

Zvaigznes: struktūra un evolūcija. 1. daļa.

Astronomija un astrofizika, kurss 3F studentiem, 2009

Ilgonis Vilks un Dmitrijs Docenko

November 4, 2009

Lekcijas plāns

- 1 Zvaigžņu veidošanās
 - Džinsa modelis, Džinsa masa
 - Zvaigznes kolapse no mākoņa
 - Sākotnējās evolūcijas stadijas
 - Planētas pie citām zvaigznēm
- 2 Zvaigžņu evolūcija
 - Uz galvenās secības

Outline

- 1 Zvaigžņu veidošanās
 - Džinsa modelis, Džinsa masa
 - Zvaigznes kolapse no mākoņa
 - Sākotnējās evolūcijas stadijas
 - Planētas pie citām zvaigznēm
- 2 Zvaigžņu evolūcija
 - Uz galvenās secības

Zvaigznes nav mūžīgas



- Zvaigznes mirst
- Zvaigznes dzimst

Džinsa modelis

- Vienkāršākais teorētiskais modelis: viendabīgs lodveida mākonis ar rādiusu λ , blīvumu ρ un temperatūru T
 - Vai tas ir stabils?
- Mākoņa masa $M = \frac{4}{3}\pi\rho\lambda^3$
- Kopējā kinētiskā enerģija $K = \frac{M}{\mu m_p} \frac{1}{\gamma-1} kT \sim \lambda^3$
- Kopējā potenciālā enerģija $U = -\frac{3}{5}G \frac{M^2}{\lambda} \sim \lambda^5$
- To attiecība ir proporcionāla λ^2 : sākot ar noteiktu λ_J mākonis būs nestabils!

Džinsa garums un Džinsa masa

- Ja $K + U > 0$, mākonis ir nestabils un izklīst telpā
- Ja $2K > -U$, mākonis ir nestabils un izplešas
- Ja $2K = -U$, mākonis ir gravitatīvi saistīts un stabils (viriāla teorēma)
- Ja $2K < -U$, mākonis ir nestabils un saraujas
- Izrisinām: $2 \frac{M}{\mu m_p} \frac{1}{\gamma-1} kT = \frac{3}{5} G \frac{M}{\lambda_J} \frac{4}{3} \pi \rho \lambda_J^3$; $\lambda_J = \sqrt{\frac{5kT}{2\pi(\gamma-1)\mu m_p \rho G}}$
- $M_J = \frac{4\pi}{3} \rho \lambda_J^3 = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \left(\frac{5k}{3(\gamma-1)\mu m_p G} \right)^{3/2} T^{3/2} \rho^{-1/2}$
 - Citi izvedumi dod citus skaitliskus faktorus
- Pēc lieluma kārtas: $\lambda_J = 0.3 \text{pc} \left(\frac{T}{10\text{K}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_H}{10^4 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$, $M_J = 30 M_{\odot} \left(\frac{T}{10\text{K}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_H}{10^4 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$

Džinsa masa: agrīnais Visums

- Izveidojoties pirmām zvaigznēm agrīnā Visumā, vides temperatūra nevarēja būt zemāka par reliktdā starojuma temperatūru. Piemēram, $z = 15$ šī zemākā robeža bija ap 40 K, kas palielina Džinsa masu par lieluma kārtu.
 - Domājams, ka pirmās zvaigznes bija daudz masīvākas: no 10 līdz $100 M_{\odot}$ vai pat vairāk.
 - Cits iemesls, kāpēc to masa nevar būt maza: nav putekļu un molekulu, kas varētu aizvadīt prom siltumu IS diapazonā.
- Izveidojoties pirmām struktūrām Visumā, temperatūra bija ap 3000 K, tāpēc tām bija masas ar kārtu $10^4 - 10^5 M_{\odot}$.

Džinsa masa: piezīmes

- Protams, Džinsa analīze nav pilnībā korekta, jo to pieņēmumi neatbilst novērojumiem
 - Kolapsējošie molekulārie mākoņi nav sfēriski un nav stacionāri
 - Spiediens rodas ne tikai temperatūras, bet arī gāzes turbulentās kustības dēļ (turbulence lielās skalās notiek ar virsskaņas ātrumiem)
 - Cits spiediena avots: starojuma spiediens no tuvu esošām zvaigznēm
- Taču tas dod rezultātus, kas ir pareizi pēc lieluma kārtas un palīdz kvalitatīvi izprast situāciju
 - Ja aukstā mākoņa masa ir $10^5 M_{\odot}$ un tas ir gravitatīvi saistīts, tad tajā ir jānotiek zvaigžņu veidošanās

Piezīme: negatīvā siltumietilpība

- Pašgravitējošām saistītām sistēmām ir negatīvā siltumietilpība!
- No klasiskās termodinamikas viedokļa šīs sistēmas nav stabilas.

$$C = \frac{dT}{dE};$$

$$\frac{3}{2}kT = m\frac{v^2}{2}, \quad v = \sqrt{G\frac{M}{R}}, \quad E = -\alpha G\frac{M^2}{R},$$

$$\text{no kurienes } C = -\frac{1}{3k\alpha}$$

- Sistēma spontāni sadalās daļās. Piemēram, mākoņa centrs kolapsē ātrāk par ārējo daļu.

Starpzvaigžņu mākoņa fragmentācija

- Ja evolūcija notiek adiabatiski, tad $T\rho^{1-\gamma} = \text{const}$ un $\sqrt{T^3/\rho} \sim \rho^{3\gamma/2-2}$ vai vienatomu gāzei ar $\gamma = 5/3$ iegūsim, ka $M_J \sim \rho^{1/2}$
 - Saspiežoties mākonim, tā blīvums pieaug un Džinsa masa palielinās
 - Agri vai vēlu kolapse apstājas!
- Ja siltums tiek aiznests ar starojumu un vides temperatūra nepieaug, tad Džinsa masa uzvedas kā $M_J \sim \rho^{-1/2}$
 - Saspiežoties mākonim, Džinsa masa samazinās!
 - Notiek mākoņa fragmentācija: lielāks mākonis sāk saspieties vairākos centros, kuru skaits arvien pieaug
 - Fragmentācija beidzas, kad starojums vairs nevar ātri aiznest siltuma enerģiju

Svarīgas laika skalas

• Brīvās krišanas laika skala

Mākoņa pievilkšanas spēks uz tā malas: $F = -G \frac{Mm}{r^2}$, $F = m\ddot{r}$.
 Atrisinām brīvās krišanas vienādojumu $\ddot{r} = -GMr^{-2}$. Meklēsim
 atrisinājumu veidā $r(t) = A(t_0 - t)^\alpha$ (kolapse). Ievietojot, iegūsim
 $A\alpha(\alpha - 1)(t_0 - t)^{\alpha-2} = -GMA^{-2}(t_0 - t)^{-2\alpha}$. Tātad, ir jāizpildās
 vienādojumiem $\alpha - 2 = -2\alpha$, no kurienes $\alpha = 2/3$, un
 $A\alpha(\alpha - 1) = -GMA^{-2}$, no kurienes $A = \left(\frac{9}{2}GM\right)^{1/3}$. Kopā

$$r(t) = \left(\frac{9}{2}GM\right)^{1/3} (t_0 - t)^{2/3}$$

Tagad atradīsim brīvās krišanas laiku $t_{ff} = (t_0 - t)$ ievietojot
 $M = \frac{4\pi}{3}\rho r^3$. Iegūsim

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{1}{6\pi G\rho}}$$

Svarīgas laika skalas

NB! Nav atkarīgs no sākotnējā mākoņa izmēra! Pēc lieluma kārtas

$$t_{ff} = 2 \times 10^5 \text{ gadu} \left(\frac{n_H}{10^4 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

NB! Bļīvākie centrālie mākoņa apgabali kolapsē ātrāk par ārējiem!

- **Skaņas laika skala**

Mākoņa spiediena izlīdzināšanas laiks, ja spiediens tiek pārnest ar skaņas viļņiem. Skaņas ātrums ir $c_s = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$, ideālā gāzē

$p = \frac{\rho}{\mu m_p} kT$, tātad, $c_s = \sqrt{\frac{kT}{\mu m_p}}$. Tātad, skaņa izies mākoņa izmēru laikā $t_s = \frac{r}{c_s} = r \sqrt{\frac{\mu m_p}{kT}}$.

Raksturīgs lielums: $c_s = 0.3 \text{ km/s} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{1/2}$

Svarīgas laika skalas

Džinsa garumu skaņa iziet laikā

$$t_{s,J} = \lambda_J \sqrt{\frac{\mu m_p}{kT}} = \sqrt{\frac{5}{2\pi(\gamma-1)G\rho}} \approx 5t_{ff}$$

- Cits Džinsa garuma raksturojums: izmērs, kurā brīvās krišanas laika skala ir mazāka par skaņas laika skalu
- Kamēr mākonis ir kaut daļēji caurspīdīgs starojumam, temperatūras (atbilstoši, arī spiediena) pārnese notiek ar starojumu, laika skala ir ar kārtu $10^0 - 10^2$ gadu.
- **Kelvina-Helmholca laika skala**

Laiks, kurā necaurspīdīgs gravitatīvi saistīts objekts var uzturēt sevi ar termisko spiedienu, ja siltums rodas tikai saspiešanās rezultātā uz potenciālās gravitācijas enerģijas rēķina.

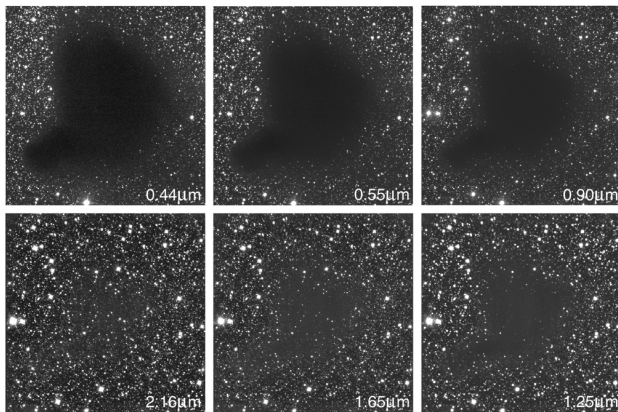
Jau bija novērtēts, runājot par Sauli: ar kārtu 10^7 gadu.

- Šo laika skalu salīdzinājums atļauj izjust, kādi procesi pārvalda zvaigžņu veidošanās

Gāzes dzesēšana

- Ka redzams, lai notiktu zvaigznes kolapse no molekulārā mākoņa, siltums ir jāaiznes no proto-zvaigznes apkārtnes
 - Siltums rodas, samazinoties proto-zvaigznes potenciālāi enerģijai
 - Tipiskās temperatūras: 10-20 K pirms kolapses, 50-100 K kolapses laikā
- To sasniedz infrasarkanais starojums, kurā molekulāram mākonim ir daudz mazāks optiskais dziļums
 - Atceramies starpzvaigžņu absorbcijas līkni!
 - sk. piemēru

Molekulārs mākonis Barnard 68: globula



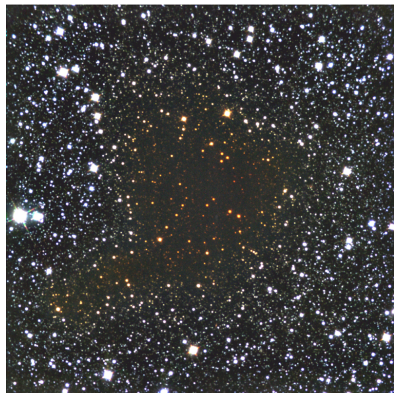
The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)

ESO PR Photo 29b/99 (2 July 1999)

© European Southern Observatory



Molekulārs mākonis Barnard 68: globula



Looking Through the Dark Cloud B68 (NTT + SOFI)

ESO PR Photo 29u/99 (2 July 1999)

© European Southern Observatory

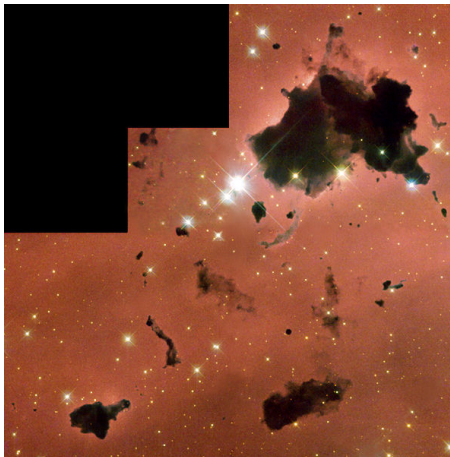


- $A_V = 35$ mākoņa centrā!
- Šeit “krāsas” ir 1.25, 1.65 un 2.15 mikronu IS starojums
- Skaidri redzams, ka šeit zvaigznes neveidojas
- Mākoņi, kuri nav caurspīdīgi tuvā IS gaismā, izspīd siltumu vidējā vai tālā IS

Infrasarkana starojuma avoti

- Lai izspīdētu IS starojumu, ir jābūt efektīgiem attiecīgām elementāriem procesiem
 - Jo komplicētāka ir atomu sistēma, jo ciešāk viens otram ir tas enerģijas līmeņi
 - Infrasarkanā (IS) starojumā izspīd daži atomi un molekulas rotācijas un vibrācijas pārejās
 - Visspožāka ir C II līnija ap $157 \mu\text{m}$
 - Spožas ir arī CO, H₂O utt. līnijas
 - Ļoti efektīvs ir arī starojums no nelieliem putekļiem
 - Tipiskie starpzvaigžņu putekļu izmērs: ap 100 \AA , elementārs sastāvs: ogle, silikāti utt., masas daļa: ap 1%.
 - Putekļi ir aukstāki par gāzi, jo ir spējīgi izspīdēt siltumu un piedalās neelastīgās sadursmēs

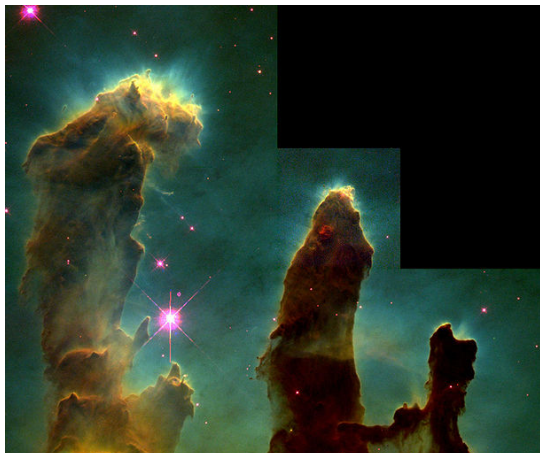
Boka globulas



Globulas ap protozvaigznēm



Globulas ap protozvaigznēm



- “Pillars of creation”, Ērgļa miglājs
- Starojums no tuvu esošām zvaigznēm palielina spiedienu uz globulām un palīdz tiem saspieties
- Kustošā zvaigžņu veidošanās (*propagating star formation*)

Atsevišķās zvaigznes kolapse

- Kolapse nozīmē, ka masai ir jānokļūst no mākoņa tilpuma vienā punktā
- Problēmas
 - **Jāsamazina potenciālā enerģija:** tiek pārvērsta siltumā
 - **Jādzesē gāze** (citādi kolapse apstājas): infrasarkanais starojums un masas aizplūde
 - **Jāsamazina leņķiskais moments:** masas aizplūde
- Rezultātā procesa efektivitāte (zvaigžņu masu attiecība pret molekulārā mākoņa masu) nepārsniedz 10%.
- Milzīgo molekulāro mākoņu (MMM) masas ir $10^5 - 10^6 M_{\odot}$, tāpēc zvaigznes galvenokārt dzimst kopās
 - Tā sauktās vajējās zvaigžņu kopas

Enerģijas samazināšana

- Starojums molekulārās līnijās (ap 10-20 K)
- Putekļu starojums nepārtrauktā spektrā tālajā IS diapazonā (ap 50-100 K)
- H_2 un citu molekulu disociācija (ap 2000 K)
- Ūdeņraža un hēlija jonizācija (ap $10^4 - 10^5$ K)
- Konvekcija protozvaigznes ietvaros visā tilpumā

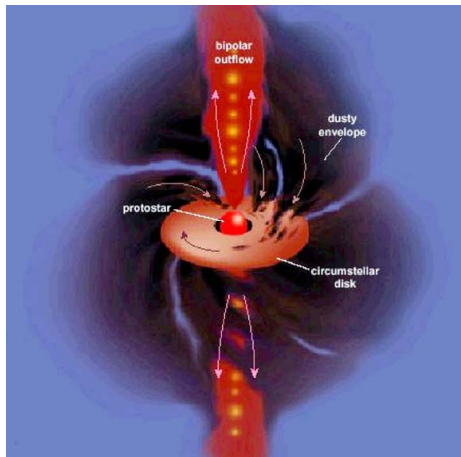
Leņķiskā momenta problēma

- Leņķiskā momenta nezūdamības likums aizliedz vielai tāpat krist uz centru: tai ir jāatdod savs leņķiskais moments
- Kaut gan vidēji leņķiskais moments ir tuvs nullei (t.i., mākoņa kā vesela rotācijas ātrums ir daudz mazāki par citiem ātrumiem), tas parasti nejaušo iemeslu dēļ nav precīzi nulle.
- Samazinoties kolapsējošai mākoņa daļai, tās rotācijas ātrums aug kā I^{-1} .
 - Parasti siltums tiek aizņemts daudz ātrāk par leņķisko momentu
- Kaut kādā momentā kolapses laikā rotācija sāk dominēt un kolapse apstājas. Ap proto-zvaigzni izveidojas **akrēcijas disks**
 - Vai arī dubultzvaigzne

Akrēcijas disks

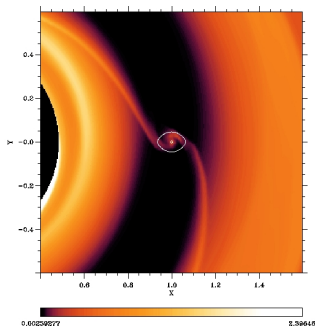
- Leņķiskais moments tiek pārdaļīts ar vielas viskozitātes palīdzību
- Viskozitāte noved pie ātruma izlīdzināšanas: iekšējām daļiņām tas samazinās (un tie spirālveidi kustās uz iekšieni); ārējām daļiņām ātrums palielinās un tie kustas ārā
- Gaze viskozitāte nav pietiekama novērojamā akrēcijas tempa nodrošināšanai
- Efektīvai viskozitātei ir elektromagnētiskā daba:
magnetorotācijas nestabilitāte, līdzīgi kā uz Saules
 - Akrēcijas diskam ir diferenciālā rotācija (saskaņā ar Keplera likumiem leņķiskais rotācijas ātrums pieaug tuvojoties centrālam objektam)

Masas aizplūde



- Tuvu pie protozvaigznes akrēcijas diska magnētiskais lauks rada strūkļas (džetus)
- To rašanas mehānisms vēl nav pilnībā izprasts
 - Strūkļas ir novērojamas itin visur, kur ir akrēcija

Protoplanētu veidošanās



- Ja disks ir pietiekami masīvs, tas kļūst nestabīls attiecībā pret blīvuma fluktuācijām
- Izveidojas blīvākie apgabali, kuros putekļi un “sniega pikas” salīp kopā izveidojot protoplanētas
- Tās pakāpeniski aug: no sākuma ar sadursmēm, tad (kad protozvaigznes akrēcijas diskā tiek iztīrīta sprauga) arī ar pašu objektu akrēciju
- Visas planētas ir gāzu milži!

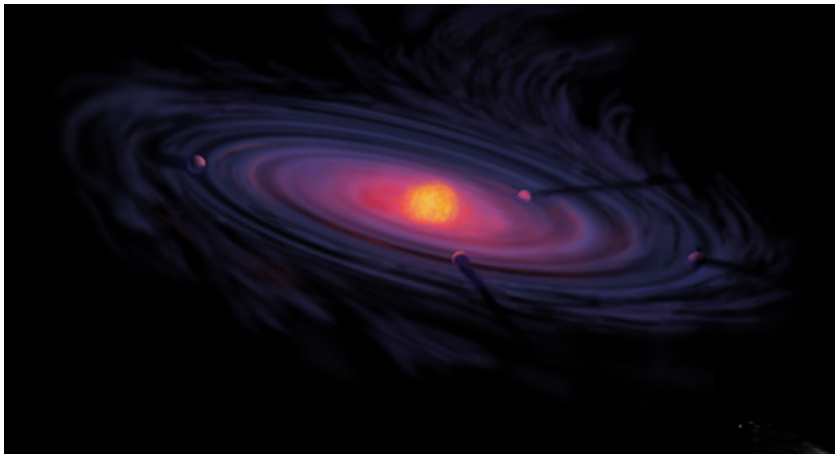
Zvaigznes karsēšana

- Protozvaigznei saspiežoties, tā sakarst, pie tam jo vairāk, jo grūtāk ir aizvadīt siltumu
- Tipiskā ir Kelvina-Helmholca laika skala: ap 10^7 gadu
- Siltums no centra tiek aizvadīts ar konvekciju, jo vielai ir zema caurspīdība
- Kad centrā temperatūra piegā līdz 10^6 K, sākas deitērija un litija degšana
- Tas paaugstina centrālo temperatūru un pēc kāda laika sākas ūdeņraža degšana

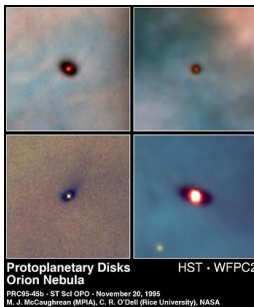
Ietekme uz vielu ap zvaigzni

- Kad enerģijas izdalīšanās kodolā pieaug, protozvaigznes “virsmas” temperatūra palielinās.
 - To nosaka konvekcija, kas nodrošina minimāli iespējamo temperatūras gradientu
 - Pieaug arī protozvaigznes izmērs
 - Raksturīga laika skala: konvekcijas laiks, vismaz 10^4 gadu
- Palielinoties zvaigznes starждаudai, tiek arvien vairāk sakarsēta viela ap to
 - Zvaigznei tuvās planētas zaudē savu ūdeņraža un hēlija apvalku un pārveršas no “milzu planētām” uz “Zemes grupas planētām”
 - Starojuma spiediena rezultātā planētu sistēmas iekšējā daļa tiek pakāpeniski iztīrīta no gāzes un maziem putekliem

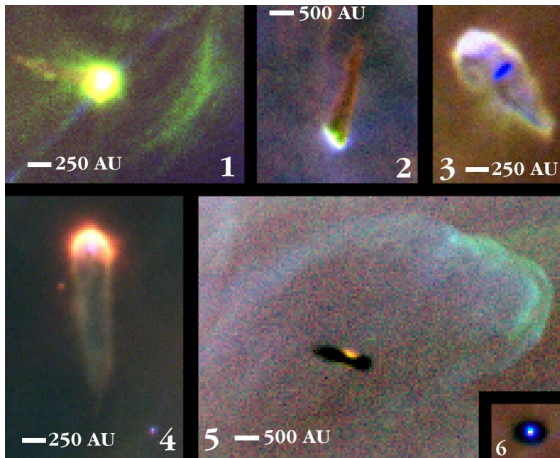
Protoplanētu sistēma



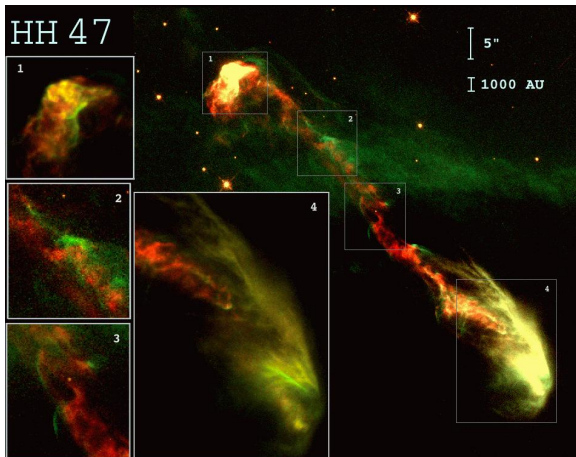
Proplidi (*Proto-planetārie disk*) Oriona miglājā



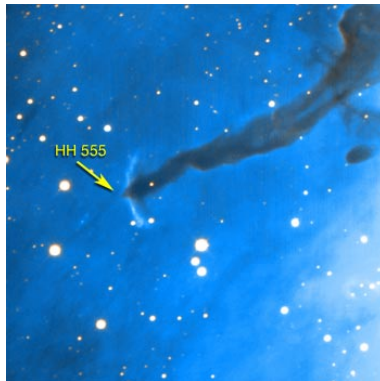
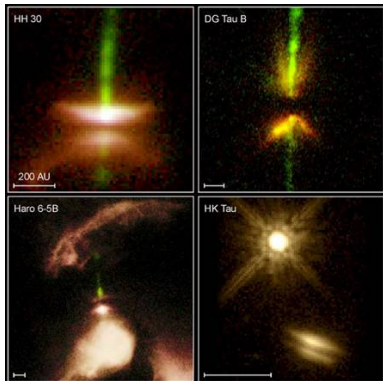
Proplidi



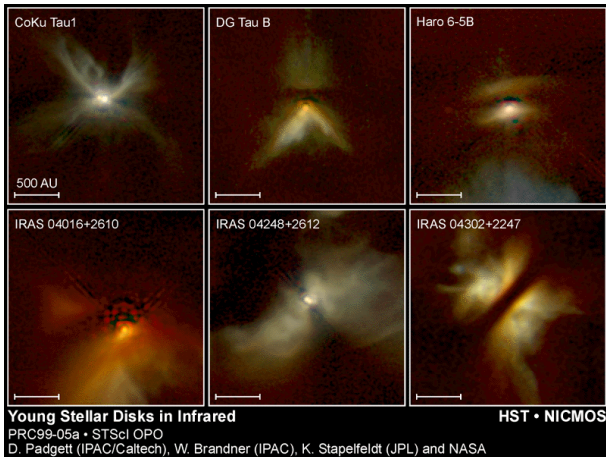
Herbiga-Aro objekti



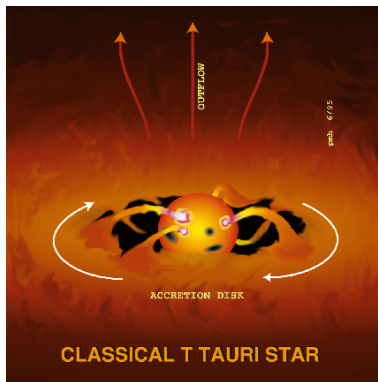
Herbiga-Aro objekti



Vērša T tipa zvaigznes IS gaismā

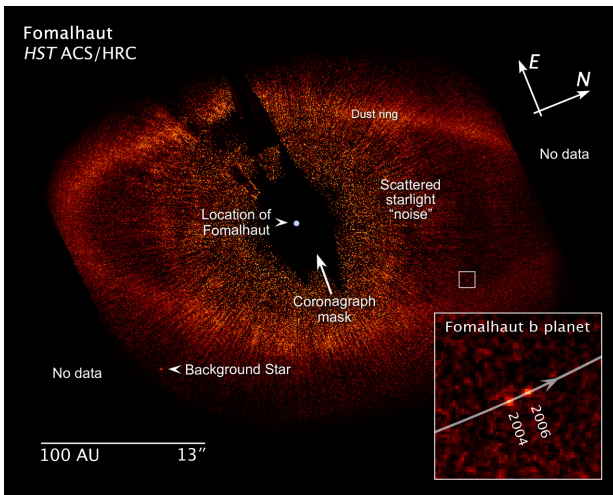


Vērša T tipa zvaigznes

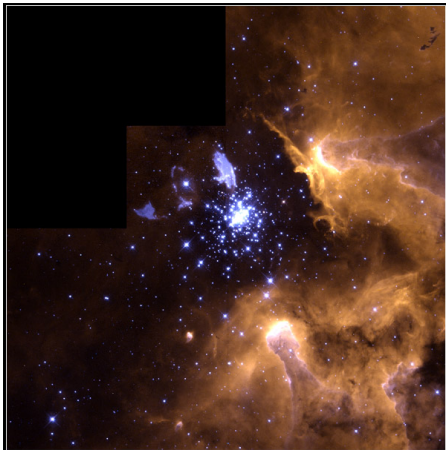


- Zvaigznes pieder Vērša T tipam savas evolūcijas pašā sākumā, kad zvaigznes gaismā beidzot sāk iziet cauri mākonim, kas lēni izklīst telpā
 - Tā sauktās **pirms-galvenās-secības zvaigznes**
- Zvaigznēm ir raksturīga augsta magnētiskā aktivitāte un neregulārs mainīgums
- Magnētiskais lauks noslēdzas caur akrēcijas disku un sekmē vielas akrēcijai uz zvaigzni

Palikušā viela ap zvaigznēm

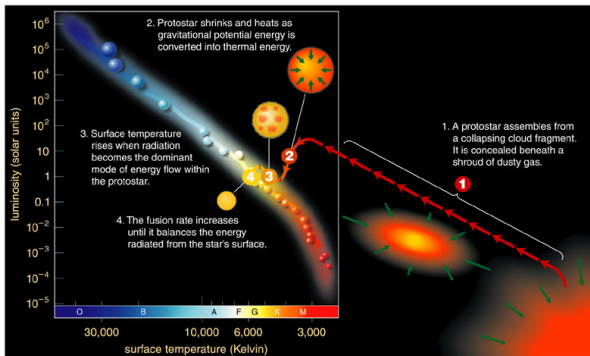


Zvaigžņu kopas veidošanās



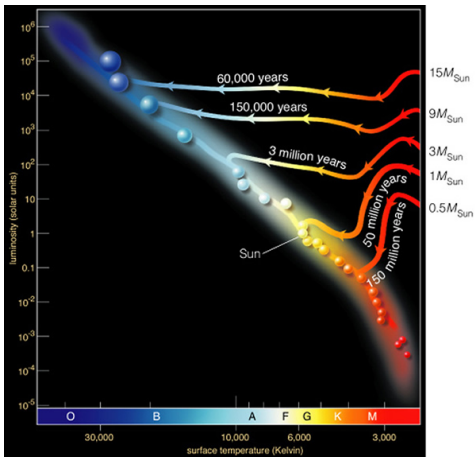
- Redzamas visas zvaigžņu veidošanas stadijas:
 - difūzs miglājs,
 - Boka globulas,
 - kolonnas ap kolapsējošiem mākoņiem,
 - zvaigznes ar gāzes paliekām un
 - jauna vaļējā zvaigžņu kopa

Uz H-R diagrammas



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

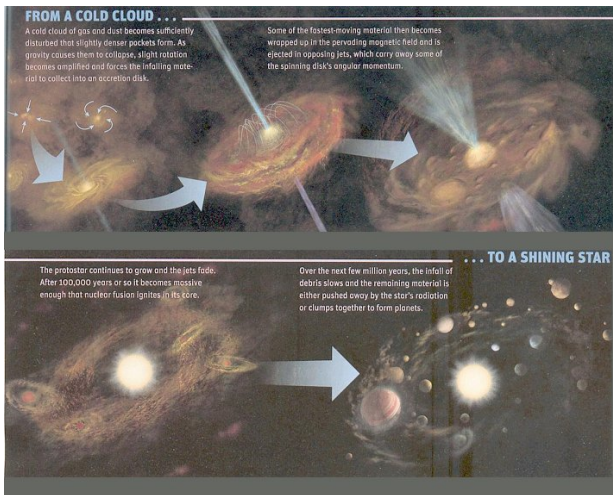
Uz H-R diagrammas: funkcija no masas



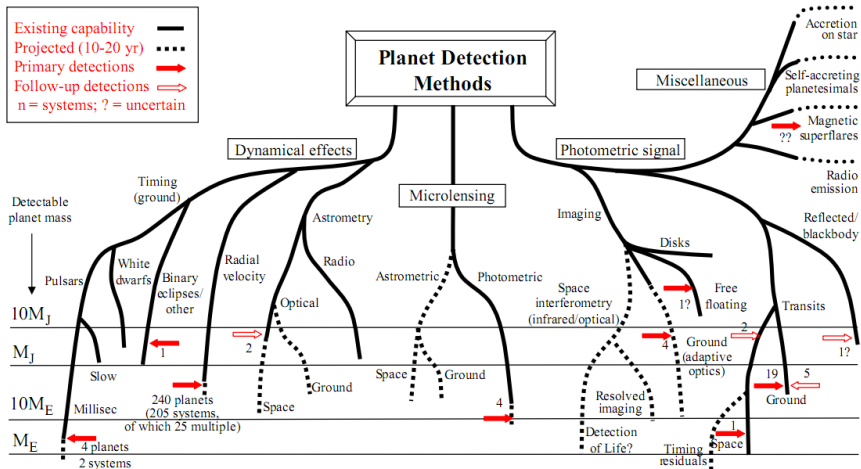
Minimāla un maksimāla zvaigznes masa

- Maksimāla zvaigznes masa (ap $60 M_{\odot}$) ir noteikta ar protozvaigznes kolapses ilgumu.
 - Kad ir sakrājusies pietiekami daudz vielas, zvaigzne sāk spīdēt neatkarīgi no tā, vai uz tās vēl krīt viela, kas apstādina kolapsi
- Minimāla zvaigznes masa ($0.08 M_{\odot}$) ir noteikta ar protozvaigznes masu
 - Ir jābūt minimālai blīvuma un temperatūras kombinācijai, lai sāktos kodoltermiskās reakcijas
 - Zvaigznēs to ierobežo blīvums: pie zemām temperatūram viela ir degenerēta

Apkopojums



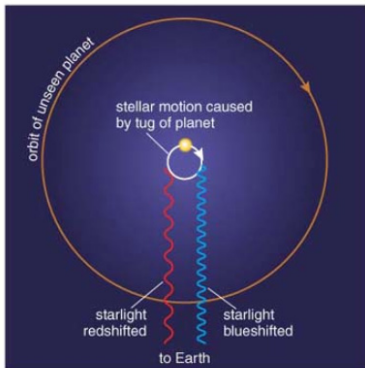
Citplanētas (eksoplanētas): atklāšanas metodes



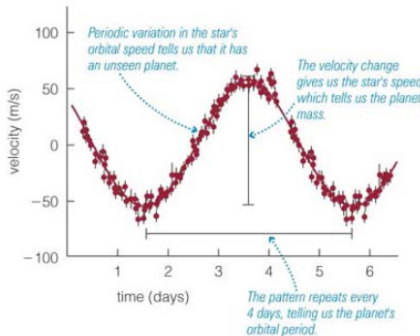
Radiālā ātruma metode (Doplera spektroskopija)

- No Zemes var izmērīt zvaigznes ātruma izmaiņas virs 3 m/s (plānots: līdz 0.5 m/s) pēc spektrālo līniju nobīdes Doplera efekta dēļ
 - Zvaigzne un planēta kustas ap kopējo masas centru
 - Zvaigznes kustības ātrums ir $v_{*,\perp} = v_{pl} \frac{m}{M_*} \sin i$, kur $v_{pl} = \sqrt{G \frac{M_*}{r}}$, ja orbīta ir riņķveida
 - Zvaigznes ātruma precizitātei 3 m/s atbilst zemāka robeža uz planētas masu $33M_{\oplus} \sin i \times \left(\frac{M_*}{1M_{\odot}}\right)^{-1/2} \times \left(\frac{a}{1\text{a.v.}}\right)^{-1/2}$

Doplera spektroskopija: 51 Peg

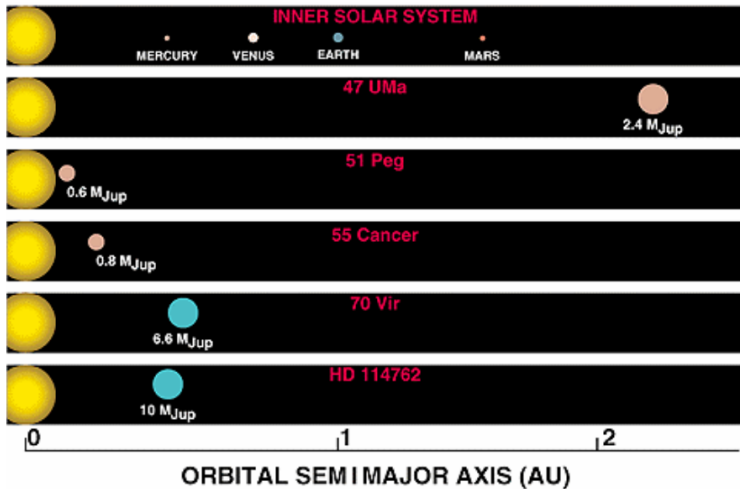


a Doppler shifts allow us to detect the slight motion of a star caused by an orbiting planet.

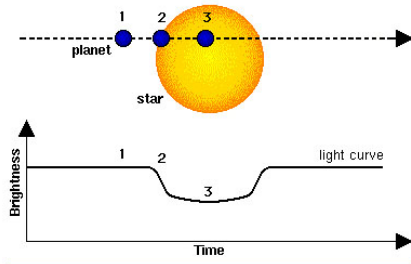


b A periodic Doppler shift in the spectrum of the star 51 Pegasi shows the presence of a large planet with an orbital period of about 4 days. Dots are actual data points; bars through dots represent measurement uncertainty.

Dažas planētu sistēmas

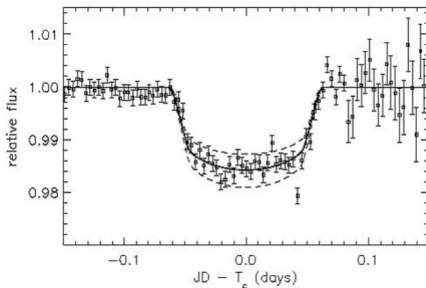
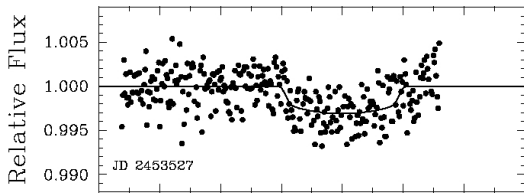


Planētu pāriešanas metode



- Princips ir tāds pats kā aptumsuma dubultzvaigznēm
- Potenciāli ļoti spēcīgā metode. No spožuma līknes dažreiz var izsecināt planētas izmēru, temperatūru, masu (salīdzinot ar Doplera metodi), blīvumu, atmosfēras sastāvu, utt.
- Ar pāriešanas metodi atklāj lielas planētas tuvu zvaigznēm (tad ir lielāka pāriešanas varbūtība)

Pāriešanas metode: piemēri



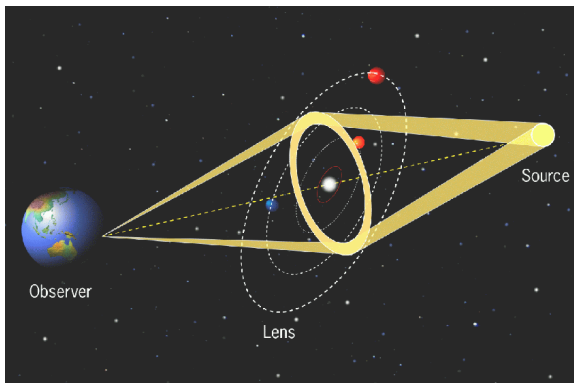
Mikrolēcošanas metode

- Metodes pamatā ir gravitācijas lēcas efekts.
- Gravitācijas lauks maina gaismas staru izplatīšanas virzienu; jo stiprāks ir lauks, jo stiprāka ir šī virziena maiņa



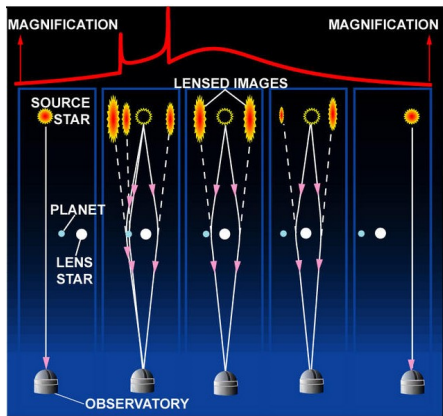
- Ja avots, punktveida lēca un novērotājs atrodas uz vienas līnijas, tad avotam ir divi attēli: vājš centrā un spožs riņķis ap lēcu
 - Šī riņķa rādiuss tiek saukts par Einšteina rādiusu
- Gaismas pastiprinājums nav saistīts ar fokusēšanos, bet tikai ar avota leņķiskā izmēra izmaiņu!

Planētu mikrolēcošana



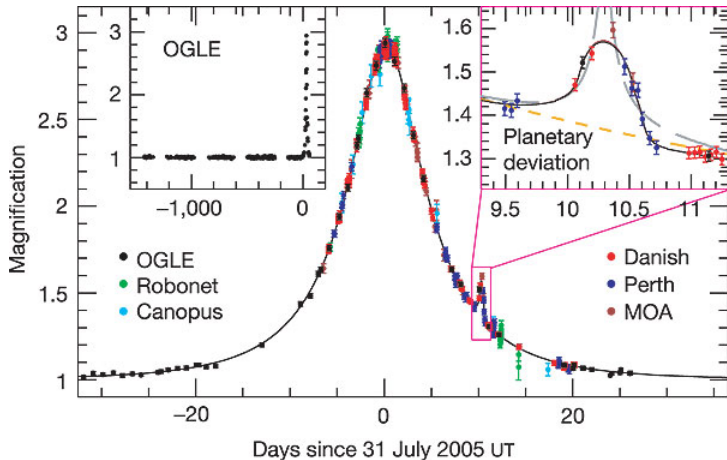
- Planēta ap zvaigznei arī nedaudz izmaina avota intensitāti ar savu gravitācijas lauku un ietekmē avota spožuma līkni

Spožuma līkne: zvaigzne + planēta



- Punktveida lēcas gadījumā spožuma līkne ir gluda funkcija ar vienu maksimumu
- Ja lēcai ir divas punktveida masas (zvaigzne + planēta), tad papildus rodas ātras spožuma izmaiņas, no kurām nosaka planētas parametrus

Spožuma līkne mikrolēcošanas gadījumā



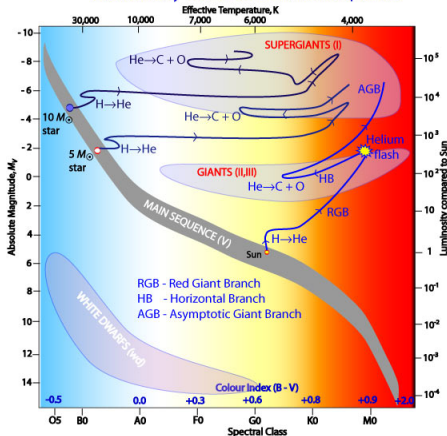
Outline

- 1 Zvaigžņu veidošanās
 - Džinsa modelis, Džinsa masa
 - Zvaigznes kolapse no mākoņa
 - Sākotnējās evolūcijas stadijas
 - Planētas pie citām zvaigznēm

- 2 Zvaigžņu evolūcija
 - Uz galvenās secības

Hercšprunga-Rasela diagramma

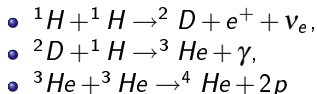
Evolutionary Tracks off the Main Sequence



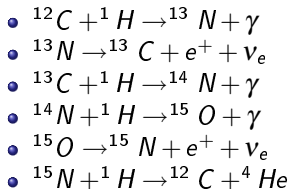
- Uz galvenās secības notiek ūdeņraža degšana hēlijā
- Mūsdienų zvaigznēs tas notiek divos veidos
 - pp cikls (zvaigznēs ar $M < 1.4 M_{\odot}$)
 - CNO cikls (zvaigznēs ar $M > 1.4 M_{\odot}$)
- Saulē CNO cikls ražo ap 1% no enerģijas

pp un CNO cikls: reakcijas

- pp-cikls: izdala 26.21 MeV

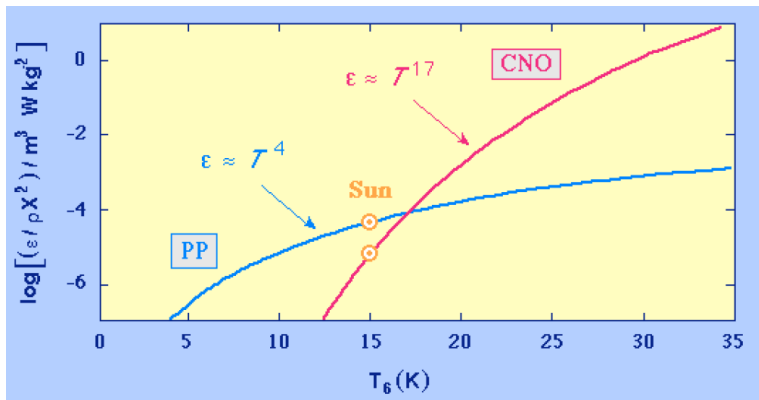


- CNO-cikls: izdala 25.0 MeV



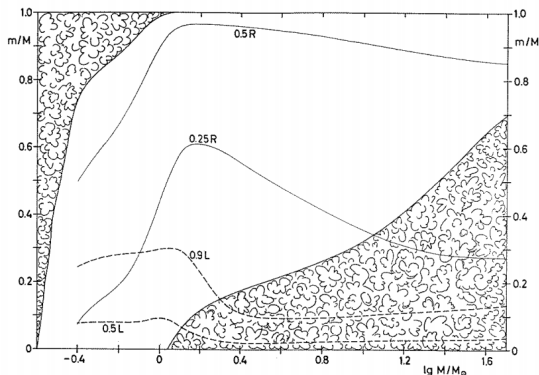
- C, N un O kalpo kā katalizatori

CNO cikls: raksturlielumi



- CNO cikla enerģijas izdalīšanās kā funkcija no temperatūras ir daudz stāvāka, kas noved pie turbulences zvaigznes centrā, nevis ārējos slāņos

Zvaigžņu iekšējā struktūra uz galvenās secības

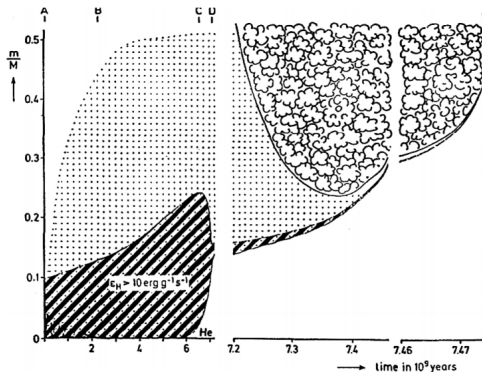


Parādītas starojuma pārnese un konvekcijas zonas kā funkcija no masas koordinātes. Parādīta masas koordinātes saistība ar rādiusu un enerģijas izdalīšanu.

Dzīves ilgums uz galvenās secības

- Dzīves ilgums ir atkarīgs no degvielas daudzuma un zvaigznes starjaudas
- Uz galvenās secības starjauda L ir proporcionāla M^3 , tātad dzīves ilgums ir $t \sim M^{-2}$
- Zvaigznei ar masu $10M_{\odot}$ dzīves ilgums būs ap 10^8 gadu, bet $50M_{\odot}$ zvaigznei - tikai ap 4 miljoniem gadu
 - Masīvākas O un B zvaigznes noiet no galvenās secības tajā pašā laikā, kad mazas zvaigznes vēl atrodas Vērša T stadijā
- Šajā laikā zvaigznes centros izveidojas hēlija kodols un kādā brīdī udeņradis sāk degt sfēriskā slānī (čaulā)
 - Jo tuvāk virsmai ir degošais slānis, jo stāvāks ir temperatūras gradients. Tas izraisa konvekciju zvaigznes ārējos, un tad arī iekšējos slāņos
 - Lai samazinātu temperatūras gradientu, zvaigzne palielina savu izmēru un kustās pa labi uz H-R diagrammas

Zvaigznes struktūra kā funkcija no laika



Zvaigznes ar masu $1.3 M_{\odot}$ evolūcijas diagramma.