



VIOLAÇÃO DE CP E A ASSIMETRIA MATÉRIA-ANTIMATÉRIA NO UNIVERSO: UM ESTUDO DE CASO NO PROCESSO $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Palavras-Chave: Física de partículas, Violação de CP, decaimento $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, Modelo Padrão.

Autoras:

Isabela Santos Franceschi, FEEC/IFGW – Unicamp
Prof^a. Dr^a. Patrícia Camargo Magalhães (orientadora), IFGW – Unicamp

INTRODUÇÃO

O Universo é constituído predominantemente por matéria, de forma assimétrica por partículas em detrimento das antipartículas, o que configura um problema em aberto na física, uma vez que o Big-Bang produziu a mesma quantidade de matéria e antimatéria [1],[2],[3],[4],[5], [6]. As condições para essa discrepância, denominada Bariogêneses, tendo em conta o Big Bang, a formação, e consequente expansão do Universo, estão conectadas por meio da violação de Carga e Paridade (CP) em decaimentos hadrônicos. A violação de CP (VCP), por sua vez, necessária para a bariogênese, corresponde a uma diferença nos decaimentos de uma partícula e sua antipartícula, de forma que um dos processos se apresenta mais favorável do que outro de ocorrer e, sendo assim, há discrepância nos produtos desses decaimentos.

Atualmente, a descrição das interações entre partículas (e antipartículas) é realizada por meio do Modelo Padrão (MP), a teoria que melhor caracteriza os fenômenos observados e com o qual se realizam previsões mais certeiras. Dentre a gama de fenômenos que podem ser explicados a partir do Modelo Padrão, a violação de CP é um deles, e pode ser compreendida por meio das interações fracas mediadas por bósons W -que viabilizam a troca de sabor dos quarks-, já que as interações fortes e eletromagnéticas são simétricas por transformações de CP. A intensidade da troca de sabores é uma grandeza empírica, descrita por uma matriz, a matriz Cabibbo-Kobayashi-Mukawa (CKM), cujos valores dos elementos foram obtidos experimentalmente. Além de apresentar a intensidade das trocas de sabores em uma interação, é importante destacar que a matriz possui uma fase, denominada fase fraca, que muda de sinal na transformação CP e ao interferir com a fase da interação forte se apresenta como o mecanismo teórica que pode gerar VCP. Na natureza, a violação de CP é obtida a partir da diferença das taxas de decaimento de uma partícula para seu estado final e de decaimento da antipartícula para o conjugado CP -do estado final da partícula, normalizada pela soma das duas taxas (A_{CP}).

Apesar de o Modelo Padrão proporcionar boas previsões para grande parte dos processos que envolvem violação de CP observados experimentalmente, ele apresenta falhas (ou lacunas) de tal forma que se pondera se o MP continuará sendo a teoria mais adequada e apenas necessita de complementaridades ou se será preciso o desenvolvimento de uma Nova Física que consiga explicar as discrepâncias teórica-experimentais presentes nele. No cerne dessa dúvida sobre o surgimento de teorias mais adequadas, encontra-se a violação de CP envolvendo o quark charm (c) e em particular o decaimento $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, que possui uma diferença entre previsão teórica de VCP e o valor experimental obtido pela colaboração LHCb (Large Hadron Collider beauty) no CERN [7][8][9].

METODOLOGIA

O projeto de iniciação tem como objetivo a compreensão da violação de Carga e Paridade no Modelo Padrão e a possibilidade do surgimento de uma Nova Física devido a divergências entre previsões feitas a partir do MP e resultados obtidos empiricamente, em especial para o decaimento $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. A pesquisa constituiu-se, em primeiro lugar, de uma revisão bibliográfica envolvendo conteúdos de física de partículas básica para estabelecer um entendimento do Modelo Padrão[1-6,12,17]. Foram abordados os diferentes tipos de força e interações que agem nas partículas elementares, e as algumas das características que permitem classificá-las como hádrons (mésons e bárions), léptons, férmions (quarks) e/ou bósons (de gauge ou escalares), por exemplo. Realizada a revisão bibliográfica, foi possível um aprofundamento no processo de violação de CP a partir das referências [1][2][10][11][12][13], em que se estudaram a matriz CKM -essencial para a descrição da VCP dentro do MP-, as simetrias C, P e T e a averiguação da possibilidade de obtenção por meio de experimentos da violação de CP com base na assimetria de CP (ACP) .

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\mathcal{M} \rightarrow f) - \Gamma(\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f})}{\Gamma(\mathcal{M} \rightarrow f) + \Gamma(\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f})} = \frac{|A_{(\mathcal{M} \rightarrow f)}|^2 - |A_{(\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f})}|^2}{|A_{(\mathcal{M} \rightarrow f)}|^2 + |A_{(\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f})}|^2} \quad (1)$$

Em seguida, com a base teórica, será possível o estudo da violação de CP a partir de um decaimento específico, $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$. Tal processo é de grande relevância para as discussões atuais em relação ao Modelo Padrão. Isso porque, a colaboração LHCb, analisando a VCP da diferença entre os decaimentos charmosos $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ e $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$, obteve como resultado um A_{CP} (sendo o uso da diferença de assimetria uma forma de maximizar a assimetria observada) uma ordem de grandeza maior que a da predição teórica [9]. O resultado apresentado pela colaboração LHCb foi de $\mathcal{A}_{CP} = -0.154 \pm 0.029$ com $5,3\sigma$ do zero [8][7]. Sendo constatada essa discrepância, com a realização dos cálculos teóricos precisos e utilização dos dados disponibilizados pelo LHCb, instalou-se um debate na comunidade sobre a necessidade de uma nova física. Neste trabalho, essa divergência será abordada a partir do MP, tendo em conta a interação forte entre os estados finais do decaimento (FSI) e a interação fraca descrita pela Matriz CKM.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do projeto englobam duas frentes complementares, a de um embasamento teórico e a de cálculos referentes ao tema de pesquisa. Estando o projeto em andamento, até o momento foi concretizada a primeira etapa com uma extensa revisão bibliográfica que abarca as referências [10][14][2][13][4][11][1][3][12], as quais permitiram o estabelecimento de uma base de física de

partículas, mecânica quântica e o estudo de VCP. Deu-se, também, início à segunda frente do projeto, a qual se programa concluir até Outubro deste ano e será baseada na abordagem da referência [9].

Embasamento teórico

A revisão bibliográfica resultou na produção de um texto expositivo sobre o tema de pesquisa. Nele, foram explicados os tipos de simetrias contínuas tendo como referência o Teorema de Noether, as simetrias contínuas e suas associações com leis da conservação; as simetrias discretas e a matriz CKM.

A simetria de Paridade (P) corresponde a invariância do fenômeno/sistema caso esse seja transformado por um espelhamento e rotação de 180° (ou, de modo equivalente, a troca de sentido dos eixos coordenados). Seu operador, denominado P, responsável pela realização dessa mudança no sistema quando a ele aplicado, é linear, unitário, hermitiano, pode ser descrito como uma matriz e, quando aplicado duas vezes, retorna o sistema a seu estado original. A simetria de Carga (C) se trata da troca dos números quânticos das partículas que compõem o sistema analisado, seu operador pode ser denominado C e, assim como P, pode ser descrito como uma matriz, é unitário e o estado final do sistema será igual ao original ao ser aplicado duas vezes. A simetria CP, portanto, trata-se da sobreposição das duas simetrias P e C e resulta na transformação das partículas em suas correspondentes antipartículas.

A violação de simetria P teve seu atestamento efetuado com o experimento conduzido pela Dra. Wu para o decaimento do Cobalto 60 em Níquel, um antineutrino e um elétron (resultante de interação fraca) $Co^{60} \rightarrow Ni^{60} + \bar{\nu}_e + e$, já que a quantidade de elétrons emitida na direção do spin era diferente da emitida na direção oposta -o que demonstra uma violância da simetria de Paridade. Tão logo, a violação de simetria CP também foi constatada, tendo como marco o decaimento do Kaon neutro em 2π e em 3π . Diferentemente do que ocorreria caso a simetria CP fosse conservada, experimentos detectaram o decaimento do Kaon em 2π onde se esperaria apenas o seu decaimento em 3π .

A matriz Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) é, atualmente, o modo com que a violação de CP é explicada dentro do MP. Ela corresponde à descrição da troca de sabores de quarks em interações fracas e possui diferentes representações, das quais a parametrização de Wolfenstein possibilita uma melhor averiguação dos fatores complexos que permitem a descrição de VCP. A seguir é apresentada a CKM tendo em conta até $O(\lambda^3)$ que leva em conta 4 parâmetros reais λ , A , ρ and η , sendo as componentes complexas apresentadas em V_{ub} e V_{td} (os extremos da diagonal contrária) [10][1].

$$M_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4) \quad (2)$$

Experimentalmente, a violação de CP é averiguada por meio da assimetria de CP (A_{CP}), cujo desenvolvimento no projeto se pronuncia na etapa seguinte.

Cálculos

O cálculo da assimetria de CP (A_{CP}) (1) foi desenvolvido e elucidado o mecanismo de geração de VCP direta. Dada a amplitude de um processo de decaimento $\mathcal{M} \rightarrow f$ definida como:

$$A_{M \rightarrow f} = Ae^{i(\delta_1 + \phi_1)} + Be^{i(\delta_2 + \phi_2)} \quad (3)$$

e o seu processo conjugado de CP, $\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f}$

$$A_{\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f}} = Ae^{i(\delta_1 - \phi_1)} + Be^{i(\delta_2 - \phi_2)} \quad (4)$$

em que as partículas/antipartículas ($\mathcal{M}/\overline{\mathcal{M}}$) decaem em estados finais ($f/\overline{f}$), com A e B constantes e δ e ϕ as fases fraca e forte.

Substituindo as amplitudes, Eqs.(2) e (4) no A_{CP} definido na Eq.(1), temos:

$$|Ae^{i(\delta_1 + \phi_1)} + Be^{i(\delta_2 + \phi_2)}|^2 = |A|^2 + |B|^2 + AB(e^{i(\delta_2 + \phi_2 - \delta_1 - \phi_1)} + e^{i(\delta_1 + \phi_1 - \delta_2 - \phi_2)}) \quad (5)$$

$$|Ae^{i(\delta_1 - \phi_1)} + Be^{i(\delta_2 - \phi_2)}|^2 = |A|^2 + |B|^2 + AB(e^{i(\delta_2 - \delta_1 + \phi_1 - \phi_2)} + e^{i(\delta_1 - \delta_2 + \phi_2 - \phi_1)}) \quad (6)$$

Portanto,

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\mathcal{M} \rightarrow f) - \Gamma(\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f})}{\Gamma(\mathcal{M} \rightarrow f) + \Gamma(\overline{\mathcal{M}} \rightarrow \overline{f})} = \frac{-2\frac{A}{B} \sin(\delta_1 - \delta_2) \sin(\phi_1 - \phi_2)}{(\frac{A}{B})^2 + 1 + 2\frac{A}{B} \cos(\delta_1 - \delta_2) \cos(\phi_1 - \phi_2)} \quad (7)$$

Esse resultado torna clara a possibilidade de VCP, já que a sua não ocorrência teria como característica uma diferença entre o quadrado das amplitudes de ambos os processos igual a zero, isto é, o decaimento de partícula e antipartícula se daria a taxas iguais, o que não apresentado pelo resultado do cálculo de A_{CP} , Eq.(7). Nesse sentido, percebe-se que é necessário tanto uma diferença de fase fraca, quanto uma diferença de fase forte que vem da FSI, para gerar VCP.

A etapa final da pesquisa irá verificar a violação de CP no decaimento específico $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, o qual envolve o charm -quark do tipo up. A partir dele, poderá ser constatada a previsão teórica com base no MP, utilizando-se das ferramentas teóricas fomentadas até então -conhecimentos sobre as simetrias C,P e CP, a violação de Carga e Paridade. O estudo será feito com base na referência [9], que propoem uma alternativa para a discordância entre previsão teórica e dados experimentais.

CONCLUSÃO

Os estudos realizados permitiram a concretização de uma base teórica sobre física de partículas com enfoque nas simetrias discretas e a violação da CP. A partir de uma abordagem abarcada pelo Modelo Padrão, foi possível o desenvolvimento teórico -mediante cálculos- objetivando a compreensão em se tratando da assimetria de CP. O próximo passo será analisar o decaimento específico, $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, o qual envolve quark charm (do tipo up). O resultado obtido em se tratando do decaimento citado será, posteriormente, utilizado como referência para a compreensão do que se obteve experimentalmente pela colaboração LHCb e, com isso, a deliberação sobre a aplicabilidade do MP como fonte de explicação para discrepância dos resultados e a possibilidade de uma Nova Física.

Referências bibliográficas

- [1] Mark Thomson. *Modern Particle Physics*. International Series of Monographs on Physics. Cambridge University Press, 2013. ISBN: 978-1-107-03426-6.
- [2] David Griffiths. “Introduction to Elementary Particles”. Em: 5ª reimpressão. Vch Verlagsgesellschaft MbH, 2008. Cap. 4, pp. 115–150.
- [3] ROBERT EISBERG e ROBERT RESNICK. *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Editora Campus—, ——. ISBN: —.

-
- [4] Kenneth S. Krane. “Modern Physics”. Em: 3^a ed. John Wiley Sons, INC, 2012. Cap. 2, pp. 25–64.
- [5] H. Moysés Nussenzveig. “Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade, Física Quântica”. Em: Blucher, 1998. Cap. 6, pp. 175–240.
- [6] Alberto Reis. *Partículas para todos*. Cap. 9, pp. 216–231.
- [7] R. Aaij et al. “Observation of CP Violation in Charm Decays”. Em: *Phys. Rev. Lett.* 122 (21 mai. de 2019), p. 211803. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.211803. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.211803>.
- [8] Alexander Khodjamirian e Alexey A. Petrov. “Direct CP asymmetry in $D \rightarrow \pi^- \pi^+$ and $D \rightarrow K^- K^+$ in QCD-based approach”. Em: *Phys. Lett. B* 774 (2017), pp. 235–242. DOI: 10.1016/j.physletb.2017.09.070. arXiv: 1706.07780 [hep-ph].
- [9] I. Bediaga, T. Frederico e P. C. Magalhães. “Enhanced Charm CP Asymmetries from Final State Interactions”. Em: *Phys. Rev. Lett.* 131 (5 ago. de 2023), p. 051802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.051802. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.131.051802>.
- [10] I.I. Bigi e A.I. Sanda. *CP Violation*. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge University Press, 2000. ISBN: 9780521443494.
- [11] *CP Violation*. International Series of Monographs on Physics. Oxford University Press, 2007. ISBN: 978-0-19-850399-6.
- [12] Emilio Segrè. *Dos Raios X aos quarks: Físicos modernos e suas descobertas*. Coleção Pensamento Científico. Editora Universidade de Brasília. ISBN: 85.230.0078-x.
- [13] Carlo Giunti e Chung W. Kim. *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*. Oxford University Press, 2007. ISBN: 978-0-19-850871-7.
- [14] Robert Eisberg e Robert Resnick. *Física Quântica: átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Editora Elsevier, 1979.