



**#2**

# Femtometreistä valovuosiin: neutroni- tähdet eksootti- sen aineen laboratoriona

*Aleksi Vuorinen*



## **Abstract**

The Standard Model of particle physics describes the basic properties and interactions of all known elementary particles at an astonishingly good level, and predictions derived from it have time and again been experimentally verified. One of its parts, namely the theory of the strong nuclear interaction, Quantum Chromodynamics (QCD), has however proven to be computationally extremely demanding. In particular, the properties of matter described by QCD are at the moment still largely unknown in the limit of high baryon density.

Very recently, the study of dense QCD matter has taken important steps forward owing largely to new observational data originating from a distant but very effective laboratory: neutron stars. The cores of these extremely compact stars contain the densest form of matter in our present-day Universe, and the properties of this matter are reflected on the measurable macroscopic properties of the stars themselves. In this review article, I will introduce this active field of research, placing particular emphasis on recent efforts to discover an entirely new phase of matter - cold and dense quark matter - inside the cores of the most massive neutron stars.

## 1. Johdanto

Mitä tavalliselle atomeista koostuvalle aineelle tapahtuu kun sitä puristetaan kasaan rajatta? Tähän kenties hieman lapselliseltakin kuulostavaan kysymykseen vastaaminen on yllättävän vaikeaa ja pitää sisällään hämmästyttävän paljon monimutkaista ja osittain hämärän peitossakin olevaa fysiikkaa. Se nivoo myös yhteen useita melko kaukaisiakin fysiikan aloja aina hiukkasfysiikasta yleisen suhteellisuusteorian kautta havainnoivaan astrofysiikkaan.

Tässä yleistajuisessa artikkelissa tarkastelen yllä esitettyä kysymystä kahdesta lähes vastakkaisesta näkökulmasta: yhtäällä teoreettisen hiukkasfysiikan ja toisaalta neutronitähtien tutkimuksen kannalta. Yhteinen kosketuspinta näille syntyy siitä, että kaikkein tiheintä ainetta sisältävät fysikaaliset systeemit löytyvät nimenomaan neutronitähtien ytimistä. Tähtien ja niiden sisältämän aineen ominaisuuksien ymmärtäminen on puolestaan mahdollista vain ydin- ja hiukkasfysiikan koneiston kautta – sisältäväthän nämä ytimet nimenomaan tiheää ydin- ja alkeishiukkasainetta.

Käsillä olevan artikkelin yleisrakenne on seuraava: lyhyen johdannon jälkeen siirryn luvussa 2 tarkastelemaan kvanttiväridynamiikan (QCD) teoriaa osana hiukkasfysiikan Standardimallia. Lyhyen peruskatsauksen jälkeen keskityn erityisesti teorian ns. faasirakenteen kuvailuun, eli siihen, millaisia aineen olomuotoja eri lämpötilan ja tiheyden arvoilla odotetaan löytyvän. Tätä seuraa luvussa 3 katsaus neutronitähtien fysiikkaan, missä etenen lyhyen historiallisen kertauksen jälkeen neutronitähtien tärkeimpiin mitattaviin

ominaisuuksiin. Luku 4 nivoo lopulta nämä kaksi aihepiiriä yhteen ja johdatelee kysymään, miten neutronitähtihavainnot ja teoreettisen ydin- ja hiukkasfysiikan tulokset pystytään yhdistämään neutronitähtiaineen tutkimuksessa. Tämän jälkeen tarkastelen luvussa 5 hyvin tuoreita tutkimustuloksia, joiden perimmäisenä tavoitteena on selvittää, löytyykö neutronitähtien ytimistä kokonaan uudentyypinen aineen olomuoto, kylmä kvarkkiaine. Luvussa 6 luon vielä viimeisen lyhyen yleiskatsauksen koko artikkelin aihepiiriin pyrkien nivomaan siinä käsitellyt asiat yhteen.

## 2. Kvanttiväridynamiikan perusteita

Hiukkasfysiikan tieteenala tutkii nimensä mukaisesti sitä, mistä kaikki ympärilämme oleva aine koostuu kaikkein pienimmillä pituuskaaloilla, ja miten nämä luonnon pienimmät rakenneosat – alkeishiukkaset – vuorovaikuttavat keskenään. Käytännössä kaikki tämänhetkinen ymmärrys hiukkasfysiikasta on sisällytetty ns. hiukkasfysiikan Standardimalliin [ks. esim. (Schwartz, 2013)], jonka on kerta toisensa jälkeen nähty kuvaavan oikein kolmea tunnettua alkeisvuorovaikutusta: sähkömagneettista voimaa sekä heikkoa ja vahvaa ydinvoimaa. Näistä kaksi ensimmäistä kuvaavat suuruudeltaan siinä mielessä heikkoja voimia, että niitä voidaan menestyksellisesti kuvata käyttäen ns. häiriöteoreettista koneistoa, jonka puitteissa erilaiset fysikaaliset suuret kehitetään vuorovaikutuksen voimakkuutta kuvaavan kytkinvälikon (QED:ssa

alkeisvaraus) potenssisarjoiksi. Näiden vuorovaikutusten osalta Standardimallin voidaankin hyvällä syyllä sanoa olevan pitkälti ratkaistu. Viimeisen eli vahvan ydinvoiman ja sitä kuvaavan QCD-teorian tapauksessa näin ei kuitenkaan ole johtuen siitä, että on nimensä mukaisesti erittäin vahva. Montaa sen piiriin kuuluvaa ja fenomenologian kannalta tärkeääkin ilmiötä ei vielä osata kuvata riittävän tarkasti (Brambilla et al., 2014).

Samalla tavoin kuin kvanttielektrodynamiikka eli QED kuvaa sähkömagneettista voimaa fotonien vaihtona sähköisesti varattujen hiukkasten välillä, QCD kuvaa vahvaa ydinvoimaa gluonien vaihtona ns. värivarauksen omaavien alkeishiukkasten, kvarkkien, välillä. Gluonien ja fotonien – ja samalla QCD:n ja QED:n – merkittävin ero löytyy siitä, että ensinmainitut kentät ovat itsekin värivarattuja, eli gluonit vuorovaikuttavat myös itsensä kanssa.

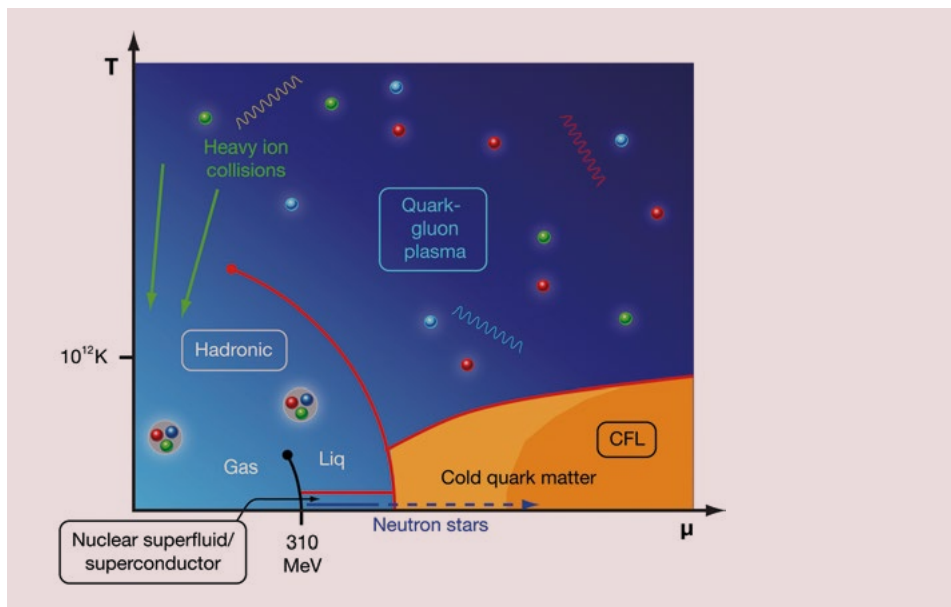
## Mitä tavalliselle atomeista koostuvalle aineelle tapahtuu kun sitä puristetaan kasaan rajatta?

Lisäksi QCD:ssa vuorovaikutuksen voimakkuus on valtavasti sähkömagneettista voimaa suurempi ja lisääntyy hiukkasten etäisyyden kasvaessa. Tämä selittää yhden QCD:n merkittävimmistä ominai-

suuksista, värivankeuden: miksi kvarkkeja ja gluoneja ei normaalioloissa esiinny vapaina hiukkasina vaan ainoastaan värineutraalien hadronien – kuten protonien ja neutronien – sisään vangittuina.

Toinen QCD:n aivan perustavanlaatuisimmista ominaisuuksista on nimeltään asymptoottinen vapaus. Se tarkoittaa vahvan ydinvoiman heikkenemistä suurten energioiden – tässä tapauksessa kenttien välillä vaihtuvan liikemäärän – rajalla ja johtaa hyvin mielenkiintoiseen ennusteseen QCD:n kuvaaman aineen käytökselle korkean energiatiheyden rajalla. Riittävän korkeilla lämpötilan ja hiukkastiheyden arvoilla QCD-aine nimittäin siirtyy hadronien muodostamasta kaasu- tai nestemäisestä faasista värivankeudesta vapautuneiden kvarkkien ja gluonien nestemäiseen olomuotoon. Tätä ilmiötä kutsutaan englanninkielisellä termillä deconfinement, ja korkeissa lämpötiloissa tätä kvarkkigluoniplasmaksi kutsuttua ainetta on pystytty tuottamaan hiukkaskiihdyttimissä suoritetuissa ns. raskasione-kokeissa. Korkeiden tiheyksien ja matalien lämpötilojen rajalla tätä vastaavan kvarkki-aineen tuottaminen laboratoriokokeissa ei kuitenkaan ole mahdollista. Tällaista ainetta onkin olemassa korkeintaan yhdessä paikassa koko maailmankaikkeudessa: neutronitähtien ytimissä.

QCD-aineen faasidiagramma, joka esittää sen eri olomuodot lämpötilan ja kvarkkien kemiallisen potentiaalin  $\mu$  (käytännössä kvarkkien tiheyden) funktiona, on esitetty kuvassa 1. Värivankeutta vastaava hadroninen faasi löytyy sen vasemmasta alakulmasta, ja isoon väritettyyn pisteeseen päättyvä punainen kaariviiva edustaa mahdollista ensimmäisen kertaluvun deconfinement-transitiota eli faasimuutosta hadroneja ja vapaita



Kuva 1. QCD:n faasidiagramma. Lähde: Alan Stonebraker, <https://physics.aps.org/articles/v3/44>.

kvarkkeja sisältävien olomuotojen välillä. Korkeilla lämpötiloilla ja suhteellisen pienillä tiheyksillä transiatio on jatkuva, mistä johtuu viivan katkeaminen kriittiseen pisteeseen. Tämän pisteen ja siitä lähtevän transiatioviivan olemassaolo on kuitenkin epävarmaa, eikä faasitransition täsmällistä sijaintiakaan tunneta korkeilla tiheyksillä. Tämä kuvaa QCD-tutkimuksen haastavuutta: vuorovaikutuksen voimakkuuden johdosta häirioteoreettiset työkalut eivät sovellu faasirakenteen määrittämiseen, ja kun ei-häirioteoreettiset menetelmät kuten hilasimulaatiot toimivat vain pienillä tiheyksillä, liittyy mm. ydin- ja kvarkkiaineen väliseen transiatioon paljon avoimia kysymyksiä (Brambilla et al., 2014). Niiden selvittäminen vaatii aivan uuden lähestymistavan, jossa niinkin kaukainen tieteenala kuin astrofysiikka voi osoittautua hyödylliseksi työkaluksi.

### 3. Neutronitähtien fysiikkaa

Neutronitähdet ovat kokoonluhistuneita vanhoja tähtiä, jotka ovat syntyneet, kun alkuperäisen vetyä polttavan tähden fuusioprosessiin käyttökelpoinen materiaali on huvennut eikä sen säteilypainne enää kykene vastustamaan painovoimaluhostumista (Glendenning, 1997). Riittävän massiivinen tähti käy tällöin läpi supernovaräjähdyksen, jossa sen ydin romahtaa joko mustaksi aukoksi tai neutronitähdiksi. Jälkimmäisessä tapauksessa tähden pitää kasassa yksittäisten nukleonien – etupäässä neutronien – ns. degeneraatiopaine, joka on seurausta Paulin kieltoäännöstä: kahta identtistä fermionihukkasta ei voi laittaa samaan kvanttitilaan. Neutronitähden massa on tyypillisesti yhden ja kahden

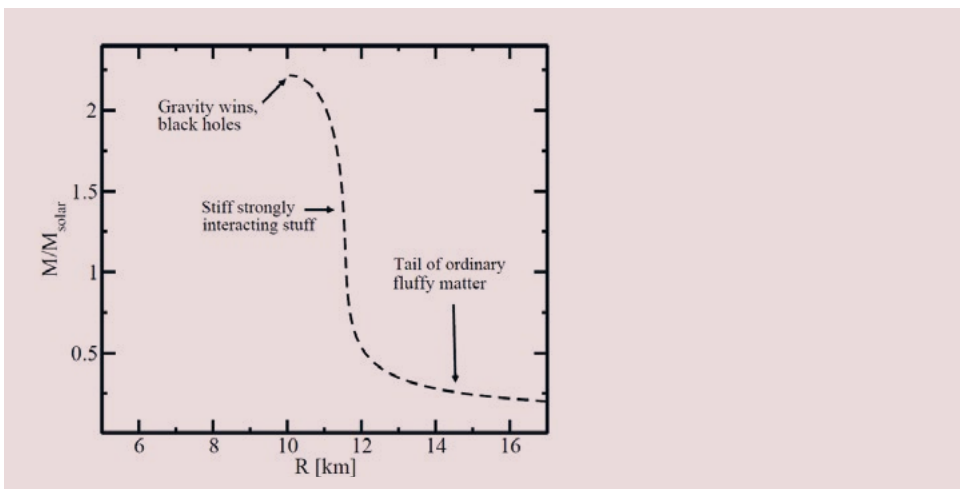
auriongon massan välissä, mutta säde vain 12-13 kilometriä; ne ovat siis äärimmäisen tiheitä ja kompakteja astrofysikaalisia kohteita, ja yksi millilitra neutronitähtiainetta painaisikin n. 200 miljardia kilogrammaa.

Neutronitähtien valtavasta tiheydestä johtuen painovoima niiden pinnalla ja sisällä on äärimmäisen vahva, ja suhteellisuusteoreettiset efektit täytyykin ottaa huomioon lähes kaikkien fysikaalisten ilmiöiden tarkastelussa. Yhtenä esimerkkinä mainittakoon valonsäteiden voimakas kaareutuminen neutronitähtien lähellä, joka johtaa siihen, että ulkopuolinen havaitsija näkee neutronitähtien pinnasta reilusti yli puolet. Neutronitähtien pinta on painovoiman vaikutuksesta lisäksi valtavan sileä, ja neutronitähtien ”vuoret” ovatkin korkeudeltaan vain millimetrien luokkaa. Tähtien sisällä aineen koostumus muuttuu puolestaan pinnan atomaarisesta kaasusta neutroneista koostuvan tiiviin ydinaineen kautta aina äärimmäisen tiheään ytimeen, jonka tarkka koostumus

on pitkälti hämärän peitossa.

Miten vähintään satojen valovuosien päässä meistä sijaitsevien ja vain parikymmentä kilometriä läpimitaltaan olevien tähtien havainnointi voi sitten kertoa jotain niiden ytimissä piilevän aineen ominaisuuksista ja QCD:n faasirakenteesta? Tämän yllättävän ja epäintuitiivisen asian taustalla lymyää Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria, jonka ns. Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) -yhtälöt (Oppenheimer ja Volkoff, 1939) kuvaavat hydrostaattista tasapainoa tähden sisällä. Pyörimättömän ja siten pallosymmetrisen tähden tapauksessa kyseessä on kaksi lineaarista ja tavallista ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöä kolmelle suurelle, jotka ovat neutronitähtiaineen paine ja energiatiheys tähden keskipisteestä lasketun säteen  $r$  funktiona sekä  $r$ -säteisen pallon sisään jäävän tähden osan massa.

Jos paineen ja energiatheyden välinen funktionaalinen relaatio  $p(\epsilon)$  eli neutronitähtiaineen tilanyhtälö tunnetaan,



Kuva 2. Neutronitähtien massa-säde-taso (MR-taso), johon on piirretty yhtä tilanyhtälöä  $p(\epsilon)$  vastaava MR-käyrä. Lähde: Alekski Kurkela.



voidaan TOV-yhtälöt ratkaista numeerisesti ratkaisun antaessa tähtien mahdollisten säteiden  $R$  arvot massan  $M$  funktiona. Tämä ns. MR-relaatio vastaa yhtä käyrää näiden kahden suureen virittämällä tasolla (ks. kuva 2), jonka päälle kaikki tarkat yksittäisten neutronitähtien massa-sädemittaukset tulevat ainakin periaatteessa putoamaan. Kukin tilanyhtälö vastaa yhtä MR-käyrää, joka päättyy maksimaalisen massan kohtaan, missä käyrä osoittaa vaakasuoraan vasemmalle: tämä piste vastaa tähden tuleamista epävakaaiksi säteen suuntaisille oskillaatioille ja sen luhistumista aina mustaksi aukoksi saakka.

Käytännössä neutronitähtiaineen tilanyhtälöä on äärimmäisen vaikea määrittää puhtaasti teoreettisen ydin- ja hiukkasfysiikan keinoin, minkä vuoksi yhteys MR-mittausten ja neutronitähtiaineen tilanyhtälön välillä onkin viime vuosina pyritty kääntämään ”ylösalaisin”. Lukuisat tarkat MR-mittaukset ja niitä täydentävät muut neutronitähtihavainnot voisivat ainakin periaatteessa kertoa TOV-yhtälöiden kautta, miten aine neutronitähtien sisällä käyttäytyy. Tällä hetkellä etenkin sädemittausten epävarmuudet ovat ikävä kyllä vielä liian suuria, jotta ne pystyisivät yksinään ratkaisemaan ongelman. Kuten seuraavassa luvussa tullaan näkemään, neutronitähtimittaukset ovat kuitenkin jo tähän mennessä johtaneet tiheän QCD-aineen termodynaamisten ominaisuuksien merkittävään tarkentumiseen, ja tulevaisuudessa niiden toivotaan ratkaisevan mm. sen, löytyykö neutronitähtien ytimistä pitkään etsittyä kvarkkiainetta.

## 4. Havaintojen ja teoreettisten tulosten yhdistämisestä

Kylmän ja tiheän QCD-aineen tilanyhtälö pystytään määrittämään teoreettisen hiukkas- ja ydinfysiikan työkaluja käyttäen kahdella eri rajalla: matalilla tiheyksillä aina ydinaineen saturaatiotiheyteen (yksittäisen neutronin tai protonin tiheys)  $n_s$  saakka sekä hyvin korkeilla tiheyksillä n.  $40n_s$ :stä alkaen. Näiden rajojen väliin jää kuitenkin laaja tiheysalue, jossa mikään nykyfysiikan metodi ei pysty ratkaisemaan kyseistä suuretta. Ikävä kyllä tämä eikenenkään-maa pitää sisällään juuri ne kaikkein mielenkiintoisimmat tiheydet  $(2-10)n_s$ , jossa raskaiden neutronitähtien ytimet sijaitsevat ja jossa ydinaineen odotetaan muuntuvan kvarkkiaineeksi. Juuri tässä alueessa myös neutronitähtihavaintojen merkitys QCD-aineen ominaisuuksien rajaamisessa tulee erityisen selkeästi näkyville.

Yllä kuvatun ongelmallisen tiheysalueen kuvailemiseksi on valittavissa ainakin kolme erilaista lähestymistapaa:

1) Ratkaistaan QCD:n sijaan jonkinlainen efektiivinen malli, jolla on samankaltaisia ominaisuuksia kuin ”emoteoriolla”, ja toivotaan, että malli todella kuvaa QCD:n termodynamiikkaa riittävällä tarkkuudella.

2) Käytetään QCD:n ratkaisemiseen kvanttikenttäteorian uusimpia työkaluja kuten ns. AdS/CFT-dualiteettia, joka mahdollistaa tiettyjen QCD:n kaltaisten teorioiden ratkaisemisen säieteoriaa ja yleistä suhteellisuusteoriaa käyttäen.

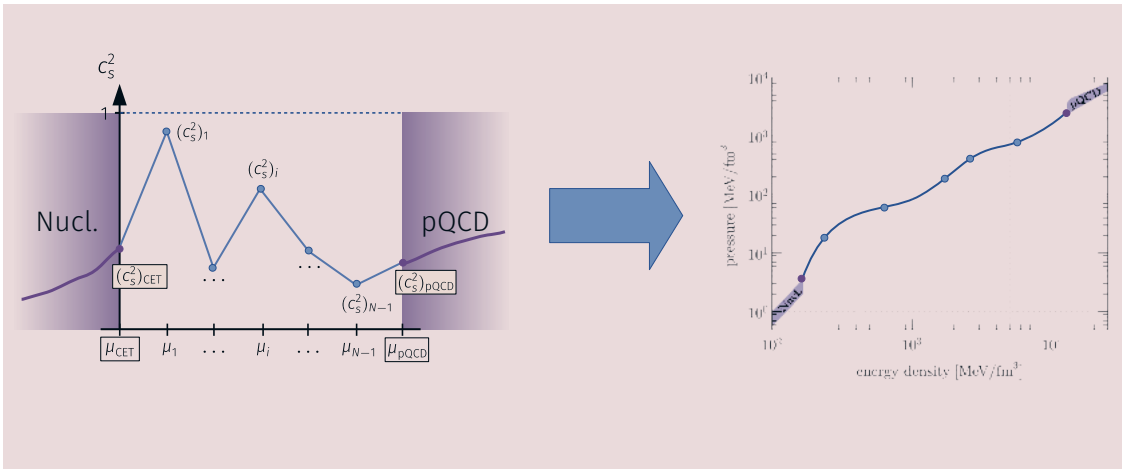
3) Sallitaan tilanyhtälölle kaikki

fysikaalisesti mahdolliset käytökset luomalla laajoja kirjastoja mahdollisista (oikeat matalan ja korkean tiheyden rajat omaavista) tilanyhtälöistä ja käytetään astrofysikaalisia havaintoja poistamaan kaikki niiden kanssa yhteensopimattomat tilanyhtälöt tästä joukosta.

Näistä vaihtoehdoista ensimmäisen huonona puolena ovat vaikeasti kontrolloitavat kvantitatiiviset epävarmuudet, kun taas toinen vaihtoehto on vielä pitkälti kehitysvaiheessa, eikä luotettavia ennusteita ole siksi välittömästi luvassa sieltäkään. Tarkastellaan siis alla sekä seuraavassa luvussa lähemmin sitä, millaisiin käytännön laskuihin ja tuloksiin kaikkein konservatiivisin vaihtoehto 3 johtaa [ks. esim. (Annala et al., 2018)].

Tuottaaksemme kaikki fysikaalisesti mahdolliset neutronitähtiaineen tilanyhtälön käytökset kannattaa aloittaa funktiosta  $p(n)$ , missä  $n$  on baryonitiheys, ja ottaa sen matalan ja korkean tiheyden rajat suoraan ydin- ja hiukkasfysiikan teoreettisista

laskuista. Näiden rajojen väliin jäävä alue jaetaan tyypillisesti useaan (käytännössä neljään tai viiteen) osaan, joissa kussakin fysikaalista painetta approksimoidaan jollain yksinkertaisella funktionaalisella muodolla. Tällaisia muotoja ovat esimerkiksi ns. polytrooppiset tilanyhtälöt  $p(n)=an^\gamma$ , joita generoidaan valitsemalla parametrit  $\gamma$  satunnaisesti (kertoimet  $a$  seuraavat paineen jatkuvuudesta), sekä funktiot, jotka muodostetaan integroimalla paloittain lineaarista äänennopeuden neliötä  $c_s^2(\mu)$  baryonisen kemiallisen potentiaalin funktiona (ks. kuva 3). Tällaisia tilanyhtälöitä generoidaan sitten valtava määrä – tyypillisesti joitakin miljoonia – ja kukin näin rakennettu tilanyhtälö sijoitetaan TOV-yhtälöihin, joista vastaavat neutronitähtien MR-relaatiot ratkaistaan. Tämä mahdollistaa erityisesti tilanyhtälöperheen välittömän vertailun astrofysikaalisiin mittauksiin, koska kaikki tilanyhtälöt, jotka ovat selkeässä ristiriidassa jonkin varman havainnon kanssa, voidaan saman tien hylätä.



Kuva 3. Tilanyhtälön luominen äänennopeuden neliöstä lähtien. Tällä metodilla luotua tilanyhtälöperhettä käytettiin esim. julkaisuissa (Annala et al., 2020) ja (Annala et al., 2021).

Mitkä sitten ovat niin varmoja havaintoja, että niitä voidaan käyttää muuten mahdollisten tilanyhtälöiden poistamiseen? Yleissääntönä on pidetty ns. 2 sigman (yli 90 %) todennäköisyyden omaavia tuloksia, joita löytyy ainakin neljää eri perustyyppiä:

1) Neutronitähtien melko tarkkoja massamittauksia on tehty jo useamman vuosikymmenen ajan. Ne ovat osoittaneet, että raskaimmat neutronitähdet ovat vähintään n. kahden auringon massan kokoisia (toisaalta paljoo tätä massiivisempia tähtiä ei ole löydetty), minkä johdosta voimme hylätä kaikki tilanyhtälöt, joita vastaavat MR-käyrät päättyvät ennen tätä raja-arvoa.

2) Neutronitähtien sädemittaukset ovat teknisesti huomattavasti haastavampia, mutta aivan viime aikoina niitäkin on onnistuttu suorittamaan parille yksittäiselle tähdelle, joiden massa on melko tarkkaan tunnettu. Kaikkein hyödyllisin näistä on NICER-kollaboraation pulsarille J0740+6620 suorittama mittausta [ks. esim. (Riley et al., 2021)], jonka mukaan tämän n. kahden auringon massaisen tähden säde on vähintään n. 11 km ja todennäköisesti jopa yli 12 km.

3) Vuonna 2017 LIGO ja VIRGO -kollaboraatiot raportoivat ensimmäistä kertaa mittauksesta, jossa havaittiin kahden neutronitähden törmäyksessä syntyneitä gravitaatioaaltoja (LIGO Scientific and Virgo, 2017). Kyseinen havainto asetti ylärajan neutronitähtien vuorovesideformabiliteetille, eli sille, kuinka paljon vuorovesivoimat muuttavat neutronitähden muotoa. Tämä suure on laskettavissa annetusta tilanyhtälöstä, joten mittausta antaa suoran tavan verrata tilanyhtälöitä.

4) Edellisessä kohdassa mainittu GW170817-neutronitähtitörmäys synnytti myös elektromagneettisena säteilynä havaitun signaalin, joka piti sisällään 1.7 sekuntia gravitaatioaalto-signaalin jälkeen saapuneen lyhyen gammasädepurkauksen (LIGO Scientific & al., 2017). Tämän purkauksen on tulkittu syntyneen törmäyksen lopputuotteen romahdettua mustaksi aukoksi, mikä antaa ylärajan maksimaalisen massiivisen stabiilin neutronitähden massalle.

Seuraavaksi käyn lyhyesti läpi tuloksia, jotka on saatu yhdistämällä ydin- ja hiukkasfysiikan teoreettisia tuloksia neutronitähtihavaintojen kanssa ylläkuvaulla tavalla.

## 5. Kvarkkiainetta näköpiirissä

Viimeisten vuosien aikana tutkimusryhmäni on yhdessä yhteistyökumppanimme kanssa julkaissut sarjan artikkeleita, joissa tavoitteena on ollut rakentaa laajoja tilanyhtälöperheitä ja rajata niitä käyttäen hyväksi kaikkia saatavilla olevia astrofysiikkalaisia havaintoja. Artikkelissa (Annala et al., 2018) johdimme ensimmäisen malliriippumattoman tilanyhtälöperheen, joka otti huomioon LIGO- ja Virgo-kollaboraatioiden GW170817-havainnon yhteydessä tekemät vuorovesideformabiliteettimitaukset, ja artikkelissa (Annala et al., 2020) esittelimme ensimmäiset todisteet kvarkkiaineytimien olemassaololle ainakin kaikkein massiivisimpien neutronitähtien sisällä. Uusimmat tuloksemme julkaistiin kuitenkin vasta aivan hiljattain artikkelissa (Annala et al., 2021), jonka tuloksia käyn

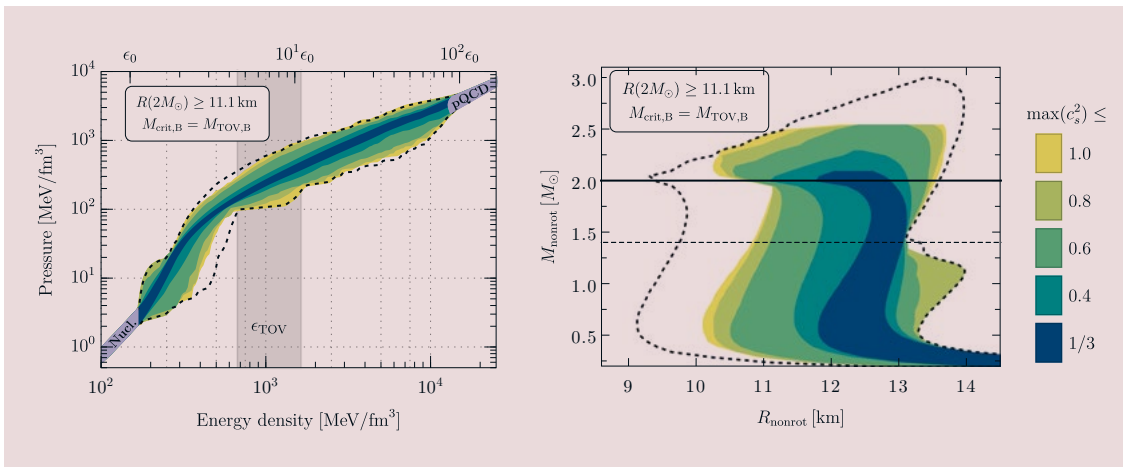
alla lyhyesti läpi. Uutta tässä työssä oli, että siinä käytettiin hyväksi kaikkia neljää edellisessä luvussa esiteltyä neutronitähtihavaintojen perustyyppiä aina sädemittauksista mustan aukon todennäköiseen muodostumiseen GW170817-törmäyksen yhteydessä. Kaikkien havaintotyyppien vaikutus tilanyhtälöperheen kokoon ja ominaisuuksiin osoittautui huomattavaksi.

Kuvassa 4 nähdään vierekkäin artikkelissa (Annala et al., 2021) johdettu neutronitähtien tilanyhtälöperhe sekä näitä tilanyhtälöitä vastaava MR-käyrien joukko. Kuvien värikoodi liittyy siihen, että tässä työssä tilanyhtälöiden interpolatio aloitettiin äänennopeudesta, mikä mahdollistaa niiden luokittelun korkeimman millään tiheydellä saavutetun äänennopeuden neliön arvon mukaan. Kuten kuvasta nähdään, tilanyhtälö olisi hyvin tarkkaan tunnettu, jos tietäisimme, ettei äänennopeuden neliö voi koskaan ylittää konformikenttäteorioista tuttua arvoa  $1/3$ , mutta jos suureen annetaan saavuttaa mikä tahansa valonnopeutta  $c \equiv 1$  pienempi arvo,

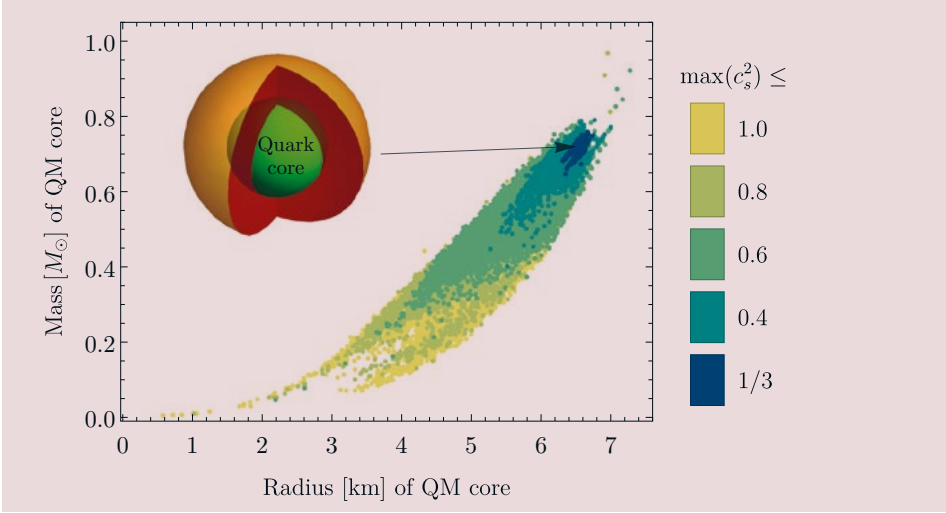
kasuvat epävarmuudet huomattavasti. Tässä työssä käytettyjen uusien rajoitteiden (sädemittaukset ja mustan aukon syntyminen GW170817-törmäyksen lopputuotteena) vaikutus nähdään puolestaan helposti vertaamalla väritettyjä alueita katkoviivalla esitettyyn aiempaan tulokseen.

Neutronitähtiaineen tilanyhtälön tarkentamisen lisäksi ehkä merkittävien artikkelien (Annala et al., 2020) ja (Annala et al., 2021) tulos liittyy rajoihin, joita niissä pystyttiin johtamaan aineen ominaisuuksille kaikkein massiivimpien neutronitähtien ytimissä. Matalan tiheyden ydinaineen ja hyvin korkean tiheyden kvarkkiaineen ominaisuudet tunnetaan varsin hyvin ja ne eroavat monessa suhteessa:

- Äänennopeuden neliö kvarkkiaineessa on ainakin korkeissa tiheyksissä alle  $1/3$  kun taas ydinaineessa se nousee nopeasti tiheyden mukana saavuttaen hyvin todennäköisesti ainakin arvon  $0.5$  ja päättyen kenties jopa lähelle valonnopeutta.



Kuva 4. Vasemmalla neutronitähtien tilanyhtälöperhe ja oikealla sitä vastaava MR-käyrien joukko. Lähde: (Annala et al., 2021).



Kuva 5. Maksimaalisen massiivisten neutronitähkien kvarkkiytimien koko äänennopeuden maksimi-arvon funktiona. Kuva on otettu artikkelista (Annala et al., 2020).

- Ns. polytrooppinen indeksi

$\gamma \equiv \frac{d \ln p}{d \ln \epsilon}$  saa ydinaineessa arvoja  $\gamma \geq 2.5$  mutta kvarkkiaineessa vain  $\gamma \approx 1$ .

• Paine jaettuna vapaan (vuorovaikuttamattoman) teorian paineella saa ydinaineessa pieniä arvoja  $\frac{p}{p_{\text{vapaa}}} \lesssim 0.1$

kun taas kvarkkiaineessa  $\frac{p}{p_{\text{vapaa}}} \gtrsim 0.4$ .

Vertaamalla aineen ominaisuuksia massiivisimpien stabiilien neutronitähkien keskellä näihin odotuksiin päädyimme artikkelissa (Annala et al., 2020) mielenkiintoiseen johtopäätökseen: tiheän QCD-aineen ominaisuudet massiivisten neutronitähkien keskellä ovat tyypillisesti paljon lähempänä kvarkki- kuin ydinainetta. Tämä havainto on ensimmäinen konkreettinen todiste sen puolesta, että kvarkkiaineesta koostuvat ytimet ovat neutronitähdissä paitsi mahdollisia myös

todennäköisiä. Kuvassa 5 kvarkkiaineitymien koko maksimaalisen massiivisissa neutronitähdissä on esitetty äänennopeuden ylärajan funktiona; kuten kuvasta nähdään, kvarkkiytimet ovat kookkaita varsinkin silloin, jos äänennopeuden neliö ei koskaan ylitä arvoa 0.6.

Aivan varmaa kvarkkiydinten olemassaolo raskaiden neutronitähkien sisällä ei kuitenkaan ole: on myös mahdollista, että neutronitähkien fysikaalinen MR-käyrä päättyy vahvaan ensimmäisen kertaluvun deconfinement-transitioon, joka tekee tähdistä epästabiileja ja johtaa vähänkin kvarkkiainetta sisältävien neutronitähkien luhistumiseen mustiksi aukoiksi. Tämän skenaarion todennäköisyyttä voidaan arvioida käyttämällä hyväksi ns. Bayesilaista päättelyä, minkä työskentelemmekin paraikaa tutkimusryhmäni ja sen kollaboraattoreiden voimin. Alustavat tulokset viittaavat siihen, että kvarkkiytimien

olemassaolo on erittäin todennäköistä, mutta löydön vahvistaminen vaatii vielä lisää työtä.

## 6. Loppusanat

Neutronitähdet sisältävät kaikkein tiheintä ainetta koko nyky maailmankaikkeudessa. Niiden ytimissä vallitsevien äärimmäisten olosuhteiden vuoksi neutronitähtien havainnoiva tutkimus paitsi valottaa näiden kohteiden astrofysiikkaa, voi myös ratkaista merkittäviä avoimia ongelmia hiukkas- ja ydinfysiikassa. Erityisen kiinnostuksen kohteena on viime vuosina ollut kysymys värivankeudesta vapautuneen kvarkkiaineen mahdollisesta olemassaolosta raskaiden neutronitähtien ytimissä. Varmistuessaan näiden kvarkkiytimien löytö edustaisi ensimmäistä havaintoa tästä aineen eksoottisesta olomuodosta luonnossa ja olisi merkittävä tulos niin astro- kuin hiukkasfysiikan sarjoilla.

Kenties merkillepantavinta neutronitähtiytimien tutkimuksessa on se tapa, jolla  $10^{15}$  metrin pituusskaalaa käsittelevää QCD-fysiikkaa pystytään tutkimaan käyttäen hyväksi havaintoja parikymmentä kilometriä läpimitaltaan olevista objekteista, jotka sijaitsevat tuhansien (esim. pulsari J0740+6620:n tapaus) tai jopa satojen miljoonien valovuosien (esim. GW170817 törmäyksen tähdet) päässä meistä. Neutronitähtien tutkimuksessa mikroskooppisen pieni ja tähtitieteellisen suuri siis kirjaimellisesti tapaavat toisensa!

Kirjoittaja

### Aleksi Vuorinen

Aleksi Vuorinen (s. 1980) on suomalainen hiukkasfyysikko, joka opiskeli teoreettista fysiikkaa Helsingin yliopistossa ja väitteli Keijo Kajantien ohjauksessa loppuvuodesta 2003. University of Washingtoniin sekä CERN:iin sijoittuneiden postdoc-kausien jälkeen hän perusti vuonna 2009 oman ryhmänsä Bielefeldin yliopistoon Saksaan, josta hän palasi 2013 Helsinkiin ensin akatemiaturkijaksi ja myöhemmin teoreettisen alkeishiukkasfysiikan apulais- ja täydeksi professoriksi.



Kuva: Veikko Kähkönen

## Lähdeluettelo

Schwartz, M. (2013).

*Quantum Field Theory and the Standard Model*. Cambridge University Press.

Brambilla, Nora & al. (2014). QCD and Strongly Coupled Gauge Theories: Challenges and Perspectives. *Eur. Phys. J. C*, 10, 2981. doi:10.1140/epjc/s10052-014-2981-5.

Glendenning, N. (1997). *Compact stars: Nuclear physics, particle physics, and general relativity*. Springer Publishing.

Oppenheimer, R. & Volkoff, G. (1939). On massive neutron cores. *Physical Review*, 55.

Annala, E. & al. (2018). Gravitational-wave constraints on the neutron-star-matter Equation of State. *Physical Review Letters*, 120, 17. doi:10.1103/PhysRevLett.120.172703.

Annala, E. & al. (2020). Evidence for quark-matter cores in massive neutron stars. *Nature Physics*, 16. doi:10.1038/s41567-020-0914-9.

Annala, E. & al. (2021). Multi-messenger constraints for ultra-dense matter. arXiv:2105.05132 [astro-ph.HE]. Hyväksytty julkaisuun *Physical Review X*.

Riley, T. & al. (2021). A NICER View of the Massive Pulsar PSR J0740+6620. *Astrophys. J. Lett.*, 918, 2, L27. doi:10.3847/2041-8213/ac0a81.

LIGO Scientific and Virgo Collaborations (2017). GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Physical Review Letters*, 119, 16. doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101.

LIGO Scientific & al. (2017). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *Astrophys. J. Lett.*, 848, 2, L12. doi:10.3847/2041-8213/aa91c9.

