1. óra

Frei Zsolt
zsolt@frei.net

frei@zsolt-frei.net

3.86
Tel: 6317
Fogadóóra: Kedd 10-12

Kozmikus fizika

írásbeli vizsga

1) Történeti áttekintés

- 2009 a csillagászat éve → ok: Galilei 400 éve használta először a távcsövet, de holland optikusok feltalálták fél néhány évvel azelőtt
  - ↳ - rendelkezésre könnyű lencsét használt
  - Galilei a Holdat vizsgálta → a hegyek magasságát mérte meg
    - ↳ - vett egy félhetet amikor félhold van s gyűrűt ha van és hogy csillog a sötét részen → a szögből a magasság meghatározható
  - - a Hold átmérője Galilei idejében már ismert
  - - G. látta a Jupiter holdjait
    - ↳ - vita volt a geo- vagy helio centrikus világkép körül, de ez kizárta a geocentrikus világképet, mert a Holdak nem a Föld körül forognak
  - - látta a Vénusz fázisait → ez is ellenzte a geocentrikus világképet
  - - látta a Szaturnusz gyűrűit
- Tycho Brahe, Kopernikusz, Kepler
- ↳ - ők bizonyították be, hogy nem minden a Föld körül forog
  - - ha a Nap körül forog minden megfigyelhető minden bolygó parallaxisa?
    - → parallaxis mozgás lehet kör, ellipszis, és vonal is
      - pici dőlésszöget lehetett volna észlelni
  - - Kepler volt az asszisztense
  - - Kepler megfejtette Brahe adataiból a bolygók mozgását
  - - a Mars megfigyeléseiből kiszámolta az ellipszis alakú pályát, ami Brahe adataival kiszámított
  - - Htorgad nyíl fejével meg
    - ↳ az elliptikus ~~~ Kepler törvényei megadja a Marsnak

Frei Zsolt
zsolt-frei.net

frei@zsolt-frei.net

3.86
Tel: 6317
Fogadóóra: Kedd 10-12

Kozmikus fizika

Írásbeli vizsga

1. óra

1) Történeti áttekintés

- 2009 a csillagászat éve → ok: Galilei 400 éve használta először a távcsövet, de holland optikusok feltalálták pár néhány évvel azelőtt
  ↳ - hadviselésben korábban is használták
  - Galilei a Holdat vizsgálta → a hegyek magasságát mérte meg
    ↳ - vett egy félholdat, amikor félhold van s felül ha van és hegy csillog a sötét részen → a szögből a magasság meghatározható
  - a Hold átmérője Galilei idejében már ismert
  - G. látta a Jupiter holdjait
    ↳ - vita volt a geo- vagy helio centrikus világkép körül, de ez kizárta a geocentrikus világképet, mert a Holdak nem a Föld körül forognak
  - látta a Vénusz fázisait → ez is ellentmond a geocentrikus világképnek
  - látta a Szaturnusz gyűrűit
- Tycho Brahe, Kopernikusz, Kepler
  ↳ - ők bizonyították be, hogy nem minden a Föld körül forog
  - ha a Nap körül forog minden megfigyelhető minden bolygó parallaxisa ?
    ↳ parallaxis-mozgás lehet kör, ellipszis és vonal is
    pici dimenziókat kellett volna észlelni
  - Kepler volt az asszisztense
  - Kepler megfejtette Brahe adataiból a bolygók mozgását
  - a Newton egyenletekből származtatták az ellipszis alakú pályát, ami Brahe adataiból kiszámítható
  - retrográd mozgást figyeltek meg
    ↳ az állni látszó csillagokhoz képesti mozgása a Marsnak

↳ Tfh. a Nap körül kering minden, a Mars is, de ő lassabban halad mint a többi mert távolabbi pályán van → a Föld sebessége gyorsabb mint a Földnek → a Marsban egy visszafelé fordulást láttak → ez a retrográd mozgás

- Messier katalógusa

↳ - 1700-as években Messier francia csillagász a Halley üstököst kereste
- akkor világkép: Föld + bolygók, amik körül [illegible] kering
- olyan objektumokat is látott amit más nem → nebula-nak nevezte el → ezek nem fényesek és pontszerűek voltak, hanem nagy kiterjedésűek és halványak → katalógust csinált belőlük → kb. 100 objektumot talált
- 100 évig nem értették meg az objektumokat

- Shapley - Curtis vita

↳ - 1920-ban a Smitsonian egyetemen zajlott → a nebulák gázfelhők - vagy galaxisok (univerzum szigetek)?
- nem homogén a csillagok eloszlása
- csillagok homogének - nem homogének ?
- 3 fő kérdés volt: - objektumok távolsága
  - ↳ ha közel: gázfelhő
  - ↳ ha távol: galaxis

↓ technika nem volt a megválaszolásukhoz

- anyagi összetétel:
  - ↳ ha gáz: gázfelhő
  - ↳ ha csillag: galaxis

↓ spektroszkópiával lenne meghatározható

- elnyelési zóna: van az égen egy sáv, amit elnyeltek a nebulák

ha van por, ha van galaxis és ha

ha galaxis: mi is itt élünk, ezért nem látjuk

→ 5. erő

ha gázfelhő: van egy erő, ami eltolja egymástól a gázfelhőket

- a vita nem dőlt el, mert nem lehetett megmérni

- Edwin Hubble megoldása

1924

↳ - meghatározott egy csillagot az Andromeda galaxis szélén, a távolságot meghatározta → távol volt, tehát a vita eldőlt ⇒ a nebulák galaxisok
↓
sok csillagból állnak

- az Andromeda szélén izolált csillagokat is

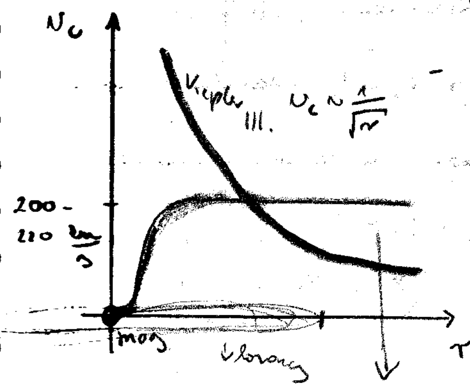
- spirál galaxis: - gömb menti mag → bulge

- tányér menti korong → disk

- gömb menti aura → halo

↳ hatalmas teljes tömeg van, de nem látszik

↳ - itt van a tömeg 90%-a



← - rotációs görbét veszünk fel
↓
a csillagok a galaxis középpontjától mért távolság

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$

a rot görbe a galaxis széle után is konstans

vörös és kék eltolódást kell visszaadni
↓ ↳ közeledik/távolodik a csillag
kapni a fény hullámhossza

Keresztül különböző távolságban csillagokat, megmérték a vörös és kék eltolódást → nem Kepler III. jött ki, hanem egy konstans görbe a rotációs görbe

ebből $\rho(r) \sim \frac{1}{r^2}$ → izotermikus eloszlás

- osztályozta a galaxisokat

↳ - 2 típus: - elliptikus: nincs korong szerkezete

- spirál galaxis: van korong szerkezet + S alakú spirál karok
↳ van küllős spirál galaxis

⇒ Hubble-féle hangvilla rendszerben ábrázolta

2.) Az univerzum szerkezete

- 1980-tól lehet tanulmányozni

- Hubble űrtávcső 1990-ben állították Föld körüli pályára
↓
- nagyon távoli galaxisokat fedezett fel → 12 milliárd éves távolságra van

- a múltat lehet vele látni → Hubble Deep Field → HDF

3.) Modern felfogás

- az univerzum szerkezete hierarchikus
- galaxisok összeütközése után alakul ki a elliptikus galaxis
- 1980-ban sikerült olyan sok galaxist feldérképezni, hogy a szerkezet is vizsgálhatóvá → homogén vagy inhomogén a szerkezet?

· Hubble törvény: - Az univerzum egyenletesen tágul → így távolságot lehet meghatározni

- A távolodási sebesség arányos a távolsággal.
- pl: tésztába mazsolát, az egészet sütjük, akkor azt látjuk a közeli mazsola lassan, a távoli mazsola gyorsan távolodik, ha gyújtjuk a tésztát
- $v = H \cdot d$ → távolság; H: Hubble áll. $\to d = \frac{v}{H}$ $\quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$

$$\boxed{d = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c \cdot \frac{1}{H}}$$

- egy galaxis távolságát 1 órás expozíciós idővel tudom megmérni
- CFA slice: - Kijelöltek az égen egy vékony sávot és mérték meg a galaxisok távolságát. 1000 vöröseltolódást gyűjtöttek össze

úgy kell elképzelni, mint egy dinnyeszeletet. Vágok ki egy dinnyéből, majd összecsukom, és a nyílásszög 6°-os

inhomogén eloszlás

üregek is vannak, ahol hiányos anyag

- Pencil beam: Ceruza darabot kivágtak az égből → pici paca mentén néztem meg a galaxisok vörös eltolódását → egyenlő eloszlást kapok → úgy csíkok és üregek váltakoznak
- SDSS: 2000-2005 → 1 millió galaxis távolságát mérte meg

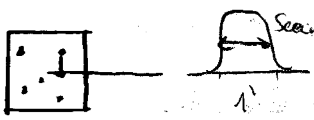
2. óra

1.) A távcsövek működése

- Galilei használta először → néhány aktív lencsét tartalmazott
- egy nagy átmérőjű távcsővel négyzetesen több fotont tudok begyűjteni
- látószög: így → ... nem ... a objektum
- a fény intenzitása $\frac{1}{\text{távolság}^2}$ -el csökken
- azért van szükség nagy távcsövekre, hogy távoli objektumokat is lássunk
- a begyűjtési közeget a lencse adja meg → megyi, hogy hol van a távcsövön
- fontosak a légköri viszonyok

  és a vízgőzre mért hatása tesz azt, hogy egy pontból érkező fény helyett egy pacát látunk
- a egész égbolt feltérképezéséhez az északi és a déli féltekére is kell távcső
- van egy távcső a Hawaii szigetek vulkánjának tetején

  és itt nem sokat esik az eső → éjszaka is lehet képet csinálni
- felbontóképesség: Van egy fotó, kivilágítok egy csillagot. A csillag felbontásától...

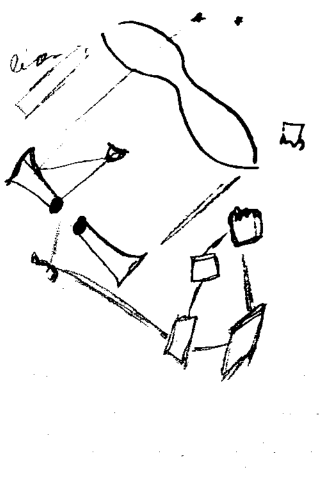


picike, kivéve a Nap, általában csak pontként látszanak.

  - a fényképlemezen nem egy pontja lesz a csillag képe, hanem egy gauss görbe mentén terül el
  - a gauss görbe félértékszélessége adja meg a felbontóképességet → seeing
  - a legjobb felbontóképesség 1 másodperc
- létezik egy közös kutató központ: E.S.O.
- pl: KEK 1, KEK 2 → 10 m átmérőjű távcső
- Boomerang kísérlet: Antarktiszon csinálják, mert ott nagyon tiszta a levegő
  - kék fényű a ...
  - felengednek egy héliummal töltött ballont, amin van egy konténer + kamera, néhány idő múlva visszaszáll a kiindulási helyre, ahol felbocsátják, így visszaszáll a Földre és a felvételekből kinyerik az adatokat

- Galilei távcsőben a szemlencse homorú lencse
- Kepler távcsőben a szemlencse domború lencse
- problémák: - kromatikus aberráció
  - ↳ - egy lencse így gyűjti a fényt, hogy domború és be vágja a fényt, megtöri, szóródik és végül egy pontban jut be
    - a lencse máshova hozza fókuszba a piros és a kék fényt → ha a kék van fókuszban akkor egy piros aura látszik körülötte
    - megoldás: kiegészítjük egy másik törésmutatójú lencsével
    - akromatikus távcső: 2 lencse → 2 mínusz van belőle
    - apokromatikus: 3 lencse → 3 mínusz van belőle
  - gömbi hiba: - ha nagy látószögű képet nézünk, akkor a kép szélén foltok jelennek meg
- manapság már nem nagyon használnak lencsés távcsöveket
  - ↳ - Yerkes obszervatóriumban Alvan Clark épített egy 103 lencse átmérőjű távcsövet
    - ok: - nehéz olyan lencsét önteni amiben nincsenek hibák (légbuborékok)
      - domború a lencse → vastag középen, vékony a szélén → a szélén kell megfogni, felfogatni és egy nagy lencsénél ez lehetetlen
- tükör: párhuzamos sugarakat egy pontban fókuszál
  - ↳ - jó, mert rövid tubusba is be lehet tenni
  - a sorral jobb, mint a lencse
  - üvegből van → jól hajlítható → parabolává
  - a fény hullámhosszának a töredékéig kicsiszolható
  - parabola tükör $\lambda/10$-el van csiszolva
    - ↳ - azért van rajta párologtatva
      - prime fókusz: összegyűjtjük a fényt → beszerelnek egy ketrecet, ide be lehet ülni és nézni a képet

- eljárások tükrös távcsövek való megfigyelésre:
  ↳ - primer fókusz: lehet közvetlen használni és lehet oda tenni
  - a fókuszpont előtt berakok egy sík tükröt, elviszi a fény útjába, oldalt lyukat fúrnék → Newton fókusz
  - Cassegrain fókusz: visszafordítja a képet, a főtükör alatt → ide lyukat fúrnak helyezhető el a kamera. Itt összehajtogatjuk a fény útját
  - Kudrin-fókusz: Van egy domború másodlagos tükör, és harmadik egy 3. síktükör is, és oldalra vezeti ki a fényt
- távcső tükrei: - ha gömb alakú tükröt alakot csinálok, az nem egy fókuszpontba gyűjti össze a fényt, hanem szétkenődik
  - ha parabola alakúra csinálom, az egy pontba fókuszál
  - korrekciós lemez használatával gömb alakú tükör is használható
- 10 m-es átmérőjű tükröt nem lehet úgy, hogy az elfordításkor ne torzuljon
  ↳ - vannak kis átmérőjű tükrök és ebből mozaikosan összerakok egy tükröt
  - a Keck is mozaikdarabokból áll
  - 4 db 8 m-es átmérőjű tükör, a egyik önmagában működik, de együtt van. Tele van alatta villanymotorokkal, ami hajlítgatja a tükröt → a egy nagy olvasatásszintben van
- adaptív optika: A távcsövek főtükre egy nagy parabola tükör. Van egy csillag, vannak turbulens áramlások. A kamerán pont helyett homályos paca jelenik meg. Berakunk egy tükröt, elvezetünk egy félig áteresztő tükörrel a fényt, ami mögött van a detektor. A közelében van egy lézer, amit úgy használnak, hogy nagy légkörben gerjesztenek ott lévő molekulákat és az gerjeszti a fényt → zöld csillagot lát, a távcső azt is látja. A tükör elkezdi hajlítgatni a pacát, hogy összeugorjon egy pontba.



- a Déli féltekén a Chilei sivatagban van a távcső → VLT (very large telescope)
  - ↳ 4 db 8 m-es tükör
    - interferometrikus módon működik a 4EK-d
- diffrakció limitált felbontás
  - ↳ a diffrakció limitálja a felbontást
    - van egy ahol, amin belép a fény csak diffrakció van
    - ha négyzetesödleteben nézem, akkor a Airy korong átmérője $\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{d}$
- mikrohullám lapot használnak } a távcsövekhez
- spektroszkópot használnak
  - ↳ vannak benne lencsék amik fókuszálják a fényt, és van benne prizma vagy optikai rács
    - anyagi összetételét meg tudom mondani egy csillagnak
- a űrbe azért kell felküldeni rakétával, mert jobb a felbontás és egy olyan spektrum tartományban tudok nézni, amiben a Földön nem
  - ↳ Vannak RTG teleszkópok az űrben, ultraibolyában működő Galex távcső
  - Hubble űrteleszkóp 2,5 m átmérőjű tükröt tartalmaz
    - Van 2,5 paraboloid tükör, másodlagos tükör, kamerák ...
    - 1986-ban akarták pályára bocsátani, végül 1990-ben küldték fel, de rosszul volt csiszolva a tükör, 1993 dec-ben javították meg
      ↓
      egy új dollár értékű tükröt raktak bele

3. óra

A galaxisok fizikája

- Messier vette észre a különszedett halvány foltokat a csillagok között

  voltak köztük galaxisok, szupernova különböző utáni gázfelhők, csillagokból álló gömbhalmaz

- nem minden Messier objektum volt galaxis, csak 16. a fele volt az
- 1924-ben döntötte el Edwin Hubble, hogy vannak galaxisok

  ↳ Cepheidák az Androméda ködben

- galaxisok morfológiai jegyeit vizsgálni
- Hubble elkezdte fényképezni a galaxisokat s kitalálta egy osztályozási eljárást, ami teljesen megjelenik
- ma már tudjuk, hogy a galaxis fizikájának semmi köze ahhoz, hogy, hogy néz ki a galaxis
- Hubble-féle osztályozási eljárás azon alapul, hogy 2 féle galaxist látott

  ↳ elliptikus alakú

  - spirál alakú

  ↳ villa diagram: nyél: elliptikus galaxis

  2 hegy: spirál galaxis ↳ küllős

- Elliptikus galaxis a neve E_0 és E_7 között van

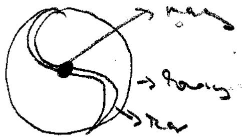
  ↳ - valami lapult ellipszoid

  - van látszólagos nagy (a) és látszólagos kis (b) féltengely
  - a alcsoportok a lapultságot fejezik ki

    ↳ ha körnek látszik akkor: 0

    ha nagyon lapult akkor: 7

  - $\frac{10(a-b)}{a}$ ⇒ az fejezi ki az alcsoportok besorolását
  - elliptikus foltnak tűnnek az égen és semmilyen más struktúrát nem mutatnak

- Spirál galaxis 

↳ - van egy "magja" és vannak karjai, amiben vannak a spirálkarok

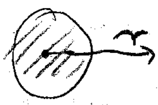
- Edge-on — Face-on : Hogyan látom a galaxist

- az elliptikus galaxis sűrűségeloszlása hasonló a spirál galaxis magjához

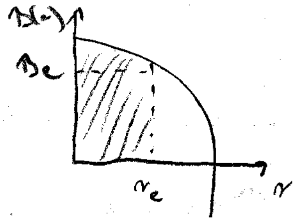
- valószínűleg a spirál galaxis magjából lesz az elliptikus galaxis → ütközések útján

- a sűrűségeloszlást empirikusan De Vaucouleurs írta le

↳ a sugár függvényében megadta a fényességet egy galaxisban



B → brightness



$$B(r) = B_e \cdot e^{-7{,}67\left(\left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/4} - 1\right)}$$

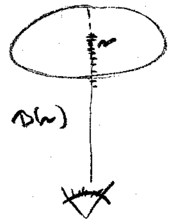
↳ a fényesség nagyságrendjét jellemzi

$$r_e : \int_0^{r} B(r) \cdot 4\pi r^2 \, dr = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} B(r)\, 4\pi r^2 \, dr$$

↳ ez az r_e definíciója → ameddig integrálva a felét kapom, mintha a végtelenig integráltam volna

$$B_e = B(r_e)$$

↳ ezzel a probléma az, hogy nincs olyan emissziós függvény, ami olyan fényességprofilt írnál

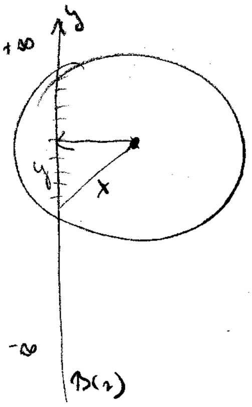


- r távolságban megnézem, hogy mekkora a B(r) fényesség, ebben össze kell adni az oda látszó csillagok fényességét

- nem tudjuk a csillagokat egyesével, a fényességük együtt összeadódva

- itt vannak az individuális csillagok, a számuk lépések nagy fényű jelleg látszó

Emissziós fv: a középponttól mért távolságban adja a fényintenzitást a galaxisnak



luminozitás a anyagsűrűségtől függ, tehát a sűrűségeloszlást kell összeadnom

Ha a luminozitást x-el paraméterezem

$\mathcal{E}(x)$ $\qquad$ $x^2 = y^2 + r^2$

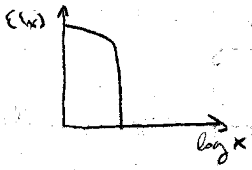
$$B(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}(x)\, dy = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{E}\left(\sqrt{y^2 + r^2}\right) dy = B_e \cdot e^{-7{,}67\left(\left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/4} - 1\right)}$$

↳ matematikailag nincs olyan $\mathcal{E}$ fv. ami ide beírható

- Jaffe azt mondta, hogy legyen $\mathcal{E}(x)$ (luminozitás) arányos $\frac{1}{x^2(a+x)^2} \cdot L$

→ ennél majdnem jó az egyezés

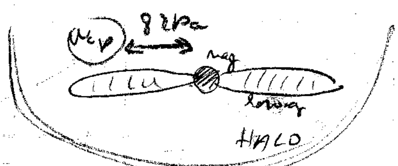
Veszünk olyan kis x-ekre a fv. alakot ahol $x \ll a$, akkor a sűrűségeloszlás $\frac{1}{x^2}$-el fog menni



→ Jaffe-féle görbe

- a Spirál galaxisnak 3 komponense van

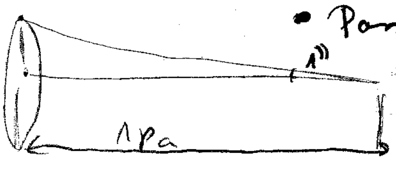
↳ - mag olyan mint a elliptikus galaxis
- korong
- halo



→ Kitérő: Csillagászati távolságok

↳ a csillagászati távolságskálát úgy választották, ahogy épp a fejlődése megkívánta

- Csillagászati egység: - Nap - Föld Távolság
AU
- kb. 150 millió km
- pl: Plútó kb. 40 csillagászat. egységre van a Naptól



- Parsec: az a távolság ahonnan egy csillagászati egység egy szög másodperc alatt látszik

- 1 Pc = 206265 AU
- 1 Pc = 3,26 fényév (L.Y.)
- a legközelebbi csillag 1,3 Pc-re van tőlünk
- a közeli csillagok képletét írja le
- 1 kPc = 10^3 Pc   1 MPc = 10^6 Pc

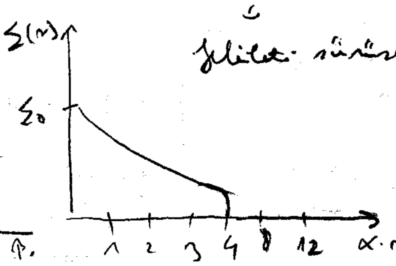
← ismétlés

mag új jele: a → 1-2 kPc a sugara

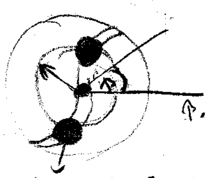
korong új jele: b → 10-12 kPc a sugara, 20-nak vélhetően, az átmérője
200-300 Pc a vastagsága

halo új jele: c → 50-100 kPc az átmérője

b: - lapult, 1:20-hoz a lapultsága
- 10-12 kPc a sugara, 20-25 kPc az átmérője
- exponenciális korong
↓
így csökken az anyag sűrűség, ahogy távolodunk a középponttól
↓
felületi sűrűség $\Sigma(r) = \Sigma_0 \cdot e^{-\alpha r}$



$\Sigma_0 = \Sigma(0)$ a galaxis középpontjában
α = skálaállandó
↓
ált.: $\frac{1}{4}$ kPc

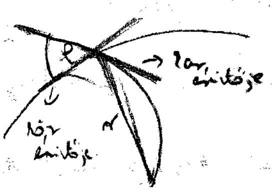


- a spirálkaroknál sűrűbb az anyag
- a spirál. karok leírására milyen fv.-t használunk
  ↳ milyen β függvényében a sűrűség?

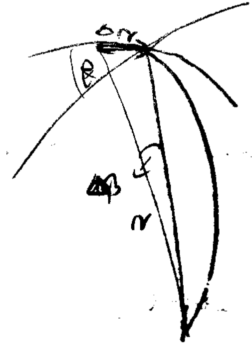
$$\sin[n(\beta-\beta_0)]$$

multiplicitás   kezdőszögtől függő konstans
mivel 2 spirál van → n = 2

- logaritmikus spirálok: állandó körök érintői, amely a csatlakozási szöge konstans



- A kör érintője és a kar érintője által bezárt szög konstans



$$\frac{\Delta r}{\Delta\beta \cdot r} = \operatorname{tg}\rho$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \Delta\beta \cdot \operatorname{tg}\rho \qquad // \int$$

$$\ln r = \beta \cdot \operatorname{tg}\rho$$

⇓

ezért nevezik logaritmikus spirál karnak

$$\frac{\ln r}{\operatorname{tg}\rho} = \beta$$

$$\Sigma(r,\beta) = e^{-\alpha r} \cdot C(r)\sin\left[m\left(\beta - \beta_0 - \frac{\ln r}{\operatorname{tg}\rho}\right)\right]^2$$

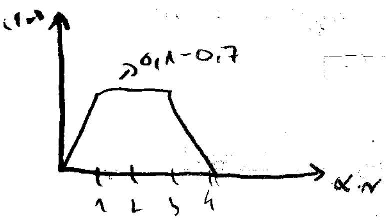
⇓

legnormálisabb a szinusz függvény, Σ adja meg a koncentrációt a spirálokkal

[illegible]

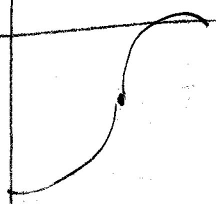
$$\Sigma(r,\beta) = \Sigma_0 e^{-\alpha r} \cdot C(r)\left[1 + \sin m\left(\beta - \beta_0 - \frac{\ln r}{\operatorname{tg}\rho}\right)\right]$$

erőssége a spirálkaroknak

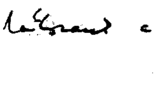


1 és 3 között jól láthatóak a spirál karok

4-nél és 1 alatt már nem nagyon látszanak a karok

	S_a	S_b	S_c
ρ	10°	→ nő	30°
C(r)	0,1	→ nő	0,7
B/D		← csökken	
Galaxis kinézete			

B/D → mag-korong arány

- később találtak lencse-féle galaxisokat → S_0 

⇓

átmenet az elliptikus és a spirál galaxisok között

- a Hubble osztályozás a galaxisok 90%-át lefedi, ami nem illik bele azokat irreguláris galaxisoknak nevezik

- Problémák a távoli galaxisokkal
  ↳ - kevés osztályozható: csak 50%-ot illik bele a Hubble sorozatba, 50% irreguláris
- Az univerzum kezdetén egy gázfelhőből összetömörödött egy anyag és ebből jön létre a galaxis
  ↳ - minden galaxis belsejében van egy fekete lyuk
    - kvazár állapot: van egy fekete lyuk és még anyag hullik bele
      ↳ - Kvázi Stellar Object rövidítése egyszerű
      - kilengések és ebből lesz a fekete lyuk
    - Aktív galaxis állapot → AGN
      ↳ idő után begyűrűzik, ott elfogy a állapot a magban és csak öreg csillagok maradnak
    - ha a gravitáció összehúzza a galaxisokat, akkor lesz az ütközés melyek
      → új galaxisok keletkeztetnek
      ↳ pl: M87

Az Spirálisok sűrűsödésekből állnak, ez pedig egyik utána csillagokból

4. óra

Csillagszerkezet

- fényességmérés
  - látszólagos magnitúdó: m
    - van egy skála ami a csillagok saját nincs lerögzítve
    - a első csillag és a másik csillag magnitúdó különbsége meg → különbséget ad meg $\nearrow^{lg}$.

$$m_1 - m_2 = x \cdot \log_{10}\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$$

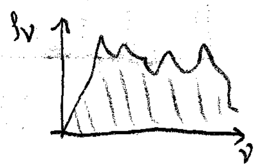
f_1 → a első csillagból érkező fluxus

x → konstans $= 2,5$

- régen olyan csillag van amit látni lehet → az első osztály a legfényesebb, a hatos osztály a leghalványabb
- ha egy magnitúdója van egy csillagnak, akkor a legfényesebb a csillag, ha hatos akkor a halvány
- konstans negatív: $m_1 = 1$ $m_2 = 6$ → $\Delta m = 5$

→ a fluxusban 100-szoros különbség van

$$m = -2,5 \cdot \lg f + \text{konstans}$$



- fluxus (f) $= \int_0^\infty f_\nu \, T_\nu \, F_\nu \, R_\nu \, Q_\nu \, d\nu$

teljes fotonenergia → ν frekvencia

Ha f_ν ν függvényében valamilyen fv. akkor a görbe alatti területet kapom

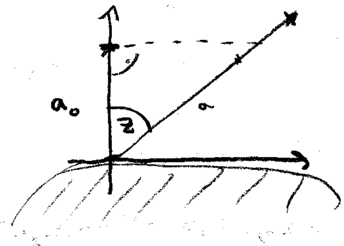
$$f = \int_0^\infty f_\lambda \, T_\lambda \, F_\lambda \, R_\lambda \, Q_\lambda \, d\lambda \quad \lambda \text{ hullámhossz}$$

↳ ugyanaz mint előbb és mi ezt használjuk

T_λ - transzmisszió → valószínűsége a átmenő képessége a levegőnek (mert elnyeli a fotont a levegő részecskéi)

- a légköri elnyelés jelentős, csak egyes hullámhossztartományban ment át
- a zenit távolságtól függ, hogy mennyi levegőn ment át

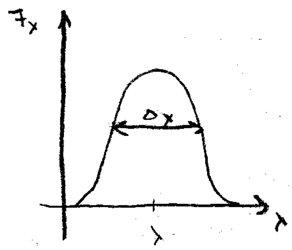
→ zenit: ha pont a fejem fölött van a csillag azt én nézem



$$\frac{a}{a_0} = \frac{1}{\cos z} = \sec z$$

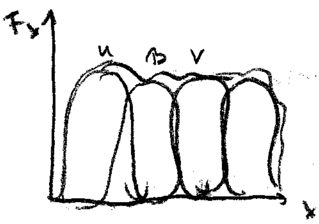
↳ relatív
↳ airmassz → 1 vagy 1-nél nagyobb valós szám
$\frac{a}{a_0}$

$$T_\lambda \sim e^{-a/a_0}$$



F_λ: - filter / szűrő → kék, piros, zöld objektíven keresztül fotózzák le a csillagot → így kapunk más képet. Ha fotózás így történik, hogy először kék szűrővel, majd pirossal, majd zölddel lefényképezem az objektumot.

- van a szűrőnek effektív hullámhossza és $\Delta\lambda$ félértékszélessége
- szélessávú szűrő: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 10-20\%$
- keskeny sávú szűrő: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{1}{100}$
  ↓
  - ilyenkor nem ereszti át a fényt, de ha nagyon fényes a csillag akkor ez is jó
  - azza jó, ha csak egy speciális tartományban és nem az egész spektrumot akarom vizsgálni



- több szélessávú szűrővel az egész tartományt le lehet fedni
- szűrő: Johnson és Morgan (1953) → U, V, B - szűrők jellemezhető

U (ultraibolya) effektív hullámhossza: 365 nm

B (blue) - " - : 445 nm

V (visual / látható) - " - : 556 nm

↳ kiegészítették R, I szűrővel

R (vörös) - " - : 658 nm

I (infravörös) - " - : 804

→ Color index

- színindex : $m_u - m_v$ = színindex (CI_{uv})

R_λ : reflexió → tükörrel dolgozik a távcső, ezért a reflexiója,

minimalizálása 95-98 %-os, a többi elvesik → ha több távcső

van a veszteség akár 20%-os is lehet

- Q_λ : kvantum hatásfok → CCD félvezető eszközök vannak → a kvantum hatásfoka nem 1 → nem is minden fotonból tud elektront kiváltani

⇒ ezzel a légkör csökkenti a fluxust

- ha magnitúdót mérünk oda kell írni, hogy milyen szűrővel mértük → $m_{u,v,B}$

$$m_{u,v,B} = -2{,}5 \cdot \lg \text{const}$$
↳ nem egyértelmű

legyen most A-val, B-vel jelölve a szűrő

$$m_A - m_B = (CI)_{AB}$$

a konstansokat úgy rögzítik, hogy a VEGA nevű csillag minden paraméterre (konstansa) nulla legyen

a színindex nulla körül mozgó valós szám

- nap magnitúdója: -27 → mert a VEGA-nál fényesebb, mint ☉

- abszolút magnitúdó: az a magnitúdó, amit akkor látnánk, ha a csillag pont 10 parsec távolságra lenne tőlünk

M

$$m - M = -2{,}5 \cdot \lg \frac{f}{F}$$

f az m-hez, F a M-hez tartozó fluxus

$$f \sim \frac{1}{d^2}$$
↳ távolság négyzetével fordítottan arányos a fluxus

$$m - M = -2{,}5 \cdot \lg \left(\frac{1}{d^2} \cdot \frac{10\,\text{Pc}^2}{1} \right)$$

$$m - M = -2{,}5 \lg \frac{10^{(2)}\,\text{Pc}}{d^2}$$

$$m - M = -5 \cdot \lg \left(\frac{10\,\text{Pc}}{d} \right)$$
reciprok

$$m - M = 5 \cdot \lg \left(\frac{d}{10\,\text{Pc}} \right)$$

d : adott csillag távolsága

$$m - M = 5 \cdot \lg d - 5$$
↳ ha parsecben van a távolság

$$\boxed{d = 10^{\frac{m-M+5}{5}}}$$ → távolság modulus egyenlet

↳ távolság Parsecben

- Nap abszolút magnitúdója: $M_\odot = 4{,}83$

Nap-szélű ↳ a képletbe behelyettesítette a Nap távolságát és így megkapjuk az M-et

$$m - M = 31{,}57$$

A nagy távcsövek (pl. Hubble) is csak 27-28 magnitúdóig látja a halvány csillagokat

- Csillagmodellek

↳ Termális modell

↳ - alapja: termonukleáris fúzióból a csillag középpontjában jön létre a energia, itt a hidrogén héliummá tud fuzionálni, a energia feláramlással a felszínre és ott fotonok formájában kisugárzódik

- nagy irányban a T_r hőmérséklet csökken; a hőmérséklet lent nagy, kifelé csökken

- feltételezések: - gömb alakú (10^5-en pontossággal a csillagok többsége gömbszerű)

- minden az r-től és esetleg az időtől (t) a függésében

mindent fel

- sűrűség: ρ; hőmérséklet: T; kémiai összetétel: X_i $\quad$ H, He... ? $i = 1,2,3$

↳ ezzel minden mást meghatározunk

- $p(\rho, T, X_i)$
  ↳ nyomás

- $u(\rho, T, X_i)$
  ↳ energia sűrűség → adott térfogatelemben mekkora energia van

- $S(\rho, T, X_i)$
  ↳ entrópia sűrűség

- $\lambda(\rho, T, X_i)$
  ↳ hővezető képesség sűrűség → milyen térfogategysége van fel

- $\varepsilon(\rho, T, X_i)$
  ↳ emisszivitás → térfogatelemben egy idő alatt mennyi energia szabadul el

- Fontos egyenletek a csillagmodellekhez
  - ↳ Termodinamika 1. főtétele

$$T\,ds = d\left(\frac{u}{\rho}\right) - \frac{p}{\rho^2}\, d\rho$$

F hő fluxusa és ε a hő forrása → energiatermelés

$$\rho \cdot T \frac{ds}{dt} = \rho \cdot \varepsilon - \mathrm{div}\, F$$

$$F = -\lambda \underbrace{\nabla}_{\text{nabla}} T$$

- Navier-Stokes egyenlet

$$\underbrace{\frac{d^2 r}{dt^2}}_{\text{gyorsulás}} - \frac{1}{\rho}\nabla p - \underbrace{\nabla V}_{\text{gravitációs potenciál}} = 0$$

→ a forgást és a gravitációs hatást is figyelembe kell venni!

$$\underbrace{\Delta}_{\text{Laplace}} V = 4\pi G \rho$$

- Az egyenleteket gömbi koordinátákban írjuk le
  - ↳ Navier-Stokes

(1) $$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = 0$$

→ Laplace-Poisson egyenlet

(2) $$\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) \rightarrow \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r}\right) = 4\pi G \rho$$

(3) $$F = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$ → fluxus def.

- 1. főtétel

(4) $$\frac{1}{\rho r^2}\left(\frac{\partial (r^2 F)}{\partial r}\right) = \varepsilon - T\frac{ds}{dt}$$

- Csillag tömege → az egyetlen [illegible] paramétere

$$M_r = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho\, dr'$$
r sugárig

- A fluxus adja a felszínen → a luminozitás ⇒ luminozitás az r sugáron belül

$$L_r = 4\pi r^2 F$$

(1)
$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{G M_r}{r^2} + \frac{d^2 r}{dt^2} = 0$$

(2)
$$\frac{dm_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

(3)
$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\overset{\to\ \text{kappa}}{\kappa}\,\rho \cdot L_r}{16\pi a \cdot c \cdot T^3 \cdot r^2}$$ c: fénysebesség, a: sugárzási konstans

$$\bar{\kappa} = \frac{4acT^3}{3\rho}\cdot\frac{1}{\chi}$$ → opacitás koefficiense

↳ radiatív opacitás koefficiens

(4)
$$\frac{\partial L_r}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho\left(\varepsilon - \frac{T\,ds}{dt}\right)$$

Még egy kis átrendezés

$$\frac{\partial}{\partial r} \text{ helyett } 4\pi r^2 \frac{\partial}{\partial m_r}$$

(1)
$$\frac{\partial p}{\partial m_r} = -\frac{G M_r}{4\pi r^4} - \frac{1}{4\pi r^2}\frac{\partial r^2}{\partial t^2}$$

(2)
$$\frac{\partial r}{\partial m_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

(3)
$$\frac{\partial T}{\partial m_r} = -\frac{3\kappa L_r}{64\pi^2 acT^3 r^4}$$

(4)
$$\frac{\partial L_r}{\partial m_r} = \underset{\substack{\downarrow \\ \text{emisszivitás}}}{\varepsilon} - T\overset{\to\ \text{entrópia változás}}{\frac{ds}{dt}}$$

→ folyt. köv. órán...

5. óra

- A csillagfejlődés végállapota: szupernóva robbanás
  ↳ - a nehéz elemek ekkor keletkeznek: pl: Fe, Mn, Co, Cr
    - ha fölrobban a szupernóva az felrobbanthat egy gázfelhőt, a beindíthatja a csillagok keletkezését
      ↳ hogy ez legyen kell egy gázfelhő, ami összenyomja a gázfelhőt, kell egy szupernóva
    - Betelgeuse csillag: bármikor fölrobbanhat mert egy szupernóva
    - másodpercenként egy szupernóva robbanás történik az univerzumban
- Visszatérünk az előző órai egyenletekhez
  ↳ - Tfh. hidrosztatikai egyensúlyban van a csillag, ezért az első egyenlet jobb oldalán a időderiváltat tartalmazó tag nulla, mert nem mozog

$$(1) \quad \frac{\partial p}{\partial M_r} = -\frac{G M_r}{4\pi r^2}$$

↳ Az entrópia nem változik időben, ezért a negyedik egyenlet jobb oldalán is eltávolítom az entrópiás tagot

$$(4) \quad \frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \varepsilon$$

- Az egyenletrendszert akkor tudom megoldani, ha peremfeltételeket adok, amik vagy a csillag szélén vagy a középpontban adom meg
- $r=0$ pont jelenti a csillag centrumát, ekkor a pontban $M_r = 0$ és $\boxed{L_r = 0}$
- a felszín legyen: $M_r = M$ pontban, ahol M a csillag össztömege, ekkor $\boxed{\rho = 0}$ legyen (vagyis ekkor a pontban nullára megy a sűrűség)

A csillag felszínén az összluminozitás a felszín részével egyenlő: $L = 4\pi \overset{\text{csillag sugara}}{R^2} \cdot \underbrace{\sigma \cdot T_{eff}^4}_{\text{négyzetméterenként kisugárzott en. (fluxus)}}$

↳ Arthur Eddington megállapította, hogy a effektív hőmérséklet:

$$T_{eff} = 2^{1/4} \cdot T_{felszín}$$

- A (effektív) hőmérsékletet a felszínen úgy tudom meghatározni, hogy: $T_{eff} = \left(\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}\right)^{1/4}$

- Tehát a peremfeltételek: → 4 db

- Az ismeretlenek: ρ centrumban, T centrumban, R (csillag sugara), L (csillag önluminozitása) → 4 db

- Az egyenleteket Politróp közelítéssel oldom meg:

↳ - A csillagok állapotegyenletére feltesszük, hogy: $\underset{\text{nyomás}}{p} = K \cdot \underset{\text{sűrűség}}{\rho}^{1+\frac{1}{n}}$

- n: politróp index

- $p(\rho, T, x_i)$

- egyszerűsítés: $1+\frac{1}{n}$ helyett $\frac{n+1}{n}$, ekkor $p^n \sim \rho^{n+1}$ és

ekkor el lehet képzelni, hogy:

$$\rho = \underset{\text{centrum}}{\rho_c} \cdot \Theta^n$$

$$p = p_c \cdot \Theta^{n+1}$$

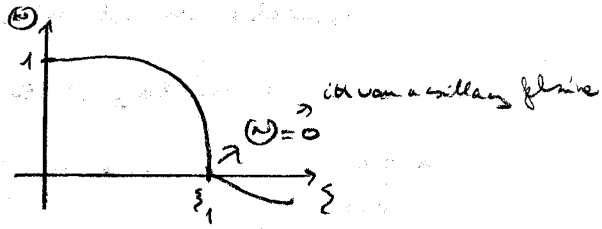
ahol Θ dimenziótlan változó → politróp közelítés →

a középen maximális, a felszínen kicsi

- legyen $r = \overset{\text{skálafaktor}}{\alpha} \cdot \xi$
  ↓
  dimenziótlan változó

- legyen $\Theta = 1$ és $\frac{d\Theta}{d\xi} = 0$ $\xi = 0$-ban a középpontban

- Ekkor olyan függvényt keresek:



A felszín: $\Theta = 0$-ban van

- Ha meghatározom ξ_1-et akkor abból a ρ_c és T_c is meghatározható

- Az egyenletrendszernek analitikusan 3 esetben van megoldása:

a Föld belseje véges → a felszín hideg

$n = 0 \xrightarrow{\text{izochor}} \Theta = 1 - \frac{\xi^2}{6}$ és $\xi_1 = \sqrt{6}$ → pl: Föld

$n = 1 \rightarrow \Theta = \frac{\sin \xi}{\xi}$ és $\xi_1 = \pi$

$n = 5 \rightarrow \Theta = \left(1 + \frac{\xi^2}{3}\right)^{-1/2}$ és $\xi_1 = \infty$

- ha $n < 5$, akkor a csillag rendelkezik felszínnel, tehát a ξ véges
- nem analitikusan több n-re megoldható az egyenlet

Adiabatikus esetben $n = 1,5 \rightarrow$ centrum / teljes csillag átlaga $\rho_c/\rho_{átl}$: 5,99 és $\xi_1 = 3,65$

Ultrarelativisztikus esetben $n = 3 \rightarrow \rho_c/\rho_{átl}$: 54,18 és $\xi_1 = 6,90$

↳ ezek a 2 szélső eset

ha ez kicsi, akkor az anyag nem sűrűsödik középen

- a nyomás adódik kell hogy álljon: gáz p_g és sugárzás p_r -ból származó nyomás

$$p = p_g + p_r$$

↳ $p_g = \frac{\mathcal{R}}{\mu+1}\rho \cdot T$

$p_r = \frac{a}{3}T^4$

legyen $\frac{p_g}{p} = \beta$ és $\frac{p_r}{p} = 1-\beta$

legyen konstans

Eddington: a gázt így írja le egy csillag belsejében, hogy a β legyen helyfüggetlen

- levezethető egy olyan képlet: $\frac{M}{M_{nap}} = \frac{19,1}{\mu^2}\sqrt{\frac{1-\beta}{\beta^2}}$

→ innen β meghatározható

→ ha a tömeg kicsi → M kicsi → β közel 1

→ ha M nagy akkor β kicsi

→ ha $M = M_{nap}$ akkor $\beta = 0,9555$

⇒ ha felírjuk a négy egyenletet (1) (2) (3) (4), akkor egy egyenletrendszert kapunk. Egyszerű megoldani ha azokat a peremfeltételeket vesszük amit írtam. Ezek után megoldható az egyenletrendszer, ha a politróp összefüggéseket vesszük. Speciális esetben analitikusan megoldható, a többi esetben numerikusan oldható meg. Ebből a hőmérséklet és a nyomás profilját megkaphatjuk.

⇒ A csillag tömege a összes többi paraméter meghatározására

- Hogyan keletkezik a NJ a csillag belsejében

↳ - Termonukleáris fúzióval: hidrogén héliummá - fúziónál

↳ - 2 féle megvalósulási forma:

↳ - p - p lánc: - fogja 2 hidrogént át össze tudom préselni egy atommagba

p - p: proton - proton

$\varepsilon = 3 \cdot 10^{-37}$ → nagyobbodó

mértékegysége: $(m^5 K^{-4} kg^{-1} s^{-3}) \rho X^2 T^4$

- $^1H + ^1H \rightarrow ^2D + e^+ + \nu$ (→ pozitron, → neutrínó)

- ha sűrű a anyag, akkor

$^2D + ^1H \rightarrow ^3He + \gamma$ (→ foton)

- ha továbbra is sűrű és forró a anyag

$^3He + ^3He \rightarrow ^4He + ^1H + ^1H$

⇒ 2 db neutrínó és γ gamma foton keletkezik

kölcsönhatás nélkül a fénysebesség → sok viszi el az energiát a csillag magjából

⇒ a pozitron egy elektronnal találkozik és γ foton formájában kisugárzódik

↳ - CNO ciklus: - nem (nitrogén + oxigén) katalizálja

$\varepsilon = 3 \cdot 10^{-57}$

mértékegysége: $(m^5 K^{-21} kg^{-1} s^{-3}) \rho X X_{CN} T^{21}$

- $^{12}C + ^1H = ^{13}N + \gamma$

$^{13}N \rightarrow ^{13}C + e^+ + \nu$

$^{13}C + ^1H = ^{14}N + \gamma$

$^{14}N + ^1H = ^{15}O + \gamma$

$^{15}O \rightarrow ^{15}N + e^+ + \nu$

$^{15}N + ^1H = ^{12}C + ^4He$

visszakaptuk a bemenő nem atomot

- akkor lehetséges ha van elég nem egy csillagban

- alacsony hőmérsékletű csillagban (pl: Nap) sok a p-p lánc negy része

- Nap neutrínó probléma: nem fogjuk annyi neutrínót a kapjuk, mint amennyit számoltak

→ Nap-neutrínó probléma:

↳ a neutrínók gyenge kölcsönható részecskék

↳ kimutatás: protonból neutron lett és ennek a ellenkezője

- a föld alatti tartályban vizsgálják

↓

a föld felszínén kozmikus sugárzás van, ami megakadályozná a mérést

- részecskék fognak be vele
- ha befogad egy részecskét akkor egy szcintillátor jelez → napi max 3-4 neutrínót tudnak befogni

- a neutrínónak tömegének kell, hogy legyen, akkor oszcillálnak és átalakulnak

↳ egy másik neutrínóvá, ezt a detektor nem jelzi, ezért mérünk kevesebb neutrínót, mint amennyit vártunk

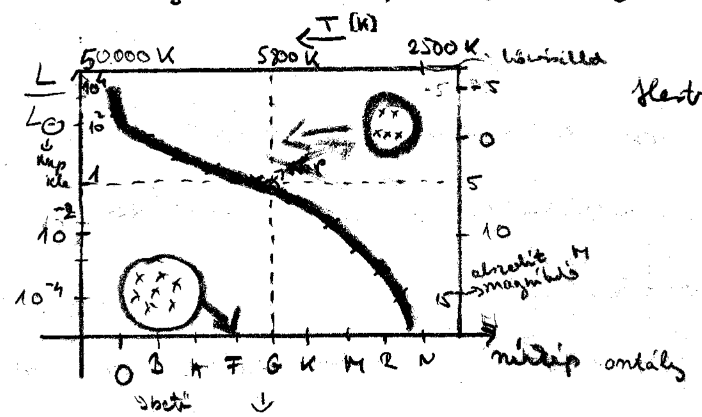
- a neutrínóra nem tudunk tömeget mérni → azt nem lehet tudni, hogy mennyi tömeg, csak, hogy max. 1-2 eV → és az oszcillálás feltétele, hogy a tömeg nem nulla.

- Nap állandó: ?

6. óra - 7. óra

1) Russel - Hertzsprung diagramm

- Felrajzolták a csillag luminozitását ($\to L$) az egyik tengelyre, a másikra pedig a színképet
- másik: találtak egy színképet, ami alacsony/erősebb vonalakat tartalmazott → abc betűivel jelölték meg ⇒ a csillag spektrumának egyszerűsége nem végtelen bonyolult → diszkrét színkép osztályba adódtak
- megállapító, hogy a hőm. színkép osztályokkal egyre a hőmérséklete



Hertzsprung - Russel diagram ágai ●

Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now

●
- A csillag vörös színű, alacsony hőmérséklet
- Luminozitása hatalmas → $L = \underbrace{4\pi R^2}_{felület} \cdot \sigma T^4$

} Vörös óriások (nagy méretű)

●
- A csillag színe fehér
- Luminozitása kicsi

} Fehér törpe (kis csillagok)

2) Színképosztályok

		Szín	Hőmérséklet (1000-ben)	Jellemző vonalak
O	→	Kék-UV	28-50	ionizált
B	→	Kék-Fehér	10-28	neutrális hélium
A	→	Fehér	7,5-10	-"- , hidrogén
F	→	Sárga-Fehér	6-7,5	hidrogén, ionizált fémek
G	→	Sárga	5-6	hidrogén, neutrális és ionizált fémek
K	→	Narancs	3,5-5	neutrális fémek
M	→	Piros-Narancs	2,5-3,5	hélium, titán-oxid

3.) Hertzsprung-Russel diagram elemzése:

- luminozitás: $L = 4\pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4$

  ↳ ebből a sugár hogyan fejezhető ki? → $R = \frac{1}{T}\sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma}}$

$$\frac{R}{R_{\odot\,\text{Nap}}} = \left(\frac{T_\odot}{T}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{L_\odot}}$$

• vonalak mentén egyező a sugara az objektumoknak

- csillag élettartama

  ↳ - tömeg-luminozitás összefüggésből → $L \sim M^{3,5}$

  ↳ - a politróp modellel lehet ezt számolni → a csillag tömegéből lehet megadni a luminozitást, és az abszolút magnitúdót

  - a csillag tömegénél, ha az adott csillag kettős (→ közös tkp.) csillagrendszerben helyezkedik el, akkor a Kepler törvényből megadható a periódusidő, a pálya → ebből a közös tömeg megadható

  ⇒ tömeg, luminozitás függetlenül számolható

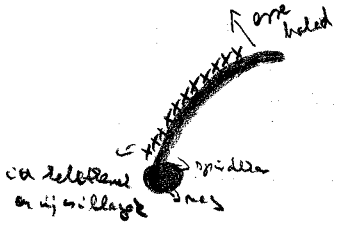
- ha növelem a tömeget, nő a luminozitás → ● kis tömeg ● nagy tömeg
- élettartam: $t \sim \frac{M}{L} \sim M^{-2,5}$

$\boxed{\frac{M}{M_\odot}}$	$\boxed{\frac{L}{L_\odot}}$	$\boxed{t\,(10^6 \text{ millió apró})}$
25	80.000	3
15	10.000	15
3	60	500
1	1	10.000
0,5	0,03	200.000

- ha a fúziót tekintjük 0,08 naptömegű a legkisebb csillag → akkor a gravitációja, hogy fel tud melegedni benne az anyag, amíg legyűlik be és tud indulni a fúzió
- ha a fúziót tekintjük 100 naptömegű a legnagyobb csillag, mert az e fölötti gázfelhő rögtön feltehetően összeesik

4.) Csillag keletkezése

- összepréselünk egy gázfelhőt, hogy a gravitációja összepréselje csillaggá
- a spirálkarok (sűrűséghullám) alatt, belül összehúzza a gázfelhőket és sok csillag keletkezik belőle → ugyanakkor keletkeznek kis és nagy tömegű csillagok
  ↓
  kis csillag: kék, picit luminozitás



- 1. fontos mechanizmus, ami a csillag keletkezését okozza: spirálkarok
- 2. fontos mechanizmus, ami a csillag keletkezését okozza: szupernova robbanás
- 3. fontos mechanizmus, ami a csillag keletkezését okozza: galaxis ütközés
  ↳ - ha közel van 2 galaxis, akkor az alakjuktól nem tudnak megszabadulni, hogy összeütköztek, mert legtöbbször (mivel csak 70 csillag van parsec négyzetenként) nem a csillagok ütköznek, hanem a gázfelhők egymással
  - ha pl. sok kék csillag van egymás mellett, akkor valószínűleg ütközés történt

5.) Csillag fejlődése

- a csillagban a hidrogén héliummá fúzionál → ha ez megszűnik, akkor nem keletkezik energia → megszűnik a gravitációt ellentartó erő → összeesik a mag fokozatosan a csillagban → a mag adiabatikusan fölmelegszik → folyamatos fúziójában [illegible]
  ↳ kívülről látható állapot: a folyamat felszabadul a külső gázrétegbe és felfújják a csillagot → a külső réteg lehűl ⇒ a csillag nagy lesz és hideg a felszíne ⇒ vörös óriás lesz
- ha a mag eltöltött 10 millió évet a fázisban, akkor elindul a vörös óriássá fejl.
  ↳ a magban új fúzió van: 10^8 K-nál: $3He \to C$

$$^4He + {}^4He \to {}^8Be$$

$$^8Be + {}^4He \to {}^{12}C + \gamma$$

↓

stabil → elkezd újra energiát termelni, ugyanis újra a főág felé kezd mozogni

- ezután kifogy a hélium is, és megáll a folyamat és újra más ex. fúzió indul,
a csillag magja összehúzódik, adiabatikusan felmelegszik, és szépen lassan nő a csillag →
vége a csillag életének → visszamarad egy fehér mag

↳ kívülről: a fehér mag pici, hőmérséklete nagyon magas, pici a luminozitása

→ vagyis a csillag a fehér törpékhez érkezik meg

- a fehér törpe hamar kihűl, mert ex. nem termelődik, a luminozitás csökken ⇒
a fehér törpék lefelé és jobbra fog vonulni → hűlési görbe

- a 4 naptömegnél nagyobb csillagok, ahol nagytömegű csillagok és másképp fejlődnek

↳ - a gravitációs állandó összetömöríti a magot, így lesz itt a hőmérséklet nagy, a szén elkezd fúzionálni és oxigén lesz belőle. → A H-R diagram elkezd ide-oda „járkálni" a főág és az óriás ágak között, egész addig, míg a magban vas nem lesz. Az összes protonból neutron lesz, szétesnek a vasmagok és a csillag magjában összenyomhatatlan gáz lesz és arról le fognak pattanni a külső gázrétegek → szupernova robbanás

- szupernova robbanás: - irdatlan mennyiségű neutrínó fog elektronbefogáskor létrejönni

→ akkora neutrínó fluxus érkezik, hogy a Föld neutrínó detektorai „kiakadnak"

az így felrobbant szupernova jele: II

- a robbanás pillanatában, annyira opálos a nagy sűrűségű gáz, hogy a fotonok nem tudnak átmenni rajta → a gáznak 24 órát kell tágulnia, hogy a fotonok átmenjenek rajta. A robbanás pillanatában keletkeznek a neutrínók → számukra nem opálos a gáz, át mennek rajta rögtön

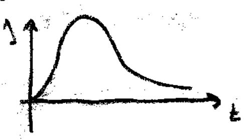
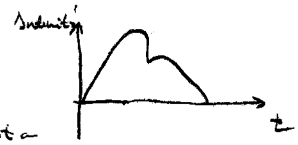
⇒ a neutrínók 1 nappal korábban érkeznek, mint a fotonok

↓

a detektorok 1 nappal korábban jelzik a robbanást, mint ahogy azt látnánk

összepréselt mag, → ami csak n^0-t tartalmaz

- ha a csillag tömege nagyobb, mint 4 naptömeg, de kisebb, mint 60 naptömeg, akkor neutroncsillag a végállapot. Ha nagyobb, mint 60 naptömeg, akkor fekete lyuk a végállapot

- a szupernóva robbanás után 95% a távozik a anyagnak és 5% a marad a magban
  => 3 naptömeg a felső határ a neutroncsillag tömegének
- pörgő nagyon csillag, amit gravitációs tere van: pulzár-nak nevezik
  ¿
  másodpercenként végig forog a tengelye körül és
  így lövi ki a részecskéket maga körül
  ↓
  ennek követtük meg hogy vannak gravitációs hullámok
  ¿
  pulzár vizsgálatával
- fehér törpe állapot: - degenerált e⁻ gáz tart ellen a gravitációs összehúzó erővel az
  ő magban → ha szállapítolok végtömegét akkor kisebb
  lesz a fehér törpe
  - a degenerált e⁻ nem bírja a versenyt a gravitációval, sőt
  a fehér törpe összetöpörödik
  és
  - Chandrasekhar (indiai csillagász) megmutatta 1930-ban,
  hogy a folyamat nem mehet végbe a végtelenségig (mert ha
  a lapátolást nem hagyjuk abba, akkor néha hossza elhízna a
  fehér törpe) → Chandrasekhar limit: 1,4 naptömeg →
  ennél kisebb van lehet a fehér törpe tömege, mert ha igen, akkor
  szupernóva robbanás következik be (eddig jelzett az elméletnek)
  → a így felrobbanó szupernóva jele: I/a.
- I osztály: a hidrogénnek vannak vonalai, II osztályban a nehezebb elemeknek, fémeknek és
  ↓ vannak vonalai 
  fehér törpe végállapota
  ↓ a I/b, I/c osztályban is 
  nagytömegű csillagok végállapota
- Ki az aki lapátol? → Egy másik csillag, mert általában kettős csillagok vannak.
  Ez másik csillag átszívja a anyagot
- Az I. osztályok mindig ugyanakkorát robbannak
- a Nagy Bumm után csak He és H keletkezik, a nehezebb tömegű elemek a csillagok fejlődésében keletkeznek,
  de csak Fe-ig. Az ennél nehezebb elemek a szupernóva robbanás pillanatában keletkeznek.

- protoplanetáris nebula:
  - ↳ egy csillag úgy keletkezik, hogy van egy gázfelhő és valami összepréseli
  - úgy kell egy picit forogni a gáznak, hogy összepréselődjön
  - \+ ez a gázfelhő, amiből a csillag keletkezik az a protoplanetáris nebula
  - nemcsak a Nap és csillagok lesznek belőle, hanem planéták / bolygók is
  - ha összenyomom a gázfelhőt energiától meg tudok szabadulni, perdülettől nem → ha egy csillag keletkezik úgy fog pörögni → kellenek bolygók, hogy elvigyék a perdületet
  - a perdület 98%-át a bolygók viszik el
  - a csillagok több mint fele kettős csillag rendszer része
  - a naprendszer 8 bolygóval rendelkezik → protoplanetáris nebulából préselődtek össze
    - ↳ Föld-szerű: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars → nehéz elemeket tartalmaznak
    - Gázóriások: Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz → gázt (He, H) tartalmaz

8. óra

A naprendszer keletkezése

1.) Hova lett a Plútó?

- a Nemzetközi Csillagászati Unió megszavazta, hogy ne legyen bolygó
- bolygó def: - ekliptika: az a sík amiben a Föld kering a Nap körül

  ↳ a bolygók síkja 5%-ot dől

  ↳ a Plútó síkja kb. 20%-ot ⇒ nem az ekliptikán kering

  - méret: legyen elég nagy
  - tömeg: vannak nagyobb holdak amik nagyobbak a Plútónál
  - saját maga jogán kering a Nap körül és nem valamit kísér, ezért sok hold nem bolygó

  → a Hold pontosan kör alakban megy körül a Nap körül, csak valamit mindig megkerülve

  - dőlt pálya, elnyúlt pálya: egyik sem jó

    ↓

    nem mindig a Plútó a legtávolabbi bolygó, mivel elnyúlt a pályája
- a Plútóhoz hasonló objektumot is lehet most már Modern távcsövekkel találni → kérdés volt, hogy azok is bolygók legyenek, vagy a Plútó se legyen bolygó

  ← így döntöttek
- úgy jelentek fel, hogy a Plútó perturbálta a Szaturnusz pályáját 1930-ban

2.) A galaxis kutatás fejlődésének első lépései:

- standard gyertya: a fényesség mindig ugyanakkora
- ha megfigyelik távol: csökkennek és megnézik a fényesség és a változás gyorsaság, akkor a periódusidőből meg tudom mondani a abs. magnitúdót

- magnitúdó def: $m - M = 2.5 \cdot \lg \left(\frac{10}{d}\right)^2$

$$m - M = -5 \lg \frac{10}{d}$$

$$\frac{M-m}{5} = \lg \frac{10}{d}$$

$$10^{\frac{M-m}{5}} = \frac{10}{d} \Rightarrow d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \text{ (pc)}$$

látszólagos magnitúdó

→ így ki tudom mérni a távolságot

- Hubble is ezt csinálta: Egy cefeida megfigyelésével kiszámolta az Andromeda távolságát
- 1958.: Abell: Galaxis halmaz katalógus
  - ↳ 1955. Palomar Observatory Sky Survey (POSS)
    - ↳ ez LA. és San Diego között van
      - fényképezték az egész eget, attól függően, hogy látszódik-e vagy sem
      - az égbolt északi felét tudták lefényképezni
      - 14×14 col-os üveglemezt (fotólem) használtak és kb. 1500 db fotót csináltak
- ezután vizsgálta Abell, hogy vannak-e galaxis csomósodások az égen → elővette a POSS lemezeit és átnézte, hogy vannak-e (galaxis) halmazok → talált 1555 db galaxis halmazt
- definiálta a galaxis halmazokat: Adott sugarú körön belül ($d = 1,5$ Mpc) van adott számú galaxis (min. 30 db) egy csomóban, akkor az galaxis halmaz

a galaxisok számsűrűsége az égen: $n_g = 10^{-2} \frac{1}{Mpc^3}$

galaxis halmazok számsűrűsége: $n_{cl} = 10^{-5} \frac{1}{Mpc^3}$ (Virgo)

↳ így tudták, hogy a 2D-s üveglemezen látott csomósodások nem egymás mögött vannak, ahol egymás mellett

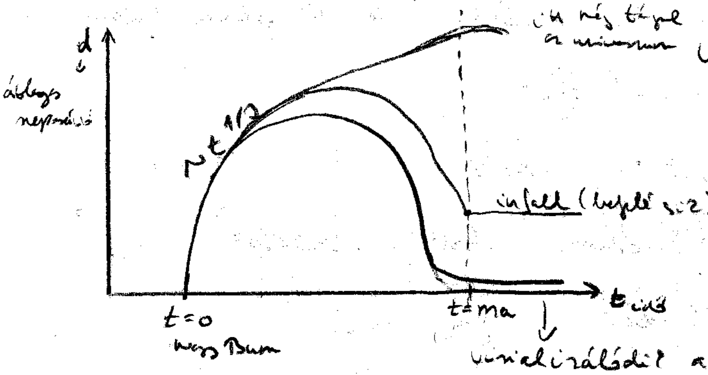
- osztályozta a galaxis halmazokat, attól függően, hogy hány galaxis van a adott sugáron belül → richness class: 30-50 db – 50-80 db ...
- van egy luminozitási fv. (adott luminozitás milyen gyakorisággal fordul elő az adott lum.) → a nagyobb luminozitású kevesebb van a kisebből több
  - ↳ megkereste a g. halmazban a fényesebbeket és azt mondta, hogy a standard gyertya és a távolság-modulus egyenlettel kiszámolta a távolságot (lásd. előző old.)
    - → így tudta megbecsülni a galaxisok távolságát és ez alapján definiálta a $d = 1,5$ Mpc távolságot sugárban
- 4,26 steradiant vizsgált → a Föld 1/3-át térképezte fel
- 1682 db galaxis halmaz 500-nál több számú galaxist tartalmazott

- a tejútrendszer pici galaxis → lokális csoport, halmaz
  (kialakulása is ... van)
- az Androméda 2-szer olyan nagy, mint a tejútrendszer, a luminozitása is duplája

- 1968. Zwicky: Galaxis halmaz katalógus
  4-9700 db galaxis halmazt talált
  - az egész eget lefedte a vizsgálata
  - 1960-as években ESO a déli féltekéről regisztrálta a fényképezést → a POSS-sal a északi féltekét térképezte fel
  - más halmaz definíciót használt

3.) Galaxis halmazok fizikája

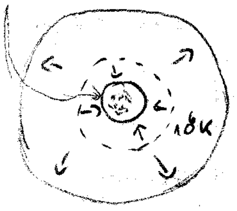
- a kialakulási effektusokat is figyelembe kell venni, mert a galaxisok kialakulása a univerzummal együtt van



Az univerzum tágul és a gravitáció összehúzza a galaxisokat

virializálódik a galaxis halmaz
↓
nem prédikálható teljesen össze

- virializált halmaz sóz



Gáz van a külső halmazban, mely 10^6 K hőmérsékletű → a gáz sugárzást kelt RTG tartományban
↓
hatalmas intenzitású röntgen sugárzás jön kifelé

A halmaz tömegének a fele gáz formájában van a galaxisok között a halmazon belül

- intenzitás 10^{43} R → sokat hűl a gáz
  ↓
  évente kb. 1-10 $M_\odot$ (naptömeg) tűnik el a forró fázisból
  ↓
  nem tudjuk, hogy mi lesz a forró fázisból eltűnő gázzal

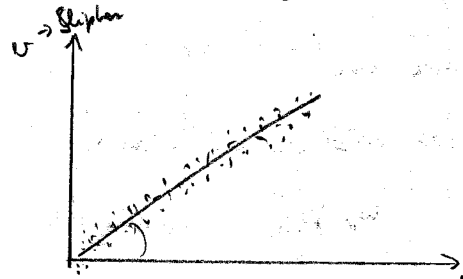
- így szökken a gyors tehát a gáz befelé áramlik

Vannak külső áramlások: kellett hol a gáz szökken a gyorsan, hiszen gáz be tud áramlani a kiegyenlítődés céljából

- ott előbb a gáz befelé áramlik sűrűségnyomással kell lennie, egyes közötti kölcsönhatásnak kell lennie → nem tudjuk megmérni

4.) Hubble törvény

- az univerzum tágulásáról szól
- Hubble megmérte a közeli galaxisok távolságát a 20-as években → ahogy fejlődtek a mérési módszerei egyre több galaxis távolságát tudta meghatározni
- Vesto Slipher előbb felmérte a vöröseltolódást néhány galaxisnak
  ↓
  tehát távolodnak tőlünk
- Hubble ezután összevetette a távolodási sebességet Slipher és Hubble adatai



$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

λ → mért hullámhossz, λ_0 → laboratóriumi hullámhossz

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = v$$

$$\boxed{v = H \cdot d}$$ → arányossági tényező: H

↓ Hubble törvény; H ↓ Hubble konstans: $H = 70\text{-}71 \left[\frac{km}{s} \cdot \frac{1}{Mpc}\right]$

↓ ebből következik, hogy az univerzum tágul → és távolságot is tudok belőle számolni.

Minél távolabb van egy galaxis, annál gyorsabban távolodik

$$\boxed{\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{c}{H} = d}$$ → távolság számítás a 4. törvénnyel

↳ elég csak a Δλ-át spektroszkópiai úton megmérni

9. óra

1) Csillagászati koordináta rendszer

- amikor a naprendszerben vizsgálódunk, akkor a Földhöz kötött: ekvatoriális koordináta rendszert használunk

• ekvatoriális koordináta rendszer

b - A Földet felrajzoljuk és a egyenlítőtől 47°-os szögben állok Bp-n és figyelem az eget. Figyelembe veszem, hogy a Föld forog a saját tengelye körül és a Nap körül. Égi csak(?) és kell akkor, hogy megfigyeljem az ég minden pontját

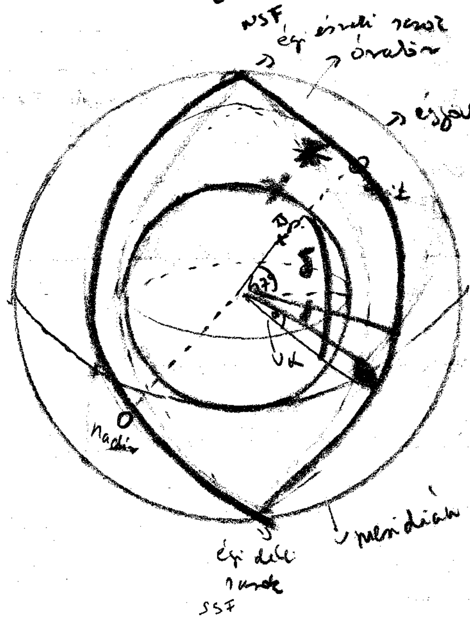
- Feltesszük egy tetszőleges sugarú éggömböt a Föld körül. Az égi objektumok pozícióját ebben az éggömbben figyeljük meg

- A k. rendsz a tetszőleges sugarú éggömbön elfoglalt 2 szöggel foglalkozik

- Ha kivetítjük a Föld egyenlítőjét az éggömbre → égi egyenlítő; ha kivetítjük az északi és déli sarkot → égi északi, égi déli sark lesz

- Ha az adott megfigyelő lába alatt húzunk egy érintő síkot, az a horizont és ez kimetsz az éggömbből egy síkot ami függ a megfigyelőtől

- A Föld Kp-ját és a talpam alatti pontot összekötöm és meghosszabbítom, ez kijelöl egy pontot az éggömbön → zenit (a van a fejem fölött), a ezt a másik irányba hosszabbítom meg az éggömbön új pontot kapok → nadír



Ezt a csillagot jelölöm ki, ekkor az órakör a csillagon és az égi északi és a déli póluson átmenő kör

• Óraszög → első koordináta

- A csillag pozíciójának leírására óraszöget használtak
  ↓
  az óraköre és a meridián közötti szög
  ↓
  óraköre és a déli póluson átmenő kör

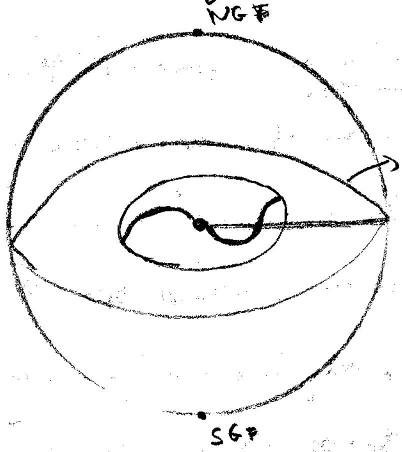
- Tavaszpont: - Ekliptikával (↳ a Föld pályájának síkja) elmetszem az égyenlítőt, ahol úgy dől a Földhöz rögzített ko. rendszer képest, ahogy a Föld forgástengelye dől az ekliptikához képest
  - Égi egyenlítő és a ekliptika közös pontja
- Őszpont: A nyári Nap felkelési pont X
- Mérjük a adott csillag óraszögét a tavaszponttól
- Rektaszcenzió (α) : óraköre tavaszponttól való távolsága (szög)
  ↳ röv: R.A ↳ 0-360° ≡ 0-24h
- 2. koordináta: deklináció: δ
  ↓
  az égi egyenlítő szög fölött hol van a objektum
- pl: északi égi pólus δ: 90°
  ↳ -90° → 90° terjed
- Zenit távolság: A csillagot köti össze a Föld középpontjával, a zenitet a Föld középpontjával. Köti össze és a a Zenit távolság → jele: Z ↳ szög!
  ↓
  ha valami látszik a égen zenit táv. < 90°
  ha valami a horizonton van zenit táv. > 90°
- átváltás: 15° R.A = 1 óra
  ↳ ha valami tavasszal (márc. 15.) éppen a fejem fölött van és R.A. = 0, fél évvel később hány órával később lehet megfigyelni

• Galaktikus koordináta rendszer
  ↳ - a tejútrendszerhez van rögzítve
  - van a tejútrendszer magja, korongja, spirálkarok → ide is felvesszük az égyenlítőt
  - illesztek egy síkot a tejútrendszer korongjára → elmetszem vele az égyenlítőt → fel és le mérhetek galaktikus magasságot
  - a kp-tól húzok egy egyenest → északi galaktikus pólus (NGP), déli galaktikus pólus (SGP)

- A Föld 8 kPc-re közel van a galaxis középpontjától

- Galaktikus szélesség → 1. koordináta → jele: b   → 0-360°

- Galaktikus hosszúság → 2. koordináta → jele: l   -90° → +90°



- Ott a pont a égen, ahol $l = 0°$ és $b = 0°$ a galaxis magja

- a Galaxis magjának a Földhöz rögzített k. rendszerben δ, α fix értékei vannak, mert mindegy, hogy honnan figyelem meg őket (a Föld precessziója nem vesszük figyelembe) → α = 14 h 45 perc = -28° 56'
déli részén van a égboltnak a galaxis középpontja

→ a Tejútrendszer a déli féltekéről, nyáron, éjjel jól látható

- Epoch: Ott adott csillag az ekvatoriális koordináta rendszerben az α és δ értéke 2000-ben mi volt
→ ennek ki lehet számolni, hogy hol lehet a csillag most az égen

- A Föld, mint pörgettyű a Nap és a Hold által kifejtett gravitációs térben precesszál változó dőlésszöggel
Luni - Solar

↳ - a precesszió periódusideje: 25800 év

- 13000 év után 47°-al arrébb fog mutatni a NGP

- Sajátmozgás: Nagyon olyan objektumok → csillagok, amik vonulnak együtt égi gyorsulatukkal a égen.

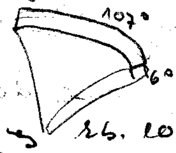
- 2 része van: radiális (nem tudom mérni) és az arra merőleges

sebesség komponens: perhaliális sebesség
↓
sebesebb hibát okoz
↓
- ha nagyon közeli a csillag pici elmozdulást fog jelenteni

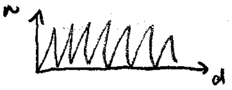
edddigi legnagyobb értéke: $0{,}55''$/év: Barnard csillaga
→ 1,8 Pc-re van tőlünk

2.) 3 Dimenziós térkép alkotása

- a galaxisok vetületén nem látszik a galaxisok eloszlása, ezek összemosódnak
- a térkép megrajzolásának legnagyobb akadálya a távolságmérés
- CFA slice: 6°-os szelet 107° szélességű szeletben mérte meg 1000 db galaxis
  1980
  pozícióját → 1000 óra kellett hozzá



- Pencil Beam: Egy keskeny nyaláb sugárnyalábban mérte meg kb. 1000 galaxis
  1990
  távolságát



„impozáns"
Sloan digital Sky Survey
- SDSS: - egyszerre 660 galaxis képét lehetett felvenni a vörös eltolódását
  2005
  → ez az első 3D térkép
  - Az északi galaktikus pólus körüli 1π szteradián területet fedett le →
    itt volt a 10^6 db galaxis
- az eloszlást azért meglepő, azt statisztikailag jellemezni kell
- anyag sűrűség eloszlását fogjuk definiálni → teljesítmény spektrum

↓ hol hány pont van az adott térfogatban

↓ - ha a univerzumban van egy anyageloszlás a kiterjedt lassan és gyorsan változó hullámhosszú sűrűség komponensekből → ezek Fourier sorba fejthetők gömbi harmonikusok alapján

- meg kell a lassú és a gyors sűrűségváltozástól, hogy a galaxis kiterjedése legyen → ezt jelenti

10. óra – 11. óra

1). Két pont korrelációs függvény

- legyen a pontpárok száma a térfogatban ($\to$ galaxis párok): dp

$$dp = \bar{n}^2 \left[1 + \xi(r_{1/2}) \right] dV_1 \, dV_2 \qquad \{dV_1\} \xrightarrow{r_{1/2}} \{dV_2\}$$

ahol dV_1 és dV_2 térfogatelem, a kettőjük közötti távolság: $r_{1,2}$

$\bar{n}$: galaxis számsűrűség átlaga

$\xi(r_{1/2})$: két pont korr. f. $\to$ $-1 \leq \xi \leq +1$

- ha $r_{1/2}$ kitüntetett távolság (vagyis a galaxisok mutatnak ekkora távolságra tartózkodni egymástól) akkor ξ pozitív és van pozitív korreláció

↳ ha nem, akkor ξ negatív

- definíció szerint: statisztikailag
$$\xi(r) = \frac{\langle \rho(\underline{x}) \, \rho(\underline{x}+\underline{r}) \rangle}{\langle \rho^2 \rangle} - 1$$

- legyen 1 galaxis tömege: m_g, a számsűrűség: $\bar{n}$, akkor $\rho = \bar{n} \cdot m_g$

$$\frac{\langle \rho(x) \cdot \rho(\underline{x}+\underline{r}) \rangle}{m_g^2} = (\xi + 1)\bar{n}^2$$ $\to$ valóban kiadott a első egyenletre

↳ ezt el lehet kezdeni, mert konstans (vagyis felnemosztjuk vele)

- Fourier sorfejtéssel írjuk fel a $\rho(x)$-et és a $\rho(x+\underline{r})$-et

előbb legyen / és definiáljuk: $\delta = \frac{\rho(x) - \langle \rho \rangle}{\langle \rho \rangle} = \frac{\delta \rho}{\langle \rho \rangle} = \delta$ $\to$ sűrűség többlet

ezt δ-át fejtsük Fourier sorba k szerint:

$$\delta(x) = \sum_k \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Fourier együttható}}}{\delta_k} \cdot e^{ikx}$$, ahol k: hullámszám

Fourier együttható: $\delta_k = \frac{1}{V} \int \delta(x) \, e^{ikx} \, d^3x$

Ezután δ-val dolgozok ρ helyett:

$$\langle \delta(x) \cdot \delta(x+r) \rangle = \frac{1}{V} \int d^3x \sum_k \sum_{k'} \underbrace{e^{ikx} \cdot e^{-ik'(x+r)}}_{\underbrace{e^{-ikx} \cdot e^{-ik'x}}_{e^{-i(k+k')x}} \; e^{-ik'r}} = \frac{1}{V} \int e^{-i(k+k')x} \, d^3x \cdot$$

$$\cdot \sum_k \sum_{k'} \delta_k \delta_{k'} \, e^{-ikr} =$$

↳ Kronecker delta definíciója

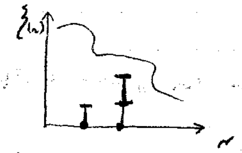
$$= \sum_k \delta_k^2 \, e^{ikr}$$

$$\Rightarrow \xi = \sum_k P(k) \cdot e^{-ikr}$$

↓ sűrűségeloszlás teljesítmény spektrum (a Fourier komponensek abszolútérték négyzete): $|\delta_k|^2$

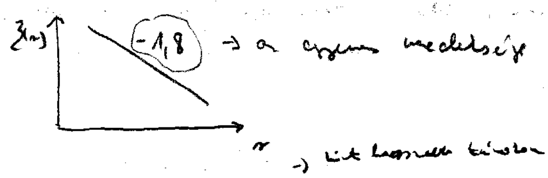
A ξ és a $P(k)$ egymással oda-vissza Fourier transzformáltja

- Tfh. van egy eloszlás és egyesével minden egyes pontpár közt a különböző távolságot → felveszi ξ és r-et, majd összeállítom a hisztogramot



- $\xi(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\gamma}$

ha γ pozitív és (r_0/r) nem az 1 „alatt", akkor $\xi(r)$ csökkenő fv.



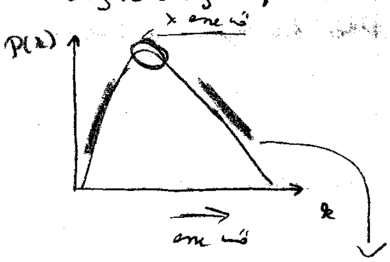
⇒ Rövidebb távolságokon több galaxis van, vagyis nem tudunk egymástól távol lenni

↓

nem meglepő, mert a gravitációs probléma összehúzni, sűríteni a galaxisokat

- Elliptikus galaxisokra erősebb a korreláció → $\gamma = 2{,}0$, a spirál galaxisokra gyengébb, mert jobban szét vannak húzva → $\gamma = 1{,}6$

- Teljesítmény spektrum:



$k = \frac{1}{\lambda}$

Valamilyen kitüntetett hullámhossznál csúcsa van a $P(k)$-nak, a kitüntetett hullámhossz

idáig nem tudunk értelmezni, mert pl: 1 Mpc-re nincsenek egymástól galaxisok

- Kompozíciós mérésekkel azt látják
- CFA slice, Pencil Beam mérésekkel azt látják

} csak a legújabb módszerekkel látják a csúcsot

2) Kozmológia

- az Univerzum keletkezésével és fejlődésével a tudománya
- XX. sz. nagy előrelépés → 3 mért az ősrobbanás elmélete

13,7 milliárd évvel ezelőtt sűrű forró volt előtte, ahonnan tágul, galaxisok, galaxis halmazok alakultak ki

- Kozmológiai elvet írunk fel

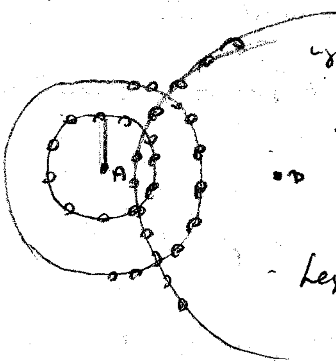
↳ - ismerjük az univerzum homogén és izotróp → ez egy posztulátum → bizonyítani, hogy így van

minden irányból ugyanazt látjuk

- kombináljuk a Kopernikuszi elvet: minden pontból legyen homogén és izotróp

↳ ha ezt feltesszük, akkor a homogenitásra & az izotrópiára nincs is szükség

- izotrópia: - legyen A pont → kört húzunk köré és a körön minden ponton ugyanakkora a sűrűség. Ha egy nagyobb kört húzunk, azon is ugyanakkora kell, hogy legyen a sűrűség. De a két körön nem biztos, hogy ugyanakkora



- Legyen B pont → itt is kört húzunk → itt is ua. a sűrűség

↳ összevetni az A pont köreivel

⇒ Minden pontból izotróp egy univerzum, akkor homogén → fordítva nem igaz

Sebességmező: - Feltételezzük az anyagot a univerzumban, mindegyiknek van sebességvektora

- sebességkomponensek: $v_i = C_i(t) \cdot x$
- a kozmológiai elvből, az izotrópiától és homogenitástól következik, hogy a sebességmező lineáris (lineárisan függ el a helykoordinátától a sebességvektor)
- nem mindegyik lineáris sebességmező engedhető meg
- rájövünk arra, hogy a $C_i(t)$ mátrix felbontható szimmetrikus és antiszimmetrikus részre

$$C_{ik} = \frac{1}{2}(C_{ik} + C_{ki}) + \frac{1}{2}(C_{ik} - C_{ki}) = \underbrace{S_{ik}}_{\substack{\text{szimmetrikus} \\ \text{diagonalizálható}}} + \underbrace{A_{ik}}_{\text{antiszimmetrikus}}$$

⇒ $S_{ik} = \underset{\text{mátrix}}{\overset{\text{skalár}}{S^{(t)}}} \cdot \delta_{ik}$ → ennek a izotrópiát használjuk ki

⇒ $v_i = S_{ik}(t) x_k$ ahol $S_{ik} = S_{ki}$

az általánosítás során rotációt ír le, ez nem lehet mert nem lenne kitüntetett irány

⇒ A kozmológiai elvből egyértelmű

$\rho = \rho(t)$

most minden helyfüggő mennyiség lineáris a hely egyenesen irányban

⇒ A dinamikához 2 egyenletet használunk: kontinuitási egyenlet, Euler egyenlet

(a hidrodinamika mozgástörvénye)

nincsen ütközés, csak a gravitáció miatt

Kontinuitási egyenlet: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \underbrace{\mathrm{div}(\rho v)}_{\text{anyagáram}} = 0$

Euler egyenlet: $\frac{\partial v}{\partial t} + (v\,\mathrm{grad})\,v = \frac{f}{\rho} - \frac{1}{\rho}\,\mathrm{grad}\,p$

→ Vektorkomponensekkel is felírható rövidebb jelöléssel

K: $\partial \qquad = 0$ E: $\partial \qquad = -\partial u$

Kihasználva a Laplace - Poisson egyenletet és az előbb kimutatott sebesség lineárisát

$\underbrace{\partial\partial}_{\text{Laplace}} u = 4\pi \underset{\text{gravitációs konstans}}{G} \rho$ $v_i = S(t)\,\delta_{ik}\,x_k$

Kijön, hogy: $3S = -\frac{\dot\rho}{\rho}$ $3(\dot S + S^2) = -4\pi G \rho$

$3S = -(\ln \rho)^{\dot{}}$ $3\dot S + 3S^2 = -4\pi G \rho$

$-3\dot S = \frac{d^2}{dt^2}(\ln \rho)$ $3\dot S = -4\pi G\rho - 3S^2$ /(-1)

$-3\dot S = 4\pi G \rho + 3S^2$

$\theta > 0$ $\rho > 0$

$\boxed{-3\dot S = \frac{d^2}{dt^2}\ln\rho = 4\pi G \rho + 3S^2}$ ⇒ Csak az üres univerzum lehet stabilis!

Stabil univerzumban a bal oldalon 0 kell, hogy álljon, (jobb oldalon)

tehát vagy $4\pi G\rho$ vagy pozitív és $3S^2$ vagy pozitív (nem lehet egyikse negatív)

Kont egyenlet
$\rightarrow \left[\frac{1}{s}\right]$

(1) $\dot{\rho} + 3S\rho = 0$
(2) $\dot{S} + S^2 = -\frac{4\pi}{3}G\rho$
} Euler egyenlet

$v_i = S(t)\cdot x_i$
$v_i = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}\cdot x_i$

S helyett vezessünk be egy új változót: $S = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$ $\rightarrow R$

$$\int S(t)\,dt = \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad /e$$

↳ integrálási konstans

$$R(t) = R_e \cdot \exp\left(\int_{t_0}^{t} S(\tau)\,d\tau\right)$$

(1) $\dot{\rho} + 3\frac{\dot{R}}{R}\rho = 0 \quad /:\rho$

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} + 3\frac{\dot{R}}{R} = 0 \quad /\int$$

$\rightarrow$ integrálás dt.

$$\ln\rho + 3\ln R = \text{constans}$$

$$\ln(\rho\cdot R^3) = \text{constans}$$

$$\ln\left(\frac{4\pi}{3}\cdot\rho\cdot R^3\right) = \text{constans}$$

↳ ide beírhatom, mert a jobb oldalon constans van

$$\frac{4\pi R^3}{3}\cdot\rho = \text{constans} = \text{új jel}: M$$

(2) $\dot{S} + S^2 = -\frac{4\pi}{3}G\rho$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\dot{R}}{R}\right) + \frac{\dot{R}^2}{R^2} = -\frac{4\pi}{3}G\rho$$

$$\frac{\ddot{R}R - \cancel{\dot{R}^2}}{R^{\cancel{2}}} + \cancel{\frac{\dot{R}^2}{R^2}} = -\frac{4\pi}{3}G\rho$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi}{3}G\rho \quad /\cdot R$$

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi R}{3}G\rho$$

$$\ddot{R} = -M\cdot\frac{G}{R^2} \quad /\cdot\dot{R}$$

$$\ddot{R}\cdot\dot{R} + \frac{MG\dot{R}}{R^2} = 0 \quad /\int$$

$$\frac{1}{2}\dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = \text{constans}$$

↳ új jel: E

$$\boxed{\frac{1}{2}\dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = E} \Rightarrow \text{Friedman egyenlet}$$

↳ úgy néz ki, mint valamilyen részecske összenergiája → kinetikus + potenciális energia

- Ha a kezdeti kinetikus energia kisebb a pot. energiánál képest, akkor az univerzum tágul, majd összeomlik.

- Ha a kezdeti kinetikus energia nagyobb a pot. energiánál, akkor végtelenségig fog tágulni az univerzum.

de.
a Relativisztikus elmélet felhasználásával értelmezett képet kap

$$\dot{R}^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} R^2 = E \quad /:R^2$$

az előbb kapott egyenletet egyszerűsít 2-vel és a G-t visszaírjuk az eredeti alakjába

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = \frac{E}{R^2}$$

$\ominus$ a k definíciója miatt

eredeti kinézete: $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 - \frac{8\pi G}{3}\rho = -\frac{k}{a^2}$

újfajta távolság mennyiség

- „a" definíciója: $a = \frac{R}{R_0}$, ahol R_0 a mai értéke az R-nek

megmondja, hogy el a mai állapothoz képest hogyan változott az univerzum mérete a korábbiakhoz képest

- „a_0" értéke: 1 $\quad \left(\frac{R_0}{R_0}\right)$
- $a_0 = a(t_0) = 1$
- k: térgörbületre utal

- A Friedmann egy. 3 megoldása van

↳ - az összenergia vagy pozitív, vagy negatív, vagy nulla

- (1.) Legyen $E = 0$ $\Rightarrow$ $R = \left(\frac{9}{2} GM\right)^{1/3} \cdot (t - t_0)^{2/3}$

$$\dot{R}^2 = E + \frac{1}{R}$$

→ konstansokat elhagyjuk

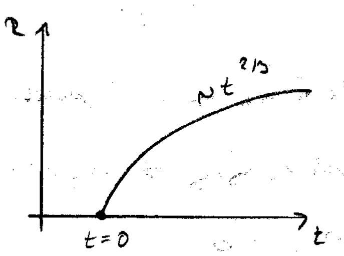
$$\dot{R} = \sqrt{E + \frac{1}{R}}$$

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{E + \frac{1}{R}} \quad /\int$$

$$dt = \int \frac{1}{\sqrt{E + \frac{1}{R}}}\, dR$$

ha $E = 0$, akkor R arányos a $t^{2/3}$-al

így tágul a univerzum



Aszimptotikusan gyorsan nő

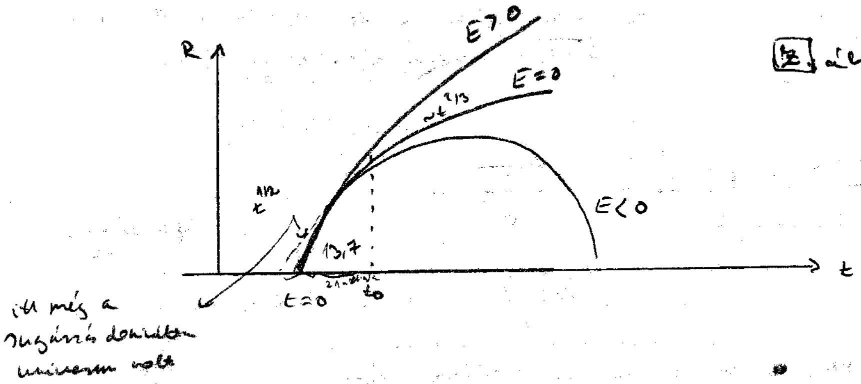
(2) Legyen $E > 0$ ő $\Rightarrow R = \frac{GM}{2E}(\operatorname{ch}\vartheta - 1)$

nagy a tágulási sebesség az össztömeghez képest

$$t - t_0 = \frac{GM}{(2E)^{3/2}}(\operatorname{sh}\vartheta - \vartheta)$$

(3) Legyen $E < 0$ $\Rightarrow R = \frac{GM}{2|E|}(1 - \cos\vartheta)$

$$t - t_0 = \frac{GM}{(2|E|)^{3/2}}(\vartheta - \sin\vartheta)$$



[illegible] ábra

Meg kell mérni, hogy mekkora a tágulási sebesség (Hubble konstans) és, hogy mekkora az anyag összsűrűsége, ahhoz, hogy ki tudjuk mondani, hogy $E=0$ vagy $E>0$ vagy $E<0$ van e.

• $v = H \cdot d$, ahol H a Hubble konstans $= 71\,(\mathrm{km/s})/$ Mega Parsec
ua. mint az S

- Átírjuk kicsit az egyenletünket:

$$\frac{1}{2}\dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = E$$

$$\frac{1}{2}\dot{R}^2 - \frac{4\pi G}{3}\rho \cdot R^2 = E \qquad \Big/ \text{ kiemeljük } \frac{4\pi G}{3}\cdot R^2\text{-et}$$

$$\frac{4\pi G}{3}R^2\left(\underbrace{\frac{3}{8\pi G}\cdot\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2}_{} - \rho\right) = E$$

ennek sűrűség dimenziójúnak kell maradnia → új jel: ρ_{krit} és

másképpen: $\frac{3H^2}{8\pi G} = \rho_{krit}$

$$\frac{4\pi G}{3}R^2(\rho_{krit} - \rho) = E$$

Ha $\rho < \rho_{krit}$ kevés az anyag → pozitív az összenergia ($E>0$) → végtelenségig tágul

Ha $\rho > \rho_{krit}$ sok az anyag → negatív az összenergia ($E<0$) → összeesik a univerzum

Ha $\rho = \rho_{krit}$ → $E = 0$

Összefoglalva:

$\rho_{krit} = \frac{3H^2}{8\pi G} = \frac{10 \text{ db H-atom}}{m^3}$

↓ ennél csak nagyon kicsi sűrűség van a univerzumban

$E>0$	$\rho < \rho_{krit}$	$\Omega < 1$	$k=-1$
$E=0$	$\rho = \rho_{krit}$	$\Omega = 1$	$k=0$
$E<0$	$\rho > \rho_{krit}$	$\Omega > 1$	$k=+1$

⇒ Az univerzumban nagyon kevés anyag van, sokkal kevesebb, mint nemtudnék

ρ-t normáljuk ρ_{krit}-el ⇒ $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{krit}}$

↓ azt kell eldönteni, hogy egyenlő, nagyobb, vagy kisebb, mint egy ↗ 1

A táblázatban a k: $\overbrace{\text{görbületét}}^{\text{univerzum}}$ jelenti

↳ hiperbolikus: $k=-1$

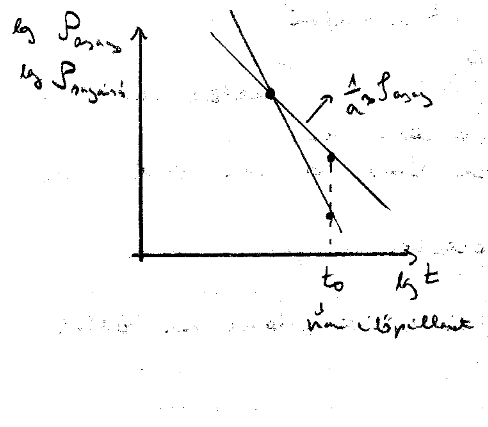
- Ω nem csak az anyagsűrűségből jönne, hanem a sugárzásból (a fotonok kitöltik a teret), azt összességét fogjuk vizsgálni.

$\rho_{anyag} \sim \frac{1}{a^3}$ A fotonok számsűrűség $\frac{1}{a^3}$-el csökken

- Ahogy tágul a univerzum, a foton hullámhossza is nő ⇒ minden foton energiája szintén $\frac{1}{a}$-val csökken

⇒ Sugárzás esetén a energia-sűrűség (ρ_{sug}) arányos $\frac{1}{a^4}$-el

- A fotonok sűrűsége kb. 3 nagyságrenddel kisebb



↳ Ma anyag dominálta régime-ben élünk

- Akkor amikor 300.000 éves volt a univerzum a sugárzás és a anyag aránya egyenlő volt.

- Régen sugárzás dominálta régime volt a univerzumban

12. óra

1.) Három fontos kísérlet a XX. sz.-ból, ami alátámasztja az ősrobbanás elméletét

- 3 bizonyíték van arra a XX. századból, hogy az ősrobbanás elmélete igaz

↳ ①. - Hubble törvény felfedezése

↳ elfelejthetjük a statikus univerzumot, mert a tágul

② - A mostani sebességből lásd I. óra, vissza tudjuk számolni az univerzum életkorát → 13.7 milliárd év

$$\frac{1}{H} = T_H$$

↳ Hubble idő: 21 milliárd év

- A korai állapotokban sokkal sűrűbb volt az anyag

kT	t (idő)	T	a	
1 GeV	10^{-6} s	10^{13}	$2 \cdot 10^{-13}$	← *
1 MeV	1 s	10^{10}	$2 \cdot 10^{-10}$	← *
1 keV	22 nap	10^{7}	$2 \cdot 10^{-7}$	← *
1 eV	60000 év	10^{4}	$2 \cdot 10^{-4}$	
1 meV	$13{,}7 \cdot 10^{9}$ év	2,7 K	1	

*: korai univerzum, itt fúziós folyamatok lehet legjobban

↳ létrejönnek a hidrogén és a hélium atom magjai → lítium is van

↓ nagyon korán keletkeztek ↓ Primordiális nukleoszintézis során

→ 3000 K a hőm. alatt

- Rekombináció: univerzum 380.000 év éves korában történt meg

↓ protonok és az elektronok összeállva kezdtek hidrogén atommá

↓ Lecsatolódik a sugárzás az anyagról → a fotonok nem látják már az anyagot

- Most a fotontenger hőmérséklete 3 K (→ 2,7 K) fok → azt mondja az univerzum, hogy úgy kell lennie

↳ rádióantennával fedezte fel Penzias és Wilson 1965-ben
⇒ kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás

③ könnyű elemek előfordulásának gyakorisága

↳ 25% H, 75% He kell hogy legyen a ... eloszlása

- nem egy adott pontban volt a robbanás (Big Bang)
  - ez a valószínű, de $t=0$ időpontba nem tudom ismertetni az eseményeket
  - $t_p = 10^{-47}$ sec előtti időben nem értjük a fizikát
    ↳ Planck idő
  - nem tudni, hogy vannak-e párhuzamos univerzumok
- a tágulásnak nincs kitüntetett középpontja és nincs kitüntetett robbanás

2) Infláció

- → probléma a Big Bang-gel kapcsolatban
  ↳ • horizont probléma
    ↳ - 21 milliárd fényév a sugara annak a gömbnek, amin belül még látok → ez a horizont
    - a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás a horizont 2 végpontja között 5 tizedesjegyig megegyezik (42 milliárd a táv) → nem kéne megegyeznie
  • struktúra eredete
    ↳ - nem homogén az anyag eloszlás
    - 2,7 K -ben $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-5}$ nagyságrend, vagyis a $\frac{\Delta \rho}{\rho} = 10^{-5}$ → majdnem teljesen egyenletes volt az anyag eloszlása
      a Sachs-Wolfe effektus miatt lehet a $\frac{\Delta T}{T}$ és $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ között egyenlőséget tenni
    - 1990-ben fellőtték a Cobe űrszondát, aminek a feladata a $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ mérése és a T megmérése (→ 2,73... K) 5 tizedesjegy pontosságig volt
      igazolta, hogy 10^{-5}
    - a probléma az, hogy miért nem nulla volt, ami 10^{-5} perturbáció, univerzum 380000 éves volt

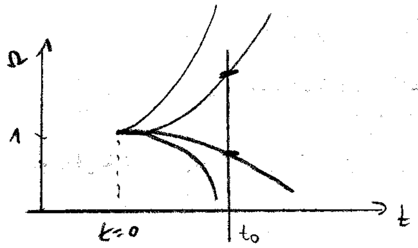
- korel egyszerűen nem lehet, hogy legyen sűrűségfluktuáció és az

egész tiszta pontosan úgy el lehet tűnnie → ezért nem igaz

• Finomhangolási probléma

↳ - $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{krit}}$ hogy változik az időben → a Friedmann egyenletből levezethető →
↳ ebben benne van a Hubble konstans, ami viszont változik

⇒ $(1-\Omega) \sim t^{2/3}$ -ot az eredményt kapnánk



- meg tudom mondani, hogy ma a Ω egyáltalán kicsit nem nagyobb, és

2 és nem kisebb, mint 1/2.

↳ ok: - ha visszamegyünk az univerzum 1s-os korába, ott az

Ω 1%-al kevesebb lett volna mint egy, akkor $\rho < \rho_{krit}$,

vagyis az anyag végtelenül hígult volna, hogy soha nem

jött volna struktúra a univerzumban, a gravitáció

nem tudta volna összehúzni

- ha a Ω 1%-al több, mint 1 lett volna 1s-os időben, akkor

összeroppant volna, vagyis végső állapotban lett volna,

kb. 20 perc.

- Ω picit hatással kezdeti kezdhető → nagyon pontosan 1 kellett, hogy

legyen a kezdetek kezdetén több tized jegyig

- ki hangolta be pontosan 1-re az Ω-át?. → a válasz

$$\frac{d^2}{dt^2}(\ln \rho) = 3S^2 + 4\pi G\rho$$

↳ itt lehet megjavítani a fizikát

Laplace

$\Delta^e u + \lambda = 4\pi G\rho$ → ezt levezethetjük

taszító erőket jelöl meg

a tömegpontú az univerzumban : $\rho = M\,\delta(x)$

$$\frac{1}{r}\frac{d^2}{dr^2}(rU) = -\lambda \quad /\cdot r \qquad \text{ha } x \neq 0$$

$$-r\cdot\lambda = (rU)'' \quad /\int$$

$$(rU)' = -\frac{1}{2}\lambda r^2 + A \quad /\int$$

$$rU = \frac{1}{6}\lambda r^3 + Ar + B \quad /:r$$

$$U = \frac{1}{6}\lambda r^2 + A + \frac{B}{r}$$

$$F \overset{\text{erő}}{=} -U' \;\rightarrow\; F = -\frac{B}{r^2} + \frac{1}{3}\lambda r \;=\; -\underbrace{\frac{GM}{r^2}}_{\substack{\downarrow \\ \text{vonzó erő, ezt } \ominus}} + \underbrace{\frac{1}{3}\lambda r}_{\text{taszító erő, ezt } \oplus}$$

$B = G\cdot M$

λ-át elnevezték kozmológiai konstansnak

↳ Einstein: elképzelhetőnek olyan távolságban a galaxisok, hogy a vonzó erő és a taszító erő kiejtse egymást és így az univerzum statikus lehet

$$U = \frac{1}{6}\lambda r^2 + \frac{GM}{r}$$

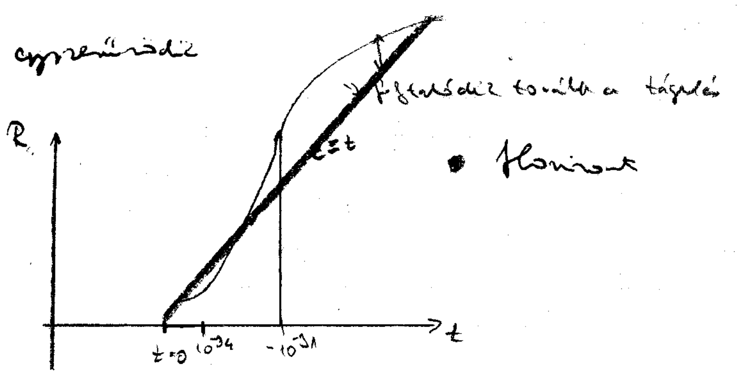
$$\left(\frac{\dot R}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{E}{R^2} + \frac{\lambda}{3}$$

így változna a Friedmann egyenlet, ha a U potenciált behelyettesítem

olyan univerzumban, ahol van λ, ott elhanyagolható ● ez a tag és az egyenlet $\left(\frac{\dot R}{R}\right)^2 = \frac{\lambda}{3}$-ra egyszerűsödik

$$\left(\frac{\dot R}{R}\right)^2 = \frac{\lambda}{3} = \frac{\ddot R}{R} = H_\lambda^2$$

$$R = R_i \cdot e^{H_\lambda (t - t_i)}$$



● Horizont

volt az exponenciális rövid tag és ezt nevezik inflációnak.

↓ → vákuum energia válik

megállt, ezt a λ biztosította

λ választ ad a 3 problémára

1981-ben Alan Guth javasolta ezt az elméletet

↓

hatalmas tágulás rövid időn belül → a téri R-ét

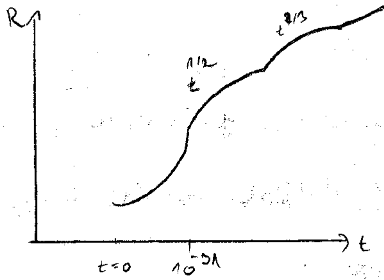
egyelőre 1-el

- a Friedmann egyenletben $\underbrace{E}_{=\lambda\cdot c}$ helyén igazából λ van, mert egy gömbfelületet

hatalmas mértékű felnagyítva nem gömbnek, hanem síknak látom, ha „ráállok"

3.) Univerzum végállapota

- azt gondoljuk, hogy van egy újfajta infláció
- 1.A típusú szupernovákkal lehet kimérni



⇓ most itt vagyunk

- nagy távolságokon a Hubble konstans nem állandó → azt kapjuk, hogy nagyobb

sebességgel távolodnak a galaxisok, azt kapjuk távolabban voltak

- az univerzum valószínűleg gyorsulva fog szétszakadni és szétfröccsen az anyag

↳ így ennek a ... az elején járnak

- ami a gyorsuló tágulást hajtja: sötét energiának nevezzük

↓

↳ okozza az újfajta inflációt