

Alan da Silva G. de Souza

**Um novo exercício de International Masterclass
para ensinar Física de Partículas**

Macaé, RJ

Março de 2017



**Universidade Federal do
Rio de Janeiro**

Programa de pós-graduação em
Ensino de Física
Campus Macaé



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Um novo exercício de International Masterclass para ensinar Física de Partículas

Alan da Silva G. de Souza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus UFRJ-Macaé, no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Campus UFRJ-Macaé

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Orientador: Prof. Dr^a. Irina Nasteva

Macaé, RJ

Março de 2017

Um novo exercício de International Masterclass para ensinar Física de Partículas

Alan da Silva G. de Souza

Orientadora:
Prof. Dr^a. Irina Nasteva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus UFRJ-Macaé, no Curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Dr^a. Irina Nasteva (Presidente)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar

Prof. Dr. Murilo Santana Rangel

Prof. Dr^a. Valéria Nunes Belmonte

Macaé, RJ
Março de 2017

S729n

Souza, Alan da Silva G. de

Um novo exercício de International Masterclass para ensinar Física de Partículas /
Alan da Silva G. de Souza. Macaé, RJ: Campus UFRJ-Macaé, Março de 2017.
xvi, 83 p.: il. (algumas color.); 30 cm.

Orientador: Prof. Dr^a. Irina Nasteva

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus
UFRJ-Macaé, Março de 2017.

1. Ensino de Física. 2. Física de Partículas. 3. International Masterclass. I. Nasteva, Irina. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus UFRJ-Macaé. III. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. IV. Um novo exercício de International Masterclass para ensinar Física de Partículas

Este trabalho é dedicado à memória de Darcy Bezerra de Souza: Você foi um exemplo de pai, avô, amigo e, acima de tudo, um homem de caráter. A saudade é grande.

Agradecimentos

Ao Deus criador dos Céus e da Terra, que me concedeu, em sua infinita misericórdia, o vigor necessário para concluir esta tarefa. Que o nome do Senhor Jesus Cristo, seu filho, seja exaltado por todas as gerações. A ti eu ofereço toda honra, glória e louvor eternamente.

A minha professora e orientadora do mestrado, Dr^a Irina Nasteva, que me proporcionou a oportunidade de concluir este trabalho sempre me ensinando muito. Seu conhecimento é esplêndido! Muito obrigado pela sua dedicação, sem a qual, eu não teria conseguido realizar esta tarefa.

Ao meus pais Luiz Fernandes e Tânia, que sempre foram referências de amor, carinho, cuidado e trabalho. Muito obrigado, pois vocês foram os meus alicerces durante toda a minha vida e sem vocês eu não poderia ter chegado até aqui.

A minha linda noiva Blenda, que sempre me apoiou e me deu forças nos momentos mais difíceis. A você dedico todo o meu amor.

Aos meus colegas de mestrado: Diogo, Evandro, William, Hudineia, Gislaine, Antônio, Wallace e Breder, passamos momentos difíceis, porém muito divertidos. Obrigado pelo apoio de cada um de vocês e que sejamos amigos para sempre.

A todos os professores do Mestrado Profissional da UFRJ campus Macaé, em especial: Bernardo, Habib, Valéria e Raphael, obrigado por tudo.

Ao meu amigo Rubem, obrigado pelas sugestões no decorrer do trabalho.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”
Albert Einstein

Resumo

O presente trabalho propõe a criação de uma sequência didática de uma ferramenta educacional para ensinar física de partículas a alunos do ensino médio. O International Masterclass é uma atividade com exercícios em que os estudantes simulam o trabalho de um pesquisador através de ferramentas de software específicas, proporcionando aos mesmos o acesso à física de partículas e ao processo de pesquisa científica. O novo exercício proposto utilizará dados do experimento LHCb no CERN para reconstruir decaimentos de mésons B . A partir do decaimento desse tipo de méson em partículas mais leves e estáveis, se verifica a violação de CP, a fim de se fazer um breve panorama sobre o comportamento da matéria e da antimatéria. Um exercício existente, referente ao decaimento do méson D^0 , foi traduzido para o português como parte do produto da dissertação e aplicado a dois grupos de alunos do ensino médio no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A realização desta atividade mostrou-se uma prática bastante positiva segundo o relato dos estudantes que participaram. O software do novo exercício está em fase de elaboração. O manual de instruções configura-se na segunda parte do produto desta dissertação e foi desenvolvida baseada no manual de instruções do exercício já existente.

Palavras-chave: Ensino de Física. Física de Partículas. International Masterclass.

Abstract

The present work proposes the creation of a didactic sequence of an educational tool to teach particle physics to high school students. The International Masterclass is an activity with exercises in which students can simulate the work of a researcher through the use of dedicated software tools, thus giving them access to particle physics and the scientific research process. The proposed new exercise will use data from the LHCb experiment at CERN to reconstruct decays of B mesons. From the decay of this type of meson to lighter and more stable particles, the phenomenon of CP violation is explored, in order to give a brief overview of the behaviour of matter and antimatter. The current LHCb exercise, related to the decay of the D^0 meson, was translated to Portuguese as part of the dissertation product and applied to two groups of high school students at the Institute of Physics of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ). The application of this activity proved to be a very positive practice according to the students' reports. The software of the new exercise is still under development. The instruction manual comprises the second part of the educational product in this dissertation, and was developed based on the instruction manual of the existing exercise.

Keywords: Physics Education. Particle Physics. International Masterclass.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Partículas elementares do Modelo Padrão.	23
Figura 2 – Representação gráfica do detector LHCb. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics	33
Figura 3 – Posição de decaimento “D” do méson D^0 em duas partículas, deslocado a partir da colisão entre prótons (bolha amarela). Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	33
Figura 4 – Visualização de um evento. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	34
Figura 5 – Visualização de uma possível trajetória cruzada de um <i>káon</i> e um <i>píon</i> a partir de um vértice deslocado (indicado pela seta em vermelho), com um dos traços selecionado. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	34
Figura 6 – Distribuição total da massa do D^0 com ajuste de gaussiana para o sinal (linha azul) e reta para o ruído (linha vermelha). Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	35
Figura 7 – Distribuição de candidatos a D^0 em função do momento do D^0 transverso à linha do feixe do LHC. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	36
Figura 8 – Distribuição de candidatos a D^0 em função do logaritmo do parâmetro de impacto. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	37
Figura 9 – Distribuição do tempo de decaimento dos candidatos D^0 . Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	37
Figura 10 – Ferramenta de ajustes da distribuição exponencial para calcular o tempo de vida do D^0 . Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.	38
Figura 11 – Respostas à pergunta 4 sobre o primeiro contato com a Física de Partículas com percentual do número total de marcações	42
Figura 12 – Respostas à pergunta 7 sobre os tópicos que mais marcaram os estudantes durante a tarefa com percentual do número total de marcações.	43
Figura 13 – Espectro de massa invariante do decaimento $B^\pm \rightarrow K^\pm K^+ K^-$, utilizando a região dos dados com maior assimetria. A figura à esquerda mostra os candidatos mésons B negativos, e à direita os positivos. Fonte: AAIJ, <i>et al</i> , 2014.	46
Figura 14 – Decaimento do méson B em três <i>káons</i>	47
Figura 15 – Distribuição total de massa dos candidatos à B^\pm contendo ajuste de modelos de sinal (linha azul), ruído (verde) e o modelo total (vermelha).	48

Figura 16 – Construção de Huygen para o efeito Cherenkov: os pontos 1,2 e 3 sobre o eixo horizontal são três posições sucessivas da partícula com intervalos de tempos (t_1 , t_2 e t_3) iguais. As curvas 2 e 3 são as posições das ondas emitidas a partir desses pontos nos tempos t_2 e t_3 . As frentes de onda estão indicadas pela linha tracejada com direção de propagação de acordo com as setas. Fonte: MARTIN; SHAW, 2008.	50
Figura 17 – Triângulo 13p, onde $t = t_3 - t_1$ e a radiação de Cherenkov é emitida com ângulo θ . Fonte: MARTIN; SHAW, 2008.	51
Figura 18 – Reconstrução do ângulo de Cherenkov medido pelo RICH em função do momento linear medido pelo tracker. Fonte: M. Adnolfi <i>et al</i> , 2013.	52
Figura 19 – Efeito da seleção de identificação de partículas sobre a amostra. Em preto está a seleção padrão, e nas outras cores o corte de identificação de partículas está espremido em diferentes valores.	53
Figura 20 – Variação do resultado da assimetria com o efeito da seleção de PIDK.	53
Figura A1 – O detector LHCb. O eixo \mathbf{z} é a direção da linha do feixe do LHC.	64
Figura A2 – Vértice secundário (“D”) da partícula D^0 deslocado do ponto de interação pp (bolha amarela).	65
Figura A3 – Três visualizações de um evento, de cima para baixo: $\mathbf{y-z}$, $\mathbf{y-x}$, e $\mathbf{x-z}$	66
Figura B1 – O detector LHCb.	73
Figura B2 – Decaimento do méson B em três $káons$	74

Sumário

	Introdução	1
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.1	A relevância da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio	5
1.2	A Física Moderna e Contemporânea nos livros didáticos	9
1.2.1	<i>Os Fundamentos da Física</i> - Ramalho, Nicolau e Toledo. 10ª ed. V.3. Editora Moderna, 2010, 512p.	9
1.2.2	<i>Ser Protagonista Física</i> - Válio et al. 2ª ed. V.3. Editora SM, 2013, 320p.	10
1.2.3	<i>Curso de Física</i> - Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga. 1ª ed. V.3. Editora Scipione, 2011, 448p.	10
1.2.4	<i>Física</i> - Sampaio e Calçada. 2ª ed. V. único. Editora Atual, 2005, 472p.	10
1.2.5	<i>Física 3</i> - Guimarães, Piqueira e Carron. 1ª ed. V. 3. Editora Ática, 2014, 296p.	11
1.2.6	<i>Física: Interação e Tecnologia</i> - Aurelio Gonçalves Filho e Carlos Toscano. 1ª ed. V.3. Editora Leya, 2013, 216p.	11
1.2.7	<i>Conexões com a Física</i> - G. Martini, W. Spinelli, H. C. Reis e B. Sant'anna. 2ª ed. V.3. Editora Moderna, 2013, 288p.	11
1.2.8	<i>Física: Eletromagnetismo e Física Moderna</i> - Bonjorno, Clinton, E. Prado e Casemiro. 2ª. ed. V.3. Editora FTD, 2013, 304p.	12
1.2.9	<i>Física aula por aula</i> - Benigno Barreto e Claudio Xavier. 2ª ed. V.3. Editora FTD, 2013, 320p.	12
1.3	O Uso de ferramentas auxiliares no Ensino de Física	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Por que Física de Partículas?	17
2.2	Principais conceitos de Física de Partículas	22
2.2.1	As partículas fundamentais da natureza	22
2.2.2	As interações fundamentais do Modelo Padrão	24
2.2.3	A física da matéria e antimatéria	26
2.2.4	Partículas Instáveis	28
3	APLICAÇÃO DO EXERCÍCIO DO EXPERIMENTO LHCB: MEDIDA DO TEMPO DE VIDA DO MÉSON D^0	31
3.1	Descrição do exercício	32
3.2	Metodologia	39
3.3	Análise da experiência dos estudantes	40

4	NOVO EXERCÍCIO DE INTERNATIONAL MASTERCLASS PARA ANALISAR O COMPORTAMENTO DA MATÉRIA E ANTIMATÉRIA A PARTIR DOS DECAIMENTOS DOS MÉSONS B	45
4.1	Exercício de visualização de eventos	46
4.2	Exercício de análise estatística	48
4.3	Medida da assimetria	49
4.4	Investigação do efeito da seleção sobre o resultado	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	Referências	58
	 APÊNDICES	 62
	APÊNDICE A – MASTERCLASS DO LHCB: MEDIDA DO TEMPO DE VIDA DO D^0 NO LHC	63
A.1	Introdução	63
A.2	Exercício de visualização de eventos	67
A.3	Exercício de ajuste	68
A.3.1	Exercício 1: Ajustar a distribuição de massa e obter as distribuições de variáveis de sinal	68
A.3.2	Exercício 2: Medir o tempo de vida do D^0	69
	 APÊNDICE B – MASTERCLASS DO LHCB: MEDIDA DA ASSIMETRIA ENTRE AS PARTÍCULAS B^- E B^+ NO LHC	 71
B.1	Introdução	71
B.1.1	O detector LHCb	72
B.2	Exercício de visualização de eventos	73
B.3	Exercício de ajuste	75
B.4	Medida da assimetria de CP do méson B	76
	 APÊNDICE C – TRADUÇÃO DOS BOTÕES, MENUS E PAINEL DE AJUDA DO EXERCÍCIO MASTERCLASS DO LHCB: MEDIDA DO TEMPO DE VIDA DO D^0 NO LHC	 78

Introdução

A Física de Partículas é a Ciência que procura descrever essencialmente o funcionamento do Universo por intermédio das partículas fundamentais que compõem a matéria e seus respectivos mecanismos de interações. O CERN (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear) é o maior laboratório do mundo e contém o principal aparato experimental de verificação do chamado Modelo Padrão que é a Teoria da Física de Partículas mais aceita pelos físicos. Pesquisas realizadas no CERN vêm ganhando nas últimas décadas notoriedade na mídia internacional e nos demais meios de divulgação científica, à medida que tais experimentos com partículas altamente energizadas consolidam a Teoria do Modelo Padrão. Por este motivo, discussões a respeito deste assunto se achegam rapidamente à vida das pessoas, levando em conta que o desenvolvimento da pesquisa avançada nesta área, acarreta em benefícios tecnológicos dos quais a sociedade contemporânea usufrui. Por isso a divulgação das descobertas e avanços científicos se torna tão importante. De acordo com Watanabe (2012):

(...) a importância de se tornarem públicas as descobertas e avanços científicos não se remete apenas a uma responsabilidade ética e política dos cientistas. Mas, também, a uma necessidade da expansão da cultura científica para uma parcela efetivamente grande da sociedade, que não reconhece a produção da ciência como um bem econômico, político e social (WATANABE, 2012, p. 17).

Todo esse contexto serve como pano de fundo para que cresça a relevância do estudo da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio. Este trabalho de pesquisa não propõe uma mudança do currículo, apesar de que breves discussões sobre a importância da FMC no currículo do Ensino Médio serão feitas nos capítulos 1 e 2 decorrentes, mas apenas apresenta um método alternativo para ensinar Física de Partículas por meio de uma ferramenta educacional em que os estudantes possam vivenciar de forma prática o trabalho de um pesquisador.

Muitos são os autores que defendem a importância da inclusão dos temas atuais da Física no Ensino Médio assim como as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias (PCN+) e as Orientações Curriculares para Ensino Médio (OCEM). De fato, as bibliografias didáticas adotadas pelas escolas do Rio de Janeiro nos últimos anos já trazem alguns assuntos de FMC, entretanto, a existência deles nos livros não é garantia de que problematizações eficazes a respeito da temática central deste trabalho realmente aconteçam. No capítulo 1 algumas obras didáticas foram cuidadosamente observadas afim de se fazer um sucinto panorama qualitativo de quais assuntos de FMC são abordados nos livros de Ensino Médio. O produto educacional proposto por esta obra constitui-se em um mecanismo complementar aos livros (o que também é discutido no final do capítulo 1),

pois para que o cidadão contemporâneo consiga fazer uma leitura crítica do mundo atual, baseado na tecnologia avançada proveniente das descobertas científicas dos Séculos XX e XXI, é necessário fazer uso de uma educação científica onde o ensino-aprendizagem de FMC pode ser uma potencial ferramenta para tal. Segundo o que escreveu Moura (2012):

(...) a educação científica deve fazer parte da formação do cidadão para que ele possa compreender, opinar e tomar decisões baseadas no entendimento sobre o progresso científico e os riscos e conflitos de interesses neles contidos (MOURA, 2012, p. 20).

O capítulo 2 esclarece o porquê da escolha do tema de Física de Partículas diante de todo conteúdo de FMC apresentando também os principais conceitos que podem ser trabalhados no Ensino Médio. Estudar Física de Partículas é avançar no sentido de compreender uma ciência que explique muito do mundo atual e suas contribuições para toda humanidade. De acordo com Watanabe (2012):

Nessa perspectiva, a física nuclear e de partículas ganha status no que tange à sua possibilidade de compreender o conhecimento científico em esferas que vão além do pragmatismo didático, com grau de abstração mais elevado, fornecendo subsídios para reconhecer a ciência como uma atividade criativa e conseqüentemente, uma produção cultural (WATANABE, 2012, p. 19).

É verdade que o Brasil precisa de investimentos cada vez maiores no setor científico, para tal é necessário que os jovens sejam atraídos para a pesquisa. Não há como separar essa real necessidade sem falar de uma educação científica que vai muito além da simples divulgação de conhecimentos, promovendo debates sobre o papel que a pesquisa tem na sociedade. Para Balthazar e Oliveira (2008):

Atualmente tem sido amplamente discutida por pesquisadores em ensino, e colocando nossa perspectiva educacional numa formação atual, que forme um jovem capaz de intervir e participar da sociedade, nos parece importantes que temas mais atuais da física (FMC) façam parte do ensino de Física (BALTHAZAR; OLIVEIRA, 2008, p. 24).

Neste sentido, a ferramenta educacional apresentada nos capítulos 3 e 4 deste trabalho que são respectivamente exercícios de International Masterclass referentes ao decaimento do méson D^0 e do méson B poderá contribuir muito para a formação científica de estudantes de Ensino Médio. O International Masterclass é um evento internacional voltado para divulgar pesquisa e ensinar física de partículas a estudantes do mundo todo. Durante o evento ocorrem conferências internacionais com os próprios pesquisadores do CERN contendo explicações sobre Física de Partículas e a relevância que essa pesquisa tem para toda sociedade. Além disso cada um dos participantes é levado a construir o próprio conhecimento exercendo uma experiência ativa com auxílio de professores durante a realização de algumas tarefas e exercícios, programados de acordo com dados reais de pesquisas feitas no próprio LHC que é o maior acelerador de partículas do mundo. Todo esse processo faz com que a educação desses jovens fique mais consolidada. Para Chassot (2003):

A *alfabetização científica* pode ser considerada como uma das dimensões para potencializar alternativas que privilegiem uma educação mais comprometida (CHASSOT, 2003, p. 91).

E ainda sobre a alfabetização científica dos alunos Chassot (2003) evidencia:

A elaboração dessa explicação do mundo natural - diria que isso é fazer ciência, como elaboração de um conjunto de conhecimentos metodicamente adquirido - é descrever a natureza numa linguagem dita científica. Propiciar o entendimento ou a leitura dessa linguagem é fazer alfabetização científica (CHASSOT, 2003, p. 93).

O exercício para medir o tempo de vida do méson D^0 é um exercício já existente no evento de International Masterclass e que teve suas instruções traduzidas para a língua portuguesa como parte do produto desta pesquisa. Essa tradução foi realizada com intuito de facilitar a participação de estudantes brasileiros neste evento de pesquisa, isto é, favorecer a aprendizagem de FMC, devido a muitos desses jovens apresentarem dificuldades com a língua inglesa e outros idiomas estrangeiros, nos quais as instruções e os botões do software também são escritos. De acordo com Ostermann e Cavalcanti (2001) sobre o ensino de FMC:

Sua aprendizagem deve ser facilitada, e isso é feito primordialmente na escola, em particular no nível médio (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2001, p. 13).

A experiência de alguns jovens que participaram do exercício foi verificada no capítulo 3 por meio de um questionário em que eles puderam relatar o seu aprendizado, o que constatou-se ser uma prática muito edificante para eles.

No capítulo 4 encontra-se a segunda parte do produto que foi a criação da sequência didática para o novo exercício de International Masterclass, cujo software está sendo desenvolvido pela Dr^a Irina Nasteva (pesquisadora da UFRJ e também orientadora deste trabalho de pesquisa) em parceria com o CERN. O novo exercício é referente ao decaimento dos mésons B onde se verifica no decorrer do processo uma diferença de comportamento entre a matéria (méson B^-) e antimatéria (B^+) que pode ser um indicativo para os físicos do mundo inteiro que tentam entender este mistério da natureza: assimetria existente entre matéria e antimatéria no universo. A construção desse novo exercício tem o objetivo de colocar diretamente os estudantes de Ensino Médio dentro dessas discussões importantes sobre o funcionamento do universo através da Física de Partículas. De acordo com Balthazar e Oliveira (2008):

Como funciona o Universo é uma pergunta que tem fascinado os cientistas há séculos e também o homem como espécie e é, em certo sentido, a pergunta chave desta área da Física (BALTHAZAR; OLIVEIRA, 2008, p. 75).

Nas considerações será tratada a importância deste evento como um todo: o novo exercício poderá ser usado em eventos nacionais e internacionais, para apresentar aos estudantes de Ensino Médio fenômenos físicos atuais estudados nos grandes centros de

pesquisa. A atividade constitui-se numa grande oportunidade para que esses indivíduos possam vivenciar, de forma lúdica, como é realizada uma pesquisa avançada em Física de Partículas, além disso, acarretará na popularização desta área da Física e da pesquisa desenvolvida no Brasil.

1 Revisão Bibliográfica

A importância do Ensino de Física no Ensino Básico se atrela ao fato de que essa Ciência está mais próxima da realidade das pessoas do que se imagina. Muitos fenômenos naturais que fazem parte diretamente do cotidiano são estudados pela Física, além disso, toda tecnologia utilizada em larga escala em nossa sociedade contemporânea, a fim de melhorar a qualidade de vida da população, tem suas origens nas descobertas científicas, principalmente no campo da Física, da Química e da Engenharia. Aparatos como telefones celulares, smartphones, computadores, microchips, internet, fibra ótica, lasers, televisões de LED e diversos aparelhos eletrônicos que funcionam à base de transistores, diodos e circuitos integrados foram desenvolvidos, principalmente, graças aos avanços de teorias da Física do século XX (CANATO JÚNIOR, 2003). Além disso, o ensino de Física precisa formar um caráter investigativo nos indivíduos, isto é, os métodos de ensino devem capacitar o aluno de forma que ele consiga responder as perguntas e buscar as informações necessárias para utilizá-las na conjuntura em que forem requisitadas, numa atitude reflexiva (BRASIL, 2006). De fato, é importante que se ensine Física Moderna e Contemporânea nas escolas.

1.1 A relevância da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio

De acordo com as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias (PCN+), para que o ensino de Física seja efetivo, é necessário que se traga o mundo vivencial dos alunos para o contexto de sala de aula. Os estudantes devem perceber que os conteúdos de Física trabalhados no ambiente escolar se conectam amplamente com seu cotidiano doméstico, social e tecnológico:

A Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos (BRASIL, 2002, p. 59).

O debate sobre esse assunto já vem de longa data. Em 1992, Terrazzan já evidenciava as dificuldades de se alcançar os estudantes com os assuntos da Física Moderna, que dirá os conteúdos da Física contemporânea, entretanto, salientava a importância da abordagem dessas temáticas no Ensino Médio:

Aparelhos e artefatos atuais, bem como fenômenos cotidianos em uma quantidade muito grande, somente são compreendidos se alguns conceitos estabelecidos a partir da virada deste século forem utilizados. A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o

entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo, define por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau (TERRAZZAN, 1992, p. 210).

De acordo com Terrazzan (1992), para que o ensino e aprendizagem de tais tópicos seja eficiente, professores de Física da escola média e professores pesquisadores das Universidades devem trabalhar de forma conjunta, em outras palavras, o saber ensinado nas escolas de maneira alguma pode se distanciar das pesquisas científicas desenvolvidas nos laboratórios das Universidades ou nos grandes Centros de Pesquisa. Um caminho sugerido seria ensinar os assuntos sem exigir um rigor matemático aprofundado:

Neste nível de escolaridade devemos estar formando um cidadão, pronto para sua participação na sociedade. Sua formação deve ser global, pois sua capacidade de intervenção na realidade em que está imerso tem relação direta com sua capacidade de compreensão desta mesma realidade (TERRAZZAN, 1992, p. 213).

Nesse cenário de aproximação dos conteúdos sistemáticos ao dia a dia das pessoas, existem áreas que atingem diretamente nossa sociedade, a exemplo, o setor de desenvolvimento energético. A maior parte da energia utilizada no Brasil é produzida nas usinas hidrelétricas, entretanto, a utilização em larga escala da energia nuclear não é algo tão distante, visto que o Brasil possui uma grande reserva de urânio, matéria prima para o abastecimento nuclear (PEREIRA; BOUZADA FILHO; NEVES, 2009). Outro setor, é o de telecomunicações que funcionam de acordo com as teorias do eletromagnetismo, da eletrônica e da óptica física. O fato é que não se pode trabalhar essas importantes discussões em sala de aula sem relacioná-las com os conceitos da Física Moderna e Contemporânea. Assuntos como buracos negros, teoria da relatividade, cosmologia, física de partículas e diversos outros temas podem enriquecer, em muito, uma aula no sentido de aguçar a curiosidade dos estudantes e atraí-los para a pesquisa científica. Segundo os PCN+ o ensino de Física no Ensino Médio deve contribuir para a formação de cidadania:

Trata-se de construir uma visão da Física voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. Nesse sentido, mesmo os jovens que, após a conclusão do ensino médio, não venham a ter mais qualquer contato escolar com o conhecimento em Física, em outras instâncias profissionais ou universitárias, ainda terão adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem (BRASIL, 2002, p. 59).

E se tratando de Física Moderna e Contemporânea contextualizada ao dia a dia dos estudantes, esses parâmetros ainda sugerem que:

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contatos com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores. A compreensão dos modelos para a

constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações nos núcleos dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas (BRASIL, 2002, p. 70).

A Física está em constante avanço, a cada dia uma nova descoberta é feita ou uma teoria é confirmada ou refutada por algum experimento, onde tudo é realizado de forma a desvendar muitos mistérios do universo, possibilitando a solução de muitos problemas do cotidiano, tornando-se uma ciência fundamental no processo de descrever os fenômenos naturais que nos cercam. Quanto melhor for a qualidade da explicação dessas teorias em sala, mais eficaz torna-se a aprendizagem dos estudantes. Nesse contexto, as Orientações Curriculares para Ensino Médio (OCEM) destacam que:

Assim, ao trazer o fenômeno para o mundo da investigação, ele sai do contexto inicial do qual foi percebido como um problema que será objeto de investigação sistemática. As teorias que se propõem compreender o fenômeno retornam à realidade, mas são teorias e modelos da física e não o próprio fenômeno. Elas serão tanto mais aceitas quanto mais e melhores explicações proporcionarem acerca da natureza ou de aparatos tecnológicos (BRASIL, 2006, p. 50).

A cada momento, muitos questionamentos são respondidos e outros vão surgindo à medida que a ciência vai se desenvolvendo. Sobre esse fato as OCEM's também ressaltam:

Assim, o que a Física deve buscar no Ensino Médio é assegurar que a competência investigativa resgate o espírito questionador, o desejo de conhecer o mundo em que se habita. Não apenas de forma pragmática, como aplicação imediata, mas expandindo a compreensão do mundo, a fim de propor novas questões e, talvez, encontrar solução. Ao se ensinar Física devem-se estimular as perguntas e não somente dar respostas a situações idealizadas (BRASIL, 2006, p. 53).

A Física pode ser dividida em dois estágios gerais. De acordo com os físicos, a Física Clássica (onde não há estudos de efeitos quânticos) compreende um período que engloba desde os trabalhos de Copérnico, Galileu e Newton, passando pela Teoria Clássica do Eletromagnetismo até os trabalhos de Einstein sobre a Teoria da Relatividade (Restrita e Geral). É comumente trabalhado no currículo do Ensino Médio brasileiro temas da Física Clássica como Mecânica, Termodinâmica, Eletricidade e Magnetismo. Já a Física Moderna é marcada por acontecimentos importantes que ocorreram num período que se iniciou na última década no século XIX, como a descoberta dos raios X, da radioatividade e, em seguida, as descobertas de novas partículas subatômicas. Assuntos mais contemporâneos da Física, aos poucos, vêm ganhando espaço neste cenário de Ensino. Discussões sobre a inserção do conteúdo no currículo da Educação Básica vêm somando forças nos últimos anos também pelo fato de que o Ensino Médio pode ser o último estágio em que os estudantes trabalharão formalmente os assuntos pertinentes a este tema (TERRAZAN, 1992).

O Currículo Mínimo (RIO DE JANEIRO, 2012) de Física da Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro, por exemplo, trabalha alguns temas de Física Moderna e

Contemporânea (abreviada no documento pela sigla FMC) desde 2012. Logo na primeira série do Ensino Médio abordam-se ao longo de um bimestre os conceitos básicos da teoria da relatividade restrita e cosmologia. Assuntos como energia nuclear, usinas nucleares e reações nucleares permeiam as discussões das aulas de Física no último bimestre da segunda série. Já na terceira série, em conjunto com os assuntos de eletromagnetismo, devem ser explanados alguns conceitos tais como fenômenos ondulatórios, natureza da luz e efeito fotoelétrico. De acordo com este currículo o ensino de Física Moderna deve proporcionar a atração dos estudantes pela Física de modo geral:

Abordamos, ao longo dos três anos, temas de FMC como forma de atrair os estudantes e dar maior significado para o estudo de Física. Por isso, ao começarmos com o estudo de Cosmologia já poderemos falar de temas contemporâneos sem precisar esperar todo o estudo da Física clássica para fazê-lo. Conhecer alguns tópicos de FMC é fundamental para compreender a realidade que nos cerca a partir da nova visão de mundo que a Física do século XX construiu (RIO DE JANEIRO, 2012, p. 3).

A relevância da inserção da Física Moderna e Contemporânea de forma efetiva no currículo de Física no Ensino Médio, conforme já sinalizado, vem sendo discutida há algum tempo, sobretudo no que se refere a correlação de tais conteúdos com a vivência dos estudantes. Na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física alguns aspectos foram cuidadosamente analisados, principalmente sobre o despertar da curiosidade dos jovens para esses assuntos e, como consequência, atraí-los para o mundo científico, pois eles se tornarão os futuros pesquisadores. Afinal de contas, as ideias revolucionárias que transformaram totalmente a Ciência surgiram com a Física do Século XX em diante. Os estudantes devem compreender que a Física é um empreendimento da humanidade e está bem próxima da realidade de cada pessoa (BAROJAS, 1988; OSTERMANN; MOREIRA, 2000).

De acordo com Campos e Veiga (2009) a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade causam um impacto estrondoso no campo científico mundial e na tecnologia moderna, principalmente porque o tempo presente é considerado como a Era da Nanotecnologia:

A não presença da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM) das escolas públicas é uma falha grave, já que na sociedade atual é imprescindível que o aluno tenha esse conhecimento para envolver-se com o desenvolvimento tecnológico que está vivenciando, seja para avaliar conscientemente os impactos das novas tecnologias sobre a sociedade, seja para ter condições de criar novas possibilidades científicas e tecnológicas em busca de contribuir para o desenvolvimento do país (CAMPOS; VEIGA, 2009, p. 2).

Pode até ser que a experiência cotidiana dos alunos não seja afetada visivelmente por fenômenos relativísticos ou quânticos, em outras palavras, a Física Clássica estudada nas escolas dá conta de explicar a maioria dos fenômenos naturais que ocorrem diariamente na vida desses indivíduos. Entretanto, não acrescentar a FMC no currículo escolar é o mesmo que sabotar possibilidades de realizar discussões mais profundas sobre o Universo

e mostrar uma nova visão do mundo para os estudantes, como por exemplo, compreender que a simultaneidade não é mais um conceito absoluto segundo a Relatividade Restrita (XIMENES, 2016). Estudar FMC viabiliza o entendimento da sociedade atual, tão dependente da tecnologia moderna e do desenvolvimento científico e ainda faz com que o aluno enxergue que é possível participar da construção da Ciência.

1.2 A Física Moderna e Contemporânea nos livros didáticos

O objetivo desta seção é trazer uma breve verificação de quais temas de Física Moderna e Contemporânea estão inseridos nos livros didáticos de Física adotados pelas escolas estaduais do Estado do Rio de Janeiro nos últimos dez anos, não levando em conta o caráter efetivo da forma em que são abordados. Em 1992 Terrazzan já apontava algumas limitações no currículo das escolas médias (na época ditas escolas de 2º grau), onde usualmente a física escolar era dividida em Mecânica, Física Térmica, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo, deixando de lado a Física desenvolvida ao longo do Século XX (TERRAZZAN, 1992). Hoje em dia, muitas obras didáticas já inserem os temas pertinentes à Física mais atual geralmente no volume 3 usado na terceira série do Ensino Médio e espera-se que esses conceitos sejam realmente trabalhados nas escolas.

Apesar do estudo de Ondas Eletromagnéticas pertencer à Física Clássica de acordo com os físicos, algumas obras didáticas apuradas apresentam tais conteúdos como parte introdutória na unidade de Física Moderna, criando uma ponte entre o dito Clássico e o Moderno/Contemporâneo. Por esse motivo, Ondas Eletromagnéticas entraram nesta análise.

1.2.1 *Os Fundamentos da Física* - Ramalho, Nicolau e Toledo. 10ª ed. V.3. Editora Moderna, 2010, 512p.

A unidade D presente no volume 3 desta obra didática, chama-se Introdução à Física Moderna que está compreendida em quatro capítulos. Antes mesmo de entrar na Física Moderna, o livro faz bastante contextualização com o cotidiano destacando-se a utilização das ondas eletromagnéticas com a medicina nuclear e a radioterapia, transmissão e recepção de ondas de rádio, e a relatividade restrita, mencionando a geração de energia por usinas nucleares. O livro trabalha alguns tópicos de física quântica como átomo de Bohr e efeito fotoelétrico, princípio da incerteza, constante de Planck, natureza dual da luz, entretanto, apenas um capítulo é destinado à física nuclear e de partículas. É bem ilustrado e sempre apresenta referências históricas, lançando mão de um rigor matemático dentro dos limites usuais do Ensino Médio. Estão presentes no livro os principais conceitos de: ondas eletromagnéticas, relatividade restrita, física quântica e física nuclear.

1.2.2 *Ser Protagonista Física* - Válio et al. 2ª ed. V.3. Editora SM, 2013, 320p.

Nesta obra didática apenas dois capítulos fazem menção à Física dos Séculos XX e XXI. A característica principal é que o livro não utiliza uma matemática tão rigorosa, se detendo mais na parte histórica e conceitual dos temas de Física Moderna e Contemporânea. Faz uma breve construção histórica sobre a constituição da matéria partindo da antiguidade, passando por Bohr (onde é explanado também por meio de equações básicas) até o modelo contemporâneo (apenas conceitual) do átomo, apresentando as falhas dos modelos anteriores. Apresenta de forma condensada os trabalhos de Planck, para resolver o problema da radiação do corpo negro e os trabalhos de Einstein: relatividade restrita e efeito fotoelétrico. Dualidade onda-partícula, princípio da incerteza, decaimento radioativo, fissão e fusão nuclear, exemplos de aplicações tecnológicas na medicina, na agricultura e na indústria também são trabalhados neste livro.

1.2.3 *Curso de Física* - Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga. 1ª ed. V.3. Editora Scipione, 2011, 448p.

Este livro também apresenta conceitos da Física dos Séculos XX e XXI abordando de forma conceitual o espectro eletromagnético: ondas de rádio, micro-ondas, radiação infravermelha, visível e ultravioleta, raios X e raios gama. A unidade 4 aborda os temas mais atuais da Física. O capítulo 9 é sobre teoria da relatividade restrita e física quântica, dando bastante ênfase na parte histórica. Trabalha também teoria do corpo negro, efeito fotoelétrico, princípio da incerteza de Heisenberg, barreiras de potencial, física de partículas e a cosmologia e, no final deste capítulo, existe um apêndice com algumas equações sobre relatividade restrita e modelo de Bohr destrinchadas. Também apresenta explicações sobre os lasers, fazendo uma breve contextualização com o funcionamento de equipamentos industriais e a medicina.

1.2.4 *Física* - Sampaio e Calçada. 2ª ed. V. único. Editora Atual, 2005, 472p.

Nesta obra, a parte do conteúdo de Ondas Eletromagnéticas vem separada da Física Moderna. Este livro apresenta um texto com uma aplicação da indução eletromagnética em supercondutores, entretanto, a seção de ondas eletromagnéticas é bem sucinta, aborda apenas raios X, ondas de rádio e TV e micro-ondas de forma conceitual. A unidade de Física Moderna inclui os conceitos de relatividade restrita (também um pequeno texto sobre a relatividade geral), mecânica quântica, contendo a radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico, átomo de Bohr e princípio da incerteza. Na unidade de Física Contemporânea, trabalha a física de partículas citando algumas partículas elementares e suas respectivas antipartículas, decaimento beta, força nuclear e fusão e fissão nuclear. Apesar da abordagem

bem condensada, esta obra didática não abre mão do uso de uma boa matemática, apresentando a dedução de muitas equações.

1.2.5 *Física 3* - Guimarães, Piqueira e Carron. 1ª ed. V. 3. Editora Ática, 2014, 296p.

Bem ilustrado, contextualizado com o cotidiano e rico em informações históricas, este livro apresenta a Física do Século XX e XXI de forma extensa. Dentro de ondas eletromagnéticas abrange o espectro eletromagnético, ondas de rádio, micro-ondas, radiação infravermelha, espectro visível, radiação ultravioleta, raios X (fazendo uma ligação com a fisiologia humana) e polarização da luz. Um fato interessante é que também discute o experimento de fenda dupla de Thomas Young sobre difração e interferência da luz por meio de um pequeno texto. Trabalha a relatividade restrita de modo abrangente com forte contextualização histórica e equações bem detalhadas sobre dilatação do tempo, contração do espaço, dinâmica e energia relativística. A seção de física quântica já começa com uma breve explicação sobre transistores e a aplicação do laser na medicina. Trabalha a radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico, modelos atômicos desde a Grécia Antiga até o átomo de Bohr e a dualidade onda-partícula. No capítulo de física nuclear, além de todos os conteúdos clássicos, fala sobre o acelerador LHC, reatores e usinas nucleares (englobando discussões importantes como produção de energia, rejeitos radioativos e acidentes nucleares). A física de partículas se encontra no capítulo de cosmologia que inclusive, trabalha o Modelo Padrão e as interações fundamentais.

1.2.6 *Física: Interação e Tecnologia* - Aurelio Gonçalves Filho e Carlos Toscano. 1ª ed. V.3. Editora Leya, 2013, 216p.

Esta obra didática optou por apresentar o conteúdo de Física Moderna e Contemporânea bem resumidamente. Abre mão do uso de matemática rigorosa, detendo-se na maior parte dos capítulos em explicações puramente conceituais com contextualizações históricas, fazendo associação entre os assuntos de Física e a tecnologia atual. Os principais conceitos trabalhados neste livro são: relatividade restrita, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, radioatividade, núcleo atômico e física de partículas.

1.2.7 *Conexões com a Física* - G. Martini, W. Spinelli, H. C. Reis e B. Sant'anna. 2ª ed. V.3. Editora Moderna, 2013, 288p.

O livro é completo tanto na explicação textual quanto em equações matemáticas, destacando-se suas ilustrações. Na seção Ondas Eletromagnéticas é descrito o espectro eletromagnético: raios X, radiação ultravioleta, luz visível, radiação infravermelha, micro-ondas e ondas de rádio. Na Física dos Séculos XX e XXI apresenta a relatividade restrita,

efeito fotoelétrico (incluindo o uso deste efeito no cotidiano), modelo atômico de Bohr, dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza de Heisenberg. Ainda apresenta os lasers e a tecnologia recente das TVs OLEDs (LED orgânico). Na seção de física de partículas inicia fazendo uma discussão histórica sobre o átomo até chegar na descoberta dos quarks e léptons, trabalhando também as interações fundamentais e o LHC. Termina apresentando um breve texto sobre nanotecnologia e seus impactos na área médica.

1.2.8 *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna* - Bonjorno, Clinton, E. Prado e Casemiro. 2^a. ed. V.3. Editora FTD, 2013, 304p.

Parecido com a obra didática analisada anteriormente, este livro também é rico em ilustrações e faz uso de uma matemática forte. Apresenta os conteúdos clássicos de Ondas Eletromagnéticas começando por campos elétricos e magnéticos induzidos e em seguida, o espectro eletromagnético, tipos de radiação (infravermelha, visível, ultravioleta), raios X e raios Gama, correlacionando-os com o uso de tecnologias de comunicação, irradiação dos alimentos e aplicações na medicina. Em Física Moderna, relata detalhadamente a teoria da relatividade restrita, começando pelos experimentos de Fizeau e Michelson e Morley e, em sequência, os postulados. Dilatação do tempo, contração do espaço, dinâmica e energia relativística também estão incluídas neste capítulo. Faz a construção histórica e conceitual de algumas teorias como a teoria do corpo negro, efeito fotoelétrico e ainda efeito Compton. Trabalha o modelo de Bohr, princípio da incerteza, radioatividade (citando a importância histórica e científica de Marie e Pierre Curie) e o decaimento de partículas, onde existe um texto que retrata algumas aplicações na área medicinal.

1.2.9 *Física aula por aula* - Benigno Barreto e Claudio Xavier. 2^a ed. V.3. Editora FTD, 2013, 320p.

Na seção de Ondas Eletromagnéticas apresenta conceitualmente a natureza eletromagnética da luz, o espectro eletromagnético, ondas de rádio e micro-ondas, luz visível, infravermelha e ultravioleta, raios X e sua aplicação na medicina. Inicia o conteúdo de Física Moderna com a teoria da relatividade restrita com um breve histórico sobre a velocidade da luz, aborda também o experimento de Michelson e Morley, a relatividade de Galileu, de Einstein, transformação de Lorentz, dilatação do tempo, contração do espaço, massa e energia relativística. No capítulo de Física Quântica existe um pequeno texto que fala das origens dessa Ciência e algumas aplicações tecnológicas, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico e o princípio da incerteza. Na Física Contemporânea apresenta o núcleo atômico, decaimento nuclear, fissão e energia nuclear incluindo um texto que fala da energia nuclear no Brasil e os riscos ambientais do lixo atômico.

1.3 O Uso de ferramentas auxiliares no Ensino de Física

Embora os livros didáticos atuais retratem os assuntos de Física Moderna e Contemporânea nas unidades finais de seus volumes, sabe-se que trabalhar esses temas no contexto escolar não é uma tarefa trivial. O tempo reduzido (entre dois a quatro tempos de aula semanais que duram aproximadamente cinquenta minutos), o baixo salário dos profissionais da educação que acarreta na falta de tempo para preparar uma aula envolvente, pois o mesmo deve trabalhar em muitas escolas para garantir uma renda maior e a falta de incentivo e interesse dos estudantes pela disciplina são fatores que agregam-se às inúmeras dificuldades. Neste cenário, surgem alguns recursos educacionais, como por exemplo, programas de computador que simulam experimentos e que podem ser utilizados em conjunto com o livro didático para tornar mais atrativo, não só os temas da Física dos Séculos XX e XXI mas todos os outros conteúdos de Física.

Não é interessante que o ensino de Física no Brasil seja limitado apenas à memorização de equações e à resolução de problemas envolvendo matemática, sem que de fato, ocorra uma compreensão consolidada dos fenômenos da natureza por parte dos estudantes, principalmente em Física Moderna e Contemporânea onde se exige maior quebra de paradigmas em relação ao pensamento comum. O processo de educação não pode ser reduzido somente à mera transmissão de conteúdo nem apenas a modelagens de pessoas, ele precisa ser libertador ao ponto de provocar uma emancipação nos indivíduos através da formação de uma conscientização verdadeira (ROSA; ROSA, 2007). De acordo com os PCN+ o Ensino de Física no Brasil já avançou bastante em relação a esse aspecto:

O ensino de Física vem deixando de se concentrar na simples memorização de fórmulas ou repetição automatizadas de procedimentos, em situações artificiais ou extremamente abstratas, ganhando consciência de que é preciso lhe dar um significado, explicitando seu sentido já no momento do aprendizado, na própria escola média (BRASIL, 2002, p. 60).

As dificuldades de tornar a Física uma disciplina mais atrativa estão relacionadas a alguns fatores como a falta de recursos audiovisuais e laboratoriais na grande maioria das escolas, limitando as aulas em exposição dos conceitos no quadro, resolução de exercícios que, dependendo da maneira em que são conduzidos, tornam a aula cansativa e pouco interessante. Tais recursos em conjunto com a utilização do livro didático, devem colaborar para o despertar da curiosidade do aluno sobre o assunto, aproximando-o das discussões e deixando-o cada vez mais interessado. O ensino baseado somente em aulas expositivas pode gerar, ao longo do tempo, um desprazer no aprendizado de Ciências de modo geral (MENDES; COSTA; SOUSA, 2012) e segundo os PCN+ a experimentação em Física é extremamente importante:

É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento de competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável (BRASIL, 2002, p. 84).

Existem diversos meios de proferir o saber que vão além das aulas tradicionais e do laboratório, como por exemplo, o uso de ferramentas tecnológicas na educação que colaborem para a construção do conhecimento em Física da melhor maneira possível. De acordo com os PCN+:

O ensino de Física tem enfatizado a expressão do conhecimento aprendido através da resolução de problemas e da linguagem matemática. No entanto, para o desenvolvimento das competências sinalizadas, estes instrumentos seriam insuficientes e limitados, devendo ser buscadas novas e diferentes formas de expressão do saber da Física, desde a escrita, com elaboração de textos ou jornais, ao uso de esquemas, fotos, recortes ou vídeos, até a linguagem corporal e artística. Também deve ser estimulado o uso adequado dos meios tecnológicos, como máquinas de calcular, ou das diversas ferramentas propiciadas pelos microcomputadores, especialmente editores de texto e planilhas (BRASIL, 2002, p. 84).

É certo que a falta de bons laboratórios nas escolas não pode servir como empecilho para que atividades diferenciadas sejam realizadas. Muitos experimentos simples podem ser construídos com materiais de baixo custo, entretanto, cada vez mais materiais didáticos de apoio a aprendizagem, os quais podem ser utilizados em todos os níveis de ensino, têm sido produzidos nas últimas décadas como um complemento ou alternativa ao laboratório. Tais ferramentas estão dispostas na rede e servem para facilitar o processo de ensino – aprendizagem no ensino presencial enquanto recurso didático complementar, não se limitando apenas a esta modalidade de ensino, mas também utilizado na educação à distância. Um dos mais disseminados tipos de recursos de apoio são as simulações computacionais de experimentos de Ciências, onde a utilização combinada às atividades de prática experimental tornam mais eficaz a aprendizagem dos estudantes (ARANTES; MIRANDA; STUDART, 2010).

A utilização de recursos educacionais vinculada às aulas que consigam fazer com que os alunos entendam a importância da Física e de como usufruem dela no cotidiano tem o objetivo de incentivar cada vez mais adeptos à pesquisa, permitindo novas aprendizagens sobre a Ciência.

2 Fundamentação Teórica

O saber ensinado nas escolas por muitas vezes se distancia daquilo que é produzido nas universidades e nos grandes centros de pesquisa, o que não é uma realidade favorável ao processo de ensino e aprendizagem: quando isso acontece o ensino fica limitado somente a estudar a ciência dos séculos passados, enquanto a ciência contemporânea por muitas vezes fica abandonada. A exemplo da Física os estudantes do Ensino Médio aprendem bastante sobre cinemática, dinâmica, termodinâmica, óptica, eletricidade e magnetismo. Esses assuntos se configuram conhecimentos fundamentais da Física, o problema é que os alunos por muitas vezes, não têm noção do que está sendo pesquisado atualmente nos laboratórios, porque essas discussões não acontecem no decorrer das aulas. Contudo, aproximar essas formas de conhecimento pode exigir um trabalho árduo. Watanabe et al (2014) salientou a dificuldade de apresentar Ciência enquanto está sendo desenvolvida:

Desde os anos 90 um número crescente de trabalhos vem se dedicando ao Ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC). Contudo, é rara a presença da Física que é efetivamente realizada na atualidade. Uma das razões para isso é a dificuldade em se apresentar uma ciência *enquanto ela é feita*, pois a mesma ainda carece de sistematização (WATANABE; GURGEL; MUNHOZ, 2014, p. 3).

Outro fator preocupante é o abismo existente entre o que é estudado em sala com a realidade que permeia a vida de cada um dos estudantes. Muitos jovens possuem dificuldades para compreender que até mesmo a Física Clássica tem aplicações imediatas na vida das pessoas. Constitui-se tarefa do professor buscar meios que permitam a contextualização dos fenômenos que são estudados em sala com o que os estudantes vivenciam. Essa dificuldade pode ser reduzida através do processo de alfabetização científica, que não só tem o objetivo de aproximar o ensino de ciências com o cotidiano mas, deve proporcionar a capacidade de leitura da natureza (CHASSOT, 2003).

Tomando este raciocínio como base, o indivíduo que consegue aprender ciências é capaz de fazer uma leitura do universo, pois a ciência é a linguagem com a qual a natureza é descrita (CHASSOT, 2003). De acordo com Auler (2003) compreender Ciência vai muito além de dominar ou memorizar conceitos; o ensino de ciências precisa ter um papel social forte, isto é, construir indivíduos críticos capazes de relacionar o que foi trabalhado na escola com o contexto de vida no qual está inserido, ajudando inclusive na formação de um cidadão apto para promover transformação social:

Neste sentido, assume-se que a ACT (*Alfabetização científico-tecnológica*) deve propiciar uma leitura crítica do mundo contemporâneo, cuja dinâmica está crescentemente relacionada ao desenvolvimento científico-tecnológico, potencializando para uma ação no sentido de sua transformação (AULER, 2003, p. 2).

Alfabetizar cientificamente é produzir importantes discussões. Obviamente, o pesquisador desempenha uma segunda função, tão importante quanto a divulgação de suas

pesquisas. De acordo com Watanabe et al (2014) o cientista deve promover a argumentação sobre as atribuições de sua pesquisa para a sociedade:

O fazer científico e as questões éticas inerentes ao trabalho do cientista devem ser postos em discussão, assim como os investimentos que são apoiados pelas esferas públicas. Ou seja, o papel do cientista deve ir além da apresentação do conhecimento científico e das pesquisas desenvolvidas, mas de promover o debate aberto sobre o papel de suas pesquisas na sociedade (WATANABE; GURGEL; MUNHOZ, 2014, p. 3).

No decorrer desse assunto, uma questão que vem surgindo é sobre o objetivo de se ensinar Ciências, ou seja, qual a importância de se trabalhar determinados conteúdos? Qual aplicabilidade esses conteúdos possuem na sociedade? Como a partir daquilo que foi ensinado em sala pode-se exercer cidadania e transformação social? Para Auler (2003) esses tipos de questionamentos saem do cenário limitado das discussões de como ensinar, culminando em discussões sobre a finalidade do ensino ou do por que ensinar:

Historicamente, no ensino de Ciências/Física, as discussões, as pesquisas têm focalizado prioritariamente questões metodológicas, relativas ao como ensinar. Mais recentemente, no contexto da formação da cidadania, novas questões têm entrado em pauta. Por exemplo, a preocupação com os objetivos educacionais. Em outras palavras, por que ensinar, por que aprender ciências. Neste sentido, a abordagem temática constitui-se no horizonte para o qual apontam os esforços empreendidos no processo de pesquisa/intervenção, entende-se que esta viabiliza discussões mais amplas, não restritas ao campo metodológico (AULER, 2003, p. 5).

No campo da Física, o processo de aprender e ensinar está pautado em compreender a forma com que a natureza se revela, descrevendo suas propriedades através de uma linguagem quantitativa. Nesse sentido, pode-se dizer que a Física é um meio pelo qual a humanidade percebe o mundo. Segundo Ostermann e Cavalcanti (2001) o conhecimento em física precisa romper as barreiras de uma simples disciplina escolar, formando pessoas capazes de atuar na sociedade:

A física é, sem dúvida, um dos mais claros e bem sucedidos exemplos de construção do conhecimento humano, mesmo quando não se está falando apenas de conhecimento científico. Consequentemente, para formar um cidadão pleno, consciente e participativo na sociedade, é necessário proporcionar-lhe acesso a esse conhecimento, não apenas no sentido prático do aprendizado escolar, mas também no sentido da física como visão de mundo, como cultura (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2001, p. 13).

Ainda sobre o processo de alfabetização científica, Ostermann e Cavalcanti (2001) acreditam que a Física deve possuir uma aprendizagem facilitada e precisa ocorrer essencialmente na escola, sobretudo, no Ensino Médio. Existem muitos problemas apontados pelos autores que acabam reduzindo a disciplina a uma visão simplista da própria Física, com demasiada aplicação de fórmulas sem que haja de fato uma compreensão dos fenômenos, fazendo com que se torne algo maçante e pouco atraente para os estudantes. Uma outra perspectiva sobre a aplicação de FMC é que ela poderia reduzir alguns desses problemas, contribuindo para elevar o interesse dos estudantes pela disciplina de Física, por tratar de assuntos mais recentes da ciência e altamente divulgados nos veículos de comunicação.

O entusiasmo dos estudantes em aprender, na própria escola, assuntos que leem em revistas de divulgação, em jornais ou na internet, justifica definitivamente a necessidade da atualização curricular. Além disso, FMC pode ser instigante para os jovens, pois não significa somente estudar o trabalho de cientistas que viveram centenas de anos atrás, mas também assistir cientistas falando na televisão sobre seus experimentos e expectativas para o futuro. Estudar problemas conceituais existentes na FMC envolve os estudantes nos desafios filosóficos de alguns aspectos da física (OSTERMANN; CAVALCANTI, 2001, p. 13).

A Física de Partículas, um tema muito importante entre os temas de Física Moderna e Contemporânea, pode ser ensinada nas escolas através da utilização do International Masterclasses: um evento internacional (disposto na página: International Masterclasses hands on particle physics) que permite que estudantes do mundo inteiro visualizem e façam análises estatísticas através de uma ferramenta computacional a partir de dados reais da Física coletados por um grande experimento internacional, sendo utilizado como um mecanismo de ensino e aprendizagem nesta área da Física, podendo acrescentar na simpatia dos estudantes e possivelmente, atraí-los para a pesquisa científica futuramente.

É sabido que o processo de alfabetização científica é algo que não acontece do dia para a noite, exige-se muito trabalho e dedicação dos profissionais da educação em ciências, entretanto, a proposta de operar alguns exercícios existentes no evento International Masterclasses oferece aos estudantes do mundo inteiro a oportunidade de fazer uma interpretação crítica do universo através de dados de experimentos reais, familiarizando-os com determinados métodos científicos de obtenção de dados. Acima de tudo, esses jovens precisam compreender que fazer Ciência é muito maior do que simplesmente estudar as disciplinas escolares.

2.1 Por que Física de Partículas?

A Física de Partículas constitui-se de um caminho provável para desvendar alguns questionamentos existentes no mundo que se conhece, principalmente sobre como se dá o funcionamento do Universo. Saber sobre como surgiu o universo, para onde ele está evoluindo, como são formados os átomos e quais as partículas elementares que constituem toda matéria, são algumas indagações que potencialmente inquietam muitas pessoas, não necessariamente cientistas. O estudo das partículas nos dá indícios para esses questionamentos. Através dessa ciência, muitas partículas foram previstas teoricamente antes mesmo de serem detectadas e comprovadas as suas existências por experimentos. Este tema da Física Contemporânea é fundamental na busca pela compreensão universal. Sobre esse aspecto, Ostermann e Moreira (2001) afirmam que:

Como funciona o Universo é uma pergunta que tem fascinado os cientistas há séculos e também o homem como espécie e é, em certo sentido, a pergunta-chave desta área da Física. O estudo das partículas elementares ilustra também a interação entre o pensar e o fazer, ou entre a teoria e a metodologia, em Física (OSTERMANN; MOREIRA, 2001, p. 139).

Discussões a respeito de assuntos tão intrigantes sobre o mundo microscópico da composição da matéria podem chegar ao alcance dos estudantes através da escola. Há algum tempo vêm surgindo trabalhos voltados para o ensino de Física de Partículas nos cursos introdutórios, a exemplo do artigo “Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares”, escrito por Ostermann (1999). Este trabalho tem o objetivo de apresentar as partículas elementares de forma acessível aos professores do Ensino Médio. O texto começa por fazer um breve relato histórico sobre o átomo desde a Antiguidade, passando pela Idade Média e Moderna até os tempos mais atuais com a descoberta das partículas subatômicas. Retrata também a descoberta do núcleo do átomo no início do século XX, as interações fundamentais da natureza e também o Modelo Padrão. De acordo com a autora, o ensino desse tema da Física volta-se para o processo de produção do conhecimento científico:

Uma grande potencialidade deste tema é a oportunidade que este oferece para a compreensão do processo de produção do conhecimento científico. Os vários episódios históricos envolvendo o avanço desta área de pesquisa mostram o quanto os físicos teóricos e experimentais uniram esforços na busca de uma compreensão maior da natureza da matéria. Foram necessários grandes investimentos tecnológicos para que se chegasse ao modelo padrão atual (OSTERMANN, 1999, p. 434).

No mesmo ano de 1999, Ostermann e Cavalcanti produziram um artigo com o tema “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Elaboração de Material Didático, em Forma de Pôster, sobre Partículas Elementares e Interações Fundamentais”. O objetivo deste trabalho é apresentar um pôster colorido e didático para ser incorporado na formação inicial e continuada de professores. Nesta época, os recursos educacionais sobre este tema traduzidos para o português eram bem escassos, por isso houve a necessidade de criação de material em língua portuguesa com a finalidade de proporcionar subsídios para a renovação dos currículos nas escolas brasileiras de Ensino Médio, através da formação do professor:

O objetivo deste trabalho é divulgar este pôster, mostrando seu enorme potencial como recurso didático para o ensino de Física de Altas Energias em cursos de formação de professores. Na realidade, o pôster e o texto foram elaborados com o objetivo inicial de preparar professores do curso de Licenciatura em Física (na disciplina “Prática de Ensino de Física”) para que, posteriormente, em seus estágios supervisionados, introduzissem o tema nas escolas (OSTERMANN; CAVALCANTI, 1999, p. 269).

O pôster desenvolvido é bem rico de conteúdo, entretanto, algumas das informações contidas nele podem não ser de fácil compreensão para os estudantes nesse nível de escolaridade, o que não inviabiliza a sua utilização nas escolas desde que haja o cuidado em selecionar os tópicos que vão ser trabalhados, de maneira que o aluno entenda adequadamente:

Sendo assim, o pôster é bastante completo, incluindo propriedades das partículas (tal como massa de repouso, carga elétrica, spin) cuja discussão no ensino médio poderá não ser factível. Acreditamos, portanto, que seu uso mais imediato seja na formação inicial e continuada de professores de Física de nível médio. É claro que sua utilização nas escolas poderá ser feita, desde que haja um certo cuidado em selecionar informações que não levem o aluno ao mal entendimento do assunto (OSTERMANN; CAVALCANTI, 1999, p. 269).

Ainda sobre esse trabalho, os autores (em concordância com diversos textos citados por esta dissertação) defendem que a curiosidade dos jovens seja estimulada através do uso de temas tão importantes da Física, e que possivelmente, culminará na transformação de estudantes em futuros cientistas:

São eles os futuros pesquisadores e professores de Física. É fundamental também despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próximas a eles. Além disso, uma boa formação científica faz parte de um pleno exercício da cidadania (OSTERMANN; CAVALCANTI, 1999, p. 267).

Outro trabalho voltado para o ensino de Física de Partículas cujo título é “Partículas e Interações”, produzido por Moreira (2004), apresenta uma visão introdutória do assunto de partículas elementares e interações fundamentais através da utilização de mapas conceituais. No texto do artigo pode-se encontrar informações didáticas sobre quarks, carga cor, léptons, hádrons, as quatro interações da natureza e bósons. O autor abre mão de utilizar ilustrações pois acredita que o uso inadequado delas prejudicará o aprendizado:

A intenção é a de mostrar que esse tema pode ser abordado de maneira acessível, sem muitas ilustrações que acabam tolhendo a imaginação dos alunos e até mesmo dificultando a aprendizagem de certos conceitos (MOREIRA, 2004, p. 10).

A justificativa para inserção de Física de Partículas nos cursos escolares, segundo Moreira (2004), é apresentar um conteúdo atual da Física potencialmente mais interessante e que possa motivar o ensino, porque na maioria dos casos, a Física é considerada uma disciplina pouco atrativa e de aprendizado mecânico:

O currículo da Física nas escolas é desatualizado; ensina-se uma Física que não chega ao século XX que é quase só Mecânica e que invariavelmente começa pela Cinemática. Esta, por seu caráter altamente representacional, é, psicologicamente, talvez o mais inadequado dos conteúdos para se começar aprender Física. Por que, então, não começar de tópicos contemporâneos? Dificilmente serão mais inapropriados do que a Cinemática, a Estática e a Dinâmica (MOREIRA, 2004, p. 14).

Em 2005 surge outro artigo sobre essa área da Física com o tema: “Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares” da autora Abdalla, onde é relatado de forma breve a descoberta das partículas elementares do Modelo Padrão. Não é um trabalho diretamente dirigido ao Ensino Médio, mas constitui-se numa obra de fácil leitura para leigos no assunto, isto é, sem o emprego de termos muito técnicos para leitores não especialistas:

Além disso, como seria impossível construir a família das partículas elementares de um ponto de vista estritamente teórico, optamos por contar sobre suas descobertas teóricas e experimentais em uma organização histórica cronológica, fazer uma representação artística para as características dessas partículas e depois acomodá-las no modelo aceito hoje em dia que é chamado de Modelo Padrão (MP) (ABDALLA, 2005, p. 38-39).

Em 2014, um grupo de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP), cujos nomes são: Graciella Watanabe, Ivã Gurgel e Marcelo Munhoz, produziu um trabalho com o

título “O que se pode aprender com o evento Masterclasses - CERN na perspectiva do ensino de física de partículas”. Neste artigo também é apresentado o tema Física de Partículas voltado para o Ensino Médio, utilizando dados de pesquisa do CERN incorporados ao evento Masterclasses que aconteceu na USP. Os estudantes foram apresentados aos estudos do experimento ALICE (um detector do LHC) onde participaram de discussões importantes, construídas com base nos pressupostos de uma alfabetização científico-tecnológica. A análise de aprendizado deste artigo foi feita com base no relato dos alunos que participaram do evento. No final os autores puderam concluir que:

Baseados nas discussões aqui apresentadas e nos elementos que emergiram dos dados pesquisados, se percebe que é possível produzir uma atividade de divulgação científica que oportunize elementos para a formação científica ampla dos estudantes. De tal maneira que esses jovens possam reconhecer a relevância da ciência na sociedade e a necessidade de um aprofundamento sobre seus conhecimentos científicos e técnicos, promovendo um pensamento menos ingênuo e limitado acerca do fazer e o saber sobre ciência (WATANABE; GURGEL; MUNHOZ, 2014, p. 1503-10).

Discutir Física de Partículas no Ensino Médio é discutir a própria construção do Cosmo: é entender como se tornou o que conhecemos hoje, na tentativa de prever para onde está caminhando o Universo. Baseados em alguns resultados de pesquisa de Ostermann e Moreira (2001) os estudantes do Ensino Médio têm plena capacidade de compreender esses assuntos, mudando o cenário das discussões sobre o que ensinar para o domínio de como ensinar esses pontos. O uso do International Masterclass proposto pode ser um caminho promissor para a abordagem de tais conceitos:

É viável ensinar Física Contemporânea no Ensino Médio, tanto do ponto de vista do ensino de atitudes quanto de conceitos. É um engano dizer que os alunos não têm capacidade para aprender tópicos atuais. A questão é como abordar tais tópicos (OSTERMANN; MOREIRA, 2001, p. 145).

A Física de Partículas também é conhecida como Física de Altas Energias devido aos experimentos promovidos nos aceleradores que utilizam de colisões entre partículas com elevadíssimas energias e velocidades. Nesse ponto trabalhar os aceleradores de partículas nas aulas de física é mais uma ferramenta para figar a curiosidade dos alunos sobre o assunto, uma vez que, esses aceleradores são máquinas impressionantes que dispõem de grande inovação tecnológica. O funcionamento de um experimento desse patamar conta com a colaboração de diversos profissionais como físicos, técnicos e engenheiros de vários países do mundo, incluindo o Brasil. O LHC (*Large Hadron Collider*) é o acelerador mais importante da atualidade com aproximadamente 27 km de circunferência, iniciou suas operações no ano de 2008 e é situado no CERN, nas imediações da Suíça e da França. O LHC tem auxiliado em pesquisas importantíssimas a exemplo da descoberta do Bóson de Higgs em 2012: partícula prevista teoricamente no Modelo Padrão, responsável por proporcionar as massas das outras partículas elementares. Os números no LHC são impressionantes e de acordo com Bediaga (2008):

No LHC, a cada segundo, um pacote com cerca de 3 trilhões de prótons, viajando com velocidade próxima à luz no vácuo (300 mil km/s), irá

atravessar outro com características idênticas. Choques “de frente” ocorrerão à estonteante taxa de 40 milhões deles por segundo. Cada vez que houver uma colisão desse tipo, serão produzidas, em média, centenas de partículas de massas variadas (BEDIAGA, 2008, p. 41).

Uma questão importante sobre o assunto é o mistério da assimetria existente entre matéria e antimatéria, fato que intriga os físicos do mundo inteiro e potencialmente poderá vir a intrigar os estudantes no decorrer das aulas: há uma grande quantidade de matéria presente no cosmo, porém as antipartículas que ocorrem de forma natural são raras, isto é, o universo é formado majoritariamente por matéria (BEDIAGA, 2008). O experimento LHCb no LHC tem o objetivo de investigar o comportamento da matéria e da antimatéria com base nas propriedades de uma partícula denominada méson B .

O desenvolvimento da pesquisa em Física de Partículas vem contribuindo muito para sociedade não só na área da Física mas em outras áreas como medicina, desenvolvimento tecnológico e computação (o que já foi apresentado na maioria dos livros didáticos analisados):

O CERN tem transferido tecnologia para a sociedade e essa tecnologia faz parte do nosso dia a dia (BALHAZAR; OLIVEIRA, 2008, p. 62).

As principais técnicas de diagnóstico e de terapias médicas atuais, por exemplo, estão baseadas nas descobertas da Física de Partículas nos séculos XX e XXI, principalmente no tratamento para combater o câncer:

Certas substâncias são emissoras de pósitrons, e por sua vez, quando um destes é emitido imerso na matéria, ele viaja uma pequena distância e então interage como um elétron do meio. A interação da matéria com a antimatéria resulta na completa aniquilação de ambas as partículas. Devido à conservação da energia e momento, suas massas são convertidas em um par de *fótons* que viajam em direções opostas. A detecção simultânea desses fótons torna possível a produção de imagens tomográficas (MACHADO; PLEITEZ; TIJERO, 2006, p. 408).

No campo da tecnologia da computação o desenvolvimento e pesquisa na área de Física de Partículas possibilitou a criação da “www” pelo CERN que impulsionou a comunicação via internet nos países do mundo todo. O avanço no armazenamento de dados constituiu-se indispensável para a realização dos experimentos no LHC. Além de tudo, inúmeras contribuições para a sociedade na área da saúde surgiram devido aos computadores do CERN. Só uma rede de computadores de última geração como esses criados, a princípio, para fazerem densos cálculos de decaimentos de partículas é capaz de analisar mais de 40 milhões de possíveis medicamentos no combate à malária através de simulações (BEDIAGA, 2008).

Todas essas aplicações servem para fazer os estudantes do Ensino Médio compreenderem a grandeza e a importância da Ciência, pois o desenvolvimento científico pode beneficiar até mesmo áreas que aparentemente não têm ligação com os assuntos

pesquisados. A aprendizagem dos conceitos em Física de Partículas é facilitada à medida que os alunos entendem a relevância desses conceitos para a sociedade.

2.2 Principais conceitos de Física de Partículas

O objetivo desta Seção é apresentar os principais conceitos de Física de Partículas que podem ser trabalhados no Ensino Médio sem que haja um caráter matemático muito rigoroso. Esses conceitos servirão de base para que os estudantes do Ensino Médio compreendam os exercícios do International Masterclass propostos neste trabalho.

2.2.1 As partículas fundamentais da natureza

Na década de 1930, os físicos pensavam que estavam muito próximos de desvendar todos os mistérios que envolviam a estrutura da matéria, pois já sabiam que o átomo era composto por prótons, elétrons e nêutrons e além disso, já tinham o conhecimento da existência do neutrino (ν) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Porém, o descobrimento de algumas partículas como *múon* (μ), *píon* (π), *káon* (K) e *sigma* (Σ) modificou tudo que os cientistas sabiam sobre a composição da matéria até o então. Tais descobertas revelaram muitas partículas diferentes das que eram sabidas, o que levou os físicos a pensarem em novas classificações. As centenas de partículas que são conhecidas hoje em dia são classificadas de acordo com o Modelo Padrão, o qual representa a teoria mais completa das partículas e suas interações atualmente. A teoria do Modelo Padrão foi desenvolvida nas décadas de 1960 e 1970 consistindo em uma teoria quântica de campos coerente com a mecânica quântica e a relatividade restrita.

Para entender o funcionamento do mundo das partículas que constituem o universo é necessário que se tenha o conhecimento das partículas fundamentais da natureza, isto é, partículas que não são constituídas por nenhum outro agrupamento de partículas. Tais partículas que não possuem estrutura interna são as chamadas partículas elementares. As partículas elementares do Modelo Padrão podem ser classificadas de acordo com o quadro da Fig. 1.

Muitas partículas foram previstas pelo Modelo Padrão antes mesmo de suas descobertas. Essa teoria também descreve três das quatro interações básicas da natureza: a interação eletromagnética que age sobre todas as partículas que possuem carga elétrica, a interação fraca que existe nos processos de decaimento beta e processos de decaimento similares e a interação forte que mantém a estabilidade dos prótons, nêutrons e do núcleo atômico. A interação gravitacional não é descrita pelo Modelo Padrão (BETTINI, 2014). No quadro apresentado na Fig. 1 estão os quarks e léptons que são as partículas que constituem toda a matéria existente na natureza. Os bósons da Fig. 1 são chamadas partículas mediadoras (exceto o bóson de Higgs H , pois ele não se configura como partícula

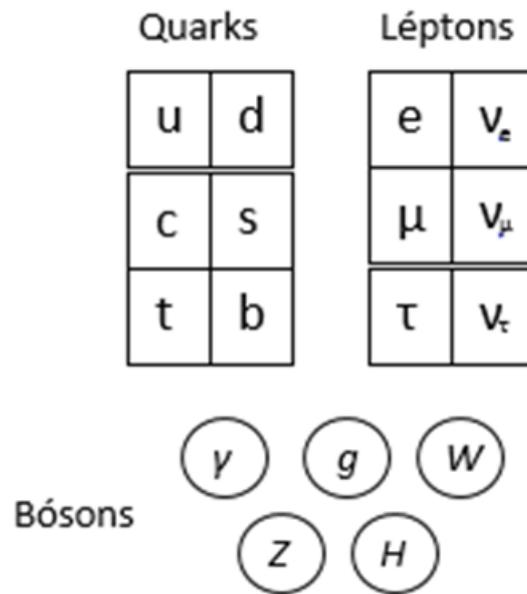


Figura 1: Partículas elementares do Modelo Padrão.

mediadora), isto é, responsáveis pelas interações quark-quark, lépton-lépton e quark-lépton. O *fóton* (γ) é responsável por mediar a interação eletromagnética, as partículas Z e W mediam a interação fraca e os *glúons* (g), a interação forte. O bóson de Higgs H , descoberto no LHC no ano de 2012, é a partícula responsável por gerar a massa das outras partículas. Sua detecção teve grande impacto na imprensa mundial pois consolidara o Modelo Padrão da Física de Partículas.

Das partículas elementares os quarks são as partículas que interagem através da chamada interação forte. É importante ressaltar que os quarks também sofrem interação eletromagnética, interação fraca e gravitacional. Os quarks apresentam uma propriedade chamada *sabor* sendo classificados em seis tipos de sabores distintos: quark *up* (u), quark *down* (d), quark *charme* (c), quark *estranho* (s), quark *bottom* (b) e o quark *top* (t). Os quarks também apresentam uma outra propriedade chamada *cor* (ou *carga cor*) e cada sabor de quark pode apresentar as cores vermelho, verde e azul. Além disso, existe uma antipartícula correspondente para cada quark (*antiquarks*). Os quarks se agrupam para formar os *hádrons*, partículas que possuem uma estrutura interna e que subdividem-se em dois grupos: os *bárions*, constituídos por três quarks ou três antiquarks, e os *mésons*, constituídos por um par quark-antiquark. Os prótons e os nêutrons são os *bárions* mais conhecidos pelos alunos do Ensino Médio. O próton (uud) é estruturado por dois quarks tipo u , cada um com carga elétrica fracionada $+\frac{2}{3}e$ e um quark tipo d com carga $-\frac{1}{3}e$, totalizado uma carga elétrica $+e$ ($e = 1,6 \times 10^{-19}C$). Já o nêutron (udd) é formado por um quark tipo u e dois do tipo d o que totaliza uma carga nula, ou seja, uma partícula eletricamente neutra. A Cromodinâmica Quântica, entretanto, permite a existência de partículas com mais de três quarks em sua estrutura:

Em princípio, a teoria dos quarks, a Cromodinâmica Quântica, não proíbe a existência de partículas com estrutura mais complexa do que

três quarks, três antiquarks ou um par quark-antiquark (MOREIRA, 2009, p. 2).

Os seis léptons existentes são: *elétron* (e), *múon* (μ), *tau* (τ), *neutrino do elétron* (ν_e), *neutrino do múon* (ν_μ) e *neutrino do tau* (ν_τ). Os léptons não estão sujeitos à interação forte e, diferentemente dos quarks, são detectados livres na natureza. Existe ainda uma classificação para as partículas de acordo com o seu momento angular intrínseco (*spin*). Os bárions e os léptons possuem o *spin* semi-inteiro e obedecem o princípio de exclusão de Pauli, onde duas partículas idênticas não podem ocupar o mesmo estado quântico, por isso são classificados como *férmions*. A exemplo dos mésons, partículas que possuem o *spin* inteiro não obedecendo o princípio de exclusão de Pauli são classificadas como *bósons* (também pertencem a essa classe as partículas com *spin* nulo) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

2.2.2 As interações fundamentais do Modelo Padrão

Como dito anteriormente, na natureza existem quatro tipos de interações, cada uma com sua partícula mediadora correspondente, entretanto, apenas três são descritas pelo Modelo Padrão. A partícula mediadora da interação gravitacional seria o *gráviton*, o problema é que nenhum foi detectado até os dias de hoje. De acordo com Moreira (2009) a não detecção dessa partícula compromete a simetria das *quatro forças* \rightarrow *quatro partículas mediadoras*:

O problema dessa bela simetria de quatro cargas, quatro interações, quatro forças, quatro tipos de partículas mediadoras e quatro campos é que nenhum gráviton foi ainda detectado e a gravidade, em si, não encaixa bem nessa teoria que se convencionou chamar de Modelo Padrão (MOREIRA, 2009, p. 3).

Pode-se associar a mediação de uma interação a uma espécie de “troca”, isto é, emissão ou absorção de partículas virtuais entre as partículas interagentes. A interação eletromagnética é a interação que ocorre entre partículas carregadas eletricamente. Uma partícula “percebe” a outra partícula com carga por meio da “troca” de *fótons* entre si, ou seja, esses *fótons* levam a informação de uma partícula para a outra. O *fóton* “compartilhado” constitui-se o *quantum* do campo eletromagnético. No caso da interação forte o *glúon* executa uma função bem parecida com a do *fóton* na interação eletromagnética, porém o alcance dessa interação é bem curto: a interação entre quarks em hádrons, está confinada dentro do hádron (BETTINI, 2014).

Quarks emitem e absorvem *glúons* o tempo todo e por isso exercem interação forte entre si. A força que age entre os quarks é chamada de “força cor” e é descrita pela teoria da Cromodinâmica Quântica. O motivo para a estabilidade dos prótons, nêutrons e do núcleo atômico também é devido a essa força. Ela não só mantém unidos os quarks para

formar os bárions e mésons, mas também mantém coesos os prótons e nêutrons nos núcleos atômicos com $A > 1$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

As partículas mediadoras da interação fraca são os bósons W^+ , W^- e Z^0 , configurando-se os quanta do campo fraco. O decaimento β de um nêutron decaindo para um próton emitindo um elétron e um antineutrino da Eq. 2.1, é um exemplo de interação fraca:



O alcance da interação depende diretamente da massa de repouso das partículas mediadoras. De acordo com a relação da *incerteza* da Mecânica Quântica, mostrada na Eq. 2.2, não é possível determinar simultaneamente com exatidão, por exemplo, a componente x do momento linear de uma partícula e também o valor exato da sua coordenada x de posição:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}. \quad (2.2)$$

Conforme a Eq. 2.2 (onde $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js é a constante de Planck) sugere, quanto maior for a massa, maior será o momento e reduzido ficará o espaço permitido a essa partícula. Assim a interação eletromagnética tem um alcance infinito porque fótons não têm massa; em contrapartida as interações fracas são mediadas por partículas massivas, logo o alcance das mesmas é curto (MOREIRA, 2004).

A teoria eletrofraca é a unificação entre as interações fraca e eletromagnética, formulada em 1962. A consolidação dessa teoria representou um grande passo para unificação das interações existentes na natureza, entretanto desenvolver essa unificação não foi nem um pouco trivial. Muitos problemas só foram solucionados com a detecção de uma partícula muito importante, prevista pelo Modelo Padrão.

Havia na teoria eletrofraca, formulada em 1962 por Sheldon Glashow, um paradoxo envolvendo as partículas W e Z. Por um lado, a debilidade das interações fracas requeria que tais partículas tivessem massas relativamente elevadas. Por outro, a simetria da teoria que dava conta dessas interações exigia que suas massas fossem nulas (MOREIRA, 2009, p.5).

Seguindo esta linha de pensamento, essa contradição desapareceria se as massas dos bósons W e Z fossem explicadas por outra partícula. Em outras palavras, deveria existir uma partícula que fosse responsável por constituir as massas dos bósons W e Z . Essa partícula é nada mais, nada menos que o bóson de Higgs, responsável pela massa de todas as partículas elementares (ELLWANGER, 2014).

De acordo com a Teoria Quântica de Campos toda partícula elementar está associada a um campo e a partícula de Higgs não é uma exceção. A partícula de Higgs é criada quando o campo de Higgs (campo que preenche o vácuo assim como os quatro campos

referentes às interações fundamentais) é excitado, recebendo energia suficiente para criar esta partícula. O chamado *mecanismo de Higgs* é dado pela interação do bóson de Higgs com outras partículas elementares, conferindo-as a energia proveniente do campo de Higgs em forma de massa. De acordo com a teoria do campo de Higgs, partículas como os bósons W^+ , W^- e Z^0 , mediadoras da interação fraca, adquiriram suas massas com a redução da temperatura do universo até uma temperatura crítica, correspondente a uma transição de fase capaz de gerar este campo (PIMENTA et al., 2013). O mecanismo de Higgs também é responsável pelas massas dos férmions. Enfim, juntamente com a detecção do bóson de Higgs em 2012 veio a consolidação da teoria eletrofraca.

2.2.3 A física da matéria e antimatéria

Para cada tipo de partícula existente no Universo existe uma antipartícula associada a ela, como por exemplo: os elétrons e os *pósitrons*, os prótons e os *antiprótons*, os quarks e os *antiquarks*, e assim por diante. Uma antipartícula possui a mesma massa que a sua partícula equivalente, entretanto a carga elétrica e os números quânticos são opostos (BETTINI, 2014). Quando a matéria e a antimatéria entram em contato, se aniquilam mutuamente, isto é, a energia que possuíam assume novas formas. Quando um elétron e um pósitron (*antielétron*) de baixas energias se aniquilam mutuamente, são produzidos dois fótons (Eq. 2.3), e caso o elétron e o pósitron estejam estacionários no momento da aniquilação a soma da energia de repouso das duas partículas constitui a energia total do sistema e é compartilhada da mesma forma pelos dois fótons (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (2.3)$$

As antipartículas também se agregam para formar a antimatéria: antiquarks podem constituir anti-hádrons e que quando se juntam a pósitrons, constituem um átomo de antimatéria ou *antiátomo*. O experimento PS 210, realizado no CERN produziu um átomo de anti-hidrogênio combinando um pósitron e um antipróton (PAULA; GANDELMAN, 1999). As antipartículas podem ser produzidas nos aceleradores ou ocorrer de forma natural:

Anti-hádrons e antiléptons são produzidos tanto em colisões feitas em aceleradores de partículas quanto em chuviscos de partículas produzidos por raios cósmicos, partículas que vêm do espaço e que podem atingir altas energias e penetram a atmosfera terrestre (PAULA; GANDELMAN, 1999, p. 32).

No início da formação do universo, de acordo com a teoria do *Big Bang* tudo começou com uma grande explosão. Nos primeiros momentos de existência, o universo era constituído por radiação. Pares de partículas e antipartículas a todo momento eram criadas e aniquiladas. Com a expansão do universo e conseqüentemente, seu resfriamento, matéria e antimatéria foram criadas nas mesmas quantidades (PAULA; GANDELMAN,

1999). Hoje em dia observamos uma predominância da matéria em relação à antimatéria, fato que tem intrigado os cientistas de todo mundo. De acordo com Bediaga (2010) os fótons observados no espaço atualmente podem nos dar indícios do universo primordial:

Na realidade, temos que fazer uma importante ressalva: no início, antes que houvesse o rápido processo de resfriamento do universo, o número de partículas de matéria e de antimatéria era imensamente superior ao existente hoje. Ou seja, nosso universo atual tem massa infinitamente inferior aquela do universo primordial. O testemunho disso é a igualmente imensa quantidade de fótons observados atualmente no espaço, produzidos como dissemos, por meio da aniquilação entre partículas e suas antipartículas (BEDIAGA, 2010, p. 49).

A verdade é que a predominância da matéria em relação à antimatéria possibilita a vida conforme conhecemos, pois quando a matéria e a antimatéria se unem, ocorre a aniquilação do par, só restando a energia.

Acredita-se que esse processo de criação e aniquilação realmente ocorreu para quase toda matéria criada no início da expansão do universo, mas o simples fato de existirmos indica que, ao menos, uma pequena fração de matéria escapou a esse extermínio precoce (PAULA; GANDELMAN, 1999, p. 32).

O que explicaria essa superioridade da matéria atualmente? O físico russo Andrei Sakharov propôs algumas condições necessárias para a subsistência da matéria que ficaram conhecidas como as condições de Sakharov: *a*) não conservação do número bariônico; *b*) violação de C e CP; *c*) desequilíbrio térmico. Sabe-se que partículas se desintegram e formam outras partículas entretanto, essa desintegração precisaria ocorrer com maior frequência para as antipartículas, como consequência de uma assimetria entre a matéria e a antimatéria (SAKHAROV, 1967). Essa assimetria existente pode ser explicada por um processo chamado violação de CP que é uma das condições de Sakharov.

O teorema da simetria CPT (“conjugação da Carga”, “conjugação de Paridade” e “reversão do Tempo”) é o estudo teórico responsável por relacionar as propriedades físicas entre as partículas e suas respectivas antipartículas (MOREIRA, 2009; BEDIAGA, 2010). De maneira geral, pode-se entender a conjugação da Carga como uma operação que descreve a transformação da partícula na antipartícula, isto é, um elétron que se transforma num pósitron com polaridade de carga invertida. Já a reversão temporal T pode ser compreendida a grosso modo como um filme que mostra a realidade sendo passada de trás para frente, sem que haja qualquer possibilidade de identificação da ordem natural dos acontecimentos (BEDIAGA, 2010). A Paridade P é o espaço invertido tendo um determinado ponto como referência, ou seja, como um reflexo produzido por um espelho plano.

Na Física a simetria CPT deve ser conservada. Ocorrendo uma violação na conservação de Carga e de Paridade, haverá também uma violação de reversibilidade temporal

como uma forma de “compensação” (BEDIAGA, 2010). As interações fracas violam essa simetria no processo chamado violação de CP, o qual se manifesta através de diferenças nas taxas de decaimento de partículas em relação a suas antipartículas. A violação de CP representa uma das condições necessárias para haver assimetria entre matéria e antimatéria no Universo (SAKHAROV, 1967), e foi comprovada experimentalmente nos decaimentos de *káons* (K) e mésons B .

O experimento LHCb do LHC no CERN apontou alguns caminhos norteadores no estudo do comportamento da matéria e antimatéria. Para tal, tomou como base os processos de decaimento de mésons B (BEDIAGA, 2008), o que será discutido em um dos exercícios de International Masterclass proposto por este trabalho.

2.2.4 Partículas Instáveis

Partículas instáveis são partículas que decaem exponencialmente em outras partículas em função do tempo, obedecendo o princípio de conservação de energia e de momento (Eq. 2.4, onde N é número de partículas que decaem em função do tempo t , N_0 é o número de partículas existente numa amostra no instante $t = 0$ e λ é a constante de decaimento: $[\lambda]_{S.I.} = s^{-1}$)

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2.4)$$

O *píon* (π^+), por exemplo, é uma partícula instável com tempo de vida média de $2,6 \times 10^{-8} s$ e que pode decair em um *antimúon* (μ^+) e um neutrino (ν_μ):

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu. \quad (2.5)$$

A energia de repouso do *píon* é de 139,6 MeV e a energia de repouso do *antimúon* é de 105,7 MeV. Como a energia de repouso do neutrino é praticamente nula, o restante da energia 33,9 MeV (139,6 MeV - 105,7 MeV) é distribuída entre o *antimúon* e o neutrino em forma de energia cinética (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009), isto é, a soma das energias do neutrino e do *antimúon* devem ser a energia de repouso do *píon*. A taxa de decaimento R em função do tempo t é medida da rapidez com que uma partícula instável decai (Eq. 2.6, onde R_0 define a taxa de decaimento no instante $t = 0$).

$$R(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

Por fim, a meia vida $T_{1/2}$ da partícula constitui o tempo necessário para que N e R caiam à metade do valor inicial (Eq. 2.7, onde $\tau = \frac{1}{\lambda}$, define o tempo de vida média da partícula). Algumas partículas possuem o tempo de vida muito pequeno, o que impossibilita uma detecção direta, isto é, são identificadas através do produto de decaimento.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2. \quad (2.7)$$

Partículas podem ser produzidas tanto de forma natural no decaimento de partículas instáveis provenientes dos raios cósmicos, quanto de forma artificial em aceleradores através da colisão entre partículas como elétrons e prótons. Na detecção de partículas de altas energias, é necessário levar em consideração os efeitos relativísticos da dilatação temporal:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_0. \quad (2.8)$$

Na Eq. 2.8 Δt é o intervalo de tempo no referencial do laboratório, Δt_0 é o intervalo de tempo próprio medido no sistema de referência do corpo em movimento e γ é o fator de Lorentz.

A exemplo dos *múons*, uma parte dos que são gerados na alta atmosfera terrestre, devido à desintegração de outras partículas que viajaram o Cosmo, consegue chegar ao nível do mar, isto é, apenas um percentual é detectado na superfície da Terra, porém a previsão da Mecânica Clássica permitiria um cálculo do tempo de vida dos *múons* muito maior do que a vida média ($\tau_\mu = 2,2 \mu\text{s}$) dessas partículas. A atmosfera tem aproximadamente 15 km de extensão e os *múons* atingem a superfície da Terra com velocidades próximas a velocidade da luz: $v = 0,998c = 2,992 \times 10^8$ (m/s), logo o tempo em que os *múons* levariam para atingirem o nível do mar é dado por (FAUTH et al., 2007):

$$\Delta t = \frac{15000(m)}{2,992 \times 10^8(m/s)} = 50,54 \mu\text{s}. \quad (2.9)$$

Ao utilizar-se o resultado da Eq. 2.9 na Eq. 2.4, o número N de *múons* que chegariam ao nível do mar em relação ao número N_0 formado da atmosfera seria bem próximo de zero, em outras palavras, todos os *múons* deveriam decair antes de chegar na superfície. Com a dilatação do tempo prevista pela Relatividade Restrita (Eq. 2.8) é possível estimar a quantidade correta de *múons* que viajam até a superfície. Nesse caso o fator de Lorentz é calculado pela razão entre a energia $E \cong 5$ GeV do *múon* media no laboratório e a sua energia de repouso $E_0 = 105,658$ MeV (FAUTH et al., 2007):

$$\gamma = \frac{E}{E_0} = 47,32. \quad (2.10)$$

O tempo de vida média (τ_μ) precisa ser multiplicado por esse fator de Lorentz para os *múons* vistos por um observador no referencial do laboratório e depois substituído na Eq. 2.4 com $\lambda = (\gamma\tau_\mu)^{-1}$ (FAUTH et al., 2007):

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda\Delta t} \cong e^{-0,48} \cong 0,62. \quad (2.11)$$

Isto mostra que aproximadamente 62% dos *múons* formados na alta atmosfera pode ser detectado na superfície.

3 Aplicação do exercício do experimento LHCb: medida do tempo de vida do méson D^0

O International Masterclass: Hands On Particle Physics (*International Masterclass e International Masterclasses in the LHC era*) é uma série de eventos internacionais organizados por físicos para apresentar a pesquisa em física de partículas de maneira prática aos estudantes do ensino médio. Ao visitarem as universidades por um dia, esses estudantes assistem palestras sobre os fundamentos da física experimental de partículas e realizam análises em dados reais, deste modo o International Masterclass disponibiliza ferramentas de ensino que viabilizam o contato com a física de partículas e a pesquisa avançada em geral. Além de palestras e atividades práticas, no final dos eventos é realizada uma videoconferência com pesquisadores nos experimentos no CERN (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear) e com alunos de outros países que têm realizado as mesmas atividades. Assim os estudantes têm a possibilidade de apresentar os resultados do exercício a seus grupos, de discutir esses resultados, de ver os experimentos e de fazer perguntas (tanto sobre física quanto mais gerais) aos pesquisadores.

O *Masterclass do LHCb: Medida do tempo de vida do D^0 no LHC* é um exercício do *International Masterclasses - hands on particles physics* (International... , 2016) que é direcionado ao público de estudantes de Ensino Médio como uma proposta de ensino de física de partículas e pode aproximá-los aos conhecimentos científicos produzidos nos centros de pesquisas e universidades, o que é um dos pressupostos teóricos de uma alfabetização científica.

Os exercícios do Masterclass são programas de GUI (Graphical User Interface) criados utilizando dados reais de partículas subatômicas coletados dos experimentos realizados no acelerador LHC (Grande Colisor de Hádrons, ou Large Hadron Collider) no CERN. A ferramenta de software é programada de acordo com um conjunto de critérios físicos estabelecidos e os processos são analisados pelos próprios estudantes (International... , 2016) com o auxílio de professores e monitores. Ao realizarem as atividades de um exercício, os estudantes vivenciam a realização na prática de uma pesquisa avançada e participam do processo científico; eles fazem ciência.

3.1 Descrição do exercício

O exercício para medir o tempo de vida do méson D^0 foi construído com base na tomada de dados no ano de 2011 no LHCb, registrando colisões reais de prótons (International..., 2016). O méson D^0 é uma partícula “charmosa” constituída por um quark *charm* e também um antiquark *up*, sendo possível identificá-la no detector LHCb, mostrado na Fig. 2, através dos produtos de seu decaimento: um *káon* (K^\pm) e um *píon* (π^\mp). Este não é o único canal de decaimento possível para o méson D^0 , contudo, será o objeto de detecção para este exercício. As partículas originadas no decaimento possuem um tempo de vida longo o suficiente para deixarem rastros no detector LHCb. O D^0 é neutro, logo não pode ser detectado diretamente, no entanto, ele pode ser reconstruído a partir das informações sobre o momento e a energia das partículas “filhas”. Esse canal de decaimento do D^0 é descrito por:

$$D^0 \rightarrow K^- + \pi^+ . \quad (3.1)$$

Na Física de altas energias, as partículas que são alvo de uma detecção são comumente chamadas de “sinal”, em contrapartida, as partículas que se misturam à amostra de sinal contaminando os dados são classificadas como “ruído”. Por esse motivo, os alunos precisam fazer a identificação de possíveis traços de decaimento do D^0 com muito cuidado. A Fig. 3 ilustra a posição de decaimento do D^0 (vértice secundário) a partir da colisão entre prótons (vértice primário) (International..., 2016). O usuário ao iniciar o exercício e carregar um evento observará a visualização que mostra as trajetórias de partículas (chamadas de “traços”) dentro do detector LHCb. Dentre os vários traços de partículas que aparecem num evento de colisão é necessário localizar um vértice característico do decaimento do D^0 , isto é, um vértice deslocado onde as trajetórias de um *káon* e de um *píon* se cruzam (algo semelhante à Fig. 3). A Fig. 4 é um evento de uma colisão onde traços de diferentes partículas são representados com cores diferentes de acordo com uma legenda existente na parte inferior da GUI. Para facilitar a identificação dos vértices, os usuários podem observar um mesmo evento em três projeções bidimensionais diferentes.

A GUI também possibilita que o estudante saiba sobre o tipo de partícula e também obtenha informações físicas de massa, energia e momento, simplesmente selecionando um traço com o mouse e clicando sobre ele. Este recurso é importante para saber se a escolha do vértice deslocado é adequada, pois a soma das massas invariantes dos dois traços selecionados em determinado evento, deve compreender uma faixa entre 1816 e 1914 MeV correspondente a massa invariante do D^0 . Essa massa é calculada quando o usuário seleciona dois traços que pareçam as trajetórias cruzadas de um *káon* e um *píon* a partir de um vértice comum, conforme mostra a Fig. 5, salva esses candidatos e em seguida, clica no botão Calcular. Caso a massa da combinação escolhida pelo usuário

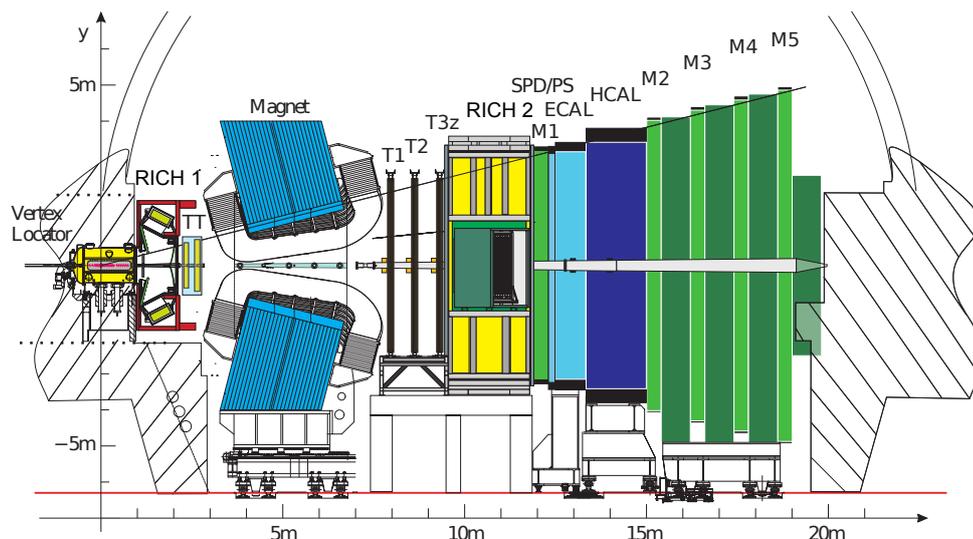


Figura 2: Representação gráfica do detector LHCb. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics

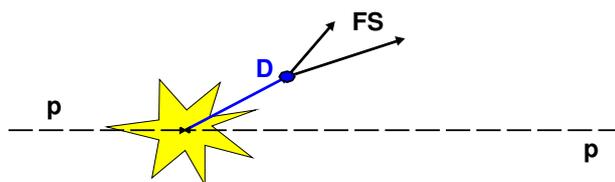


Figura 3: Posição de decaimento “D” do méson D^0 em duas partículas, deslocado a partir da colisão entre prótons (bolha amarela). Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

possua compatibilidade com a da partícula D^0 , ele deverá acionar o recurso de adição de partículas, e então, gravá-la.

O participante também notará que nem todos os vértices deslocados terão precisamente a faixa de massa invariante do D^0 , o que o levará a filtrar suas escolhas de maneira mais apropriada (eles estão trabalhando com dados reais que contêm o sinal mas também os ruídos). Se, por ventura, o usuário salvar uma combinação não compatível com a faixa de massa do D^0 , o próprio exercício não permitirá que essa combinação seja gravada. Assim será feita a distinção entre o que é sinal e o que é ruído. Com o término da observação de todos os eventos deverá ser criado um histograma de massa que servirá como tema de discussão entre os participantes e mediadores (International . . . , 2016). O exercício então será realizado em duas sequências de etapas: a primeira é referente ao ajuste de distribuição de massa para obtenção das distribuições de variáveis de sinal e o

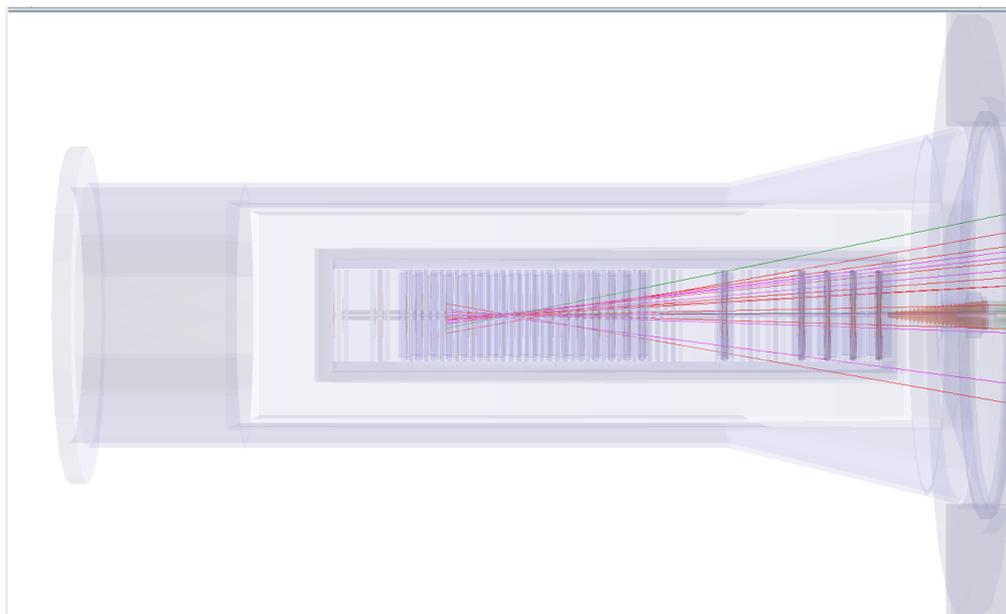


Figura 4: Visualização de um evento. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

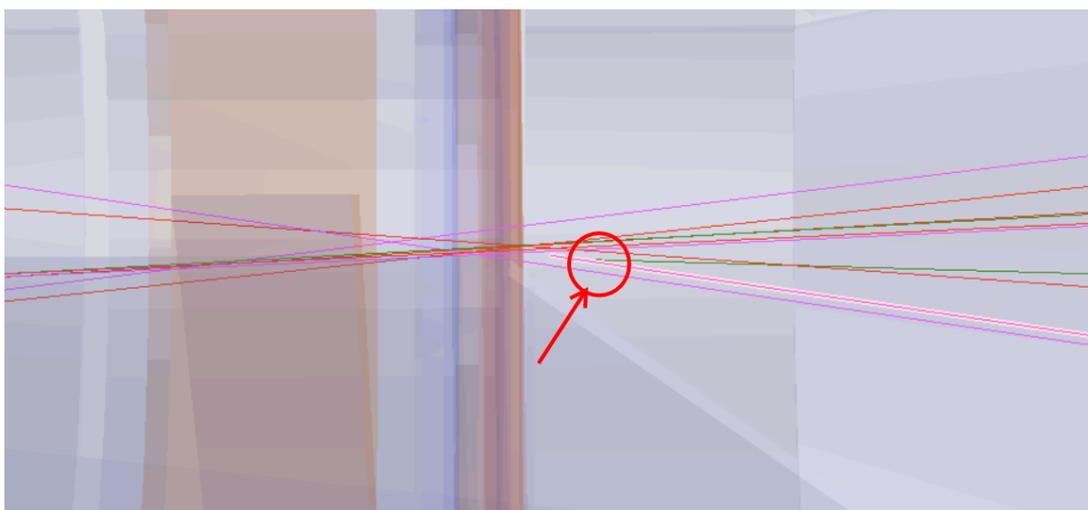


Figura 5: Visualização de uma possível trajetória cruzada de um káon e um píon a partir de um vértice deslocado (indicado pela seta em vermelho), com um dos traços selecionado. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

grau de pureza da amostra, e a segunda, é para medir o tempo de vida do D^0 .

Na primeira etapa os estudantes acionarão o botão designado para plotar a massa do D^0 a fim de traçar a distribuição total da massa, onde o sinal poderá ser visto a partir de uma estrutura em forma de um pico, dentro da faixa de massa relevante para análise (1816-1914 MeV), acima de uma distribuição plana que é o ruído. É importante destacar que a forma do sinal é descrita por uma distribuição gaussiana cuja média da distribuição corresponde à massa do D^0 e o desvio padrão (3% em torno da massa do D^0) equivale à resolução experimental do detector (International... , 2016). Após traçarem a distribuição

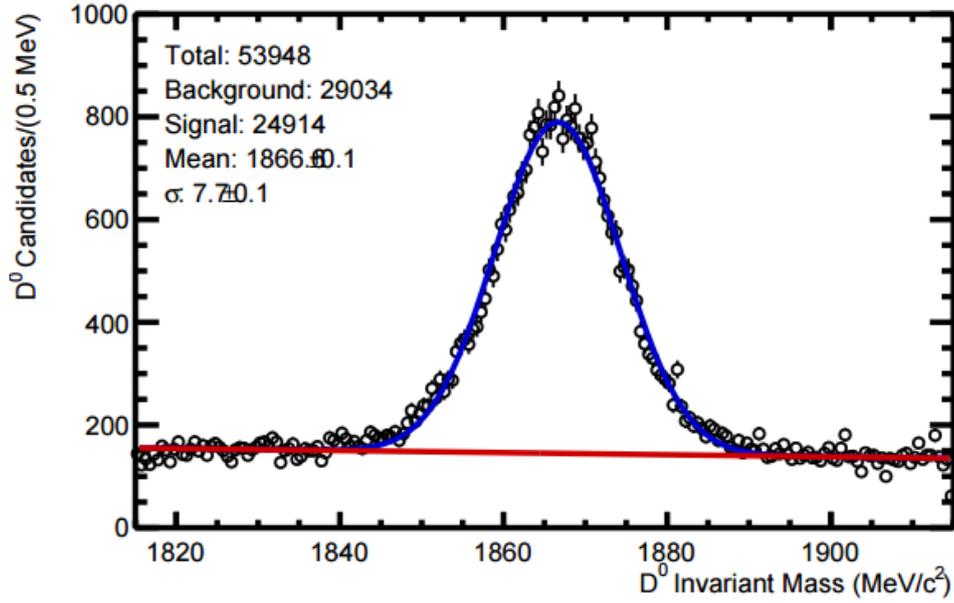


Figura 6: Distribuição total da massa do D^0 com ajuste de gaussiana para o sinal (linha azul) e reta para o ruído (linha vermelha). Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

de massa, deverão ajustá-la para que a função gaussiana do sinal fique bem definida assim como a função linear para o ruído, conforme mostra a Fig. 6.

A distribuição de massa após ser ajustada poderá ser separada em três regiões: a região central que corresponde ao sinal e as regiões laterais que contêm somente ruído. O cursor chamado “**Sig range**” será usado para definir a região de início e fim do sinal. Desta maneira, os eventos que não estão compreendidos na faixa do sinal, serão automaticamente considerados na região de ruído.

É possível observar na Fig. 6 que há ruído na região central (massa do D^0), entretanto é necessário separá-lo do sinal. O método de separação usado define bandas laterais um pouco afastadas da região que contém o sinal, para que eventos da região de pico não fiquem misturados a essas bandas. Tais regiões laterais devem ter dimensões equivalentes (possivelmente iguais) e suficientemente largas. As regiões podem ser descritas por três distribuições: $\phi_{esquerda}$, ϕ_{pico} e $\phi_{direita}$. As áreas sob a curva ajustada para as três regiões são definidas como $A_{esquerda}$, A_{pico} e $A_{direita}$, onde nesse caso, a área sob a curva em vermelho na região de pico da Fig. 6 é uma estimativa do número de eventos de ruído. A distribuição que corresponde à subtração do ruído então será dada pela relação:

$$\phi_{sub} = \phi_{pico} - \frac{A_{pico}}{A_{esquerda} + A_{direita}} (\phi_{direita} + \phi_{esquerda}). \quad (3.2)$$

Além da distribuição de massa, os estudantes usarão as regiões definidas para

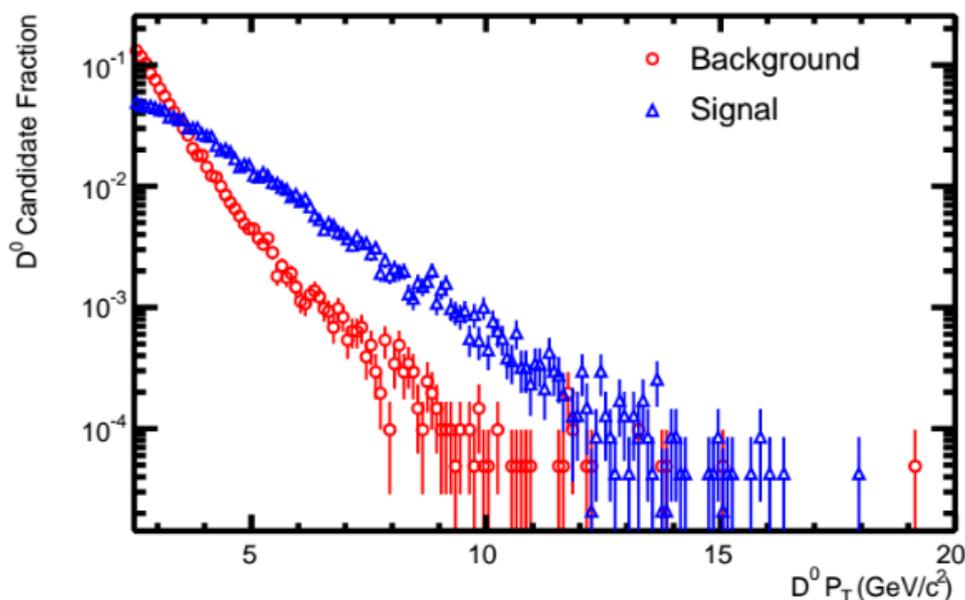


Figura 7: Distribuição de candidatos a D^0 em função do momento do D^0 transversal à linha do feixe do LHC. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

determinar as distribuições de sinal (em azul) e de ruído (em vermelho) em outras variáveis, como por exemplo, a distribuição de candidatos a D^0 em função do momento do D^0 transversal à linha do feixe do LHC, mostrado na Fig. 7.

Outro gráfico que deverá ser obtido é a distribuição de candidatos a D^0 em função do logaritmo de base 10 do “parâmetro de impacto” que é distância de menor aproximação do D^0 em relação à posição do vértice primário (interação próton-próton). A probabilidade de que o D^0 tenha sido originado na interação primária é maior quanto menor for o parâmetro de impacto (International . . . , 2016). Essa distribuição é mostrada na Fig. 8.

A parte da distribuição do sinal com alto parâmetro de impacto na Fig. 8 corresponde aos mésons D^0 , que são formados no decaimento de mésons B , ou seja, não foram criados no vértice primário, mas sim a partir do decaimento dos mésons B que viajaram alguns milímetros antes de decaírem.

Por fim, também é possível traçar a distribuição do tempo de decaimento dos candidatos a D^0 que pode ser observada na Fig. 9. Uma exponencial descreve o sinal, cuja inclinação corresponde a um sobre o tempo de vida do D^0 , isto é, inverso do tempo de vida da partícula, e o ruído fica concentrado em curtos tempos de decaimento (International . . . , 2016).

A segunda etapa do exercício utilizará a amostra de sinal da etapa anterior para calcular o tempo de vida da partícula D^0 que é o equivalente da meia vida de uma partícula radioativa (Eq. 2.7). O decaimento do D^0 é dado por uma função de distribuição

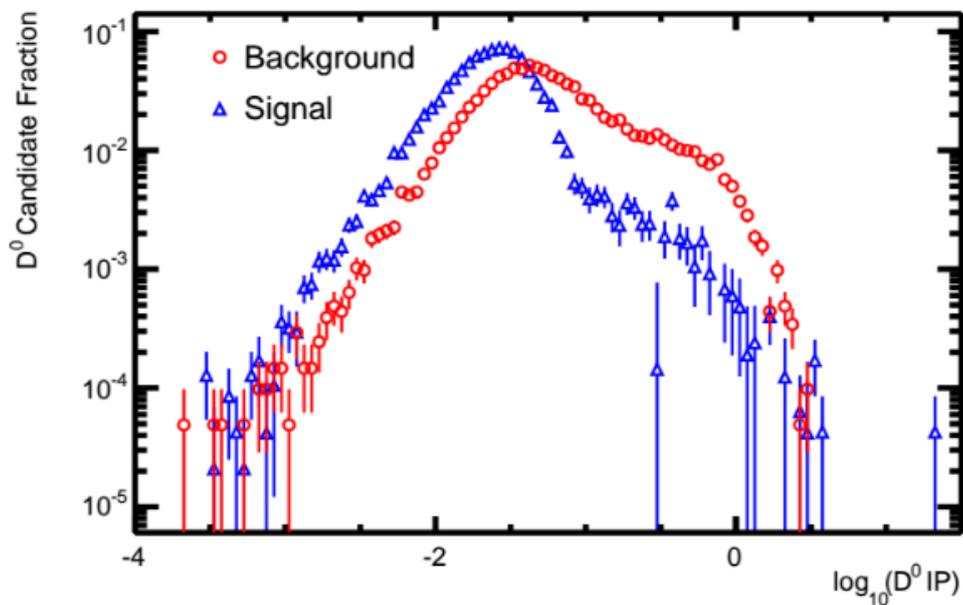


Figura 8: Distribuição de candidatos a D^0 em função do logaritmo do parâmetro de impacto. Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

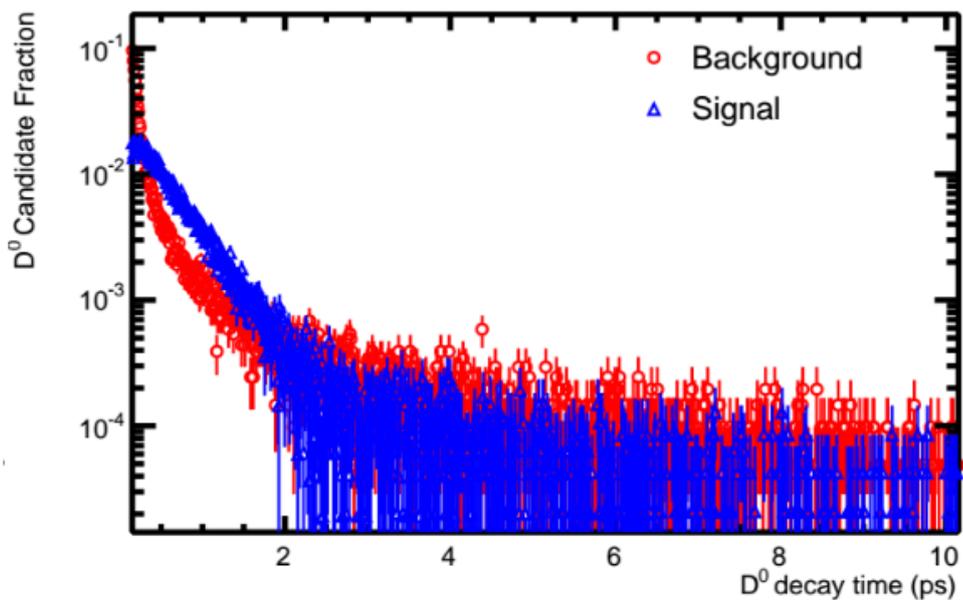


Figura 9: Distribuição do tempo de decaimento dos candidatos D^0 . Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

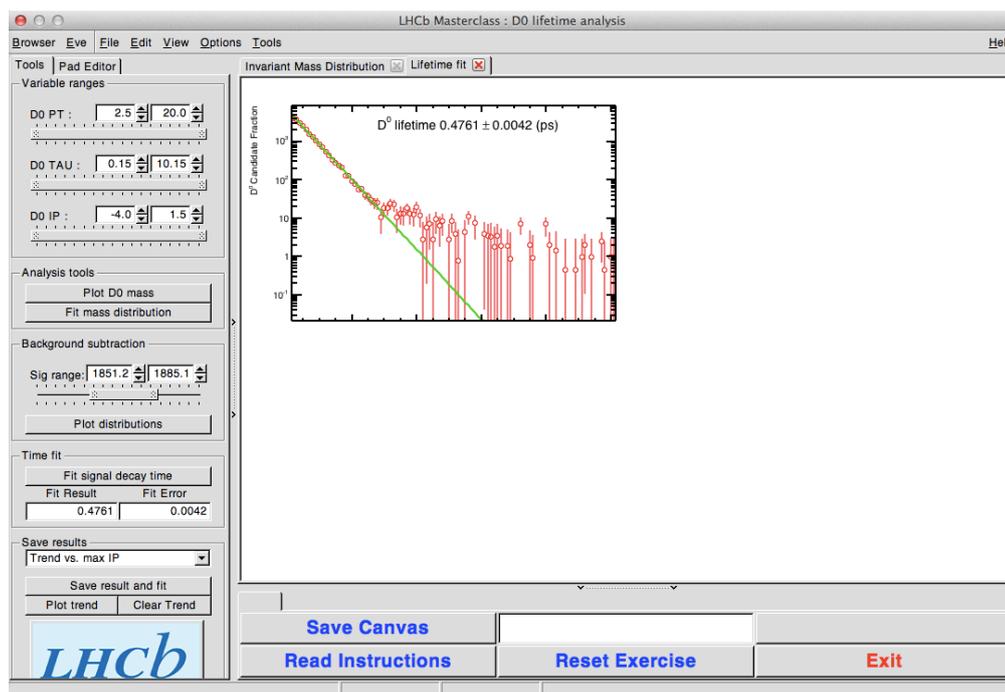


Figura 10: Ferramenta de ajustes da distribuição exponencial para calcular o tempo de vida do D^0 . Fonte: International Masterclasses Hands on Particles Physics.

exponencial. Quando essa função é ajustada à distribuição do tempo de decaimento dos candidatos D^0 , o inverso do tempo de vida do D^0 será dado pela inclinação da exponencial. Os usuários farão a comparação do valor obtido com a média mundial, dada pelo *Particle Data Group* (PATRIGNANI et al., 2016). Logo em seguida, eles repetirão esse ajuste enquanto variam o máximo permitido do logaritmo do parâmetro de impacto do D^0 , movendo o valor superior a partir de 1,5 até - 1,9 em estágios de 0,20 e refazendo o ajuste do tempo de vida do D^0 em cada ponto, de acordo com as instruções apresentadas, para traçar a inclinação mostrada na Fig. 10 (International... , 2016).

O corte no parâmetro de impacto é necessário para eliminar os casos em que o méson D^0 é proveniente do decaimento dos mésons B , onde a estimativa do tempo de vida é superestimada (soma do tempo de vida do méson B com o D^0).

Em cada etapa os participantes discutirão sobre os resultados com os monitores e professores. As instruções referentes a essas sequências de etapas, as quais os estudantes precisam fazer uma leitura cuidadosa antes de partirem para a realização das tarefas propostas, foram traduzidas para a língua portuguesa como parte do produto proposto por este trabalho de pesquisa (a tradução completa está em Apêndice A), para facilitar o acesso dos estudantes brasileiros a este evento internacional de ensino.

3.2 Metodologia

O exercício para medir o tempo de vida do méson D^0 , com suas instruções traduzidas para a língua portuguesa foi aplicado em duas ocasiões. A primeira aplicação foi para uma turma especial de 12 estudantes de Ensino Médio, pertencentes a várias escolas (públicas e privadas) do Estado do Rio de Janeiro, no dia 9 de março de 2016. A segunda aplicação ocorreu no dia 1 de dezembro do mesmo ano para os alunos da Escola Estadual Canadá, situada no Município de Nova Friburgo/RJ, onde novamente, 12 estudantes participaram. A quantidade de alunos nos dois dias foi uma coincidência. Mais alunos (cerca de 20 - 25 por evento) estavam inscritos, entretanto, apenas 12 compareceram em cada dia. Não há uma quantidade definida de estudantes que possam realizar as atividades, mas há necessidade de que haja no máximo 3 alunos por computador para garantir o bom andamento da aplicação do exercício.

Os dois eventos aconteceram no Instituto de Física da UFRJ e os estudantes, que se inscreveram junto a suas escolas para participarem do programa, foram selecionados através de uma escolha por ordem de inscrição. A divulgação das atividades foi realizada através do envio de e-mails, por parte dos organizadores, diretamente aos professores das escolas e através de divulgação pública do evento International Masterclass na página de facebook do Laboratório de Física de Partículas LAPE - UFRJ (<<https://www.facebook.com/lapeufrj/>>).

Os eventos fizeram parte da organização internacional e contaram com palestras introdutórias (com duração de uma hora) sobre Física de Partículas e sobre o exercício, ministradas por pesquisadores da UFRJ. A realização do exercício pelos alunos ocorreu com três horas de duração no total (nos dois casos) e foi seguida por uma videoconferência com pesquisadores no CERN e no experimento LHCb e com alunos da Itália, Alemanha e Estados Unidos para a discussão final da tarefa. Logo após terminarem o exercício, os estudantes responderam um questionário com algumas perguntas decorrentes a realização do exercício:

1. *A instituição de ensino em que você estuda pertence à rede: () Pública Federal () Pública Estadual () Pública Municipal () Privada*
2. *Série do Ensino Médio: () 1ª série () 2ª série () 3ª série*
3. *Antes de realizar o exercício você já havia tido algum contato com a Física de Partículas? Caso sua resposta seja não, vá para a quinta pergunta.*
4. *Seu primeiro contato com assuntos de Física de Partículas foi através de (se necessário marque mais de uma alternativa): () Escola () Revistas e/ou jornais () Documentários () Notícias de TV e/ou internet () Algum amigo e/ou parente () outros (especifique)*

5. *Após a realização deste exercício seu interesse sobre a Ciência mudou de alguma forma?*
6. *Você gostou de realizar o exercício? Caso sua resposta seja não, vá para a oitava pergunta.*
7. *O que você mais gostou ao praticar este exercício? Marque mais de uma opção se necessário. () Simular o trabalho de um pesquisador () Entender que a Física está mais próxima da nossa realidade do que imaginamos () Ampliar seus conhecimentos em Física principalmente sobre como funciona o nosso Universo () Realizar uma atividade diferenciada que não se limitou apenas ao aprendizado formal em sala de aula () Outras (especifique)*
8. *Você sentiu alguma dificuldade ao realizar o exercício que possa ter prejudicado de alguma forma o seu entendimento sobre o assunto proposto?*
9. *Você tem algum comentário, crítica ou sugestão para o evento?*

Na seção seguinte foi feita uma análise conjunta dos questionários com a finalidade de trazer um breve relato de forma quantitativa e qualitativa sobre a experiência que cada jovem adquiriu com a participação de suas escolas nos dois eventos de International Masterclass que ocorreram na UFRJ em 2016.

3.3 Análise da experiência dos estudantes

Através da análise dos questionários aplicados, verificou-se que do total de 24 estudantes que participaram do evento (somando as duas ocasiões em que ocorreu) 3 (13%) pertenciam a rede federal de ensino, 19 (79%) pertenciam a rede estadual e 2 (8%) eram da rede privada. Sobre a escolaridade foi constatado que 16 (67%) estavam cursando a 3ª série, 2 (8%) a 2ª série e 6 (25%) a 1ª série do Ensino Médio. Um dos principais objetivos da realização dos eventos de International Masterclass além de promover discussões sobre a Ciência é proporcionar o contato entre os estudantes de Ensino Médio com a pesquisa científica avançada em física de partículas, cuja importância dos saberes está associada à grande visibilidade midiática dos aspectos científicos e aos impactos socioeconômicos decorrentes (WATANABE et al., 2016). Antes de realizar o exercício, 16 (67%) do total de 24 estudantes que participaram já haviam tido pelo menos algum contato com os assuntos de física de partículas, os outros 8 (33%) ainda não possuíam este contato o que acabou se tornando algo inovador em suas vidas.

A pergunta posterior foi sobre onde havia acontecido o primeiro contato com esses assuntos antes do exercício de Masterclass (repondida somente pelos que marcaram sim na terceira pergunta), permitindo inclusive que o estudante marcasse mais de uma opção.

A Fig. 11 mostra a porcentagem de cada opção marcada sobre o primeiro contato com a Física de Partículas em relação ao total de marcações feita pelos alunos.

A opção que mais se destacou entre os jovens, foi referente à comunicação dos assuntos de Física de Partículas na escola, totalizando 8 de 21 marcações, isto é, 38% de todas as opções marcadas, o que é uma porcentagem razoável quando é considerado somente o total de marcações. Entretanto, quando é levado em conta a quantidade total de estudantes, uma realidade chocante é revelada: apenas oito estudantes (33% do total) que participaram do evento relataram que obtiveram o primeiro contato com a Física de Partículas no ambiente escolar, o que se torna um dado preocupante e aponta o quanto essa temática ainda não é adequadamente trabalhada nas salas de aula mesmo sendo um tema tão importante da Física e presente nos livros didáticos atuais. É certo que alguns quando realizaram a tarefa, ainda não haviam concluído todo conteúdo de Física do Ensino Médio, entretanto, nada impede que assuntos ligados a FMC sejam debatidos antes do bimestre ou trimestre designados pela grade curricular, principalmente devido a importância desses conceitos para sociedade tecnológica atual. A grande maioria dos alunos pertencia a rede Estadual de ensino, que apresenta no Currículo Mínimo determinados assuntos de FMC a serem trabalhados na 1^a e 2^a série, incluindo Física de Partículas, e mesmo assim, relataram que não tiveram esse contato na escola.

A segunda opção mais assinalada, foi referente à divulgação desses assuntos nas reportagens de TV ou internet totalizando 7 de 21 marcações. Sabe-se que os resultados de pesquisas realizadas no LHC nos últimos anos tiveram grande repercussão nos noticiários, sobretudo o que diz respeito ao bóson de Higgs descoberto em 2012 e o prêmio Nobel da Física rendido a esta pesquisa no ano de 2013. A terceira opção em destaque foi o contato através dos documentários (3 marcações). Muitos canais de TV hoje em dia, ligados a ciência, divulgam tais assuntos de forma didática no formato de documentários. Veículos de comunicação, computadores e smartphones, são de mais fácil acesso à realidade da maioria dos estudantes, possibilitando a proximidade com as publicações científicas divulgadas na rede. Dois estudantes obtiveram seu primeiro contato com a Física de Partículas através de algum familiar ou amigo, entretanto, ninguém havia lido algum artigo de revista ou jornal sobre o assunto, o que retrata pouco incentivo à leitura científica, e outras formas de contato não foram relatadas. Neste sentido, o evento de International Masterclass serviu como um divulgador de ciência no primeiro momento, no intuito de compensar a precariedade do ensino de física de partículas nas escolas e instigar o interesse pela pesquisa científica (WATANABE et al., 2016).

A quinta pergunta do questionário identificou que do total de estudantes que participaram, 18 (75%) modificaram o interesse próprio pela Ciência. Alguns simplesmente pelo fato de não compreendiam nada sobre o assunto e após o exercício, passaram a entender melhor. Outra questão levantada foi em relação à curiosidade, ficaram fascinados

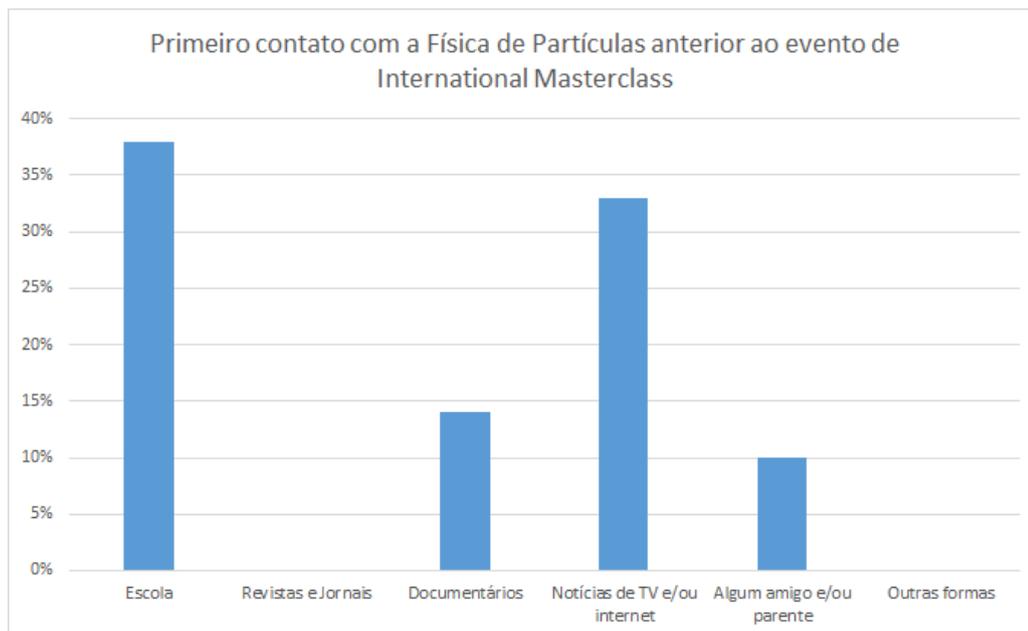


Figura 11: Respostas à pergunta 4 sobre o primeiro contato com a Física de Partículas com percentual do número total de marcações

em conhecer mais sobre o Universo e entender como funciona o mundo. Saber mais sobre a gigantesca máquina que é o acelerador LHC e o contato com pesquisadores do CERN; a compreensão da importância que toda tecnologia desenvolvida para o funcionamento do LHC tem para sociedade, um dos pressupostos de uma alfabetização científica, contribuiu muito para esta questão.

Estudante 1: “Senti uma vontade maior de conhecer e entender o mundo em que vivemos através da ciência.”

Estudante 2: “Podemos conhecer um pouco mais sobre os avanços que estão ocorrendo na ciência, gerando ainda mais interesse e curiosidade.”

Estudante 3: “Ampliou minha visão da física e pude ver um pouco melhor como funciona um acelerador de partículas”. Agora a dúvida é entre física de plasma, a física quântica, física de partículas ou engenharia.”

Estudante 4: “Quanto mais eu sou exposta ao conhecimento, não só científico, eu vejo o quanto que eu não sei e vejo que quero aprender mais.”

Esses trechos da fala dos alunos comprovam que alguns dos objetivos de uma verdadeira alfabetização científico-tecnológica (ACT) foram alcançados através da realização deste evento de International Masterclass:

(...) a visão ampliada da ACT permite compreender a ciência de forma a articular o saber da ciência com sua dimensão tecnológica e social. Esse aspecto se refere a postura na formação científica que seja capaz de superar os mitos que possibilite uma reflexão capaz ultrapassar as

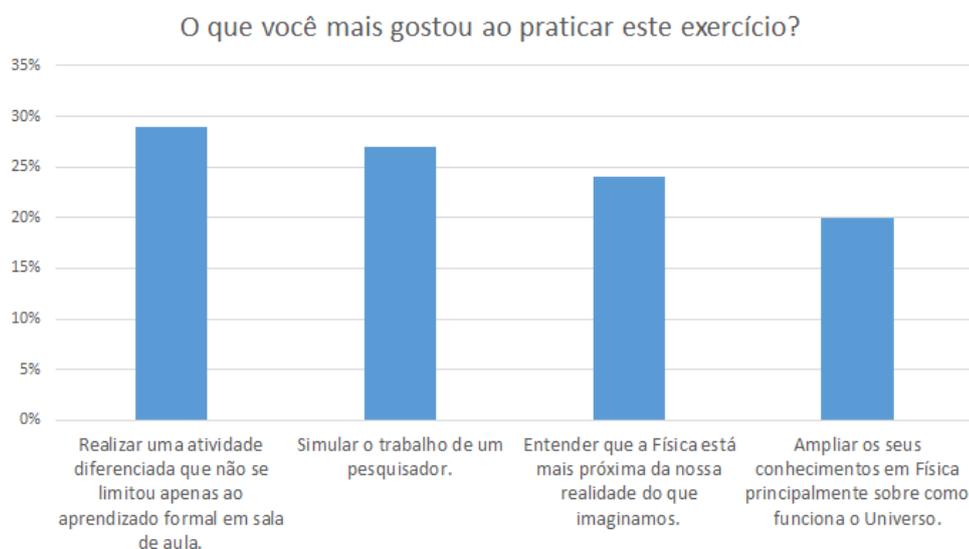


Figura 12: Respostas à pergunta 7 sobre os tópicos que mais marcaram os estudantes durante a tarefa com percentual do número total de marcações.

esferas da escola e que seja possível promover a atuação desses sujeitos no mundo (WATANABE; GURGEL; MUNHOZ, 2014, p. 3).

A maioria dos alunos gostou de realizar a atividade pois 21 (88%) fizeram uma avaliação positiva da experiência da qual participaram. Dentre as opções disponíveis no questionário (cada estudante poderia marcar mais de uma opção nesta fase) sobre o que mais atraiu esses jovens na realização da tarefa (sétima pergunta) foi realizar uma atividade diferenciada, isto é, fora do ambiente formal e maçante da sala de aula, acrescentando muito no aprendizado desses indivíduos. Esta opção obteve 14 marcações de um total de 49 opções assinaladas no questionário. A segunda opção mais escolhida foi simular o trabalho de um pesquisador. De fato, o exercício propõe a seleção de dados a partir de critérios físicos, para que em seguida, os próprios alunos analisem tais dados, o que configura uma experiência inovadora para muitos. Esta opção obteve 13 marcações dos estudantes. A terceira opção que mais agradou os alunos foi entender que a Física está mais próxima da realidade em que vivem do que imaginavam com 12 marcações. Por fim, 10 estudantes também ficaram admirados em compreender o funcionamento do Universo. Esta etapa do questionário foi fundamental para se ter um breve panorama do quanto a realização de um exercício científico influenciou a vida desses jovens. A Fig. 12 mostra a porcentagem de cada opção marcada por eles em relação ao número total de marcações sobre o que o estudante mais gostou ao realizar a atividade.

Apenas quatro (17%) alunos sentiram dificuldades para fazer a tarefa. Dos quatro apenas dois relataram, de forma específica, quais foram essas dificuldades e um dos obstáculos foi a língua estrangeira durante a conferência, a qual foi realizada em inglês. A tradução das instruções para a realização das atividades computacionais eliminou possíveis

barreiras com o idioma estrangeiro.

Estudante 5: “Pelo fato de nunca ter mexido com essa área.”

Estudante 6: “O aprendizado da língua inglesa”.

Os demais 20 estudantes (83%) não sentiram dificuldades. A última pergunta do questionário relatou um aspecto muito favorável: alguns alunos parabenizaram o evento relatando um experiência incrível de aprendizado e sem dificuldades e ainda sugeriram que o evento acontecesse em mais escolas e em maior tempo, a fim de que ocorra uma maior explanação do tema. Houve uma crítica em relação à conferência que foi referente a dificuldade relatada pelo Estudante 6.

Estudante 1: “Minha sugestão é que ao invés de trabalharmos em parceria apenas com alunos dessa escola, possamos interagir mais com alunos de outras instituições e também fazermos o estudo na prática em laboratórios.”

Estudante 4: “Eu achei maravilhoso e que poderia durar um pouco mais para termos mais tempo de realizar o evento.”

Estudante 6: “Deveria ter alguém para traduzir o que foi dito.”

Estudante 7: “Quero parabenizar, o evento foi muito interessante e produtivo e me fez entender muitas coisas.”

Estudante 8: “Achei muito interessante o evento e muito bem feito, pois tive compreensão quase que total do que estava sendo dito e feito e tive um grande aprendizado.”

O exercício no âmbito geral tornou-se uma experiência muito positiva para eles, aproximando-os dos conhecimentos científicos e aguçando-os para a pesquisa. Sobretudo, esses alunos entenderam a importância que a pesquisa desenvolvida no CERN tem para a sociedade, observando que a ciência está constantemente em construção. O evento foi muito mais do que simplesmente ensinar conceitos; foi uma maneira alternativa de promover o entendimento dos alunos sobre o Universo em que vivem. De acordo com Chassot (2003):

Acredito que se possa pensar mais amplamente sobre as possibilidades de fazer com que alunos e alunas, ao entenderem ciência, possam compreender melhor as manifestações do universo (CHASSOT, 2003, p. 91).

A realização de um evento de International Masterclass com o exercício atual serviu de experimento para auxiliar os pesquisadores a planejarem a implementação na prática do novo exercício sobre o decaimento dos mésons tipo B .

4 Novo exercício de International Masterclass para analisar o comportamento da matéria e antimatéria a partir dos decaimentos dos mésons B

O texto contendo as instruções para a realização do novo exercício de International Masterclass (Apêndice B) constitui a segunda parte do produto proposto por este trabalho e foi escrito com uma linguagem que busca em todo momento a aproximação com o público do Ensino Médio. A criação desse novo exercício, assim como o exercício para medir o tempo de vida do D^0 , utilizou dados reais coletados do experimento LHCb referentes ao decaimento dos mésons B carregados, para analisar o comportamento da matéria e da antimatéria e oferecer uma visão deste tema para os estudantes. Esses dados foram extraídos da pesquisa *Measurements of CP violation in the three-body phase space of charmless B^\pm decays* (AAIJ et al., 2014) uma análise de dados do LHCb desenvolvida no Brasil em colaboração entre o CBPF e a UFRJ (REIS, 2014).

O software de visualização e análise para o novo exercício está sendo desenvolvido pela Dr^a Irina Nasteva (UFRJ), com base na programação do exercício anterior, disponibilizada pelos próprios pesquisadores do CERN que a criaram. Esse novo exercício seguirá uma sequência baseada na já adotada pelo exercício atual, porém os dados empregados serão da análise de violação de CP nos decaimentos de mésons B em três hádrons leves (AAIJ et al., 2014), que já foram aplicados a um projeto para alunos de graduação em física na Universidade de Manchester (PARKES; GERSABECK; GUTIERREZ, 2015). A análise então foi simplificada para ser adaptada ao nível de Ensino Médio.

O objetivo deste novo exercício é fazer com que os jovens vivenciem, por um dia, um trabalho científico que os levará a compreender um pouco mais sobre o comportamento da antimatéria. Este assunto configura-se um potencial artifício de atração para muitos estudantes em Física, pois trata de um tema que é enigmático até para os pesquisadores de ponta. Como já discutido no Capítulo 2, o Universo, no início de sua formação, possuía as mesmas quantidades de matéria e antimatéria, e por alguma razão, ocorreu um desequilíbrio entre essas duas entidades. Uma das pesquisas realizadas no CERN mostrou que o processo de violação de CP é evidenciado na diferença entre as taxas de decaimento dos mésons B^+ e B^- em três káons (AAIJ et al., 2014; PARKES; GERSABECK; GUTIERREZ, 2015; REIS, 2014), o que pode ajudar os cientistas a entenderem o porquê da desigualdade existente entre matéria e antimatéria observada atualmente na natureza. O méson B^- é

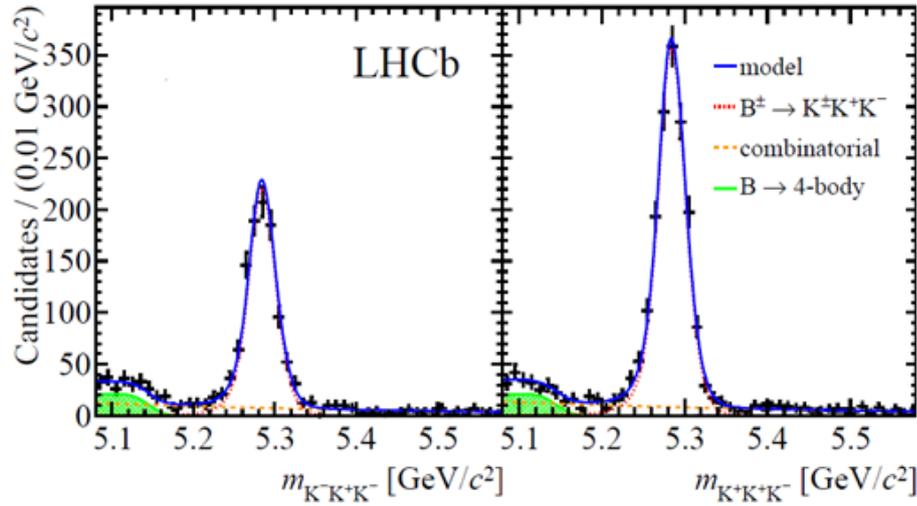


Figura 13: Espectro de massa invariante do decaimento $B^\pm \rightarrow K^\pm K^+ K^-$, utilizando a região dos dados com maior assimetria. A figura à esquerda mostra os candidatos mésons B negativos, e à direita os positivos. Fonte: AAIJ, *et al*, 2014.

constituído por um *quark bottom* e um *antiquark up*, decaindo em dois káons negativos e um káon positivo, já a antipartícula (méson B^+) é constituída por um *antiquark bottom* e um *quark up*, decaindo em dois káons positivos e um negativo. O decaimento desses mésons é dado pela equação Eq. 4.1:

$$B^- \rightarrow K^+ + K^- + K^-, \quad B^+ \rightarrow K^- + K^+ + K^+. \quad (4.1)$$

A Fig. 13 mostra o espectro de massa invariante do decaimento do méson B em três káons para a região de maior assimetria separado por carga, onde é visível a assimetria entre o número de mésons B positivos e negativos. Este canal de decaimento foi escolhido por possuir regiões do espaço de fase com altas assimetrias que poderão servir para ilustrar com clareza o fenômeno de violação de CP aos estudantes e por ser relativamente fácil de selecionar a partir de uma análise sistemática dos traços gerados em uma colisão de prótons no acelerador LHC.

4.1 Exercício de visualização de eventos

Em meio as inúmeras trajetórias de partículas que aparecerão em cada evento de visualização, a identificação da partícula B pode ser feita a partir de um ponto característico que indique o decaimento do méson B em três *káons* conforme ilustrado pela Fig. 14. A ferramenta, nesse caso, também permite que os usuários obtenham informações importantes como massa, energia e momento linear (quantidade de movimento) da partícula que se deseja selecionar.

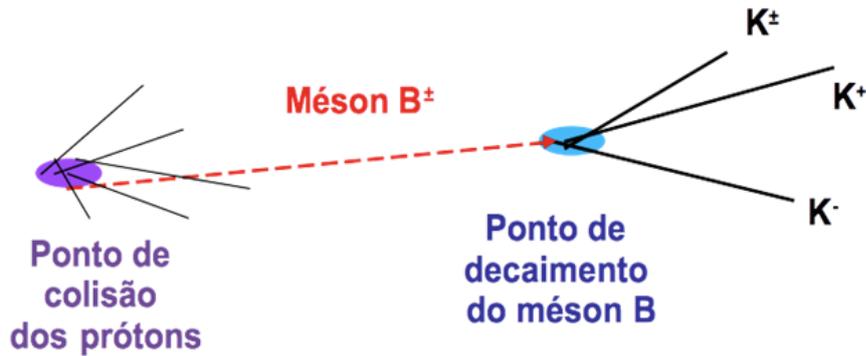


Figura 14: Decaimento do méson B em três káons.

De forma análoga ao exercício do méson D^0 , o estudante pode observar esses dados ao selecionar, com o cursor do mouse, a combinação de partículas que julgar que seja de possíveis candidatos ao decaimento do méson B , ou seja, deverá selecionar três traços de káons que se cruzam a partir de um vértice comum. É necessário calcular a carga e a massa do méson B a partir das partículas selecionadas. O estudante pode realizar esse passo clicando no botão responsável para fazer esses cálculos. A soma das cargas dos três káons também deverá ser $+1$ ou -1 , isto é, igual à carga do méson B (que pode ser negativo ou positivo se, respectivamente, corresponder à matéria ou à antimatéria).

De acordo com a Relatividade Restrita a energia total (E) de uma partícula depende do seu momento linear p e da sua massa de repouso m_0 : $E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. A massa de repouso m_0 pode ser obtida através da equação da energia total de acordo com a Eq. 4.2:

$$m_0 = \sqrt{(E/c^2)^2 - (p/c)^2}. \quad (4.2)$$

A massa m_0 é estabelecida a partir de grandezas que se conservam (energia e momento) e é invariante na natureza (por isso é chamada “massa invariante”). A Eq. 4.2 é utilizada para reconstruir a massa invariante do B^\pm . Ao realizar-se a soma das medidas de energia e momento dos três káons, que constituem os produtos de decaimento, e aplicando tais valores na Eq. 4.2, é possível encontrar a massa m_0 do B^\pm , situada na faixa de aproximadamente 5225 a 5340 MeV (AAIJ et al., 2014). Está é a faixa do sinal, contudo os participantes vão selecionar eventos dentro da faixa total entre 5150 a 5440 MeV que contém também o ruído.

De modo semelhante ao exercício anterior, os traços de diferentes partículas serão mostrados, em um evento de colisão, com cores distintas, de acordo com uma legenda presente na GUI, facilitando os usuários na identificação do sinal em detrimento do ruído. Após realizar a identificação dos candidatos a méson B , eles adicionarão essa combinação clicando em um botão específico no software e em seguida, a gravarão. Os estudantes vão

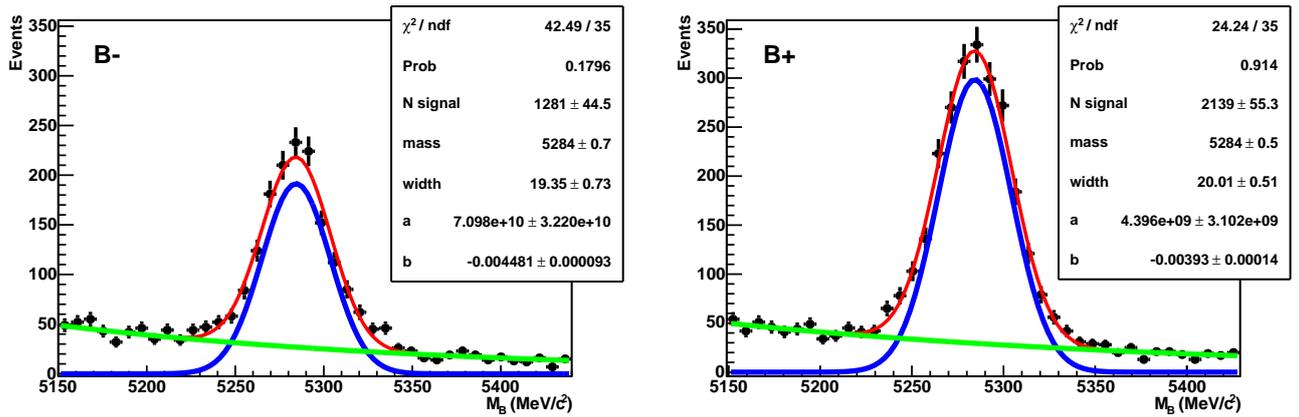


Figura 15: Distribuição total de massa dos candidatos à B^\pm contendo ajuste de modelos de sinal (linha azul), ruído (verde) e o modelo total (vermelha).

repetir esses passos para os 30 eventos que irão observar. Com o término desta etapa de observação de eventos de colisão, um histograma de massa invariante deverá ser criado.

4.2 Exercício de análise estatística

A criação do histograma marcará o início da segunda etapa e a ele serão adicionados mais eventos pré-selecionados. Depois de examinarem com cuidado esse histograma, os estudantes plotarão a distribuição total de massa dos candidatos a B^\pm , onde farão um ajuste para descrever o sinal e o ruído. Assim como no exercício do D^0 , uma função gaussiana descreverá o sinal, mas o ruído será descrito por uma função exponencial. É necessário que cada grupo de alunos aplique um ajuste de modelo que inclua descrições funcionais do canal de decaimento de interesse e do ruído presente na amostra de dados a esse histograma. O ajuste é solicitado ao clicar em um botão na GUI, o qual executa o software de análise estatística baseado na ferramenta ROOT incorporada no programa, conforme mostra a Fig. 15.

Na Fig. 15 a curva em vermelho representa a distribuição de massa do B^\pm dos eventos que ocorreram dentro da faixa total (5150 a 5440 MeV). A forma do sinal é descrita por uma distribuição gaussiana (em azul) cujo valor da média, (valor central) correspondente à massa do B^\pm , é de 5284 MeV. A espessura da faixa do sinal é definida como sendo $5284 \text{ MeV} \pm 3\sigma$, onde o desvio padrão $\sigma = (19 - 20) \text{ MeV}$ é a largura em torno da média da gaussiana, determinado pela resolução experimental do detector (AAIJ et al., 2014). Logo a faixa do sinal estará aproximadamente entre 5225 a 5340 MeV. O ruído é descrito por uma distribuição exponencial (em verde) cujos parâmetros a e b são respectivamente a normalização e a inclinação da exponencial, que se aproxima muito de uma reta inclinada.

Logo após realizarem a separação das regiões de sinal e de ruído, os participantes também obterão as distribuições das variáveis de sinal em função do parâmetro de impacto (IP), do momento transverso à linha do feixe (P_T), e da distribuição do tempo de decaimento dos mésons B^\pm (τ), assim como no exercício do D^0 . Os alunos vão observar diferenças nas distribuições de sinal e ruído, o que servirá de objeto de discussões entre os grupos. Como o ruído é formado por combinação aleatória de traços, ele possuirá uma distribuição de P_T mais baixa que o sinal. O IP do sinal será bem próximo de zero, isto é, quanto menor for o IP maior será a probabilidade de ocorrer a formação dos mésons B^\pm na colisão de feixes de prótons. Os mésons B^\pm também possuem um tempo de vida $\tau = 1,6 \times 10^{-12}$ s longo suficiente para permitir que os mesmos viagem alguns milímetros antes de decaírem em outras partículas, o que possibilita a sua detecção. Em contraste, o ruído de combinações aleatórias de traços terá tempos de decaimento próximos de zero. As discussões das distribuições cinemáticas servirão de base para explicar como são desenvolvidos os critérios de seleção do sinal e de supressão do ruído na amostra de dados.

4.3 Medida da assimetria

Seguindo a sequência do exercício, é necessário separar as amostras dos candidatos a mésons B^- e B^+ para, então calcular a assimetria. Esse cálculo é acionado ao clicarem em um botão na GUI e é dado pela Eq. 4.3, onde N^+ é o número de eventos de decaimento do B^+ e N^- é o número que corresponde ao decaimento do B^- (AAIJ et al., 2014):

$$A = \frac{N^- - N^+}{N^- + N^+}. \quad (4.3)$$

Esta etapa para determinar a assimetria é o resultado mais importante do exercício. O valor de N^\pm é estimado pelo ajuste na distribuição da massa invariante do B^\pm levando em conta somente a contribuição dos eventos de sinal. Para a amostra total da Fig. 15 o valor de assimetria medido foi de $A = (-25 \pm 2) \%$, onde é possível observar uma grande diferença entre os candidatos positivos e negativos. O interessante é que o ruído apresenta números de eventos aproximadamente iguais para os candidatos negativos e positivos, não mostrando assimetria na Fig. 15. Os estudantes também discutirão sobre a assimetria do ruído. Nele estão contidos traços aleatórios onde não ocorrem violação de CP e por isso, o valor de assimetria encontrado deve ser bem próximo de zero. Aplicando a Eq. 4.3 com números de eventos do ruído, a assimetria do ruído é obtida compatível com zero. O cálculo será invocado com um botão dedicado na GUI.

4.4 Investigação do efeito da seleção sobre o resultado

O detector LHCb é formado por uma série de sub-detectores que estão dispostos ao longo da direção da linha do feixe, onde cada um deles possui uma função específica.

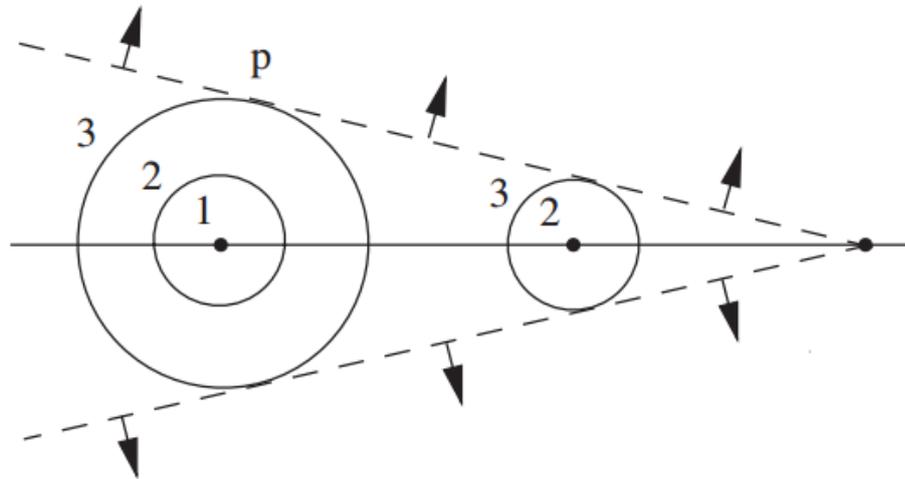


Figura 16: Construção de Huygen para o efeito Cherenkov: os pontos 1,2 e 3 sobre o eixo horizontal são três posições sucessivas da partícula com intervalos de tempos (t_1 , t_2 e t_3) iguais. As curvas 2 e 3 são as posições das ondas emitidas a partir desses pontos nos tempos t_2 e t_3 . As frentes de onda estão indicadas pela linha tracejada com direção de propagação de acordo com as setas. Fonte: MARTIN; SHAW, 2008.

A identificação de partículas, também chamada de PID (*Particle IDentification*) é a parte da seleção responsável por identificar partículas carregadas: káons, píons, múons e prótons. Ela é realizada a partir de informações obtidas nos detectores de Cherenkov (RICH: *Ring-Imaging Cherenkov system*) contidos no LHCb (ADINOLFI et al., 2013). Esses dispositivos funcionam de acordo com o efeito Cherenkov, um método para identificar partículas altamente energizadas. Este efeito é observado quando uma partícula carregada atravessa com certa velocidade v , um meio dispersivo cujo índice de refração é n , excitando os átomos que estão próximos, tornando-os polarizados. Se a velocidade v da partícula for maior do que a velocidade da luz no meio c/n , uma parte da energia de excitação reaparece como forma de radiação emitida num cone a um ângulo característico θ com a direção do movimento (MARTIN; SHAW, 2008).

Estabelecendo a condição necessária para que ocorra este efeito ($v > c/n$), o ângulo θ pode ser encontrado através do esquema da Fig. 16 que representa uma construção de Huygen.

A Fig. 17 mostra um triângulo construído a partir dos pontos da Fig. 16 onde a radiação de Cherenkov é emitida com um ângulo θ , onde $\beta = v/c$. A velocidade v pode ser obtida através da Eq. 4.4, pois ao encontrar-se θ , v pode ser automaticamente calculado. No tempo t , a partícula percorre $\beta ct = vt$, enquanto a luz viaja $(c/n)t$, e o ângulo θ será dado por (MARTIN; SHAW, 2008):

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}. \quad (4.4)$$

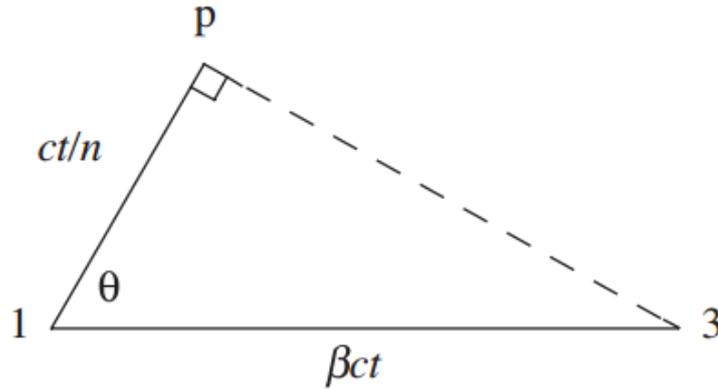


Figura 17: Triângulo 13p, onde $t = t_3 - t_1$ e a radiação de Cherenkov é emitida com ângulo θ . Fonte: MARTIN; SHAW, 2008.

Para partículas que apresentam baixos valores de momento linear são esperados grandes ângulos, entretanto altos valores de momento requerem pequenas aberturas angulares. Por tal motivo, o sistema RICH é dividido em dois sub-detectores: o RICH1 que cobre a região de baixos e intermediários momentos (2 – 40) GeV/c, sobre a faixa angular do espectrômetro total de (25 – 300) mrad e o RICH2, que abrange a região de altos valores de momento (15 – 100) GeV/c sobre o intervalo angular de (15 – 20) mrad. O meio óptico presente no RICH1 é o gás C_4F_{10} e no RICH2 é o CF_4 , ambos são compostos de flúor e carbono que apresentam baixa dispersão, por isso são utilizados como meios radiadores para a radiação de Cherenkov (ADINOLFI et al., 2013; ALVES JR. et al., 2008). A radiação aparece como um espectro contínuo e é detectada por um dispositivo fotossensível de silício.

Para medir o momento linear das partículas, o LHCb contém um ímã onde existe um campo magnético \vec{B} fornecido por um dipolo, que ao interagir com a partícula de massa m , velocidade v e carga q , provoca uma deflexão de raio r na sua trajetória (antes em linha reta) devido a força de Lorentz $\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$. A força $|\vec{F}_B|$ é a componente centrípeta da curva de raio r formada pela partícula: $qvB = \frac{mv^2}{r}$.

Um terceiro dispositivo chamado tracker (detector de traços) mede o momento linear \vec{p} das partículas a partir de suas respectivas trajetórias construídas ponto a ponto. Quando a partícula carregada passa por determinados materiais, estas interagem deslocando elétrons dos átomos criando assim uma carga elétrica que permite medir a sua posição, sendo possível rastrear a sua trajetória (ALVES JR. et al., 2008). De acordo com a equação Eq. 4.5, o momento da partícula é dado por:

$$p = mv = qBr . \tag{4.5}$$

Com o momento linear medido e a velocidade calculada a partir do ângulo de Cherenkov (Eq. 4.4), é possível determinar a massa de uma partícula. Para o mesmo valor

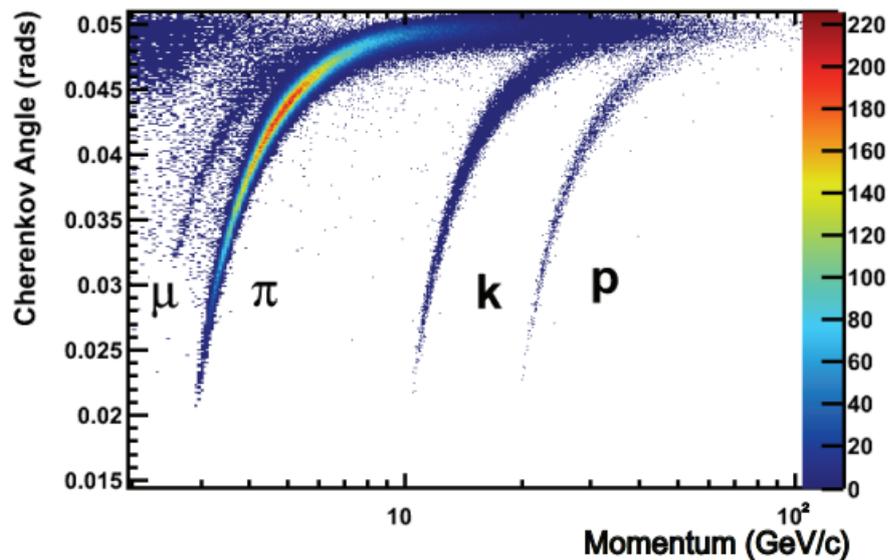


Figura 18: Reconstrução do ângulo de Cherenkov medido pelo RICH em função do momento linear medido pelo tracker. Fonte: M. Adnolfi *et al.*, 2013.

de momento, partículas com massas diferentes como píons (π), múons (μ), káons (K) e prótons, possuirão velocidades diferentes e conseqüentemente, ângulos de Cherenkov distintos. Ao medir o ângulo e o momento separadamente, é possível identificar cada partícula de acordo com sua massa (ADINOLFI *et al.*, 2013). A Fig. 18 representa a identificação de partículas de acordo com o momento linear e o ângulo de Cherenkov no LHCb. Desta maneira, os káons são distinguidos dos π , μ e prótons com alta eficiência e baixa taxa de falsa identificação. Este critério de seleção será incorporado no software do exercício.

Os critérios de seleção dos candidatos serão otimizados, por meio da seleção de identificação de partículas aplicada aos três káons produtos do decaimento conforme mostra a Fig. 19. Em preto está a seleção padrão ($PIDK > 0$), em vermelho $PIDK > 2$, em verde $PIDK > 3$ e em azul $PIDK > 4$. A variável $PIDK$ é responsável por fazer a identificação dos káons; ela é equivalente a uma diferença entre as probabilidades da partícula ser um káon e ser um pión: quanto maior for a $PIDK$, mais provável que a partícula requerida seja um káon e maior será o grau de pureza da amostra. Esta etapa demonstrará como se desenvolve na prática uma pesquisa científica.

Ao variar os critérios de identificação de káons, repetir o ajuste para a distribuição da massa invariante e realizar novamente a medida da assimetria para cada critério de seleção, os estudantes devem perceber que a assimetria do sinal é estável. A Fig. 20 mostra que o resultado da medida da assimetria é estável com a escolha de seleção, ou seja, a escolha do corte na variável $PIDK$ não introduz erros sistemáticos no resultado, que é a diferença entre a média de um número suficiente de medições e o resultado verdadeiro esperado. Esta análise mostrará que a assimetria apresentará pequenas variações no valor

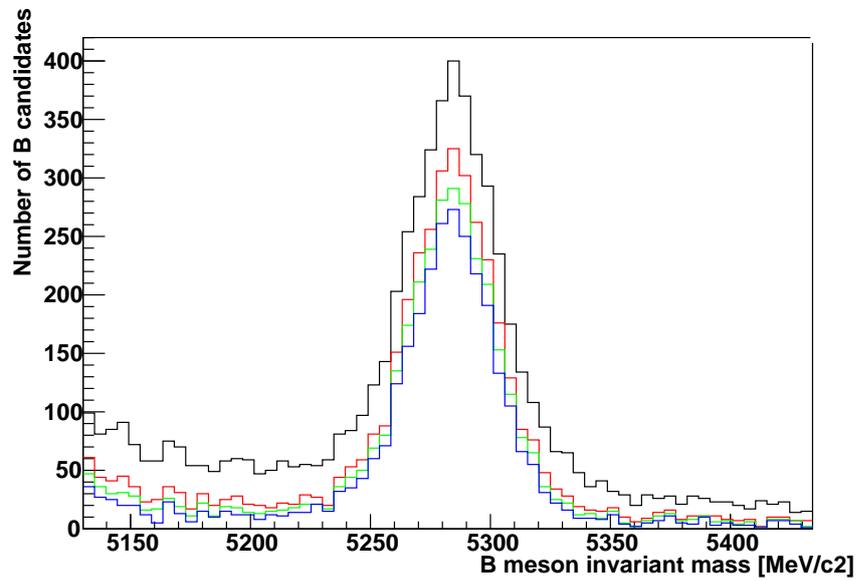


Figura 19: Efeito da seleção de identificação de partículas sobre a amostra. Em preto está a seleção padrão, e nas outras cores o corte de identificação de partículas está espremido em diferentes valores.

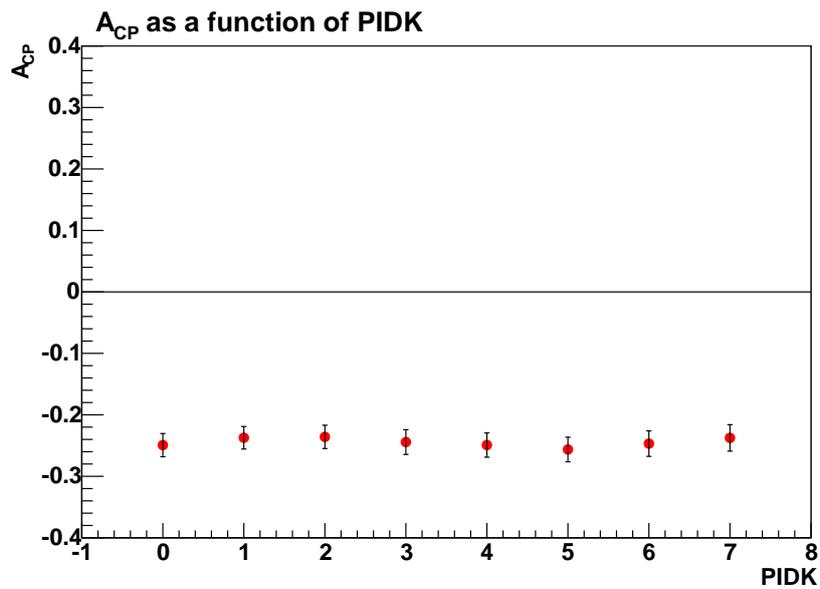


Figura 20: Variação do resultado da assimetria com o efeito da seleção de PIDK.

central, dentro da incerteza experimental, assim ilustrando os vários níveis de controle e verificação dos resultados no processo científico. Os alunos vão criar uma figura muito parecida com a Fig. 20 e debaterão este assunto em pares ou em grupos. Os estudantes também poderão observar que a incerteza aumenta quando a amostra é menor e discutir como se otimiza a escolha de seleção na pesquisa.

A nova ferramenta está sendo desenvolvida com base na sequência didática do manual do usuário construído neste trabalho que se encontra em Apêndice B. A seleção de dados para o novo exercício ocorre em conjunto entre pesquisadores da UFRJ e do CERN, assim como a implementação do GUI e criação de manuais de instruções em inglês. O produto educacional foi apresentando no Encontro de Pesquisa e Ensino de Física, realizado no Instituto Federal do Espírito Santo campus Cariacica em 2015, e no Encontro de Pesquisa em Ensino de Física da Sociedade Brasileira de Física (SBF), na cidade de Natal (RN) em 2016. O presente estudo foi publicado nos anais do evento (SOUZA; NASTEVA, 2016). Em breve o novo exercício estará na página oficial do evento International Masterclass do LHCb (International. . . , 2016) juntamente com o manual de instruções produzido neste trabalho.

5 Considerações finais

De acordo com os diversos autores, presentes na literatura, é muito importante que seja incluído, no ensino de Física, o estudo de FMC no Ensino Médio, com o compromisso de formar indivíduos capazes de fazer uma leitura crítica do mundo em que vivem através da compreensão da Ciência. Portanto, faz-se necessário um ensino de Física altamente contextualizado, isto é, que aproxime os estudantes das pesquisas atuais onde o entendimento dos fenômenos físicos da natureza terão maior relevância do que a resolução de problemas que se resumem em aplicações de matemática.

Neste contexto, esse trabalho exerceu o papel de divulgador de pesquisas científicas para jovens onde os mesmos puderam participar das tarefas propostas como verdadeiros pesquisadores em ciência avançada, sobretudo, de assuntos de FMC dos quais muitos deles ainda não haviam trabalhado em suas escolas. É certo que assuntos que envolvem Física de Partículas já fazem parte de alguns currículos dos sistemas educacionais brasileiros, a exemplo do Currículo Mínimo de Física do Ensino Médio da Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro, entretanto, como já abordado nos capítulos iniciais, a presença desses temas tanto no currículo quanto nos livros didáticos não é garantia de que eles serão adequadamente abordados no decorrer das aulas. Esta realidade foi constatada durante a participação dos estudantes nos eventos de International Masterclass que ocorreram nos dias 9 de março e 1 de dezembro de 2016, onde parte considerável desses alunos sequer havia ouvido falar desse assunto nas escolas. Neste sentido, o evento interveio atuando com palestras e exercícios no ponto onde o ensino nas escolas ficou deficiente.

Não é esperado que a aplicação dos produtos educacionais desenvolvidos ao longo desta pesquisa resolva todos os problemas presentes no ensino de FMC, entretanto configuram-se uma oportunidade de ensino diferente para muitos alunos, ou seja, uma proposta de construção de conhecimento que não se limita ao ambiente cansativo que, por muitas vezes, uma escola pode vir a tornar-se. Com a realização do evento os estudantes tiveram a chance de visitar e conhecer o Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, além disso, participaram de videoconferências diretamente com cientistas do CERN e com alunos de outros países. O evento de International Masterclass promoveu o contato direto entre os alunos de Ensino Médio com os grandes centros de pesquisa, explicando a Física contemporânea de maneira lúdica.

Muitos dos que participaram do evento nos dois dias em que ocorreu sentiram dificuldades com o idioma (a videoconferência foi realizada em inglês). Pode-se disponibilizar para os próximos eventos tradutores durante a realização das conferências para sanar essa dificuldade. A tradução das instruções do exercício para calcular o tempo de vida do méson

D^0 serviu para quebrar as barreiras do idioma estrangeiro, permitindo que muitos alunos brasileiros, daqui para frente, tenham melhor acesso a Ciência.

No geral, pode-se comprovar através do relato dos estudantes, que o evento foi muito produtivo onde muitos começaram a contemplar a ciência com novos olhos. De fato, o Brasil precisa aproximar os jovens à ciência de modo geral e, tudo começa tornando-se mais atrativo o ensino das disciplinas. O processo de ensino e aprendizagem deve ser de tal forma que os alunos compreendam a ciência como parte integrante de suas respectivas realidades e que o conhecimento científico também traz muitos benefícios à qualidade de vida da população.

O sucesso dos eventos realizados no Instituto de Física da UFRJ abre caminho para se pensar na realização das atividades em nível local, isto é, nas próprias escolas de Ensino Médio fora dos eventos do CERN. Caso isso ocorra, o alcance da proposta desse trabalho seria amplificado, pois permitiria a flexibilização de datas, preparação de seminários em língua portuguesa e até mesmo, gravações dos seminários em vídeo para que possam ser repassados futuramente. Certamente alguns pontos precisam ser cuidadosamente estudados com a finalidade de que o evento aconteça numa escola, como por exemplo, a organização de um espaço com computadores e dispositivos audiovisuais ou laboratórios de informática para que os estudantes possam operar o software do International Masterclass. Também é necessário encontrar uma data específica no calendário anual para que o evento não prejudique o andamento das demais disciplinas escolares, visto que possui uma duração maior que uma aula de cinquenta minutos, entretanto, nada disso inviabiliza aplicações do evento nas escolas desde que tudo seja organizado com antecedência.

A criação do novo exercício de international Masterclass que estuda o decaimento do méson B para analisar o comportamento da matéria e da antimatéria, foi baseada na programação do exercício anterior. Espera-se que aplicações futuras desse exercício motivem a curiosidade dos alunos, fornecendo uma nova visão do tema. O principal objetivo é fazer com que os jovens compreendam um pouco mais sobre o Universo em que vivem e o importante papel que a antimatéria exerce não só nesse contexto, mas também na aplicabilidade em outras áreas da sociedade contemporânea. Este novo exercício poderá ser objeto internacional de pesquisas em Ensino de Física.

Os dados da análise de violação de CP do decaimento dos mésons B em três $káons$ que estão servindo de base para a programação do novo exercício, como já mencionado, foram aplicados num projeto para alunos de graduação em Física na Universidade de Manchester. As atividades do International Masterclass, tanto o exercício do méson D^0 quanto o novo que está em fase de criação, poderão ser usadas para cursos universitários como a Licenciatura em Física. Os estudantes de graduação terão uma compreensão mais abrangente dos métodos estatísticos e esta atividade servirá como complemento as disciplinas teóricas de Física de Partículas. Além disso pode-se pensar numa preparação

para estes futuros professores para que eles introduzam esse tema nas escolas.

É sabido que a experimentação dos assuntos de Física é importante para preparação escolar, todavia muitas escolas, principalmente as do setor público, enfrentam dificuldades para criação de laboratórios de Física com equipamentos adequados para realização de aulas experimentais. De mais a mais, os experimentos priorizados são os da Física Clássica, havendo muita dificuldade na obtenção de equipamentos que façam experimentos de FMC. Neste sentido, a realização dos exercícios de International Masterclass poderá vir a transformar-se na complementação experimental das aulas de Física.

Acredita-se que o Brasil tem um grande potencial científico. Neste trabalho, por exemplo, grande parte da pesquisa foi desenvolvida junto a pesquisadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e da UFRJ. Com o engajamento dos jovens e a consolidação dos conhecimentos científicos, serão originados cidadãos brasileiros mais conscientes, aptos para participarem de discussões que tratem dos rumos em que a Ciência atual está tomando.

Referências

- AAIJ, R. et al. Measurements of CP violation in the three-body phase space of charmless B^\pm decays. *Phys. Rev.*, D90, n. 11, p. 112004, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 45, 47, 48 e 49.
- ABDALLA, M. C. B. Sobre o Discreto Charme das Partículas Elementares. *Física na Escola*, v. 6, n. 1, p. 38–44, 2005. Citado na página 19.
- ADINOLFI, M. et al. Performance of the LHCb RICH detector at the LHC. *Eur. Phys. J.*, C73, p. 2431, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 52.
- ALVES JR., A. A. et al. The LHCb Detector at the LHC. *JINST*, v. 3, p. S08005, 2008. Citado na página 51.
- ARANTES, A. R.; MIRANDA, M. S.; STUDART, N. Objetos de aprendizagem no ensino de física: usando simulações do phet. *Física na Escola*, v. 11, n. 1, p. 27–31, 2010. Citado na página 14.
- AULER, D. Alfabetização científico-tecnológica: um novo “paradigma”? *ENSAIO - Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 5, n. 1, p. 1–16, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- BALTHAZAR, W. F.; OLIVEIRA, A. L. de. *Partículas Elementares no Ensino Médio: uma abordagem a partir do LHC*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ensino de Ciências, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 21.
- BAROJAS, J. Cooperative networks in physics educations. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, v. 173, 1988. Citado na página 8.
- BEDIAGA, I. LHC: O colosso criador e esmagador de matéria. *Ciência Hoje*, v. 42, n. 247, p. 40–45, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.
- BEDIAGA, I. A antimatéria e o universo. *Ciência Hoje*, v. 45, n. 268, p. 46–51, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- BETTINI, A. *Introduction to Elementary Particle Physics*. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 22, 24 e 26.
- BRASIL. *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+): Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília: Ministério da Educação/MEC, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 5, 6, 7, 13 e 14.
- BRASIL. *Orientações Curriculares para o Ensino Médio: Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília: Ministério da Educação/MEC, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- CAMPOS, C. A. de; VEIGA, J. S. da. A apresentação de tópicos de mecânica quântica no ensino médio: Um considerável entrave. *VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*, p. 1–13, 2009. Citado na página 8.

- CANATO JÚNIOR, O. *Texto e Contexto para o Ensino de Física Moderna na Escola Média*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Citado na página 5.
- CHASSOT, A. Alfabetização científica: uma possibilidade para a inclusão social. *Revista Brasileira de Educação*, n. 22, p. 89–100, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 3, 15 e 44.
- ELLWANGER, U. *From the University to the Elementary Particles: A First Introduction to Cosmology and the Fundamental Interactions*. Berlin: Springer, 2014. Citado na página 25.
- FAUTH, A. C. et al. Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 4, p. 585–591, 2007. Citado na página 29.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna*. 8a. ed. Rio de Janeiro - RJ: L.T.C., 2009. Citado 5 vezes nas páginas 22, 24, 25, 26 e 28.
- International Masterclasses Hands on Particles Physics. 2016. Disponível em: <<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/en/LHCb-outreach/masterclasses/en/DOLifetime.html>>. Citado 7 vezes nas páginas 31, 32, 33, 34, 36, 38 e 54.
- MACHADO, A.; PLEITEZ, V.; TIJERO, M. Usando a antimatéria na medicina moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, p. 407–416, 2006. Citado na página 21.
- MARTIN, B. R.; SHAW, G. *Particle physics*. [s.n.], 2008. Disponível em: <<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470032944.html>>. Citado na página 50.
- MENDES, J.; COSTA, I. F.; SOUSA, C. de. O uso do software modellus na integração entre conhecimentos teóricos e atividades experimentais de tópicos de mecânica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 1, p. 1–9, Jun. 2012. Citado na página 13.
- MOREIRA, M. A. Partículas e Interações. *Física na Escola*, v. 5, n. 2, p. 10–14, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 25.
- MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, p. 1–11, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 27.
- MOURA, M. A. *Educação Científica e cidadania: abordagens teóricas e metodológicas para a formação de pesquisadores juvenis*. 1st. ed. Belo Horizonte: Organizadora, 2012. Citado na página 2.
- OSTERMANN, F. Um texto para professores do ensino médio sobre partículas elementares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 21, n. 3, p. 415–435, 1999. Citado na página 18.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. Física moderna e contemporânea no ensino médio: Elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, v. 16, n. 3, p. 267–286, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. de H. Um pôster para ensinar física de partículas na escola. *Física na Escola*, v. 2, n. 1, p. 13–18, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 3, 16 e 17.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000. Citado na página 8.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, v. 18, n. 2, p. 135–151, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- PARKES, C.; GERSABECK, M.; GUTIERREZ, J. Undergraduate laboratory experiment: measuring matter antimatter asymmetries at the large hadron collider. LHCb-PUB-2015-005. 2015. Citado na página 45.
- PATRIGNANI, C. et al. Review of Particle Physics. *Chin. Phys.*, C40, n. 10, p. 100001, 2016. Citado na página 38.
- PAULA, L. de; GANDELMAN, M. A assimetria do universo: por que existe mais matéria do que antimatéria? *Ciência Hoje*, v. 25, n. 148, p. 30–37, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- PEREIRA, G. R.; BOUZADA FILHO, M. V.; NEVES, M. A. *Um Estudo Sobre a Inserção do Tema Energia Nuclear no Ensino Médio de Municípios da Baixada Fluminense - RJ*. Florianópolis: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009. Citado na página 6.
- PIMENTA, J. J. M. et al. O bóson de Higgs. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 2, p. 1–14, 2013. Citado na página 26.
- REIS, A. C. dos. Matéria e antimatéria: uma relação não muito simétrica. *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*, 2014. Disponível em: <<http://portal.cbpf.br/noticia/materia-e-antimateria-uma-relacao-nao-muito-simetrica/798>>. Acesso em: 22 out 2016. Citado na página 45.
- RIO DE JANEIRO. *Currículo Mínimo 2012: Física*. Governo do Estado do Rio de Janeiro/Secretaria de Estado de Educação, 2012. Disponível em: <<http://conexaoescola.rj.gov.br/professor/apoio-pedagogico/fisica>>. Acesso em: 15 mar 2016. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- ROSA, C. W. da; ROSA, Á. B. da. Ensino da física: tendência e desafios na prática docente. *Revista Iberoamericana de Educación*, v. 47, n. 7, p. 1–12, maio 2007. Citado na página 13.
- SAKHAROV, A. D. Violation of CP Invariance, c Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe. *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, v. 5, p. 32–35, 1967. [Usp. Fiz. Nauk161,61(1991)]. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SOUZA, A.; NASTEVA, I. Um novo exercício de International Masterclass para ensinar Física de Partículas. *XVI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física da Sociedade Brasileira de Física (SBF) em Natal (RN)*, p. 1–8, 2016. Disponível em:

<<http://www1.sbfisica.org.br/eventos/enf/2016/sys/resumos/T1389-3.pdf>>. Acesso em: 29 jan 2017. Citado na página 54.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Cad. Cat. Ens. Fís.*, v. 9, n. 3, p. 209–214, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 9.

WATANABE, G. *Construindo subsídios para a promoção da educação científica em visitas a laboratórios de pesquisa*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo. Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências e Faculdade de Educação, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.

WATANABE, G.; GURGEL, I.; MUNHOZ, M. G. O que se pode aprender com o evento masterclasses - CERN na perspectiva do ensino de física de partículas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1–10, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 20 e 43.

WATANABE, G. et al. O evento CERN Masterclasses: Hands on Particles Physics: contribuições sobre seu papel na comunicação científica a partir de percepções de seus participantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 3, p. 1–12, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

XIMENES, S. J. C. *Matéria Escura no Ensino Médio*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Citado na página 9.

Apêndices

APÊNDICE A – Masterclass do LHCb: Medida do tempo de vida do D^0 no LHC

A.1 Introdução

O Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadron Collider*, ou LHC) não é apenas uma ferramenta de busca de novas partículas exóticas, mas também é uma fábrica de partículas, as quais sabemos existir, entretanto sem conhecer suficientemente suas propriedades. Um exemplo são as partículas charmosas, isto é, partículas que contêm um quark *charm* (também conhecido como quark *c*), que foram encontradas pela primeira vez há mais de 30 anos. Aproximadamente uma em cada dez interações do LHC produz uma partícula charmosa, e o experimento LHCb no LHC já registrou mais de um bilhão de eventos que contêm partículas desse tipo.

Além de um grande número de partículas charmosas, as colisões do LHC produzem um número ainda maior de outras partículas que não contêm o quark *charm*, mas que podem ser confundidas com elas. No jargão da física de altas energias, costumamos chamar as partículas que são o objeto central de um estudo como “sinal”, e aquelas que são detectadas e podem ser confundidas como sinal (“ruído”), representando uma contaminação da amostra de dados.

A fim de extrair informações a partir das tais grandes amostras de sinal, é necessário alcançar um excelente controle sobre este ruído. Hoje você realizará exercícios usando colisões reais, registradas pelo experimento LHCb durante a tomada de dados de 2011 que contêm tanto partículas de sinal quanto de ruído. Este conjunto de exercícios é projetado para ensiná-lo(a) a:

1. Usar uma visualização de eventos das colisões próton-próton dentro do detector LHCb para procurar partículas charmosas e separar estes sinais do ruído.
2. Fazer um ajuste aos dados através das funções que descrevem o sinal e ruído, para medir o número de eventos de sinal nos dados e seu grau de pureza (definido como a fração de eventos de sinal relativa ao total).
3. Obter a distribuição de eventos de sinal de uma dada variável, tomando a distribuição de eventos combinados na amostra de dados (que contém tanto o sinal quanto ruído) e subtraindo a distribuição de ruído. O resultado do ajuste na etapa anterior é utilizado para encontrar uma amostra de eventos de ruído pura, para subtração,

e para calcular a partir do número de eventos e pureza do sinal, a quantidade apropriada de ruído que deve ser subtraído.

4. Medir o tempo de vida das partículas charmosas, a partir da distribuição de tempo de decaimento para eventos de sinal, obtida na etapa anterior. O sinal que você observará decai exponencialmente com o tempo, de forma análoga a um isótopo radioativo. O tempo de vida é definido como o tempo necessário para que uma fração $(e - 1)/e$ das partículas existentes inicialmente decaia, onde $e \approx 2.718$ é a base do logaritmo natural. Seu significado é análogo ao conceito de meia-vida no decaimento radioativo.

A amostra de dados utilizada para este exercício consiste de candidatos a um tipo de partícula charmosa conhecida como a partícula D^0 encontrados numa amostra de interações do LHC recolhidas aleatoriamente na tomada de dados em 2011. A partícula D^0 é composta por um quark *charm* e um antiquark *up*. Os D^0 são identificados a partir do decaimento $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$.

As partículas são medidas decaindo da forma $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, onde o estado final das partículas são um káon (K^-) constituído por um quark estranho e um antiquark *up*, e um pión (π^+) que consiste num antiquark *down* e um quark *up*. Essas partículas possuem um tempo de vida longo o suficiente e, para a proposta deste exercício, são estáveis dentro do detector LHCb. As partículas foram pré-selecionadas com base em critérios frouxos de modo que você inicie o exercício com um sinal visível, porém com uma quantidade de ruído ainda significativa.

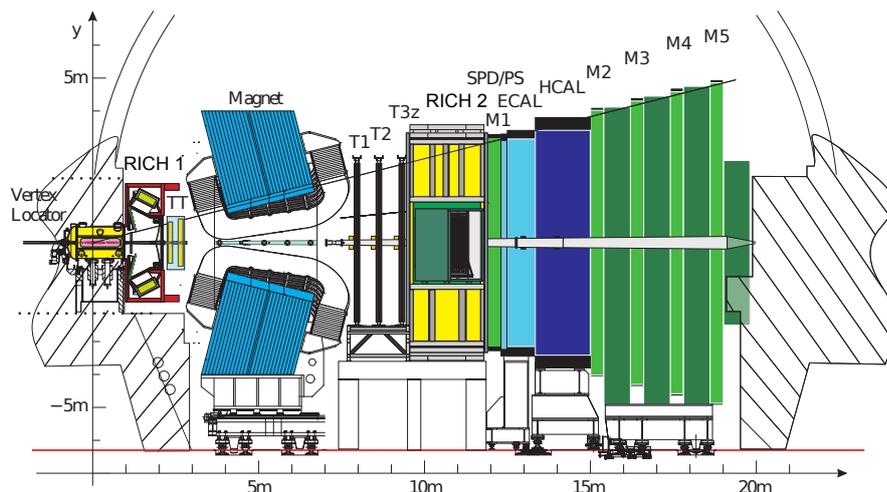


Figura A1: O detector LHCb. O eixo z é a direção da linha do feixe do LHC.

Antes de discutir ainda mais o exercício, vale a pena levar um tempo se familiarizando com o detector LHCb, mostrado na Fig. A1. Ele é um espectrômetro frontal que cobre a faixa angular entre 0.7° e 15° em relação à linha do feixe do LHC. A linha

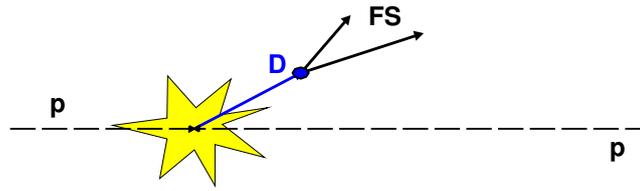


Figura A2: Vértice secundário (“D”) da partícula D^0 deslocado do ponto de interação pp (bolha amarela).

do feixe está localizada em $y = 0$ na figura e passa ao longo do eixo z . No texto que se segue, “transverso” significa transverso à linha do feixe do LHC, “à esquerda na figura” corresponde a posições com menores valores de z e “à direita na figura” a posições com maiores valores de z . O detector inclui um sistema de alta precisão para rastrear partículas carregadas, sendo constituído por um detector de tiras de silício que circunda a região da interação próton-próton; um detector de tiras de silício que cobre uma grande área, localizado à esquerda de um dipolo magnético com um poder de deflexão de cerca de 4 Tm; e três estações de detectores de tiras de silício e tubos de arrasto na região à direita. Partículas carregadas deixam trajetórias em linha reta no detector que circunda a região de interação, onde não há ação do campo magnético, e são subsequentemente defletidas pelo ímã antes de deixar trajetórias na estação de trajetórias à direita. Sua quantidade de movimento e sua carga podem ser deduzidas a partir da curvatura de suas trajetórias, induzida por esse campo magnético. O sistema combinado de trajetórias tem uma resolução de quantidade de movimento (momento linear) $\Delta p/p$ que varia de 0.4% a 5 GeV/ c a 0.6% a 100 GeV/ c , e uma resolução de parâmetro de impacto¹ de 20 μm para trajetórias com elevada quantidade de movimento transversa, e uma resolução para o tempo de vida de 50 fs.

Uma característica que diferencia a partícula D^0 é seu longo tempo de vida (o objeto deste exercício) que pode ser medido. De um ponto de vista prático, significa que elas formam um “vértice secundário” (posição do decaimento) que é deslocado da interação próton-próton chamada “vértice primário”. Isso está ilustrado na Fig. A2. Este fato, juntamente com sua taxa de produção abundante, permite que os sinais de D^0 sejam bem separados do ruído do resto do evento, a maioria do qual consiste de combinações aleatórias de partículas produzidas durante a colisão próton-próton.

Os dados são fornecidos em conjunto com uma interface gráfica de usuário (GUI) que você pode usar para acessá-los. Agora abra o programa. Você pode acessar as instruções on-line a partir da GUI usando o botão **Ajuda**. O exercício consiste em duas partes: a primeira é uma visualização de eventos que você pode usar para procurar os vértices

¹ Parâmetro de impacto é a distância transversa de menor aproximação entre a trajetória de uma partícula e um vértice, no caso mais comum o vértice primário da interação próton-próton.

deslocados de partículas D^0 no interior do detector LHCb, e a segunda parte é um ajuste que você pode utilizar para separar o sinal do ruído e medir o tempo de vida das partículas D^0 .

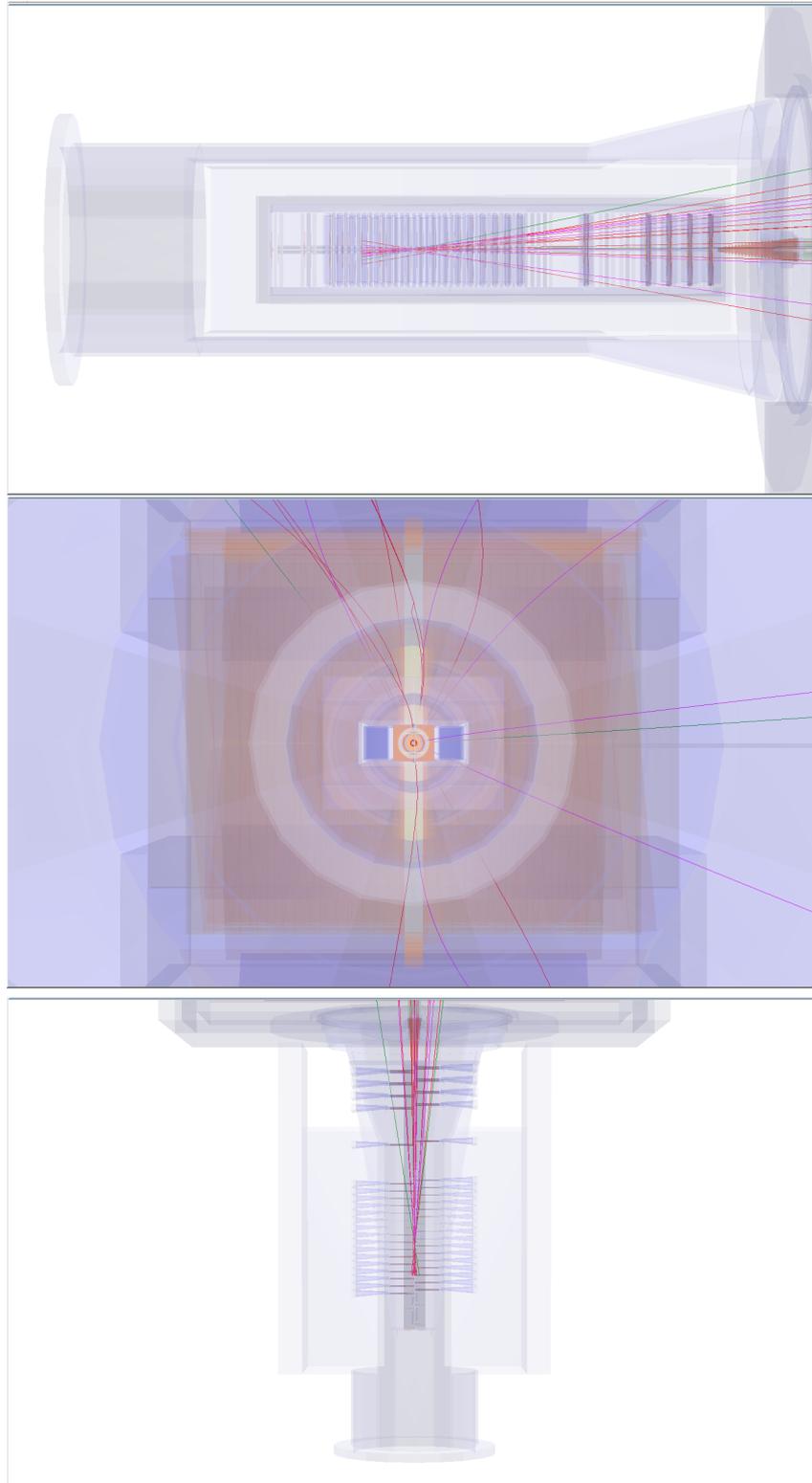


Figura A3: Três visualizações de um evento, de cima para baixo: $y-z$, $y-x$, e $x-z$.

A.2 Exercício de visualização de eventos

O objetivo do exercício de visualização é encontrar os vértices deslocados das partículas D^0 dentro do detector de vértices do experimento LHCb. Quando você iniciar o exercício e carregar um evento, você vai observar uma imagem do detector LHCb juntamente com trajetórias de partículas (“traços”) no seu interior. Essas trajetórias são diferenciadas com cores e uma legenda na parte inferior da GUI informa a cor correspondente a cada tipo de partícula.

A fim de tornar mais fácil a identificação de vértices, você pode ver um mesmo evento em três projeções bidimensionais diferentes: $\mathbf{y-z}$, $\mathbf{y-x}$, e $\mathbf{x-z}$, como mostrado no evento da Fig. A3. Diferentes eventos podem ficar mais claros em projeções diferentes, então sinta-se à vontade para experimentar com todas as três opções! Vértices deslocados aparecem como um par de trajetórias que se cruzam, longe das outras trajetórias do evento. Quando você clicar sobre uma partícula, visualizará suas informações, tais como massa e quantidade de movimento, na caixa **Informação das Partículas**.

Uma partícula D^0 decai em um káon e um pión. Assim você terá que encontrar um vértice deslocado onde uma trajetória de káon cruza uma trajetória de pión. Uma vez encontrado uma trajetória que pareça parte do vértice deslocado, você pode salvá-la clicando no botão **Salvar Partícula**. Depois de salvar duas partículas (um káon e um pión), você pode calcular sua massa clicando no botão **Calcular**. Se você achar que esta combinação tem uma massa compatível com a da partícula D^0 , clique em **Adicionar** para gravá-la: gravando uma combinação para cada evento, você construirá um histograma das massas invariantes dos vértices deslocados nos diferentes eventos.

Lembre-se de que estará observando dados reais que contêm tanto o sinal quanto ruído e o detector tem uma resolução finita. Logo nem todos os vértices deslocados terão exatamente a massa invariante do D^0 (mesmo os que são sinais). Eles devem, no entanto, estar dentro da faixa entre 1816-1914 MeV (a largura desta faixa é de cerca de 3% em torno da verdadeira massa do D^0). Se você tentar salvar uma combinação que é muito distante da massa real do D^0 , o exercício irá avisá-lo de que você não encontrou o par do vértice deslocado correto e não vai permitir que você o grave.

Se você não conseguir encontrar o vértice deslocado de um evento depois de alguns minutos, passe para o próximo, e então se sobrar tempo para terminar o exercício, retorne para o que estava te causando dificuldade. Uma vez observados todos os eventos, você pode examinar o seu histograma de massa clicando no botão **Desenhar**. Discuta a forma do histograma com um moderador.

No final, lembre-se de clicar em **Salvar Histograma**, a fim de salvar o seu histograma! Então, ele será combinado pelos moderadores com os histogramas dos outros alunos e vocês devem discutir seus resultados em grupo.

A.3 Exercício de ajuste

Antes de descrever o exercício de ajuste, será útil listar as grandezas, ou variáveis, envolvidas neste exercício:

- **D0 mass** : é a massa invariante da partícula D^0 . O sinal pode ser visto como uma estrutura de pico acima do ruído plano. A faixa de massa relevante para a análise é 1816-1914 MeV. A forma do sinal é descrita por uma distribuição gaussiana (também conhecida como distribuição “normal”). O centro da distribuição (“média”) é a massa da partícula D^0 , enquanto a largura representa a resolução experimental do detector.
- **D0 TAU** : é a distribuição do tempo de decaimento dos candidatos D^0 . O sinal é descrito por uma simples exponencial cuja inclinação é o tempo de vida do D^0 (que é o objetivo do último exercício), enquanto o ruído concentra-se em curtos tempos de decaimento.
- **D0 IP** : “parâmetro de impacto”, é a distância de menor aproximação em milímetros (“parâmetro de impacto”) do D^0 a respeito do evento de interação próton-próton (vértice primário). Quanto menor o parâmetro de impacto maior a probabilidade de que o D^0 tenha vindo realmente da interação primária. A fim de simplificar a figura, na verdade nós plotamos e cortamos o logaritmo (base 10) do parâmetro de impacto no exercício.
- **D0 PT** : é a quantidade de movimento do D^0 transversa à linha do feixe do LHC.

Agora vamos prosseguir com o exercício em si.

A.3.1 Exercício 1: Ajustar a distribuição de massa e obter as distribuições de variáveis de sinal

O objetivo deste exercício é ajustar a distribuição da variável **D0 mass** e extrair o número de eventos de sinal e o grau de pureza da amostra.

1. Clique no botão **Plotar massa do D^0** para traçar a distribuição total da massa. Você verá um pico (sinal) no topo de uma distribuição plana (ruído). O pico pode ser descrito por uma função gaussiana, cuja média corresponde à massa do D^0 e cuja largura (σ) é determinada pela resolução experimental do detector LHCb.
2. Clique em **Ajustar distribuição de massa** para ajustar a distribuição usando uma função gaussiana para o sinal e uma função linear para o ruído.
3. Olhe para a distribuição de massa ajustada. Você pode separá-la em três regiões: a região do sinal e duas faixas laterais que contêm somente ruído: uma à direita do

sinal (a faixa lateral superior) e outra à esquerda do sinal (a faixa lateral inferior). A distribuição gaussiana contém 99.7% de seus eventos dentro de três desvios padrão da média, logo esta região de “três sigma” em torno da média é geralmente a definição da região de sinal.

4. Use o cursor chamado **Sig range** para definir o início e o fim da região do sinal. Todos os eventos que não caem na faixa de sinal, serão considerados na região de ruído.
5. Agora você pode usar as definições das regiões de sinal e de ruído na variável massa para determinar as distribuições de sinal e de ruído em outras variáveis. Clique no botão **Plotar distribuição**. Você verá as distribuições de sinal (azul) e de ruído (vermelho) para as outras três variáveis plotadas ao lado da distribuição de massa. Você deve discutir o exercício com um(a) instrutor(a) neste momento.

A.3.2 Exercício 2: Medir o tempo de vida do D^0

O objetivo deste exercício é usar a amostra de sinal que você obteve na etapa anterior para medir o tempo de vida da partícula D^0 . É o equivalente da meia-vida de uma partícula radioativa: o D^0 decai de acordo com uma distribuição exponencial, e se essa exponencial for ajustada à distribuição do tempo de decaimento do D^0 , a inclinação da exponencial será o inverso do tempo de vida do D^0 .

1. Faça o ajuste do tempo de vida do D^0 .
2. Compare a inclinação desta exponencial com o inverso do tempo de vida do D^0 dado pelo *Particle Data Group*. Converse com um(a) instrutor(a) sobre quão bom é o acordo entre esses dois valores.
3. Além das incertezas estatísticas, as medições podem sofrer de incertezas sistemáticas causadas por aparelhos descalibrados, ou por um modelo incorreto do ruído. Uma técnica básica para estimá-los é repetir a medição alterando os critérios utilizados para selecionar eventos de sinal. Se o resultado mudar significativamente ao se modificar os critérios, saberemos que há alguma coisa errada!
4. Repita seu ajuste para o tempo de vida do D^0 enquanto varia o máximo permitido do logaritmo do parâmetro de impacto do D^0 . Os valores permitidos variam de -4.0 a 1.5 no ajuste inicial. Mova o valor superior a partir de 1.5 até -1.9 em passos de 0.20 , e refaça o ajuste do tempo de vida do D^0 em cada ponto, salvando os resultados à medida que avança.

5. Trace um histograma que mostra o valor do tempo de vida do D^0 como função do corte superior do logaritmo do parâmetro de impacto. Discuta a forma, e o que ela representa sobre o tempo de vida do D^0 , com um(a) instrutor(a).
6. Quais outras fontes de incertezas sistemáticas poderiam ser consideradas ao fazermos a medição do tempo de vida?

APÊNDICE B – Masterclass do LHCb: Medida da assimetria entre as partículas B^- e B^+ no LHC

B.1 Introdução

Você sabe o que é antimatéria? A antimatéria é definida basicamente como uma espécie de matéria constituída por átomos formados por antipartículas. Uma antipartícula possui a mesma massa que a sua partícula correspondente, entretanto valores como a carga elétrica são opostos. Um átomo de anti-hidrogênio, por exemplo, é composto por um antipróton no núcleo e um pósitron (anti-elétron) nas regiões externas ao núcleo. O antipróton e o pósitron possuem respectivamente, as mesmas massas do próton e do elétron, todavia as suas cargas são inversas. Sabe-se que quando uma partícula colide com sua antipartícula equivalente, ocorre uma aniquilação mútua que resultará na liberação de energia.

Falar sobre antimatéria é discutir um assunto misterioso e ao mesmo tempo estimulante até para os cientistas mais renomados! Isto porque verifica-se no Universo atualmente a predominância da matéria em relação a antimatéria, entretanto pesquisas apontam que nem sempre foi assim. No início do Universo as quantidades de matéria e antimatéria, criadas no Big Bang, eram iguais. De certo modo esse desequilíbrio observado atualmente é um aspecto positivo, pois favorece a existência da vida conforme é conhecida pela humanidade, isto é, não havendo incontáveis aniquilações o tempo todo graças a essa assimetria.

De alguma forma, a natureza ligeiramente privilegiou a criação de matéria em detrimento da antimatéria, possibilitando que uma pequena parte da matéria, criada no Big Bang, escapasse da aniquilação total e formado o Universo que conhecemos hoje em dia. Segundo algumas estimativas, foram criadas um bilhão e uma partícula de matéria para cada um bilhão de partículas de antimatéria, logo, tudo que existe atualmente, de galáxias até bactérias, foi formado a partir de uma única partícula de matéria a cada um bilhão que sobreviveu. Seguindo esse pensamento podemos concluir que o Universo já teve uma massa muito maior. O físico Andrei Sakharov (1921-1989) propôs em 1967 algumas condições para que ocorresse tal desequilíbrio, que ficaram conhecidas como as condições de Sakharov. Segundo ele, partículas e antipartículas deveriam se desintegrar, contudo essa desintegração deveria ocorrer com maior frequência para as antipartículas.

Os físicos ainda não possuem as respostas que explicam essa mudança sofrida pelo Universo em comparação ao seu início e nem sabem o porquê desse desequilíbrio entre a matéria e a antimatéria, todavia, pesquisas sobre o decaimento de algumas partículas como os mésons do tipo B , podem apontar um caminho promissor na tentativa de responder a tais questionamentos. Os mésons B são partículas massivas (relativamente pesadas quando comparada a algumas outras partículas) e são constituídos por partículas ainda menores. O méson B^- é constituído por um *quark bottom* e um *antiquark up*, já a sua antipartícula o méson B^+ , é formado por um *antiquark bottom* e um *quark up*. Os *quarks* são partículas fundamentais da natureza e são classificados em seis tipos diferentes: *up*, *down*, *bottom*, *top*, *charm* e *strange*. Os *antiquarks* são as antipartículas dos *quarks*. Os mésons B possuem um tempo de vida $\tau = 1,6 \times 10^{-12}$ s longo o suficiente para serem detectados, isto é, viajam alguns milímetros antes de decaírem em outras partículas no detector. Estamos interessados no decaimento dos mésons B^\pm em três partículas menores chamadas *káons* (K).

As partículas são medidas decaindo em três *káons* da forma $B^+ \rightarrow K^+ + K^+ + K^-$ e $B^- \rightarrow K^- + K^- + K^+$. Existe uma diferença de comportamento (assimetria) entre a forma como a matéria e a antimatéria decaem. Para explicar esse fato podemos utilizar um teorema conhecido como CPT: C é o que os físicos chamam de conjugação de carga, isto é, uma operação que transforma uma partícula em sua antipartícula; P, é a paridade que reflete as coordenadas espaciais; e T, é reversibilidade temporal que não permite determinar a ordem dos acontecimentos (é como uma filmagem de uma bola de sinuca chocando-se contra a parede da lateral da mesa de sinuca, ao passar o filme ao contrário, você não seria capaz de dizer o sentido real da filmagem). O teorema CPT diz que se aplicarmos as três operações C, P e T, as grandezas se conservam, logo caso haja uma violação de CP deverá acontecer uma violação de T que a compense. O processo de violação de CP é um fenômeno físico onde torna-se clara a diferença no comportamento de uma partícula em relação a sua antipartícula, sendo um dos requisitos das condições de Sakharov. Os mésons B^+ e B^- apresentam uma diferença entre suas taxas de decaimento que evidenciam esta violação de CP. Você perceberá com clareza este fenômeno na realização dos exercícios de decaimento dos mésons B^\pm onde será constatada essa assimetria.

B.1.1 O detector LHCb

Os *káons* originados no decaimento dos mésons B , que serão medidos no decorrer deste exercício, foram identificados no experimento LHCb do Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadron Collider*, ou LHC). O LHC é o maior acelerador de partículas do mundo e fica situado no CERN (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear). A Fig. B1 mostra o detector LHCb onde a linha do feixe está localizada em $y = 0$ e decorre ao longo do eixo z . O detector LHCb possui um sistema altamente preciso para rastrear partículas com

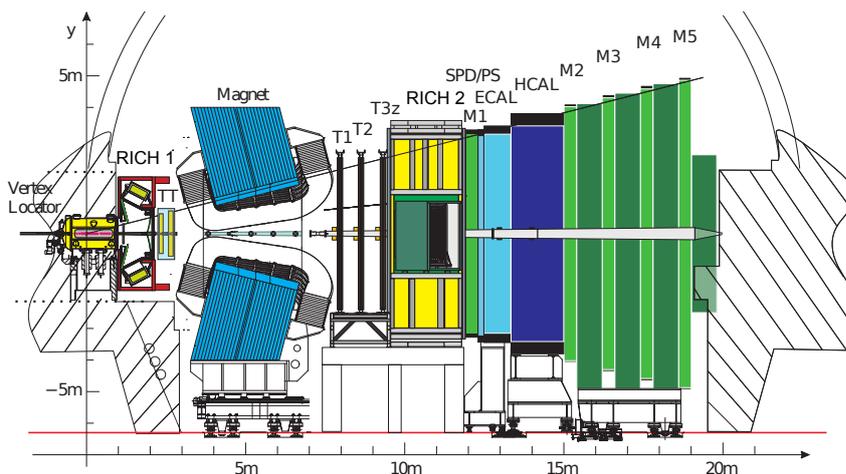


Figura B1: O detector LHCb.

carga elétrica constituído por: um detector de tiras de silício que circunda a região onde ocorre a colisão dos feixes de prótons, outro detector de tiras de silício, que envolve uma grande área, estando este localizado à esquerda de um dipolo magnético com capacidade de deflexão de 4 Tm, e na região à direita, existem três estações de detectores de tiras de silício e tubos de arrasto.

No detector que circunda a região de interação dos feixes de prótons, as partículas carregadas deixam trajetórias em linha reta, pois não há ação do campo magnético nessa região. Posteriormente essas partículas são defletidas pelo ímã antes de seguirem pela estação de trajetórias à direita. Podemos calcular dados importantes dessas partículas como a quantidade de movimento (momento linear) e a carga elétrica, a partir da curvatura de suas trajetórias devido à ação do campo magnético.

A partícula B pode ser identificada a partir de seu ponto de decaimento que caracteriza a posição em relação ao ponto onde ocorre a colisão dos feixes de prótons no detector LHCb, conforme ilustrado pela Fig. B2, permitindo fazer a distinção entre o que é sinal e o que é ruído a partir dos traços de decaimento formados. A análise desses traços será a chave para verificar a diferença de decaimentos entre matéria e antimatéria. Venha ajudar os cientistas a desvendar esse mistério por meio desta prática!

B.2 Exercício de visualização de eventos

Você a partir de agora vai utilizar um programa de GUI (*Graphical User Interface*): um software que permite a visualização e interação com gráficos criados de acordo com um conjunto de parâmetros físicos baseados em dados reais de partículas extraídos de pesquisas feitas no LHC. A GUI também permite que as instruções sejam acessadas de forma on-line durante a realização da tarefa clicando no botão **Ajuda**. Ao abrir o programa você encontrará uma série de eventos nos quais precisará selecionar as possíveis trajetórias

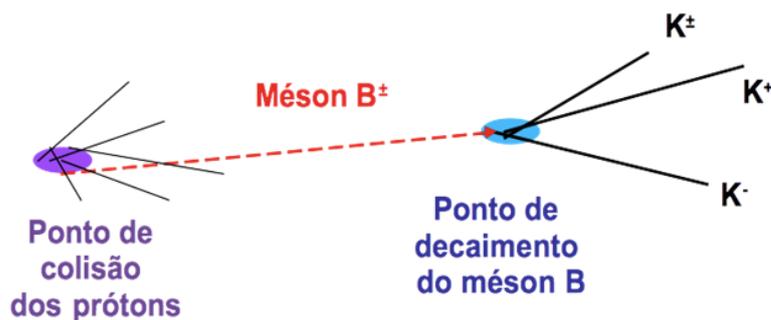


Figura B2: Decaimento do méson B em três *káons*.

de partículas que representam os decaimentos dos mésons B em *káons*. Você deve procurar, com muita cautela, por trajetórias cruzadas de três *káons*, isto é, três traços que surgem de um mesmo ponto em meio a uma grande quantidade de traços de outras partículas (Cuidado, pois isso pode te confundir). As informações sobre as partículas selecionadas, como massa e momento, também estão dispostas na GUI, para visualiza-las é só clicar na partícula e observar a caixa **Informação da partícula** (você precisará checar esses dados para saber se está selecionando corretamente os traços).

Após concluir a seleção de uma partícula do sinal você deverá clicar no botão **Salvar partícula** para salvar cada uma das três partículas que são produto do decaimento do méson B e, logo em seguida, clicando no botão **Calcular massa** você poderá verificar se a massa invariante das três é compatível com a massa do méson B . A soma das cargas dos káons deve ser, respectivamente, -1 para o B^- ou $+1$ para o B^+ . Você pode verificar isso acionando o botão **Calcular carga**.

Por fim, caso seja compatível a sua seleção, é necessário gravar a combinação clicando no botão **Adicionar** para poder construir um histograma das massas invariantes dos eventos. Vocês identificarão candidatos a decaimentos de mésons B em três káons, investigando um número de visualizações de dados semelhantes às da Fig. B2. Nas visualizações, vocês reconhecerão os traços de diferentes partículas e o vértice deslocado do decaimento do méson B . Caso você tente salvar uma combinação que não corresponde ao B^\pm , o próprio exercício irá informar que você não encontrou as partículas corretas e não será possível gravá-las.

Após a identificação de um número de visualizações, você deverá abrir um histograma da massa invariante dos candidatos clicando no botão **Desenhar**. Visualize a distribuição do histograma de massa invariante e discuta o seu formato com um monitor. A forma da distribuição da massa é a esperada? É muito importante que você salve esse histograma clicando em **Salvar histograma**, para que ele seja combinado pelos moderadores com os histogramas dos outros participantes.

B.3 Exercício de ajuste

Em seguida, você abrirá um histograma maior juntando a sua amostra com uma outra amostra pré-selecionada e fará um ajuste de modelo a esse histograma. O modelo inclui descrições funcionais do canal de decaimento de interesse e do ruído presente na amostra de dados. O ajuste executará o software de análise estatística baseado na ferramenta ROOT incorporada no programa.

Você deve clicar no botão **Plotar massa** para traçar a distribuição da massa. A amostra de *káons* corretamente selecionada constitui o que chamamos de “sinal” e a contaminação dessa amostra de dados por outras partículas designam o que chamamos de “ruído”. Observe que um pico (sinal) se formará no topo de uma distribuição que é bem próxima de uma reta (ruído). Uma função Gaussiana pode ser usada para descrever o sinal, cuja média condiz com a massa do méson B^\pm .

Clique em **Ajustar distribuição de massa** para ajustar a distribuição onde a função Gaussiana em azul descreve o sinal e uma função exponencial em vermelho, o ruído (esta função será bem próxima do formato de uma reta). A figura do ajuste mostrará o valor da massa (m) e da largura (σ). Compare o valor da massa do méson B^\pm que você encontrou com o valor mundial registrado pelo *Particle Data Group*.

Ao realizar este passo você identificará que a distribuição de massa pode ser separada em três regiões. A região central corresponde ao sinal com um pouco de ruído e as duas faixas laterais contêm apenas o ruído. A espessura da faixa do sinal é definida como sendo o valor central da Gaussiana $\pm 3\sigma$, onde σ é a largura em torno da média da Gaussiana, determinado pela resolução experimental do detector. A distribuição Gaussiana contém 99,7 % de seus eventos dentro de três desvios padrão da média (3σ) o que define a região do sinal.

O cursor chamado **Sig range** deverá ser usado para determinar o início e o fim da região de sinal. Os eventos que não caírem na faixa de sinal, serão automaticamente considerados na região de ruído.

Será necessário usar as regiões de sinal e ruído na variável massa para determinar as distribuições em outras variáveis. Através das funções que descrevem o sinal e o ruído será feito um ajuste de dados, para medir o número de eventos de sinal e seu grau de pureza, que é dado pela razão entre o número de eventos de sinal e o total de eventos. O resultado deste ajuste será usado para encontrar uma amostra de eventos de ruído pura, para subtração, e para calcular a partir do número de eventos e pureza do sinal, a quantidade de ruído que deverá ser subtraído. Para tal, clique no botão **Plotar distribuições**, e você observará as distribuições de sinal (azul) e de ruído (vermelho) para outras três variáveis que serão plotadas ao lado da distribuição de massa:

1. B^\pm **TAU** (τ): é a distribuição do tempo de decaimento dos candidatos B^\pm .
2. B^\pm **IP**: “parâmetro de impacto”, é a distância de menor aproximação do B^\pm em relação ao ponto de colisão dos prótons (interação primária). A probabilidade de que o méson B^\pm tenha vindo da interação primária crescerá conforme menor for o parâmetro de impacto (medido em milímetros).
3. B^\pm **PT**: é a quantidade de movimento do B^\pm transverso à linha do feixe do LHC.

Analise as formas dessas distribuições. Existem diferenças entre as formas das distribuições no sinal e no ruído? Por quê?

B.4 Medida da assimetria de CP do méson B

Nesta etapa você vai calcular a assimetria entre o número de mésons B^- e B^+ . Clique no botão **Separar por carga** para visualizar as distribuições de massa separadas em amostras de B^- e B^+ . Há grandes diferenças entre as amostras de mésons positivos e negativos?

Para calcular a assimetria é necessário acionar o botão **Medir a assimetria do sinal**. A assimetria é calculada como sendo a diferença do número de eventos de B^- e B^+ dividida pela soma do número de eventos. É importante destacar que o número de eventos são o sinal já com o ruído subtraído. A assimetria que mediram é significativa? Discuta essa questão em grupo.

Além de calcular a assimetria do sinal, você também deve determinar a assimetria do ruído ao clicar no botão **Medir a assimetria do ruído**. Lembre-se, o ruído é constituído por traços aleatórios onde não se espera violação de CP. Esse valor encontrado para a assimetria do ruído é esperado? Discuta este resultado com os monitores e com os outros alunos.

Podem ocorrer erros sistemáticos em medições de laboratório que são ocasionados, por exemplo, pela má calibração de um instrumento de medida. Isto pode acrescentar sistematicamente, sempre o mesmo fator na quantidade medida da grandeza a ser determinada. Para estimar as incertezas sistemáticas da nossa seleção, vamos repetir a medida alterando os critérios de seleção de eventos de sinal. Caso o resultado encontrado ao modificar-se os critérios sofra uma alteração considerável, você saberá que algo está incorreto!

Repita a medição da assimetria enquanto varia o mínimo permitido da probabilidade das partículas serem káons, a variável PIDK. Esta variável é responsável por fazer a identificação dos káons; ela é equivalente a uma diferença entre as probabilidades da partícula ser um káon e ser um pión. Quanto maior for a PIDK, mais provável que a partícula requerida seja um káon e maior será o grau de pureza da amostra. Os valores

permitidos variam de 1 a 7 e realize essa variação em passos de 1. Para cada valor, repita a visualização e os ajustes de massa dos passos iniciais, até calcular a nova assimetria. No final, clique no botão **Gravar assimetria**.

Trace um gráfico que mostra a assimetria como função da identificação de káons clicando no botão **Plotar tendência**. O que podemos dizer sobre a incerteza sistemática? Baseado em todas as medidas, qual seria a sua melhor medida? Comunique o seu resultado final escolhido, o valor da melhor medida de assimetria, ao monitor. O que acontece com a assimetria do sinal quando usamos critérios de seleção mais fortes? Ela sofre alguma modificação?

APÊNDICE C – Tradução dos botões, menus e painel de ajuda do exercício Masterclass do LHCb: Medida do tempo de vida do D^0 no LHC

PORTUGUESE

Tools

Ferramentas

Variable ranges

Faixas das variáveis

Analysis tools

Ferramentas de análise

Background subtraction

Subtração de ruído

Time fit

Ajuste do tempo

Save results

Salvar resultados

Plot D0 mass

Plotar massa do D0

Fit mass distribution

Ajustar distribuição de massa

Plot distributions

Plotar distribuições

Fit signal decay time

Ajustar tempo de decaimento do sinal

Save result and fit

Salvar resultado e ajuste

Plot trend

Plotar Tendência

Clear Trend

Limpar Tendência

Save Canvas

Salvar Tela

Read Instructions

Ler Instruções

Reset Exercise

Reiniciar Exercício

Exit

Sair

Filename

Nome de arquivo

You cannot set the signal range to be the same as the total mass range. The background range must always contain at least some area which is not in the signal range, so that you have some pure background events to subtract.

Você não pode definir a faixa de sinal para ser igual a faixa de massa total. A faixa de ruído deve sempre conter pelo menos uma área fora da faixa de sinal, para que você tenha eventos de puro ruído para subtrair.

You must fit the mass distribution before plotting the variable distributions. The fit to the mass distribution allows you to measure the number of background events under the signal peak. This in turn means that you know how many background events to subtract from the signal region to get the signal variable distributions.

For more details on the LHCb experiment, please visit the LHCb pages at: <<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>and<<http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>>

Para mais detalhes sobre o experimento LHCb, por favor visite as páginas do LHCb em: <<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>and<<http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>>

Você deve ajustar a distribuição de massa antes de plotar as distribuições das variáveis. O ajuste à distribuição de massa permite medir o número de eventos de ruído debaixo do pico do sinal. Isso significa saber quantos eventos de ruído subtrair da região

do sinal para obter as distribuições das variáveis do sinal.

You must save at least one result of the lifetime fit before making the trend plot

Você deve salvar pelo menos um resultado do fit do tempo de vida antes de plotar a tendência.

WARNING: Max and min cut are both varying

AVISO: Ambos os cortes mínimo e máximo estão variando

You must fit the lifetime distribution before attempting to save the results of this fit.

Você deve ajustar a distribuição do tempo de vida antes de tentar salvar os resultados deste ajuste.

Welcome to the LHCb masterclass exercise on measuring the lifetime of the D^0 meson.

Bem-vindo(a) ao exercício de masterclass do LHCb para medir o tempo de vida do méson D^0

The goal of this exercise is to measure the lifetime of the D^0 meson, a fundamental particle made of a charm quark and an up anti-quark. In order to do so, you will first learn how to separate signal D^0 mesons from backgrounds. Finally, you will compare your results to the values found by the Particle Data Group (<http://pdgLive.lbl.gov>).

O objetivo deste exercício é medir o tempo de vida do méson D^0 , uma partícula fundamental composta por um quark charme e um antiquark up. Para realizar o exercício, primeiro você vai aprender como separar o sinal de mésons D^0 do ruído. No final, você vai comparar seus resultados com os valores medidos pelo Particle Data Group (<http://pdgLive.lbl.gov>).

Step-by-step instructions:

Instruções passo a passo:

1. Plot the D^0 mass distribution. The mass of the D^0 is a fundamental variable which separates signal (the peaking structure in the middle) from the flat background.

1. Plote a distribuição da massa do D^0 . A massa do D^0 é a variável fundamental que separa o sinal (a estrutura de pico no centro) do ruído plano.

2. Read the results of the fit and use them to determine the signal range. The function being fitted to the signal is a Gaussian, whose width, indicated

by the greek letter sigma, is related to how far the signal extends from the mean (or most probable) value. In particular, an interval of ± 1 sigma around the mean value contains 68% of the signal, while ± 3 sigma contains 99.7% of the signal. Use the slider to set the signal range to be ± 3 sigma around the mean value.

2. Leia os resultados do ajuste e use-os para determinar a faixa do sinal. A função sendo ajustada ao sinal é uma gaussiana, cuja largura, indicada pela letra grega sigma, é relacionada com o quão longe o sinal se estende do valor médio (valor mais provável). Em particular, um intervalo de ± 1 sigma em torno do valor médio contém 68% do sinal, enquanto ± 3 sigma contém 99.7% do sinal. Use o controle deslizante para selecionar a faixa do sinal em ± 3 sigma em torno do valor médio.

3. Plot the variable distributions. You will see three further plots appearing, and in each one the blue points represent the distribution of the signal in that variable while the red points represent the distribution of the background. The plot is logarithmic in the Y axis, and each point represents the fraction of the total signal in that bin. Which regions of each variable contain mostly signal? Which contain mostly background?

3. Plote as distribuições das variáveis. Você vai ver três gráficos. Em cada gráfico os pontos azuis representam a distribuição do sinal, enquanto os pontos vermelhos representam a distribuição do ruído. O gráfico é logarítmico no eixo Y, e cada ponto representa a fração do sinal total nesse bin. Quais regiões de cada variável contêm principalmente sinal? Quais contêm principalmente ruído?

4. Fit the lifetime distribution. Save the results of your fit and compare them to the PDG value. Do they agree?

4. Ajuste a distribuição do tempo de vida. Salve os resultados de seu ajuste e compare-os ao valor do PDG. Os valores concordam?

5. Repeat step 4 but now varying the upper D0 log(IP) variable range from 1.5 to -2 in steps of 0.2. Do you notice a pattern?

5. Repita o passo 4, mas agora variando o limite superior da variável log(IP) do D0 de 1.5 a -2 em passos de 0.2. Notou algum padrão?

6. Talk to a demonstrator about your results. Does the D0 lifetime with an log(IP) cut of -1.5 agree better or worse with the PDG than the lifetime with an log(IP) cut of 1.5?

6. Converse com um(a) instrutor(a) sobre seus resultados. O valor do tempo de vida para o corte de -1.5 na variável log(IP) tem melhor ou pior concordância com o valor do PDG do que o valor para o corte de 1.5?

Error messages:

Mensagens de erro:

Error Erro

You cannot have more than two particles. Você não pode selecionar mais que duas partículas.

You have already added this particle. Você já selecionou esta partícula.

Hint Palpite

When you want to rotate the view, press CTRL or CTRL + SHIFT to be more precise.

Quando quiser girar a visualização, pressione CTRL ou CTRL + SHIFT para ter maior precisão.

You have already added new mass in histogram.

Você já adicionou a nova massa ao histograma.

Mass is not in range. Please, try again.

A massa está fora da faixa. Por favor, tente novamente.

You have successfully saved your histogram. Você salvou seu histograma com sucesso.

Congratulations

Parabéns

You have successfully completed MasterClassDisplay exercise.

Você completou o exercício do MasterClassDisplay com sucesso.

Name

Nome

Surname

Sobrenome

Class

Série escolar

Save

Salvar

Exercise

Exercício

Tabela 1: Painel MENU

1. Validar	13. Minhas Particulas
2. Ajuda	14. Informacao das Particulas
3. Sair	15. Minhas Particulas
4. Salvar Particula	16. Zoom
5. Calcular	17. Gerenciador de eventos
6. Remover	18. Visualizacao
7. Adicionar	19. Legenda
8. Desenhar	20. Histograma
9. Salvar Histograma	21. Comecar
10. Massa	22. Linguas
11. Nome	23. Esconder Geometria
12. Numero do evento:	24. Transparencia

Languages Masterclass Display

Painel AJUDA:

1. Zoom oferece uma visualização ampliada da colisão.
2. Clique numa trajetória para saber mais sobre as propriedades da partícula.
3. Use projeções para visualizar as partículas de um ângulo diferente.
4. Palpite mostra o D^0 escondido e suas filhas.
5. A visualização transparente oferece uma visão melhor das trajetórias das partículas e do detector LHCb.
6. A visualização em tela cheia mostra a visão completa do detector LHCb e das trajetórias das partículas.
7. Você pode esconder a geometria para ver as trajetórias das partículas.
8. Escolhe com cuidado as partículas que quer salvar, pois você obterá uma nova massa deles que pode não estar correta!
9. Adicione e Desenhe seus resultados num histograma. Não se esqueça de salvar o histograma quando terminar!