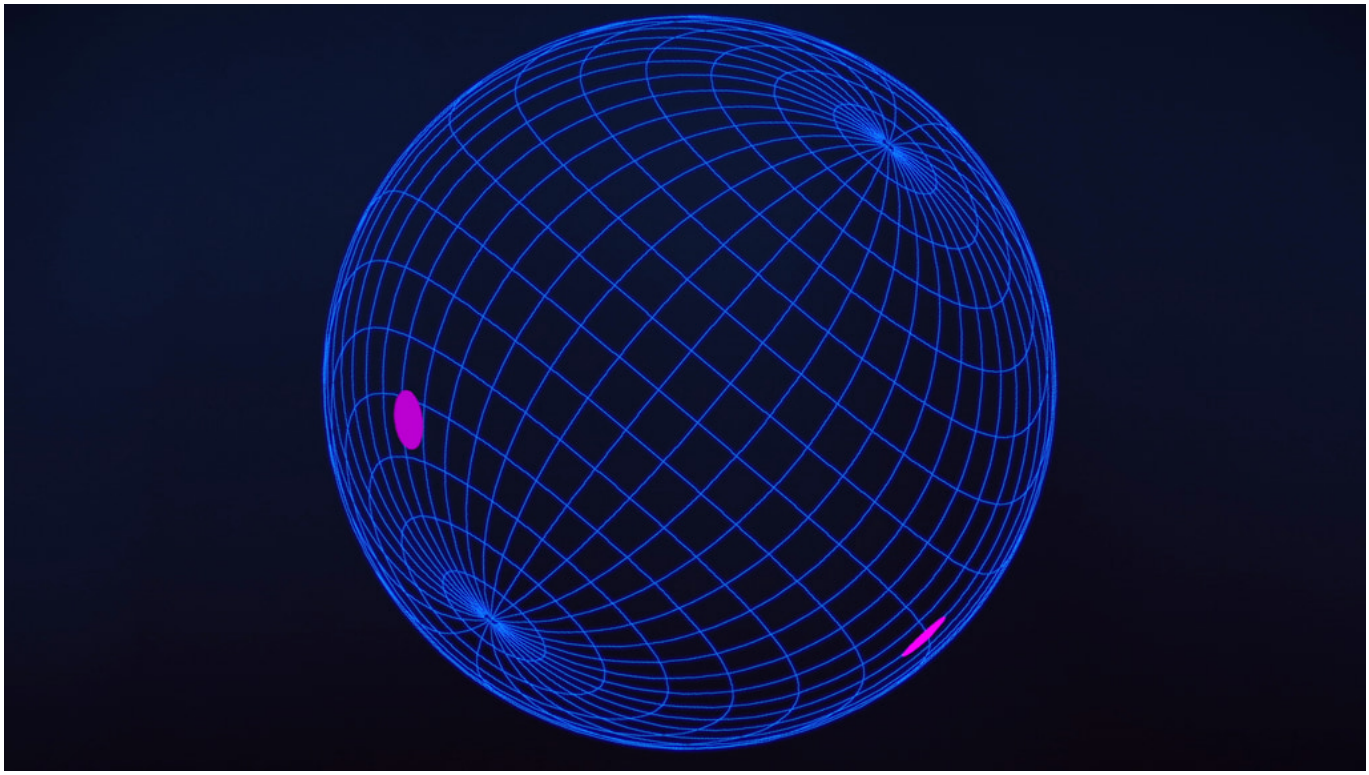
Wat zit er binnen in een neutronenster?

De materie in het binnenste van neutronensterren is minder goed samen te drukken dan eerder werd gedacht. Een mondiaal samenwerkingsverband komt tot die conclusie nadat ze met NASA's Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) de grootte en massa hebben bepaald van de zwaarste neutronenster die bekend is: PSR J0740+6620. Wat veroorzaakt die onverwachte stijfheid?

Bron: persbericht NOVA



Afbeelding 1. Weergave van de oppervlaktepatronen van PSR J0740+6620. Aan de hand van metingen aan deze patronen kan de massa en grootte van de ster nauwkeurig bepaald worden. Een geanimeerde versie van de afbeelding is hier te bekijken. Afbeelding: NASA's Goddard Space Flight Center.

Aan het eind van het leven van zware sterren raakt de brandstof in hun kern op. De sterren klappen onder hun eigen gewicht in elkaar, waarna ze ontploffen als supernova. Bij de allerzwaarste sterren blijft zo een zwart gat over; de andere sterren worden neutronensterren. Ook zulke neutronensterren zijn extreme objecten: ze hebben meer massa dan de zon, maar een doorsnede van slechts enkele tientallen kilometers. Als de dichtheid zo extreem hoog is, welke vorm neemt de materie in de binnenkern dan aan?

Zwaar en extra zwaar

De onderzochte pulsar PSR J0740+6620 (J0740 in het kort) bevindt zich op een afstand van ruim 3000 lichtjaar in de richting van het sterrenbeeld Giraffe. De pulsar is een dubbelstersysteem bestaande uit een neutronenster en een witte dwerg, het afkoelende restant van een zonachtige ster. De neutronenster roteert 346 keer per seconde om zijn eigen as. De massa wordt geschat op 2,1 keer de massa van de zon

In traditionele modellen van een typische neutronenster, een ster met ongeveer 1,4 maal de massa van de zon, nemen natuurkundigen aan dat de binnenkern grotendeels gevuld is met neutronen – vandaar ook de naam. De relatief lagere dichtheid in deze ‘gewone’ neutronensterren zorgt ervoor dat de neutronen ver genoeg uit elkaar blijven om intact te blijven. De innerlijke stijfheid van de neutronen-materie resulteert in een nog betrekkelijk grote ster.

In zwaardere neutronensterren zoals J0740 is de dichtheid van de binnenkern echter veel hoger, waardoor de neutronen dichter op elkaar worden gedrukt. Het is onduidelijk of neutronen onder deze omstandigheden intact kunnen blijven of dat ze in plaats daarvan in quarks uiteenvallen. Theoretici vermoeden dat de neutronen door de druk versplinteren, maar er zijn nog veel vragen over de details. Om antwoorden te krijgen hebben wetenschappers een nauwkeurige meting nodig van de grootte van een zware neutronenster.

Pulsars bieden uitkomst

Om zulke precieze afmetingen van neutronensterren te meten neemt NICER, een röntgentelescoop aan boord van het Internationale Ruimtestation ISS, snel roterende exemplaren waar: pulsars, een type ster dat in1967 werd ontdekt door Jocelyn Bell Burnell. Pulsars hebben hete plekken op hun oppervlak die heldere röntgenstraling uitzenden. Als de

pulsar roteert, draaien de vlekken in en uit het zicht, als de lichtbundels van een vuurtoren. Dat resulteert in regelmatige variaties in de röntgenhelderheid.

Maar pulsars zijn ook zo dicht dat hun zwaartekracht de nabije ruimtetijd kromt. Dezelfde massa in een kleinere verpakking veroorzaakt een grotere vervorming. Die vervorming is zo sterk dat licht van de verre kant van de ster kan worden omgeleid, waardoor de pulsar groter lijkt dan hij in werkelijkheid is. Dit effect kan zo intens zijn dat het zelfs voorkomt dat de hot spots volledig verdwijnen terwijl ze rond de pulsar draaien. NICER gebruikt deze effecten om de massa en de doorsnee van de ster nauwkeurig te meten.

Twee teams hebben verschillende benaderingen gebruikt om de grootte van J0740 te bepalen: een groep onder leiding van Thomas Riley en Anna Watts (respectievelijk postdoc en professor in de astrofysica aan de Universiteit van Amsterdam) en een team onder leiding van Cole Miller, hoogleraar astronomie aan de Universiteit van Maryland, College Park (VS). Naast de NICER-gegevens voor J0740 hebben beide groepen ook röntgenwaarnemingen met ESA's XMM Newton-satelliet gedaan, die nuttig waren bij het corrigeren voor achtergrondruis. Het eindresultaat van al deze metingen en berekeningen: de twee teams schatten dat de pulsar ongeveer 25-27 km in doorsnede is.

Zwaarder, maar niet groter

Eerder, in 2019, gebruikten de twee teams NICER-gegevens om zowel de grootte als de massa te schatten voor een ander object: PSR J0030+0451 (of J0030), een geïsoleerde pulsar op ongeveer 1100 lichtjaar afstand. Ze ontdekten dat die pulsar ongeveer 1,4 keer zo zwaar is als de zon en eveneens een doorsnede heeft van 25-27 kilometer.

"Onze nieuwe metingen van J0740 laten zien dat die pulsar, hoewel hij bijna 50% zwaarder is dan J0030, in wezen even groot is," zegt Watts. "Dat sluit enkele modellen voor neutronensterkernen uit, waaronder die waarin het inwendige slechts een zee van quarks is. J0740's grootte en massa vormen ook een probleem voor sommige modellen waarin de kern alleen neutronen en protonen bevat."

Wat er dan wél precies gebeurt binnenin de zware pulsar is nog niet duidelijk. De Amsterdamse promovendus Geert Raaijmakers onderzoekt nu de consequenties voor de theorie van dichte materie, waarbij hij de nieuwe NICER-resultaten combineert met data van

zwaartekrachtgolfdetectoren en laboratoriumdata. Recente theoretische modellen stellen enkele alternatieven voor, zoals binnenkernen die een mix van neutronen, protonen en exotische materie van quarks of nieuwe combinaties van quarks bevatten. “Maar alle mogelijkheden zullen opnieuw moeten worden geëvalueerd in de context van deze nieuwe informatie van NICER,” aldus Watts.