

Rezultate

Raportarea rezultatelor se va face separat pe fiecare din partile componente ale proiectului. În dreptul fiecărui rezultat voi menționa articolele corespunzătoare din lista de publicații / bazele de date.

O1. Pentru investigarea efectelor de temperatura finită în materia nucleară și în materia stelara compusa din nucleoni am selectat un număr de 13 EdS care satisfac următoarele condiții: 1) au, pentru citiva din cei mai bine cunoscuți parametri ai materiei nucleare, valori în acord cu constrangerile experimentale; odată extinse la materia catalizată, produc 2) SN cu masa maximă cel puțin egală cu $2M_{\text{Sun}}$, 3) prezic pentru razele SN cu masa de $1.4M_{\text{Sun}}$ și $2M_{\text{Sun}}$ valori în acord cu cele furnizate de colaborarea NICER în ceea ce privește PSR J0030+0451 și PSR J0740+6620, 4) prezic pentru deformabilitatea mareică a două SN cu masa totală și raport de masa comparabil cu cele ale sistemului binar din GW170817 o valoare apropiată de cea extrasă din evenimentul GW170817. Aceste EdS corespund a trei clase de modele: de cimp mediu relativist (6), de cimp mediu nerelativist (5) și microscopic variational (2). Analiza detaliată a densității termice de energie, presiunii termice, entropiei per nucleon, precum și a unui număr de coeficienți termici pe plaje largi de temperatura, densitate și fracțiune de sarcină denotă următoarele: în cazul modelelor non-relativiste, mărimea efectelor de temperatura finită depinde de valoarea masei efective Landau la densitatea considerată și, în unele cazuri, și de aceea a derivatei sale în funcție de densitate; modelele nerelativiste și cele relativiste prezic dependente de densitate calitativ diferite pentru mai multe mărimi fizice; indicele termic prezintă o dependență puternică de densitate și EdS, ceea ce înseamnă că aproximația G, folosită de unele din simulările numerice de fenomene astrofizice pentru a adăuga EdS reci efecte de temperatura, nu este realistă. Aceste studii au făcut obiectul publicației A9 și al mai multor seminarii și contribuții la conferințe.

Pentru cuantificarea efectelor produse de particulele exotice - hiperoni, mesoni (pion și kaon), rezonante nucleonice, cuarci, precum și a modului în care este făcută tranziția de fază de la materia hadronică la cea de cuarci - am selectat un număr de 19 EdS ce presupun diferite compoziții hadronice și care satisfac aceleași condiții impuse EdS pur nucleonice discutate în paragraful precedent. Trei din aceste EdS (B1, B2, B3) au fost construite de noi și, la data publicării pe site-ul Compose, au fost unicele care, în plus față de nucleoni, considerau 10 specii exotice. Modul în care, odată populați, barionii grei și mesonii modifică proprietățile termice este calitativ același: valoarea densității termice de energie, pentru valori fixe are variabilelor termodinamice, crește cu numărul de specii existente în timp de valoarea presiunii termice scade. Este interesant de remarcat că, în anumite condiții, aceasta din urmă scădere poate fi atât de pronunțată încât poate duce la valori negative. În consecință, indicele termic devine, la rîndul său, negativ. Indicele adiabatic și viteza sunetului se anulează doar în cazul în care tranziția către fază de cuarci deconfinati se face printr-o construcție Maxwell. Aceste studii au făcut obiectul publicației A8 și al mai multor seminarii și contribuții la conferințe.

Datorită faptului ca potențialul de interacție al rezonanțelor Delta în materia nucleară este mai atractiv decât cel al nucleonilor și ca, în cartetul de spin $3/2$, este prezenta și o particulă cu sarcina electrică negativă, este de așteptat ca apariția Delta în materia nucleară să inducă o tranziție de fază iar, în materia SN, să afecteze atât parametrii geometrici (raza, compactitate, moment de inerție, deformabilitate mareica, etc.) cât și compoziția SN. Plaja de constante de cuplaj care permit apariția unei tranziții de fază, persistenta ei cu temperatura, modificarea densității de prag pentru reacțiile Urca directe la care participă nucleoni, și care sunt considerate a accelera foarte mult răcirea SN, au fost discutate în A12. A fost calculată și prima diagrama de fază a materiei nucleare îmbogățite cu Delta.

Noile informații referitoare la SN provenite din măsurătorile astrofizice sunt cel mai eficient exploatate în analize statistice, posibil datorită creșterii considerabile a resurselor de calcul. Datorită experienței noastre în calcule de cimp mediu cu interacții efective, în A1 și A3 ne-am concentrat asupra unor aspecte relativ puțin studiate: dependență de model a distribuțiilor a posteriori; dependență de setul de constrângeri; corelații dintre parametrii materiei nucleare și parametrii SN. Meritul A3 constă în a demonstra că constrângerea dependentei de densitate a materiei neutronice prin fixarea valorilor presiunii sau energiei per neutron se reflectă în proprietățile SN. Meritul A1 constă în a demonstra că luarea în considerare a corelațiilor între valorile pe care energia per particulă în materia de neutroni le are la diferite valori ale densității, și care a fost ignorată în literatură, duce la o puternică constrângere a comportamentului materiei bogate în neutroni și, implicit, materiei SN. Au fost construite și analizate un număr mare de corelații și a fost discutată dependență de model și, respectiv, de setul de constrângeri. Pe baza acestor date și a altora din literatură se pot decela corelațiile fizice de cele artificiale. Studiile discutate în A1 și A3 au presupus generarea și analiza a 1.1 milioane de EdS, ceea ce reprezintă un cost computațional considerabil. La cerere, vom furniza comunității științifice oricare din cele 11 seturi de EdS generate, prin furnizarea distribuției a posteriori a parametrilor de model. Aceste rezultate au fost prezentate în cadrul mai multor conferințe internaționale în 2023 și s-au bucurat de un interes considerabil.

Cele 100 000 modele de EdS corespunzătoare unuia din cele 6 seturi de EdS generate în A3 în cadrul unui model de cimp mediu relativist cu cuplaje dependente de densitate au fost folosite pentru construirea de modele de EdS de temperatură finită. Au fost considerate temperaturi cuprinse între 0.5 și 50 MeV, densități cuprinse între 0.02 și 1 fm^{-3} și fracțiuni de protoni egale cu 0.1 și 0.5. Am studiat sistematic dependență de densitate a tuturor marimilor fizice considerate anterior în A9 și A8. Concluzia la care am ajuns este că densitatea de energie termică (e_{th}), entropia per barion (S/A) și căldura specifică la volum constant (C_V) depind puternic de valoarea masei efective Dirac (m^*) la densitatea respectivă. Primele două mărimi menționate prezintă, pentru toate condițiile termodinamice considerate, corelații puternice și pozitive cu m^* . Cazul lui C_V este particular: la temperaturi joase prezintă o corelație pozitivă cu m^* iar la temperaturi ridicate o corelație negativă cu m^* . Explicația acestei situații, aparent paradoxale, constă în aceea că la temperaturi înalte contribuția la entropie a stărilor neocupate o domina pe cea a stărilor ocupate. În cazul presiunii termice (p_{th}) situația este mai complicată datorită faptului că termenii cinetici și, respectiv, de

interacție, au dependente opuse de valoarea masei efective Dirac. Cele mai multe din rezultatele acestea pot fi deduse analitic în cazul aproximatiei Sommerfeld, zisa de temperaturi joase, care pentru densități de cca $n_{\text{sat}} (3n_{\text{sat}})$, se dovedeste valabila până la cca $T=20 \text{ MeV}$ ($T=60 \text{ MeV}$). Acest studiu va face obiectul F1. Precizăm ca în prezent nu a fost publicată nici o analiză Bayesiană a efectelor de temperatură finită în materia densă.

O2. Folosind cele 100 000 de modele corespunzătoare uneia din familiile de EdS generate în cadrul A3, am verificat valabilitatea scalării cu valoarea medie a densității a frecvenței oscilațiilor de tip f ; scalarea cu compactitatea a produsului dintre masa gravitațională a SN și frecvența de oscilație a modului p . În plus, am pus în evidență ca frecvența oscilațiilor de tip f se scalează cu valoarea densității centrale. Frecvențele celor două moduri de oscilație neradială au fost calculate în cadrul aproximatiei Cowling. Pentru verificarea legilor de scalare au fost considerate stele cu mase cuprinse între $1M_{\text{Sun}}$ și $2M_{\text{Sun}}$. Folosind un set de EdS de temperatură finită și care țin cont de diverse compoziții posibile, am investigat modul în care n_f și n_p depind de profilurile marimilor termodinamice. Cele două moduri de oscilație sunt afectate de temperatură în mod diferit datorită localizării preferențiale în straturi de diferite adâncimi. Aceste concluzii sunt prezentate în A2.

În A10 am investigat dependența de EdS a masei gravitaționale maxime a stelelor fierbinți, în funcție de care se decide soarta lor. Au fost considerate modele obținute în cadrul tuturor celor trei categorii utilizate în mod curent și compoziții pur nucleonice. A fost identificată o corelație între valoarea cu care se modifică M_G^* și valoarea cu care se modifică presiunea centrală.

În A11 am arătat că un număr mare de legi de scalare identificate în cazul SN reci în rotație lentă și în rotație rapidă rămân valabile și în SN fierbinți cu condiția ca profilele entropiei per barion (S/A) și fracțiunii leptonice (Y_L) (sau de sarcină Y_q) să fie identice. A fost considerat un număr de cca 15 EoS barionice cu diferite grade de libertate de particule și profiluri ale S/A și Y_L (Y_q) caracteristice evoluției din faza de proto-SN bogată în leptoni în cea de SN rece și catalizată. În plus, am studiat modul în care o serie de parametri globali, e.g., masa gravitațională maximă a SN statice (M_S^*), masa gravitațională la limita Kepler (M_K^*), frecvența Kepler (f_K), depind de compoziția de particule și valoarea (S/A). Astfel, s-a dovedit că pentru unele EdS pur nucleonice, e.g., RG(SLy4) și HS(IUF), raportul (M_K^*/M_{TOV}^*) are o evoluție monotona cu (S/A) în timp ce pentru altele, e.g., SRO(APR) și FSU2H, are o evoluție nemonotonă. Estimarea făcută în ceea ce privește valoarea maximă a masei gravitaționale a SN folosind GW170817 a fost prima din literatură unde au fost luate în considerare efectele de temperatură și îmbogățirea în leptoni. Valorile presupuse pentru acestea din urmă au fost $2 \leq S/A \leq 3$ și $Y_q = 0.1$.

Am identificat o serie de corelații între un număr de parametri ai materiei nucleare - K_{sat} , Q_{sat} , Z_{sat} , m_{eff} , L_{sym} , K_{sym} - și o serie de parametri globali ai SN, $R_{1.4}$, P_c^* , n_c^* , M_G^* . K_{sat} , Q_{sat} și Z_{sat} reprezintă coeficienții de ordin 2, 3 și 4 din dezvoltarea în serie de puteri a energiei per nucleon a materiei simetrice în funcție de deviația față de punctul de saturatie. L_{sym} și K_{sym} reprezintă coeficienții de ordin 1 și 2 din dezvoltarea de puteri a energiei

de simetrie. m_{eff} reprezintă masa efectivă Dirac la densitatea de saturație a materiei simetrice. $R_{1.4}$ reprezintă raza unei SN canonice; P_c^* și n_c^* denotă valorile presiunii centrale și numărului central de particule corespunzătoare configurației de masă maximă, cu masa gravitațională M_G^* . În timp ce corelațiile $R_{1.4} - L_{\text{sym}}$ sau, în mai mică măsură, $R_{1.4} - K_{\text{sat}}$ au mai fost discutate în literatură, corelația $m_{\text{eff}} - P_c^*$ a fost identificată pentru prima dată în A3. În ce măsură supraviețuiește modulul în care sunt implementate alte constrângeri, este discutat pe larg în A3.

O3. Deoarece - datorită cimpurilor magnetice extrem de intense, rotației sau acumulării de material în urma acrecției de la o stea partener - este de așteptat ca geometria SN să se abată de la cea sferică, ne-am propus să generalizăm codul NSCool, care permite simulări numerice ale evoluției termice a SN izolate sau acretante, la 2D. Varianta 1D a NSCool a fost dezvoltată de Prof. D. Page și este disponibilă public pe site-ul <http://www.astroscu.unam.mx/neutrones/NSCool/>. Acest obiectiv a presupus o serie de dezvoltări majore. Prima, de natură conceptuală, a constat în rescrierea ecuațiilor de transport a căldurii în noua metrică. Apoi, în vederea rezolvării numerice a acestor ecuații, a fost necesară discretizarea lor și adaptarea grilei spațiale și temporale de calcul de așa manieră încât calculele să fie deopotrivă rapide și precise. La fel de importantă a fost înlocuirea structurii geometrice sferice cu una 2D cu simetrie azimutală. Aceasta din urmă trebuie calculată, pentru combinațiile alese de EdS și viteza de rotație, cu un pachet de calcul dedicat. În cazul nostru, am folosit software-ul Lorene, și el accesibil public la adresa <https://lorene.obspm.fr>. Odată finalizată etapa de modificare a codului, am efectuat o serie de simulări ale evoluției termice a mai multor SN construite folosind diverse combinații de EdS ale miezului și crustei și având viteze de rotație de până la limita Kepler. O atenție deosebită a fost acordată frecvențelor de rotație de 700 Hz, care corespund celei mai mari frecvențe măsurate până în prezent pentru un pulsar. Am analizat în amănunțime profilele de temperatură la diverse momente de timp cuprinse între 10^{-2} și 10^6 ani și la diferite unghiuri polare. Cel mai interesant rezultat obținut l-a constat formarea, în plan ecuatorial și în crusta internă, a unei zone fierbinți care acționează ca o sursă de căldură. Apariția acestei structuri se datorează proprietăților de transport diferite ale crustei și miezului SN. Noile ecuații ale structurii și transportului de căldură în 2D sunt prezentate și discutate pe larg în A4. Tot în A4 sunt prezentate concluziile unor simulări ale evoluției termice, realizate în cadrul așa numitei paradigme minimale. Noul model de evoluție termică și codul numeric asociat (NSCool2d Rot), împreună cu cea mai mare parte a rezultatelor din A4, au fost prezentate în cadrul mai multor seminarii științifice și contribuții la conferințe internaționale de prestigiu.

Împreună cu colaboratori de la Institutul de Astronomie al Universității Naționale Autonome din Mexico City și de la Institutul de Astronomie al Universității din Amsterdam am efectuat simulări numerice intensive a evoluției termice a SN din MAXI J0556-322. Acest tranzient de raze X a fost obiectul a numeroase campanii de observații, între 2011 (când a fost constatată prima sa emisie puternică, care a durat 16 luni) și 2020 (când a fost înregistrată cea de a patra emisie). Au fost modelate cca 20 de observații obținute în timpul perioadei de acalmie survenite după cele 4 explozii, considerând că în timpul procesului de acrecție crustei i-a

fost transferata caldura atat prin reactii de adincime cit si prin reactie de suprafata. Concluziile noastre sint ca: I) datele de racire pot fi reproduse presupunind un mecanism unic de transfer de caldura superficiala in timpul producerii ultimilor trei explozii, ii) temperatura efectiva extrem de ridicata, de cca. 350 eV, poate fi explicata doar daca se presupune ca in timpul primei explozii a actionat un alt mecanism de transfer de energie, mult mai puternic și, probabil, de o alta natura. Explicatia pe care am oferit-o este ca acest din urma proces se datoreaza unei explozii termonucleare gigantice, datorate arderii instabile a isotopilor bogati in neutroni ai oxigenului sau neonului, care s-a produs cu citeva saptamini inainte de sfirsitul primei explozii, eliberind 10^{44} ergs la densitati de cca 10^{11} g cm^{-3} . Datele propriu-zise, metoda de lucru și rezultatele sunt descrise în A6.

Înțelegerea evolutiei termice a SN este ingreunata de o mulțime de factori, dintre care numărul relativ redus de informații obtinute din observatii astrofizice si necunoasterea suficienta a micro-fizicii (compozitia SN; EdS; procesele exacte de emisie de neutrini; proprietati de transport; cimpuri magnetice; superfluiditate și supraconductivitate; etc.) În plus, este de așteptat ca, în cazul în care gravitatiea din jurul obiectelor compacte sa difere fata de cea prezisa de Relativitatea Generala a lui Einstein, acest lucru să se reflecte în evolutia termica. Pentru o mai buna înțelegere a acestui din urma aspect, am simulat procese de răcire într-o serie de teorii alternative ale gravitatiei. Concluziile studiului publicat în A5 sunt acelea ca evolutia în modelele alternative de gravitatie considerate nu difera semnificativ de cea obtinuta în cadrul teoriei Relativitatii Generale și, deci, nu pot consitui un criteriu de confirmare/infirmare a acestei teorii.