

# 1

## Introdução

Quem eu sou? De onde eu vim? Qual é o sentido da vida? A humanidade ao longo dos séculos fez questionamentos sobre os mais diversos temas. São perguntas que formam parte da tentativa de descobrir nossas origens baseadas apenas no uso de ferramentas mentais surgidas para nos ajudar a iluminar a escuridão do mundo no qual vivemos.

Na medida em que o cérebro humano ganha mais conhecimento, experiência e, portanto, uma maior intuição da natureza e dos processos que a regem, vai avançando aos poucos na explicação de cada uma das questões que o preocupam desde os primórdios. Uma das questões fundamentais colocadas pelos filósofos e que em um primeiro aspecto chama a atenção sobre a origem das coisas, foi a existência de um limite no menor tamanho que uma partícula material pode ter. Empédocles postulou os *rizhomata*, partículas de vida que se misturam entre si em diferentes proporções para produzir as coisas, Anaxágoras aprofunda essa idéia e chega ao conceito de *homeomerias*, partículas infinitesimais de matéria, capazes de se aglutinarem para formar todas as coisas, e Demócrito com a postulação do átomo, uma partícula hipotética indivisível. Assim se assentaram as bases da que seria chamada a teoria atomista. Mas quais partículas são essas que formam a matéria? Como surgiu a matéria da qual o universo está feito? E, mais especificamente, porque o universo conhecido é feito completamente de matéria, uma vez que anti-matéria também existe?

A busca de respostas para estas perguntas fez o mundo da Física começar uma vertiginosa viagem até o fundo dos constituintes fundamentais do núcleo atômico com o intuito de explicar o comportamento das partículas das quais a matéria está composta e as leis das forças que agem entre elas. Ninguém pode dizer com certeza qual será o resultado desta emocionante viagem, nem quais serão os obstáculos que teremos de superar na tentativa de compreender o mundo e suas leis, mas, no caminho, cientistas brilhantes desenvolvem ferramentas fantásticas que fornecem pistas sobre o quebra-cabeças que pressupõe a existência do Universo e tornam ainda mais apaixonante a tarefa

que enfrentamos.

Uma destas ferramentas é conhecida como o Modelo Padrão, um conjunto de grupos de simetria [1] [2] [3] que acumula todo o conhecimento atual da Física para descrever as partículas fundamentais que formam a matéria conhecida classificando-as como *quarks*, *léptons* e *bósons*, e as interações entre elas, como *interação forte*, *fraca* e *eletromagnética*, restando apenas por incluir a interação gravitacional. Cabe salientar que neste modelo a cada uma destas partículas está associada sua antipartícula, com idêntica massa mas com carga oposta e valores invertidos em todos seus números quânticos aditivos internos (como número bariônico, número leptônico, estranheza, etc). Ao entrarem em contato, matéria e antimatéria se aniquilam liberando energia e reduzindo as quantidades de partículas e antipartículas em iguais proporções. Porque então não vemos antimatéria no universo? Esta desproporção, como proposto pelo físico russo Andrei Shkarov [4], pode ser explicada por meio das três condições necessárias que uma interação deve reunir para produzir matéria e antimatéria em diferentes quantidades. Uma destas condições é a violação da simetria de carga e paridade ou violação de CP. Em teoria, no processo conhecido como Big-Bang, deveriam ser produzidas iguais quantidades de matéria e antimatéria. No entanto, algum fenômeno ainda não totalmente explicado provocou o fato de que para cada  $\approx 10^9$  pares de partícula-antipartícula houvesse um excesso de partícula, tornando possível a existência de todo o universo conhecido até hoje.

Se CP fosse uma simetria exata, as leis da natureza seriam as mesmas para matéria e anti-matéria. Embora as interações eletromagnética, gravitacional e forte sejam simétricas no que diz respeito às simetrias C, P e por conseguinte CP, sabe-se que as interações fracas violam tanto C e P separadamente, como a combinação destas, a simetria CP, efeito que já foi observado em decaimentos de káons e do méson B. Entretanto, nenhuma evidência foi observada ainda da violação desta simetria nos decaimentos carregados do méson  $D^1$ .

A violação de CP é introduzida no Modelo Padrão através da presença de uma fase complexa na matriz que associa os auto-estados de massa dos quarks aos auto-estados da interação fraca, conhecida como Matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) [6], e manifesta-se como uma diferença na taxa de decaimento entre a partícula e sua antipartícula. Especificamente no setor dos decaimentos de mésons charmosos carregados, principal escopo do estudo

---

<sup>1</sup>Muito recentemente, enquanto esta dissertação era escrita, o LHCb encontrou possível evidência de violação de CP em decaimentos de  $D^0$  [5].

desta dissertação, tal fase é devida à interferência de diagramas *árvore* e *pinguim* (explicados mais adiante) nos decaimentos suprimidos por Cabibbo,  $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$  e  $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$ , e, pelo fato destes decaírem em três corpos, as informações referentes à cinemática e à dinâmica podem ser completamente descritas utilizando apenas duas variáveis, o que define um espaço de fase bidimensional conhecido como Dalitz Plot. Toda a informação sobre a dinâmica do decaimento pode ser extraída do Dalitz Plot, isto é, se a partícula alcançou o estado final decaindo diretamente em três corpos ou por diversos processos intermediários conhecidos como ressonâncias, com *fases relativas* entre eles. A comparação destas variações no espaço de fase do Dalitz Plot para partícula e antipartícula é o que permite a busca por violação de CP, seja pela medida direta da fase fraca relativa por meio de um ajuste multidimensional ou mediante a comparação estatística das populações de  $D^+$  e  $D^-$  em intervalos 2D (*bins*) do Dalitz Plot.

Sabendo-se que a magnitude da assimetria predita pelo Modelo Padrão para os mésons charmosos é muito pequena -da ordem de 0,1%- cabe ressaltar que encontrar evidência de violação de CP da ordem de 1% em decaimentos no setor de charme forneceria indícios de Física Nova, como algumas extensões ao Modelo Padrão predizem, tornando este cenário uma das principais motivações do experimento LHCb.

O LHCb, que faz parte do Grande Colisor de Hádrons (LHC), outra das grandes construções do cérebro humano, produz, milhões de vezes a cada segundo, eventos nos quais quantidades de partículas e antipartículas são criadas mediante a colisão de feixes de prótons, tentando encontrar algum tipo de assimetria que leve à comprovação de violação de CP ou à evidência de Física Nova. Assim que as colisões são produzidas e detectadas pelos complexos aparatos do LHCb, os dados passam por um sofisticado processo de *trigger* e aqueles que são selecionados como candidatos a eventos são armazenados em disco para serem submetidos à seleção final, que aplica cortes gerais na amostra de dados e cortes específicos nas variáveis para cada canal de decaimento.

Em termos gerais a ideia é realizarmos uma análise em todo o espaço de fase dos decaimentos utilizando a técnica denominada *Mirandizing* [7] ou busca de anisotropias no Dalitz Plot, que visa a encontrar violação de CP procurando variações locais na significância da diferença entre as populações de  $D^+$  e  $D^-$  para cada *bin* do gráfico, para os canais  $D^\pm \rightarrow K^\mp K^\pm \pi^\pm$  e  $D^\pm \rightarrow \pi^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ .

No caso da busca de assimetrias de CP, defrontamo-nos com a dificuldade que, além da assimetria que proviria diretamente dos aspectos teóricos preditos para os canais que estamos tentando analisar, existe a possibilidade de

depararmos com fontes externas de assimetria que poderiam nos levar a interpretações errôneas da informação contida nos dados. As referidas fontes de “falsa” assimetria podem vir de efeitos de produção dos mésons  $D^+/D^-$  ou efeitos do detetor. Em tal caso, por não apresentar fase que permita violação de CP, os canais favorecidos por Cabibbo,  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  e  $D_s^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ , foram também selecionados como *canais de controle* para testar por este tipo de assimetrias em nossa amostra de dados até alcançar bons níveis de confiança baseados na estatística do método que tentamos aplicar aos canais de interesse.

Uma vez que temos uma visão geral do assunto exposto, procedemos agora à exposição do estudo da busca de violação de CP no decaimento  $D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ , realizando também um estudo preliminar para o decaimento  $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$ . Este trabalho começa com os aspectos teóricos referentes ao Modelo Padrão (Capítulo 2), e ao estudo da cinemática e dinâmica dos decaimentos em três corpos (Capítulo 3), visando a explicar as ferramentas de análise para este tipo de decaimento. No Capítulo 4, faremos uma descrição global do LHCb e suas componentes principais, com o intuito de compreender o processamento dos dados produzidos pelo LHC. Após estas breves revisões teóricas e técnicas, passaremos ao estudo das características da amostra de dados coletada (Capítulo 5), explicando o processo de seleção de cada um dos canais de interesse para o estudo e os critérios levados em consideração nas etapas posteriores para as diferentes amostras de dados.

Os resultados relevantes deste trabalho, baseados na busca de violação de CP em decaimentos charmosos em três corpos, serão mostrados no capítulo 6, e finalmente, formularemos algumas conclusões com os resultados obtidos.