

# Estrelas de neutrões como laboratórios de física

Constança Providência, Milena Albino, João Cartaxo, Valéria Carvalho, Tiago Custódio, Luigi Scurto, Márcio Ferreira, Tuhin Malik, Helena Pais

CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, Portugal

cp@fis.uc.pt

## Sumário

É feita uma breve apresentação das estrelas de neutrões e do seu papel na determinação da equação de estado e do diagrama de fases da matéria que interage pela força forte. Após uma breve incursão histórica é discutido sucintamente como estes astros nos podem dar informação importante sobre matéria muito densa que não conseguimos produzir no laboratório. Apresentamos as observações que atualmente impõem restrições fortes, tanto dos pulsares identificados pela radiação eletromagnética que emitem na gama de frequências do rádio e dos raios-X de baixa energia, como a informação obtida da deteção das ondas gravitacionais da fusão de estrelas de neutrões. Discutimos como estas observações restringem a equação de estado, usando um modelo agnóstico que não nos dá informação sobre a composição da matéria, mas permite identificar toda a região do espaço de fase acessível, considerando restrições teóricas e observações. Mostramos que, considerando apenas matéria nuclear, a região possível para a equação de estado é apenas coberta parcialmente, ficando em aberto perceber que grau de liberdade poderão gerar a região toda, e de que modo novas observações vão restringir mais esta região. Concluimos, discutindo como métodos de aprendizagem de máquina nos poderão ajudar a identificar a equação de estado da matéria que interage pela força forte diretamente da observação de estrelas de neutrões.

## 1. Um pouco de história

A descoberta do neutrão por Chadwick ocorre em 1932. Logo em 1934, Walter Baade e Fritz Zwicky propõem pela primeira vez que uma estrela de neutrões resulta de uma explosão de supernova, afirmando "with all reserve we advance the view that supernovae represent the transition from ordinary stars into neutron stars, which in their final stages consist of closely packed neutrons." [1].

É apenas em 1967 que a aluna de doutoramento Jocelyn Bell observa sinais que viria a interpretar com o seu supervisor Antony Hewish como emitidos por um pulsar. Através do Interplanetary Scintillation Array do telescópio do Observatório de Radio Astronomia Mullard da Universidade de Cambridge, construído em parte por Jocelyn Bell, foram detetados pulsos

regulares com a duração de 0,3 s e um período de repetição de 1,337 s, período que se mantinha com uma enorme precisão. Confirmaram que o período era constante com uma precisão superior a uma parte em  $10^7$ . Fazendo um cálculo da energia irradiada por ano estimaram que o raio do objeto teria de ser inferior a 4800 km, concluindo que a radiação poderia ter origem numa anã branca ou numa estrela de neutrões. Antony Hewish recebe o prémio Nobel Física em 1974 pela sua contribuição na descoberta dos pulsares. O prémio Nobel da Física é dado pela primeira vez a uma descoberta na área da astronomia e astrofísica. Infelizmente, Jocelyn Bell não foi adequadamente reconhecida pela sua contribuição essencial para esta descoberta. De notar que um pulsar é uma estrela de neutrões em rotação que emite radiação eletromagnética ao longo do seu eixo magnético.

Em 1975, Russell Alan Hulse e Joseph Hooton Taylor Jr. observam o primeiro binário constituído por um pulsar PSR B1913+16 e uma estrela de neutrões [2]. Identificaram imediatamente o binário como um laboratório ideal para testar a relatividade geral. Em particular, observaram que a variação da velocidade e da compacidade durante a órbita seriam suficien-

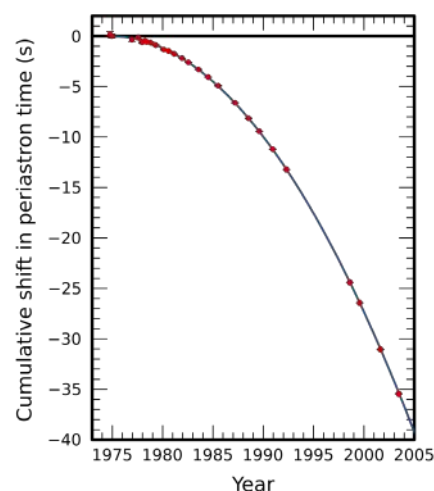


Figura 1 - Decaimento da órbita do pulsar PSR B1913+16, sendo representado em função do ano a mudança do periastro em segundos, relativamente a um sistema igual que não sofresse decaimento. Os pontos a vermelhos são as observações e a linha resulta de um cálculo teórico. (figura retirada de [3]).

tes para dar origem a efeitos observáveis no período. Prevendo que o avanço do periastro seria de cerca de  $4^\circ$  por ano utilizaram este binário para confirmar a teoria da relatividade geral. Em 2005 foram publicados dados acumulados durante trinta anos de observações. A figura 1, retirada de [3], mostra como o periastro do pulsar PSR B1913+16 se desloca no tempo em relação a um sistema que teria um período orbital constante: os pontos vermelhos são dados observacionais e a linha azul é a previsão teórica da relatividade geral. A observação da lenta redução do período do binário é explicada pela emissão de ondas gravitacionais por um sistema acelerado. Russell Alan Hulse e Joseph Hooton Taylor Jr. recebem o prémio Nobel da Física em 1993 pela "descoberta de um novo tipo de pulsar, uma descoberta que abriu novas possibilidades para o estudo da gravitação".

## 2. Estrelas de neutrões como laboratórios de física

Desde a descoberta das primeiras estrelas de neutrões que o interesse por estes objetos não deixa de crescer por poderem servir de laboratórios de diferentes tipos de física. A matéria no interior destes astros é formada por muitos neutrões mas não só: prótons, elétrons, e múons também estão presentes, e no seu centro, poderão existir outros tipos de matéria a que chamamos de exótica porque as partículas que a formam necessitam de condições especiais para serem criadas. Quando referimos matéria exótica, referimo-nos a hiperões, primos próximos dos neutrões e prótons mas contendo pelo menos um quark estranho e não só quarks up e down, bariões-delta, também primos dos prótons e neutrões mas com mais massa, condensados de kaões, partículas contendo quarks estranhos mas muito diferentes dos prótons e neutrões pois podem formar condensados, e simplesmente quarks livres. Algo que os físicos querem perceber é se no centro destas estrelas existem mesmo quarks livres. Além disso, sabemos que o Universo é constituído não só de matéria bariónica mas também de matéria escura. Devido à sua grande massa, as estrelas de neutrões também poderão ser locais onde a matéria escura se acumula, e presentemente são também considerados laboratórios de nova física para o estudo de candidatos a matéria escura, desde os axiões aos WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Para podermos usar as estrelas de neutrões como laboratórios temos de conseguir medir as suas propriedades como massa, raio, período de rotação, deformabilidade de maré, luminosidade com uma grande precisão!

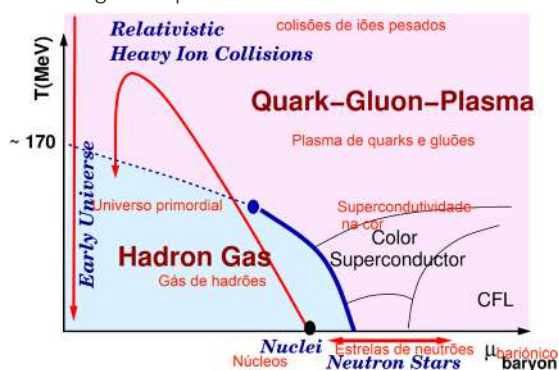


Figura 2 - Diagrama de fases da cromodinâmica quântica, sendo a temperatura representada em função do potencial químico bariónico ( $\mu_{\text{bariónico}}$ ). As linhas azul grossa a cheio e pretas finas representam transições de fase previstas em cálculos teóricos. A linha azul tracejada representa um crossover. As linhas a vermelho representam regiões do diagrama de fases exploradas em laboratório ou nas estrelas de neutrões.

E porque é que há tanto interesse em considerar as estrelas de neutrões como laboratórios? Não chegam os que construímos à superfície da Terra? Não. É que nos laboratórios como os do CERN, não é possível criar as condições existentes dentro de uma estrela de neutrões, nem de densidade, nem de assimetria neutrão-próton, nem de temperatura. Também falham os nossos cálculos de primeiros princípios baseados na cromodinâmica quântica, a teoria que descreve o comportamento das partículas que contêm quarks e que interagem pela força forte. Tal como a água tem um diagrama de fases que nos indica para certas condições de temperatura, pressão e volume o estado da água, também podemos construir um diagrama de fases para a matéria que interatua pela força forte, como na figura 2. Algumas partes deste diagrama já foram confirmadas experimentalmente, mas a maior parte é ainda desconhecida. Em particular, é impossível criar no laboratório matéria muito densa a baixas temperaturas, como a que no diagrama fica a baixas temperaturas e potenciais químicos bariónicos (densidades bariónicas) grandes.

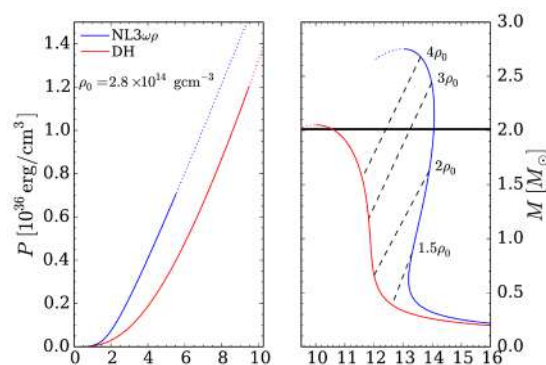


Figura 3 - Equação de estado da matéria numa estrela de neutrões, pressão versus densidade bariónica (esquerda) e curvas representando a massa das estrelas de neutrões em função do raio da estrela (direita). Curvas obtidas para dois modelos com propriedades muito diferentes. As linhas a tracejado unem estrelas com a mesma densidade bariónica no centro.

Na figura 3 mostramos a equação de estado em termos da pressão e densidade bariónica de dois modelos diferentes representados pelas linhas azul e vermelha. Dizemos que o modelo azul é muito mais duro que o modelo vermelho porque a pressão aumenta mais rapidamente com a densidade bariónica na estrela. Conhecendo as equações de estado é possível integrar as equações de Tolman-Oppenheimer-Volkoff [4,5] para determinar a massa e o raio de estrelas esféricas em equilíbrio hidrostático. Equações de estado diferentes dão origem a curvas massa-raio diferentes. Se for possível medir simultaneamente o raio e massa de uma estrela de neutrões poderemos eliminar os modelos que não satisfazem as observações.

## 3. Novas observações I: pulsares com duas massas solares

Em 2010 é medida a massa dum pulsar que tem quase duas massas solares: o pulsar PSR J1614-2230 com uma massa de  $1,908 \pm 0,016 M_{\odot}$  e um período de 3 ms [6,7]. Este pulsar forma um binário com uma anã branca. A determinação da massa com uma grande precisão foi possível porque sempre que a anã branca está entre o pulsar e o telescópio, a radiação emitida demora mais tempo a chegar. Dizemos que sofre um atraso de Shapiro, e este atraso previsto pela relatividade geral é uma quantidade que depende da massa da estrela.

Esta deteção foi muito importante porque muitos modelos teóricos que tinham sido apresentados até àquela data tiveram de ser postos de lado porque não conseguiam descrever estrelas com duas massas solares.

Três anos mais tarde, volta a ser observado um outro pulsar com uma massa acima das duas massas solares: o pulsar PSR J0348+0432 com a massa  $2,01 \pm 0,04 M_{\odot}$  e um período de 39 ms [8]. O pulsar forma um binário com uma estrela anã branca e a determinação da sua massa foi possível pelo decaimento da sua órbita devido à emissão de ondas gravitacionais, tal como o pulsar Hulse-Taylor. Esta nova observação veio confirmar que modelos teóricos credíveis que descrevem matéria densa que interage pela força forte têm de conseguir descrever estrelas com pelo menos duas massas solares. Os pulsares com maior massa atualmente conhecidos são o PSR J0740+6620 com a massa  $2,08 \pm 0,07 M_{\odot}$  [9], PSR J1810+1744 [10] com a massa  $2,13 \pm 0,04 M_{\odot}$  e o PSR J0952-0607 com a massa  $2,35 \pm 0,17 M_{\odot}$  [11]. Os últimos dois pulsares são conhecidos por "viúvas-negras" por pertencerem a um binário, onde estão a acretar matéria da estrela companheira, o que torna a determinação da sua massa sujeita a maiores incertezas, e as observações a restrições menos fortes. O pulsar PSR J0740+6620 foi posteriormente estudado pela missão NICER, como discutiremos numa das próximas secções.

#### 4. Novas observações II: ondas gravitacionais

Uma verdadeira revolução ocorreu com a deteção das ondas gravitacionais emitidas pela fusão de duas estrelas de neutrões no dia 17 de agosto de 2017, designadas por GW170817, e detetadas pelos observatórios LIGO/Virgo [12,13]. Associada a esta fusão foi detetado um surto curto de raios gamma pelos detetores de ondas eletromagnéticas como o Fermi e Integral [14] e ainda uma componente eletromagnética no ultravioleta, ótico e infravermelho que foi interpretada usando modelos de kilonovas como radiação emitida por núcleos que decaem como resultado da nucleossíntese por captura rápida de neutrões designados por processos r [15]. Esta última observação indica que a fusão de estrelas de neutrões cria locais ideais para a produção de núcleos pesados como o ouro e a platina, sendo consideradas como verdadeiras minas cósmicas de ouro.

A observação da fusão de estrelas de neutrões associada às ondas gravitacionais GW170817 foi o início do que atualmente chamamos Astronomia Multimessageira. A observação de um mesmo fenómeno por diferentes tipos de detetores, seja de ondas gravitacionais, de ondas eletromagnéticas nos diferentes comprimentos de onda, ou de partículas como neutrinos, reúnem muito mais informação sobre as propriedades do objeto observado. O sinal detetado em 17 de agosto de 2017 permitiu fazer uma estimativa do raio e massa das estrelas que fundiram. A determinação do raio foi possível porque o espectro das ondas gravitacionais transmite informação sobre a deformabilidade de maré que as estrelas de neutrões sofrem devido à força gravítica que cada estrela exerce na outra. A deformabilidade de maré depende da equação de estado que descreve a matéria da estrela e está relacionada com as massas e raios das estrelas envolvidas. Esta primeira determinação

veio acompanhada de incertezas bastante grandes, mas acreditamos que com os futuros detetores de ondas gravitacionais de terceira geração, como o Einstein Telescope ou o Cosmic Explorer, em funcionamento na próxima década, será possível obter informação do raio com uma incerteza de cerca de 100 m, informação que vimos anteriormente ser necessária para determinar se um modelo teórico é realista, e podermos confirmar se no centro de uma estrela de neutrões existe matéria de quarks livres.

Simulações da fusão de duas estrelas de neutrões têm permitido identificar possíveis assinaturas da existência de matéria de quarks [16] ou outro tipo de matéria não nuclear como hiperões [17] no seu interior, mas dados observacionais com menor incerteza e estudos mais gerais e com mais estatística são necessários para dar respostas definitivas. Recentemente, num estudo [18] que realizou várias simulações de fusão de estrelas de neutrões, usando seis equações de estado sintéticas, representativas de diferentes comportamentos, os autores mostraram existir uma forte correlação entre a relação entre as perdas de energia e de momento angular na porção tardia do sinal pós-fusão, designado por "long ringdown", e a equação de estado a densidades várias vezes a densidade de saturação de matéria nuclear existente no centro de estrelas de neutrões. Realizando estudos com maior estatística, espera-se que esta correlação, e outras que sejam identificadas, permitam fornecer restrições rigorosas sobre as propriedades da matéria no centro das estrelas de neutrões. Estas restrições juntamente com restrições provenientes de cálculos de QCD perturbativo serão essenciais para desvendar a composição das estrelas de neutrões.

#### 5. Novas observações III: ondas eletromagnéticas de raios-X

A determinação simultânea da massa e raio de uma estrela de neutrões pode restringir fortemente a equação de estado como discutimos acima. Foi precisamente esse o objetivo do telescópio da NASA, o Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) instalado na Estação Espacial Internacional, que permite efetuar espectroscopia na banda dos raios X de baixa energia (0,2 keV - 12 keV). Desde 2019 a colaboração já publicou dados referentes a cinco pulsares PSR J0030+0451 [19,20], PSR J0740+6620 [21,22], PSR J0437-4715 [23], PSR J1231-1411 [25], PSR J0614-3329 [24] com massas de uma até mais de duas massas solares. Estes resultados têm dado uma contribuição importante, mas as incertezas associadas às observações ainda restringem pouco a equação de estado [26,27]. Espera-se que as futuras missões de raios-X eXTP (X-Ray Timing and Polarimetry) [28] e STROBE-X [29] possam reduzir as incertezas associadas à determinação do raio a 2 %.

Baseados em observações da missão Gaia e na modelação do espectro de raios-X, a colaboração HESS detetou recentemente um objeto compacto no centro do remanescente de uma supernova, HESS J1731-347, com uma massa abaixo de uma massa solar,  $0,77^{+0,20}_{-0,17} M_{\odot}$ , e raio  $10,4^{+0,86}_{-0,78}$  km, que desafia a descrição da matéria de estrela de neutrões a baixas densidades [30].

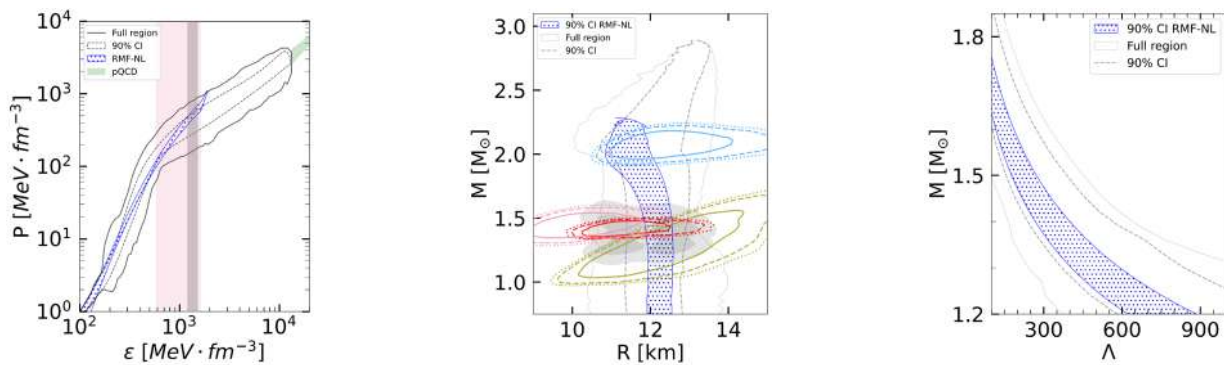


Figura 4 - Esquerda: A região do espaço pressão versus densidade de energia definida pela linha cheia (tracejada) é a região permitida (intervalo de confiança de 90%) pela aplicação de várias restrições observacionais e de cálculos de primeiros princípios. A região azul ponteadada é determinada usando um modelo microscópico que descreve matéria nuclear sujeita às mesmas restrições e considerando também as propriedades de núcleos finitos. A região verde a altas densidades resulta de cálculos de QCD perturbativa e corresponde a densidades da ordem de 40 vezes a densidade de saturação. Causalidade e relações termodinâmicas mostram que mesmo sendo as restrições obtidas a densidades muito altas, estas têm influência nas densidades existentes dentro das estrelas de nêutrons. A banda rosa (cinza) identifica a densidade central das estrelas de massa máxima descritas pelo modelo agnóstico (microscópico nuclear). Meio e direita: respectivamente, regiões de massa-raio e massa-deformabilidade de maré previstas pelas equações de estado da figura da esquerda. São probabilidades do raio e da deformabilidade de maré condicionadas na massa. A linha a cheio define a região total, enquanto a linha tracejada define o intervalo de confiança de 90 %, e a região ponteadada azul é o intervalo de confiança de 90% previsto pelo modelo microscópico nuclear. Na figura do meio representamos as distribuições de probabilidade de quatro pulsares observados pela missão NICER: PSR J0030+0451 (verde seco) [19,20], PSR J0740+6620 (azul) [21,22], PSR J0437-4715 (vermelho) [23], PSR J0614-3329 (rosa) [24]. A região cinza escura (clara) corresponde à distribuição de probabilidade com um intervalo de confiança de 50% (90%) obtida da análise do evento GW170817 [12].

## 6. A equação de estado de matéria nuclear

Utilizando as observações apresentadas juntamente com cálculos ab-initio para densidades abaixo da densidade de saturação e a densidades muito altas onde a QCD perturbativa é válida, vários estudos recentes têm recorrido a modelos agnósticos para definir a região do espaço fase definido pela pressão em função da densidade de energia que inclui a verdadeira equação de estado de matéria que interage pela força forte. Estes modelos agnósticos não utilizam modelos microscópicos, mas descrevem a equação de estado baseados em parametrizações de funções politrópicas, ou da velocidade do som, ou ainda abordagens não paramétricas como processos gaussianos. A figura 4, painel da esquerda, identifica a região da pressão em função da densidade de energia que é permitida pelas observações astrofísicas que temos atualmente e cálculos ab-initio a baixas e altas densidades. A linha a cheio define a região total, enquanto a linha a tracejado define o intervalo de confiança de 90%. Esta região foi obtida usando sete segmentos parametrizados pela velocidade do som e impondo restrições de cálculos teóricos (teoria de campos quiral efetiva a baixas densidades e QCD perturbativa a altas densidades) e observações astrofísicas (a deformabilidade de maré efetiva da fusão de duas estrelas de nêutrons do evento GW170817, e a massa máxima acima de duas massas solares imposto pelos pulsares PSR J0348+0432 e PSR J0740+6620). Representamos com uma banda rosa a região definida pela densidade no centro das estrelas de maior massa. As observações astrofísicas só conseguirão impor restrições até esta densidade. Nos painéis do meio e da direita é representada a previsão para a massa-raio e massa-deformabilidade de maré obtida da descrição agnóstica da equação de estado: as linhas a cheio representam a região total e as linhas a tracejado as distribuições de probabilidade com um intervalo de confiança de 90% (mais abaixo serão discutidas as regiões a azul ponteadada). Esta informação é útil, mas nada nos diz sobre a composição da estrela de nêutrons. Além disso, dados laboratoriais existentes, como as propriedades dos núcleos, não são tidos em conta numa descrição agnóstica da equação de estado. Assim, esta informação precisa de ser complementada por novas obser-

vações com incertezas menores, e cálculos teóricos que permitam dar informação sobre a composição. Além de dados observacionais da massa, raio e deformabilidade de maré, será essencial também usar outro tipo de dados, como os que estão relacionados com o arrefecimento das estrelas, os seus modos de oscilação e as suas propriedades magnéticas.

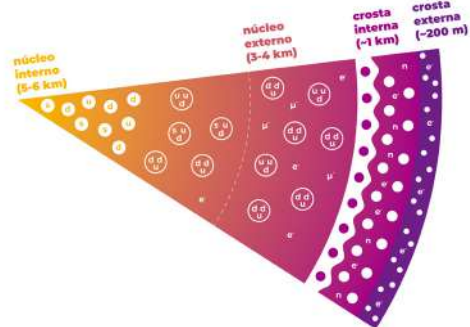


Figura 5 - Corte representando as diferentes camadas que constituem uma estrela de nêutrons: a crosta externa contém agregados de núcleões numa rede cristalina com um fundo de elétrons; na crosta interna os agregados de nucleões são muito ricos em nêutrons e existem num fundo de elétrons e nêutrons. Os agregados nucleares podem adquirir formas exóticas na transição para o núcleo da estrela; o núcleo externo é constituído por nêutrons, prótons, elétrons e múons; no núcleo interno podem existir vários tipos de matéria exótica como hiperões ou quarks desconfinados.

Usando vários modelos de matéria nuclear baseados em descrições com simetria de covariância de Lorentz designadas por funcionais covariantes da densidade, o nosso grupo fez recentemente um estudo amplo considerando apenas matéria nuclear em equilíbrio beta para identificar de que modo matéria sem componentes exóticas é compatível com as observações astrofísicas, dados experimentais dos núcleos e cálculos ab-initio existentes [31]. Os parâmetros dos modelos que descrevem a interação nuclear através da troca de mesões com as simetrias adequadas (escalar-isoescalar, vector-isoescalar e vector-isovector) foram obtidos em cálculos de inferência bayesiana [32,33,34]. Em todos os painéis da figura 4, as regiões a azul ponteadada representam as distribuições de pro-

babilidade obtidas do cálculo de inferência bayesiana com um intervalo de confiança de 90 %.

Os dados observacionais existentes presentemente são todos compatíveis com modelos sem graus de liberdade exóticos. Verificamos, no entanto, que uma descrição hadrónica só cobre parte da região permitida atualmente pelas observações e descrições teóricas. O modelo microscópico utilizado não tem em conta o aparecimento de graus de liberdade exóticos e de transições de fase sendo, por isso, apenas um ponto de partida para descobrir o diagrama de fases da QCD a densidades altas. O próprio funcional covariante da densidade deve ter flexibilidade suficiente e ser apenas limitado por argumentos físicos. Encontrar assinaturas que identifiquem sem qualquer dúvida a presença de graus de liberdade não nucleónicos é um dos desafios presentes.

É essencial também referir que o conhecimento do interior das estrelas de neutrões, obriga a uma correta interpretação dos sinais emitidos à superfície. Entre a superfície e o núcleo de uma estrela existe a crosta, uma camada com uma estrutura muito complexa. A crosta é normalmente dividida em duas partes: a crosta externa onde núcleos formam uma estrutura cristalina que tem como fundo uma distribuição de eletrões de modo que no todo há neutralidade de carga elétrica; a crosta interna caracterizada por agregados de nucleões cada vez mais ricos em neutrões em equilíbrio com um fundo de eletrões e de neutrões. A crosta interna pode apresentar na camada próxima do núcleo da estrela estruturas exóticas cuja forma geométrica resulta da competição entre a força de Coulomb e força nuclear. Dizemos que é uma forma de matéria frustrada. Os físicos que descreveram pela primeira vez esta matéria chamaram-lhe de pasta, inspirados no termo italiano, porque à medida que se penetra na estrela mostraram que os agregados de nucleões passam pela geometria esférica (o gnocchi), cilíndrica (spaghetti), planar (lasagna), buracos cilíndricos (pene), buracos esféricos (queijo suíço) [35]. Foi proposto que a existência desta camada amorfa poderia explicar o decaimento rápido do campo magnético em estrelas com campos magnéticos muito fortes [36]. Em [37], construímos um conjunto de equações de estado unificadas, cuja crosta interna foi calculada com o mesmo modelo usado para descrever o núcleo da estrela, algo que geralmente não é feito. Para simular a fusão de estrelas de neutrões é necessária a equação de estado a temperatura finita, que inclui também uma região não homogénea à superfície. Mais uma peça do grande puzzle que é uma estrela de neutrões que precisa de ser investigada. Usando dados de colisões de iões pesados que decorreram no laboratório GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) em Caen, França, obtivemos recentemente uma parametrização realista de matéria nuclear com núcleos leves como isótopos do hidrogénio e do hélio como a que poderá existir em matéria de supernovas ou da fusão de estrelas de nucleares [38]. São todas estas componentes que a descrição de uma estrela de neutrões exige que torna esta área tão desafiante.

Uma questão que podemos colocar é: como podemos de um modo eficiente extrair a equação de estado da matéria das estrelas de neutrões e identificar a sua composição? Os métodos

de aprendizagem de máquina (ML) irão certamente constituir uma ferramenta importante para identificar a composição de uma estrela. Recorrendo a estes métodos, utilizámos redes neuronais bayesianas (BNN) para determinar a composição no interior de uma estrela de neutrões, em particular a fração de protões, conhecendo as suas propriedades macroscópicas como a massa, raio e deformabilidade de maré. Estas redes BNN têm a particularidade de nos fornecerem uma medida de incerteza da previsão. O modelo de BNN foi treinado usando conjuntos de equações de estado geradas impondo restrições observacionais e teóricas e verificámos que o modelo BNN recuperou com sucesso a fração de protões com níveis razoáveis de incerteza [39]. Um outro modelo de ML usado com sucesso foi um modelo de classificação por redes neuronais para detetar a presença de graus de liberdade hiperónicos em estrelas de neutrões, partindo do conhecimento do raio e/ou deformabilidade de maré de um conjunto de estrelas de neutrões [40]. O modelo treinado dá a probabilidade da presença de hiperões na composição da estrela de neutrões.

## 7. Olhando para o futuro

Estrelas de neutrões são objetos muito complexos, que colocam muitos desafios, mas que poderão servir de laboratórios não só de física nuclear e de partículas, mas também de matéria escura, de relatividade geral, de matéria condensada, de física de plasmas. Nesta aventura é essencial descrever adequadamente a equação de estado da matéria que as forma mas também a sua dinâmica: a explosão de supernova, a fusão de duas estrelas, a evolução do seu campo magnético, os glitches ou mudanças repentinas no período de rotação, os seus modos vibracionais, o seu arrefecimento. O desenvolvimento de recursos computacionais cada vez mais potentes e mais rápidos serão essenciais. Nas próximas décadas irão entrar em funcionamento diversos telescópios e missões que nos vão permitir ter acesso às propriedades de um grande número de estrelas de neutrões, com uma incerteza cada vez menor. O conhecimento da física das estrelas de neutrões coloca desafios a todos os níveis, desde o tecnológico, ao teórico, observacional e computacional, e certamente os próximos anos serão muito ricos em novas descobertas.

## Agradecimentos

Trabalho financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito dos projetos UIDB/04564/2020 e UIDP/04564/2020 com identificadores DOI 10.54499/UIDB/04564/2020 e 10.54499/UIDP/04564/2020, respetivamente. M.A., V.C., T.C. e L.S. são financiados pelas bolsas de doutoramento 2022.11685.BD, 2024.00311.BD, PRT/BD/154193/2022 e 2021.08779.BD (FCT, Portugal), respetivamente. H.P é financiada pelo contrato 2022.03966.CEECIND (FCT, Portugal) com o identificador DOI 10.54499/2022.03966.CEECIND/CP1714/CT0004.

## Referências

- [1] W. Baade and F. Zwicky, Contributions from the Mount Wilson Observatory 3, 79 (1934).
- [2] R. A. Hulse and J. H. Taylor, *ApJ*, 195, L51 (1975).
- [3] J. M. Weisberg and J. H. Taylor, *ASP Conf. Ser.* 328, 25 (2005), arXiv:astro-ph/0407149.
- [4] R. C. Tolman, *Phys. Rev.* 55, 364 (1939).
- [5] J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff, *Phys. Rev.* 55, 374 (1939).
- [6] P. Demorest, T. Pennucci, S. Ransom, M. Roberts, and J. Hessels, *Nature* 467, 1081 (2010), arXiv:1010.5788 [astro-ph.HE].
- [7] H. T. Cromartie et al. (NANOGrav), *Nature Astron.* 4, 72 (2019), arXiv:1904.06759 [astro-ph.HE].
- [8] J. Antoniadis et al., *Science* 340, 6131 (2013), arXiv:1304.6875 [astro-ph.HE].
- [9] E. Fonseca et al., *Astrophys. J. Lett.* 915, L12 (2021), arXiv:2104.00880 [astro-ph.HE].
- [10] R. W. Romani, D. Kandel, A. V. Filippenko, T. G. Brink, and W. Zheng, *Astrophys. J. Lett.* 908, L46 (2021), arXiv:2101.09822 [astro-ph.HE].
- [11] R. W. Romani, D. Kandel, A. V. Filippenko, T. G. Brink, and W. Zheng, *Astrophys. J. Lett.* 934, L17 (2022), arXiv:2207.05124 [astro-ph.HE].
- [12] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101 (2017), arXiv:1710.05832 [gr-qc].
- [13] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 121, 161101 (2018), arXiv:1805.11581 [gr-qc].
- [14] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo, Fermi-GBM, INTEGRAL), *Astrophys. J. Lett.* 848, L13 (2017), arXiv:1710.05834 [astro-ph.HE].
- [15] P. S. Cowperthwaite et al., *Astrophys. J. Lett.* 848, L17 (2017), arXiv:1710.05840 [astro-ph.HE].
- [16] A. Bauswein, N.-U. F. Bastian, D. B. Blaschke, K. Chatziioannou, J. A. Clark, T. Fischer, and M. Oertel, *Phys. Rev. Lett.* 122, 061102 (2019), arXiv:1809.01116 [astro-ph.HE].
- [17] H. Kochankowski, G. Lioutas, S. Blacker, A. Bauswein, A. Ramos, and L. Tolos 10.1103/vmrl-lf6k (2025), arXiv:2501.12905 [astro-ph.HE].
- [18] C. Ecker, T. Gorda, A. Kurkela, and L. Rezzolla, *Nature Commun.* 16, 1320 (2025), arXiv:2403.03246 [astro-ph.HE].
- [19] T. E. Riley et al., *Astrophys. J. Lett.* 887, L21 (2019), arXiv:1912.05702 [astro-ph.HE].
- [20] S. Vinciguerra et al., *Astrophys. J.* 961, 62 (2024), arXiv:2308.09469 [astro-ph.HE].
- [21] T. E. Riley et al., *Astrophys. J. Lett.* 918, L27 (2021), arXiv:2105.06980 [astro-ph.HE].
- [22] T. Salmi et al., *Astrophys. J.* 974, 294 (2024), arXiv:2406.14466 [astro-ph.HE].
- [23] D. Choudhury et al., *Astrophys. J. Lett.* 971, L20 (2024), arXiv:2407.06789 [astro-ph.HE].
- [24] L. Mauviard et al., (2025), arXiv:2506.14883 [astro-ph.HE].
- [25] T. Salmi et al., *Astrophys. J.* 976, 58 (2024), arXiv:2409.14923 [astro-ph.HE].
- [26] C. Huang, G. Raaijmakers, A. L. Watts, L. Tolos, and C. Providência, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 529, 4650 (2024), arXiv:2303.17518 [astro-ph.HE].
- [27] C. Huang, L. Tolos, C. Providência, and A. Watts, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 536, 3262 (2025), arXiv:2410.14572 [astro-ph.HE].
- [28] S.-N. Zhang et al. (eXTP), *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 62, 29502 (2019), arXiv:1812.04020 [astro-ph.IM].
- [29] P. S. Ray et al. (STROBE-X Science Working Group), (2019), arXiv:1903.03035 [astro-ph.IM].
- [30] V. Sagun, E. Giangrandi, T. Dietrich, O. Ivanytskyi, R. Negreiros, and C. Providência, *Astrophys. J.* 958, 49 (2023), arXiv:2306.12326 [astro-ph.HE].
- [31] J. Cartaxo, C. Huang, T. Malik, S. Sourav, W.-L. Yuan, T. Zhou, X. Liu, and C. Providência, (2025), arXiv:2506.03112 [nucl-th].
- [32] T. Malik, M. Ferreira, B. K. Agrawal, and C. Providência, *Astrophys. J.* 930, 17 (2022), arXiv:2201.12552 [nucl-th].
- [33] T. Malik, M. Ferreira, M. B. Albino, and C. Providência, *Phys. Rev. D* 107, 103018 (2023), arXiv:2301.08169 [nucl-th].
- [34] L. Scurto, H. Pais, and F. Gulminelli, *Phys. Rev. D* 109, 103015 (2024), arXiv:2402.15548 [nucl-th].
- [35] D. G. Ravenhall, C. J. Pethick, and J. R. Wilson, *Phys. Rev. Lett.* 50, 2066 (1983).
- [36] J. A. Pons, D. Viganò, and N. Rea, *Nature Phys.* 9, 431 (2013), arXiv:1304.6546 [astro-ph.SR].
- [37] T. Malik, H. Pais, and C. Providência, *Astron. Astrophys.* 689, A242 (2024), arXiv:2401.10842 [nucl-th].
- [38] T. Custódio, A. Rebillard-Soulié, R. Bougault, D. Gruyer, F. Gulminelli, T. Malik, H. Pais, and C. Providência, *Phys. Rev. Lett.* 134, 082304 (2025), arXiv:2407.02307 [nucl-th].
- [39] V. Carvalho, M. Ferreira, T. Malik, and C. Providência, *Phys. Rev. D* 108, 043031 (2023), arXiv:2306.06929 [nucl-th].
- [40] V. Carvalho, M. Ferreira, and C. Providência, *Phys. Rev. D* 110, 123016 (2024), arXiv:2409.12684 [nucl-th].



Constança Providência doutorou-se na Universidade de Oxford em Física Nuclear e é presentemente Professora Catedrática do Departamento de Física da Universidade de Coimbra. Estuda as propriedades da matéria nuclear em condições de densidade, assimetria nuclear e temperatura extremas como a que forma as estrelas de neutrões, estando especialmente interessada no diagrama de fases da cromodinâmica quântica, no aparecimento de graus de liberdade exóticos nas estrelas de neutrões, e nas propriedades de matéria bariônica magnetizada. Recebeu o Prémio Ciência da Gulbenkian em 1991 e é membro correspondente da Academia das Ciências de Lisboa.



Márcio Ferreira é investigador no CFisUC, Universidade de Coimbra, Portugal. Obteve o seu doutoramento em Física pela Universidade de Coimbra. Estudou o efeito de campos magnéticos muito fortes no diagrama de fases da QCD. Presentemente está particularmente interessado em determinar a composição das estrelas de neutrões conhecidas as suas propriedades, aplicando métodos de machine learning, em particular, modelos generativos para desenvolver estruturas de inferência rápida e redes neurais bayesianas para quantificar incertezas.



Helena Pais concluiu o seu doutoramento em Física, com especialização em Astrofísica, na Universidade do Tennessee, Knoxville, EUA, em 2013. Trabalha na área das Ciências Físicas, com especialização em Astrofísica Nuclear. Atualmente, é investigadora auxiliar com um CEECIND na Universidade de Coimbra. A sua investigação centra-se nas estrelas de neutrões, particularmente na equação de estado, transições de fase de matéria que interage pela força forte, energia de simetria nuclear e o efeito de campos magnéticos fortes na matéria bariônica.



Tuhin Malik é investigador no CFisUC, Universidade de Coimbra, Portugal. Obteve o seu doutoramento em Física pelo BITS-Pilani, Índia (2020) e é especialista em física de estrelas de neutrões, modelação de equações de estado e métodos de inferência bayesiana. A sua investigação centra-se na restrição das propriedades da matéria densa e na presença de matéria escura em estrelas de neutrões através de observações astronómicas multi-mensageiras e modelação teórica. É membro ativo da colaboração Einstein Telescope.



Milena Bastos Albino é aluna de doutoramento em Física na Universidade de Coimbra e mestre pela Universidade de São Paulo. Estuda a possibilidade de haver matéria de quarks no interior das estrelas de neutrões utilizando modelos microscópicos e aplicando análise Bayesiana para obter conjuntos de equações que satisfaçam restrições teóricas de matéria que interage pela força forte e observacionais das estrelas de neutrões.



Valéria Carvalho é aluna de doutoramento em Física na Universidade de Coimbra. O seu trabalho foca-se na aplicação de métodos de machine learning para determinar a composição e as propriedades da matéria das estrelas de neutrões, a partir de dados observacionais atuais e a previsão da sua fiabilidade em observações futuras.



Tiago Custódio é aluno de doutoramento em Física Nuclear e Partículas pela Universidade de Coimbra. Estuda colisões de íões pesados como forma de melhorar o conhecimento da equação de estado da matéria nuclear quente não-homogênea presente em eventos astrofísicos como colisões de estrelas de neutrões e colapsos de supernovas.



Luigi Scurto é aluno de doutoramento na Universidade de Coimbra. A sua investigação centra-se na equação de estado magnetizada para objetos estelares compactos, com especial enfoque na região da crosta, onde se pode formar agregados de matéria nuclear. Estes aglomerados nucleares podem ter impacto não só no arrefecimento da proto-estrela de neutrões, mas também nas propriedades dinâmicas, como os coeficientes de transporte destes objetos compactos.



João Cartaxo está a concluir o Mestrado em Física na Universidade de Coimbra, com especialização em Física Nuclear e de Partículas. A sua investigação centra-se no desenvolvimento de um modelo fenomenológico flexível para estudar as limitações e o alcance preditivo dos modelos de Campo Médio Relativista (RMF).