

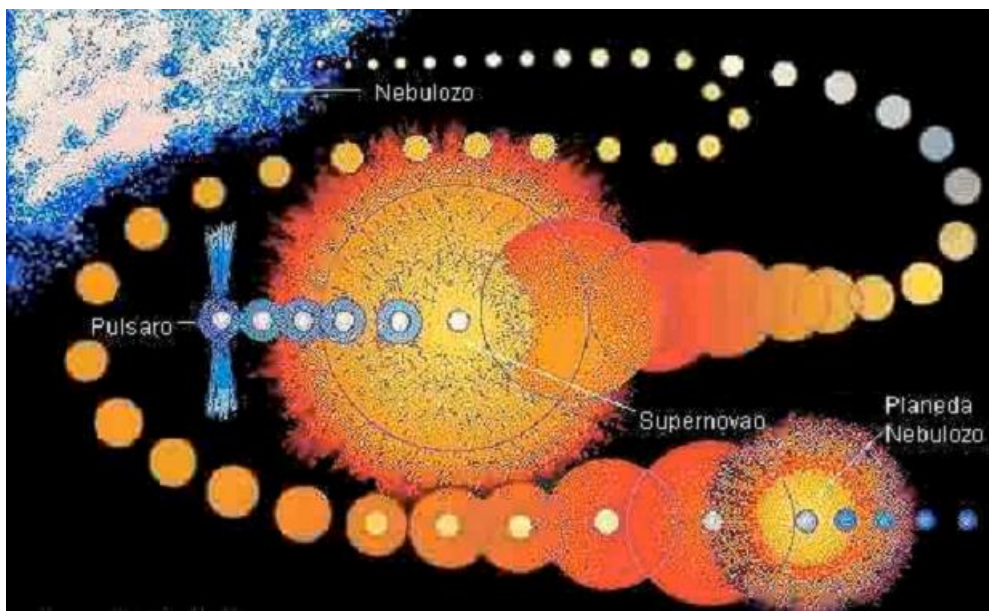
Komentoj pri stelevoluo

Antonio M. Sánchez Pérez
Universitato de La Laguna, Kanarioj, Hispanio

Marco Trevisan Herralde
Aŭtonoma Universitato de Madrido, Madrido, Hispanio

Laŭ homa skalo la vivodaŭro de la steloj estas grandega, do ili al ni ŝajnas eterne senŝanĝaj objektoj. Tamen, kvazaŭ vivaj estaĵoj, la steloj naskiĝas, kreskas, mortas, kaj eĉ havas "filojn". Ĉiam konsiderante, ke oni laboras surbaze de teorioj kaj fizikaj modeloj apogataj de observado, ni klopodos traigardi la evoluprocezojn de diversaj stelotipoj. Tiujn stelotipojn ni klasigos laŭ maso. Tiu parametro determinas ne nur la vivodaŭron de stelo, sed ankaŭ ĝian mortprocezon same kiel respondas al la demando - ĉu la formiĝanta antaŭstelo fariĝos vere stelo (ĉu la infano naskiĝos aŭ mortos nenaskita).

Ni ankaŭ klopodos klasifiki stelojn laŭ koloroj, surfacotemperaturoj kaj spektroj kaj klarigos la tre konatan kaj en astrofiziko vaste uzatan diagramon de Hertzsprung - Russell kaj stelmoviĝon laŭ ĝi dum ilia evoluado.



Kondiĉoj por steloformiĝo

Steloformiĝo estas ligita kun vastaj regionoj de la interstela spaco, kies materia denseco povas esti konsiderinda kompare kun la ĉirkaŭa vakuo. La materio el kiu konsistas tiuj regionoj (nuboj) estas ĉefe molekula hidrogeno (H_2) kaj konsiderinda kvanto de aliaj molekuloj kiel karbondioksido (CO_2), molekula karbono (C_2), silikatoj miksitaj kun glacio, kaj simplaj organikaj molekuloj kiel amoniako, alkoholoj aŭ iona grupo OH, kaj pli kompleksaj kiel formaldehidaj kaj aliaj.

El tiu materio formiĝas la steloj, sed kiamaniere la procezo komenciĝas? Se partikloj estas elektre neŭtraj, t.e. sen elektra ŝarĝo, la forto kiu regas inter ili estas la gravito. Tiu ĉi forto estas ĉiam kuntira kaj klopodas proksimigi la partiklojn pli kaj pli, tial ke la nubo kontrahiĝu. Sed ekzistas ankaŭ alia forto, la premforto, kiu aperas, ĉar la temperaturo de la nubo ne estas nula (tipa temperaturo estas $30\text{ K} = -243^\circ\text{ C}$). Tiu forto celas disigi la nubon. Povas okazi, ke la nubo stabiligiĝas. Tio signifas ke ambaŭ fortoj, kiuj puŝas en malsamaj direktoj nuligas unu la alian kaj la nubo nek eksplodas, nek implodas (falas sur sin mem - hidrostata ekvilibro). Sed imagu ke pro iu kialo okazas malstabiligiĝo, ekzemple pro proksima supernova eksplodo. Tio perturbas la nubon tiamaniere ke en ĝi aperus regionoj kie la denseco de materio estas pli alta ol en iliaj ĉirkaŭaĵoj. Se

tiu denseco estas sufiĉe alta tiam tiuloke la gravita forto superas la preforton kaj la ĉirkaŭanta materio kuntiriĝas al tiuj pli densaj regionoj. Jen ĝerموj de eblaj estontaj steloj.

La unua kiu studis tiun problemon estis brita matematikisto, fizikisto kaj astronomo Sir James Hopwood Jeans (1877 - 1946) kiu solvis matematikan simpligitan problemon, kiu koncernis sferan homogenan gasan volumenon al kiu estas aplikata sinusa perturbo. Kriterio de Jeans [ĵi:ns] diras, ke por ke tiaj regionoj estu kreataj necesas, ke la maso de la nubo ne estu pli malgranda ol iu fiksita kvanto.

Protosteloj

Laŭ la antaŭa alineo, en la "stelĝermo" regas la gravita forto kaj tiu regiono komencas kontraĥiĝi. Samtempe pro tiu kontraĥiĝo kreskas temperaturo de la regiono. La kontraĥiĝantaj kaj varmiĝantaj nuboj oni nomas *protosteloj* (antaŭsteloj).

Ankaŭ ene de protostelo la premo plialtiĝas, tial la preforto iĝas pli kaj pli grava kaj la gravito havas denove konkuranton. Kiam ambaŭ fortoj egaliĝas, la kontraĥiĝo ĉesas kaj la regiono atingas denove hidrostatan ekvilibron.

Nu, ju pli granda estas la maso de la protostelo, des pli rapida estas la kontraĥiĝo kaj des pli altaj estas la temperaturoj atingeblaj en ĝia kerno. Se post fino de la kontraĥiĝo tiu temperaturo ne sufiĉas por komenci temonulkeajn reakciojn, la protostelo neniam iĝos stelo. La bezonata temperaturo estas proksimume unu miliono da gradoj.

La protostelo devas havi mason ne pli malgrandan ol 0.06 sunaj masoj por ke tiu temperaturo estu atingita. Protosteloj, aŭ substeloj, kun maso nesufiĉa por termonukleaj reakcioj, sed sufiĉe granda (75-obla de la Jupitera maso) estas objektoj membrilaj, similaj al maljunaj steloj kun malgranda maso. Tiuj objektoj nomiĝas *brunaj nanaj steloj* (kvankam ili fakte ne estas steloj). La unua estis observata en 1995 per la teleskopo IAC80 ĉe la Observatorio Teide (Astrofizika Instituto de la Kanarioj) en la insulo Tenerife. Tiu bruna nano troviĝas ĉe la Plejadoj kaj estis nomita *Teide 1*. La konfirmo ke vere temis pri bruna nana stelo venis samjare de havaja teleskopo Keck I. Tie du hispanaj astronomoj, Rafael Rebolo kaj Eduardo Martín, kunlabore kun du usonaj astronomoj de Berkelia Universitato rimarkis en ĝia spektro litio-liniojn, kio estas kondiĉo por ke la objekto estu bruna nana stelo, sed ne maljuna stelo.

Oni diskutas: kioma estas la maso-limo por dividi brunan nanan stelon de planedo. Multaj sciencistoj opinias, ke tiu maso egalas al 13 jupiteraj masoj. Do, "protosteloj" kies maso estas malpli granda ol tiu masolimo estas konsiderataj planedoj.

Du ekzemploj de malsamaj stadioj en la stelformiĝo estas la nebulozo en Oriono, kie nuntempe naskiĝas steloj, kaj la Plejadoj, kie ĉirkaŭ junaj steloj videblas la restaĵoj de la originala nubego.

La ĉefa sekvenco

Oni nomas tiel la plej longan periodon de la stela vivo. Ĝia ĉefa karakterizaĵo estas bruligado de hidrogeno en la stelkerno pro nukleaj reakcioj.⁽¹⁾ Kiam la centro de la kontraĥiganta protostelo atingas la necesan temperaturon komenciĝas la nuklea aktivado kaj la energio eliĝanta el tiuj reakcioj plialtigas la temperaturon de la protostelo. Sekve la gaspremo plialtiĝas kaj haltigas la gravitan kontraĥiĝon, per kio la hidrostata ekvilibro estas atingita.

Dum la unuaj jarmilionoj de tiu periodo la steloj montras iujn karakterizaĵojn kiajn ekz. nereguleco en la brilo. La klarigo estas, ke ĉirkaŭ la ĵusnaskita stelo troviĝas ankoraŭ granda kvanto de materio, restaĵoj de la kontraĥiganta nubo, kun kiu la stelo interŝanĝas energion kaj angulan momanton. Tiuj steloj nomiĝas *T Taŭro-steloj*, ĉar unu el la unuaj observataj estas la stelo T de la konstelacio Taŭro.

Post tiu periodo la stelo eniras pli longan kiun karakterizas ĝia "trankvileco". La tempodaŭro de tiu periodo dependas de la maso de la stelo, ĉar ju pli alta estas ĝia denseco, des pli rapide okazas la nukleaj reakcioj kaj foruziĝas la hidrogeno. Por la Suno, kiu estas konsiderata malalt-masa stelo, la tempodaŭro estas kalkulita je dek mil milionoj da jaroj, kaj oni taksas ke ekde ĝia komenciĝo jam forpasis duono de tiu tempo.

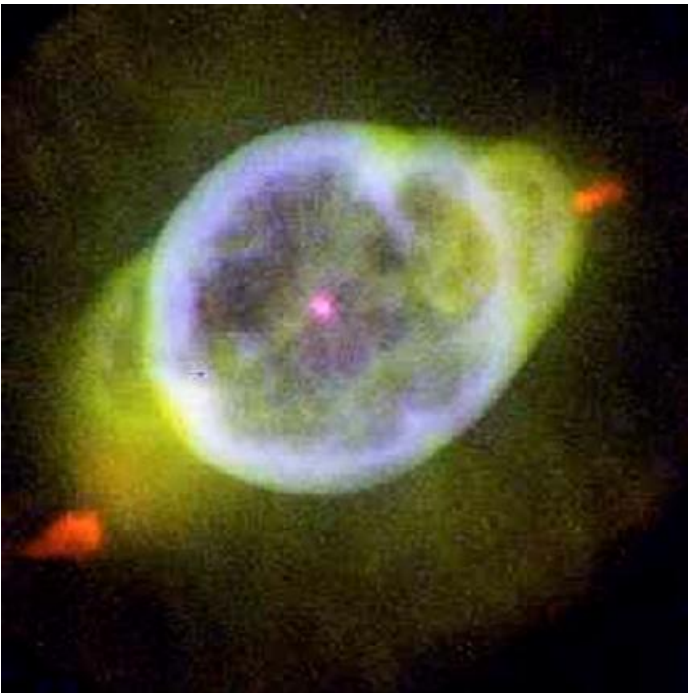
La fakto ke dum la periodo de la ĉefa sekvenco la stelo prezentas rimarkindajn ŝanĝojn ne signifas ke la stelo tute ne ŝanĝiĝas. La lumintenseco (L) estas proporcia al la maso (M), radiuso (R) kaj al la meza molekula pezo (m) laŭ jena esprimo:

$$L \sim M^{5.5} R^{-0.5} m^{7.5}$$

La maso kiun perdas la stelo dum tiu tempo, ekzemple kiel stelo-vento, estas notinda se la stelo havas grandegan mason, ni diru ekzemple 30 suno-masoj, sed ne en la kazo de steloj malpli masaj ol 15 suno-masoj; ankaŭ la radiuso apenaŭ varias se la stelo ne estas tre grandmasa. Se temas pri la molekula maso, la afero estas alia. La rezulto de la hidrogenbrulado estas, krom lumo kaj varmo, heliomo; heliomo estas elemento pli peza ol hidrogeno, do laŭ tempopaso la meza molekula pezo plialtiĝas kaj, laŭ ĝia eksponento, la brilo konsiderinde altiĝas. Fakte oni kalkulas ke antaŭ 4000 milionoj da jaroj la Suno estis inter 25 kaj 30 % malpli brila ol nun.

Alia karakterizaĵo, kiu dependas de la maso estas la koloro de la stelo. Ju pli granda estas la maso, des pli alta estas la temperaturo en ĉiuj regionoj de la stelo, kaj la surfaca temperaturo determinas ĝian koloron.

Evoluo de steloj post la ĉefa sekvenco



Jen la planeda nebulozo NGC 3242, ankaŭ konata kiel La Fantomo de Jupitero. Ĝi enhavas blankan nanan stelon.

La maso de la stelo ne nur determinas la tempodaŭron de ĝia ĉeesto en la ĉefsekvenco, sed ankaŭ ĝian postan pluevoluadon. Ĝenerale kio okazas kiam la nuklea brulado finiĝas, okazas rompiĝo de la hidrostatika ekvilibro ĉar la nukleaj fortoj ne plu subtenas la pezon de la stelo kaj la iam interrompita kontraĥiĝado rekomenciĝas.

Etmasaj steloj pelos eksteren siajn atmosferojn lasante la kernojn nudaj kaj iom post iom malvarmiĝantaj. Grandmasaj steloj havas pli violentan morton. Pli detale ni vidu la diversajn evolueblecojn.

Ĉar tio influos rekte sur nia planedo kaj sur niaj malproksimegaj posteuloj, ni unue okupiĝu pri la Suno kaj steloj mase similaj. Pli supre ni vidis ke dum la stela kerno fabrikadas heliomon, la brilo kreskadas, do ni devas atendi ke dum la venontaj 5000 milionoj da jaroj la sunbrilo preskaŭ duobliĝos.

Kiam tiaj steloj lasas la ĉefan sekvencon, la hidrogeno en la centro estas tute bruligita kaj la kerno estas sfero el heliomo ĉirkaŭata de hidrogenriĉaj regionoj. La temperaturo ne estas sufiĉa por komencigo de reakcioj inter heliumaj nukleoj, sed la lima hidrogeno ankoraŭ brulas kreante pli da heliomo, kreskigante la helioman kernon kaj laŭ maso kaj laŭ dimensio. Ni rimarku, ke la hidrogenreakcioj ne okazas en la centro, kiel dum la ĉefsekvenco, sed en pli ekstera ŝelo, kaj ju pli kreskas tiu kerno, des pli proksime de eksteraj regionoj okazas tiuj reakcioj. La generita energio estas pli facile portebla per konvekcio al la supraĵo, kie la gaspremo kreskas kaj la eksteraj ŝeloj komencas ekspansii, samtempe ke la stelbrilo plialtiĝas. Tiam la radiuso kreskas dum la supraĵa temperaturo iĝas pli kaj pli malalta kaj ĝia koloro ruĝiĝas. Ni diras ke la stelo iĝis *ruĝa giganta stelo*. 3000 milionojn da jaroj post la fino de la ĉefa sekvenco la Suno estos centoble pli granda ol ĝi estas nun, kaj 2000-oble pli brila. Ĝia supraĵa temperaturo estos tamen 1800 gradojn malpli alta. Tiam la teraj oceanoj estos delonge vaporigintaj, sed la stelo ne daŭre kreskos sen manĝi la tutan Teron, ĉar ĝia radiuso atingos kaj preterpasos la teran orbiton.

Dume la helioma koro kontraĥiĝas kaj iom post iom la temperaturo kreskas en la centro. Ni notu ke kolizio de elektronoj kun fotonoj kreas neŭtrinojn kaj antineŭtrinojn, kiuj kapablas transporti energion eksteren, tiakvante ke la ĝusta centro de la stelo relative malvarmiĝas, dum ĉirkaŭanta ŝelo atingas la ĝustan temperaturon por reakcio de heliomo. Ĉar la denso estas altega, heliumfuzio okazas tre rapide kaj tre intense. Oni nomas tion "helium-fulmo", kvankam laŭ homskalo tio fakte okazas dum pli-malpli 200 jaroj, post kiuj la bruligado de heliomo fariĝas pli stabila.

La reakcioj inter heliumaj nukleoj nomiĝas "triple-alpha" (triobla-alfa) procezo, kaj esence konsistas en kreado de karbononukleo el tri heliumaj nukleoj (alfa-partikloj). Nune la temperaturo en la centro de la stelo mezureblas en centoj da milionoj da gradoj. Iom post iom en la kerno estos nur karbono ĉirkaŭata de heliumreakcia ŝelo, siavice ĉirkaŭata de ŝelo el reakcia hidrogeno.

En steloj kies maso estas du suno-masoj, karbono kaj heliomo povas reakcii por krei oksigenon; en kvar suno-masaj, karbono kaj karbono kreas heliomon kaj nejon; en ok suno-masaj aperas silico kaj magnezio kaj en steloj kies maso superas dek suno-masojn, fero.

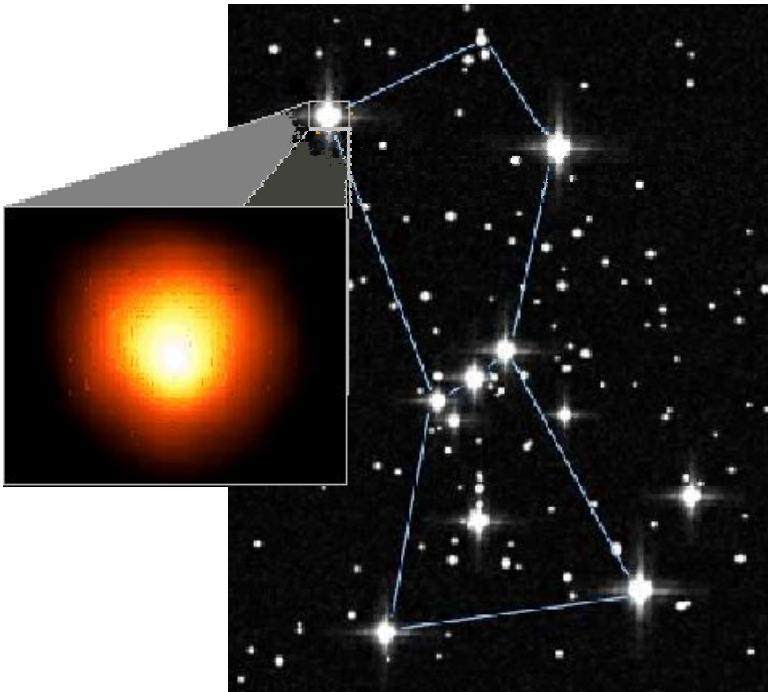
Dum la nukleo sintetizas novan elementon, la malnova akiras ĉirkaŭŝelon tiamaniere, ke la diversaj elementoj distribuiĝas laŭ cepoŝeloj laŭlonge de la radiuso.

Ĉe tiu ĉi punkto la fina horo de la stelo alproksimiĝas, kaj ĝia mortmaniero, ĉu trankvila, ĉu violenta, dependas denove de la dekomenca maso. Ni priskribu unue la procezon por pli malgrandmasaj steloj, al kiuj apartenas la Suno (steloj apartenantaj al tiu grupo estas tiuj kies maso ne superas 10 suno-masojn). La eksteraj ŝeloj de la ruĝa giganta stelo ekspansias pli kaj pli ĝis ili disiĝas de la centra kerno kiu baldaŭ estos videbla kiel varma stelo, kies supraĵa temperaturo estas pli-malpli 10000 gradoj kaj prezentas blankan koloron. Tion oni nomas *blanka nana stelo*. Ĉirkaŭ ĝi videblas belkolora ringo kiu apartenas al la elpelita materio, kiu forkuras de la stelo je rapido de 30-60 kilometrojn ĉiusekunde. Tiujn belegajn objektojn oni nomas *planedaj nebulozoj*, kvankam ili fakte havas neniun rilaton kun planedoj.

La blankaj nanaj steloj brilos ĝis la lasta gutto da brulaĵo konsumiĝos, kaj post tio ne plu estos videblaj.

Pli interesa, kaj tute ne malpli bela, estas la morto de pli grandmasaj steloj, tiuj kiuj posedas feran kernon. Fero estas nuklee la plej stabila elemento kaj ne povas fuziiĝi por sintezi novajn elementojn. Tial en la kerno la nuklea aktivado ĉesas, kaj kun ĝi, la fortoj kiuj subtenis la pezon de la stelo. Sub tiom da pezo la fera kerno subite kontraĥiĝas, kaj en la centro koncentriĝo kaj temperaturo estas tiel altaj ke elektronoj kaj protonoj kunfandiĝas por krei neŭtronojn kaj kreiĝas granda kvanto da fotonoj kaj neŭtrinoj. La stelo eksplodas kiel *supernova*.

Tiaj eksplodoj estas tiel violentaj ke la stelo povas brili pli forte ol la tuta galaksio kie ĝi loĝas. Ili ne estas tre oftaj nuntempe, tamen kelkaj okazis dum historiaj tempoj. Unu el la plej famaj estas tiu okazinta en la jaro 1054 kaj registrita en ĉinaj kaj japanaj kronikoj. En la jaro 1987 astronomoj povis observi kaj studi unu okazintan en la Granda Magajana Nubo. En la "ĉirkaŭaĵoj" de nia sunsistemo ekzistas kelkaj ruĝaj gigantoj kiuj tre probable iĝos supernovoj; feliĉe la plej proksima estas je 160 lumjaroj, nome Betelĝuzo, la maldekstra ŝultro de Oriono, kiu situas je 500 lumjaroj de ni. Se eksplodo tia okazus je distanco de malpli ol 100 lumjaroj, la konsekvencoj por la vivo surtera povus esti katastrofaj.



Jen Betelĝuzo kaj ĝia loko en la konstelacio Oriono.

Sed la supernovaĵoj ne estas portantoj de morto, tute male. Grandmasaj steloj fabrikas la elementojn necesajn por konstrui la vivon: karbono, oksigeno, nitrogeno... kaj tiujn necesajn por konstrui la medion el kiu povas formiĝi fero k.a. el kiuj konsistas la tersimilaj planedoj. La supernovaĵaj eksplodoj ĵetas ilin en la medion riĉigante la hidrogenajn nubojn el kiuj iam denove naskiĝos steloj kaj planedoj. Do, de la fero de la Tera kerno, ĝis la karbono de nia DNA, ne forgesante la oksigenon kiun ni spiras, ĉio kreiĝis en tiaj steloj.

Kio okazas post supernova eksplodo? Kiel okazis al etmasaj steloj, ĉirkaŭ la iama stelkerno videblas nebulozo kiu estas la elpelita materio, sed pro la karaktero de la procezo, ĝi havas pli neregulan formon. Ekzemplo de tia nebulozo estas la Kraba Nebulozo, kies ekzisto ligiĝas al la supernovaĵo de la jaro 1054.

La steloj redonas al la medio la materion kiun ili prenis iam prenis kaj el kiu formiĝos novaj steloj. Tiu materio estas krome pli riĉigita je pezaj elementoj.

Kaj, kio pri la iama kerno? Denove tio dependas de la dekomenca maso de la stelo. Se tiu maso ne superis certan valoron, ni troviĝas antaŭ kompaktegaj sferformaj objektoj el materio kies staton oni nomas "degenera"; se tiel, ni troviĝas antaŭ tre interesa objekto: *nigra truo*.

Ni notis ke tuj antaŭ la eksplodo la kema koncentriĝo estis tiel alta ke el elektronoj kaj protonoj formiĝis neŭtronoj; el tio konsistas la nuda kerno kiu restas post tiu eksplodo. Tiajn objektojn oni nomas *neŭtronaj steloj*. Ili koncentras la materion de unu suna maso en balono kies radiuso estas nur 10-kilometra, do ĝia denso estas tiel enorma ke unu kuba centimetro entenas pli ol 100 milionojn da tunoj. Ĉefa karakterizaĵo de tiaj objektoj estas: ilia tre rapidega rotaciado - tipaj kazoj povus esti de 30-ono de sekundo, kaj eĉ de 6000-ono! - kaj ilia ekstrema magneta kampo, laŭ kies linioj la stelo ĵetas materion kies efekto estas emisio de radio-ondaj pulsoj kies periodo estas tiu de ĝia rotacio.

Pro tiuj radiopulsoj, tiajn objektojn oni nomas *pulsaroj*, mallongigo de "pulsating star", (pulsanta stelo) en la angla, kvankam fakte ne temas pri pulsantaj steloj, kiuj estas steloj kies brilo kaj grandeco varias periode, ankaŭ nomataj *cefeidoj*.

Pulsara periodo estas tiel regula ke kiam la unua estis malkovrita, la sciencistoj pensis ke povus temi pri ekstertera artefarita radiofonto kaj komence nomis ĝin LGM (Little Green Men, verdaj etuloj, en la angla). En la centra parto de supernovaĵaj nebulozoj, kiel Krabo kaj aliaj, estas detektataj tiaj pulsaroj. Interesaĵo pri lastatempaj malkovroj rilate pulsarojn estas, ke ili povas havi planedojn: en 1992 oni deduktis la ekziston de planedoj similaj al la Tero kaj al lunoj de nia sunsistemo ĉirkaŭ unu

tia stelo. Kompreneble tiuj planedoj ne povas havi vivon, interalie pro la radiacio, sed tio montris ke planedformado ne estas tiel malfacila.

Kiu forto kapablas subteni tiom grandmasajn objektojn kontraŭ la gravito? Ne la nuklea, ĉar reakcioj jam ne okazas; nek la varmopremo, ĉar kvankam altega, la centra varmo ne kapablas subteni tiom da koncentrita maso. Tio havas rilaton kun speciala stato de la materio kiu nomiĝas *degenera*, pri kiu ni diru nur ke ĝi rilatas kun la kvantum-meĥaniko kaj ke ĝi kapablas generi aleksteran premon kiu kontraŭas la graviton. Ne nur neŭtronaj steloj, sed ankaŭ blankaj nanaj steloj konsistas el materio de tia stato.

Ĉu ĉiaj neŭtronsteloj kapablas bremsi la graviton? Ne, tute ne. Se la neŭtrona stelo havas mason kiu superas du suno-masojn, nenio povas bremsi la graviton. En tia kazo la regiono iĝas tiel gravito-potenca, ke eĉ la lumo ne povas foriri -la fuĝrapido, kiu estas la rapido necesa por venki la gravitan kampon de objekto (de planedo ekzemple) estas en tiaj regionoj pli forta ol lumrapido. Tion oni nomas *nigraj truoj*.

Neniu nigra truo fakte estas rekte observita, ĝuste pro tio ke ili ne elsendas lumon, sed ilia ekzisto estas detektata pere de la gravitaj efektoj kiujn ili kaŭzas al akompanantaj steloj, kaj al la emisio de X-radiado fare de la materio kiu ĉirkaŭas ilin. Ĝis nun neniu estis detektita izola, sed nur akompanata de normala stelo. Lastatempe, tamen, estis malkovritaj tiaj izolituloj, pere de *efekto de gravita lenso* (deviado de lumaj radioj pro ilia grandega maso) al la lumo de steloj situantaj post ili.

Stelklasifikado: la diagramo de Hertzsprung - Russel

Ni ĵus vidis ke steloj povas prezenti malsamajn kolorojn kaj brilojn. Ili ankaŭ prezentas, kiam oni disigas la lumon ricevatan de ili en la diversaj koloroj (spektro) certajn karakterizaĵojn, kiuj distingas unu de la aliaj laŭ la elementoj kiuj troviĝas en iliaj atmosferoj. Ekde la 19a jarcento oni inventis sistemojn por klasifiki la stelojn laŭ tiuj diversaj parametroj.

Laŭ spektra klasifikado aperis du ĉefaj sistemoj: de Harvard, pli antikva, kaj de Yerkes. La unua dividis la stelojn laŭ spektraj tipoj donante unu literon al ĉiu (A, B, C, D...), kiuj poste estis reordigitaj kaj kunfanditaj, restante kiel ni konas ĝin nuntempe: O, B, A, F, G, K, M. Stelo-tipoj O, B, kaj A estas pli bluecaj, dum tipoj K, M estas pli ruĝaj. Iom poste oni enmetis subklasifikon. Ekzemple, por steloj O: a, b, c, d, e; por A: 1,2,3, ĝis 9 k.t.p. Laŭ tiu sistemo la Suno havas stelo-tipon G2.

La sistemo de Yerkes estas evoluaĵo de la Harvard-a sistemo. Ĝi aldonas duan parametron kiu rilatas al la lumintenseco. Tiu parametro reprezentigas per romiaj numeraloj kaj iras de I (plej brila) ĝis V (plej malbrila), ankaŭ kun subdividoj. Laŭ tiu sistemo la Suno estas tipo V. Tial komplete la suna stelo-klaso: G2 V.

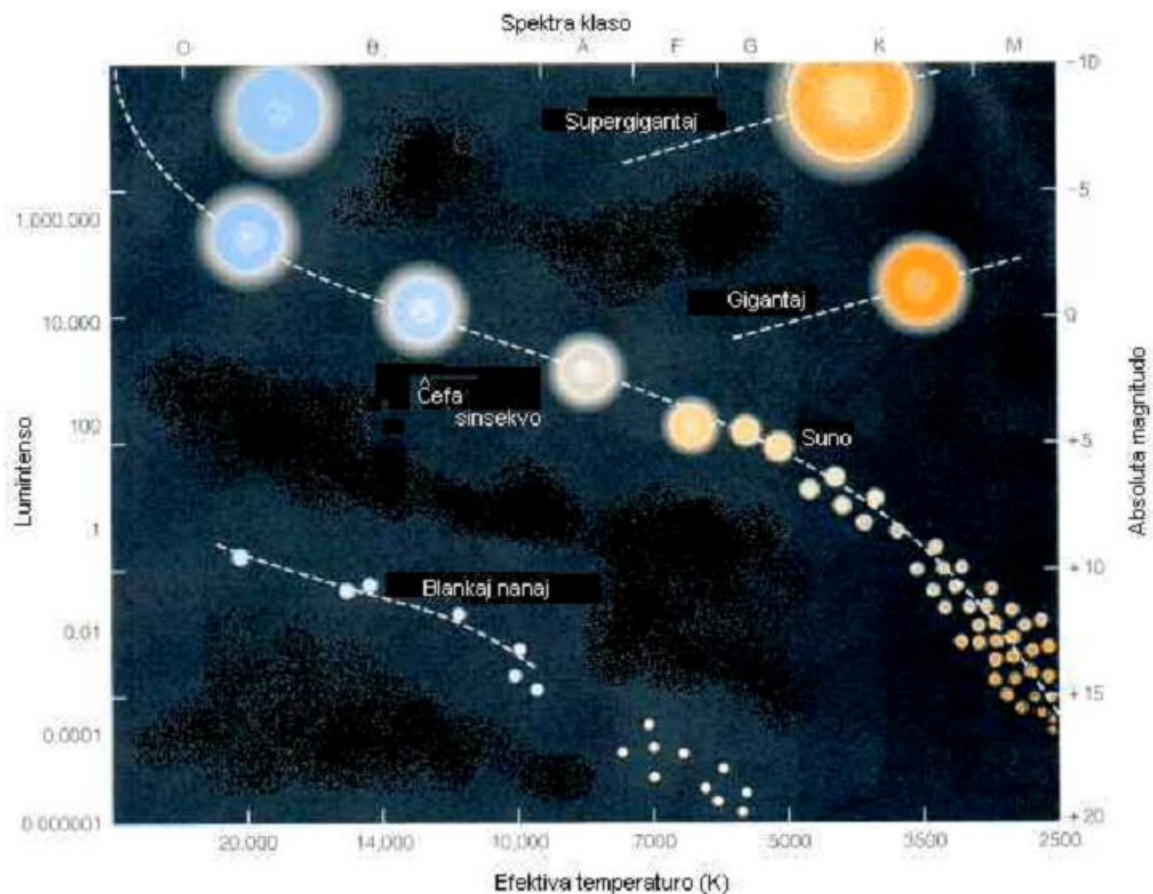
La klasifiko de Yerkes nomumas la stelojn jene:

I	Supergigantaj
II	Brilaj gigantaj
III	Gigantaj
IV	Subgigantaj
V	Nanaj

Krom tiu spektra klasifikado ekzistas alia kriterio: fotometra klasifikado, kiun ni tie ĉi ne priskribos.

Ni vidas ke la sistemo de Harvard klasifikas stelojn laŭ temperaturo (O pli bluecaj, do pli varmaj; M pli ruĝaj, do pli malvarmaj) kaj sistemo de Yerkes laŭ brileco. Ambaŭ parametroj estas perfekte mezureblaj. Ĉe tiu punkto oni povas demandi - ĉu ĉiuj eblaj kombinoj brileco/temperaturo vere ekzistas en la Universo; tio estas: ĉu povas ekzisti steloj brilaj kaj varmaj kaj same brilaj sed malvarmaj; aŭ malmulte brilaj kaj malvarmaj, kaj malmulte brilaj sed varmaj.

Sendepende, la dana astronomo Ejnar Hertzsprung kaj la usona Henry Norris Russel ellaboris manieron reprezenti stelojn laŭ lumintenseco kaj temperaturo. Honore al siaj du kreintoj ĝi nomiĝas diagramo H-R. Sur ĝi oni reprezentas lumintensecon malsupre supren kaj temperaturon dekstre maldekstren, laŭ kreskanta ordo.



Diagramo de Hertzsprung ? Russel

La lumintenseco estas esprimita en frakcioj de la Suno. La supra parto de la diagramo apartenas al la pli brilaj steloj kaj la malsupra al malpli brilaj. Same la maldekstra parto apartenas al la varmaj steloj kaj la dekstra al la malvarmaj (varmece kaj malvarmece laŭ surfaĉa temperaturo, kompreneble).

Nun ni deduktu, kiaj steloj okupas kiujn poziciojn sur la diagramo. La temperaturo indikas radiatan energion laŭ difinita mezurunuo, ekzemple por unu kvadrata centimetro sur la surfaco de la stelo, dum la lumintenseco diras al ni kiom da energio emisias la stelo entute. Evidente tio ebligas kalkuli la grandecon de la koncerna stelo.

Ni unue rigardu la supran dekstran porcion. Al ĝi apartenas steloj samtempe brilaj kaj malvarmaj. Tio indikas ke ili radias malmulte da energio por ĉiu kvadrata centimetro sed ke entute ili elsendas multe da energio. Do ilia surfaco devas esti elstare granda. Fakte temas pri la ruĝaj gigantaj steloj.

Male ni iru nune al malsupra maldekstra parto. Tie ni trovas stelojn kun febla brilo sed alta temperaturo. Tio signifas ke ili radias multe da energio el ĉiu kvadrata centimetro sed entute radias malmulte. Do ili devas esti malgrandaj steloj. Fakte temas pri blankaj nanaj kaj neŭtronaj steloj.

La diagonalo kiu komenciĝas supre maldekstre kondukante malsupren dekstren apartenas al steloj kiuj troviĝas en la ĉefa sekvenco. Ni rimarku ke al ĝi apartenas la plimulto el ili, kio konfirmas tion ke ĝi estas la plej longa parto de la stela vivo. La ĉefa sekvenco havas tre interesan karakterizaĵon: ĝi prezentas precizan rilaton inter maso kaj temperaturo. Tion oni malkovris kalkulante masojn de tiaj steloj apartenantaj al duoblaj sistemoj kaj ĝi montras ke maso kreskas kun temperaturo, t.e.: ju pli malvarma, des pli etmasa, kaj male. Do la malsupra dekstra regiono apartenas al steloj kies maso estas eta, dum la supra maldekstra al la grandmasaj. Tio donas tre precizan rilaton inter brileco kaj maso de ĉefsekvencaj steloj: ju pli brila, des pli grandmasa. Tio ebligas determini la masojn de tia stelo konsiderante nur ĝian brilon.

La branĉo kiu disiĝas de la ĉefa sekvenco supren dekstren estas la tiel nomata asimptoto de la subgigantoj kaj en ĝi estas reprezentataj tiuj steloj kiuj komencas lasi la ĉefan sekvencon por iĝi ruĝaj gigantoj.

La H-R diagramo ne reprezentas stelevoluon; ĝi estas momenta fotografiaĵo de diversaj steloj. Ni povas imagi tre bonŝancan astronomon (aŭ eble ne tiom) kies vivo daŭrus milionojn da milionoj da jaroj kaj ke li "de tempo al tempo", ni diru ĉiun jarmilionon aŭ eble iom pli, devus desegni la H-R diagramon por la samaj steloj. Kiel moviĝus la diversaj steloj sur ĝi?

Steloj ĉiam eniras la ĉefsekvencon de la maldekstra parto kaj lasas ĝin laŭ la dekstra. Pro la rilato maso/brileco - ju pli alte la stelo eniras ĝin, des pli grandmasa ĝi estas kaj des malpli longan tempon ĝi restos en ĝi. Ili lasas la ĉefsekvencon laŭ la subgiganta asimptoto, por iri al tiu de la ruĝaj gigantoj, kaj depende de tio ĉu ili lasas pli aŭ malpli supre, ili finiĝos kiel supemovaoj kaj neŭtronaj steloj, aŭ kiel planedaj nebulozoj kaj blankaj nanoj, tiuj ĉi en la regiono malsupra iom maldekstra de la diagramo.

Notoj:

1. Ni klopodu kompreni nukleajn reakciojn, kiuj mastras la stelvivon. Hidrogena atomo konsistas el protono kaj elektrono. Protono estas dumiloble pli masa ol elektrono, iliaj elektraj ŝarĝoj estas malsamsignaj (protona estas pozitiva kaj elektrona negativa). Alia konsiderenda elemento estas deŭterio aŭ peza hidrogeno. Ĝi konsistas el protono, neŭtrono kaj elektrono. Neŭtrona maso estas simila al protona sed ĝi estas elektrike neŭtra. Do deŭtera kaj hidrogena atomoj havas la samajn elektrikajn karakterojn, sed la unua estas proksimume duoble pli masa (pro la aldona neŭtrono). En tiel varmaj medioj kiel stelaj kemoj, kie ni parolas pri milionoj da gradoj, la energio kapablas disigi la elektronojn de la atomoj, do la nukleaj reakcioj okazas inter atomnukleoj.

En steloj kies kerna temperaturo estas proksimume 10 milionoj da gradoj la ĉefa nuklea reakcio estas la tiel nomata "proton-protona", kiu funkcias jene:

- 1- Du protonoj -hidrogenaj nukleoj- kolizias kaj rezulte naskiĝas deŭterono (atomkerno de peza hidrogeno), pozitono kaj neŭtrino (pozitono estas pozitiva elektrono; neŭtrino estas neŭtra "fantoma partiklo" kiu apenaŭ interakcias kun la materio dum ĝi vojaĝas je preskaŭ lumrapide).
- 2- Deŭterono kolizias kun protono naskigante nukleon de helio malpeza, He^3 (ĝi konsistas el du protonoj kaj unu neŭtrono), kaj fotonon.
- 3- Du el tiuj nukleoj kolizias aperigantaj nukleon de He^4 , la plej stabila helia izotopo, kaj du protonojn.

En tiu procezo du hidrogenaj nukleoj produktas unu heliuman. Ju pli alta estas la kerna temperaturo des pli grava iĝas alia procezo: la tiel nomata "CNO" (Karbono-Nitrogeno-Oksigeno), kiu estas pli komplika. Por ĝia realigo estas necesa la ekzisto de nukleoj de karbono (C^{12}), ĉar la komenc-kolizioj okazos inter tiuj kaj la hidrogenaj. La procezo estas cikla kaj la rezulto estas He^4 plus fotonoj, kun meza kreado de diversaj nitrogenaj kaj oksigenaj izotopoj, same kiel C^{13} kiuj koliziantes kun protonoj donas finfine C^{12} denove (plus nukleon de helio).

Fonto: <http://www.esperanto.org/AEK/biblio/Komento.htm>

PDF-versio: L.S.