

# Projeto de Pesquisa

## *Estudo de Sinais de Matéria Escura no LHC*

### **Resumo**

Neste projeto o estudante deverá utilizar geradores de eventos para simular a produção de Matéria Escura em reações envolvendo aceleradores de partículas, em particular no colisor LHC do CERN. Estas reações deverão ser simuladas utilizando-se geradores e simuladores de eventos MadGraph, Pythia e Delphes, sendo posteriormente analisadas utilizando-se 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. O LHC desempenha o papel central nesta área de pesquisa, possibilitando a investigação da existência de novas partículas e interações. Talvez o mais destacado item de sua agenda 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. Remanescente deste mecanismo, o elusivo bóson de Higgs foi por muitas décadas o maior desafio da Física Experimental de Altas Energias.

Apesar de não se poder prever sua massa, havia fortes indicações experimentais indiretas que apontavam para valores que seriam acessíveis a este experimento.

Além de servir para a comprovação da existência do Bóson de Higgs, ou o descarte definitivo de sua existência, o LHC foi projetado para ser uma máquina de descobertas, que permite explorar de forma sistemática regiões ainda não acessíveis até hoje. Com a comprovação experimental da existência do Bóson de Higgs, foi concluída a descoberta de todos os componentes do Modelo Padrão, conforme previstos teoricamente nos anos 60 e 70 do século passado. Há, no entanto, uma série de indícios tanto teóricos quanto observacionais que o Modelo Padrão não seja ainda a explicação completa e formalmente coerente das interações entre os constituintes elementares da matéria. De fato, além dos experimentos do LHC estarem empenhados em aprimorar as medidas existentes dos parâmetros do Modelo Padrão, há um grande espectro de modelos teóricos além do Modelo Padrão que vêm sendo testados no LHC. Dentre eles, os modelos de supersimetria e aqueles que prevêm a existência de dimensões extras e de matéria escura estão entre os mais promissores. Os modelos de supersimetria provêm a coerência formal que falta ao Modelo Padrão; a inserção de dimensões extras, além das usuais, possibilita a incorporação da interação gravitacional às três outras já presentes no Modelo Padrão (MP); os modelos de Matéria Escura (ME) procuram explicar, dentro da perspectiva da física de partículas, fenômenos descritos por observações astronômicas que não encontram explicação dentro do conhecimento que se tem atualmente.

A procura pelo Bóson de Higgs concentrou grande parte dos esforços de investigação do primeiro ciclo de funcionamento do LHC, operando

então a energia de 8 TeV. Da mesma forma, a elucidação da natureza da Matéria Escura é um dos grandes objetivos do LHC neste novo ciclo de operação a energia de 13-14 TeV, que deve se estender até aproximadamente 2024. Ambos os experimentos CMS e ATLAS estão realizando grandes esforços para cumprir este audacioso programa de pesquisa [3].

O estudo reações onde ocorra falta de momento transversal total dos estados finais é parte essencial do extensivo programa de busca por nova física do LHC e em particular para a procura da Matéria Escura. Dada a natureza desconhecida da ME, a interpretação de tais pesquisas devem ser feitas de forma ampla e inclusiva. Existem vários modelos simplificados para interpretação da falta de momento transversal [4]. Uma característica comum de modelos simplificados para a ME é a presença de partículas adicionais que medeiam as interações entre os componentes do MP e a partícula que compõe a ME.

Se a ME é uma nova partícula fundamental, e se ele interage fracamente com o MP, a aniquilação de partículas de MP em ME constitui uma fonte de momento faltante nas reações, visto que a ME interage muito fracamente com a matéria usual, tornando-se invisível ao detector.

O exemplo mais simples e mais conhecido da procura por momento faltante é a busca por mono-jatos, ou seja, um único jato de hádrons restando contra nada do outro lado. No modelo de partículas subjacentes, esse jato é assumido como tendo sido irradiado a partir dos partons do estado inicial, antes da colisão produzir a componente invisível, qual seja, a ME. Além de mono-jatos, raciocínio similar se aplica à busca por sinais de ME em eventos contendo mono-fótons, mono- $W$ , mono- $Z$ , jatos provenientes de quarks top ou bottom, bem como buscas por mono-léptons.

## 2 Objetivos e Metas

Este Projeto de Pesquisa tem por objetivo introduzir o estudante nas técnicas e conceitos fundamentais da Física de Altas Energias, tanto no aspecto teórico como no experimental. Visamos complementar a formação acadêmica do estudante, fornecendo um conhecimento básico da pesquisa atual na área e possibilitando sua futura participação nos experimentos de Física de Altas Energias. Ao final deste projeto, o estudante deverá ser capaz de utilizar geradores de eventos para simular a produção de Matéria Escura em reações envolvendo aceleradores de partículas, em particular no colisor LHC do CERN. Estas reações deverão ser simuladas utilizando-se geradores de eventos como Pythia e MadGraph e posteriormente analisadas utilizando-se ROOT. Os sinais característicos da produção de Matéria Escura serão então identificados, possibilitando o estudo mais detalhada do pano de fundo que pode levar ao surgimento de sinais similares. Com isto poderão ser desenvolvidas estratégias de análise que permitam uma separação eficiente do sinal proveniente da existência de Matéria Escura daquele proveniente do pano de fundo da reação.

Neste projeto realizaremos os estudos relevantes para a procura por mono-X no LHC em modelos simplificados que possuem um candidato a matéria escura e um mediador em reações no canal  $s$  [5]. Isso nos permitirá estudar os sinais produzidos com falta de momento transversal, contendo jatos ou bósons neutros ( $\gamma, Z, H$ ), verificando os efeitos advindos da inclusão de radiação adicional advinda de múltiplos pártons na produção dos estados iniciais e seu casamento com o chuveiro partônico que origina os jatos de hádrons.

Estas simulações serão realizadas utilizando-se modelos implementa-

dos na plataforma de simulação computacional do MadGraph5 [6], que permite o encadeamento do cálculo dos elementos de matriz com a geração dos eventos de Monte Carlo em nível partônico e sua posterior hadronização nos estados finais através das rotinas do Pythia [7].

O MadGraph5 é uma plataforma que permite o cálculo automatizado a nível de árvore (LO) e na aproximação seguinte (NLO) de seções de choque diferenciais e seu casamento com os chuveiros partônicos que lhe deram origem.

O Pythia é uma plataforma utilizado para a geração de eventos de física de alta energia, ou seja, para a descrição de colisões a altas energias entre partículas elementares, tais como elétrons, pósitrons, prótons e antiprótons. Ele contém teorias e modelos para uma série de aspectos de física, incluindo interações em várias escalas de momento transferido, funções de distribuições de pártons, radiação dos estados iniciais e finais, interações multi-parton, fragmentação e decaimento. Foi desenvolvido na Universidade de Lund, Suécia, em grande parte com base em pesquisa dos próprios desenvolvedores, mas também utilizando muitos procedimentos conhecidos da literatura da área.

O MadGraph, como um gerador de eventos em nível partônico, e o Pythia, como um gerador de estados finais de objectos detectáveis, podem também atuar de forma integrada. Assim, elementos de matriz exatos, a convolução com funções de estrutura hadrônica, decaimentos, hadronização dos pártons e a evolução do chuveiro partônico podem ser integrados, realizando os estágios básicos das simulações das reações a altas energias.

Este estudo será conduzida em várias etapas. Na primeira etapa será feito o estudo das técnicas de simulação de Monte Carlo e sua utilização

em integrais numéricas. Em seguida será feito o estudo dos geradores MadGraph e Pythia, produzindo arquivos com as características cinemáticas dos estados finais da reação na padronização do Acordo de Les Houche - LHE [8]. Esses arquivos serão então convertidos para serem analisados utilizando-se a plataforma de análise ROOT [9], plataforma de organização e análise de dados orientada a objeto largamente utilizada na física de partículas elementares. Uma vez que as chamadas Trees do ROOT tenham sido criadas, contendo a totalidade dos eventos simulados, inicia-se então o processo de análise dos dados em si, o qual difere do procedimento utilizado nos experimentos do LHC apenas em sua complexidade.

### **3 Metodologia**

Este programa de pesquisa destina-se a ser realizado por estudantes que estejam no final do curso de Graduação em Física, pois requer a compreensão de um formalismo acessível apenas àqueles que tenham tido contato com os conceitos fundamentais da mecânica quântica. O objetivo é fornecer ao estudante a formação básica em física de partículas e suas técnicas de modo a adiantar conceitos e habilidades que serão utilizados por ocasião de sua pós-graduação em física de partículas.

Para a correta análise e interpretação das variáveis mensuráveis nos experimentos de física de altas energias é fundamental o domínio da cinemática relativística. Para tanto serão estudados os primeiros capítulos do livro de Teoria de Campos de Landau [10] e a apostila de curso *Introdução à Cinemática Relativística* [11].

Para a correta compreensão dos fenômenos físicos envolvidos nestas

simulações será necessário o estudo sistemático de livros textos da área, bem como adquirir cultura geral dos problemas da física de partículas através da leitura de textos de divulgação da área. Deverá ser realizado o estudo sistemático do livro "Quarks and Leptons"[12] até pelo menos seu capítulo 06, onde são vistos os processos da Eletrodinâmica Quântica.

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++"[13].

Paralelamente à aquisição e consolidação dos conceitos básicos de cinemática relativística, programação científica e das propriedades das partículas e suas interações, o estudante deverá realizar o estudo do Pythia e do MadGraph5. Ele deverá ser capaz de instalar esses programas no ambiente Linux, realizar os testes padrões para averiguar sua correta instalação e reproduzir os exemplos presentes nos diversos tutoriais existentes. Deverá então realizar a simulação de alguns processos padrões como a produção do bóson  $Z^0$  em colisões  $pp$  analisando seus decaimentos hadrônicos e leptônicos.

Ele deverá então ser capaz de utilizar um dos modelos de produção de Matéria Escura já implementados nesses simuladores e obter os sinais que deverão ser observados na produção associada de Matéria Escura com monojetas. Deverá neste estágio ser estudada a hadronização dos estados produzidos em nível partônico, incluindo as correções para ra-

dições de estados iniciais e finais, bem como a influência de diferentes funções de distribuição de pártons e a escolha apropriada das escalas de hadronização e fatoração.

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 2023 da UFABC.

## 4 Cronograma

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

	1° Trim.	2° Trim.	3° Trim.	4° Trim.
Conceitos fundamentais				
Programação científica: ROOT e C++				
Cinemática relativística				
Instalação e testes de Pythia e MadGraph				
Simulação da produção de Matéria Escura				
Estudo das características do sinal				
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] D. Abercrombie *et al.*, "*Dark Matter Benchmark Models for Early LHC Run-2 Searches: Report of the ATLAS/CMS Dark Matter Forum*," arXiv:1507.00966 [hep-ex].
  - [4] J. Abdallah *et al.*, "*Simplified Models for Dark Matter and Missing Energy Searches at the LHC*," arXiv:1409.2893 [hep-ph].
  - [5] O. Mattelaer and E. Vryonidou, "*Dark matter production through loop-induced processes at the LHC: the s-channel mediator case*," Eur. Phys. J. C **75**, no. 9, 436 (2015) [arXiv:1508.00564 [hep-ph]].
  - [6] MadGraph: <http://madgraph.hep.uiuc.edu>  
J. Alwall *et al.*, Journal of High Energy Physics 7, 79 (2014).
  - [7] 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.
  - [8] J. Alwall *et al.* (September 2006). "A standard format for Les Houches Event Files". arXiv:hep-ph/0609017
  - [9] ROOT: <http://root.cern.ch/>  
R. Brun e F. Rademakers, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A389, 81 (1997).
  - [10] L.D. Landau e E.M. Lifshitz, "*The Classical Theory of Fields*", Pergamon Press (1975)
  - [11] S. F. Novaes, apostila de curso, disponível em  
<http://www.sprace.org.br/slc/course/view.php?id=9>

- [12] F. Halzen e A.D. Martin, "*Quarks and Leptons: an Introductory Course in Modern Particle Physics*", Wiley & Sons (1984).
- [13] A. Koenig e B. Moo, "*Accelerated C++: Practical Programming by Example*", Addison-Wesley (2000).