

La Fisica Nucleare Teorica nell’Era dell’Astronomia Multimessaggera

Omar Benhar INFN e Dipartimento di Fisica - Sapienza Università di Roma

Negli anni a venire l’Astronomia Multimessaggera fornirà informazioni senza precedenti sulla struttura e la dinamica delle stelle di neutroni. I dati che ci si aspetta di ottenere saranno fondamentali per determinare i limiti di applicabilità del paradigma della Fisica Nucleare Teorica, basata sull’ipotesi che i sistemi nucleari siano descrivibili come aggregati di protoni e neutroni interagenti.

Introduzione

La rivelazione di radiazione gravitazionale annunciata dalla Collaborazione LIGO/Virgo il 17 Agosto del 2017 [1], seguita a meno di due secondi dall’osservazione del γ -ray Burst GRB 170817A, effettuata dal Fermi Gamma ray Burst Monitor (GBM) [2] e dall’International Gamma-ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL) [3], e undici ore più tardi dalla rivelazione del transiente ottico AT 2017gfo [4], hanno permesso di

attribuire l’evento GW170817 alla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni nella galassia ellittica NGC 4993, seguito dall’esplosione di una kilonova. Con questa straordinaria dimostrazione della possibilità di utilizzare in modo complementare informazioni contenute in segnali di natura diversa, tanto l’Astrofisica quanto la Fisica Nucleare sono entrate nella nuova era dell’*Astronomia Multimessaggera*¹.

L’analisi combinata di segnali gravitazionali ed elettromagnetici, rivelati da osservatori installati sia sulla Terra che nello spazio, ha il potenziale di fornire informazioni senza precedenti sulla struttura e la dinamica delle stelle di neutroni, e fare luce su molti problemi aperti della Fisica Nucleare. I dati raccolti saranno fondamentali per la comprensione delle interazioni tra i nucleoni a densità molto maggiori di quella tipica dei nuclei atomici, $\rho_0 \approx 2.7 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$, e permetteranno di esplorare sia i limiti di applicabilità

¹L’uso italiano di questa dicitura—traduzione dell’Inglese *Multimessenger Astronomy*—è suggerito dall’Accademia della Crusca [5].

della descrizione dei sistemi nucleari in termini di protoni e neutroni che la possibile comparsa di forme di materia non osservabili sulla Terra, la cui esistenza è prevista dalla teoria fondamentale delle interazioni forti.

Dinamica Nucleare

Le Teoria Nucleare a Molti Corpi è fondata sull'ipotesi che i nuclei atomici siano aggregati di protoni e neutroni, che si comportano come particelle puntiformi non relativistiche interagenti tramite l'Hamiltoniana

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i < j} v_{ij} + \dots \quad (1)$$

Nell'equazione sovrastante p_i e m indicano, rispettivamente, l'impulso dell' i -esimo nucleone e la sua massa, v_{ij} è il potenziale agente tra due nucleoni, e i puntini di sospensione indicano la possibile presenza di interazioni irriducibili che coinvolgono più di due particelle.

Il modello a *shell* dei nuclei, capace di predire in modo soddisfacente spin, parità, momento magnetico e momento di quadrupolo elettrico, è basato su una semplice implementazione di questo schema, in cui i potenziali d'interazione tra i nucleoni sono sostituiti da un campo medio, all'interno del quale protoni e neutroni si muovono come particelle indipendenti. La validità di questo scenario è stata ampiamente confermata dallo studio sistematico dei processi di diffusione di elettroni in cui viene emesso un protone dal nucleo bersaglio [6]. Effetti significativi dovuti ad interazioni non descrivibili dal campo medio, che danno origine a forti correlazioni a corto raggio tra i nucleoni, emergono tuttavia chiaramente dai dati disponibili, ed indicano che la descrizione accurata della dinamica nucleare richiede l'uso di un'Hamiltoniana definita come nell'Eq. (1).

Nei modelli più realistici, H include un potenziale nucleone-nucleone (NN) in grado di descrivere accuratamente le proprietà osservate del sistema di due nucleoni, sia nell'unico stato legato² che negli stati di diffusione a energie fino alla soglia di produzione del pione. Per ripro-

²Il nucleo di deuterio, o deutone, è formato da un protone e un neutrone in uno stato di spin totale $S = 1$.

durre il valore sperimentale dell'energia dello stato fondamentale del nucleo ^3He è necessario aggiungere al secondo membro dell'Eq. (1) un termine contenente il potenziale U_{ijk} , che descrive interazioni irriducibili tra tre nucleoni (NNN). Il contributo di questo termine all'energia potenziale, che può essere ottenuto risolvendo in modo esatto l'equazione di Schrödinger, risulta essere molto minore di quello del potenziale NN; tipicamente $\langle U_{ijk} \rangle / \langle v_{ij} \rangle < 5\%$.

I progressi degli approcci stocastici basati sul metodo di Monte Carlo hanno permesso di utilizzare le Hamiltoniane nucleari costruite nel modo sopra descritto per effettuare calcoli accurati delle energie dello stato fondamentale e dei primi stati eccitati dei nuclei con numero di massa $A \leq 12$ [7]. L'accordo tra i risultati di questi studi ed i valori sperimentali conferma in modo molto convincente il potere predittivo della teoria nucleare a molti corpi.

Materia superdensa

L'estensione dello schema descritto nella sezione precedente al caso della materia nucleare superdensa, necessaria per lo studio delle proprietà delle stelle di neutroni, pone problemi non banali, che devono essere analizzati attentamente. In primo luogo, è necessario individuare i limiti di applicabilità della descrizione in termini di protoni e neutroni.

A densità maggiori della densità tipica dei nuclei atomici, ρ_0 , la statistica di Fermi tende a rendere energeticamente favoriti processi in cui i nucleoni, di massa $M_N \approx 939$ MeV, vengono rimpiazzati da particelle più pesanti aventi stranezza non nulla, come gli iperoni Λ e Σ , le cui masse sono $M_\Lambda = 1116$ MeV e $M_\Sigma \approx 1193$ MeV. Al crescere della densità, tipicamente per $\rho \gtrsim 2\rho_0$, queste reazioni divengono possibili perché l'eccesso di massa dovuto agli iperoni prodotti è compensato dalla diminuzione dell'energia cinetica delle particelle che partecipano alla reazione.

Quando la densità di massa-energia della materia nucleare diventa paragonabile a quella dei nucleoni, $\rho_N \approx 4 \times 10^{15}$ gr cm⁻³ $\approx 15\rho_0$, la descrizione in termini di nucleoni individuali puntiformi perde ovviamente significato. In questo regime i gradi di libertà rilevanti sono i costituenti elementari di protoni e neutroni, non più

confinati al loro interno. Nel limite $\varrho \rightarrow \infty$ la materia si riduce a un gas di Fermi di quark non interagenti, come dettato dalla libertà asintotica dalla teoria fondamentale delle interazioni forti.

Lo studio della possibile transizione dalla materia nucleare alla materia iperonica, o alla materia di quark, consiste essenzialmente nel determinare lo stato fondamentale del sistema a densità di numero barionico fissata, con le condizioni aggiuntive di neutralità elettrica ed equilibrio chimico rispetto alle interazioni deboli, che trasformano barioni in leptoni e viceversa. L'elemento fondamentale di questa analisi è l'equazione di stato (EOS), che descrive la dipendenza della pressione dalla densità di massa-energia della materia.

Dato un modello di Hamiltoniana, il formalismo della teoria a molti corpi permette di ottenere l'energia per nucleone della materia nucleare a densità barionica fissata, $e(\varrho)$. Nel caso di materia con ugual numero di neutroni e protoni, I risultati di questi calcoli riproducono in modo soddisfacente le proprietà di equilibrio che si ottengono dall'estrapolazione della formula semiempirica delle masse e delle misure di densità di carica dei nuclei [8]. L'EOS, $P(\epsilon)$, si calcola a partire dalla $e(\varrho)$ utilizzando le relazioni

$$P(\varrho) = \varrho^2 \frac{d}{d\varrho} e(\varrho) \quad , \quad \epsilon = \varrho e(\varrho) . \quad (2)$$

La derivata dell'EOS fornisce una misura della compressibilità della materia, K_0 , che a sua volta determina il valore della velocità del suono nel mezzo. Di conseguenza, la richiesta che sia soddisfatta la causalità, cioè che la velocità del suono sia sempre minore della velocità della luce, pone un vincolo alla rigidità, o *stiffness*, predetta dall'EOS.

La *stiffness* dell'EOS è determinata dal modello dinamico utilizzato per descrivere le interazioni tra i costituenti della materia. L'uso dell'approssimazione non relativistica implica però che, indipendentemente dal modello di Hamiltoniana, la causalità venga violata quando la densità supera un valore di soglia, limitando così il regime di applicabilità della teoria a molti corpi.

La comparsa di forme di materia diverse dalla materia nucleare, costituite tanto da iperoni quanto da quark deconfinati, ha come conseguenza una diminuzione della *stiffness* dell'EOS ad al-

ta densità, potenzialmente sufficiente a mitigare il problema della violazione della causalità.

Stelle di neutroni

Le proprietà osservabili delle stelle di neutroni sono largamente determinate dall'EOS della materia stellare, che riflette sia la sua composizione che la dinamica delle interazioni tra i suoi costituenti.

Per ogni modello di EOS, massa e raggio stellari si ottengono dalla soluzione delle equazioni differenziali di Tolman Oppenheimer e Volkof (TOV) [9, 10], che descrivono l'equilibrio idrodinamico nella teoria della relatività generale, assegnando come condizione iniziale il valore della densità al centro della stella, ϱ_c . Questa analisi fornisce l'intervallo di valori di massa delle configurazioni stabili supportate dal modello utilizzato, come pure i raggi corrispondenti.

La massa massima è determinata principalmente dalla *stiffness* dell'EOS, che a sua volta dipende dalla struttura e dalla dinamica microscopica del sistema. Il semplice modello adottato nello studio pionieristico di Tolman e Oppenheimer, in cui la materia stellare veniva descritta come un gas di Fermi di neutroni non interagenti, è caratterizzato da una EOS molto soffice. Le masse predette da questo modello dipendono debolmente da ϱ_c per $\varrho_c \gtrsim 2\varrho_0$, e raggiungono il valore massimo $M_{\max} = 0.8 M_\odot$, dove M_\odot è la massa solare [10]. L'analisi delle relazioni massa-raggio ottenute utilizzando modelli diversi indica che, a parità di massa, le EOS più soffice predicono raggi minori.

L'EOS gioca un ruolo importante anche nella coalescenza dei sistemi binari di stelle di neutroni. Nella fase iniziale del processo, nella quale orbitano a grande distanza, i due corpi celesti si comportano come se fossero puntiformi, mentre la struttura interna diventa determinante quando la distanza orbitale è paragonabile alle loro dimensioni.

Il campo gravitazionale generato da una delle stelle induce un momento di quadrupolo di massa sull'altra, che a sua volta agisce allo stesso modo sulla prima, accelerando così il processo di coalescenza. Questo effetto è quantificato dal parametro Λ , chiamato **deformabilità mareale** [11]. Per ogni valore della massa della stella,

M , il valore di Λ , come quello del raggio, è determinato in modo univoco dall'EOS. I risultati degli studi teorici mostrano che, a parità di massa, ai modelli dinamici che predicono EOS più soffici corrispondono valori maggiori di Λ .

Confronto con le osservazioni

La possibilità di utilizzare dati astronomici per ottenere informazioni sulle proprietà della materia superdensa emerge chiaramente dal confronto tra il risultato dello studio di Oppenheimer e Volkoff discusso nella sezione precedente ed i valori osservati delle masse di stelle di neutroni.

Le masse di circa quaranta stelle di neutroni appartenenti a sistemi binari, formati sia da due stelle di neutroni (NS-NS) che da una stella di neutroni ed una nana bianca (NS-WD), sono state ottenute dalle misure dei parametri orbitali, che possono essere messi in relazione con le masse utilizzando la terza legge di Keplero, e dei parametri detti post-kepleriani, che tengono conto di effetti relativistici.

I valori centrali delle distribuzioni di massa ottenute da queste misure sono $M = 1.33 M_{\odot}$ per i sistemi NS-NS e $M = 1.55 M_{\odot}$ per quelli NS-WD [12]. L'incompatibilità tra questi dati e la massa massima ottenuta dall'analisi di Oppenheimer e Volkoff dimostra chiaramente che la materia stellare non si comporta come un gas di neutroni non interagenti. Nelle stelle di neutroni la stabilità non è assicurata solo dalla pressione di degenerazione, come avviene nelle nane bianche, ma richiede il contributo di una pressione aggiuntiva di origine dinamica. Questa osservazione ha importanti implicazioni fenomenologiche, in quanto implica che le misure di massa possono dare informazioni utili per verificare la validità dei diversi modelli usati per descrivere la materia stellare.

La stella di neutroni avente la massa più alta osservata fino ad oggi, $M = 2.08^{+0.069}_{-0.072} M_{\odot}$, è la pulsar PSR J0740+6620 [13]. L'esistenza di stelle aventi massa maggiore di due masse solari pone un vincolo stringente sulla *stiffness* dell'EOS, e tende ad escludere i modelli dinamici che prevedono una EOS soffice; in particolare quelli che prevedono la comparsa di iperoni nella regione centrale delle stelle. La materia composta esclusivamente di nucleoni, al contrario, è in grado di

generare pressione sufficiente a supportare stelle di massa compatibile con tutti i dati disponibili.

Vincoli ancora più stringenti si possono ottenere dall'analisi di misure combinate di massa e raggio, recentemente rese possibili dal Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER), installato dalla NASA sulla Stazione Spaziale Internazionale. Le osservazioni della pulsar PSR J10030+0451 hanno permesso di determinarne sia la massa, $M = 1.44^{+0.15}_{-0.14} M_{\odot}$, che il raggio, $R = 13.02^{+1.24}_{-1.06}$ km [14]. Questi valori sono ampiamente compatibili con i risultati di calcoli teorici effettuati usando l'approccio basato sulla teoria nucleare a molti corpi, che predice una densità centrale della stella $\rho_c \sim 3\rho_0$.

Il raggio della pulsar PSR J0740+6620, la cui densità centrale è $\rho_c \sim 4\rho_0$, è stato anch'esso misurato dalla collaborazione NICER, col risultato $R = 12.39^{+1.30}_{-0.98}$ km. L'osservazione di stelle aventi masse molto diverse e raggi che differiscono di poco indica che la *stiffness* dell'EOS non diminuisce drasticamente per $3\rho_0 \lesssim \rho \lesssim 4\rho_0$. Ciò sembra escludere la possibilità di una transizione di fase del prim'ordine alla materia di quark in stelle di massa $\sim 2 M_{\odot}$.

Il limite superiore alla *stiffness* dell'EOS, derivante dalla richiesta che la velocità del suono sia inferiore alla velocità della luce nella regione di densità rilevante, è generalmente soddisfatto dai modelli della materia nucleare per stelle di massa compatibile con quella della pulsar PSR J0740+6620.

L'osservazione dell'evento GW170817 [1], che ha segnato l'inizio dell'era lungamente attesa dell'astronomia gravitazionale, ha permesso di ottenere informazioni sulla massa e la deformabilità mareale delle due stelle di neutroni appartenenti ad un sistema binario coalescente. Questa analisi, i cui risultati sono compatibili con le predizioni della teoria nucleare a molti corpi, ha determinato che le masse sono comprese negli intervalli $1.18 \leq M_1/M_{\odot} \leq 1.36$ e $1.36 \leq M_2/M_{\odot} \leq 1.58$. I valori di Λ_1 e Λ_2 ottenuti favoriscono modelli della materia stellare che predicono valori elevati della compattezza, definita dal rapporto M/R .

Studi basati sul metodo di Bayes sono stati effettuati per inferire l'EOS della materia stellare dall'insieme di dati ottenuti combinando le osservazioni di segnali gravitazionali ed elettromagnetici [15]. La stessa tecnica è stata anche

utilizzata per determinare i valori dei parametri presenti nei modelli dinamici da cui le EOS vengono derivate, come gli accoppiamenti tra i nucleoni nel regime di alta densità [16, 17].

Prospettive future

Negli anni a venire, la disponibilità di dati accurati permetterà di fare nuova luce sulla struttura e la dinamica della materia superdensa.

I risultati di analisi bayesiane basate su dati simulati hanno già mostrato che con l'avvento degli osservatori gravitazionali di nuova generazione, come l'Einstein Telescope attualmente in fase di progettazione [18]. Il potenziale di questi studi aumenterà enormemente [19].

Analisi vengono anche eseguite combinando le osservazioni astronomiche con le misure effettuate da esperimenti effettuati nei laboratori terrestri. Molto importanti, in questo contesto, sono le collisioni tra ioni pesanti di alta energia [20] e gli esperimenti di diffusione elettrone-nucleo [21], che permettono di ottenere informazioni sull'energia di simmetria nucleare.

Per concludere, va sottolineato il ruolo dell'analisi delle sezioni d'urto elettrone-nucleo in termini della variabile di scala y [22], che dimostra che gli elettroni incidenti si accoppiano con particelle di massa uguale a quella del nucleone con impulsi fino a ~ 500 MeV [23]. Dal momento che la presenza di componenti di impulso elevato nella funzione d'onda nucleare è dovuta all'effetto delle correlazioni tra i nucleoni, che localmente danno luogo a fluttuazioni della densità nucleare fino a valori $\sim 5\rho_0$ [24], l'osservazione dello scaling in y è consistente con l'ipotesi che il paradigma della Fisica Nucleare Teorica continui ad essere valido fino alle densità tipiche delle stelle di neutroni di massa più elevata.



- [1] B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*, Phys. Rev. Lett., 119 (2017) 161101.
- [2] A. Goldstein *et al.*: *An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A*, The Astrophysical Journal Letters, 848 (2017) L14.
- [3] V. Savchenko *et al.*: *INTEGRAL Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational-wave Event GW170817*, The Astrophysical Journal Letters, 848 (2017) L15.
- [4] B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, The Astrophysical Journal Letters, 848 (2017) L12.
- [5] Per le motivazioni, si consulti la pagina al link: <https://accademiadellacrusca.it/it/contenuti/la-nuova-astronomia--multimessaggera/6203>
- [6] O. Benhar: *Exploring Nuclear Dynamics with ($e,e'p$) Reactions: From LNF to JLab*, Nuclear Physics News, 26 (2016) 15.
- [7] J. Carlson *et al.*: *Quantum Monte Carlo methods for nuclear physics*, Rev. Mod. Phys., 87 (2015) 1067.
- [8] A. Akmal, V.R. Pandharipande: *Spin-isospin structure and pion condensation in nucleon matter*, Phys. Rev. C, 56 (1997) 2261.
- [9] R. C. Tolman: *Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid*, Phys. Rev., 55 (1939) 364.
- [10] J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff: *On Massive Neutron Cores*, Phys. Rev., 55 (1939) 374.
- [11] K.S. Thorne, A. Campolattaro: *Non-Radial Pulsation of General-Relativistic Stellar Models. I. Analytic Analysis for $L \geq 2$* , The Astrophysical Journal, 149 (1967) 591.
- [12] B. Kiziltan, A. Kottas, M. De Yoreo, S.E. Thorsett: *The Neutron Star Mass Distribution*, The Astrophysical Journal, 778 (2013) 66.
- [13] T.E. Riley *et al.*: *A NICER View of the Massive Pulsar PSR J0740+6620 Informed by Radio Timing and XMM-Newton Spectroscopy*, The Astrophysical Journal Letters, 918 (2021) L27.
- [14] M.C. Miller *et al.*: *The Radius of PSR J0740+6620 from NICER and XMM-Newton Data*, The Astrophysical Journal Letters, 918 (2021) L28.
- [15] G. Raaijmakers *et al.*: *Constraints on the Dense Matter Equation of State and Neutron Star Properties from NICER's Mass-Radius Estimate of PSR J0740+6620 and Multimessenger Observations*, The Astrophysical Journal Letters, 918 (2021) L29.
- [16] A. Maselli, A. Sabatucci, O. Benhar: *Constraining three-nucleon forces with multimessenger data*, Phys. Rev. C, 103 (2021) 065804.
- [17] T. Malik, M. Ferreira, B.K. Agrawal C. Providência: *Relativistic Description of Dense Matter Equation of State and Compatibility with Neutron Star Observables: A Bayesian Approach*, The Astrophysical Journal, 930 (2020) 17.
- [18] M. Maggiore *et al.*: *Science case for the Einstein telescope*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2020 (2020) 050.
- [19] A. Sabatucci, O. Benhar, A. Maselli, C. Pacilio: *Sensitivity of neutron star observations to three-nucleon forces*, Phys. Rev. D, 106 (2022) 083010.

- [20] P. Russotto *et al.*: *Studies of the equation-of-state of nuclear matter by heavy-ion collisions at intermediate energy in the multi-messenger era*, *La Rivista del Nuovo Cimento*, 46 (2023) 1.
- [21] D. Adhikari *et al.* (PREX Collaboration): *Accurate Determination of the Neutron Skin Thickness of ^{208}Pb through Parity-Violation in Electron Scattering*, *Phys. Rev. Lett.*, 126 (2021) 172502.
- [22] O. Benhar, D. Day, I. Sick: *Inclusive quasielastic electron-nucleus scattering*, *Rev. Mod. Phys.*, 80 (2008) 189.
- [23] J. Arrington *et al.*: *Inclusive Electron-Nucleus Scattering at Large Momentum Transfer*, *Phys. Rev. Lett.*, 82 (1999) 2056.
- [24] R. Subedi *et al.*: *Probing Cold Dense Nuclear Matter*, *Science*, 320 (2008) 1476.



Omar Benhar: Dirigente di Ricerca Emerito dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), ha pubblicato oltre 150 articoli sulla teoria dei sistemi di molti corpi, le interazioni elettrodeboli dei nuclei e le proprietà delle stelle di neutroni. È co-autore, insieme a Stefano Fantoni, della monografia *Nuclear Matter Theory* (CRC Press, 2020).