

5. ábra. Különböző ingerek hatására az emberi memóriában lezajló változás. Szaggatott vonal: ritkán ismételt ingerek között az információ elfelejtődik. Folytonos vonal: gyorsan ismételt ingerek hatására az információ rögzül.

ismétlődő ingerekkel is képesek vagyunk memorizálni valamit, ha a lecsengés elegendően hosszú időskálára terjed ki (5. ábra, folytonos vonal). A „lassú felejtés” szükséges feltétele annak, hogy a téves vagy felesleges információk eltűnjenek. Az agykutatók körében ismert, hogy a felejtés nem egy egyszerű exponenciális lecsengés, hanem a mérhető jel időben több nagyságrenden keresztül is megmarad.

Az általunk vizsgált Ag_2S memrisztor „gyorsan írható – lassan felejtő” memóriaként működik (3. ábra). Az ismétlődő pulzusok hatására bekövetkező tanulási folyamat miatt memrisztorokon alapuló mesterséges intelligencia alkalmas lehet nagy erőforrás-igényű számítástechnikai feladatok új elveken történő, gyors és hatékony elvégzésére (például a mintázatfelismerés). Agykutatási alkalmazási lehetőséget jelent a szinapszis által összekötött neuronok bonyolult kapcsolat

látat leíró úgynevezett plaszticitási függvény (spike timing dependent plasticity – STDP) tanulmányozása memrisztorokból készített hálózatok segítségével.

Összefoglalás

A fent bemutatott eredmények alapján elmondható, hogy az ezüst-szulfidban kialakuló fémes, néhány nanométer átmérőjű vezető szálak ellenállása folyamatosan változtatható nanoszekundum alatti időskálán. A kis méret és a memóriával analóg viselkedés lehetővé teszi, hogy gyors és kompakt memóriát építsünk ezüst-szulfidon alapuló cellák hálózatából. A különleges dinamikai tulajdonságok miatt az Ag_2S memrisztorok nemcsak számítógépes adattárolásra, de új típusú „felejtő” neurális hálózatok építésére is alkalmasak.

Irodalom

- A. Gubicza, D. Zs. Manrique, L. Pósa, C. J. Lambert, G. Mihály, M. Csontos, A. Halbritter: Asymmetry-induced resistive switching in $\text{Ag-Ag}_2\text{S-Ag}$ memristors enabling a simplified atomic-scale memory design. *Scientific Reports* 6 (2016) 30775.
- A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály: Non-exponential resistive switching in Ag_2S memristors: a key to nanometer-scale non-volatile memory devices. *Nanoscale* 7 (2015) 439.
- A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály: Resistive switching in metallic Ag_2S memristors due to a local overheating induced phase transition. *Nanoscale* 7 (2015) 11248.
- A. Geresdi, M. Csontos, A. Gubicza, A. Halbritter, G. Mihály: Fast operation of nanometer-scale metallic memristors: highly transparent conductance channels in Ag_2S devices. *Nanoscale* 6 (2014) 2613.
- A. Geresdi, A. Halbritter, A. Gyenis, P. Makk, G. Mihály: From stochastic single atomic switch to nanoscale resistive memory device. *Nanoscale* 3 (2011) 1504.

NEUTRONCSILLAGOK EXTRÉM ANYAGÁNAK VIZSGÁLATA ÚJ TÉRELMÉLETI MÓDSZEREKKEL

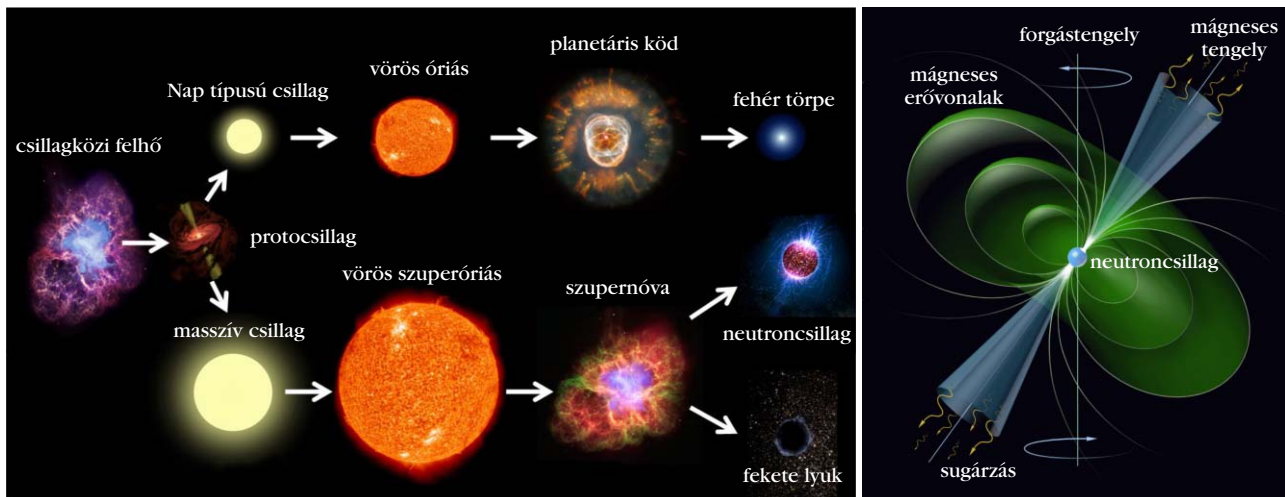
Pósfay Péter – MTA Wigner FK RMI, ELTE TTK
 Barnaföldi Gergely Gábor – MTA Wigner FK RMI
 Jakovác Antal – ELTE TTK Fizikai Intézet

Kompakt égi objektumoknak nevezzük a nagy tömegű csillagvégállapotokat, amelyek fehér törpék, neutron- vagy kvarkcsillagok, esetleg fekete lyukak [1]. Ezek mindegyikének elméleti leírása újabb és újabb fizikai és matematikai modelleket, megoldási technikákat kíván mind analitikus, mind numerikus oldalról. Ennek oka alapvetően abban keresendő, hogy két olyan fizikai modell együttes alkalmazása szükséges

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni az NKFIH OTKA K120660, K104292, K104260 pályázatoknak, valamint az MTA NKM-81/2016 MTA-UA bilaterál mobilitási programnak. Barnaföldi Gergely Gábor és Pósfay Péter köszönettel tartozik a NewCompStar (MP1304) és THOR (CA15213) COST akciópályázatok nyújtotta támogatásért.

az elméleti leírások során, amelyek értelmezési tartományai nehezen összeegyeztethetők. E két modell a geometriai alapú, lokálisan a téridő szerkezetét meghatározó gravitációelmélet, valamint mikroszkopikus kvantumvilágot leíró kvantumtérelmélet. Míg előbbi nagy skálájú viselkedést modellez lokálisan, erősen görbült téridőben, az utóbbi a mikrovilág sík téridőbeli „globális” leírására épül. A statisztikus termodinamika beillesztése ebbe a kettős leírásba további nehézségeket teremt.

Kutatásunk célja a neutroncsillagok (1. ábra) belső szerkezetének modellezése, amely mindmáig nagy kihívást jelent: (i) hiszen földi körülmények között nem állítható elő e kompakt csillagbelső – a feltétele-



1. ábra. A neutronsillagok keletkezése és közeli kozmikus környezetük. A világítótorony-effektus [2].

zéseknek megfelelő – hideg, erősen kölcsönható anyaga; (ii) elméleti számolások esetén sem álltak rendelkezésre olyan egzakt módszerek, amelyekkel a barionos anyag ilyen állapota tárgyalható.

Jelen cikk egy, a szerzők által kifejlesztett eljárást mutat be egy egyszerűsített térelméleti modellen keresztül, amellyel nemcsak egzakt megoldás adható, de – azonos számolási keretben – különböző szintű közelítések is összehasonlíthatók. Az új eljárás a

Funkcionális Renormálási Csoport (FRG) módszerét használja nagy sűrűségű (véges kémiai potenciálú) valamint nulla hőmérsékletű közelítésben – ahol általánosan alkalmazható egzakt megoldási eljárás eddig nem létezett [3, 4].

Neutronsillagok: extrém sűrű maganyag hideg égi laboratóriumokban

Napjaink leginkább kutatott kérdése, hogy a neutronsillagok vizsgálatával miként következtethetünk a maganyag tulajdonságaira? Erre jelenleg csak közvetett módszerek állnak rendelkezésünkre: az extrém sűrű maganyagra felteszünk egy fizikailag motivált anyagmodellt, és kiszámítjuk, hogy milyen tulajdonságokkal rendelkeznek azok a neutronsillagok, amelyeket a modellünk által leírt anyag alkot [5]. Az eredményt összehasonlítva megfigyelésekkel következtetéseket tudunk levonni modellünk alkalmazhatóságáról¹.

Számunkra legfontosabb mérhető fizikai (csillagászati) paraméterek a neutronsillag R sugara, M tömege, P forgási periódusa és dP/dt lassulása. A sugár meghatározása nagyon összetett feladat, mindemellett még nem állnak rendelkezésre kellően pontos mérési adatok ahhoz, hogy jelentősen megszorítsák az elméleti leírásokat.

Az utóbbi időben rengeteg erőfeszítést történt a sugár mérésének pontosítására, azonban a mérések indirekt módszerekkel történnek, így az eredmények modellfüggők. A közvetett eredményekből annyit biztosan tudhatunk, hogy a neutronsillagok sugara megközelítőleg 10 km [6, 7]. A tömeg mérésére nagyon kifinomult módszerek állnak rendelkezésre, ezt paramétert valóban nagy pontossággal ismerjük, köszönhetően a kettős neutronsillag-rendszerekben megfigyelhető speciális gravitációs effektusoknak [8]. A mai el-



Pósfay Péter 2014-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n és azóta az ELTE fizika doktori tanulója, valamint a Wigner Fizikai Kutatóközpont elméleti osztályának munkatársa. Disszertációjának témája a térelméleti módszerek alkalmazása asztrofizikai jelenségek esetében.

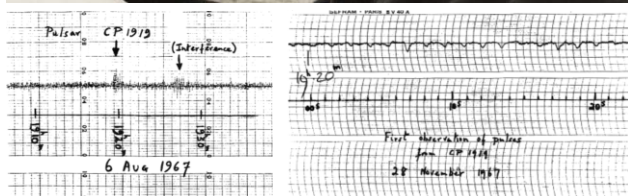


Barnaföldi Gergely Gábor, PhD, az MTA Wigner FK, Nehézionfizika Kutatócsoport és az Magyar ALICE Csoport vezetője. Kutatási témái: nagyenergiás nehézionfizika, kompakt csillagok vizsgálata, erősen kölcsönható anyag fáziszerkezete.



Jakovác Antal, PhD, egyetemi tanár az ELTE Atomfizikai Tanszékén. Kutatási témák: véges hőmérsékletű és nemegyensúlyi térelméletek, erősen kölcsönható anyag fáziszerkezete, egzakt renormálási csoport.

¹ A probléma látszólag invertálható, azonban a csatolt differenciálegyenlet komplexitása miatt mindmáig nem megoldott.



2. ábra. Jocelyn Bell Burnell és az első, 1967. augusztus 6-án mért pulzáradat-sor.

méletek számára az egyik legnagyobb kihívás, hogy egyre több nehéz, a Napunknál közel kétszer nagyobb tömegű neutroncsillagot detektálnak [9]. Figyelembe véve a 10 km-es sugarat, ezek rendkívül nagy sűrűségű objektumok. Ilyen sűrű anyag nem áll rendelkezésre a Földön, ezért laboratóriumban nem tudjuk közvetlenül megvizsgálni, így elméleti leírásuk várat magára.

Érdeemes megemlíteni, hogy a gravitációs hullámok felfedezésével egy új, független mérési módszer vált elérhetővé a neutroncsillagok szerkezetének vizsgálatára. Két egymás körül keringő neutroncsillag lassanként energiát veszít, egyre közelebb kerül egymáshoz, mígnem összeütköznek, és egy fekete lyukat vagy egy új neutroncsillagot alkotnak. Eközben nagy energiájú gravitációs hullámokat bocsátanak ki, amiket elemezve az őket alkotó anyag tulajdonságairól szerezhetünk információt, amelyet modelljeink tesztelésére és finomítására használhatunk fel. Neutroncsillag-kettősökből származó gravitációs hullámokat még nem detektáltak, de a várakozások szerint a fenti módszer hamarosan fontos szerephez jut majd, hiszen az egyes neutroncsillag-állapotegyenletek nagyon erőteljesen befolyásolják az összeolvadó kettősök által keltett gravitációs hullámok jeleit [10].

A neutroncsillagok (pulzárak) legegyszerűbben, közvetlenül megfigyelhető tulajdonsága a forgási periódus, annak ellenére, hogy egy-egy fordulat a másodperc tört része alatt lezajlik. Felfedezésük és megfigyelésük egyik kulcsa a kozmikus világitótorony-effektus (1. ábra), amely háttérben a mágneses és forgási tengelyek közötti eltérés áll [1]. Idén ünnepeljük az ezen jelenség alapján felfedezett pulzárak felfedezésének 50. évfordulóját (2. ábra) [11]. Jelenleg mintegy 2000 pulzár forgási periódusa áll rendelkezésünkre, amelyek – feltételezésünk szerint – neutron- vagy kvarkcsillagok. Jeleiket széles elektromágneses tartományban mérhetjük, leggyakrabban rádió-, röntgen- vagy gamma-teleszkópokkal.

A kompakt csillagok (mikroszkopikus) belső szerkeze azonban közvetlen módszerekkel nem mérhe-

tő. Éppen ezért érdekes, hogy a fenti makroszkopikus mennyiségek megfigyelésével és csillagászati adataikat elemezve, majd összehasonlítva az elméleti magfizikából számolt állapotegyenletekkel, közvetett módon jellemezhető a hideg, nagy sűrűségű, erősen kölcsönható anyag mikroszkopikus szerkezete is.

Az erősen kölcsönható anyag vizsgálata neutroncsillagokban

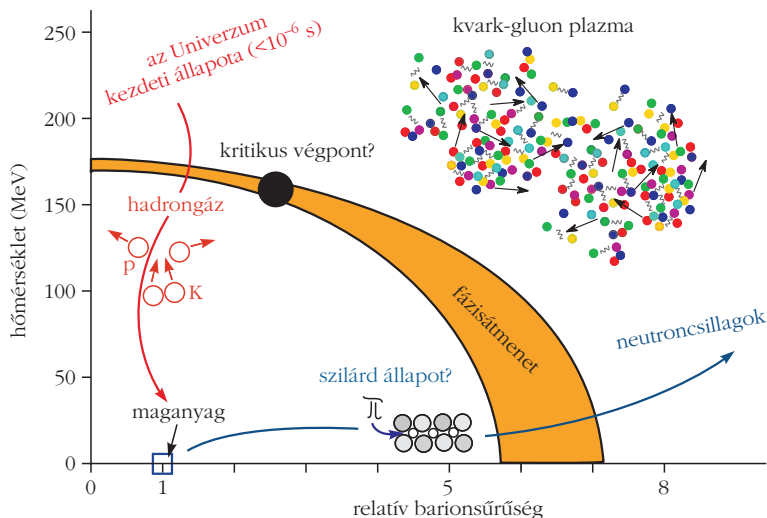
Minden anyagnak saját, rá jellemző fázisszerkezete van. A legközismertebbek például a víz különböző fázisai, halmazállapotai: a légköri nyomáson a víz 100 °C felett gőz halmazállapotú, 0 °C alatt szilárd jég, a kettő között pedig folyékony. Ezeket a fázisokat fázisátmenetek (halmazállapot-változások) választják el egymástól, a különböző fázisokban a víz fizikai tulajdonságai jelentősen eltérnek.

Jelent tudásunk szerint az Univerzum anyaga – fejlődése során – több fázisátmeneten ment keresztül. Történetének kezdetén, az Ősrobbanás első mikromásodperceiben nagyon sűrű, forró, ideálshoz közeli folyadékállapotban volt az anyag. Tágulásának következtében hűlt és a sűrűsége egyre csökkent, míg el nem érte a ma tapasztalható, alapvetően hideg és kis sűrűségű állapotát – ahol a térelméleti modellekkel jól tárgyalható a hadronikus, barionos anyag. A fejlődés korai szakaszában a hőmérséklet olyan magas volt, hogy az atommagot alkotó hadronok belsejéből kiszabadult kvarkok úgynevezett kvark-gluon plazmaállapotot (QGP) hoztak létre. Ezt kell vizsgálnunk, ha mélyebb betekintést szeretnénk nyerni az Univerzum fejlődésének történetébe.

A kvarkok és gluonok között ható erős kölcsönhatást leíró fizikai elmélet a kvantum-színdinamika (QCD), amelyet a forró anyag leírásához véges hőmérsékleten kell alkalmaznunk, azaz a kvantummechanikai effektusok mellett figyelembe kell vennünk a termodinamikát is. Ezen vizsgálatokban központi szerepet játszik az erősen kölcsönható anyag fázisszerkezetének vizsgálata, azaz a hadronikus és partonikus állapotok közötti átmenet folyamatának megértése.

Az erősen kölcsönható anyag esetében hasonlóan kell eljárunk: több fázist feltételezünk, például maganyag, kvark-gluon plazma, színes szupravezető fázis stb. és tudni szeretnénk, hogy ezek milyen körülmények között valósulnak meg és hogy milyen típusú fázisátmenetek választják el őket egymástól. A QCD fázisdiagramot hagyományosan két paraméter – a hőmérséklet és a sűrűség – által kifeszített síkon szokták ábrázolni (3. ábra).

Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramjának egyes részeit más és más kísérleti módszerekkel vizsgálják. A magas hőmérsékletű és kis sűrűségű tartomány kísérletileg részecskegyorsítók segítségével térképezhető fel, amelyek protonok és nehéz atommagok egymással való ütköztetése során érik el az Univerzum korai állapotát jellemző fizikai körülményeket. A fázisdiagram nagy sűrűségekhez és kis hőmérséklet-



3. ábra. Az erősen kölcsönható anyag feltételezett fázisszerkezete.

hez tartozó tartománya azonban földi körülmények között nem vizsgálható. A maganyag ilyen extrém állapota pulzárók, neutroncsillagok és a nagyon erős mágneses terű magnetárok belsejében fordulhat elő, ezért ezeket az égi objektumokat vizsgálva nyerhetünk információt a hideg kvark/hadron anyagról is.

Kvantumfluktuációk térelméletekben, renormálás

Az anyag mikroszkopikus leírása a kvantumelméleteken alapszik. A részecskefizika szokásos leírásának matematikai alapja a kvantumtérelmélet, amely egyszerre foglalja magában a részecskék kvantummechanikai természetét és a kölcsönhatások fizikai mezőkkel történő leírását. Például az elektromágnesesség esetében a töltések forrásai az elektronok és a protonok – kvantummechanikai részecskék –, az elektromágneses tér pedig fizikai mező. Az elektromosság ezen tulajdonságait figyelembe vevő térelmélet a kvantum-elektrodinamika (QED).

Célunk olyan effektív térelméletek megalkotása, amelyek a neutroncsillagokban előforduló nagy sűrűségek és kis hőmérsékletek esetén jól használhatók az erősen kölcsönható anyag leírására. Elméletünk effektív, ugyanis nem arra törekszünk, hogy valamilyen alapvető fizikai elméletből vezessük le a modelünket (amely jelen esetben a QCD), hanem egy egyszerűbb és emiatt hatékonyabban alkalmazható elméletet találunk ki, ami nagy sűrűségek esetén hűen visszaadja a QCD legfontosabb tulajdonságait. Munkánk eredményességét az elmélet neutroncsillagokra vonatkozó következményei és a megfigyelések összehasonlításából tudhatjuk meg. Nagy sűrűségek esetén a kvantum-szindinamikát egyelőre nem tudjuk megoldani, így egy jól működő effektív elmélet új nézőpontból világíthatja meg a kvarkok és gluonok elméletének ilyen extrém körülmények közötti viselkedését, és talán közelebb visz minket egy pontosabb megoldáshoz.

Az effektív elméletek finomításának szempontjából fontos lépés – a kölcsönhatások mező jellege mellett – a részecskék kvantum viselkedésének figyelembevétele. E mikroszkopikus effektusok hatását a kvantumtérelméletek nyelvén fluktuációknak hívják. Szemléletesen: a Heisenberg-féle határozatlansági reláció alapján egy részecske helyét és impulzusát nem ismerhetjük teljesen pontosan, a mennyiségek között a következő összefüggés áll fenn:

$$\Delta x \Delta p \leq \frac{\hbar}{4\pi}. \quad (1)$$

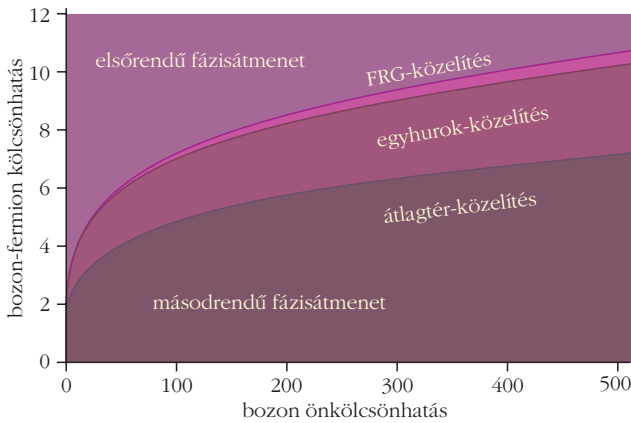
Hasonló összefüggés áll fenn a részecske energiája és az idő (életideje) között is:

$$\Delta t \Delta E \leq \frac{\hbar}{4\pi}. \quad (2)$$

Az (1) és (2) formulák szemléletes jelentése, hogy minél kisebb tér- és időintervallumban szeretnénk megfigyelni a részecske viselkedését, annál nagyobb bizonytalanságot (fluktuációt) tapasztalunk impulzusában és energiájában.

A mikroszkopikus részecskék a kvantumtérelmélet által megengedett kölcsönhatásokban vesznek részt. A kvantumfluktuációk hatását figyelembe vevő eljárást *renormálásnak* hívják, amely nevét onnan kapta, hogy fluktuációk hatására a fizikai mennyiségek értékei megváltoznak, *renormálódnak*. Ennek szemléltetésére képzeljük el, a következő hétköznapi helyzetet: éjszaka a lámpa köré rovarok gyűlnek és ezzel leárnyékolják a lámpa fényét. Ha valaki messziről nézi a lámpát és nem tud a rovarokról, akkor azt hiheti, hogy a lámpa eredeti fénye a rovarok által árnyékolva, halványabb fényerejű. Ezt a tévedést nem veszi észre egészen addig, amíg egy másik lámpát be nem kapcsolunk, ugyanis ekkor a rovarok ahhoz is szeretnének közel repülni, így az eredeti lámpa mellett kevesebb marad. A távoli megfigyelő számára az eredeti lámpa egyszer csak fényesebb lesz, pusztán attól, hogy egy másikat felkapcsoltunk! Ebben a példában a fluktuációknak a rovarok fényhez való vonzódása felel meg, és az emiatt megváltozott fizikai mennyiség pedig a lámpa fényessége.

A módszer, amivel effektív elméletünkben figyelembe vesszük a kvantumfluktuációk hatását, a *Funkcionális Renormálási Csoport* eljárás (röviden FRG). E módszer előnye, hogy nem perturbatív, azaz alkalmazhatósága nem függ a leírandó kölcsönhatás erősségétől. Esetünkben, amikor a nagy sűrűségek és erős kölcsönhatások tartományában mozgunk, ez különösen hasznos. Az FRG a kvantumeffektusokat egy skála segítségével veszi figyelembe, amely a nagy energiákat és az általunk megfigyelt energiatartományt köti össze. A skála folytonos átmenetet biztosít a mikroszkopikus világ (elemi részecskék és kölcsönhatások) és a makroszkopikus (számunkra megfigyelhető) folyamatok közt, miközben figyelembe veszi a részecskék kvantum természetéből adódó hatásokat, azaz



4. ábra. A fázisátmenetek típusa a kölcsönható fermiongáz esetén. Vízszintes tengelyen a bozon önkölcsönhatásának erőssége, a függőleges tengelyen pedig a bozon-fermion kölcsönhatás erőssége – dimenziótlanított csatolási egységekben – szerepel.

a kvantumfluktuációkat. A módszer így betekintést nyújt abba, miként hozzák létre az anyagot alkotó részecskék azokat a fázisokat (halmazállapotokat), amelyeket meg tudunk figyelni, sőt a fázisátalakulások során tanulmányozhatjuk a mikroszkopikus folyamatok szerepét.

Kvantumfluktuációk hatása a fázisdiagramra

A kvantumfluktuációk figyelembevételére tett első lépésünk egy olyan modell vizsgálata volt, amely a későbbi finomításhoz tartalmazza a legfontosabb összetevőket, de még elég egyszerű ahhoz, hogy láthassuk, a kvantumos fluktuációknak köszönhetően milyen effektust kapunk [4]. A legegyszerűbb kölcsönható Fermi-gáz-modellt vizsgáltuk, amely kétféle részecskét tartalmaz: egy fermiont és egy bozont. A fermionok felelnek meg a nukleonoknak, kölcsönhatásuk a bozonokkal az erős kölcsönhatást modellezi. Ebben a képből a bozonok még önmagukkal is képesek kölcsönhatni, amit teljesen kvantumosan szeretnénk figyelembe venni, azaz a bozonok önkölcsönhatásából fakadó kvantumfluktuációk hatását vizsgáljuk a fizikai mennyiségekre.

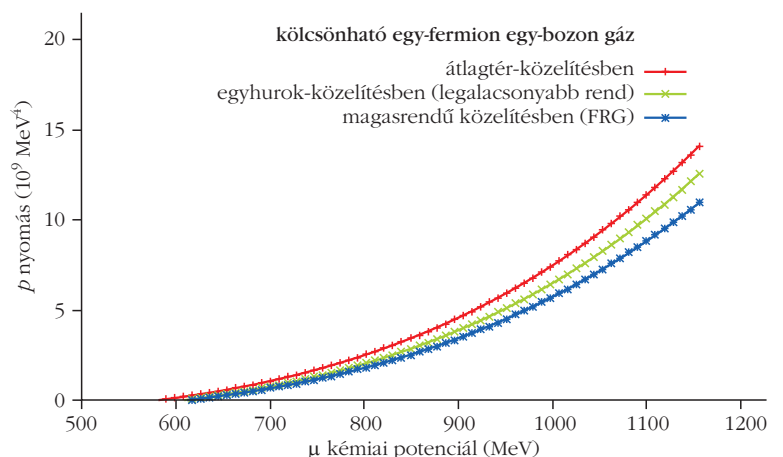
Az FRG-számolás végrehajtására saját technikát használunk, amely jelentősen lecsökkenti az aritmetikai számolások bonyolultságát. A probléma fő nehézségét a fermionok természete adja: a fermionok a Fermi-Dirac-eloszlásnak megfelelően viselkednek, amely alacsony hőmérsékleten azt jelenti, hogy egy adott energiaszint felett egyáltalán nem található meg a rendszerben, viszont alatta minden energiaszintet betöltenek. Energia szerinti eloszlásuk emiatt egy gyorsan változó, úgynevezett lépcsőfüggvény, amelynek deriváltjai határesetben olyan nagyok, hogy külön matematikai formalizmust (disztribúciók) igényelnek. Az aritmetikai megoldás emiatt egyre összetettebb lesz, különösen,

ha egyre jobb közelítést szeretnénk elérni. A fentebb említett FRG-módszer ehelyett úgy közelít a megoldáshoz, hogy két külön egyenlettel dolgozik: egygel abban az esetben, amikor a fermionok egyáltalán nincsenek jelen az adott energián, egy másikkal pedig akkor, amikor vannak és járuléku végese. A nehézség abban rejlik, hogy a határokon megfelelő módon egyeztetni kell a két egyenletet. Ebben az egyszerűsített modellben elvégezve a számolást a 4. ábrán látható fázisdiagramot kapjuk.

A 4. ábra vízszintes tengelyén a bozon önkölcsönhatásának erőssége, a függőleges tengely pedig a bozon és fermion kölcsönhatásának erőssége – dimenziótlanított csatolási egységekben – található. A modellben két fázis van, amelyek abban különböznek, hogy mekkora a fermion tömege. Az elsőben a fermion tömege nulla, a másikkban pedig a nukleon tömegével egyezik meg. Ennek a fázishatárát különböző közelítésekben jelölik a fázisdiagramon felvett görbék. A tömeget a fermionok bozonnal való kölcsönhatása határozza meg: ha a bozonikus mező felvesz egy – az önkölcsönhatása által meghatározott – adott értéket, akkor a fermion tömeges részecskévé válik. A folyamat részleteit az FRG-módszer írja le úgy, hogy az FRG-skála nagyenergiás részén a bozonikus mező értéke nulla, így a fermion tömege is nulla. Ahogy csökkentjük a skálát, a kvantumfluktuációk együttes hatása megváltoztatja a bozonikus mező nagyságát, aminek végeredménye az, hogy a fermion a bozon-fermion kölcsönhatáson keresztül tömeget kap. Az erős kölcsönhatást leíró kvantum-szindinamikában a fermionok – ehhez hasonló módon – a királis fázisátmenetnek köszönhetően kapnak tömeget, így egyszerű modellünk ennek effektív leírása.

Mi elsősorban a 4. ábra fázisdiagramján szemléltetett két fázis közötti átmenet jellegét szeretnénk vizsgálni, mert ezek között kísérletileg lehet különbséget tenni, így fontos paraméternek számítanak. Megvizsgáltuk, hogy különböző közelítések esetén milyen típusú fázisátmenet látható a rendszerben:

5. ábra. A kölcsönható egy-fermion egy-bozon gáz modell állapotegyenlete különböző közelítésekben számolva átlagtér, egyhurok és az egzakt FRG esetben számolva.



- az átlagtér-közelítés annak felel meg, amikor a kvantumfluktuációk hatását elhanyagoljuk,
- az FRG-számolás során a bozon önkölcsönhatásából származó fluktuációkat teljesen figyelembe vettük,
- az egyhurok-közelítés a két szélsőség között helyezkedik el: itt a fluktuációkat csak a legalacsonyabb, vezető rendű közelítésben számoljuk.

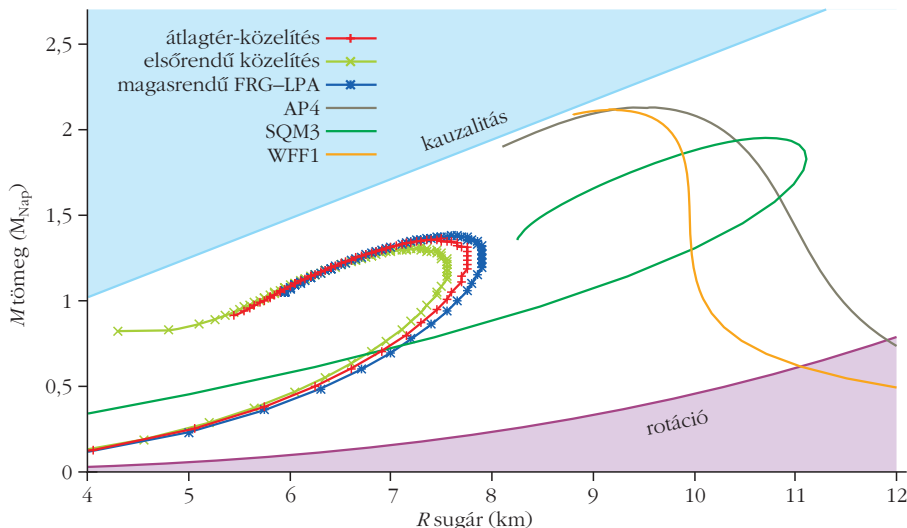
Megfigyelhetjük, hogy a közelítés jelentősen befolyásolja fázisátmenet típusát: adott erősségű kölcsönhatások mellett – a kvantumfluktuációkat is figyelembe véve –, átlagtér-közelítés esetén az elsőrendű fázisátalakulás másodrendű lesz. Az is látható, hogy az FRG- és az egyhurok-közelítés nagyon közeli eredményt ad, és mindkettő jelentősen eltér az átlagtér-közelítéstől, amiben nem szerepelnek kvantumfluktuációk. A 4. ábra egyik fő üzenete, hogy a kvantumfluktuációk alapszintű figyelembe vétele is jelentősen csökkenti az elhanyagolásukkal okozott eltérést.

Megvizsgálhatjuk, hogy ezen számítási eljárások mennyiben befolyásolják a hideg, kétkomponensű (egy-fermion, egy-bozon) anyag állapotegyenletét (5. ábra). Nagy kémiai potenciál-értékek esetében mintegy 5%-os eltérés mutatkozik az egyes közelítések között. A kémiai potenciál a sűrűséggel áll kapcsolatban, hiszen a nyomás kémiai potenciál szerint vett deriváltja a sűrűség:

$$n = \frac{dP}{d\mu}. \quad (3)$$

Ez a derivált az 5. ábrán látható görbék meredekségét jelenti, azaz minél gyorsabban nő egy görbe, annál nagyobb sűrűségek tartoznak hozzá. A három görbe kis kémiai potenciálok esetén közel halad egymáshoz, majd a kémiai potenciál növekedésével különbségük is nő, azaz változási sebességük (meredekségük, deriváltjuk) a kémiai potenciál növekedésével egyre jobban eltér. A kvantumfluktuációk figyelembe vétele tehát az anyag sűrűségét is megváltoztatja. Ez a

6. ábra. Kompakt csillagok $M(R)$ tömeg-sugár diagramja a kölcsönható egy-fermion egy-bozon gáz modell állapotegyenletével számolva különböző közelítésekben. Összehasonlítás céljából felrajzoltuk más modellek eredményeit is [7, 12–14].



neutroncsillagok esetében – ahol az anyag sűrűsége határozza meg a gravitációs energiát, és ezen keresztül a neutroncsillag méretét és tömegét – különösen fontos. Felmerül a kérdés, a kvantumfluktuációknak mekkora hatása lehet a kompakt csillagok megfigyelhető makroszkopikus tulajdonságaira?

Kvantumfluktuációk hatása a kompakt csillagokra

Fentiekben meghatároztuk, hogy a kvantumfluktuációk figyelembevétele, azaz a különböző közelítésben végzett számolások mennyiben változtatták meg az állapotegyenletet és a fázisdiagram szerkezetét. A fenti három esetre – ugyanazon modellben végigszámolva – meghatározhatók a kompakt csillagmodellekbe építhető állapotegyenletek. Cikkünk fő kérdését – miszerint látható-e ennek hatása a kompakt csillagok megfigyelhető mennyiségeiben – megválaszolandó, a Tolman–Oppenheimer–Volkov-egyenletet alkalmazva, a fentebb említett három közelítésben kapott állapotegyenleteket felhasználva, kiszámítottuk a lehetséges kompaktcsillag-konfigurációk $M(R)$ csillagtömeg-csillagsugár összefüggését.

A 6. ábrán látható, hogy a három fenti közelítésben számolt állapotegyenlet milyen $M(R)$ görbékre vezet. A görbék menetéből kitűnik, hogy nagy sűrűségeknél már mutatkozik eltérés az állapotegyenletek számítási közelítésében. Ez akár 3% eltérést is eredményezhet a lehetséges kompakt csillagállapotok tömegében és sugarában. Ábránkon összevetésként felrajzoltuk más szerzők által használt realiztikus állapotegyenleteket is [7, 12–14]. Tekintve, hogy egyszerű modellünk nagyságrendileg azonos tartományban van ezekkel az állapotegyenletekkel, sejthető, hogy összetett, realiztikusabb modellekben hasonló nagyságú effektust figyelhetünk majd meg. Ennek bizonyítása jelenleg is folyó kutatásunk célja, mindamelllett, hogy

modellünk a kísérleti mérésekből ismert tömeg- és sugárértékekkel is összhangban legyen.

Konklúziók

Egyszerűsített Yukawa-jellegű csatolást alkalmazó, egy-fermion egy-bozon modellünk alapján azt várjuk, hogy a kvantumfluktuációk szerepe – akár 5%-os effektusként – más effektív elméletek esetében is érezhető. Az itt alkalmazott technikát felhasználva a fluktuációk szerepét bonyolultabb esetekben is figyelembe vehetjük. Sőt, nem csak a nagyenergiás fizikában, a maganyag leírására használhatjuk, hanem

bármilyen kölcsönható Fermi-gázzal modellezhető rendszer esetében. Ez az első lépés volt a kvantumfluktuációk hatásának vizsgálatára a hideg sűrű anyag esetében, és az eredmények alapján a következő lépés a módszer alkalmazása lesz realiztikusabb modellekben.

Irodalom

1. Karsai Sz., Barnaföldi G. G., Forgácsné Dajka E., Pósfay P.: Neutroncsillagok – a világegyetem legnagyobb atommagjai. *Nukleon VIII* (2015) 185.
2. http://astro.elte.hu/icsip/csill_elete/csillagok_elete/index.html
<https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>
http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch16/ch16.html
3. P. Pósfay, G. G. Barnaföldi, A. Jakovác: FRG Approach to Nuclear Matter at Extreme Conditions. *PoS EPS-HEP2015* (2015) 369.
4. G. G. Barnaföldi, A. Jakovác, P. Pósfay: Harmonic expansion of the effective potential in a functional renormalization group at finite chemical potential. *Phys. Rev. D* 95/2 (2017) 025004.
5. V. Graber, N. Andersson, M. Hogg: Neutron stars in the laboratory. *Int. J. of Modern Physics D* 26/8 (2017) 1730015.
6. S. Guillot, M. Servillat, N. A. Webb, R. E. Rutledge: Measurement of the Radius of Neutron Stars with High Signal-to-noise Quiescent Low-mass X-Ray Binaries in Globular Clusters. *The Astrophysical Journal*, 772/1 (2013) 7.
7. F. Özel, D. Psaltis, T. Guver, G. Baym, C. Heinke, S. Guillot: The Dense Matter Equation of State from Neutron Star Radius and Mass Measurements. *Astrophys. J.* 820/1 (2016) 28.
8. F. Özel, P. Freire: Masses, Radii, and Equation of State of Neutron Stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 54 (2016) 401–440.
9. P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts, J. W. T. Hessels: A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature* 467 (28 October 2010) 1081–1083.
10. L. Rezzolla, K. Takami: Gravitational-wave signal from binary neutron stars: a systematic analysis of the spectral properties. *Phys. Rev. D* 93/12 (2016) 124051.
11. A. Hewish: *Pulsars. Ann. Rev. of Astron. and Astrophysics* 8 (1970) 265.
12. M. Prakash, J. R. Cooke, J. M. Lattimer: Quark-hadron phase transition in protoneutron stars. *Phys. Rev. D* 52 (1995) 661.
13. R. B. Wiringa, V. Fiks, A. Fabrocini: Equation of state for dense nucleon matter. *Phys. Rev. C* 38 (1988) 1010.
14. A. Akmal, V. R. Pandharipande: Equation of state of nucleon matter and neutron star structure. *Phys. Rev. C* 58 (1998) 1804.

BALESETÁLLÓ ATOMERŐMŰVI FŰTŐELEMENEK FEJLESZTÉSE

Hózer Zoltán

MTA EK Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium

A világon napjainkban működő több mint négyszáz atomerőmű többsége urán-dioxid-tablettákat tartalmazó, cirkóniumburkolattal ellátott fűtőelemekkel üzemel. Ez az üzemanyag nagyon jól használható az erőművek normál üzemelése során, amit több mint ezer reaktorév tapasztalata is bizonyít. Az urán-dioxid-üzemanyagban a besugárzás során végbemenő változások nem akadályozzák meg, hogy egészen magas kiégéseket lehessen elérni. A jó korrózióállósággal, mechanikai szilárdsággal és sugárállósággal rendelkező cirkóniumburkolattal pedig több évig lehet üzemelni úgy, hogy közben a fűtőelem ne veszítse el integritását, és utána a kiégett üzemanyag még a több évtizedes átmeneti tárolás és a végleges elhelyezés során fellépő terheléseket is képes elviselni.

Üzemzavarok és balesetek során a felhevült fűtőelemekben számos kedvezőtlen folyamat léphet fel. A cirkóniumötvözet magas hőmérsékleten intenzív reakcióba lép a vízgőzzel. Az exoterm reakcióban hidro-

gén keletkezik, az oxidált fém pedig elridegedik és mechanikai terhelés hatására eltörhet. A szerény hővezető-képességgel rendelkező urán-dioxid középponti hőmérséklete normál üzemelés során is meghaladja az 1000 °C-ot, de baleseti körülmények között még ennél is magasabbra emelkedhet. Ha ez nem is éri el a baleset során az UO₂ olvadáspontját (2800 °C), a hőmérséklet növekedésével a hasadási termékek kikerülése a tablettából fokozódik, ami potenciálisan növeli a környezeti kibocsátást.

Az atomerőművek biztonsági rendszerei megakadályozzák azt, hogy tervezési üzemzavarok során a fűtőelemek épsége olyan mértékben sérüljön, aminek komoly környezeti hatása lenne. A kis valószínűségű, súlyos balesetek során bekövetkezhet a fűtőelemek jelentős mértékű sérülése és akár a zóna megolvadása is. Ekkor a környezeti kibocsátást az erőmű további védelmi gátjai (elsősorban a konténment) hivatott garantálni. A régebben tervezett atomerőművek egy részét nem látták el a súlyos balesetek kezeléséhez szükséges rendszerekkel, sajnos ezek közé tartoztak a fukusimai balesetben sérült blokkok is.

A 2011. évi balesetben a fukusimai reaktorok túléltek a földrengést és a cunamit. A dízelgenerátorok elvesztése és a külső áramforrás hiánya miatt azonban a vészhűtőrendszerek szivattyúi nem tudták biztosítani a maradványhő elvezetését. A burkolat forró felületén beindult a cirkónium vízgőzös oxidációja, és a kémiai reakcióban reaktoronként több száz kg hidrogén keletkezhetett. A néhány nappal később bekövetkezett hidrogénrobbanások három blokkon



Hózer Zoltán az MTA doktora, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumának vezetője. Több mint két évtizede foglalkozik fűtőelemes kutatásokkal. Vezetésével több kísérleti programot hajtottak végre a paksi atomerőműben használatos cirkóniumburkolatok normál üzemi és üzemzavari viselkedésének jobb megismerésére.