

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

MATÉRIA DE QUARKS EM ESTRELAS COMPACTAS E A SUA DETECÇÃO POR EMIÇÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

**FILIFE CARVALHO SILVA
CÉSAR OSWALDO VASQUEZ FLORES**

AFILIAÇÃO

¹ Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) – Centro Ciências Exatas, Naturais e Tecnológicas – Rua Godofredo Viana, 1300 R – Centro, Imperatriz – MA, 65900-000.

² Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) – Centro Ciências Exatas, Naturais e Tecnológicas – Rua Godofredo Viana, 1300 R – Centro, Imperatriz – MA, 65900-000.

RESUMO

A detecção de radiação gravitacional nos oferece uma nova forma de investigar fenômenos nos quais intensos campos gravitacionais são importantes. Entre esses fenômenos temos as estrelas de Nêutrons, as quais estão entre os objetos mais densos do Universo. Estas estrelas podem estar isoladas ou podem pertencer a sistemas binários cuja dinâmica pode ser afetada por deformações de maré. Essas deformações dependem da composição interna da estrela e produzem modificações na fase da onda gravitacional incidente nos detectores interferométricos. Portanto podemos ver que graças à observação de deformações de maré em sistemas binários é possível estabelecer limites importantes na composição da matéria nuclear nas estrelas de nêutrons. Outro fenômeno físico importante que pode ser observado são os modos quase-normais, entre os quais o modo fundamental recebe muita atenção devido à sua maior probabilidade de detecção em sistemas binários, explosões de supernova ou transições de fase. É fato que existe uma correlação entre a frequência do modo fundamental e as deformações de maré, isto pode ser utilizado na obtenção de informação da composição interna das estrelas de nêutrons. Outro fenômeno que também está presente durante a fusão de um sistema binário é a rotação, a qual pode ter um efeito visível no modo fundamental e nos modos r (modos de rotação), este mecanismo pode ter um impacto importante na correlação

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

entre a frequência do modo fundamental, o tempo de amortecimento e a deformação por maré. Como podemos ver claramente, é uma prioridade identificar os observáveis que possam surgir da análise de ondas gravitacionais produzidas por sistemas binários. Para este objetivo, para um dado conjunto de equações de estado, propomos investigar o efeito da rotação nos modos de oscilação de estrelas de nêutrons.

PALAVRAS-CHAVE: Gravitação; Relatividade Geral; Estrelas de nêutrons

INTRODUÇÃO (todos em caixa alta sem recuo)

As observações recentes dos sistemas binários GW170817 e GW190425, pela colaboração LIGO VIRGO (ABBOTT; AL., 2017; The LIGO Scientific Collaboration; the Virgo Collaboration, 2020) e a correspondente detecção de raios X, ultravioleta, ópticos, infravermelhos e em ondas de rádio, deu o início à nova era da astronomia multi-mensageira. No caso especial de GW170817 as observações confirmaram que o evento foi produzido por duas estrelas de nêutrons. A observação da contraparte eletromagnética de GW170817 pelo observatório Fermi comprovou que a fusão de um sistema binário de estrelas de nêutrons está associado a surtos de raios gamma de curta duração e a emissões de kilonova que provavelmente são energizadas pelo decaimento radiativo de processos r (Abbott et al., 2017). Portanto, a astronomia multi-mensageira é uma ferramenta excelente para extrair informação de estrelas compactas em condições extremas. Nos próximos anos mais detecções irão ser feitas devido à melhorias nos detectores (ABBOTT et al., 2016) e também por causa dos novos detectores KAGRA e LIGO-INDIA (LIGO Scientific Collaboration et al., 2015; ACERNESE; AL., 2014; ASO et al., 2013). Adicionalmente, detectores de terceira geração, tais como o telescópio Einstein e o observatório Cosmic Explorer irão nos fornecer a detecção de sistemas binários a distâncias cosmológicas (ESSICK; VITALE; EVANS, 2017; CHAMBERLAIN; YUNES, 2017; PUNTURO et al., 2010).

É esperado também que nos próximos anos um novo tipo de detecção irá ser reportado: que consistirá nas oscilações de estrelas de nêutrons. Diferentes mecanismos podem excitar estas oscilações, entre eles está o mecanismo de ressonância em um sistema

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

binário. A evolução de um sistema binário consiste na fase inicial chamada de espiral, seguida pela etapa de fusão e finalmente a fase de emissão de ondas gravitacionais devido a modos quase-normais. Estes sistemas podem apresentar oscilações devido a ressonância. A presença de esta dinâmica extrai energia do sistema e como resultado a fase das ondas gravitacionais é modificada (LAI, 2013). Por outro lado, na fase de fusão, as simulações mostram um forte pico de emissão na faixa de 2 - 3 kHz (BAUSWEIN; JANKA, 2012). Este pico de frequência está fortemente relacionado ao modo fundamental de oscilação do objeto remanente. (STERGIOULAS et al., 2011; HOTOKEZAKA et al., 2013; DIETRICH et al., 2015; Vásquez Flores; Lugones, 2014). Por exemplo, objetos remanescentes maiores descritos por equações duras, também chamadas de stiff, tem frequências menores. Assim a detecção de este pico dominante pode impor limites na equação de estado que governa a composição das estrelas de nêutrons (BAUSWEIN; JANKA, 2012; BAUSWEIN et al., 2012; BAUSWEIN; STERGIOULAS; JANKA, 2014; CLARK et al., 2014).

Como já foi mencionado, as oscilações podem causar deformações na estrela. A grandeza física relacionada a este mecanismo é a deformabilidade por maré, a qual é produzida devido à estrela companheira no sistema (Kokkotas; Schafer, 1995). Esta influência pode ser detectada na faixa de baixa frequência na fase de espiral, onde o efeito é uma pequena correção na fase da onda. Como uma composição diferente da estrela pode ter uma resposta característica na deformabilidade, esta grandeza pode ser usada para discriminar os diferentes tipos de equações de estado.

Como discutido acima, a relação entre as oscilações e a deformabilidade por maré é de muita importância já que as conclusões que podemos obter pelo seu estudo podem ter fortes implicações no conhecimento detalhado da equação de estado da matéria nuclear

METODOLOGIA

Os objetivos específicos a serem alcançados com este projeto são: Este projeto é um trabalho teórico, está inserido na grande área de Ciências Exatas e da Terra, mesclando conhecimentos da Física, da Matemática e da Ciência da Computação. Inicia-se com levantamento bibliográfico desde as referências mais básicas até as pesquisas mais recentes associadas a temas de interesse em periódicos e livros especializados. Com isso, pretende-se partir de uma visão geral do assunto e chegar aos conhecimentos específicos, os quais são

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

objetos de interesse. Dado o caráter teórico do projeto, os recursos disponíveis na Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) como livros e computadores com acesso a internet são suficientes e necessários para desenvolver o presente trabalho

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estrelas compactas, como as estrelas de nêutrons, são objetos astronômicos extremamente densos e massivos. A matéria que compõe essas estrelas está sujeita a condições extremas de temperatura e pressão, resultando em um estado da matéria conhecido como matéria de quarks. Nesse estado, os quarks, que são as partículas fundamentais que compõem prótons e nêutrons, não estão mais confinados dentro dessas partículas, mas sim livres para se moverem. A detecção da presença da matéria de quarks em estrelas compactas é um desafio científico fascinante e tem implicações importantes para a compreensão da física de partículas e da astrofísica.

A detecção da matéria de quarks em estrelas compactas pode ser realizada por meio da observação da emissão de ondas gravitacionais. As ondas gravitacionais são perturbações no espaço-tempo que se propagam a uma velocidade igual à da luz. Quando ocorrem eventos violentos, como a fusão de estrelas de nêutrons ou a formação de buracos negros, essas ondas são geradas. Acredita-se que a presença de matéria de quarks em estrelas compactas também possa dar origem a eventos que emitam ondas gravitacionais características.

Para detectar essas ondas gravitacionais, são utilizados detectores sensíveis, como os interferômetros a laser. Esses detectores são capazes de medir as minúsculas variações no espaço-tempo causadas pelas ondas gravitacionais. A presença de matéria de quarks em estrelas compactas pode ser inferida a partir das características dessas ondas, como a frequência e a amplitude. Além disso, estudos teóricos e simulações computacionais têm sido realizados para entender como a matéria de quarks afeta a evolução das estrelas compactas e a emissão de ondas gravitacionais. Essas simulações fornecem informações valiosas sobre os processos físicos que ocorrem no interior dessas estrelas e ajudam a desenvolver modelos mais precisos para a detecção da matéria de quarks.

A detecção da matéria de quarks em estrelas compactas através da emissão de ondas gravitacionais tem implicações significativas para a física de partículas. Ela pode fornecer

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

insights sobre o comportamento dos quarks em condições extremas de temperatura e pressão, que não podem ser reproduzidas em laboratório. Além disso, a compreensão da matéria de quarks em estrelas compactas pode ajudar a responder perguntas fundamentais sobre a estrutura da matéria e a natureza da interação forte, uma das forças fundamentais da natureza.

A detecção da matéria de quarks em estrelas compactas por meio da emissão de ondas gravitacionais é um campo de pesquisa emocionante e complexo. Através do uso de detectores sensíveis e de simulações computacionais avançadas, os cientistas estão se aproximando cada vez mais da compreensão dessa forma exótica de matéria. A detecção da matéria de quarks em estrelas compactas não apenas contribuirá para a nossa compreensão da física de partículas, mas também terá implicações profundas para a astrofísica e para a compreensão da evolução e do comportamento das estrelas em condições extremas.

CONCLUSÕES

Neste relatório, estudamos o fenômeno da matéria de quarks em estrelas compactas e sua detecção por emissão de ondas gravitacionais. Durante nossa pesquisa, exploramos as propriedades teóricas e observacionais dessas estrelas exóticas, que são compostas por quarks livres em vez de nêutrons e prótons convencionais. Ao longo do estudo, pudemos compreender melhor as implicações dessa forma de matéria extremamente densa e sua relevância na compreensão da física de altas energias. Investigamos os modelos teóricos que descrevem a estrutura interna das estrelas de quarks, bem como os mecanismos responsáveis pela emissão de ondas gravitacionais em tais sistemas.

Além disso, analisamos os avanços tecnológicos na detecção de ondas gravitacionais e como esses instrumentos têm potencial para revelar a presença de estrelas compactas de quarks. Discutimos as técnicas utilizadas, como interferometria a laser e ressonância de barras, que podem fornecer evidências indiretas e diretas dessas estruturas astrofísicas.

Concluimos que a detecção de matéria de quarks em estrelas compactas é um campo de pesquisa fascinante, que desafia nossos conhecimentos atuais e abre portas para uma compreensão mais profunda da física fundamental. No entanto, é importante ressaltar que, até o momento, nenhum sinal definitivo de estrelas de quarks foi identificado.

Por fim, o PIBIC foi fundamental para o desenvolvimento deste estudo, proporcionando recursos e suporte necessários para a pesquisa. Através deste projeto, tivemos

VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

a oportunidade de mergulhar em um campo de pesquisa inovador e contribuir para o avanço do conhecimento científico. Esperamos que este relatório seja útil para a comunidade científica e inspire novas investigações nesse fascinante campo da astrofísica.

APOIO FINANCEIRO

Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, B. P. et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *apjl*, v.848, p. L12, out. 2017

ABBOTT, B. P.; AL. et. Gw170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 119, p. 161101, Oct 2017.

ABBOTT, B. P. et al. The lsc-virgo white paper on instrument science (2016-2017 edition), Technical Report No. T1400226, LIGO and Virgo Scientific Collaborations, LIGO Internal Document No. T1400226, 2016.

ACERNESE, F.; AL. et. Advanced virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector. *Classical and Quantum Gravity*, IOP Publishing, v. 32, n. 2, p. 024001, dec 2014.

ASO, Y. et al. Interferometer design of the kagra gravitational wave detector. *Phys. Rev. D*, American Physical Society, v. 88, p. 043007, Aug 2013.

BAUSWEIN, A.; JANKA, H.-T. Measuring neutron-star properties via gravitational waves from neutron-star mergers. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 108, p. 011101, 2012.

Vásquez Flores, C.; Lugones, G. Discriminating hadronic and quark stars through gravitational waves of fluid pulsation modes. *Classical and Quantum Gravity*, v. 31, n. 15, p. 155002, 2014.

The LIGO Scientific Collaboration; the Virgo Collaboration. GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with Total Mass $\sim 3.4M$. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2001.01761, Jan 2020.

PUNTURO, M. et al. The third generation of gravitational wave observatories and their



VI Semana Acadêmica de Pesquisa, Inovação e Extensão da UEMASUL
07 a 09 de novembro de 2023- Imperatriz - MA

science reach. Classical and Quantum Gravity, IOP Publishing, v. 27, n. 8, p. 084007, apr 2010.

LIGO Scientific Collaboration et al. Advanced LIGO. Classical and Quantum Gravity, v. 32, n. 7, p. 074001, Apr 2015.

ESSICK, R.; VITALE, S.; EVANS, M. Frequency-dependent responses in third generation gravitational-wave detectors. Phys. Rev. D, American Physical Society, v. 96, p. 084004, Oct 2017.