

Evoluția stelelor

John Percy

Uniunea Astronomică Internațională, Universitatea Toronto (Canada)

Rezumat

Acest articol conține informații utile pentru profesorii de fizică din gimnaziu privind studiul stelelor și evoluția lor. De asemenea, conține link-uri către curriculum tipic pentru școală și sugerează activități relevante pentru elevi.

Obiective

- Înțelegerea evoluției stelare și a proceselor care stau la baza acestuia.
- Înțelegerea diagramei Hertzsprung-Russell.
- Înțelegerea sistemului de magnitudini absolute și aparente.

Introducere

Evoluția stelară presupune orice modificare apărută la nivelul stelelor, începând cu nașterea acestora, de-a lungul vieții lor îndelungate și până la moarte, de la „Forțele” gravitaționale ale stelelor la energia radiantă. Pentru a compensa această pierdere de energie, stelele produc energie prin procese de fuziune nucleară a unor elemente ușoare în altele mai grele. Acest fenomen schimbă încet compoziția chimică și, implicit, și celelalte proprietăți ale acestora. În final, nu va mai exista combustibil nuclear și astfel vor muri. Înțelegând natura și evoluția stelelor, vom reuși să înțelegem și să apreciem natura și evoluția soarelui nostru – astrul care face posibilă existența vieții pe Pământ. Ne ajută să înțelegem originea sistemului nostru solar, a atomilor și a moleculelor din care este formată materia, inclusiv materia vie. Ne ajută să răspundem la întrebări fundamentale, precum „sunt alte stele capabile să producă energie, și să trăiască suficient de mult timp, și să rămână stabile suficient de mult, astfel încât să fie posibilă apariția și dezvoltarea vieții pe planetele din jurul lor?”. Pentru acestea, precum și pentru alte motive, evoluția stelelor este un subiect interesant pentru elevi.

Proprietățile Soarelui și ale Stelelor

Primul pas în înțelegerea originii și evoluției Soarelui și a stelelor este înțelegerea proprietăților lor. Elevii ar trebui să înțeleagă modul în care sunt determinate aceste proprietăți. Soarele este cea mai apropiată stea. Discuții legate de Soare au fost realizate în alte părți ale acestui curs. În acest articol, tratăm Soarele din punct de vedere al evoluției stelelor. Elevii ar trebui să înțeleagă proprietățile și structura, precum și sursa de energie a Soarelui, deoarece aceleași principii permit astronomilor să determine structura și evoluția tuturor stelelor.

Soarele

Comparativ cu alte stele, determinarea proprietăților de bază ale Soarelui este un proces relativ ușor. Dimensiunea sa medie este de $1,495978715 \times 10^{11}$ m; din aceasta, raza sa unghiulară (959,63 arcsec) poate fi transformată, prin geometrie, într-o rază liniară: $6,96265 \times 10^8$ m sau 696265 km. Fluxul observat (1370 W/m^2), la distanță terestră poate fi transformată într-o putere totală: $3,85 \times 10^{26}$ W.

Masa acestuia poate fi determinată prin forța gravitațională exercitată asupra planetelor, prin utilizarea legilor mecanice și gravitaționale ale lui Newton: $1,9891 \times 10^{30}$ kg. Temperatura la suprafață – stratul de unde provine lumina – este de 5780 K. Perioada de rotație este de aproximativ 25 de zile, dar variază în funcție de latitudinea Soarelui. În ceea ce privește compoziția acestuia, aceasta constă în principal din hidrogen și heliu. La activitatea 2, elevii vor observa Soarele, cea mai apropiată stea, pentru a vedea cum arată o stea.

Stelele

Cea mai evidentă proprietate a unei stele este luminozitatea acesteia. Aceasta se măsoară prin *magnitudine*, care este o măsură logaritmică a fluxului de energie pe care-l primim.

Scala de magnitudine a fost dezvoltată de astronomul grec Hiparh (c. 190-120 î. Hr.). Acesta a clasificat magnitudinea stelelor de la 1 la 5. De aceea, stelele cu o luminozitate mai mică au magnitudine mai mare. Mai târziu, s-a constatat că simțurile umane reacționează logaritmice față de stimuli, astfel a fost introdus un raport de luminozitate (2,512), ce corespunde unei diferențe de 1,0 a magnitudinii. Cea mai luminoasă stea pe cer în timpul nopții are magnitudinea de -1,44. Cea mai slab luminată stea vizibilă cu cel mai mare telescop are magnitudinea de aproximativ 30.

Luminozitatea aparentă, B , a unei stele depinde de puterea ei, P , și de distanță, D . Conform *legii pătratului invers al luminozității*, aceasta este direct proporțională cu puterea și invers proporțională cu pătratul distanței: $B \cong P/D^2$. Pentru stelele apropiate, distanța poate să fie măsurată prin *paralaxă*. La Activitatea 1, elevii pot să facă o demonstrație pentru a ilustra paralaxa și a arăta că aceasta este invers proporțională cu distanța la obiectul observat. Puterea stelelor poate să fie apoi calculată și determinată cu legea pătratului invers al luminozității.

Stelele prezintă culori diferite, acest lucru se poate fi studiat foarte ușor prin observarea stelelor Rigel (Beta Orionis) și Betelgeuse (Alpha Orionis) din constelația Orion (figura 1).

La activitatea 3, elevii pot să observe stelele în timpul nopții și să admire frumusețea cerului real. Culorile diferite ale stelelor se datorează temperaturilor diferite ale straturilor radiante ale stelelor. Stelele mai reci apar roșii, iar cele mai calde apar albastre. Datorită modului în care ochiul răspunde la culori, o stea roșie apare roșu-deschis, iar o stea albastră apare albastru-deschis. Culoarea poate să fie determinată în mod exact cu ajutorul unui fotometru cu filtre de diferite culori și astfel se poate determina temperatura stelei analizate.



Fig. 1: Constelația Orion. Betelgeuse, steaua din colțul din dreapta sus, este rece și astfel apare roșie. Deneb, din partea de jos dreapta, este fierbinte și apare albastră. Nebuloasa Orion se poate observa sub cele trei stele din partea centrală a constelației.

Temperatura unei stele se poate determina și cu ajutorul spectrului său – distribuția culorilor sau a lungimilor de undă a luminii stelei (figura 2). Această figură ilustrează frumusețea culorilor luminii stelelor. Această lumină a trecut de atmosfera exterioară a stelei, și ionii, atomii și moleculele din atmosferă îndepărtează anumite lungimi de undă din spectru. Astfel apar liniile negre sau lipsa culorilor din spectru (figura 2). În funcție de temperatura atmosferei, atomii se pot ioniza, excita sau combina în molecule. Observarea stării atomilor în spectru oferă astfel informații legate de temperatură.

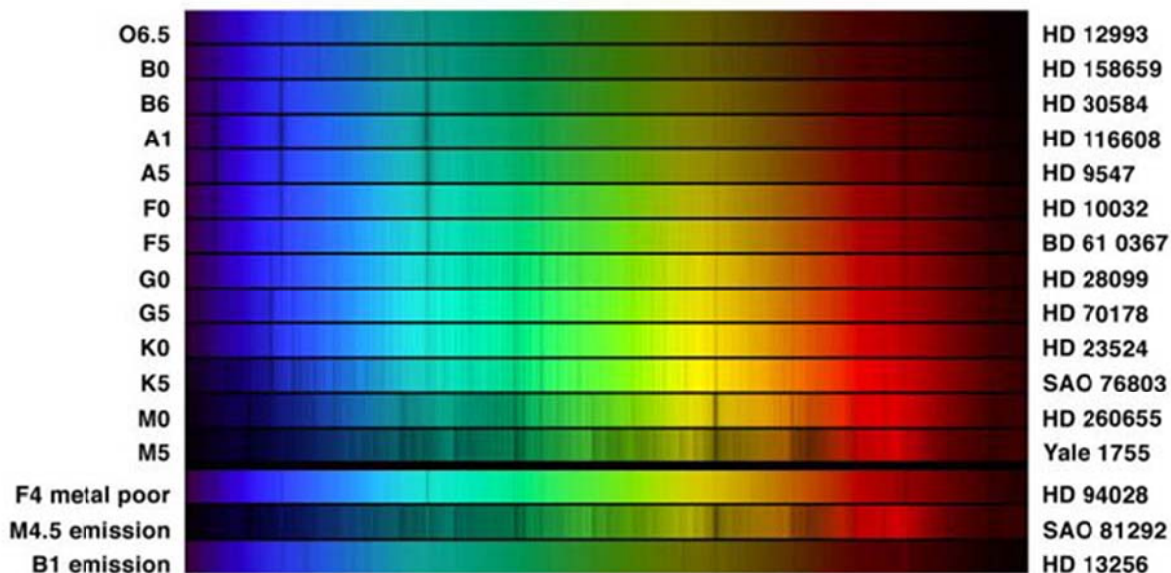


Fig. 2: Spectrul stelelor, de la cele mai fierbinți (O6.5-sus) la cele mai reci (M5: a patra de jos). Diferitele aspecte ale spectrelor se datorează diferitelor temperaturi ale stelelor. Ultimele trei spectre aparțin unor stele cu comportament aparte. Sursa: National Optical Astronomy Observatory

Acum un secol, astronomii au descoperit o relație importantă între puterea unei stele și temperatura sa: pentru majoritatea stelelor (dar nu pentru toate), puterea este mai mare la o

temperatură mai ridicată. Mai târziu s-a constatat că factorul care controlează această relație este masa stelei: stelele mai masive sunt mai puternice și mai fierbinți. Graficul relației putere-temperatură poartă numele de diagramă Hertzsprung-Russell (figura 3). Este foarte important ca elevii să creeze graficele (Activitatea 8) și să le interpreteze (figura 3).

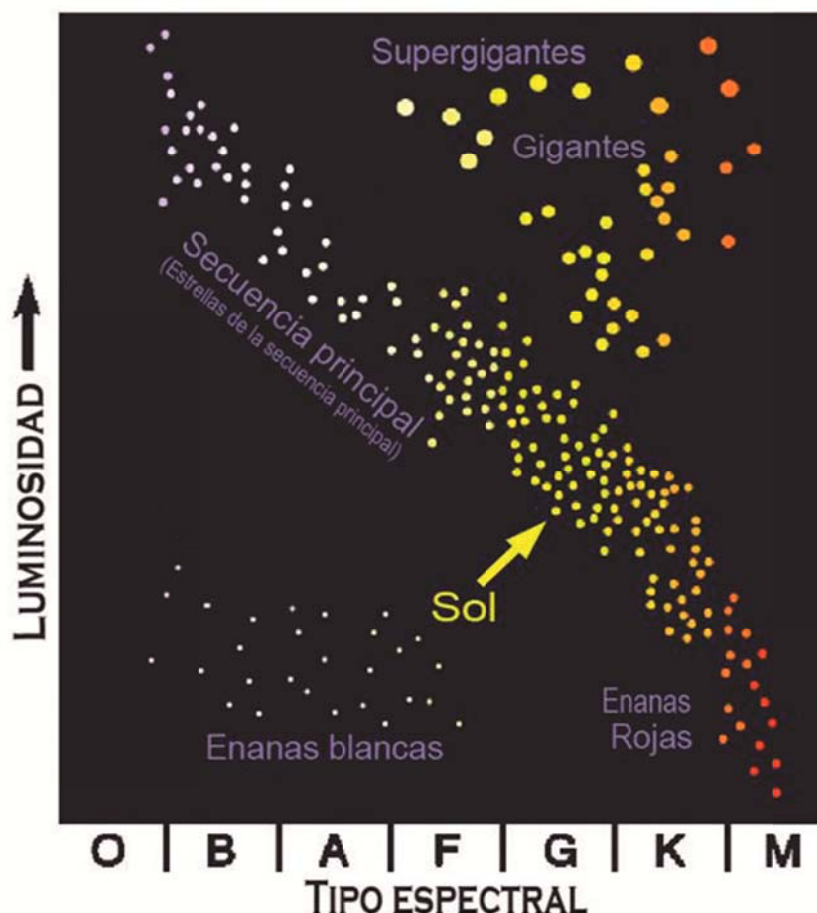


Fig. 3: Diagrama Hertzsprung-Russell, un grafic al puterii și a luminozității stelare versus temperatură. Din motive istorice, temperatura crește spre stânga. Literele OBAFGKM sunt tipuri spectrale descriptive care sunt legate de temperatură. Liniile diagonale reprezintă raza stelelor; stele mari (gigante sau supergigante) sunt în partea dreaptă de sus, iar cele mici (pitice) sunt în partea de jos spre stânga. De remarcat secvența principală din partea dreaptă de jos spre stânga sus. Majoritatea stelelor se găsesc în această regiune. Este prezentată masa majorității stelelor. De asemenea, este redată și locația unor stele bine cunoscute. Sursă: University of California Berkeley

Un obiectiv principal în astronomie este determinarea puterii stelelor de diferite tipuri. Așadar, în cazul în care se observă un anumit tip de stea într-o parte a Universului, astronomii pot să utilizeze luminozitatea B și puterea presupusă P pentru a determina distanța D din legea pătratului invers a luminozității: $B \cong P/D^2$.

Spectrele stelelor (și ale nebuloaselor) dezvăluie, de asemenea, informații legate de compoziția stelelor: curba de abundență cosmică (figura 4). Acestea constau în 3/4 hidrogen, 1/4 heliu și 2% elemente grele, în mare parte carbon, azot și oxigen.

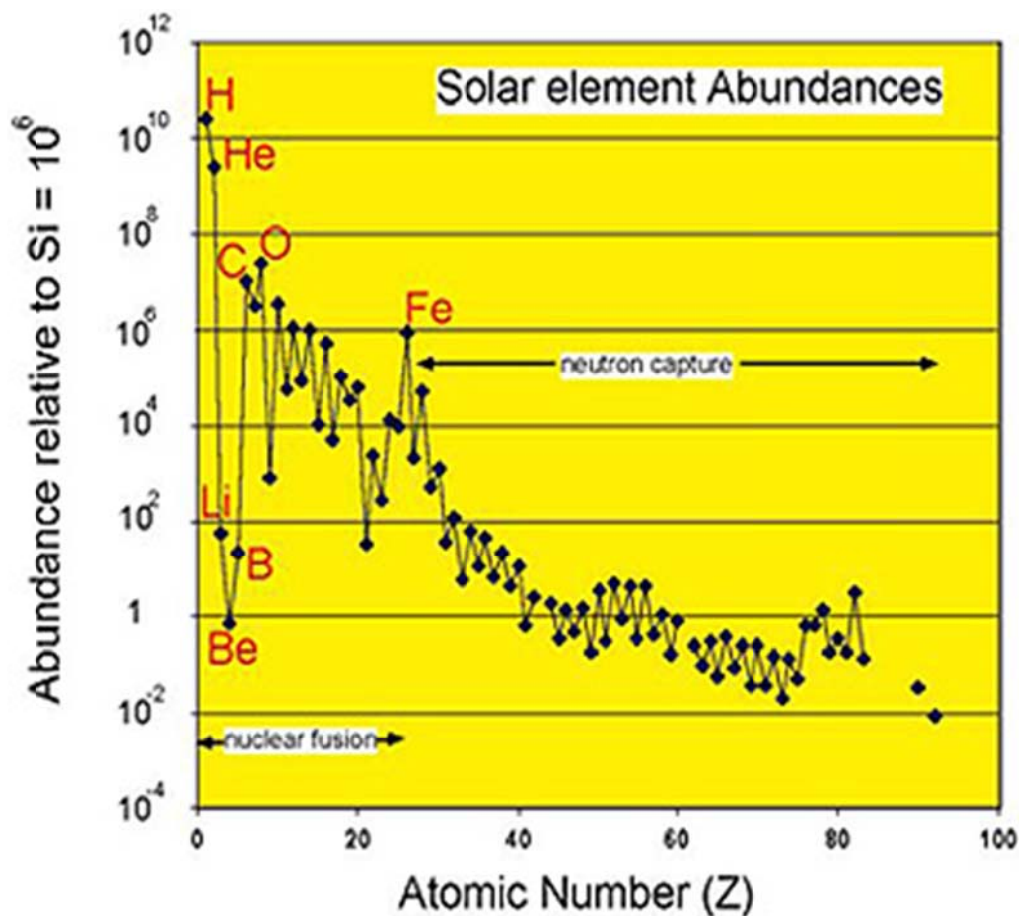


Fig. 4: Abundența elementelor din Soare și stele. Cele mai abundente sunt hidrogenul și heliul. Litiul și beriliul sunt în concentrații foarte mici. Carbonul, azotul și oxigenul sunt abundente. Prezența altor elemente descrește odată cu creșterea numărului atomic. Hidrogenul este de 10^{12} ori mai abundent decât uraniul. Elementele cu același număr par de protoni sunt mai abundente decât cele cu număr impar de protoni. Elementele mai ușoare decât fierul sunt produse prin fuziune nucleară, în timp ce cele mai grele rezultă din captura neutronilor în exploziile supernovei. Sursă: NASA.

Aproximativ jumătate din stelele din vecinătatea Soarelui sunt *binare* sau *duble* – două stele ce se orbitează una pe cealaltă. Stelele duble sunt importante deoarece permit astronomilor să măsoare masa stelelor. Masa unei stele se poate determina prin observarea mișcării celei de-a doua stele și invers. Sirius, Procyon și Capella sunt exemple de stele duble. Există de asemenea și stele *multiple*: trei sau mai multe stele care se orbitează reciproc. Alpha Centauri, cea mai apropiată stea de Soare este o stea triplă. Epsilon Lyrae este o stea quadruplă.

După cum am menționat mai sus, există o relație importantă între puterea unei stele și masa acesteia: puterea este aproximativ proporțională cu masa stelei la puterea a 3-a. Aceasta poartă numele de *relația masă-luminozitate*.

Masa stelelor variază între 0,1 și 100 de ori față de masa Soarelui. Puterea variază de la aproximativ 0,0001 la 1.000.000 față de masa Soarelui. Cele mai fierbinți stele au aproximativ 50.000 K, iar cele mai reci 2.000 K. Când astronomii studiază stelele pot observa că Soarele este mult mai masiv și mai puternic decât 95% dintre toate stelele din vecinătate.

Stelele masive și puternice sunt foarte rare. Soarele nu este o stea comună. Este mai presus de comun!

Structura Soarelui și a stelelor

Structura Soarelui și a stelelor este determinată în principal de gravitație. Gravitația este cea care menține partea fluidă a Soarelui într-o formă aproape sferică. În adâncul Soarelui, presiunea crește, datorită greutateii straturilor gazoase de la suprafață. Conform legilor gazelor, care sunt aplicabile în cazul unui gaz perfect, densitatea și temperatura sunt de asemenea mai mari în cazul în care presiunea este mai mare. Dacă straturile mai adânci sunt mai fierbinți, căldura va migra spre exterior, deoarece căldura migrează întotdeauna de la cald spre rece. Aceasta se poate realiza fie prin radiație, fie prin convecție. Aceste trei principii rezultă din legea masă-luminozitate.

În cazul în care căldura migrează spre exteriorul Soarelui, atunci straturile mai adânci se vor răci și gravitația va determina contractia Soarelui – dacă energia este produsă în centrul Soarelui. S-a dovedit că Soarele nu se contractă, ci este ținut de presiunea radiației creată prin procesul de fuziune termonucleară, descrisă mai jos.

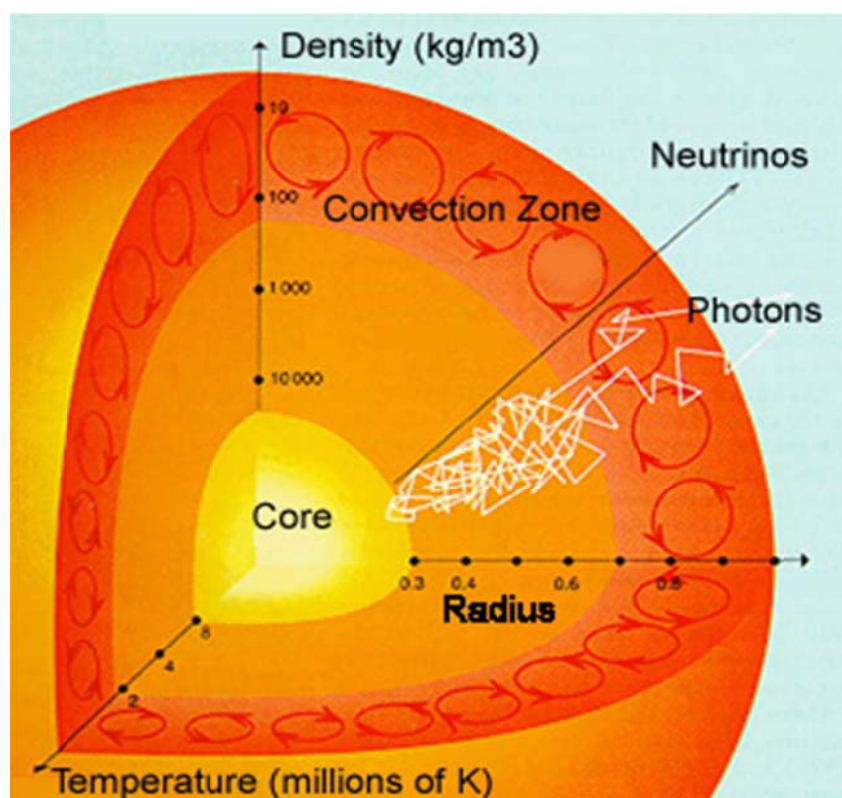


Fig. 5: O secțiune transversală prin Soare, determinată din modele fizice. În zona de la suprafață, energia este transportată prin convecție; sub aceasta este transportată de radiație. Energia este produsă în miezul Soarelui. Sursă: Institute of Theoretical Physics, University of Oslo.

Aceste patru principii simple se aplică la toate stelele. Se pot exprima ca ecuații și soluționate la calculator. Acesta oferă un *model* al Soarelui sau al oricărei stele: presiune, densitate și flux de energie în orice poziție față de miezul stelei. Aceasta e metoda de bază prin care astronomii învață despre structura și evoluția stelelor. Modelul este construit pentru o anumită valoare a masei și a compoziției stelei; și, pornind de la aceasta, astronomii pot să calculeze raza stelei, puterea acesteia, precum și alte proprietăți observabile (figura 5).

Recent, astronomii au dezvoltat o metodă puternică de testare a modelelor privind structura Soarelui și a stelelor – *helioseismologia* sau, pentru alte stele, *astroseismologia*. Soarele și stelele vibrează ușor și în moduri diferite. Acestea pot fi observate cu instrumente sensibile și comparate cu proprietățile vibrațiilor care sunt prezise de modele.

Sursa de energie a Soarelui și a stelelor

Una din întrebările cercetătorilor, de mai multe secole, este legată de sursa de energie a Soarelui și a stelelor. Cea mai evidentă sursă de energie este reprezentată de arderea chimică a combustibililor, cum ar fi uleiuri sau gaze naturale dar, datorită puterii extrem de ridicate a Soarelui (4×10^{26} W), astfel de surse de energie ar putea să se epuizeze în câteva mii de ani. Până acum câteva decenii, oamenii credeau ca vârsta Soarelui și a Pământului este de doar câteva mii de ani datorită scrierilor din Biblie!

După cercetările efectuate de Isaac Newton, care a emis Legea atracției universale, cercetătorii au realizat că Soarele și stelele ar putea să genereze energie prin contracția înceată. Energia (potențialul) de gravitație ar putea să fie convertit în căldură și radiație. Această sursă de energie ar putea să dureze milioane de ani. Cu toate acestea, dovezile geologice sugerează că Pământul, și prin urmare Soarele, au o vârstă mult mai mare.

La sfârșitul secolului al 19-lea, cercetătorii au descoperit radioactivitatea și fisiunea nucleară. Elementele radioactive sunt însă foarte rare la nivelul Soarelui și a stelelor, și nu ar putea să asigure puterea acestora pentru miliarde de ani.

În final, cercetătorii au realizat în secolul 20 că elementele ușoare pot să fuzioneze în altele mai grele, proces numit fuziune nucleară. Dacă temperatura și densitatea sunt suficient de ridicate, acestea ar putea produce o mare cantitate de energie – mai mult decât suficientă pentru a alimenta Soarele și stelele. Elementul cu cel mai ridicat potențial de fuziune nucleară este hidrogenul, iar acesta este cel mai abundent la nivelul Soarelui și a stelelor.

La nivelul stelelor cu masă mică, cum este Soarele, fuziunea hidrogenului are loc în mai multe etape ce poartă numele de reacția în lanț p-p. Protonii fuzionează și formează deuteriul, alt neutron fuzionează cu deuteriul și generează heliu-3. Nucleii de heliu-3 fuzionează și formează heliu-4, izotopul normal al heliului (figura 6).

În stelele masive, hidrogenul fuzionează și se formează heliul printr-o serie diferită de reacții ce poartă numele de *ciclu CNO* (*ciclu de carbon-azot-oxigen*), în care carbonul-12 este utilizat drept catalizator (figura 7). Rezultatul final, în fiecare caz, este că prin fuzionarea a 4 nuclee de hidrogen rezultă un nucleu de heliu. O mică parte a masei nucleelor de hidrogen este convertită în energie (vezi Activitatea 9). În mod normal nucleele se resping unul pe

celălalt, datorită încărcării pozitive, fuziunea apare numai dacă între nuclee are loc o coliziune energetică (la temperaturi ridicate) și frecventă (densitate ridicată).

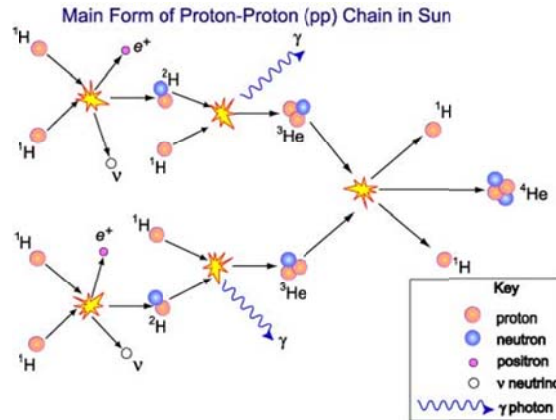


Fig. 6: Reacția în lanț proton-proton prin care rezultă heliu din fuziunea hidrogenului la nivelul Soarelui și a altor stele cu masă mai mică. În această figură, precum și în următoarea, se observă că neutronii (ν) sunt emiși în urma unor reacții. Energia este emisă sub formă de radiații gamma și energie cinetică a nucleelor. Sursă: Australia National Telescope Facility.

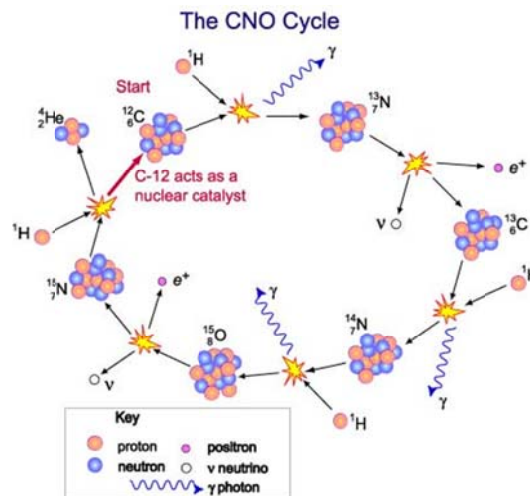


Fig. 7: Ciclul CNO, prin care hidrogenul fuzionează și generează heliu la nivelul stelelor mai mari decât Soarele. Carbonul-12 (marcat cu „start”) acționează drept catalizator, acesta participă la reacții fără a fi consumat. Sursă: Australia National Telescope Facility.

Dacă fuziunea nucleară este sursa puterii Soarelui, atunci reacțiile de fuziune ar trebui să ducă la generarea unui număr mare de particule subatomice numite neutrini. De obicei aceștia trec prin materie fără a interacționa cu aceasta. Miliarde de neutrini trec prin organismul nostru în fiecare secundă. Numai o parte din aceștia pot să fie observați prin măsurători speciale. Primele observații au detectat doar o treime din numărul presupus de neutrini. Această problemă a „neutrinelor solari” a durat mai bine de 20 de ani, dar a fost în final soluționată de Observatorul Neutrinic din Sudbury (SNO) din Canada (figura 8). Inima acestui observator este un rezervor imens de apă grea – apă în care nucleele de hidrogen sunt reprezentate de deuteriu. Ocazional, aceste nuclee absorb un neutrino și emit un flash de

lumină. Există trei tipuri de neutrini. Două treimi dintre neutrinii de la Soare se modifică în alte tipuri. SNO este sensibil față de toate cele trei tipuri de neutrini și este capabil să detecteze toți neutrinii prevăzuți teoretic.

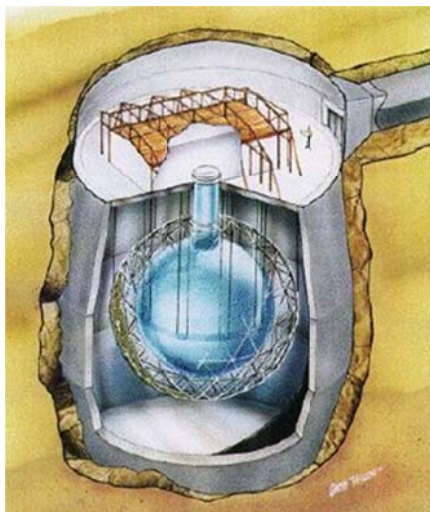


Fig. 8: Observatorul Neutrinic din Sudbury, unde cercetătorii au confirmat modelele de fuziune nucleară din Soare prin observarea fluxului teoretic de neutrini. Inima observatorului este un rezervor imens de apă grea. Nucleii de deuteriu (vezi text) interacționează ocazional cu neutrini pentru a produce o undă de lumină observabilă. Sursă: Sudbury Neutrino Observatory.

Viața Soarelui și a stelelor

Termenul de „metodă științifică” este un concept fundamental în predarea științelor, astfel este necesară explicația modului în care astronomii înțeleg evoluția stelelor:

- prin utilizarea simulărilor pe calculator, bazate pe legile fizicii, după cum s-a descris mai sus;
- prin observarea stelelor pe cer, care se află în diferite stadii de evoluție, și plasarea lor într-o „secvență de evoluție” logică;
- prin observarea roiurilor de stele: grupuri de stele care s-au format din același nor de gaz și praf, în același timp, dar care au mase diferite. Există mii de roiuri de stele în galaxia noastră, inclusiv *150 de roiuri globulare* care sunt cele mai vechi obiecte din galaxia noastră. Hyadele, Pleiadele și majoritatea stelelor din Ursa Mare sunt roiuri de stele care pot fi observate cu ochiul liber. Roiurile sunt „experimentele naturii”: grupuri de stele formate din același material, în același loc și în același timp. Aceste stele diferă numai în ceea ce privește masa. Cum roiuri diferite au vârste diferite, se poate observa cu o colecție de stele de diferite mase ar apărea la vârste diferite.
- prin observarea directă și rapidă a stadiilor de evoluție; acestea vor fi foarte rare, deoarece reprezintă o scurtă etapă în viața stelelor;
- prin studierea modificărilor perioadei pulsației stelelor variabile. Aceste modificări sunt mici, dar sunt observabile. Durata acestor perioade depinde de raza stelei. Odată cu modificarea razei pe parcursul evoluției, se modifică și perioada. Modificarea perioadei poate să fie măsurată prin observații sistematice și pe o perioadă îndelungată a stelelor.

Prima metodă, cea de utilizare a simulărilor computerizate, este aceeași metodă prin care a fost determinată *structura* stelelor. Odată cunoscută structura stelei, se cunoaște temperatura acesteia și densitatea în orice punct, se poate calcula modul în care compoziția chimică se modifică în urma proceselor termonucleare. Aceste modificări ale compoziției pot să fie încorporate în următorul model de secvență a evoluției.

Cele mai cunoscute stele variabile care pulsează se numesc Cepheide, după steaua Delta Cephei care este un exemplu evident. Există o relație între perioada de variație a Cepheidei și puterea sa. Prin măsurarea perioadei, astronomii pot să determine puterea și implicit distanța, prin utilizarea legii pătratului-invers a luminozității. Cepheidele reprezintă un instrument important pentru determinarea mărimii și a scalei vârstei Universului.

La activitatea 5, elevii vor observa diferite stele, prin proiecte de genul Cytizen Sky. Aceasta le va permite dezvoltarea unor abilități matematice și științifice, în timp ce învață știința adevărată și probabil vor contribui la cunoașterea astronomică.

Viața și moartea Soarelui și a stelelor

Procesul de fuziune a hidrogenului este foarte eficient. Asigură luminozitatea stelelor prin viața lor lungă. Reacțiile de fuziune sunt mai rapide spre centrul stelei, unde temperatura și densitatea sunt mai ridicate. Astfel, steaua dezvoltă un miez de heliu care se extinde treptat spre exterior. În acest timp, miezul stelei este fierbinte, prin contracție, astfel încât hidrogenul din jurul miezului de heliu este suficient de fierbinte pentru a fuziona. Acest proces duce la extinderea straturilor de la suprafața stelei – încet la început, și apoi mai rapid. Devine o stea roșie gigantă, de sute de ori mai mare decât Soarele. În final, centrul de heliu devine suficient de fierbinte și astfel heliul fuzionează în carbon. Această fuziune echilibrează atracția gravitațională, dar nu pentru mult timp, deoarece fuziunea heliului nu este la fel de eficientă ca și cea a hidrogenului. În acest moment miezul de carbon se micșorează, devine mai fierbinte și straturile de la suprafață se extind și devine o gigantă roșie și mai mare. Cele mai masive stele se extind la o dimensiune și mai mare, devin *stele roșii supergigante*.

O stea moare în momentul în care se termină combustibilul. Nu mai există o sursă de energie pentru a menține miezul fierbinte și pentru a genera suficientă presiune gazoasă care să împiedice forța gravitațională să contracte steaua. Modul în care moare o stea depinde de masa ei.

Durata de viață a unei stele depinde de asemenea de masa ei: stelele mai mici au o luminozitate mai mică și o durată de viață mai mare – zeci de miliarde de ani. Stelele mai mari au o luminozitate mai mare și un timp de viață mai scurtă – milioane de ani. Majoritatea stelelor sunt cu mase mici și viața lor depășește vârsta actuală a universului.

Înainte ca o stea să moară, aceasta își pierde din masă. În timp ce consumă ultima parte de hidrogen, urmată de heliu, steaua se transformă într-o stea roșie gigantă, cu o rază de sute de ori mai mare și cu un volum de un miliard de ori mai mare decât ale Soarelui. La Activitatea 4, elevii vor putea să facă o scală-model, pentru a vizualiza modificările imense ale dimensiunii unei stele pe parcursul evoluției sale. Forța gravitațională în straturile de la suprafața unei stele roșii gigante sunt reduse. De asemenea, devine instabilă în pulsație, cu

expansiune și contracție ritmică. Datorită dimensiunii mari a unei stele roșii gigante, este nevoie de luni până la ani pentru fiecare ciclu de pulsație. Aceasta va duce la pierderea straturilor de la suprafață în spațiu, formând o frumoasă *nebuloașă planetară* ce se extinde încet în jurul stelei aflate în agonie (figura 9). Gazele din nebuloasa planetară sunt fluorescente datorită ultravioletelor emise de miezul fierbinte al stelei. În cele din urmă, acestea se vor disipa în spațiu departe de stea și, alături de alte gaze și praf, vor forma nebuloase din care se vor naște noi stele.



Fig. 9: Nebuloasa Helix, o nebuloasă planetară. Gazele din nebuloasă au fost eliminate din stea în faza de evoluție de gigantă roșie. Miezul stelei este fierbinte și se poate observa foarte vag în centrul nebuloasei. Sursă: NASA.

Viața stelelor masive este ușor diferită de cea a stelelor cu masă mai mică. În stelele cu masă mai mică, energia este transportată spre exterior prin radiație. În miezul stelelor mai mari, energia este transportată prin convecție, astfel miezul este complet amestecat. În timp ce ultimul nucleu de hidrogen este consumat în miez, steaua se transformă rapid într-o gigantă roșie. În cazul stelelor cu masă mai mică, tranziția este mai lentă.

Stelele trebuie să aibă o masă de 0,08 mai mare decât a Soarelui. În sens contrar, ele nu vor avea miezul suficient de fierbinte și dens pentru a duce la fuzionarea hidrogenului. Cele mai masive stele au masele de sute de ori mai mare decât masa Soarelui. Stele de dimensiuni mai mari ar fi așa de puternice încât radiația ar opri formarea lor sau menținerea într-o stare stabilă.

Stele obișnuite: stele cu masă mică

În stelele cu o masă inițială de 8 ori decât cea a Soarelui, pierderea masei va duce la micșorarea miezului de 1,4 ori masa Soarelui. Acest tip de miez nu are combustibil termonuclear. Acțiunea forțelor gravitaționale este balansată de presiunea exterioară a electronilor. Aceștia rezistă oricărei alte contracții datorită Principiului de Excluziune a lui Pauli – o lege a fizicii cuantice care afirmă că există o limită a numărului de electroni care pot fi într-un anumit volum. Aceasta poartă numele de *pitică albă*. Aceștia au o masă de 1,44 mai mică decât masa Soarelui. Aceasta poartă numele de *limită Chandrasekhar*, deoarece

astronomul, laureat al Premiului Nobel, Subrahmanyan Chandrasekhar a arătat că acest tip de stea este mai masivă și radiază energie răcindu-se.

Piticele albe reprezintă punctul final în evoluția unei stele. Sunt foarte comune în Galaxia noastră. Însă sunt foarte greu de observat: nu sunt mai mari decât Pământul, astfel, cu toate că sunt fierbinți, nu emit o mare cantitate de radiații. Puterea acestora este de mii de ori mai mică decât cea a Soarelui. Emit radiații doar datorită faptului că sunt fierbinți. Astfel de stele orbitează în jurul unor stele precum Sirius și Procyon. Aceste stele nu au o sursă de energie, în afară de căldura înmagazinată. Acestea sunt ca și tăciunii de cărbune aprinși, care se răcesc într-un șemineu. După miliarde de ani se vor răci complet și vor deveni negre și reci.

Stele rare: stelele masive

Stelele masive sunt fierbinți și puternice, însă sunt foarte rare. Au o viață scurtă, de câteva milioane de ani. Miezul acestora este suficient de fierbinte și dens pentru a duce la fuzionarea elementelor până la fier. Miezul de fier nu are disponibilă o sursă de energie, fie ea prin fuziune sau prin fisiune. Nu există o sursă de energie care să mențină miezul fierbinte astfel încât să reziste forțelor gravitaționale. Acestea vor duce la colapsul miezului stelei într-o secundă, ducând la transformarea acestuia într-o masă de neutroni (sau altă materie), eliberând astfel cantități imense de energie gravitațională. Aceasta duce la explozia straturilor exterioare și la apariția *supernovei* (figura 10). Aceste straturi sunt ejectate cu o viteză de până la 10.000 km/sec.



Fig. 10: Sursă: NASA. Nebuloasa Crabului, rămășițele unei explozii a unei supernove care a fost observată de astronomi în Asia 1054 î. Hr. Miezul stelei care a explodat este un pulsar, sau o stea neutronică care se rotește cu o viteză mare, în interiorul nebuloasei. O mică parte a energiei de rotație este transmisă nebuloasei, făcând-o să lumineze. Sursă: NASA.

O supernovă, la luminozitate maximă, poate să fie la fel de luminoasă ca și o galaxie de sute de miliarde de stele. Atât Tycho Brahe, cât și Johannes Kepler au observat și studiat supernove strălucitoare în 1572, respectiv 1604. Conform lui Aristotel, stelele au fost perfecte și nu s-au schimbat; Brahe și Kepler au demonstrat contrariul. În Galaxia noastră, Calea Lactee, nu a fost observată o supernovă de mai bine de 400 de ani. O supernovă vizibilă cu

ochiul liber a fost observată în 1987 în Micul Nor al lui Magellan, o mică galaxie satelit a galaxiei noastre.

Masa miezului unei supernove depășește limita Chandrasekhar. Protonii și electronii din miezul care colapsează fuzionează și generează neutroni și neutrini. Explozia neutronilor poate să fie observată de un observator neutrinic. Atâta timp cât masa miezului este de trei ori mai mică decât masa Soarelui, va fi stabilă. Forțele gravitaționale interioare sunt compensate de presiunea externă a neutronilor. Acest obiect poartă numele de *stea neutronică*. Diametrul său este de aproximativ 10 km, iar densitatea sa este de 10^{14} ori densitatea apei. Poate să fie văzută cu ajutorul telescoapelor cu raze X în cazul în care este încă suficient de fierbinte, însă acestea au fost descoperite într-un mod neașteptat – ca surse de impulsuri de unde radio numite *pulsari*. Perioada de pulsație a acestora este de aproximativ o secundă, uneori chiar mai puțin. Pulsațiile sunt produse de câmpul magnetic puternic al stelelor neutronice, fiind aruncat în jurul valorii apropiate de viteza luminii prin rotație rapidă a stelei.

Aceasta este cel de-al doilea tip de supernove ce se întâlnesc în sistemele binare în care o stea a murit și a devenit o pitică albă. Când a doua stea începe să se extindă, poate să emită gaze spre pitica albă. Dacă masa piticei albe devine mai mare decât limita Chandrasekhar, atunci aceasta "deflagrează": materia fuzionează aproape instant în carbon, eliberând energie suficientă pentru a distruge steaua.

În explozia unei supernove, toate elementele care s-au format în urma reacțiilor de fuziune sunt emise în spațiu. Elementele mai grele decât fierul sunt produse, în cantități mici, în timpul exploziei, în timp ce neutronii iradiază nucleele mai mici care sunt emise.

Stele foarte rare: stele foarte masive

Stelele foarte masive sunt foarte rare – o stea dintr-un miliard. Au o putere de un milion de ori mai mare decât a Soarelui și trăiesc foarte puțin. Sunt așa de masive, încât atunci când rămân fără energie și miezul lor colapsează, masa lor este de 3 ori mai mare decât a Soarelui. Gravitatea depășește energie exercitată de neutroni. Miezul continuă să colapseze până când este așa de dens încât forțele gravitaționale împiedică emiterea oricărui tip de materie, inclusiv lumină. Astfel devine o *gaură neagră*. Găurile negre nu emit radiații, însă dacă este o stea normală în preajmă, determină orbitarea acesteia în jurul ei. Mișcarea de orbitare permite astronomilor să detecteze găurile negre și să măsoare masa acestora. Mai mult: o mică cantitate de gaz de la steaua normală poate să fie atrasă spre gaura neagră și încălzită până ajunge să strălucească în domeniul X înainte să fie încorporată în gaura neagră (figura 11). Găurile negre sunt astfel surse puternice de raze X și pot fi descoperite cu ajutorul telescoapelor cu raze X.

În centrul multor galaxii, inclusiv al Galaxiei noastre, astronomii au descoperit *găuri negre masive*, de milioane sau miliarde de ori mai mari decât Soarele. Masa acestora este determinată prin intermediul efectelor exercitate asupra stelelor vizibile din vecinătatea lor. Găurile negre masive s-au format în timpul procesului de naștere a galaxiilor, dar nu este încă clar cum anume. Unul din obiectivele astronomilor este să înțeleagă cum s-au format primele stele, galaxii și găuri negre masive, la scurt timp de la nașterea universului.

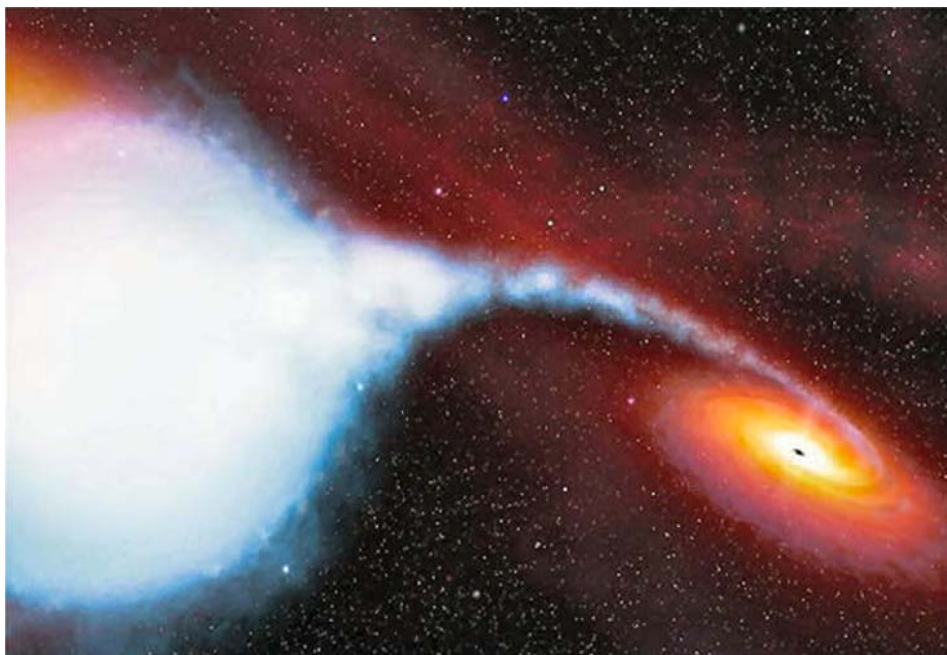


Fig. 11: Viziunea unui artist asupra unui sistem binar de raze X Cygnus X-1. Acesta constă dintr-o stea masivă normală (stânga) și o gaură neagră (dreapta), de 15 ori mai masive decât Soarele, ce se orbitează una pe alta. Gazele din steaua normală sunt atrase în așa numitul *disc de acumulare* din jurul găurii negre și în final vor fi încorporate în aceasta. Gazele sunt încălzite suficient pentru a duce la emiterea de raze X. Sursă: NASA.

Stele variabile cataclismice

Aproximativ jumătate din stele sunt stele binare, două sau mai multe stele ce se orbitează reciproc. De cele mai multe ori, orbitele sunt foarte mari și cele două stele nu intervin în evoluția celeilalte. Dar dacă orbita este mică, cele două stele pot să interacționeze, în special în cazul în care una devine o gigantă roșie. Și dacă una din stele moare și devine o pitică albă, o stea neutronică sau o gaură neagră evoluția stelei normale va fi influențată și va furniza materie către cea moartă și se pot întâmpla lucruri interesante (figura 12). Sistemele binare variază în ceea ce privește luminozitatea, din diverse motive, și poartă numele de *variabile cataclismice*. După cum s-a prezentat anterior, o stea satelit de tip pitică albă poate să explodeze generând o supernovă dacă este transferată suficientă energie către aceasta. Dacă steaua normală a furnizat materie bogată în hidrogen către pitica albă, această materie poate să explodeze în urma procesului de fuziune a hidrogenului generând o *novă*. Materia care migrează spre pitica albă, stea neutronică sau gaură neagră, poate să devină pur și simplu fierbinte și să producă o cantitate mare de radiație, precum razele X.

În viziunea artistică a unei găuri negre (figura 11), se poate vedea *discul de acumulare* al gazelor în jurul găurii negre, și fluxul de gaze de la steaua normală care este atras de gaura neagră.

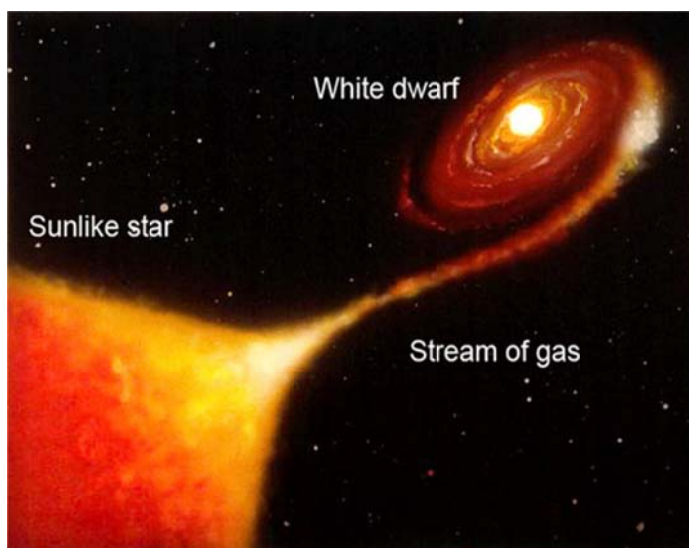


Fig. 12: O stea variabilă cataclismică. Materia de la steaua normală (stânga) este atrasă spre pitica albă (dreapta). Formează discul de acumulare în jurul piticeii albe, ceea ce generează lumină. În cele din urmă materia este încorporată în pitica albă unde se poate aprinde sau poate să explodeze. Sursă: NASA.

Formarea (nașterea) Soarelui și a stelelor

Stelele se nasc acum! Deoarece majoritatea stelelor masive au o viață de numai câteva milioane de ani, și deoarece vârsta Universului este de mai bine de zece miliarde de ani, se presupune că aceste stele masive s-au format recent. Localizarea acestora ar putea fi un indiciu: se găsesc în și lângă nori de gaz și praf ce poartă numele de nebuloase. Gazele sunt formate din ioni, atomi și molecule, în special hidrogen, cu urme de heliu și mici cantități de alte elemente grele. Praful constă în particule de silicat și grafit, cu dimensiuni mai mici de un micrometru. Praful este în cantități mai mici decât gazul, dar acesta joacă un rol important într-o nebuloasă. Permite formarea moleculelor prin protejarea acestora de radiațiile puternice de la stelele învecinate. De asemenea, este un catalizator al formării moleculelor. Cea mai apropiată nebuloasă, de mari dimensiuni și luminoasă, este Nebuloasa Orion (figura 13). Stelele fierbinți din nebuloasă determină ca atomii de gaz să fie fluorescenți. Praful este cald și emite radiații infraroșii. De asemenea, blochează lumina de la stelele și gazele din spatele său, ceea ce duce la apariția unor pete întunecate în nebuloasă.

Gravitația este o forță de atracție, de aceea nu este uimitor că anumite zone din nebuloasă se contractă încet. Aceasta se întâmplă dacă forța gravitațională este mai mare decât presiunea turbulenței din acea parte a norului. Primele stadii de contracție pot să fie ajutate de o undă de șoc de la o supernovă învecinată sau de puterea radiațiilor de la o stea masivă din apropiere. Odată ce începe contracția, aceasta continuă. Aproximativ jumătate din energia eliberată din contracția gravitațională duce la încălzirea stelei. Cealaltă jumătate este emisă în spațiu. Când miezul ajunge la o temperatură de 1.000.000 K, începe fuziunea termonucleară a deuteriului; când temperatura ajunge la valori mai ridicate, începe fuziunea termonucleară normală a hidrogenului. Când energia produsă este egală cu energia emisă, se consideră, în mod oficial, că a luat naștere o stea.



Fig. 13: Nebuloasa Orion, un nor mare de gaz și praf în care stelele (și planetele sale) se formează. Gazul este fluorescent. În praf se observă pete întunecate, care se pot observa în partea sus stânga. Sursă: NASA.

Când începe contracția gravitațională, materia prezintă o mică mișcare de rotație (moment cinetic) datorită turbulențelor din nor. Pe măsură ce contracția continuă, „conservarea momentului cinetic determină accelerarea mișcării de rotație. Acest fenomen poate fi observat la patinaj, în momentul în care patinatorul dorește o accelerare a rotației piruetei și își retrage mâinile aproape de axa de rotație (corp). În timp ce crește mișcarea de rotație a stelei ce se contractă, forța centrifugă (după cum este numită popular, dar incorect) determină ca materia din jur să se distribuie într-un disc. Astfel se formează partea densă a miezului discului. Planetele se formează efectiv în acest disc – planetele stâncoase sunt aproape de stea iar cele gazoase și reci spre exteriorul discului.

În nebuloase, precum Nebuloasa Orion, astronomii au observat stele în diferite stadii de formare. Ei au observat discuri protoplanetare în care se formează planete precum a noastră. Începând din 1995, astronomii au descoperit exoplanetele și planete extra-solare – planete în jurul unor stele ca și Soarele. Aceasta este o dovadă incontestabilă că planetele sunt produse secundare ale procesului de formare a stelelor. Există posibilitatea ca în Univers să existe multe planete asemeni Pământului.

Bibliografie

- Bennett, Jeffrey et al, *The Essential Cosmic Perspective*, Addison-Wesley; one of the best of the many available textbooks in introductory astronomy, 2005.
- Kaler, James B, *The Cambridge Encyclopaedia of Stars*, Cambridge Univ. Press, 2006.
- Percy, J.R, *Understanding Variable Star*, Cambridge University Press, 2007.

Surse Internet

- American Association of Variable Star Observers. <http://www.aavso.org>. Education project: <http://www.aavso.org/vsa>
- Chandra X-Ray Satellite webpage. http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/
- Kaler's "stellar" website. <http://stars.astro.illinois.edu/sow/sowlist.html>
- Stellar Evolution on Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution