

Projeto de Iniciação Científica

Física de Neutrinos na Física de Partículas Elementares

Aluno: Mateus Marques
Orientadora: Profa. Dra. Renata Zukanovich Funchal

Departamento de Física Matemática
Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Resumo

Neste projeto de Iniciação Científica estudaremos como a Física de Neutrinos contribuiu para o estabelecimento do Modelo Padrão da Física de Partículas Elementares e como agora o fenômeno de oscilação de neutrinos apresenta hoje uma das únicas evidências experimentais de Física além do Modelo Padrão. Vamos começar introduzindo as razões experimentais e ideias básicas que levaram ao Modelo Padrão para depois estudar de maneira mais profunda como este pode ser entendido no contexto mais geral de uma teoria quântica de campos. Com isso poderemos discutir o mecanismo de massa do Modelo Padrão, entender porque neutrinos não tem massa nesse modelo e o que pode ser feito para que as massas dos neutrinos sejam consideradas de forma a explicar as oscilações de sabor que têm sido observadas experimentalmente. O estudante até o final do projeto terá a oportunidade de simular os resultados de um experimento de oscilação de neutrinos de reator nuclear, KamLAND, confrontando sua simulação com dados experimentais.

Nosso objetivo é que ao final deste projeto o estudante esteja preparado para iniciar uma pós-graduação na área de Fenomenologia das Partículas Elementares ou em áreas afins.



Mateus Marques



Renata Zukanovich Funchal

1 Introdução

Neutrinos têm tido, desde sua entrada em cena no início da década de 30, consequências profundas em nossa compreensão das forças da natureza. No passado, levaram à teoria de Fermi para o decaimento beta, à natureza quiral das interações fracas, à descoberta das correntes neutras e participaram das primeiras indicações à favor do Modelo Padrão (MP) [1, 2]. Neste início de século, os neutrinos apresentam-se novamente como nossos guias, indicando talvez uma das janelas mais promissoras que poderá nos conduzir além das fronteiras do MP ou mesmo além das fronteiras da física fundamental, tal qual nós a entendemos hoje.

Depois das inúmeras evidências de oscilações de neutrinos em experimentos atmosféricos e solares, produzidos em aceleradores e em reatores nucleares, hoje temos um quadro mais claro do que sabemos e ignoramos nesse setor. Em particular, o fato que neutrinos têm massa não-nula precisa ser explicado teoricamente, pois é através de massa e mistura que entendemos essas oscilações de sabor observadas experimentalmente.

Para compreender as grandes questões da área e poder entender os avanços que estão sendo feitos, tanto do ponto de vista teórico como experimental, para respondê-las, é necessária uma formação teórica que, em geral, não é fornecida durante o curso de graduação. O projeto tem como objetivo orientar o estudante a construir essa base para conseguir entender e acompanhar essas discussões. Começaremos por construir uma base teórica sólida em Física de Partículas Elementares motivada inicialmente por diversas descobertas experimentais, como a própria descoberta do neutrino, que levaram ao Modelo Padrão. Em seguida faremos um estudo mais sistemático da fenomenologia do Modelo Padrão antes de entrar no estudo da Teoria Quântica de Campos. Nosso objetivo é que ao final o estudante consiga entender como neutrinos podem ter massa não-nula e sofrer oscilação de sabor em extensões mínimas desse modelo.

No final da Iniciação Científica o estudante será capaz de simular o experimento de oscilação de neutrinos do reator KamLAND e confrontar duas previsões teóricas com os dados deste experimento.

O programa de estudos visa complementar a formação acadêmica do estudante, introduzindo-o aos conhecimentos básicos da área. Os principais tópicos formativos que serão tratados serão: simetrias contínuas e discretas em Mecânica Quântica, Teoria Clássica de Campos e uma introdução à Teoria Quântica de Campos com ênfase no mecanismo de geração de massas. Usaremos como roteiro inicial o livro *The Physics of Massive Neutrinos* [3], a partir do qual iremos estudar os tópicos acima e, conforme a necessidade, outros complementares. No final desta Iniciação Científica esperamos que o estudante esteja apto a fazer uma pós-graduação na área conseguindo imediatamente começar a trabalhar em uma pesquisa original.

2 Objetivos

Com o intuito de introduzir o estudante à Física de Neutrinos, elaboramos um projeto que permite a construção de uma base teórica sólida em Física de Partículas Elementares. Desenvolveremos um programa de estudo que passará pela leitura e compreensão de artigos de divulgação escritos por cientistas que desenvolveram trabalhos significativos para a cons-

trução do Modelo Padrão, artigos científicos experimentais sobre descobertas fundamentais na área e diversos livros teóricos. Além da formação geral na área, enfatizaremos aspectos particulares da Física de Neutrinos, desenvolvendo também as habilidades computacionais necessárias para o trabalho de pesquisa futuro, preparando assim o estudante para uma pós-graduação em Física de Partículas Elementares.

3 Plano de Trabalho e Cronograma

3.1 Roteiro de Estudo

Forneceremos aqui um pequeno roteiro do projeto de estudo.

1. Introdução Geral

Iniciaremos o estudo da física de partículas pela leitura e discussão dos capítulos do livro *The Ideas of Particle Physics* de G. Coughlan e J. Dodd [4] e dos artigos de divulgação científica das revistas *Scientific American* e *Physics Today* relacionados com o tema de cada capítulo [5–17]. Este livro dará uma visão geral qualitativa da área e preparará o estudante para o estudo mais formal.

2. Introdução à Física de Neutrinos I

O estudo mais formal será introduzido usando como roteiro o livro de Boris Kayser [3]. Utilizaremos também o livro de F. Halzen e A. D. Martin [18] para muitas das discussões. Estudaremos os seguintes tópicos:

- (a) Cinemática Relativística;
- (b) Física de Neutrinos sem o formalismo de Teoria Quântica de Campos;
- (c) Simetrias discretas e contínuas em Mecânica Quântica;
- (d) Equação de Dirac;
- (e) Eletrodinâmica de partículas de spin $\frac{1}{2}$;
- (f) Oscilação de neutrinos no vácuo;
- (g) Interações eletrofracas;
- (h) Oscilações de neutrinos na matéria;
- (i) Simetrias de calibre;
- (j) Modelo de Weinberg-Salam;
- (k) Partículas de Majorana;
- (l) Termos de massa de Dirac e de Majorana.

3. Descobertas Experimentais

Usaremos o livro *The Foundations of Particle Physics* de R. Cahn e G. Goldhaber [19] para complementar os estudos teóricos com leitura de artigos experimentais das descobertas relacionadas a neutrinos.

4. Teoria Clássica de Campos

Estudaremos os capítulos 1 e 2 do livro *Quantum Fields* de N. Bogoliubov e D.V. Shirkov [20] onde encontraremos o tratamento lagrangiano para campos livres clássicos (campos escalares, vetoriais e de Dirac) e o teorema de Noether.

5. Introdução à Física de Neutrinos II

Estudaremos as bases teóricas do Modelo Padrão e da Física de Neutrinos: a Teoria Quântica de Campos, usando como base o livro *Quantum Field Theory* de F. Mandl e G. Shaw [21]. Utilizaremos também o livro *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics* de Giunti e Kim [22] para a parte mais diretamente relacionada a neutrinos. Os tópicos que pretendemos cobrir são:

- (a) Formalismo Lagrangiano para campos quânticos;
- (b) Quantização Canônica;
- (c) Campos Livres e em Interação;
- (d) Matriz S e Diagramas de Feynman;
- (e) Física de Neutrinos com o formalismo de Teoria Quântica de Campos;
- (f) Termos de massa de neutrinos em Teoria de Campos.

3.2 Cronograma

No segundo semestre de 2021 o estudante fará as leituras relativas à **Introdução Geral** e iniciará o estudo dos tópicos da **Introdução à Física de Neutrinos I** com algumas leituras de artigos de **Descobertas Experimentais**. Aqui será também realizado o estudo de **Teoria de Campos Clássicos** que poderá ser completado no início de 2022.

No primeiro semestre de 2022 o estudante deverá terminar o estudo da **Introdução à Física de Neutrinos I** acompanhado de leituras de artigos das **Descobertas Experimentais** relevantes. O estudo dos tópicos descritos em **Introdução à Física de Neutrinos II** será realizado no segundo semestre de 2022 e o estudante deverá fazer uma simulação do experimento de oscilações de neutrinos em reator KamLAND [23].

O estudante participará também das reuniões semanais do Jornal Club de Partículas e de reuniões de discussão com outros estudantes de Iniciação Científica do grupo.

O aprendizado de métodos computacionais algébricos e numéricos será realizado ao longo do projeto na medida em que estes se fizerem necessários ou úteis para a reprodução de resultados teóricos e comparação com dados experimentais.. Por exemplo, pretendemos iniciar o estudante na utilização do programa Mathematica [24] para realizar cálculos dos diagramas de Feynman e ao uso de programas gráficos tais como Gnuplot [25].

Referências

- [1] Steven Weinberg. A Model of Leptons. *Phys. Rev. Lett.*, 19:1264–1266, 1967.
- [2] S. L. Glashow. Partial Symmetries of Weak Interactions. *Nucl. Phys.*, 22:579–588, 1961.

- [3] B. Kayser, F. Gibrat-Debu, and F. Perrier. *The Physics of Massive Neutrinos*. World Scientific, 1989.
- [4] Guy D. Coughlan and James Edmund Dodd. *The ideas of particle physics: an introduction for scientists*. Cambridge University Press, 1991.
- [5] Freeman J Dyson. Field theory. *Scientific American*, 188(4):57–65, 1953.
- [6] Murray Gell-Mann and Edward P Rosenbaum. Elementary particles. *Scientific American*, 197(1):72–92, 1957.
- [7] Sidney D Drell. Electron-positron annihilation and the new particles. *Scientific American*, 232(6):50–65, 1975.
- [8] Gerard 't Hooft. Gauge theories of the forces between elementary particles. *Scientific American*, 242(6):104–141, 1980.
- [9] David B Cline, Carlo Rubbia, and Simon Van Der Meer. The search for intermediate vector bosons. *Scientific American*, 246(3):48–59, 1982.
- [10] Chris Quigg. Elementary particles and forces. *Scientific American*, 252(4):84–95, 1985.
- [11] M. J.G. Veltman. The higgs boson. *Scientific American*, 255(5):88–94, 1986.
- [12] David N Schramm and Gary Steigman. Particle accelerators test cosmological theory. *Scientific American*, 258(6):66–73, 1988.
- [13] Helen R Quinn and Michael S Witherell. The asymmetry between matter and anti-matter. *Scientific American*, 279(4):76–81, 1998.
- [14] Edward Kearns, Takaaki Kajita, and Yoji Totsuka. Detecting massive neutrinos. *Scientific American*, 281(2):64–71, 1999.
- [15] Francis Halzen and Spencer R Klein. Astronomy and astrophysics with neutrinos. *Physics today*, 61(5):29, 2008.
- [16] Chris Quigg. The coming revolutions in particle physics. *Scientific American*, 298(2):46–53, 2008.
- [17] Joseph Lykken and Maria Spiropulu. The future of the higgs boson. *Phys. Today*, 66(FERMILAB-PUB-13-598-T):28–33, 2013.
- [18] Francis Halzen and Alan D. Martin. *Quark & Leptons: An Introductory Course In Modern Particle Physics*. John Wiley & Sons, 2008.
- [19] Robert N. Cahn and Gerson Goldhaber. *The experimental foundations of particle physics*. Cambridge University Press, 2009.
- [20] N. Bogoliubov and D. V. Shirkiv. *Quantum Fields*. Benjamin-Cummings Pub. Co, 1982.
- [21] F. Mandl and G. Shaw. *Quantum Field Theory*. John Wiley and Sons Ltd.

- [22] Carlo Giunti and Chung W. Kim. *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*. Oxford University Press, 2007.
- [23] S. Abe et al. Search for Solar Flare Neutrinos with the KamLAND detector. *arXiv:2105.02458*, (astro-ph), 5 2021.
- [24] Wolfram Research, Inc. Mathematica, Version 12.3.1. Champaign, IL, 2021.
- [25] Thomas Williams, Colin Kelley, and many others. Gnuplot 5.4: an interactive plotting program, June 2021.