

BEVEZETÉS AZ ASZTROFIZIKÁBA

/2019-20-as tanév őszi féléve/

Werner Norbert és Raffai Péter előadásai alapján írta össze Bora Zsófia

- ° 0.89. , Werner Norbert /nagyenergiás asztrofizika kut. csop./
- ° W. Kauffmann, R. Freedman : Universe → minden óra után pdf-ben letölthető
- ° írásbeli vizsga felér végén
- ° főlíák óra után elérhetőek

CSILLAGÁSZATI MEGFIGYELÉSEK

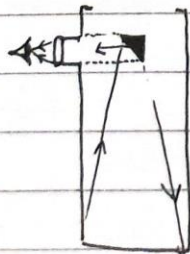
- ° fotonok, neutrínók, gravitációs hullámok

↓
látható tartomány: csillagok ; második v.h. után: radar, UV, röntgen ...

- ° most az egész e.m. spektrumon van megfigyelés

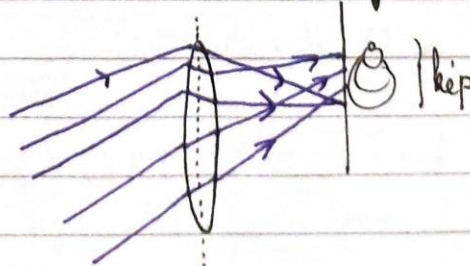
OPTIKAI FÉNY:

- ° csillagok fénye
- ° évszázadok óta végezzük (galilei elvileg az első)
- ° teleszkópok : objektív / okulár = nagyítás
- ° először lencsés távcsövek (legnagyobb: 125 cm-es átmérőjű volt)
 - > kromatikus aberráció (más hullámhosszok máshogy fókuszálódnak)
 - > meléiz tisztán éteni nagy méretekben, idővel deformálódik
- ° 1. Newton: tükrös távcsövek



> szférikus aberráció → parabolikus tükör jobb

> kóma aberráció



> típusok

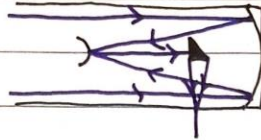
① PRIME

② NEWTONI

③ CASSEGRAIN-1

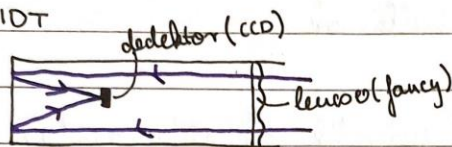


④ COUDÉ - I



⑤ RITCHIEY - CHRÉTIEN

⑥ SCHMIDT



◦ spektrometria

> fény elemekre bontása

◦ teleszkóp-szerelés

> azimut

> equatorial (dec, asc)

> dobsonian

◦ közeli infravörös → átjut a porfelhőkön

◦ turbulens atmoszféra → adaptív optika (műszillaghoz igazolás)

◦

INFRAVÖRÖS:

◦ távoli infravörös

◦ Sophia repülő, Herschel űrtávcső

◦ milliméteres tartomány

> háttér-sugárzás ($\sim 2,8$ K) / hűt és rögzítéskor, Tejút sávja beazonosítható

> CO sugárzása (vörös dipól sugárzás)

> ALMA

> M-87 galaxis fekete lyukának eseményhorizontja (EHT) / 6 mld. nagytávcső

RÁDIÓ TARTOMÁNY:

- H 21 cm vonal
- rádiócsillagászat → nagyon nagy "távcsövek" helyénél → interferometria

RÖNTGEN TARTOMÁNY:

- sz. m. feltételükba hulló anyag bocsátja ki
- nehéz megfigyelni (nem lehet fókuszálni) → Uhuru műhold
- Chandra műhold (tükör), XMM-Newton
↓ CCD detektor
- parab. + hiperbolikus tükör
↓
héjakba rendezve

GAMMA TARTOMÁNY:

- legnagyobb energiájú
- Fermi űrtávcső
- pulzárak, aktív galaxismagok, blázárak, röntgen hullócsillagok
- $\gamma \rightarrow e^+$
 $\gamma \rightarrow e^-$ párkeltések megfigyelése atmoszférában (Cherenkov-sug.)
↓
TeV-es fotóelektronok szupernova maradványokból

GRAVITÁCIÓS HULLÁMOK:

- 2015 óta, LIGO, VIRGO (lézersugarak fázisa)
- 10^{-21} m méretváltozások megfigyelése
- két feltehető ütközése volt az első megfigyelés (idén kb. 30)

↓
pár századmp., két neutroncsillag: pár mp.

gammafelhullanással jár, ilyenkor nehezebb démek
keletkeznek (vannak nehezebb)

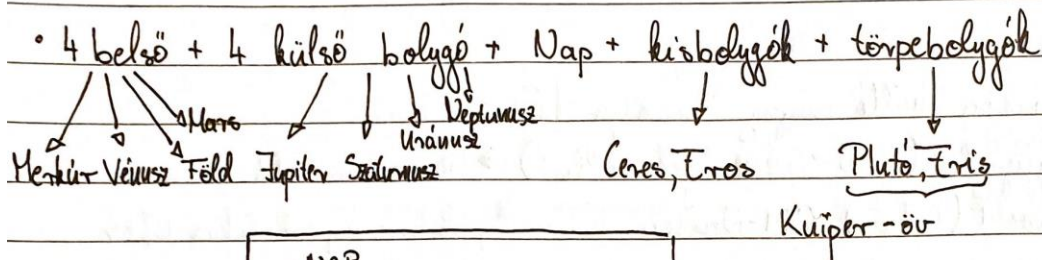
• Fermi, Swift
↓

teremben: CAMELOT (CubeSatok 53°-os pályán, időközönkéntől helyzet)

09.24

II. ÓRA

NAPRENDSZER



NAP
BELSŐ N. RENDSZER
kisbolygó-öv
KÜLSŐ N. RENDSZER
TRANSNEPTUN-ÖBJEKTUMOK
KUIPER-ÖV
OORT FELHŐ

- transzneptun-objektumok: néhány gyakran megvan délre (Plutó: 17°)
- üstökösök: jég és por alkotta kisbolygó, ami közel került a Naphoz
- gyakori üstökösök → kráterek
 - > minnél kisebb égitest → annál több kráter látható (kiseb. erózió)
 - ↓
 - annál hamarabb kihűl → geológiailag inaktív
 - > Plutón a jég betakarja a krátereket (ez is erózió)

(BOLYGÓK)

BELSŐ SZERKEZET

- betekinteni melyik → magneses tér ad róla információt
 - > Marsnál már nincs (kihűlt) → reziduális lokális mag. tér
 - > Jupiterben nem vasmag; fémhidrogén
 - > Uránusz + Neptun: víz és egyéb anyagok

KELETKEZÉS

- főleg H_2 és He

Csillagok

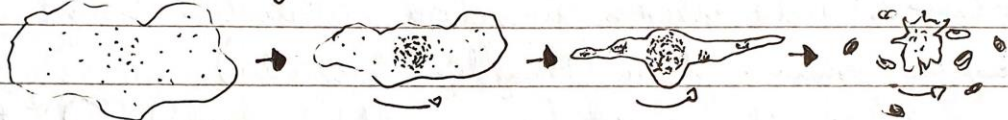
- korábbi csillagok maradványainak gáz és porfelhőjéből született
- leggyakoribb elemek: H_2 , He, O_2 , C, Ne, N stb...

NARRENDŐSZER

- legöregebbi objektumok: meteoritok ($\sim 4,45$ milliárd év)
 - > radioaktív kormeghatározás

// $C \rightarrow N$, 5730 és $K \rightarrow Ar$, 13 millió //

- keletkezés mechanikája



- > saját gravitációján alatt összezsongorodó porfelhő.
- > kialakul a protonap $\rightarrow$ tovább zsugorodik $\rightarrow$ melegedik $\rightarrow$
 - $\rightarrow$ eléri a fúzióhoz szükséges hőmérsékletet és „beindul”
- > a maradék por és gáz bolygókat alkot
(protoplanetáris korong)
 - $\rightarrow$ szilikátokból és fémekből keletkező kőzetes bolygók kisebbek
 - $\rightarrow$ a hővonal mögött (kb. 5 s.e.) már a jég is hozzájárul a bolygóformáláshoz $\rightarrow$ kívül nagyobb protobolygók $\rightarrow$ magukhoz vonzzák a gázokat $\rightarrow$ nagy gázóriások

- > nagybolygók migrációja (korai m. / későbbi m.)

Jupiter szétverte a Mars anyagát, amiből bent volt

Oort-felhő
($r = 0,8$ fényév)



Uránusz és Neptunusz belsejéből keletkezettek (és talán helyet is cseréltek)

Kuiper-öv

KÖZETBOLGÓK

MERKUR:

- pályájának nagy az excentricitása, alakja kissé ellipszoid
- Schiaparelli: Merkúr rotációja kötött a Naphoz

↓
kiseb radarral megállapították: 1.5 / merkur

- ősi kráteres felszín + törésvonalak
- van mágneses tere (összetett) pályarezonancia miatt lehet

VÉNUSZ:

- vénuszén > rotáció

↓
retrográd rotáció

- Mariner 2: első sikeres űrszonda elhaladás bolygó mellett
- nagyon sima felszín (Magellán űrszonda)
 - > horvák rajta (magnum felbuborékosít) + törésvonalak
 - > 500 millió éves (nagyon fiatal) felszín → újradulad 500 m. évente

MARS:

- fantáziák marsi civilizációkról (jégapokaliptika kanálisok „városokba”)
- egész bolygót beborító porhárak
- nincs(?) tektonika (talán 2 lemez)

északi alföld ↓ (?) ↓ déli fennsík

- Valles Marineris
- milyen az atmoszférában (bakteriális élet? geológiai aktivitás?)

10.01.

KÜLSŐ NAPRENDSZER

JUPITER

- távcsövel az egyik legfelismerőbb
 - > zónák és övek + nagy vörös folt + kóklak ármegkai
- új: a pólusa, Red Spot Jr.



- nagyon aktív, mert még mindig zsugorodik → hő alakul ki benne
- közet mag fémhidrogénnel körbevéve → mágneses tér (holdjaira is kihat)
↓
10 kitérésit éléníti, a részecskéket a pólusokba vezeti → AURORÁK
- kősi, sötét, de van gyűrűje

SZATURNUSZ:

- szintén aktív
- hexagonális pólus (Cassini által) / hidrodinamikai kísérletek rekonstruáltak /
- Galileo űrszonda leszállóegysége behatolt a felhőkbe
- közet mag + fémhidrogén
- gyűrűi
 - jég és por szemcsék, bennük holdak miatt üres sávok
 - kialakulásuk: pályarezonancia + árapályhatások (Roche-límit) szét-
törték a korai holdakat / Most a Marsnak a Phobosz /

HOLDJAIK

- Jupiter 4 nagy holdja (Galileo távcsővel): Io, Európa, Ganymedes, Callisto
 - képződésük: protojupiter zsugorodása során jöttek létre
 - ↓
belsőbb meleg: Io, Európa
 - ↓
külsőbb hideg: Ganymedes, Callisto
(van jég → nagyobbak)
 - Io: vulkánilag legaktívabb égitest a Naprendszerben
(Európával 1:2 rezonancia → bizgatója az Io belsége)
/1979: VOYAGER-I KÉPE/
 - nagyon aktív: gyorsak a kilövellések, kifolyások
 - kilövellt részecskék → plazma törzs → Jupiter körüli jég
 - Európa: jég borítja, kevés kráter → folyékony óceán?
• törések sötétebbek (organikus anyag)

- ↳ vízjezek is találhatók (sűrűbb részek kráter körül)
- ↳ Galileo űrszonda észlelt mágneses teret (változó)
 - sós víz jó vezető (ionok) + vasmag és köbpeny
- ↳ UV-ban vízfelhők észlelése (szonda átrepülhet rajta)

> Gangmedes: legnagyobb hold a Naprendszerben

- ↳ kisebb sűrűség, mint Io és Europa
- ↳ sötét és világos részek, nem nagyon aktív
- ↳ vasmag, ~~fel~~ köbpeny, talán sós felszín alatti tenger

° Szaturusz holdjai

> Titán: metaingáz atmoszférá (vastag felhőréteg)

- ↳ Cassini: Huygens leszállószonda lefelfedezte a felszínt
- ↳ meta ciklus (tavak → felhők → esők stb.)
- ↳ vízjég kövek
- ↳ sűrű atmoszféra, nagy nyomás, erős szellő → homokdűnék
- ↳ évszakonként változik a tavak helyzete
- ↳ kőgyökű vulkanizmus
- ↳ körmag jéggel körbeölelve, folyékony ammónia és víz: „óceán”, jégköpeny / a felszín is jég /

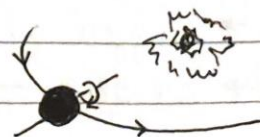
> legtöbb hold a bolygókkal egyszerre jött létre, de vannak befogott aszteroidák is

> Mimas (halcsillag), Tethys, Hyperion, Iapetus (kétszínű), Enceladus (jégvulkánok)

↳ gyűrűt alkot

URA'NUSZ:

- 98°-os tengelyfordulás (retrográd)
- a holdak is így keringenek, vagyis nagy ütközés proto bolygó korában történhetett



- ° miros időjárás, nem ad le hőt
- ° jég és kőmag + folyékony H és He + atmoszféra + nagy sűrűségű víz és ammónia
- ° vékony gyűrűk

melegség tér

nagy eltérés a forgási tengelyhez képest

* NEPTUNUSZ

- ° lead egy kis hőt, vannak felhői és viharjai
- ° Voyager-2 felfedez gyűrűket

HOLDJAIK

° Triton

> befogott törpebolygó, Neptunuszhoz képest retrográd kering

TRANSNEPTUN - RÉGIÓ

PLUTÓ

- ° 1930-2006-ig bolygó, most törpebolygó
- ° New Horizons szonda nemrég ért oda

↓
inaktív, kihűlt, kihalt égtestet vártunk

↓
helyett geológiailag aktív (kriovulkanizmus)

° Charon a holdja

> régebbi felszín

miért? arapály?

(?)

↓
a többi holdtal együtt alakult ki (talán ütközés miatt)

- ° ahartak egy Kuiper-öv objektum mellett elrepülés miatt

2014 MU69 felfedezése



KISBOLYGÓK + ASZTEROIDÁK

- a periodikus pályák miatt kerestek ott egy bolygót



Ceres, Vesta, Pallas, stb...

CERES

- már gömb alakú (a legtöbbiek nem az)
- vízjég

ITOKAWA

- Hayabusa gyűjtött mintát

VESTA

- vasmag
- Földi meteoritok forrása 60%-ban

KRATEREK

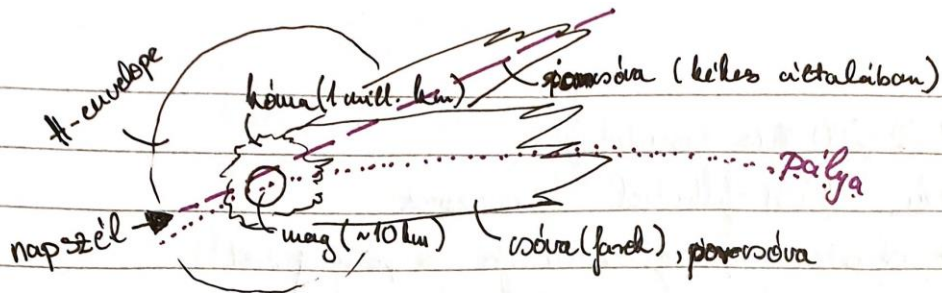
- Barringer - kráter Földön a legjobban fennmaradt
- 4% vas, 95% kő, 1% egyéb szilícium
- 10 km-es átmérőjű Yukatan-félszigetnél
- 1908: Tunguska esemény: ~100 kg-os aszteroida felrobbant a légkörben
- 2013: Chelyabinszk: Tunguska-hoz hasonló
- szele-kondritok: nulkivül értékesek (érintetlenek)
 - > aminosavak
 - > 4,6 milliárd éve volt egy szupernova robbanás itt

10.08.

2019: FIZIKA NOBEL-DÍJ: EXOBOLYGÓK FELFEDEZÉSE

ÜSTÖKÖSÖK / aszteroida, amiben van jég és közel kerül a Naphoz /

- sek jég (víz + szárazjég)
- Oort-felhőből származnak
- Hyakutake (1996): nulkivül fényes volt



- > pórszóró a pálya irányán marad, ioncsóva a napszéllel ellentétes
- > kórnán kívül még egy hidrogén burkuk van
- > „hosszú köpönyök” ↔ „havas porgolyó”

• 1986: Halley-üstökhöz magjához első felvétel (~10 km + hidrogén köpönyök) láthatóan

• Wild 2 üstökhöz: Stardust misszió

- > aerogelbe gyűjtött részecskék: aminosavak (bal és jobb szim. is van)

↳ folyékony vízben fejlődött
asztronómiai anyagok

• Deep Impact misszió

- > rezimpaktor becsapódik a magba; megfigyelés
- > gyenge összetartott kisebb darabokból áll

• Rosetta misszió

> 67P

- > a magasabb portentalom, mint jég
- > szigorúan való leszállást terveztek, de nem működött; megszakadt vele a kapcsolat a leszállóegység-el
- > a keringő egység jéket figyelt meg, képeket készített

• Kohoutek üstökhöz képei



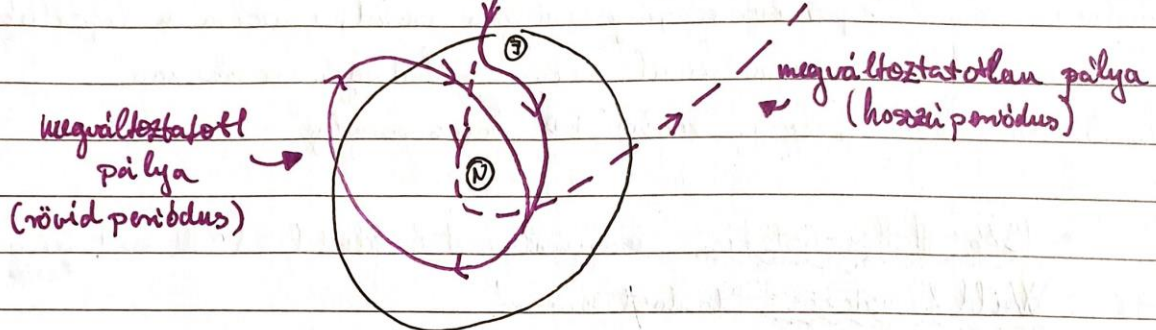
láthatóan ultraibolyában (H-burkuk)

• periódikusak

- > rövid: Halley, Kuiper-övből jönnek

↳ ~76 éves periódus

- ↳ 20-200 éves periódusok
- > hosszú: Oort-felhőből származnak
- ↳ Jupiter megváltoztathatja a pályájukat?



- életük végére szétesnek
- > „sun-grazing comets”: túl közel mennek a Naphoz
 - ↳ SOHO havi 1x megfigyelt ilyen
- > amikor a Föld pályája mentén esnek szét, akkor lehetnek az éves meteorrajok
- > becsapódhatnak bolygókba is
 - ↳ Shoemaker-Levy 9 a Jupiterbe (1994)

◦ interaszteroida üstökösök

- > Comumama: változott a fényessége, különösen lapos az alakja
 - ↳ nem alakult ki csóvája
- > Borisov/I2: még csak közeledik, csóvája növekszik

EXOBOLYGÓK

- 1992: pulzár körül
- 1995: normális villag körül
- kell a megfigyelés (túl fényes a villag)
 - ↳ kitalálják
 - ↳ infravörös
 - ↳ fényesség növekedés után

MÓDSZEREK

① Csillag mozgása

- elmozdul a tkp., ahogy a bolygó kering



→ kek / vörös eltolódás mérése

② Infravörösben mérés

- csillag külső fényes

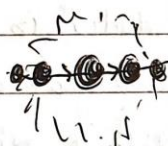
- 51 Pegasi megtalálása

→ ez a bolygó fontos Jupiter-típusúak
(→ valószínűleg nagyobb, M-vel kisebb)

nehéz megmagyarázni, miért vannak ilyen közel (migráció(?))

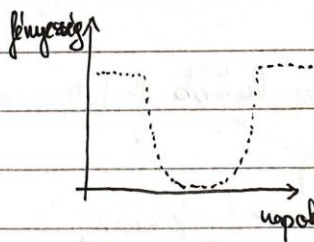
- Gaia-távcső

③ Transzit-módszer



- fényességváltozás mérése (+ spektrográfia)

bolygó mérete, sűrűsége, közeledése, légkörének összetétele, hőmérséklete



- Kepler-távcső

- Trappist obszervatórium: 7 bolygó

→ ebből 3 földi méretű-zónában

- potenciálisan élhető bolygók (0 → 1 skála)

> Föld: 1.0

> Proxima Cent. B: 0.85.

> Jupiter: 0.12

- Kepler R.I.P. → TESS távcső most

GALAXISOK

- az égbolton a Tejút-rendszer villagai láthatóak (kb. 6000)
- a villaghközi gáz és por elvél valamennyi felvett a galaxis síkjában

galaxis síkján kívül gömbhalmozok

- RR Lyrae változó villagok → Cepheidák

> minél nagyobb a periódusuk, annál nagyobb az abszolút fényességük

↓
távolságmérésre alkalmasak

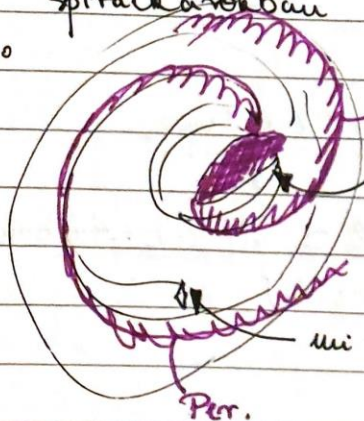
> Lee: Sagittariusban sok gömbhalmoz: ez lehet a gal. közepe

- korongban: por, gáz, nagy fénytartalmú fiatal villagok
- haló: öreg, fémcszegény villagok
- "dudor": ez is, az is (fiatal + idős)

újs villagokkal
újs-újs a
korongon kívül

- infravörösben: jól megfigyelhető a por és a "dudor" is
- rádióban: 21 cm-es vonal megmutatja a H eloszlását a galaxisban, valamint ezeknek a felhőknek a sebességét

- spirálkarokban a legtöbb neutralizált H, és a legtöbb fiatal villag



Cent.

mi: Orion-nyílványban

Per.

> 2 főkar

Perzeusz-kar

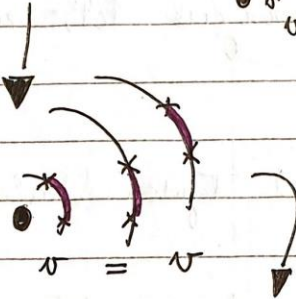
Centaurus-kar

• mozgása:

- > mint egy merev test?
- > mint egy naprendszer?

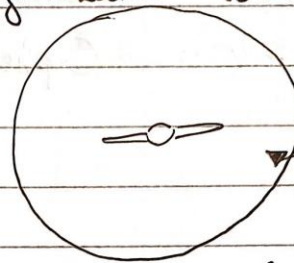


nem:



→ idővel "befeledhet a kark"

magyarázata: sötét anyag



sötét anyag halo

láthatatlan, mi alkothatja?

barna törpek? primordiális fekete lyukak?

MACHO-k

→ mérésük ezt cáfolják

olyan részecskék alkotják, amik nem interakálhatnak e.m. mezővel, mágneses, de gravitációval igen

- > a spirálkarkok idővel befekerednének, de nem, mert valójában "SZÜRŐGÉSHULLÁMOK"



mi hozza létre? → talán a centrális kúlló, és a villághétközös folyamatok is beleszól

10.15.

GALAXISOK, GALAXIS HALMAZOK

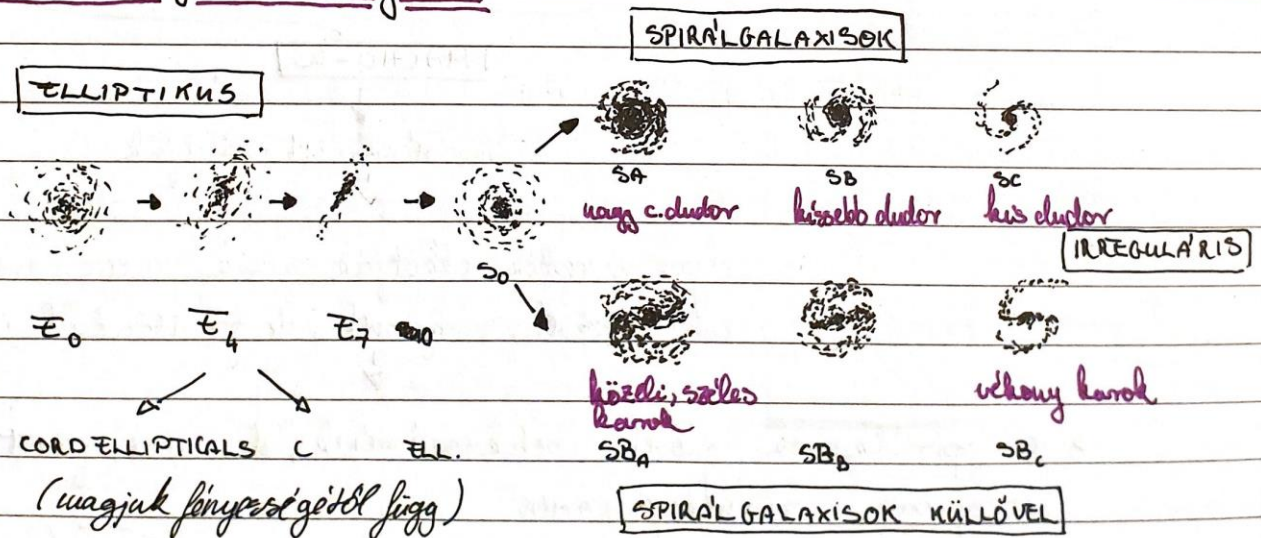
Lord Rosse 'Leviathan' távcsövével 1845-ben megfigyeli az M-51
galaxis spirálkarjait

↓
nem tudták, hogy ezek Tejútunk kívüli objektumok

↓
Edwin Hubble jött rá, és mérte meg a távolságukat

↓
Cepheidák: standard gyertyák, az
abszolút fényességük és a
luminositás összehasonlításával meghatá-
rozható a távolságuk

"Hubble Tuning Fork" diagram



centrális dudor $\neq$ kulló

↑
ütközéssel
jön létre,

komelál a kullóval a
fehér-lyuk

↑
nem függ a bp.-i
fehér lyuktól

ELLIPTIKUS

- $E_0 - E_7$
- meg fényességétől függően lehetnek cond, vagy
- törpe elliptikus
 - > szinte átlátszóak

LENTIKULÁRIS

IRREGULÁRIS

- pl.: Magellán - ködök (Tejút körüli kísérőgalaxisok)

KELETKEZÉSÜK

- korai világgegyekben sűrűség ingadozások
↓
összegyűlik csillagokba a gáz
- gyors összehúzó: elliptikus
 - > vagy spirálgalaxisok ütközéséből
- lassú keletkezés: spirál
 - > van idő a korok kialakulására

UNIVERZUM NAGYLEPTÉKŰ SZERKEZETE

- hálószerű, nem homogén, „kozmosz pókháló”
↓

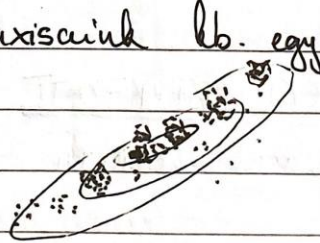
ahol a filamentumok találkoznak: gal. halmozatok
◦ „void”-ok, ürességek a szerkezetben
↓

- ezen falában sűrűbb anyag → ezek a filamentumok
- mi egy falban (filamentumban) vagyunk: LOKÁLIS CSOPORT
 - > Tejút, Androméda, M33, szatellitok (100n) (Tejút, Androméda, törpegalaxisok)
 - > $m \approx 3 \cdot 10^{12}$ nap tömeg, $d = 3$ Mpc

- 50-es évek m : magnitúdó
 3. legfényesebb galaxis
- galaxis-halmazok felfedezése: **ABELL-KATALÓGUS**
 - > galaxis-halmaz: min. 50 galaxis között $m_3 < m_3 + 2$ fényesség
 - > távolság kritérium: 0,02 - es vöröseltolódástól 0,2-ig
 - ↓
röfjen a fotólemezekre
 - ↓
ne legyen túl halvány
 - > ezt kezelt minálta 30 éven át az 50-es években, és még mindig valid (kb.)
 - > ha a galaxisok száma < 50: az csoport
 - > $m_{gal} \sim 10^{14} - 10^{15}$ nap tömeg, $m_{csoport} \sim 10^{13}$ nap tömeg
 - > a halmazok a világegyetem legnagyobb gravitáció által összetartott objektumok

SÁJÁT KIS CSOPORTUNK

- van egy local void a közelben
 - ↓
nehéz volt felfedezni, mert a Tejút másik oldalán van
- van egy extragalaktikus egyenlítő
 - ↓
a legnehezebb galaxisaink kb. egy síkban helyezkednek el



SZUPER GALAXIS-HALMAZ

- Laniakea
- szuperhalmazon belül „tárgulnak el” egymástól a gal. halmazok
 - > de ezen belül mégis mozognak a halmazok és a galaxisok → ha egy irányba mozognak, akkor egy szuperhalmaaz részét alkotják
- „Great Attractor” vonzza őket („folyók”)

- $m \approx 10^{17}$ napfény, $d \approx 160$ Mpc
- közepén sűrűbben vannak a galaxisok

SÖTÉT ANYAG

- első felfedezett galaxisgalaxis: Fritz Zwicky: Coma Cluster
(~~amikor Vera Rubin~~) már hipotetizálta

- Vera Rubin: Androméda-gal. megfigyelése 1970-es évek
 > a keringési sebesség a körön belül kb. állandó



sokkal több anyagnak kell lennie, mint amit látunk

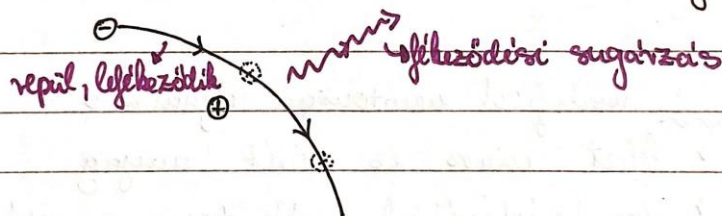
- > rádióvillágászati bizonyítékok

- galaxisgalaxisokban is jelen van

- > röntgenben látható a galaxisok közötti forró, de alacsony sűrűségű gáz (plazma)



miért sugároz röntgenben?



- > fitteléssel spektrumból megállapítható, hogy $T \approx 37\ 200\ 000$ K (ideális gázzal közelítik)
- > sűrűséggel, és nyomással megállapítjuk, hogy hidrosztatikai egyensúlyban van



hisz matek, és trükkök



hiszámolható a tömege a gázfelhőnek



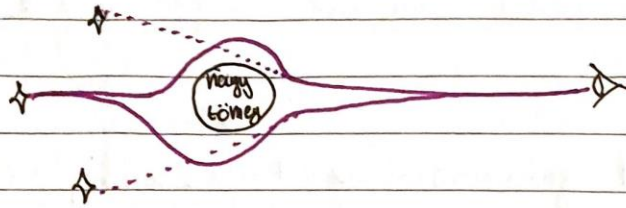
mindennek a 80%-a kb.

minden bolygó	látható gáz	sötét anyag
---------------	-------------	-------------

2% 12% 86%

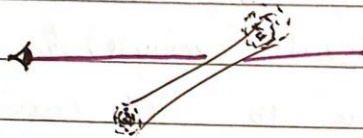
látható anyag

◦ gravitációs lencsehatással



- > teljes gyűrű is kialakulhat: Einstein-gyűrűk
- > kiszámolható, mekkora az ezt kelte anyag

◦ 2 galaxis halmoz filamenttel összekötve (ilyen szögből nézve)



a ritka gázt meg lehet figyelni így

◦ gyenge lencsehatással fl lehet térképezni a filamentumok tömegeloszlását

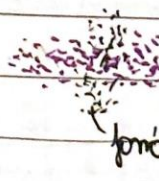
◦ M.O.D : modified newtonian dynamics

- > lehet minos is sötét anyag
- > ha módosítjuk Newton gravitációját, akkor a galaxisokban a megfigyeléseket meg lehet magyarázni

> Ω_c : galaxis halmozokban nem tudja megmagyarázni



két galaxis halmoz ütközése-nél
a két adag gáz befelé húz egymást



gyenge grav. lencse

pmó gáz

AKTÍV GALAXIS MAGOK

10.22.

szupermasszív fekete lyukak btlw.

helyezésük nem tisztázott

- 1908: első megfigyelés, de nem tudták megmagyarázni
- 1913: jet M87-ben, de nem tudja mi ez
- 1930: K. Fausky: rádiókommunikációs szót próbálja kiküszöbölni
"az első rádiócsillagász"

Sagittariusból konstans jön sz

- 1953: Cygnus A: galaxis közepéből két jet lövell ki és rádióban sugároznak

- korabeli rádióteleszkópok felbontása nem jó → A Hold kitakarásából pontosítják a helyzetüket

optikai távcsövel megkeresik

első **kvazár** felfedezése
(kvázi-sztellár objektum)

> nagyon furcsa spektrum

vöröseltolódott H-vonalak: nagyon távoli objektum
(de mégis milyen nagyon fényes)

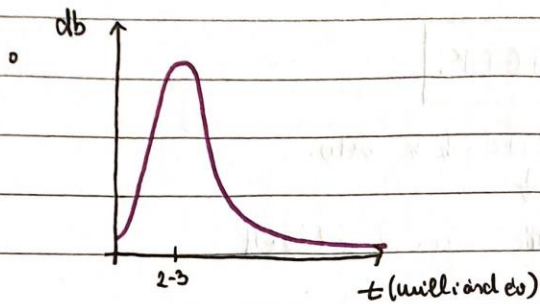
KVAZÁROK

- saját galaxisunk fényességénél 10x, 100x, 10000x-el is fényesebb
- pedig csak csillagszerű objektumnak látnak
- hogyan lehetnek?

> az objektum grav. vonzása > fénynyomása

PENNINGTON-HATA'R

- fényességük időben változik → kicsi kell legyen (~ Naprendszer)
(mert ha túl nagy, akkor a fénynek időbe telik eljutni)



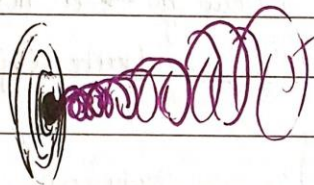
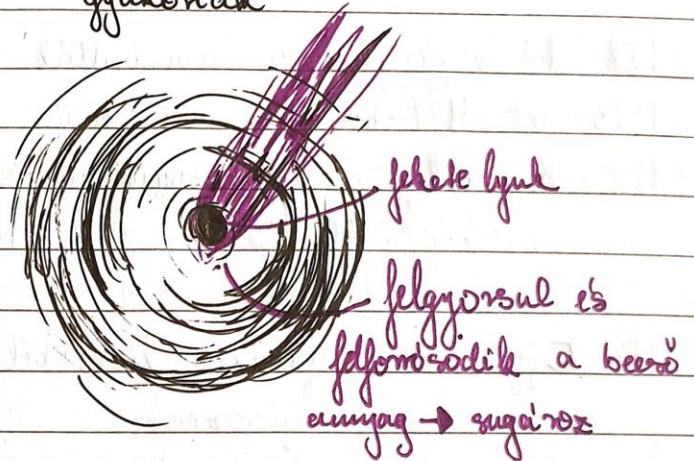
"ma" már nem létezik, csak a régiókat látjuk (10-11 milliárd évvel ezelőtt)

galaxiskepződés időszakában voltak gyorsak

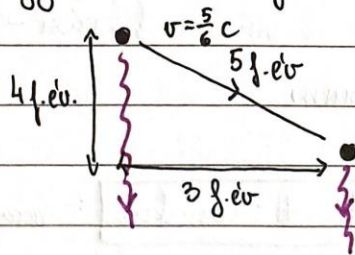
• honnan jön a fényszáj?
> akkréciós korong

Eddington-határhoz közeli akkréciót ér el

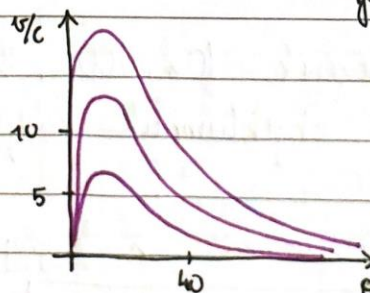
> jet



↳ távolról szimmetrikusak, közelről nézve nem annyira
↳ gyorsabban terjed, mint a fény(???)



-Földről nézve $1.5c$ -nek néz ki



↑ mennyire relativisztikus a sebesség

→ jet Földhöz képest állásának szöge

• M87: lefotózott fekete-lyuk (6.5 milliárd naptömegű)
> aktív, jeteket bocsát ki

- minden kvazár aktív g. mag, de nem minden g. mag kvazár

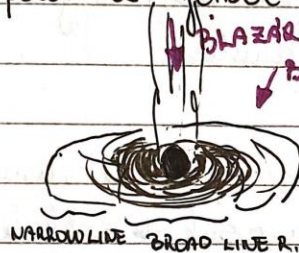


Seyfert 1, Seyfert 2, Blazár, RL kvazár, RL kvazár, Ab., nagyon sok altípus van

UNIFIED MODEL

- középen fekete-lyuk, körülötte aktív korong
- körülötte felhők:
 - gyorsan mozog benne az anyag, vörös/kekk eltolódás nagy → **BROAD LINE REGION**
 - távolabb nyugodtabb a felhő → **NARROW LINE REGION**

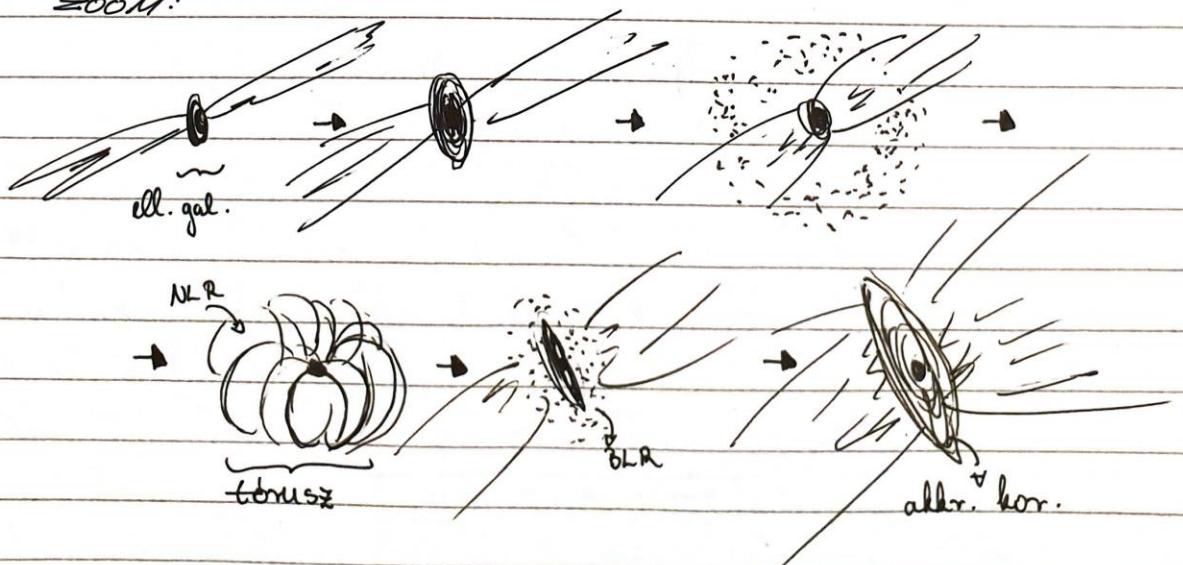
- ha pont a jetből nézünk rá: BLAZÁR



válasz: irányától függ milyen felét látunk

- előleg van körülötte egy **tórusz**
- (jetek elliptikus galaxisokban gyakoribbak)

ZOOM:



- jet és akkreció's korong viszont nem mindig van egyszerre (általában ha van jet, nincs akt. korong)

- centrális dudor és sz.m. fekete lyuk tömege között összefüggés
„együtt nőnek fel”



f.-lyuk eléri az Eddington-kritériumot



kihívell az anyag (és kisöpör környező anyagot)



nem marad anyag a centrális dudorban
a további csillagképződéshez

- galaxishalmazok közepén lekiül a gáz (mert kiszugározza
röntgenben az energiáját)



de mégis azt figyeljük meg, hogy mintha
valami gátolná a lekiülést



jétek hiszontják az „üregből”
a gázt, nagyon gyorsan → sokszor

felmelegednek

> M87-ben látható ez a folyamat a legjobban

CSILLAGOK SZERKEZETE

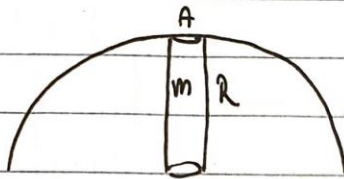
11.05.

NAP:

- $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ kg}$
- $R_{\odot} = 696\,000 \text{ km}$
- $R_{\text{MF}} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$
- $L_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{sec}} = 4\pi R^2 F$

$$F = \sigma T^4 \rightarrow T_{\text{felszíni}} = 5800 \text{ K}$$

lejjebb?



$$m = \rho \cdot A \cdot R$$

$$F = \frac{G \cdot m \cdot M}{R^2} = \frac{G \rho A R M}{R^2}$$

$$p = \frac{F}{A} = \frac{G \cdot \rho \cdot M}{R} = n \cdot h \cdot T, \quad \left. \begin{array}{l} \text{ideális gázzal közelítjük} \\ \text{számsűrűség: } \frac{\rho}{m_p} \end{array} \right\}$$

$$T = \frac{G \cdot M \cdot m_p}{h R} = 23 \cdot 10^6 \text{ K} \quad (\text{valójában } \sim 15 \cdot 10^6 \text{ K})$$

$$\alpha = \frac{4\pi\sigma}{c}$$

☞ sugárzási konstans

• luminositás függ a tölegtől?

A fotonok rengeteg ütközésen mennek keresztül, amíg kijutnak a felszínre.

☞ közepes szabad úthossz: $l = \frac{1}{n \cdot \sigma}$

☞ hatás keresztmetszet
számsűrűség

$$N_{\text{ütk}} = \left(\frac{R}{l}\right)^2 \rightarrow \text{mennyi idő, amíg kijut?}$$

$$t = \frac{l}{c} \cdot N_{\text{ütk}} = \frac{l}{c} \frac{R^2}{l^2} = \frac{R^2}{c \cdot l} = \frac{R^2}{c} \cdot n \cdot \sigma$$

$$L = \frac{E}{t} = \frac{\alpha T^4 R^3}{R^2 \cdot n \sigma} \cdot c = \frac{\alpha T^4 R}{\frac{\rho}{m_p} \sigma} \cdot c = \frac{\alpha T^4 R \cdot R^3 \cdot c}{\sigma \cdot M} = \frac{c \alpha}{\sigma} \frac{M^4 m_p^5 R^4}{K^4 M} =$$

$$= \frac{c \alpha G^4 M_p^5}{h^4 \sigma} M^3 \quad \left. \begin{array}{l} \text{megadja egy csillag luminositását} \end{array} \right\}$$

CSILLAGOK ÁLTALÁNOSAN

☞ sugar r_0 -ben akarunk megadni mindent $\rightarrow$ feltételezzük, hogy gömbszimmetrikusak

• minden termodin. mennyiség (ρ, T, X_i) r_0 -l

↳ kémiai
összetétel

99%-uk 10^5 pontossággal g. sz.

1%-uk nagyon nem (korong)

$$\rho(\rho, T, X_i)$$

$$u(\rho, T, X_i): \text{energia-sűrűség térfogatra}$$

$$S(\rho, T, X_i): \text{entropia tömeg-sűrűsége}$$

$$\lambda(\rho, T, X_i): \text{hővezető képesség térfogatra}$$

$$\epsilon(\rho, T, X_i): \text{hőforrás}$$

$$\underline{F}: \text{hőfluxus}$$

• term. első főtétel: $\rho \cdot T \cdot \frac{ds}{dt} = \rho \cdot \epsilon - \text{div } \underline{F}$

$$\underline{F} = -\lambda \nabla T$$

Navier-Stokes: $\frac{d^2 \underline{r}}{dt^2} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla V = 0$

↳ potenciál: Poisson-egyenlet

$$\nabla^2 V = 4\pi G \rho$$

$$\frac{d^2 \underline{r}}{dt^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \underline{r}} + \frac{\partial V}{\partial \underline{r}} = 0$$

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

$$\underline{F} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$\rho \cdot T \frac{ds}{dt} = \rho \cdot \epsilon - \frac{\partial}{\partial r} (r^2 F)$$

$$M_r = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho dr' = M(r)$$

$$\frac{\partial M_r}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho \quad \frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

$$\frac{d^2 \underline{r}}{dt^2} + \frac{1}{\rho} 4\pi r^2 \rho \frac{\partial}{\partial M_r} p + \frac{GM_r}{r^2} = 0$$

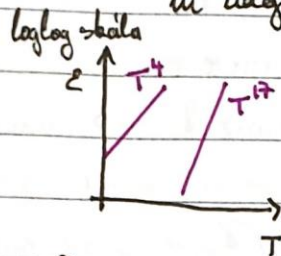
$$L = -4\pi r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \rightarrow \frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon - T \cdot \frac{ds}{dt}$$

(kellenek majd peremfeltételek)

$$\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon$$

↳ L csak a hőtermelésétől függ

u kicsi: $\epsilon \sim T^4$ } p-p ciklusos energiaterm.
 u nagyobb: $\epsilon \sim T^{17}$ } CNO ciklusos energiaterm.



$$\sigma = \frac{4acT^3}{3\beta(K)}$$

$\beta(K)$ opacitás $\rightarrow$ Kramer-opacitás: $K = K_0 \cdot \beta \cdot T^{\frac{7}{5}}$

$$I(x) = I_0 e^{-\kappa \rho x}$$

$$(P = \kappa \cdot \rho^{\frac{4}{3}})$$

↳ közelítő csúcs

$$\tau = \int_0^{\infty} \kappa \rho dx$$

optikai mélység

11.26.

KOZMOLOGIA

↓
legnagyobb skálák fizikája

↓
univerzum keletkezése, és evolúciója

bolygók → Naprendszer → galaxisok → halmozatok → univerzum

az anyag csomósodik → az anyag egyenletesen oszlik el
(homogén és izotróp)

> **KOZMOLOGIAI ELV:** Nincs se kitüntetett hely, se kitüntetett irány.

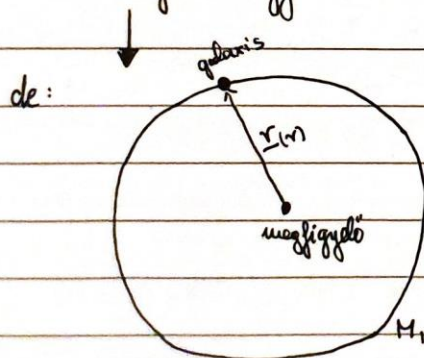
> ezen a méretskálán már csak a gravitációs hatások érvényesül

NEWTON

> ezen a méretskálán nincs mozgás / változás

> örökkön létező, végtelen univerzum

> végtelen sok költjük egymást: nyugalom



$$\ddot{r} = -\frac{G \cdot M}{r^2} = -\frac{G}{r^2} \frac{4\pi r^3 \rho}{3} = -\frac{4G\pi \rho}{3} r$$

megfigyelt áll, de "felé gyorsul"
minden
↓

EINSTEIN

> 1915: Általános relativitáselmélet

• a távolság két felé képpen változhat

1.)



ELMOZDULUNK

2.)



A TER MŰLIK / SZÜKÖRÖDIK

paradoxon

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Einstein-tenzor (4×4 -es mátrix) $\rightarrow$ Energiaimpulzus-tenzor: hogyan oszlik el az anyagok
16 egyenlet

° egyenletes anyageloszlásra ($T_{\mu\nu}$) egyszerűen megoldható

FRIEDMANN: Megoldja, Einstein leírta. F. 1922

LEMAÎTRE: Pap, szintén megoldja. 1927

mindkettőre arra jutottak, hogy statikus világegyetem nem létezhet (csak, ha üres)

Einstein nem bírja elviselni

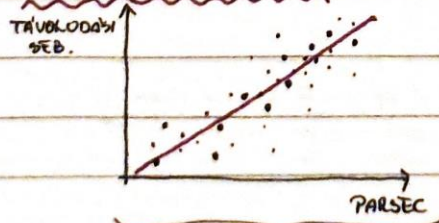
° Lemaître arra is rájön, hogy vöröseltolódással bizonyítani lehet a táguló univerzumot.

nem tudjuk, hogy a megfigyelő mozog, vagy a tér tágul csak az eltolódásból

spektroszkópiával ütközben felhők vizsgálata

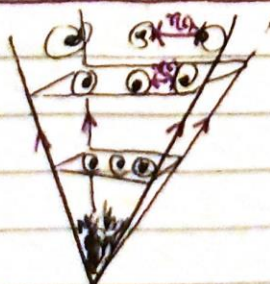
° a távolság és a vöröseltolódás között egyenes arányosság kell, hogy funcionáljon

° Edwin Hubble: 1929-ben igazolja



/távolodási sebesség a tér nyílásából származik/

Hubble-Lemaître-tör.



$$r(t) = a(t) \cdot r_0$$

skálafaktor

↓
univerzális minden galaxisra

↳ ei mozog, vagy a tér nyúlik?

a sebesség kisebb c -nél

a nyúlásnak megfelelően
távolodási sebesség nagyobb lehet
 c -nél is

a fény nem jut el hozzánk

↳ $r(t) = a(t) \cdot r_0$

ma: $a(t) = 1$

múltban: $a(t) < 1$

⋮

$t=0$ -ban (13,8 milliárd év): $a(t)=0$

minden 0 távolságra van?



ÉZT NEVEZZÜK BIG BANG-NEK

↳ kezdeti „szétválás” sebességétől függ, hogy a
tágulás lassul-e, visszaszűkít-e, még mindig tágul-e

igazából 0-ig nem tudunk eljutni, csak
a Planck-időig (10^{-42} sec)



szingularitás az ötlet

MATEMATIKAI BEVEZETÉS

$r = a \cdot r_0 \rightarrow \dot{r} = \dot{a} r_0$

$\dot{r} = \frac{\dot{a}}{a} \underbrace{a r_0}_r = \frac{\dot{a}}{a} r \rightarrow \boxed{v = H \cdot r}$

Hubble-paraméter: $H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$
Hubble-állandó: H_0

→ $\ddot{r} = \ddot{a} r_0$

$\ddot{r} = -\frac{4\pi G}{3} \rho r$ $\frac{\ddot{r}}{r} = \frac{\ddot{a} r_0}{a r_0} = \frac{\ddot{a}}{a}$ $-\frac{4\pi G}{3} \rho = \frac{\ddot{a}}{a}$

közi kiegyensúlyozás: $\boxed{\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)}$ FRIEDMANN II.

ha anyagok, van energiájuk, az hozzájárul a gravitációhoz

> ezeken a méretskálákon közelíthetjük tökéletes folyadékkal az univerzumot

$p(\rho) = \boxed{w} \rho \cdot c^2$

↓

} tökéletes folyadék esetén összefüggés a nyomás és sűrűség között

3 értéke van: 1.) $\boxed{w_m \approx 0}$

nonrelativisztikus anyagokra (barionikus)
 $m_{ny} \gg E_{kin}$ + sötét anyag is "cold dark matter"

2.) $\boxed{w_r = \frac{1}{3}}$

relativisztikus részecskékre (fotonok, grav. hullámok, neutrínók ...)
 $m_{ny} \ll E_{kin}$

a lassuló tágulás ~1 milliárd év alatt gyorsuláshoz
 "negatív nyomás"

3.) $\boxed{w_{de} < -\frac{1}{3}}$: SÖTÉT ENERGIA

$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3w\rho c^2}{c^2} \right) = -\frac{4\pi G}{3} (1+3w)\rho$
 akkor $\ominus$, ha

$w_{de} < -\frac{1}{3}$, ebbe beletartozik a sok érték, a miénk pont $\boxed{w_{de} = -1}$

↓
 Λ : KOSZMOLÓGIAI ÁLLANDÓ

Tágul az univerzum, Λ sűrűsége állandó, az anyagi és sugárzásé hígul, idővel (~1 milliárd év) a Λ sűrűsége fog dominálni.

híri kiegészítés: $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$ FRIEDMANN II.

ha anyag, van energiám, az hozzátesz a gravitációnak

> ezeken a méretskálákon közelíthetjük tökéletes folyadékkal az univerzumot (Friedmann így vette le)

$p(\rho) = w \rho \cdot c^2$

} tökéletes folyadék esetén összefüggés a nyomás és sűrűség között

3 értéke van:

1.) $w_m \approx 0$

nonrelativisztikus anyagokra (barionikus)

$m_{ny} > E_{kin.}$

+ sötét anyag is
"cold dark matter"

2.) $w_r = \frac{1}{3}$

relativisztikus részecskékre (fotonok, grav. hullámok, neutrínók ...)

$m_{ny} < E_{kin.}$

a lassuló tagulás ~1 milliárd év átmenet gyorsulásba
"negatív nyomás"

3.) $w_{DE} < -\frac{1}{3}$: SÖTÉT ENERGIA

$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3wp}{c^2} \right) = -\frac{4\pi G}{3} (1+3w)\rho$
akkor $\ominus$, ha

$w_{DE} < -\frac{1}{3}$, ebbe beletartozik a sok érték, a miénk pont $w_{DE} = -1$

Λ : KOSZMOLÓGIAI ALLANDÓ

Tárgul az univerzum, Λ sűrűsége állandó, az anyagé és ~~sűrűsége~~ ^{energia} hígul, idővel (~1 milliárd éve) a Λ sűrűsége fog dominálni.

12.03.

> ismétlés: van egy méretskála, ami felett az univerzum homogén és izotróp, mino kitüntetett hely és kitüntetett idő, az egyetlen releváns kölönhatás a gravitáció, és a tér tárgul ezen a méretskálán.

* sugárzásé

↓
 tágul; valami elindította ezt a tágulást (~13,8 milliárd éve)
 ↓
 és valami gyorsítja

(a tágulás csak galaxisok közötti méretekben van jelen)

- $r(t) = a(t) \cdot r_0$: univerzális skálafaktorral növekszik a galaxisok közötti távolság
- $v = H_{(t)} \cdot r$: Hubble-Lemaître tv.
Hubble-paraméter; ennek mai értéke H_0 , a Hubble-állandó
- $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$: II. Friedmann-egyenlet

↳ $p = w \cdot \rho \cdot c^2$

→ $w_m = 0$

anyag

→ $w_r = \frac{1}{3}$

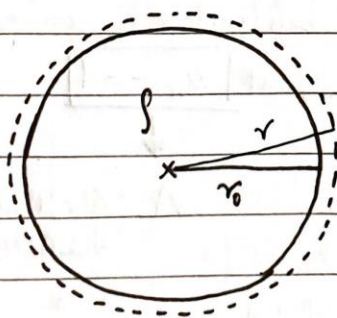
sugárzás

→ $w_{\text{ve}} = -\frac{1}{3}$

"exotikus" anyag

↓ ez ad Fr. II-ben gyorsuló tágulást
 $w_\Lambda = -1$

↳ ez a helyzet, teljesül-e az energia megmaradás?



$r = a \cdot r_0$ $dU = dK + dW$
 $d(\rho \cdot c^2 \cdot \frac{4}{3} r^3 \pi) = -p dV$

$d(\rho r^3) = -w \rho r^3 d(r^3)$ $r^3 = a^3 r_0^3$

$d(\rho a^3) = -w \rho d(a^3)$

$a^3 d\rho + 3a^2 \rho da = -3w \rho a^2 da$ $/: a^2 da$

$\frac{d\rho}{da} + \frac{3\rho}{a} = -3w \frac{\rho}{a}$

$\frac{d\rho}{da} = -3(1+w) \frac{\rho}{a}$

diff. egy. m.o. - $3a$

$d(\ln \rho) = d(\ln a^{-3(1+w)})$

$\rho = \rho_0 \cdot a^{-3(1+w)}$

° $W_m - re$:

$$\rho_m = \rho_{m0} \cdot a^{-3(1+0)} = \rho_{m0} \cdot a^{-3}$$

→ térfogat növelésével hígul az anyag
($\rho = \frac{M}{V} \rightarrow \frac{N \cdot m_0}{V_0 \cdot a^3}$)

° $W_r - re$:

$$\rho_r = \rho_{r0} \cdot a^{-3(1+\frac{1}{3})} = \rho_{r0} \cdot a^{-4}$$

→ hígul a tömegsűrűsége, és nyúlik a fotonok hullámhossza

$$\rho = \frac{E}{V} = \frac{N \cdot \frac{h}{\lambda}}{V_0 \cdot a^3} = \frac{N \cdot \frac{h}{\lambda_0 a}}{V_0 \cdot a^3}$$

° $W_\Lambda - ra$:

$$\rho_\Lambda = \rho_{\Lambda 0} \cdot a^{-3(1-1)} = \rho_{\Lambda 0}$$

→ nem változik a kezdetek óta

ρ_r hígul a leggyorsabban, majd hígul a ρ_m is,
és ma már a ρ_Λ dominál



ezért vagyunk ma már
gyorsulva táguló univerzumban

volt egy korai szakasz, amikor a ρ_r dominált
a tágulásban

SUGÁRZÁS DOMINÁLT → ANYAG DOMINÁLT → Λ DOMINÁLT
KORSZAK KORSZAK KORSZAK

a másik kettő elhanyagolható,
hőnyű kiszámolni

az átmeneteket nehéz
leírni (ma ez van)

3-400.000 év → 12,5 milliárd év → 1 milliárd év

FRIEDMANN I.:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (1+3w)\rho$$

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_m + M_r + M_\Lambda}{V} = \rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \sum_{i=1}^3 (1+3w_i)\rho_i$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3} (1+3w) \rho_0 \cdot a^{-3(1+w)}$$

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3} (1+3w) \rho_0 \cdot a^{-3(1+w)+1}$$

$$\ddot{a} = \frac{d\dot{a}}{dt}$$

$$= \frac{d\dot{a}}{da} \cdot \frac{da}{dt}$$

$$= \frac{d\dot{a}}{a} \cdot \dot{a} = \frac{d}{da} \left(\frac{1}{2} \dot{a}^2 \right)$$

$$\frac{d}{da} \left(\frac{1}{2} \dot{a}^2 \right) = \frac{-4\pi G}{3} (1+3w) \rho_0 \cdot a^{-3(1+w)+1} \quad | \int da$$

$$\frac{1}{2} \dot{a}^2 = -\frac{4\pi G}{3} (1+3w) \rho_0 \cdot \frac{a^{-3(1+w)+2}}{-3(1+w)+2}$$

$$- \frac{kc^2}{a^2} \quad | \cdot 2, \frac{1}{a^2}$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 - \frac{kc^2}{a^2}$$

$$\boxed{\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 - \frac{kc^2}{a^2}}$$

FRIEDMAN I.

- k : „göbületi paraméter” a tér geometriáját írja le; a göbületnek topológiai okokból mindenhol ugyanannyinak kell lennie (lokálisan változó persze)

- végzetlen kiterjedés:
- ↳ $k=0$: euklideszi tér $\Delta: 180^\circ$
 - ↳ $k<0$: 4D-be ágyazott 3D-s hiperboloid $\Delta: <180^\circ$
 - ↳ $k>0$: gömbi geometria (mint ha 4D-s gömb 3D-s felülete lenne) $\Delta: >180^\circ$
- ↳ határtalan, de véges térfogatú

↓
mivel $k \neq 0$

↳ $\frac{kc^2}{a^2}$ elhanyagolhatóan kicsi lesz

$$\circ \underline{a(t), \rho(t), p(t) = ?}$$

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

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

$$\text{dimenziótlan } \textcircled{1} = \frac{8\pi G}{3H^2} \rho - \frac{kc^2}{a^2 H^2}$$

↳ $\frac{3H^2}{8\pi G}$ dimenziótlan, legyen „kritikus sűrűség”

$$\rho_{c0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

$$1 = \frac{\rho}{\rho_c} - \frac{kc^2}{a^2 H^2}$$

Ω : „sűrűség paraméter”

$$\frac{\rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda}{\rho_c} = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda$$

és vezetünk meg be $\Omega_k = -\frac{hc^2}{a^2 H^2}$

$1 = \Omega + \Omega_k$

$\Omega_k = 1 - \Omega$ Friedmann I. egyenlet egyeztetése

mai értéke $\Omega_{k0} = -\frac{hc^2}{1 \cdot H_0^2} \Rightarrow \frac{\Omega_k}{\Omega_{k0}} = \frac{-\frac{hc^2}{a^2 H^2}}{-\frac{hc^2}{H_0^2}} = \frac{H_0^2}{H^2} \cdot a^{-2} \Rightarrow \Omega_k = \Omega_{k0} \frac{H_0^2}{H^2} a^{-2}$

valamint:

$$\Omega_m = \Omega_{m0} \frac{H_0^2}{H^2} a^{-3}$$

$$\Omega_r = \Omega_{r0} \frac{H_0^2}{H^2} a^{-4}$$

$$\Omega_\Lambda = \Omega_{\Lambda 0} \frac{H_0^2}{H^2} a^0$$

ma de newton-típus: $H^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_m + \rho_r + \rho_\Lambda) - \frac{hc^2}{a^2}$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3 H_0^2} H_0^2 (\rho_{m0} a^{-3} + \rho_{r0} a^{-4} + \rho_{\Lambda 0}) - \frac{hc^2}{a^2 H_0^2} H_0^2$$

$$H^2 = H_0^2 (\Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{k0} a^{-2})$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 (\Omega_{m0} a^{-3} + \Omega_{r0} a^{-4} + \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{k0} a^{-2}) \quad | \cdot a^2$$

$$\dot{a}^2 = H_0^2 (\Omega_{m0} a^{-1} + \Omega_{r0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda 0} a^2 + 1 - \Omega_{m0} - \Omega_{r0} - \Omega_{\Lambda 0})$$

$$\frac{da}{dt} = \pm H_0 \sqrt{\Omega_{m0} a^{-1} + \Omega_{r0} a^{-2} + \Omega_{\Lambda 0} a^2 + 1 - \Omega_{m0} - \Omega_{r0} - \Omega_{\Lambda 0}}$$

a tárgyalás megoldás, de az ~~összeállítás~~ az, megkérdezzük egy más ~~tükrözöttjei~~

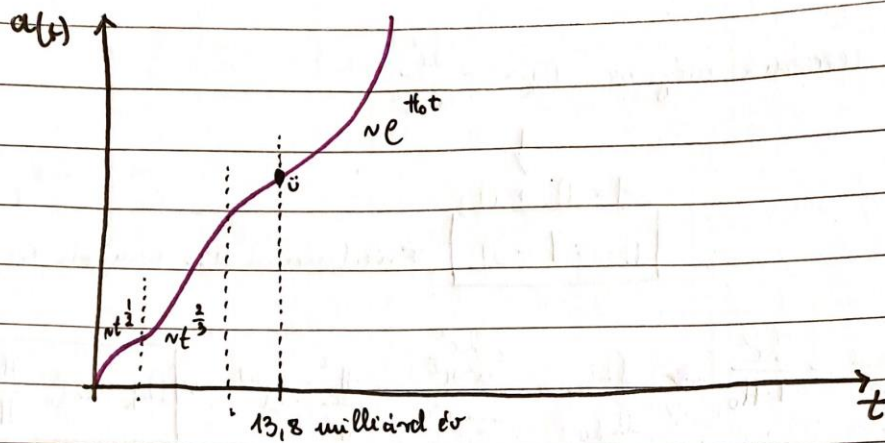
$dt = \frac{da}{H_0 \sqrt{\text{funkció}}} = \frac{da}{H_0 f(a)}$ $\hookrightarrow a$ -nak függvénye

$\int dt = \int \frac{1}{H_0 f(a)} da$
 $t = \int \frac{1}{H_0 f(a)} da$ } analitikusan nem oldható meg könnyen és pontosan
 $t = t(a)$
 $\hookrightarrow$ megkapjuk $a(t)$

pl.: ha $k=0$, és a megadott Ω_k
 univerzum $\rightarrow$ $da = \text{minden van}$
 analitikusan $m.o. - a$

$$t = \int \frac{1}{H_0 \sqrt{\Omega_{m0} a^{-1}}} da$$

$m: a(t) \propto t^{\frac{2}{3}}$
 $r: a(t) \propto t^{\frac{1}{2}}$
 $\Lambda: a(t) \propto e^{H_0 t}$



VIZSGAID: 7 AN. 10., 10⁰⁰, 8 feladat (4 Werner, 2 Kósi's, 2 Raffai), papír + toll

ISMETLÉS:

• $r(t) = a(t) \cdot r_0$

↳ univerzális, dimenziólan szorzófaktor (mai értéket 1-nek vesszük)

$a(t)$ függvényét, ha ismerjük, megmondhatjuk, hogy hogyan és fejlődött az univerzum

• FRIEDMANN I: $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G}{3} H_0^2 a^2 \left(\rho_{m,0} \bar{a}^{-3} + \rho_{r,0} \bar{a}^{-4} + \rho_{\Lambda,0} + \rho_{k,0} \bar{a}^{-2} \right)$$

$\dot{a} = H_0 \cdot a \sqrt{\Omega_{m,0} \bar{a}^{-3} + \Omega_{r,0} \bar{a}^{-4} + \Omega_{\Lambda,0} + (1 - \Omega_{m,0} - \Omega_{r,0} - \Omega_{\Lambda,0}) \bar{a}^{-2}} = \frac{da}{dt}$

jelölhető $\bar{t}(a)$ -val

$dt = \frac{1}{H_0} \frac{da}{a \cdot \bar{t}(a)}$ ← azóta mennyi idő telt el az adott a' értékeig

$t = \frac{1}{H_0} \int_0^a \frac{da'}{a' \bar{t}(a')} = \frac{1}{H_0} \int_0^a \frac{da'}{a' \bar{t}(a')} = \bar{t}(a)$

„Hubble-idő”: T_H

Univerzum kora az a' függvényében

de mi az $a(t)$ -t kereszük: invertálni kell

→ ehhez kellene: $H_0, \Omega_{m,0}, \Omega_{r,0} \dots$ értékek, ezeket hogyan mérjük meg?

Planck-műhold kimérte őket:

$\Omega_{m,0} \approx 0,3$

$\Omega_{r,0} \approx 0,7$

$\Omega_{\Lambda,0} \approx 3 \cdot 10^{-5}$

$\Omega_{k,0} \approx 0$ és $k \approx 0$

látszik, hogy ma már ő dominál

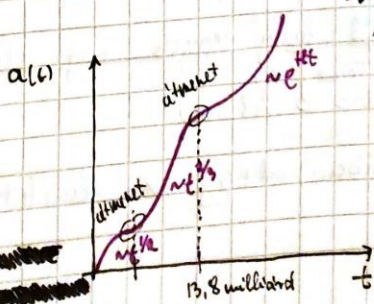
$(1 - \Omega_{m,0} - \Omega_{r,0} - \Omega_{\Lambda,0})$ tag ≈ 0 : elhagyható az integrálból

↳ ki integrálható numerikusan az egyes korok meghatározására:

$a(t) \sim t^{\frac{1}{2}}$: sugárzásdominált, 3-400 000 év

$a(t) \sim t^{\frac{2}{3}}$: anyagdominált, 13 milliárd év

$a(t) \sim e^{H_0 t}$: kozm. állandó dominált, a maradék



↳ a törtélelem oroszlámésze anyagdominált



mellesleg itt a meghatározó anyag a
rötekt anyag

- Univerzum teljes életkora ugyancsak az integrállal kiszámolható:

$$T = T_H \int_0^1 \frac{da'}{a' \cdot E(a')} \approx 13,8 \text{ milliárd év}$$

- „look-back time”: mennyivel korábbi képet látunk az univerzumban?

$$t_{lb} = T - t = T_H \int_0^1 \frac{da'}{a' \cdot E(a')} - T_H \int_0^a \frac{da'}{a' \cdot E(a')} = T_H \int_a^1 \frac{da'}{a' \cdot E(a')}$$

péld: nézünk egy galaxist, valahogy kiismerem az a' -ját,
milyen régi az a kép?

BIG BANG

- matekból kijön, de kellene megfigyeléses alátámasztás
- 10^{-42} mp-ig lehetünk vissza, addig működik az elmélet

① Az Univerzum tágul

- vöröseltolódott színkép + Hubble-Lemaître törvény

$$v = H \cdot r$$

② CMB

- nem is mikrohullám, hanem cm-es rádióhullám amúgy
- az első fotonok hullámhossza megnagyobbult és „lehűlt” az
(400.000 év kb.)

évmilliárdok alatt, lecsökken az energiájuk

- ionizált hidrogén (plazma): átlátszatlan kezdetben, majd
hialakul a semleges, átlátszó hidrogén (REKOMBINÁCIÓ)

↓
egy adott átlagos energia szinten történik,
elindulnak a fotonok, feketetest-spektрумot
mutatva

- elmélet szerint kb. 3 K körül kell, hogy legyen egy ilyen
feketetest-spektрум → ES MEG IS TALÁLTÁK
(Penzias & Wilson)

- létezik, és megfogható olyan formában, ahogy az elmélet
megjósolta

③ Big Bang nukleoszintézis eredménye
 • kezdetben a nagy energiák miatt nem tudtak összetekni atommagok kialakulni

• van egy-egy hőmérséklet, egy-egy atommaghoz, ami után/által már képesek kialakulni
 ↓
 de közben hígul az anyag
 } mire eléri a hőmérséklet, már nincs annyi proton és neutron egymás közelében, hogy összetekeljenek atommagok ki képződésük alakulni

• ez alapján a barionikus anyag 75%-a H, 25% He, <1% nehezebb elem
 kellene, hogy legyen az elmélet szerint

↓
 ezt meg lehet mérni, és valóban ez a helyzet
 ("a kezdeti anyagokhoz alig van olyan közel az anyagteremtő folyamatok a 13,8 milliárd év alatt")

• ①: Big Bang igaz a jelenre; ②: Big Bang igaz az első 400 000 évre;

• ③: BB igaz az első 3 percre is

↓
 10^{-42} mp-ig (Planck-idő) működik

• problémái: (nyitott kérdések)

① Simaság problémája

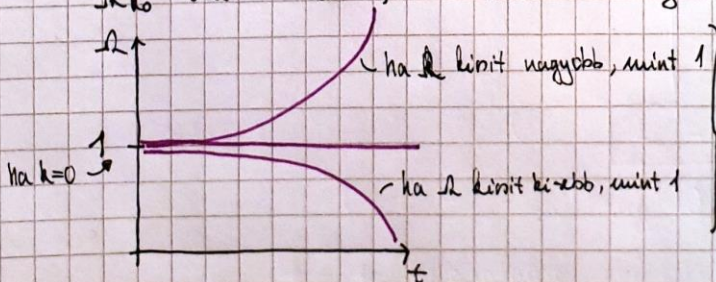
• Ω_{k0} miért 0? $\Omega_{k0} = -\frac{kc^2}{H_0^2}$, vagyis a $k=0$, de miért?

$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{a^2 H_0^2} = 1 - \Omega \rightarrow \Omega_{k0} = 1 - \Omega_0 = -\frac{kc^2}{H_0^2}$$

$$1 - \Omega = -\frac{kc^2}{a^2}$$

ha $k \neq 0$: $|1 - \Omega|$ növekedne

• Ω_{k0} ma $\approx 0 \pm 0,01 \rightarrow t=0$ -ban még inkább 0-hoz közelít



kérdésnél nagyon pontosan 1 kell, hogy legyen

FINOMHANGOLÁSI PROBLÉMA

② Horizont probléma

• CMB-n 10^{-5} K-es hőingadozások: nagyon aprók

• de az univerzum egyik fele soha nem találkozott egyúttal "kínál sokkal egymás horizontján"

③ Struktúra eredetének problémája

- hogyan eredhet az apró inhomogenitások?
- és miért pont ekkorak?

◦ 3 magyarázatra: **KÖZMIKUS INFLACIÓ**

> $10^{-36} - 10^{-32}$ mp-ig nagyon hirtelen exponenciálisan "felfújódott" az univerzum

↓
egy kozmológiai állandó dominálta a tágulást

①: > a megnö: h nagyon kicsi

②: > találkoznak, kiegyenlítődnek, az exp. tágulás időtartama őket

③: > exp. tágulás előtt még kvantummechanikai tulajdonságok voltak
kvantumfluktuációk $\xrightarrow[\text{tágulás}]{\text{hirtelen}}$ makroszkopikus fluktuációk

megmagyarázza, de vannak problémái is

> volt egy $\hookrightarrow$ kvantumfluktuációk $\rightarrow$ gravitációs hullámok CMB-hoz hasonló háttérre alakul ki (nem találják)
"inflaton - mező"

skalármező, ahol az elektromos-gyenge-erős k.h.-ok egybe vannak $\rightarrow$ kozmológiai állandóként viselkedik ez az egzotikus anyag, 10^{-32} mp-nél lebomlik a mező

> lehet, hogy nem jó megoldás, de legalább egybe gyúrta a 3 problémát

["Mi az inflaton - mező?"]