

## 1º SEMESTRE DE 2026

### FI224 – Tópicos em Cronologia, Raios Cósmicos e Altas Energias II

#### Turma A

#### Horário

Quinta – 14h às 16h na sala IF15

#### Créditos

2

#### Docente

Orlando Luis Goulart Peres

Adriano Lana Chercheglia

#### Pré-Requisitos

-

#### Ementa

Física de neutrinos e Física Além do Modelo Padrão: Introdução histórica, Estados de sabores e estados de massa, Matriz de Mistura, Oscilação de Neutrinos, Neutrinos em duas famílias, Comprimento de oscilação, Efeito da Meio na propagação de neutrinos, Comprimento de interação, Decoerência, Comprimento de decoerência, Neutrinos em três famílias, Oscilação de neutrinos com uma escala dominante, Probabilidade de oscilação de neutrinos para três famílias: computação de uma série perturbativa, Neutrinos de Majorana, Física Além do Modelo Padrão: Interações efetivas, Operadores de dimensão superior, Neutrinos estéreis, decaimento de neutrinos, interações não padrão neutras e carregadas.

#### Objetivos

Formar pesquisadores com conhecimento em física de neutrinos e em física além do modelo padrão. Apresentar o quadro atual de pesquisa em neutrinos e seus desafios. Familiarização da fenomenologia de neutrinos.

## Programa

- Introdução e Motivação Histórica: breve revisão da física de partículas até o Modelo Padrão; descoberta dos neutrinos; primeiros experimentos.
- Neutrinos no Modelo Padrão: correntes neutras e carregadas; ausência de massa de neutrinos.
- Estados de Sabor e Estados de Massa: definição e formalismo de mistura; matriz PMNS;
- Oscilação de Neutrinos em Vácuo: derivação da fórmula de oscilação; comprimento de oscilação; interpretação fenomenológica.
- Oscilações em Duas Famílias: Casos Experimentais - Experimentos solares e atmosféricos; Super-Kamiokande, SNO, KamLAND.
- Efeito do Meio: Oscilação em Matéria (Efeito MSW) -Derivação do potencial efetivo; ressonância MSW; aplicações astrofísicas.
- Interações, Decoerência e Comprimentos Característicos: comprimento de interação e de decoerência; efeitos de dispersão e perda de coerência; feixes de longa distância.
- Oscilações em Três Famílias: extensão para três massas; violação de CP; hierarquia normal e invertida; expressão geral da probabilidade.
- Aproximações e Escalas Dominantes: limite de uma escala dominante; expansões perturbativas; aplicação a experimentos como T2K e NOvA.
- Computação Perturbativa das Oscilações: séries perturbativas; efeitos de matéria de primeira ordem; comparação com soluções exatas.
- Neutrinos de Majorana: diferenças entre Dirac e Majorana; violação de número leptônico; decaimento beta duplo sem neutrinos; mecanismo de seesaw.
- Física Além do Modelo Padrão: Interações Efetivas - Teoria de Campos Efetiva; operadores de dimensão 5 e 6; operador de Weinberg; simetrias e novas escalas.
- Neutrinos Estéreis, Decaimento e Interações Não Padrão: motivação para neutrinos estéreis; modelos 3+1; decaimentos; interações não padrão; descrição via teoria efetivas.
- Perspectivas: experimentos atuais e futuros (DUNE, Hyper-K, JUNO, IceCube); questões em aberto.

## Bibliografia

- 1) Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, *C. Giunti, C. W. Kim*, Oxford University Press, Oxford, UK, 2007. ISBN 978-0-19-850871-7.
- 2) <https://global.oup.com/academic/product/fundamentals-of-neutrino-physics-and-astrophysics-9780198508717>.
- 3) Physics of Massive Neutrinos, *E. Lisi*, 2006. Dept. of Physics, Bari, Italy (Doctorate course 2006). <http://www.pd.infn.it/~laveder/unbound/scuole/2006/bari-2006/dottorato/>.
- 4) Neutrinos in Physics and Astrophysics, *C. W. Kim, A. Pevsner*, Harwood Academic Press, 1993. Contemporary Concepts in Physics, Vol. 8.
- 5) C. P. Burgess, *Introduction to Effective Field Theory: Thinking Effectively about Hierarchies of Scale*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- 6) A. Falkowski, Saclay lectures, <http://www.pd.infn.it/~feruglio/Falkowski.pdf> , 2017
- 7) T. Cohen, “As Scales Become Separated: Lectures on Effective Field Theory,” PoS TASI2018, 011 (2019) [arXiv:1903.03622 [hep-ph]].
- 8) A. V. Manohar, “Introduction to Effective Field Theories,” Les Houches lectures, [arXiv:1804.05863 [hep-ph]].

## Critério de Avaliação

Os alunos resolverão listas de problemas em casa.