nanosegundo. Eventualmente o elétron pula de volta à banda de condução depois de receber energia suficiente por agitação térmica ou outros meios. De lá ele pode pular ao centro de luminescência causando a emissão de luz cintilante.

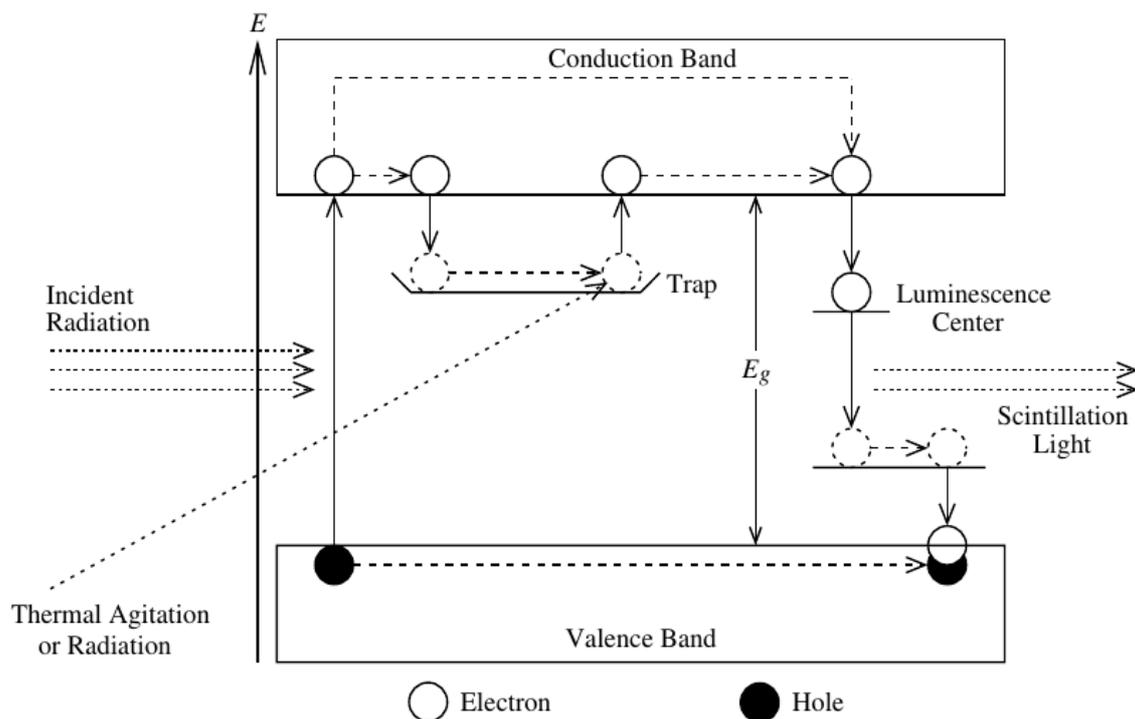


Figura 4.2: Princípio da produção de luz cintilante rápida e atrasada pela radiação incidente.

Cintiladores orgânicos

Uma das maiores vantagens de cintiladores orgânicos é que podem ser produzidos em teoria em qualquer geometria e, portanto, podem ser customizados para aplicações específicas. Seu funcionamento básico é a fluorescência ou a emissão imediata de luz, seguindo as transições eletrônicas do estado-S.

As formas mais usadas de cintiladores orgânicos são:

1. Cintiladores plásticos

- São quimicamente estáveis

- Têm um alto grau de homogeneidade ótica
 - Podem ser modelados em virtualmente qualquer formato.
2. Cintiladores líquidos, geralmente são compostos pelos seguintes componentes:
- Flúor primário, o cintilador primário da mistura. Tem alta eficiência cintilante mas produz luz no espectro do ultravioleta.
 - Wavelength Shifter, que transforma a luz ultravioleta dos cintiladores de flúor em luz visível, normalmente luz azul.
 - Líquido base, com boas propriedades de transmissão de luz que servem de mistura homogênea para os cintiladores citados acima.
3. Cintiladores cristalinos, os quais têm como vantagem sobre os cintiladores cristalinos inorgânicos as seguintes razões:
- Não-higroscopicidade
 - Pequena retrodifusão.

Cintiladores inorgânicos

A maioria dos cintiladores inorgânicos tem estruturas cristalinas, fazendo com que tenham um número de átomos maior do que os orgânicos, o que os torna mais atrativos em aplicações onde um grande poder de parada na radiação incidente é desejado. Outra vantagem é uma saída luminosa maior que os cintiladores orgânicos.

Alguns mecanismos de cintilação:

- Luminescência exciton:

Quando a radiação passa por um cristal cintilador inorgânico, produz um "par de buraco de elétrons" e dependendo da energia depositada na molécula do cristal, o par pode ficar livre para se mover ou continua parcialmente ligado pela atração de Coulomb. Se a energia for grande o suficiente para o elétron pular para a banda de condução, então se torna livre e, nesse caso, o buraco, com uma carga efetiva positiva, também pode se mover pelo cristal. No entanto, se a energia depositada não for grande o suficiente, os elétrons ficam parcialmente ligados ao buraco. Isso pode ser visto com um pulso do elétron a uma banda logo abaixo da banda de condução (como na figura 4.3). Essa dependência entre o elétron e o buraco não é muito forte, já que uma pequena quantidade de energia a mais que o elétron possa receber faz com que ele possa ir a uma banda de condução. Nesse estado ligado, o elétron e o buraco formam um sistema chamado "exciton", que tem uma curiosa propriedade de poder se mover pelo material como uma entidade e pode ser retida por uma impureza ou defeito no cristal. Se esse defeito for luminoso, uma emissão de um fóton cintilante ocorre quando o elétron cair a um nível energético mais baixo. Esse processo normalmente é chamado de auto-aprisionamento de excitons.

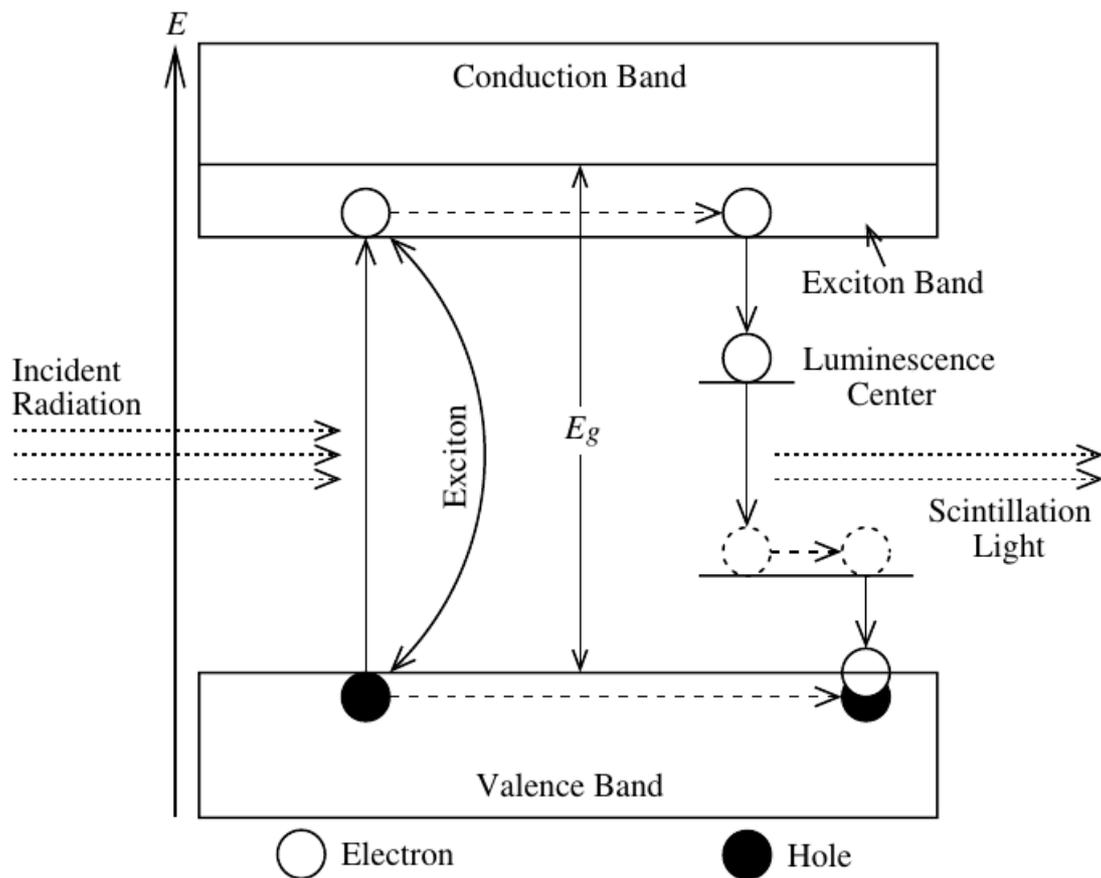


Figura 4.3: Princípio da luminescência exciton de um exciton parcialmente ligado em um cintilador orgânico.

- Luminescência dopada

Alguns cintiladores carregam impurezas ou dopadores para aumentar suas propriedades cintiladoras. Se um elétron é aprisionado num nível dopado e de lá cair a um nível de baixa luminescência, luz cintilante é emitida.

- Luminescência do núcleo da banda de valência

Se a radiação incidente depositar energia suficiente na estrutura cristalina, pode elevar elétrons das partes mais profundas do núcleo de valência até a banda de condução, deixando um buraco para trás. Esse buraco é preenchido com um elétron da banda de valência rapidamente, resultando na emissão de luz.

As principais propriedades que se levam em consideração na escolha de um material para o detector são o comprimento de onda máximo de emissão λ_{\max} e o rendimento luminoso dN/dE .

A seguir, são listados alguns materiais com suas principais características:

1. Iodeto de sódio dopado com Tálcio (NaI:Tl)

É o cintilador mais usado e o escolhido para esse trabalho. Tem como vantagens os seguintes fatos:

Crystal	ρ ($g\ cm^{-3}$)	λ_{max} (nm)	τ (μs)	$(\times 10^3)dN/dE$ MeV^{-1}
<i>NaI:Tl</i>	3.67	410	0.23	41
<i>CsI:Tl</i>	4.51	550	0.8-6	66
<i>CsI:Na</i>	4.51	420	0.63	40
<i>LaCl₃:Ce</i>	3.86	330	0.025(65%)	46
<i>LaBr₃:Ce</i>	5.3	358	0.035(90%)	61
<i>Bi₄Ge₃O₁₂(BGO)</i>	7.1	480	0.30	9
<i>CaHfO₃:Ce</i>	7.5	390	0.04	10
<i>CdWO₄(CWO)</i>	7.9	495	5	20
<i>YAlO₃:Ce(YAP)</i>	5.5	350	0.03	21
<i>LuAlO₃:Ce(LuAP)</i>	8.3	365	0.018	12
<i>Lu₂Si₂O₇:Ce(LPS)</i>	6.2	380	0.03	30
<i>Lu₂SiO₅:Ce(LSO)</i>	7.4	420	0.04	26
<i>Gd₂SiO₅:Ce(GSO)</i>	6.7	440	0.06	8
<i>Gd₂O₂S:Pr(UFC)</i>	7.3	510	3	50
<i>Gd₂O₂S:Tb</i>	7.3	545	1000	60

Figura 4.4: Densidade ρ , comprimento de onda da emissão máxima λ_{max} , tempo de decaimento τ e rendimento luminoso dN/dE de alguns cintiladores inorgânicos comuns.

- Alto rendimento luminoso (41,000 fótons por MeV),
- Emissão de luz azul que coincide com os requerimentos da maioria dos FTMs,
- Pouca auto-absorção de luz da cintilação,
- Boa performance espectroscópica,
- De fácil acesso e pouco custo de produção (ideal para CubeSats), e
- A Possibilidade de produzir cristais com grandes áreas.

O maior problema desse material é sua vulnerabilidade à umidade, fazendo com que tenha que ser usado em ambientes selados.

2. Iodeto de Césio dopado com Sódio (CsI:Na)

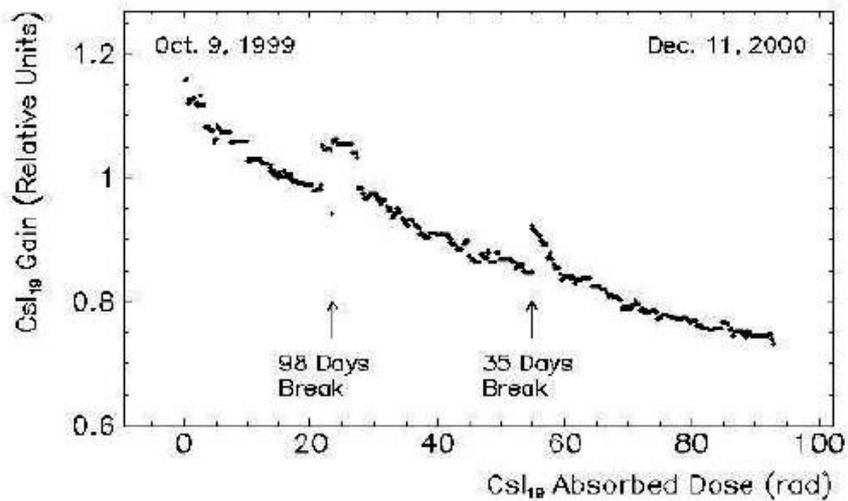


Figura 4.5: Diminuição do ganho de um detector baseado em CsI não dopado.

- Também um dos materiais mais usados,
 - Alto rendimento luminoso (40,000 fótons por MeV),
 - Emissão de luz azul que coincide com os requerimentos dos FTMs,
 - Menos suscetível à umidade que o NaI:Tl.
3. Iodeto de Césio dopado com Tálcio (CsI:Tl)
- Não tão usado como os outros dois,
 - Alto rendimento luminoso (66,00 fótons por MeV),
 - Emite luz a 550nm que coincide com os requerimentos da maioria dos fotodiodos,
 - Sem problemas com umidade,
 - Estável mecanicamente e resistente a pancadas,
 - Pode ser cortado e moldado como for necessário, e
 - É resistente a danos induzidos por radiação.
4. Germanato de Bismuto (BGO)
- Uma alta eficiência de absorção,
 - Consegue ter uma resolução de altas energias,
 - Curto tempo de decaimento,
 - Grande resistência à radiação,
 - Cristais relativamente grandes podem ser produzidos, e
 - É mecanicamente estável e forte.

Por causa de sua alta taxa de absorção de raios gama, BGO é empregado de forma comum em aplicações, envolvendo espectroscopia de raios gama. Em nosso trabalho, essa característica foi crucial.

5 MÉTODO NUMÉRICO

O GEANT4

Geant4 é uma abreviação para “GEometry ANd Tracking”, uma ferramenta baseada em Monte Carlo para simulações da trajetória e interações que uma partícula possa ter com a matéria. Foi desenvolvida com o propósito de ser uma ferramenta robusta e versátil de simulações, baseada em C++, uma linguagem fundamentada em orientação a objetos, capaz de satisfazer os requerimentos impostos na física nuclear e de partículas, ditada pela complexidade de detectores de partículas de grande escala em experimentos de altas energias (HEP, termo em inglês para High Energy Physics) como o LHC no CERN.

É usado também na física médica e espacial, justamente por sua incrível capacidade de modelar com precisão o ambiente da simulação, por causa de sua ampla biblioteca de componentes físicos, flexibilidade e avançada descrição das funcionalidades da geometria aplicada.

O período de pesquisa e desenvolvimento foi completado em 1998, com a entrega do primeiro produto. No ano seguinte, a Geant4 Collaboration foi estabelecida, com colaboradores ao redor de todo o mundo, para continuar o desenvolvimento, refinar a ferramenta, prover manutenção e suporte ao usuário. A cada ano, dois lançamentos públicos do Geant4 são fornecidos, com funções novas ou melhoradas.

Geant4 é o único programa de código livre em Monte Carlo para pesquisa física em radiação de altas energias e que suporta processos também a baixas energias, da ordem de eV. Geant4 fornece detectores compreensíveis e capacidades de modelagem da física. É possível modelar o modelo experimental em termos da geometria, dos materiais e definir as partículas envolvidas e suas interações. O usuário pode rastrear a partícula na matéria, na presença de campos eletromagnéticos e como o detector reage ao experimento. Geant4 também fornece interfaces que permitem que os usuários interajam com as simulações e guardem e salvem seus resultados em forma de histogramas, ntuples, etc.

MÉTODO MONTE CARLO

Monte Carlo é o termo dado ao método de resolução de problemas, usando eventos aleatórios. O termo foi cunhado na década de 1940 por Stanislaw Ulam e John Von Neuman, enquanto trabalhavam em projetos de armas nucleares no Los Alamos National Laboratory, EUA, e investigavam proteções para radiações e a distância que nêutrons provavelmente viajariam através de vários materiais. Mesmo tendo quase todos os dados necessários para o cálculo, eles não eram capazes de resolver o problema usando métodos matemáticos determinísticos convencionais. Então,

tiveram a ideia de usar métodos de geração aleatórios e a probabilidade deles ocorrerem.

O experimento mais conhecido é o da “agulha de Buffon”, que propõe a jogada de uma agulha em uma superfície com linhas paralelas equidistantes. A probabilidade com que a agulha cruzará quaisquer das linhas paralelas é uma função do comprimento da agulha e da separação das linhas, dado como na seguinte equação:

$$P = \frac{2L}{t \cdot \pi}, \quad (5.1)$$

onde P é a probabilidade da agulha cruzar quaisquer das linhas paralelas, L é o comprimento da agulha e t é a distância que separa as duas linhas. Como curiosidade, é possível estimar o valor de π usando esse mesmo experimento, mas com um número muito grande de vezes em que a agulha seria derrubada, com

$$\pi \approx \frac{2L \cdot n}{t \cdot h}, \quad (5.2)$$

onde n é o número de vezes que a agulha seria derrubada e h é o número de vezes que a agulha cruzou uma das linhas paralelas.

Há vários códigos de Monte Carlo (MC) desenvolvidos para transporte de partículas, tais como GEANT4, EGS e PENELOPE justamente por sua habilidade de modelar sistemas muito complexos com vários corpos. Todos os códigos de transporte de radiação em MC seguem um roteiro pré-definido para seu cálculo:

1. Definir um conjunto de condições iniciais e contorno para o sistema.
2. Aleatoriamente gerar entradas no sistema e computar os dados.
3. Unificar os resultados computados individualmente em um resultado final.

Definir um conjunto de condições iniciais e contorno para o sistema.

O primeiro passo para o cálculo em uma simulação MC envolve a definição dos requisitos a serem satisfeitos pelo sistema modelado. Para os códigos de transporte de radiação, temos:

- A configuração experimental, como materiais, geometria e detectores.
- Definição do tipo de partícula, sua energia, direção, quantidade, etc.
- Interações físicas
- Etc.

Aleatoriamente gerar entradas no sistema e computar os dados.

O segundo passo consiste na geração de eventos aleatórios em um sistema definido. A maioria dos códigos MC para transporte de radiação seguem as mesmas rotinas para a geração de partículas aleatórias e rastreamento:

- O caminho da partícula primária com as condições iniciais predeterminadas é simulado através do meio inicial.
- As possíveis interações da partícula primária com o meio são determinadas e a probabilidade de cada interação é calculada.
- Um gerador de números aleatórios é usado aleatoriamente para selecionar uma das interações a que a partícula possa estar sujeita.
- A quantidade de energia perdida por causa das interações é gravada e registrada para aquela região específica do meio.
- Quaisquer partículas secundárias criadas a partir das interações são rastreadas até que a energia das mesmas seja menor que a energia de corte, na qual a energia é dita como perdida naquele ponto e registrada na memória.
- Outra partícula primária é gerada e rastreada.
- O processo se repete até que se atinja um limite predeterminado das partículas primárias que serão geradas.

Unificar os resultados computados individualmente em um resultado final.

O terceiro e último passo na simulação MC diz respeito à análise final dos dados obtidos nas simulações. Para códigos MC de transporte de radiação podemos calcular quantidades dosimétricas, como a porção depositada por alguma partícula primária numa determinada região. Os resultados finais podem ser alocados em qualquer forma para representar os resultados calculados, como gráficos de 1, 2 ou 3 dimensões e espectros de energias.

O NÚCLEO DO GEANT4

O Geant4 foi feito de modo que seus usuários não ficassem restritos a uma única área de conhecimento físico, fazendo com que tivesse diferentes requerimentos e, para contornar este fato, foi necessário uma arquitetura modular e flexível. Assim, uma extensa classe de bibliotecas foi feita de modo que seus usuários pudessem construir suas próprias aplicações. Podemos representar as principais classes como as mostradas, a seguir, na Fig. 5.1, levando em conta que são interligadas por um fluxo unidirecional de dependências.

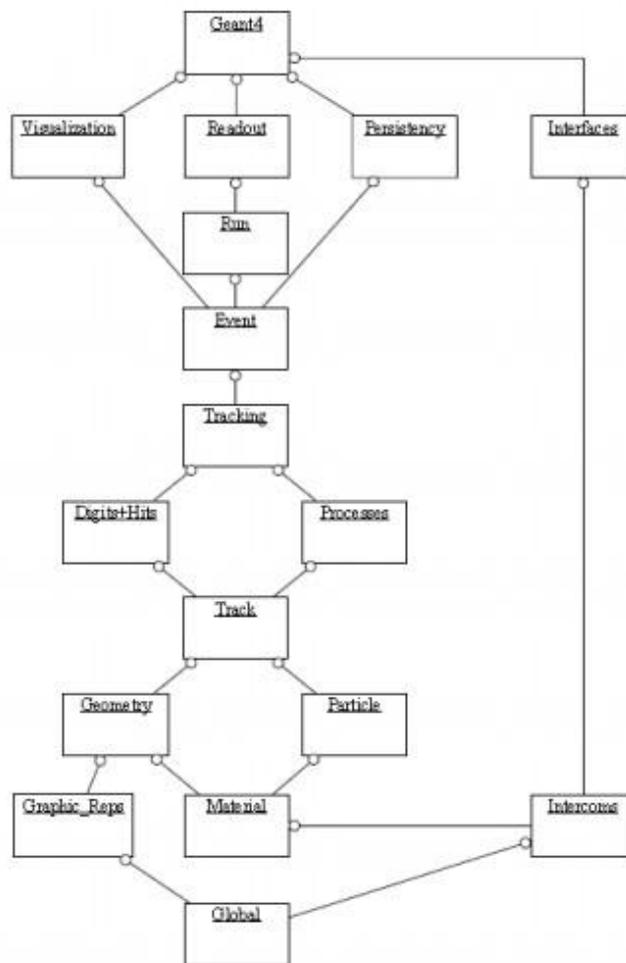


Figura 5.1: Estrutura hierárquica do núcleo do Geant4

As categorias na parte de baixo do diagrama são usadas por categorias superiores e provêm o alicerce do kit de ferramentas que é o Geant4. Uma descrição mais detalhada de todas é possível de ser encontrada no manual de desenvolvimento do usuário, no entanto, listaremos as principais características das categorias mais importantes para o entendimento básico de como uma aplicação do Geant4 funciona. São elas: *G4VUserDetectorconstruction*, onde são definidos os atributos de visualização, materiais, geometrias detectores; *G4VUser PhysicsList*, onde é especificado o tipo de partícula e a física associada à mesma; *G4VUserPrimaryGeneratorAction*, onde o tipo da partícula primária, assim como sua direção, energia e dimensões são registrados.

Todas as classes são registradas sob *G4RunManager*, classe que controla o comportamento geral do programa a ser usado.

GEOMETRIA

O pacote de geometrias nos oferece a possibilidade de descrever uma estrutura geométrica e propagar uma partícula através dela. O aparato experimental é definido através de três camadas:

- **solid:** onde o formato e o tamanho da componente geométrica são definidos.
- **logical volume:** onde os atributos (material, sensibilidade, etc) são definidos.
- **physical volume:** onde é definido a posição espacial ou o posicionamento do volume lógico com respeito ao volume mãe que o engloba.

O aparato experimental de uma simulação do Geant4 é estruturado de uma forma hierárquica, onde o Volume Mãe engloba seus respectivos volumes. Assim, sempre que uma simulação for montada, primeiro é criado um Volume Mundo, que englobará toda a simulação, depois é criado um segundo volume (podendo ser vários volumes dentro do Volume Mundo), dessa forma, diferentes partes do experimento podem ser posicionadas com maior facilidade e/ou rotacionadas em relação ao eixo central do Volume Mundo e por fim, os volumes dos detectores.

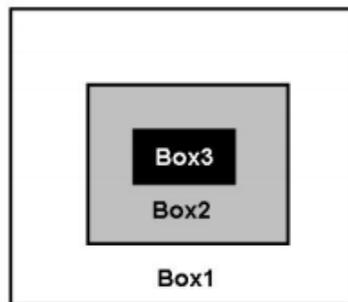


Figura 5.2: Hierarquia dos volumes no Geant4, sendo os volumes mais externos os Volumes Mães dos mais internos.

Não há necessidade de ser só 3 Volumes hierárquicos, mas é o aparato mais comum. O usuário no entanto deve ficar atento a sobreposições dos volumes. Um volume nunca pode ser maior ou estar além da borda do seu Volume Mãe, assim como uma sobreposição de volumes de qualquer hierarquia resultará em bugs no programa e devem ser corrigidos. Geant4 tem um método para checar essas sobreposições de volumes físicos, `CheckOverlaps()`.

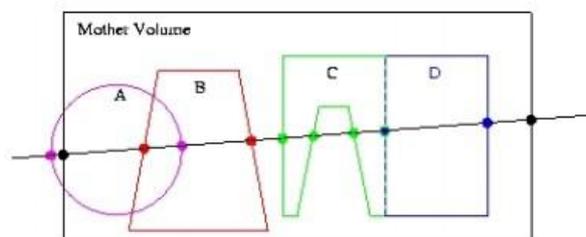
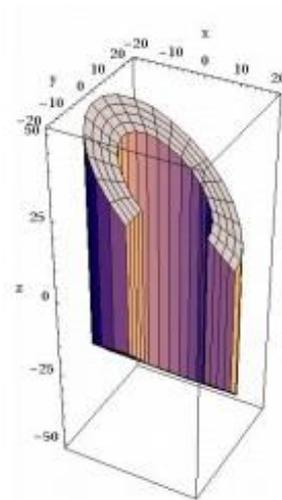


Figura 5.3: Diferentes casos de volume se sobrepujando no geant4.

TIPOS DE SÓLIDOS

Geant4 fornece uma extensa coleção de classes de sólidos pré-definidos, ajudando na construção das geometrias. Todas as classes caem dentro de três categorias diferente de sólidos: Constructed Solid Geometry (CSG), que incluem esferas, cones, cilindros e paralelepípedos; Boundaries Represented Solid (BREP), sólidos definidos por suas fronteiras, com superfícies planares ou de segunda ordem que podem ser construídos com programas exteriores como CADs (Geant4 tem biblioteca voltada para a importação desse tipo de sólidos, sendo de grande ajuda em objetos mais complicados, já que a forma como é programado um sólido no Geant4 tende a ficar mais complicado quanto mais complexo for o objeto); Boolean Solids, objetos que podem ser unidos ou diminuídos um do outro a partir de operações booleanas, como união, adição ou subtração.

```
G4CutTubs( const G4String& pName,
           G4double pRMin,
           G4double pRMax,
           G4double pDz,
           G4double pSPhi,
           G4double pDPhi,
           G4ThreeVector pLowNorm,
           G4ThreeVector pHighNorm )
```



In the picture:

```
pRMin = 12, pRMax = 20, pDz =
30, pSPhi = 0, pDPhi = 1.5*pi,
pLowNorm = (0, -0.7, -0.71),
pHighNorm = (0.7, 0, 0.71)
```

Figura 5.4: Código do Geant4 e o sólido gerado pelo mesmo.

Outra ferramenta muito útil na confecção de sólidos é a possibilidade de duplicar, triplicar, multiplicar um determinado sólido com todas as suas características de uma forma em que todos terão os mesmos espaçamentos e dimensões, serão réplicas. Sólidos parametrizados também são possíveis, no entanto, seus tipos, materiais e dimensões podem ser diferentes um dos outros.

MATERIAIS

A categoria dos materiais nada mais é do que a representação da natureza, ou seja, mostra as possibilidades com que os elementos constituem determinado objeto. Essas possibilidades

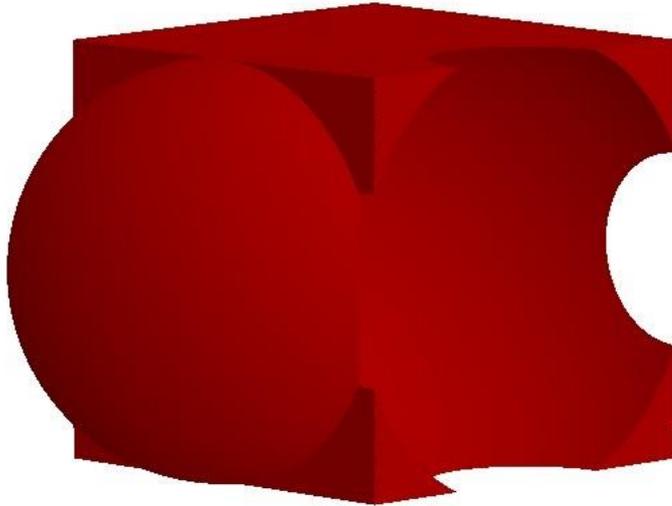


Figura 5.5: Sólido Booleano.

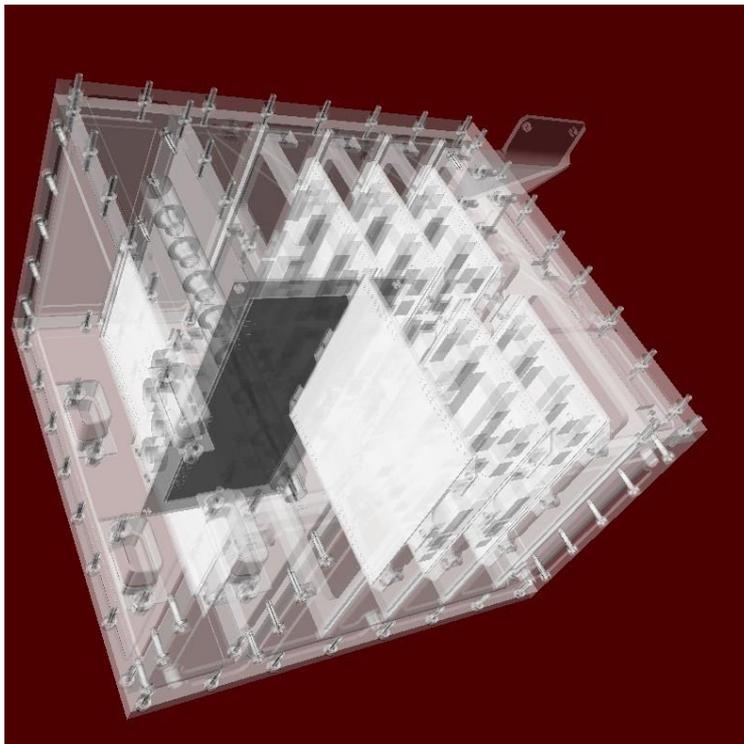


Figura 5.6: Sólidos gerados por CADs.

podem ser objetos formados a partir de um único elemento, como um gás nobre, um conjunto deles, como a água, ou até por isotopos, sendo um único tipo ou todos os isotopos combinados.

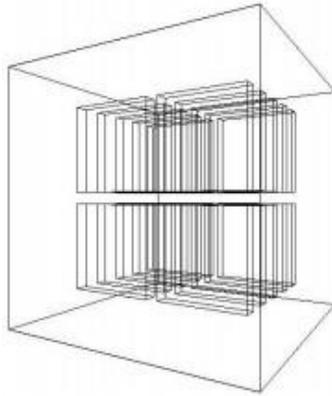


Figura 5.7: Sólidos repetidos.

```

G4double density = 1.390* g/cm3;
G4double a = 39.95*g/mole;
G4double z = 18. ;
G4Material* liquidArgon = new G4Material
    ("liquidArgon", 18., a, density);

a = 1.01*g/mole;
G4Element* e1H = new G4Element("Hydrogen",symbol="H",z=1.,a);

a = 16.00*g/mole;
G4Element* e1O = new G4Element("Oxygen",symbol="O",z=8.,a);

density = 1.000*g/cm3;
G4Material* H2O = new G4Material("Water",density,ncomp=2);

G4int natoms;
H2O -> AddElement(e1H, natoms = 2);
H2O -> AddElement(e1O, natoms = 1);

```

Figura 5.8: Do lado esquerdo, a definição de um único elemento (He). Do lado direito, definição de um elemento composto (Água).

OS DETECTORES

O pacote de detectores do Geant4, `Detector`, gerencia seus componentes do aparato experimental. O `Detector` guarda as informações acerca das interações físicas das partículas que interagem com o objeto a ser estudado, como sua energia de deposição, momento, tempo de interação e sua posição.

O usuário também pode guardar as informações obtidas em cada rodada de simulação nos detectores por um objeto chamado `Hit`. `Hit` é uma “foto instantânea” do momento exato de interação da partícula com o material sensível do detector. Com essa ferramenta em mãos, o usuário pode coletar a informação guardada depois de cada partícula primária rodada ou da simulação por completo e salvá-la em um arquivo de saída do tipo ROOT, CSV ou XML.

PARTÍCULAS

O Geant4 oferece uma enorme gama de partículas pré-definidas em sua base de dados, incluindo bárions, mésons, fótons, léptons, gluôn, quarks, íons e geantinos. **Geantinos** são partículas fictícias do próprio Geant4 usadas para simulações que não interagem com a matéria, e por

isso, suas trajetórias podem ser usadas para testar determinado aparato experimental. As informações de uma partícula são descritas por classes de três níveis: `G4ParticleDefinition`, que contém as propriedades estáticas da partícula, como o nome, massa, spin, modo de decaimento e tempo de vida; `G4DynamicParticle`, que descreve propriedades dinâmicas como o momento, energia e polarização da partícula; `G4Track`, que representa o estado da partícula no final de cada passo enquanto ela atravessa algum objeto. `G4Track` tem ponteiros em seu código apontando para as outras duas classes de partículas mostradas, `G4ParticleDefinition` e `G4DynamicParticle`, também contém informações como a distância percorrida pela partícula, sua direção, energia cinética e seu peso.

O RASTREIO DAS PARTÍCULAS

O pacote de rastreamento (Tracking) gerencia o caminho das partículas em um aparato experimental por uma sequência de passos. Cada passo é definido como a distância entre duas interações. A cada passo, é possível retirar informações sobre a partícula, como sua energia cinética no começo e no fim do caminho, quais processos físicos ela sofreu e outros.

O pacote Tracking não depende do tipo de partícula ou da física do experimento. Geant4 executará da mesma maneira em qualquer evento.

EVENTOS E RODADAS

O Evento é a parte mais importante da simulação. Há uma classe específica a ela em cada programa. É iniciada quando uma ou mais partículas são geradas e são concluídas quando todas as partículas primárias e secundárias são rastreadas por completo no aparato da simulação. Uma rodada, ou Run, é uma coleção de eventos que compartilham as mesmas condições experimentais, ou seja, cada partícula secundária ou interação com campos magnéticos dentro da simulação. Quando a simulação está rodando, as configurações dos detectores, como suas geometrias, materiais e processos físicos não podem ser alterados durante uma rodada (Run).

PROCESSOS FÍSICOS DO GEANT4

Geant4 fornece uma grande variedade de processos físicos que podem ser simulados. Eles são acessados pela classe `G4UserPhysicsList`, que descreve como as partículas interagem com o meio e os materiais. Sete grandes categorias de processos físicos são fornecidas pelo Geant4. Elas podem ser encontradas com mais detalhes no Manual de Referências Físicas do Geant4.

Eletromagnética

1. Padrão: conjunto completo de processos que abrangem partículas carregadas e gamas.
 - alcance de energia, 1 keV até Pev.
2. Baixa energia: rotinas especiais para e⁻, gamas e hádrons carregados.
 - um detalhe maior para as estruturas atômicas; alguns processos com validade perto dos 250 eV ou abaixo; outros inválidos acima de alguns GeV.

Hadrônica

1. hadrônico puro (0 - TeV)
 - Elástico, inelástico, captura e fissão.
2. decaimento radioativo
 - em repouso ou movimento

Decaimento

1. Decaimento fraco (leptônico, decaimentos semi-leptônicos, decaimentos radioativos do núcleo).
2. Decaimento eletromagnético (π^0 , σ^0 , etc.).
3. Decaimentos fortes não estão inclusos nesse processo (fazem parte do modelo hadrônico).

Photolepton-Hadron

1. fotonuclear(10 MeV- TeV).
2. lepto-nuclear(10 MeV- TeV).
 - e⁺,e⁻ reações nucleares induzidas.
 - reações nucleares induzidas por múons.

Óptico

1. Apenas para fótons com longo comprimento de ondas (raios-X, UV, visível).
 - processos por reflexão/refração, absorção, espalhamento Rayleigh e wavelength shifting.

Parametrização

1. Chuveiros eletromagnéticos propagados de acordo com parâmetros calculados sobre a média de todos os eventos.
2. Simulações de chuveiros mais rápidos que os detalhados.

Transporte

1. Processo responsável apenas pelo movimento da partícula através de determinada geometria.

Todos esses processos são derivados da classe base `G4VProcess`. Basicamente, um processo faz duas coisas. Decide quando e onde uma interação irá ocorrer e gera o estado final das interações (mudança de momento, partículas secundárias geradas, etc). Quaisquer processos devem simular, no mínimo, uma das seguintes ações: contínua, distribuída no espaço (`AlongStep`); discreta, bem localizada espacialmente (`PostStep`); no repouso, bem localizada no tempo (`AtRest`). Para cada ação, os métodos `GetPhysicalInteractionLength` (GPIL) e `Dolt` associados a cada uma devem ser definidos. O método GPIL limita o tamanho dos passos da partícula e determina quando uma interação ocorrerá, enquanto que o método `Dolt` gera o estado final da partícula.

Os seguintes processos físicos e suas ações realizadas pelo Geant4 são listados para uma ideia geral:

- Discreto: Espalhamento Compton
- Contínuo: Efeito Cherenkov
- No repouso: Aniquilação de pósitrons no repouso
- Discreto + contínuo: Ionização
- Contínuo + Discreto (processo): Bremsstrahlung

Com essas informações, o usuário pode ter uma ideia dos processos que ocorrem por trás das interações físicas do Geant4 e ainda criar modelos físicos variados a partir dos básicos.

5.12 INTERFACES DE USUÁRIOS, VISUALIZAÇÕES E FERRAMENTAS DE ANÁLISES

Geant4 fornece algumas opções de interfaces (UI). Uma aplicação pode ser rodada num terminal, ou com Java ou com uma interface gráfica modificada, podendo ainda ser rodada usando um arquivo macro.

Comandos em UI por padrão, foram projetados para controlar eventos típicos das simulações, como tipo de partícula primária, sua energia, se há campo magnético no meio ou não, sua direção, etc. O usuário também pode adicionar outros comandos na UI por uma classe derivada da G4UImessenger.

Várias ferramentas para visualizações e análises estão disponíveis, como OpenGL, DAWN, QT, HepRep, Java Analysis Studio (JAS), ROOT. Nesse trabalho, foram utilizados QT e ROOT.

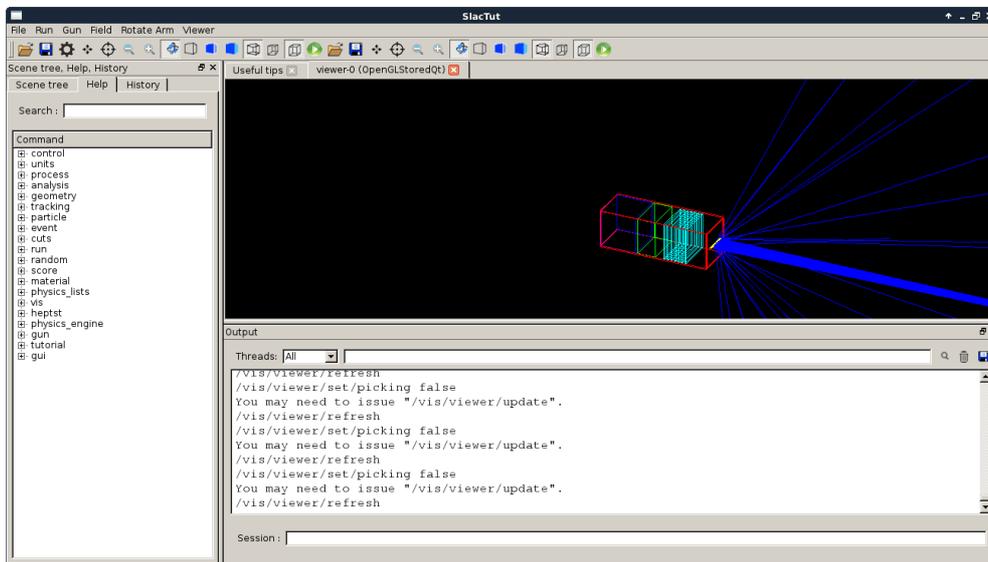


Figura 5.9: Ferramenta de visualização QT.

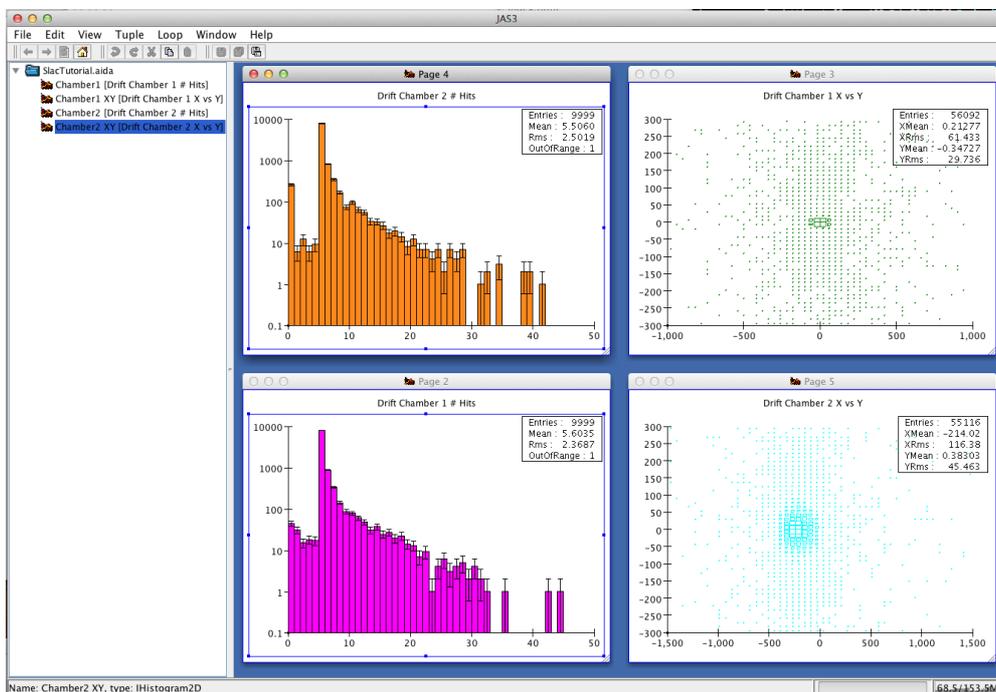


Figura 5.10: Exemplos de ferramentas de visualização e análises.

6 GEOMETRIAS ESTUDADAS

GEOMETRIA

Para a elaboração desse trabalho, foram utilizadas as seguintes configurações para o CubeSat e seus respectivos componentes com as seguintes dimensões (X cm, Y cm, Z cm):

- **Cristal Cintilador de Iodeto de Sódio dopado com Tálcio de:**
Sem BGO de antioincidência (8 cm x 8 cm x 9 cm).
Com BGO de antioincidência (7 cm x 7 cm x 9 cm).
- **Barreiras de Sulfato de Bário e Plexiglass:**
BaS ou Plexiglass (9,98 cm x 9,98 cm x 11,98 cm) com espessuras de 1,72 cm.
Mistas, variando entre plexiglass na parte inter ou externa com o BaS (9,98 cm x 9,98 cm x 11,98 cm) com espessuras de 0,86 cm cada.
- **Barreiras de antioincidência de Germanato de Bismuto:**
(8 cm x 8 cm x 10 cm) com 1 cm de espessura.
- **Carcaça do CubeSat de Alumínio:**
(10,2 cm x 10,2 cm x 30,2 cm) com 2 mm de espessura.
Vale ressaltar que tanto as barreiras de BaS, Plexiglass, BGO e a carcaça de alumínio do CubeSat não eram fechadas na face do cristal voltada à detecção.
- **Bloco de bronze maciço que ilustra o circuito de detecção:**
(9,92 cm x 9,92 cm x 5 cm).
- **9 placas de cobre espaçadas por 1 cm cada, ilustrando os circuitos com:**
(9,8 cm x 9,8 cm x 4 mm).

Na figura 6.1 tem-se uma ilustração do CubeSat e dos seus elementos, assim como do feixe de radiação incidente (em verde). Em vermelho está a estrutura do satélite, em azul as placas dos componentes eletrônicos, em rosa o cintilador (separados em camadas), em cinza o circuito do detector e por fim em verde, as barreiras e o ACD.

CASOS SIMULADOS

Nas simulações realizadas, o detector foi bombardeado por fótons com as seguintes energias e números de partículas iniciais:

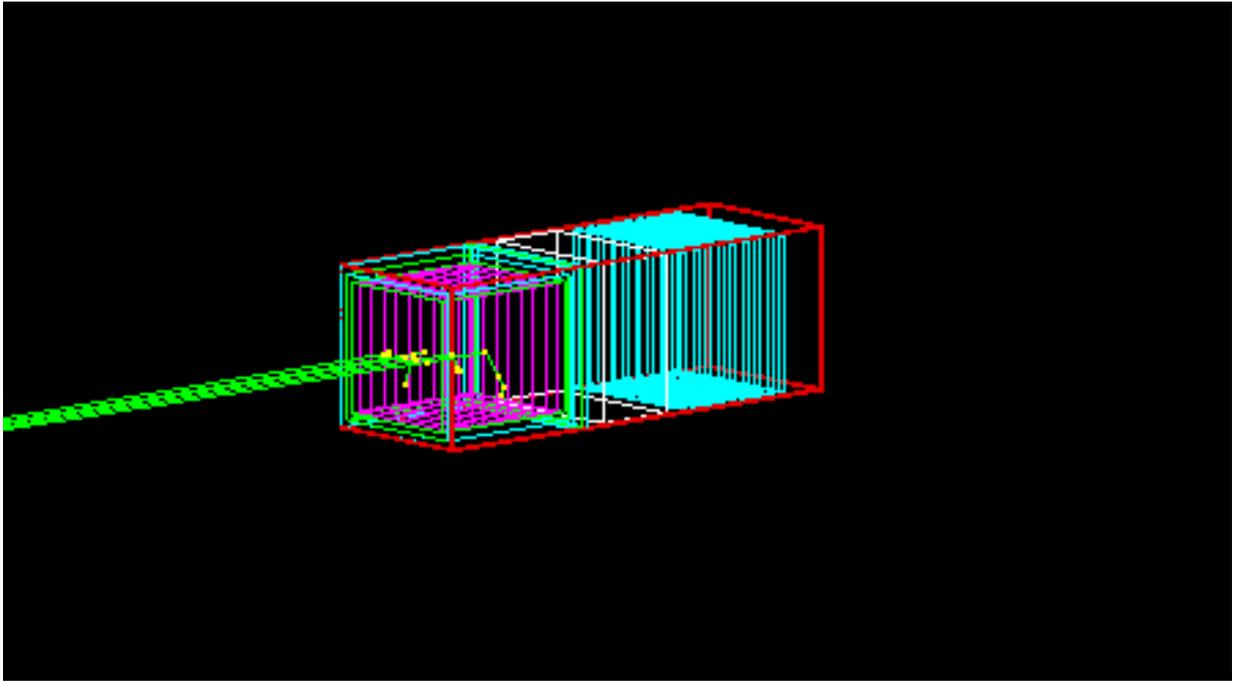


Figura 6.1: Raio incidindo diretamente no detector do sistema estudado.

- 50 KeV com 500 partículas primárias.
- 100 KeV com 500 partículas primárias.
- 500 KeV com 500 partículas primárias.
- 1 MeV com 100 partículas primárias.
- 10 MeV com 100 partículas primárias.
- 100 MeV com 50 partículas primárias.
- 500 MeV com 10 partículas primárias.
- 1 GeV com 10 partículas primárias.

Com as partículas incidindo diretamente do detector, na parte lateral do CubeSat na região do detector e na parte de trás do CubeSat.

6.2.1 Barreira anticoincidência

Para a diferenciação dos fótons gama produzidos por eventos secundários ao atravessarem os escudos propostos dos fótons incidentes, utilizou-se uma barreira anticoincidência (ACD) de BGO.

O método de anticoincidência é amplamente usado para suprimir eventos de alta energia indesejados. Tipicamente, quando são estudadas interações de altas energias, quando o evento

ocorre e é detectado por algum detector eletrônico no aparelho, um pulso eletrônico rápido é criado na eletrônica do detector. Contudo, os eventos desejados são misturados com um número significativo de outros eventos, produzidos por outras partículas ou outros processos, que criam eventos muito difíceis de serem diferenciados no detector. Muitas vezes, é possível organizar outros fótons físicos ou detectores de partículas para interceptar os eventos de fundo indesejados, produzindo impulsos essencialmente simultâneos que podem ser usados para rejeitar ou vetar o fundo indesejado.

A implementação de ACD em observatórios espaciais voltados à detecção de raios gama já é bastante utilizada e aceita, com uma precisão muito bem documentada como em Moiseev et al., (SLAC-PUB-12411) e Thompson et al., (SLAC-PUB-12900).

7 RESULTADOS

Os resultados serão divididos em quatro partes, de orientação do raio incidente no detector (frente, lado e atrás) e com o raio incidente atingindo o detector, envolto na barreira de anticoincidência, pelo lado do mesmo. São apresentadas tabelas com os resultados numéricos e imagens provenientes do Geant4 que traçam as trajetórias de todas as partículas geradas em cada simulação, para uma melhor visualização do problema proposto.

SIMULAÇÕES

Como especificado na seção 6.2 do capítulo anterior, diferentes quantidades de partículas iniciais foram geradas para cada nível de energia. Para energias de 50 KeV a 500 KeV, foram 500 fótons primários incididos. De 1 MeV a 10 MeV, foram 100 fótons primários. De 100 MeV foram 50 partículas iniciais. E para 500 MeV e 1 GeV foram 10 partículas iniciais.

Essa diferença no número de partículas iniciais se dá ao fato de que o Geant4 guarda a trajetória individual de cada partícula gerada na simulação na memória RAM do computador. Quanto maior o nível energético das partículas iniciais, maior será o número de partículas secundárias geradas e conseqüentemente uma carga maior na memória. Afim de evitar travamento do computador utilizado (com 16 GB de RAM), utilizou-se esse artifício.

As figuras mostram, em sentido horário, os raios incidentes com seus respectivos produtos de interações para cada material usado como barreira, sendo a primeira 50 KeV, depois 100 KeV, 500 KeV, 1 MeV, 10 MeV, 100 MeV, 500 MeV e finalmente 1 GeV. Os traços verdes são as trajetórias de partículas neutras, as vermelhas de partículas negativas, as azuis de partículas positivas e os pontos amarelos determinam os pontos de interação daquela partícula com o meio material, o que também são chamados de *steps* para cada partícula que o Geant4 simulará.

Nas tabelas estão presentes os números de partículas, primárias ou secundárias, detectadas no nosso alvo, um cristal cintilador de iodeto de sódio dopado com tálio (NaI:Tl). Da esquerda para a direita temos os dados de um CubeSat sem barreiras de diminuição de ruídos, com a barreira de Sulfeto de Bário (BaS), Plexiglass, barreira mista sendo a parte interna feita de Plexiglass e a externa de BaS, barreira mista sendo a parte interna feita de BaS e a externa de Plexiglass.

Tabela 7.1: Raio incidindo direto no detector.

Energias iniciais	N de partículas primárias	Sem barreira Detectadas	BaS Detectadas	Plexiglass Detectadas	Plexi-BaS Detectadas	BaS-Plexi Detectadas
50 KeV	500	503	506	506	505	505
100 KeV	500	559	549	549	540	540
500 KeV	500	1278	1279	1281	1224	1224
1 MeV	100	304	303	304	327	327
10 MeV	100	1420	1408	1412	1467	1489
100 MeV	50	5329	5261	5488	5417	5318
500 MeV	10	3202	3318	2956	4550	4194
1 GeV	10	4854	4694	5572	6069	6779

Tabela 7.2: Raio incidindo atrás do CubeSat.

Energias iniciais	N de partículas primárias	Sem barreira Detectadas	BaS Detectadas	Plexiglass Detectadas	Plexi-BaS Detectadas	BaS-Plexi Detectadas
50 KeV	500	0	0	0	0	0
100 KeV	500	0	0	0	0	0
500 KeV	500	2	4	4	5	5
1 MeV	100	10	1	6	1	1
10 MeV	100	213	165	201	220	219
100 MeV	50	433	501	495	424	408
500 MeV	10	1842	2054	2169	1982	1721
1 GeV	10	5521	4361	5325	4287	4426

Tabela 7.3: Raio incidindo do lado do CubeSat e detector.

Energias iniciais	N de partículas primárias	Sem barreira Detectadas	BaS Detectadas	Plexiglass Detectadas	Plexi-BaS Detectadas	BaS-Plexi Detectadas
50 KeV	500	455	0	399	1	1
100 KeV	500	525	12	483	57	56
500 KeV	500	1180	953	1125	1032	1032
1 MeV	100	288	256	294	309	309
10 MeV	100	1120	1119	1117	1421	1407
100 MeV	50	4262	4613	4117	5252	5285
500 MeV	10	1985	1973	1952	2804	2680
1 GeV	10	2829	3725	3185	4014	3649

Tabela 7.4: Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com ACD.

Energias iniciais	N de partículas primárias	Sem barreira Detectadas	BaS Detectadas	Plexiglass Detectadas	Plexi-BaS Detectadas	BaS-Plexi Detectadas
50 KeV	500	0	0	0	0	0
100 KeV	500	3	0	1	0	0
500 KeV	500	802	614	750	705	705
1 MeV	100	235	221	232	191	191
10 MeV	100	1164	1090	1110	1052	1051
100 MeV	50	4972	4763	5069	4455	4407
500 MeV	10	2971	2907	2710	2766	2742
1 GeV	10	4427	5300	4686	4664	4360

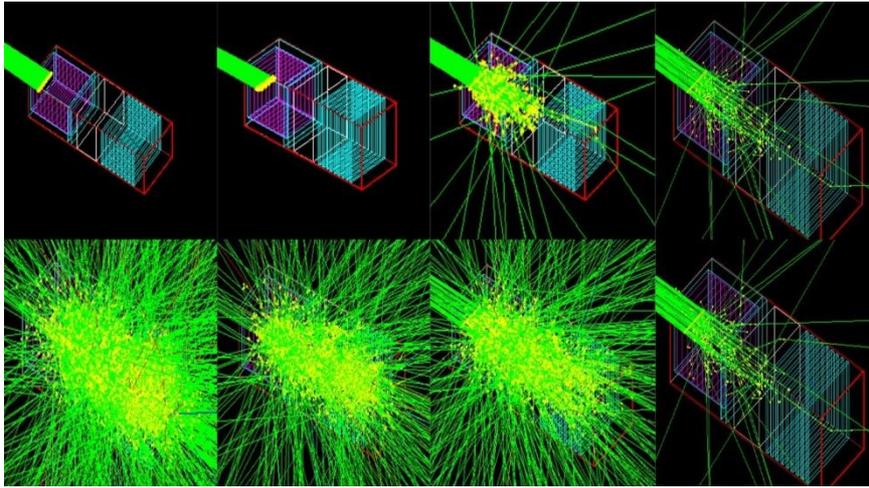


Figura 7.1: Raio incidindo direto no detector sem as barreiras de proteção.

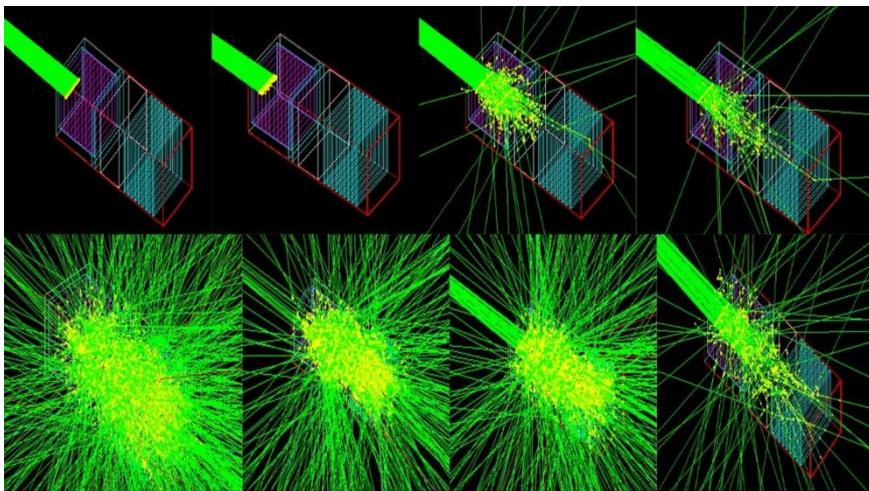


Figura 7.2: Raio incidindo direto no detector com uma barreira de BaS.

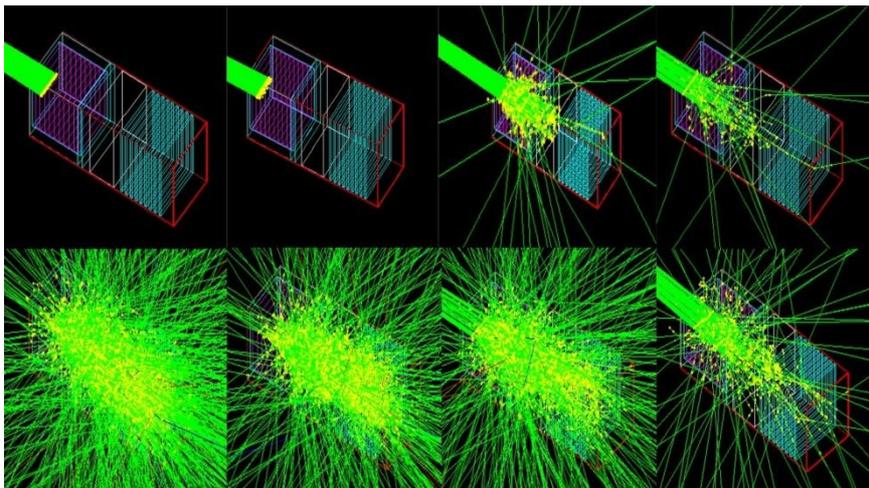


Figura 7.3: Raio incidindo direto no detector com uma barreira de Plexiglass.

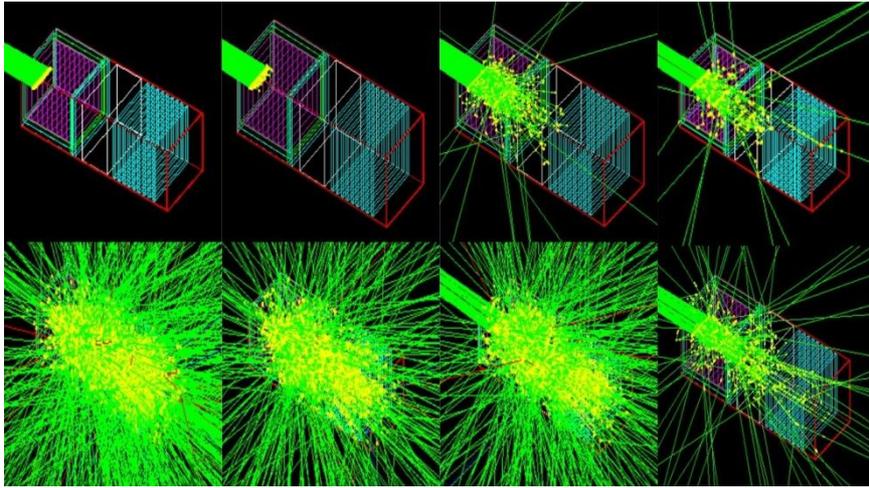


Figura 7.4: Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.

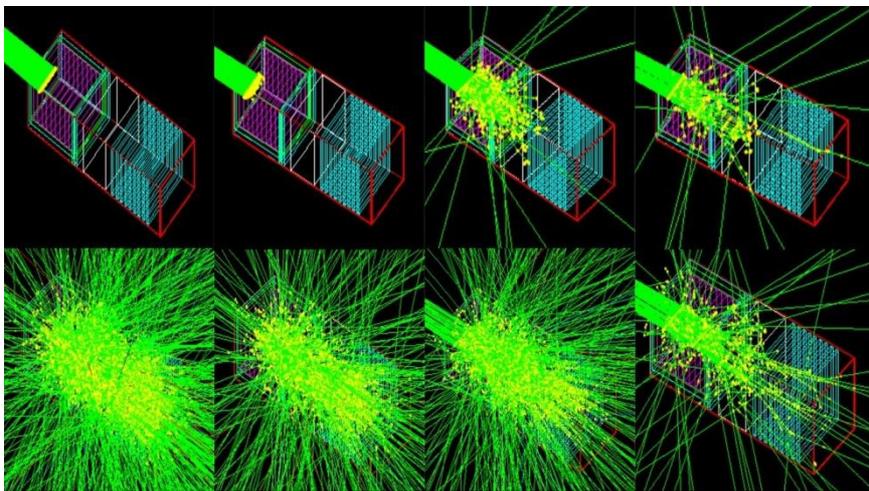


Figura 7.5: Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.

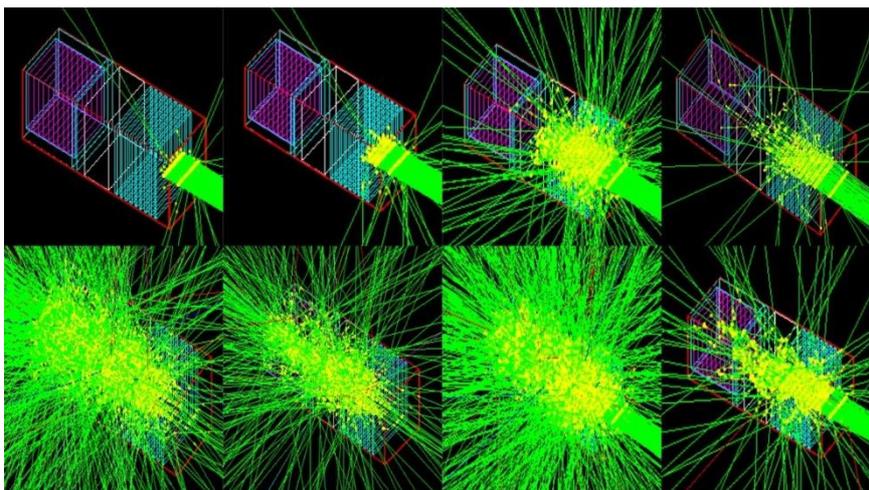


Figura 7.6: Raio incidindo direto no detector sem as barreiras de proteção.

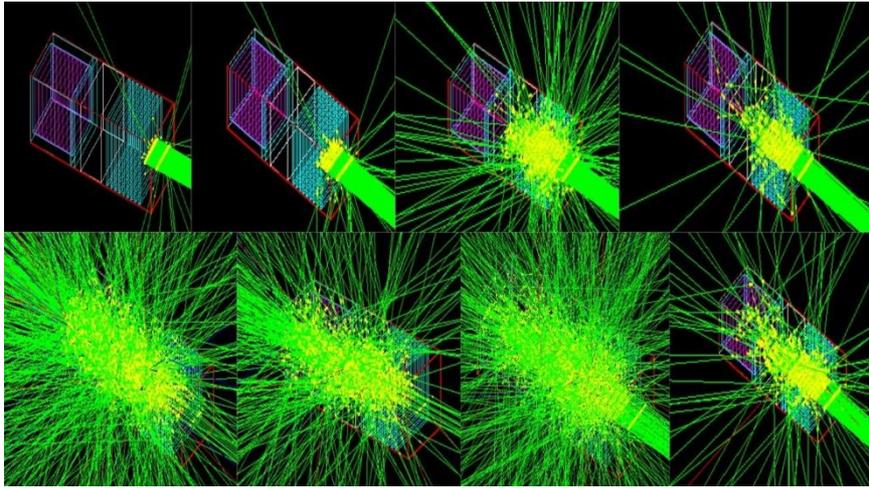


Figura 7.7: Raio incidindo direto no detector com uma barreira de BaS.

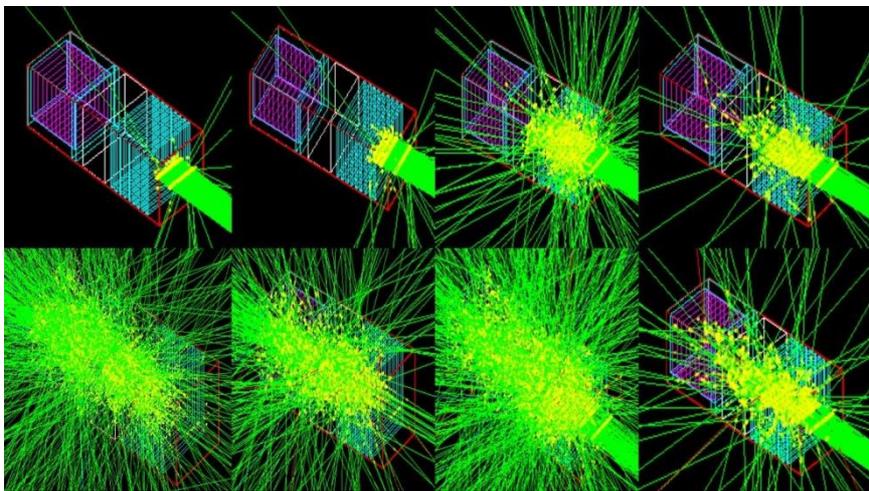


Figura 7.8: Raio incidindo direto no detector com uma barreira de Plexiglass.

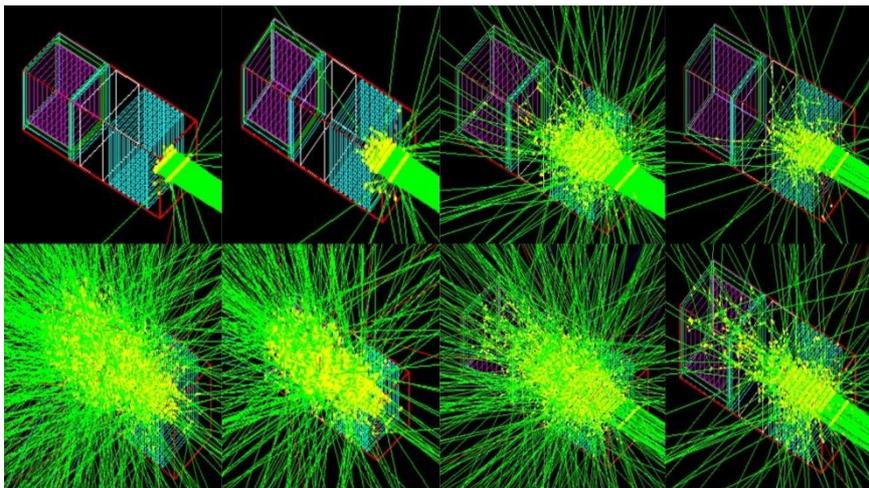


Figura 7.9: Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.

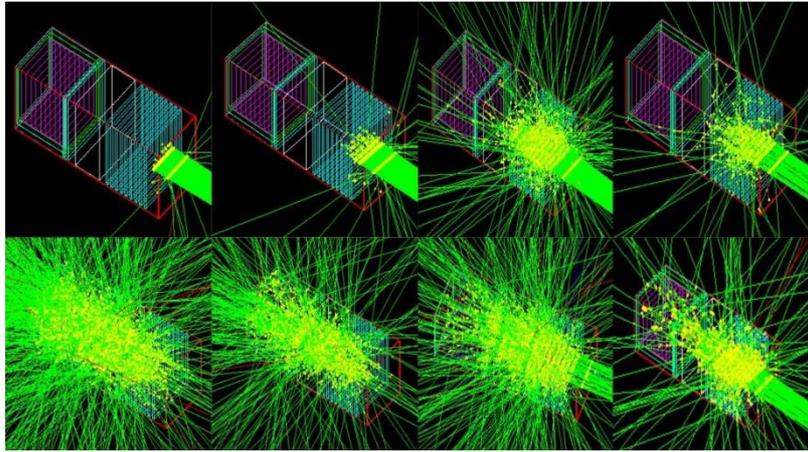


Figura 7.10: Raio incidindo direto no detector com uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.

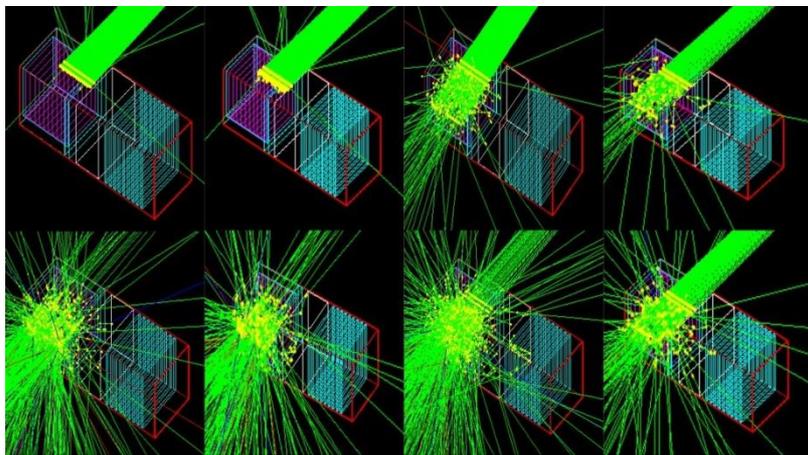


Figura 7.11: Raio incidindo direto no detector sem as barreiras de proteção.

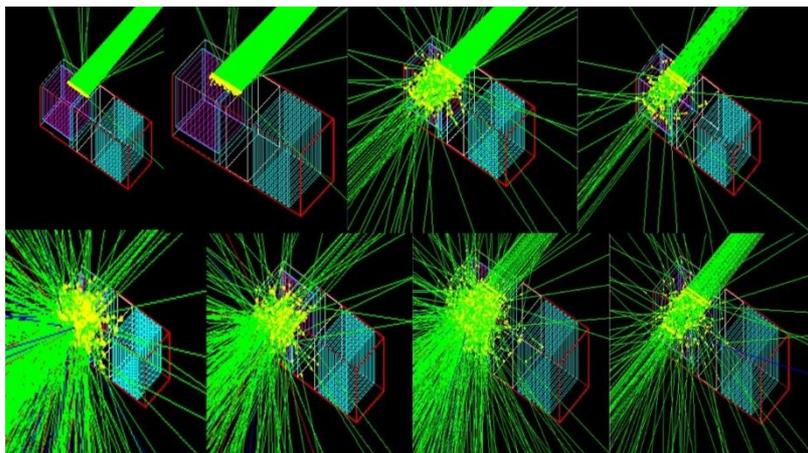


Figura 7.12: Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira de BaS.

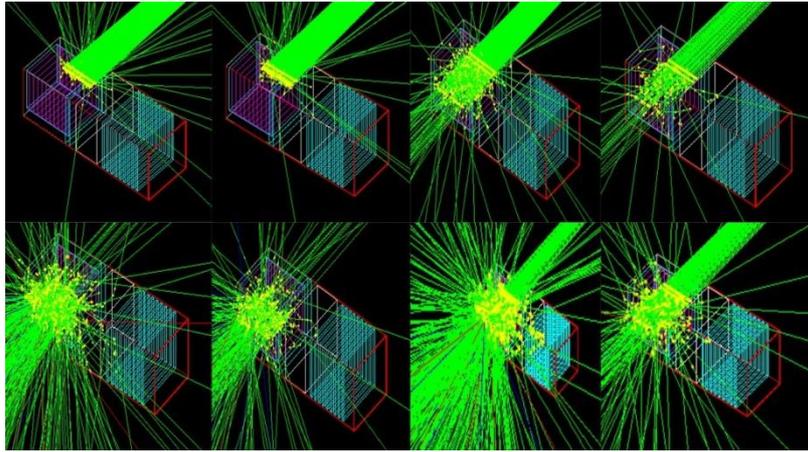


Figura 7.13: Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira de Plexiglass.

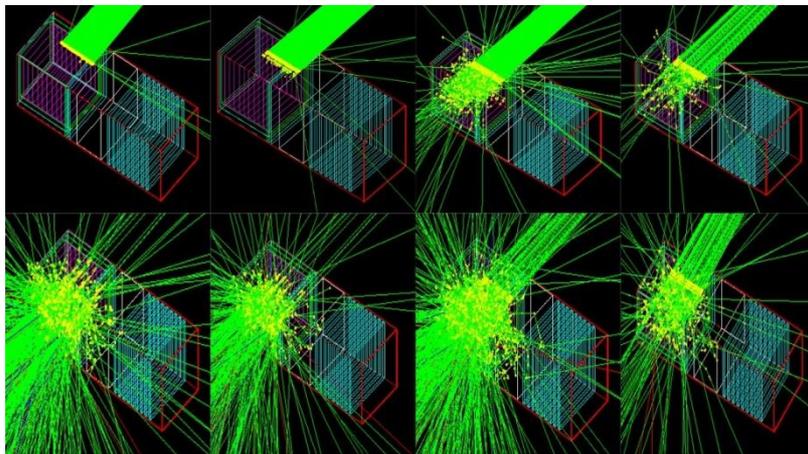


Figura 7.14: Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.

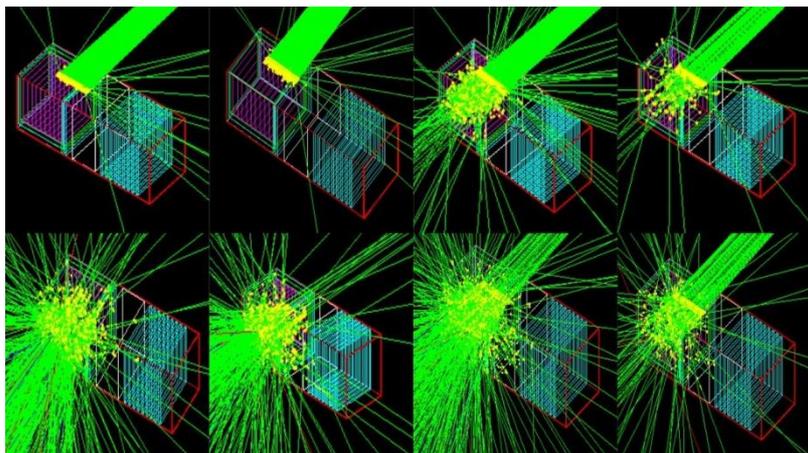


Figura 7.15: Raio incidindo do lado do CubeSat e detector com uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.

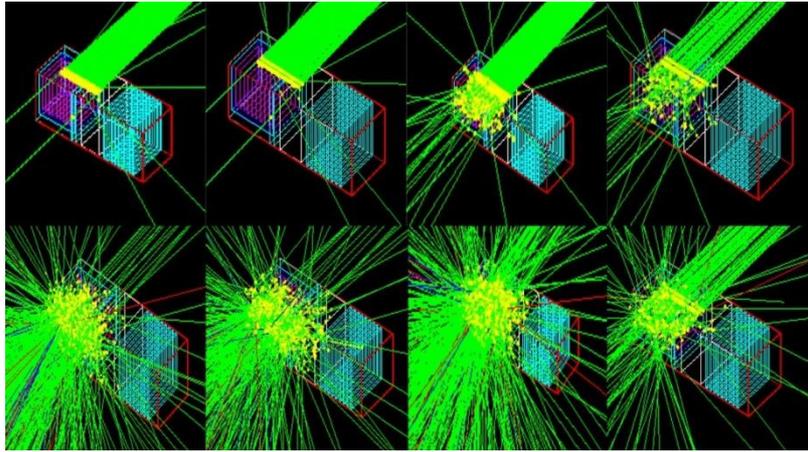


Figura 7.16: Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD, sem as barreiras de proteção.

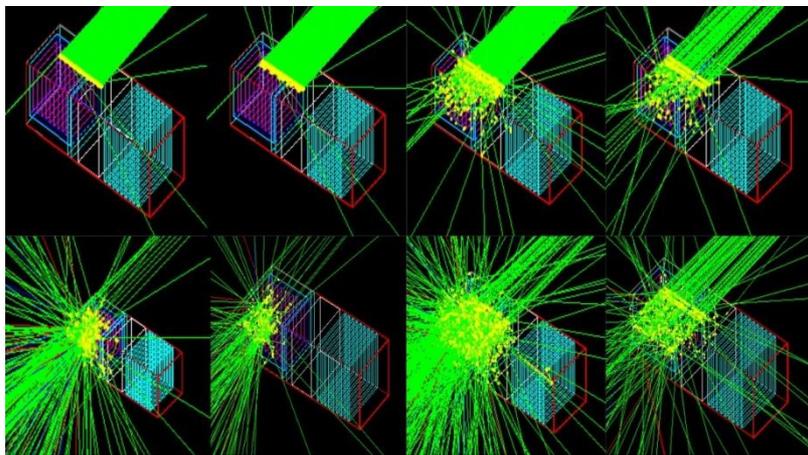


Figura 7.17: Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira de BaS.

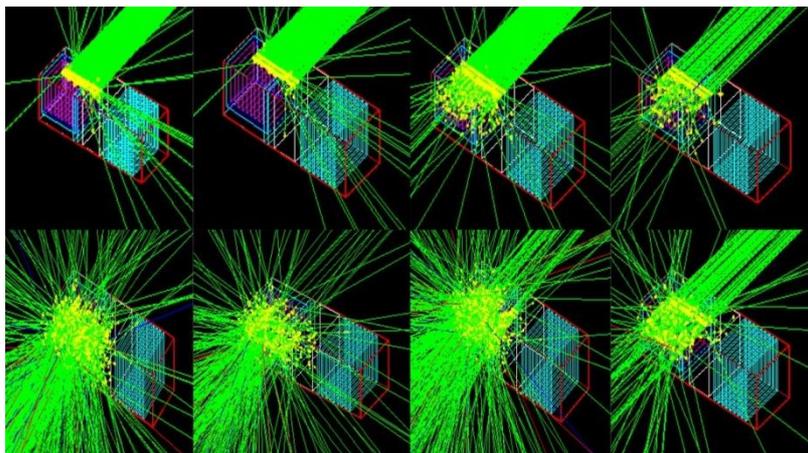


Figura 7.18: Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira de Plexi-glass.

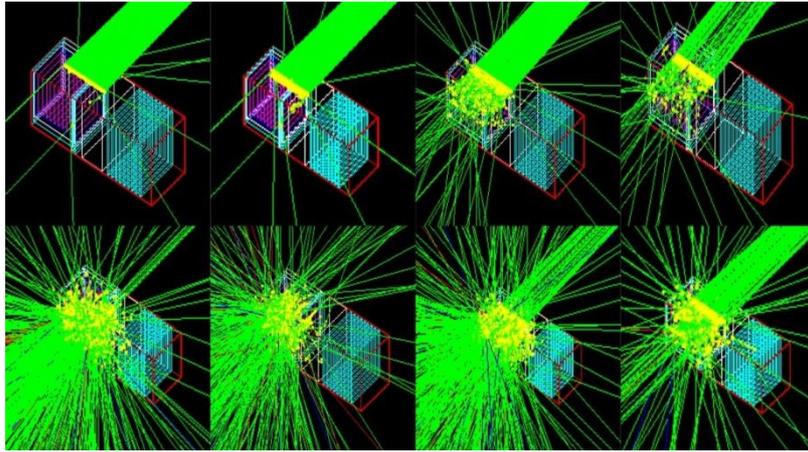


Figura 7.19: Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira mista de Plexiglass na parte interior e BaS na exterior.

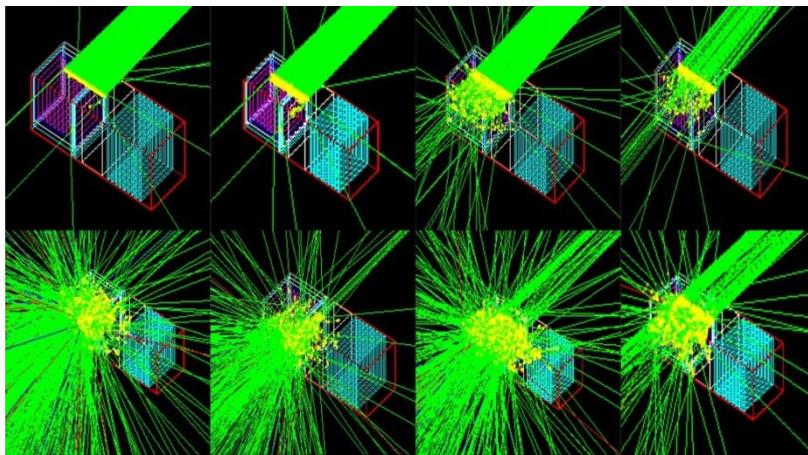


Figura 7.20: Raio incidindo do lado do CubeSat, com detector envolto na barreira de ACD e uma barreira mista de BaS na parte interior e Plexiglass na exterior.

DISCUSSÃO

É possível observar que para baixas energias, 50 KeV a 100 KeV, a barreira de BaS é bastante eficiente em comparação com a barreira de Plexiglass, barrando fótons fora da visão de estudo e que podem interferir nos resultados. Para energias mais altas, 500KeV a 500MeV, contudo, não há uma grande diferença entre os dois materiais propostos (BaS e Plexiglass) como barreiras na diminuição de ruídos, sendo que para 1 GeV, Plexiglass se mostra mais eficiente.

Para uma barreira mista, é possível perceber que, apesar de em baixas energias, 50 KeV a 500 KeV, ela servir como uma boa barreira, quando fótons mais energéticos, de 1 MeV para cima, atingem a plataforma, nota-se uma maior incidência de partículas secundárias inundando o detector.

Outro fato curioso que se percebe é que fótons que atingem a plataforma pela parte de trás, a partir de 1MeV, penetram as placas de cobre que servem como circuitos elétricos no nosso CubeSat com certa facilidade. Para evitar essa situação, seria necessária uma blindagem na parte inferior do CubeSat ou de circuitos eletrônicos mais robustos à radiação.

Para energias mais altas, pode ficar a impressão de que a configuração proposta de CubeSat é completamente ineficiente visto o grande número de ruído detectado, mas deve-se levar em consideração o fato de que o fluxo de partículas energéticas em uma determinada área decai vertiginosamente com o aumento da energia e, visto o tamanho relativamente minúsculo de um CubeSat, as chances de serem detectadas são mínimas.

A principal conclusão é que dadas as dimensões do CubeSat e as limitações de massa impostas pela plataforma, a melhor forma de combater o ruído é realizando uma detecção diferencial, com placas de detectores de anticoincidência. Estes detectores avisam ao sistema que há partículas entrando por cima e pelos lados, que certamente não fazem parte do feixe estudado, permitindo assim uma melhor discriminação entre o sinal e o ruído.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a modelagem por meio de um código Monte Carlo das interações de partículas energéticas de raios gama com um cristal cintilante e da implementação de barreiras a fim de minimizar a incidência de partículas indesejadas que aumentariam o ruído, diminuindo a confiabilidade dos dados.

No que diz respeito aos testes propostos, tanto de se criar uma barreira física para barrar partículas indesejadas que contribuiriam ao aumento do ruído nos dados, como o da diferenciação dos raios gama primários dos secundários produzidos por interações com a carcaça da plataforma e das barreiras, conclui-se que foi satisfatório. Será uma importante adição à literatura para esse tipo de detector em plataformas CubeSats, visto que hoje ela é quase inexistente.

Para se obter um funcionamento adequado do detector, no que tange à distinção das partículas de interesse, verificou-se a necessidade do uso da técnica de anticoincidência. Com ela pode-se distinguir, com maior propriedade, as partículas que compõem o ruído daquelas do feixe de raios gama oriundos do evento.

Para trabalhos futuros que queiram continuar com a proposta de detectores em plataformas CubeSats, a fim de diminuir os custos de projetos como um todo, tornando-os mais acessíveis para alunos e professores nas universidades de todo o mundo e principalmente no Brasil, a implementação de simulações computacionais como o Geant4 é bastante recomendada, visto que além de possuir uma ampla lista de físicas documentadas em seu Manual de Referências físicas, oferece a possibilidade de modelagem geométrica bastante flexível e resultados confiáveis. Ao projetar e colocar em operação um instrumento que só pode ser testado realmente no seu ambiente de execução, simulações confiáveis são imprescindíveis para o sucesso.

Plataformas CubeSats são o futuro da física de altas energias, ou mesmo da física experimental que se utiliza de experimentos no espaço, tanto pelo seu custo, como pela crescente confiança nos componentes eletrônicos junto a simulações confiáveis, não havendo razão de não serem usadas. Este trabalho demonstrou que essa é uma realidade mundial, dessa forma, tanto a Universidade de Brasília como o Brasil não podem ficar para trás.

Referências

Inan, U. S., S. C. Reising, G. J. Fishman, and J. M. Horack (1996), On the association of terrestrial gamma-ray bursts with lightning and implications for sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 23(9), 1017–1020.

Rycroft, M.J., Odzimek, A., Arnold, N.F., Füllekrug, M., Kulak, A., Neubert, T., 2007. New model simulation of the global atmospheric electric circuit driven by thunderstorms and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 69, 2485-2509.

Gabriela Nunes Turqueti e Ivan Soares Ferreira. Um estudo do circuito elétrico atmosférico global. *Physicae Organum - Brasília*, vol. 1, n. 2 - 2015.

Moss, G. D., V. P. Pasko, N. Liu, and G. Veronis (2006), Monte Carlo model for analysis of thermal runaway electrons in streamer tips in transient luminous events and streamer zones of lightning leaders, *J. Geophys. Res.*, 111, A02307, doi:10.1029/2005JA011350.

Williams, E.; Boldi, R.; Bór, J.; Sători, G.; Price, C.; Greenberg, E.; Takahashi, Y.; Yamamoto, K.; Matsudo, Y.; Hobara, Y.; Hayakawa, M.; Chronis, T.; Anagnostou, E.; Smith, D. M.; Lopez, L. I. (2006). "Lightning flashes conducive to the production and escape of gamma radiation to space". *Journal of Geophysical Research*. 111: D16209. Bibcode:2006JGRD..11116209W. doi:10.1029/2005JD006447.

Dwyer, J. R., B. W. Grefenstette, and D. M. Smith (2008), High-energy electron beams launched into space by thunderstorms, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02815, doi:10.1029/2007GL032430.

Carlson, B. E., Lehtinen, N. G., and Inan, U. S. (2008). Runaway relativistic electron avalanche seeding in the Earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 113(A10), A10307.

Carlson, B. E., N. G. Lehtinen, and U. S. Inan (2009), Observations of terrestrial gamma-ray flash electrons, *AIP Conference Proceedings*, 1118(1), 84–91, doi:10.1063/1.3137717.

Chanrion, O., and T. Neubert (2010), Production of runaway electrons by negative streamer discharges, *J. Geophys. Res.*, 115(A14), A00E32, doi:10.1029/2009JA014774.

Celestin, S., and V. P. Pasko (2011), Energy and fluxes of thermal runaway electrons produ-

ced by exponential growth of streamers during the stepping of lightning leaders and in transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, 116(A15), A03315, doi:10.1029/2010JA016260.

XU, W.; CELESTIN, S.; PASKO, V.P. Source altitudes of terrestrial gamma-ray flashes produced by lightning leaders. *GRL*, v. 39, n. 8, 2012. DOI: 10.1029/2012GL051351.

Gurevich, A. V.; Milikh, G. M.; Roussel-Dupre, R. (June 1992). "Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm". *Physics Letters A*. 165 (5–6): 463. Bibcode:1992PhLA..165..463G. doi:10.1016/0375-9601(92)90348-P.

Dwyer, J. R. (2003), A fundamental limit on electric fields in air, *Geophys. Res. Lett.*, 30(20), 2055, doi:10.1029/2003GL017781. Wiley Online Library | Web of Science® Times Cited: 131.

Dwyer, J. R. (2008). "Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes". *Journal of Geophysical Research*. 113: D10103. Bibcode:2008JGRD..11310103D. doi:10.1029/2007JD009248.

Dwyer, J. R.; Grefenstette, B. W.; Smith, D. M. (2008). "High-energy electron beams launched into space by thunderstorms". *Geophysical Research Letters*. 35 (2): L02815. Bibcode:2008GeoRL..35.2815D. doi:10.1029/2007GL032430.

Dwyer, J. R., and L. P. Babich (2011), Low-energy electron production by relativistic runaway electron avalanches in air, *J. Geophys. Res.*, 116(A15), A09301, doi:10.1029/2011JA016494.

Dwyer, J. R., D. M. Smith, and S. A. Cummer (2012), High-energy atmospheric physics: Terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena, *Space Sci. Rev.* doi:10.1007/s11214-012-9894-0.

KÖHN, C.; EBERT, U. (2015). Calculation of beams of positrons, neutrons and protons associated with terrestrial gamma-ray flashes. *J. Geophys. Res. Atmos.* 120, 1620, doi:10.1002/2014JD022229.

KÖHN, C.; DINIZ, G.; MUHSIN, N.H. (2017). Production mechanisms of leptons, photons, and hadrons and their possible feedback close to lightning leaders. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, doi:10.1002/2016JD025445.

DWYER, J.R.; RASSOUL, H.K.; AL-DAYEH, M.; CARAWAY, L.; WRIGHT, B.; CHEST, A.; UMAN, M.A.; RAKOV, V.A.; RAMBO, K.J.; JORDAN, D.M.; JERAULD, J.; SMYTH, C. A ground level gamma ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *GRL*,

Smith, D. M.; Lopez, L. I.; Lin, R. P.; Barrington-Leigh, C. P. (2005). "Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV". *Science*. 307 (5712): 1085–1088. Bibcode:2005Sci...307.1085S. doi:10.1126/science.1107466. PMID 15718466.

TAVANI, M.; MARISALDI, M.; LABANTI, C.; FUSCHINO, F.; ARGAN, A.; TROIS, A.; GIOMMI, P.; COLAFRANCESCO, S.; PITTORI, C.; PALMA, F.; TRIFOGLIO, M.; GIANNOTI, F.; BULGARELLI, A.; VITTORINI, V.; VERRECCHIA, F.; SALOTTI, L.; BARBIELLINI, G.; CARAVEO, P.; CATTANEO, P. W.; CHEN, A.; CONTESSI, T.; COSTA, E.; D'AMMANDO, F.; MONTE, E. D.; PARIS, G. D.; COCCO, G. D.; PERSIO, G. D.; DONNARUMMA, I.; EVANGELISTA, Y.; FEROCI, M.; FERRARI, A.; GALLI, M.; GIULIANI, A.; GIUSTI, M.; LAPSHOV, I.; LAZZAROTTO, F.; LIPARI, P.; LONGO, F.; MEREGHETTI, S.; MORELLI, E.; MORETTI, E.; MORSELLI, A.; PACCIANI, L.; PELLIZZONI, A.; PEROTTI, F.; PIANO, G.; PICOZZA, P.; PILIA, M.; PUCELLA, G.; PREST, M.; RAPISARDA, M.; RAPPOLDI, A.; ROSSI, E.; RUBINI, A.; SABATINI, S.; SCALISE, E.; SOFFITTA, P.; STRIANI, E.; VALLAZZA, E.; VERCELLONE, S.; ZAMBRA, A.; ZANELLO, D. Terrestrial gamma-ray ashes as powerful particle accelerators. *Physical Review Letters*, v. 106, n. 1, p. 018501, 2011.

KÖHN, C. High-energy phenomena in thunderstorm and laboratory discharges. 2014. PHD, Holstein, 2014.

Medeiros, Claudia. Estudo da ocorrência de corrente contínua em relâmpagos nuvem-solo negativos. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

DINIZ, G. (2017). Processos radiativos no plasma atmosférico e suas consequências. Qualificação, Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 52 p.

Ferro, Marco Antonio da Silva. Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais. Tese (Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

Campos, Leandro Zanella de Souza. Caracterização das componentes-m e dos líderes de relâmpagos naturais a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e medidas de campo elétrico. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Poggiani, Rosa. High Energy Astrophysical Techniques. Springer Switzerland, 2017.

Broberg Skeltved, A., N. Østgaard, B. Carlson, T. Gjesteland, and S. Celestin (2014), Modeling the relativistic runaway electron avalanche and the feedback mechanism with GEANT4, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 9174–9191, doi:10.1002/2014JA020504.

CubeSat Design Specification Rev. 13. The CubeSat Program, Cal Poly SLO.
<http://www.nanosats.eu/>.

Thyrso Villela, Alessandra Brandão, Rodrigo Leonardi. Cubesats e oportunidades para o setor espacial brasileiro. *Parc. Estrat., Brasília-DF*, v. 21, n. 42, p. 91-114, jan-jun 2016.

Syed Naeem Ahmed, *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Academic Press Inc. Published by Elsevier 2007.

Geant4 Colaboration. Geant4 User's Guide for Application Developers. Version: geant4 10.3 (9 December 2016).

Geant4 Colaboration. Physics Reference Manual. Version: geant4 10.3 (9 December 2016).

<http://www-public.slac.stanford.edu/geant4/Tutorial2014.asp>

Advanced Monte Carlo for radiation physics, particle transport simulation, and applications: proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, 32-26 October 2000 I Andreas Kling. [et al.], eds.

Guatelli, S, Cutajar, D, Oborn, B and Rosenfeld, AB, 2011, Introduction to the geant4 simulation toolkit, 4th SSD Summer School: Concepts and Trends in Medical Radiation Dosimetry, pp. 303-322, American Institute of Physics.

Emily S. Poon. Validation of the GEANT4 Monte Carlo code for radiotherapy applications. A thesis submitted to McGill University in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master in Science.

A. A. Moiseev, R. C. Hartman, J. F. Ormes, D. J. Thompson, M. J. Amato, T. E. Johnson, K. N. Segal, and D. A. Sheppard. The Anti-Coincidence Detector for the GLAST Large Area Telescope. SLAC-PUB-12411.

D.J. Thompson, E. Charles, R.C. Hartman, A.A. Moiseev, J.F. Ormes, for the GLAST/LAT Collaboration. Performance of the Anti-Coincidence Detector on the GLAST Large Area Telescope. SLAC-PUB-12900.