

Féléves beszámoló - 4. félév

Kompakt csillagok tulajdonságainak vizsgálata effektív modellekkel

TAKÁTSY JÁNOS

Fizika Doktori

Iskola

DR. KOVÁCS PÉTER

Tudományos főmunkatárs

Wigner FK

Témavezető

2021. május 31.

1. Bevezetés

Az erős kölcsönhatás alacsony hőmérsékleten és nagy sűrűségeen a jelenleg rendelkezésre álló eszközökkel nem vizsgálható sem földi körülmények között elvégzett kísérletekkel, sem a QCD egzakt megoldásával. Ennek a régióknak a kísérleti vizsgálatára ad lehetőséget az univerzumban található legsűrűbb, még nem szinguláris képződmények, a neutroncsillagok tanulmányozása. Ezen objektumok vizsgálata az utóbbi évtizedben új lendületet kapott. Több olyan neutroncsillagot is megfigyeltek, amelyek tömege $2 M_{\odot}$ körüli [1-3], így jóval meghaladja a korábban mért legnagyobb, $1.6 M_{\odot}$ -es neutroncsillag-tömeget. Ezen kívül a neutroncsillagok röntgen profilját vizsgáló NICER program [4] segítségével ugyanazon objektum tömege és sugara is mérhetővé válik. Az első ezzel kapcsolatos mérési eredmények éppen a doktori programom kezdete óta láttak napvilágot [5]. Szintén az előző évtized közepén került sor az első gravitációshullám-megfigyelésre az Amerikában található LIGO detektorokkal [6], azóta pedig több neutroncsillag-kettős összeolvadását is sikerült kimérni [7,8]. Ezen mérések újabb, független információt adnak a neutroncsillagok belső szerkezetéről.

Az erősen kölcsönható anyag véges sűrűségű leírására effektív térelméleti modelleket alkalmazhatunk. Ezen modellek fenomenologikus jellegük következtében felépítésük és a modelleket leíró paraméterek terén sok szabadságot engednek meg. Emiatt szükséges a modellek jóslatait a megfelelő kísérleti mérésekkel összehasonlítani. Az asztrofizikai megfigyelések lehetőséget adnak a különböző elméleti modellek által jóslott mérhető mennyiségekkel való összehasonlításra, így az újabb megfigyelések segítenek a modellek megszorításában.

2. Az első három félévben végzett kutatások ismertetése

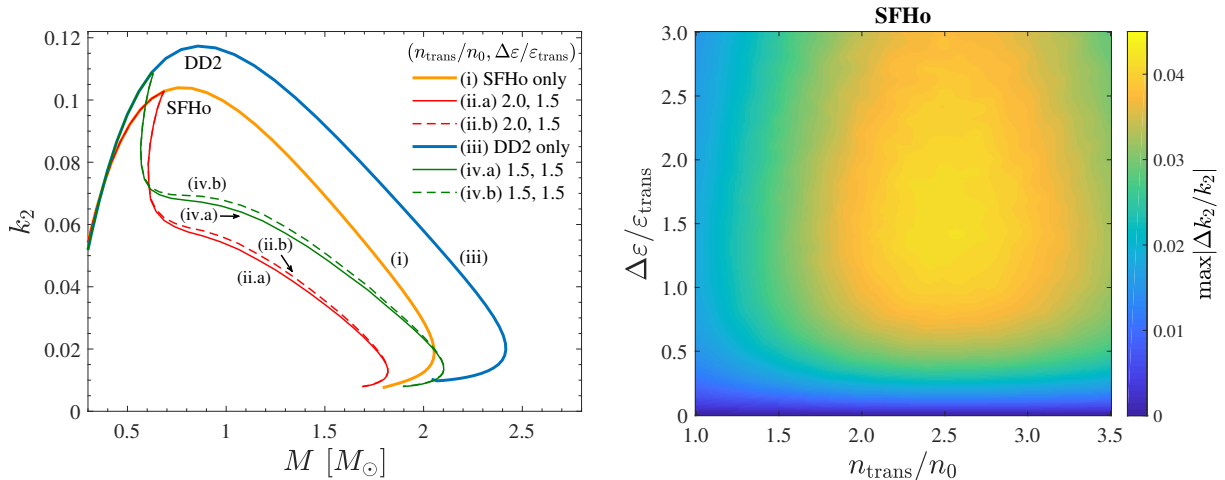
Doktori munkám során az (axiál-)vektormezonokkal kibővített lineáris szigma-modellt [9,10], mint effektív térelméleti modellt vizsgáltam zérus hőmérsékleten és véges sűrűségen. Az ebből a modelltől kapott állapotegyenletet alkalmaztam neutroncsillagokra, és így vizsgáltam ezeknek az objektumoknak különböző tulajdonságait.

Véges sűrűségen az állapotegyenlethez fontos járulékot adnak a vektormezonok kondenzátumai, hiszen ezek a mezonok felelősek a fermionok között fellépő rövidtávú tasztításért. Fontos eredmény volt a doktori kutatásom során, hogy sikerült beilleszteni a vektormezon-kondenzátumokat a szigma-modellbe, ezzel egy fontos járulékot sikerült figyelembe venni.

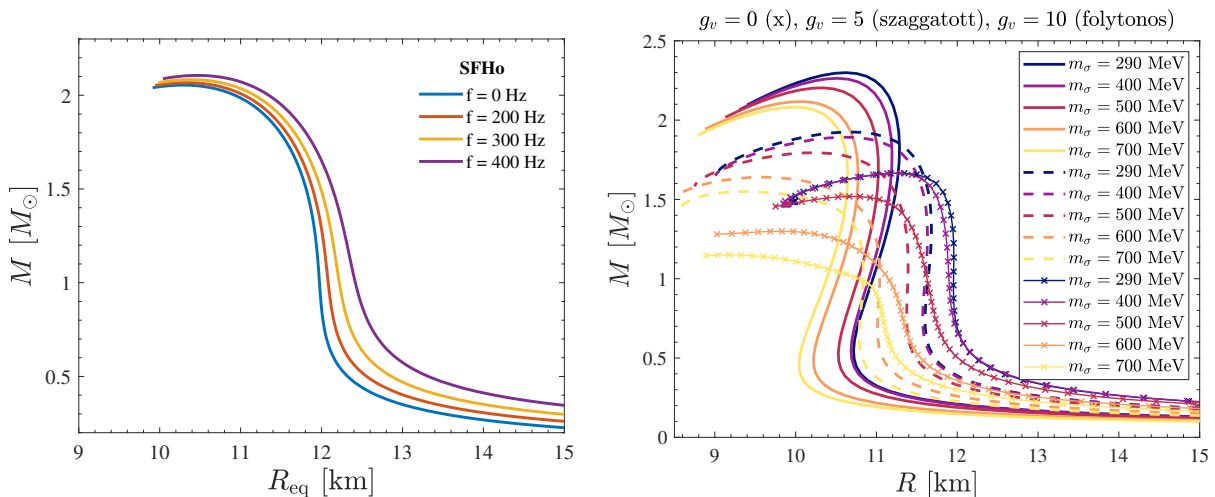
A kutatásnak szintén fontos része volt a hadronikus állapotot leíró modellek, valamint a hadron–kvark fázisátalakulás leírásának áttekintése. Az utóbbi félévek során rendszerem a jelenleg használatban levő, számunkra érdekes állapotegyenleteket. Ezen kívül a hadronikus és kvarkanyag állapotegyenleteinek különböző lehetséges összefűzési módszereit is megvizsgáltam, valamint ezek közül néhányat numerikusan implementáltam. Ezek egyike az ún. nyomás-interpolációs módszer [11]. Ezen módszer során a két fázis állapotegyenletei, konkrétan a $p(\rho_B)$ függvények között – ahol ρ_B a barionsűrűség – hozunk létre egy „sima” interpolációt. A módszer során az energiasűrűséget a termodinamikai relációk fenntartásának megkövetelésével számoljuk ki.

A neutroncsillagok sztatikus, gömbszimmetrikus állapotai körül több perturbációt is megvizsgáltam. Ezek egyike volt a gravitációshullám-megfigyelések során is fontos árapály-deformáció vizsgálata. Az elméleti számolások eredményeként egy korábbi publikációra írt kommentben korrigáltunk egy összefüggést, amelyet eddig a szakirodalomban téves formában használtak. Az 1. ábra ennek az eredményeit szemlélteti. Ezen kívül a neutroncsillagok forgás hatására létrejövő deformációját is vizsgáltam a Hartle-Thorne közelítésben [12]. Ennek eredményei a 2. ábra bal oldalán láthatók.

Az utóbbi félévek során több párhuzamos kutatásba is becsatlakoztam. Az egyik ilyen kutatás egy kHz-es frekvencián érzékeny gravitációshullám-detektor megtervezését célozta meg. A projekt kapcsán segítettem kijelölni, milyen típusú gravitációshullám-jelekre történjen az optimalizálás, valamint az optimális detektor paramétereit is meghatároztam. Ez a kutatás jelenleg is folyamatban van. Emellett egy geofizikai kutatásba is bekapcsolódtam, amelyben az ionoszférában létrejövő elektromágneses hullámokat vizsgáltuk, a nappal-éjszaka aszimmetriát is figyelembe véve, valamint összehasonlítva az erre a problémára alkalmazott analitikus és numerikus módszereket. A kutatás eredményeiből publikáció is született.



1. ábra. Az eltérés a Love-számban, amennyiben a hibás (szaggatott) és a helyes (folytonos) összefüggést használjuk a számoláskor (balra), valamint a maximális relatív eltérés különböző sűrűségeken bekövetkező és különböző erősségű elsőrendű fázisátalakulások esetén, amennyiben a maganyagot az SFHo [13] állapotegyenlettel modellezzük (jobbra).



2. ábra. Az SFHo állapotegyenlettel számolt neutroncsillagok tömeg–sugár relációja forgásmentes esetben és különböző frekvenciájú forgások esetén (balra), valamint a szigma-modell különböző paraméterezései mellett kapott hibrid csillagok tömeg–sugár relációi (jobbra). A hibrid csillagok állapotegyenleteinek előállításához a nyomás-interpoláció módszerét használtuk, alacsony sűrűségeken az SFHo állapotegyenletet alkalmazva. m_σ a szigma-mezon tömegét jelöli, g_v pedig a konsztituens kvark–vektormezon csatolási állandó.

3. Az aktuális félévben végzett kutatások ismertetése

A félév során a doktori kutatásommal kapcsolatos munkák – részben betegségem miatt – lassabban haladtak, azonban így is sikerült több új eredményt elérni.

Tovább vizsgáltam a vektormezon-kondenzátumokkal kiegészített szigma-modell viselkedését különböző paraméterezések mellett. Korábban azt tapasztaltuk, hogy bizonyos paraméterezések mellett a vektormezon-kondenzátumok hatására a királis kondenzátumok

– melyek lecsökkenése jelzi a királis fázisátalakulást – egy adott sűrűség felett elkezdnek növekedni. Ezt orvosolandó, megvizsgáltuk a téregyenletek aszimptotikus viselkedését nagy kémiai potenciálok esetén, valamint meghatároztuk, a paraméterek között milyen egyenlőtlenségnek kell teljesülnie, hogy a királis kondenzátumok nagy sűrűségen lecsengjenek. A már ezzel a paraméterezéssel számolt tömeg-sugár relációk láthatók a 2. ábra jobb oldalán különböző értékű szigma-mezon tömegek és vektormezon-csatolások esetén.

Emellett elkezdtem előkészíteni egy munkát, melynek során statisztikai módszerekkel és az utóbbi évek asztrofizikai méréseit felhasználva határoznánk meg, hogy a fázisátalakulás és a szigma-modell milyen paramétertartományokban adja vissza helyesen a megfigyelések eredményeit.

Hivatkozások

- [1] P. Demorest, T. Pennucci, S. Ransom, M. Roberts and J. Hessels, *Nature* 467, 1081 (2010)
- [2] J. Antoniadis et al., *Science* 340, 6131 (2013)
- [3] H.T. Cromartie et al., *Nature Astronomy* 4, 72 (2019)
- [4] F. Ozel, D. Psaltis, Z. Arzoumanian, S. Morsink and M. Baubock, *Astrophys. J.* 832, no. 1, 92 (2016)
- [5] M. C. Miller et al., *Astrophys. J. Lett.* 887, L24 (2019)
- [6] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016)
- [7] B. P. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* 119, no. 16, 161101 (2017)
- [8] M. J. Lindquist et al., *Astrophys. J.* 881, no. 2, L26 (2019)
- [9] D. Parganlija, P. Kovács, G. Wolf, F. Giacosa and D. H. Rischke, *Phys. Rev. D* 87, 014011 (2013)
- [10] P. Kovács, Zs. Szép and Gy. Wolf, *Phys. Rev. D* 93, no. 11, 114014 (2016)
- [11] K. Masuda, T. Hatsuda, T. Takatsuka, *PTEP* 2013, 073D01 (2013)
- [12] J. B. Hartle, *Astrophys. J.* 150, 1005 (1967)
- [13] A. W. Steiner, M. Hempel, T. Fischer, *Astrophys. J.* 774, 17 (2013)

4. Publikációk

A doktori képzés alatt megjelent referált publikációk:

1. **J. Takátsy**, P. Kovács, Zs. Szép, Gy. Wolf: *Compact star properties from an extended linear sigma model*, Universe, 5, 174, 2019
2. T. Bozóki, E. Prácsr, ..., **J. Takátsy**: *Modeling Schuman resonances with schupy*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 196, 105144, 2019
3. **J. Takátsy**, P. Kovács: *Comment on “Tidal Love numbers of neutron and self-bound quark stars”*, Phys. Rev. D, 102, 028501, 2020
4. E. Prácsr, T. Bozóki, G. Sători, **J. Takátsy**, E. Williams, A. Guha: *Two Approaches for Modeling ELF Wave Propagation in the Earth-Ionosphere Cavity with Day-Night Asymmetry*, IEEE Trans. on Ant. & Prop.

Konferenciakötetben megjelent közlemények:

1. G. Dály, **J. Takátsy**, ..., A. Pál: *Towards the attitude determination of nanosatellites with thermal imaging sensors*, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV, 11451, 883, 2020
2. P. Kovács, **J. Takátsy**: *Hybrid Star Construction with the Extended Linear Sigma Model: Preliminary Results*, Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl., 14, 127, 2021
3. **J. Takátsy**, P. Kovács, Gy. Wolf: *Hybrid star properties from an extended linear sigma model*, Astron. Nachr., 342, 271, February 2021

5. Féléves tanulmányok

A félév során egy kurzust végeztem el:

- FIZ/2/094E Nagyenergiás nehézion-fizika, Csanád Máté

6. Konferencia részvétel

A doktori program alatt több konferencián is részt vettem hallgatóságként. Ezek a következők voltak:

- 19th Zimányi School, Winter Workshop on Heavy Ion Physics, Budapest, 2019
- 20th Zimányi School, Winter Workshop on Heavy Ion Physics, Budapest (online), 2020

- Strangeness in Quark Matter Conference, New York (online), 2021

Ezen kívül a "Probing Nuclear Physics with Neutron Star Mergers" online workshopra jelentkeztem előadóként, amely július közepén lesz megtartva.

7. Oktatási tevékenység

Az utóbbi két félévben besegítettem a Fizika BSc. alatt kötelező *Klasszikus Fizika Laboratórium* méréseinek megtartásába, valamint a jegyzőkönyvek javításába.

8. Egyéb szakmai tevékenység

Az előző évben megnyertem egy pályázatot, amelynek kapcsán egy 1 hónapos rövid kutatóútra kaptam támogatást Frankfurtba. A járványhelyzet miatt az utazást többször el kellett halasztani, azonban jelenleg úgy tűnik, júliusban sikerül megvalósítani a kutatóutat.