

Stelle di neutroni: lezione introduttiva

Xavier Roca Maza 5/12/2018

1) Alcune proprietà che fanno delle stelle di neutroni oggetti unici nell'universo:

Sono gli oggetti da questo lato dell'orizzonte degli eventi più densi: 10^{15} g / cm^3 . Hanno una massa simile a quella del Sole e un raggio di circa 10 km.

Hanno una gravità nella superficie di 10^{12} m / s^2 . 100 miliardi la gravità' sulla superficie terrestre.

Possono ruotare con un frequenze altissime fino a 714 Hz (PSR J1748-2446). Questo implica una velocità all'equatore di $c/4$.

Possono avere campi magnetici nella superficie fino a 10^{14} G ($1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$). Il campo magnetico nella superficie terrestre è inferiore a 1 G

A parte il Big Bang, le temperature più elevate mai misurate si osservano nella nascita o nel "merging" di due stelle di neutroni.

Dal "merging" di due stelle di neutroni si sono osservate onde gravitazionali (GW170817)

[Bilancio energia nucleare (formula delle masse) – energia gravitazionale (Newtoniana) con un modello semplice. Stima della massa e raggio della stella. Per le equazioni e considerazioni matematiche vedere appunti lezione]

2) Alcune scoperte importanti:

1920 Rutherford predice l'esistenza del neutrone.

1931 Landau anticipa l'esistenza di una "stella-nucleo" (non si riferisce esplicitamente ad una stella di neutroni).

1932 Chadwick scopre il neutrone.

1934 W. Baade and F. Zwicky suggeriscono che le stelle di neutroni sono il prodotto di una esplosione di supernova.

1939 Tolman e poi Oppenheimer and Volkoff trovano che la relatività generale predice una massa massima per una stella di neutroni.

1964 Hoyle, Narlikar and Wheeler prevedono che le stelle di neutroni devono ruotare molto velocemente.

1965 Hewish and Okoye scoprono un segnale radio molto intensa (dopo sarà mostrato che si tratta di una stella di neutroni)

1967 C. Schisler scopre una dozzina di fonti che emettono onde radio pulsate ("pulsar") usando un radar militare

1967 Hewish, Bell, Pilkington, Scott and Collins scoprono PSR1919+21 (Hewish riceve premio Nobel nel 1974).

1974 Primo pulsar binario (PSR 1913+16) scoperto da Hulse e Taylor (premio Nobel nel 1993).

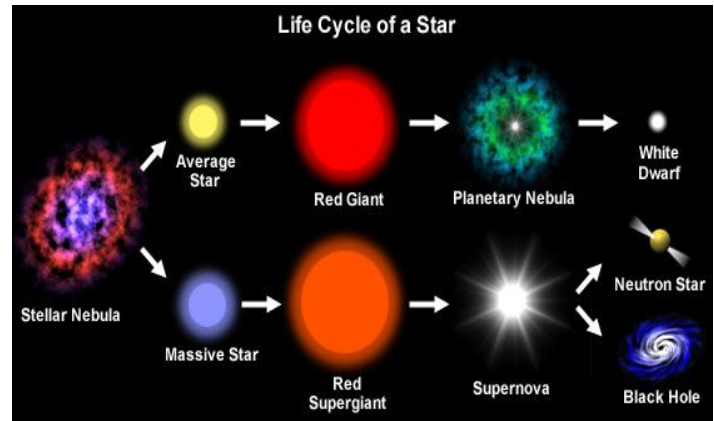
1982 Backer scopre il primo "millisecond pulsar" (PSR B1537+21)

1996 Walter scopre la stella di neutroni piu' vicina a noi (RX J1856-3754)

1998 Kouveliotou scopre il primo "magnetar" (stella di neutroni con campi magnetici molto intensi).

3) Evoluzione e formazione stella di neutroni:

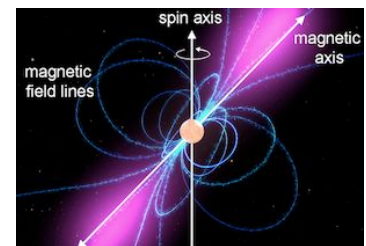
Stelle piccole come il Sole seguono una vita (e morte) molto tranquilla seguendo il percorso di superiore nella figura a destra e finendo la loro vita come una nana bianca. Stelle molto più massicce del Sole avranno invece una vita più movimentata e alla fine della loro vita vedranno una parte molto importante della loro massa dispersa per l'universo dopo la cosiddetta esplosione di supernova, il cui residuo sarà una stella molto densa, una stella di neutroni. Se la stella originale è particolarmente densa, la parte che rimane dopo l'esplosione supernova sarà così massiccia da collassare gravitazionalmente in un buco nero.



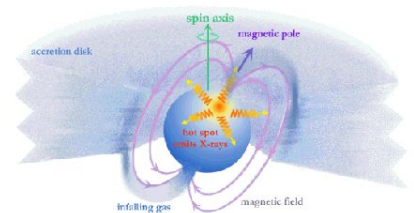
4) Tipi di stelle di neutroni osservabili

Una stella di neutroni isolata è praticamente invisibile. Se la stella di neutroni ha una compagna, questa può cederle massa. Oppure la stella di neutroni può "alimentarsi" da materia presente nei dintorni. La stella può quindi manifestarsi sotto varie forme:

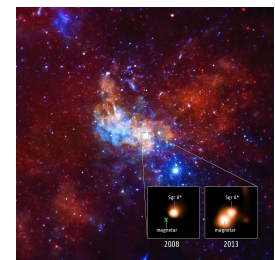
Pulsar: stella di neutroni che emette impulsi direzionali di radiazione rilevabili sulla Terra grazie al suo fortissimo campo magnetico. Funzionano più o meno come un faro rotante.



Burster a raggi X: una stella di neutroni con una compagna binaria dalla quale estrae materia che va a cadere sulla sua superficie. La materia che cade acquista un'enorme energia ed emette raggi-X.

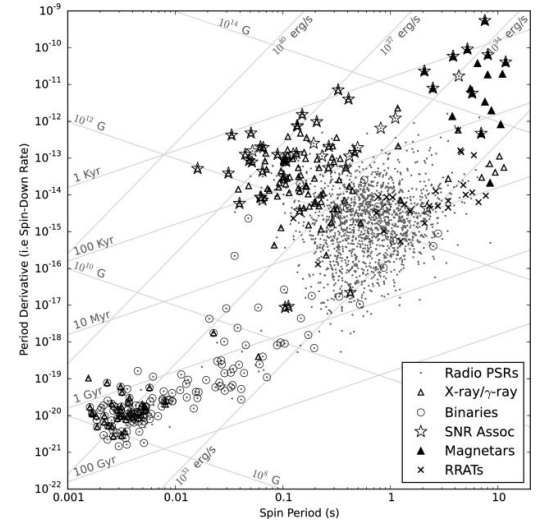


Magnetar: stella di neutroni con un campo magnetico molto intenso che diminuisce (o soffre delle variazioni) ed emette radiazione gamma (soft gamma ray emitter).



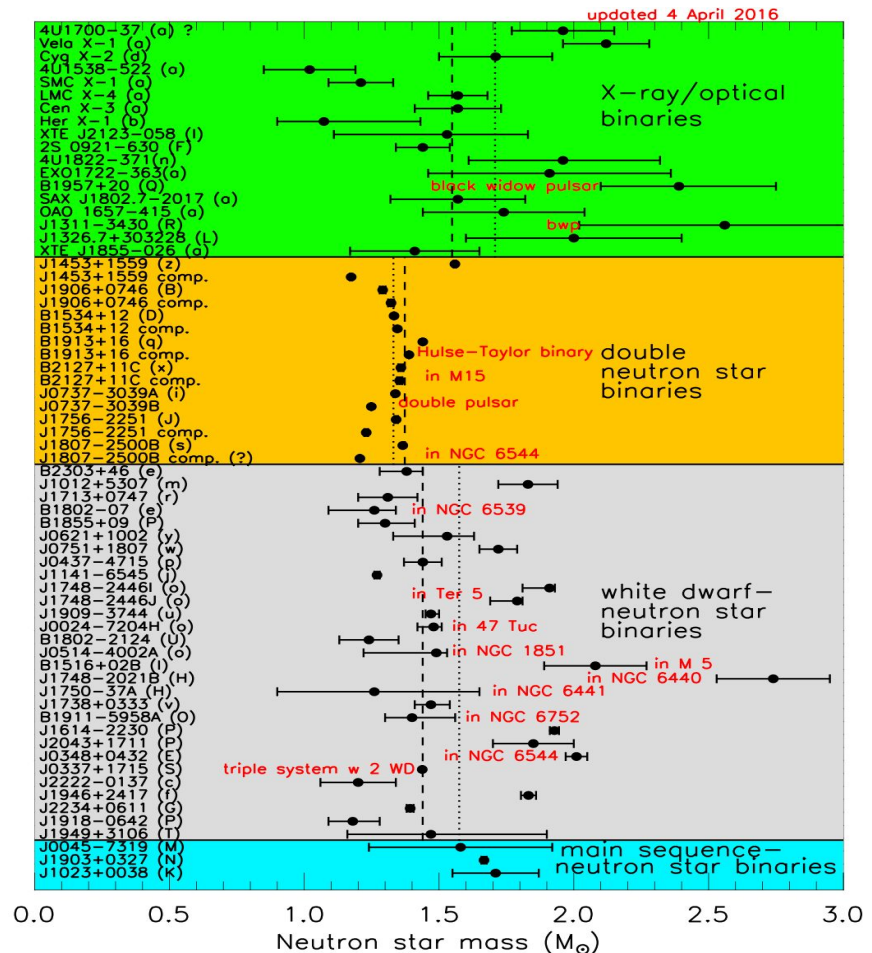
5) La maggior parte di stelle di neutroni vengono osservate come “pulsar”:

Attorno a 2000 stelle sono state osservate come pulsar. Queste stelle, a parte di emettere energia e ruotare con periodo (P) molto velocemente, mostrano anche una diminuzione della rotazione nel tempo (dP/dt). Queste caratteristiche sono spiegate in modo ragionevole del modello di dipolo magnetico. Tre caratteristiche possono essere estimate da questo modello dalla misura di P e dP/dt : intensità del campo magnetico, età o tempo caratteristico e luminosità. Questo suggerisce di rappresentare le misure di P e dP/dt come nella figura.



6) Masse di stelle di neutroni osservate:

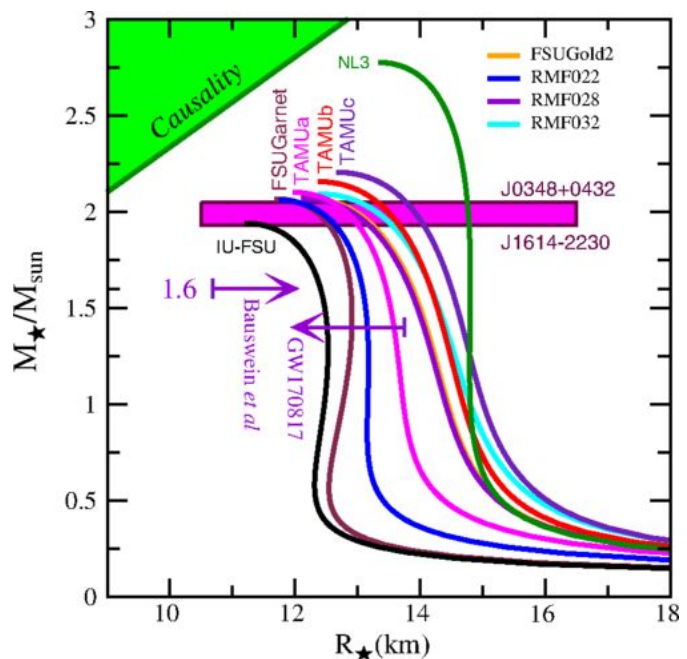
In realtà la maggior parte delle masse delle stelle di neutroni sono state misurate quando si trovano in sistemi binari. In modo molto schematico si può usare la terza legge di Kepler che ci fornisce la massa della stella di neutroni se si può misurare la proiezione del semiasse dell'orbita, il periodo di rotazione del sistema binario e la massa della stella compagna.



7) Stelle di neutroni come fonte di onde gravitazionali: perché la fisica nucleare è importante per capire questo tipo di eventi

In Agosto del 2017 LIGO rilevò un segnale di onde gravitazionali (GW170817) provenienti da una coppia di stelle di neutroni che si fondevano ("binary neutron star merger"). Attorno a due secondi dopo il Fermi Gamma-ray Space Telescope e il International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL) identificarono un gamma-ray burst associato a questo stesso evento. Entro le 11 ore seguenti diversi telescopi operando a diverse lunghezze d'onda identificarono l'esplosione di supernova (kilonova in questo caso per la grande quantità di energia rilasciata). In questo tipo di eventi si crede che abbia luogo la sintesi di elementi più pesanti non prodotti nelle stelle normali attraverso il meccanismo

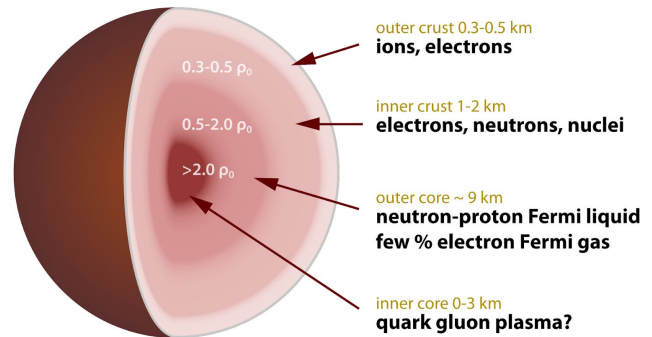
della fusione nucleare. Approssimativamente 0.05 masse solari di elementi sono stati sintetizzati nel merging delle due stelle di neutroni (10000 volte la massa della Terra). A parte l'importanza di trovare meccanismi che spieghino l'abbondanza osservata di elementi più pesanti del Ferro nell'universo, la rilevazione delle onde gravitazionali in questo tipo di sistema può dare informazioni molto importanti per comprendere l'equazione di stato della materia nucleare (neutroni e protoni) in condizioni molto estreme di densità. In particolare, la cosiddetta "tidal polarizability" o deformabilità (quadrupolare) della stella quando si trova sotto gli effetti di un campo gravitazionale molto intenso (quello creato dall'altra stella) è molto sensibile a quello che capiamo (e non) riguardo alla interazione nucleare efficace in un mezzo molto denso. Ovvero l'interazione tra neutroni e protoni in un mezzo ad alte densità. Una caratteristica di questo parametro che misura la deformabilità è che è molto sensibile al raggio della stella (elevato alla quinta potenza). E' importante notare che è molto difficile determinare il raggio di una stella di neutroni con metodi osservazionali. In realtà esistono tante stime ma tutte dipendono dal modello usato per la stella studiata osservazionalmente. Dall'altro lato, è relativamente semplice costruire un modello teorico che predica il raggio di una stella di neutroni. I risultati teorici si basano principalmente su una equazione di stato nucleare che ha delle grandi incertezze nel descrivere quantità intimamente legate al raggio di una stella di neutroni. A questo riguardo, si è dimostrato che le conoscenze attuali dei nuclei presenti nella Terra non permettono di predire con precisione il raggio di una stella di neutroni. Si è anche dimostrato che il raggio di una stella di neutroni è molto sensibile alla pressione di neutroni stimata in nuclei pesanti come il 208Pb. Il problema è la difficoltà di misurare questa pressione in laboratori con la sufficiente precisione. I diversi modelli mostrati in figura descrivono bene molte proprietà nucleari ma non sono in accordo nel predire la cosiddetta pelle di neutroni, legata alla pressione di neutroni prima menzionata, nel 208Pb. Come si vede nella figura, il disaccordo nella predizione del raggio di una stella di neutroni mostra una chiara discrepanza tra i diversi calcoli. I modelli compatibili con il segnale rivelato di onde gravitazionali è



consistente con i risultati teorici dei modelli più a sinistra nella figura. In conclusione, le onde gravitazionali possono aiutarci non solo a capire meglio l'equazione di stato nucleare ad alte densità ma anche la struttura di nuclei presenti nella Terra.

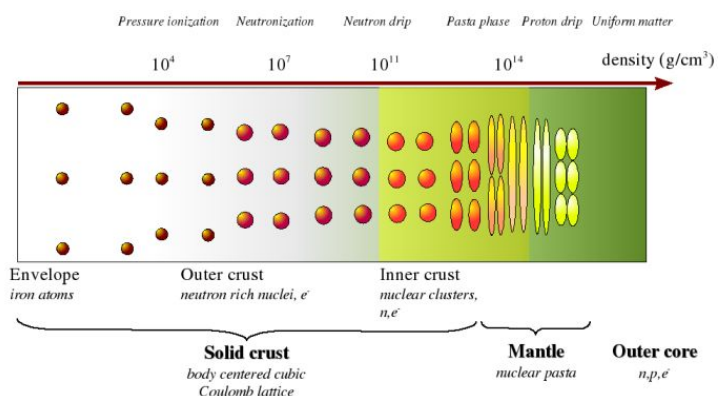
8) Struttura e composizione di una stella di neutroni:

Esistono diversi modelli teorici per la struttura di una stella di neutroni, in parte questi modelli sono confrontabili con i dati osservazionali esistenti e con misure fatte nei laboratori ma in grande misura non si possono verificare completamente. Il modello più standard divide le stelle di neutroni in 4 strati (sotto descritte). Qui trascuriamo la finissima atmosfera e la possibilità che la stella di neutroni abbia un disco di materia (come ad esempio nel caso di stelle binarie) e consideriamo stelle fredde ($T \sim 10^9 K \sim 0.1 \text{ MeV}$).



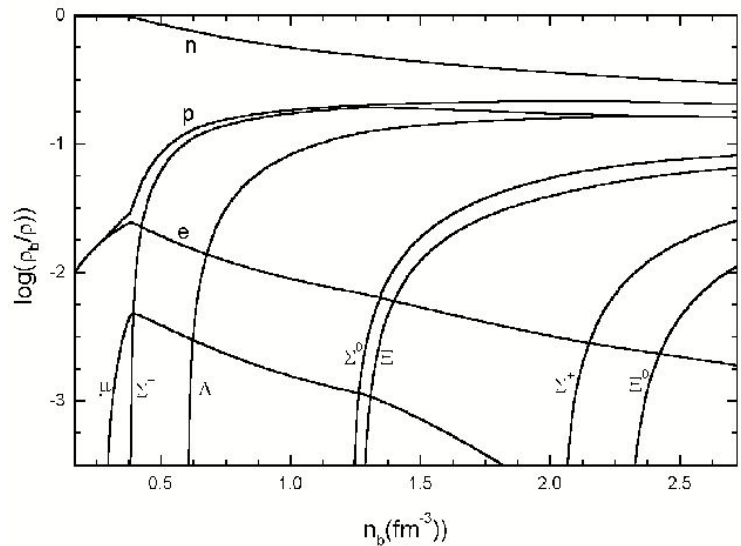
La **crosta esterna** è formata da atomi completamente ionizzati messi in un reticolo BCC (body-centered-cubic) e immersi in un gas di elettroni relativistici. Le alte densità ionizzano gli atomi che si vedono e si dispongono in una rete cristallina (dovuto essenzialmente all'interazione di Coulomb). Il reticolo che minimizza l'energia è quella BCC anche se altre configurazioni possono essere presenti. Le alte densità che fanno ionizzare gli atomi sono sufficienti anche per assumere un comportamento relativistico degli elettroni che a sua volta schermano l'interazione Coulombiana tra ioni (di questo effetto si deve anche tenere conto quando si valuta il reticolo cristallino ottimale). Nella parte più esterna della crosta esterna, dove la densità è così alta da ionizzare gli atomi ma non così alta da indurre modifiche al livello della struttura nucleare, è formata dal ^{56}Ni (minimizza l'energia del sistema reticolo cristallino bcc + gas di elettroni), che è il nucleo con l'energia di legame per nucleone più elevata. Nell'aumentare la densità (andando dentro la stella), è conveniente energeticamente che avvengano delle catture elettroniche ($p + e \rightarrow n$) per diminuire l'energia degli elettroni liberi che aumenta molto velocemente al prezzo di diminuire l'energia di legame (aumentare la massa) dei nuclei presenti nella rete e farli diventare piano piano più ricchi di neutroni. Questo processo continua producendo nuclei ogni volta più ricchi di neutroni fino che non è energeticamente favorevole emettere neutroni per abbassare la massa dei nuclei presenti nella reticolo BCC.

La **crosta interna** inizia in questo preciso momento. E' formata da nuclei molto ricchi di neutroni messi in una reticolo cristallina BCC come nel caso della crosta esterna ma adesso questo reticolo cristallino è immerso in un gas di elettroni e neutroni liberi. Aumentando la densità lo spazio tra gli ioni si riempie da neutroni (sia legati che liberi) e ha luogo il fenomeno conosciuto come "pasta phase" dove non si può più parlare



di nuclei nella reticolo ma di una sorta di materia molto ricca di neutroni con forme tipo spaghetti, lasagna, ... ecc. Se si continua ad andare dentro la stella, la densità è tale che si raggiungono densità vicine a quella della saturazione nucleare. In questo momento la materia molto ricca in neutroni, alcuni protoni ed elettroni si può considerare uniforme.

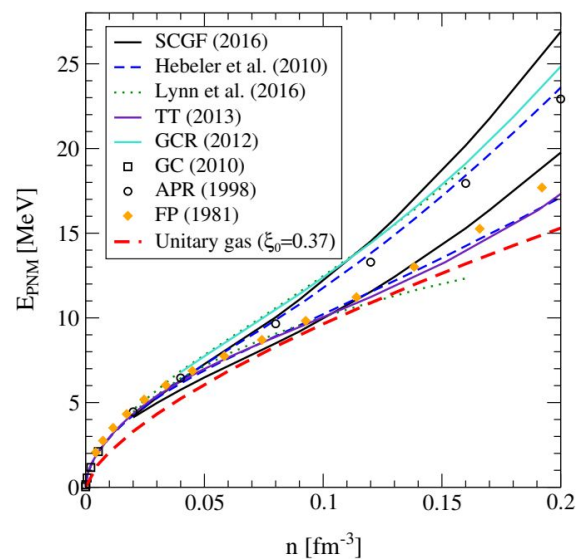
Inizia il **cuore esterno della stella**. Il cuore esterno è maggiormente costituito da un gas di neutroni interagenti e superfluidi con la presenza di alcuni protoni ed elettroni. Non esistono più nuclei ma si tratta di un continuo di materia nucleare non confinata. Questo strato della stella è esteso per la maggior parte del suo raggio come si vede in figura. Questo è il motivo per il quale, il modello piu' semplice ma ancora realistico per la descrizione di alcune proprietà macroscopiche (raggio e massa) della stella è quello di assumere una stella fatta di un gas di Fermi di neutroni interagenti. Trascurando così tutta la struttura della stella e parte dei costituenti. Questo sistema rimarrà in questo stato fino che non si raggiungano le densità sufficienti perche' compaiano particelle più esotiche come iperoni o addirittura si deconfinino i quark costituenti dei nucleoni stessi (quark – gluon plasma).



In questo momento avrà inizio il **cuore interno** del quale non sappiamo molto ma che si ipotizza sia composto da particelle più esotiche (iperoni) e/o materia de-confinata (quark – gluon plasma)

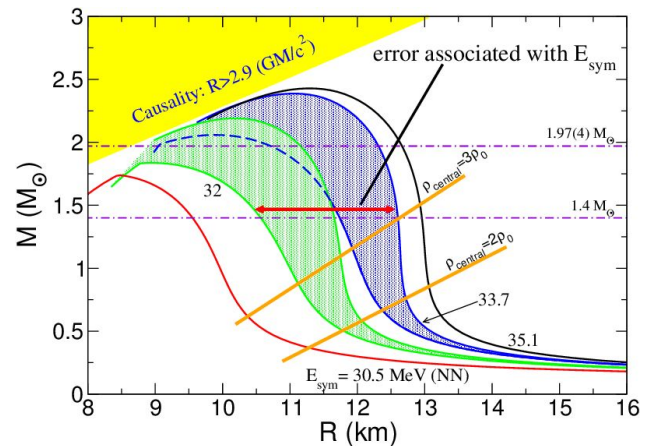
9) Modello semplice per una stella di neutroni I: massa e raggio

Come accennato nel punto precedente un modello semplice ma ragionevole per descrivere la materia in una stella di neutroni è assumere che questa è fatta di un gas di solo neutroni interagenti. Per ottenere una descrizione accurata di questo sistema è quindi essenziale avere una conoscenza dell'interazione neutrone-neutrone molto precisa e per densità che vanno da zero fino a varie volte la densità di saturazione nucleare. Al giorno d'oggi le conoscenze in fisica nucleare sia teoriche che sperimentali non consentono di raggiungere una risposta unica a questo problema. Vedere in figura i risultati corrispondenti ai modelli piu' sofisticati esistenti in letteratura per descrivere l'equazione di stato di materia neutronica (E_{PNM}) in funzione della densità di neutroni. Notare che i diversi calcoli si discostano molto già per densità



relativamente basse. Questa discrepanza viene accentuata a densità più alte come si può intuire dalla figura.

Una volta deciso il modello per la materia neutronica che descrive come si comportano i neutroni a diverse densità bisogna imporre l'equilibrio idrostatico di questa materia per vedere se si può predire l'esistenza di una stella di soli neutroni con delle proprietà simili alle stelle osservate. A questo scopo, si deve tenere conto delle correzioni di relatività generale alle equazioni per l'idrostatica basate sulle leggi di Newton. Questo è dovuto a che la densità di materia presente nella stella produce dei campi gravitazionali molto intensi. Nel 1939, Tolman e subito dopo Oppenheimer e Volkoff (TOV) derivarono le equazioni per l'equilibrio idrostatico dove l'unico input è l'equazione di stato della materia che compone la stella ed è una equazione alle derivate del primo ordine che si risolve imponendo la densità al centro della stella.



La equazione per l'equilibrio idrostatico di TOV assume una costante cosmologica pari a zero (costante cosmologica nelle equazioni di Einstein per la relatività generale). In realtà però un modo di spiegare l'accelerazione osservata delle galassie ecc... dell'universo è assumere una costante cosmologica diversa da zero (energia oscura sarebbe la causa ipotizzata per l'accelerazione osservata). Una costante cosmologica modifica l'equazione di TOV. Quali valori di questa costante implicano un cambio nella struttura della stella, sono questi valori compatibili con altre stime della costante cosmologica?

[Equazione idrostatica relativistica per la stella e limite Newtoniano. Equazione di stato semplice (politropo) ed esempio di equazione di stato più realistica (Skyrme). Per le equazioni e considerazioni matematiche vedere appunti lezione]

10) Modello semplice per una stella di neutroni II: crosta

[Modello semplice per capire la composizione della crosta esterna ed indicazioni di come procedere in modo simile per lo studio della crosta interna. Per le equazioni e considerazioni matematiche vedere appunti lezione]

Bibliografia:

Introduction to neutron stars. James M. Lattimer. AIP Conference Proceedings 1645, 61 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4909560>

Neutron stars for undergraduates. Richard R. Silbar and Sanjay Reddy. American Journal of Physics 72, 892 (2004). <https://doi.org/10.1119/1.1703544>

Web stellarcollapse.org dedicata nel offrire risorse per la ricerca in stelle di neutroni (e altro).

Unified equation of state for neutron stars on a microscopic basis. B. K. Sharma, M. Centelles, X. Viñas, M. Baldo and G. F. Burgi. Astronomy & Astrophysics 584, A103 (2015). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526642>

Static solutions of Einstein's field equations for spheres of fluid. R. C. Tolman. Phys. Rev. 55, 364-373 (1939). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.364>

On massive neutron cores. J. R. Oppenheimer and G. M. Volkov. Phys. Rev. 55, 374-381 (1939). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.374>

Impact of the symmetry energy on the outer crust of non-accreting neutron stars. X. Roca-Maza, J. Piekarewicz. Phys. Rev. C 78 (2008) 025807. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.78.025807>

Outer crust of a cold non-accreting magnetar. D. Basilico, D. Peña Arteaga, X. Roca-Maza, and G. Colò. Phys. Rev. C 92, 035802 (2015). <http://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.92.035802>

Neutron Skins and Neutron Stars in the Multimessenger Era. F.J. Fattoyev, J. Piekarewicz, and C.J. Horowitz. Phys. Rev. Lett. 120, 172702 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.172702>

Magnetic field effects on the composition of a neutron star outer crust. Davide Basilco. Tesi di laurea triennale. 2013.

Effetti globali di un'equazione di stato polinomiale sulle proprietà delle stelle di neutroni. Giovanni Selva. Tesi di laurea triennale. 2015.

Vibrational modes in the crust of neutron stars. Valentina Craveia. Tesi di laurea magistrale. 2017.