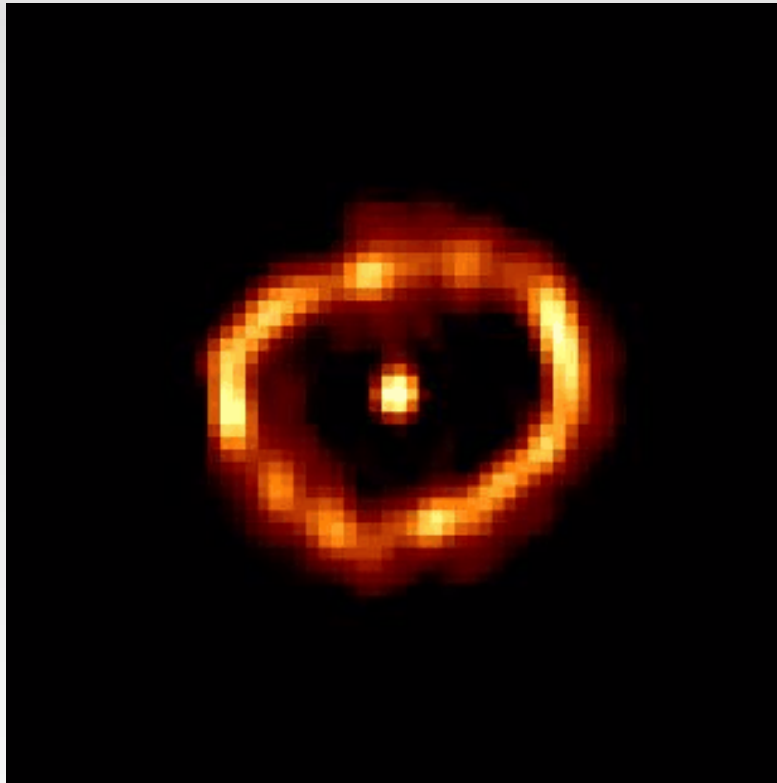


L7 Explosioner från vita dvärgar och neutronstjärnor



Vita dvärgar

- Slutstationen för stjärnor med $M < 8 M_{\text{sol}}$ (vilket är $\sim 98\%$ av alla stjärnor).
- Solens öde om ~ 5 miljarder år.
- Vita dvärgar små "stjärnor" där fusionen avstannat men som hålls uppe av elektronernas **degenerationstryck** (se Claes lektioner).



Historia I

- **1910** : Den första vita dvärgen (**40 Eridani B**) upptäcks. "Het men ändå ljussvag → måste vara en mycket *liten* stjärna!"
- Ju varmare någonting är desto mer **strålar det per ytenhet**.

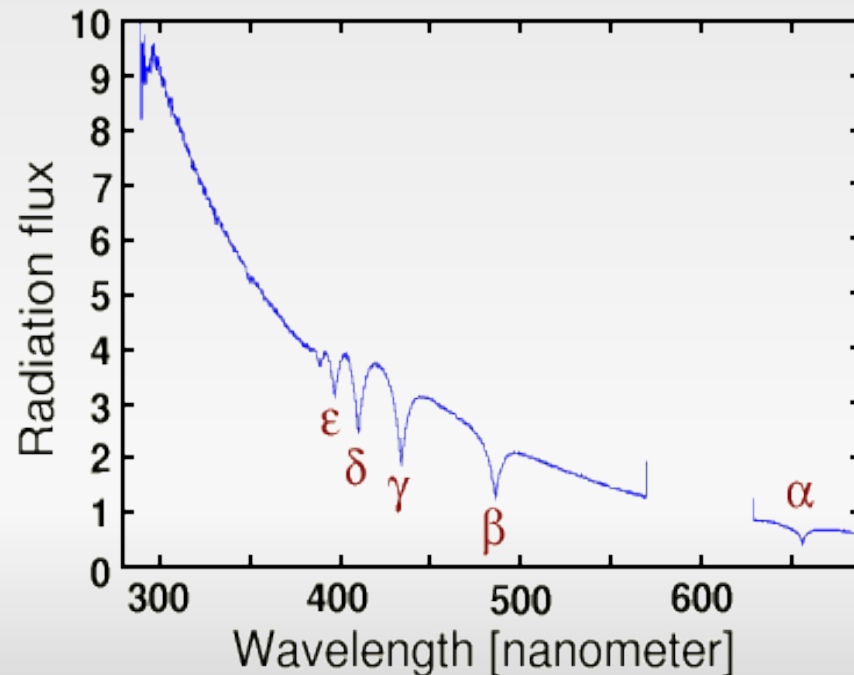
En konstant ($5.67 \cdot 10^{-8}$)
↓

$$L_A = \sigma T^4 \quad L_{\text{tot}} = L_A * \text{Area}$$

- För att en stjärna ska kunna vara **het** men ändå **ljussvag** måste därför den **totala arean** vara liten, dvs det måste vara en mycket liten stjärna.

Historia II

- **1915** : **Sirius B** upptäcks på samma sätt.
- **1922** : **Wilhelm Leuten** myntar namnet vit dvärg.
- **1925** : **Allmän relativitetsteori bekräftas** för Sirius B (gravitationell rödförskjutning av ljuset)



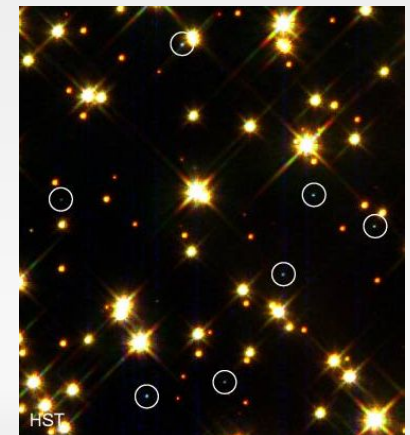
*Spektrallinjerna från Sirius B är lite rödförskjutna (med cirka 0.1 nm). Detta är pga att tyngdkraftfältet på en vit dvärgs yta är starkt och orsakar **gravitationell tidsdilatation** i det oscillerande elektromagnetiska fältet.*

Historia III

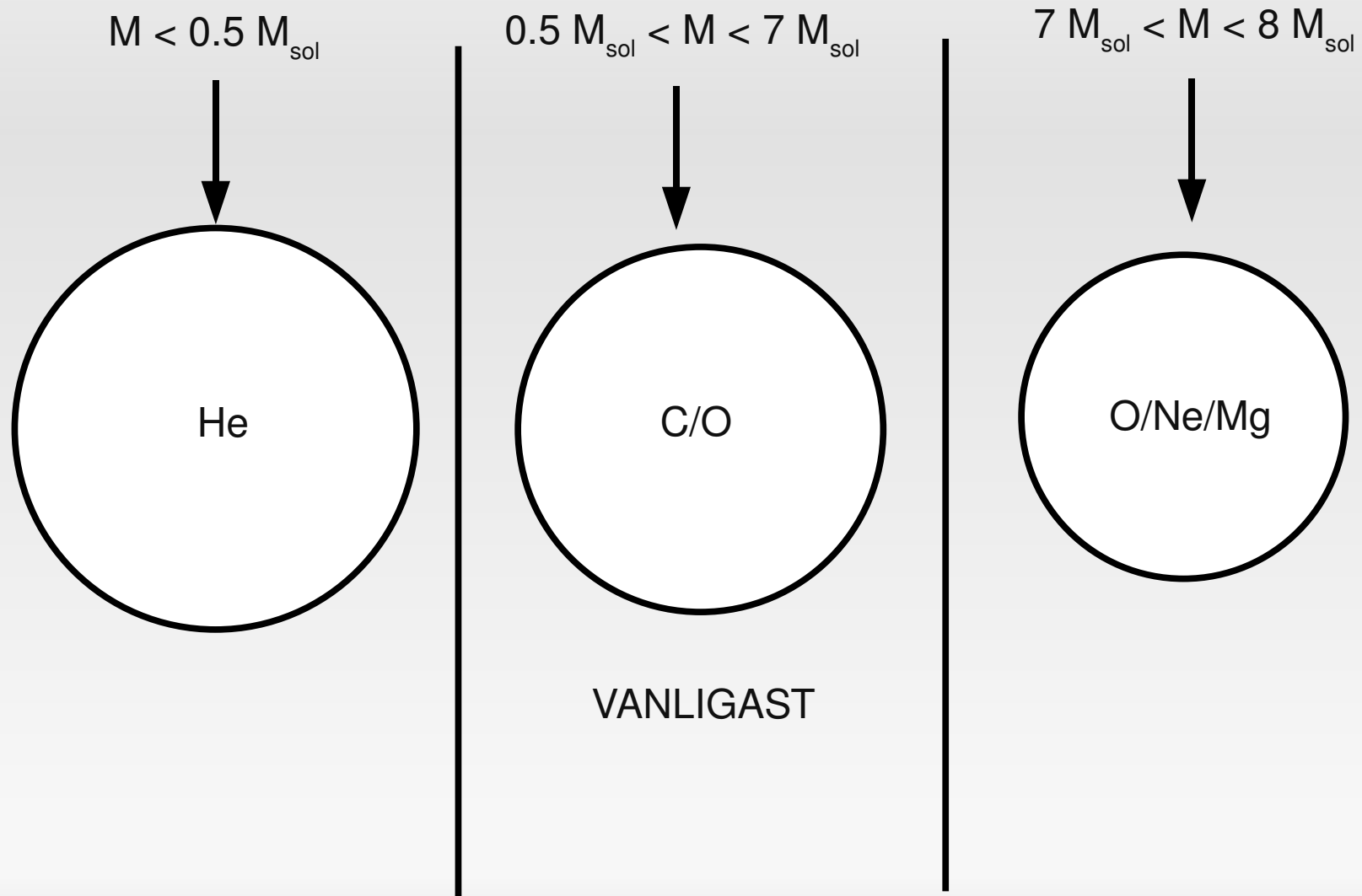
- **1926 : Ralph Fowler** visar hur den nya kvantmekaniken kan förklara hur vita dvärgar hålls uppe (genom *degenerationstryck*)
 - $N_e = N_p \sim 1 M_{\text{sol}} / m_p \sim 10^{57}$
 - $V \sim V_{\text{jord}} \sim R_{\text{jord}}^3 \sim 10^{21} \text{ m}^3$
 - $V_{\text{pp}} = V/N \sim 10^{-36} \text{ m}^3$
 - $dx \sim V_{\text{pp}}^{1/3} \sim 10^{-12} \text{ m}$
 - Heisenberg $dv \sim h/(m_e * dx) \sim \mathbf{0.5 c !}$

Historia IV

- **1931** : Chandrasekhar visar att vita dvärgar kan inte vara mer massiva än $\sim 1.4 M_{\text{sol}}$: över denna gräns blir elektronerna relativistiska ($v \sim c$), se föregående sida) och blir då sämre på att upprätthålla trycket.
- **2010** : Över 10,000 vita dvärgar är nu kända.



Tre typer av vita dvärgar



Notera att **större massa** innebär **mindre radie** – en ovanlig egenskap som degenererad materia har!

VD av helium

- Man tror att de allra minsta stjärnorna ($M < 0.5 M_{\text{sol}}$) når ett stabilt degenerat tillstånd redan innan heliumförbränning kommer igång. De skapar aldrig kol och syre utan bildar då **He-vita dvärgar**.
- Men en $0.5 M_{\text{sol}}$ stjärna har en livstid på hundratal miljarder år : mycket större än universums ålder (13.7 miljarder år).
- Äkta He-vita dvärgar borde alltså ännu inte hunnit skapas!

VD av helium

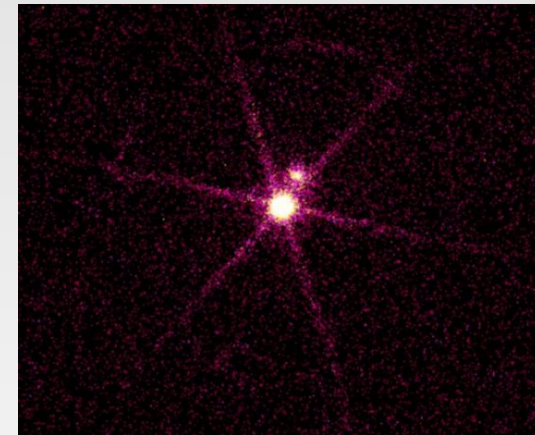
- Men trots det har man observerat just sådana.
- Man kan förklara denna paradox genom att anta att mer massiva föregångare förlorat en ovanligt stor del av sitt material (via **stjärnvindar** eller en massöverföring till en **kompanjonstjärna**) och kommit av sig när heliumförbränning skulle starta.

VD av O/Ne/Mg

- Man tror att de mest massiva stjärnor som *inte* blir supernovor ($M \sim 7-8 M_{\text{sol}}$) även lyckas förbränna sitt kol (till neon och magnesium).
- De bildar då **O/Ne/Mg-vita dvärgar**.
- Sådana har observerats precis som He-vita dvärgar.
- Notera att syret förbränns fortfarande inte.

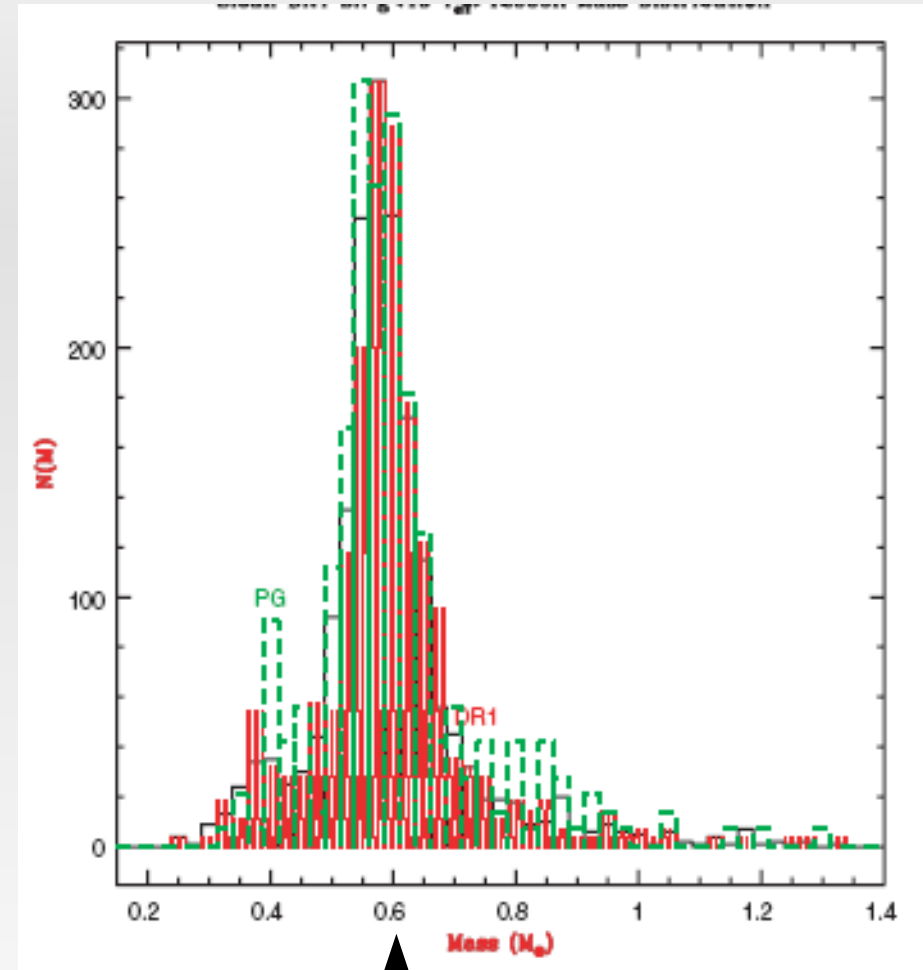
Observerad massor

- Hur bestämmer man en vit dvärgs, eller någon annan stjärnas, massa?
- För att 'väga' en stjärna krävs att man ser hur någonting betar sig i stjärnans tyngdkraftfält (via Keplers lagar) : den måste alltså ha en **kompanjon**.
- I princip alla massbestämningar kommer därför från system med fler än en stjärna i.



Observerade massor

- Chandrasekhars resultat att $M_{VD} < 1.4 M_{sol}$ stöds av att ingen observerad vit dvärg har större massa än $\sim 1.35 M_{sol}$.
- De flesta har en massa på $\sim 0.6 M_{sol}$.



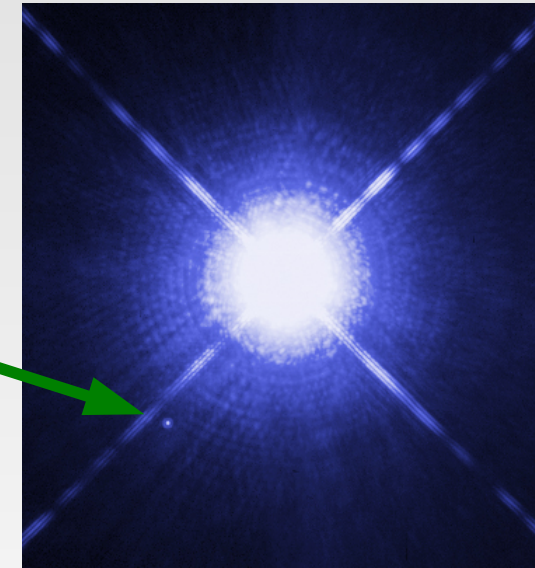
Distribution av observerade vita dvärgars massor : Den flesta har en massa mellan ~ 0.5 och $0.7 M_{sol}$.

Minsta möjliga massar

- Givet att gasen är i plasmaform finns ingen teoretisk gräns för en vit dvärgs minsta möjliga massa.
- Men eftersom stjärnor inte kan vara mindre massiva än $\sim 0.08 M_{\text{sol}}$ (mindre än så och de är för kalla för fusion) blir ~ 0.08 även den minsta möjliga massan för en vit dvärg.
- Den minsta observerade massan är $0.17 M_{\text{sol}}$.

Storlekar

- Hur kan storleken mätas?
 - Stjärnor är nästan aldrig upplösta i teleskop så man kan därför inte direkt mäta deras storlek.
 - Ett undantag är den närbelägna (8 ljusår) **Sirius B** där den vita dvärgen ses vara mycket mindre än den vanliga stjärnan bredvid (den är upplöst).
 - För de andra icke-upplösta stjärnorna uppskattar man storleken från ljusstyrkan + luminositeten.



Observationer av storlekar

- Observationerna visar att vita dvärgar har ungefär samma storlek som jorden.

■ Sirius B	$0.9 R_{\text{jord}}$
■ Eridani B	$1.5 R_{\text{jord}}$
■ Van Maanens stjärna	$1.4 R_{\text{jord}}$
■ Procyon B	$1.4 R_{\text{jord}}$

Massöverföring

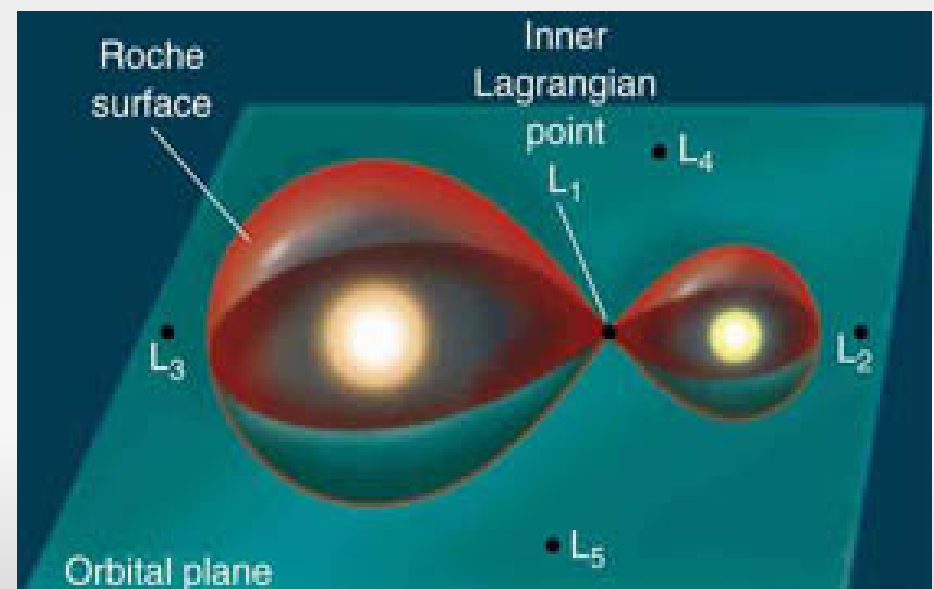
- Nyckeln till att få ljusstark emission från ett kompakta objekt som en vit dvärg är **massöverföring**.
- Cirka 40% av alla stjärnsystem består av **två eller flera stjärnor**.

Albireo är en dubbelstjärna med en varm (blå) och en kall stjärna (orange).



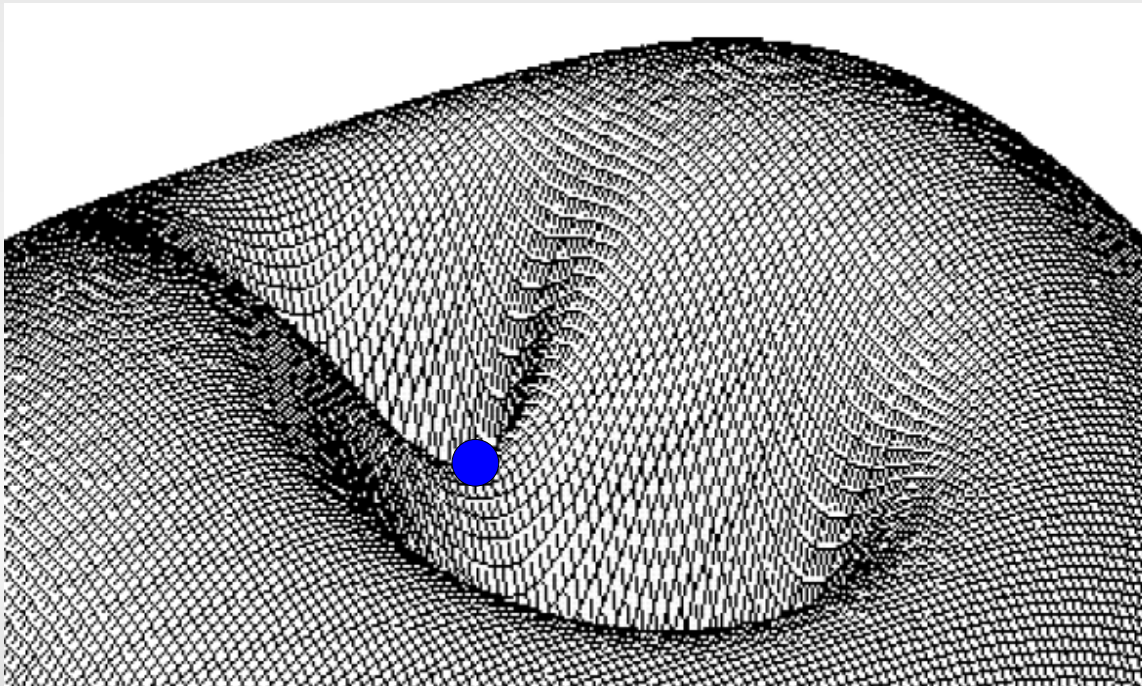
Roche-lober

- Man kan definiera en region runt varje stjärna där materialet är **gravitationellt bundet** till den stjärnan.
- Denna region kallas **Roche-loben**.
Tillsammans med den andra stjärnans Roche-lob bildas en "figur 8".



Roche-lober

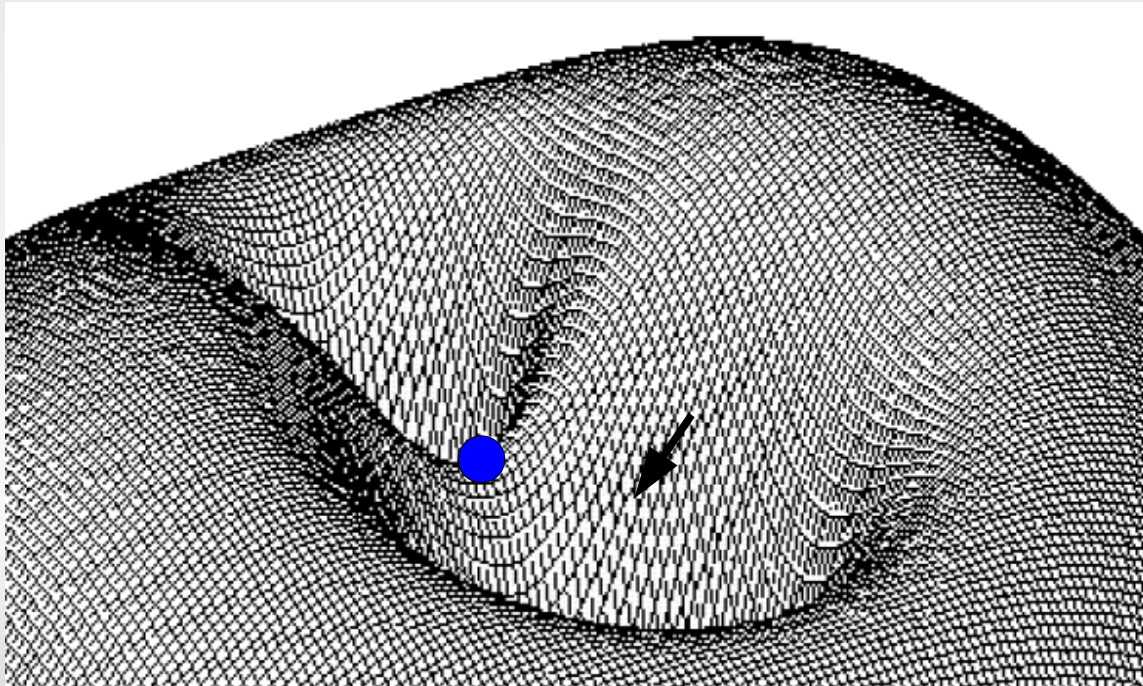
- Gränserna definieras av bindningsenergin vid den **inre Lagrange-punkten L1** : den bildar ett 'krön' där materia kan passerar mellan dalarna.



Exempel på den gravitationella potentiella energin runt en dubbelstjärna : massöverföring kräver att energin är större än på krönet (L1 punkten) vilket material utanför Roche-loberna har.

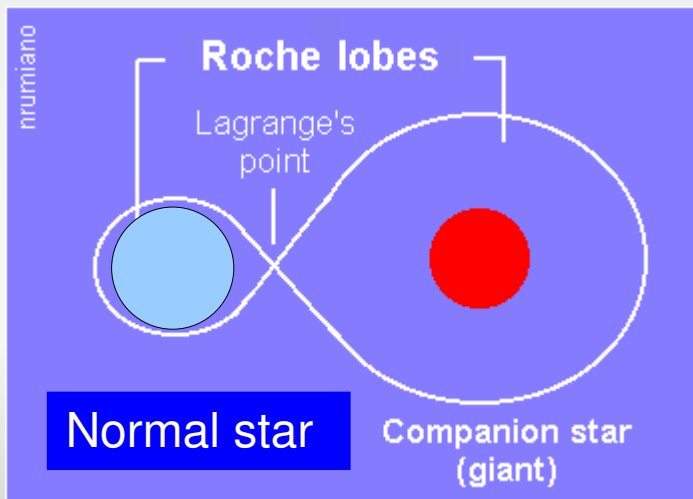
Roche-lober

- Kraftmässigt uppstår en komponent riktat mot den andra stjärnan som gör att material utanför Roche-loberna men nära L1-punkten 'dras' mot den.

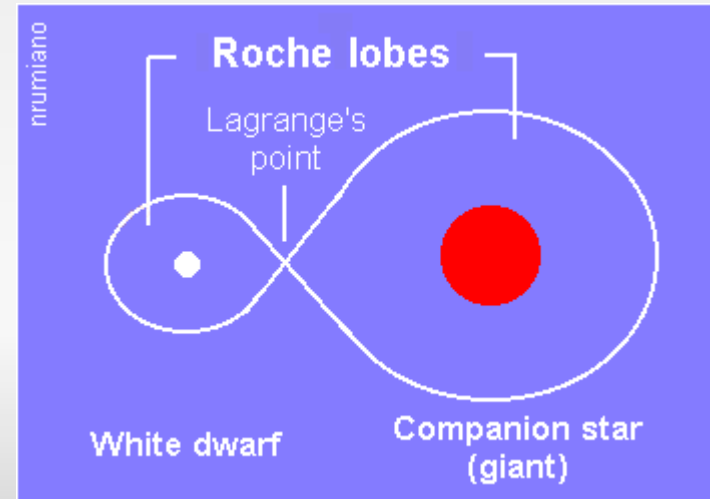


Roche-lober

- Ett resultat känt redan från Newton är att ***gravitationsfältet utanför en sfärisk kropp beror bara på dess massa, inte dess utsträckning.***
- En vit dvärg har därför samma Roche-lob som vilken kropp som helst med samma massa!

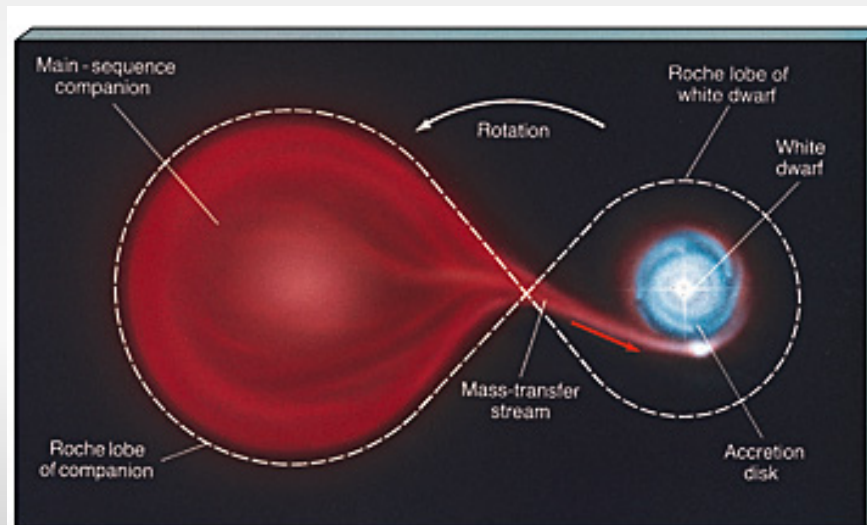


=



Massöverföring

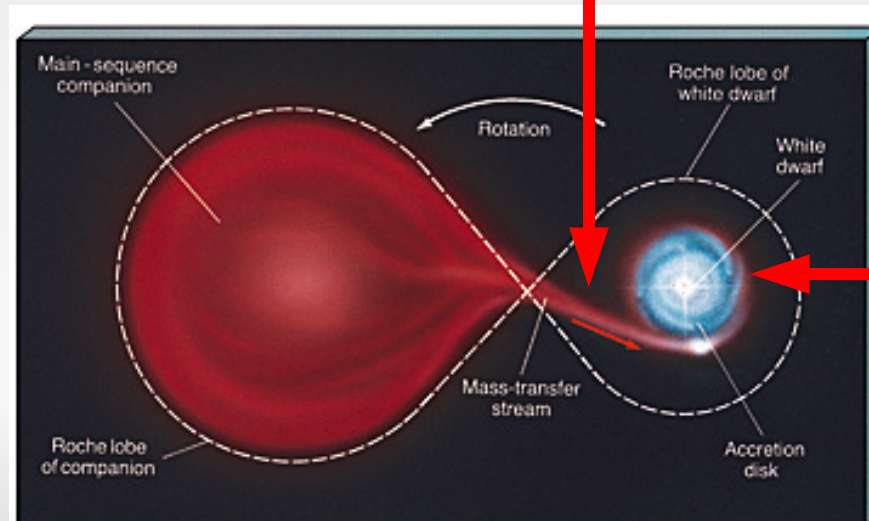
- Antag nu att vi har ett system med en vit dvärg och en vanlig stjärna.
- När den vanliga stjärnan närmar sig slutet av sitt liv sväller den alltid upp. *Om den blir större än sin Roche-lob börjar material föras över till den vita dvärgen via L1-punkten.*



Akretionsskivor

- Materialet är vanligt stjärnmateriale; mestadels **väte** och **helium**.
- Pga rotationen träffar materialet inte den vita dvärgen direkt utan lägger sig i en **akretionsskiva**.

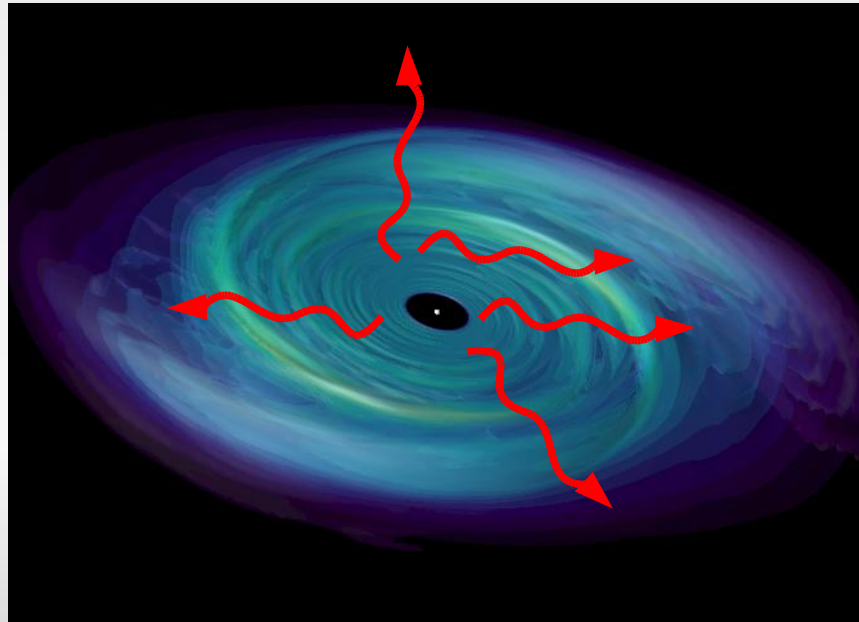
Rotationen gör att gasen inte faller rätt på den vita dvärgen.



Akretionsskiva

Akretionsskivor

- I akretionsskivan krockar partiklarna vilket omvandlar deras omloppshastighet till **värme**.
- Denna emitteras ut som **elektromagnetisk strålning**, vars våglängd beror på hur varm skivan blir.



Akretionsskivor

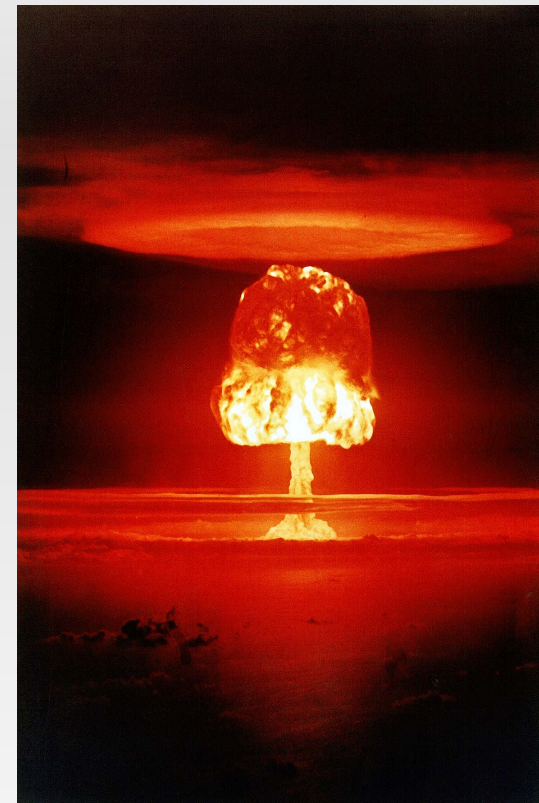
- Materialet sjunker sakta inåt och landar till slut på den vita dvärgens yta.
- Akretionsflödet är typiskt $\sim 10^{-9} M_{\text{sol}}/\text{år}$, men beror på egenskaperna hos den uppsvällande stjärnan.

Klassisk nova

- Allteftersom mer och mer gas ansamlas på den vita dvärgens yta ökar gasens densitet och temperatur.
- Om temperaturen når över $\sim 10^7$ grader startar **termonukleär fusion** och vätet börjar förbrännas till helium.
- Fusionsreaktionerna kan också sättas igång pga att partiklarna får höga hastigheter pga det degenererade tillståndet. Detta kallas **pycnonukleär fusion** (latin för 'tät').

Klassisk nova

- Eftersom gasen är degenererad leder de uppvärmande fusionsreaktionerna *inte till ett ökat tryck* som expanderar gasen och saktar ner fusionen; förbränningen saknar därför den säkerhetsventil som finns hos vanliga stjärnor.
- Allt materiellt förbränns därför **explosivt** som i en bomb. Resultatet är en kraftig explosion som kallas **nova** eller **klassisk nova**.



Klassisk nova

- Mängden gas som överförs innan antändning sker är 10^{-7} - $10^{-4} M_{\text{sol}}$.
- Typisk maximal ljusstyrka är $10^5 L_{\text{sol}}$, som varar i ett par timmar eller dagar. Total emitteras $\sim 10^{37}$ J (=1000 års solenergi).
- Temperaturen som nås är 2 - $3 \cdot 10^8$ K, vilket är tillräckligt för He-fusion (startar vid $\sim 1 \cdot 10^8$ K) men inte kolfusion (kräver $6 \cdot 10^8$ K).
- C och O ses i novans spektra men kan även vara material från den VD.

Klassisk nova

- Ungefär 10 klassiska novor observeras varje år i vår galax. Man tror att fler sker men att deras ljus skymms av stoft och gas i galaxen.
- Denna ide stöds av att vi ser fler i granngalaxen Andromeda (~30 per år).

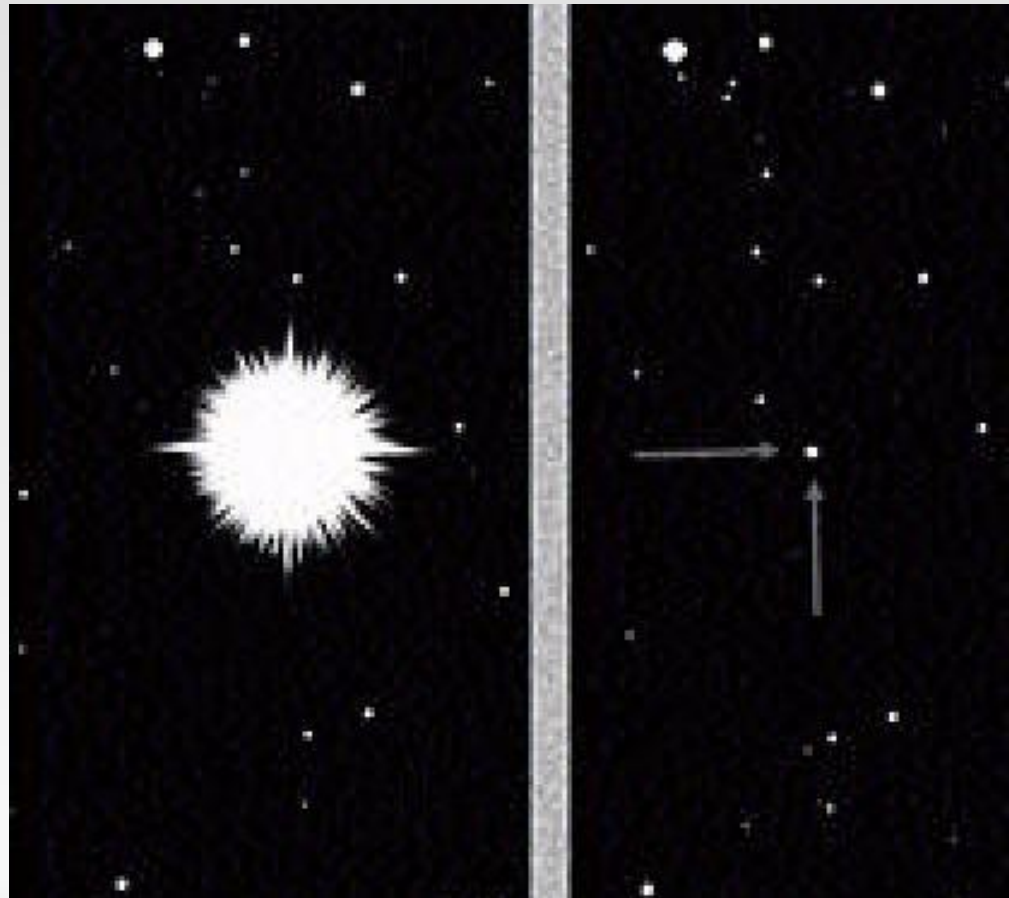


Klassisk nova

- Efter några år kan en **nebulosa** ses vilket är material som slungats ut i explosionen. Ejektats massa är svår att uppskatta men är av storleksordningen $10^{-4} - 10^{-5} M_{\text{sol}}$.
- Det är i dagsläget inte klart om den vita dvärgen kastar ut *mer* eller *mindre* material jämfört med vad den ackreterat, dvs om den kan växa eller ej.
- Eventuellt kan båda scenarion hända.

Observerade klassiska novor

- **Nova Herculis (1934) :**
- ← Årtalet anges oftast i parantes

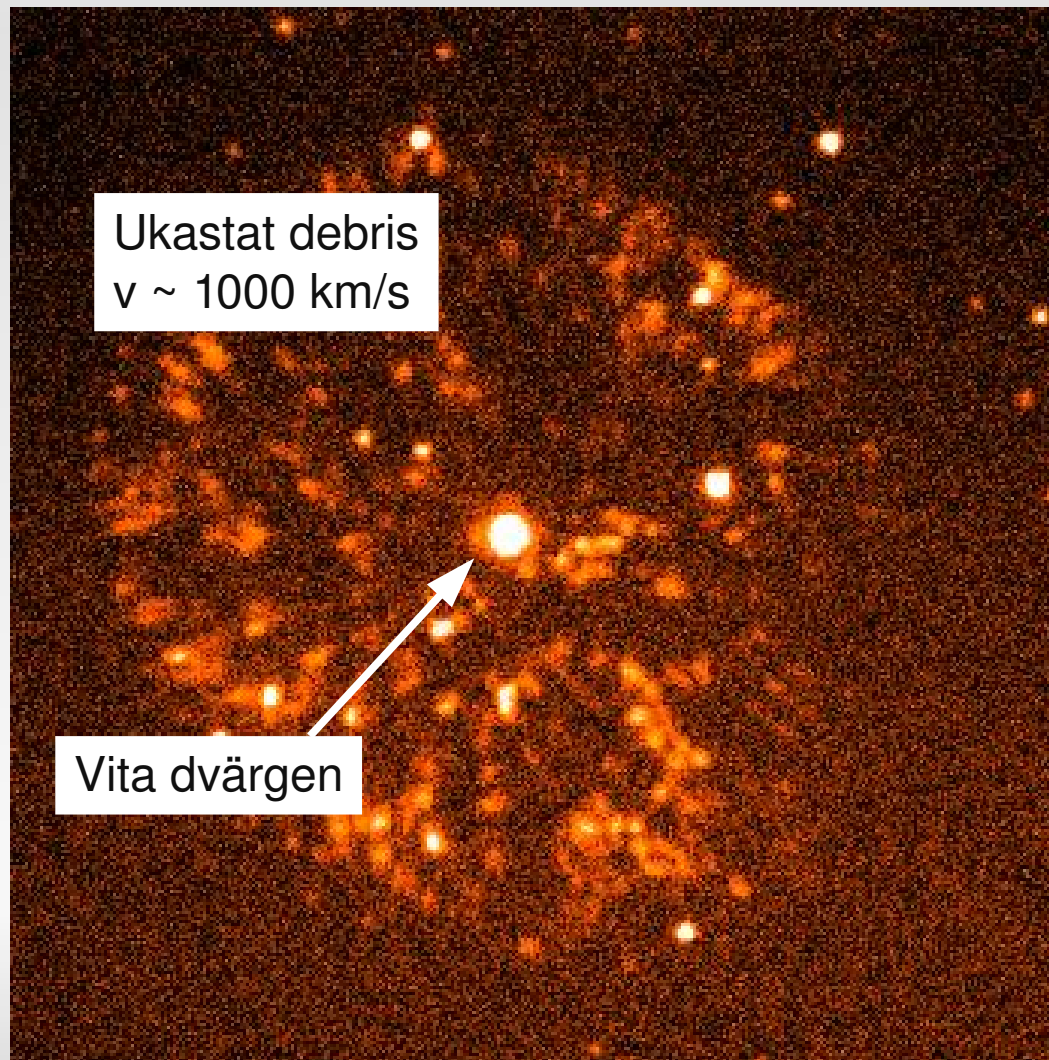


Utbrott

2 månader senare

Observerade klassiska novor

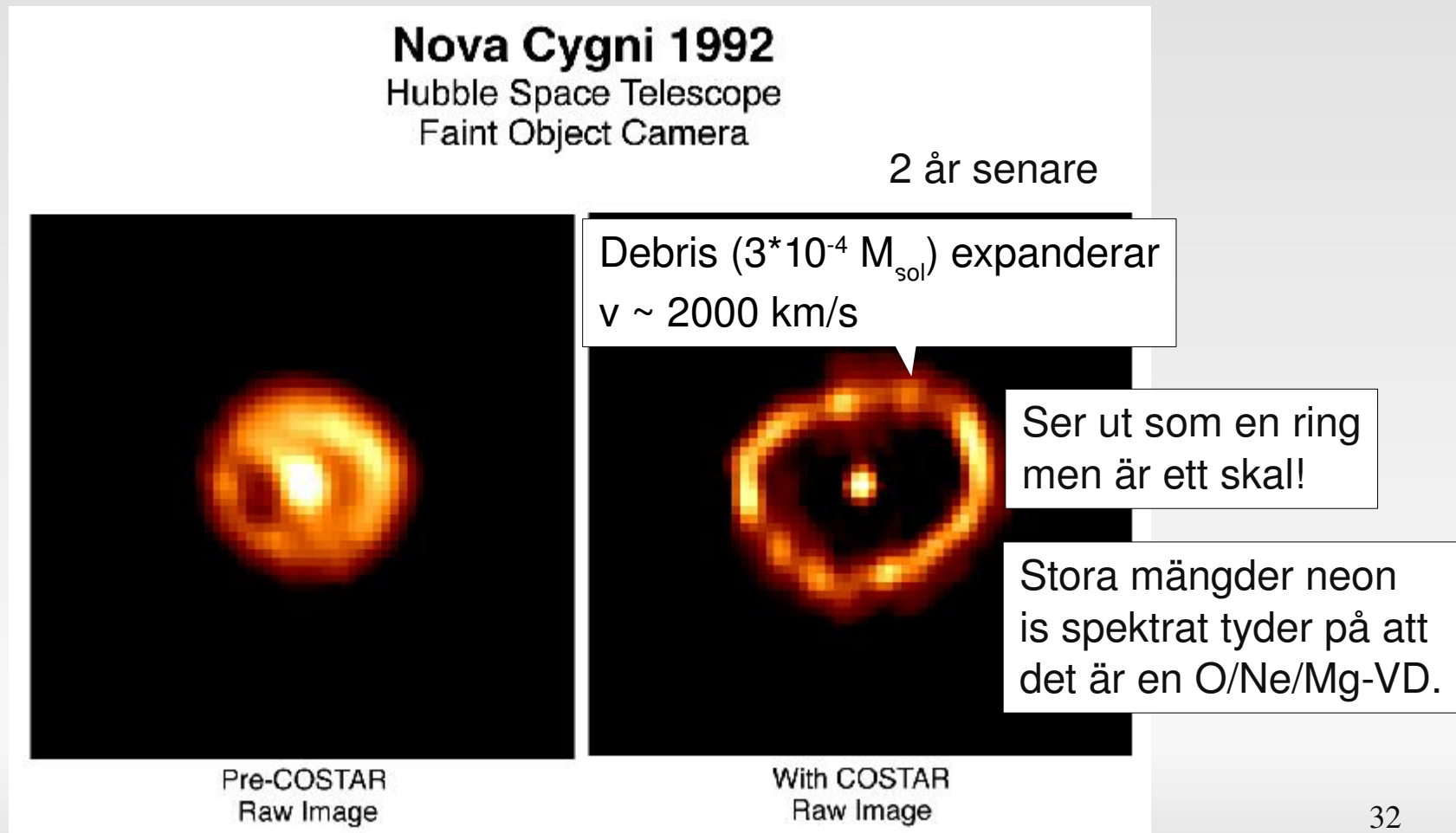
- **Nova Persei (1901):**



*Foto från nutid.
Nebulosan
kallas även **Firework
Nebula.***

Observerade klassiska novor

- **Nova Cygni (1992)** (Första novan att ses med HST)

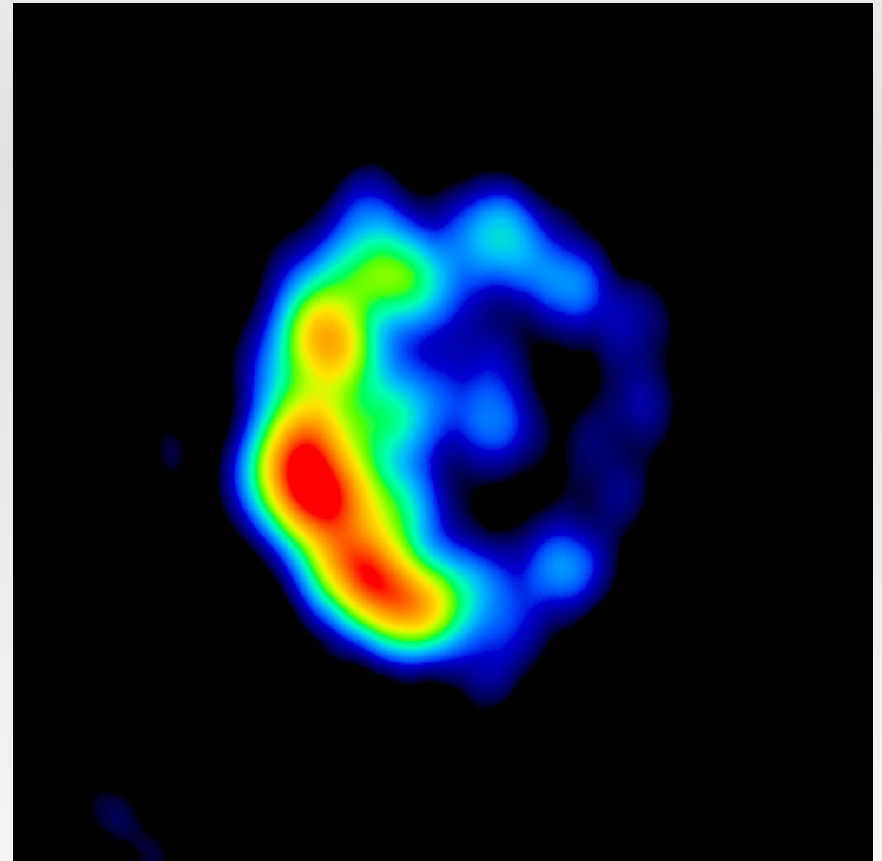


Klassiska novor kommer åter!

- I novan förbränns det väte som lagrats på den vita dvärgens yta, men sedan fortsätter ackretionen som innan.
- Till slut nås på nytt den kritiska massan för antändning och en ny nova bryter ut.
- Novor är därför (antagligen) **återkommande**. Tidsskalorna mellan utbrotten uppskattas till mellan 1000 och 100,000 år.

RS Ophiuchi

- En del novor har dock redan skett mer än en gång.
- **RS Ophiuchi** är en klassisk nova som återkommit 1898, 1933, 1958, 1967, 1985 och 2006. (Intervall 35, 25, 9, 18, 21 år)



Radioobservation av RS Ophiuchi bara 14 dagar efter explosion.

Återkommande novor

- Novor som setts mer än en gång klassificeras som **återkommande novor**.
- Det är fortfarande oklart varför dessa sker med så korta intervall (~ 10 år), men beror antagligen på ovanliga stora ackretionsflöden.

Supernovor Typ 1A

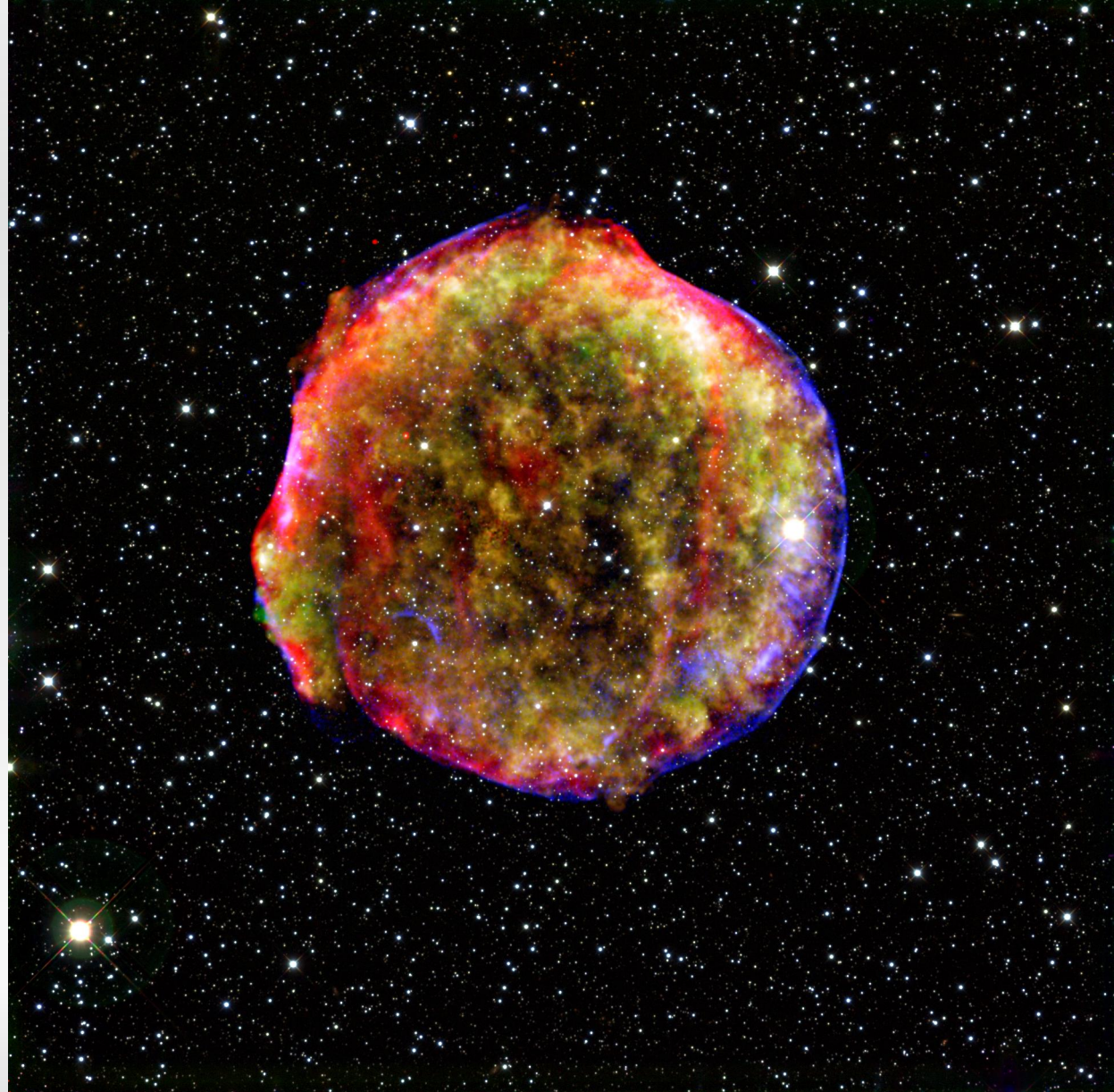
- Vad skulle hända om en vit dvärg ackumulerade material så att den fick $M > M_{\text{chandrasekhar}}?$
- Om inga fusionsreaktioner startar så skulle den börja kollapsa till en **neutronstjärna**.
- Den gravitationella bindningsenergin skulle behöva överföras till en del av materialet som så skulle slungas ut som en supernova.

Supernovor Typ 1A

- Men, till skillnad från när järnkärnan i en massiv stjärna kollapsar, finns det här gott om **fusionsbränsle** kvar (C och O).
- Kollapsen skapar snabbt tillräckligt hög densitet och temperatur för att fusionsreaktioner ska komma igång. Pga det degenerade tillståndet löper dess iväg **explosivt**, precis som i novorna.
- Energin som släpps lös i dessa reaktioner stoppar kollapsen, och spränger istället den vita dvärgen i luften.

En Typ 1a SN

- Tychos supernova (1572).
- 2004 upptäcktes **kompanjonstjärnan** Tycho G. Den har fått en kick på ~ 140 km/s i explosionen.



Skillnaden mellan novor och Typ 1A supernovor

- Både novor och Typ-1A supernovor involverar **fusionsexplosioner** på/i vita dvärgar.
- Skillnaden är att för en nova sker reaktionerna bara på **ytan**, medan för en 1A supernova sker de **inuti** stjärnan.
- I novor sker väte och helium fusion, i supernovor fusion ända upp till järn.
- Båda kräver interaktion med en **kompanjonstjärna**.

Dvärgnovor

- En del vita dvärgar uppvisar en mindre typ av utbrott som kan ske med ganska korta intervall (veckor/månader).
- Dessa kallas **dvärgnovor**.
- Ljusstyrkan ökar här bara med en faktor ~ 10 - 10^2 mot 10^4 - 10^5 i novorna.

Dvärgnovor

- Man tror att de produceras av **instabiliteter i ackretionsskivan** som gör att ackretionen plötsligt ökar kraftigt och gravitationell energi frisläpps.
- Man tror att det också här nås en **kritisk temperatur** : dock inte för fusionstart utan för att gasen ska genomgå en fasförändring som ändrar den interna friktionen.
- Notera att det alltså är ackretionsskivan som ändrar luminositet i en dvärgnova, ingen fusion sker som i klassiska novor.

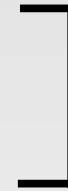
Dvärgnovor

- Sker också återkommande, i allmänhet med kortare mellanrum (~veckor-år).
- Kan särskiljas från novor genom att **inget material slungas iväg**.
- Ubrotten är ljussvagare än i klassiska novor.
- Samma vita dvärg kan genomgå både novor och dvärgnovor.

Sammanfattning : Explosioner från vita dvärgar

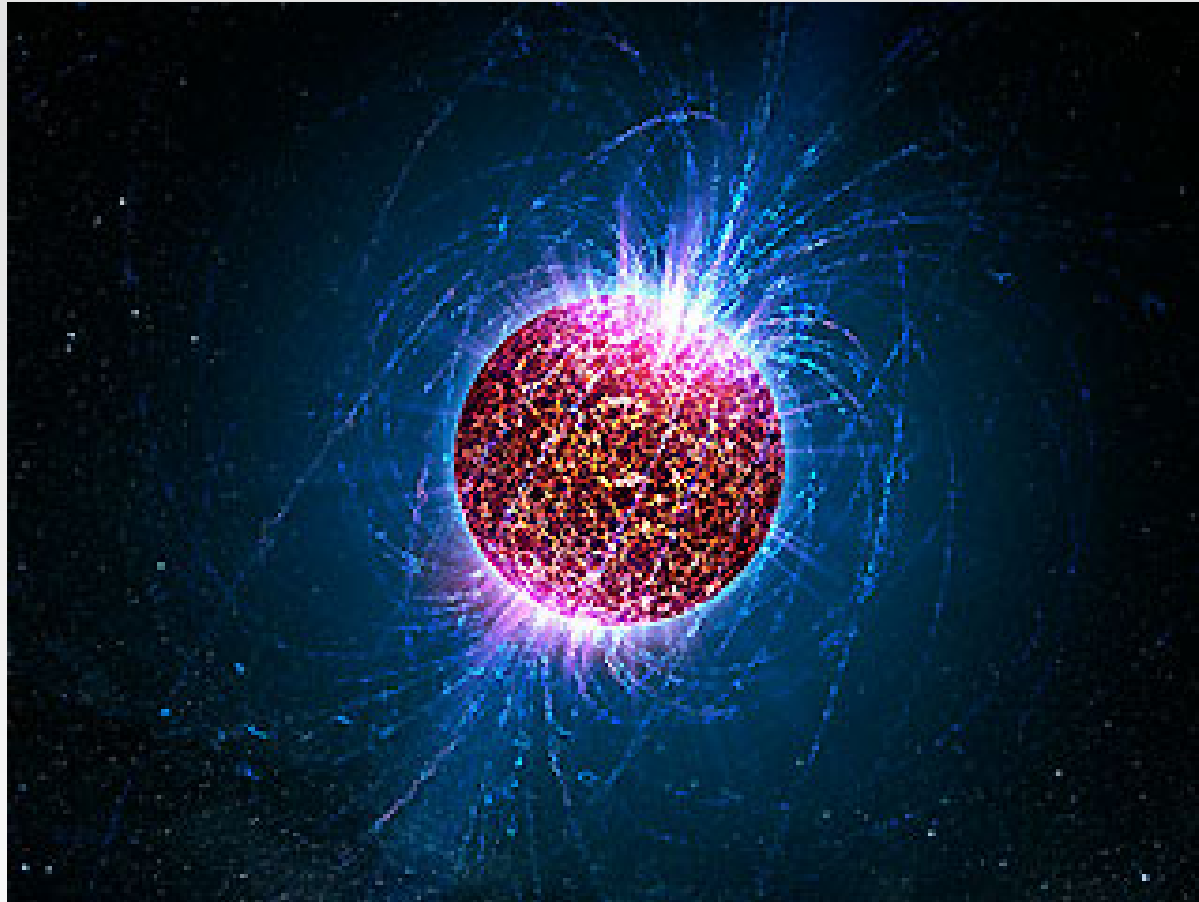
- Vita dvärgar är associerade med **tre typer av explosioner:**

- 1) Klassisk nova
- 2) Dvärgnova
- 3) Supernova typ 1A



Kataklysmiska variabler

Neutronstjärnor



Historia

- **1932: James Chadwick** upptäcker neutronen.
- **1934: Baade och Zwicky** föreslår existensen av stjärnor bestående av neutroner (för att förklara var de mystiska supernovorna var för något).



Historia

- **1968: Jocelyn Bell** upptäcker den första neutronstjärnan (en pulsar).
- **2010:** ~2000 neutronstjärnor kända.
- Uppskattningsvis finns 100 miljoner i galaxen (i princip varje supernova ger en)

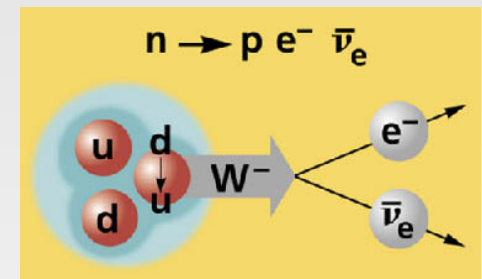


Neutroner

- **Neutroner** är elektriskt neutrala partiklar uppbyggda av tre st kvarkar (se L1).
- De är något tyngre än protonen (0.14%).
- Känner av alla fyra krafter.
- Detekteras genom sin interaktion med atomkärnor (via den starka och svaga kärnkraften)

Fria neutroner sönderfaller

- En *fri* neutron sönderfaller via den svaga kraften mellan kvarkarna till en proton, en elektron och en anti-neutrino på ~15 minuter (sk **β^- -sönderfall**).
- Detta är möjligt eftersom **neutronens massa** är större än summan av massorna för **protonen**, **elektronen** och **anti-neutrino** → reaktionen kräver ingen tillförsel av energi utan kan ske spontant.



$$m_n c^2 > (m_p + m_e + m_{\nu}) c^2$$

Fria protoner sönderfaller ej

- En proton är stabil eftersom den inte har några lättare produkter att sönderfalla till.
- Den kan dock omvandlas till en neutron, en positron och en neutrino om man tillför energi (sk **β^+ -sönderfall**)
- Detta sker två gånger vid fusionreaktionen som ger $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$.

Bundna neutroner sönderfaller *ej*

- Inuti en atomkärna förhindras sönderfallet av neutroner av **Paulus uteslutningsprincip** : en fermion (neutronen) vill bli två fermioner (proton och elektron) men det finns inte plats för två st!
- Enligt Heisenberg-relationen skulle det gå om en av dem fick en hög hastighet, men detta skulle i så fall kräva energitillförsel utifrån och kan inte ske spontant.

Neutronstjärnor måste vara små för att inte sönderfalla

- På grund av neutronens instabilitet måste en makroskopisk kropp bestående av neutroner ha en densitet liknande (eller större) den i en atomkärna för att förhindra sönderfall.
- En stjärna med massan $1 M_{\text{sol}}$ som har en sådan densitet har storleken ~ 10 km.
- Vi kan alltså dra slutsatsen att **om det finns stjärnor som är gjorda av neutroner så måste de vara av storleksordningen 10 km!**

Storlek

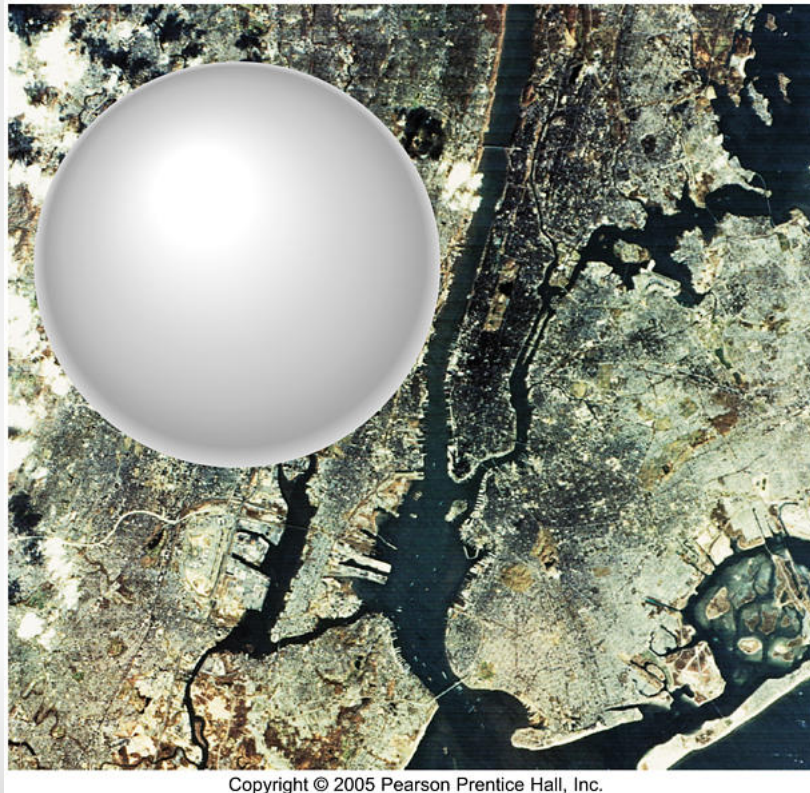
- Som första approximation kan vi tänka oss att en neutronstjärna är den vita dvärgens motsvarighet om vi byter elektroner mot neutroner.
- Båda är fermioner och lyder Paulis uteslutningsprincip. Stjärnan stabiliseras vid den storlek där beståndsdelarna blir degenererade.

Storlek

- Enligt Heisenberg-relationen är kvanttillståndens storlek *omvänt proportionell mot partikelns massa*: $\Delta x \cdot \Delta v = h/m$
- *Förhållandet i storlek mellan en neutronstjärna och en vit dvärg är därför ungefär samma som förhållandet mellan elektronens och neutronens massa : $\sim 1/2000$.*
- En typisk vit dvärg har $R \sim 10,000$ km, vilket då ger $R_{NS} \sim 10,000 \text{ km} / 2000 = 5 \text{ km}$.

Storlek

- Vi har nu utifrån två (helt olika) fysikaliska resonemang kunnat visa att **neutronstjärnor måste vara av storleksordningen ~ 5-10 km.**



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Största massa

- **Chandrasekhars formel** för den maximala massan för en degenererad stjärna beror *inte* på vilken fermionen är (elektron eller neutron eller något annat).
- $M_{\text{max}} = 1.4 M_{\text{sol}}$ är alltså oberoende av vilken fermion som upprätthåller stjärnan och borde vara den största möjliga massan även för neutronstjärnor?

Största massa

- Inte riktigt : Chandrasekhar massan underskattar den maximala massan för neutronstjärnor pga att även **kärnkrafter** hjälper till att hålla uppe dessa.
- Den starka kärnkraften är vanligtvis attraherande (håller ihop atomkärnor), men blir repulsiv för ihoppressad materia.

*Neutronstjärnor hålls uppe av **både** degenerationsstryck och av repulsiva kärnkrafter.*

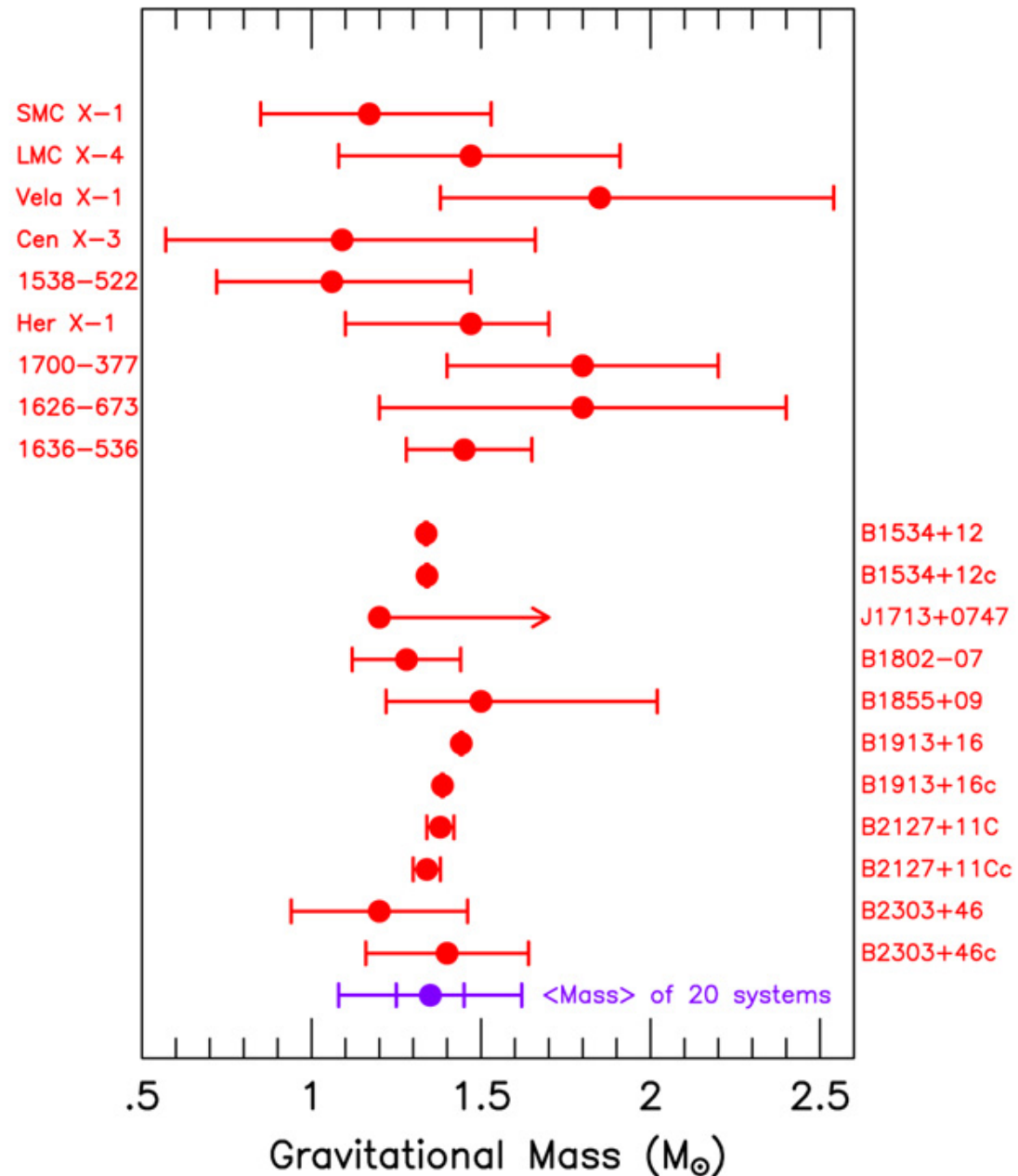
Största massa

- Tar man med detta i beräkningen får man en maximal massa på **2-3 M_{sol}** , där osäkerheten beror på vår bristande kunskap om kärnfysik vid dessa extrema tillstånd.
- Denna gräns kallas **Tollman-Oppenheimer-Volkoff-gränsen**.

En neutronstjärnas största möjliga massa är 2-3 solmassor.

Observerade massor

- Hur stora är då de massor man uppmänt hos neutronstjärnor?
- De flesta ligger mellan $1-2 M_{\text{sol}}$, ingen har större än $2.5 M_{\text{sol}}$ inom felmarginalerna. Se även sid 57 i boken.



Minsta massa

- Finns det en lägsta massa för neutronstjärnor?
Ja : $\sim 0.1 M_{\text{sol}}$. Under denna massa är inte trycket tillräckligt stor för att protoner och elektroner ska bilda neutroner. Men denna massa verkar inte kunna nås i några realistiska formationskanaler.
- Den lägsta observerade massan ligger på $\sim 1 M_{\text{sol}}$.

Temperatur

- Eftersom neutronstjärnor är så extremt små svalnar de långsamt och har en typisk yttemperatur på 10^6 K. Tex har Cas A neutronstjärnan (upptäckt av Chandra-teleskopet 1999) $T \sim 2 \cdot 10^6$ K.
- Det är ganska svårt att bestämma temperaturen eftersom det är svårt att särskilja termisk från icke-termisk emission.

Temperatur

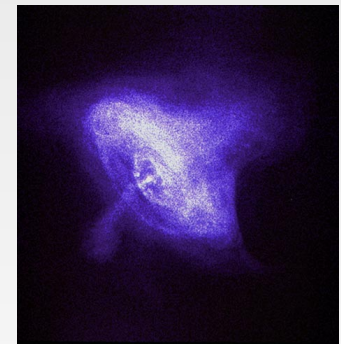
- Den termiska emissionen har sitt maximum i **röntgenområdet**, och neutronstjärnor ser vita ut i synligt ljus.
- Den totala luminositeten är ungefär samma som solens:
- $L/L_{\text{sol}} = A_{\text{NS}} T_{\text{NS}}^4 / A_{\text{sol}} T_{\text{sol}}^4 \sim 1 !$

Observerade storlekar

- Precis som för vita dvärgar mäter man inte storleken direkt utan kombinerar (termisk) ljusstyrka med yttemperatur.
- Observationer görs både av vanliga neutronstjärnor och i röntgenstrålningsutbrott (se längre fram).
 - Neutronstjärna: Storlek:
 - 4U 1608-52 : $R = 9.3 \text{ km} \pm 1.0$
 - 4U 1820-30 : $R = 9.1 \text{ km} \pm 0.4$
 - EXO 1745-248 $R = 10.0 \text{ km} \pm 1.0$

Observation av neutronstjärnor

- De observationer av neutronstjärnor vi nämnt hittills är ganska moderna. Historiskt upptäcktes de först genom **pulsarerna**.
- **Pulsarer** är en typ av neutronstjärnor som roterar fort och emitterar en pulserande strålning i takt med rotationen.
- Nästan alla kända neutronstjärnor är pulsarer pga av att dessa emitterar så mycket ljus och är därför lättare att se än gamla långsamt roterande neutronstjärnor.



Pulsarers rotation

- Den snabba rotationen beror på neutronstjärnans **kompakthet**, i enlighet med lagen om rörelsemängdsmomentets bevarande.
- Krymper man solen (som roterar cirka en gång på en månad) till en neutronstjärnas storlek blir rotationen 1000 varv per sekund!

Pulsarers rotation

- Det krävs alltså inget unikt för att skapa pulsarer, och man tror att *en stor del av neutronstjärnorna föds som pulsarer.*
- Med tiden saktar dock rotationen ned; pulsarerna är därför mestadels **unga neutronstjärnor.**

Millisekundpulsarer

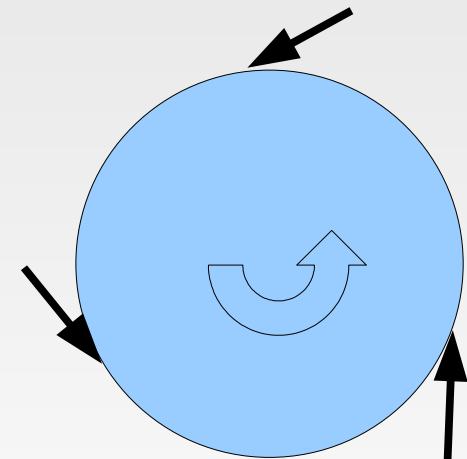
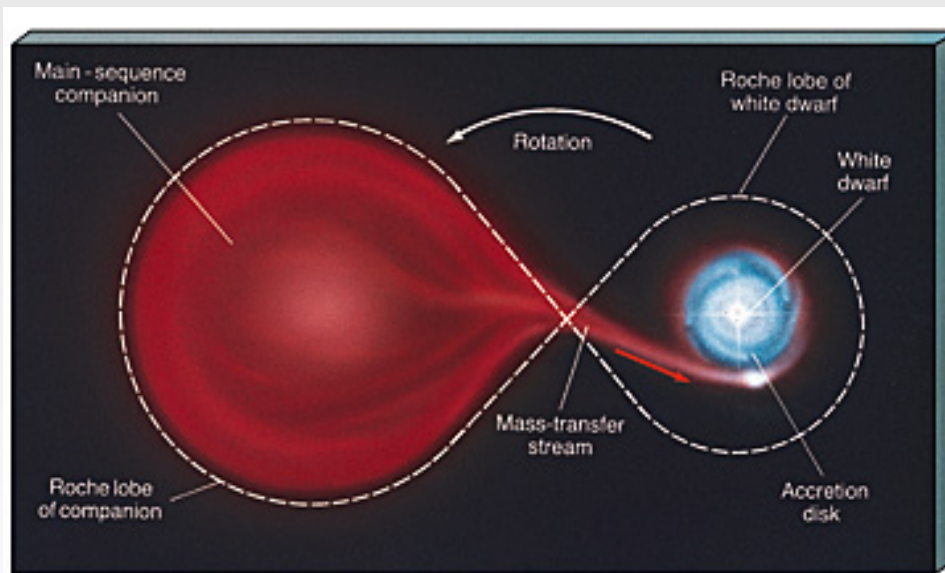
- Den snabbaste pulsaren man känner till, PSR 1509-58, har en period på bara 0.0014 sekunder = 1.4 millisekunder. Detta innebär **642 varv per sekund!**
- Ekvatorn rör sig då med $0.1c$ (om $R = 10$ km), dvs neutronstjärnor kan inte rotera mycket fortare än så här.

Millisekundpulsarer

- Första gissningen blir att detta är en mycket ung pulsar som inte hunnit sakta ned något.
- Men, det visar sig att denna pulsar inte saktar ned över huvud taget.
- Man tror istället att denna pulsar *tillförs* rotationenergi via interaktion med en kompanjon : **massöverföring träffar ytan med en vinkel.**
- Denna ide stöds av att de allra flesta ms-pulsarer har en nära kompanjon.

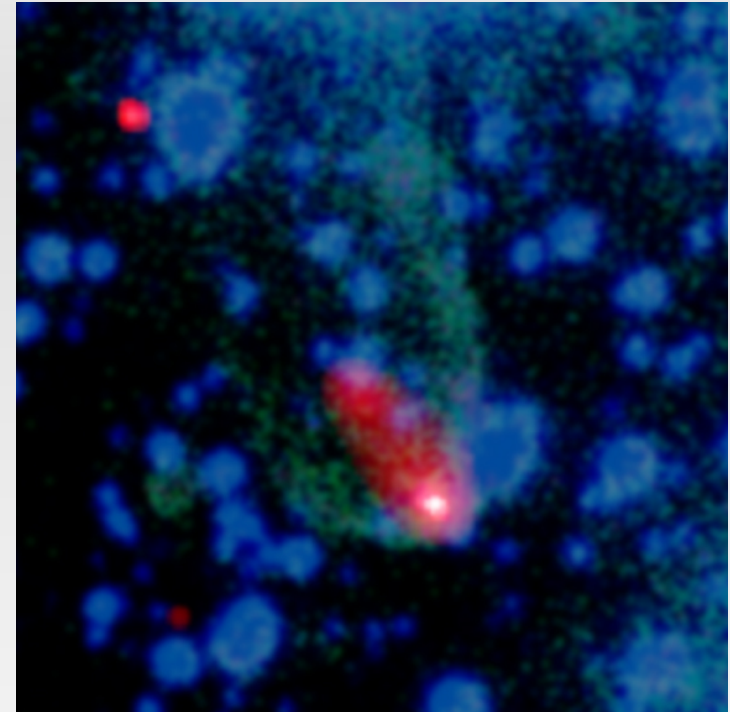
Millisekundpulsarer

- Detta sker när systemet roterar åt samma håll som den vita dvärgen spinner.



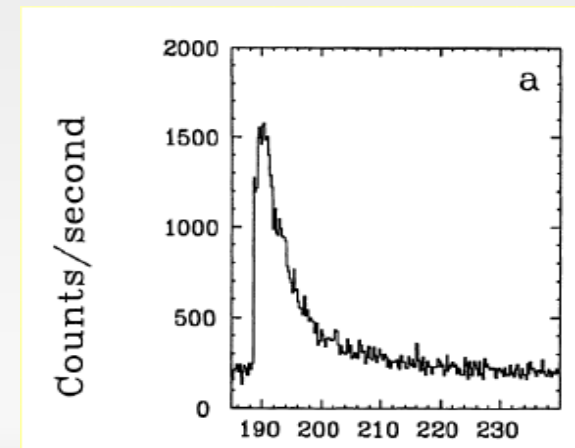
Millisekundpulsarer

- En del ms-pulsarer har dock ingen kompanjon.
- Här tror man att kompanjonen nyligen evaporerat pga det starka strålningstrycket från pulsaren.
- En kandidat till en pulsar som är mitt i denna process är **Svarta Änkan**-pulsaren.



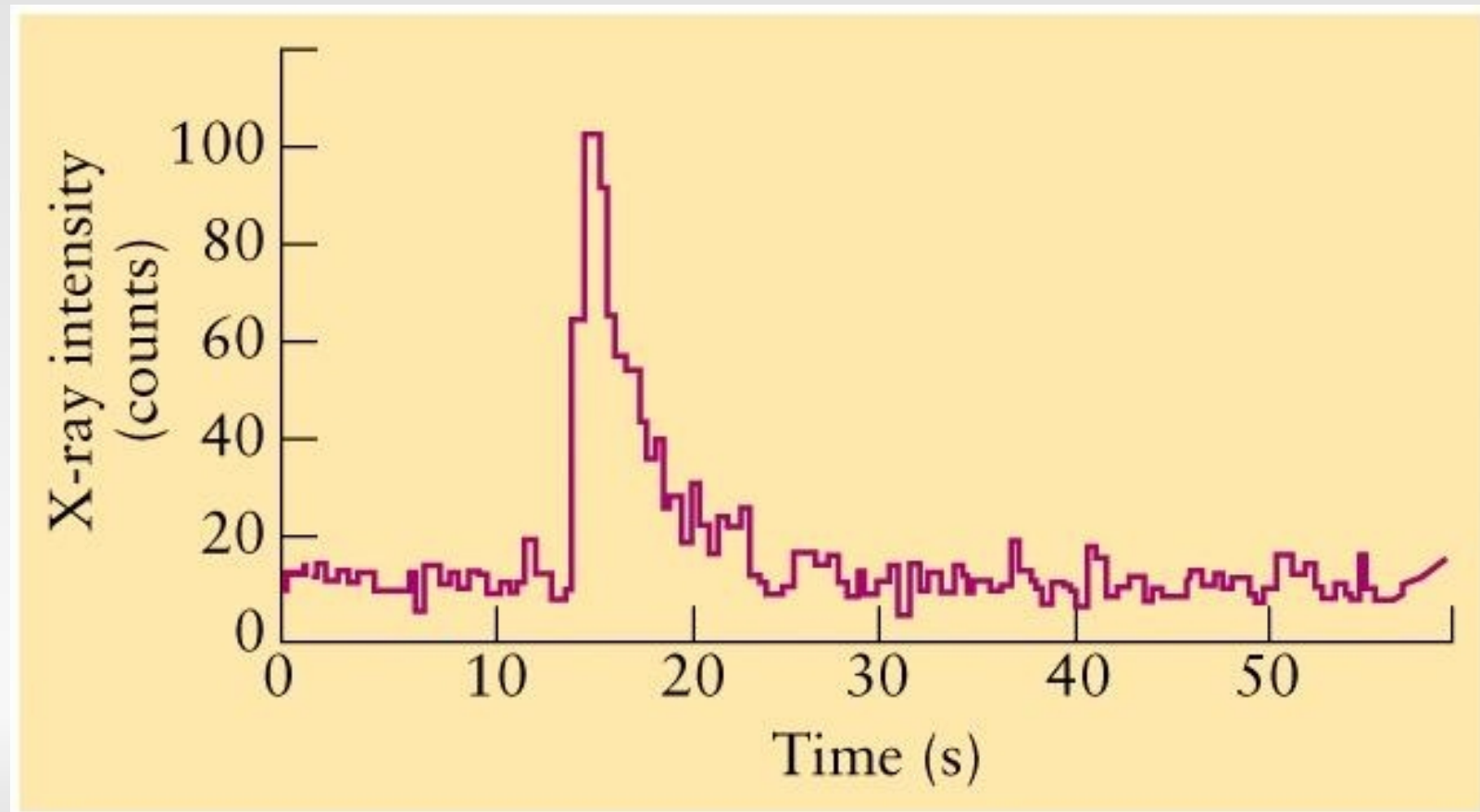
Explosioner från neutronstjärnor

- Material kan ackreteras och antändas i explosiv fusion på en neutronstjärnas yta precis som på en vit dvärgs.
- Gasen hettas upp till höga temperaturer och emitterar mestadels **röntgenstrålning**.
- Dessa utbrott kallas därför **röntgenstrålningsutbrott** (X-ray bursters).



Röntgenstrålningsutbrott

- Utbrotten går fort : är ofta över på några sekunder:



Röntgenstrålningsutbrott

- Varje partikel är ~ 1000 gånger hårdare gravitationellt bunden på en neutronstjärnas yta jämfört med på en vit dvärgs yta.
- Den gravitationella bindningsenergin är $\sim 0.2mc^2$ ($=GM_{NS}m/R$ med $M = 1.4 M_{sol}$, $R = 10$ km)
- Men fusion kan bara ge $\sim 0.007mc^2$
→ materialet kan inte slungas iväg (som i novor) utan faller tillbaka.

Röntgenstrålningsutbrott

- **Typ 1:**

- **Kärnenergi** : ytfusion av ackreterat material (jfr *klassiska novor*).

- $E = 10^{29} - 10^{31}$ J.

- Varar i ~ 1 minut.

- Omkring ~ 100 kända system.

→

- Den typ vi pratar om härnäst.

- **Typ 2:**

- **Gravitationell energi** : Instabiliteter i ackretionen (jfr *dvärgnovor*)

Nukleosyntes

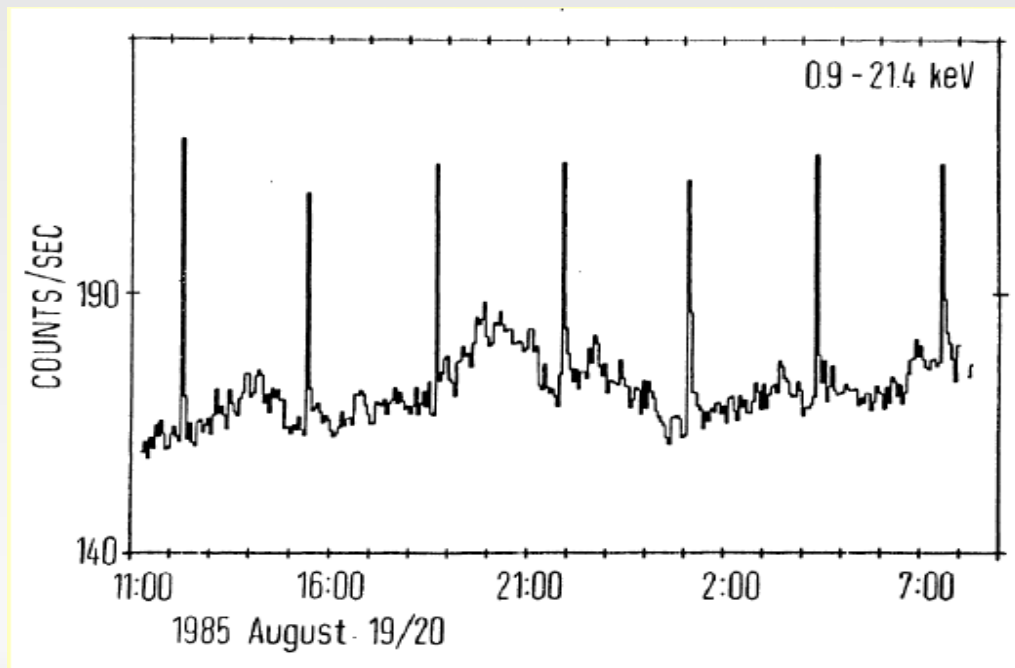
- Väte och/eller heliumfusion.
- En del fall är så varmt på neutronstjärnans yta att det anländande vätet *direkt* förbränns (icke-explosivt) till helium.
- Det är sedan när detta **heliumlager** blir tillräckligt tjockt (~ 1 m) som förhållandena nås för att helium ska antändas ($3 \text{ } ^4\text{He} \rightarrow \text{}^{12}\text{C}$).

Nukleosyntes

- Väte och helium-fusion sker, samt även **rp-processen**, där tyngre ämnen bildas genom påbyggnad av protoner.
- Tex $^{12}_6\text{C} + \text{p} \rightarrow ^{13}_7\text{N}$, $^{13}_7\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{14}_8\text{O}$ etc..
- Notera skillnaden mot nukleosyntes i supernovor där hela tiden tunga kärnor sätts ihop (det finns inga protoner i den miljön).
- rp-processen fortsätter ända upp till de tyngsta atomkärnorna \rightarrow *RSU kan skapa ämnen mycket tyngre än järn!*

Perioder

- De flesta utbrotten är **återkommande** med mycket kortare intervall än även de snabbast novorna (~**timmar/dagar** istället för årtionden).



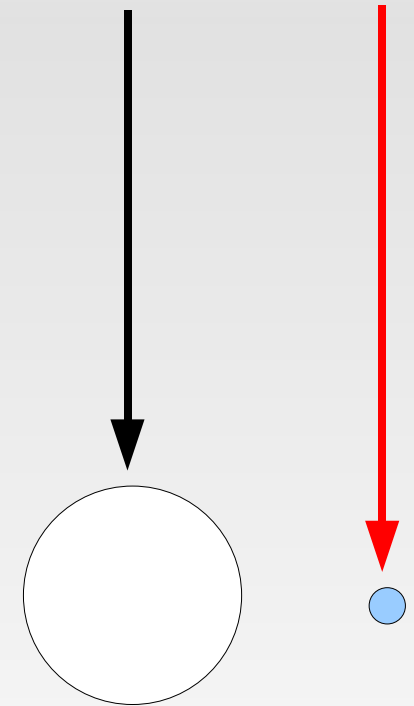
4U 1820 – 303 får utbrott ungefär var tredje timma!

Perioder

- Detta beror *inte* på att ackretionen är kraftigare till neutronstjärnor (Roche-loberna är likadana!).
- Vi kan istället förstå detta utifrån att gasen blir mycket **mer komprimerad** på en neutronstjärnas yta jämfört med en vit dvärgs.
- Det krävs därför **mindre material** innan det kritiska tillståndet uppnås, dvs en kortare tid av ackretion.

Utbrott vs stadig emission

- Material som ackreteras till en neutronstjärna faller ner i en mycket **djupare gravitationspotential** än i en vit dvärg.
- Den **stadiga ackretionsluminositeten** (som är lika med den gravitationella potentiella energin som släpps loss) är därför mycket större per partikel.

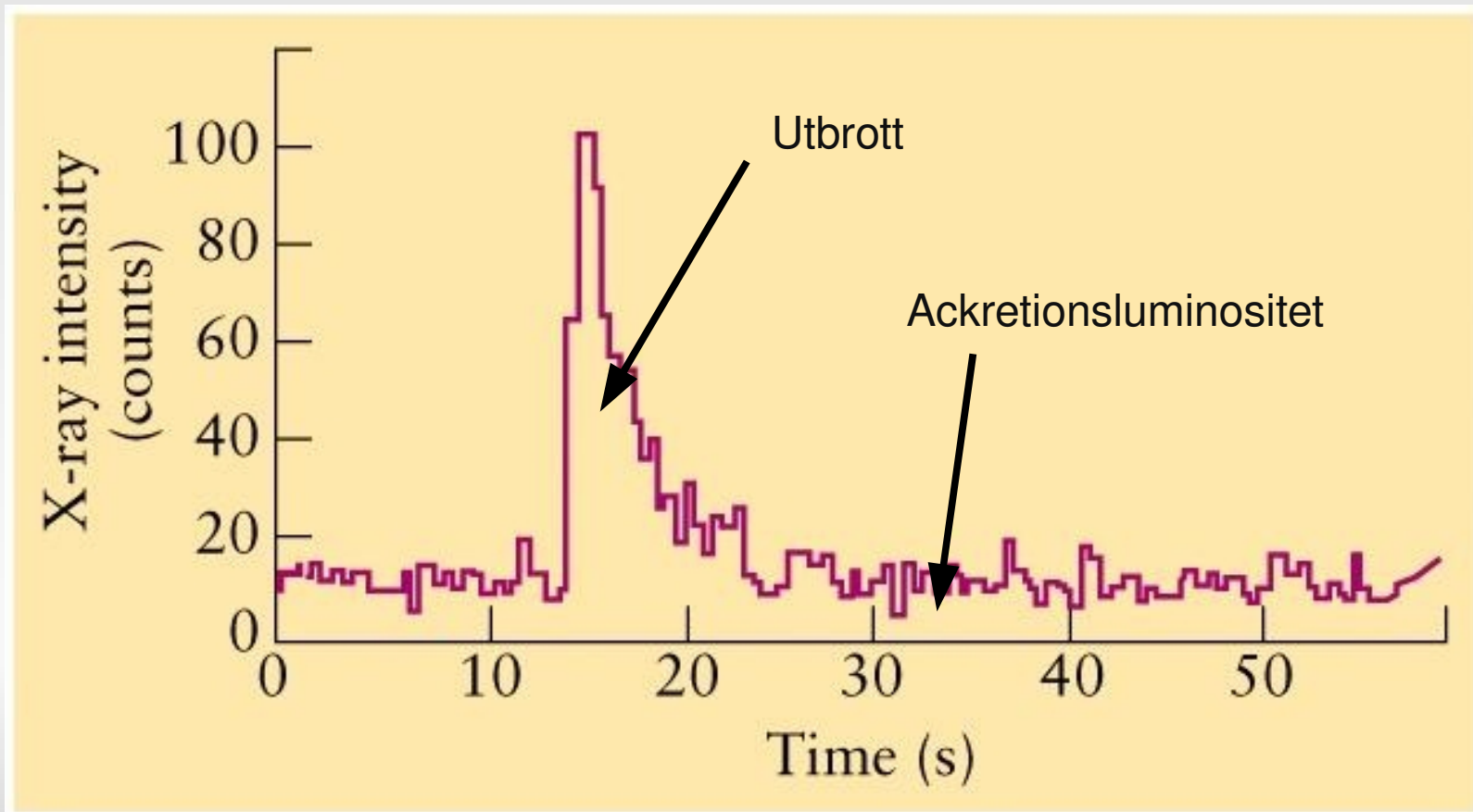


Utbrott vs stadig emission

- Samtidigt ger fusion $\sim 0.007mc^2$ oavsett i vilket tyngdkraftfält den sker.
- Därför blir *förhållandet* mellan energin som släpps ut i utbrott (kärnenergi) och energin som släpps ut under den stadiga ackretionen (gravitationell energi) mycket mindre för röntgenstrålningsutbrott jämfört med novor.
- $E_{\text{utbrott}}/E_{\text{ackretion}} \text{ (NS)} \ll E_{\text{utbrott}}/E_{\text{ackretion}} \text{ (VT)}$

Utbrott vs stadig emission

- $E_{\text{utbrott}}/E_{\text{akkretion}} \text{ (VT)} \sim 30$
- $E_{\text{utbrott}}/E_{\text{akkretion}} \text{ (NS)} \sim 1/30 !$



Explosion av hela neutronstjärnan?

- Neutronerna i en neutronstjärna är redan mer tätt packade än en atomkärna : vi kan se dem som om de redan genomgått fusion till en enda gigantisk kärna.
- Det finns alltså ingen kärnenergi att släppas ut när neutronstjärnor börjar kollapsa, och neutronstjärnor kan därför *inte* explodera som en vit dvärg kan göra (Typ 1A supernova).
- Växer de sig mer massiva än OTV-gränsen ($2-3 M_{\text{sol}}$) är de därför dömda till fortsatt kollaps.