

# Tópicos de Física de Partículas e Campos A (FIW820)

Professor: Leandro Salazar de Paula - Semestre: 2024/2

## Ementa

- I. Modelo Padrão
  - A. Revisão do Modelo Padrão das Partículas Elementares
    1. Sucessos e limitações do Modelo Padrão, uma revisão de resultados recentes
    2. Decaimentos do méson  $B_c$  em quarks leves
    3. Uso do  $B_c$  para testar extensão do Modelo Padrão
- II. O detector LHCb
  - A. As oportunidades experimentais oferecidas pelo acelerador LHC
  - B. O detector LHCb
    1. Características do detector - reconstrução e armazenagem dos dados
      - a) tratamento de grandes volumes de dados (big data)
    2. Ambiente de análise do LHCb - trigger e ferramentas específicas
- III. Estatística aplicada a análise de dados
  - A. O uso de simulações na análise de dados
    1. Estatística multivariável
    2. Ajuste binado e não binado de funções
  - B. O uso de canais de controle
  - C. Métodos de IA
    1. Boost Decision Trees - BDT
  - D. Incertezas estatísticas e sistemáticas

## Bibliografia

- M. Thomson, Modern Particle Physics, University of Cambridge, 2013
- D. Griffiths, Introduction to Elementary Particles, Wiley, 2008
- LHCb Collab. Phys Rev D94, 091102(R), 2016
- J. Martins, Contribution to the Analysis of the  $B_c^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$  Decay in the LHCb Experiment, Tese de mestrado do IF-UFRJ orientada por L. de Paula e A. Hicheur
- A. A. Alves Jr. et al, The LHCb detector at the LHC, JINST, 3:S08005, 2008
- S. Agostinelli et al, Geant4: a simulation toolkit. Nucl. Instrum. Meth., A506:250, 2003
- The RooFit Toolkit for Data Modeling: [https://root.cern.ch/doc/master/group\\_\\_Roofit.html](https://root.cern.ch/doc/master/group__Roofit.html)
- B. P. Roe, H. Yang, J. Liu, I. Stancu and G. McGregor. Boosted decision trees as an alternative to artificial neural networks for particle identification. Nucl. Instrum. Meth, A 543:577, 2005

# Tópicos de Física Teórica B (FIW839)

**Título:** *Efeitos do vácuo quântico  
no contexto da Eletrodinâmica Quântica*

**Professor:** *Carlos Farina*  
*Instituto de Física, 2º semestre de 2024*

Rio de Janeiro, 13 de julho de 2024

Prezado Coordenador da Pós-Graduação,

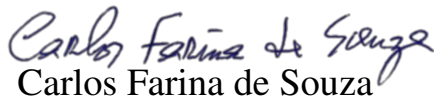
Apresento, aqui, minha solicitação para ministrar um curso de Tópicos de Física Teórica na pós-graduação de nosso instituto no 2º semestre de 2024. O curso está dividido em cinco módulos, sendo os dois primeiros de caráter geral e introdutório. Esse curso pode ser acompanhado por alunos que estejam no final da graduação, desde que já tenham feito Mecânica Quântica II e Eletromagnetismo II.

A avaliação dos alunos será feita da seguinte forma:

- cada estudante deverá redigir até o final do curso um texto, no formato de um artigo científico, ou seja, com título, *abstract*, introdução, metodologia utilizada, resultados e conclusões, sobre um tema relacionado direta ou indiretamente aos tópicos discutidos no curso. Esse texto deve seguir os padrões de artigos publicados em periódicos científicos de reconhecida qualidade.
- Cada estudante deverá apresentar um seminário de final de curso sobre o artigo escrito (veja o item anterior).
- Cada estudante deverá apresentar pelo menos um pequeno seminário durante o curso sobre algum tema que lhe seja solicitado pelo professor.

A seguir, descrevo os tópicos a serem abordados ao longo do curso. Alguns deles poderão ser apresentados como seminários dos alunos (veja o último subitem).

Atenciosamente,

  
Carlos Farina de Souza

# EMENTA

## 1 História da energia de ponto-zero na antiga teoria quântica

- Radiação de corpo negro e a primeira teoria de Planck
- Segunda teoria de Planck e a história da energia de ponto-zero
- Modelo de Einstein-Hopf
- Energia de ponto-zero no modelo de Einstein-Stern
- Fórmula de flutuação de Einstein de 1909
- Coeficientes A e B de Einstein
- Calores específicos e energia de ponto zero
- Difração de Raios-X por redes cristalinas e energia de ponto zero

## 2 Quantização canônica do campo eletromagnético

- Revisão da quantização do oscilador harmônico (OH)
- Quantização do campo eletromagnético no espaço livre sem fontes
- Espaço de Fock
- Quantização do campo eletromagnético na presença de uma placa perfeitamente condutora; idem para o caso de duas placas paralelas e perfeitamente condutoras
- Momento linear e momento angular do campo eletromagnético
- Algumas relações de comutação para os campos eletromagnéticos quantizados
- Outros estados do campo
  - estados coerentes: definição, operador de Glauber e algumas de suas propriedades; OH sob ação de uma força externa com dependência temporal genérica e estados coerentes
  - estados comprimidos: definição, operador de compressão e algumas de suas propriedades; OH com frequência dependente do tempo e estados comprimidos

- Estados puros, misturas estatísticas e o operador densidade
- Radiação térmica
- Interação átomo-campo de radiação no calibre de Coulomb
  - Interação de  $N$  partículas carregadas com o campo eletromagnético clássico no formalismo lagrangiano
  - Interação de  $N$  partículas carregadas com o campo eletromagnético clássico no formalismo hamiltoniano
  - Descrição quântica da interação de  $N$  partículas carregadas com o campo eletromagnético
  - Aproximação de dipolo elétrico e a transformação para o hamiltoniano de interação  $\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}_\perp$
  - O campo quântico de reação de radiação e a massa eletromagnética
  - O campo quântico de um dipolo oscilante no espaço livre
- Alguns efeitos do vácuo quântico (da EDQ)
  - **deslocamento Lamb:** experimento de Lamb e Retherford [12]; cálculo de Bethe [13]; interpretação de Welton [14] e interpretação de Feynman [15]
  - **emissão espontânea (EE):** fórmula para a taxa de EE de um emissor quântico na presença de corpos em sua vizinhança em termos dos modos do campo eletromagnético; aplicações introdutórias: emissor no espaço livre (Dirac 1927); emissor próximo a uma placa perfeitamente condutora e entre duas placas perfeitamente condutoras e paralelas entre si.
  - **momento magnético do elétron:** um pouco de sua história; método de Welton para um cálculo (bastante) simplificado do momento anômalo do elétron em ordem  $\alpha$ .

### 3 Forças dispersivas

- **Modelo de dipolos flutuantes** para a interação de van der Waals não-retardada
  - método semiclassico para a força de London a partir da variação da energia de ponto zero dos átomos devido à interação dos dipolos flutuantes
  - não-aditividade das forças de London-van der Waals [5];
  - força entre um átomo polarizável eletricamente e outro polarizável magneticamente no regime não-retardado [6];

- aplicação do método dos dipolos flutuantes no cálculo da interação de London-van der Waals em sistemas mais complexos, como por exemplo: um átomo e uma parede perfeitamente condutora e um átomo e uma esfera perfeitamente condutora.
- Força de London-van der Waals entre dois átomos: cálculo utilizando teoria de perturbação de segunda ordem em mecânica quântica
- **Método de Eberlein-Zietal** para a interação de van der Waals dispersiva entre um átomo e uma superfície condutora de formato arbitrário. Aplicações introdutórias: (i) átomo-parede perfeitamente condutora; (ii) átomo-esfera perfeitamente condutora
- **Método de Eberlein-Zietal em sistemas não triviais**, como por exemplo, átomo-esferóide condutor prolato/oblato, átomo-semiplano condutor infinito, átomo-cilindro condutor infinito, entre outros.
- **Interação dispersiva entre dois átomos para qualquer regime de distância:** cálculo de 4<sup>a</sup> ordem em teoria de perturbação em Eletrodinâmica Quântica. Análise dos casos particulares de curtas distâncias (força de London) e longas distâncias (comumente chamada de força de Casimir-Polder)
- Cálculo para qualquer regime de distância da interação dispersiva entre um átomo e uma parede perfeitamente condutora; análise dos casos particulares de curtas distâncias (força de Lennard-Jones) e longas distâncias (força de Casimir-Polder calculada em 1948)
- Alguns experimentos importantes
  - experimento de Yale [24]: o primeiro a verificar, quantitativamente, efeitos de retardamento na força exercida sobre um feixe de átomos na presença de placas condutoras
  - experimento baseado em reflexão quântica [26];
  - experimento realizado com espelho atômico com ondas evanescentes [25]

## 4 Efeito Casimir estático

- O efeito Casimir e sua origem na física de colóides
- O método global de Casimir baseado na energia de ponto-zero
- Cálculo da força de Casimir por unidade de área entre duas placas perfeitamente condutoras no vácuo via método de Casimir

- Efeito Casimir para outros campos e sob condições de contorno variadas: campo escalar sem massa e massivo sob condições de Robin; campo fermiônico sem massa e massivo sob condições do MIT
- Outros métodos globais de cálculo da densidade de energia de Casimir (método via funções de Green, método de Schwinger, método da função zeta generalizada) e algumas aplicações
- O método local baseado no tensor energia-momento e aplicações
- O teorema de força de proximidade e aplicações simples: efeito Casimir entre plano e esfera, ambos perfeitamente condutores
- Correções térmicas ao efeito Casimir
- **Fórmula de Lifshitz** : força de Casimir entre regiões semi-infinitas preenchidas por dielétricos e separadas por uma fatia de vácuo
  - Dedução da fórmula de Lifshitz e aplicações introdutórias
  - Dependência com a temperatura para placas perfeitamente condutoras
  - Placas com condutividade finita
- **Interação dispersiva entre átomo polarizável e região semi-infinita preenchida por um meio dispersivo** (na literatura essa interação é usualmente denominada interação de Casimir-Polder)
- **Experimentos de Casimir**: desde o primeiro experimento realizado por Sparnaay (1958) até os inúmeros experimentos modernos e de alta precisão, iniciados com Lamoreaux (1997) e Mohideen e Roy (1998)
- **Miscelânea** (possíveis tópicos para seminários de alunos)
  - controle da interação de Casimir-Polder e mecanismos de controle da reflexão quântica (fenômeno em que átomos frios incidem sobre paredes e, mesmo atraídos por elas, têm alta probabilidade de serem refletidos).
  - controle da taxa de EE por meio de agentes externos que possam modificar continuamente a vizinhança do emissor quântico
  - cálculo da taxa de criação de pares elétron-pósitron (mecanismo de Schwinger) por campos externos
  - cálculo do efeito Casimir via método de espalhamento
  - correções radiativas ao efeito Casimir; efeito Casimir e cosmologia
  - aplicação à física hadrônica: EPZ no chamado modedo de sacola do MIT
  - força de Casimir lateral entre superfícies corrugadas e torque de Casimir

## 5 Breve introdução feito Casimir dinâmico

- Uma breve história do efeito Casimir dinâmico (ECD)
- Força sobre uma fronteira em movimento não-relativístico em 1+1 dimensões
- Criação de partículas por movimento não relativístico de fronteira em 1+1 dimensões
- Teorema de Flutuação-Dissipação (TFD) e o ECD
- ECD em cavidades unidimensionais com condições de contorno de Dirichlet, Neumann e Robin
- ECD em 3+1 dimensões com uma única placa em movimento: campo escalar sem massa e campo eletromagnético
- Modelos análogos para o ECD: (i) simulação do ECD pela imposição de condições de contorno em uma fronteira fixa porém com propriedades dependentes do tempo; (ii) experimentos relacionados ao ECD

## Referências

- [1] H. Margenau and N.R. Kestner, *Theory of Intermolecular Forces* (Pergamon, New York, 1969).
- [2] Dieter Langbein, *theory of Van der Waals Attraction*, Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 72 (Springer-Verlag, Berlin, 1974).
- [3] V. Adrian Parsegian, “*Van der Waals Forces: a Handbook for Biologists, Chemists, Engineers, and Physicists*”, Cambridge University Press, 2006.
- [4] Jacob Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces* (Academic Press, 2a ed., 1991).
- [5] C. Farina, F.C. Santos e A.C. Tort, Am. J. Phys. **67** (1999) 344-349;
- [6] C. Farina, F.C. Santos e A.C. Tort, Am. J. Phys. **70** (2002) 421-423.
- [7] P.W. Milonni, *The Quantum Vacuum: An Introduction to Quantum Electrodynamics* (Academic, New York, 1994).
- [8] R. Loudon, *The Quantum Theory of Light* (Oxford University Press, 1981).
- [9] Leonard Mandel e Emil Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics*, (Cambridge University Press, 1995).
- [10] D.P. Craig e T. Thirunamachandran, *Molecular Quantum Electrodynamics* (Academic Press Inc., 1984).
- [11] G. Compagno, R. Passante e F. Persico, *Atom-Field Interactions and Dressed Atoms* (Cambridge University Press, 1995).

- [12] Willis E. Lamb and Robert C. Retherford, *Phys. Rev.* **72**, 241 (1947).
- [13] H.A. Bethe, *Phys. Rev.* **72**, 241 (1947).
- [14] T.A. Welton, *Phys. Rev.* **74**, 1157 (1948).
- [15] E.A. Power, *Am. J. Phys.* **34**, 516 (1966).
- [16] E.J.W. Verwey, J.T.G. Overbeek and K. van Nes, *J. Phys. and Colloid Chem.* **51**, 631 (1947).
- [17] E. M. Lifshitz, *Sov. Phys. JETP* **2**, 73 (1956); I.E. Dzyaloshinskii, E.M. Lifshitz and L.P. Pitaevskii, *Advan. Phys.*, **10** (38), 165 (1961).
- [18] E.S. Sabisky and C.H. Anderson, *Phys. Rev. A* **7**, 790 (1973).
- [19] Stefan Yoshi Buhmann e Dirk-Gunnar Welsch, *Dispersion forces in macroscopic quantum electrodynamics*, arXiv:quant-ph/0608118v1, (2006).
- [20] F. London *Z. Physik* **63**, 245 (1930).
- [21] H.B.G. Casimir and D. Polder, *Phys. Rev.* **73**, 360 (1948).
- [22] D. Tabor and R.H.S. Winterton, *Nature* **219**, 1120 (1968); *Proc. Roy. Soc. Lond.* **A312**, 435 (1969).
- [23] D. Raskin e P. Kusch, *Phys. Rev.* **179**, 712 (1969).
- [24] C.I. Sukenik, M.G. Boshier, D. Cho, V. Sandoghdar and E.A. Hinds *Phys. Rev. Lett.* **70**, 560 (1993).
- [25] A. Landragin, J.-Y. Courtois, G. Labeyrie, N. Vanteenkiste, C. I. Westbrook e A. Aspect, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1464 (1996).
- [26] F. Shimizu, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 987 (2001).
- [27] H.B.G. Casimir *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* **51**, 793 (1948).
- [28] E. Elizalde e A. Romeo, *Am. J. Phys.* **59**, 711 (1991).
- [29] C. Farina, *Braz. J. Phys.* **36**, 1137 (2006).
- [30] K.A. Milton, *Physical Manifestations of Zero-Point Energy: the Casimir Effect*, (World Scientific, New Jersey, 2001).
- [31] Teses de mestrado e doutorado de vários alunos do grupo de Casimir.
- [32] Artigos publicados por membros do grupo de Casimir desde a sua formação.
- [33] P.A. Maia Neto, *J. Phys. A* **27**, 2167 (1994);  
P. A. Maia Neto and L.A.S. Machado, *Phys. Rev. A* **54**, 3420 (1996);  
D.F. Mundarain and P.A. Maia Neto, *Phys. Rev. A* **57**, 1379 (1998).