

# Projeto de Pesquisa

## *Uso de Geradores de Eventos na Simulação de Reações a Altas Energias*

### **Resumo**

Neste projeto o estudante deverá aprender a utilizar geradores de eventos para simular reações em aceleradores de partículas, em particular no colisor LHC do CERN. Reações bem conhecidas, como a produção do bóson  $Z^0$  e de jatos hadrônicos deverão ser simuladas e comparadas com os resultados conhecidos da literatura. Deverá ser adquirida habilidade na utilização dos geradores Madgraph, Pythia e Delphes, bem como na ferramenta a ser utilizada para a análise dos dados gerados, o ROOT.

## **1 Introdução**

Construído para investigar as interações fundamentais da natureza e a estrutura íntima da matéria, o acelerador de partículas Large Hadron Collider - LHC da European Organization for Nuclear Research - CERN [1] está operando desde o início de 2010. De 2022 até 2025 colidirá prótons a uma energia sem precedentes de 13,8 TeV de centro de massa. O LHC desempenhará o papel central nesta área de pesquisa, possibilitando a investigação da existência de novas partículas e interações.

Ao longo do LHC estão instalados quatro experimentos: ATLAS, CMS, LHCb e ALICE. Talvez o mais destacado item da agenda do LHC tenha

sido a descoberta do bóson de Higgs [2]. O mecanismo de Higgs é, no Modelo Padrão, responsável pela quebra espontânea de simetria e, conseqüentemente, pela geração de massa dos bósons vetoriais intermediários das interações e dos férmions constituintes da matéria. Além da busca do Higgs, há um grande espectro de modelos teóricos que prevêem diferentes cenários a serem testados. Dentre eles, os modelos de supersimetria e aqueles que prevêem a existência de dimensões extras e de matéria escura estão entres os mais promissores.

## 2 Objetivos e Metas

Este Projeto de Pesquisa tem por objetivo introduzir o estudante nas técnicas e conceitos fundamentais da Física de Altas Energias, complementando a formação acadêmica do estudante e fornecendo um conhecimento básico desta área de pesquisa. Ao final deste projeto, o estudante deverá ser capaz de utilizar geradores de eventos para simular reações em aceleradores de partículas, em particular no colisor LHC do CERN. Reações bem conhecidas, como a produção do bóson  $Z^0$  e de jatos hadrônicos deverão ser simuladas e comparadas com os resultados conhecidos. Para tanto, deverá ser adquirida habilidade na utilização dos geradores MadGraph [3], Pythia [4] e Delphes [5], bem como na ferramenta utilizada para a análise dos dados gerados, o ROOT [6].

Este estudo será conduzida em várias etapas. Na primeira etapa será feito o estudo dos conceitos fundamentais da física de partículas, da cinemática relativística bem como o aprendizado básico de programação na linguagem C++ e utilização da plataforma ROOT no sistema operacional Linux. Em seguida será feito o estudo dos geradores MadGraph,

Pythia e Delphes através da simulação sequencial de alguns processos conhecidos. Em cada etapa, o resultado das simulações será realizado através do ROOT. Os relatórios parciais e finais deverão ser elaborados em LaTeX, bem como o poster final.

O MadGraph é uma ferramenta para geração automática de elementos de matriz para processos de Física de Altas Energias, como decaimentos e espalhamentos. No MadGraph o usuário especifica um processo em termos de partículas de estado inicial e final, podendo escolher o modelo teórico a ser utilizado. Como resultado, o MadGraph gera todos os diagramas de Feynman para o processo e gera o código computacional necessário para avaliar o elemento da matriz em um determinado ponto do espaço de fase. A avaliação dos elementos da matriz é feita usando chamadas para funções de onda e amplitudes de helicidade. O MadGraph também produz saída pictórica dos diagramas de Feynman para o processo em questão. O código produzido pelo MadGraph é então utilizado para os cálculos de seção de choque, largura de decaimento e geração de eventos. O MadGraph fornece todos os elementos necessários para a fenomenologia do Modelo Padrão e Além do Modelo Padrão, e utiliza uma grande gama de ferramentas relevantes para manipulação e análise de eventos. Os processos podem ser simulados com precisão de primeira ordem (LO) para qualquer Lagrangiana definida pelo usuário, e precisão de ordem superior (NLO) no caso de modelos que suportam esse tipo de cálculo. O MadGraph escreve o resultado da reação a nível partônico em um arquivo contendo as características cinemáticas dos estados finais da reação na padronização do Acordo de Les Houches - LHE [7], formato que pode ser lido posteriormente por outros programas encarregados da formação das partículas finais da reação, como por exemplo o Pythia.

O Pythia é um programa utilizado tanto para a geração de eventos, como para complementar a geração de eventos em nível partônico produzida por outros geradores, tais como o MadGraph. Através do Pythia é realizada a hadronização dos pártons produzidos no estágio de geração a nível de árvore, bem como a fragmentação dos fluxos de cor do processo. Ele também é capaz de inserir os efeitos da radiação dos estados iniciais e finais, bem como os efeitos advindos de múltiplas interações entre os pártons iniciais. O Pythia contém teorias e modelos para uma série de aspectos de física, incluindo interações em várias escalas de momento transferido e funções de distribuições de pártons. A partir das partículas produzidas em nível de árvore pelo MadGraph, o Pythia completa o processo de produção das partículas produzidas na colisão, gerando o conjunto completo de partículas finais produzidas em uma reação a altas energias. Para se realizar a simulação completa de como são observados os eventos, falta a simulação da detecção das partículas produzidas pelo Pythia e a construção dos objetos físicos utilizados na análise dos dados nos experimentos de física de altas energias. Isto é feito pelo Delphes.

O Delphes realiza a simulação de um detector de propósitos gerais, modelando o comportamento de vários dos detectores atualmente em operação. A simulação pode incluir sistemas de propagação de traços através de um campo magnético, calorímetros eletromagnéticos e hadrônicos e um sistema de identificação de múons. Objetos físicos que podem ser usados para análise de dados são reconstruídos a partir da resposta simulada do detector. Isso inclui traços e depósitos de energia nos calorímetros e objetos de alto nível, como elétrons isolados, jatos, taus e energia faltante. O framework Delphes é amplamente usado para estudos simplificados de detectores, quando não são necessárias ferramen-

tas mais precisas. Embora alguns aspectos do Delphes sejam específicos de colisores de hádrons, ele é flexível o suficiente para ser adaptado às necessidades dos experimentos de colisores elétron-pósitron. Ele é plenamente compatível com o Pythia, construindo o evento da colisão como se fosse o experimento desejado e armazenando os objetos dos diversos eventos em estruturas de banco de dados do tipo Tree do ROOT, assim como é realizado nos experimentos do LHC.

### **3 Metodologia**

Para a correta compreensão dos fenômenos físicos envolvidos nestas simulações será necessário o estudo sistemático de livros textos da área, como o “Quarks and Leptons” [8], bem como adquirir cultura geral dos problemas da física de partículas através da leitura de textos de divulgação da área.

Será necessário também o domínio da cinemática relativística para a correta análise e interpretação das variáveis mensuráveis nos experimentos de física de altas energias. Para isto serão estudados os primeiros capítulos do livro de Teoria de Campos de Landau [9] e a apostila do curso “Introdução à Cinemática Relativística” [10]

Como as atividades deste projeto de pesquisa estão pesadamente relacionadas à programação científica avançada, o estudante deverá, ao longo de todo o projeto, desenvolver suas habilidades nas técnicas de programação em C++ em ambiente Linux, bem como na utilização do ROOT para análise dos dados produzidos. Concomitantemente ao desenvolvimento inerente à realização das atividades, estas habilidades deverão ser solidificadas através do estudo sistemático do livro “Accelerated

C++” [11].

De posse dos conceitos básicos de cinemática relativística, programação científica e das propriedades das partículas e suas interações, o estudante deverá dar início ao estudo do MadGraph. Ele deverá ser capaz de instalar o programa no ambiente Linux, realizar os testes padrões para averiguar sua correta instalação e reproduzir os exemplos presentes nos diversos tutoriais existentes.

Deverá então realizar o encadeamento da geração de eventos pelo MadGraph à simulação pelo Pythia de alguns processos padrões como a produção do bóson  $Z^0$  em colisões  $e^+e^-$  e  $pp$ , analisando seus decaimentos hadrônicos e leptônicos. Deverá ser então estudada a hadronização dos estados produzidos em nível partônico, incluindo as correções para radiações de estados iniciais e finais.

Uma vez dominadas as etapas da simulação da reação, deverá ser realizada a simulação da detecção das partículas produzidas através do Delphes, quando então esses mesmos eventos serão analisados a partir dos objetos físicos disponibilizados pelos experimentos de física de altas energias.

Ao final deste programa, o estudante deverá redigir o relatório final expondo os procedimentos realizados, seus resultados e conclusões. Deverá então elaborar o cartaz contendo os resultados obtidos, e apresentá-lo no Simpósio de Iniciação Científica de 2022 da UFABC.

## 4 Cronograma

As atividades descritas acima deverão seguir aproximadamente o seguinte cronograma, dividido em trimestres de duração do projeto:

	1°	2°	3°	4°
Conceitos fundamentais				
Programação científica: ROOT e C++				
Cinemática Relativística				
Simulação de reações usando o MadGraph				
Simulação de reações usando o Pythia				
Simulação de reações usando o Delphes				
Elaboração do relatório final e cartaz				

## Referências

- [1] CERN: <http://public.web.cern.ch/public/Welcome.html>
- [2] CMS Collaboration, “*Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*”, Physics Letters B716, 30 (2012).
- [3] MadGraph: <http://madgraph.hep.uiuc.edu>  
J. Alwall *et al.*, Journal of High Energy Physics 7, 79 (2014).
- [4] PYTHIA: <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>  
T. Sjöstrand, S. Mrenna and P. Skands, JHEP05 (2006) 026, Comput. Phys. Comm. 178 (2008) 852.
- [5] J. de Favereau *et al.*, “*DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment*”, Journal of High Energy Physics 2, 57 (2014).
- [6] ROOT: <http://root.cern.ch/>  
R. Brun e F. Rademakers, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A389, 81 (1997).

- [7] J. Alwall et al. (September 2006). "A standard format for Les Houches Event Files". arXiv:hep-ph/0609017
- [8] F. Halzen e A.D. Martin, "*Quarks and Leptons: an Introductory Course in Modern Particle Physics*", Wiley & Sons (1984).
- [9] L.D. Landau e E.M. Lifshitz, "*The Classical Theory of Fields*", Pergamon Press (1975)
- [10] S. F. Novaes, apostila de curso, disponível em  
<http://www.sprace.org.br/slc/course/view.php?id=9>
- [11] A. Koenig e B. Moo, "*Accelerated C++: Practical Programming by Example*", Addison-Wesley (2000).