

# Bevezetés a kozmológiába

## 2. Ősrobbanás és vidéke

*HTP-2024, CERN, 2024. augusztus 22.*

**Horváth Dezső**

horvath.dezso@wigner.hu

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Debreceni Egyetem, Fizikai Intézet

és Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

# Vázlat

- Ősrobbanás és felfúvódás
- Kozmikus háttérsugárzás
- COBE, WMAP, PLANCK: anizotrópia
- Gravitációs hullámok
- Sötét anyag és energia
- Ősrobbanás és teológia

# Felfúvódás (infláció)

Hipotézis: A világegyetem (VE) gyors tágulása  $10^K$ -szorosra ( $K \geq 26$ )  $10^{-36} - 10^{-32}$  s között az Ősrobbanáskor

Alan Guth, 1980 és K. Sato, 1981

Vákuum-energia, inflaton (talán a Higgs-tér?)  $\Rightarrow$  exponenciális tágulás

Később lelanyhul, síma tágulás, ma enyhén gyorsul

A világegyetem nagy területei kiesnek az eseményhorizontunkból (fényvel nem érhetők el).

Megmagyarázhatja a következőket:

- Kezdeti anizotrópiák kisimítása  $\Rightarrow$  nagy skálán homogén és izotróp.
- Lapos (Euklideszi) VE, görbület nélkül.
- Galaxisok keletkezése helyi sűrűségfluktuációkból.
- Anyag – antianyag aszimmetria: eseményhorizonton kívül lehet antianyag többségben.

# BICEP2, 2014 március 17.

## Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization

Kozmikus háttérsugárzás hőmérsékleti  
anizotrópiája: kezdeti sűrűség-ingadozás

COBE  $\Rightarrow$  WMAP  $\Rightarrow$  Planck

Lecsatolódáskor elektromos módus  
(skalár)

Grav. görbíti: B-módus, axiálvektor

B-módusú polarizáció:

inflációs gravitációs hullámok

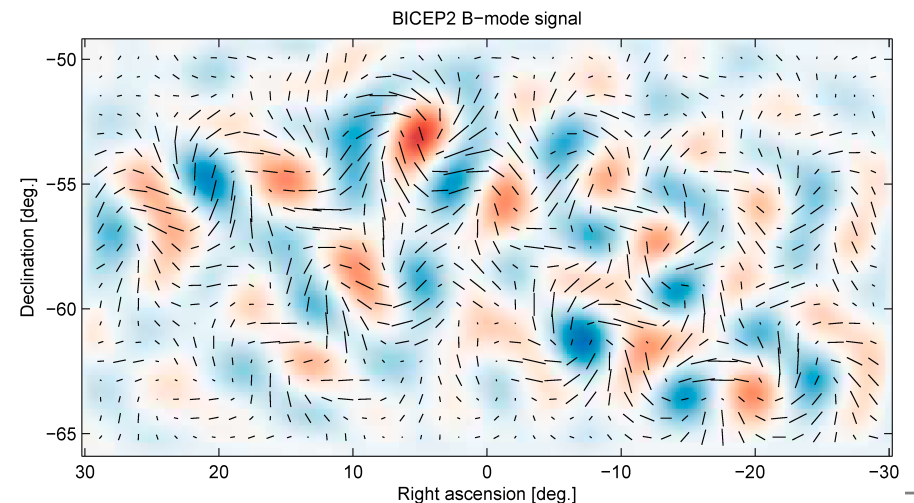
Polarizáció eloszlása égbolt egy  
darabján:

óramutatóval, ellentétesen tekerő

Planck + BICEP2, 2015: szóródás poron



BICEP2 a Déli sarkon



# Ősrobbanás (Big Bang)

Látható anyag:  $\sim 75\%$  hidrogén,  $\sim 25\%$  hélium,  $< 1\%$  más  
 $H+H \rightarrow He$  fúzió csak plazmában: forró korai Univerzum kiadja

Felfúvódás (Alan Guth, 1980, *inflation*): Óriási sötét energia, fénynél gyorsabb kezdeti tágulás ( $10^{-32}$  s alatt  $10^{26}$ -szoros)

Kozmikus háttérsugárzás eredete:

Big Bang után 30 perc: plazma,  $T = 300\,000\,000$  K.

Sugárzás dominál, fotonok halmaza átlátszatlan közegben

380000 év: lehülés 3000 K-re, semleges atomok, fotonoknak átlátszó

Tágulás 1000x: fotonok hullámhossza nő,  $T = 3000 \rightarrow 3$  K

Galaxisok eredete:

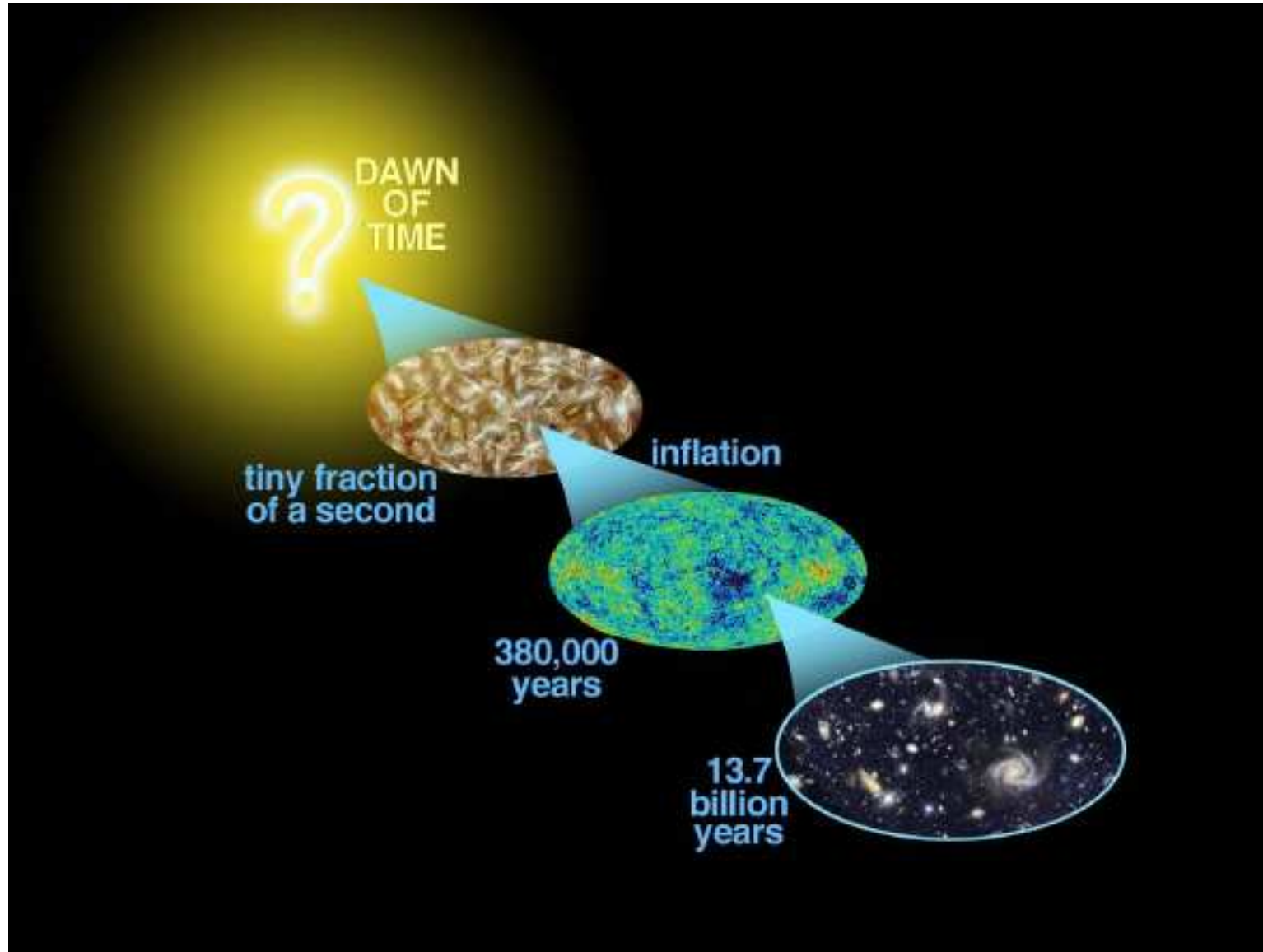
Kvantumfluktuációk  $\Rightarrow$  gyors táguláskor térbeli anizotrópia

$\Rightarrow$  sötét anyag gravitációs gödreiben barionos anyag sűrűsödése  $\Rightarrow$

csillagok, galaxisok kialakulása

Bizonyíték: Kozmikus háttérsugárzás anizotrópiája

# Ősrobbanás, felfúvódás, sugárzás



# Mitől jöttek létre a galaxisok?

Sötét anyag gravitációs gödrei!

Bizonyíték: kozmikus háttérsugárzás anizotrópiája:  
bizonyos irányokból sokkal (?) forróbb

Ott már a csillagok kialakulása előtt  
sokkal sűrűbb volt az anyag



# A COBE anizotrópiája

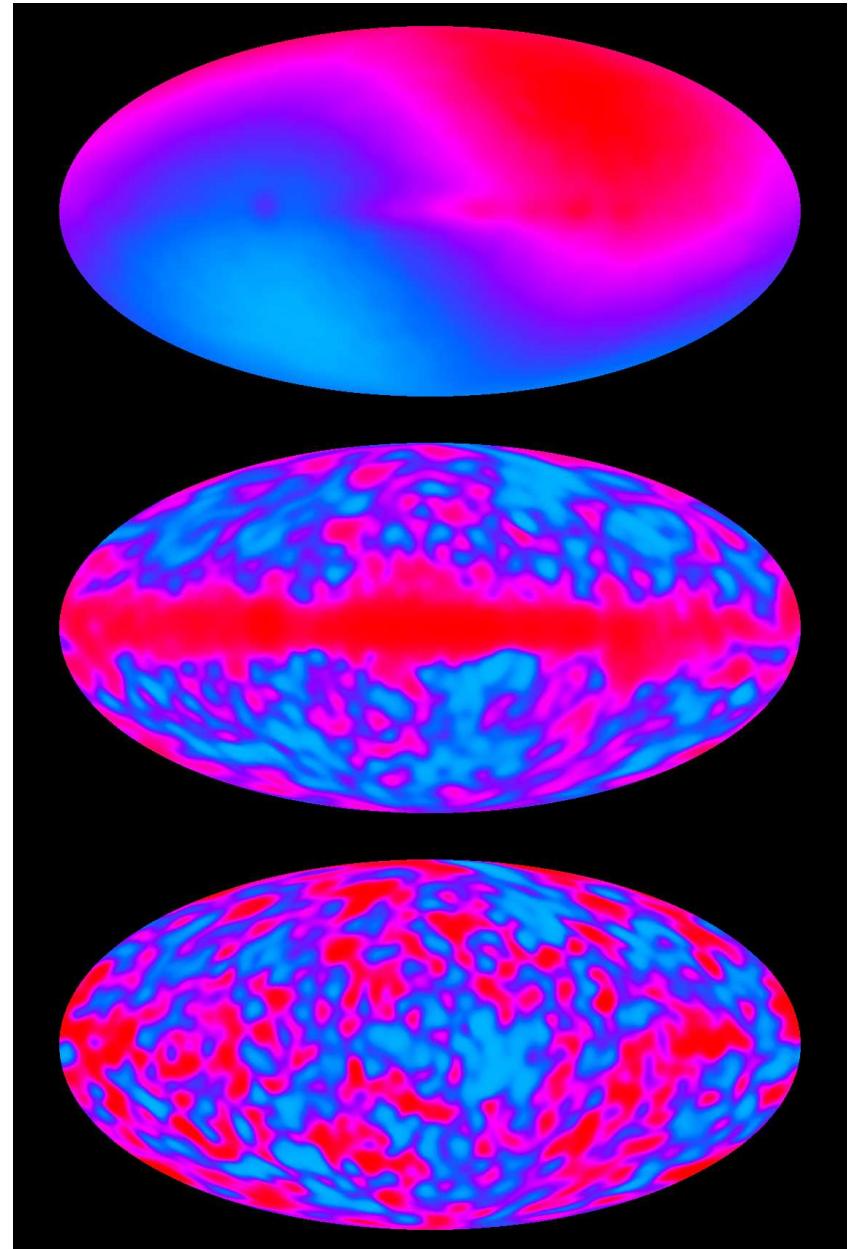
Hőmérséklet-eloszlás kiterített égbolton

Vörös = 2,721 K, kék = 2,729 K

A Nap mozgása

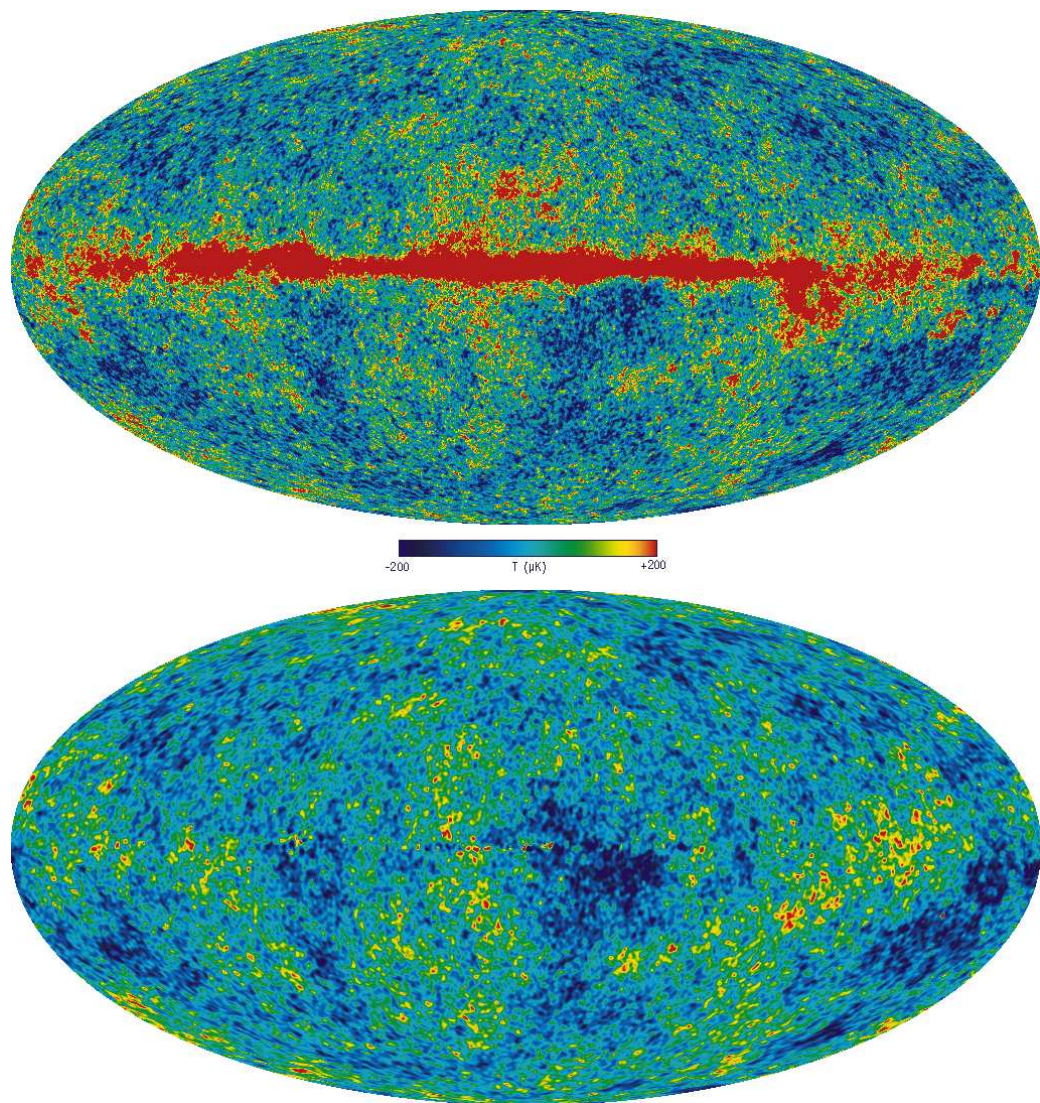
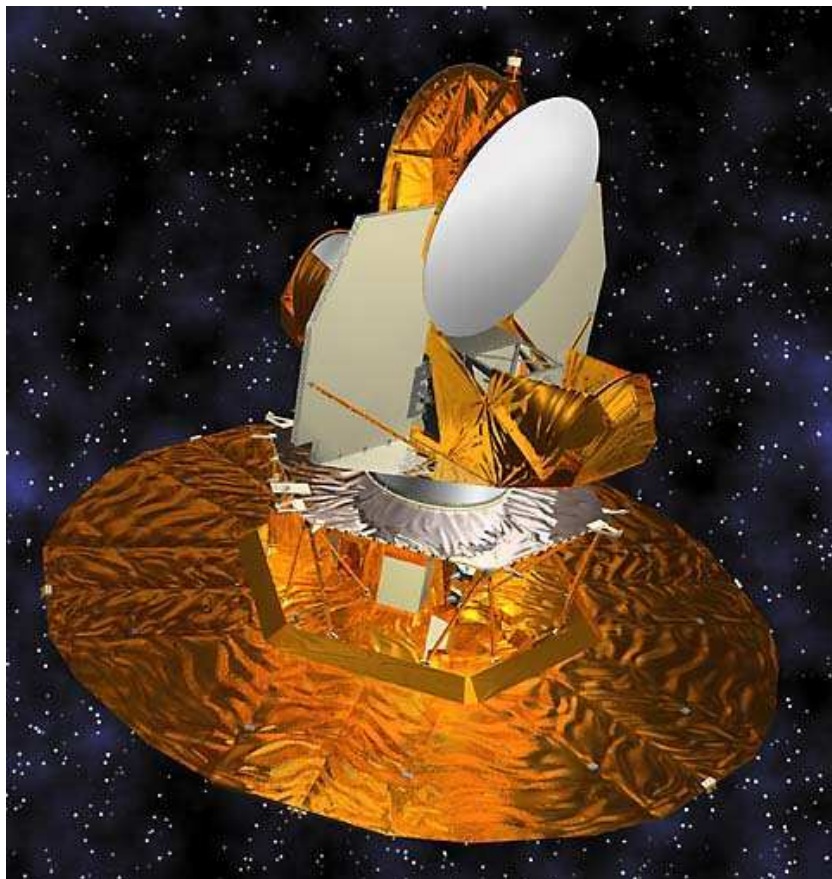
Tejútrendszer

Maradék anizotrópia





# A háttérsugárzás anizotrópiája

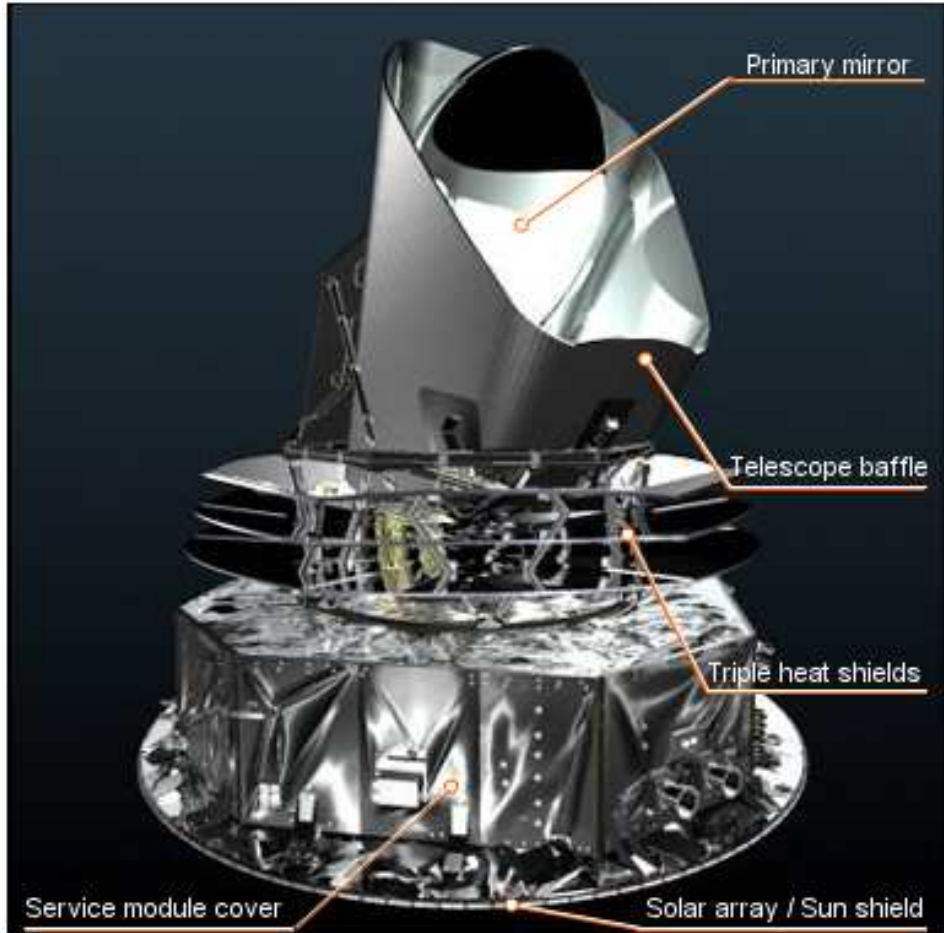


Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2001-2010



# A Planck-űrszonda, ESA, 2009–2012

(a kozmikus háttérsugárzás vizsgálatára)



A Planck-űrszonda:

4,2 m; 2,4 t; 1,5 millió km

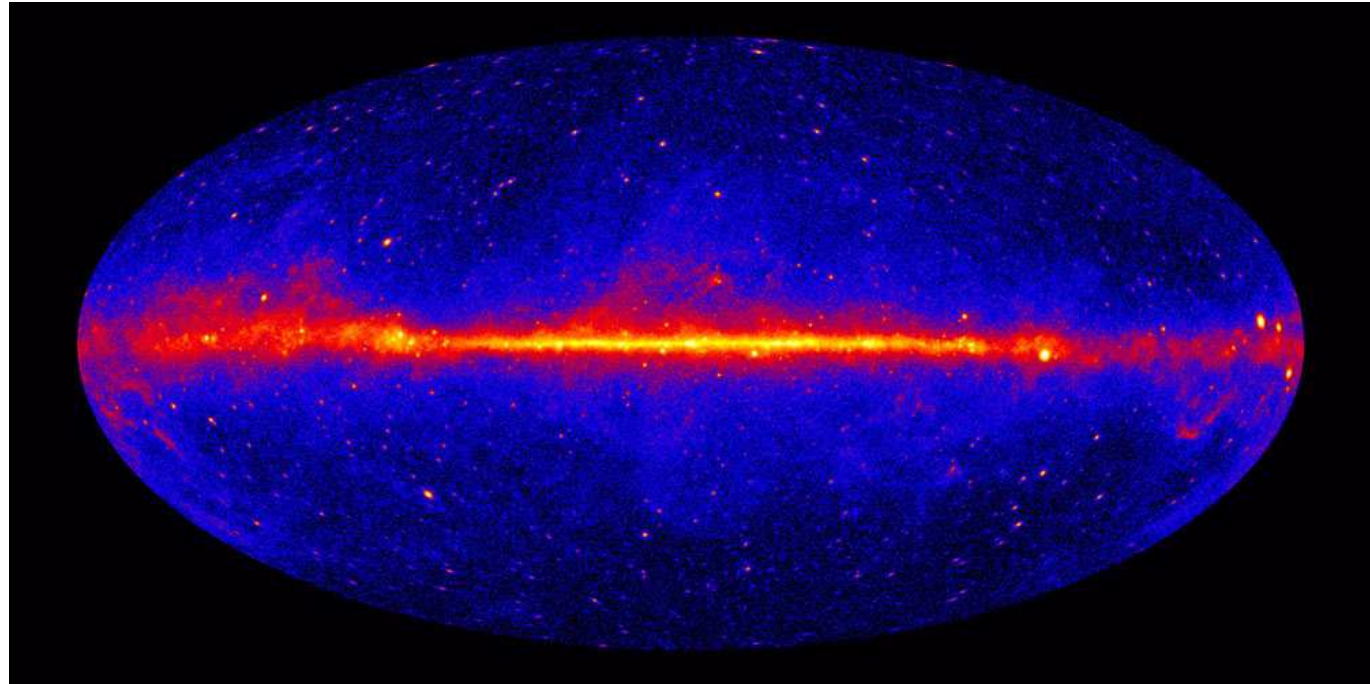
A látható fényt vizsgáló Herschel-űrteleszkóppal együtt lőtték fel

Herschel-űrteleszkóp:

Csillagképződés az Orion-ködben

# Fermi Large Area Telescope, 2008–

FLAT: Űrteleszkóp nagyenergiás gamma-sugarak  
(gamma-kitörések) észlelésére



3 év termése

(<https://kipac.stanford.edu/research/projects/fermi>)

# Az Univerzum zenéje

Akusztikus spektrum:  
rezgési módusok az  
ősplazmában

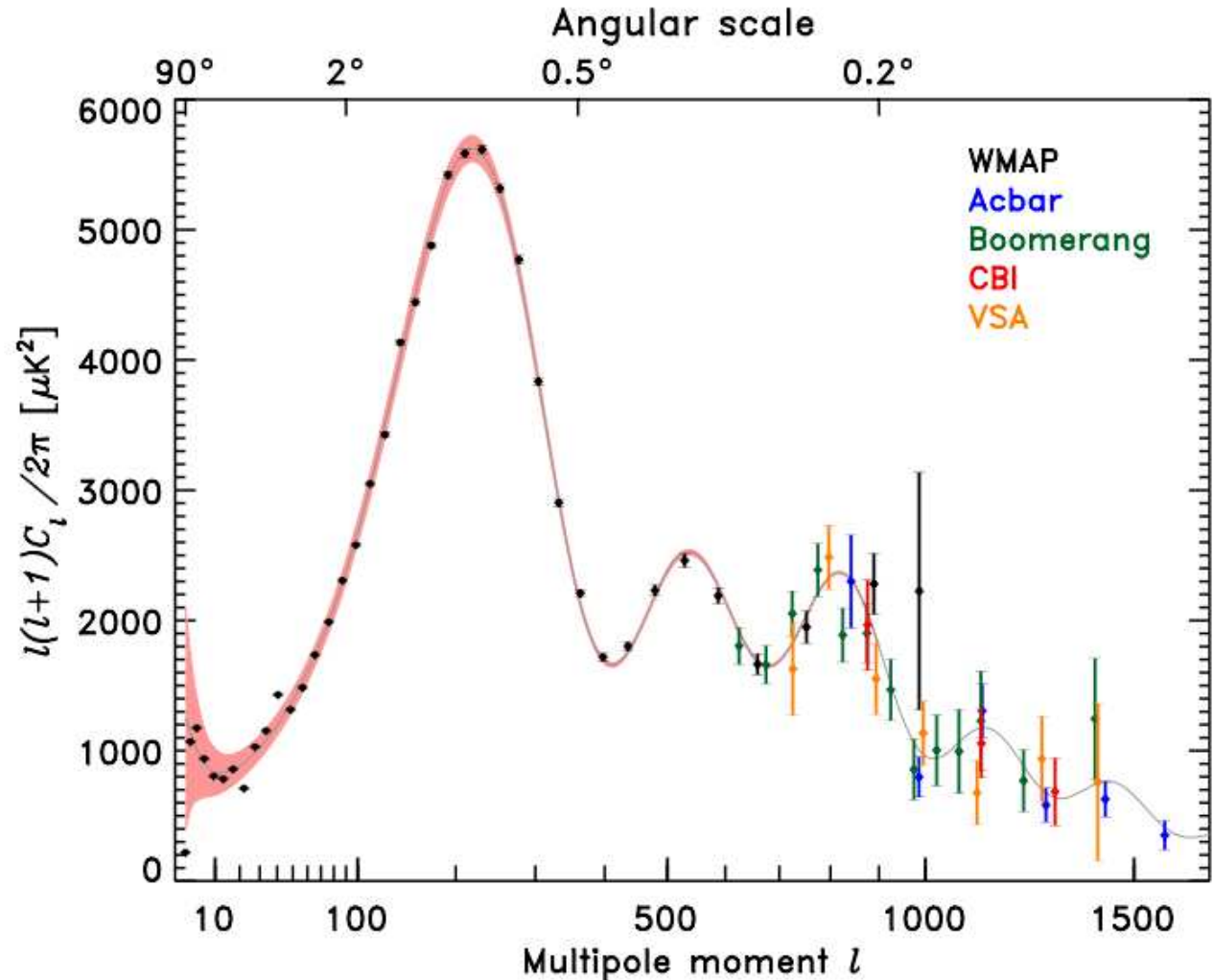
Hullámhossz: szög,  
frekvencia: rezgésszám

Főcsúcs helye:  
görbület = 0

Csúcsarányok:  
barionsűrűség

3. csúcs: sötét anyag  
sűrűsége

Lapos Univerzum,  $\Lambda \neq 0$





# Ősrobbanás (Big Bang) időrendje

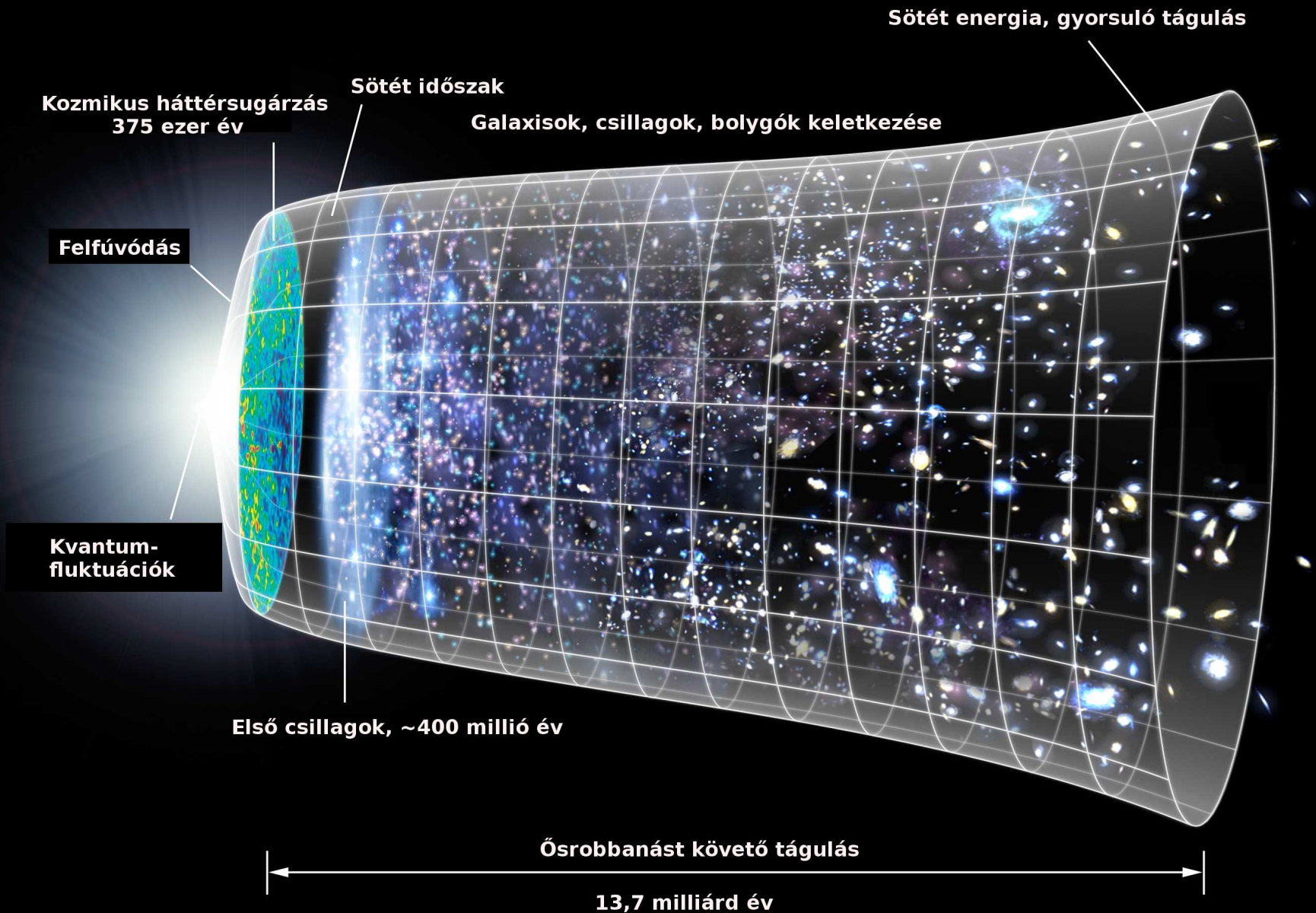
Esemény	idő	hőmérséklet	$\rho^{1/4}$
Planck-idő (infláció ↓?)	$10^{-36}$ s		$10^{18}$ GeV
Nagy egyesítés	$10^{-32}$ s		$10^{16}$ GeV
Elektrogyenge ↑? (bariogenezis)	$10^{-6}$ s	$10^{15}$ K	100 GeV
Kvark → hadron	$10^{-4}$ s	$10^{12}$ K	100 MeV
Nukleonok	1–1000 s	$10^9 - 10^{10}$ K	0,1 – 1 MeV
Lecsatolódás	380000 év	3000 K	0,1 eV
Szerkezet kialakulása	$> 10^5$ év		
Mai helyzet	13,75 G év	2,7 K	$3 \cdot 10^{-4}$ eV

Jelenlegi kép: gyorsulva táguló, lapos Univerzum

# Az elemek keletkezése

- Ősrobbanás után 3 perc:  $T < 10^9$  K  $\Rightarrow$  forró plazma, H  $\rightarrow$  He fúzió (75% H<sub>2</sub> + 25% He)
- Sokkal később csillagok, belül forró fúzió, nehezebb elemek (szén felett).
- Szupernova robbanása  $\Rightarrow$  nehéz atomok szétszóródnak.
- Li, Be, B: csillagban szétesik, csillagközi térben keletkezik.
- Nehéz elemek mennyisége lassan növekszik.
- Mindez kísérletileg igazolva:
  - Szupernovák maradványainak spektruma.
  - Neutroncsillagok összeolvadása (sokcsatornás csillagászat gravitációs hullámokkal)

# A történet eddig

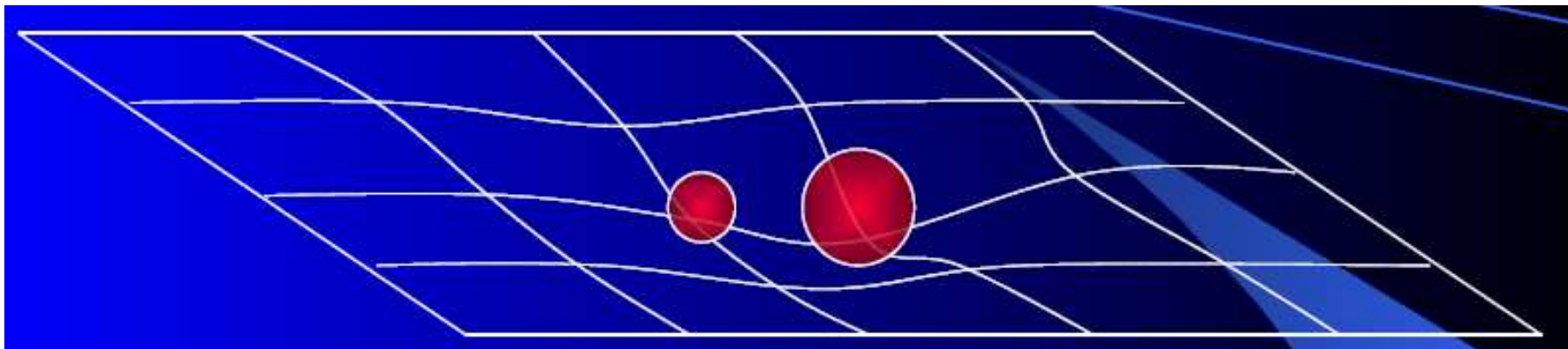




# Általános relativitáselmélet

Newtoni gravitáció + állandó fénysebesség (Einstein, 1915)

- Görbült téridő ( $t, x, y, z$ )
- Görbület tömegtől
- Szabadesés geodéziai vonalak mentén



Gravitációs potenciál  $\Rightarrow$  tér görbülete

Douglas Adams (*Galaxis útikalauz*): „Az anyag megmondja a térnek, hogyan görbüljön, a tér meg az anyagnak, hogyan mozogjon”

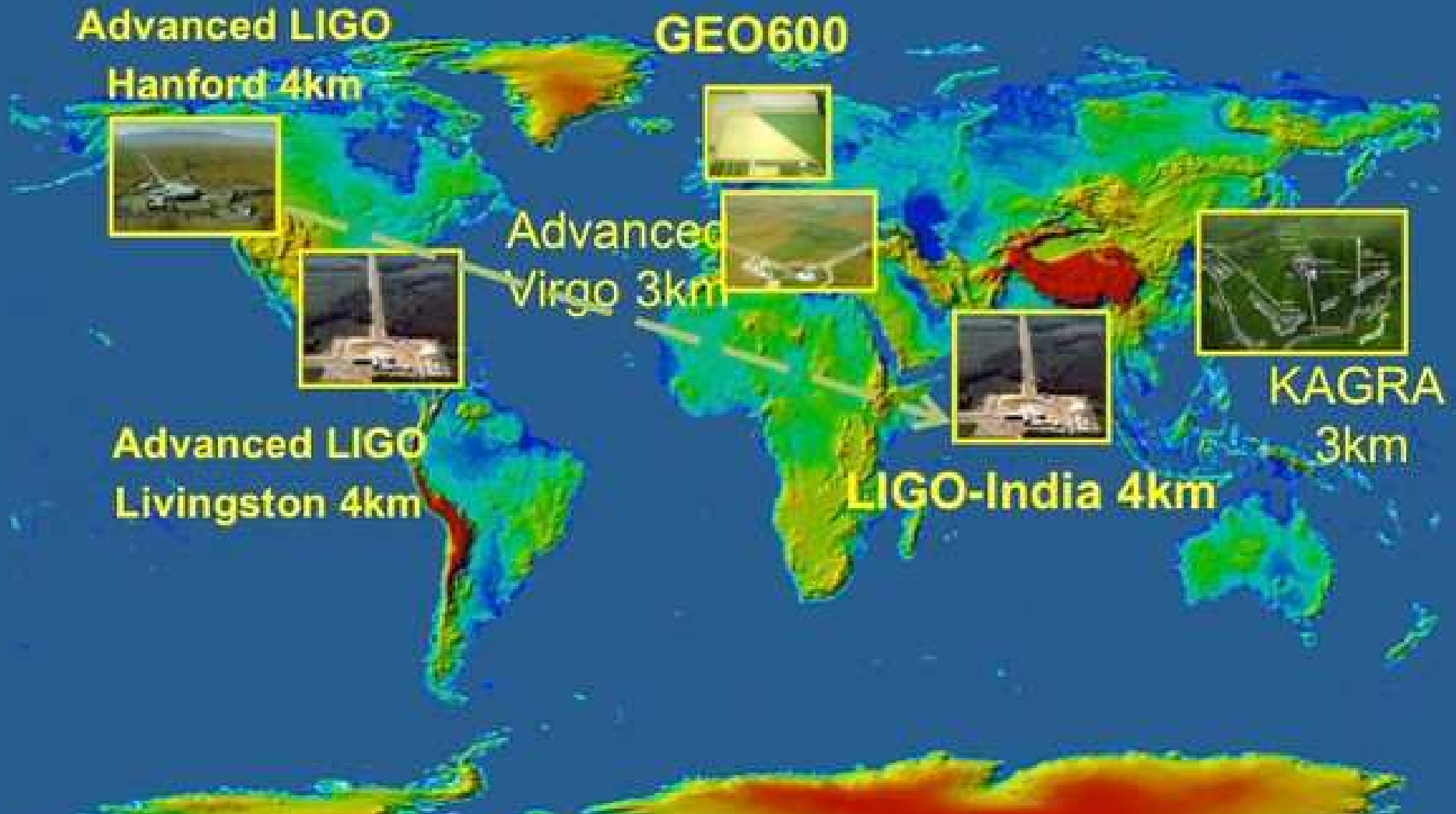
Gravitáció változása  $\Rightarrow$  térszerkezet fodrozódása  
 $\Rightarrow$  gravitációs hullámzás

# Gravitációs hullámok

- 1916: Einstein megjósolja a létezésüket
- 1962: M. E. Gertsenshtein and V. I. Pustovoit (SzU) optikai módszert javasol a megfigyelésükre. 1972: R. Weiss (MIT, USA) is javasolja.
- 1979: LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) tervezése, 1994: Kezdődik LIGO építése két helyen: Washington és Louisiana. 1996: VIRGO építése Pisa mellett.
- 2007: LIGO + VIRGO együttműködés. 2002-2010: Nem észlelnek grav. hullámot → újjáépítés.
- 2015. szept.: Advanced LIGO működik, 2016. aug.: Advanced VIRGO is.
- 2016. febr. 11: LIGO: fekete lyukak összeolvadása.
- 2017. okt., Nobel-díj: Rainer Weiss, Kip Thorne és Barry Barish.
- 2017. okt. 16: 2 neutroncsillag összeolvadása (ötféle észlelés!).

# Grav. hullám: obszervatóriumok, 2022

## *The GW Detector Network ~2022*



# Gravitációs hullám észlelése



LIGO, Hanford:  $2 \times 4$  km



VIRGO, Pisa mellett:  $2 \times 3$  km

Sokszorososan oda-visszavert lézersugarak merőleges csövekben:  
grav. hullám megváltoztatja a két csőben a tükrök távolságát.

Állandó fénysebesség mellett különböző érkezési idő

Távolságkülönbség mérése hihetetlen pontossággal  
(atommagméret/10000 !)



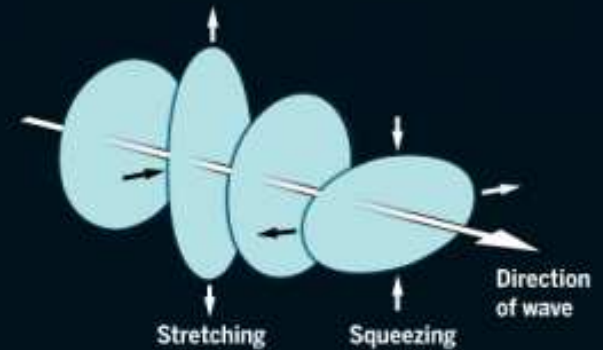
# LIGO: grav. hullám optikai észlelése

## Catching a wave

As Einstein calculated, a whirling barbell-shaped mass, such as two black holes spiraling together, radiates ripples in space-time: gravitational waves.



Zooming along at light speed, a wave stretches space in one direction and squeezes in the perpendicular direction, then reverses the distortions.



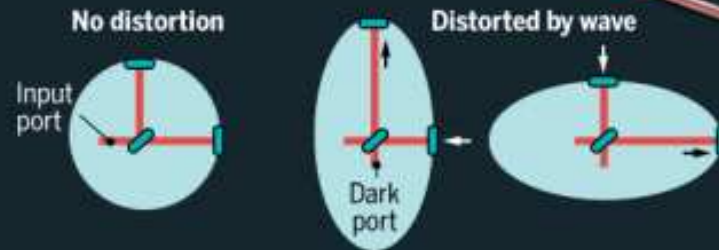
LIGO has detected waves of wavelength roughly equal to the distance between the detectors. The waves stretch each detector by about 1/10,000 the width of a proton.



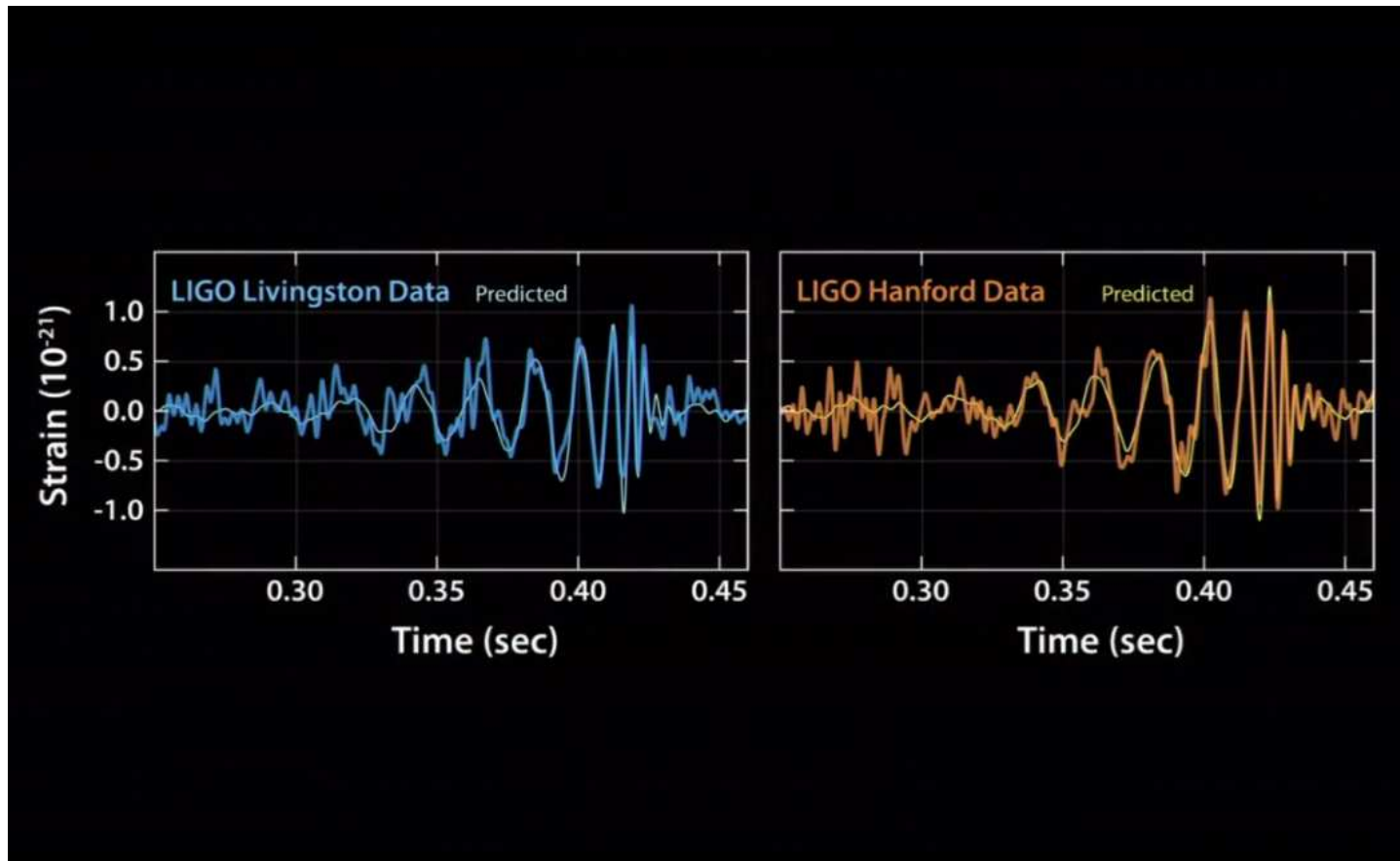
Earth

4 km arms house two laser beams

Light bounces back and forth in the 4-kilometer arms of a LIGO interferometer. When a wave makes the arms unequal in length, light leaks out the interferometer's "dark port," revealing the wave.



# LIGO + VIRGO: GW150914



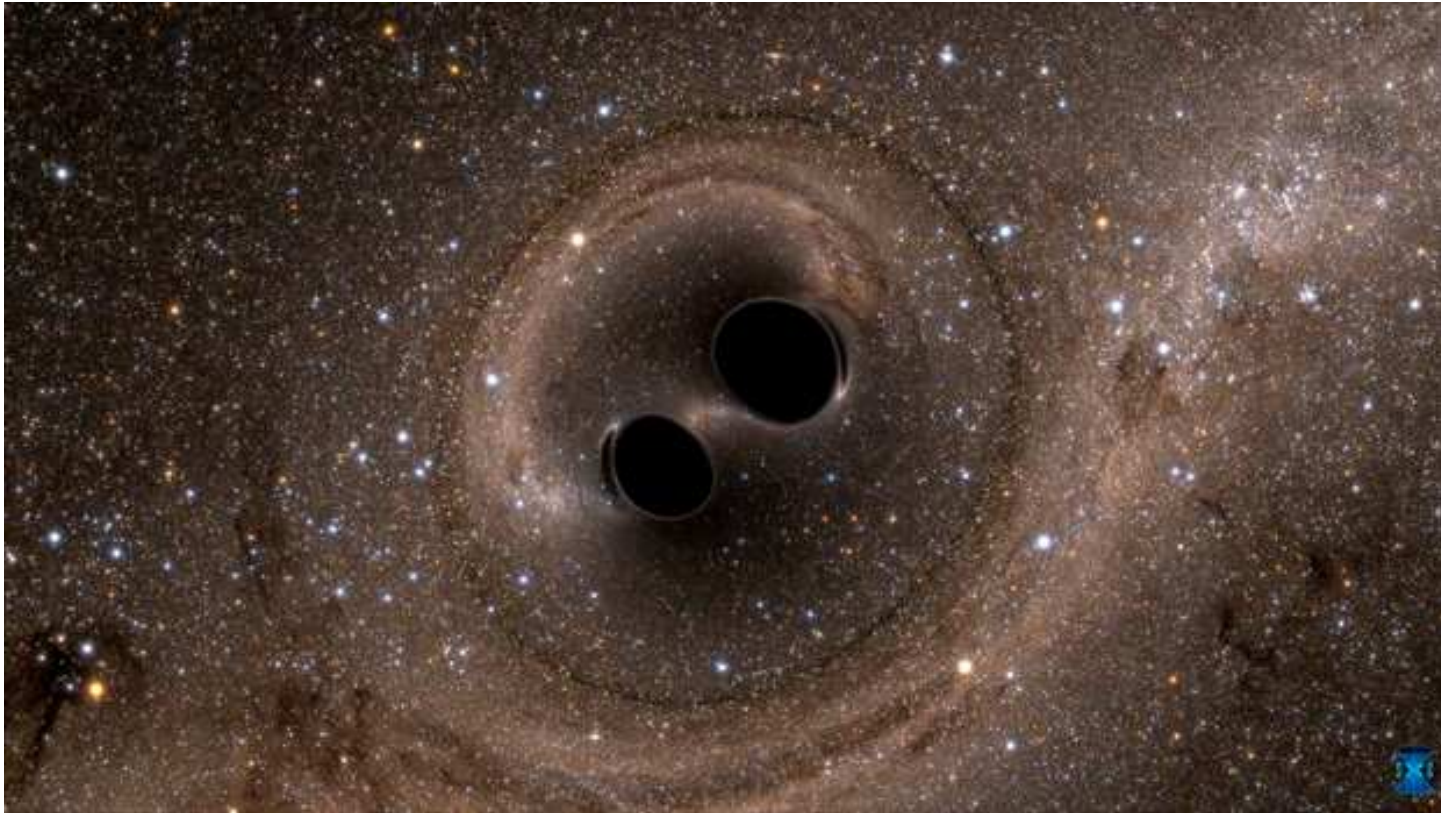
A LIGO észlelt jele (2015. szept. 14.) feketelyukas szimulációval

LIGO Scientific and Virgo Collaborations, Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 061102

Magyar szerzők: Barta D., Bojtos P., Debreczeni G., Frei Z., Gergely L., Gondán L., Raffai P.,

Tápai M. és Vasúth M. (Eötvös E., Szegedi E. és Wigner FK)

# GW150914: fekete lyukak összeolvadása



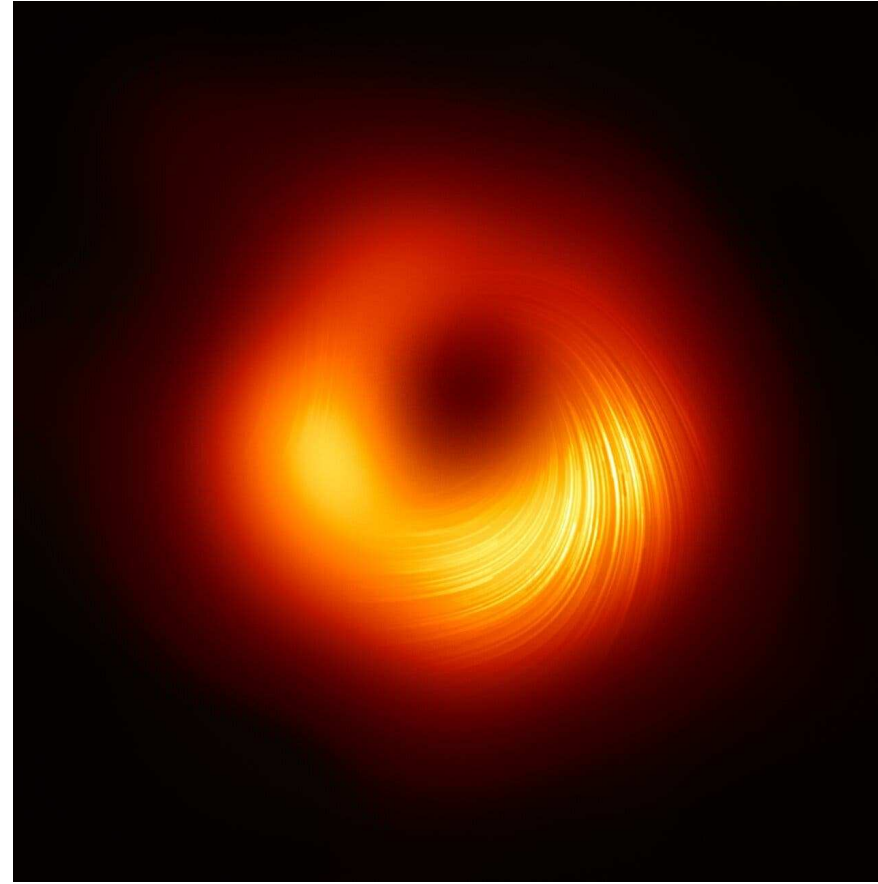
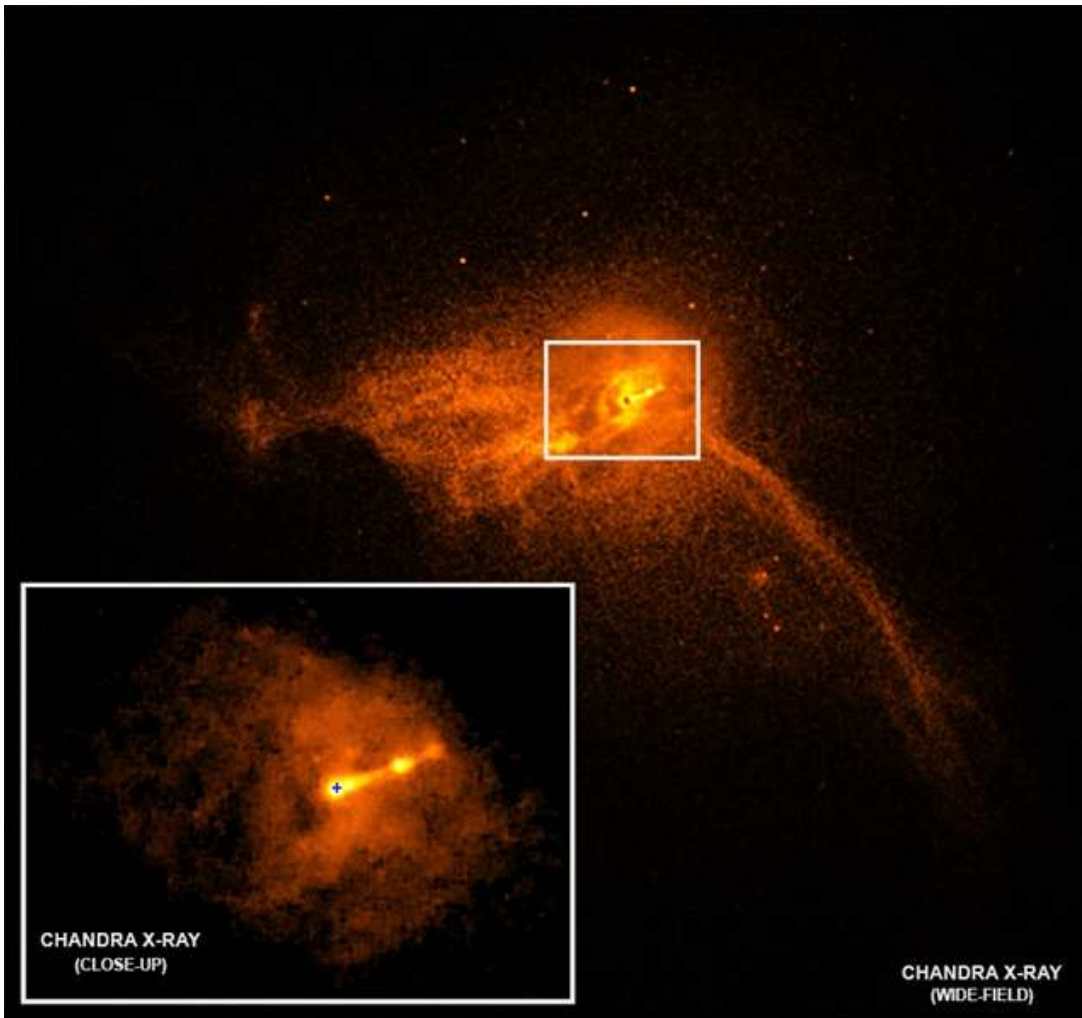
Egy nagyobb (36 naptömeg) és egy kisebb (29 naptömeg) fekete lyuk spirális keringése és összeolvadása 1,3 milliárd fényévre.

3 naptömegnyi energia távozása ( $E = mc^2$ ).

Két fekete lyuk összeolvadása: szimuláció



# Fekete lyuk az M87 galaxisban



Óriás (6 milliárd naptömegű,  $M_{\odot}$ ) fekete lyuk az M87 galaxis közepén, polarizált fénnel, mutatva a mágneses erővonalakat

# További megfigyelések

Az első megfigyelést azóta sok újabb követte, 2017-ben már mindkét LIGO és a működésben lépett VIRGO egyidejű észlelésével, erősen növelve a helymeghatározás pontosságát (háromszögelés).

Jel	típus	$M_1 [M_\odot]$	$M_2 [M_\odot]$	típus	$MM [M_\odot]$	táv. [Mpc]
GW150914	BH + BH	35	30	BH	62	440
GW151226	BH + BH	14	8	BH	21	440
GW170104	BH + BH	31	19	BH	49	880
GW170814	BH + BH	31	25	BH	53	540
GW170817	NS + NS	1,5	1,3	NS/BH	2,74	40

Viszonylag kis fekete lyukak: észlelési frekvenciatartomány korlátozza.

GW170817: Két neutroncsillag összeolvadása.

# GW170817: áttörés a csillagászatban

**GW170817:** Két neutroncsillag összeolvadása.

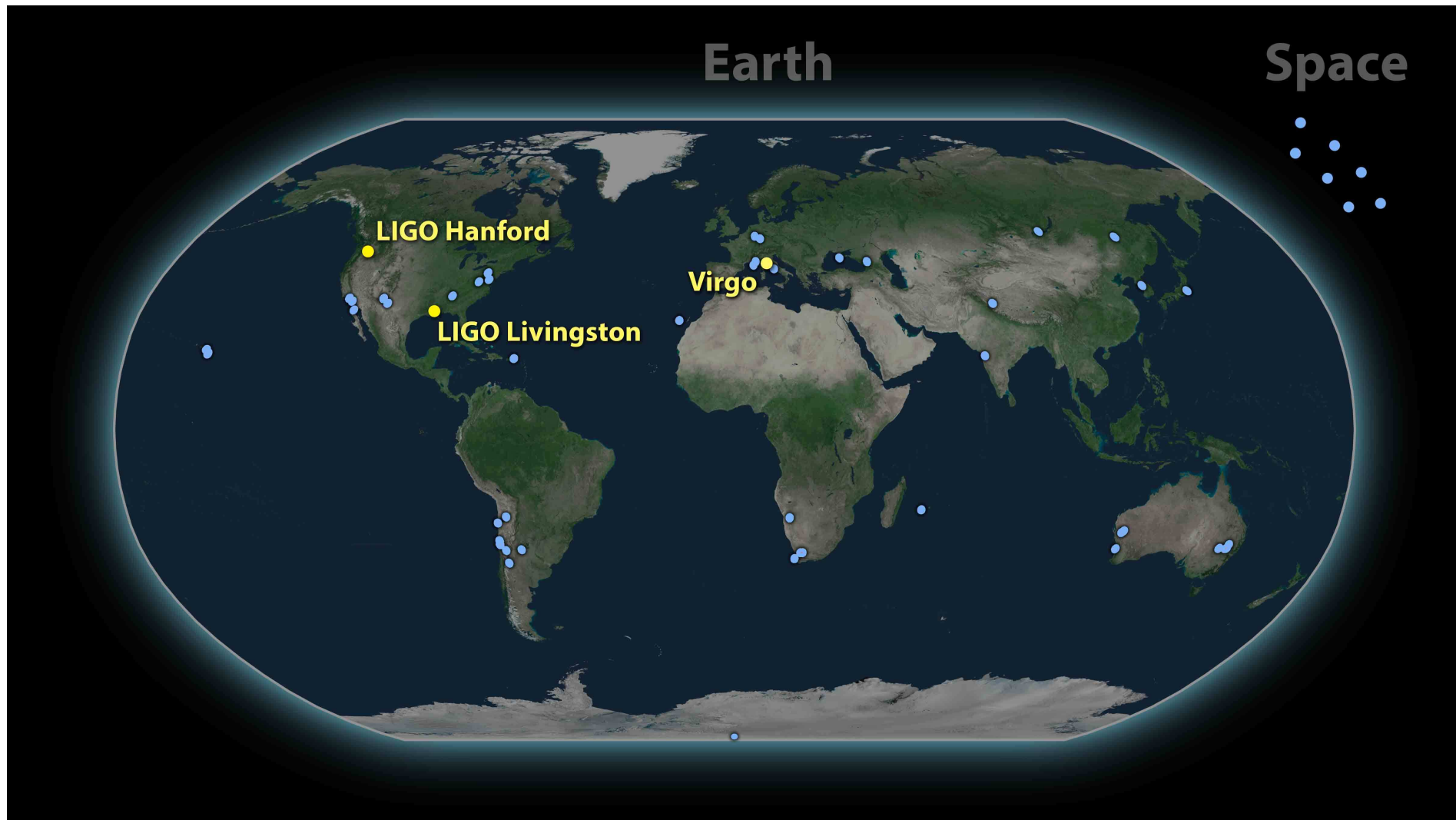
Észlelve a grav. hullám után 1,7 mp-cel gamma-kitöréssel (Fermi űrteleszkóp), 11 órával későbbtől több égi és földi teleszkóppal (rádiosugár, fény, röntgen) napokig.

Valóságos áttörés, bizonyít jó pár elméleti feltevést:

- Neutroncsillagok létezését, keletkezését szupernova után.
- A nehéz elemek (Au, Pt, ...) kibocsátását szupernova és neutroncsillag-robbanás közben.
- A nagyerejű gamma-kitörések eredetét.
- A gravitációs hullám fénysebességgel való terjedését.

**A kombinált többcsatornás csillagászat kezdete!**

# GW170817: megfigyelési állomások



# Az elemek keletkezése

## Element Origins

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U													

**Merging Neutron Stars**  
**Dying Low Mass Stars**

**Exploding Massive Stars**  
**Exploding White Dwarfs**

**Big Bang**  
**Cosmic Ray Fission**

Based on graphic created by Jennifer Johnson



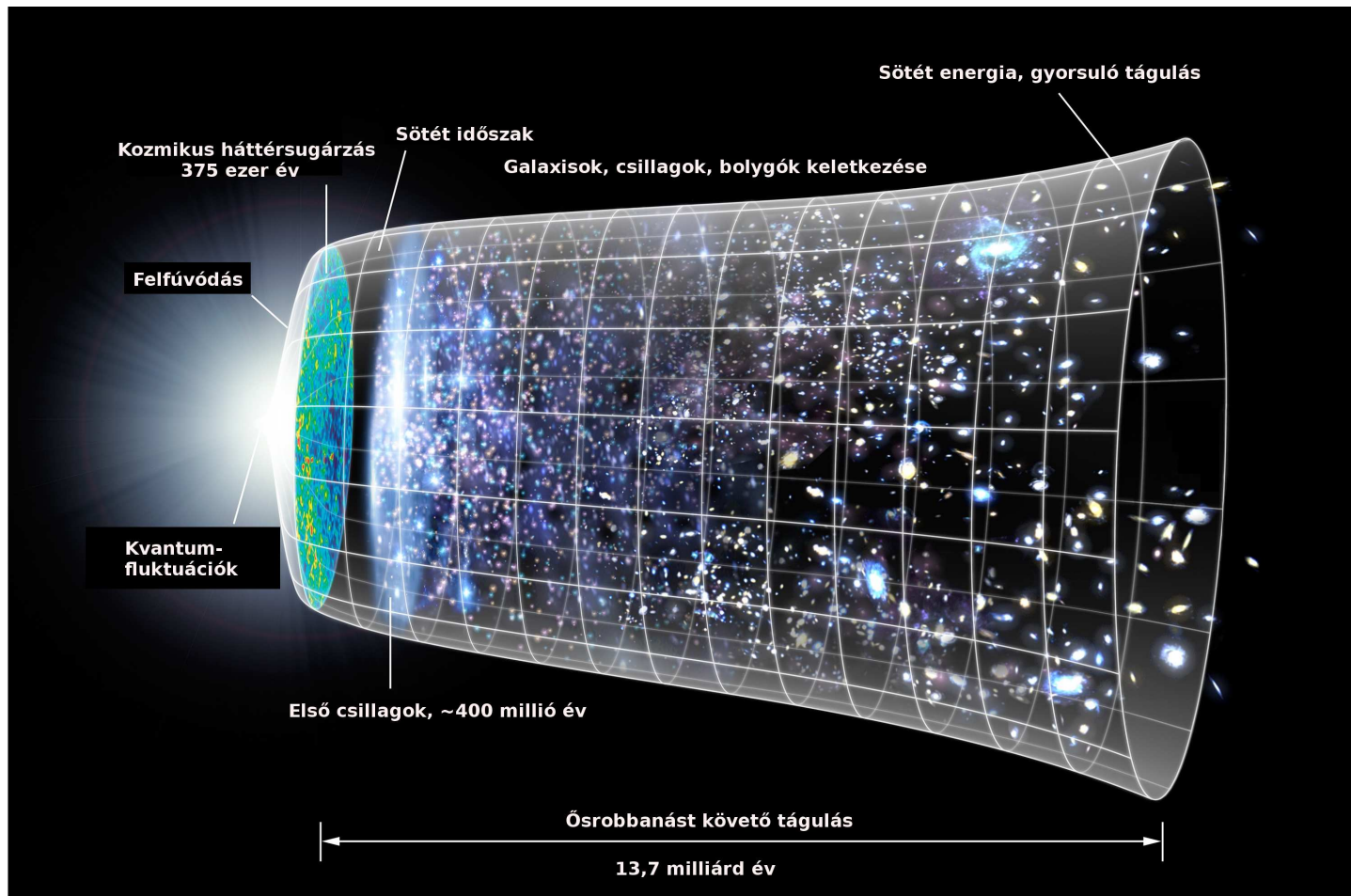
# Legkorábbi tudósítóink

⇓ Grav. hullámok (ősrobbanás, felfúvódás)

⇓ Neutrínók (atommagok kialakulása)

⇓ Koszmos háttérsugárzás (atomok kialakulása)

⇓ Csillagászati távcső (csillagok keletkezése)



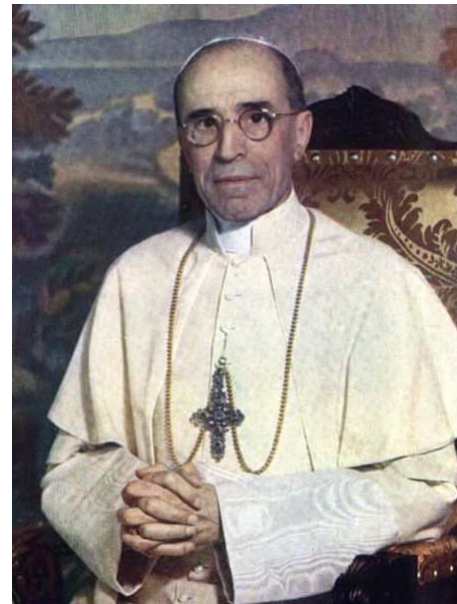
# Ősrobbanás és vallás

Ősrobbanás értelmezéséhez  
az evolúció a fő kérdés

A legtöbb vallás elfogadja

XII. Pius már az ötvenes években  
beletörődött egy részleges evolúcióba.

A Vatikán ma teljes mértékben elfogadja.



XII. Pius pápa



# Evolúció és a Vatikán

2009. február: G. Ravasi bíboros, a Pontifical Academy of Sciences elnöke, abból az alkalomból, hogy a Vatikán konferenciát szervezett **Charles Darwin: *A fajok eredete*** megjelenésének 150. évfordulójára:



*Habár a Vatikán korábban ellenséges volt a darwinizmussal szemben, soha nem vetette azt hivatalosan el és a könyvet sem ítélte el. Az evolúció ötlete már Szent Ágoston és Aquinói Szent Tamás műveiben is fellelhető.*

# Szent Ágoston, Hippo püspöke, 354-430

Szent Ágoston vallomásai, 397

(Dr. Vass József fordítása)

<http://vmek.niif.hu/04100/04187/04187.htm>

Önéletrajz és vita Istennel a Szentírásról

Könyvekre és fejezetekre tagolódik

A fordítók fejezetcímekkel látták el,  
pedig a latin eredetiben nem láttam. A  
fejezet lehet egy mondat vagy több  
oldal.



Szent Ágoston, 354 – 430

(Philippe de Champaigne, XVII. sz.)

Világképe igen közeli a modern kozmológiához

# Szent Ágoston vallomásai, XI. könyv

## A teremtés

- V. fejezet: *Isten a világot semmiből teremtette*
- VI. fejezet: *A teremtő ige nem lehetett valami időben elhangzó parancs. Akárminek képzelem ugyanis azt a teremtést megelőző valamit, ami hordozója lett volna parancsodnak, biztosan nem volt, hacsak azt is meg nem teremtéd vala.*
- X. fejezet: *Működött-e Isten a világ teremtése előtt?*  
Ez vissza-visszatérő kérdése. A válasz:
- XI. fejezet: *Isten örökkévalóságához nincs köze időnek.*
- XII. fejezet: *A teremtés előtt Isten kifelé, vagyis teremtő módon semmit nem cselekedett.*
- XIII. fejezet: *A teremtés előtt nem volt idő, mert ez maga a teremtmény.*

# Ősrobbanás és teremtés: XII. Pius pápa

XII. Pius 1951-ben (jóval az előtt, hogy a fizika elfogadta volna!) üdvözölte az Ősrobbanást, mint a Világ teremtését.

*Isten létezésének bizonyítékai a modern természettudomány fényében*

XII. Pius pápa beszéde a Vatikáni Tudományos Akadémia 1951 november 22-i ülésén

<http://www.papalencyclicals.net/Pius12/P12EXIST.HTM>

*51. Így tehát a Teremtés megtörtént. Tehát van Teremtő. Tehát Isten létezik! Habár nem nyíltan kimondott és nem teljes, ez az a válasz, amelyet a tudománytól vártunk, és amelyet az emberiség jelenleg vár tőle.*

# Edwin Hubble és XII. Pius pápa, 1951

Edwin Hubble levelet kapott egy barátjától, aki megkérdezte, a pápa bejelentése kvalifikálja-e szentté avatásra:

*Amíg a reggeli újságban nem olvastam róla, nem gondoltam volna, hogy a pápának rád van szüksége Isten létének bizonyításához.*



Edwin Hubble

1889 – 1953

Georges Lemaître meggyőzte a Vatikán tudósait, hogy nem szabad túlságosan építeni erre a nem bizonyított elméletre, és a pápa többet nem hivatkozott rá.

# Ősrobbanás és II. János Pál

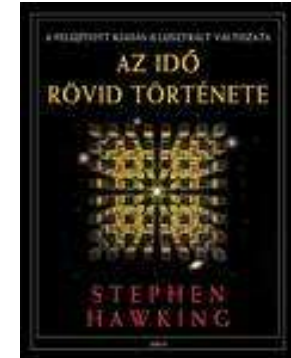
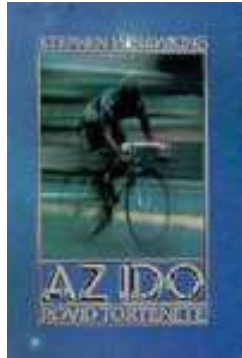
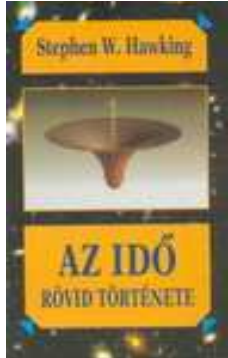
II. János Pál, Pontifical Academy of Sciences, 1996:

*... úgy tűnik, hogy a modern tudománynak ... sikerült megtalálnia az elsődleges fiat lux [legyen világosság] pillanatát, amikor a semmiből az anyag mellett fény és sugárzás tengere tört elő, az elemek meghasadtak és kavarogtak és galaxisok millióivá váltak. ... Így tehát a fizikai bizonyításra jellemző konkrétsággal [a tudomány] megerősítette a világegyetem esetlegességét és annak a kornak a megalapozott levezetését, amikor a Világ előjött a Teremtő kezéből. Így megtörtént a teremtés. Kijelentjük: tehát létezik Teremtő. Tehát Isten létezik!*



# II. János Pál és Stephen Hawking

Stephen W. Hawking, miután beszélt II. János Pállal, aki azt tanácsolta, ne fessegessék az Ősrobbanás pillanatát, mert az Isteni beavatkozás volt:



*Örültem, hogy nem ismerte a konferencián éppen elhangzott előadásom témáját — a lehetőségét annak, hogy a tér-idő ugyan véges, de nincs határa, kezdete sem, tehát a Teremtésnek sincs időpontja.*

Szerintem a kettő nincs ellentmondásban...



# Teológia és fizika

A vallások nagyrészt elfogadják az Ősrobbanást  
Teremtésnek

Ez ki is következtethető a táguló világegyetemből:  
valamikor mindennek egészen közel kellett lennie  
egymáshoz.

A modern fizika tér- és időfogalma is logikailag levezethető  
Spinoza, Kant, Hegel, Engels: értékes tudományos  
következtetések

**A fizika kísérleti tudomány**, másképpen kérdez és kutat,  
mint a filozófia vagy a teológia.

**Kérdése: hogyan működik a Világunk**

**Módszere: Elmélet, számítások, kísérleti ellenőrzés  
megfigyeléssel**

Lemaître számítása pontos volt, mégsem fogadták el (ő  
maga sem), amíg megfigyelések nem erősítették meg.

# Fizika és teológia

Ősrobbanás: modell, amelyet eddig minden megfigyelés alátámaszt

De a megfigyelések csak az első 0,01 mp-től érvényesek, azelőttre csak elméleti becslések és spekulációk.

**CERN Nagy hadron-ütköztetője:** Ősrobbanás utáni milliomod mp megközelítése anyagállapotban.

Talán a sötét anyagot is megtaláljuk.

# Olvasnivaló

- <http://hu.wikipedia.org/wiki/Ősrobbanás>
- Leon Lederman és Dick Teresi: *Az Isteni A-tom avagy Mi a kérdés, ha a válasz a világegyetem?*
- Stephen Hawking: *Az idő rövid története*
- Frei Zsolt és Patkós András: *Inflációs kozmológia*
- Jáki Szaniszló: *Isten és a kozmológusok*
- HD: Fizikai Szemle, 2010 augusztus

# Köszönöm a figyelmet