

## Uma possível relação de ancestralidade entre XDINs, SGRs e AXP

## A possible ancestral relationship among XDINs, SGRs and AXP

### RESUMO

O estudo das Estrelas de Nêutrons tem proporcionado a descoberta de novos tipos de estrelas com características dissemelhantes de qualquer outro corpo celeste, o que tem gerado, por sua vez, novos estudos científicos e levantado questionamentos em relação aos modelos canônicos que objetivam explicar o comportamento destas estrelas. Entre estes questionamentos, está a dúvida relacionada ao tipo de relação existente entre os Magnetares classificados como AXP e SGRs e os Pulsares do tipo XDINs. O presente trabalho objetiva investigar tal relação, para que seja possível haver melhor clareza acerca das características que aproximam tais astros. Aqui, apontamos os dados e equações que explicariam o maior entrave para a conclusão da ancestralidade, demonstrando a factibilidade da confirmação de tal relação caso o modelo CFLQS seja, também, confirmado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estrelas de Nêutrons, Magnetares, Pulsares.

### ABSTRACT

The study of Neutron Stars has provided the discovery of new types of stars with characteristics unlike any other celestial body, which has, in turn, generated new scientific studies and raised questions in relation to canonical models that aim to explain the behavior of these stars. Among these questions is the doubt related to the relationship of the Magnetars classified as AXP and SGRs and the Pulsars classified as XDIN. The present work aims to study this relationship, thus it will be possible to have better clarity about their common characteristics. Here, we show the data and equations that explain the greatest obstacle to the conclusion of the ancestry, demonstrating the feasibility of confirming the ancestral relationship if the CFLQS model be also confirmed.

**KEYWORDS:** Neutron stars, Magnetars, Pulsars.

**Victor Bueno Fontes**

[Victorfontes@alunos.utfpr.edu.br](mailto:Victorfontes@alunos.utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

**Jaziel Goulart Coelho**

[jazielcoelho@gmail.com](mailto:jazielcoelho@gmail.com)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos o homem busca entender o universo que o cerca, e faz isso utilizando das tecnologias mais avançadas disponíveis em sua época. Desta forma, com o avanço tecnológico houve a possibilidade de encontrar, estudar e conhecer corpos celestes com características peculiares e extremas. Entre esses corpos, estão as Estrelas de Nêutrons, objetos estelares complexos, descobertos recentemente, que se encontram em condições extremas de temperatura, densidade e pressão, bilhões de vezes mais altas que as possíveis de serem produzidas em laboratórios na Terra.

Landau foi o primeiro a especular sobre possibilidade da existência de estrelas compostas inteiramente de nêutrons, formadas quando a pressão dentro da matéria estelar se tornaria muito grande. Após alguns anos, Baade and Zwick (1934) concluíram que, “possivelmente, uma supernova representa essa transição de uma estrela comum para um grupo compacto de estrelas de massa consideravelmente menor”, neste caso uma Estrela de Nêutrons. Até que, em 1967, Jocelyn Bell, enquanto examinava os gráficos de dados produzidos pela observação de quasares de rádio, notou sinais com um padrão tão regular que ela pensou que deveria ser artificial. Esta foi a primeira Estrela de Nêutrons efetivamente descoberta.

Entre as Estrelas de Nêutrons estão as SGRs, AXPs e XDINs. No estudo dessas estrelas, existem evidências observacionais que sugerem que os Repetidores de raios- $\gamma$  (SGRs) e os Pulsares Anômalos de raios-x (AXPs), pertencem a uma mesma classe de pulsares. Estas, possuem sua potência energética proveniente do Campo Magnético, e não da desaceleração de sua rotação (*spin-down*), como ocorre normalmente em pulsares. Desta forma, sua alta luminosidade quiescente  $L_x$ , *bursts* e *flares*, são entendidos como provenientes do decaimento de seu forte campo magnético (MEREGETTI, 2008), afinal, apresentam valores de luminosidade maiores que sua perda de energia de rotação por desaceleração (*spin-down*), ou seja  $L_x > \dot{E}_{rot}$ .

Entretanto, a descoberta de quatro SGRs e AXPs, que emitem rádio, com perda de energia rotacional maior que a luminosidade,  $L_x < \dot{E}_{rot}$  durante a fase quiescente, permitiu questionamentos acerca da verdadeira natureza dessas estrelas, afinal, isto demonstra uma contradição nas premissas do modelo canônico.

Após a detecção de uma estrela que mudou temporariamente de um Pulsar para um Magnetar, as especulações acerca de uma possível relação entre estrelas do tipo XDINs, AXPs e SGRs ganharam forças, sendo sugerido por Ouyed et al. (2007) que “a idade é a principal diferença entre esses tipos de estrelas e que todas se manifestam na forma de Estrelas de Quarks (QS) na fase CFL (*Color-Flavor Locked*)”.

O presente artigo tem como objetivo estudar tal relação de ancestralidade e sua exequibilidade, tendo como apoio as incertezas acerca da natureza das SGRs e AXPs, que têm aberto espaço para modelos alternativos, como o possível modelo de estrelas feitas de matéria de quarks, as CFLQS (*Color-Flavor Locked Quark Star*).

## MATERIAL E MÉTODOS

Na classe de Objetos compactos estão as anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros, que possuem a propriedade em comum de surgirem quando estrelas normais morrem, isto é, quando a maior parte de seu combustível estelar foi consumido.

Todas as três espécies de objetos compactos diferem de estrelas normais em duas formas fundamentais. Primeiro, uma vez que queimam combustível nuclear, eles não conseguem sustentar a si próprios contra o colapso gravitacional gerando pressão térmica. Em vez disso, as anãs brancas são sustentadas pela pressão de elétrons degenerados, as Estrelas de Nêutrons são sustentadas pela pressão de nêutrons degenerados. Buracos negros, por outro lado, são estrelas completamente colapsadas, isto é, estrelas que não conseguiram encontrar qualquer meio para conter a atração da gravidade e, portanto, entrou em colapso para singularidade gravitacional.

A segunda característica que distingue objetos compactos de estrelas normais é seu tamanho excessivamente pequeno. Em relação às estrelas normais de massa comparável, os objetos compactos têm raios muito menores e, portanto, campos gravitacionais de superfície muito mais fortes. (SHAPIRO, 1983, p. 1).

Dentro da classe de Objetos Compactos estão as Estrelas de Nêutrons, formadas predominantemente de nêutrons e, possivelmente, matéria de quarks. Existem diferentes modelos para explicar as Estrelas de Nêutrons. Tendo em conta o modelo canônico, podemos considerar que elas possuem a massa de, aproximadamente, 1,4 da massa de nosso sol, ou seja,  $M \approx 1,4 M_{\odot}$  e o raio próximo de 10 km.

Esse grupo de corpos celestes se faz especial por diversas características, como concentrarem uma grande quantidade de massa, de acordo com estimativas, “maior que a massa de nosso Sol, em uma região menor que 15 km”, de acordo com Miller (2004). Esta diversidade de características é responsável por separar esse grupo em diversos subgrupos, para facilitar a compreensão e estudo desses astros.

Entre as Estrelas de Nêutrons estão os Pulsares, caracterizados por emitirem pulsos de Raios Gama e de Rádio, com larguras de banda de 2 à 100 MHz, em intervalos regulares que variam de milissegundos a segundos.

Assim como muitos corpos celestes, esses possuem campos magnéticos dipolares, o que gera um movimento de partículas carregadas ao longo das linhas do campo magnético, que unida a rápida rotação, se faz responsável pelo efeito de pulsos nos Pulsares.

Entre os Pulsares, nos interessarão, especialmente, o seleto grupo dos Sete Magníficos (M7), ou XDINS, sendo estes um grupo de sete jovens Estrelas de Nêutrons descobertas nos dados do telescópio orbital ROSAT, que apesar das intensas pesquisas em seus dados, nenhum outro corpo celeste com propriedades semelhantes foi encontrado, permanecendo com o número de membros constante desde 2001. Este grupo é caracterizado por possuírem uma emissão leve de raio-X (*Soft X-Ray*), e por isso são também conhecidas pelo nome de XDINS (*X-ray Dim Isolated Neutron Stars*). Estes objetos se encontram a uma distância de

120 a 500 parsecs da Terra e, de acordo com um estudo de síntese populacional e de reconstrução de trajetórias de Estrelas de Nêutrons, realizado por Popov (2003), “estão relacionadas ao Cinturão de Gould”, região que, por traçar várias nuvens moleculares na parte local da galáxia, possui uma elevada formação de estrelas majoritariamente massivas, brilhantes e com idade entre 30 e 50 milhões de anos.

“As M7 (*Magnificent Seven*) possuem muitas propriedades semelhantes entre si, mas muito diferentes dos Pulsares de rádio normais” (MEREGHETTI, 2010) , como, por exemplo, possuem pouca ou nenhuma emissão de Raio X. Estas possuem em torno de  $10^6$  anos, um campo magnético relativamente forte ( $10^{13}$  a  $10^{14}$  G) e “um leve espectro de corpo negro que acarreta na baixa absorção interestelar ( $kT$  40 – 100eV” (PIRES, 2009). Possuem sua luminosidade oriundas da perda de energia rotacional, sendo classificadas como pulsares *rotation powered* ( $L_x < \dot{E}_{rot}$ ).

A desaceleração da energia rotacional pode ser descrita como:

$$\dot{E}_{rot} = \frac{-4\pi I \dot{P}}{P^3} \quad (1)$$

A luminosidade:

$$L_x = \frac{GM\dot{M}_x}{R_x} \quad (2)$$

Os Magnetares, por sua vez, são objetos compactos com o campo magnético extremamente alto, em torno de quadrilhões de vezes mais forte que o campo magnético da Terra. Alguns modelos formulados sobre o processo de colapso do núcleo mostram que “o possível efeito dínamo pode gerar um campo magnético ainda maior” (PATERNÒ, 2013). É estimado que 1 em cada 10 supernovas gere uma estrela deste tipo, entretanto, ainda não é bem definido como elas se formam. Sendo uma das teorias existentes para essa formação formulada após o estudo de uma estrela específica no Westerlund 1, onde foi concluído que, possivelmente, a mesma havia de ter nascido de uma explosão de uma estrela com cerca de 40 vezes a massa do Sol, entretanto, é acreditado que estrelas com estes valores de massa dão origem a buracos negros. Para solucionar este mistério, foi sugerido por J.S. CLARK (2014) “que esta teria se formado a partir das interações entre duas estrelas de elevada massa, num sistema binário tão compacto que caberia no interior da órbita da Terra em torno do Sol”.

Existem, dois diferentes tipos de objetos referidos como Magnetares, as AXPs e SGRs, estrelas isoladas com poucos membros confirmados, “9 SGRs e 11 AXPs” (MANUEL MALHEIRO, JAZIEL G. COELHO, 2012), que serão de grande interesse neste estudo. A luminosidade na fase quiescente  $L_x$  dessas estrelas, bem como os *bursts* e *flares*, são entendidos como provenientes do decaimento de seu forte campo magnético (MEREGHETTI, 2008).

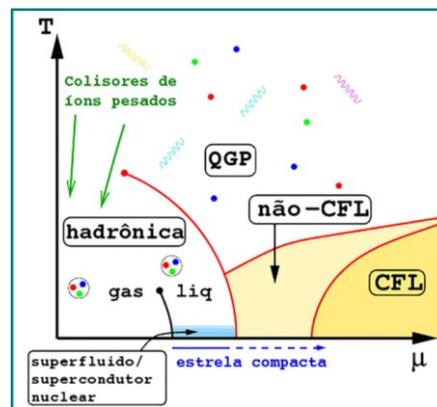
As SGRs (*Soft Gamma Repeaters*) possuem período de rotação em torno de  $\sim(2-10)$  segundos e violentos episódios de emissão de Raios Gama ( $\sim 1$  MeV) de forma esporádica ou durando semanas, fenômeno que se repete em intervalos de vários anos (MAZETS, GOLENTSKII, GURYAN, 1979), esta característica possibilitou sua descoberta em 5 de março de 1979.

As AXPs (*Anomalous X-ray Pulsars*), por sua vez, são estrelas jovens, que possuem muitas semelhanças com as SGR, mas com períodos de rotação em torno de  $\sim(2-12)$  segundos e episódios menos violentos de emissão de Raios Gama.

“É geralmente aceito a existência de diferentes tipos de matéria na estrutura de Estrelas de Nêutrons” (OUYED et al, 2007), como a matéria Quark, que se refere a um número de estados da matéria na qual graus de liberdade incluem quarks e glúons, sendo estas a fase hadrônica, plasma de quarks-glúons, líquido quark não CFL (*Color-Flavor Locked*) e CFL.

Na Figura 1 podemos verificar o Diagrama de Fase para a matéria QCD (Cromodinâmica Quântica), uma estrutura esquemática de como esse tipo matéria se comporta, tendo como variáveis relevantes o Potencial Químico dos quarks ( $\mu$ ), representado pelo eixo das abcissas e a Temperatura ( $T$ ), representada pelo eixo das ordenadas.

Figura 1: Estrutura esquemática da matéria QCD



Fonte: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* (M.G. ALFORD, S. HAN e K. SCHWENZER, 2019)

“Este tipo de matéria ocorre em temperaturas e densidades extremamente altas” (M. FERREIRA., 2005) e é gerada pela alta pressão e temperatura dentro da estrela. Ademais, possuem propriedades peculiares que afetam o comportamento da mesma.

A metodologia utilizada para o estudo desse objetos pode ser classificada como exploratória e qualitativa. De acordo com Roesch (2005) podemos afirmar que “a pesquisa qualitativa é apropriada para a coleta de dados em uma fase exploratória, pois tem como finalidade a busca de dados que induzem à maior reflexão acerca do que é servido como objeto de estudo”. Gerhardt e Silveira (2009) defendem que “a pesquisa exploratória tem o objetivo de proporcionar maior familiaridade com o problema proposto”, para então, haver a possibilidade de explicação, conclusão ou geração de hipóteses acerca dos fenômenos estudados.

Isto, com a finalidade de realizar um estudo teórico acerca de classes específicas de estrelas do grupo dos Pulsares e Magnetares, para então, realizar uma comparação entre suas propriedades, pretendendo encontrar sinais de ancestralidade entre SGRs e AXPs, com as XDINs.

Para a demonstração gráfica do sinal de ancestralidade, proposto pela teoria de Ouyed et al (2007), foi analisado o banco de dados do Catálogo da Universidade

McGill (Olausen & Kaspi, 2014), para que fossem selecionados os dados que seriam relevantes e aplicados ao programa SciDAVis.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

É acreditado que a potência energética das SGRs e AXPs é proveniente do alto campo magnético característico dessas estrelas, e não da rotação, como ocorre nos rádios pulsares ordinários, ou por acreção como nos pulsares de raios-X (COELHO, 2013). Isto, pois possuem luminosidade  $Lx$  maior que a perda de energia de rotação  $\dot{E}_{rot}$ , desta forma, não é possível afirmar que sua potência energética seja proveniente da desaceleração da estrela, como é considerado para pulsares *rotation-powered*. Desta forma, a luminosidade na fase quiescente, bem como os *bursts* e *flares* dessas estrelas, são entendidos como provenientes do decaimento de seu forte campo magnético (MEREGETTI, 2008).

Entretanto, a existência de quatro fontes SGRs e AXPs, com perda de energia rotacional por desaceleração maior que a luminosidade durante a fase quiescente ( $Lx < \dot{E}_{rot}$ ), permitiu questionamentos acerca da verdadeira natureza dessas estrelas.

Em 21 de fevereiro de 2008, foi anunciado por pesquisadores da NASA e Universidade McGill o descobrimento de uma estrela de nêutrons que mudou temporariamente de um Pulsar para um Magnetar. Indicando que “os Magnetares não são apenas um tipo raro de Pulsar, mas podem ser uma fase, possivelmente reversível, na vida de, pelo menos, algumas dessas estrelas” (SHAINBLUM, 2008).

Este evento possibilitou que especulações acerca de uma possível relação entre estrelas do tipo XDINs, AXPs e SGRs ganhassem força, sendo, anteriormente, sugerido por Ouyed et al. (2007) que “a idade é a principal diferença entre esses tipos de estrelas e que todas se manifestam na forma de Estrelas de Quarks (QS) na fase CFL (*Color-Flavor Locked*)”. De acordo com Ouyed et al. (2007), “Estrelas de Quarks (QS) na fase CFL (*Color-Flavor Locked*) não apenas existem, mas se manifestam na forma de SGRs, AXPs e M7”.

Apesar deste evento de 2008, a confirmação da relação das XDINs com as AXPs e SGRs precisava explicar a manutenção do campo magnético da estrela, particularidade necessária para ocorrer a transição entre os grupos, mas não plausível de ser explicada considerando os modelos mais populares de Estrelas de Nêutrons.

Entretanto, tendo em mente o Modelo CFLQS, o campo magnético da Estrela de Quark tende a diminuir através da frenagem magnética, conforme descrito na Equação 5, proposta por Niebergal et al. (2006), após o mesmo considerar que o período de rotação e o campo magnético possuem relação, mas podem ser resolvidos independentemente. Gerando, desta forma, as seguintes relações:

$$\frac{B^2}{\Omega} = \frac{B_0^2}{\Omega_0} \quad (3)$$

$$P = P_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$B = B_0 \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{-1}{6}} \quad (5)$$

Sendo  $\tau$  a idade característica da estrela, calculada por:

$$\tau_{yrs} = 5 \times 10^4 \left( \frac{10^{14} G}{B_0} \right)^2 \left( \frac{P_0}{5s} \right)^2 \left( \frac{MQS}{M_{\odot}} \right) \left( \frac{10km}{RQS} \right)^4 \quad (6)$$

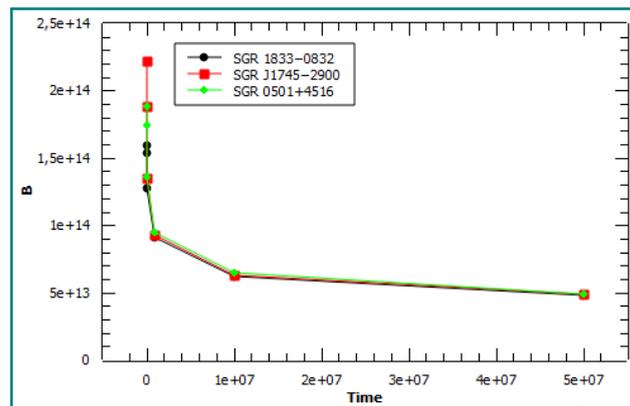
Onde,  $MQS$ , representa a massa da Estrela de Quarks,  $RQS$ , seu raio e  $M_{\odot}$  a massa do nosso sol.

Utilizando idades da ordem de  $10^6$  anos, podemos chegar aos resultados indicativos do estudo das características das M7.

Realizando a análise das equações propostas e considerando que se uma “CFLQS nascer com um raio de 9 km, período  $P_0 = 3$  s e Campo magnético de  $B_0 = 10^{14}$  G, quando atingir as idades estimadas para XDINs, irá atingir um período de 10 segundos e seu campo decairá para, aproximadamente,  $5 \times 10^{13}$  G” (OUEYD et al, 2007). Isto sugere que “a idade é a principal diferença entre SGRs, AXPs e M7”, de acordo com Ouyed et al.(2007).

Para testar tal afirmação, plotamos a Figura 2, utilizando a Equação 5, que representa a Evolução do Campo Magnético no Tempo de três diferentes Magnetares, as SGR 1833-0832, SGR J1745-2900 e SGR 0501+4516.

Figura 2. Evolução do Campo Magnético no Tempo



Fonte: Próprio autor.

Ao realizarmos a plotagem da Figura 2, podemos observar a manutenção do campo magnético da estrela, passando de valores característicos de Magnetares, para valores coincidentes para as M7, ao atingirem idades da ordem de  $10^6$  anos. Este resultado é consistente com a teoria de Ouyed (2007).

## CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo é estudar a relação de ancestralidade entre SGRs, AXPs e XDINs, considerando eventos que possibilitam questionamentos acerca dos modelos canônicos para a explicação do funcionamento das Magnetares, e seguindo o modelo, não canônico, das CFLQS (*Color-Flavor Locked Quark Star*). Sendo proposto por Ouyed et al. (2007) que esses tipos de estrelas se manifestam nesse modelo.

Os questionamentos acerca do modelo canônico para Magnetares surgiram devido a descoberta de quatro SGRs e AXPs, com perda de energia rotacional maior

que a luminosidade ( $Lx < \dot{E}_{rot}$ ), e a detecção de uma estrela que mudou temporariamente de um Pulsar para um Magnetar.

Utilizando o modelo CFLQS (*Color-Flavor Locked Quark Stars*) e considerando a evolução da temperatura efetiva, o período de rotação e o campo magnético, é factível evidenciar a possível ancestralidade entre as XDINs, SGRs e AXPs. Sendo isto observável pela Figura 2, anteriormente apresentada, que demonstra a transição das SGRs para XDINs, pela manutenção do campo magnético da estrela, fenômeno que, até então, não era plausível de ser explicado, considerando apenas os modelos mais populares de Estrelas de Nêutrons.

Ademais, algumas características do modelo das CFLQS torna possível explicar algumas peculiaridades das M7. Como, a falta de pulsações de rádio, presentes nessas classes de estrelas e “seu espectro quase inexpressivo, que pode ser explicado pela não presença de crosta nas estrelas do modelo CFLQS” (Pons et al. 2005).

Desta forma, se tornaria, portanto, exequível a conclusão da existência de ancestralidade proposta, a partir da comprovação do modelo CFLQS.

### AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao orientador Jaziel G. Coelho por todo apoio e motivação prestada durante o desenvolvimento do artigo, aos autores que dedicaram suas vidas para o desenvolvimento da ciência e minha família por todo incentivo prestado.

### REFERÊNCIAS

A. M. PIRES. **Population Study of Radio-Quiet and Thermally Emitting Isolated Neutron Stars**. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14131/tde-22072010-054601/publico/AMPiresPhD.pdf>. Acesso em: 23 nov 2019.

COELHO, J. G. **Magnetares e os Pulsares de Anãs Brancas**. Disponível em:

[https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/ITA\\_3b9e422805225833c9fb51caca06a91d](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/ITA_3b9e422805225833c9fb51caca06a91d). Acesso em: 6 nov 2020.

R. OUYED, B. NIEBERGAL, D. LEAHY. **SGRs and AXPs proposed as ancestors of the Magnificent Seven**. DOI: 10.1051/0004-6361:20078647. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/0709.1492>. Acesso em: 9 fev 2020.

J. S. CLARK, B. W. RITCHIE, F. NAJARRO, N. LANGER, I. NEGUERUELA. **A VLT/FLAMES survey for massive binaries in Westerlund 1 IV. Wd1-5 – binary product and a pre-supernova companion for the Magnetar CXOU J1647-45?**. Disponível em:

<https://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1415/eso1415a.pdf>. Acesso em 12 nov 2019.

LUCIO PATERNÒ. **The Magnetars as a Consequence of Magnetic Field Amplification by Dynamo Effect.** Disponível em:

<http://www.oact.inaf.it/users/luciopaterno/PRESENTATIONS/MAGNETARS.pdf> .

Acesso em: 22 fev 2020.

MANUEL MALHEIRO, JAZIEL G. COELHO. **Magnetic dipole moment of SGRs and AXPs as white dwarf Pulsars.** Disponível em:

[http://www.astro.iag.usp.br/~foton/CSQCD3/DOWNLOADS/CSQCD3\\_malheiro.pdf](http://www.astro.iag.usp.br/~foton/CSQCD3/DOWNLOADS/CSQCD3_malheiro.pdf). Acesso em 23 fev 2020.

MÁRCIO RAFAEL BAPTISTA FERREIRA. **QCD phase diagram under an external magnetic field.** Disponível em:

<https://eg.uc.pt/bitstream/10316/29041/1/QCD%20phase%20diagram%20under%20an%20external%20magnetic%20field.pdf> . Acesso em: 13 fev 2020.

ALFORD, M. G.; HAN, S. e SCHWENZER, K., J. Phys. G. Nucl Part Phys, **46**, 114001 (2019). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/issue/0954-3899/46/11> Acesso em: 15 ago 2020.

OIAUSEN, S. A., KASPI, V. M., **The McGill Magnetar Catalog.** Disponível em:

<http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html> . Acesso em: 1 mar 2020.

POPOV, S. B.; et al. Young isolated neutron stars from the Gould Belt. **Astronomy and Astrophysics.** DOI: 10.1051/0004-6361:20030680. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0304141> . Acesso em: 10 out. 2019.

ROESCH, S. M. A. **Projetos de estágio e de pesquisa em administração: guia para trabalhos de conclusão, dissertações e estudos de caso.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005.

SANDRO MEREGHETTI. **X-ray emission from isolated neutron star. High Energy Astrophysical Phenomena.** DOI: 10.1007/978-3-642-17251-9\_29. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/1008.2891> . Acesso em: 13 dez. 2019.

SHAINBLUM MARK. NASA and McGill scientists find star which morphs from Pulsar to Magnetar. **Channel**, Montreal, set, 2018. Disponível em:

<https://www.mcgill.ca/channels/news/jekyll-hyde-neutron-star-discovered-researchers-29230>. Acesso em: 5 fev 2020.

STUART L. SHAPIRO, SAUL A. TEUKOLSKY. **Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars.** Vol 1. 1983.