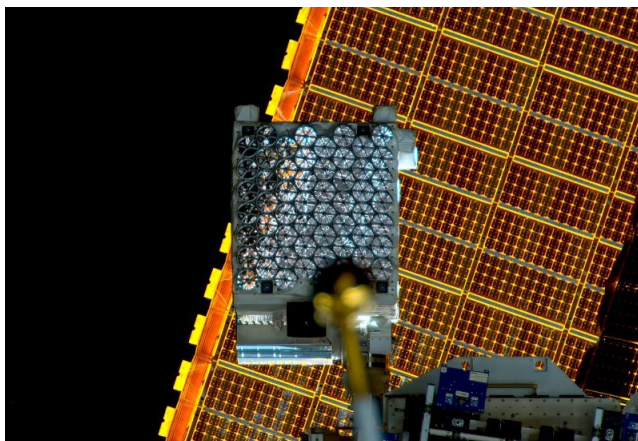


NICER har målt en neutronstjernes diameter

Henning Heiselberg, DTU Space og Security DTU

NASA's satellit NICER har netop målt en neutronstjernes diameter til 25 km. Efter 100 års spekulationer og modelberegninger har vi nu et mål for størrelsen og dermed tilstandsligningen for det tætte kernestof i neutronstjerner. Vi kan også bedre forstå supernovaers kollaps, kollisioner mellem binære neutronstjerner målt af LIGO, og dannelsen af tunge grundstoffer i universet – stjernestøvet som vi er lavet af.

NASA's NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) har netop målt diameteren for en neutronstjerne 1.100 lysår væk i stjernebilledet Fiskene [1]. To forskellige analyser af røntgenprofiler fra pulsaren PSR J0030+0451 giver en diameter på 25–26 km for en masse på ca. 1,4 solmasser [2,3]. Dette er en milepæl efter 100 års spekulation over neutronstjernes størrelse, hvor meget den presses sammen, og dermed tilstandsligningen for kernestof og de stærke kræfter mellem neutroner og protoner (nukleoner)¹.



Figur 1. NICER-røntgenteleskopet foran et af solpanelerne på rumstationen ISS.

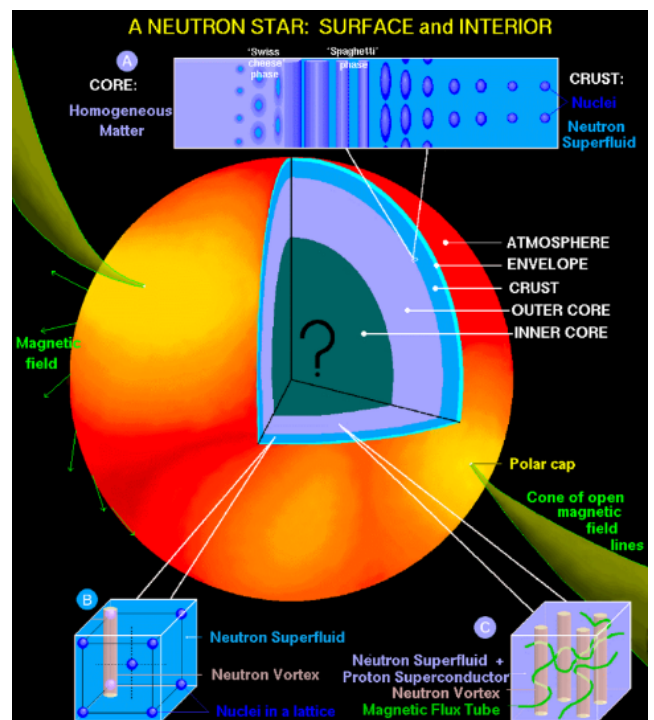
Jérôme Chenevez fra DTU Space deltager i NICER-eksperimentet. Detektoren sidder på Den Internationale Rumstation. Jérôme lokker mig hvert år til at gæsteforelæse om neutronstjerner på hans kursus. Da Nordita (Nordic Institute for Theoretical Physics) lå i København for mange år siden, var vi nemlig en gruppe teoretikere, der forskede i neutronstjerner og bl.a. beregnede diameteren til omkring 25 km [4].

Måden, hvorpå NICER måler diameteren, er spektakulær: Stof falder ned på neutronstjernen, ved at gasser spiralerer ned langs magnetfeltlinier nær dens magnetiske poler (ligesom nordlys på Jorden). Her dannes hotspots, der fusionerer i gigantiske udbrud af røntgenstråler. Disse udbrud detekteres af NICER, som også kan se dem oscillere med neutronstjernes rotation på 205 Hz, deraf navnet millisekundpulsar. Imidlertid afbøjer neutronstjernes stærke tyngdefelt strålingen, så vi faktisk ser noget af dens bagside. En mindre diameter eller tungere masse giver mere afbøjning, som udjævner

oscillationsspektret. De to uafhængige analyser [2,3] er godt nok ikke enige om antal og form af disse hotspots, men begge finder en diameter mellem 25 og 26 km.

Millisekundpulsarer er hurtigt roterende neutronstjerner, som ville slynge masse ud i rummet, hvis ikke de var så små og kompakte. De roterer så hurtigt (op til ca. 500 gange i sekundet), fordi de har ædt af en nabostjerne og derved fået tilført impulsmoment. Pulsarerne er kraftigt magnetiserede og udsender radiobølger som en roterende antenne eller "fyrtårn", og disse radiopulser kan vi måle tværs over galaksen med høj præcision. Binære pulsarer er to sådanne neutronstjerner i rotation om hinanden. De spiralerer langsomt mod hinanden, præcist som forudsagt af Einsteins generelle relativitetsteori, og man kan måle masserne præcist.

Enkelte pulsarer får stjerneskælv eller "hiccups". Disse skyldes, at neutronstjernen langsomt taber sin rotation og gerne vil være mindre fladtrykt, ligesom Jorden. Dette kan kun ske, hvis skorpen krakelerer i et stjerneskælv, hvorved inertimoment og rotationsfrekvens ændres i et spring.



Figur 2. Skitse af en neutronstjernes struktur og faser.

¹De fleste neutronstjerner har en masse omkring 1,4 solmasser og alle målte mellem 1,2–2,2 solmasser. For disse masser giver beregninger for de fleste tilstandsligninger en næsten konstant radius for neutronstjerneerne.

Disse præcise målinger fortæller dog ikke noget om neutronstjernens radius eller indre tilstand. Der har været mange beregninger af neutronstjernens struktur og forudsigelser af diametre på alt mellem 15 og 30 km. NICER-målingen udelukker de fleste. Vijay Pandharipande og hans gruppe fra University of Illinois stod for de mest omfattende beregninger baseret på al viden om kræfterne mellem nukleoner og data fra kernerens energitilstande og nukleonspredningseksperimenter [4]. Samtidigt skal kræfterne opfylde bestemte symmetriegenskaber og relativistisk invarians.



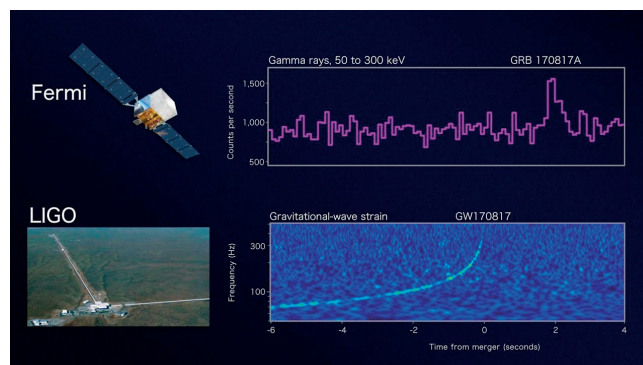
Figur 3. Skitse af to neutronstjerner, der spiralerer mod hinanden.

Illinois-gruppen lavede også beregninger af hele neutronstjernens struktur [4,5]. Yderst ligger et gitter af neutronrige kerner, som en halv kilometer nede drypper neutroner ud i en blandingsfase. Lidt længere inde i skorpen dannes boble-, rør- og pladelignende strukturer, som vi i et sultent øjeblik døbte “the pasta in pulsars”. Dybere inde presses kernestoffet sammen til en neutronrig væske, og i centrum bliver trykket måske så højt, at kvarkerne frigøres [5]. Her bliver forudsigelserne dog usikre, fordi “kvarkindespærring” (engelsk quark-confinement) i nukleoner ikke kan beregnes (kvantekromodynamikken er ikke-lineær og non-perturbativ). Derfor er vores viden om nukleoners vekselvirkning baseret på empirisk viden fra spredning og kernefysik. Disse måler dog kun på næsten-frie nukleoner, så det vides ikke, hvordan de opfører sig ved højt tryk, hvor deres indre kvarkstruktur ændres. Dette influerer igen på vekselvirkningen med andre nukleoner. Disse trelegeme-vekselvirkninger var netop, hvad Vijay forudsagde ud fra symmetri, isospin og relativitet. Neutronstjernens diameter gør os dermed klogere på kernefysik, nukleoner, kvarker og de grundlæggende stærke kræfter.

Det er bemærkelsesværdigt, at stjerner, hvide dværge, neutronstjerner, quarkstjerner og sorte huller alle kan have masser på ca. en solmasse. De består alle af nukleoner (quarks) og elektroner, men i vidt forskellige faser og tilstandsligninger. Så selvom massen er ens, er tæthed og radius og dermed tyngdefeltet meget forskellige.

Diameteren er også relevant for de gigantiske eksplosioner, der følger kollisioner mellem to neutronstjerner. I 2017 målte LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) gravitationelle bølger

fra en sådan kollision. To neutronstjerner spiralerer mod hinanden med en frekvens, der vokser kraftigt, indtil de rører hinanden, kolliderer og smelter sammen. En gigantisk eksplosion udløses, der får rummet til at skælve med tyngdebølger, der kan måles mange galakser væk af LIGO. Efterfølgende kunne man i teleskoper også se eftergløden.



Figur 4. LIGO-chirp-frekvensen målt sekunder før kollision.

Man mener nu, at de tungeste grundstoffer i universet dannes efter sådanne neutronstjernerne sammensmeltninger og eksplosioner. De mellemtunge grundstoffer dannes derimod i supernovaeksplosioner, mens de lette grundstoffer helium og lithium blev dannet i Big Bang. Planeter – og dermed vi mennesker – er altså delvist lavet af stjernestøv fra neutronstjernerne eksplosioner, der starter i en afstand på 25 km mellem to neutronstjerner – deres diameter!

Litteratur

- [1] www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-s-nicer-delivers-best-ever-pulsar-measurements-1st-surface-map
- [2] T.E. Riley m.fl. (2019) *Astrophys. J. Letts.*, bind **887**, side L21.
- [3] M.C. Miller og N. Yunes (2019) *Nature*, bind **568**, side 469–476.
- [4] A. Akhmal, V.R. Pandharipande og D.G. Ravenhall (1998) *Phys. Rev. C*, bind **58**, side 58; H. Heiselberg og V.R. Pandharipande (2000) *Ann. Rev. Nucl. Part. Phys. Sci.*, bind **50**, side 481.
- [5] G.A. Baym og C.J. Pethick (1979) *Ann. Rev. Astron. Astrophysics*, bind **17**, side 415; H. Heiselberg, C.J. Pethick og E.F. Staubo (1993) *Phys. Rev. Lett.*, bind **70**, side 1355.
- [6] LIGO (2017) *Phys. Rev. Lett.*, bind **119**, side 161101.



Henning Heiselberg er ph.d. i fysik og B.Sc. i matematik fra Aarhus Universitet. Tidligere lektor på Nordita, Staff Scientist på Lawrence Berkeley Laboratory, seniorforsker ved Forsvarets Forskningstjeneste og nu centerleder på Security DTU.