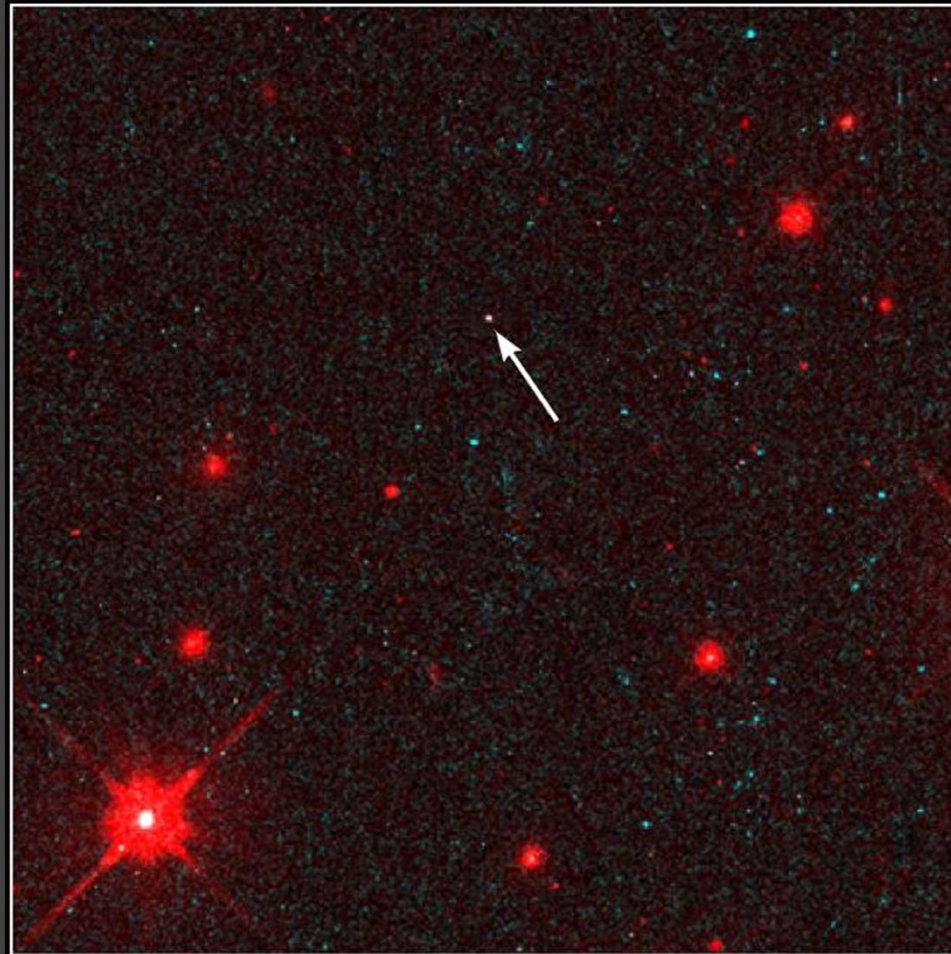


X-ray bursts –
kernexplosies op neutronensterren

Jean in 't Zand

Neutronensterren: zeer zwak in visueel licht...

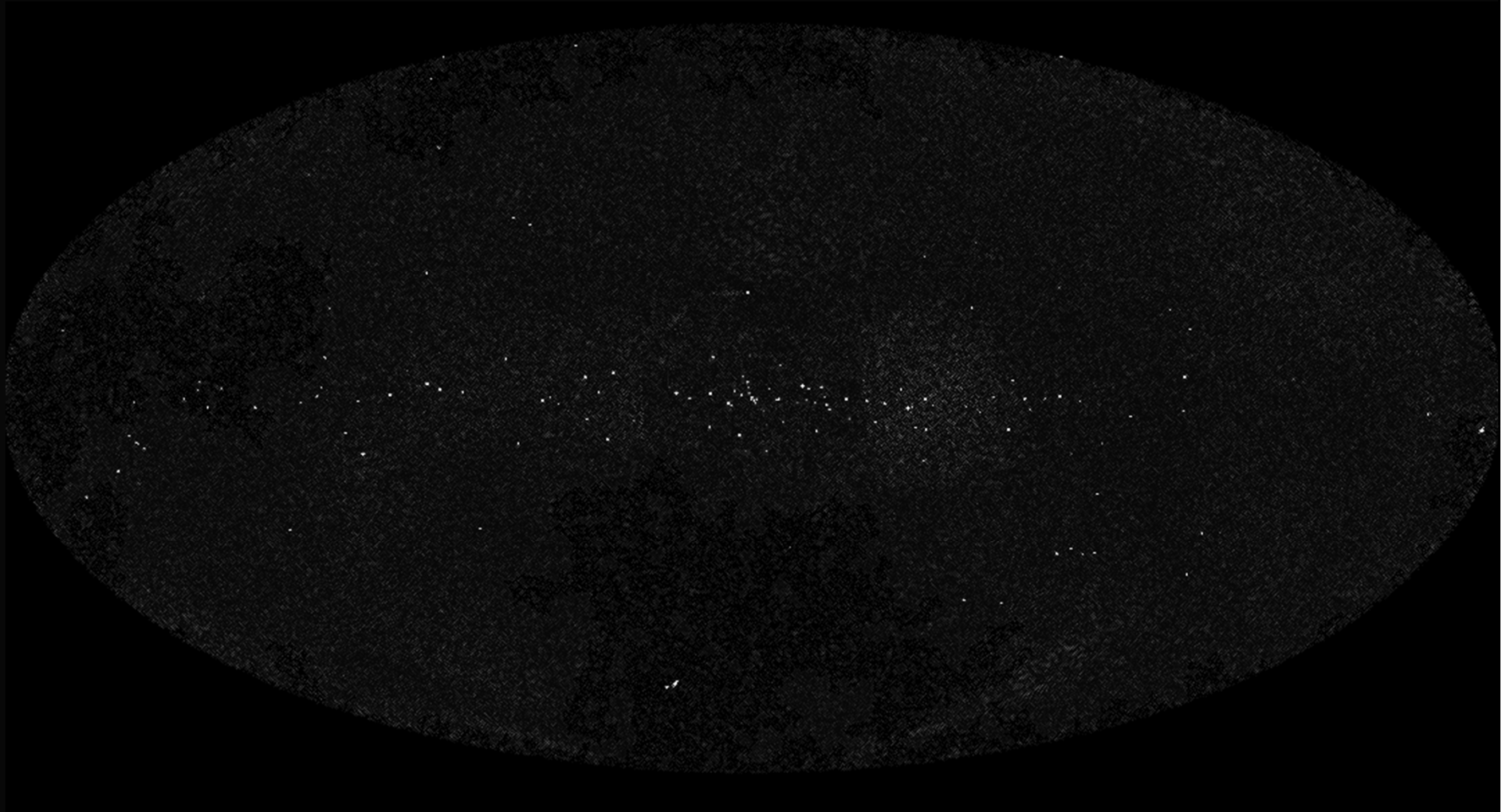
De dichtstbijzijnde visuele neutronenster
Afstand 400 lichtjaar, $V = 25.7$



Isolated Neutron Star RX J185635-3754 HST • WFPC2

PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997
F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

..maar zeer helder in röntgenlicht!



Opzet van lezing

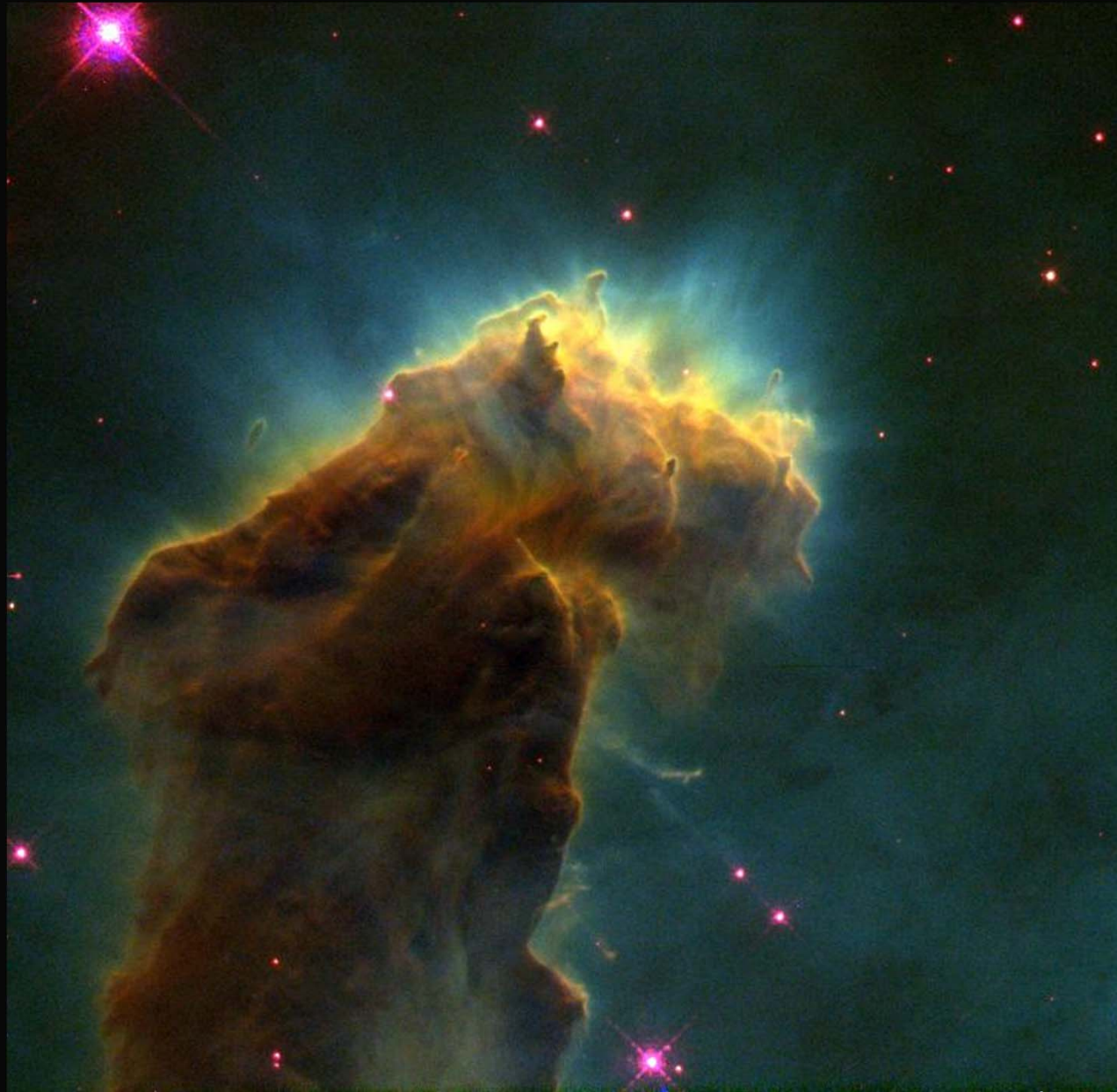
- 1) **Neutronensterren**
 - a) Ontstaan
 - b) Een verscheidenheid aan extremen
 - c) Een verscheidenheid aan gedaantes

- 2) **X-ray bursts**
 - a) Accreterende neutronensterren
 - b) X-ray bursts - een Nederlandse ontdekking
 - c) De opbouw van een waterstof/helium-bom
 - d) Kleine bommen, grote bommen
 - e) Een explosie aan fundamentele kennis?

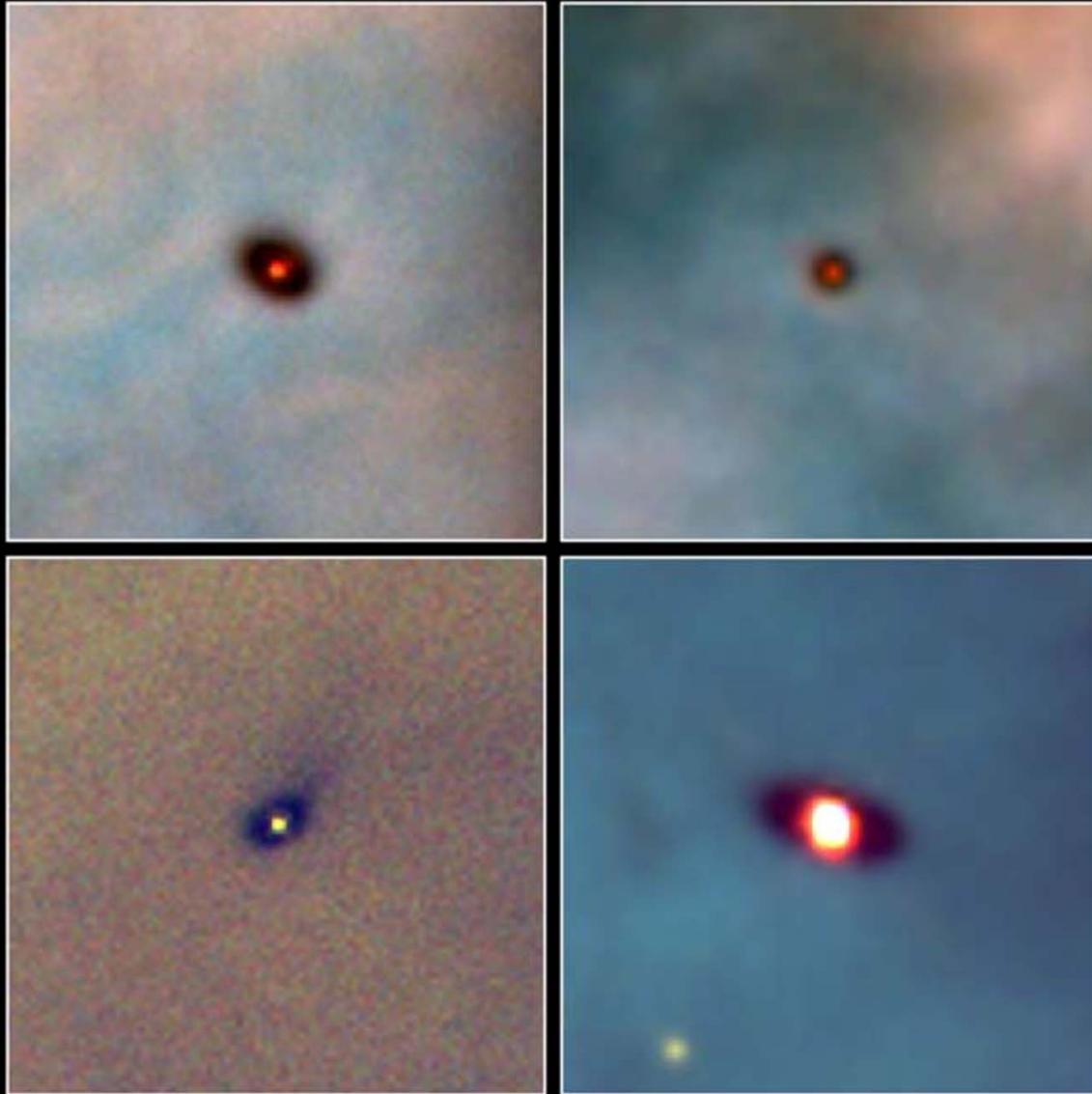
Embryonaal sterrenmateriaal



Embryonaal sterrenmateriaal



De geboorte van een ster



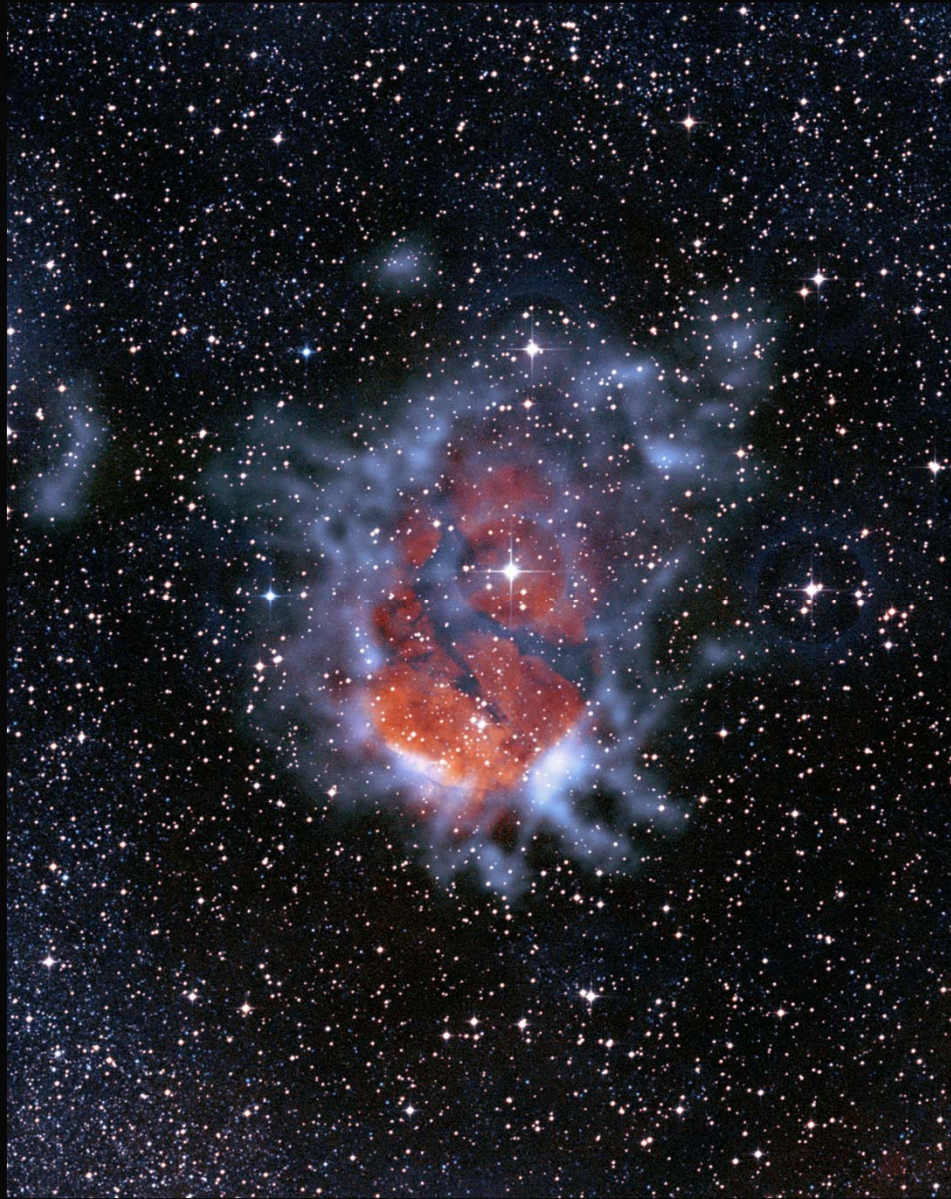
Meerlingen!



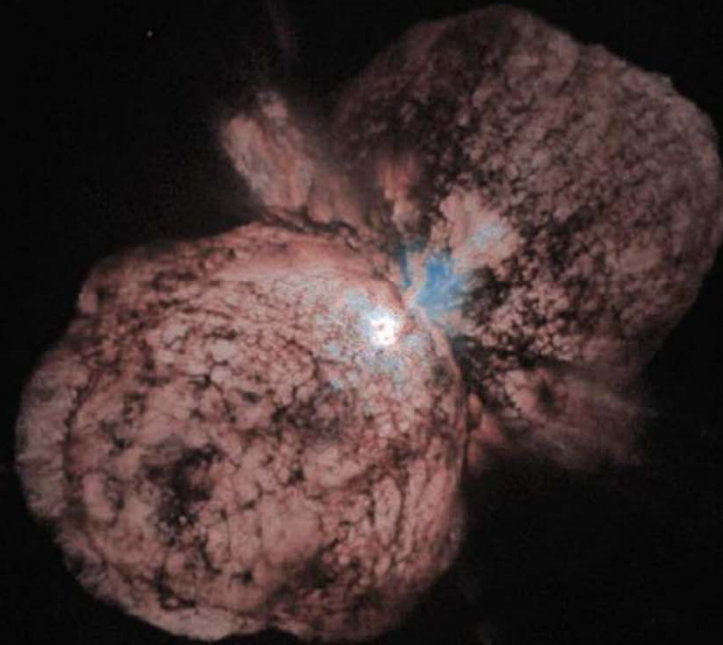
Broers en zusters



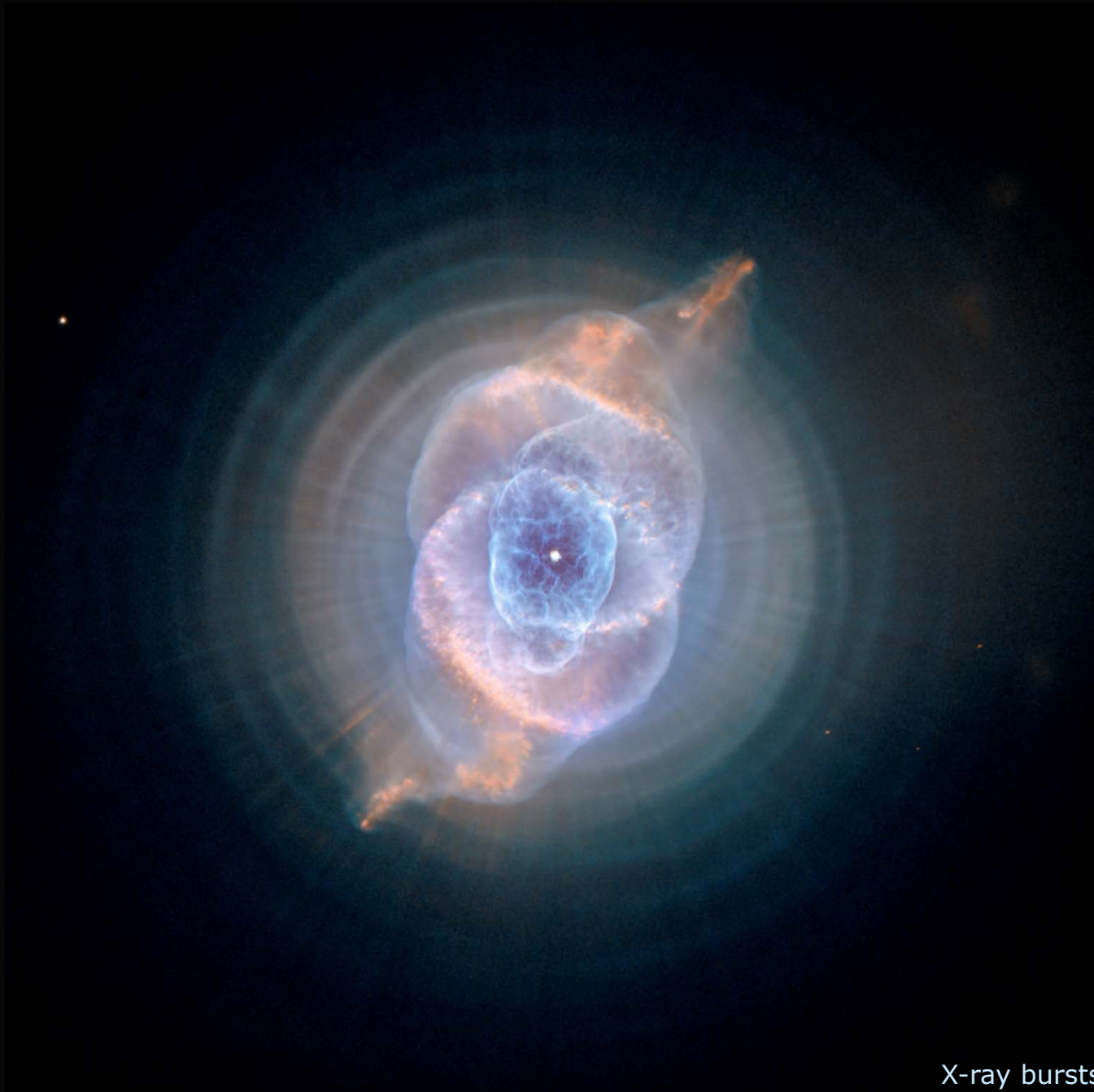
Vervuilers

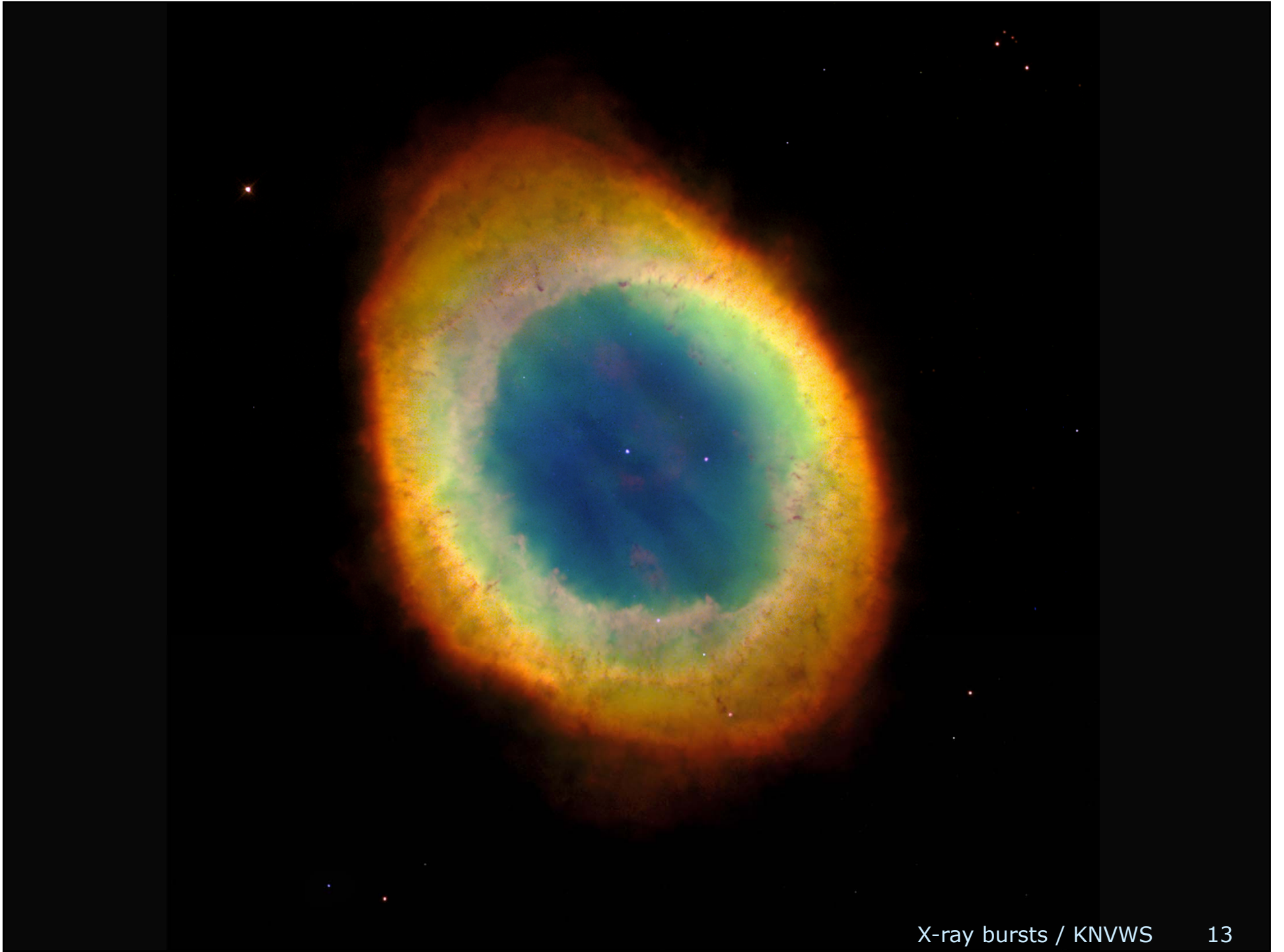


Grote vervuilers..



Gescheiden afval

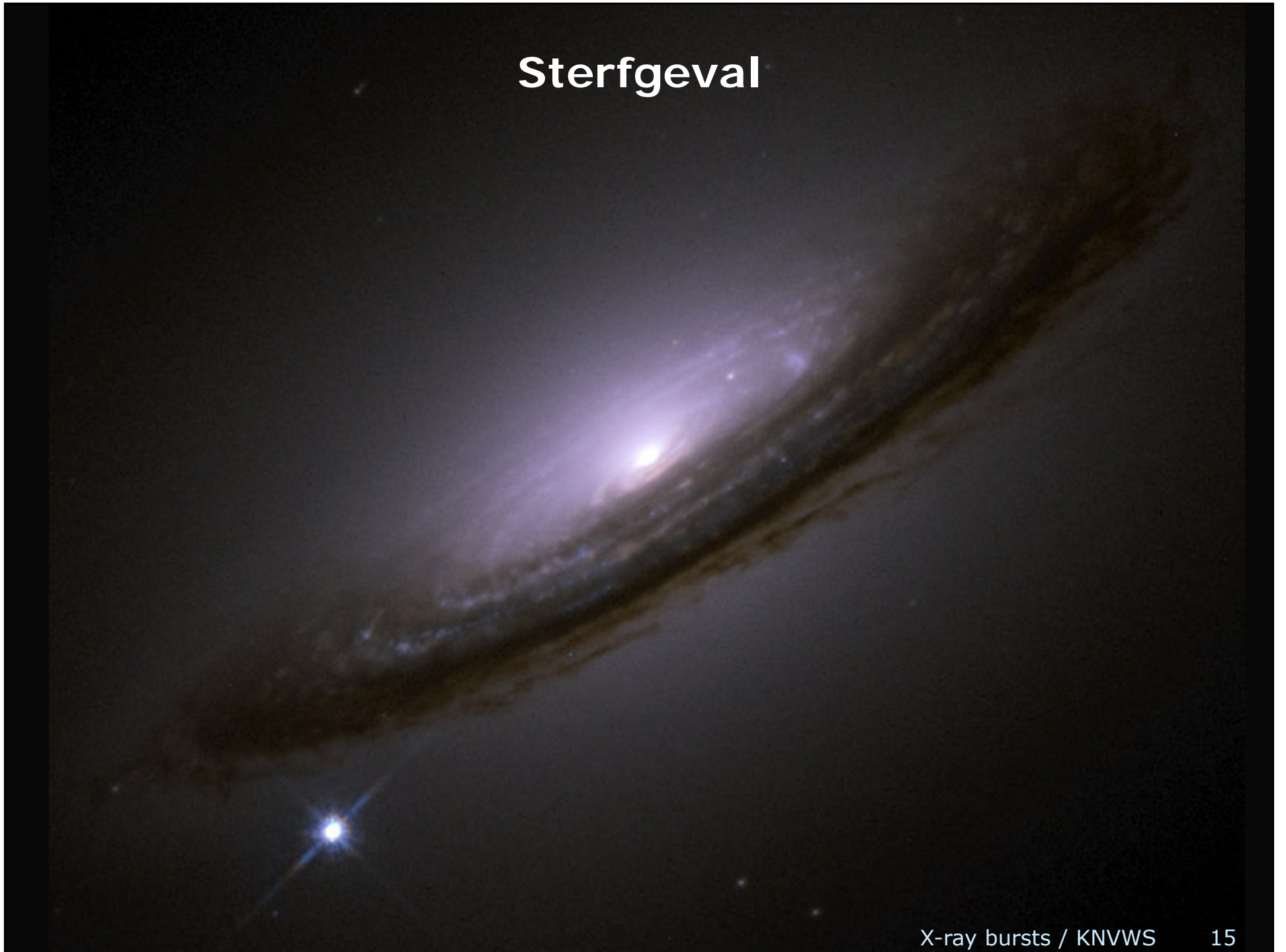




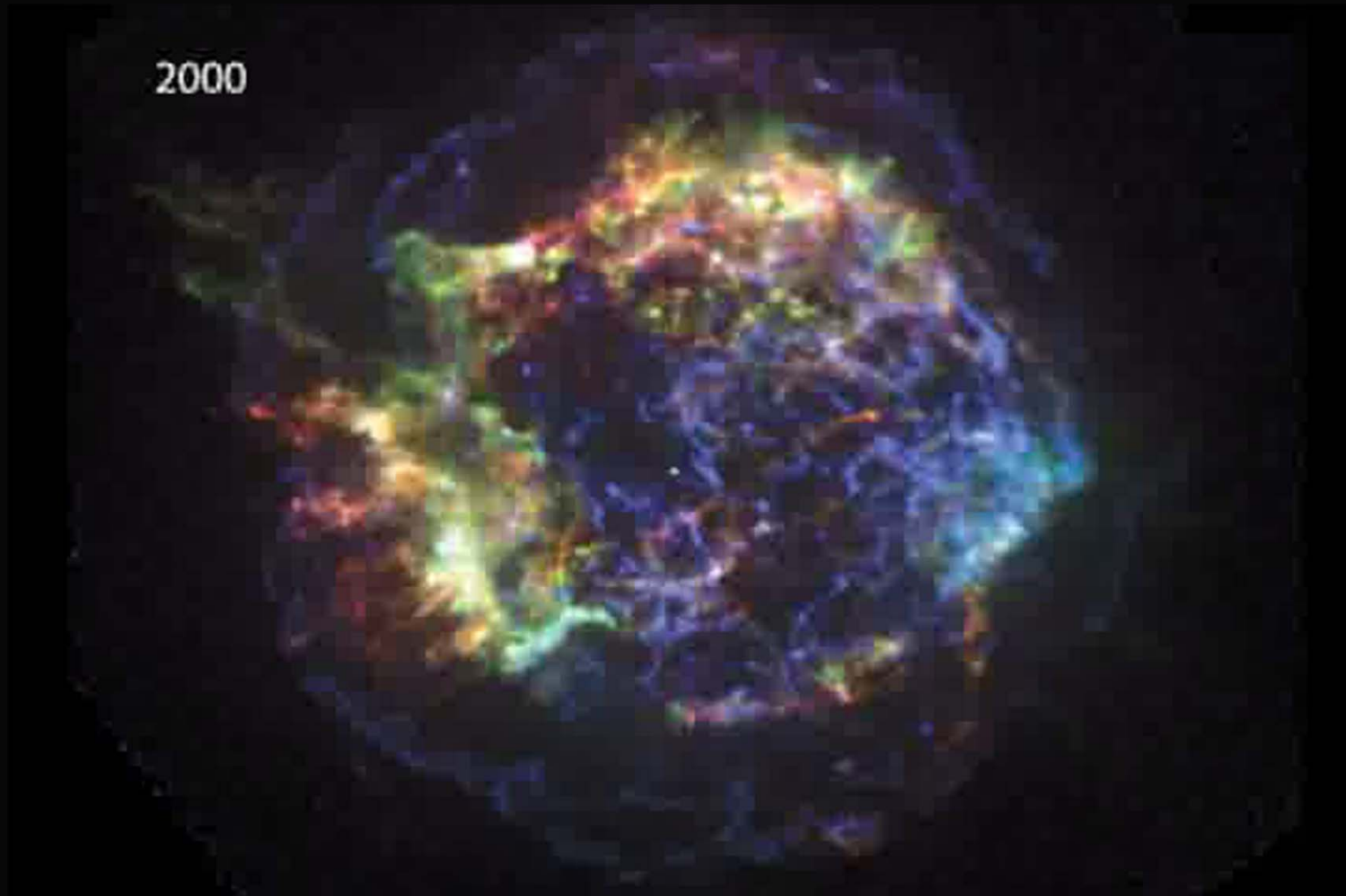
Supernova



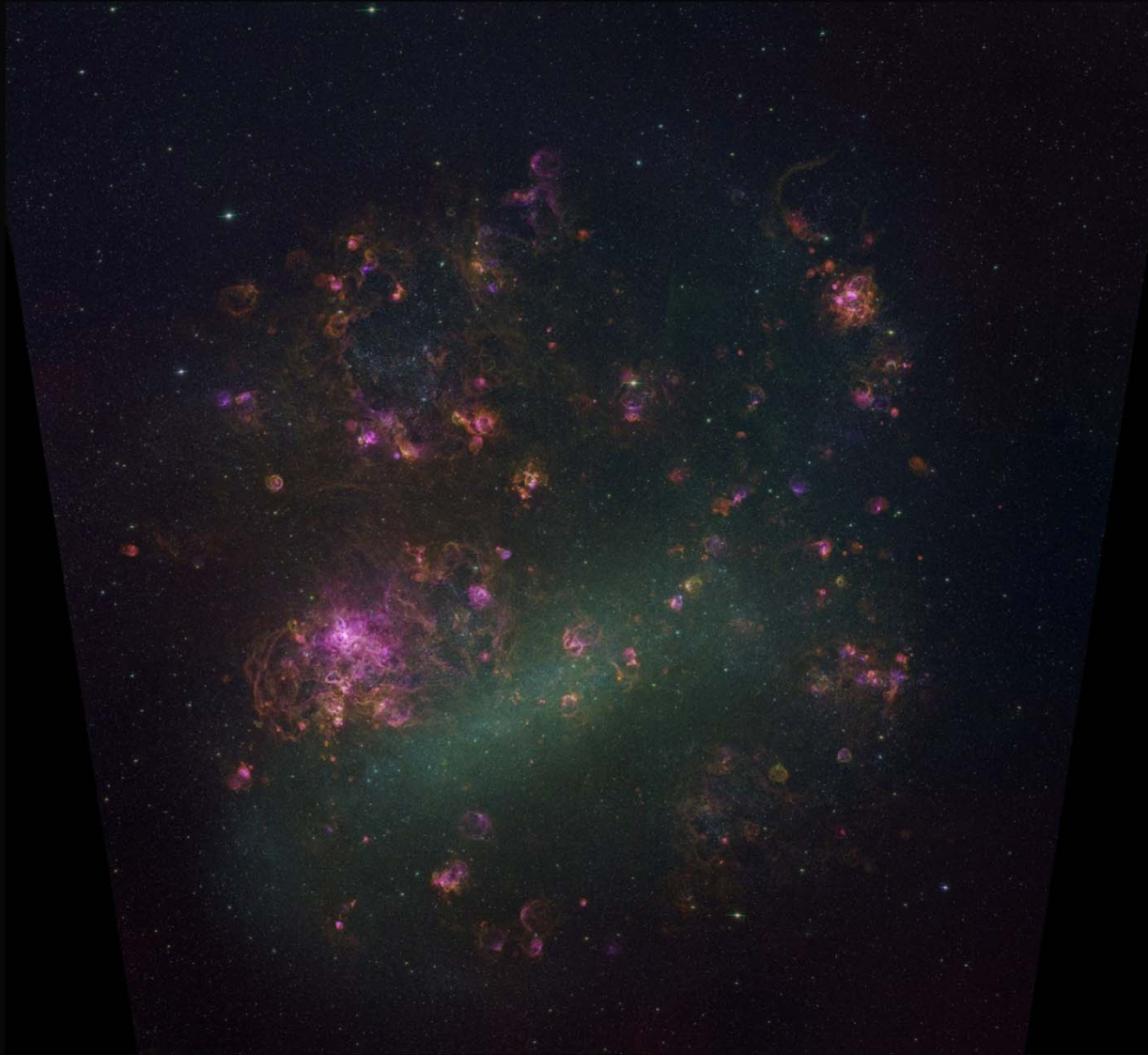
Sterfgeval



Asverstrooing



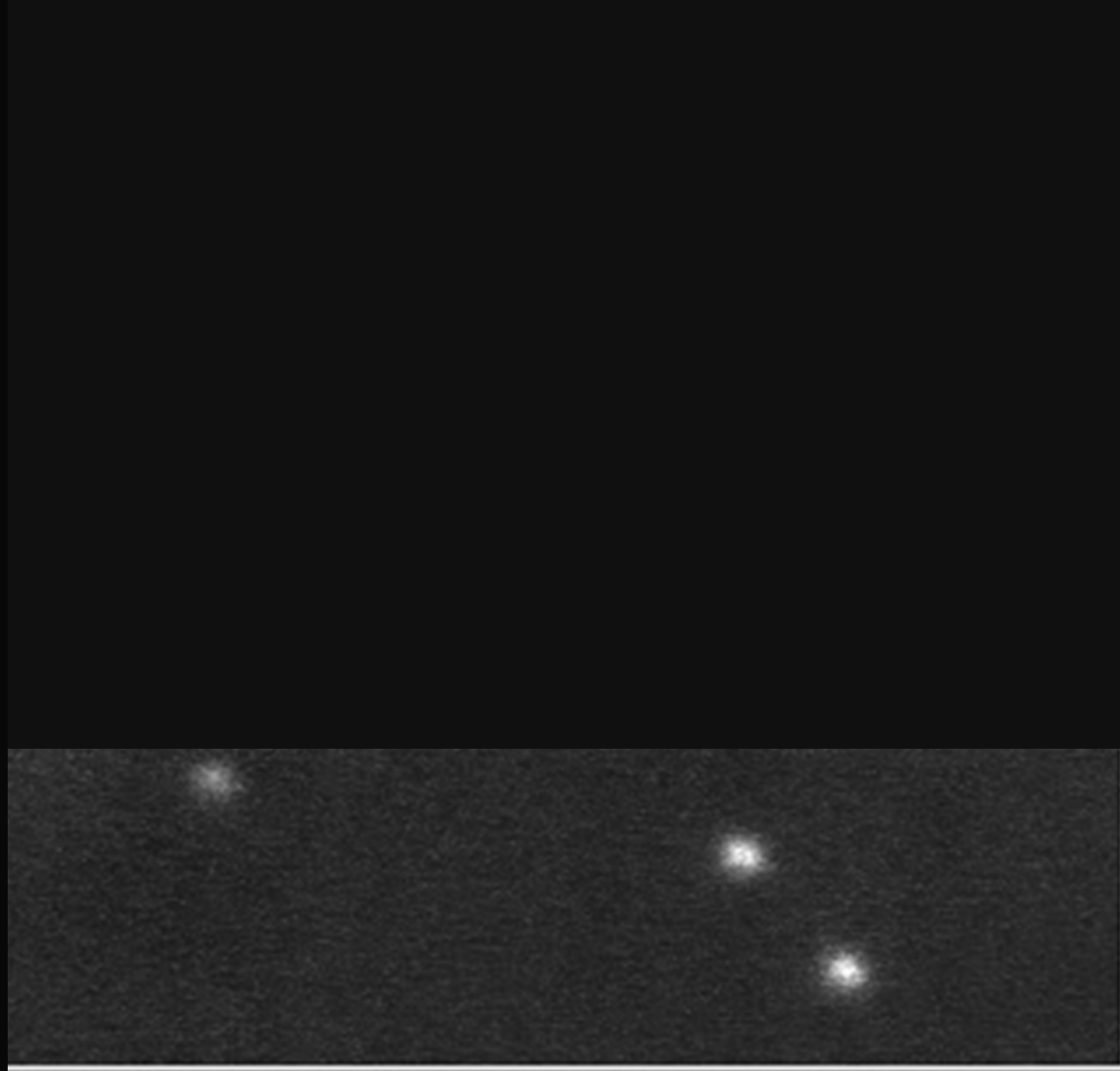
Kerkhof



De Crab nevel

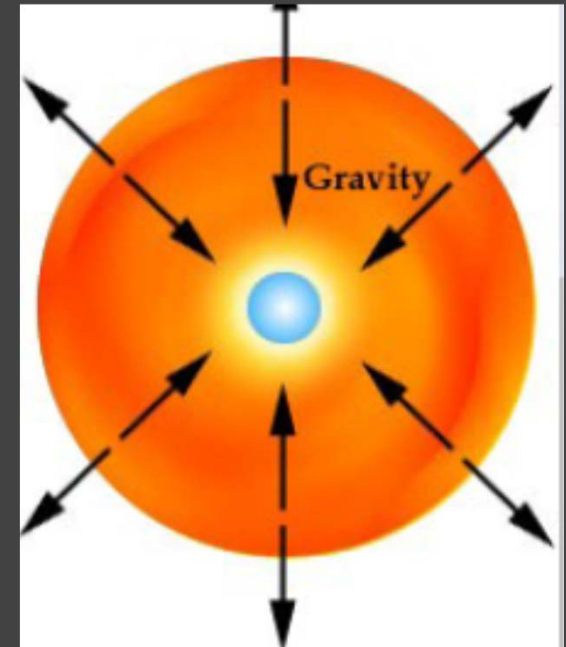


Wat blijft er achter?



Structuur van een gewone ster zoals de zon

- Alle sterren zijn in hydrostatisch evenwicht
 - dwz **zwaartekracht** wordt **gecompenseerd door drukverschil**
 - Voorbeeld: aardatmosfeer
- Druk neemt toe naar centrum van de ster, omdat temperatuur daar hoog wordt gehouden door continue kernfusie, en door stralingsdruk
- Als **kernbrandstof op** is (duurt miljoenen tot miljarden jaren), valt druk weg en overwint zwaartekracht → **implosie**



Twee soorten gas-druk

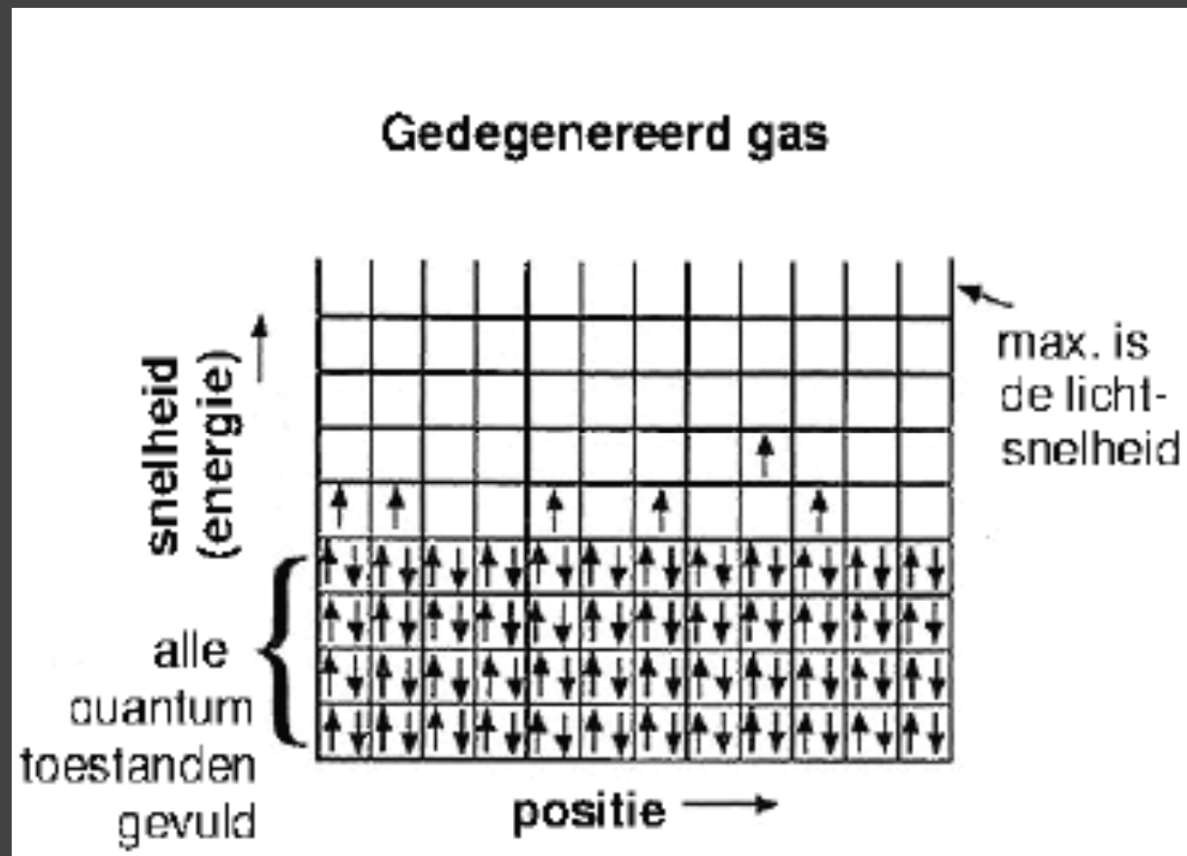
- **Gewoon gas**
 - Druk gevolg van botsingen tussen atomen
 - Hogere temperaturen → hogere snelheden → hevigere botsingen → hogere druk
 - Druk evenredig met temperatuur en dichtheid
- **Gedegenereerd gas**
 - Als dichtheid heel groot is zodat er geen plaats meer is tussen deeltjes

Quantumfysica

- **Onzekerheidsrelatie van Heisenberg (1927)**
 - Een deeltje kan niet tegelijkertijd op een nauwkeurig bepaalde plaats zijn én een bepaalde snelheid hebben. In formule: $\Delta r \times \Delta v > \text{constante}$
- **Uitsluitingsprincipe van Pauli (1925)**
 - Twee dezelfde deeltjes (electronen, protonen of neutronen) kunnen zich niet op precies dezelfde plaats bevinden, en zelfde rotatie en snelheid hebben



Quantumfysica schematisch



Twee soorten gas-druk

- **Gewoon gas**
 - Druk gevolg van botsingen tussen atomen
 - Hogere temperaturen → hogere snelheden → hevigere botsingen
 - **Druk evenredig met temperatuur en dichtheid**
- **Gedegenereerd gas**
 - Druk gevolg van nulpuntsbewegingen – quantumfysisch effect dat pas gaat domineren bij lage temperaturen of zeer hoge dichtheden
 - **Druk en dichtheid onafhankelijk van temperatuur**, druk evenredig met macht van dichtheid

Witte dwergen

- Chandrasekhar (1931):
druk in witte dwergen
geleverd door
gedegenererde
electronen
- Witte dwergen blijven
bestaan, zelfs bij $T=0$ K
- Hoe zwaarder, hoe
kleiner
- Maximum massa is $1.4 \times$
de zon \rightarrow Chandrasekhar
limiet



Neutronensterren

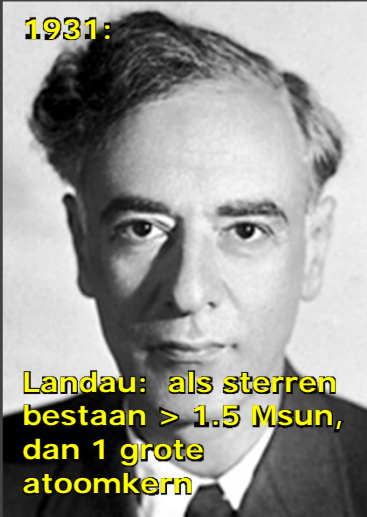
- Als massa groter is dan 1.4 maal de zon, leveren **electronen niet genoeg druk tegen zwaartekracht**
- Er gebeurt iets: electronen worden ingevangen door protonen en er ontstaat een **surplus aan neutronen**, electronendruk valt weg
- Er ontstaan neutron-zware atomen, die op het gegeven moment gaan lekken → vrije neutronen
- **Neutronen** kunnen **degenereren** net als electronen, maar bij veel hogere dichtheid
 - Electronen bij 10^6 g/cm^3
 - Neutronen bij 10^{15} g/cm^3 → dichtheid van atoomkernen!
 - 1 miljard x hogere dichtheid → 1 miljard x kleinere ster → 1000 x kleinere straal → **20 km i.p.v. 20 000 km**

Stop de implosie

- Brandstof op → geen interne verhitting → zwaartekracht overwint → ster trekt samen of **implodeert** zelfs
 - Als massa minder is dan 1.4 maal de zon → samentrekking stopt als ster 20000 km groot is → **witte dwerg**
 - Als massa groter is, maar minder dan 3 maal de zon → implosie stopt als ster 20 km groot is → supernova → **neutronenster**
 - Als massa nog groter is → implosie stopt waarschijnlijk niet → **zwart gat**

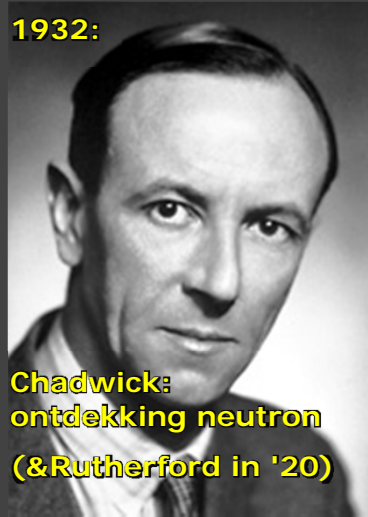
1930s: Landau, Chadwick Baade, Zwicky, Tolman, Oppenheimer, Volkoff

1931:



Landau: als sterren bestaan $> 1.5 M_{\text{sun}}$, dan 1 grote atoomkern

1932:

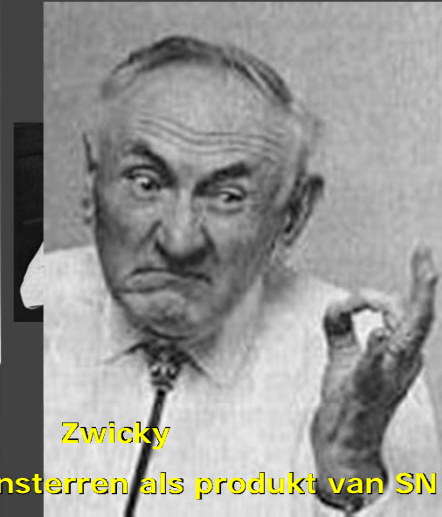


Chadwick: ontdekking neutron (& Rutherford in '20)

1934:

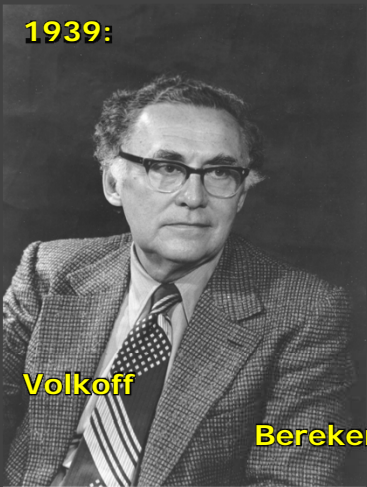


Baade
Voorspelling neutronensterren als produkt van SN

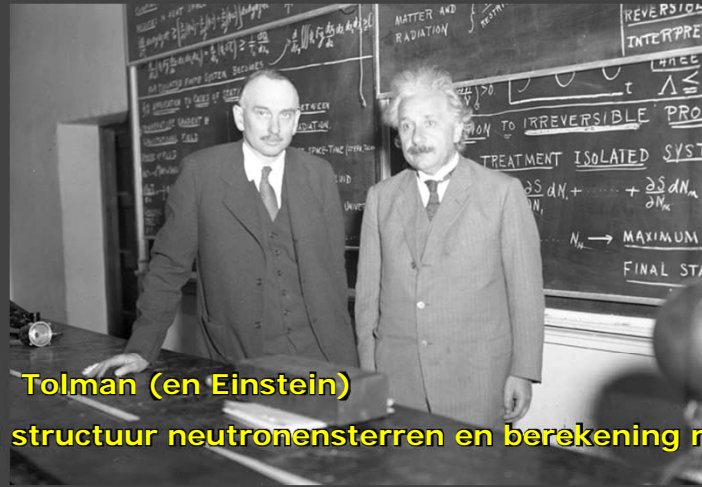


Zwicky

1939:

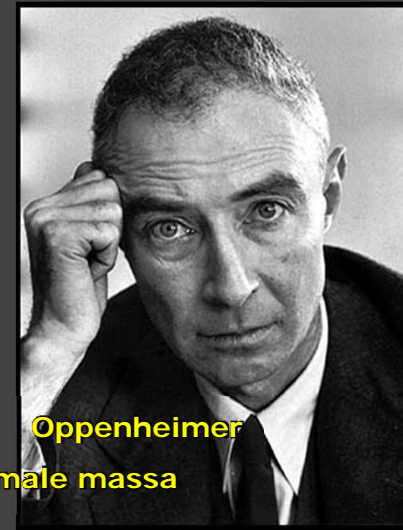


Volkoff



Tolman (en Einstein)

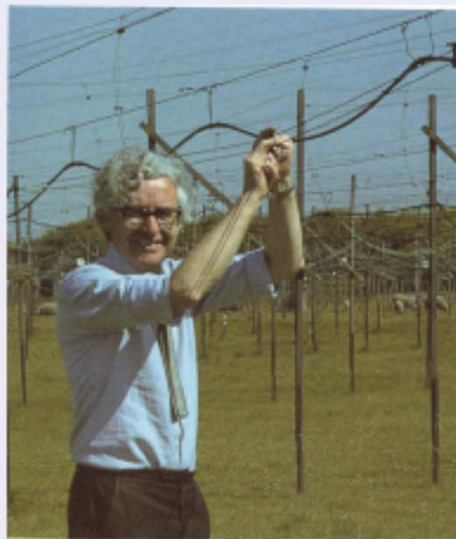
Berekening structuur neutronensterren en berekening maximale massa



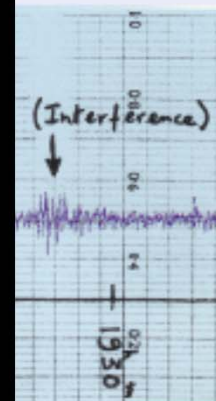
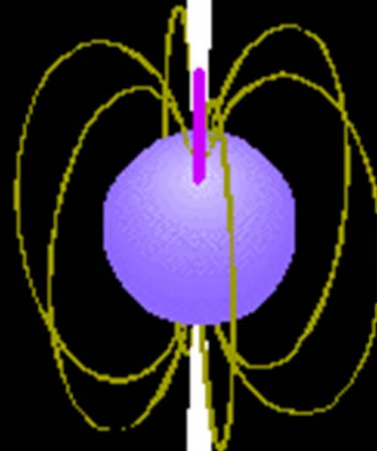
Oppenheimer

30 jaar later.. 1967: Hewish & Bell ontdekken 1ste pulsar; Gold verklaart dit als zijnde neutronenster; 1974 nobelprijs

De ontdekking van



- 'storing' in radios
- verschuift elke dag
minuten: komt van
- kleine groene mannetjes:

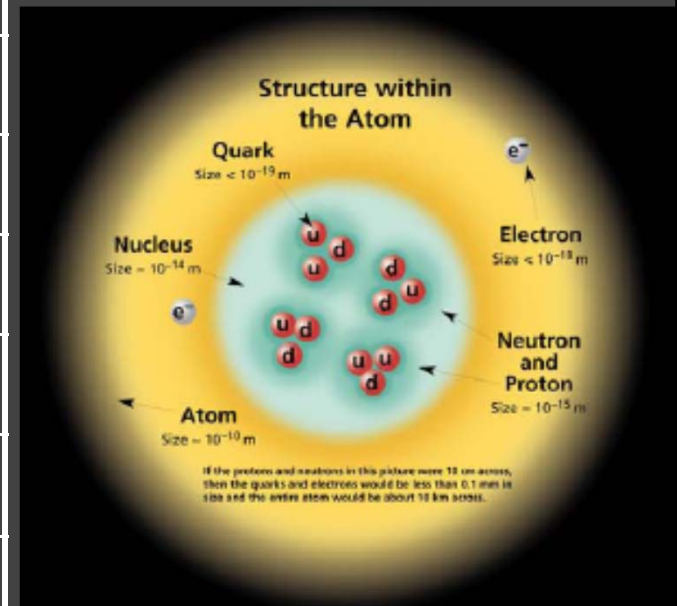


© 2004 The Trustees of Amherst College. www.amherst.edu/~gsqgreenstein/progs/animations/pulsar_beacon/

28 November 1967

Dichtheden in het heelal

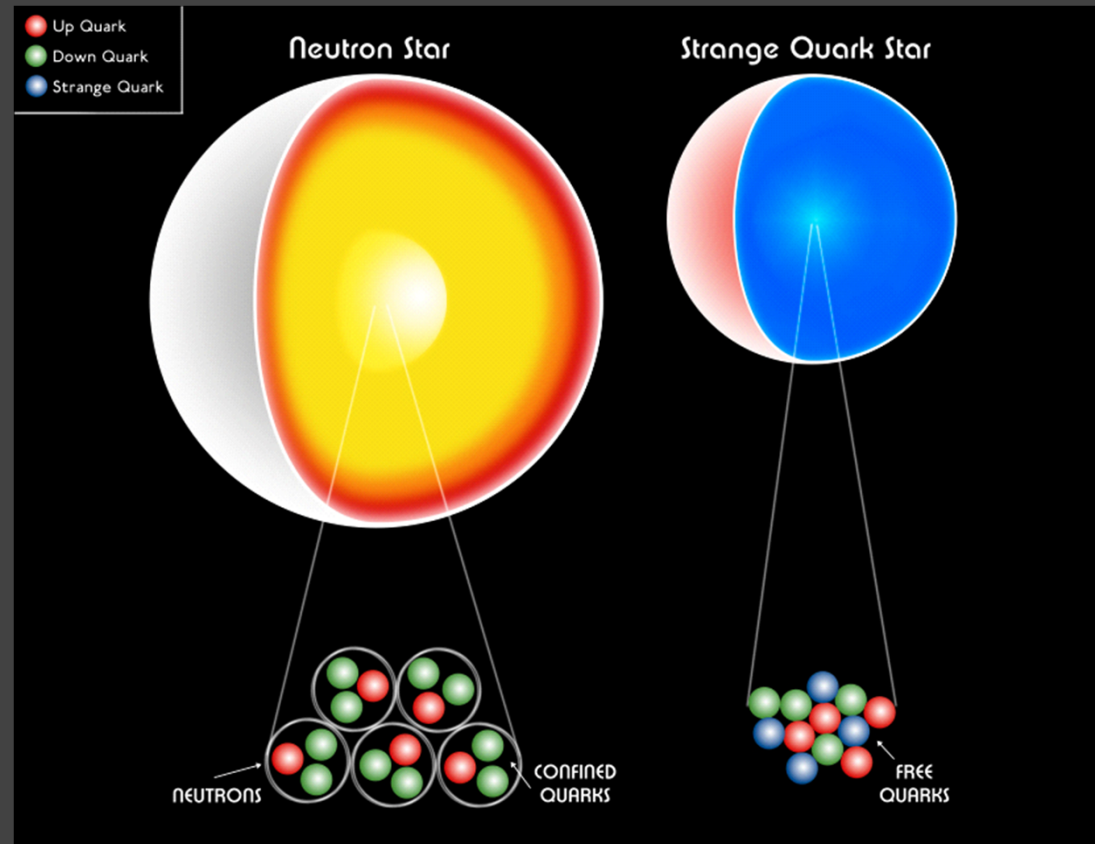
Ruimte tussen melkwegen	$<10^{-21} \text{ g cm}^{-3}$
Interstellaire medium	$10^{-17} \dots 10^{-14}$
Aardatmosfeer	10^{-3}
Water	1
Atoom	10
Centrum van de aarde	10
Centrum van de zon	10^2
Witte dwerg	10^9
Atoomkern	10^{14}
Kerdeeltjes/nucleonen	10^{15}
Neutronenster	10^{15}
Stellair zwart gat	$>10^{17}$



Structuur van een neutronenster

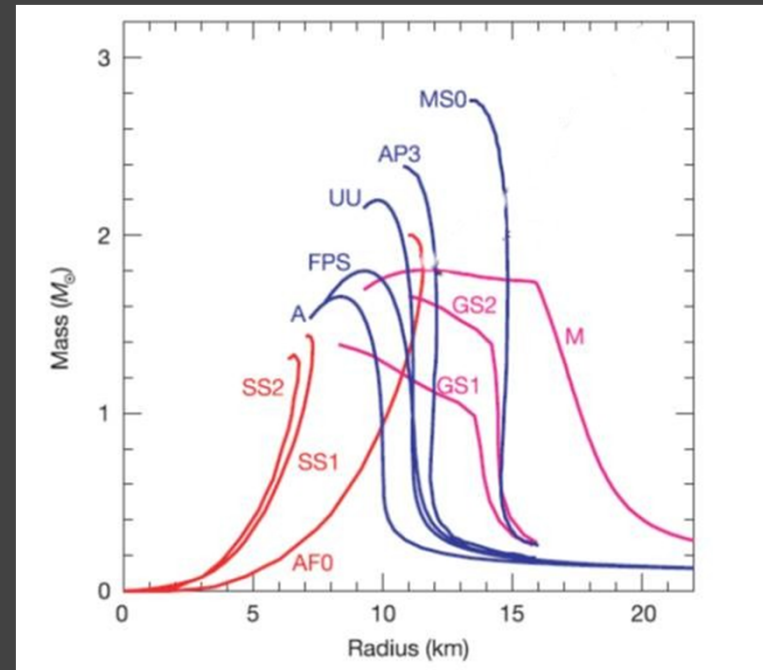


- Atmosfeer (~ 1 cm): gewoon materiaal. $T \sim 1$ miljoen K
- Oceaan (~ 100 m) van zware metalen (C, Ni)
- Korst (~ 1 km): kristallijn ijzer, vorming neutron-zware atomen, lekken van neutronen
- Kern (99% massa): vrije neutronen en, dieper, ????

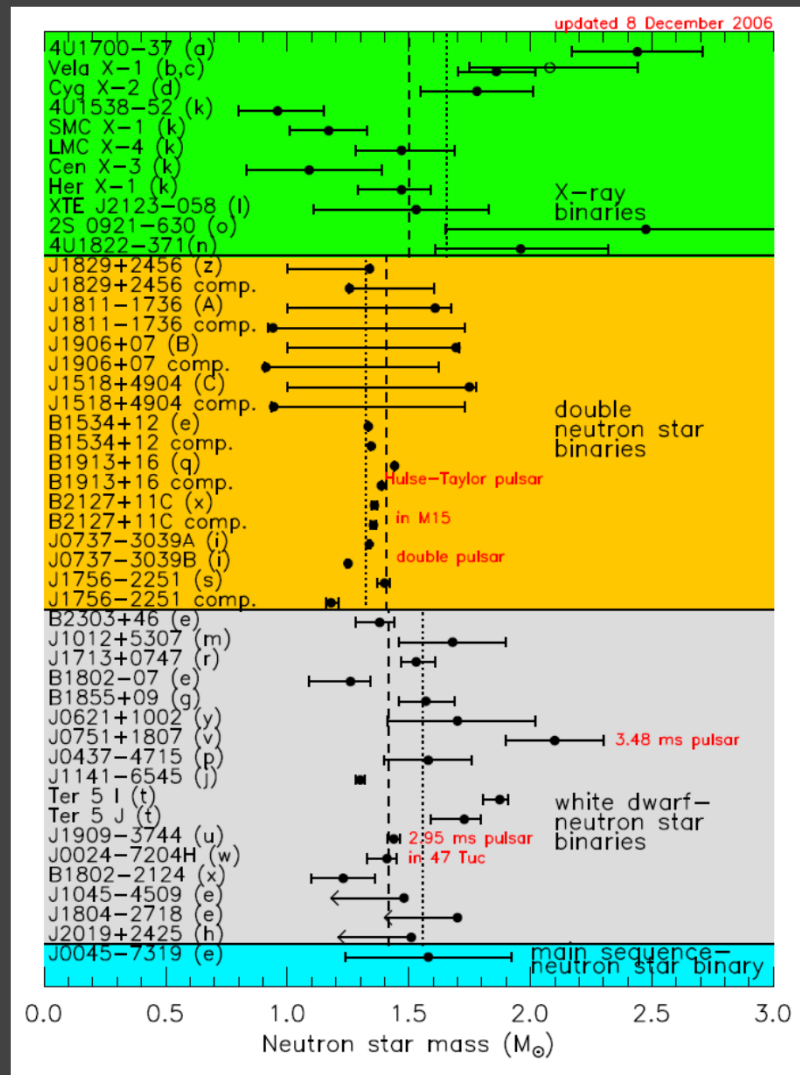


Extreme onstandigheden: grote dichtheden

- Gedrag van materie binnen atoomkernen bepaald door theorie van sterke kernkracht ('QCD')
- QCD onbekend als deeltjes zeer dicht bij elkaar staan, zoals bij dichtheden groter dan die in atoomkernen
- Er zouden wel eens zeer exotische deeltjes kunnen ontstaan, bv vrije quarks
- Massa-straal bepaald door dichtheid
- M/R metingen zouden belangrijke informatie kunnen leveren voor QCD = fundamentele natuurkunde
- Ultieme doel → meet M and R van neutronenster



Massabepalingen 'gemakkelijk'



Lattimer & Prakash 2007

Straal.. moeilijker

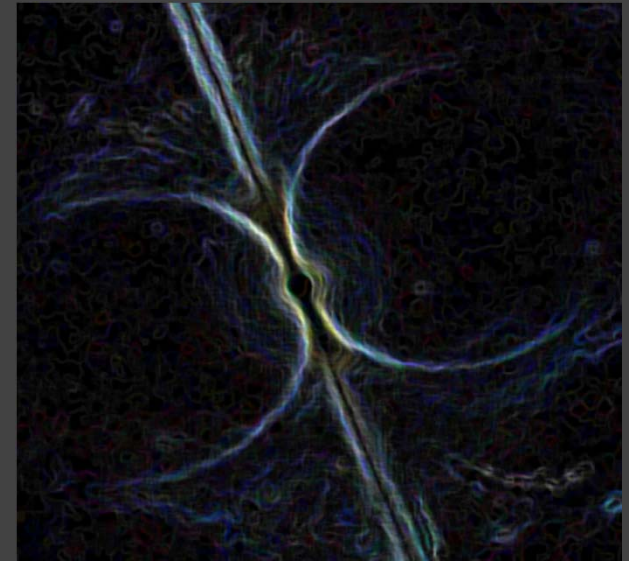


niet pulsars



X-ray bursts!

(zie later)

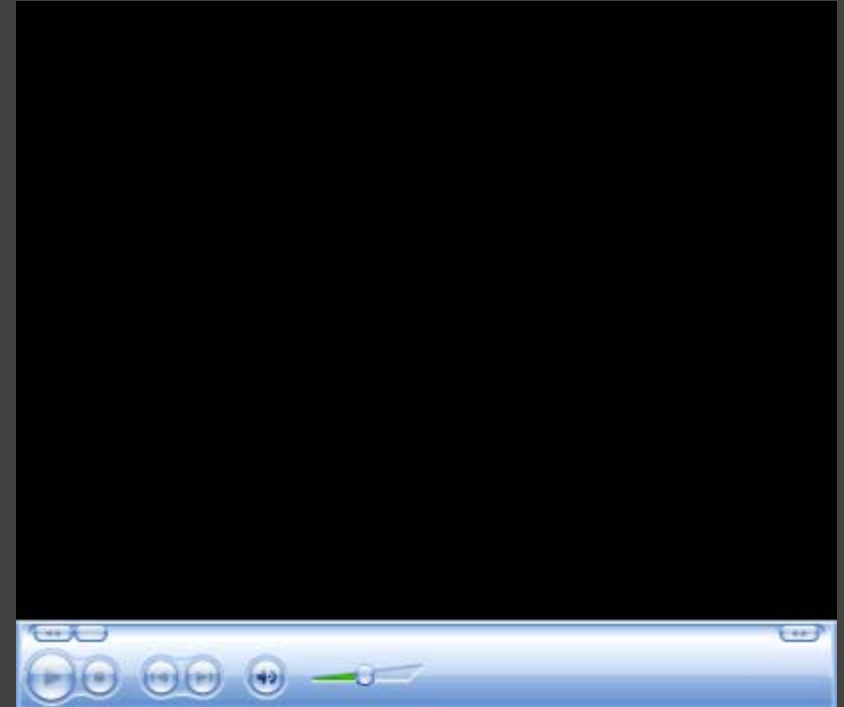
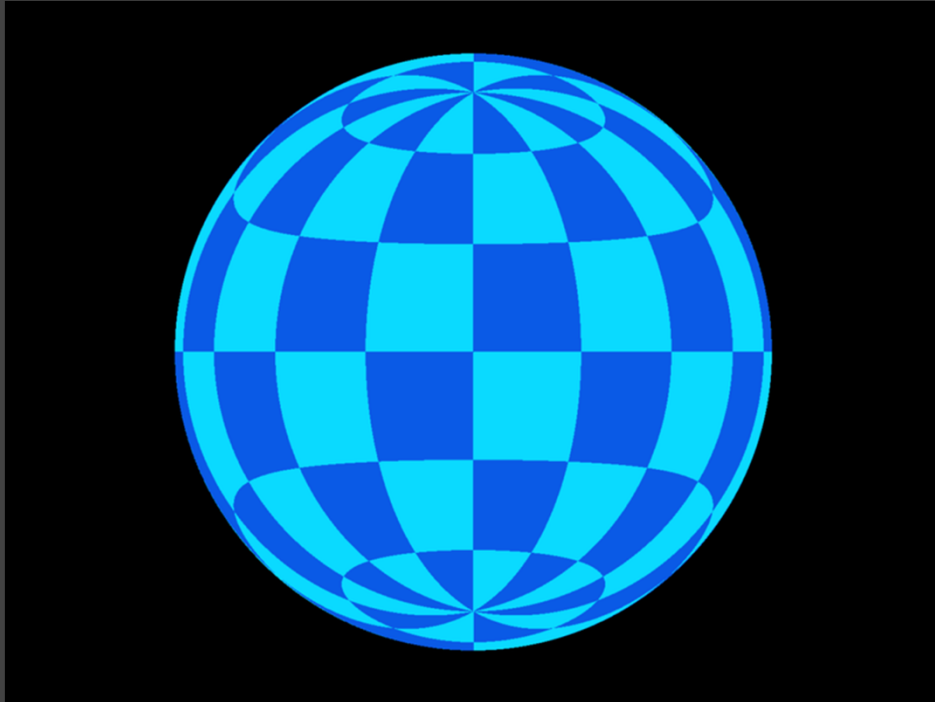


Sterke zwaartekracht

vergelijking zwaartekracht

hemellichaam:	ontsnappings- snelheid:	versnelling aan oppervlak:
aarde	11 km/sec	1 x g
zon	620 km/sec	28 x g
witte dwerg	5000 km/sec	170.000 x g
neutronenster	190.000 km/sec	200 miljard x g
zwart gat	300.000 km/sec = c	

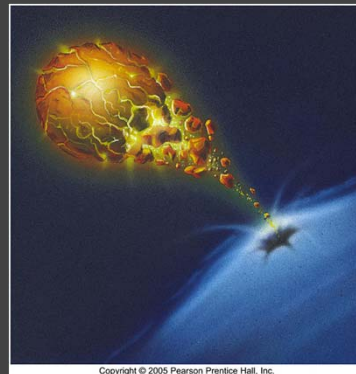
Sterke zwaartekracht → sterk gekromde ruimte



- Licht wordt afgebogen door sterk zwaartekrachtsveld, en roodverschoven
- Meer voorbeelden: [home page Robert J Nemiroff](#)

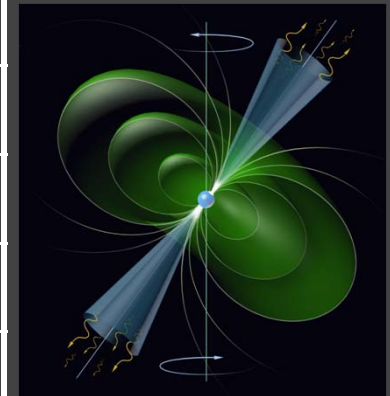
Sterke zwaartekracht →

- Gladste oppervlakken in het heelal, sterkste kristallen overleven niet als groter dan 1 mm
- Enorme valsnelheden
- Getijdekrachten zeer sterk, alle objecten groter dan 10 cm worden uit elkaar getrokken



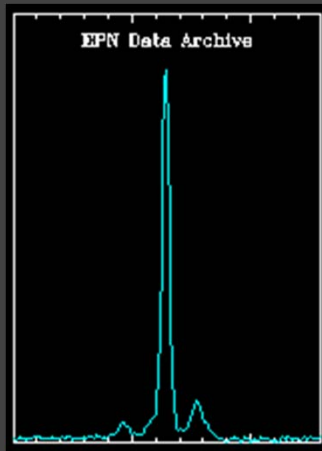
Sterk magnetisch veld

Interstellair medium	10^{-5} Gauss
Zonnewind	10^{-4}
Gasnevel	10^{-3}
Aarde	1
Zware ster	10^2
Koelkast	10^2
Zonnevlek	10^3
Jupiter	10^3
Magnetische ster	10^4
Witte dwerg	10^6
Neutronenster	10^{8-12}
Magnetar	10^{15}

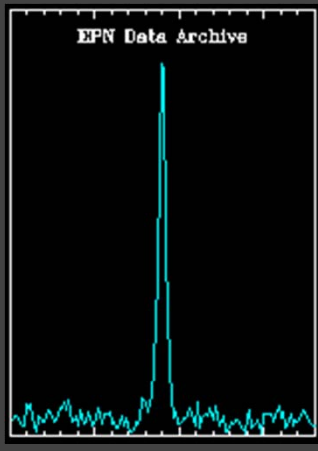


Enorm snelle rotatie

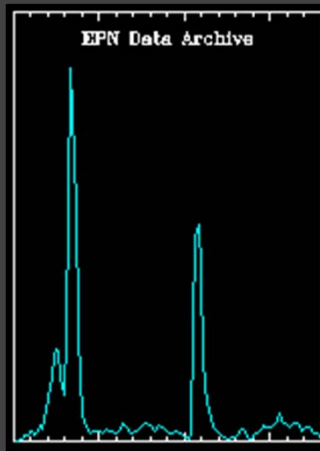
PSR B0329+54 (0.7 s)



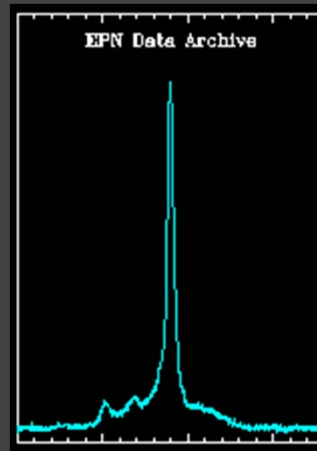
Vela pulsar (0.09 s)



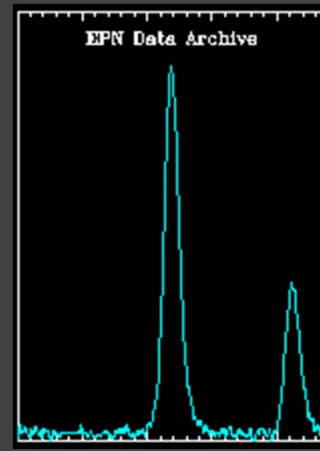
Crab (0.03 s)



PSR J0437-4715 (0.005 s)



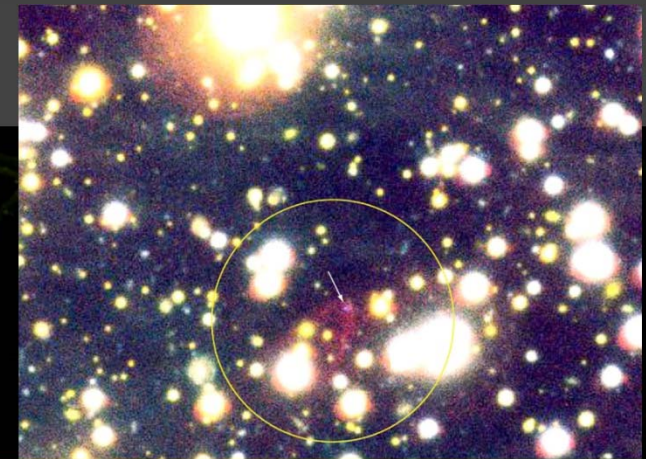
PSR B1937+21 (0.0016 s)



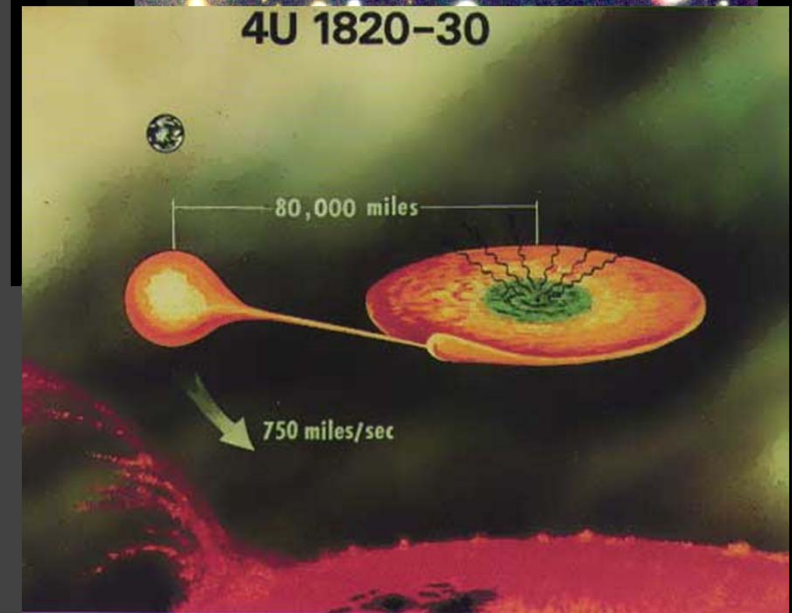
- Gevolgen:
 - .zeer stabiele klokken (stabiel tot 1 op 10^{21})
 - .Zeer snelle rotatiesnelheid aan equator (0.3 c)
 - .Zeer veel rotatie-energie: zelfde orde als van supernova

Verschijningsvormen van neutronensterren

- Voorspeld aantal: 100 miljoen on de Melkweg (1 op de 1000 sterren zijn)
- Bekend: slechts ~2200:
 - **2000 Pulsars**
 - **Radio pulsars** (~1800), gevoed door rotatie-energie, waaronder Roterende radio transients (RRATs; ~10)
 - **Magnetars** (~20), gevoed door magnetische energie
 - **Röntgenpulsars** (~200), gevoed door accretie-energie
 - **10 centrale compacte objecten** in SNRs, vaak ook optische pulsars
 - **10 geïsoleerde neutronensterren**, vaak ook zwakke optische pulsars
 - Accreterende NSs in lage-massa röntgendubbelsterren (klein magneetveld)
 - zonder bijzondere kenmerken (~50)
 - **100 X-ray bursters** of röntgenflitsers

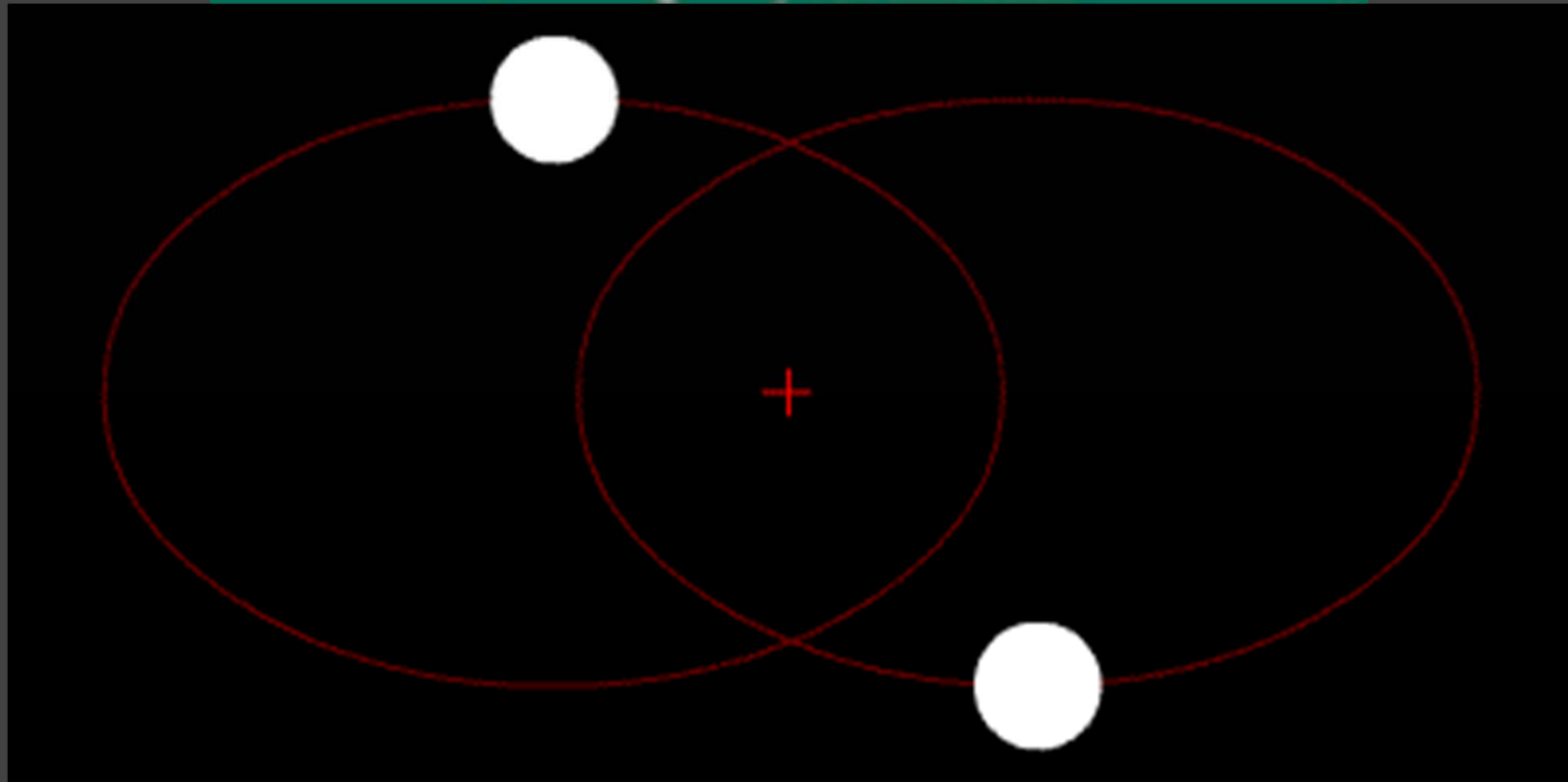


4U 1820-30

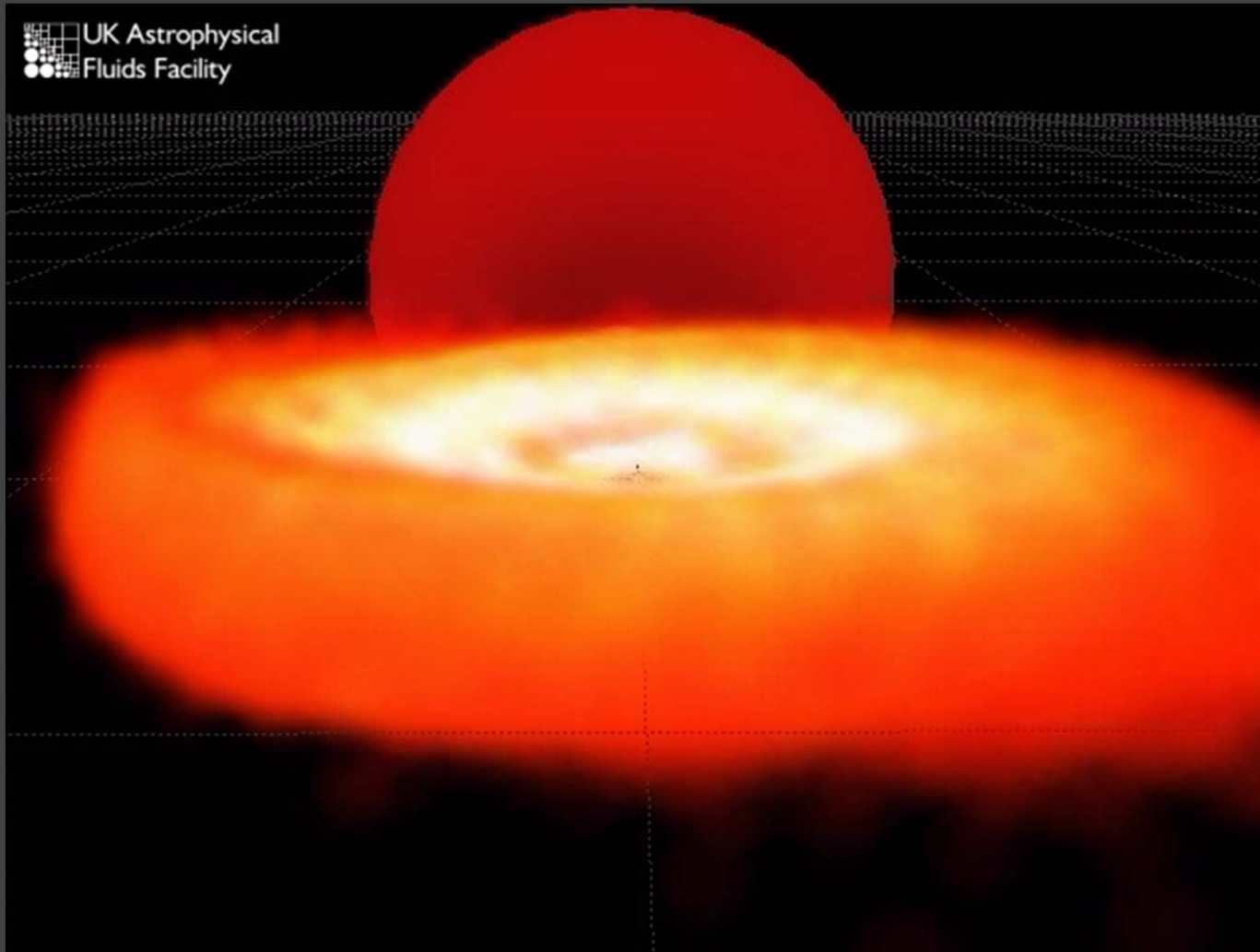


Pauze

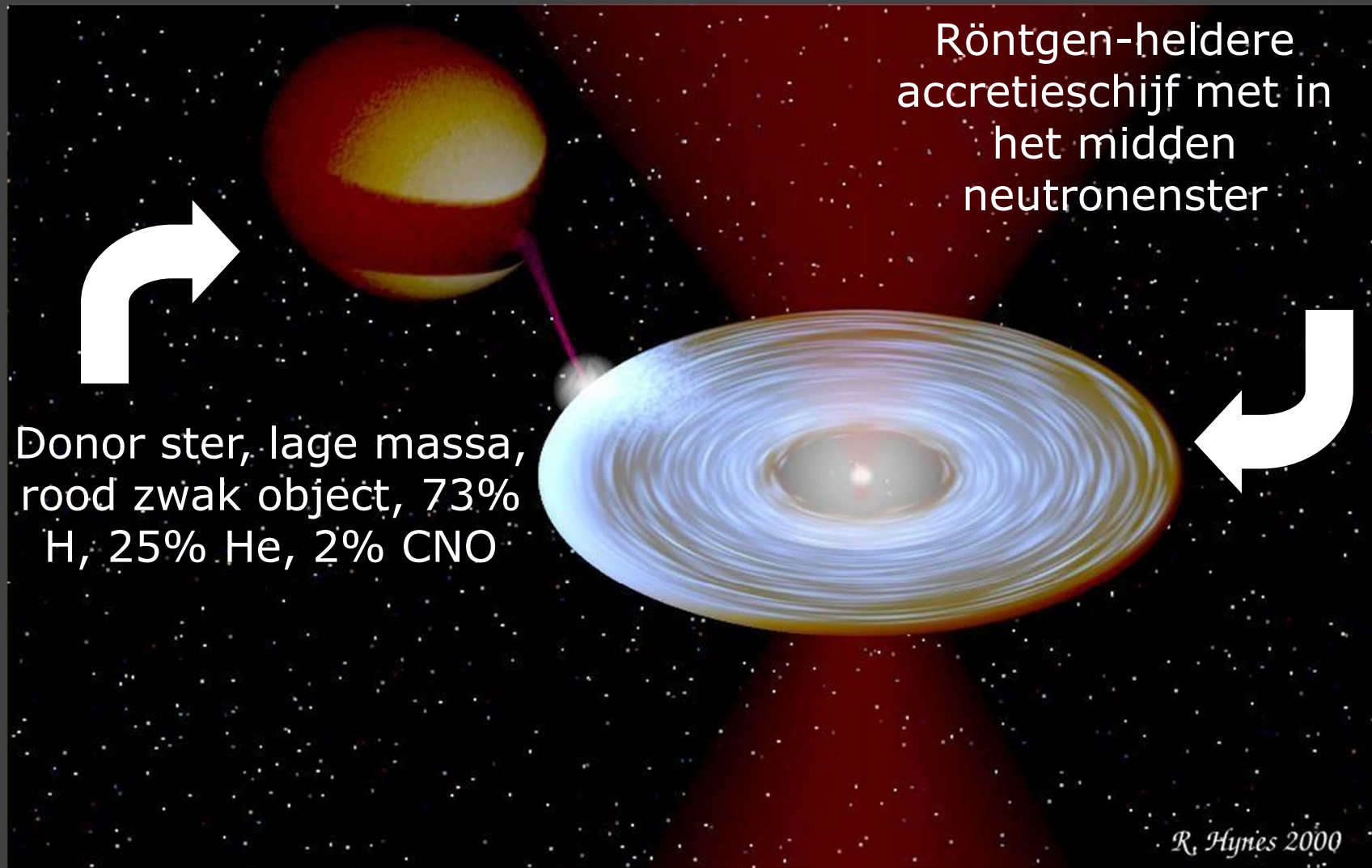
Dubbelsterren



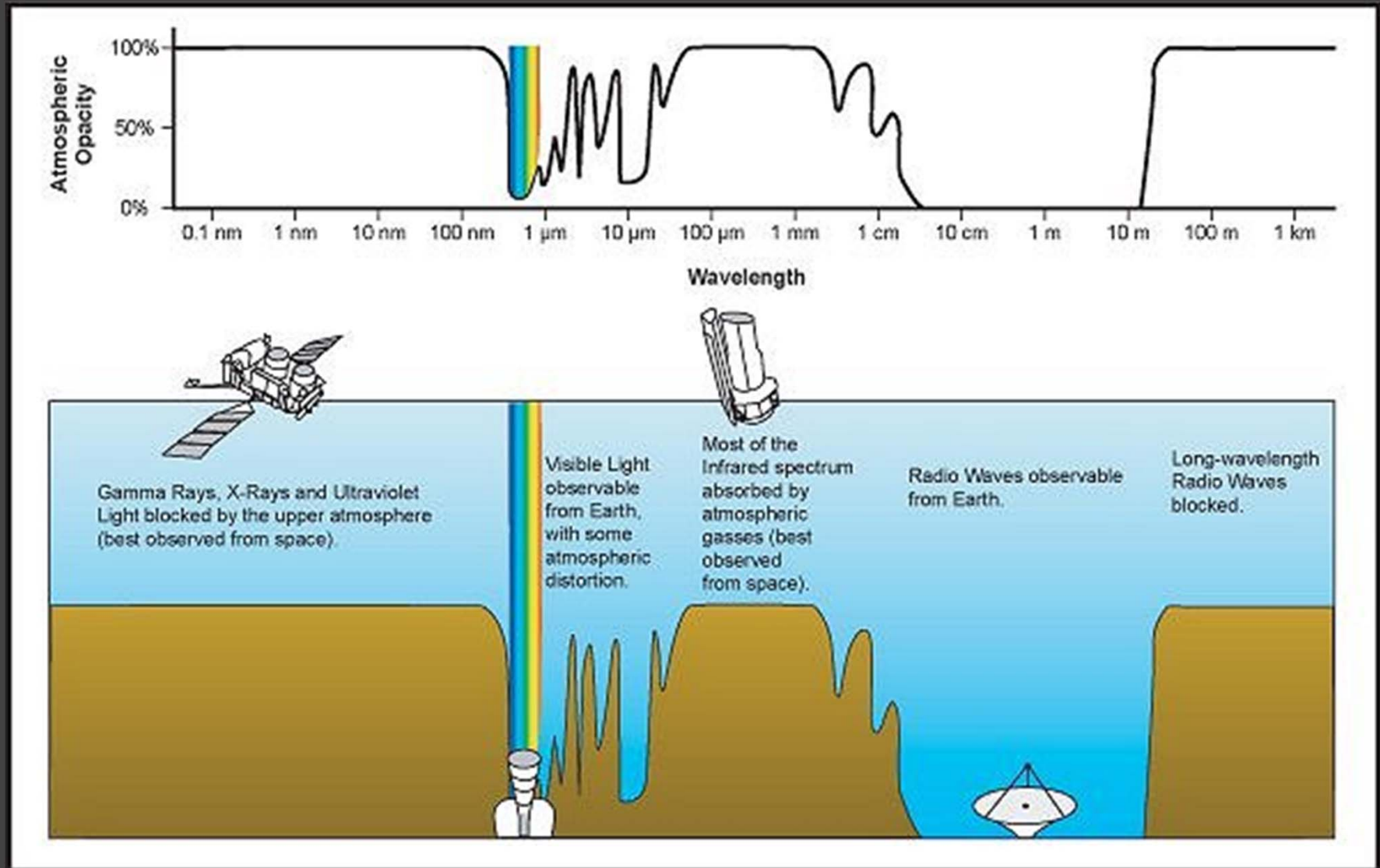
1 vd 2 neutronenster of zwart gat → röntgendubbelster



Accreterende neutronensterren in lage-massa röntgendubbelsterren



Röntgenlicht zien? De ruimte in!



Ontdekking 1962 dmv raketexperiment, Nobelprijs 2002 Giacconi

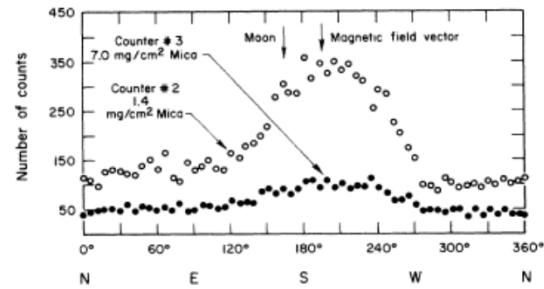
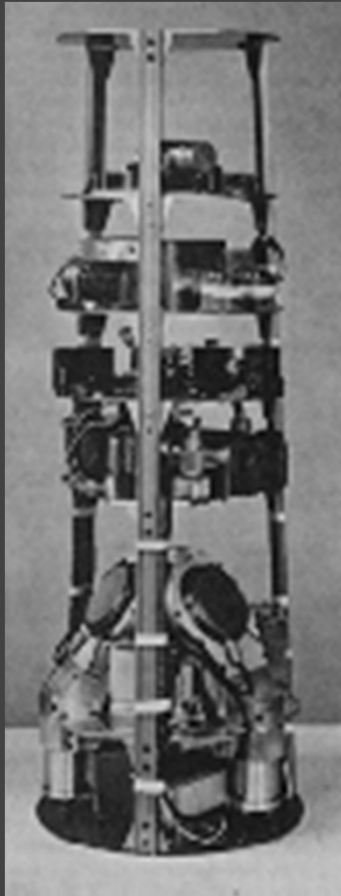


FIG. 1. Number of counts versus azimuth angle. The numbers represent counts accumulated in 350 seconds in each 6° angular interval.

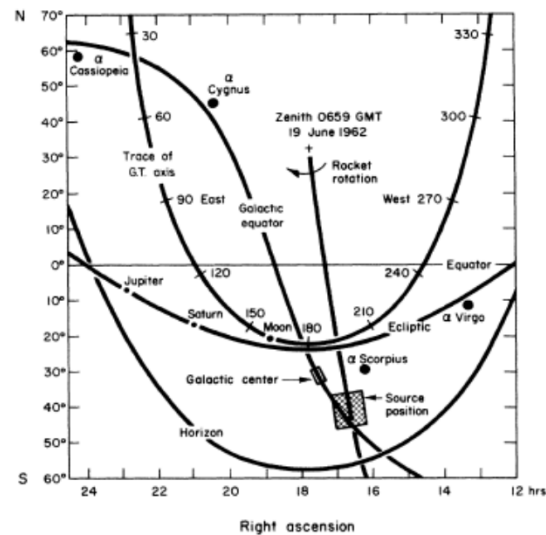
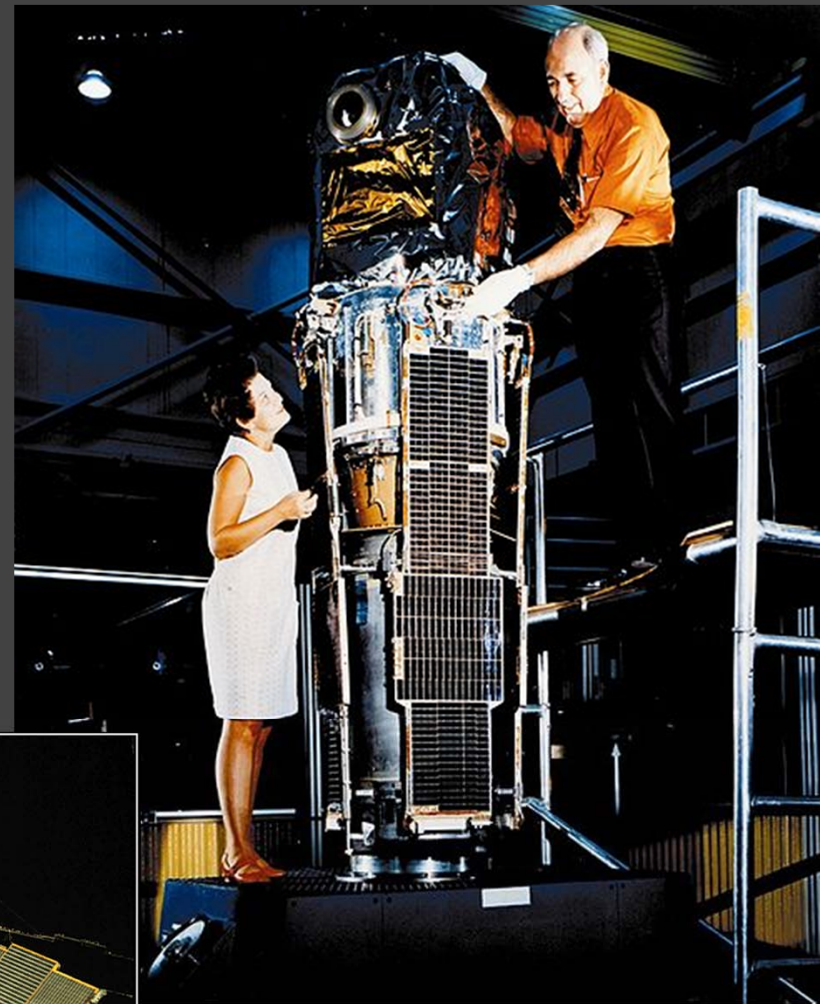
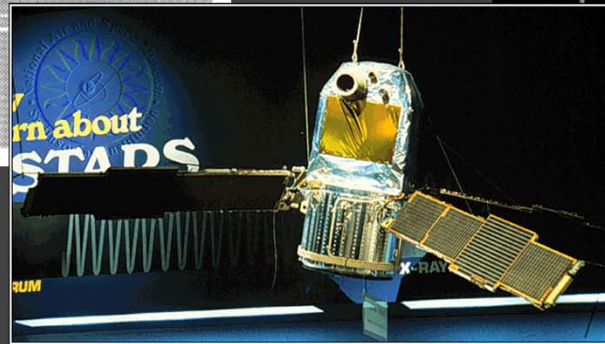


FIG. 2. Chart showing the portion of sky explored by the counters.



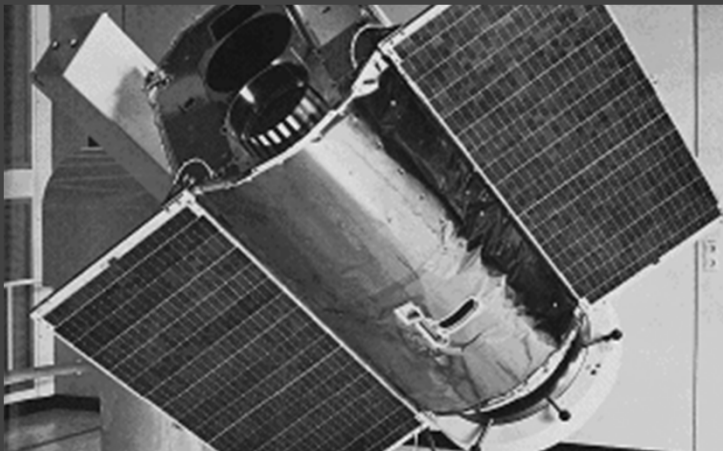
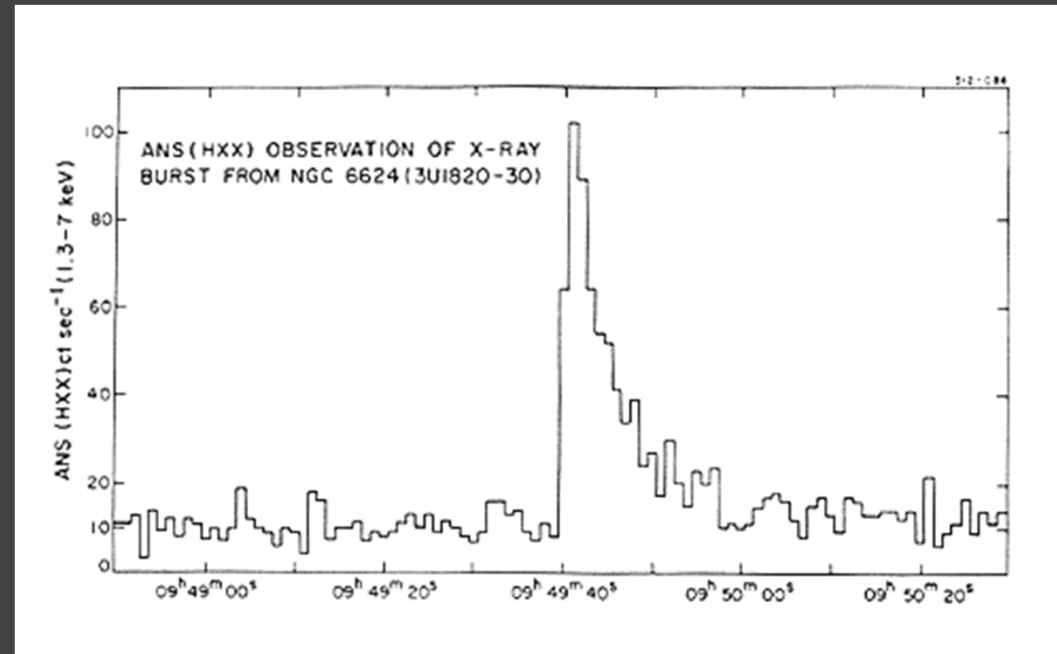
1970-1973: eerste röntgensatelliet Uhuru

- Maakte eerste hemelkaart in röntgenstraling
- Ontdekte circa 100 röntgendubbelsterren
- Ontdekte eerste röntgenpulsar

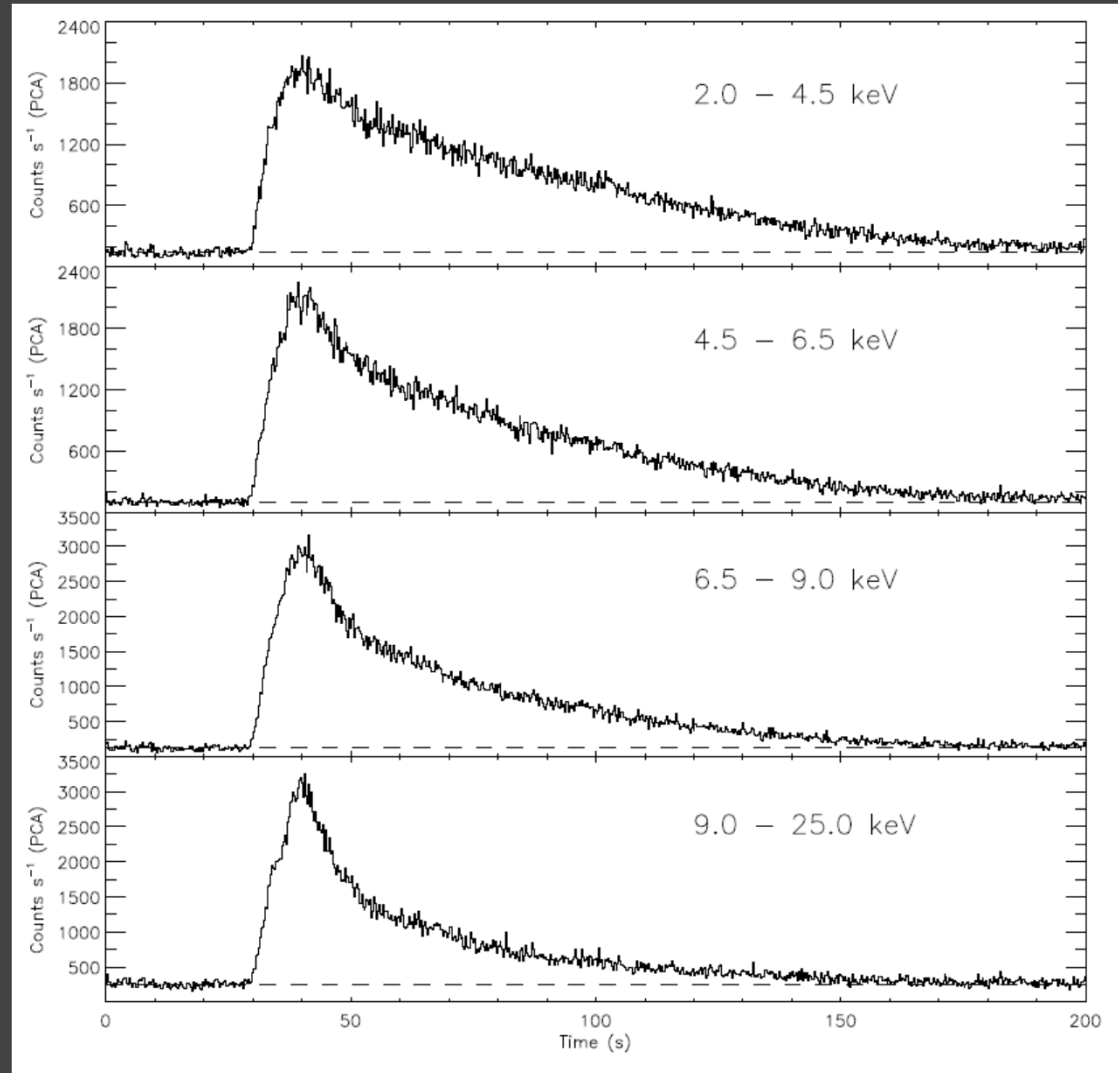


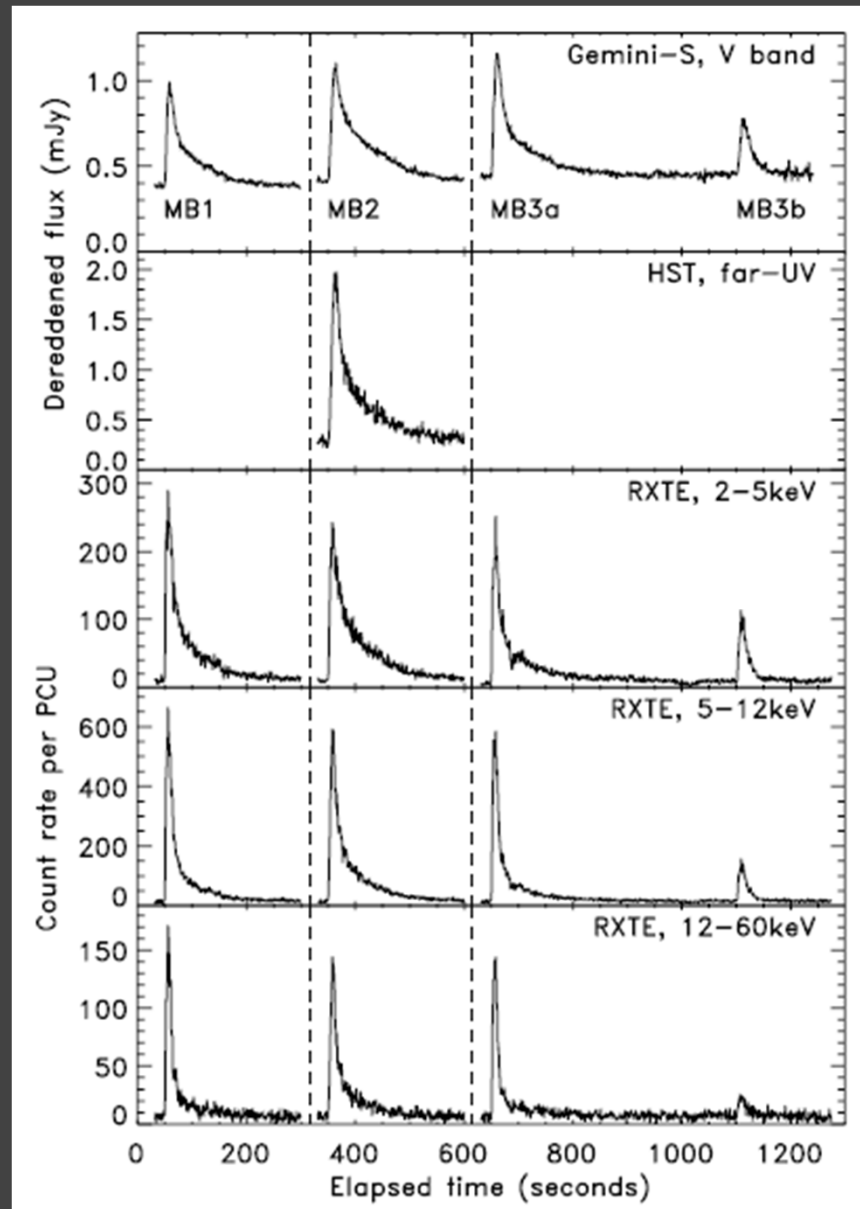
1974: lancering eerste Nederlandse satelliet / ontdekking van X-ray bursts in 1975 door John Heise en Josh Grindlay

- Met Astronomische Nederlandse Satelliet **ANS**, eerste van twee door NL gebouwde satellieten. Gebouwd door Philips, Fokker, SRON en Harvard.
- 1ste 3-assig gestabiliseerde satelliet



1 burst in detail



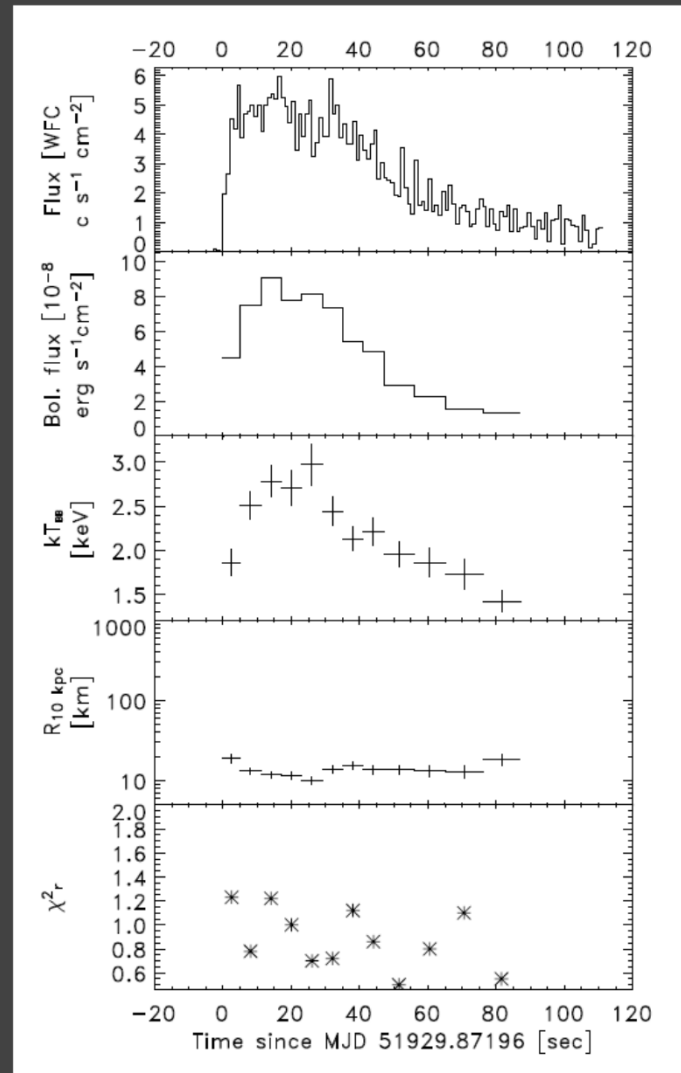


- $\lambda=550$ nm (mag 17)
- 100 nm
- 0.5 nm
- 0.1 nm
- 0.04 nm

Karakteristieken van X-ray bursts

- Snelle piek (binnen enkele seconden)
- Langzame uitdoving (tientallen seconden)
- Repeterend, met wachttijden van uren tot soms wel jaren
- Thermische spectra met temperaturen van tientallen miljoenen graden
- Signalen gezien in optisch t/m röntgenlicht

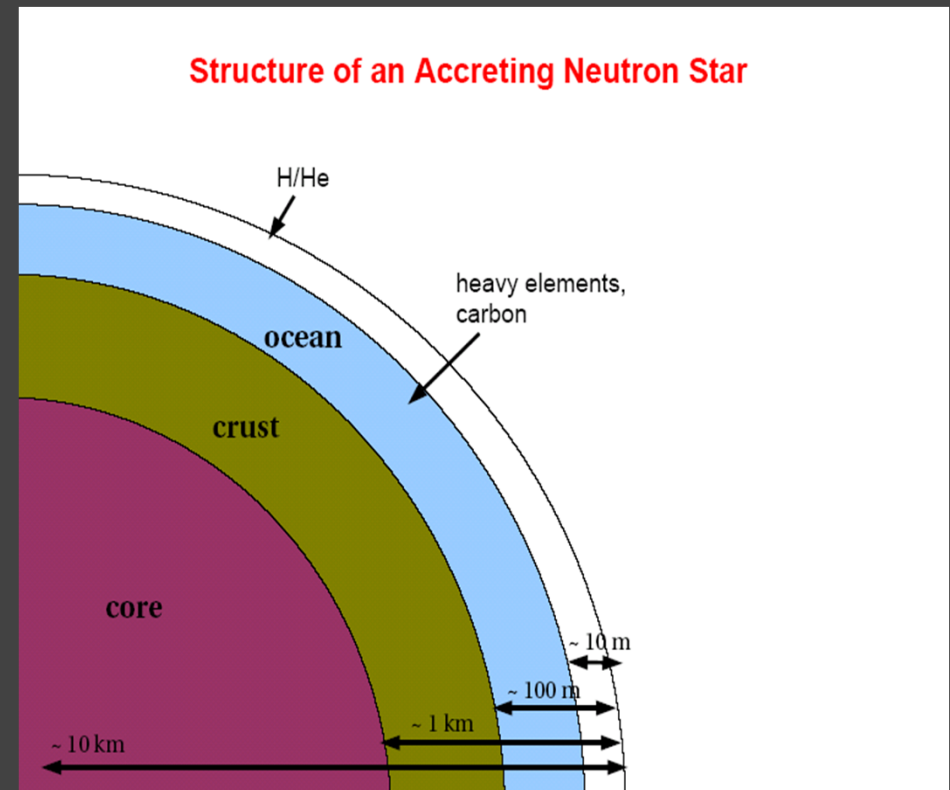
Een burst ontleed



10 km.. →
NS!

Oorzaak - opeenstapeling van nucleaire brandstof

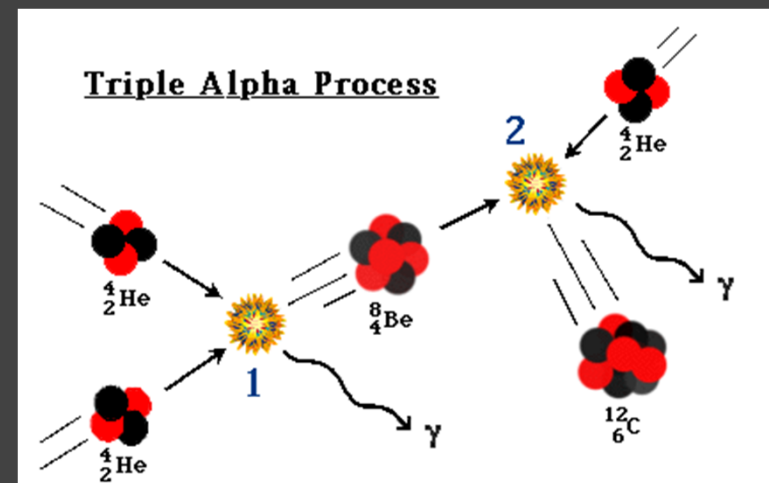
- Accretiesnelheid $1-100 \text{ kg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
- Na enkele uren tot dagen is er een laag van 10-1000 ton per cm^2 met een dikte van ongeveer 1 m
- De druk (evenredig met de dikte) is genoeg voor het in gang zetten van thermonucleaire. Andere processen processen dan in zon, trouwens.



Ontsteking!

- Belangrijkste fusie-reactie:
 $3\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C} + 2\gamma$ ("triple alpha")
- Reactiesnelheid gaat met $T^{40} \rightarrow$
als T 2% groter wordt, is
reactiesnelheid 2 x groter!
- Afkoeling volgens T^4
- \rightarrow verhitting is sneller dan
afkoeling \rightarrow op hol geslagen
proces \rightarrow explosief proces
- 'thermonuclear shell flash'
- Laag verhit tot 1 miljard K,
gevolgd (na opraken brandstof)
door afkoeling dmv uitstraling \rightarrow

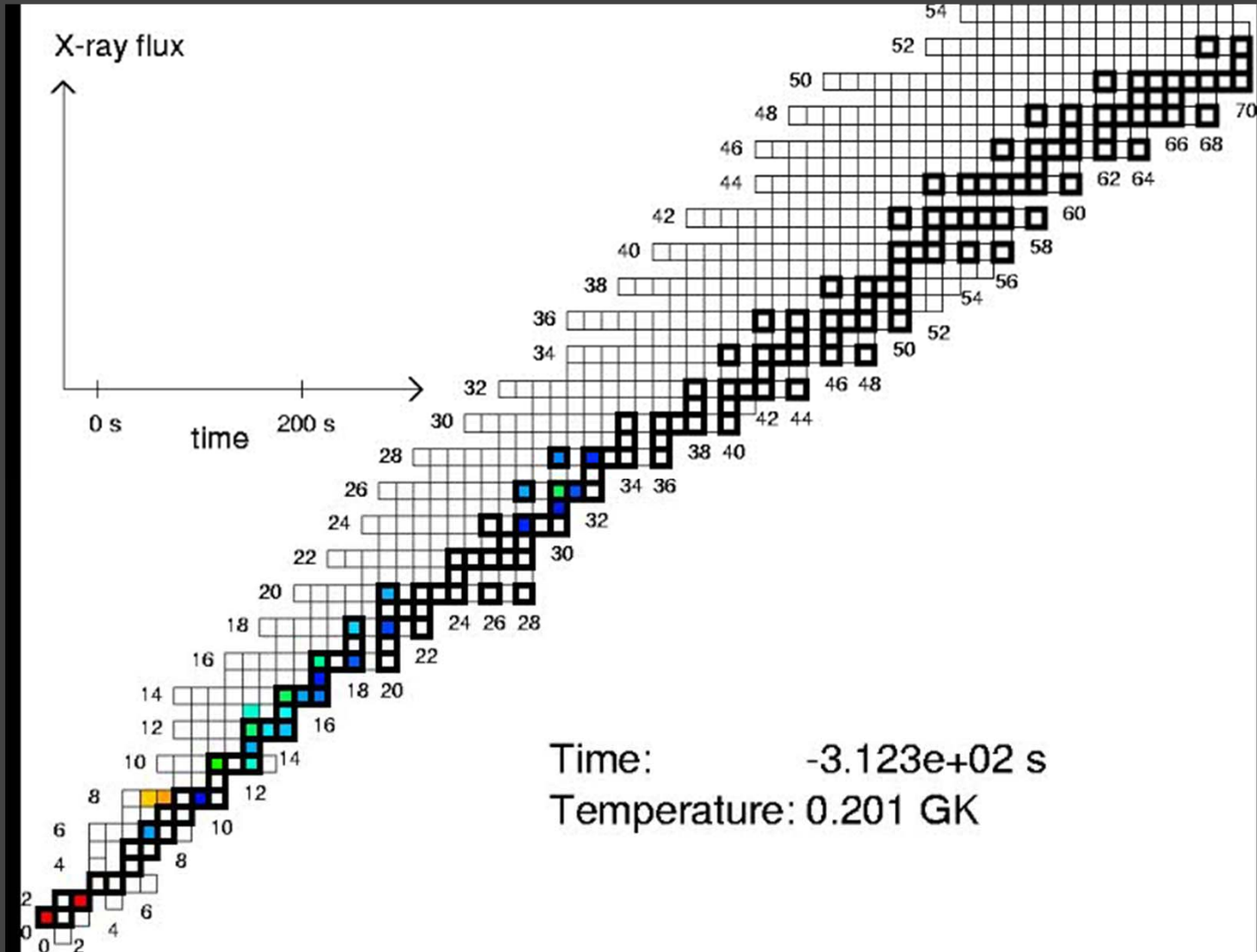
X-ray burst



In werkelijkheid honderden isotopen, zeer complexe reactie !



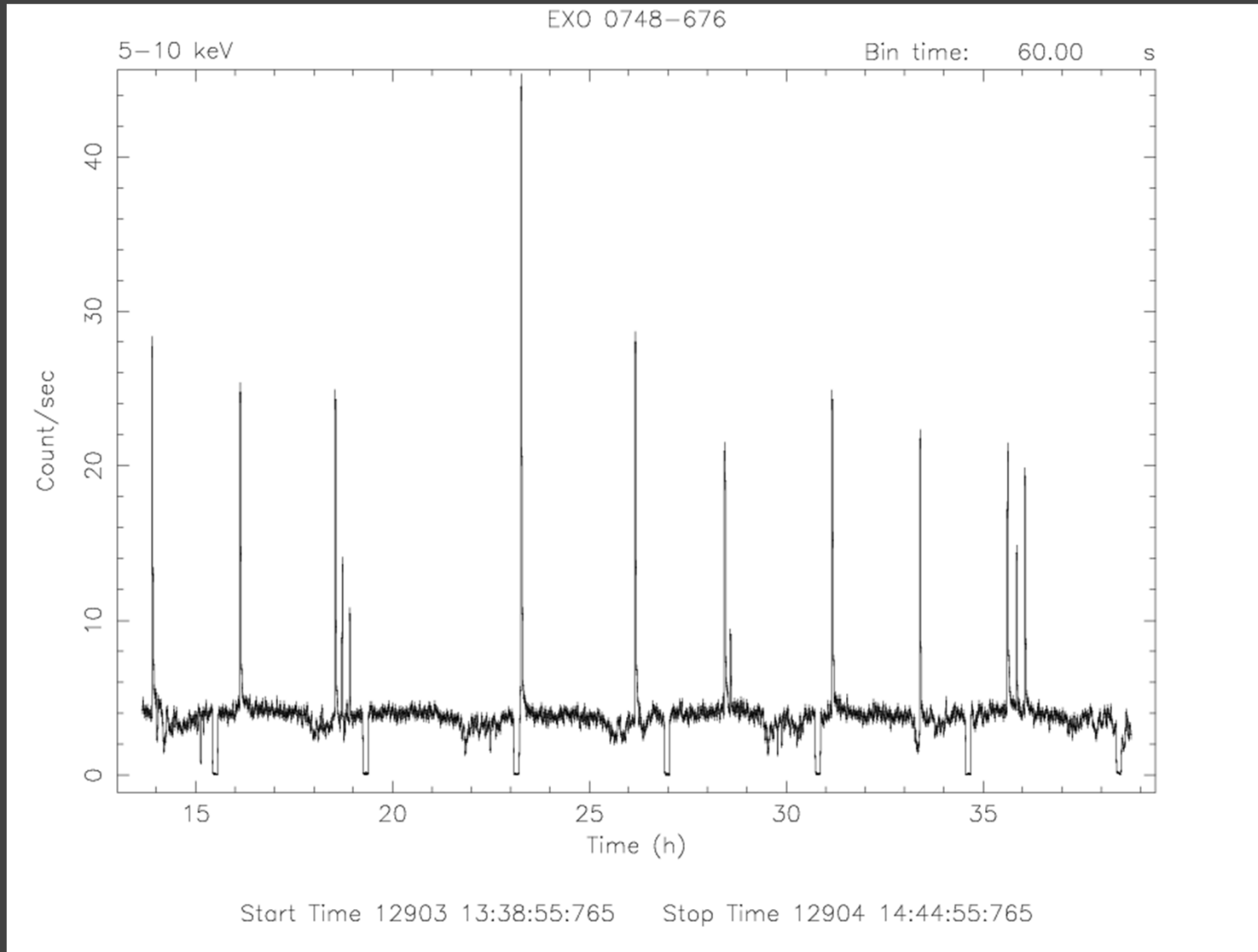
protonen



neutronen

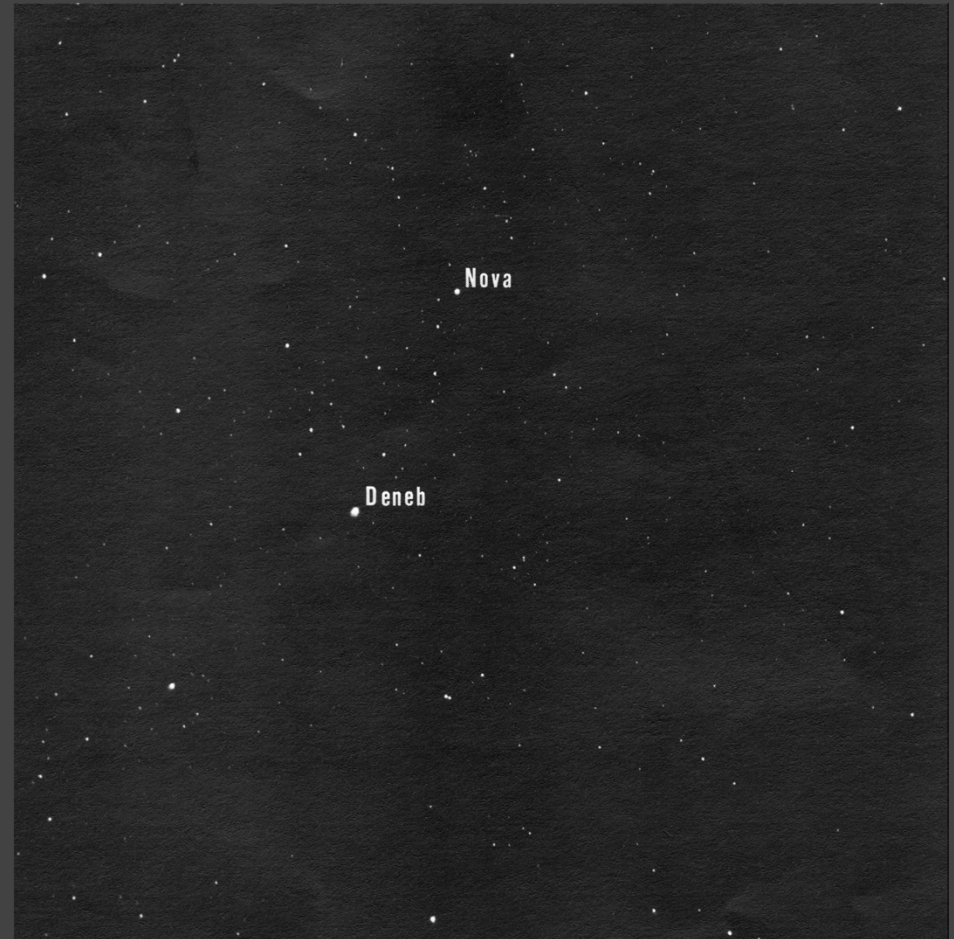


Repetierend proces van opeenstapeling en ontbranding



Analoog verschijnsel op witte dwergen ipv neutronenster

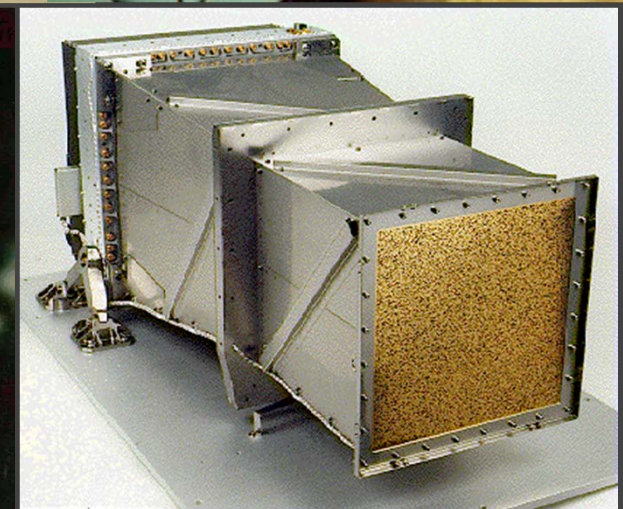
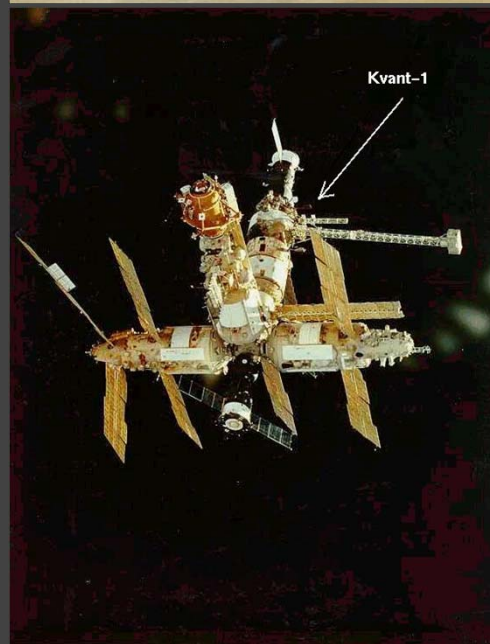
- Klassieke nova!
- Verschillen WD tov NS:
 - Kleinere gravitatieput
 - Optische uitbarsting ipv röntgenuitbarsting
 - Duurt langer voordat druk hoog genoeg is voor ontbranding
 - → langere uitbarstingen, langere wachttijden (miljoen x langer)
 - → hogere energieproductie
 - → veel massaverlies
- In principe zijn dit soort systemen voorlopers van supernova's van type Ia, maar de vraag is hoe massaverlies beperkt kan worden gehouden



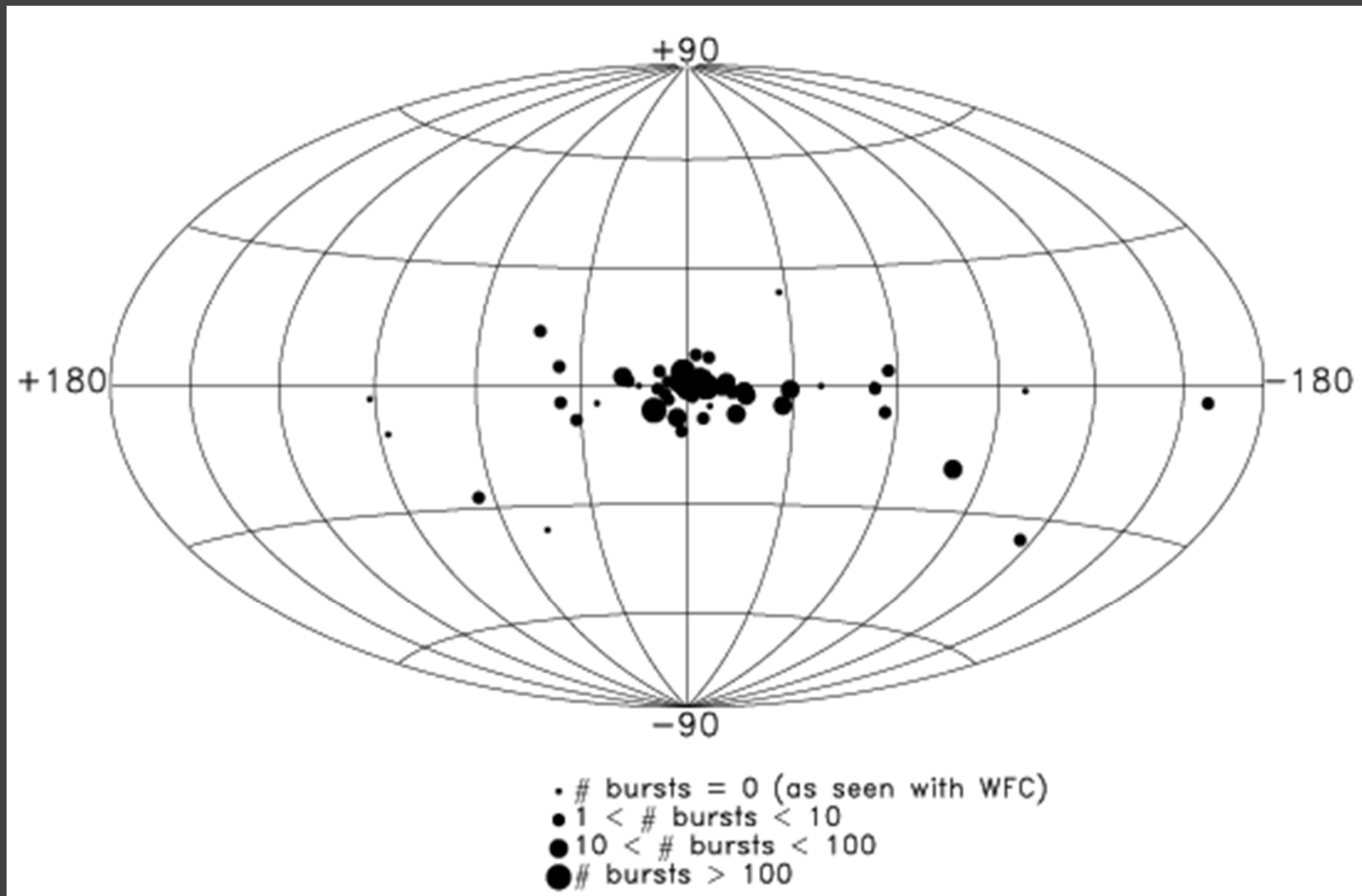
Nova Cygni 1975 – op 1 na helderste nova in NL van 20ste eeuw ($m_v \sim 1.7$). Foto uit Zenit oktober 1975

Nederlandse burst successen

- Ontdekking (Grindlay & Heise 1975) met Astronomische Nederlandse Satelliet **ANS**
- Baanbrekend onderzoek **Walter Lewin** (MIT) **Jan van Paradijs** (UvA)
- Ontdekking van superburst fenomeen in 2000 (Cornelisse et al. 2000) met Italiaans-NL **BeppoSAX** satelliet
- Ontdekking van 29 van de 93 Galactische X-ray bursters (met ANS, Mir-**COMIS/TTM** en BeppoSAX-WFC)

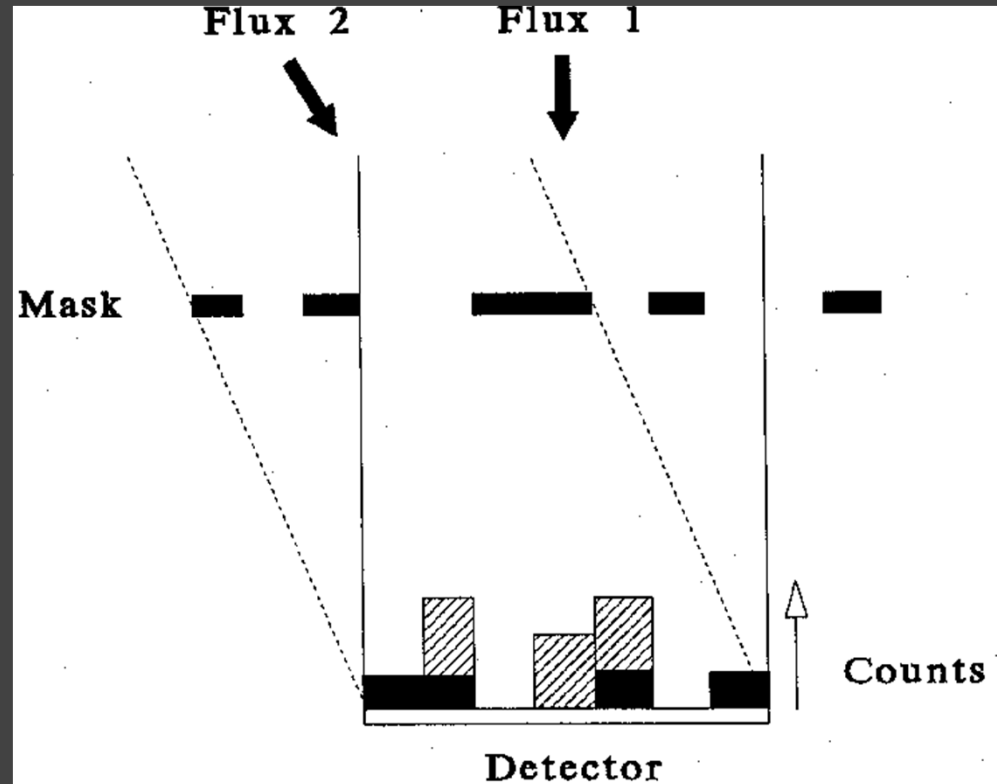


Galactische kaart van bursters



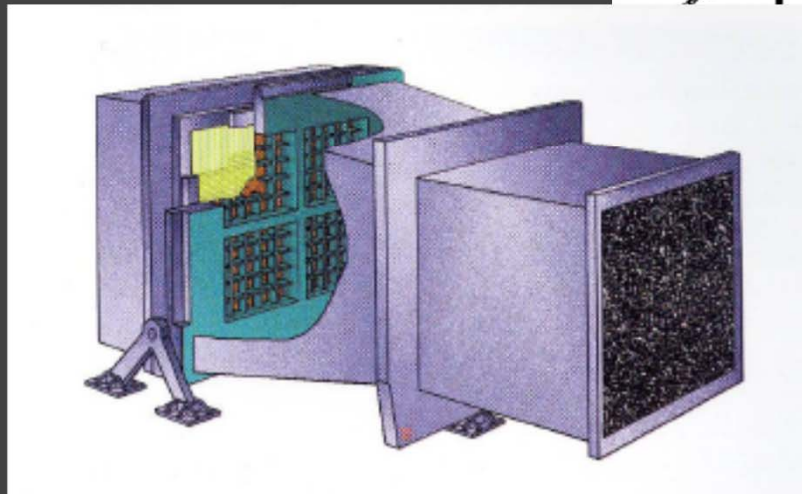
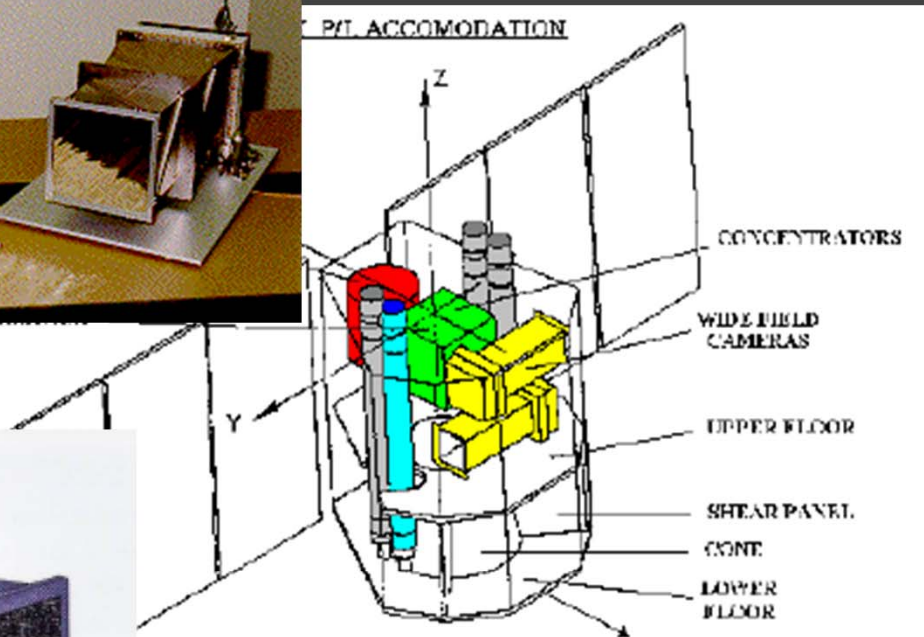
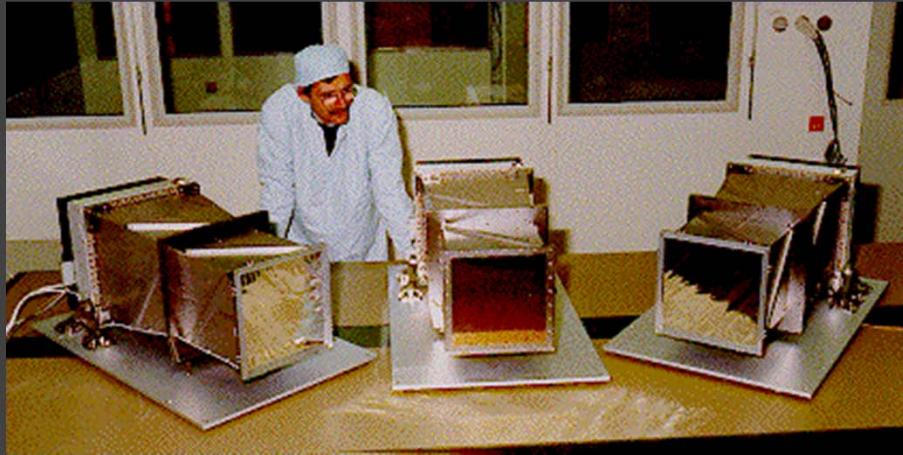
BeppoSAX schaduwmaskercamera – het principe

- Uitgangspunt: camera obscura
- Gaatjesgrootte bepaalt resolutie
- Aantal gaatjes bepaalt gevoeligheid
- Indirecte (2-staps) afbeelding
- Kwaliteit van reconstructie in sterke mate bepaald door patroon van gaatjes
- Aantal af te beelden objecten moet kleiner zijn dan aantal gaatjes
- Voordelen:
 - Goedkoop
 - Groot beeldveld mogelijk
- Nadelen:
 - Beperkte gevoeligheid
 - Grote detector nodig
- Populair afbeeldingsprincipe: momenteel in gebruik bij 6 ruimtetelescopen

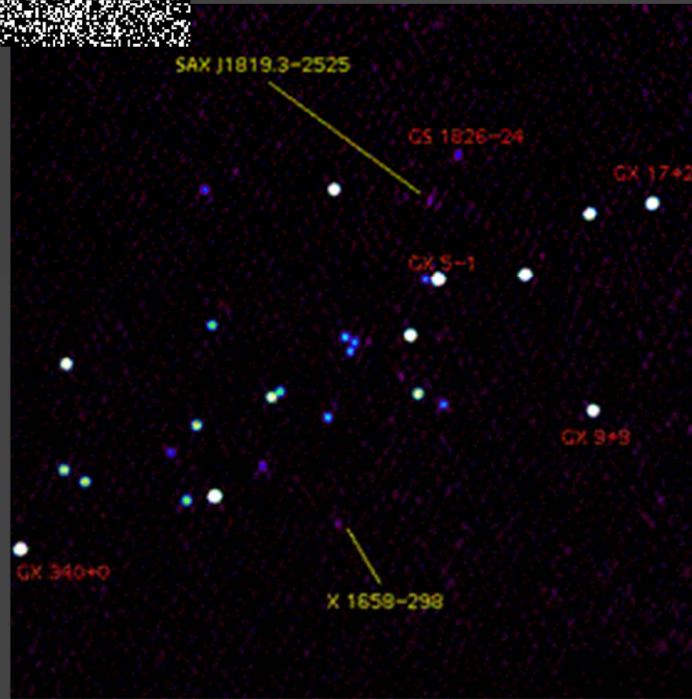
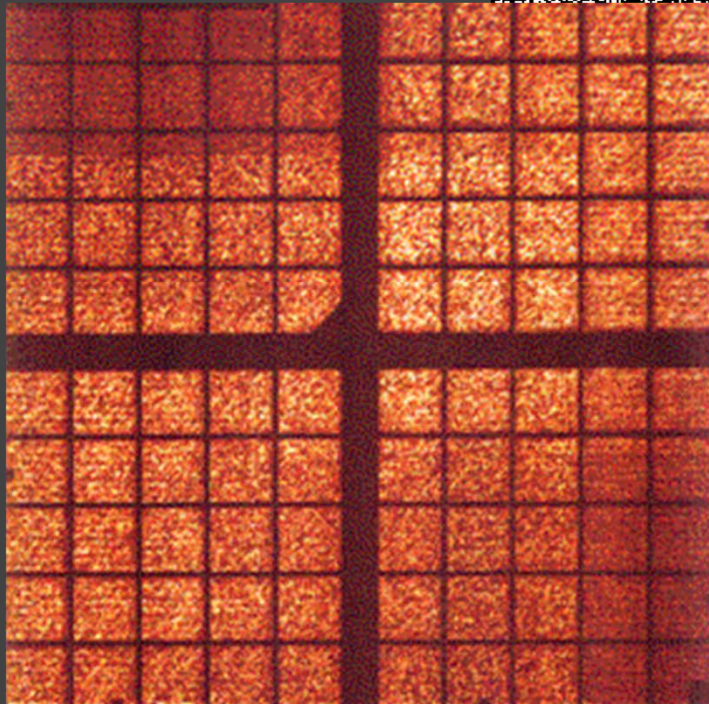
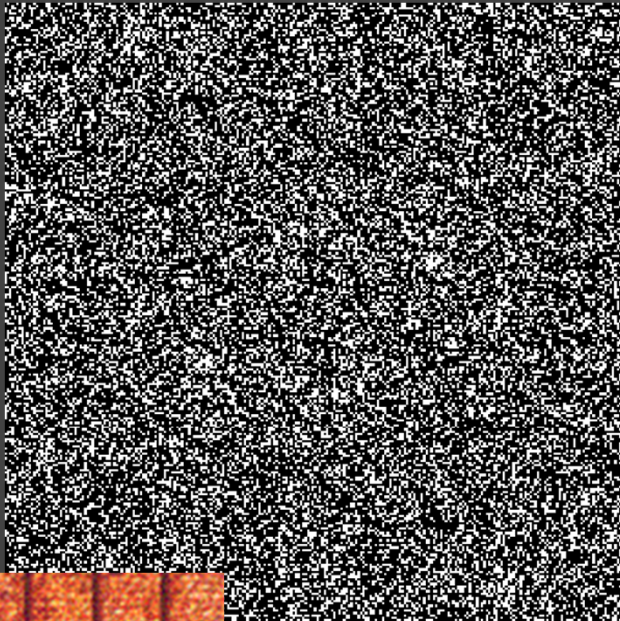


Voor een inleiding zie
<http://www.sron.nl/~jeanz/cai>

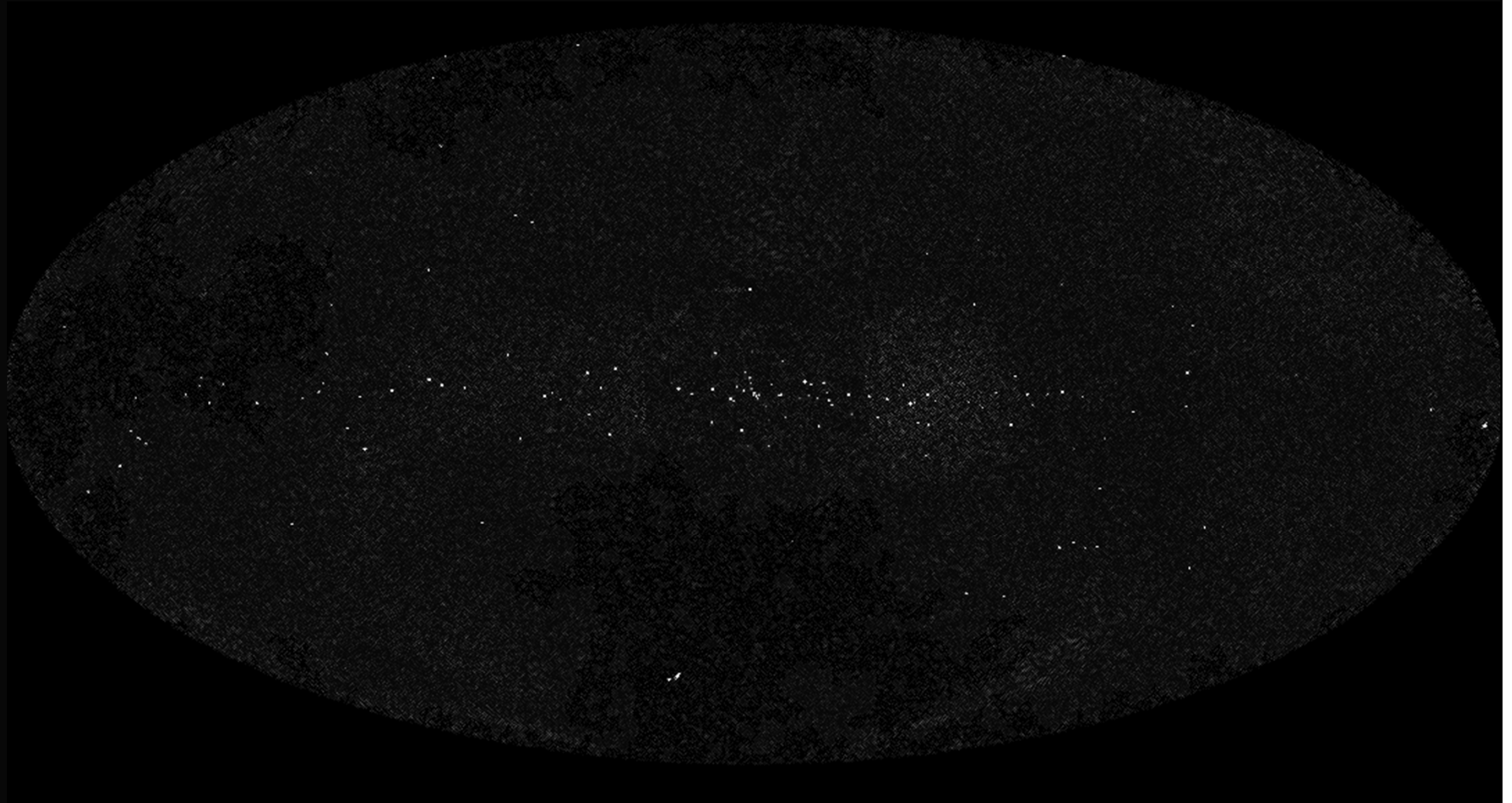
Bepposax Wide Field Cameras (WFCs)



1350 kg, 480 kg payload
800 W, 260 W payload



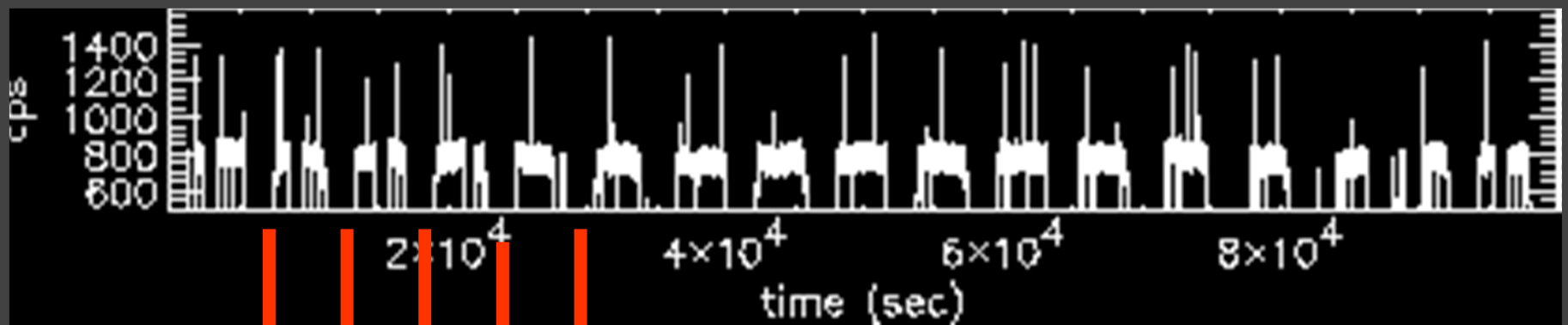
Totaalkaart BeppoSAX-WFC waarnemingen 1996-2002
(galactische coördinaten)



368 sterren: 106 LMXBs, 47 HMXBs, 80 galaxies, 35 galaxy clusters..

1 dag naar het Melkwegcentrum kijken..

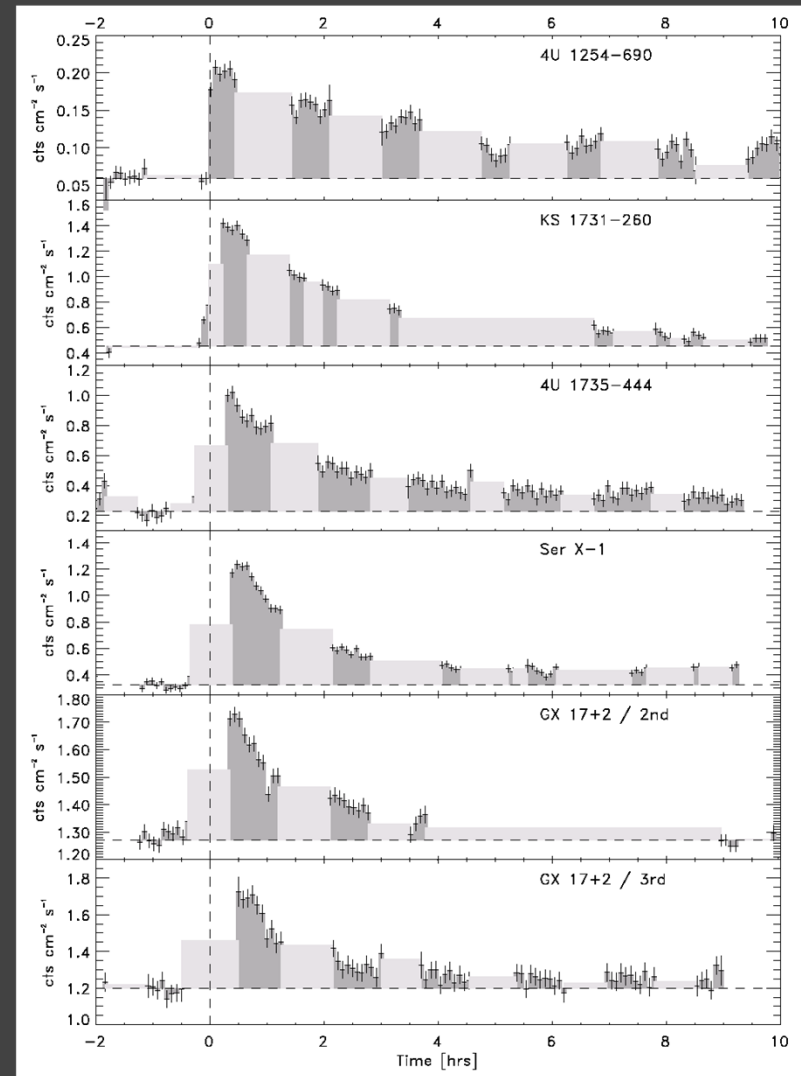
- Cps = counts per second = aantal fotonen dat per seconde registreerd wordt (lichtkromme dus)



- Gaten tgv aardoccultatie

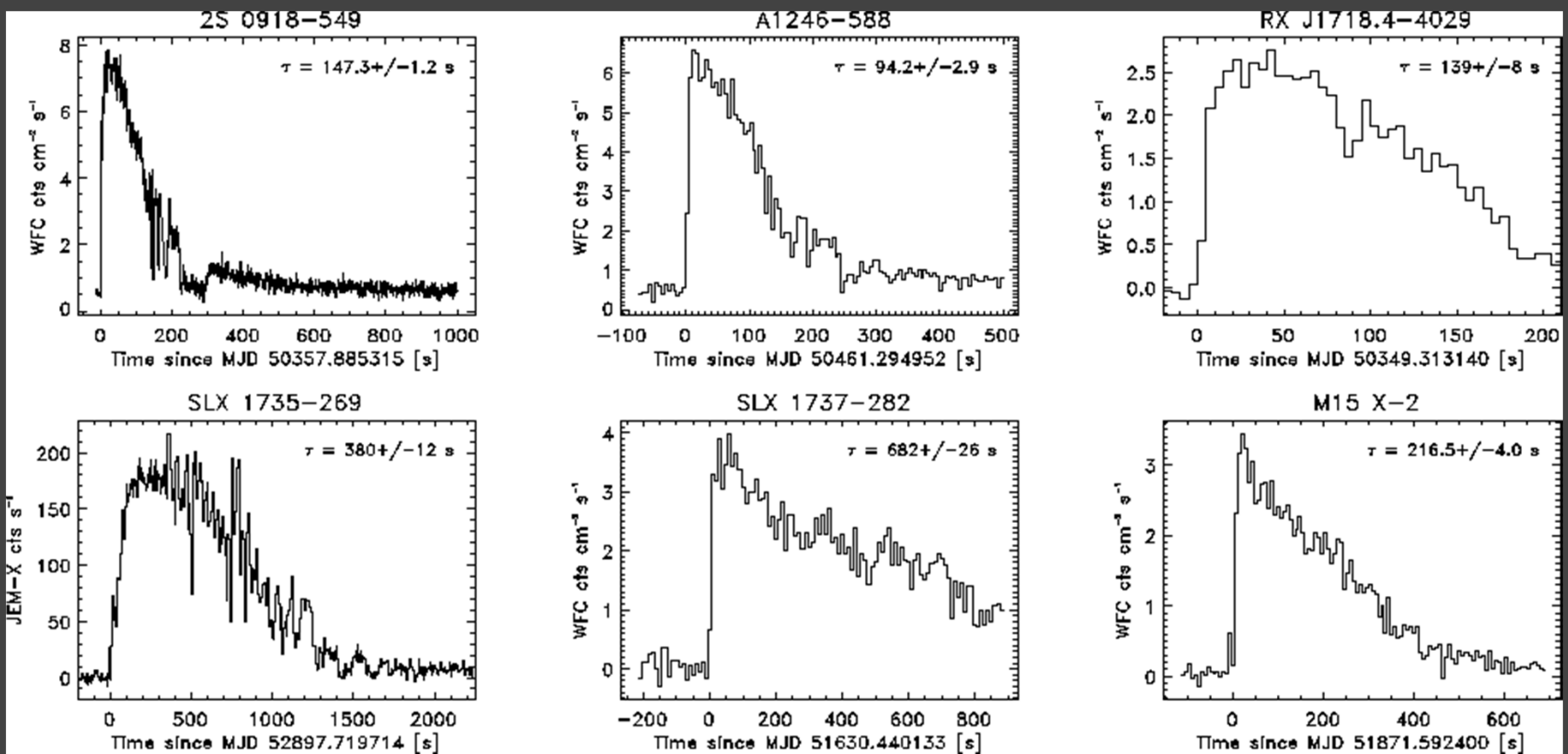
In 2000..

- Promovendus Remon Cornelisse zag iets vreemds in gegevens uit 1996: een opvlamming binnen enkele seconden van een bekende burster met een **uitdooftijd van uren** ipv minuten.
- **'Superburst'** !
- Verklaring werd in 2002 gevonden: dit is geen H/He bom, maar een koolstofbom!



Later realiseerden we ons nog meer..

- Uitdooftijd van half uur.
- 'Intermediate duration burst'
- Verklaring: normale bursts op koude neutronensterren



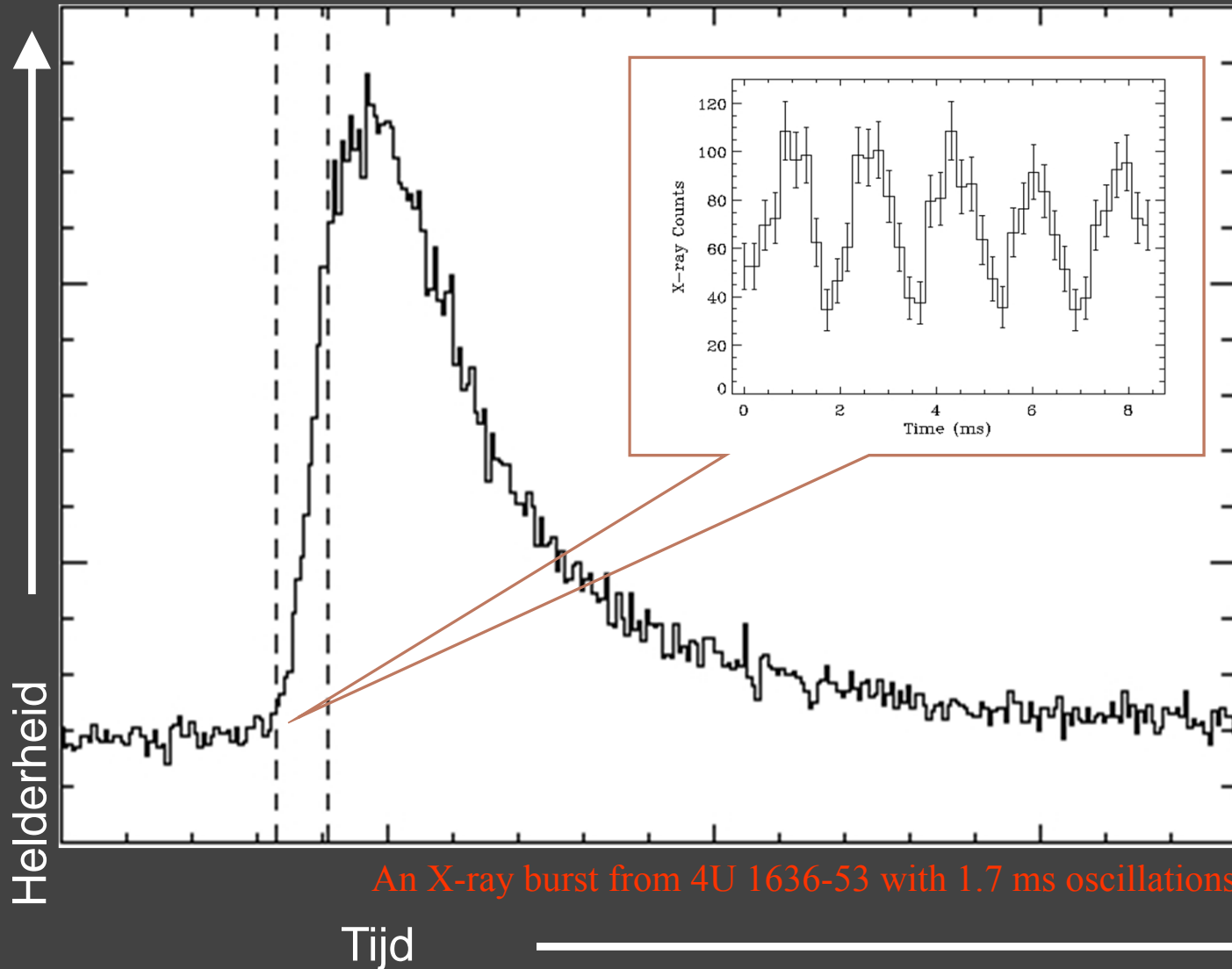
Statistieken

Burstende neutronensterren:	93 (soms maar 1 burst), plus 2 gezien in Andromeda.
Geziene bursts:	11 duizend, sinds 1975
Grootste helderheid:	Equivalent aan $V \sim 5$ in röntgen (op een afstand van 4000 lichtjaar)
Hoogste lichtkracht:	1 miljoen maal de zon
Grootste energie-output:	30 jaren zonneschijn, of 1 miljard x miljard atoombommen

Uitbarstingen in het heelal

Type	Typische duur	Karakteristische straling	Peak lichtkracht (max)	Peak E-output (max)
Zonnevlam	< 1 s tot 1 uur	X	10^{28} erg s ⁻¹	10^{23-32} erg
Harde röntgennova	weken	X	10^{33-38}	10^{40-45}
Accretie X-ray bursts	30 s	X	10^{38}	10^{40}
Dwergnovae	weken	UV	10^{38}	10^{44}
Zachte röntgennova	weken	X	10^{38}	10^{45}
Thermonuclear X-ray bursts	100 s	X	10^{38}	10^{39}
Superbursts	1 dag	X	10^{38}	10^{42}
Klassieke novae	weken	UV	10^{38}	10^{46}
Eruptieve LBV SN oplichters	decaden	Opt	10^{40}	10^{51}
SGR bursts	100 ms	X	10^{42}	10^{41}
Supernovae	maanden	Opt	10^{43}	10^{51}
Stellare getijde-disruptie	jaren	UV	10^{45}	10^{52}
SGR gigant bursts	500 ms	X	10^{47}	10^{46}
GRBs (prompt)	100 s	γ	10^{53} (iso)	10^{54} (iso)

Burst oscillaties



An X-ray burst from 4U 1636-53 with 1.7 ms oscillations.

- 25 accreterende neutronensterren hebben rotatieperiodes tussen 2 en 50 milliseconden → allemaal supersnelle tollen

Metingen van straal R van neutronenster mbv X-ray bursts

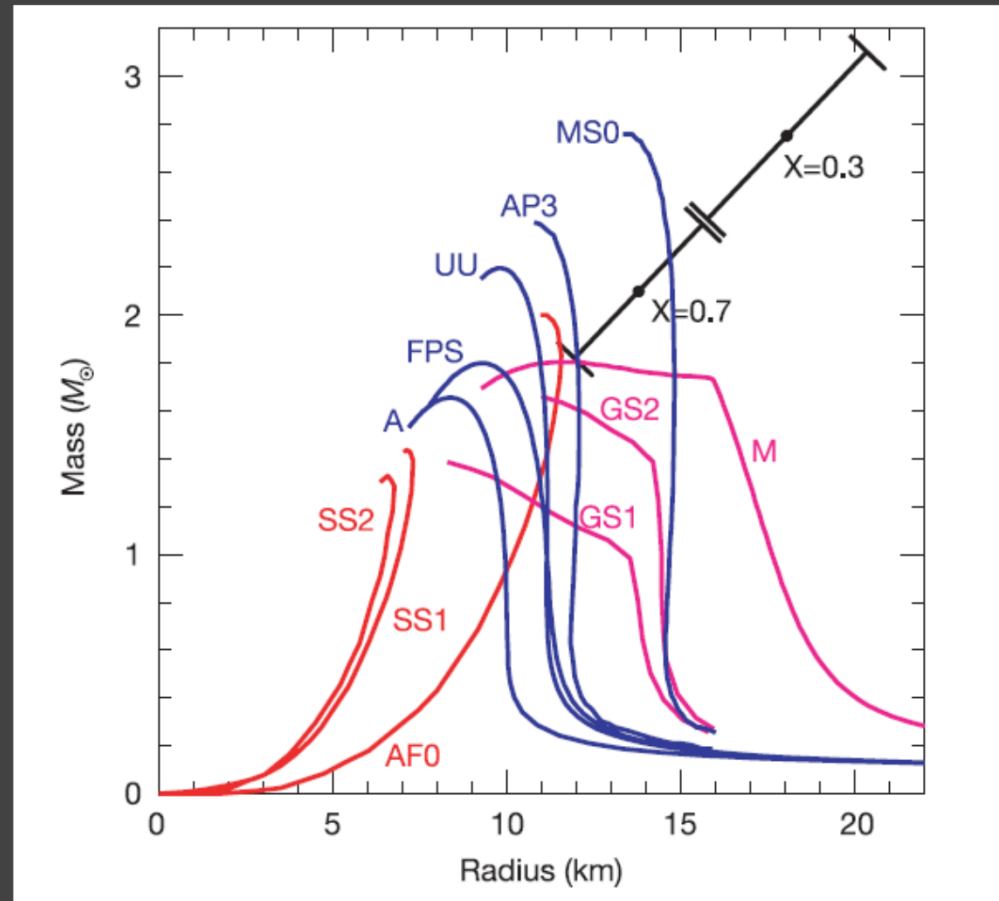
- Gebruik bursters in bolhopen → afstand bekend
- Meet temperatuur T
- Meet flux en corrigeer voor afstand: bepaal totale lichtkracht L
- Wet van Stefan-Boltzmann:
 - $L = \text{constante} \times T^4 \times 4\pi R^2 \rightarrow$ bepaal straal R
- Moeilijkheden:
 - Afstand heeft nauwkeurigheid van niet beter dan $\sim 20\%$
 - T-meting is niet recht-toe-recht-aan

Andere diagnostiek van X-ray bursts:
meet gravitationele roodverschuiving

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}$$

$$(M/R = (c^2/2G) [1-(1+z)^{-2}])$$

Combineren van ruwe R en M/R meting



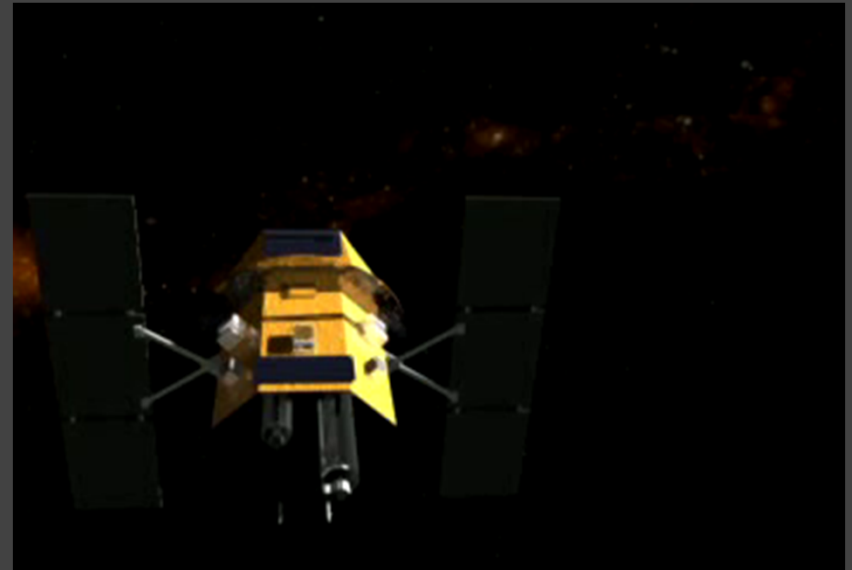
Hoe nu verder? → super-Eddington flitsen!

- De flux kan gemakkelijk zo groot worden, dat de atmosfeer door de stralingsdruk gaat borrelen en zelfs opgeblazen wordt
- Een deel weggeslingerd
- Het borrelen brengt zware as in de fotosfeer → sterke spectraallijnen en absorptiekanten!

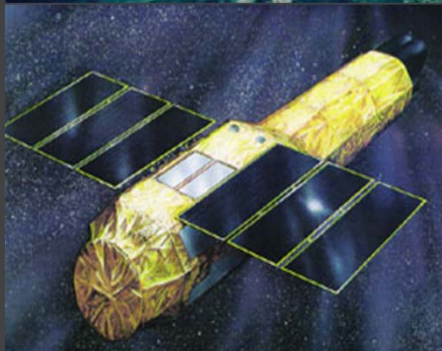
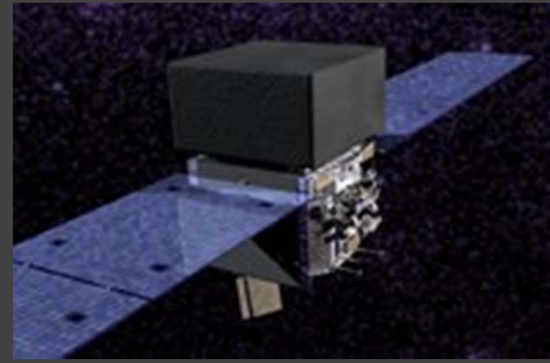


Hoe?

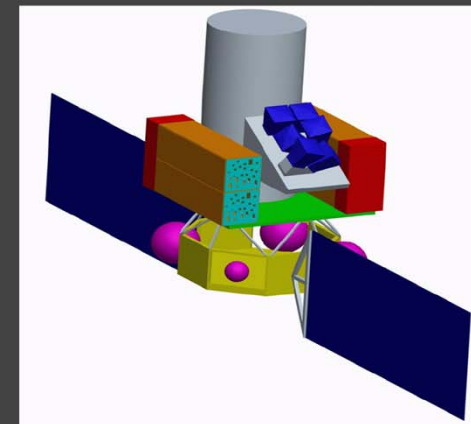
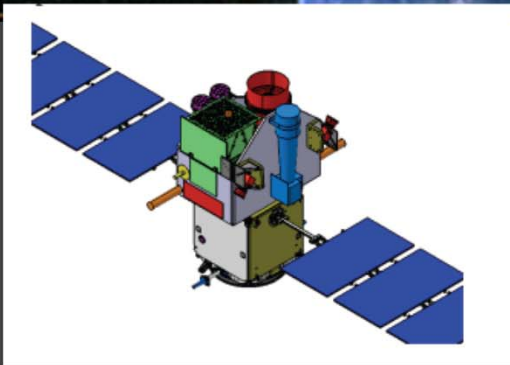
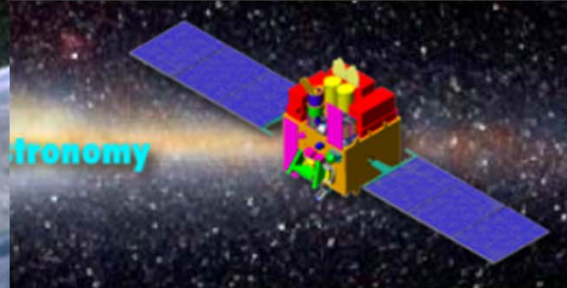
- Moeilijkheid: flitsen zijn zeer zeldzaam (dagen tot maanden wachten)
- Te duur om 1 telescoop continu op neutronenster gericht te houden
- Mogelijke oplossing: gebruik snelle automatische herorientatie capaciteit van Swift, en meet met röntgen CCD



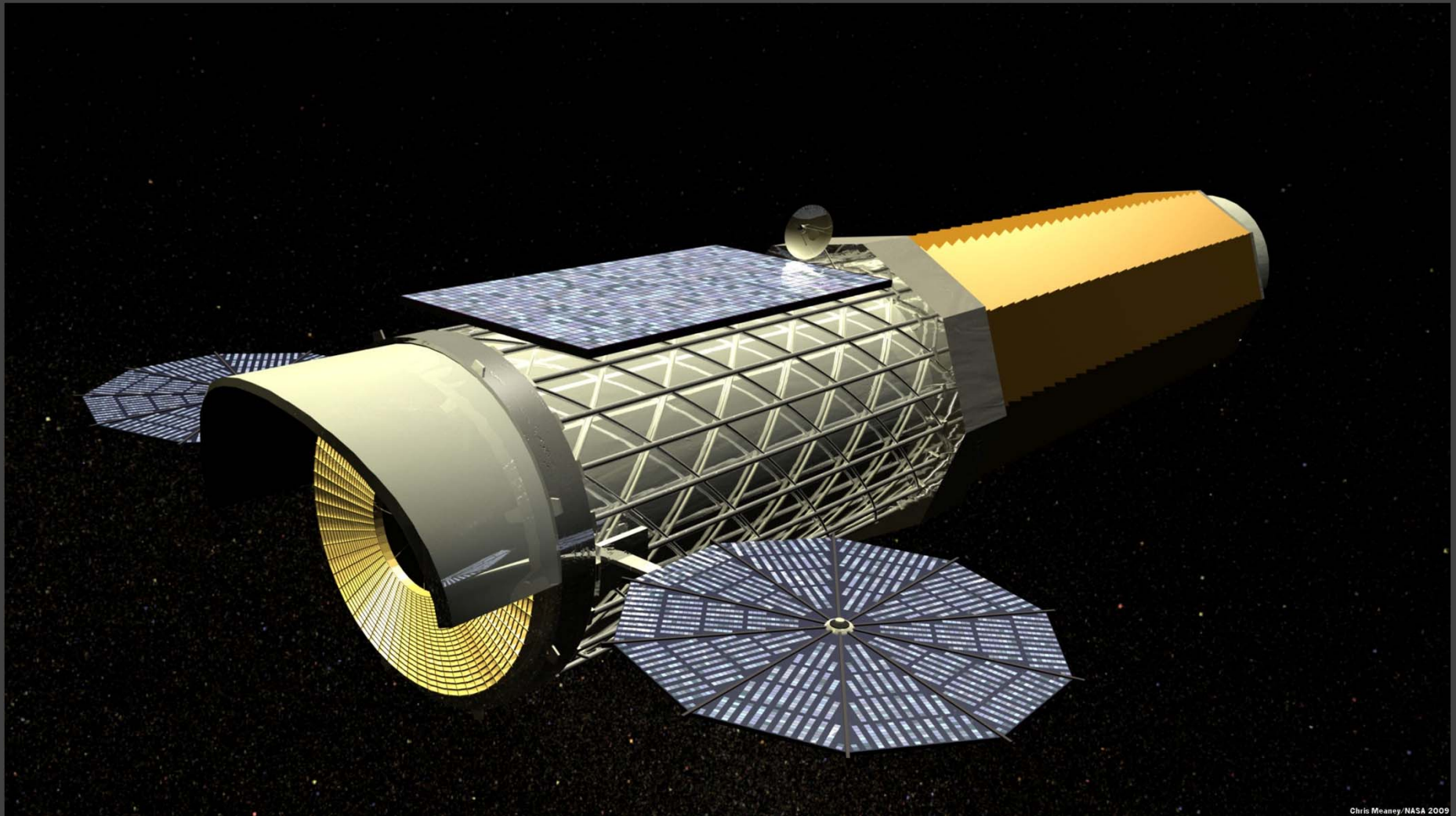
9 röntgen-observatoria functioneel nu (VS, EU, IT, JP)



De komende vier jaar nog 6 of 7 erbij



Maar, ooit, de grote stap naar 'meter-klasse telescopen':
IXO (EU/VS/JP) of GRAVITAS, LOFT, ORIGIN

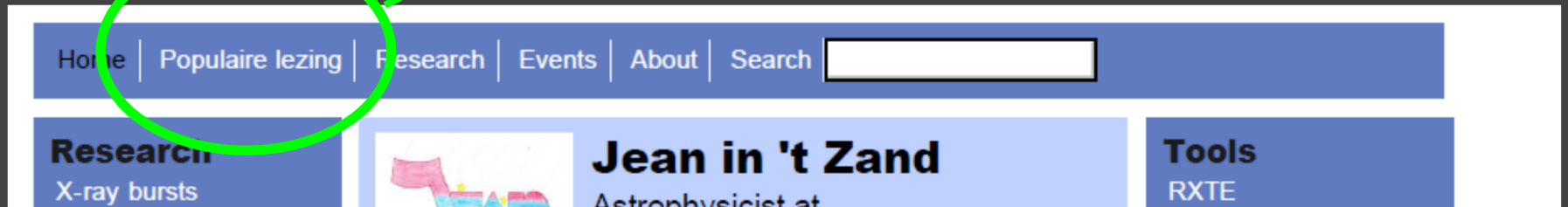


Chris Meaney/NASA 2009

Dank U!


Nog een keer bekijken?

www.sron.nl/~jeanz



Home | Populaire lezing | Research | Events | About | Search

Research
X-ray bursts

 **Jean in 't Zand**
Astronomer at

Tools
RXTE