



---

## **PROJETO – DE – PESQUISA**

### **Programa de Iniciação científica e Tecnológica**

### **CBPF**

Nome do pesquisador ou tecnologista (orientador interno):

Maurício Hippert Teixeira

Coordenação: COSMO

Nome do pesquisador ou tecnologista (coorientador/colaborador externo, se houver): \_\_\_\_\_

Instituição de Pesquisa Externa (se houver): \_\_\_\_\_

Título do projeto:

Interações fortes e matéria em condições extremas

Palavra-chave: QCD, estrelas de nêutrons, colisões de íons pesados

Área de conhecimento: Física nuclear, física de partículas e campos

Pré-requisito desejado (se houver): \_\_\_\_\_

Possibilidade de orientação remota:       Sim       Não

Resultante principal do Projeto:

- Publicação (horizonte de 4 anos).
- Preparação do bolsista para área científica.
- Produto tecnológico.
- Produto educacional ou didático.

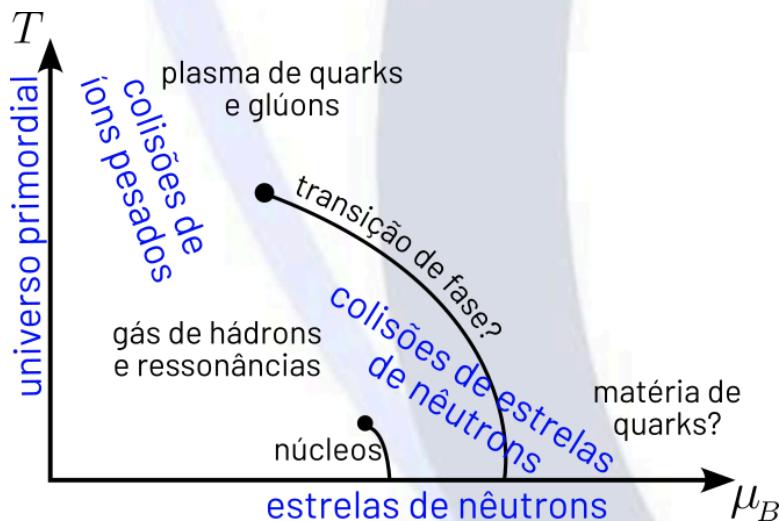
Rio de Janeiro, 17 de Abril de 2025

# Projeto

## Motivação

A teoria fundamental das interações fortes, a Cromodinâmica Quântica, ou QCD, descreve fenômenos físicos muito diversos dependendo de condições de temperatura, das densidades de diferentes partículas etc. Em condições comuns, suas partículas fundamentais, os quarks e glúons, estão sempre confinados em hadrons — ou seja, partículas como, por exemplo, o próton, o nêutron e o píon. No entanto, em condições suficientemente extremas, são esperadas fases exóticas da matéria em que os quarks e glúons deixam de estar confinados. Isso acontece, por exemplo, no plasma de quarks e glúons formado a temperaturas da ordem de centenas de milhares de vezes as encontradas no interior do sol.

Conjectura-se que haja uma transição de fase descontínua entre as fases confinada e desconfinada, presente apenas a altas densidades. Assim como as fases da água (sólida, líquida, gasosa) e de outros materiais, as diferentes fases da QCD podem ser organizadas em um diagrama de fases, como ilustrado abaixo.



Como mostrado na figura, oportunidades para a investigação empírica da QCD em condições extremas são encontradas em colisões relativísticas de íons pesados e em estrelas de nêutrons.

As colisões de íons pesados são experimentos em que dois núcleos se chocam a velocidades próximas à da luz, formando um plasma de quarks e glúons que se expande como um fluido antes de se converter em hadrons. Esses experimentos são realizados, por exemplo, no grande colisor de hadrons (LHC), na Europa, e no Laboratório Nacional de Brookhaven, nos EUA. Colisões de íons pesados com diferentes energias permitem explorar o diagrama de fases a alta temperatura e densidade de partículas.



Já as estrelas de nêutrons são objetos astrovísicos extremamente compactos, que podem abrigar em seu interior densidades que superam em algumas vezes as densidades encontradas no núcleo atômico. Uma estrela de nêutrons duas vezes mais massiva que o Sol teria um raio de apenas cerca de 12 quilômetros. A existência de fases exóticas da QCD nas camadas mais densas das estrelas de nêutrons é uma possibilidade em aberto. Quando duas estrelas de nêutrons se colidem, condições extremas de densidade e temperatura ocorrem simultaneamente. Essas colisões são tão poderosas que geram ondas gravitacionais que podem ser detectadas, a uma grande distância, na Terra.

### Pesquisa

A pesquisa realizada pelo bolsista será aplicada aos contextos das colisões de íons pesados relativísticas e das estrelas de nêutrons, tanto isoladas quanto em sistemas binários em colisão. Há múltiplas oportunidades de trabalho nessa direção.

Um ingrediente essencial para a descrição macroscópica da matéria em condições extremas é sua termodinâmica, conhecida apenas em regiões bastante específicas do diagrama de fases da QCD. Um trabalho interessante consistiria em construir interpolações flexíveis conectando essas regiões a regimes físicos de interesse, onde a termodinâmica da QCD não é totalmente compreendida, possibilitando explorar diferentes possibilidades.

Uma outra opção seria o trabalho com a hidrodinâmica relativística, amplamente usada para descrever a evolução dinâmica matéria em condições extremas. Em colisões de íons pesados, seria interessante estudar a evolução de correções viscosas fora do equilíbrio, a partir de cenários simplificados. Em colisões de estrelas de nêutrons, seria oportuno investigar o efeito de reações que dissipam energia via emissão de neutrinos.

### Metodologia

O desenvolvimento do projeto pode envolver uma série de tópicos teóricos, incluindo:

- a termodinâmica,
- fundamentos da mecânica estatística,
- bases da mecânica dos fluidos,
- a teoria da relatividade restrita,
- conceitos essenciais da física de partículas,
- noções introdutórias de física nuclear.

O trabalho do bolsista deve envolver ainda ferramentas computacionais, como métodos de Monte Carlo e a solução numérica de equações algébricas e/ou diferenciais, a partir de uma linguagem de programação conveniente — provavelmente, o Python.



## Bibliografia

1. *The phase diagram of dense QCD,*

Kenji Fukushima, Tetsuo Hatsuda  
Rept.Prog.Phys. 74 (2011), 014001

<https://arxiv.org/abs/1005.4814>

2. *Quark-Gluon Plasma, Heavy Ion Collisions and Hadrons,*

Edward Shuryak  
World Sci.Lect.Notes Phys. 85 (2024)

3. *Compact stars: Nuclear physics, particle physics, and general relativity*

N.K. Glendenning  
New York, USA: Springer (1997) 390 p

4. *Theoretical and experimental constraints for the equation of state of dense and hot matter*

MUSES Collaboration • Rajesh Kumar et al.  
Living Rev.Rel. 27 (2024) 1, 3

<https://arxiv.org/abs/2303.17021>

5. *Neutron stars and the dense matter equation of state: from microscopic theory to macroscopic observations*

Katerina Chatzioannou, H. Thankful Cromartie, Stefano Gandolfi, Ingo Tews, David Radice et al.

<https://arxiv.org/abs/2407.11153>