

# Asymmetrien i supernovaeksplosioner

Af Allan Hornstrup, Niels J. Westergaard og Finn E. Christensen, DTU Space

NuSTAR – en NASA satellit med et afgørende dansk bidrag – har observeret en supernovarest og fundet radioaktivt materiale, der er asymmetrisk fordelt. Det bekræfter for første gang detaljer i teorierne om supernovaers eksplosion.

## Indledning

Cassiopeia A (Cas A) er en supernovarest fra en supernova, der eksploderede omkring 1670. Den amerikanske satellit NuSTAR har observeret denne supernovarest og har fundet ud af, at det radioaktive  $^{44}\text{Ti}$  er ujævnt fordelt. Det er vigtigt, fordi det kan bekræfte modellerne for hvordan supernovaer eksploderer.

Det har betydning for os, for i grove træk er alle grundstoffer tungere end brint og helium dannet i supernovaer, og en detaljeret forståelse af supernovaer og hvordan de eksploderer og dermed frigiver grundstofferne til det omgivende univers, er af stor betydning for forståelsen af sammensætningen af vores univers, for dannelsen af planeter og stjerner osv.

Supernovaer har længe været kendt som himmelobjekter. Det var fx en supernova, der i 1572 fik Tycho Brahe til for alvor at interessere sig for astronomi. Trods deres navn har de dog intet med nye stjerner at gøre; tværtimod er det slutstadiet for en stjerne. En stjerne som Solen kommer ikke til at blive en supernova, dertil er den for let, men større stjerner, hvis masse er over ca. 8 gange Solens, vil ende deres liv med en eksplosion, som frigør helt enorme mængder energi.

Supernovaer deles i typer. En kendt og meget diskuteret type er SN Ia, som opstår i et dobbeltstjernesystem, hvor den ene stjerne er en hvid dværg (på størrelse med Jorden, men med en masse som Solen) og den anden en stjerne, der mister materiale til overfladen af den hvide dværg. Den type bliver brugt som standardlyskilde og dermed til afstandsbestemmelse i Universet.

### Cas A

Cas A (Cassiopeia A) er en supernovarest i stjernebilledet Cassiopeia, og blev første gang observeret i 1949. Det er en meget klar radiokilde på himlen, faktisk den klareste udenfor Solsystemet. Den eksploderede omkring 1670, men da man ikke har samtidige optegnelser af, at det skulle være bemærket på Jorden, er denne tidsangivelse omtrentlig. Den er beregnet ud fra, hvor hurtigt supernovaresten bevæger sig væk fra centret (over 5000 km/s). Supernovaresten befinder sig i vores egen galakse og er omkring 11.000 lysår fra Jorden. Astronomer har fundet ud af, at Cas A er en supernova af typen IIb. Det er gjort ved at se på stråling fra selve eksplosionen, som er reflekteret på skyer langt fra supernovaen.

Cas A er imidlertid af den såkaldte kernekollaps type (helt præcist type IIb), hvor en stor stjerne selv falder sammen i en kæmpe eksplosion. Figur 1 viser den nuværende Cas A-supernovarest, der er blevet ret udstrakt på himlen, nemlig 4 bueminutter, svarende til ca. 1/7 af Månens diameter.



Figur 1. Cas A observeret i synligt lys med Hubble Space Telescope (NASA/ESA).

Modeller af den slags eksplosioner har været udført både analytisk og med computersimuleringer, men et af de store problemer har været, at man ikke har kunnet få modellerne til at give den korrekte eksplosion, hvis udgangspunktet var en symmetrisk eksplosion, altså hvor alle dele falder samtidig mod centret og eksploderer i kuglesymmetri. I de tilfælde viste modellerne, at eksplosionen så at sige endte som en roligt sivende forøgelse af det efterladte sorte hul. Så der skulle andre fysiske forhold til for at forklare de kraftige energiudladninger, som ses ved supernovaeksplosioner.

Observationer af supernovaer har da også vist, at deres efterladenskaber faktisk ikke er jævnt fordelt på himlen; der er forskelle i de tætheder af materiale, som man observerer efter supernovaeksplosionen. Det er derfor oplagt at antage, at eksplosionen ikke er pænt symmetrisk. Et stort arbejde er i gang for at få observationer og modeller til at passe sammen.

### Modellerne bekræftes – delvist

Observationer med bl.a. Hubble Space Telescope viser, at supernovaresten ikke er jævn. Årsagen hertil

behøver imidlertid ikke kun stamme fra asymmetri i eksplosionen, for det man ser fra supernovaresten i det synlige område er udsendt af det opvarmede materiale, der dannes ved sammenstødet mellem eksplosionsmateriale og det omgivende stof. Det kan jo godt være dette omgivende stof, der er ujævnt fordelt, og dermed giver de asymmetriske antydninger i billederne.

Så modellerne med asymmetriske eksplosioner var tilsyneladende at foretrække frem for de symmetriske, men den endelige observation, der kunne bekræfte asymmetrien, manglede.

### Supernovaer og kernesyntese

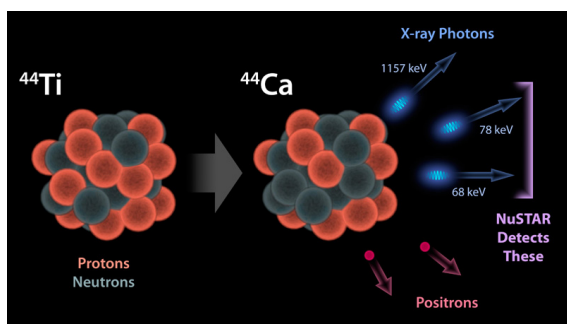
For at forstå hvor det observerede titanium og metaller som jern kommer fra, må vi lige minde om supernovaers udvikling. Her i en meget simplificeret version.

Som ung, frisk og tung stjerne – fx 10-20 gange så tung som Solen – opretholdes ligevægten i stjernen ved dannelse af helium (He) fra brint (H) i de centrale dele. Dette H brænder ud, og stjernens centrale dele trækker sig sammen; He begynder at brænde til kulstof (C) mens en skal af H udenom stadig brænder til He. Denne proces gentages med stadig stigende grundstofnumre, hvor der optræder forbrænding i kernen og i brændende skaller (udefra) af C, neon (Ne), oxygen (O), silicium (Si), indtil jern (Fe) er dannet. Efter Fe kan man ikke hente mere energi ved fusion, og processen hører op.

Når kernen efter dannelse af Fe ikke længere kan modstå trykket af materiale ovenfra falder den sammen og bliver ligeså kompakt som en atomkerne. Denne kerne kaster derfor det yderligere indfaldende materiale tilbage med stor kraft, så det forsvinder fra supernovae. Det sker på brøkdele af et sekund, og der udsendes energi svarende til alle stjerner i en galakse. Kraften forstærkes af, at dannelsen af den kompakte kerne har medført dannelse af et ufatteligt stort antal neutrinoer, der forsøger at slippe væk. Deres energi bidrager til eksplosionen, selvom neutrinoer kun vekselvirker ekstremt svagt med stof.

Op til og i dette afgørende sekund frigives også mange neutroner, som støder ind i kerner, som derved vokser i masse og bliver til de tungere grundstoffer.

Lige inden eksplosionen har vi altså en kerne bestående af Fe inderst, herefter skaller af forskellige lettere grundstoffer, som ringe i et løg. Disse stoffer er alle repræsenteret i det materiale, der stødes væk fra kernen.

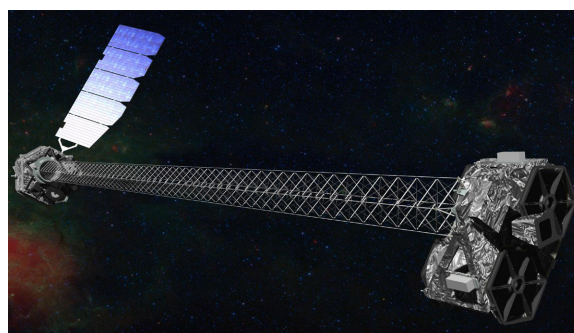


**Figur 2.** Hvordan Ti henfalder til Ca. NuSTAR kan detektere de to linier ved 68 og 78 keV. (NASA)

### NuSTAR

NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) er en NASA-satellit af "small explorer"-typen. NuSTAR-satellitten er resultatet af et årelangt samarbejde mellem DTU Space og CalTech, og leder af missionen er professor Fiona Harrison fra CalTech. NuSTAR blev opsendt den 13. juni 2012. Satellitten har to røntgenteleskoper, hvor den særlige belægning udviklet på DTU Space gør det muligt at fokusere røntgenstråling med energier helt op til 80 keV; det har ingen tidligere mission kunnet præstere. Detektorerne af CdZnTe er udviklet på CalTech.

Som et led i udviklingen af røntgeninstrumenterne til NuSTAR-satellitten har DTU Space og CalTech også haft en tilsvarende instrumentpakke på et balloneksperiment i 2005 (High Energy Focusing Telescope (HEFT)).



Billedet viser NuSTAR-satellitten med de to røntgenteleskoper til højre, der fokuserer strålingen på detektorerne i satellitmodulet til venstre (NASA)

### <sup>44</sup>Ti – hvorfor er det interessant?

<sup>44</sup>Ti dannes ligesom de andre grundstoffer i de inderste dele af det materiale, der udskydes ved selve eksplosionen. <sup>44</sup>Ti dannes ved Si-forbrændingen; man kan sige, at det består af 11 heliumkerner.

Det er en interessant isotop i denne sammenhæng, fordi den har en relativt kort levetid (mængden halveres på ca. 60 år), idet det henfalder via  $^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$  (se figur 2), som resulterer i udsendelse af gammakvanter med energier omkring 67,86; 78,36 og 1157 keV. Den korte halveringstid gør, at det titanium, man ser, må komme fra områder ret tæt på dannelsesstedet, og derfor er det et godt sporstof, hvis man vil se detaljerne om eksplosionen. De første to energier falder lige akkurat inden for NuSTARs observationsområde.

### Tidligere observationer af <sup>44</sup>Ti

Naturligvis har man tidligere forsøgt at finde ud af, om supernovaresten indeholdt spor af <sup>44</sup>Ti. Og det er bekræftet af flere tidligere satellitobservationer, men de har alle den ulempe, at de ikke kan fokusere strålingen, så det eneste man kunne bekræfte med disse målinger er tilstedeværelsen af grundstoffet og den omtrentlige mængde, men ikke hvorfra i supernovaresten, den stammede.



## Andre røntgenobservationer

I den bløde ende af røntgenspektret, nemlig for energier under 10 keV, er det muligt med en lidt anden teknologi at lave fokuserende teleskoper. Flere af den type teleskoper har været opsendt siden 1980'erne, og især to observatorier er førende i dette bølglængdeområde, nemlig Chandra (NASA) og XMM-Newton (ESA) begge opsendt i 1999.

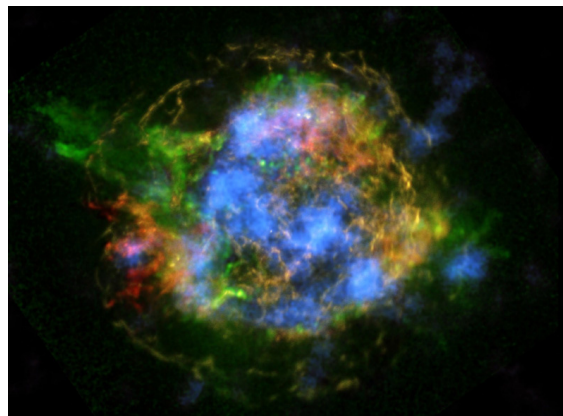
Disse observatorier har observeret supernovaresten Cas A, og det har været muligt at se røntgenemission fra supernovaresten. Fra de målinger har man især set en klar jern-emissionslinie ved 6,7 keV; den kommer fra stærkt ioniseret jern (Fe). Det ventes, at disse emissioner opstår, når Fe fra kernen af stjernen efter eksplosionen rammer det omgivende stof. Dette stof stammer i stor udstrækning fra stjernens sidste leveår, hvor den udsender noget af sin atmosfære som stjernevinde.

Da disse observatorier har fokuserende røntgeninstrumenter har det været muligt at kortlægge, hvorfra den varme jern udsender strålingen, og man har her set en asymmetri, som også var forventet fra modellerne.

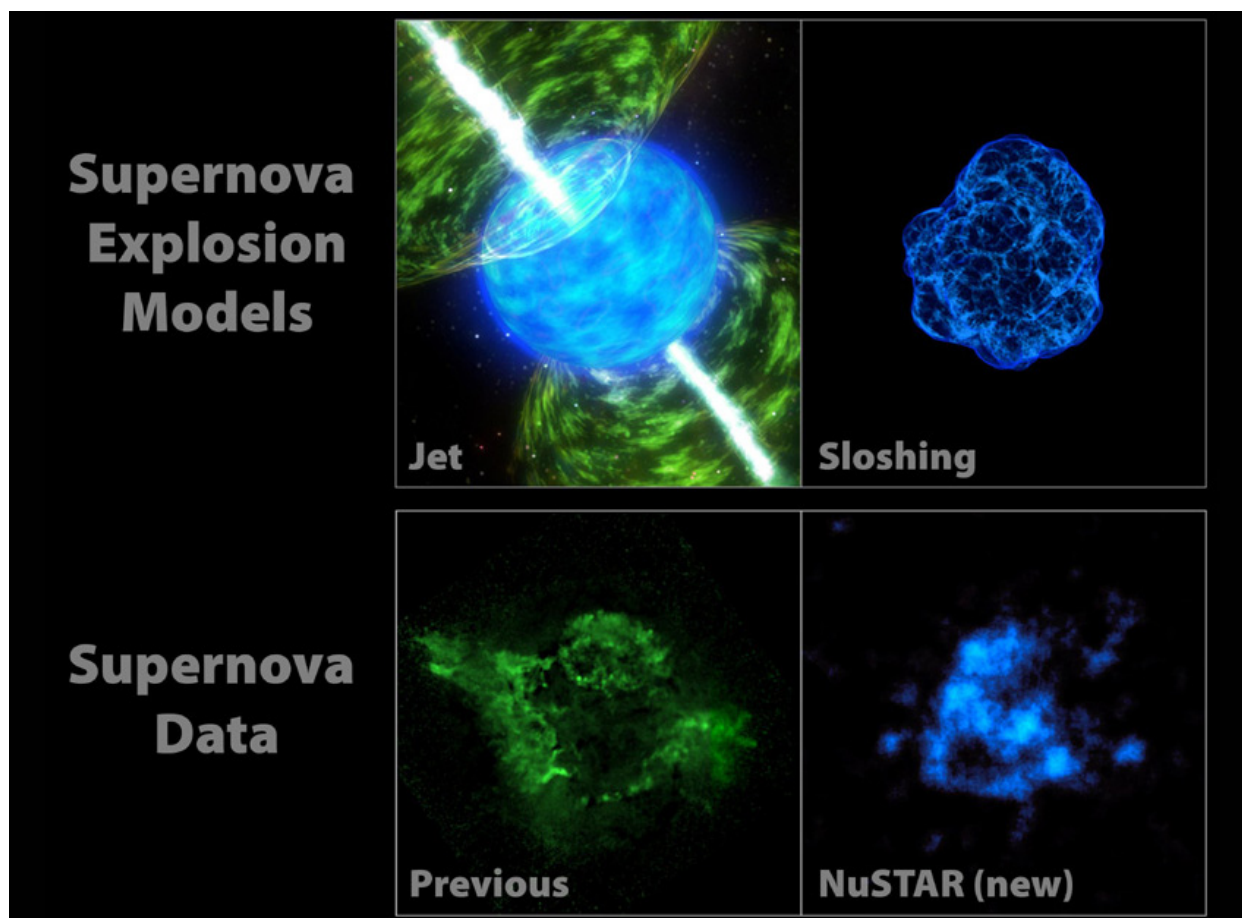
## NuSTARs observationer

NuSTAR stirrede på supernovaresten over flere omgange fra august 2012 til juni 2013 til en samlet observation på ca. 14 dage. Det er ret svage signaler, vi har at gøre

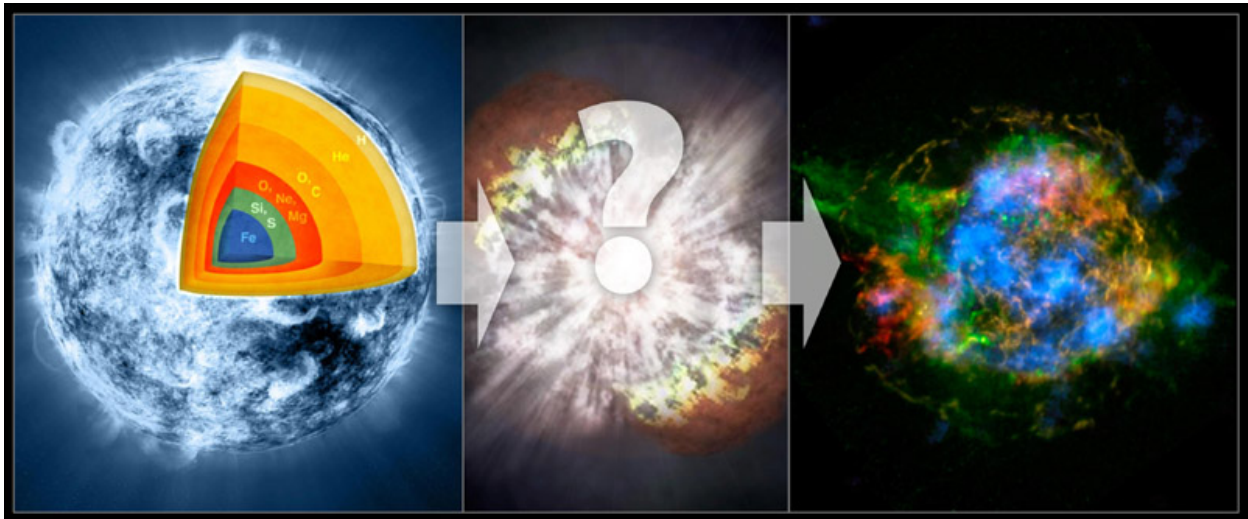
med. De mange dages resultater blev lagt sammen, og man kunne herfra bestemme hvor meget stråling, der kom i de relevante energiområder, som udgør  $^{44}\text{Ti}$ 's spektrallinier. Da teleskoperne fokuserer, kunne det samtidig afgøres, hvorfra på himlen strålingen kom, og dermed var det muligt i detaljer at kortlægge hvor  $^{44}\text{Ti}$  befinder sig. Resultatet af arbejdet ses i figur 3.



**Figur 3.** Billedet viser, hvor  $^{44}\text{Ti}$  befinder sig i Cas A.  $^{44}\text{Ti}$  er gengivet med blå farve, mens observationer fra Chandra i blød røntgen er i grønne, gule og røde farver. Svagt synligt er også optiske observationer [1].



**Figur 4.** To modeller af en supernovaeksplosion, samt to typer observationer. De to modeller er ekstremer – én hvor man har to jets under selve eksplosionen, og én, hvor man har konvektion, der her kaldes "sloshing". Data nederst til venstre fra Chandra (Fe-emission) antyder mulige jets, mens NuSTAR data nederst til højre, som antages at stamme mere direkte fra eksplosionen, går mere i retning af konvektionsmodellen.



**Figur 5.** Udviklingen af en supernovaeksplosion fra den udbændte og ustabile stjerne (til venstre), over selve eksplosionen (i midten) til supernovaresten (til højre).

Det interessante ved billedet er, at titanium ikke følger de andre røntgenemitterende elementer. Det var oprindeligt ventet, at Ti ville dukke op på de samme steder, hvor man ser Fe, men det er slet ikke tilfældet. Jern-emissionen kommer dér, hvor materialet fra supernovaen støder ind i det omgivende materiale, og hvor der opstår chokfronter med kraftig opvarmning til følge. Derimod er Ti-fordelingen en direkte afspejling af eksplosionen i den oprindelige kerne, fordi det radioaktive materiale blev dannet i selve kernen og altså ikke først senere ved sammenstød og opvarmning. Ti-observationerne kan derfor mere direkte fortælle om asymmetrier i den oprindelige eksplosion og dermed give værdifuldt input til dem, der forsøger at beregne og simulere eksplosionerne.

Observationerne tyder på, at de modeller, hvor materialet lige omkring eksplosionstidspunktet var i gang med en opblanding (i stil med det man ser, når vand koger) er bedst til at forklare den observerede fordeling af titanium. To meget forskellige og simplificerede modeller af eksplosioner er sammenlignet med Ti-observationerne (og med Fe-observationerne fra Chandra). De er vist i figur 4.

Figuren viser de to modeller: Én, hvor man antager at eksplosionen sker i forbindelse med hurtig rotation af kernen, og dermed dannelse af en kraftig bipolar jet. Og en anden, hvor der ved eksplosionen sker konvektion i lagene. Konvektion er det, der svarer til vand, der koger. Konvektion i stjerner er helt almindeligt; Solen har fx også konvektion, men mest omkring overfladen og i de yderste lag.

Som figuren viser, så havde man fra optagelserne af røntgenstråling fra Fe haft den opfattelse, at der nok var tale om jets, mens Ti-optagelserne, der som nævnt mere direkte kan henføres til selve kernen i eksplosionen, peger i retning af konvektion. Det er en stor hjælp til de forskere, der skal simulere de fysiske forhold lige under eksplosionen, på den måde at få direkte billeder af det væsentlige område.

### Videre arbejde

NuSTAR fortsætter denne type observationer. Der er også observeret Ti-emission i andre supernovaresten, og NuSTAR er i gang med at observere nogle af dem for også her at kortlægge, hvordan Ti fordeles sig i supernovaresten.

Vi regner med, at der om få år er meget mere nøjagtige modeller og dermed en større forståelse af supernovaeksplosioner, baseret på de nøjagtige observationer fra NuSTAR og andre røntgenteleskoper. Dette er antydnet med spørgsmålstegnet midt i figur 5.

### Litteratur

- [1] B. Grefenstette et al. (2014), Asymmetries in core collapse supernovae revealed by maps of radioactive titanium in Cas A, *Nature*, bind 506, nr. 7488, pp. 339-342.



Allan Hornstrup (t.v.) er leder af afdelingen for astrofysik på DTU Space. Niels J. Westergaard (midten) og Finn E. Christensen (t.h.) er seniorforskere ved DTU Space.