

Začetki proučevanja Galaksije

Tu je **Galaksije** pisano z veliko začetnico, ker se navezuje na našo galaksijo **Rimsko cesto** (in ne Mlečna cesta).

Klavdij Ptolemaj (90-170)

Starogrško-egipčanski astronom in optiki, ki je izdal zvezdni katalog **Algemest**, ki je vseboval 1025 objektov. Podpiral Ptolemajev (svoj) geocentrični sistem.

Galilejo Galileji (1564-1642)

Leta 1610 s teleskopom videl posamezne zvezde v Rimski cesti. Bil podpornik Kopernikovega heliocentričnega sistema.

William Herschel (1738-1822)

Herschel se je zanimal za velikost in obliko Galaksije. Stel je zvezde v različnih smereh ob predpostavkah, da imajo vse zvezde enak izsev in tudi, da so enakomerno porazdeljene.

Herschelovo stetje zvezd:

Z teleskopom je meril magnitudo m . Za največjo razdaljo r_0 bo veljalo $j_0(m) = \frac{L}{4\pi r_0^2}$ oz.:

$$r_0 = \sqrt{\frac{L}{4\pi j_0}}$$

Koliko zvezd torej vidimo?

$$N(j > j_0) = \int_0^{V_0} n(r) dV = n \int_0^{V_0} dV = \frac{4}{3} n\pi r_0^3 = \frac{4}{3} n\pi \left(\frac{L}{4\pi j_0}\right)^{\frac{3}{2}} = N(L)$$

kjer je n številska gostota zvezd in smo privzeli, da je konstantna. Tako je skupno svetilo zvezd:

$$N = \int N(L) dL = \int \frac{4}{3} n\pi \left(\frac{L}{4\pi j_0}\right)^{\frac{3}{2}} dL = A j_0^{-\frac{3}{2}}$$

Messierov katalog (1781)

Katalog nastane kot pripomoček pri iskanju kometov. To je katalog predmetov, ki niso kometi, zato da se on ni zmotil pri opazovanju. Skupno 110 objektov (zvezdne kopice, planetarne meglice, refleksijske meglice, ostanki supernov, galaksije)

Friedrich Wilhelm Argelander

Meril je položaje in magnitudo zvezd. S sodelavci je objavil katalog 324000 zvezd **Bonner Durchmusterung**.

Jacobus Kapteyn

Objavil je zvezdni katalog **Cape Photographic Durchmusterung** s položaji in magnitudami 454875 zvezd na južni polobli. Leta **1904** odkrije, da se zvezde ne gibljejo naključno. Opazil je dva tokova zvezd, ki se gibljeta v nasprotnih smereh kar je **prvi dokaz o vrtenju Galaksije**. Začel je veliko studijo porazdelitve

zvezd v Galaksiji. To je bila prva koordinirana statistična študija v astronomiji, kjer je sodelovalo okoli 40 observatorijev.

V začetku 20 st. Kapteyn iz štetja zvezd in porazdelitve njihovega izseva (za zvezde v bližini sonca) sklepa, o velikosti in obliki »vesolja«:

Zvezde so v sploščenem sestavu s polmerom 8500pc

Harlow Shapely (1885-1972)

Po letu 1917 meri razporeditev kroglastih kopic.

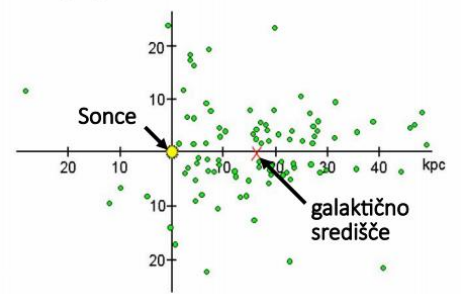
Hentrietta Leavitt

Iz posnetkov Malega Magellanovega oblaka najde okoli 1000 spremenljivih zvezd. Za 20 od teh je ugotovila, da se za svetlejše spremenljivke hitrost spreminjanja sija manjša (perioda spreminjanja sija je daljša). Shapley je umeril opisano relacijo na bližnjih kefeidah v kroglastih kopicah znotraj Galaksije in tako utegnil izmeriti njen premer.

Ugotovil je:

- Kopice niso enakomerno razporejene v vse smeri
- kjer so številnejše, so tudi manjše in temnejše
- krogelno razporejene s središčem oddaljenim 35000ly v smeri Strelca
- oddaljenost kopic izmeri s spremenljivimi zvezdami
- izmeri polmer galaksije

Shapley's Globular Cluster Distribution



Velika debata

Velika debata o velikosti, do takrat znanega vesolja je potekala med gospodoma Harlow Shapley in Heber Curtis. Shapley je trdil, da je vesolje naša Galaksija, da so spiralne meglice v bližini le oblaki plina in da sonce ni v središču Galaksije. Danes vemo, da ima prav le to, da nase sonce ni na središču Galaksije. Curtis pa je trdil, da je vesolje, sestavljeno iz galaksij podobnih naši, kar danes vemo da je res. Napačno pa je trdil, da je sonce v središču nase majhne galaksije.

Edwin Powell Hubble

Edwin Hubble najde rešitev. Našel je kefeide v meglicah in izmeril oddaljenost do njih. Pokazal je, da so te neznane spiralne meglice zelo daleč. Leta **1929** objavi članek o razdalji do Andromede M31.

Hubble-Lemaitrov zakon (1929)

Meril je »hitrost«. Iz zamaknenosti spektralnih cret (rdeči zamik) je meril hitrost oddaljevanja. Gre pa tudi za to, da se prostor siri:

$$v = cz = H_0 d; H_0 = 100h \frac{km}{s Mpc}, h = 0.67$$

Robert Trumpler (1889-1956)

Meri razporeditev razsutih kopic in ugotovi **da ležijo pretežno znotraj galaktičnega diska**. Ugotovila, da kopice manjših kotnih velikosti so temnejše kot je pričakoval. To kaže na obstoj **prahu** v Galaksiji.

Walter Baade

Ločil dve populaciji zvezd:

- **Populacija I:** zvezde v disku, krožne orbite okoli središča (mlade, modre zvezde)
- **Populacija II:** zvezde v središčni odebelitvi (rdeče, stare zvezde)

Odkril je prisotnost različnih vrst kefeid (tipa I in II).

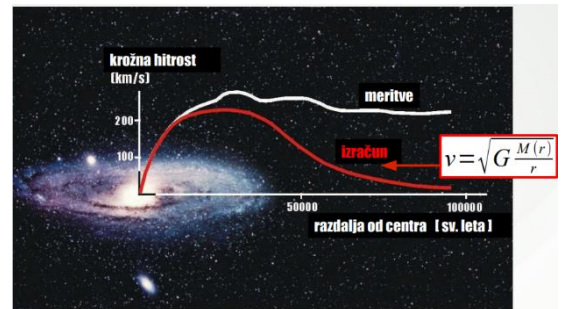
Jan Henrik Oort (1900-1992)

Iz opazovanja lastnega gibanja zvezd potrdi, da zvezde krožijo okoli središča galaksije. Postavi hipotezo o obstoju Oortovega oblaka. Rekel da so zvezde v galaktičnem haloju, da je masa Galaksije okoli 100 milijard mase Sonca in da je Sonce oddaljeno okoli 19200 ly od središča Galaksije. Preko **radijske astronomije** (21cm vodikova črta) odkril spiralno strukturo Galaksije.

Meritve rotacijske krivulje spiralnih galaksij

Manjka znatna masa, ki je ne vidimo ampak ima gravitacijski učinek. Kaze na prisotnost **temne snovi**.

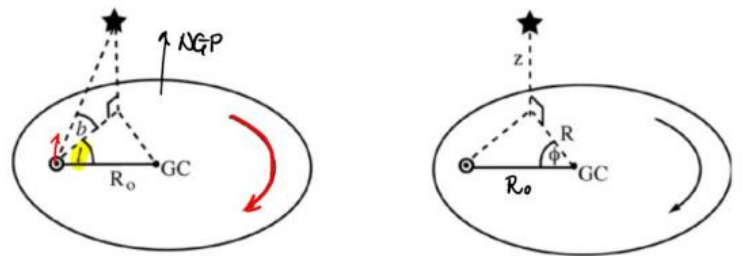
$$v = \sqrt{G \frac{M(r)}{r}}$$



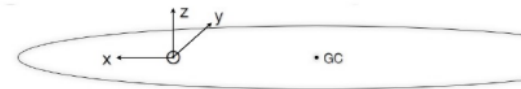
Koordinatni sistemi

- **Geografski** koordinatni sistem (ϕ, λ)
- **Horizontalni** koordinatni sistem (azimut in višina nad obzorjem) $\rightarrow (A, h)$
- **Ekvatorialni** koordinatni sistem (rektascenzija, deklinacija) $\rightarrow (\alpha, \delta)$
- **Ekliptični** koordinatni sistem (uporaben za sledenje objektom v osončju)
 - **Heliocentrični** (b, l)
 - **Geocentrični** (β, λ)
- **Galaktični** koordinatni sistem:

R_0 je razdalja od sonca do GC, l je galaktična dolžina in b je galaktična širina (kot med objektom in galaktično ravnino, kjer je kot pozitiven v smeri NGP)



Možen je tudi sistem z kotom merjenim od GC in višino nad galaktično ravnino ali pa celo neke sorte kartezični ekvivalent, kjer je x pozitiven v smeri radialno ven, y pozitiven v smeri rotacija sonca in z pozitiven v smeri izven ravnine proti NGP.



Območje izogibanja

To je območje o katerem ne utegnemo imeti zelo veliko informacij. Izven galaktične objekte lažje gledamo izven ravnine nase Galaksije, ki nam zastira pogled z ogromno količino zvezd, plinom in prahu.

To je območje je pas z galaktično širino:

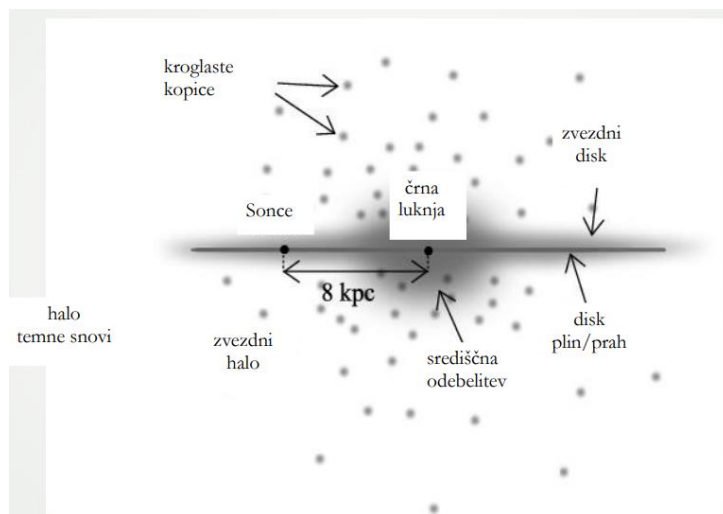
$$-15^\circ < b < 15^\circ$$

Struktura galaksije

Struktura	Masa	Opis/Značilnosti
Središčna odebelitev	$10^{10}M_\odot$	Lahko podaljšana v prečko
Galaktični disk	$10^{11}M_\odot$	Definicija galaktične ravnine
Zvezdni disk (znotraj galaktičnega)	/	Na polovici tega diska najdemo Sonce
Plinasti disk oz. disk plina in prahu (znotraj galaktičnega)	10^9M_\odot	Spiralni rokavi
Zvezdni halo (sferoid)	10^9M_\odot	1% zvezd v njem je v kroglastih kopich
Halo temne snovi	$10^{12}M_\odot$	Vse prejšnje strukture so zaobjete v

Velikosti struktur

Struktura	R	d
Središčna odebelitev	3kpc	1kpc
Zvezdni disk	15kpc	1kpc
Plinasti disk	25kpc	300kpc
Zvezdni halo	> 20kpc	Halo
Halo temne snovi	> 50kpc	Halo



Sestavni deli galaksije

Temna snov:

Obstajata dve vrsti temne snovi:

- **Barionska** (npr. ugasle zvezde)
- **Nebarionska** (se precej neznana)

Zvezde

Kovinskost zvezde lahko definiramo, kot masa elementov zvezde, ki niso H in He deljeno s celotno maso:

$$z = \frac{\sum_{i; i \neq H, He} m_i}{\sum_i m_i}; \quad z_{\odot} = 0.02$$

Zvezde ločimo v različne populacije:

Populacija I

Sestavljena iz zvezd znotraj diska stare med 10^6 do 10^{10} let. Imajo krožne orbite in kovinskost med $z = 0.01$ in 0.04 .

Populacija II

Sestavljena iz zvezd v zvezdnem haloju in v središčni odebelitvi. Gre za stare zvezde, ki so starejše $> 12 \cdot 10^9$ let. Imajo kovinskost $Z < 0.002$ (recimo znotraj zvezdnega haloja) do $z = 10^{-6}$. Te zvezde imajo ekscentrične orbite in imajo visoke hitrosti.

Tako kovinskost kot hitrost (dinamično in kemično) opisujeta, kaj se je z našo galaksijo dogajalo v preteklosti.

Populacija III

Naj bi teoretično obstajale in naj bi bile prve zvezde v vesolju. Zaradi tega naj bi imele zelo zelo majhno kovinskost $z \approx 10^{-9}$.

Plin in prah:

Plin

Sestava plina je okoli 70% H , 28% He , 2% *other*. Vodik pride v različnih oblikah:

- H_2 **molekularni vodik**: V območjih z veliko gostoto, majhno temperaturo ($< 100K$). in malo UV
- $H = HI$ **atomarni vodik**: V območjih s pogoji nekje vmes
- HII **ionizirani vodik**: V območjih z visoko temperaturo, veliko UV žarkov in malo gostoto.

Masa plina je približno enaka 10% mase vseh zvezd.

Prah

Prah je sestavljen iz grafitnih in silikatnih (C, O, Si, \dots) delcev velikosti od $0,1\mu m$ do $1\mu m$.

Medzvezdna snov (ISM – Interstellar medium)

To je snov v prostoru med zvezdami. Gostoto ima okoli $10^6 m^{-3}$. 50% te snovi je v molekularnih oblakih, ki imajo tipično maso okoli $10^7 M_{\odot}$ in velikost $D \sim 10 - 100 pc$. Medzvezdna snov je pomembna za nastanek zvezd. Vsebuje območja HI in HII (recimo Orionova meglica).

Galaktični disk

Medzvezdni plin:

Atomarni vodik in 21 cm Črta

Atomarni vodik lahko opazujemo v radijskem območju, ker oddaja črto z valovno dolžino 21cm.

Izmerimo lahko tudi njegovo oddaljenost. Atomarni vodik seva to črto zaradi tako znanega **spin flip**

transitiona, kjer se v vodikovem atomu spin elektrona (ki je na začetku vzporeden z spinom protona) obrne v nasprotno smer. Energija prehoda je:

$$\Delta E = hv = \frac{hc}{\lambda} = 5.9 \cdot 10^{-6} \text{ eV}; \lambda = 21\text{cm}$$

Naključno termično gibanje povzroči »vzbujanje« teh vodikovih atomov:

$$E_{kin} > \Delta E \Rightarrow \frac{3}{2}k_B T > \Delta E \Rightarrow T \geq \frac{2\Delta E}{3k_B} = 0.05\text{K}$$

Tako smo dobili pogoj za temperaturo, ki je pa zagotovljen praktično povsod. Preko Dopplerjevega premika črte lahko izmerimo radialno komponento hitrosti oblaka vodika:

$$\frac{v_{rad}}{c} = \frac{\lambda - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}}$$

(na sliki 21cm različno oddaljenih in različno gibajočih oblakov)

Opazovanje 21 cm črte v Galaktičnem disku

$$v_r = v \cos \alpha - v_0 \sin l$$

Uporabimo sinusni izrek za trikotnik med GC, zemljo in oblakom, da izrazimo kosinus neznanega kota α :

$$\frac{\sin(90^\circ + \alpha)}{\sin l} = \frac{r_0}{r} \Rightarrow \cos \alpha = \frac{r_0}{r} \sin l$$

Tako dobimo končen izraz, kjer upoštevamo se $v_r = \omega r$:

$$v_r = v \frac{r_0}{r} \sin l - v_0 \sin l = r_0 \sin l \left(\frac{v}{r} - \frac{v_0}{r_0} \right) = r_0 \sin l (\omega - \omega_0)$$

[TODO: Zakaj rata takšen zemljevid?]

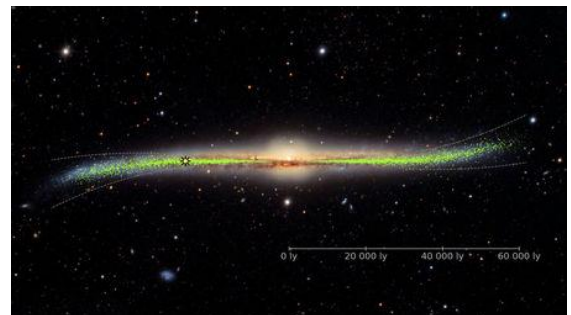
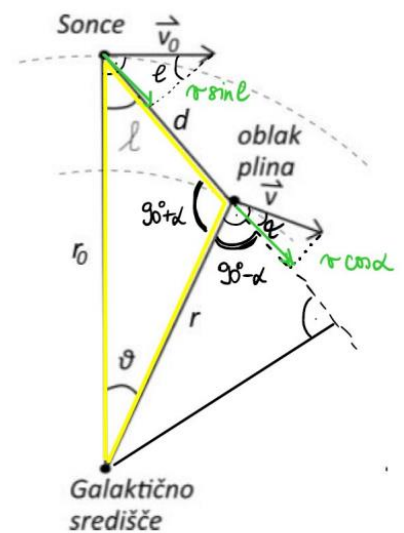
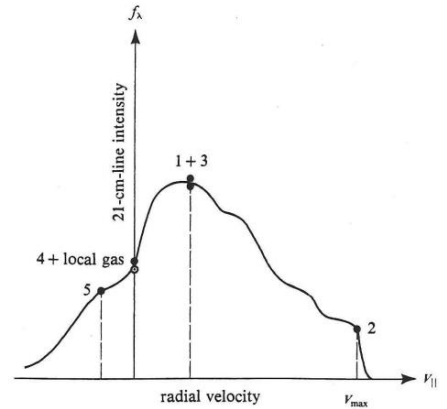
Galaktični plinski disk je ukrivljan na oddaljenostih večjih od 16kpc , kar lahko opazimo s pomočjo 21cm crte. Dviga se nad in pod Galaktično ravnino za $\sim 1 - 2\text{kpc}$. Ukrivljenost (ang. Warp) potrebuje za obhod Galaktičnega središča 600 do 700 milijonov let, medtem ko nase sonce potrebuje 220 milijonov let. Ukrivljenost bu bula lahko posledica plimnih sil bližnjih galaksij.

Območja CO

Kjer imamo CO je velika verjetnost, da imamo tudi H. Količina teh dveh naj bi bila približno enaka.

Medzvezdni prah

Prah seva podobno kot črno telo. Lahko pride celo do sublimacije prahu pri temperaturah $T < 2000\text{K}$. Prah nam lahko tudi **polarizira** svetlobo. Plin in prah bistveno prispevata, da nismo zmožni opazovati na dolge razdalje znotraj nase Galaksije. To je zaradi pojava, ki mu pravimo **Ekstinkcija**.



Ekstinkcija

Ekstinkcija so sevalne izgube svetlobe zaradi sipanja in absorpcije fotonov na poti od vira do nas. Popraviti moramo zvezo:

$$m - M = 5 \log \left(\frac{r}{10 \text{ pc}} \right)$$

ki ne velja v nepraznem prostoru. Če imamo zvezdo, ki oddaja L_0 potem lahko zapišemo, da L pada kot:

$$dL = -\alpha L dr$$

kjer je α **neprozornost**. Definiramo **optično globino** τ kot:

$$d\tau = \alpha dr \rightarrow dL = -L d\tau$$

$$\int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = - \int_0^\tau \tau d\tau \Rightarrow L = L_0 e^{-\tau}$$

Vidimo, da izsev pada eksponentno. Pogledajmo kaj se potem zgodi z gostoto svetlobnega toka:

$$L = \omega r^2 j(r)$$
$$L_0 = \omega R^2 j_0$$

kjer je ω prostorski kot po katerem merimo. Tako dobimo:

$$j(r) = \frac{j_0 R^2}{r^2} e^{-\tau}$$

Sedaj lahko popravimo nas izraz za distance modulus:

$$j(10 \text{ pc}) = j_0 \frac{R^2}{(10 \text{ pc})^2}$$

$$m - M = -2.5 \log \left(\frac{j(r)}{j(10 \text{ pc})} \right) = -2.5 \log \left[\frac{j_0 \frac{R^2}{r^2} e^{-\tau}}{j_0 \frac{R^2}{(10 \text{ pc})^2}} \right] = 2.5 \log \left[\frac{r^2}{(10 \text{ pc})^2} e^{-\tau} \right]$$
$$= 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} - 2.5 \log e^{-\tau} = 5 \log \left(\frac{r}{10 \text{ pc}} \right) + 2.5 \tau \log e$$

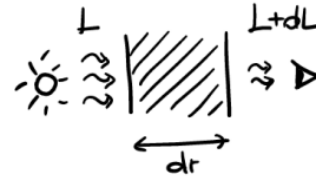
Tako dobimo končni rezultat:

$$m - M = 5 \log \left(\frac{r}{10 \text{ pc}} \right) + A; A = \tau(2.5 \log e) \geq 0$$

kjer je A , ekstinkcija. Pogledamo lahko se primer, ko je neprozornost konstantna:

$$\tau = \alpha \int_0^r dr = \alpha r$$

$$m - M = 5 \log \left(\frac{r}{10 \text{ pc}} \right) + ar; a = \alpha(2.5 \log e)$$



Pordečitev in barvni indeks

Pordečitev je pojav, ki je soroden z ekstinkcijo. Do nje pride zaradi sipanja na prahu, kjer se fotoni manjših valovnih dolžin ustavijo (absorbirajo) fotoni, daljših valovnih dolžin pa ostanejo, zato zglejajo objekti bolj rdeči, kot res so.

$$V \equiv m_V = M_V + 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} + A_V$$

$$B = M_B + 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} + A_B$$

Tako lahko za barvni indeks napišemo:

$$B - V = (M_B - M_V) + (A_B - A_V) = (B - V)_0 + E_{B-V}$$

kjer prvi oklepaj predstavlja **internistično barvo zvezde**, E_{B-V} pa **barvni presežek**. $R(V)$ je koreliran z povprečno velikostjo prašnih delcev, ki povzročajo ekstinkcijo. Za našo Galaksijo je:

$$R = \frac{A_V}{E_{B-V}} \cong 3.0$$

Meritve Trumplerja (za rasute kopice)

Trumpler je prvi opazil pojav ekstinkcije. Ocenil je temperature razsutih kopic preko spektralnega tipa zvezd in tako ocenil absolutne magnitudo. Meril je tudi premere kopic. Sklepal je, da so kotno manjše, dlje stran (sklep po tem, da je vedel približno kako velik naj bi res bil objekt). Namesto, da bi za te dve meritvi dobil enaki oddaljenosti, je prišlo do odstopanja, ki je bilo večje, dlje je bila kopica. Velikost kopice je:

$$D = d \cdot r$$

kjer je D fizicna velikost kopice, d kotna velikost in r oddaljenost.

Iz tega sledi, da je v eni od metodi neka sistematična napaka. To da bi bile kotno manjše kopice bližje se sliši nesmiselno. Napaka je ravno ekstinkcija. Trumpler je ocenil parameter a kot:

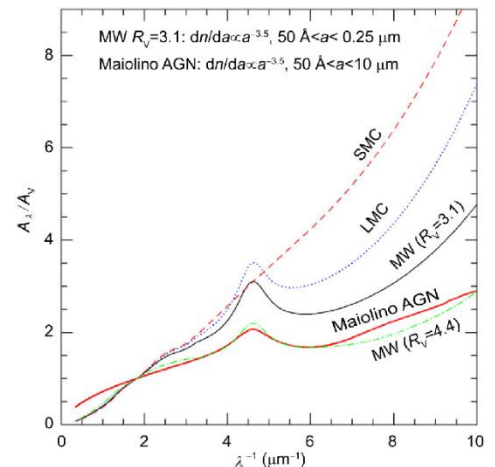
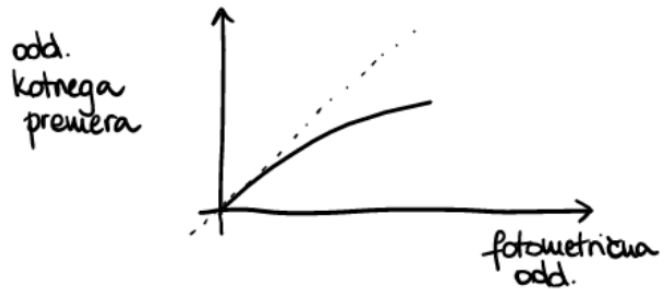
$$\bar{a} = 0.79 \frac{\text{mag}}{\text{kpc}}$$

Danes pa vemo, da je ekstinkcija v Galaktični ravnini pravzaprav okoli:

$$a = 2 \frac{\text{mag}}{\text{kpc}}$$

Krivulja ekstinkcije

Proti visokim valovnim dolžinam pada proti 0. Pri valovnih dolžinah okoli $4.6 \mu\text{m}$ ima vrh, potem pa raste dalje za IR in daljše. Na sliki primer za druge galaksije



Ekstinkcija izven ravnine Galaksije

Poglejmo spremembo zaradi vertikalne ekstinkcije:

$$\Delta m(b) = \frac{\Delta m}{\sin b}$$

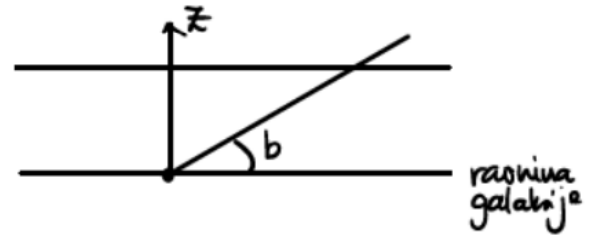
$$\log N_0(m) = 0.6m + C$$

$$m(b) = m_0 + \Delta m(b) = m_0 + \frac{\Delta m}{\sin b}$$

$$\log N(m(b)) = \log N_0(m - \Delta m(b)) = 0.6(m - \Delta m(b)) + C = \log N_0(m) - 0.6 \Delta m(b)$$

$$\Delta m \sim 0.1$$

$\Delta m \sim 0.03$ v smeri NGP. To je zaradi razlike v porazdelitvi prahu.



Vertikalna struktura Galaktičnega diska

Gostota zvezd ima odvisnost«

$$n(z) = n_0 e^{-\frac{|z|}{h}}$$

kjer je n_0 številčna gostota zvezd znotraj ravnine, z vertikalna koordinata in h karakteristična višina:

- **Tanek disk:**
 - O,B tip zvezd: $h \sim 50 - 60 pc$
 - G,K,M zvezde: $h \sim 300 pc$
- **Debeli disk:** $h \sim 1000 - 3000 pc$

Odvisnost karakteristične višine od spektralnega tipa kaže na časovno evolucijo strukture Galaksije. Plin ima odvisnost gostote:

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-\frac{|z|}{h}}; h \sim 150 pc$$

Hitrost nastanka zvezd (SFR) v M_\odot/year

Ce bi veljalo $SFR \propto \rho_{gas}$ potem bi bile h za O,B zvezde in plin enaki. V resnici je:

$$SFR \propto \rho^n; n > 1$$

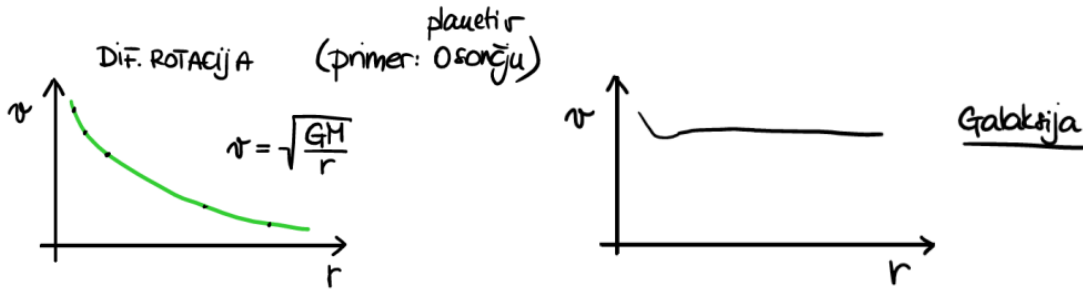
kjer je n odvisen od oblaka plina.

Spiralna struktura v Galaktičnem disku

Predpostavljamo (iz galaksij na različnih rdečih premikih = starostih), da so spiralne strukture obstojne. V spiralah prihaja do nastanka zvezd (*HII* regije in odprte kopice).

Diferencialna rotacija zvezd

Diferencialna rotacija je ko se deli rotirajočega objekta gibljejo pri različnih kotnih hitrostih, za različne oddaljenosti. Kaze, da ne gre za rotacijo togega telesa.



Kaj bi se zgodilo, če bi bili rokavi sestavljeni iz istih zvezd?

- a) Koliko orbit bi opravila zvezda na razdalji $4kpc$ v času sonca?

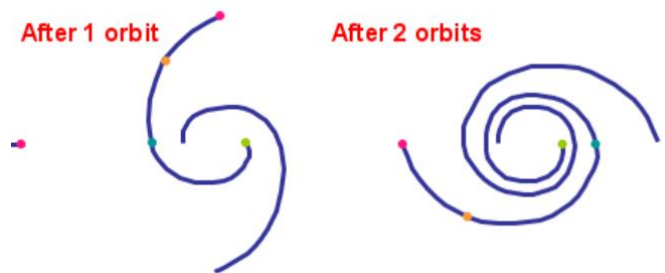
$$t_{orbit} = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi \cdot 4kpc}{200 km/s} = 1.23 \cdot 10^8 \text{ years} \Rightarrow N = \frac{t_{\odot}}{t_{orbit}} \cong 37$$

- b) Kaj pa za zvezdo na razdalji $10kpc$?

$$\Rightarrow N \cong 15$$

Diferencialna rotacija bi lahko bila vzrok za nastanek spiralnih rokavov, ampak bi potem te spiralne strukture po krajšem času izginile (vidimo kako velikokrat bi sle zvezde okoli, torej zagotovo ne bi bilo spiralnih rokavov). To je **dilema navijanja rokavov (winding dilemma)**.

Dilemo resi to, da zvezde v rokavih niso vedno iste. Zvezde zaidejo v rokav za nekaj časa in ga potem zapustijo.



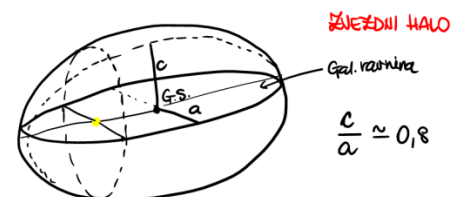
Nastanek spiralnih rokavov

Oblaki plina zavijejo v spiralni rokav, kjer tam iz tega plina nastanejo zvezde. Modre zvezde izumrejo preden zapustijo rokav. Bolj hladne pa uspešno zapustijo.

Spiralni rokavi so posledica naravnih perturbacij, ki vodijo do takih vzorcev. Ni se vse znano. **Density waves theory** pravi, da rokavi predstavljajo rokavi območja z večjo gostoto, ki se vrtijo počasneje. V grobem plin, ki zajadra v rokav prisotnost tega »valova« gostote stisne in rata ugodno za nastanek novih zvezd.

Zvezdni halo in središčna odebelitev

Zvezdni hali in središčna odebelitev skupaj sestavljata galaktični sferoid. To je območje kjer ne nastajajo nove zvezde (torej imamo tu samo stare zvezde). Ima obliko sploščenega elipsoida. Zvezde imajo eliptične orbite.



Kroglaste kopice so različne v Galaktičnem disku ali pa izven njega, predvsem po **kemični zastopanosti**. Tiste z nizko kovinskostjo so precej enakomerno razporejene. Kopice z visoko kovinskostjo so pa znotraj diska (kjer je bilo tudi več generacij zvezd že, da imajo sploh navolijo težje elemente).

Kovinskost:

$$[Fe/H] = \log\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_* - \log\left(\frac{N_{Fe}}{N_H}\right)_\odot$$

RR Lire (meritev razdale Galaktičnega središča)

RR lire so zvezde s pomočjo katerih lahko določimo velikost haloja, ker so lahko standardna svetila. Lahko določimo njegovo intrinzično svetlost (in sklepamo, da so vse te spremenljivke med sabo enake) in iz navideznih svetlosti izračunamo oddaljenost osončja od Galaktičnega središča:

$$r_\odot = 8.7 \pm 0.6 \text{ kpc}$$

Ugotovimo, da da številčna gostota RR lire ima odvisnost $n_* \propto 1/r^3$.

Središčna odebelitev

Zvezde se b središčni odebelitvi gibljejo zelo iregularno. Nimajo lepih orbit. Prečka (in njen nastanek) je se vedno nepopolnoma razrešen pojav. Numerični modeli pokažejo, da prečka vedno nastane. Mi pa iz opazovanj vemo, da nimajo vse spiralne galaksije prečke.

Središčna črna luknja

Čeprav imamo pogled prav v središče Galaksije zakrit zaradi prahu, lahko gledamo v radijskem spektru. V središču Galaksije so našli zelo močen radijski izvor. 0.4pc stran pa kopico polno mladih vročih zvezd. Preko opazovanja zvezd okoli tega izvora so pokazali, da se zvezde zelo hitro gibljejo. Preračunali so, da naj bi imel objekt v središču maso:

$$M = 4.3 \cdot 10^5 M_\odot$$

v območju nekajkrat AU. Takoj pomislimo na kompaktni objekt kot **črna luknja**.

Oortovi konstanti

Predpostavimo, da imajo zvezde krožne orbite okoli Galaktičnega središča (dobra aproksimacija za zvezde populacije I in plin).

Podobna izpeljava kot za 21cm črto da:

$$v_r = R_\odot \sin l (\omega - \omega_\odot)$$

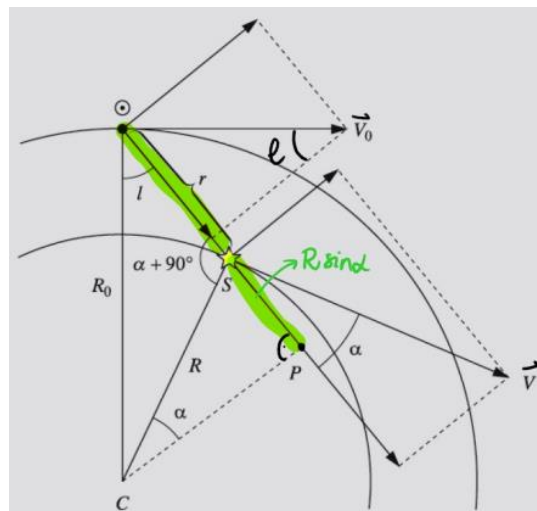
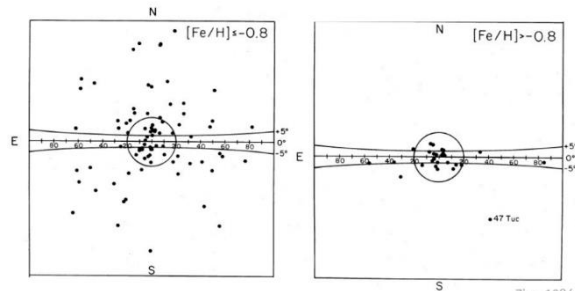
Izrazimo se tangencialno komponento:

$$v_t = v \sin \alpha - v_\odot \cos l; \quad R \sin \alpha = R_\odot \cos l - r$$

$$v_t = R\omega \sin \alpha - R_\odot\omega_\odot \cos l = \omega R_\odot \cos l - \omega r - R_\odot\omega_\odot \cos l \\ = R_\odot \cos l (\omega - \omega_\odot) - \omega r$$

Ker nas zanima Sončeva okolica (za kjer lahko sploh lahko izvedemo meritve) velja $r \ll R_\odot$, razvijemo $\omega - \omega_\odot$ v Taylorjevo vrsto okoli R_\odot :

$$\omega - \omega_\odot = \left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R=R_\odot} + \dots = (*)$$



$$\begin{aligned} \left(\frac{d\omega}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} &= \left(\frac{dv}{dR} \cdot \frac{1}{R} - \frac{v}{R^2}\right)_{R=R_{\odot}} = \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} \frac{1}{R_{\odot}} - \frac{v_{\odot}}{R_{\odot}^2} \\ &\Rightarrow (*) = \frac{1}{R_{\odot}^2} \left[\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} R_{\odot} - v_{\odot} \right] (R - R_{\odot}) \end{aligned}$$

Tu upoštevamo se $R - R_{\odot} \cong -r \cos l$ (kot $r \ll R_{\odot}$ in $R_{\odot} \cong R$). Tako smo torej dobili razvoj:

$$v_r = R_{\odot} \frac{1}{R_{\odot}^2} \left[\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} R_{\odot} - v_{\odot} \right] (-r \cos l) \sin l = \left[\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} - \frac{v_{\odot}}{R_{\odot}} \right] (-r \cos l \sin l)$$

In tako dobimo **prvo Oortovo konstanto A**:

$$v_r = Ar \sin 2l; \quad A = \frac{1}{2} \left[\frac{v_{\odot}}{R_{\odot}} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} \right] = 15 \frac{\text{km}}{\text{s kpc}}$$

Razvijemo se v_t kot prej (in upoštevamo $2 \cos^2 l = 1 + \cos 2l$ in $\omega r \approx \omega_{\odot} r$):

$$\begin{aligned} v_t &= R_{\odot} (\omega - \omega_{\odot}) \cos l - \omega r = R_{\odot} \frac{1}{R_{\odot}^2} \left[\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} R_{\odot} - v_{\odot} \right] (-r \cos^2 l) - \omega_{\odot} r \\ &= \left[\frac{v_{\odot}}{R_{\odot}} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} \right] r \cos^2 l - \omega_{\odot} r \end{aligned}$$

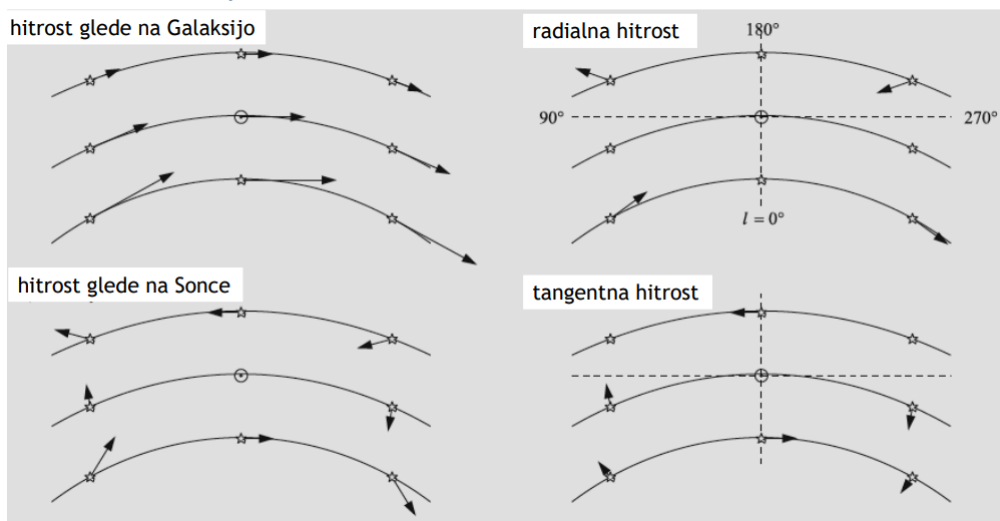
In tako dobimo se **drugo Oortovo konstanto B**:

$$v_t = Ar \cos 2l + Br; \quad B = -\frac{1}{2} \left[\frac{v_{\odot}}{R_{\odot}} + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}} \right] = -10 \frac{\text{km}}{\text{s kpc}}$$

Velja se:

$$A - B = \frac{v_{\odot}}{R_{\odot}} = \omega_{\odot} \quad A + B = -\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_{\odot}}$$

Ucinek diferencialne rotacija



Halo temne snovi

Poznamo samo njen gravitacijski učinek (gravitacijsko pomembna za gibanje). Drugače je pa ne vidimo. Dober pokazatelj za prisotnost temne snovi je rotacijska krivulja. Če pogledamo maso:

$$M(< R_{\odot}) = \frac{v_{\odot}^2 r_{\odot}}{G} \cong 10^{11} M_{\odot}$$

Če pogledamo rotacijsko krivuljo galaksije vidimo da po nekem r velja:

$$v = \sqrt{\frac{GM(< r)}{r}} = konst.$$

Kar pomeni:

$$M(< r) \propto r \quad \rho(r)r^3 \propto r \Rightarrow \rho_{DM}(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

Tako lahko ocenimo maso haloja temne snovi:

$$M_{DM} \cong 10^{12} M_{\odot}$$

Torej je temne snovi za red velikosti več kot vidne snovi.

Narava temne snovi

Iz česa je?

- Plin? Bi ga delektirali
- Prah? Bi ga prepoznali zaradi IR sevanja in opazili bi ekstinkcijo
- Masivni kompaktni objekti v haloju? Lahko bi to bili zvezdni ostanki, ki jih ne detektiramo. Preučevanje z gravitacijskim lečenjem
- Osnovni delci? Možni aksioni, wimps (weakly interacting massive particles)

Gravitacijsko lečenje

Predpostavimo:

- Sibo gravitacijsko polje
- Vpadni parameter je veliko manjši od ostalih vpletenih razdalj

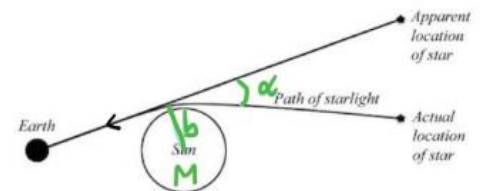
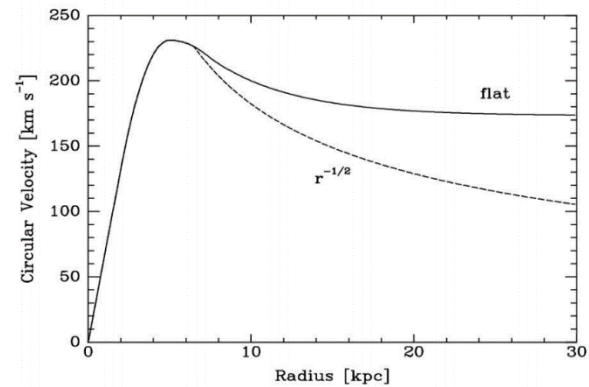
$$b \gg R_{sch} = \frac{GM}{c^2} \rightarrow \frac{GM}{bc^2} \ll 1$$

To je **aproksimacija tanke lece**.

Odklonski kot:

Newton:

$$\alpha = \frac{2GM}{Rc^2}$$



Einstein:

$$\alpha = \frac{4GM}{Rc^2}$$

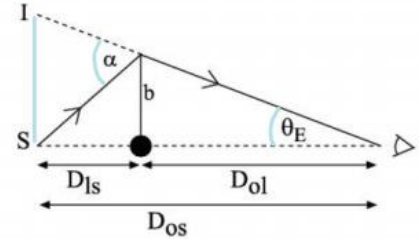
Gravitacijsko lečenje točkaste mase (izvor, leca in opazovalec poravnani)

V primeru šibkega polja velja:

- i) $\frac{GM}{bc^2} \ll 1$ in $\alpha = \frac{4GM}{bc^2} \ll 1$ (torej α je majhen kot)
- ii) $b \ll D_{OL}$ (θ_E je majhen kot)

Lz geometrije sledi:

$$\begin{aligned} \alpha D_{LS} &= \theta_E D_{OS} \\ b &= R_E = \theta_E D_{OL} \\ \alpha &= \frac{4GM}{c^2 b} \end{aligned}$$



Tako dobimo:

$$\theta_E^2 = \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_{OS} D_{OL}}$$

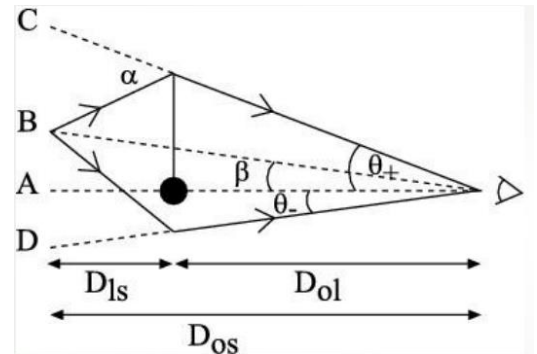
Gravitacijsko lečenje točkaste mase (izvor, leca in opazovalec neporavnani)

Spet v šibkega polja velja:

- i) $\alpha \ll 1$
- ii) $b \ll D_{OL} \rightarrow \theta \ll 1$

Lz geometrije sledi:

$$\begin{aligned} AC &= AB + BC \\ \theta D_{OS} &= \beta D_{OS} + \alpha D_{LS} \\ \beta &= \theta - \alpha \frac{D_{LS}}{D_{OS}} = \theta - \frac{D_{LS}}{D_{OS}} \frac{4GM}{c^2 \theta D_{OL}} = \theta - \frac{\theta_E^2}{\theta} \end{aligned}$$



Tako dobimo:

$$\theta^2 - \beta\theta - \theta_E^2 = 0$$

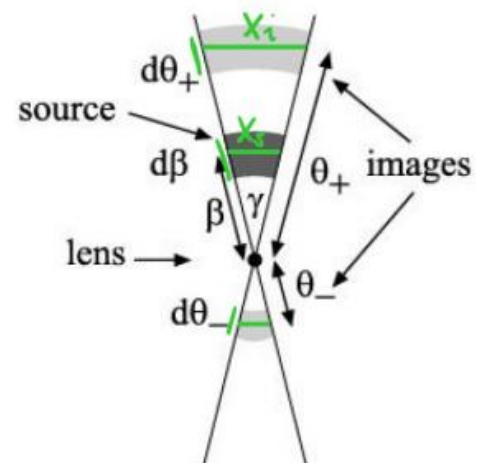
In imamo dve rešitvi:

$$\theta_{\pm} = \frac{1}{2} \left[\beta \pm (\beta^2 + 4\theta_E^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Izgled lečenje izvora

Raztezek slike: $\frac{\theta_{\pm}}{\beta}$

Velikost slike (debelina): $\frac{d\theta_{\pm}}{d\beta}$ (odvod rešitve)



Magnifikacija: $a_{\pm} = \frac{\theta_{\pm}}{\beta} \frac{d\theta_{\pm}}{d\beta} = \left[1 \pm \frac{\beta}{(\beta^2 + 4\theta_E^2)^{\frac{1}{2}}} \right]$

Amplifikacija: Površinska svetlost se ohranja

$$a_{tot} = a_+ + a_- = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{\frac{1}{2}}}; \quad u = \frac{\beta}{\theta_E}$$

Relativno gibanje izvora in lece glede na opazovalca

- Hitrost merimo v ravnini lece
- Premočno gibanje po nebu

$$\beta(t) = \sqrt{\beta_0^2 + \frac{v^2}{D_{OL}^2} (t - t_0)^2}$$

kjer je t_0 čas prehoda. Tako je:

$$u(t) = \frac{\beta(t)}{\theta_E} = \left[u_0^2 + \frac{(t - t_0)^2}{\tau^2} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad u_0 = \frac{\beta_0}{\theta_E} \quad \tau = \frac{\theta_E D_{OL}}{v}$$

In iz tega (grozno) sledi:

$$a_{tot} = \frac{u_0^2 + \frac{(t - t_0)^2}{\tau^2} + 2}{\sqrt{u_0^2 + \frac{(t - t_0)^2}{\tau^2}} \cdot \sqrt{u_0^2 + \frac{(t - t_0)^2}{\tau^2} + 4}}$$

Eksperiment mikolecenja v Velikem Magelanovem oblaku

$l = 50 \text{ kpc}$ in m je masa MACHO objekta.

$$n = \frac{M_{DM}}{\frac{4}{3}\pi l^3}$$

Sipalno površino lečenje napišemo kot:

$$\sigma = \pi(\theta_E D_{OL})^2 = \pi \frac{4Gm}{c^2} \frac{D_{LS}}{l D_{OS}} D_{OL}^2$$

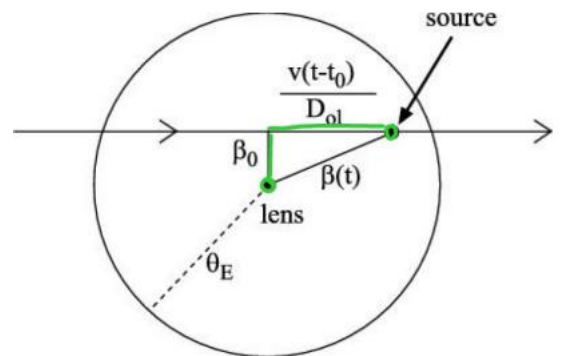
Tako je:

$$N = \int_0^l n(r) \sigma(r) dr = n \sigma l = \frac{M_{DM}}{\frac{4}{3} m \pi l^3} \pi \frac{4Gm}{c^2} \frac{D_{LS}}{l D_{OL}} D_{OL}^2 l$$

Za primer, ko je $D_{LS} = D_{OL} = \frac{l}{2}$ dobimo:

$$N \cong \frac{GM_{DM}}{lc^2} = \left(\frac{v_{\odot}}{c} \right)^2$$

Torej če vstavimo podatke:



$$N = \left(\frac{270 \frac{km}{s}}{3 \cdot 10^5 \frac{km}{s}} \right)^2 \sim 10^6$$

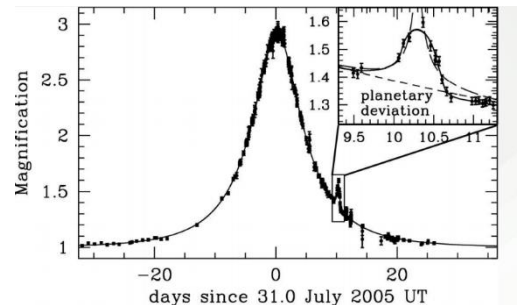
To je zelo majhna številka. Če privzamemo $m \cong M_{\odot}$ $D_{OL} \sim l/2$ in $\theta_E \sim 2 \cdot 10^{-9}$. Dobimo:

$$\tau = \frac{2\theta_E D_{OL}}{v} \cong 6 \text{ months}$$

V eksperimentu so 5 let gledali 10^7 zvezd in ocenili, da mora priti do 10 lečenj na sekundo. Odkrili so, da pride do 15 lečenj na sekundo. Iz eksperimenta so zaključili, da temno snov sestavlja at most 20% MACHO objektov (kompaktni objekti, ki jih ne zaznamo).

Mikrolecenje in odkrivanje planetov

Mikrolecenje se lahko uporabi za delektirane planetov. Planet bo dodatno lečil in ojačal sliko.



Alternativa temne snovi MOND – Modified Newtonian Dynamics

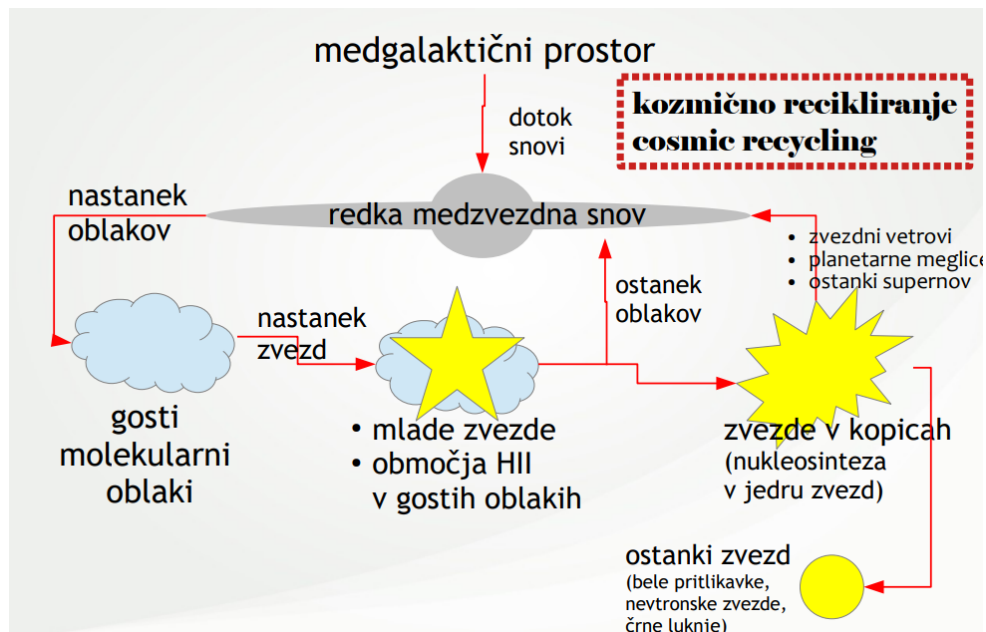
$$F = ma \rightarrow F = m \frac{a^2}{a_0}; \quad a \ll a_0 \quad a_0 \cong 10^{-8} \text{ cm/s}^2$$

To je kot alternativa temne snovi, ki uspešno opise rotacijsko krivuljo galaksije ima pa druge težave.

Razvoj nase Galaksije

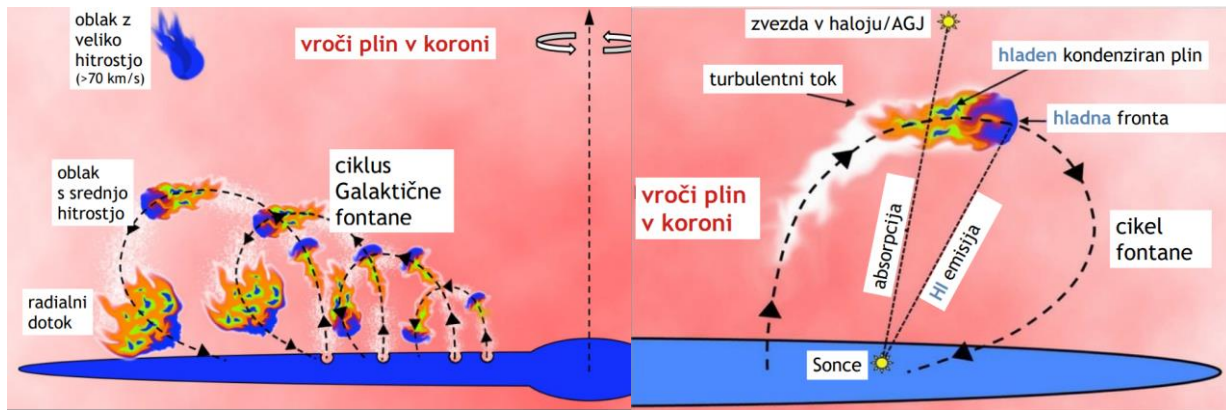
Razvoj medzvezdne snovi (Cosmic recycling)

Model pravi, da so zvezde tiste, ki sintetizirajo težje elemente in p smrti obogatijo svojo okolico z novimi elementi. Glej sliko!



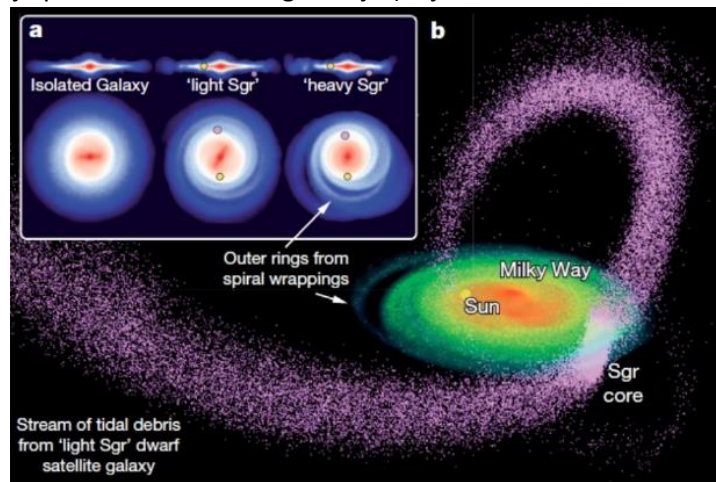
Galaktična fontana

Supernova (oz. več supernov hkrati) tvori mehur snovi/plina izven diska (iz materiala v okolici zvezd). Ta vroč plin vstopi v galaktični halo in se ohladi in vrne v disk.



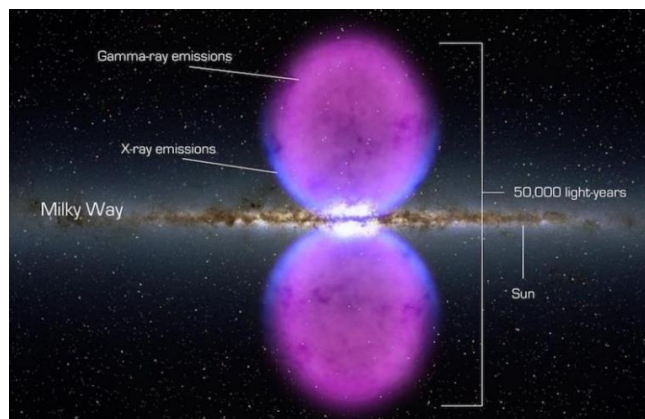
Oblaki visoke hitrosti

Gre za megalaktični plin, ki se ni zgostil ob nastanku galaksije okoli katere je. Nasa Galaksija je trčila v neko lažno pritlikavo satelitsko galaksijo (to je bilo odkrito iz zvezdnih tokov).



Fermijeva mehurčka

Prisotnost ni razložen. Možen je nastanek iz relativističnih curkov iz središčne luknje. Iz hitrosti se sklepa, da je to kratkoživi pojav.

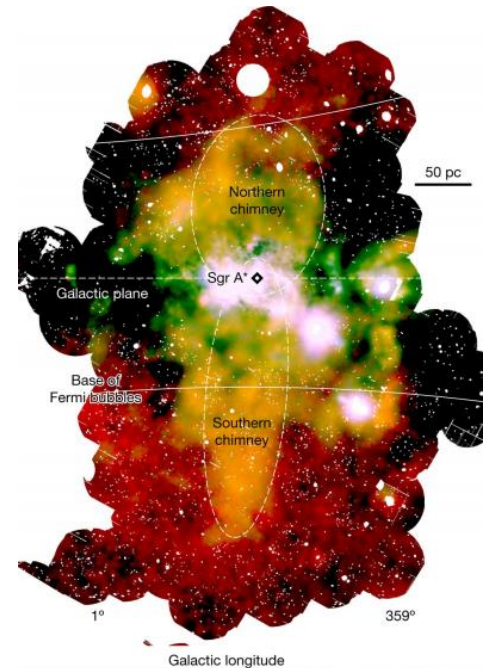


Veliki radijski mehurčki

Sklepam da tako kot Fermijeva samo večja in v radijskem spektru.

»Dimniki« v rentgenskem spektru

Povezujeta se z Fermijevima mehurčkoma in izhajata iz *Sgr A**. Sklepa se, da tu teče tok v Fermijeva mehurčka.



Povzetek

komponenta	oblika	dimenzija	barionska snov		masa [M_{sun}]	gibanje
			zvezdna	plinasta		
halo temne snovi	sploščeni sferoid?	>50 kpc ?	?	?	$\sim 10^{12}$?
disk	sploščeni disk	(radij) ~ 15 kpc				
tanki disk	spiralni rokavi	(debelina) ~ 1 kpc	pop I $Z \sim 0,005-0,04$ O, B zvezde v spiralnih rokavih	gosti in razpršeni oblaki; snov med oblaki; območja HII	zvezde $\sim 10^{11}$ plin $\sim 10^{10}$ prah $\sim 10^8$	krožna diferencialna rotacija; karakteristična višina < 300 pc
debeli disk		(debelina) ~ 2 kpc	pop I (stare zvezde)	skoraj nič plina	zvezde $\sim 10^{10}$	skoraj krožna; karakteristična višina ~ 1 kpc
sferoid						
zvezdni halo		radij > 20 kpc	pop II ($Z < 0,002$)	zelo malo plina; oblaki z zelo visokimi hitrostmi	zvezde $\sim 10^9$ skoraj ni plina	eliptične orbite, nagnjene glede na galaktično ravnino
središčna odebelitev	triaksialni elipsoid (prečka)	radij 3 kpc	$Z < 0,02$		zvezde in plin $\sim 10^{10}$ masivna črna luknja $4 \cdot 10^6$	
vroča korona				redki vroči plin		