

# Kozmológia a modern korban

A csillagászat története 2., 2015. május 8.



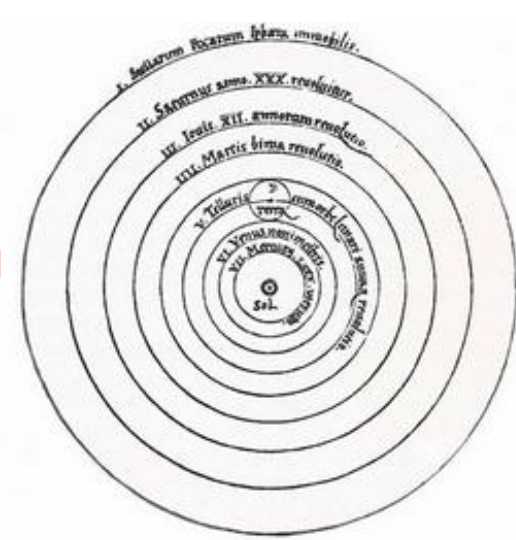
$$\begin{aligned}
 R_{\eta\eta} = & -\frac{2a^2 \frac{\partial \psi}{\partial t} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{2ac \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta \psi} + \frac{a \frac{\partial c}{\partial \eta} \cot \theta}{\delta} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \cot \theta}{2\delta} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} \cot \theta}{2\delta} - \frac{2a^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2}}{\delta \psi} \\
 & - \frac{2a^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial t}\right)^2}{\delta \psi^2} + \frac{4ac \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi^2} - \frac{a^2 \frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta d \psi} + \frac{ac \frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta d \psi} + \frac{2a \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} \\
 & - \frac{3a \frac{\partial a}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} - \frac{2a^2 c \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} + \frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b c \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} + \frac{a^3 \frac{\partial b}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} \\
 & + \frac{a^2 \frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} - \frac{2ab \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2}}{\delta \psi} - \frac{2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2}}{\psi} + \frac{4ac \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta \partial t}}{\delta \psi} - \frac{2ab \left(\frac{\partial c}{\partial \eta}\right)^2}{\delta \psi^2} + \frac{6 \left(\frac{\partial \psi}{\partial \eta}\right)^2}{\psi^2} \\
 & + \frac{ac \frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta d \psi} - \frac{ab \frac{\partial d}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta d \psi} - \frac{2c \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} - \frac{2a \frac{\partial b}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta \psi} \\
 & + \frac{2a^2 b \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} - \frac{2abc \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} - \frac{a^2 \frac{\partial b}{\partial \eta} c \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b c \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} + \frac{a^2 b \frac{\partial b}{\partial \eta} \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} + \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} b^2 \frac{\partial \psi}{\partial t}}{\delta^2 \psi} \\
 & + \frac{a \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \eta}}{2\delta d} - \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \frac{\partial d}{\partial \eta}}{4\delta d} - \frac{a \frac{\partial a}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \eta}}{4\delta d} - \frac{\delta^2 d}{2d} + \frac{\left(\frac{\partial d}{\partial \eta}\right)^2}{4d^2} - \frac{c \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial d}{\partial \eta}}{2\delta d} \\
 & + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} c \frac{\partial d}{\partial \eta}}{4\delta d} + \frac{\frac{\partial a}{\partial \eta} b \frac{\partial d}{\partial \eta}}{4\delta d} + \frac{a \frac{\partial^2 c}{\partial \eta \partial \eta}}{\delta} - \frac{a \frac{\partial^2 b}{\partial \eta^2}}{2\delta} - \frac{a \frac{\partial^2 a}{\partial \eta^2}}{2\delta} + \frac{ac \frac{\partial c}{\partial \eta} \frac{\partial c}{\partial \eta}}{\delta^2}
 \end{aligned}$$

# Kozmológia és tudomány

- „Kozmosz”: rend, rendszeresség, szépség (lásd kozmetika)  
→ a világ racionális berendezettsége (vs. khaosz)
- 20. sz. előtt a „kozmológia” szó ritkán fordul elő tudományos kontextusban
  - filozófia, teológia, mitológiák, világképek, stb.
  - a csillagászok előszeretettel kerülték a témát
- a 20. sz. közepe előtt ez nem számított önálló tudományos területnek  
→ több korábbi, részben független terület összeolvasztása:
  - kozmográfia: az univerzum rendjének, általános szerkezetének leírása
  - kozmogónia: az univerzum eredetének, keletkezésének vizsgálata
  - kozmofizika: a világ egészének fizikai elveken nyugvó vizsgálata
- ma: önálló tudományos terület, szoros kapcsolatban számos tudományággal (csillagászat, részecskefizika, relativitáselmélet, stb.)
  - mindamellett a legnépszerűbb tudományág: széles közönség érdeklődése és figyelme



## A geometriai paradigma (i.e. 4. sz. – i.sz. 17. sz.)



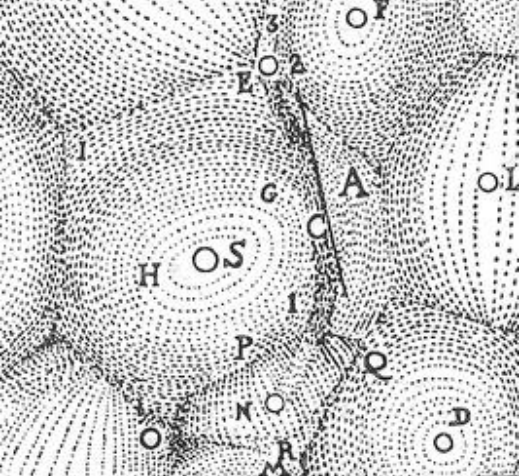
- a világ szerkezete geometriai természetű, leírására a geometria szolgál (Platón)
- véges gömb, koncentrikus bolygószférákkal és lezáró csillagréteggel (Eudoxosz)
- időben statikus (Arisztotelész) – ahogy a geometria is (leszámítva: Teremtés)

### Földközéppontú: görög-arab-skolasztikus paradigma

- két régió: Hold feletti és Hold alatti (Arisztotelész)
- a keskeny (Arisztotelész) vagy vastag (Ptolemaiosz) szférák egymásra simulnak
- tipikus átmérő:  $2400 R_F$  (Arkhimédész) –  $40\,000 R_F$  (Ptolemaiosz)

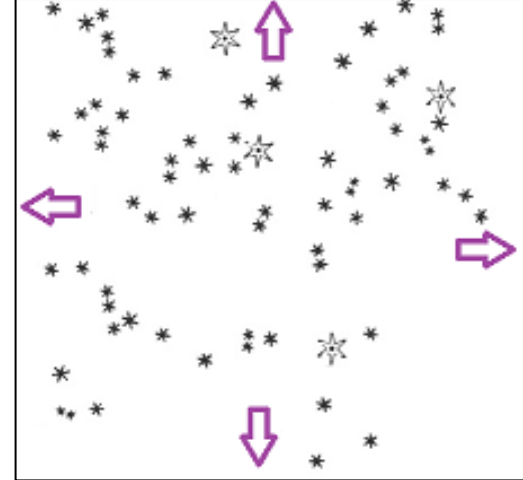
### Napközéppontú: kopernikuszi paradigma (Arisztarkhosz, Kopernikusz, Kepler (??))

- nem egyetlen fizikai középpont (Nap → bolygók, Föld → Hold)
- a szférák közt jelentős hézagok, melyek geometriailag magyarázhatók
- tipikus átmérő:  $64\,800 R_F$  (Arisztarkhosz) –  $< \infty$  (Kepler)



# A mechanikai paradigma (17-19. sz.)

a kozmosz mozgásban lévő anyag  
→ szintén geometriai leírás



- karteziánus (Descartes)
  - anyag és kiterjedés ugyanaz, tér és anyag végtelen
  - a dolgok különbségei nem az anyag, hanem a mozgások különbségei
  - egyetemes törvények irányítják, és szükségszerűen olyan, amilyen
- newtoniánus (Newton)
  - matematikai formájú törvények → a jelenségek magyarázhatók, előrejelezhetők, uralhatók
  - tér és anyag elkülönül: a tér (szükségszerűen  $\infty$ ) jórészt űr
  - Newton: a világ folyton romlik → Istennek szüntelenül fenn kell tartania
    - érv az időben végtelen univerzum ellen: előbb-utóbb szétesik
  - (Leibniz: a világ önfenntartó → a beindítás után nem kell beavatkozni)
  - Newton: időben statikus ↔ Kant, Herschel, stb.: (lokális) fejlődés

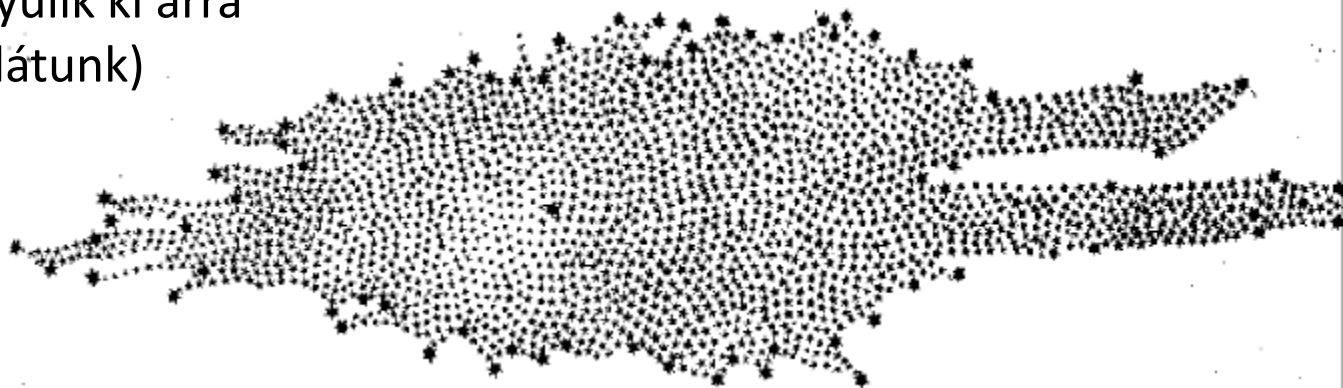
# Problémák a newtoni paradigmában

- gravitációs paradoxon: ha minden vonz mindent, össze kellene esnie
  - Newton: végtelen tér  $\rightarrow$  mindenre mindenhol egyforma erő hat  $\leftrightarrow$  ez így instabil: Istennek fenn kell tartani az összehangoltságot
  - 18-19. sz.: ez gyakran érv a végtelen múlt ellen: *még* nem esett össze
  - mások: ötletek a stabilizálásra
    - 1895, Hugo von Seeliger: nagy távolságokon a Newton-törvény nem érvényes 
$$F(r) = \frac{GmM}{r^2} e^{-\Lambda r}$$
    - William Thomson (Kelvin): hasonló módosítások
    - Richard Proctor, 1870: nem homogén anyageloszlás  $\rightarrow$  hierarchikus struktúrák: ha elég gyorsan csökken a sűrűség kifelé, stabil tud maradni
- Olbers-paradoxon: ha  $\infty$  sok csillag, az égboltnak mindenütt ragyognia kell
  - megoldások (pl. H. W. Olbers, 1826): a világűr kissé elnyelő közeg  $\leftrightarrow$  J. Herschel: ekkor felfűtené a csillagfény a közeget, ami világítana
  - mások: standard érv a tér végeisége mellett
  - vagy az idő végeisége mellett: még nem ért ide a fény (Mädler, 1858)
  - mások: nem-euklideszi tér (pozitív görbület) (Zöllner, 1872)

- A termodinamika második főtétele (TD2)
  - 1850 körül, Rudolf Clausius → 1865: entrópia
  - a folyamatoknak van iránya (Thomson: a mechanikai energia disszipál)
  - a világegyetemnek valamikor kezdődnie kellett
    - népszerű érv a Teremtés-történet mellett (Maxwell, Tait)
      - Arthus Haas, 1911: a radioaktív elemek jelenléte is véges múltra utal
  - és valamikor végződnie kell: hőhalál (Clausius, Helmholtz)
    - ↔ lehetséges ellenérvek:
      - ismeretlen entrópia-csökkentő folyamatok, pl. sugárzási energiatranszfer
        - ↔ Henri Poincaré: arra is működik TD2
      - a TD2 statisztikai értelmezése (Ludwig Boltzmann, 1895): végtelen hőhalál-univerzumban véges fluktuációk ideiglenesen, majd helyreáll a „rend”
      - az univerzum egészére nem érvényes a TD2
        - mert végtelenül sok anyag (William Thomson)
        - vagy mert az egészre (ami nem objektum) nem mondhatók olyanok, mint a részeire (Ernst Mach)

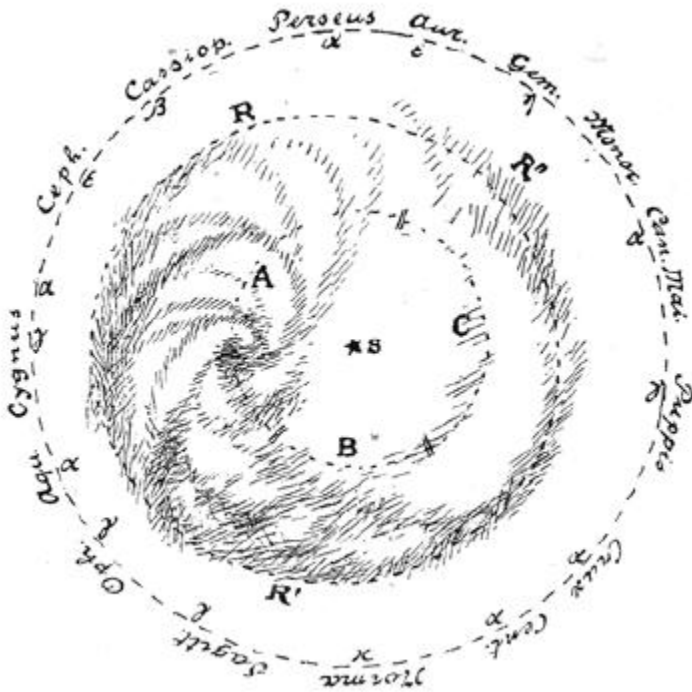
# A Tejút dimenziói

- OK, a tér végtelen, de miért van benne egy nagy, véges struktúra?
- W. Herschel: statisztikai vizsgálatok: minél több egy csillag adott irányban, annál messzebb nyúlik ki arra (minden csillagot látunk)



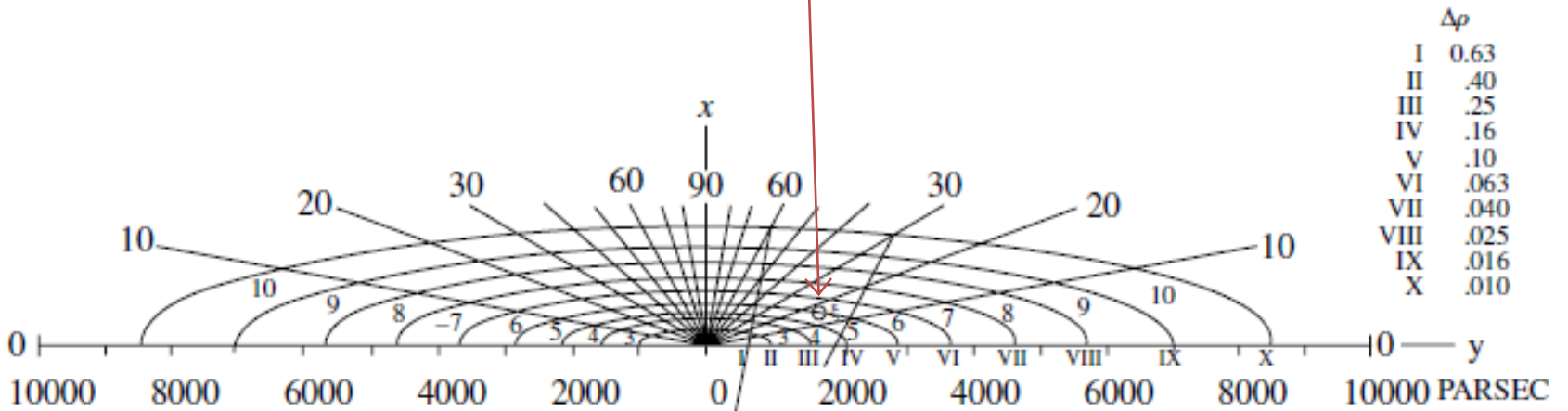
- Jacobus C. Kapteyn, Hugo von Seeliger: nagy statisztikai vizsgálatok látszó fényességek alapján
  - Seeliger, 1920: 33 000 fényév széles és 3900 vastag lapos korong
  - Kapteyn, 1920: sajátmozgások is → két független áramlat
    - 59 000 fényév széles és 7800 vastag
      - 1922: a Nap nem a kp-van van: 2000 fényévre (addig főleg a kp-ba tették)

⇒ ez lenne maga az egész univerzum?



← Cornelis Easton rajza a Tejútról (1900):  
a spirálkarok még látszanak, de a Nap  
van a középpontban

Kapteyn Tejútjának végső változata (1922):  
a Nap a kp-ból kimozdítva

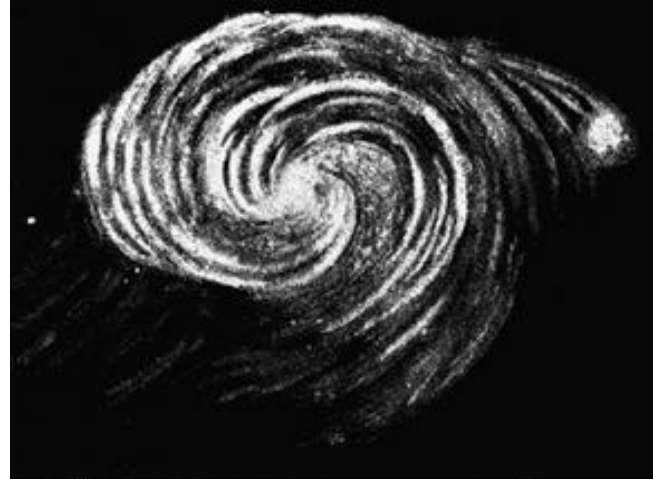




# A spirálködök

- első: William Parsons, 1845 (M51)
    - a kor legnagyobb távcsövével („a Parsonstown-i Leviatán”)
  - hamarosan sok ilyen + folytonos spektrum: vagy csillaghalmazok, vagy fényszóró gázfelhők
- szigetuniverzumok-e? (W. Herschel)

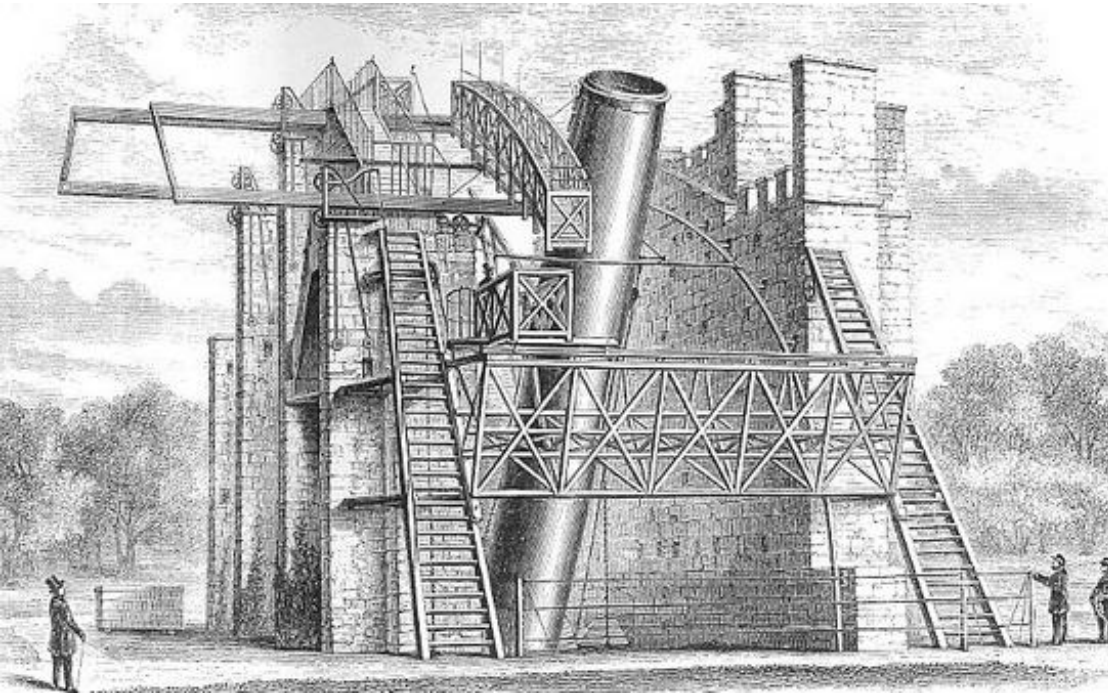
M51



M101



M99

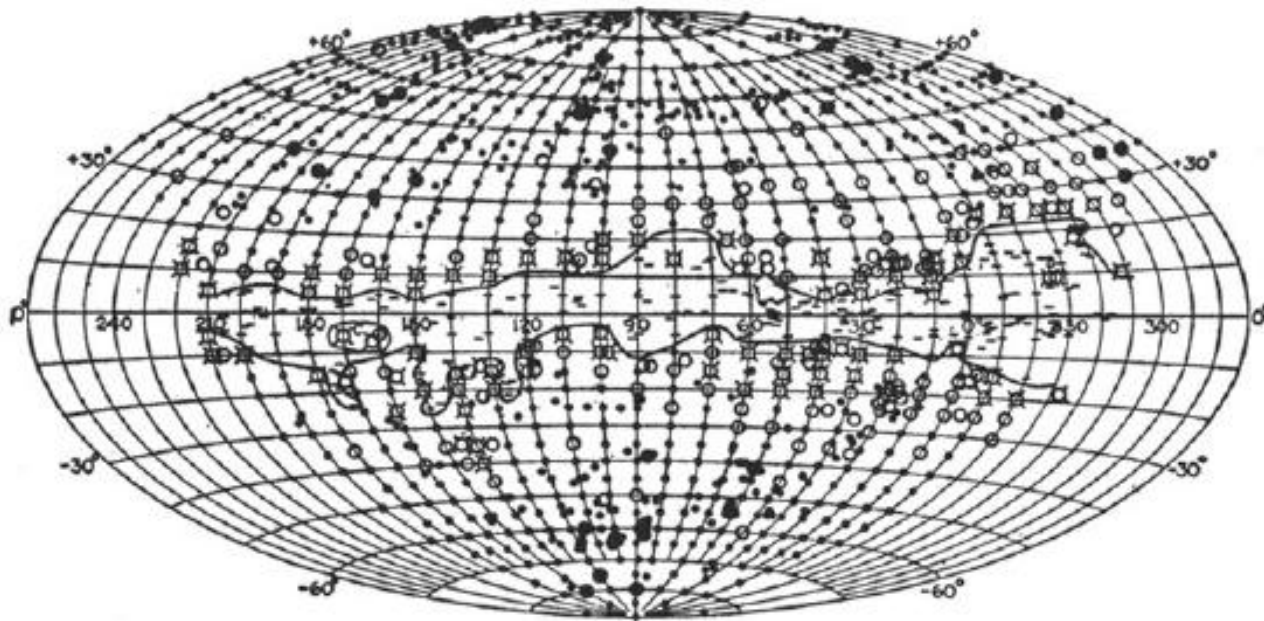


# „Nagy Vita” a kozmológiában (1920. ápr. 26, Washington)

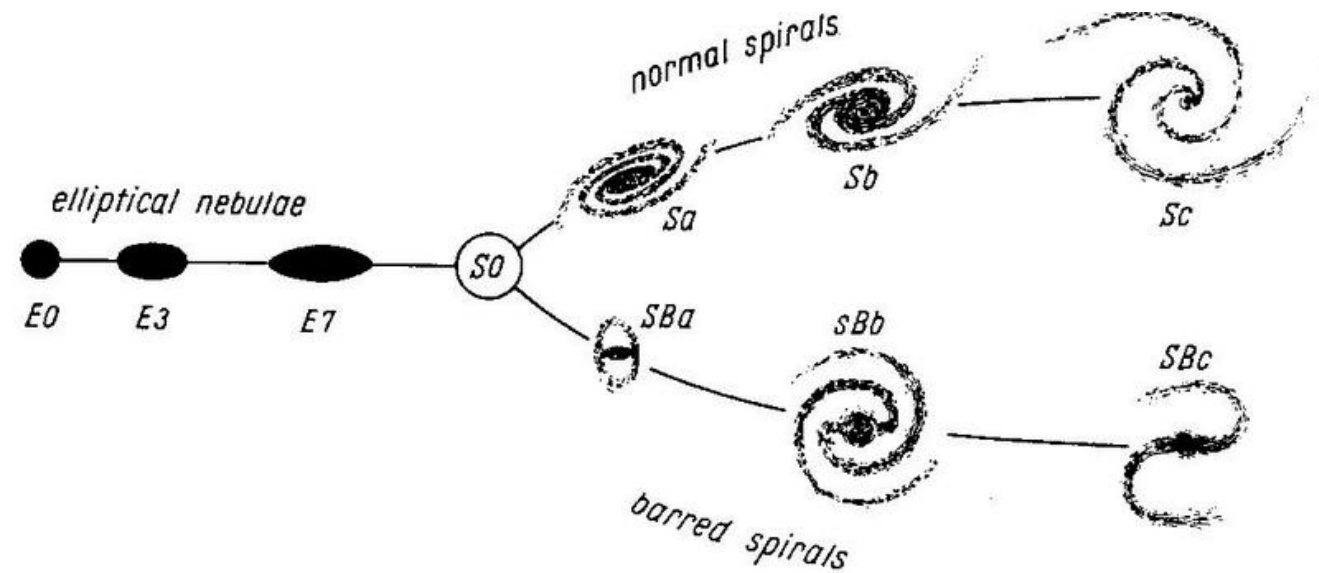
- A spirálködök a Tejút részei: Harlow Shapley
  - 1900 körül az uralkodó álláspont → Eddington, Russell, Hale támogatja
  - jóval több látható a Tejút síkjától távol, mint a síkban → egyetlen struktúra
  - 1885, Nova S Andromedae: ha a Tejúton kívül, nevetségesen fényes lenne
  - 1916, Adriaan van Maanen: M101 forgássebessége → ha a Tejúton kívül, akkor fénysebességnél nagyobb [↔ később: erősen pontatlan mérés]
  - 1917, Shapley, gömbhalmazok vizsgálata: hatalmas gömbhéj a Tejút körül → 300 000 f.é. széles, a Nap 65 000 f.é-re a kp-tól → túl hatalmas...
- A spirálködök a Tejúton kívül vannak: Heber Curtis
  - 1904, J.F. Hartmann: csillagközi anyag → elnyelés miatt anizotróp eloszlás
  - 1917, Curtis: a normál nóvák (4) az Androméda-ködben 10 mag-val halványabbak az 1885-ösnél, vagyis az tényleg nevetségesen fényes volt
  - nagy szórás a spirálködök méretében → ha nagyságrendileg egyformák, akkor nem alkothatnak egy burkot a Tejút határán (mint a gömbhalmazok)
- a vitát nagy figyelem övezi, de nem sikerül dűlőre jutni a kérdésben

# Válasz a kérdésre

- 1923, Edwin **Hubble**: cefeidák mérése spirálködökben: „döntő bizonyíték”  
→ nagyon messze! (szerinte 930 000 f.é.)
- sőt: 30-as évek elejére galaxishalmazokat is azonosítanak, és távolságokat mérnek (cefeidák → legfényesebb csillagok → teljes galaxis intenzitása)  
→ hatalmas struktúrák egy hatalmas világegyetemben
- probléma: messze túl alacsony távolság-bebecslések → úgy tűnik, mintha a Tejút jóval nagyobb lenne a többi galaxisnál (esetleg egy galaxis-halmaz?)
  - pontosítások később: csillagközi elnyelés figyelembe vétele, más galaxisok gömbhalmazainak felfedezése, fényérzékenyebb fotók, cefeidák fajtáinak megkülönböztetése\*, stb.
- 1952, Walter Baade: az extragalaxisokban mért központi cefeidák (II. pop., vörös) 1,5 mag-val halványabbak, mint a spirálkarok cefeidái (I. pop., kék)  
→ az eddigi módszer (a Tejút gömbhalmazainak cefeidáit (II. pop.) összevetni a galaxisok spirálkarjainak cefeidáival (I. pop.) hibás  
→ a galaxisok kétszer olyan messze vannak, mint gondolták



Hubble:  
a galaxisok eloszlása  
(1934)



Hubble:  
a galaxisok típusai  
(1936)

# Mindeközben a fizikában...

- 1905, Albert Einstein: speciális relativitáselmélet
  - téridő-kontinuum: Eukleidész távolság-fogalmának 4D általánosítása

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

- 1907-8, Hermann Minkowski: Einstein egyenleteinek szimmetrikus általánosítása (sík Minkowski-tér)
- görbült-e a tér?
  - nemeuklideszi terek: Gauss, Lobacsevszkij, Bolyai (1830-as évek)  
+ 1854, Bernhard Riemann: általános matematikai modell
  - 1900, Karl Schwarzschild: empirikus kérdés:  $\Delta \angle$ -einek  $\Sigma$ -e = ?
  - Henri Poincaré: ha a tér görbül, a mérőeszközök is görbülnek  
→ nem empirikus kérdés, lehetetlen kimérni
  - **Einstein**, 1915: görbült téridő  
→ 1917: alkalmazás a kozmológiára (téregyenletek)

# A relativisztikus fizika színre lép

1915-16: általános relativitáselmélet (ÁRE)

- nehéz konceptuálisan: órák gravitációs lassulása, gyorsuló és gravitációs terek ekvivalenciája, a gravitáció elhajlítja a fényt...
- kemény, szokatlan matek: differenciálgeometria, tenzoranalízis
- korai bizonyítékok:
  - 1915: Einstein levezeti a Merkúr perihélium-mozgását: magyaráz egy már ismert és régóta kutatott anomáliát
  - megjósolja a napkorong-súroló fénysugár elhajlását ( $1,7''$ ): új jelenséget jelez előre
    - 1919, Frank Dyson, Arthur Eddington: napfogyatkozásor igazolják  
→ ekkor válik közismertté tudományon belül és kívül is
  - 1924, Eddington: kimutatja a Szíriusz B gravitációs vöröseltolódását (fehér törpe):  $20 \text{ km/s}$ -t számol,  $21 \text{ km/s}$ -t mérnek (Walter Adams)

(→ ÁRE a csillagászzal szorosan összefügg, másutt nem túl releváns...)

# Az Einstein-de Sitter relativisztikus univerzum

- Az Einstein-féle téregyenlet általánosan az egész univerzumra:  
(Einstein és Willem de Sitter, 1917)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}$$

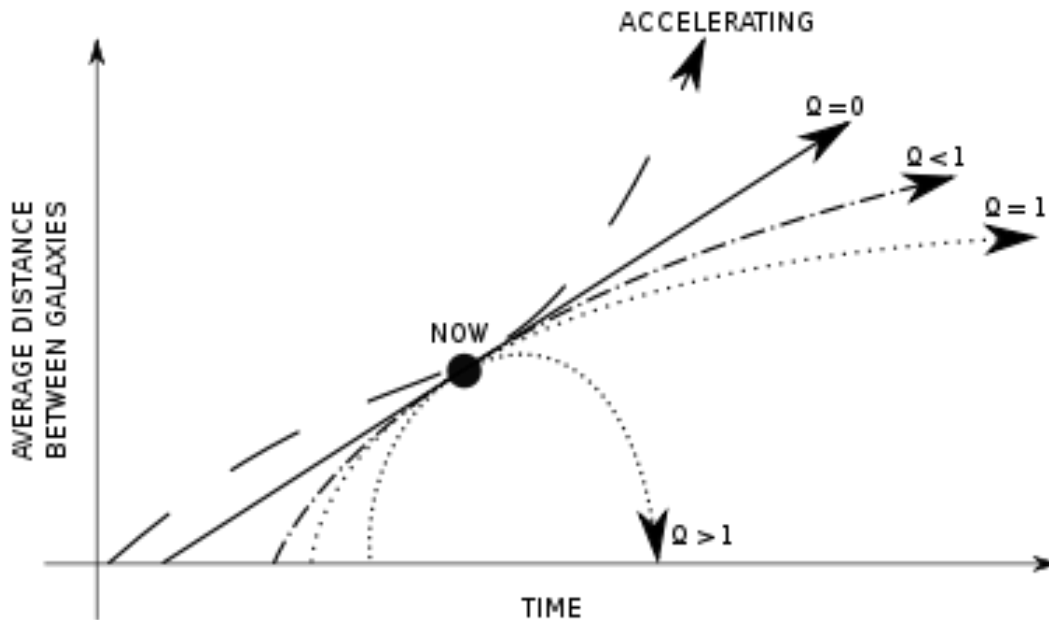
$R_{\mu\nu}$	: görbületi tenzor
$g_{\mu\nu}$	: metrikus tenzor
$T_{\mu\nu}$	: energia-impulzus tenzor
$R$	: skalár görbület
$\Lambda$	: kozmológiai konstans
$\kappa$	: fizikai állandókból ( $G, c$ )

- Az eredeti egyenlet nem tartalmazza  $\Lambda$ -s tagot
  - ekkor viszont nem statikus a tér
    - ez elfogadhatatlan → *ad hoc* bevezetett taggal lehet stabilizálni
  - bal oldalon szerepel: a tér tulajdonsága, nem az anyagé
  - (Einstein később: „életem legnagyobb butasága”)
- Az anyag sűrűsége határozza meg a tér görbületét
- 1917, de Sitter: megoldás üres (anyag nélküli) térre → egyre gyorsulva tágul
  - Einstein nem fogadja el: csak anyag határozhatja meg a teret (Mach-elv)
  - a tágulás elején szingularitás van → értelmetlen
  - meg persze a térnek nyilván statikusnak kell lennie...
  - (bár még van  $\Lambda$ , de ez a későbbi dinamikus modellek alapja)

# Első dinamikus megoldások

- 1922, Alexander Friedmann: az egyenletek első dinamikus megoldásai
  - táguló megoldások + oszcilláló megoldások (szférikus),  $\Lambda$  nélkül
  - 1924: hiperbolikus modellek: állandó negatív görbület
  - pusztán matematikai érdeklődés: nem vonatkoztatja a való világra
  - 1925-ben meghal + oroszul publikált → csak később fedezik fel
- 1927, Georges Lemaître: az univerzum *tágul* az ÁRE szerint
  - realista felfogás: a konkrét fizikai világot szeretné leírni (elsőként)
  - TD-i megfontolások is: pl. energiamegmaradás
  - csak a táguló megoldás érdekli: ez van összhangban a csillagászati megfigyelésekkel (lásd köv. fólia)
    - a tágulás mértéke szerinte: 625 km/s/Mpc
    - a tágulás oka szerinte: sugárzási nyomás
  - a világ nagy része örökre elérhetetlen marad: a 100"-es távcső csak a  $R/200$ -ig lát el → elválnak a látható világ és a világ egésze (horizont)
  - ez a cikk is jórészt ismeretlen marad (Einstein mindkettőt ismeri, de matematikailag korrekt, ám fizikailag abszurd játéknak tartja)





## Friedmann-féle megoldások

Az univerzum sorsa a mindenkori anyagsűrűségtől ( $\Omega$ ) függ:

- $\Omega = 1$  (kritikus sűrűség): örökké lassuló, végtelenben megálló tágulás (lapos tér)
- $0 < \Omega < 1$ : örökké lassuló, végtelenben sem megálló tágulás (nyílt tér)
- $\Omega = 0$ : örökké egyenletes tágulás
- $\Omega > 1$ : valameddig tágulás, aztán összehúzódás (zárt tér)
- $\Omega < 0$ : gyorsuló tágulás ( $\leftrightarrow$  negatív sűrűség?)

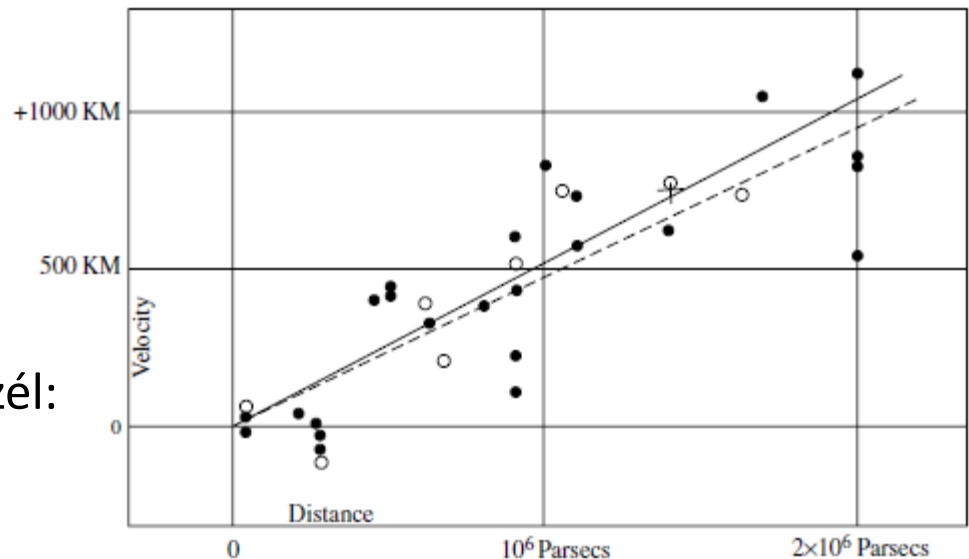
Megj. 1: ebben most nincs  $\Lambda$

Megj. 2: ekkor az univerzum sorsa empirikus kérdés: mennyi az anyag?

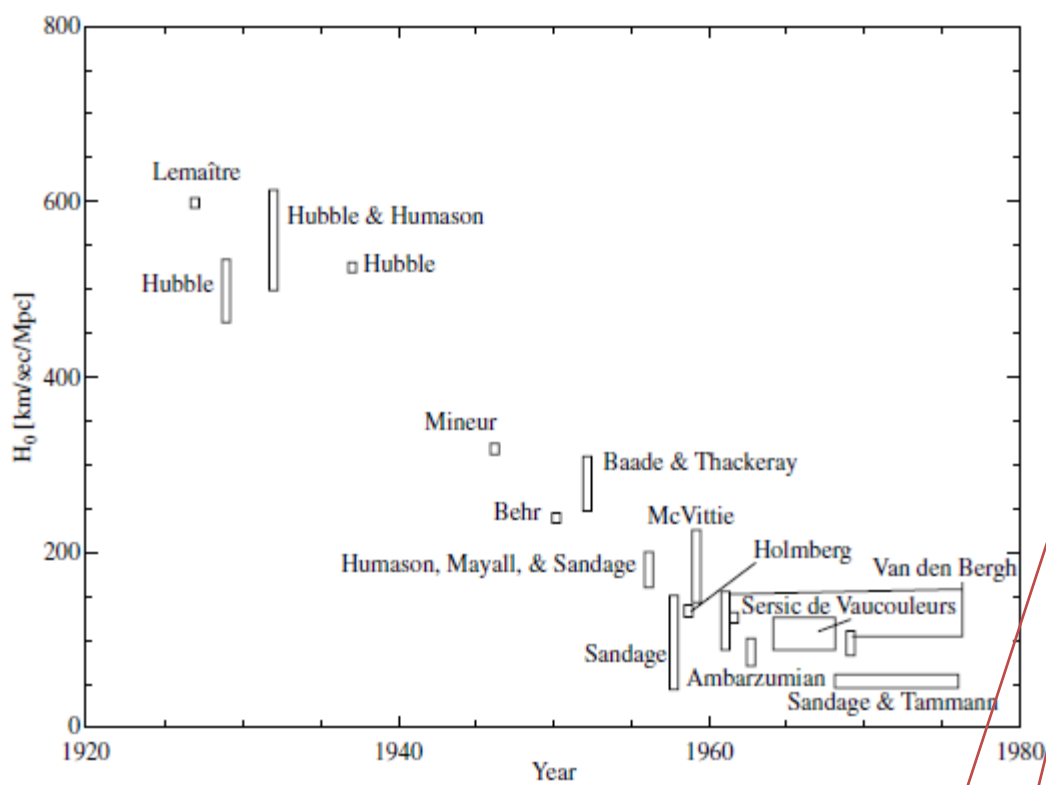
Megj. 3: feltéve, ha az anyag dominál (az energiához képest)  $\rightarrow$  később változik...

# A kozmikus vöröseltolódás

- 1917, Vesto Melvin Slipher: 25 spirálköd Doppler-eltolódása: 4 közeledik, a többi igen gyorsan távolodik  $\leftrightarrow$  nagyjából ismeretlen marad
- 1925, Knut Lundmark: minél kisebbnek látszik egy galaxis, annál nagyobb a vöröseltolódása  $\rightarrow$  összhangban de Sitter 1916-os modelljével
- 1929, Hubble, Milton Humason: a 100"-es távcsővel lineáris összefüggést találnak a spirálködök (46) távolsága és távolodásuk sebessége között
  - 1931: még 40 galaxis  $\rightarrow$  egyre világosabb összefüggés
  - tágulási állandó:  
 $H_0 = 558 \text{ km/s/Mpc}$
  - 1950: a 200"-es távcső is rááll  $\rightarrow$  egyre pontosodik az érték
  - Hubble „látszó” tágulásról beszél: sokáig vonakodik valódiként értelmezni (fényszórás? gravitációs eltolódás?)



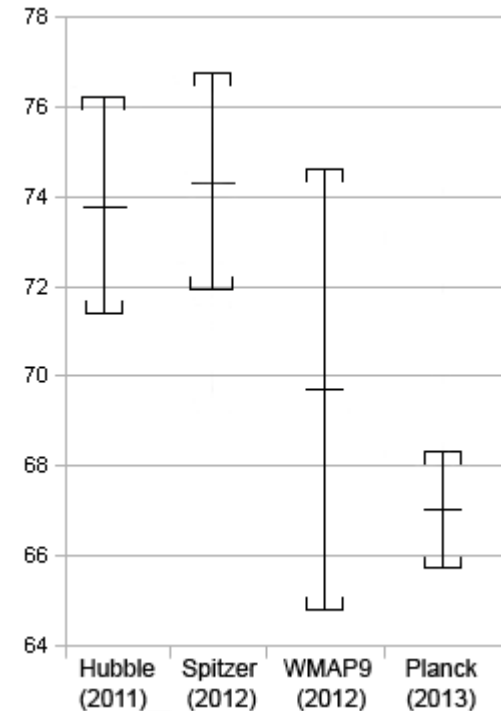
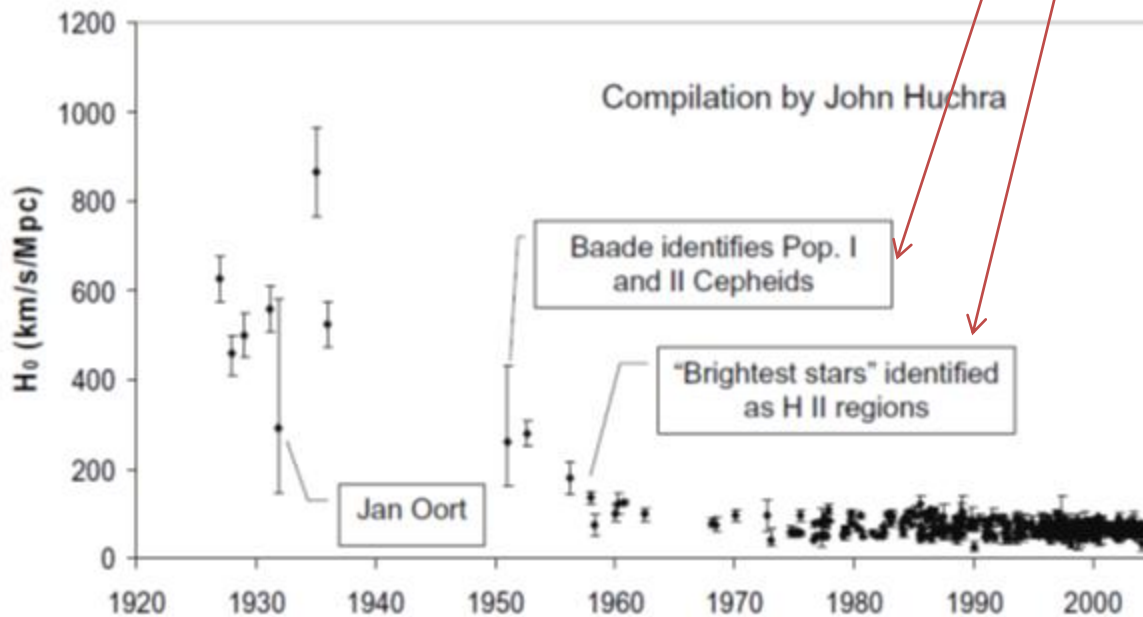
(„menekülnek előlünk, mint egy leprás elől”)



A Hubble-állandó értékei  
(ma:  $\sim 70$  km/s/Mpc)

Legfontosabb fordulópontok:

- I. és II. pop. cefeidák (Baade, 1952)
- Hubble becslése távoli galaxisok legfényesebb csillagai alapján hibás, mert gázködöket/halmazokat nézett csillagoknak (1960)



# A táguló univerzum diadala

- 1930: Arthur Eddington beszáll a támogatók közé → népszerűsítő munka
  - egyik statikus megoldás sem kielégítő: kis fluktuáció kibillenti → dinamikus kell → felfedezik Lemaître és Friedmann megoldásait
  - 1931: Einstein elveti a kozmológiai állandót (az oszcillálót támogatja)
  - 1933: konszenzus kialakul → ismeretterjesztő könyvek születnek

Ez egy nemzetközi konferencia, és én egy nemzetközi témát választottam. A német Einstein, a holland de Sitter és a belga Lemaître elméleti munkáiról fogok beszélni. Észlelési adatokért az amerikaiakhoz fordulok, Slipherhez, Hubble-höz és Humasonhoz, nem feledve azonban, hogy a távolság meghatározásának nélkülözhetetlenül fontos módszerét a dán Hertzprungnak köszönhetjük... Témám szétszórja a galaxisokat, de egyesíti a Földet. Reménykedjünk, hogy semmiféle „kozmológiai taszítás” nem szakíthat szét bennünket egymástól!



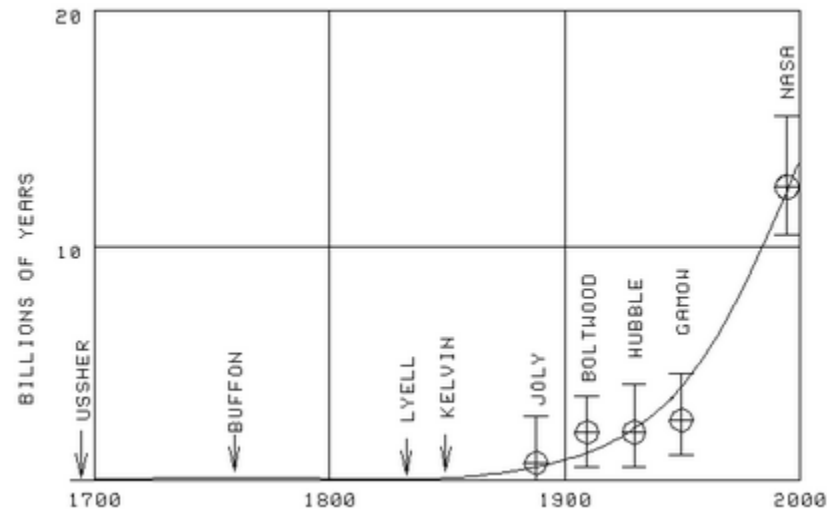
Eddington, 1933

# Ősrobbanás 1: Lemaître, 1931

- a radioaktív elemek egy ősi kataklizmikus eseményre utalnak
- a QM nem-kauzális és indeterminisztikus → megkerülhetők a világ kezdetének vizsgálatával kapcsolatos régi filozófiai problémák
- a világ egy szuperatomból bomlott szét: tömegszáma megegyezett a mai atomok tömegszámainak összegével (→ nem szingularitásból: végesen kicsi)
- robbanásszerű kezdet → lassuló tágulás → újra gyorsuló tágulás
  - ehhez használni kell  $\Lambda$ -t (2. fázis)  $\leftrightarrow$  Einstein hevesen tiltakozik
  - így meg tudja növelni az univerzum korát (lásd: köv. fólia)
  - magyarázatot ad a galaxisok keletkezésére: megoldatlan probléma (nála: a lassú tágulás alatti összehúzódások)
  - várható a kozmikus sugárzásban a kezdeti, forró állapot nyoma
- az 1960-as évekig az Ősrobbanás-elmélet *nem* általánosan elfogadott, de a tágulás igen (kivéve pl. Hubble: mindig óvatos marad, sosem kezeli a tágulást tényként)

# Problémák

- kor-paradoxon: sok megoldás túl rövid időt ad a múltra
  - ha  $H_0 = 550 \text{ km/s/Mpc}$  (Hubble), akkor a világ kora 1,8 milliárd év  
→ ez kevés a csillagok, a galaxisok és a Föld becsült korához képest
  - ahogy csökken  $H_0$  mért értéke, úgy lassan nő a világegyetem kora
    - Baade: 250 → 4 milliárd év
    - 1960: 100 → 10 milliárd év
    - ma: 70 → 13,7 milliárd év
  - ha  $\Lambda > 0$  (gyorsuló tágulás), akkor a probléma megkerülhető → a 2 v.h. között főleg ezért népszerű még  $\Lambda$
- egyes galaxis-halmazokban a vöröseltolódások szórása igen nagy (pl. Coma-halmaz: 7000 km/s átlag, 3000 km/s szórás)
  - hogyan magyarázható egy általános tágulással?
  - a struktúra-képződés továbbra is probléma



# Alternatív modellek 1: a fáradó fény

Sokakat zavar táguló univerzum → a vöröseltolódás másképp is magyarázható:

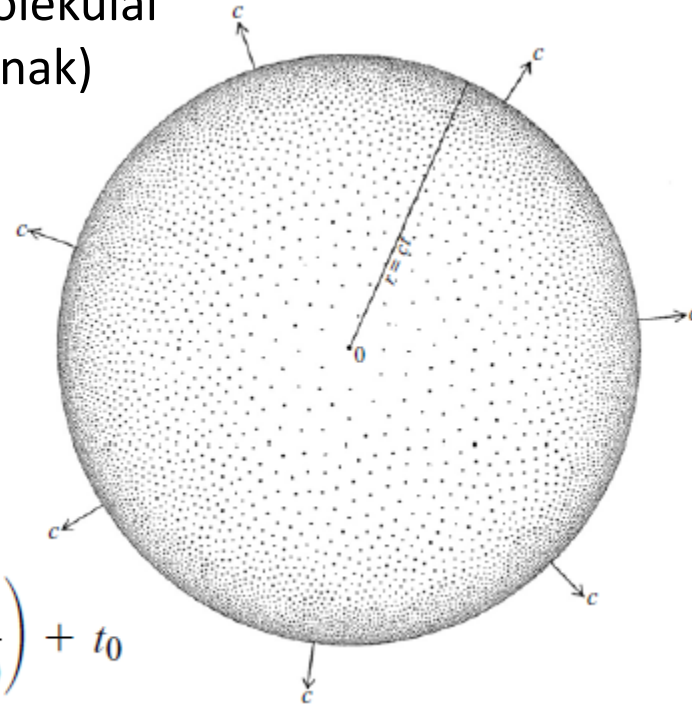
- 1931, Tokio Takeuchi: a fénysebesség időben lassan csökken
- 1929, Zwicky: egy Compton-szóráshoz hasonló gravitációs effektus: a fénykvantumok energiát adnak át az intergalaktikus anyagnak
- 1931, John Stewart: a fény frekvenciája exponenciálisan csökken a megtett távolsággal
- 1937, Samuel Sambursky: a Planck-állandó időben csökken ( $\exp(-Ht)$ )
- 1932, William D. MacMillan, Walther Nernst: a fotonok energiát veszítenek (foton-bomlás), így lelassulnak, és egyre több idő kell nekik a Föld eléréséhez (nem Doppler-effektus)



# Alternatív modellek 2: szétszaladó anyag

1929-50, Edward Arthur Milne: tágulás ÁRE nélkül (de spec.rel. OK)

- a térnek nem lehet szerkezete → nem tágulhat (nincsenek tulajdonságai)
- a galaxisok távolodása: mint a szétterjedő gáz molekulái (random sajátmozgással indítva nyilván széttartanak)
  - határ: fénysebességgel tágul  
→ ∞ anyagsűrűség (de elérhetetlen)
- a gravitáció időben nő → eleinte nem akadályozhatta a tágulást, később meg elhanyagolható a távolságokhoz képest
- kétféle idő: kinematikai ( $t$  – pl. optika) és dinamikai ( $\tau$  – pl. newtoni fizika)
  - $t$  szerint a világ pontforrásból tágul,  $\tau$  szerint viszont statikus
  - eleinte a kettőt ugyanolyan fontosnak látja, később  $t$  az alapvetőbb
- a kozmológia nem lehet független Isten tárgyalásától (kozmo-teológia)
- komoly vihart arat, néhány lelkes támogató, és sok szenvedélyes ellenző



$$\tau = t_0 \log\left(\frac{t}{t_0}\right) + t_0$$



# Alternatív modellek 3: numerikus harmóniák

- előzmény: 1929-44, Eddington: a gravitáció és a QM ötvözése

– a mikrofizika és kozmológia állandói összefüggenek, pl.:

$$\frac{mc}{\alpha h} = \frac{\sqrt{N}}{R} \quad \frac{c}{h} \sqrt{\frac{mM}{\Lambda}} = \sqrt{\frac{N}{30}} \quad \begin{array}{l} N: p^+ \text{-ok összmennyisége} \\ M: p^+ \text{-tömeg, } m: e^- \text{-tömeg} \end{array}$$

– támogatók, továbbvivők: Hans Ertel, Arthur E. Haas, Erwin Schrödinger

- 1930-as évek, Paul Dirac, Pascal Jordan: változó gravitáció

– Dirac: nagy számok hipotézise: a természeti állandókból alkotott két nagy szám között egyszerű összefüggésnek kell lennie

Pl.  $\frac{T_0}{e^2/mc^3} \cong \frac{e^2}{GmM} \cong 10^{39}$  nem lehet véletlen  
→ a jobb oldalból csak  $G$  lehet változó

→ a természet törvényei időben (esetleg helyről helyre) változnak

– Jordan: ehhez anyagnak kell keletkeznie folyton a tágulással

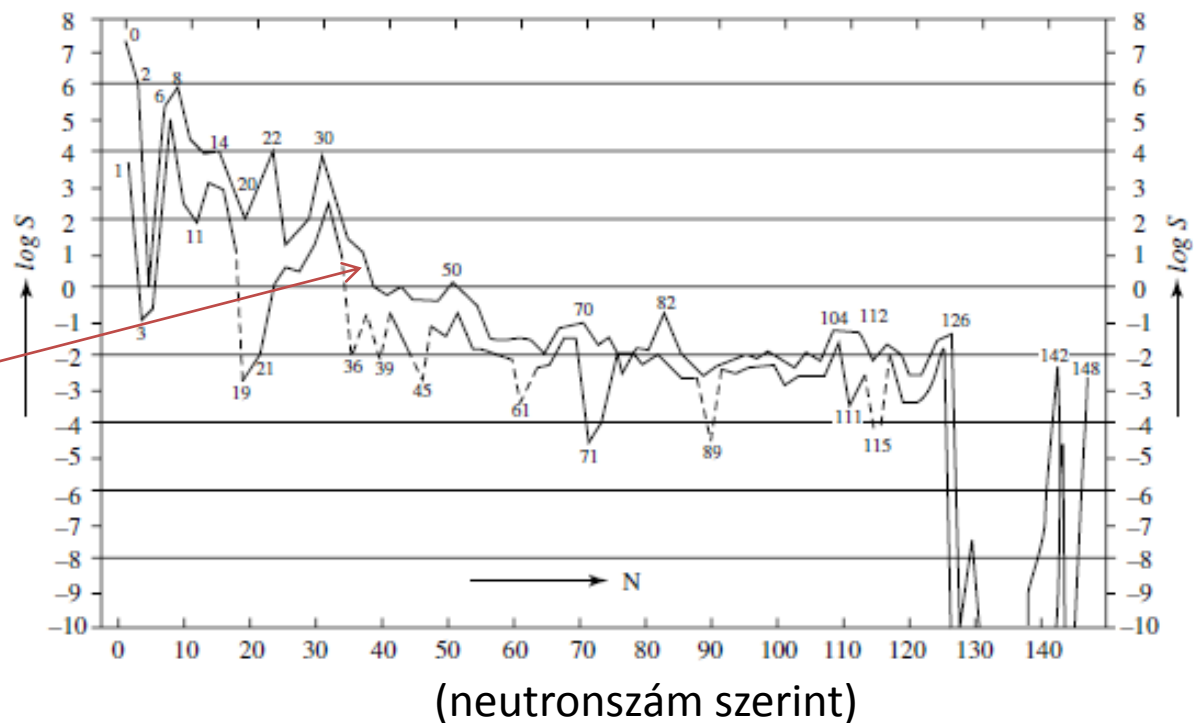
→ ha eleinte nem volt anyag, akkor nem kellett Ősrobbanásnak lennie (1950-es évek, Jordan: a változó  $G$  elmélettel magyaráz geológiai jelenségeket: kontinensvándorlás, vulkánosság, jégkorszakok, stb.)

# Az elemek eloszlása és a kozmológia

- 1938-39, Hans Bethe és Carl Friedrich von Weizsäcker: a csillagok energiatermelésének nukleáris fizikája
  - Weizsäcker: a nehezebb elemek: csak csillagokon kívül jöhettek létre
  - az elemek eloszlása árulkodik a korai viszonyokról: „nukleáris régészet”
    - korai állapot: igen sűrű anyag (atommag), ami szétrobban (magyarázza a tágulást, de független az ÁRE-től)

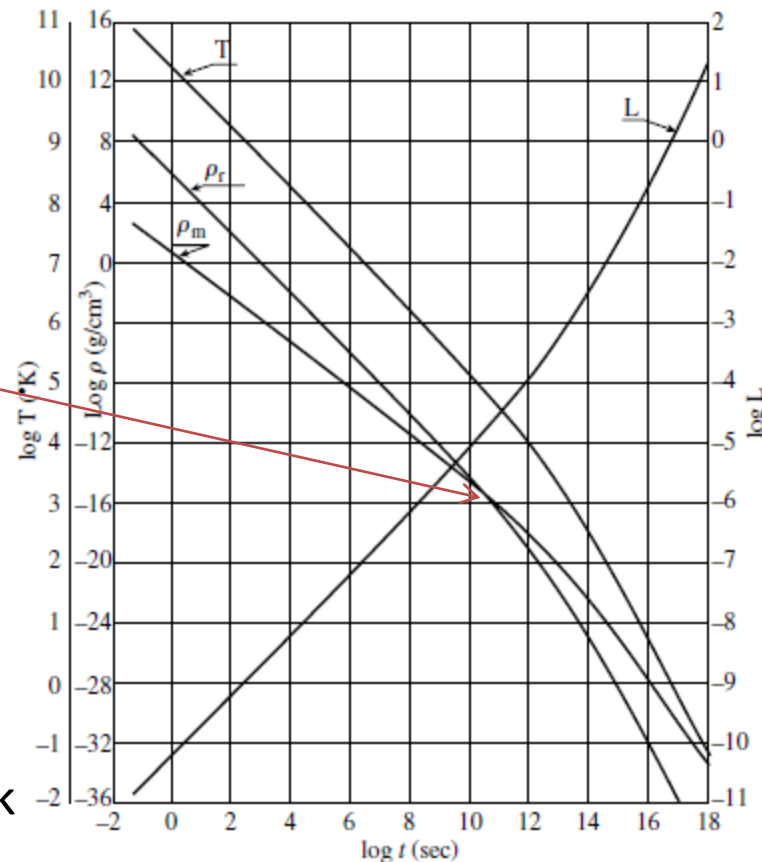
- 1938, Victor Goldschmidt: a földi és a kozmikus elemek eloszlása →

- Weizsäcker elmélete nem magyarázza a vas utáni elemek relatív ritkaságát
- mégsem kozmikus nukleoszintézis?



# Ősrobbanás 2: Gamow és Alpher, 1948

- 1946, George Gamow: az elemek egy kataklizmikus eseményben keletkeztek
  - nem a tágulás vagy az ÁRE izgatja, hanem a magfizika
  - neutron-gáz  $\rightarrow$  hűl és tágul  $\rightarrow$  neutronbomlás (proton)  $\rightarrow$  neutronbefogás
- 1948, Gamow + Ralph Alpher: Ősrobbanás-elmélet (Lemaître nekik ismeretlen)
  - tágulás első fél órája: „nukleáris főzés” (neutron-befogás) – utána már túl ritka
  - Gamow: amikor az anyag és a sugárzás sűrűsége azonos, akkor keletkeznek a galaxisok
  - Alpher és Robert Herman: kozmikus háttérsugárzást jósolnak
  - aztán: még forróbb ősleves: foton, neutrínó, pozitron, elektron, müon
- 1953 után a program elhal: nem túl népszerű
  - H/He arányt jól magyarázza, de mást nem
  - csak a kezdeteket nézi  $\rightarrow$  csillagászok unják



# Alternatív modellek 4: állandó állapotú világegyetem

- 1948, Fred Hoyle, Hermann Bondi, Thomas Gold
- az 50-es és 60-as évek népszerű alternatívája: nincs kor-paradoxon
- változatlan, de dinamikus univerzum: örökké tágul  
(„tökéletes kozmológiai elv”: a világ nemcsak térben, hanem időben is homogén)
  - H-atomok keletkeznek  $\rightarrow$  a sűrűség állandó  $\rightarrow$  a határtalan univerzum kortalan
    - a szükséges mennyiség (3 atom/m<sup>3</sup>/évmillió) detektálhatatlanul kicsi
    - később: neutronok keletkeznek, nem H-atomok  $\rightarrow$  ezek bomlanak tovább
    - sérti az energiamegmaradást, viszont nem lép fel a hőhalál-kérdés (sosem zárt)
  - 1951-53, William Hunter McCrea: C-tér elmélet
    - nem anyag keletkezik, hanem a tér bír negatív nyomással  $\rightarrow E$  kb. +marad
  - 1959, Hermann Bondi, Raymond Lyttleton: elektrosztatikus taszítás az ok: enyhe töltéskülönbség  $p^+$  és  $e^-$  között  $\leftrightarrow$  labormérések ezt cáfolják
- elemek keletkezése nem kozmikus  $\rightarrow$  ösztönzik az asztrofizikát („B<sup>2</sup>HF” elmélet)
- próbálják magyarázni pl. a struktúraformálódás (galaxisok) problémáját is...

# A tudományon kívülre mutató kozmológia

Filozófiai, valláskritikai és politikai témákhoz kötődik a kérdés:

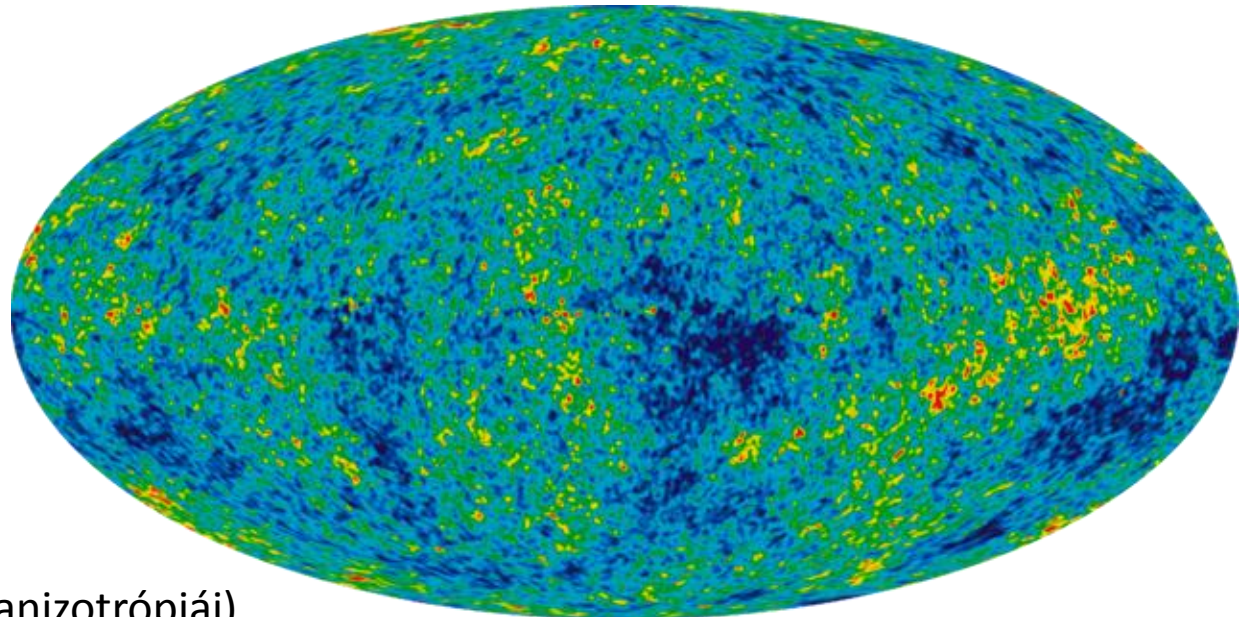
- filozófia: módszertani/tudományfilozófiai kérdések
  - Hoyle-ék: az Ősrobbanás-elmélet tetszőlegesen igazítható észlelésekhez  
→ a tények nem tudják megcáfolni → nem tudomány (← Karl Popper)
  - egyáltalán kérdés még, hogy a kozmológia tudomány-e (vitatott)  
→ Vizsgálható-e empirikusan a „minden”? Magyarázható-e a kezdet? Stb.
- vallás: az Ősrobbanás a Teremtés-elmélet egy verziója, így nincs helye a tudományban
  - elvégre Lemaître egy pap
  - ráadásul XII. Piusz pápa már 1951-ben elismeri az Ősrobbanást (míg a tudományos közösség többsége még nem)
- politika: Szovjetunió, Kína: eleve reakciós ideológiaként kritizálják a kozmológiát, de az Ősrobbanást tartják a legbotránnyosabbnak  
→ kutatása sokáig be van tiltva

# Ősrobbanás 3: A mikrohullámú háttérsugárzás

- 1948, Gamow-Alpher-Herman: 5 K-es maradványsugárzást várnak
- 1965, Arno Penzias, Robert Wilson: véletlenül megtalálják:  $T = 3,5 \pm 1$  K ( $\lambda = 7,3$  cm)  $\rightarrow$  ez megöli az állandó állapotú modellt: **empirikus bizonyíték**
- 1970-es évek vége: a megfigyelő mozgása miatti anizotrópiák kimutatása (a Nap keringése a Tejútban + a Tejút mozgása a halmazon belül)
- 1992, COBE (*Cosmic Background Explorer*): kis anizotrópiák a kezdeti egyenetlenségek miatt (galaxisok, halmazok magjai) +  $T = 2,726 \pm 0,01$  K  $\rightarrow$  látszanak a struktúra-képződés csírái



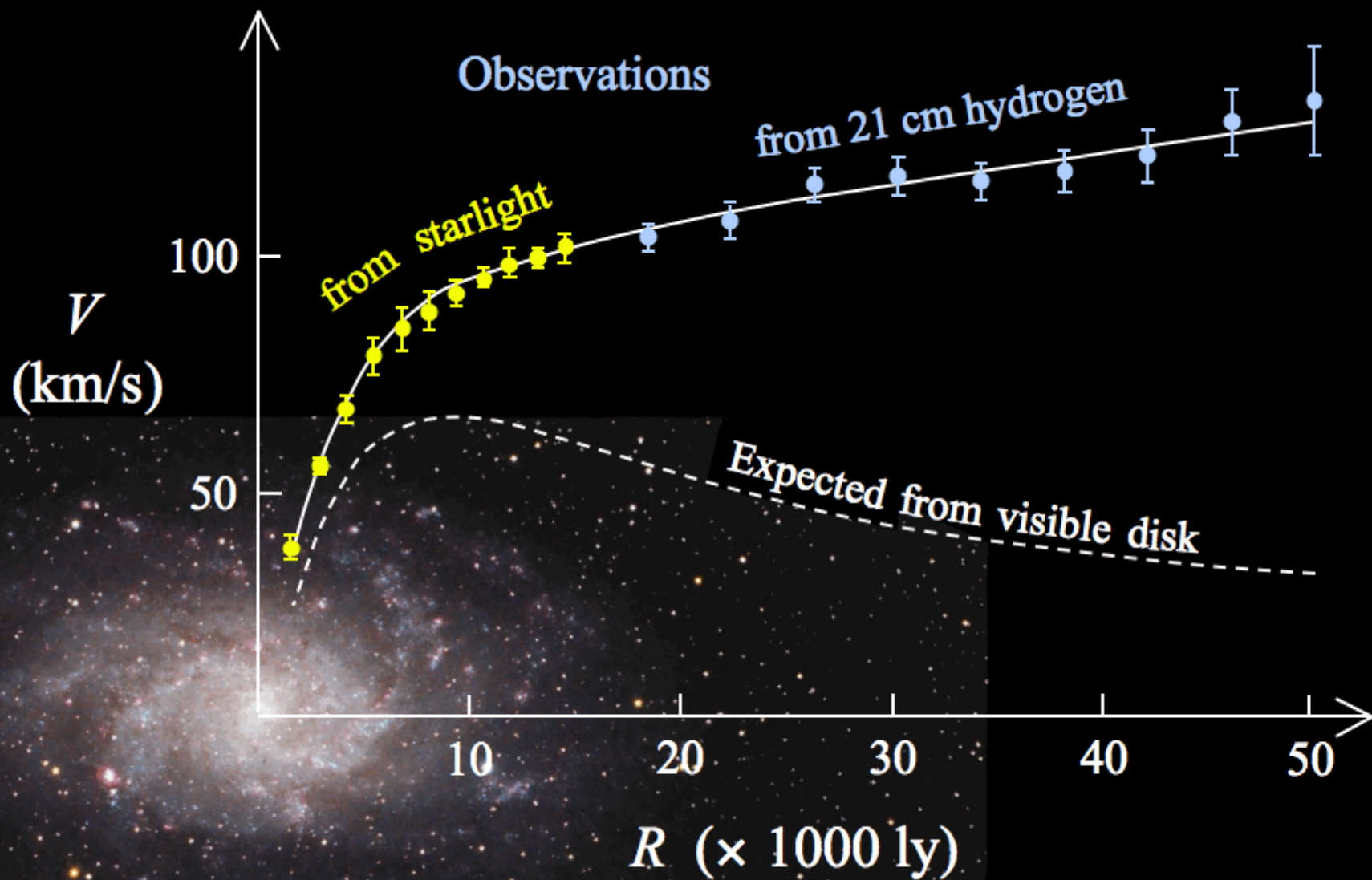
az 1960-as évek végére  
az Ősrobbanás elmélete  
uralja a kozmológiát  
+ a kozmológia elismert  
tudománnyá válik



(2012, COBE: a kozmosz anizotrópiái)

# Probléma: hiányzó tömeg

- 1930-as évek: az empirikus sűrűségbecslések (Hubble, Eddington) jóval nagyobbak a kritikus sűrűségnél → összehúzódás
- 1933, Franz Zwicky: a Coma-halmaz galaxisainak becsült össztömege kb. négyszázad része annak, ami kell a gravitációs összetartásukhoz  
→ az anyag jó része láthatatlan: **sötét anyag**  
→ később megnőnek a becsült tömegek, de a távolságok is → kb. jó arány
- 1970, Vera Rubin: hasonló eredmények galaxisok rotációjára: több a tömeg, mint ami látszik
- 1974: a látható anyag tömege 10-100-ad része annak, ami a kontrakcióhoz kellene → örök tágulás
  - probléma 1:  $\Omega$  kezdeti értéke olyan közel volt az 1-hez, hogy nagyon valószínűtlen, hogy nem volt egyenlő vele
    - antropikus elv: ha nem ennyi lenne, mi nem lennénk → nem értelmes kérdés
    - vagy: legyen inkább  $\Omega = 1$  → ekkor van egy csomó láthatatlan anyag
  - probléma 2: mi alkotja? fekete lyuk? kozmikus húrok? barna törpék? fekete törpék? nehezen detektálható elemi részecskék?



Rotációs görbe (keringési sebességek a galaxisban): a látható tömegek alapján a szaggatottat várnánk  $\rightarrow$  a folytonos (mért) görbe nagy mennyiségű, kevésbé koncentrált anyagra utal

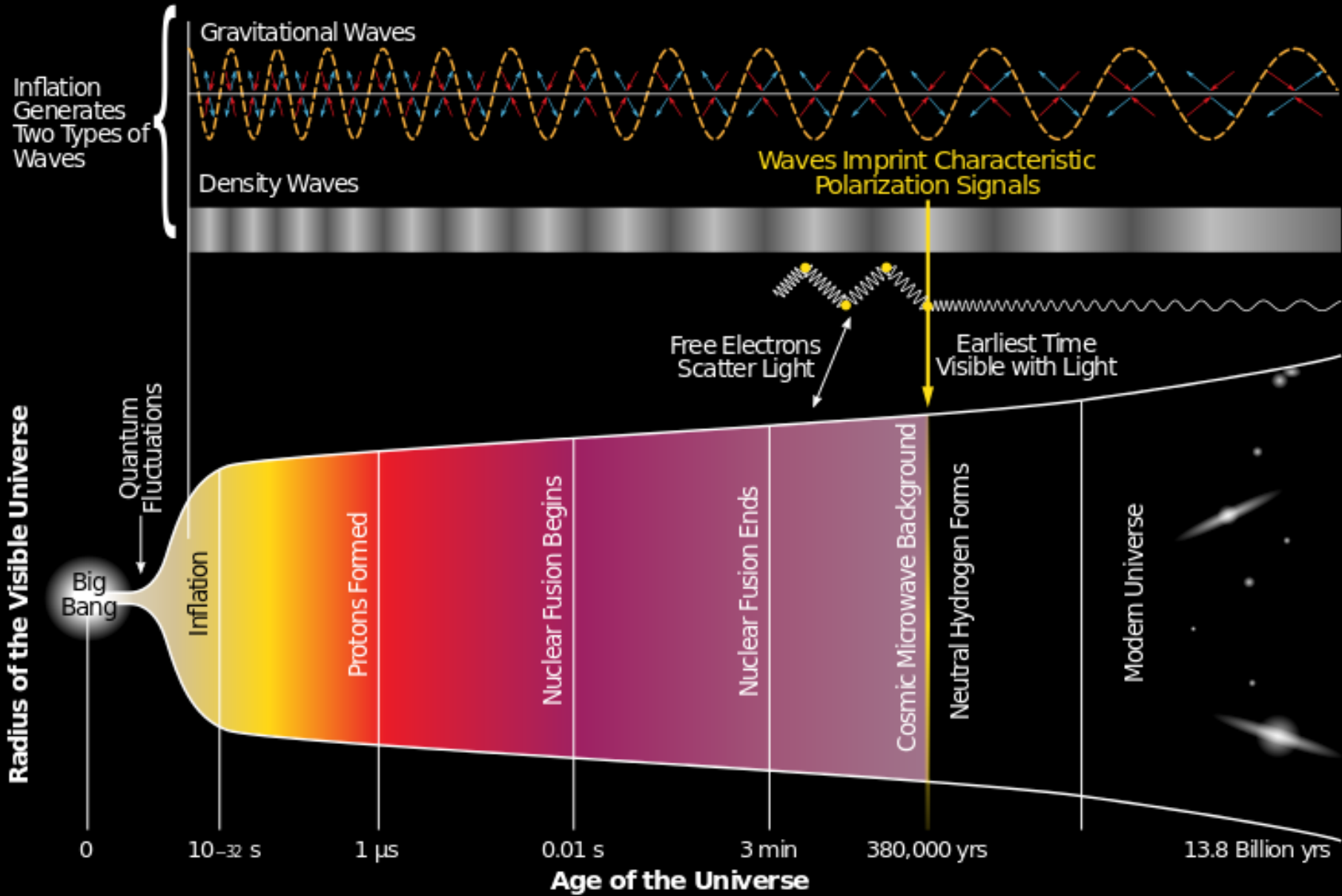


# Módosítás: a felfúvódó univerzum

1979-82, Alan Guth

- kezdetben volt egy nagyon hirtelen, óriási mértékű tágulás (fázisátmenet):  
 $H_0 = 10^{14}$  km/s/Mpc  $\rightarrow$  törtmásodperc alatt  $10^{40}$ -szeresére nőtt
- hamis vákuum: gravitációs taszítás (mint a de Sitter-modellben)
- több problémát megold:
  - a GUT-k (Nagy Egyesített Elméletek) sok mágneses monopólust jósolnak, de ezek nem találhatók  $\leftrightarrow$  ebben a modellben nem is kell
  - egyenletesség-probléma: a standard modell szerint a korai univerzum távoli részei nem kommunikálhattak egymással  $\leftrightarrow$  itt igen (nagyon kicsi)
  - laposság-probléma: ha a tér kb. lapos, akkor kezdetben igen közel volt a kritikus sűrűséghez ( $10^{-55}$  eltérés)  $\leftrightarrow$  itt nem: a felfúvódás kisimította
- 1990-es évek: a tágulás ma is gyorsul  $\rightarrow$  mégis kell  $\Lambda$ : „sötét energia” (sőt, jóval több kell, mint sötét anyag (ami jóval több, mint a látható)
  - független a felfúvódástól, de kombinálható vele
  - a természetete nyitott kérdés (még jobban, mint a sötét anyagé)

# History of the Universe



# És amik kimaradtak

- további relativisztikus témák
  - egyéb megoldások az egyenletekre (pl. forgó: Kurt Gödel, 1949 → időutazás)
  - gravitációs lencsék (1979): kvazárok,  $H_0$  mérése
  - fekete lyukak (Schwarzschild, 1916 → Oppenheimer, 1939 → Hawking, 1971 → stb.)
  - féreglyukak, etc.
- részecskefizika és kozmológia
  - nem barionos anyag
  - neutrínók fajtái, problémája, észlelése
  - Nagy Egyesített Elméletek (GUT)
  - húrelmélet, etc.
- egyéb kozmológiák
  - sokvilág-elméletek
- stb. stb.

