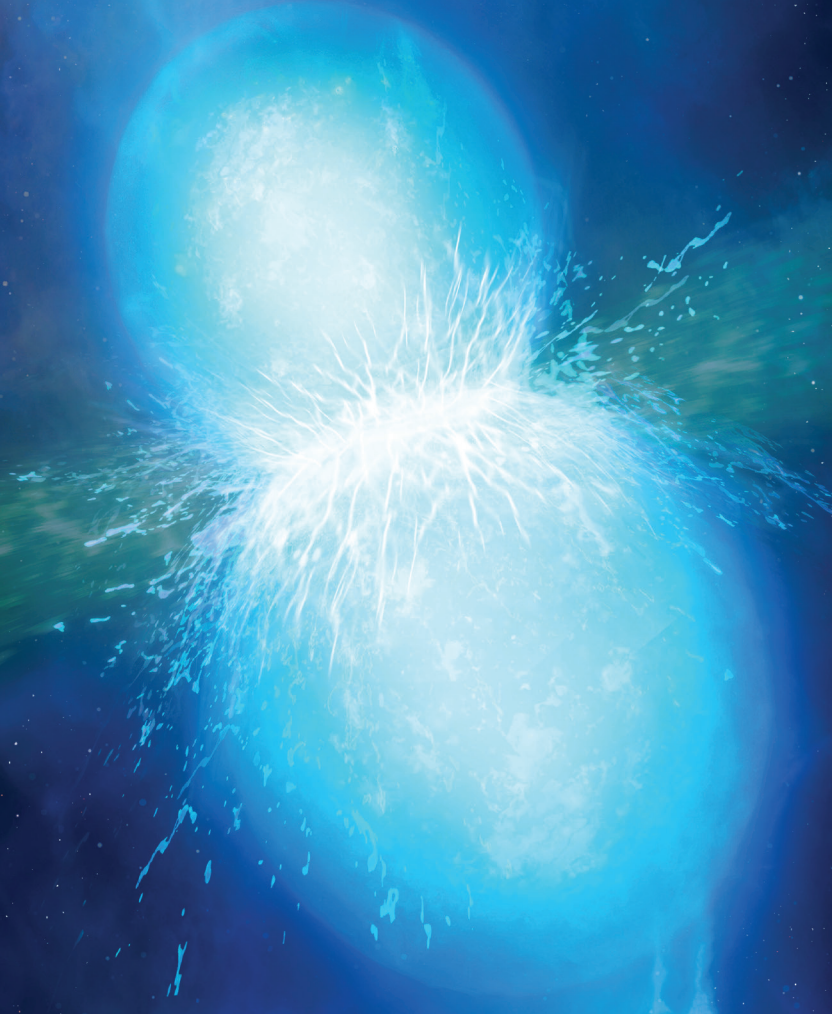


EEN NIEUWE BLIK OP NEUTRONEN- STERREN VIA MACROSCOPISCHE EN MICROSCOPISCHE BOTSINGEN



Meer dan een halve eeuw na hun ontdekking stellen neutronensterren ons nog steeds voor raadsels. Alle vier de bekende natuurkrachten spelen een rol in hun interne structuur, waardoor ze tot de fascinerendste objecten in het heelal behoren. Tegelijk maakt die rijkdom aan krachten het moeilijk om betrouwbare theoretische modellen op te stellen. In de laatste vijf jaar is er echter een waaier aan astrofysische observaties beschikbaar gekomen die empirische input kunnen geven. Sinds kort is er ook hulp uit onverwachte hoek: botsingen van zware ionen in deeltjesversnellers op Aarde.

Materie bij de grootste dichtheden

Neutronensterren zijn de compactste sterren die er bestaan; als je ze verder in elkaar zou persen, dan storten ze in en vormen ze een zwart gat. De enorme druk in hun binnenste – meer dan 10^{34} Pa – dwingt protonen en elektronen om zich te verenigen tot neutronen. De neutronen vormen een supervloeistof met een dichtheid die oploopt tot 10^{18} kg/m³, terwijl een deel van de protonen in een supergeleidende toestand terechtkomt. Enorme magnetische velden treden op, tot wel 10^{15} keer sterker dan het magneetveld van de Aarde. Neutronensterren behoren tot de fascinerendste fysische systemen, omdat alle bekende fundamentele wisselwerkingen meespelen: de sterke kernkracht die beschrijft hoe quarks en gluonen zich verenigen tot baryonen, de zwakke kernkracht die onder meer toelaat dat een proton en een elektron worden omgezet in een neutron en een neutrino, de elektromagnetische kracht, en de zwaartekracht, die in de buurt van een neutronenster zo sterk is dat Einsteins algemene relativiteitstheorie met zijn gekromde ruimtetijd een onmisbaar ingrediënt wordt in de beschrijving.

Omgekeerd kan zo veel fysische rijkdom ook een vloek zijn. In de voorbije decennia zijn er allerlei modellen opgesteld om de macroscopische eigenschappen van neutronensterren te beschrijven vanuit de microscopische fysica die daaraan ten grondslag ligt, maar dat leidde tot wel heel uiteenlopende voorspellingen. Een schijnbaar eenvoudige vraag als ‘wat is de diameter van een neutronenster met gegeven massa?’ leidde tot een veelvoud aan antwoorden, die soms met een factor twee verschilden. Empirische input was dus hard nodig in het bepalen van de toestandsvergelijking van neutronensterren: druk als functie van dichtheid (en temperatuur: daar komen we op terug) of diameter als functie van massa – wat voor deze objecten bijna equivalent is.

Astrofysische observaties

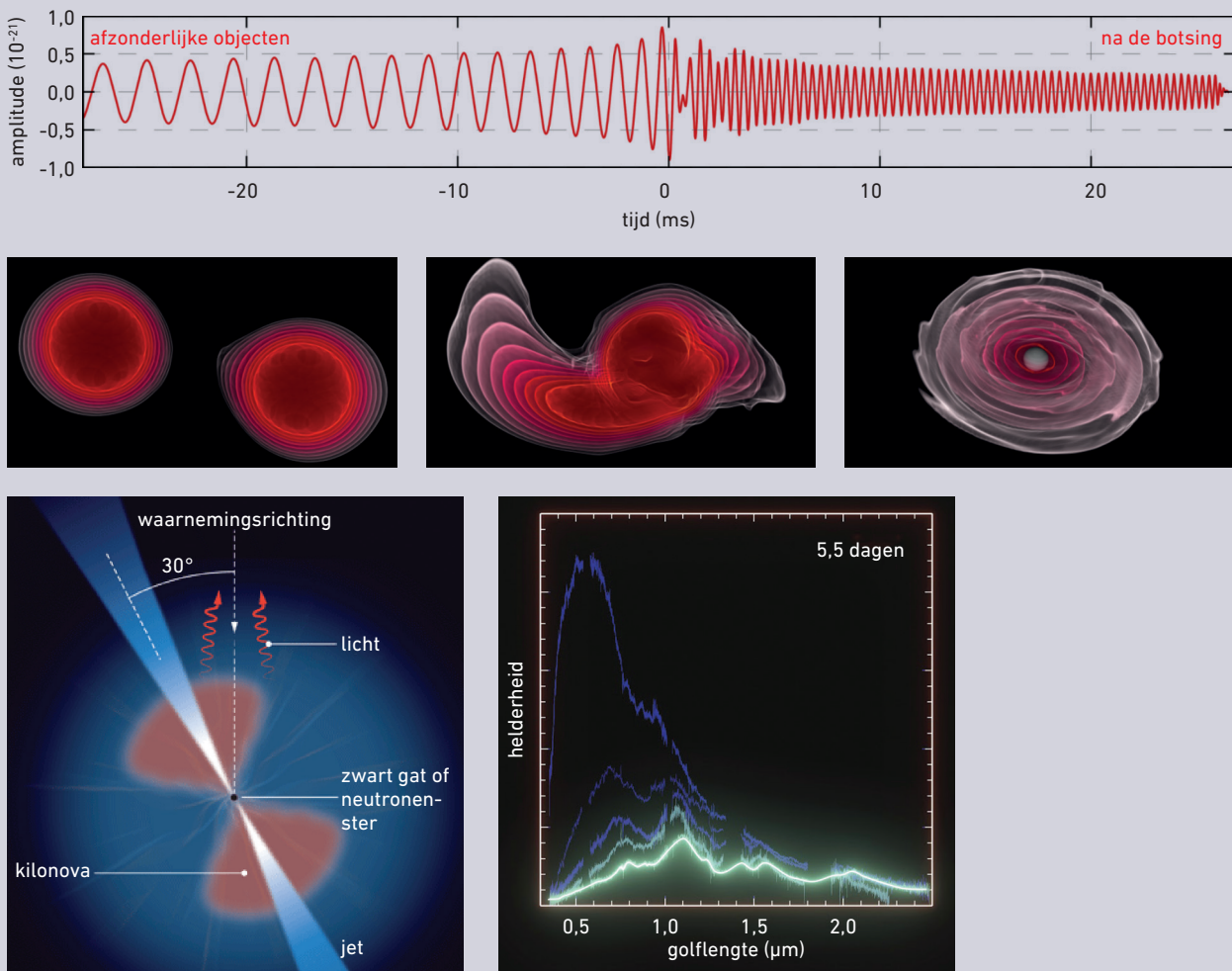
In de laatste vijf jaar is de studie van neutronensterren in een stroomversnelling geraakt als gevolg van het beschikbaar komen van nieuwe waarneming-

stechnieken (naast radio-observaties). Een daarvan is de detectie van zwaartekrachtgolven, trillingen in de kromming van de ruimtetijd die werden voorspeld door Einsteins algemene relativiteitstheorie, en die in 2015 voor het eerst rechtstreeks zijn waargenomen. De eerste zwaartekrachtgolven die werden waargenomen, waren afkomstig van botsende zwarte gaten, maar in 2017 ontdekten de twee LIGO-detectors in de Verenigde Staten en de Virgo-detector in Italië een bijzonder krachtig signaal, GW170817 genaamd, van twee neutronensterren die in een spiraalbeweging naar elkaar toe bewogen, alvorens te botsen. Wanneer twee neutronensterren dicht in elkaars buurt komen, gaan ze elkaar vervormen als gevolg van getijdenkrachten. Die vervormingen beïnvloeden de baanbeweging en de baanbeweging staat op haar beurt ‘gecodeerd’ in de precieze vorm van de zwaartekrachtgolven die worden uitgezonden, zie figuur 1. De vervormbaarheid van een neutronenster is een functie van de massa, en ook dit functionele verband is equivalent aan druk als functie van dichtheid. Aan de hand van het zwaartekrachtgolf signaal konden zowel de vervormingen als de massa's van de twee neutronensterren worden geschat, wat rechtstreeks toegang gaf tot de toestandsvergelijking. Het zwaartekrachtgolf signaal GW170817 liet meteen zien dat de natuur de voorkeur geeft aan veel compactere neutronensterren dan werd voorspeld door sommige modellen. Maar er was meer. Nagenoeg tegelijk met de zwaartekrachtgolf werd er door telescopen in de Fermi- en INTEGRAL-satellieten een flits van gammastraling waargenomen, die bijna zeker geassocieerd was met een krachtige jet die in twee richtingen wordt uitgezonden wanneer twee neutronensterren botsen, zie figuur 1. Alsof dat niet voldoende was, kon uit de verschillende aankomsttijden van de zwaartekrachtgolf bij de drie detectors in het LIGO-Virgo-netwerk worden afgeleid waar ongeveer aan de hemel het signaal vandaan was gekomen. Aan de hand daarvan ontdekten astronomen de nagloed van de botsing: de zogenoemde kilonova, een relativistisch uitzettende wolk van materie

Op de linkerpagina een artistieke impressie van twee botsende neutronensterren, waarbij een kilonova en gravitatiegolven ontstaan. Figuur: University of Warwick - Mark Garlick.



Chris Van Den Broeck (Leuven, 1974) is hoogle-raar zwaartekrachtgolven bij de UU en hij gebruikt deze golven om neutronensterren en zwarte gaten te bestuderen. Als lid van het team dat de eerste zwaartekrachtgolven ontdekte, ontving hij in 2016 de Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics en de Gruber Cosmology Prize. In Utrecht is hij medeoprichter van het interdisciplinaire Institute for Gravitational and Subatomic Physics (GRASP).
vdbroeck@nikhef.nl

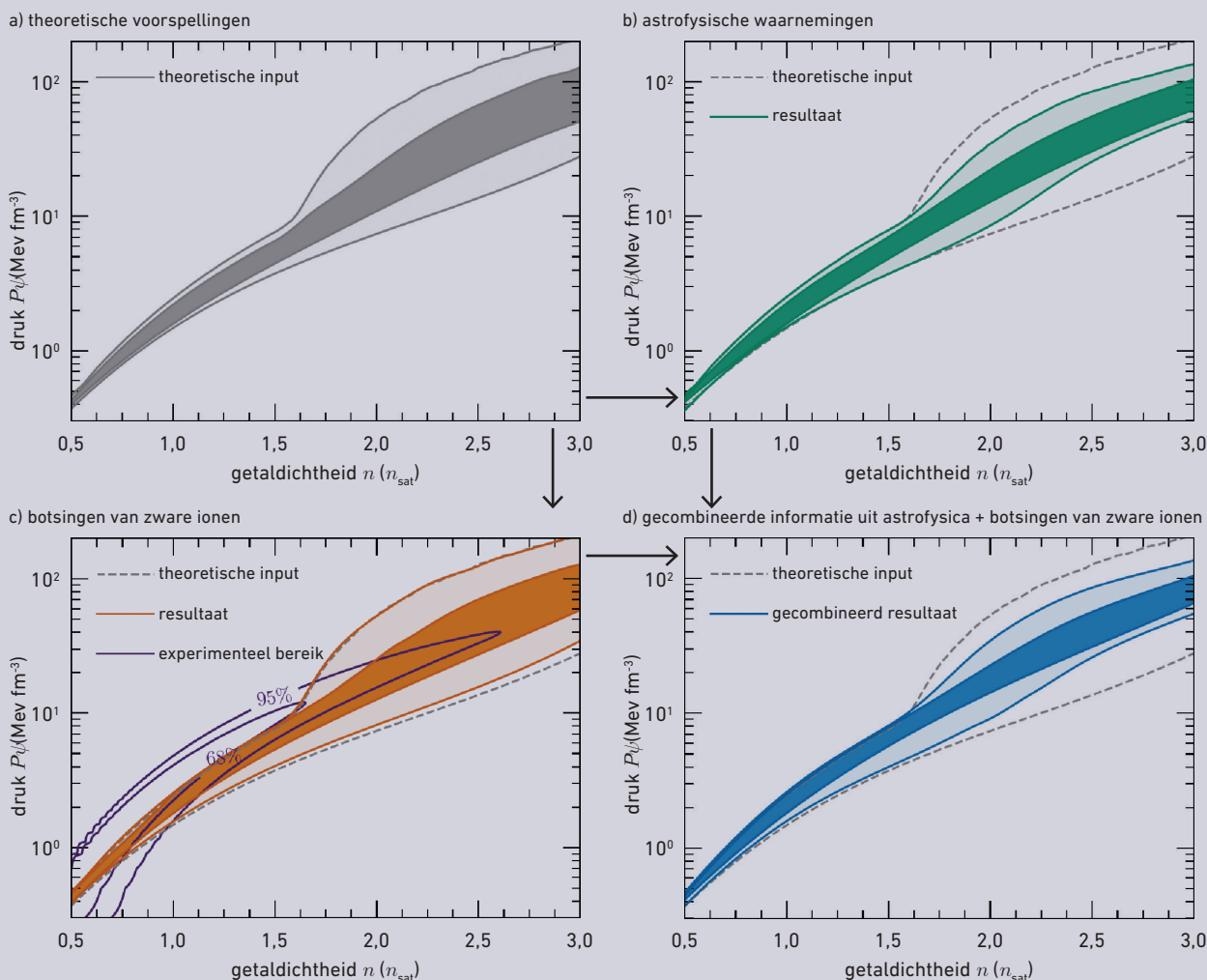


Figuur 1. Bovenaan: het zwaartekrachtgolfsignaal dat wordt uitgezonden door twee neutronensterren die naar elkaar toe bewegen en samensmelten [1]. Linksonder: na de botsing ontstaan er twee jets die gammastraling uitzenden, en een uitzettende wolk van materie – de kilonova die met optische telescopen kan worden gezien (C. Bickel/Science). Rechtsonder: het spectrum van de kilonova (ESO/E. Pian et al./S. Smartt & ePESSTO/L. Calçada).

waarvan het spectrum wees op een overvloed aan zware metalen, zoals goud, platina en uranium, gevormd in de neutronenrijke omgeving die wordt gecreëerd door de botsing van twee neutronensterren. Dat er überhaupt een kilonova te zien was, betekende dat neutronensterren niet ál te compact konden zijn, want dan zou de botsing te snel hebben geleid tot een zwart gat dat veel van de omringende materie bijna meteen zou hebben opgeslokt. Samen met de metingen van de zwaartekrachtgolven werd de verzameling van mogelijke toestandsvergelijkingen meteen van twee kanten begrensd.

Er is nog een andere manier om kennis op te doen over hoe neutronensterren in elkaar zitten. De Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER), gelanceerd in 2017, is een röntgentelescoop die gemonteerd is op het Internationale Ruimtestation. Deze kan reconstructies maken van wat er zoal gebeurt aan het oppervlak van een neutronenster en ook de diameter ervan bepalen met een onzekerheid van minder dan 10%. Als het een neutronenster betreft die een dubbelsysteem vormt met een ander object, kan ook de massa worden gemeten. En zoals gezegd is diameter als functie van massa equivalent aan

druk als functie van dichtheid – ook op deze manier krijgen we toegang tot de toestandsvergelijking. Verschillende astrofysische observaties meten verschillende grootheden: NICER de diameter en massa, LIGO en Virgo de vervormbaarheid en de massa, optische waarnemingen waaronder het spectrum van de kilonova en zijn evolutie in de tijd, en waarneming van de gammaflits en de eigenschappen van de jet. Het interessante is dat deze observabelen allemaal nauw met elkaar samenhangen, via zogenoemde quasi-universele relaties. Dit zijn soms verrassende verbanden tussen de verschillende

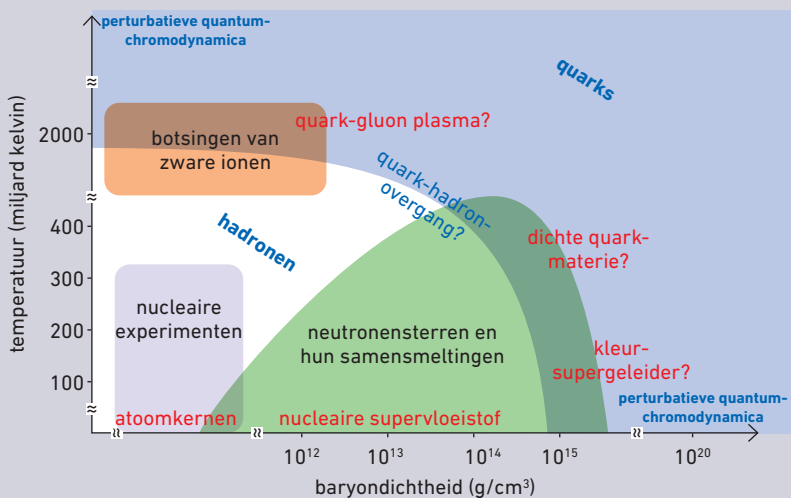


Figuur 2. Linksboven: theoretische voorspellingen voor druk als functie van de dichtheid van nucleaire materie lopen wijd uit elkaar; de 1 σ - en 2 σ -onzekerheden worden aangeduid door respectievelijk de donker- en lichtgekleurde gebieden. Informatie vanuit astrofysische waarnemingen begint hierin verbetering te brengen (rechtsboven). Onlangs konden ook data van botsende zware ionen in deeltjesversnellers worden toegevoegd (linksonder). Het voorlopige totaalplaatje staat rechtsonder. Figuur uit [2].

grootheden die geschat kunnen worden aan de hand van computersimulaties en die geldig blijken te zijn voor een zeer groot aantal mogelijke toestandsvergelijkingen. Hoe het kilonovaspectrum evolueert hangt af van de massa van het materiaal dat wordt uitgeworpen door de botsing van neutronensterren, en met welke snelheid dit gebeurt. Die massa en snelheid blijken op een eenvoudige manier te zijn gerelateerd aan de massa's van de twee neutronensterren die er waren vóór de botsing en hoe sterk ze waren vervormd. Deze zijn op hun beurt gerelateerd aan de breedte van de jet die de gammaflits veroor-

zaakt. Het bestaan van deze verbanden heeft het mogelijk gemaakt om een data-analyseformalisme te construeren dat alle waarnemingen, samen met hun meetonzekerheden, in één keer met elkaar combineert, met als output een schatting van de toestandsvergelijking van neutronensterren. Voorlopig is het resultaat nog niet heel nauwkeurig. Sinds GW170817 is er weliswaar opnieuw een botsing van neutronensterren waargenomen met LIGO en Virgo, maar in dit geval was er geen gammaflits te zien. Omdat er op dat moment slechts twee van de drie zwaartekrachtgolfdetectoren

operationeel waren, was de botsing bovendien nauwelijks te lokaliseren aan de hemel, wat wellicht verklaart waarom optische telescopen ook geen kilonovanagloed hebben gevonden. Om vooruitgang te maken, hebben we naast verdere waarnemingen met NICER ook een groter aantal gebeurtenissen zoals GW170817 nodig, waarbij er zowel zwaartekrachtgolven als elektromagnetische signalen worden gedetecteerd. Voor de komende paar jaar zijn er aanzienlijke verbeteringen gepland van de LIGO- en Virgo-detectors, waardoor ze uiteindelijk tientallen signalen van dubbele neutronensterren per jaar zullen zien. Daarnaast



Figuur 3. Het fasesdiagram van nucleaire materie. Verschillende fenomenen doen zich voor bij verschillende dichtheden (horizontale as) en temperaturen (verticale as). Neutronensterren geven toegang tot relatief lage temperaturen maar hoge dichtheden. Botsingen van zware ionen zoals bij het ALICE-experiment (linksboven) zitten in een complementair regime van lage dichtheid maar hoge temperatuur. Andere kernfysische experimenten overbruggen de verschillende regimes [3].

zullen er twee nieuwe zwaartekracht-detectors worden toegevoegd aan het wereldwijde netwerk – KAGRA in Japan en LIGO-India – wat het veel makkelijker zal maken om de bron van een signaal te lokaliseren, en dus de bijbehorende kilonova te vinden.

Botsende neutronensterren en botsende ionen

Tot dusver hebben we het gehad over astrofysische waarnemingen om neutronensterren te bestuderen. Heel recent is er echter ook een verband gelegd met een andere manier om de eigenschappen van nucleaire materie na te gaan, namelijk botsingen van zware ionen (zoals goud). Hierbij wordt nauwkeurig gemeten hoe de energie per nucleon afhangt van het aantal nucleonen en van het verschil tussen het aantal neutronen en protonen in botsende ionen. Dat vertaalt zich naar een druk, en hoe druk afhangt van dichtheid leidt weer naar de toestandsvergelijking. De versnellers waar het om gaat – die van GSI in Darmstadt (Duitsland), Brookhaven National Laboratory en Lawrence Berkeley National Laboratory (Verenigde Staten) hebben voorlopig toegang tot processen die gepaard

gaan met een lagere dichtheid dan in neutronensterren, maar dat maakt de metingen complementair aan de astrofysische waarnemingen. De combinatie van metingen wordt geïllustreerd in figuur 2. Ook hier is de gecombineerde meetnauwkeurigheid nog niet heel groot. Het echte belang van dit werk is dat het de grondslagen legt om de meest diverse manieren van meten – astrofysica en deeltjesversnellers – samen te brengen in een enkel formalisme. En daar zullen we in de nabije toekomst ons voordeel mee doen, wanneer er van beide kanten een overvloed aan metingen komt.

Het begin van een nucleaire ontdekkingsreis

Het verband tussen druk en dichtheid in neutronensterren is een belangrijk aspect van het gedrag van nucleaire materie, maar het vertelt niet het hele verhaal. Individuele neutronensterren hebben een hoge dichtheid, maar een (naar de normen van de sterke kernkracht) verwaarloosbare temperatuur van 'slechts' een paar miljoen kelvin. In botsende neutronensterren loopt de temperatuur op tot honderden miljarden kelvin.

Echter, bij het ALICE-experiment van de Large Hadron Collider (LHC) in de buurt van Genève worden goud- en loodionen tot botsing gebracht met zo'n hoge energie dat een toestand van de materie wordt gecreëerd die heeft bestaan toen het heelal minder dan een miljoenste seconde oud was: een quark-gluonplasma. Hierin worden temperaturen bereikt van meer dan 10^{12} kelvin, en magnetische velden van 10^{14} tesla; daarnaast roteert het plasma tot 10^{22} keer per seconde. De volgende grote uitdaging wordt het begrijpen van het verband tussen botsende neutronensterren, de fysica van quark-gluonplasma's, en alles wat er tussen zit: het fasesdiagram van nucleaire materie, zie figuur 3. Tot voor kort werden de verschillende gebieden van het fasesdiagram onderzocht door wetenschappelijke gemeenschappen die elk hun eigen focus en niet veel interactie hadden, maar daar komt verandering in. Een consortium van theoretisch fysici, experimentele deeltjesfysici, kernfysici en astrofysici geleid vanuit Nederland heeft onlangs de handen ineen geslagen om te proberen het hele fasesdiagram op een systematische manier in kaart te brengen en een robuuste theoretische beschrijving te vinden die de verschillende gebieden van het diagram met elkaar verbindt. In de toekomst zullen we hierbij worden geholpen door verbeteringen van de deeltjesversnellers, en in het geval van zwaartekrachtgolven ook de Einstein Telescoop, een krachtig observatorium dat mogelijk gedeeltelijk in Nederland zal worden gebouwd. In de komende decennia hopen we zo helderheid te geven over de manier waarop het gedrag van nucleaire materie varieert over vele ordes van grootte in druk, temperatuur en dichtheid.

REFERENTIES

- 1 T. Dietrich et al., Interpreting binary neutron star mergers: Describing the binary neutron star dynamics, modelling gravitational waveforms, and analyzing detections, *Gen. Rel. Grav.* **53**, 27 (2021).
- 2 S. Huth et al., Constraining neutron-star matter with microscopic and macroscopic collisions, *Nature* **606**, 276 (2022).
- 3 M. Maggiore et al., Science case for the Einstein Telescope, *JCAP* **03**, 050 (2020).