

**S**tjärnor lever tveklöst ett mycket aktivt liv på ålderns höst. I sin, för stjärnan naturliga, strävan att upprätthålla jämvikt mellan de två motverkande krafterna gravitation (riktad inåt) och tryck (riktat utåt) måste den förändra sin struktur drastiskt när den ditintills dominerande energikällan, omvandlingen av väte till helium i stjärnans centrum, tar slut. En förändring som skall visa sig vara fruktlös, då mängden av det resterande bränslet är mycket begränsad.

Stjärnor med en massa av omkring solens storlek genomgår då en omvandling från en normal stjärna (som solen är nu) via en röd jättestjärna till en död stjärnrest, en vit dvärg i vilken energiproduktionen har avstannat. I dödsögonblicket skapas ett spektakulärt astronomiskt fenomen, en planetarisk nebulosa. Dödskampens utveckling styrs huvudsakligen av en intensiv stjärnvind, stora mängder materia blåser verkligen från stjärnan ut i den omgivande rymden. Denna stjärnvind gör att stjärnan förlorar en avsevärd del av sin massa. När detta händer befinner sig stjärnan i vad astronomerna kallar AGB-stadiet. (AGB står för *asymptotic giant branch*, vilket inte säger så mycket om vad som verkligen försiggår, men vi väljer ändå att behålla detta begrepp i denna text.) Majoriteten av alla stjärnor som fullbordat sin livscykel i vårt universum har genomgått AGB-fasen, och solen kommer också så småningom att göra det. Därför är AGB-stjärnorna naturligtvis viktiga att studera.

I denna artikel beskrivs AGB-stjärnornas egenskaper och deras framträdande roll i universums utveckling. Det sker delvis genom historiska återblickar ämnade att ge läsaren en inblick i hur astronomerna efterhand lärt sig att förstå sig på dessa fascinerande gasklot, som är bland de mest komplicerade i universum.

### De röda jättarna uppträder på scenen

Att stjärnor kan ha olika färg torde redan de första mänskorna som betraktade de små ljusprickarna på natthimlen ha noterat, se bilden här intill. Det dröjde emellertid ända till 1800-talet innan detta faktum kopplades till prickarnas, dvs. stjärnornas, yttemperatur. Ju svalare desto rödare, men varför stjärnor hade olika temperatur förstod man ännu inte. Att sedan stjärnor med samma färg kan skilja sig avsevärt åt i storlek är långt ifrån uppenbart. Det var den danske astronomen Ejnar Hertzsprung som i början av 1900-talet fann att vid en jämförelse av stjärnor med samma färg och uppmätta ljusstyrka fanns det en grupp bland de röda stjärnorna som hade mycket mindre egenrörelser på himlen. (Egenrörelse är den mycket lilla sträcka som en stjärna förflyttar sig över himlen på ett år. Den kan mätas med noggranna instrument.) Hertzsprung drog den korrekta slutsatsen att stjärnorna med liten egenrörelse bör ligga längre bort och därmed vara mycket ljusstarkare och mycket större. Kort därefter, ca 1910, infördes begreppen *dvärgstjärna* och *jättestjärna* för att särskilja dem. Men varför en stjärna var av dvärg- (egentligen "normal-", som solen) eller jättetyp hade man ingen aning om.

# RÖDA JÄTTAR

## – och vita dvärgar ...

av Hans Olofsson

Ett hundra år av astrofysikalisk utveckling har gjort det möjligt för oss att förstå något om stjärnornas utveckling. I denna artikel redogörs för vad som händer när stjärnorna åldras. Många

problem är lösta, men många återstår ännu. Och vad är svaret på den viktiga frågan: Vad kommer till slut att hända med solen? Det finns all anledning att fortsätta forskningen om framtiden.

## ... eller sagan om AGB-stjärnorna

En annan upptäckt, som skulle visa sig vara av stor betydelse för förståelsen av de röda jättarna, gjordes redan på 1800-talet. Det var att en del mycket röda stjärnor hade distinkt annorlunda spektra som faktiskt liknade dem som uppstod vid urladdning mellan kolelektroder i ett jordiskt laboratorium. Senare fann man att dessa stjärnor också var jättestjärnor.

### Astrofysik och röda jättar

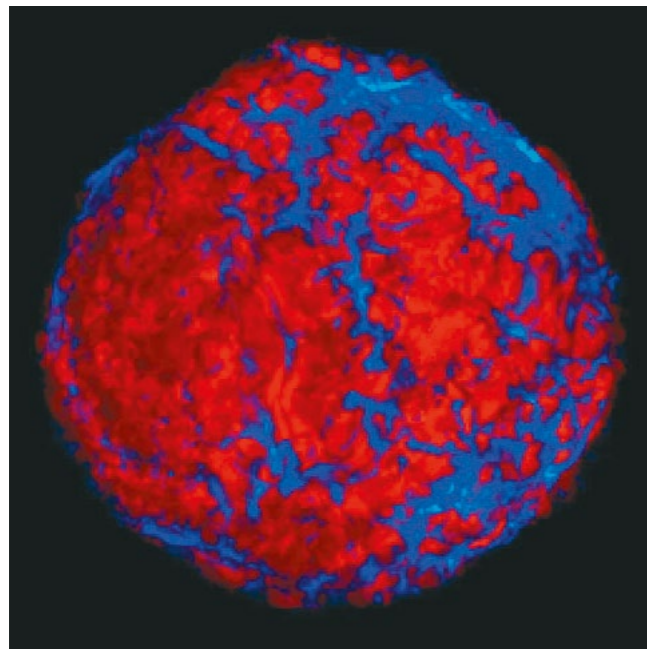
För ett hundra år sedan stod astronomin inför en monumental utmaning: att förstå stjärnornas struktur och utveckling. Några årtionden senare hade de viktigaste grunderna för en fysikalisk beskrivning av hur dvärgstjärnor fungerar identifierats. Stjärnor är i stort sett gasklot bestående av väte och helium där gravitation och tryck balanserar varandra perfekt. Energiformen materia omvandlas till energiformen strålning genom sammanslagning av väte till helium (*vätefusion*) i de centrala delarna. Den färg och den ljusstyrka stjärnan får bestäms av massan.

Men det stod snart klart att de röda jättarna var av ett helt annat slag är dvärgstjärnorna. De skulle dessutom visa sig vara mycket komplicerade. Ett första viktigt steg togs när man insåg att en jättestjärna är en stjärna som utvecklats ur en dvärgstjärna sedan vätet i dvärgstjärnans centrum tagit slut, dvs. en jättestjärna är en åldrande stjärna. Spekulationer om att de röda jättarna istället kunde vara stjärnor under bildande förekom, men de kunde snabbt avfärdas.

### Datorernas intåg

Av avgörande betydelse för den fortsatta utforskningen var utvecklingen av datorererna. I början av 1950-talet var de väldiga maskiner som fyllde hela rum! Men de hade ändå nått en snabbhet som gjorde att de kunde användas för att beräkna vad som händer då en röd jätte bildas, och man kunde finna den avgörande orsaken, en separering av stjärnan i två delar. I den långt utvecklade dvärgstjärnan sker vätefusion i ett skal utanför den centrala delen, *kärnan*. Kärnan består av (för tillfället inaktivt) helium som bildats vid vätefusionen. På grund av det delas stjärnan i två delar, kärnan och det *stellära höljet*, på vars inre sida om vätefusionskalet. Kärnan drar sig långsamt samman när vätefusionen där upphör. Det paradoxala är då att det stellära höljets reaktion på detta blir att höljet expanderar och en jättestjärna med avsevärda dimensioner bildas. Denna har väsentligt högre ljusstyrka än dvärgstjärnan men får allt lägre yttemperatur, dvs. den blir allt rödare.

Stjärnor i vår egen galax, Vintergatan. De olika färgerna beror på stjärnornas olika massor och utvecklingsstadier. En betydande del av de röda stjärnorna är jättar.



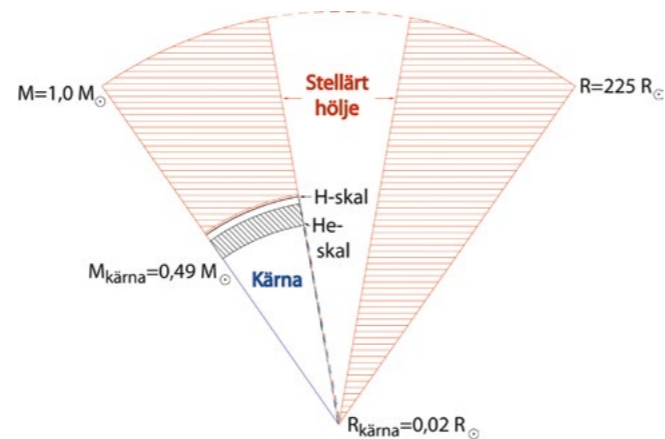
Datorsimulering av en AGB-stjärna tyder på att dess yta har ett komplicerat, ständigt varierande, mönster av stigande (blå) och fallande (röd) gas.

### Röda jättar av två skilda typer

Ett stort steg hade därmed tagits, men man var ännu inte framme vid en full förståelse av de röda jättarna. Exempelvis hade observationer av de klotformiga stjärnhoparna påvisat att det finns röda jättar av *två* typer (huvudsakligen rörde det sig om en skillnad i ljusstyrka). Man frågade sig nu om dessa båda jättetyper hade olika ursprung eller om den ena är en vidareutveckling av den andra. Det senare visade sig vara riktigt. Den första utvecklingen som röd jätte avbryts nämligen då helium i kärnan börjar fusioneras till än tyngre grundämnen såsom kol (och syre), en process som dock bara pågår en "kort" tid. Till slut består stjärnan återigen av två delar, en kärna, nu bestående av mestadels (inaktivt) kol och syre, och ett stellärt hölje på varsin sida om ett område som begränsas av ett inre heliumfusionsskal och ett yttre vätefusionsskal. För andra gången drar sig nu kärnan samman och som följd därav växer höljet tills stjärnan återigen blivit en röd jätte. Dessa röda jättar utgör den så kallade *asymptotiska jättegrenen* (på engelska *asymptotic giant branch*) i ett s.k. HR-diagram. Eftersom utvecklingen går mycket snabbare under AGB-fasen än under det första jättetadiet utgör AGB-stjärnorna bara en bråkdel av alla röda jättar, förmodligen mindre än 1 procent.

### De märkliga AGB-stjärnorna

En AGB-stjärna är en mycket egendomlig himlakropp. Kärnan är jämförbar med jorden i storlek, men tätheten är så hög att en sockerbit av kärnans materia väger ca ett ton. Det stellära höljet å andra sidan har expanderat till ett jätteklot med en diameter som är några hundra gånger större än solens. Följaktligen blir tätheten där mycket



En AGB-stjärnas inre uppdelning i en mass- (vänster) och en radieskala (höger). I masskalan delar kärnan och det stellära höljet på utrymmet, men i radieskalan domineras utrymmet totalt av det sistnämnda (figuren gäller för en AGB-stjärna med en solmassa).

låg, ca en tusendel av jordatmosfärens, och det är svårt att föreställa sig detta uttunnade gasklot som en kropp med en påtaglig yta, se teckningen ovan.

Fortsatta datorberäkningar ledde till ytterligare en överraskande upptäckt, som föreföll så främmande att man först trodde att det berodde på ett räknefel. Det visade sig att heliumfusion och vätefusion i skal inte kan förekomma samtidigt. Istället sker heliumfusionen explosionsartat under korta perioder, det rör sig om några tiotal år, som upprepas regelbundet med ca 100 000 års mellanrum. Detta ger upphov till vad man kallar *termiska pulser* som ger AGB-stjärnans ljusstyrka en karakteristisk och regelbunden variation. Detta är ett för AGB-stjärnorna unikt fenomen! Under större delen av tiden mellan de termiska pulserna är det endast vätefusionen som står för energiproduktionen.

### Det inre kopplas till det yttre

De termiska pulserna leder till en oväntad men mycket viktig process. De öppnar nämligen transportvägar i AGB-stjärnan, så att materia som berikats på nya grundämnen i stjärnans inre kan föras upp till ytan via strömningsrörelser i det stellära höljet. Framförallt är det kol som förs upp, och om tillräckligt många termiska pulser har verkat kan gasen vid stjärnans yta till slut innehålla mer kol än syre. Då kan kolet reagera mycket effektivt med syret och kolmonoxid bildas. Därefter kan bara kolrika molekyler bildas, och föga förvånande kallas därför en sådan stjärna för en *kolstjärna*. Därmed har vi förklaringen till de märkliga stjärnor som hade kolbågliknande spektra.

Ett mer spektakulärt bevis för att dessa stjärnor verk-

I vissa fall sker utkastningen av materia på ett eruptivt sätt som visas på bilden till höger, upptagen i radiostrålning från kolmonoxid mot kolstjärnan TT Cygni (gul prick i centrum). Skalet kastades ut med en hastighet av ca 50 000 km/h för ca 7 000 år sedan, möjligen som en följd av en termisk puls.



BILD: MAURON & HUGGINS

ligen producerar grundämnen i sitt inre och för upp dem till ytan presenterades 1952, då det radioaktiva grundämnet teknetium identifierades i ett spektrum från en jättestjärna. Detta ämne är inte stabilt, och den variant som bildas i AGB-stjärnor har en halveringstid på bara 213 000 år, dvs. en förhållandevis mycket kort tid. Detta ämne måste alltså hela tiden nybildas under AGB-fasen.

Den gigantiska omrörningen av stjärnmaterien resulterar också i ett komplicerat och dynamiskt mönster av stigande och fallande gas på stjärnytan, se bild sidan 8.

### AGB-stjärnor bantar: ett cirkumstellärt hölje bildas

Trots dessa framsteg fann man under 1970-talet att något måste vara fel i bilden av AGB-stjärnorna. Man hade dock svårt att inse vad som skulle kunna vara fel i den modell av dem som arbetats fram. En första ledtråd till en förklaring kom genom att observationer nu också kunde göras i det infraröda våglängdsområdet. Man upptäckte stjärnlika kroppar av mycket låg temperatur, i själva verket onaturligt låg för att komma från en stjärna. Det visade sig snart att det måste röra sig om AGB-stjärnor som omger sig med höljen av gas- och gruspartiklar, ogenomskinliga för vanligt ljus. Dessa höljen omvandlar dock stjärnljuset till långvägigt infraröd strålning. Den avgörande ledtråden, att höljena expanderar, erhöles genom att utnyttja nya observationer vid radiovåglängder. Därmed kunde man fastställa ytterligare en egenskap hos

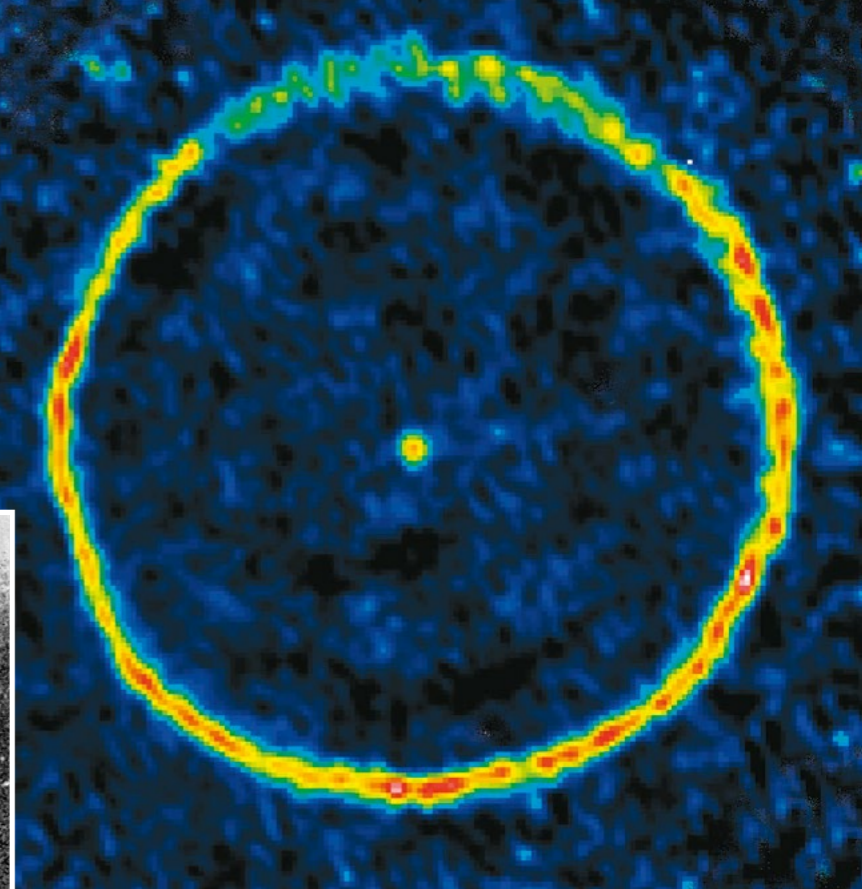


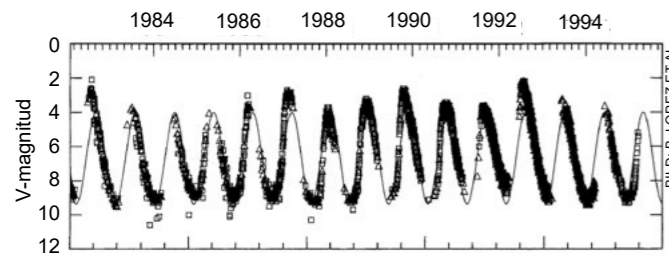
BILD: OLOFSSON M.F.L.

Cirkumstellära höljen är kalla och lyser normalt inte i det synliga området. Här till vänster ser man höljet genom att stjärnljuset sprids i de cirkumstellära gruskornen. Stjärnan CW Leonis (en kolstjärna) ligger djupt inbäddad i mitten. Höljet har en utsträckning på ca ett ljusår.

AGB-stjärnor: de förlorar stora mängder materia från ytan i form av en intensiv *stjärnvind*. Denna utströmmande materia bildar ett *cirkumstellärt hölje*. Det var alltså inget fel på stjärnmodellen, men AGB-stjärnan bantar, dvs. minskar sin massa, och detta påverkar naturligtvis dess framtida utveckling.

Bantningen, och inte fusionen i väteskalet, är den process som huvudsakligen bestämmer en AGB-stjärnas utveckling; massförluster väsentligt överstigande en miljard solmassa per år (nästan en miljard gånger högre än solens s.k. solvind) är vanligt förekommande, och det betyder att en stjärna med solens massa kan "försvinna" på bara en miljon år! Tyvärr måste man konstatera att det ännu inte på långa vägar visat sig möjligt att ens teoretiskt räkna fram stjärnvindens egenskaper för en given stjärna. Huvudsakligen beror det på att ett stort antal fysikaliska och kemiska processer, alla med olika hastigheter, samverkar på ett komplicerat sätt. Därför görs stora ansträngningar för att observationellt bestämma hur stjärnvindens egenskaper varierar med stjärnmassan, temperaturen och den kemiska sammansättningen, samt hur stjärnvinden utvecklas med tiden under döds kampen.

Det är genom analys av strålningen från det cirkumstellära höljets materia som vi bygger upp vår kunskap om stjärnvindens egenskaper och därmed AGB-stjärnors utveckling. Den utkastade materian uppvisar en imponerande komplexitet i form av olika molekyler, som bildats



Den varierande ljusstyrkan hos AGB-stjärnan Mira Ceti under åren 1983 till 1995. Den heldragna linjen ger en anpassning av en matematisk funktion till mätdata.

i stjärnatmosfären eller i det cirkumstellära höljet, och mikroskopiska gruskorn bestående av kol- och kisel-föreningar och olika mineraler, se bilderna på sidan 9. Vad gäller de mest extrema AGB-stjärnorna, dvs. de som har så täta cirkumstellära höljen att centralstjärnan inte syns, kommer all information från den cirkumstellära strålningen.

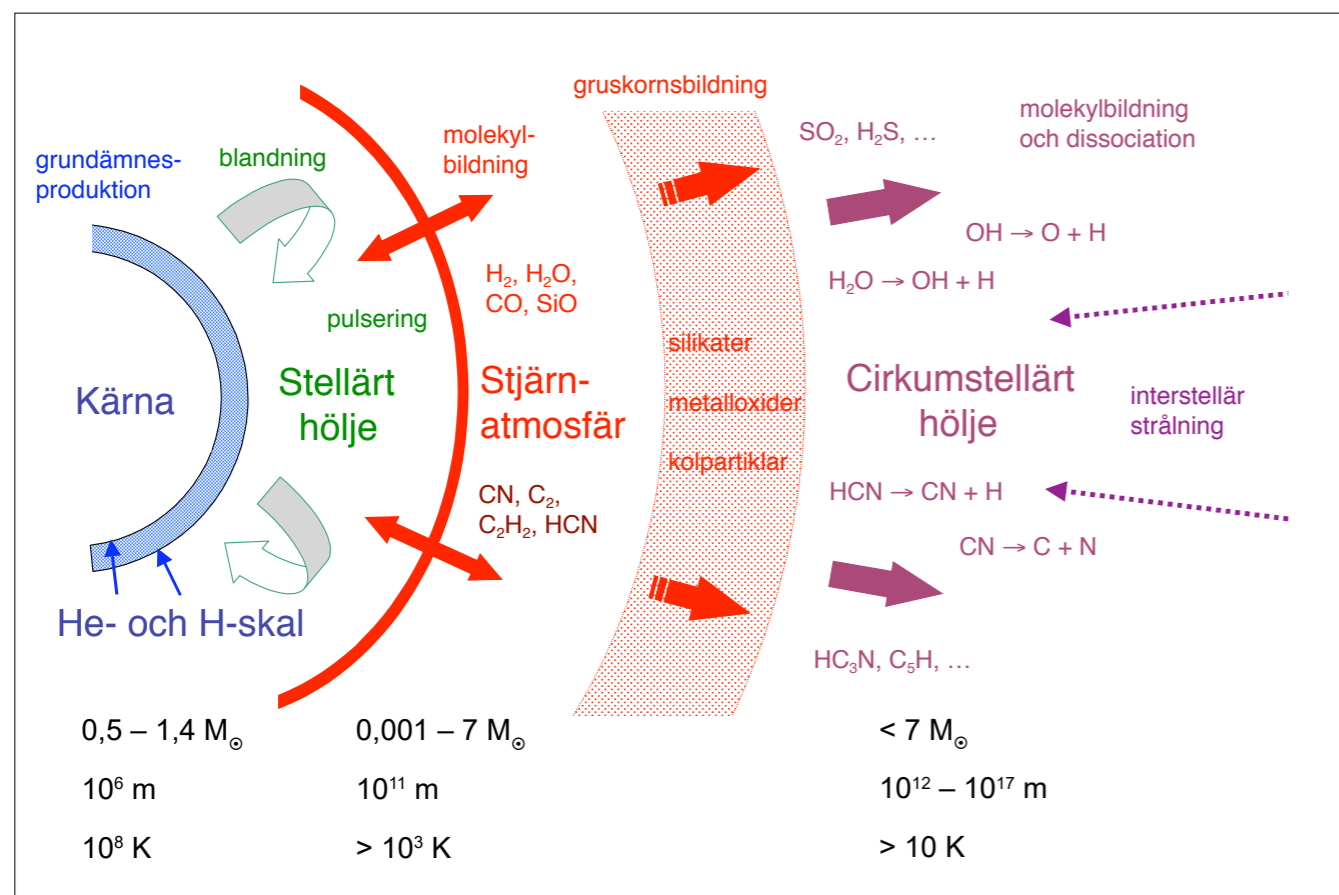
### Pulserande jättar

AGB-stjärnorna har ytterligare en intressant egenskap, de *pulserar*. Det stellära höljet är instabilt och vibrerar, ofta periodiskt på en tidsskala om ca ett år. Det inverkar naturligtvis på deras inre struktur, men framförallt är det förhållandena i atmosfären som påverkas då stora mäng-

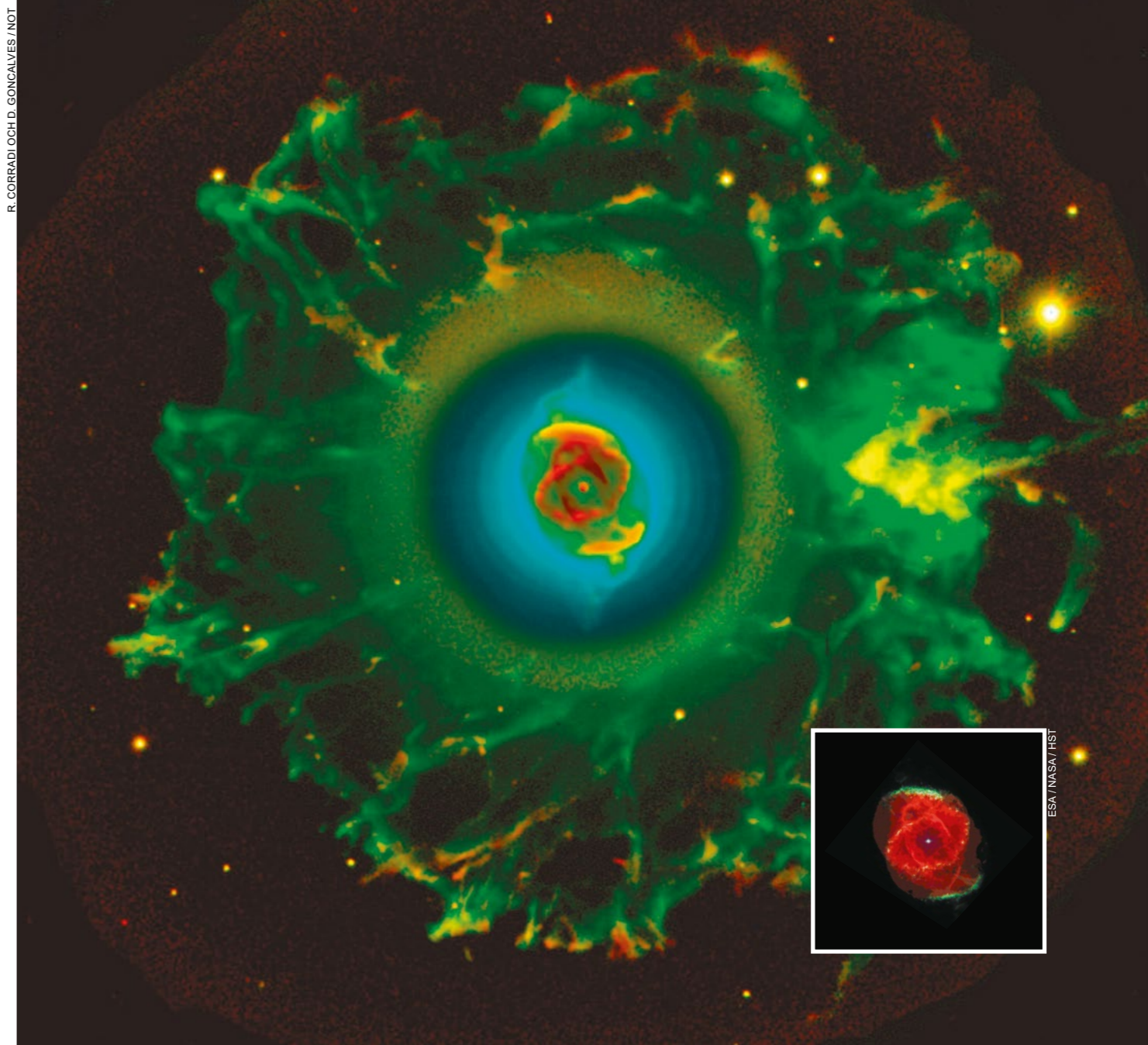
der mekanisk energi regelbundet pumpas igenom den. Den primära effekten är en regelbundet varierande ljusstyrka, ett särdrag som gör att dessa stjärnor ofta är lätta att identifiera på stjärnhimlen, bilden till vänster, och som gjort dem populära som studieobjekt bland amatör-astronomer. Av väsentligt större betydelse är att pulseringen, med största säkerhet, spelar en avgörande roll för bantningsprocessen.

### Mycket komplicerade, dynamiska objekt

Det har förhoppningsvis framgått att en AGB-stjärna är en mycket komplicerad tingest, men därför också fascinerande att studera. Vi tror oss idag förstå huvuddragen i dess utveckling. I princip består den av tre separata delar: kärnan, det stellära höljet och det cirkumstellära höljet. Dessa tre komponenter har väsentligt olika egenskaper vad gäller storlek, temperatur och partikeltäthet, se figuren nedan. Det är utvecklingen hos de enskilda delarna och framförallt kopplingen mellan dem – vid väte- och heliumfusionskalen och vid stjärnatmosfären – som bestämmer helhetens utveckling och som därmed gör det mycket svårt att uppnå en full förståelse. De teoretiskt beräknade stjärnmodellerna kombinerar processer från många delar av fysiken såsom mekanik, termodynamik, hydrodynamik, kvantfysik och kärnfysik, och ibland spelar också kemiska processer stor roll.



R. CORRADI/OGHD. GONCALVES/NOT



I den lilla infällda bilden ses den vackra planetariska nebulosan NGC 6543 (även kallad Kattögenebulosan) med den vita dvärgen i centrum. Ett mycket komplicerat mönster, med viss symmetri, har uppstått i det bortflyende cirkumstellära höljet. Den stora bilden är en djupexponering av nebulosan med omgivningarna och visar ytterligare komplicerade strukturer längre ut i det tunna höljet.

### Så har de flesta döda stjärnor slutat sitt liv

Stjärnor ”lever” på energi som huvudsakligen frigörs genom fusionsprocesser. Dessa kräver en allt högre temperatur ju tyngre de ingående atomkärnorna är. AGB-stjärnornas kärna består huvudsakligen av kol och syre, och det krävs en mycket hög temperatur för att kolfusion skall ske. En hög temperatur kan uppnås genom att kärnan drar sig samman kraftigt, och så sker också i tillräckligt tunga stjärnor. Så är dock inte fallet hos en nybliven AGB-stjärna; det beror på att elektronerna, som följer mikrofysikens lagar, rör sig allt snabbare ju tätare de packas, ett mycket effektivt *degenerationstryck* uppstår som motverkar gravitationen.

Redan på 1930-talet visade den indiske astrofysikern Subrahmanyan Chandrasekhar att det finns en kritisk gräns här, en AGB-kärna vars massa överstiger 1,4 solmassor (*Chandrasekhar massan*) kommer att kollapsa trots

degenerationstrycket. En AGB-stjärna där kärnmassan ökat tillräckligt (den ökar sin massa, på stjärnhöljets bekostnad, vid varje termisk puls från ett ursprungligt värde på ca 0,5 solmassor) skulle därför kunna fortsätta med kolfusion, dvs. gå in i en ny livsfas som till slut skulle leda till en *supernovaexplosion*. Så sker dock inte i verkligheten. Anledningen är att bantningen är så effektiv att även hos de tyngsta AGB-stjärnorna hinner inte kärnmassan överstiga Chandrasekhar massan förrän all materia utanför den, det stellära höljet, är avkastat genom stjärnvinden. AGB-fasen blir därför det sista stjärnstadiet för alla stjärnor i massintervall ca 0,8–8 solmassor.

Eftersom livstiden för en 0,8 solmassors stjärna är ca 17 miljarder år, och det föds betydligt fler stjärnor med lägre massor än med högre, betyder det att *en överväldigande majoritet av alla stjärnor som dött i vårt ca 14 miljarder år*

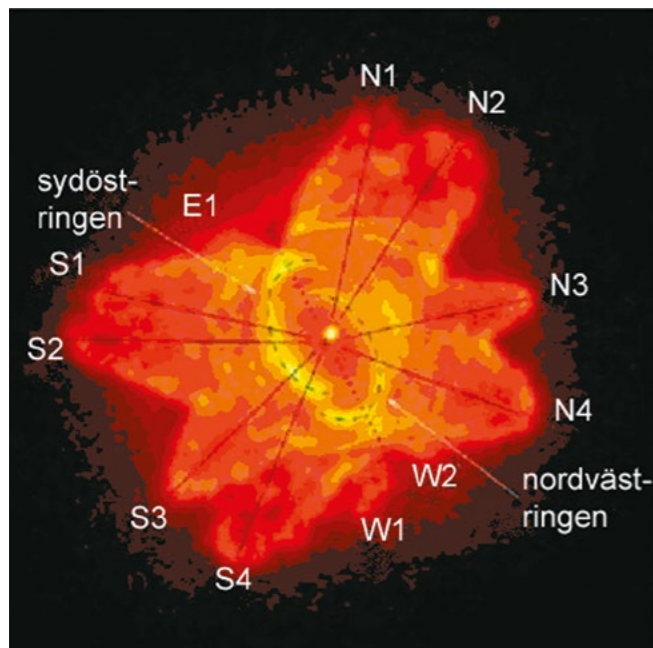


BILD: R. SAHAI OCH J. T. TRAUGER

I centrum av den unga planetariska nebulosan He2-47 har man funnit tecken på materiekastningar i form av "jetstrålar" som skjuter ut i olika riktningar. Växelverkan mellan sådana jetstrålar och det cirkumstellära höljet tros bilda de komplicerade mönster som syns i NGC 6543 på bilden på föregående sida.

*gamla universum har gjort det som AGB-stjärnor.* Bantningen gör också att antalet supernovaexplosioner (av kärnkollapstyp) begränsas kraftigt, eftersom enbart stjärnor som är minst 8 gånger tyngre än solen blir supernovor av detta slag.

#### Från dvärgstjärna till planetarisk nebulosa

Utvecklingen från dvärgstjärna leder alltså fram till en förvandling där större delen av stjärnmassan återgår till den omgivande rymden och kvar blir bara den kompakta, heta kärnan. Denna "döda" stjärnrest av jordstorlek kallas en *vit dvärg*. Den kommer att svalna i lugn och ro allteftersom årmiljarderna går. Ibland har den vita dvärgen en närliggande stjärngranne från vilken materia överförs, och då kan resultatet bli en speciell sorts supernovaexplosion (kallas typ Ia och används som kosmologisk måttstock), men det är en annan historia bortsett från att AGB-fasen är en nödvändighet även för detta fenomen.

Under ca tiotusen år efter AGB-fasens slut är den vita dvärgen så ljusstark och så het att den kan hetta upp det bortflyende cirkumstellära höljet. Så uppstår ett av den astronomiska himlens mest praktfulla fenomen, en planetarisk nebulosa, bilder på sidan 11 och härovan. Det var den ryske astrofysikern Josef Sjklovskij som på 1950-talet gjorde den första kopplingen mellan röda jättar och planetariska nebulosor. Men de senare hade fått denna benämning redan på 1700-talet av William Herschel efter utseendet, som påminde om planetskivor.

#### Med jetstrålar formas de cirkumstellära höljena

Naturen är ofta mer uppfinningsrik än man kan föreställa

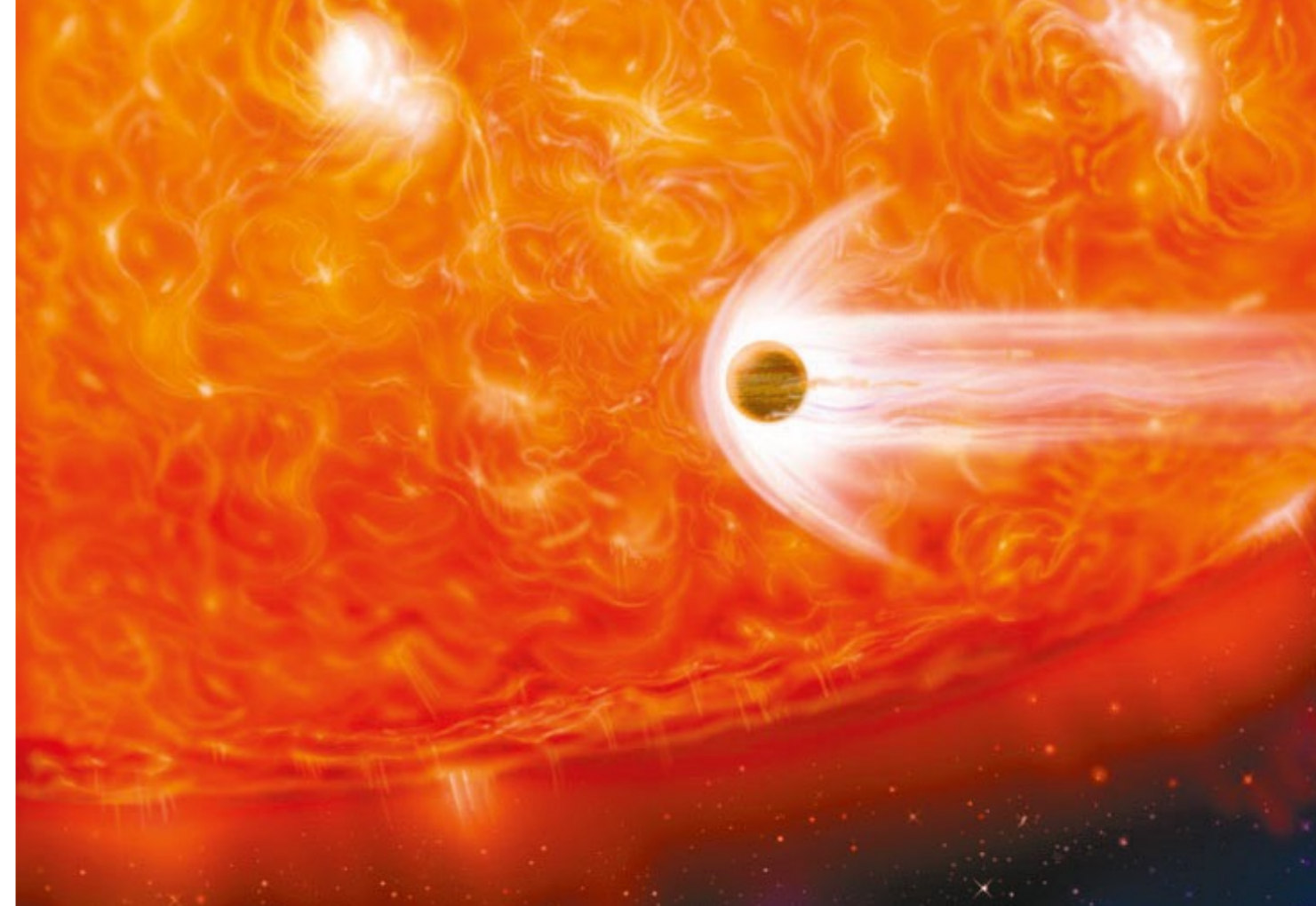
sig. Observationer med känsliga och högupplösande teleskop har påvisat att oerhört komplicerade geometriska mönster kan uppstå i de planetariska nebulosorna. Det tycks som om vissa processer, som tar vid i slutet av stjärnans dödskamp, leder till att "strålar" av materia skjuter ut från området i närheten av stjärnan. Dessa formar de mönster som ses i större skala, dvs. de gröper ur det expanderande cirkumstellära höljet (bilden till vänster). Vad som orsakar dessa strålar har vi än så länge ingen aning om.

#### AGB-stjärnornas roll i grundämnesproduktionen

Stjärnorna spelar en central roll i vårt universum, inte minst därför att i stort sett alla grundämnen har sitt ursprung i kärnprocesser i stjärnors inre eller vid deras explosiva död som supernovor. Eftersom AGB-stjärnor inte kommer längre än till heliumfusion finns det en hel del grundämnen som inte har skapats av dessa stjärnor. Vad gäller de för livet så väsentliga grundämnena kol, kväve och syre tycks det som om AGB-stjärnorna kan bidra med betydande mängder kol, möjligen gäller samma sak för kväve, men syret måste vi tacka supernovorna för. Det skall också noteras att vårt universums grundämnesuppsättning skulle sett helt annorlunda ut om inte bantningen under AGB-fasen starkt begränsat antalet supernovor av kärnkollapstyp.

Alla grundämnen skapas dock inte genom kärnfusion. I själva verket är det så kallade *neutroninfångningsprocesser* som ligger till grund för majoriteten av alla grundämnen tyngre än järn. I en sådan bildas ett nytt grundämne t. ex. genom att en kärna absorberar en neutron som sedan radioaktivt sönderfaller till en proton och en elektron. En viss typ av sådana processer är särskilt aktiv i AGB-stjärnor, och det tycks vara så att *om man räknar antalet grundämnen som skapas så är det AGB-stjärnor som dominerar produktionen*, framförallt de med atomvikter överstigande 90 har sitt ursprung här. Det skulle leda alltför långt att i detalj beskriva produktionen av grundämnen i AGB-stjärnors inre, men förhållandena i området mellan helium- och väteskalet är speciellt gynnsamma, och de termiska pulserna ger nödvändig energi och koppling till stjärnytan.

Av ytterligare intresse i detta sammanhang är att förutsättningarna för bildandet av större partiklar (om än mikroskopiska), är speciellt gynnsamma i AGB-stjärnornas atmosfärer tack vare de höga tätheterna och de relativt låga temperaturerna. Hur bildandet av dessa *gruskorn* går till i detalj vet vi ännu inte, men partiklar som måste ha sitt ursprung i en AGB-stjärna som levde före solens födelse har hittats i vårt eget solsystem. Uppskattningar ger vid handen att AGB-stjärnorna dominerar produktionen av dessa gruskorn, som i sin tur bildar "fröna" till de interstellära gruskornen. De senare spelar en mycket viktig astronomisk roll, då de underlättar bildandet av nya stjärnor genom att kyla ned den komprimerade gasen, och de kan verka som katalysatorer vid bildandet av komplexa molekyler i den kosmiska gasen.



När solen blir en jättestjärna kommer de inre planeterna i solsystemet sannolikt att slukas av solatmosfären. Även jorden kan komma att drabbas av detta öde, vilket är motivet för denna teckning.

#### Solens död

Vårt intresse för AGB-stjärnor stimuleras naturligtvis också av att solen kommer att sluta sitt liv som en sådan. Dess utveckling som dvärgstjärna tror vi oss idag förstå, även om en viss osäkerhet råder. Enligt aktuella beräkningar kommer denna lugna fas att vara slut om ca 6,5 miljarder år, dvs. då solen är ca 11 miljarder år gammal, och den kommer då att vara ungefär dubbelt så ljusstark som idag (vilket ger en förödande effekt på jordens klimat!). Sedan inträder ett åldrande som kommer att sträcka sig över ca 1,5 miljarder år. Huvuddelen av denna tid upptas av den första utvecklingen som en röd jätte. Även då kommer solen att förlora materia, uppskattningsvis en fjärdedel av sin massa. AGB-fasen utgör i stort sett bara de sista tiotalen årmiljoner, och bantningen sker under den sista årmiljonen. Då kommer solen att förlora ytterligare en fjärdedel av sin massa, nå en ljusstyrka ca 5000 gånger högre än den nuvarande, samt gå igenom ca fem termiska pulser, vilket dock inte kommer att räcka för att förvandla solen till en kolstjärna. Den resulterande vita dvärgen kommer att ha en massa som är hälften av solens, och den kommer troligen att kunna skapa en planetarisk nebulosa, ett praktfullt slut på ett långt liv.

Bantningen påverkar också planeterna. Solens minskande massa gör att planeterna vill flytta sig utåt, medan friktionen mellan dem och den cirkumstellära materien

leder till den omvända effekten, allt mindre banor. Det gör det osäkert om solen kommer att svälla tillräckligt för att så småningom svälja jorden, det beror inte minst på hur massförlusten utvecklas. Om så sker blir det det definitiva slutet på livsbetingelserna på jorden!

#### Framtida utmaningar

AGB-stjärnorna intar en så central roll i universum att det motiverar en fortsatt utforskning av dem. De är så komplicerade att ett framgångsrikt forskningsarbete bara kan bedrivas genom en stark koppling mellan teori och observationer. Den teoretiska utvecklingen begränsas huvudsakligen av datorernas förmåga. Observationellt krävs att ett stort antal olika metoder inom olika våglängdsområden utnyttjas för att få en så komplett bild som möjligt. Av speciellt intresse är högupplösande metoder som ger information om det område där stjärnvinden startar. Det är en stor utmaning för oss att reda ut hur en AGB-stjärna verkligen fungerar. Många överraskningar återstår innan förvandlingen från dvärgstjärna till vit dvärg och planetarisk nebulosa har fått sin fulla förklaring. ♦

**HANS OLOFSSON** är professor i astronomi vid Stockholms universitet och har särskilt intresserat sig för stjärnornas sena utvecklingsstadier.