

FUNDAMENTOS DE FÍSICA NUCLEAR: UMA INTRODUÇÃO APLICADA AO ESTUDO DE ESTRELAS DE NÊUTRONS

PATRICK RITTER¹; RAFAEL CAVAGNOLI²

¹Universidade Federal de Pelotas – patrickritter23@yahoo.com

²Universidade Federal de Pelotas – rafael.cavagnoli@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A física nuclear representa um dos pilares fundamentais da física moderna, com aplicações que transcendem os laboratórios terrestres e encontram manifestações espetaculares nos fenômenos astrofísicos mais extremos do universo. Desde sua consolidação no século XX, a física nuclear tem sido essencial para compreender não apenas a estrutura da matéria, mas também processos cósmicos inacessíveis à experimentação direta (POTEKHIN, 2010).

As estrelas de nêutrons constituem laboratórios naturais únicos onde a física nuclear manifesta-se em condições extremas, com densidades centrais que podem exceder várias vezes a densidade nuclear de saturação ($n_0 \sim 2,8 \times 10^{14}$ g/cm³). Esses objetos compactos, formados como produtos finais da evolução de estrelas massivas, apresentam um regime físico onde as aproximações convencionais da matéria tornam-se fundamentalmente inadequadas, demandando tratamentos teóricos sofisticados da física nuclear (SILVA, 2020).

O estudo das estrelas de nêutrons revela limitações críticas de modelos simplificados baseados exclusivamente em gases ideais de férmions. Enquanto tais tratamentos preveem massas máximas de aproximadamente $0,7 M_{\odot}$, isto é, 0,7 vezes a massa do Sol, observações astronômicas documentam objetos com massas superiores a $2,0 M_{\odot}$, demonstrando inequivocamente a necessidade de incorporar interações nucleares na descrição teórica (BURGIO et al., 2021). Esta discrepância evidencia a importância de compreender adequadamente os fundamentos da física nuclear para abordar problemas astrofísicos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma introdução sistemática aos conceitos fundamentais da física nuclear, estabelecendo conexões diretas com suas aplicações no estudo de estrelas de nêutrons, visando tornar acessível a complexa interface entre física nuclear e a astrofísica.

2. METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada baseia-se na progressão conceitual do simples ao complexo, estabelecendo uma narrativa científica que conecta fundamentos teóricos com aplicações astrofísicas concretas. A fundamentação teórica é desenvolvida a partir de literatura consolidada em física nuclear e astrofísica, priorizando fontes que estabelecem pontes entre os dois campos.

A estratégia pedagógica estrutura-se em três etapas principais: (1) apresentação dos conceitos fundamentais da estrutura nuclear; (2) discussão das características essenciais das interações nucleon-nucleon; e (3) demonstração de como estes fundamentos se manifestam no contexto específico das estrelas de nêutrons. Esta progressão permite evidenciar tanto a elegância teórica da física nuclear quanto sua relevância prática para compreender desde fenômenos terrestres a fenômenos astrofísicos extremos.

A seleção de conteúdo priorizou conceitos que ilustram a transição necessária entre descrições não-interagentes da matéria nuclear e tratamentos sofisticados que incorporam adequadamente as forças nucleares, utilizando as estrelas de nêutrons como motivação e aplicação dos princípios discutidos.

Para o estudo da interação nuclear foi utilizado o modelo de Walecka simplificado (WALECKA, 1974), no qual considera-se apenas os mésons σ e ω como partículas mediadoras da força nuclear forte, de onde é possível obter as equações de estado (EoS) que descrevem o sistema. Foram estudadas as propriedades da matéria nuclear, e depois o modelo é estendido em densidades superiores a fim de descrever a condição em que se acredita estar o interior de estrelas de nêutrons. As EoS geradas são conectadas aos objetos astrofísicos através da equação de Tolman-Oppenheimer-Volkoff - TOV - (OPPENHEIMER; VOLKOFF, 1939), que é obtida como uma das soluções simplificadas das equações de Einstein da Relatividade Geral, considerando um objeto estático, isto é, sem rotação e composto por um fluido ideal relativístico. O regime relativístico é necessário em função das massas associadas pois a equação de estrutura gravitacional newtoniana torna-se inadequada neste regime.

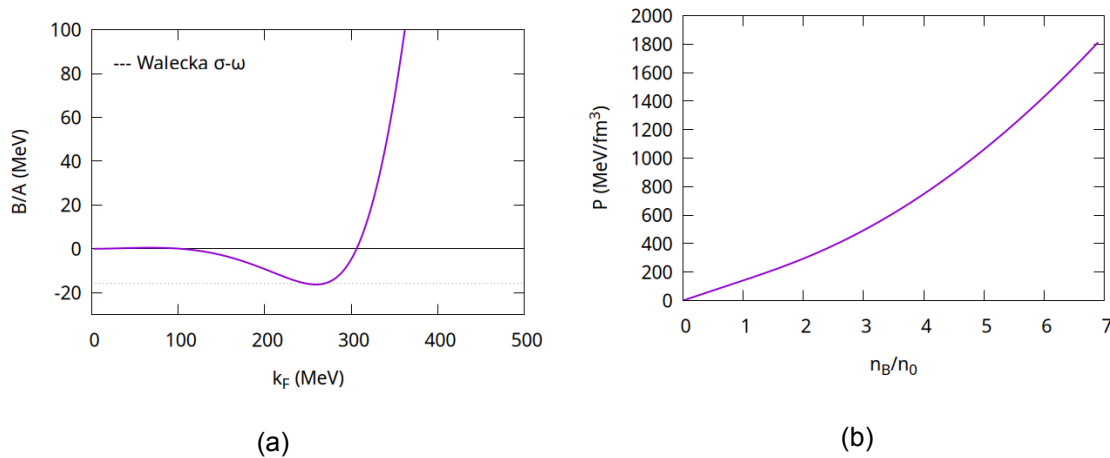
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O núcleo atômico, descoberto por Rutherford em 1911, representa um sistema quântico de muitos corpos onde prótons e nêutrons (coletivamente denominados nucleons) interagem através de forças fundamentais. A densidade nuclear de saturação ($n_0 \sim 2,8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$) estabelece uma escala característica que será excedida dramaticamente no interior de estrelas de nêutrons, onde densidades podem atingir 5-10 vezes este valor (DEXHEIMER, 2006). A estabilidade nuclear resulta de um delicado equilíbrio entre forças atrativas e repulsivas, um princípio que se manifesta de forma amplificada nas condições extremas encontradas em estrelas de nêutrons. A força nuclear forte, responsável pela coesão nuclear, apresenta características distintivas: atração moderada a distâncias intermediárias (~ 1 a 2 fm , onde $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) e intensa repulsão a curtas distâncias ($< 0,5 \text{ fm}$), propriedades que se tornam críticas para determinar as propriedades macroscópicas de objetos compactos.

As interações nucleon-nucleon manifestam comportamento complexo que não podem ser adequadamente descritas por potenciais simples. A força nuclear forte apresenta dependência do spin, tem caráter tensorial e sensibilidade à estrutura de isospin, características que emergem da natureza composta dos nucleons e da dinâmica dos quarks e glúons subjacentes (WALECKA, 1974). Em densidades supranucleares, encontradas no interior de estrelas de nêutrons, a repulsão de curto alcance da interação nucleon-nucleon torna-se dominante, gerando pressões substanciais que não são capturadas por modelos de gás ideal. Esta transição de regime - de atração nuclear em densidades normais para repulsão dominante em altas densidades - constitui o mecanismo fundamental que permite às estrelas de nêutrons suportar massas superiores às predições de modelos simplificados.

Usando o modelo de Walecka simplificado, apenas com mésons σ e ω , foram obtidos alguns resultados calibrados para a matéria nuclear simétrica, pois uma descrição mais elaborada necessita no mínimo da inclusão de mais um méson, como o méson ρ . Conforme Figura 1 (a), foi calculada a energia de ligação nucleon-nucleon. Na Figura 1 (b) temos um exemplo das EoS geradas.

Figura 1: (a) energia ligação por nucleon (B/A) em função do momento de fermi k_F . (b) exemplo de equações de estado geradas, pressão em função da densidade nuclear (bariônica) n_B , em termos da densidade de saturação n_0 .

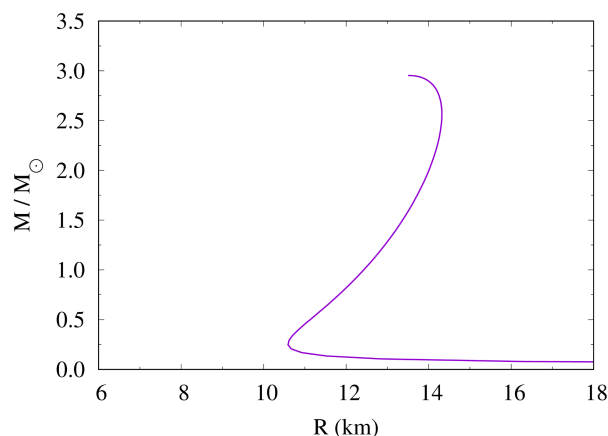


Fonte: o Autor

A aplicação dos princípios de física nuclear ao estudo de estrelas de nêutrons revela a inadequação fundamental de tratamentos baseados exclusivamente em degenerescência fermiônica. O modelo de gás de nêutrons não-interagente, embora pedagogicamente útil, falha em reproduzir as massas observadas de estrelas de nêutrons, prevendo um limite máximo de aproximadamente $0,7 M_\odot$ (OPPENHEIMER; VOLKOFF, 1939). A incorporação das interações nucleares, permite superar tais limitações. A relevância prática desta abordagem manifesta-se na capacidade de reproduzir massas observadas de estrelas de nêutrons superiores a $2,0 M_\odot$ como documentado principalmente em sistemas binários (LATTIMER, 2024).

A Figura 2 mostra um exemplo de uma família de estrelas geradas pelas EoS obtidas através do modelo de Walecka simplificado, usando-se a eq. TOV. Nota-se que o modelo nuclear simplificado gera massa máxima muito elevada, embora melhor do que $0,7 M_\odot$, nota-se que são necessários novos ajustes.

Figura 2: resultado astrofísico das EoS geradas por modelo de física nuclear.



Fonte: o autor.

Verifica-se que determinados objetos estelares necessitam de ferramentas diferentes e mais elaboradas em sua descrição quando comparados a estrelas

análogas ao Sol, onde usando um gás ideal clássico é possível obter algumas propriedades interessantes. Todavia, no estudo de objetos celestes compactos é indispensável a inclusão das interações nucleares e de considerações relativísticas, dadas as condições extremas em seu interior.

4. CONCLUSÕES

A física nuclear emerge como disciplina fundamental para a compreensão de fenômenos astrofísicos extremos, particularmente no contexto de estrelas de nêutrons. A progressão conceitual desde fundamentos básicos da estrutura nuclear até aplicações em objetos compactos ilustra tanto a elegância teórica quanto a relevância prática desta área do conhecimento.

A inadequação de modelos simplificados para descrever propriedades de estrelas de nêutrons evidencia a necessidade de incorporar adequadamente as interações nucleon-nucleon em tratamentos teóricos. A transição de regimes de atração para repulsão dominante, governada pelas características intrínsecas das forças nucleares, constitui o mecanismo físico que permite a existência de estrelas de nêutrons com massas observacionalmente documentadas.

Neste trabalho estudou-se a base conceitual inicial para auxiliar investigações subsequentes com implementações computacionais de modelos de física nuclear mais elaborados e aplicados à estrutura de estrelas de nêutrons, demonstrando como fundamentos teóricos conectam-se diretamente com problemas astrofísicos de fronteira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURGIO, G. F. et al. Neutron stars and the nuclear equation of state. **Progress in Particle and Nuclear Physics**, v. 120, p. 103879, 2021.

DEXHEIMER, V. A. **Compressibilidade da Matéria Nuclear em Estrelas de Nêutrons**. 2006. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

LATTIMER, J. M. Stellar Collapse Project. Neutron Star Mass and Radius Data. 2024. <<https://stellarcollapse.org/index.php/nsmasses.html>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

OPPENHEIMER, J. R.; VOLKOFF, G. M. On massive neutron cores. *Physical Review*, v. 55, n. 4, p. 374–381, 1939.

POTEKHIN, A. Y. The physics of neutron stars. **Physics-Uspekhi**, v. 53, n. 12, p. 1235, 2010.

SILVA, S. D. N. **Uma Introdução ao Modelo da Hadrodinâmica Quântica para o Estudo das Estrelas de Nêutrons**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Bacharelado em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

WALECKA, J. D. A theory of highly condensed matter. **Annals of Physics**, v. 83, n. 2, p. 491-529, 1974.