

## Estabilidade da Matéria Estranha de Quarks

Lucas Da Silva Lazzari<sup>1</sup>; Victor Paulo Gonçalves<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Pelotas – lucas.lazzari@outlook.com*

<sup>2</sup>*Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br*

### 1. INTRODUÇÃO

Com os avanços do Modelo Padrão da Física de Partículas (MOREIRA, 2009), realizados em grande parte nos Aceleradores de Partículas, hoje sabemos a constituição fundamental da matéria. Essa matéria que é formada por átomos, pode ser ainda mais discriminada. Os elétrons que orbitam em torno do núcleo, são partículas elementares, pois não possuem subestruturas no seu interior. Já as partículas que compõe o núcleo (prótons e nêutrons), não são fundamentais, e podem ser divididas em partículas elementares chamadas de quarks. Prótons e nêutrons são identificados como bárions, pois possuem três quarks cada. Dentro da teoria, os quarks são classificados em seis sabores: up, down, strange, charm, bottom e o top. Os sabores up e down são os únicos presentes na matéria usual. Além dessa propriedade, os quarks são as únicas partículas que possuem carga de cor, que é a carga responsável pela Interação Forte. Apesar de o Modelo Padrão descrever todas as partículas fundamentais, e suas respectivas interações (exceto a Interação Gravitacional), daremos foco apenas nos quarks e na Interação Forte, a fim de evoluirmos nas consequências da mesma. Na Interação Forte descrita pela Cromodinâmica Quântica (QCD), temos duas propriedades de interesse: o confinamento e a liberdade assintótica (ver GRIFFITHS, 1987). A primeira prevê que os quarks estão presos no interior dos hadrons (partículas formadas por quarks), enquanto que a segunda demonstra que os quarks comportam-se como livres no interior dessas estruturas.

Uma das possíveis consequências da QCD foi proposta por BODMER (1971), onde era discutido um núcleo colapsado, não mais formado por prótons e nêutrons, e sim, por “pacotes” maiores de quarks. WITTEN (1984) refinou tal modelo, afirmando que esses “pacotes” seriam uma matéria formada basicamente por quarks. Além disso, ainda propôs que a presença do quark strange, em altas densidades tornaria essa matéria mais estável que o isótopo de  $^{56}\text{Fe}$  (elemento mais estável encontrado na natureza), como estimamos em nossos cálculos. Hoje conhecemos essa matéria como Matéria Estranha de Quarks (SQM), e estuda-se a possibilidade de que esse seja o verdadeiro estado da matéria que interage fortemente. Espera-se que a SQM seja estável apenas em condições exóticas, como altas densidades e/ou temperaturas, podendo ser visto com mais detalhes na seção 3. Nesse trabalho procuramos comprovar essa estabilidade baseando-nos em alguns trabalhos anteriores, como os de JENSEN (1996) e FUNE (2011).

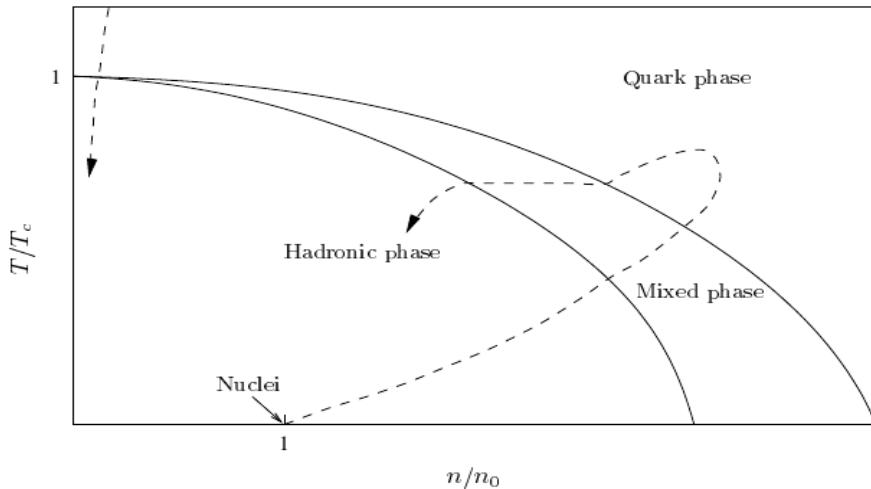
### 2. METODOLOGIA

A partir das possibilidades dos trabalhos de BODMER (1971) e WITTEN (1984), analisamos os trabalhos de JENSEN (1996) e FUNE (2011), calculando a energia de ligação (energia por bárion) da SQM em altas densidades. Os cálculos foram realizados utilizando o Modelo de Sacola do MIT (JAFFE, 1977), onde os hadrons se comportam como uma sacola que contem quarks. Com isso estimamos a estabilidade dessa matéria nessas condições exóticas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentro do modelo de BODMER (1971), e posteriormente no de WITTEN (1984) uma matéria formada por um plasma de quarks livres (sem as barreiras de prótons e nêutrons) pode ser o verdadeiro estado da matéria nessas condições exóticas, como mostra a figura 1. Passando de uma temperatura crítica, que de acordo com a QCD na Rede, é de aproximadamente 150 MeV, e/ou de uma densidade bariônica crítica, temos a desestruturação da matéria comum, e o que espera-se nesse modelo é a matéria de quarks. Também foi proposto por WITTEN (1984), que no Universo Primordial, onde temperatura e densidade tendiam ao infinito, que uma “sopa” de quarks e glúons era toda a matéria existente, e que ao decorrer da expansão do Universo e de seu resfriamento, chegamos na matéria ordinária atual, onde quarks e glúons estão confinados no interior dos hadrons.

Figura 1: Diagrama de fase dos estados da matéria que interage fortemente. (JENSEN, 1996)



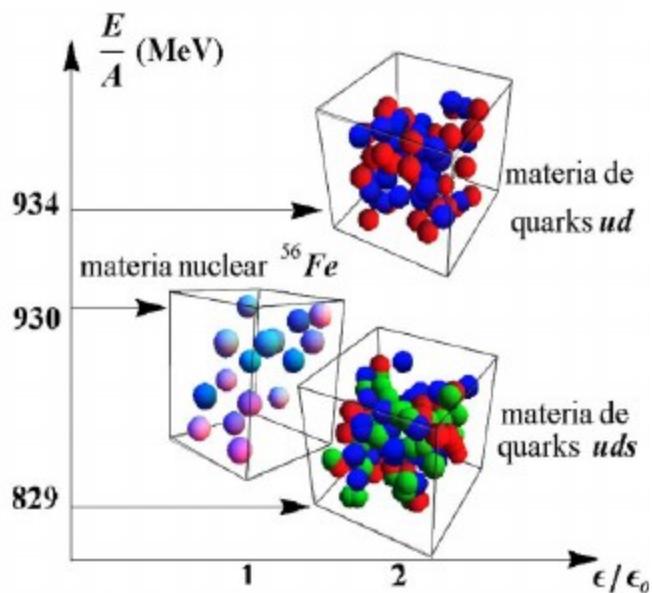
Calculamos a estabilidade desse possível estado da matéria, obtendo os resultados ilustrados na figura 2. Onde podemos analisar que o estado usual da matéria (com quarks confinados em prótons e nêutrons) é mais estável (possui menor energia de ligação) do que o estado com quarks up e down livres, explicando assim, a presença da matéria comum. Quando introduzimos o quark do tipo strange, temos para densidades bariônicas de aproximadamente o dobro da densidade bariônica do  $^{56}\text{Fe}$ , que essa matéria com quarks livres possui menor energia de ligação do que a matéria ordinária, sendo assim mais estável. Essa matéria de quarks livres com a presença do quark strange, é chamada de Matéria Estranha de Quarks. Densidades ou temperaturas tão elevadas podem ser encontradas no Universo Primordial ( $10^{-6}$  segundos após o Big Bang), no núcleo de Estrelas de Nêutrons, nos colisores de partículas, e nas possíveis Estrelas de Quarks.

### 4. CONCLUSÕES

Com isso, concluímos de forma qualitativa, que a estabilidade da matéria de quarks para as elevadas densidades e/ou altas temperaturas é maior que a da matéria ordinária. Vimos também que dentro do modelo proposto, a SQM seria ainda mais estável que uma matéria de quarks formada apenas por quarks up e down, podendo assim, ser o verdadeiro estado da matéria que interage via Interação Forte. Como possibilidade da SQM, surgem os Strangelets, estruturas

de quarks up, down e strange livres, que podem ser estáveis em condições exóticas e que serão o alvo de estudo na continuação da nossa pesquisa.

Figura 2: Energia por bárion versus a razão da densidade bariônica pela densidade bariônica do  $^{56}\text{Fe}$ . Verifica-se a maior estabilidade da SQM em comparação com a matéria formada por átomos ou por quarks up e down livres. (FUNE, 2011)



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MOREIRA, M.A. O Modelo Padrão da Física de Partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 1306.1–1306.11, 2009.
- BODMER, A.R. Collapsed Nuclei, **Physical Review D**, Maryland, v. 4, n. 6, p. 1601-1606, 1971.
- WITTEN, E. Cosmic Separation Phases, **Physical Review D**, Maryland, v. 30, n. 2, p. 272-285, 1984.
- JENSEN, D. M. **Strangelets Effects of Finite Size and Exact Color Singlets**, 1996. Tese (Ph.D. em Física) – Curso de Pós-Graduação em Física, University of Aarhus.
- FUNE, E. L. **Strangelets Under Strong Magnetic Fields**, 2011. Tese (Mestrado em Ciências Físicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Físicas, Institute of Cybernetics Mathematics and Physics.
- JAFFE, R. L. Quark confinement, **Nature**, Londres, v. 268, p. 201-208, 1977.