

# Ementa

## Introdução à Física de Astropartículas

(formalmente Top. de fis. de partículas e campos – B (FIW 721/821)

2022/2)

**Prof. João R. T. de Mello Neto**

Instituto de Física - UFRJ

---

### 1 Introdução

Pretendemos abordar neste curso a física de astropartículas, principalmente aos tópicos de física estudados nos experimentos Pierre Auger, Deep Underground Neutrino Detector (DUNE) e Ground Radio Array Neutrino Detector (GRAND). Trataremos tanto de física de neutrino de aceleradores, neutrinos de altíssima energias quanto de neutrinos astrofísicos, de raios cósmicos de altíssimas energias e matéria escura. O curso consistirá de discussão de artigos recentes sobre os vários temas, provavelmente precedidos de pequenos artigos de revisão do assunto em pauta ou de capítulos de referências básicas. Como exemplo de artigos de revisão gerais teremos [Ell+19; Cli19; Her20; Bau18]. Pretendemos discutir publicações recentes relacionadas ao experimento DUNE [Abi+20c; Abi+20a; Abi+20d; Abi+20b; Abi+18a; Abi+18b; Abi+18b] como um exemplo de experimento de física neutrino em aceleradores e GRAND [Ack+19b; Ack+19a; Álv+20; Alv+19] como um estudo de caso de experimento de raios cósmicos de altíssimas energias, multi-mensageiros e raios cósmicos. Artigos relacionados ao experimento Pierre Auger também serão discutidos [Mat+20; Bar20; Bit+19]. E finalmente artigos sobre matéria escura relacionados ao experimento DUNE [BCZ15; Ber+20; Aga+14] também serão considerados.

Como referências de suporte de física básica utilizaremos *Neutrino Physics*, Kai Zuber, 2020 e *The State of the Art of Neutrino Physics*, Antonio Ereditato, 2018 que fazem uma revisão bastante atual e acessível ao assunto [Zub20; Ere18]. Também usaremos como referência básica um livro recente que faz revisão da física de raios cósmicos *Cosmic Rays and Particle Physics*, Thomas Gaisser, Ralph Engel e Elisa Resconi, 2016 [GER16]. E finalmente, como referência mais geral de física de neutrinos utilizaremos *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*, Carlo Giunti, Carlo e Chung W. Kim, 2007 [GK07].

A avaliação levará em conta participação em sala e seminários. Estamos propondo um curso no formato híbrido de modo que pesquisadores do exterior possam ocasionalmente participar de discussões com a turma.

## 2 Tópicos

- Física básica de raios cósmicos.
- Detecção de raios cósmicos e neutrinos de altíssimas energias por meio de ondas eletromagnéticas.
- Raios cósmicos de altíssimas energias;
- Fontes de raios cósmicos de altíssimas energias;
- Propriedades dos neutrinos;
- Massas dos neutrinos e física além do modelo padrão ;
- Procura direta das massas dos neutrinos;
- Oscilação de neutrinos;
- Neutrinos atmosféricos;
- Neutrinos solares;
- Neutrinos de supernovas;
- Neutrinos cósmicos de ultra-alta energia;
- Neutrinos em cosmologia;
- Neutrinos e matéria escura.

### 3 Bibliografia

- [Abi+18a] B. Abi et al. “The DUNE Far Detector Interim Design Report Volume 1: Physics, Technology and Strategies”. In: (July 2018). arXiv: [1807.10334](https://arxiv.org/abs/1807.10334) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
- [Abi+18b] B. Abi et al. “The DUNE Far Detector Interim Design Report, Volume 3: Dual-Phase Module”. In: (July 2018). arXiv: [1807.10340](https://arxiv.org/abs/1807.10340) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
- [Abi+20a] Babak Abi et al. “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume I Introduction to DUNE”. In: *JINST* 15.08 (2020), T08008. DOI: [10.1088/1748-0221/15/08/T08008](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/T08008). arXiv: [2002.02967](https://arxiv.org/abs/2002.02967) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
- [Abi+20b] Babak Abi et al. “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume II DUNE Physics”. In: (Feb. 2020). arXiv: [2002.03005](https://arxiv.org/abs/2002.03005) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].
- [Abi+20c] Babak Abi et al. “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume III DUNE Far Detector Technical Coordination”. In: *JINST* 15.08 (2020), T08009. DOI: [10.1088/1748-0221/15/08/T08009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/T08009). arXiv: [2002.03008](https://arxiv.org/abs/2002.03008) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
- [Abi+20d] Babak Abi et al. “Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume IV Far Detector Single-phase Technology”. In: *JINST* 15.08 (2020), T08010. DOI: [10.1088/1748-0221/15/08/T08010](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/T08010). arXiv: [2002.03010](https://arxiv.org/abs/2002.03010) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)].
- [Ack+19a] Markus Ackermann et al. “Astrophysics Uniquely Enabled by Observations of High-Energy Cosmic Neutrinos”. In: *Bull. Am. Astron. Soc.* 51 (2019), p. 185. arXiv: [1903.04334](https://arxiv.org/abs/1903.04334) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
- [Ack+19b] Markus Ackermann et al. “Fundamental Physics with High-Energy Cosmic Neutrinos”. In: *Bull. Am. Astron. Soc.* 51 (2019), p. 215. arXiv: [1903.04333](https://arxiv.org/abs/1903.04333) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
- [Aga+14] Kaustubh Agashe, Yanou Cui, Lina Necib, and Jesse Thaler. “(In)direct detection of boosted dark matter”. In: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2014.10 (Oct. 2014), pp. 062–062. ISSN: 1475-7516. DOI: [10.1088/1475-7516/2014/10/062](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/10/062). URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2014/10/062>.
- [Alv+19] Rafael Alves Batista, Rogerio M. de Almeida, Bruno Lago, and Kumiko Kotera. “Cosmogenic photon and neutrino fluxes in the Auger era”. In: *JCAP* 01 (2019), p. 002. DOI: [10.1088/1475-7516/2019/01/002](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/01/002). arXiv: [1806.10879](https://arxiv.org/abs/1806.10879) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].

- [Álv+20] Jaime Álvarez-Muñiz et al. “The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and Design”. In: *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 63.1 (2020), p. 219501. DOI: [10.1007/s11433-018-9385-7](https://doi.org/10.1007/s11433-018-9385-7). arXiv: [1810.09994](https://arxiv.org/abs/1810.09994) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/hep)].
- [Bar20] A. Barbano. “Search for correlations of high-energy neutrinos and ultra-high energy cosmic rays”. In: *PoS ICRC2019* (2020), p. 842. DOI: [10.22323/1.358.0842](https://doi.org/10.22323/1.358.0842). arXiv: [2001.09057](https://arxiv.org/abs/2001.09057) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/hep)].
- [Bau18] Laura Baudis. “The Search for Dark Matter”. In: (Jan. 2018). DOI: [10.1017/S1062798717000783](https://doi.org/10.1017/S1062798717000783). arXiv: [1801.08128](https://arxiv.org/abs/1801.08128) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/archive/astro)].
- [BCZ15] Joshua Berger, Yanou Cui, and Yue Zhao. “Detecting boosted dark matter from the Sun with large volume neutrino detectors”. In: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2015.02 (Feb. 2015), pp. 005–005. DOI: [10.1088/1475-7516/2015/02/005](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/02/005). URL: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/02/005>.
- [Ber+20] Joshua Berger, Yanou Cui, Mathew Graham, Lina Necib, Gianluca Petrillo, Dane Stocks, Yun-Tse Tsai, and Yue Zhao. *Prospects for Detecting Boosted Dark Matter in DUNE through Hadronic Interactions*. 2020. arXiv: [1912.05558](https://arxiv.org/abs/1912.05558) [[hep-ph](https://arxiv.org/archive/hep)].
- [Bit+19] J. Biteau, T. Bister, L. Caccianiga, O. Deligny, A. di Matteo, T. Fujii, D. Harari, K. Kawata, et al. “Covering the celestial sphere at ultra-high energies: Full-sky cosmic-ray maps beyond the ankle and the flux suppression”. In: *EPJ Web of Conferences* 210 (2019). Ed. by I. Lhenry-Yvon, J. Biteau, O. Deligny, and P.Editors Ghia, p. 01005. ISSN: 2100-014X. DOI: [10.1051/epjconf/201921001005](https://doi.org/10.1051/epjconf/201921001005). URL: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201921001005>.
- [Cli19] James M. Cline. “TASI Lectures on Early Universe Cosmology: Inflation, Baryogenesis and Dark Matter”. In: *PoS TASI2018* (2019), p. 001. arXiv: [1807.08749](https://arxiv.org/abs/1807.08749) [[hep-ph](https://arxiv.org/archive/hep)].
- [Ell+19] Richard Keith Ellis et al. “Physics Briefing Book: Input for the European Strategy for Particle Physics Update 2020”. In: (Oct. 2019). arXiv: [1910.11775](https://arxiv.org/abs/1910.11775) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)].
- [Ere18] Antonio Ereditato, ed. *The State of the Art of Neutrino Physics*. World Scientific, 2018. ISBN: 978-981-322-608-1. DOI: [10.1142/10600](https://doi.org/10.1142/10600).
- [GER16] Thomas K. Gaisser, Ralph Engel, and Elisa Resconi. *Cosmic Rays and Particle Physics: 2nd Edition*. Cambridge University Press, June 2016. ISBN: 978-0-521-01646-9.

- [GK07] Carlo Giunti and Chung W. Kim. *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*. Apr. 2007. ISBN: 978-0-19-850871-7.
- [Her20] Carlos Pérez de los Heros. *Status of direct and indirect dark matter searches*. 2020. arXiv: [2001.06193](https://arxiv.org/abs/2001.06193) [astro-ph.HE].
- [Mat+20] A. di Matteo et al. "Full-sky searches for anisotropies in UHECR arrival directions with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array". In: *PoS ICRC2019 (2020)*, p. 439. DOI: [10.22323/1.358.0439](https://doi.org/10.22323/1.358.0439). arXiv: [2001.01864](https://arxiv.org/abs/2001.01864) [astro-ph.HE].
- [Zub20] Kai Zuber. *Neutrino physics*. 3rd ed. CRC Press, 2020.

Disciplina: "Filmes finos, Cristalografia e caracterização de propriedades magnéticas"  
Professores Benjamin Salles e Marcelo Sant'Anna

Tóp. de Fís. da Mat. Cond. e Mec. Estat. A (FIW 726/826) - 2022/2

O curso tem como objetivo oferecer aos alunos uma introdução à pesquisa experimental em física dos sólidos envolvendo crescimento de filmes finos, cristalografia e caracterização de propriedades magnéticas. Serão utilizados exclusivamente os equipamentos multiusuários do Instituto de Física da UFRJ. Não é suposto por parte dos alunos conhecimento prévio de técnicas experimentais.

O trabalho será realizado por grupo de 2 ou 3 alunos. Cada grupo fabricará um filme fino (espessura da ordem de dezena de nanômetros) e caracterizará suas propriedades magnéticas e estruturais. Listamos abaixo os experimentos que serão realizados:

1. Fabricar filmes finos de NiFe por Sputtering;
  - a. Cada grupo fabricará um filme de NiFe com características ligeiramente diferente (espessura, temperatura de deposição, tratamento térmico);
2. Caracterizar as propriedades magnéticas dos filmes por medidas de magnetometria SQUID
  - a. Medidas de magnetização em função da temperatura;
  - b. Medidas de magnetização em função do campo magnético;
3. Caracterizar as propriedades estruturais das amostras por difração de raio X
  - a. Medidas de reflectometria
  - b. Medidas de difração de raio X rasante (GIXRD - Grazing incidente X ray diffraction)

### **Ementa e cronograma:**

O curso será estruturado com aulas semanais de 4h. Apresentamos abaixo o cronograma do curso por semana:

1. Apresentação do curso / aula sobre fabricação de filmes finos com ênfase em filmes fabricados por sputtering
  - a. Epitaxia por feixe molecular
  - b. Ablação a laser
  - c. Sputtering
  - d. Epitaxia em fase de vapor metalorgânico
2. Trabalho bibliográfico sobre filmes finos de NiFe dando ênfase às propriedades magnéticas e estruturais.
3. Fabricação dos filmes finos por sputtering.
4. Aula sobre magnetismo de filmes finos.
  - a. interações magnéticas;
  - b. fase magnéticas;

- c. reversão da magnetização;
  - d. Medidas de magnetização;
- 5. Medidas magnéticas dos filmes finos;
- 6. Medidas magnéticas dos filmes finos;
- 7. Aula sobre difração em matéria condensada
  - a. difração e comprimento de onda de partículas;
  - b. lei de Bragg;
  - c. Transformada de Fourier e espaço recíproco;
  - d. Planos de difração e índices de Miller;
  - e. fator de estrutura e fator atômico;
- 8. Aula sobre medidas de difração de raio X e apresentação do equipamento;
  - a. Espaço recíproco e esfera de Ewalds;
  - b. Difração de pó -  $\theta$ - $2\theta$
  - c. Difração de monocristal
  - d. Difração de filmes finos
    - i. epitaxial vs policristalino
    - ii.  $\theta$ - $2\theta$
    - iii. reflectometria
- 9. Medidas de difração de raio X;
- 10. Medidas de difração de raio X;
- 11. Análise das medidas de raio X;
- 12. Apresentação oral dos resultados.

#### Bibliografia:

- 1- "Thin Film Growth: Physics, Materials Science and Applications", Editor: Zexian Cao, Woodhead Publishing (2011)
- 2- "The Basics of Crystallography and Diffraction", C. Hammond
- 3- "Elements of X-ray diffraction", B. D. Cullity
- 4- "Introduction to Magnetic Materials", B. D. Cullity, C. D. Graham

## Teoria de Campos Estatística

L. Moriconi (IF-UFRJ).

### I. Revisão de mecânica estatística:

- a) Conexão mecânica estatística -- termodinâmica.
- b) Fenomenologia das transições de fase.
- c) Argumentos de Peierls.

### II. Modelo de Ising como um protótipo de sistema crítico:

- a) Teoria do campo médio.
- b) Expansões de baixas e altas temperaturas.
- c) Solução exata em duas dimensões.

### III. Teoria de Landau-Ginzburg e o problema infra-vermelho:

- a) Formalismo perturbativo.
- b) Aproximação de Hartree-Fock.
- c) Expansão em  $1/N$ .

### IV. O método do grupo de renormalização:

- a) Blocos de spin de Kadanoff e relações de escala.
- b) Grupo de renormalização à la Wilson.
- c) Renormalização em dimensão fixa.
- d) Renormalização da teoria crítica.

### V. Comportamento dos sistemas críticos abaixo de $T_c$ :

- a) Quebra espontânea de simetria.
- b) Modelo-sigma não linear e expansão em  $2+\epsilon$ .
- c) Grupo de renormalização no modelo XY.

### VI. Teoria de campos euclídeana e teoria quântica de campos:

- a) Modelo de Ising em duas dimensões e férmions de Majorana.
- b) Bosonização e o cálculo do expoente crítico  $h = 1/4$ .
- c) Fenômenos críticos quânticos.

### VII. Evolução de sistemas fora do equilíbrio e dinâmica crítica:

- a) Equações de Langevin e Fokker-Planck.
- b) Formalismo de Martin-Siggia-Rose-Janssen-de Dominicis.
- c) Comportamento crítico do modelo de Kardar-Parisi-Zhang.

### VIII. Introdução às teorias conformes em duas dimensões:

- a) Álgebra de Virasoro; Identidades de Ward.
- b) Modelos Minimais.
- c) Teorema-c e perturbações ao redor do ponto crítico.

Avaliação: listas de exercícios e seminários.

Referências principais:

- G. Parisi, "Statistical Field Theory", *Frontiers in Physics*, v. 66, Addison-Wesley Publishing Company (1988).
- J. Zinn-Justin, "Quantum Field Theory and Critical Phenomena", Oxford University Press (1996).
- D. Amit, "Field Theory, the Renormalization Group, and Critical Phenomena", McGraw-Hill, New York (1978).
- J. Cardy, "Scaling and Renormalization in Statistical Physics", Cambridge Lect. Notes in Phys. 5, Cambridge University Press (1996).