

## 2. Rész

# Kozmológia a 21. században

## A FIRAS spektrum

A hőmérsékleti sugárzás spektrumát a Planck-féle eloszlás írja le

$$d\varepsilon(f, T) = 8\pi \frac{(kT)^4}{(hc)^3} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \quad x = \frac{hf}{kT}$$

$$\varepsilon_\gamma(T) = \int_0^\infty d\varepsilon(f, T) = cT^4 \quad \text{Stefan-Boltzmann}$$

$$E_\gamma = \frac{h}{\lambda} \quad \& \quad \forall \lambda \propto R \quad \Rightarrow \quad kT = \langle E_\gamma \rangle \propto \frac{1}{R}$$

$$\rho c^2 = \varepsilon \propto \frac{1}{R^n}$$

sugárzás:	$n = 4$
anyag:	$n = 3$
kozmológiai állandó:	$n = 0$

## A FIRAS spektrum

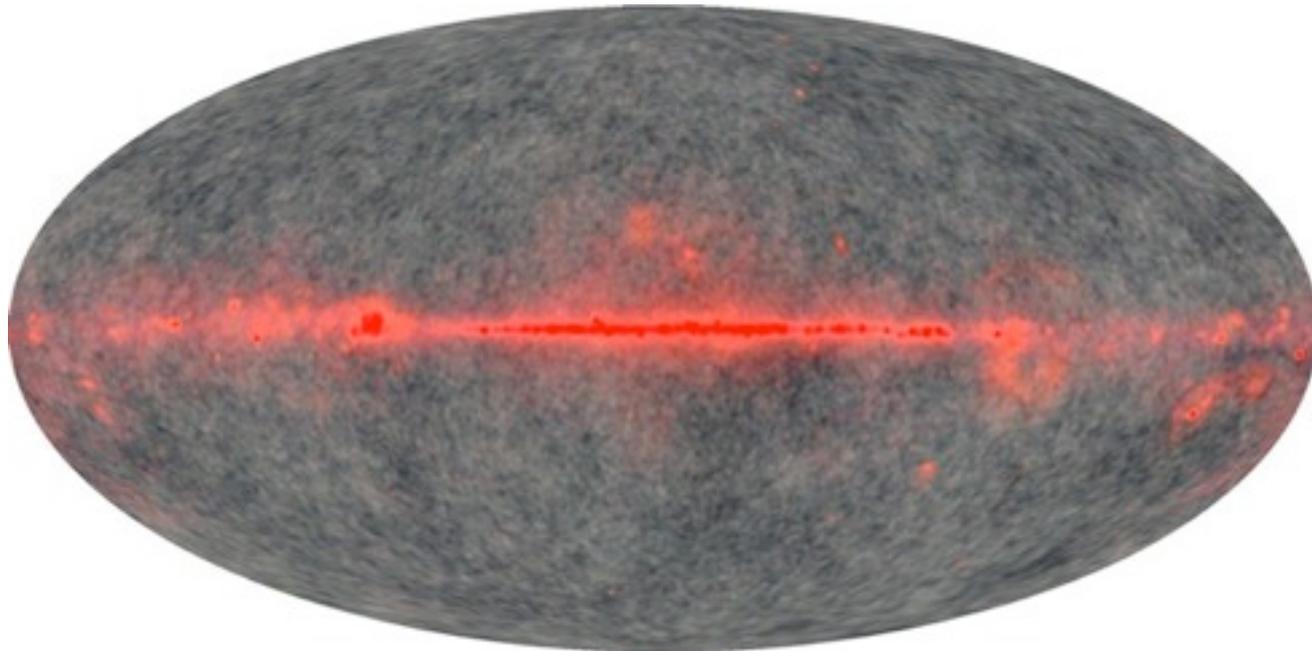
A hőmérsékleti sugárzás spektrumát a Planck-féle eloszlás írja le

$$d\varepsilon(f, T) = 8\pi \frac{(kT)^4}{(hc)^3} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} \quad x = \frac{hf}{kT}$$

$$n_\gamma(T) = \int_0^\infty \frac{d\varepsilon(f, T)}{hf} = 8\pi \frac{(kT)^3}{(hc)^3} \int_0^\infty \frac{x^2 dx}{e^x - 1} =$$

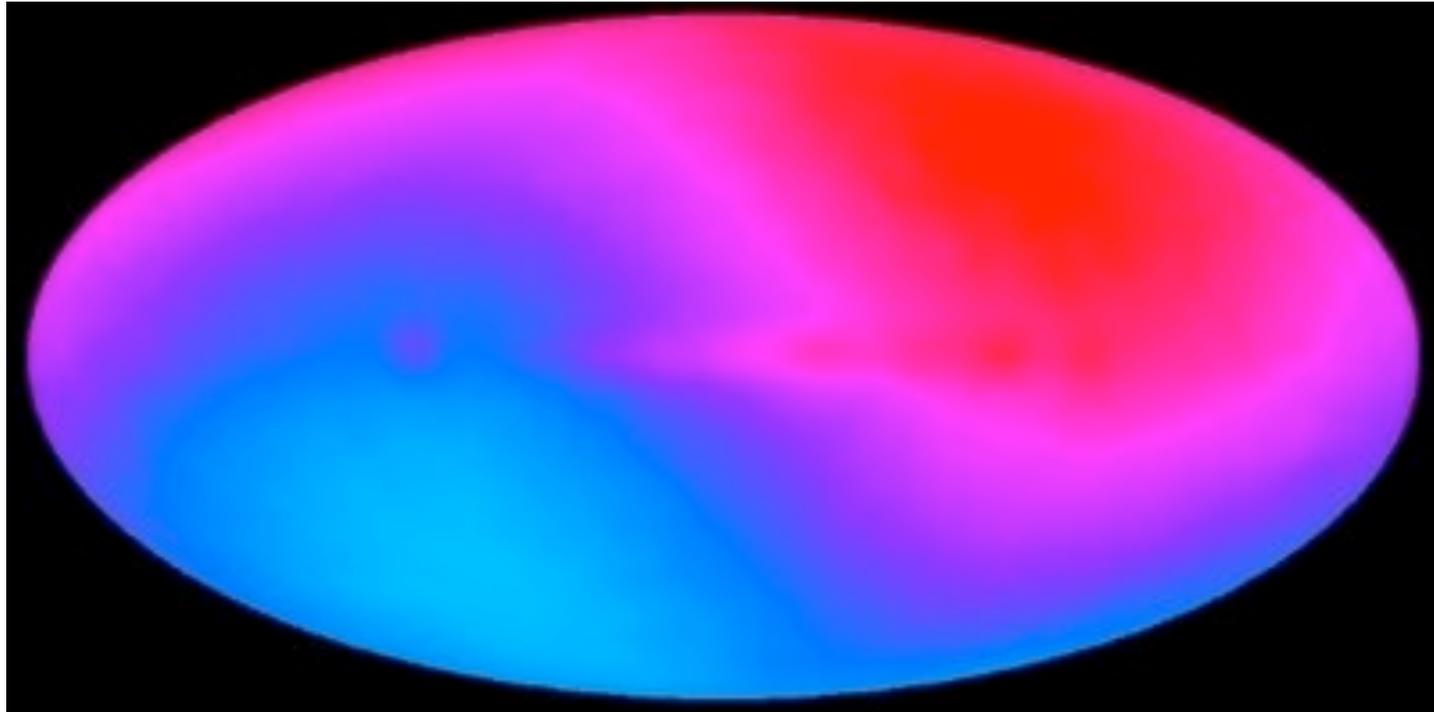
9. kérdés: Mekkora a nukleáris részecske/foton arány?

Izotrópnek látta-e a COBE VE-t?



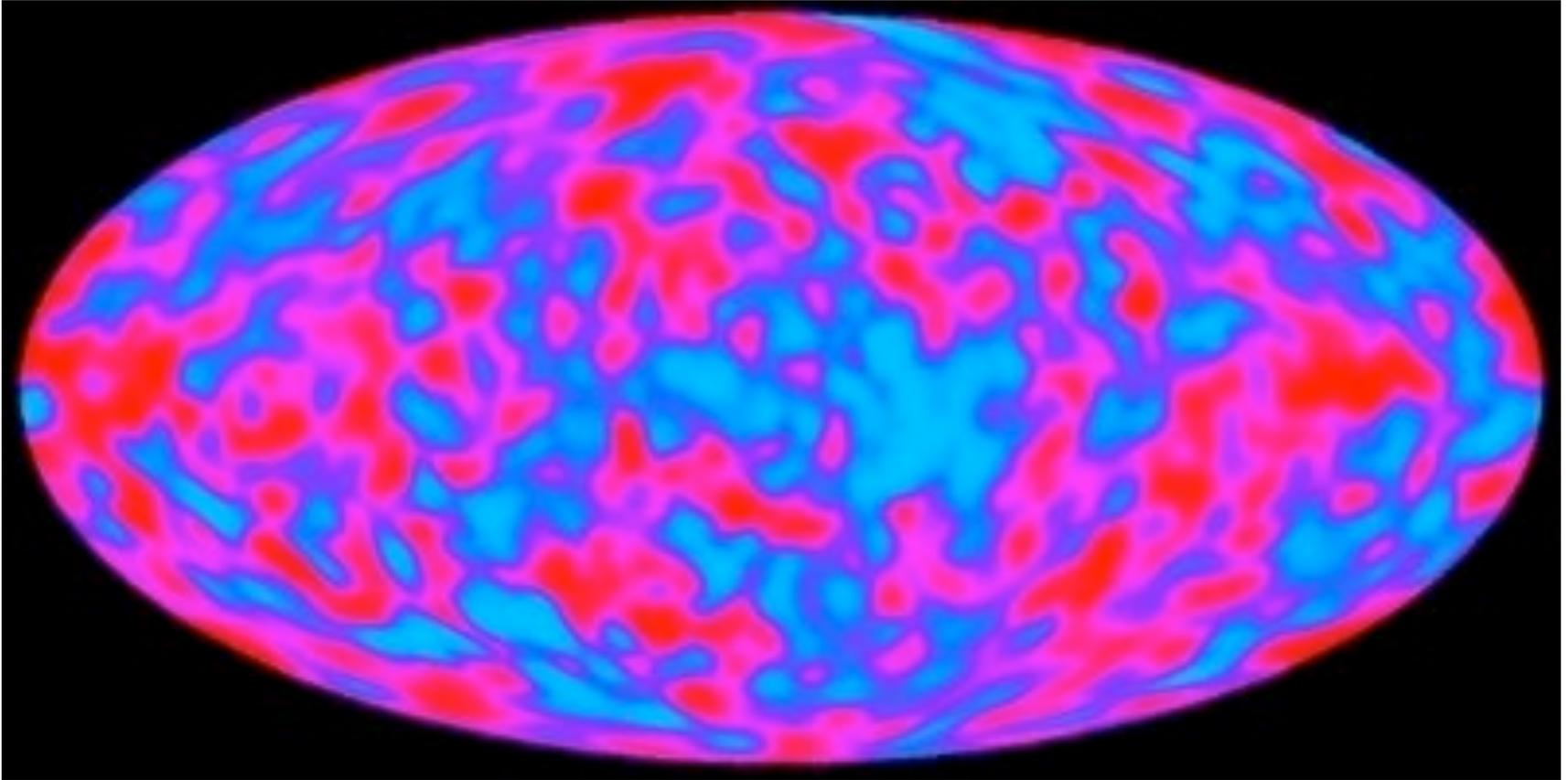
A Tejút hatását le kell vonni

# Izotrópnak látta-e a COBE VE-t?



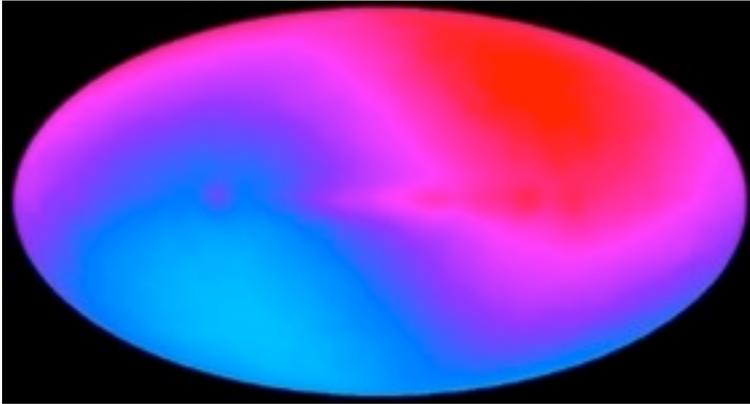
A dipólus anizotrópia a Föld mozgásának  
következménye (szintén le kell vonni)

# A COBE felfedezése

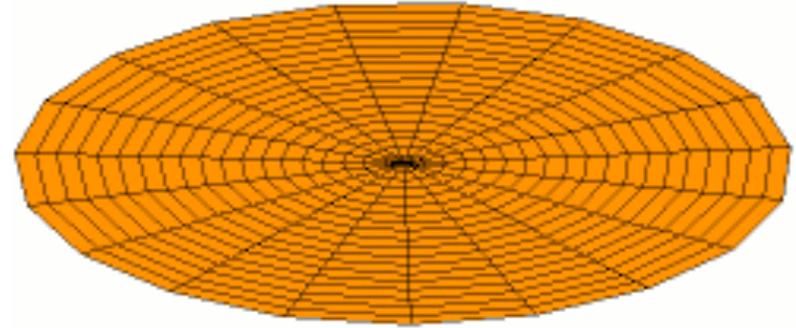


A piros és kék tartományok hőmérséklet különbsége  $10^{-5}\text{K}$   
(0,01mm-es hullámok az uszodában)

# Multipólus sorfejtés

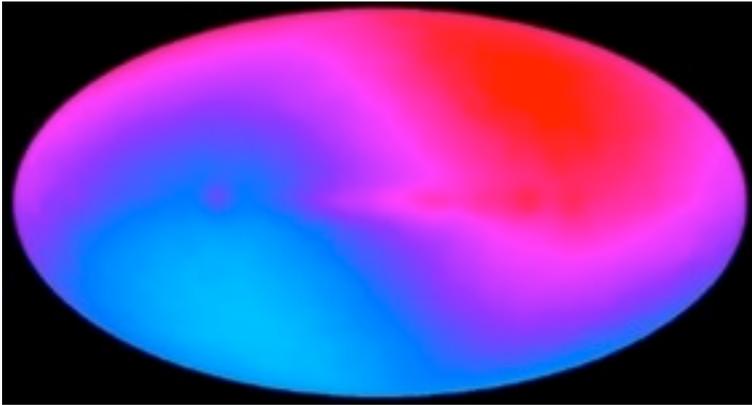


$l=1$

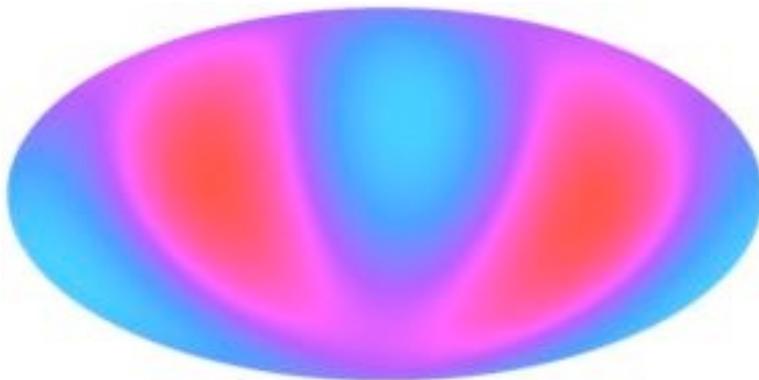
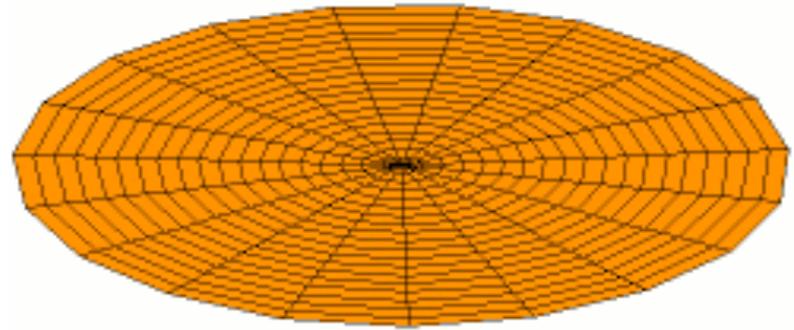


$$T(\vartheta, \varphi) = \sum_{\ell, m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\vartheta, \varphi)$$

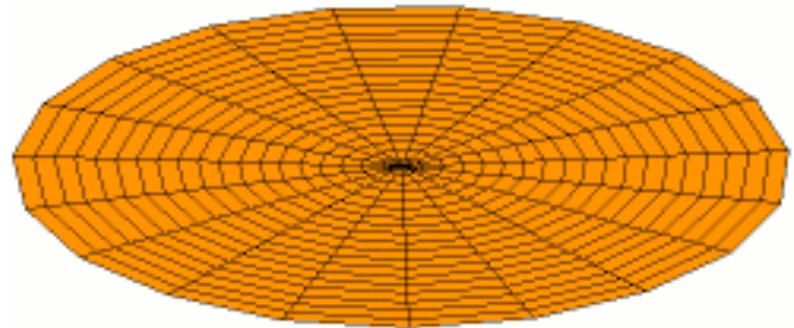
# Multipólus sorfejtés



$l=1$

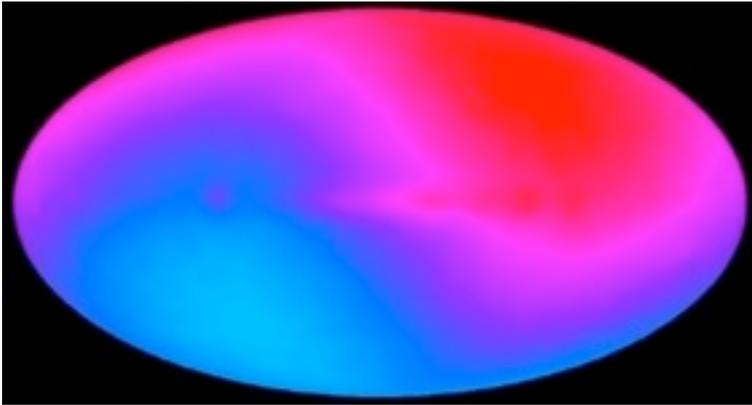


$l=2$

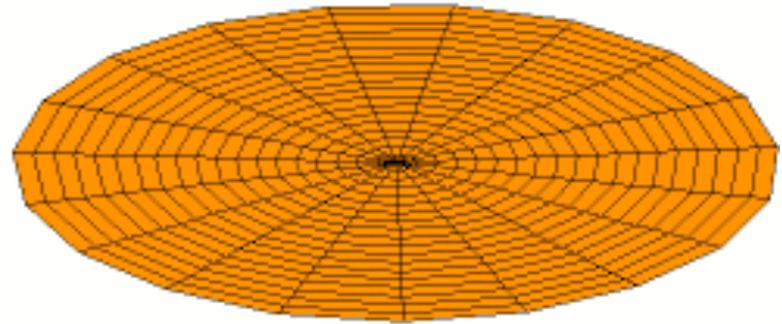


$$T(\vartheta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$

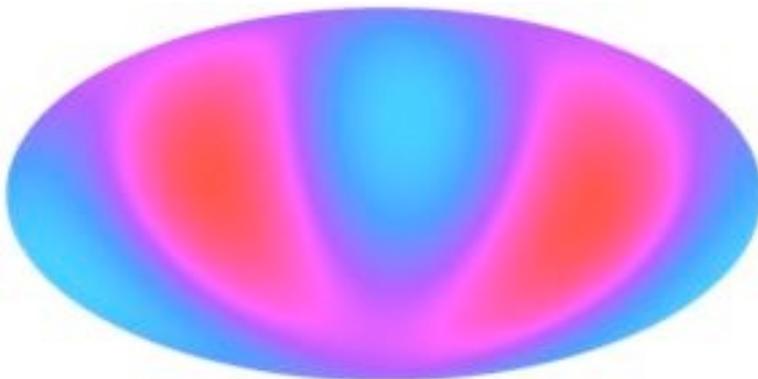
# Multipólus sorfejtés



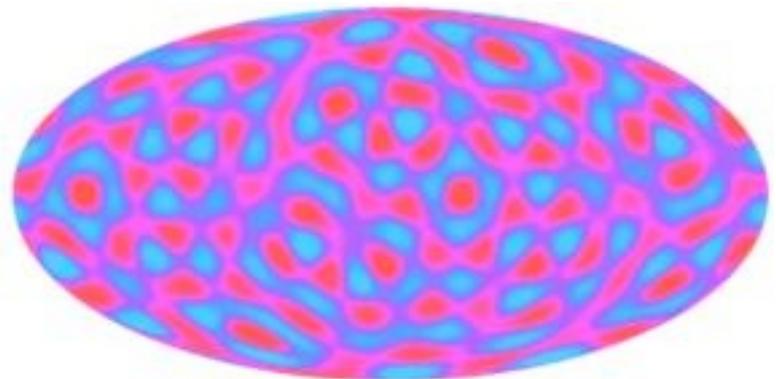
$l=1$



$l=4$



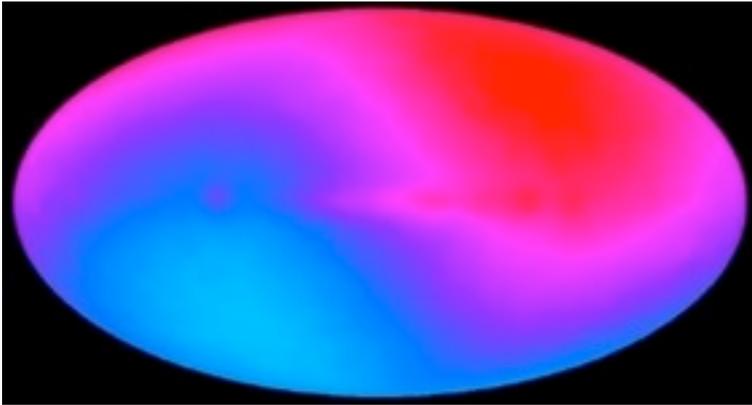
$l=2$



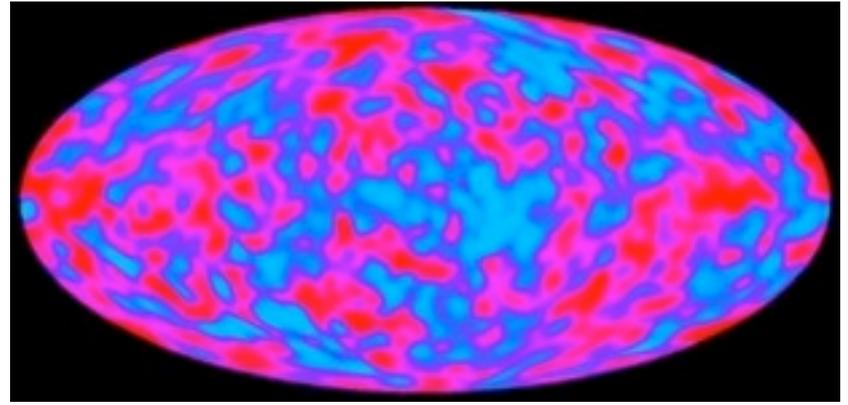
$l=16$

$$T(\vartheta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$

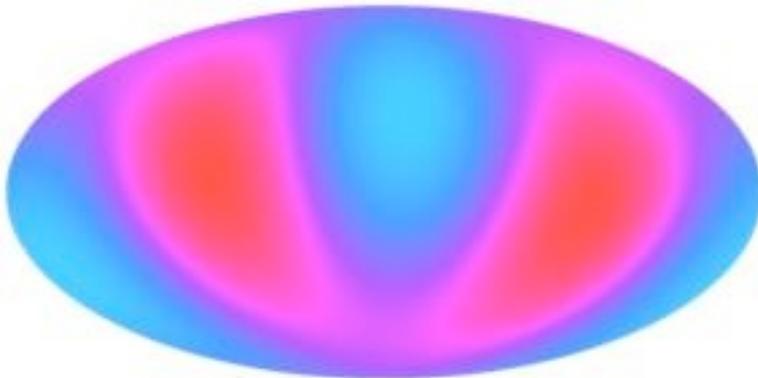
# Multipólus sorfejtés



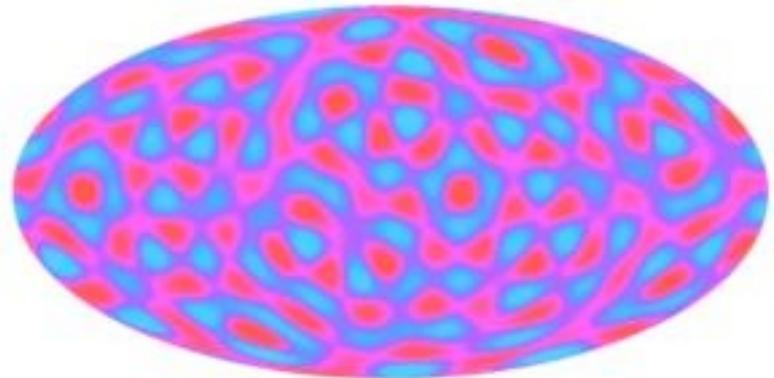
$l=1$



$\sum_l$

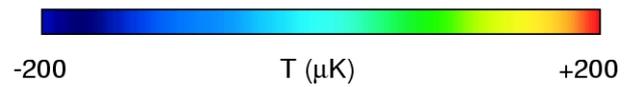
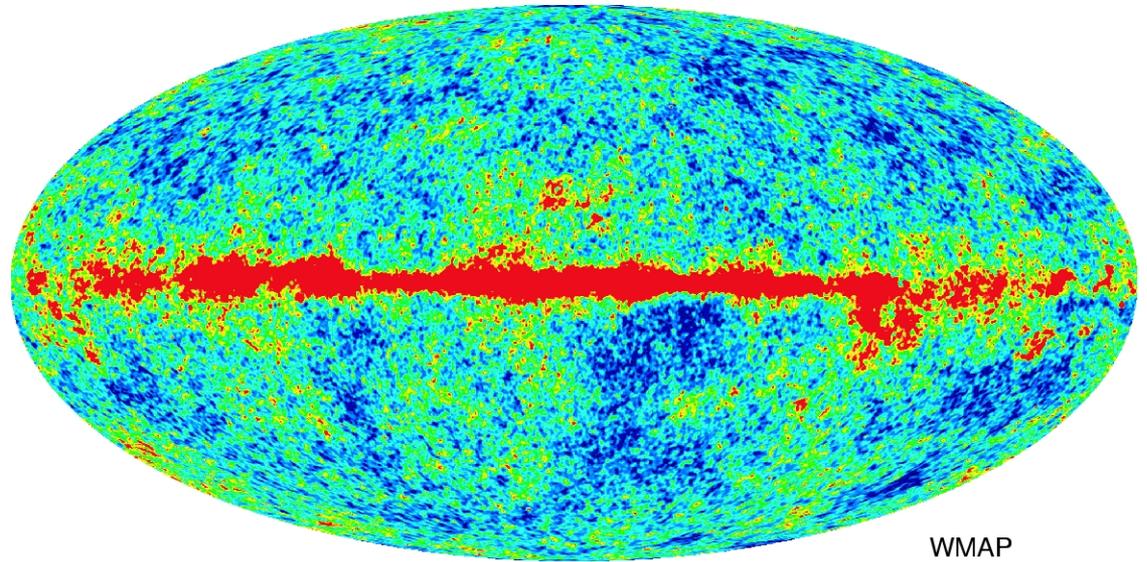
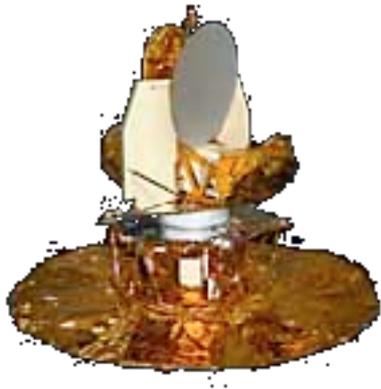
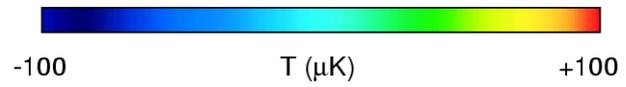
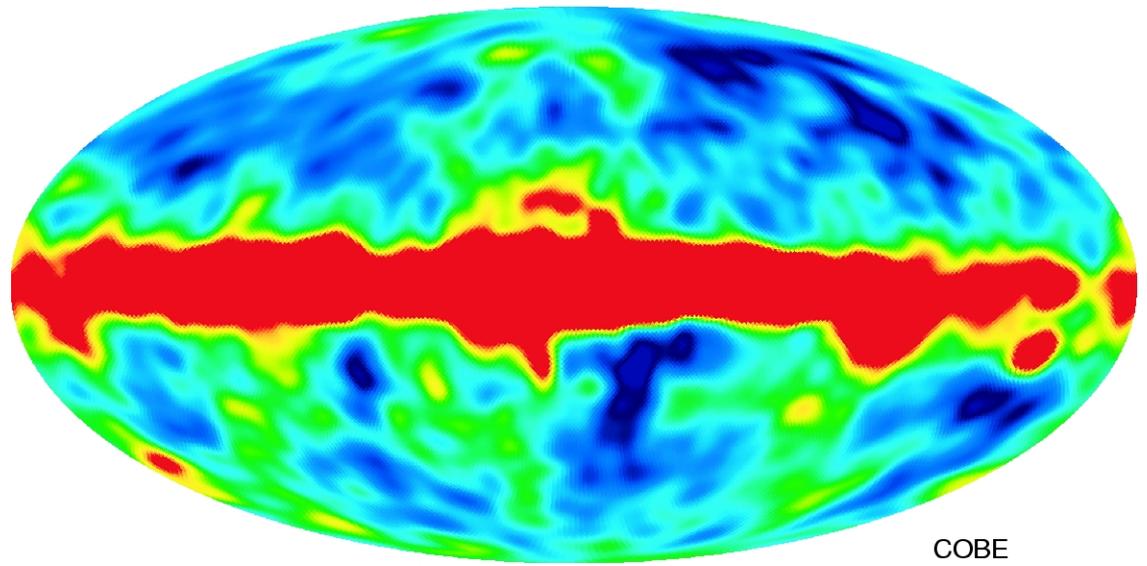


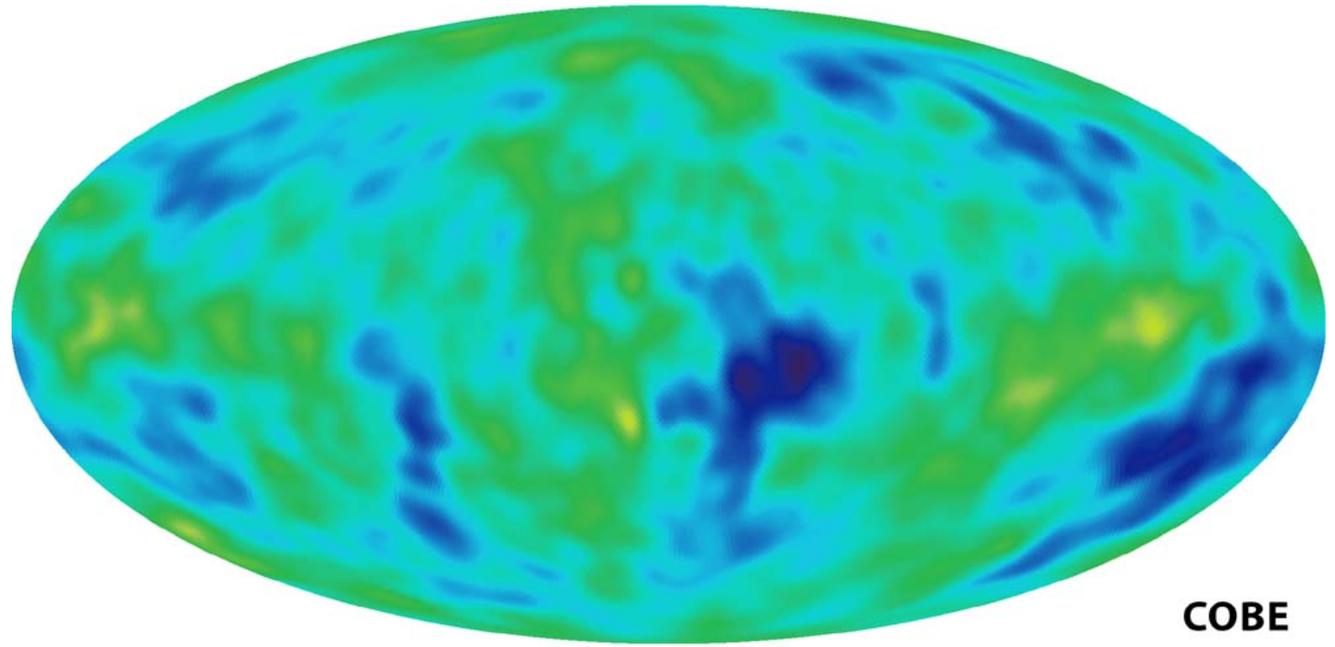
$l=2$



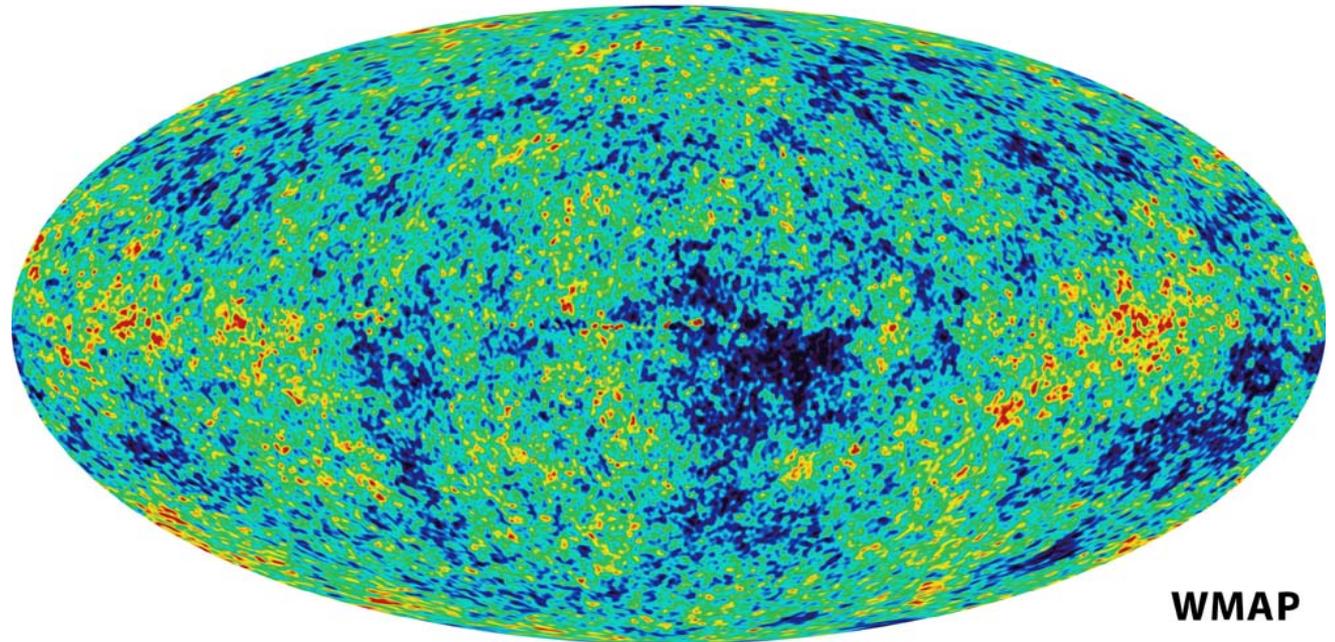
$l=16$

$$T(\vartheta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$



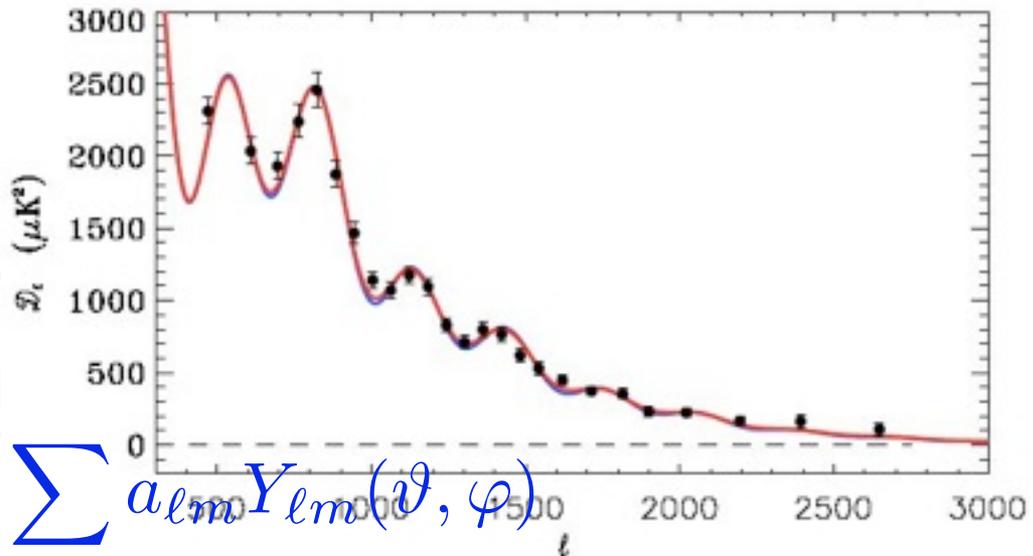
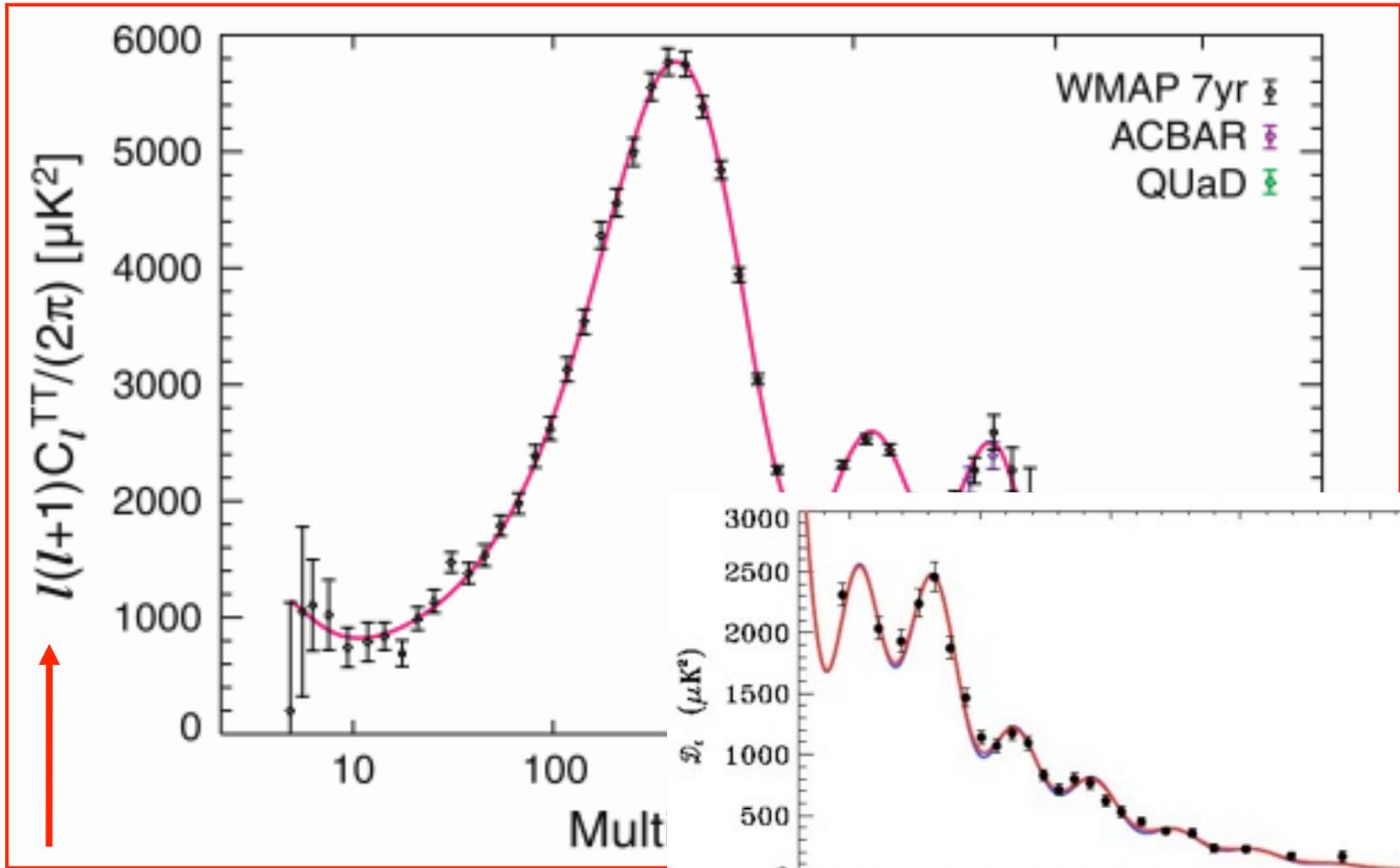


**COBE**



**WMAP**

# Power spectrum



$$l \sum_m a_{lm}^2$$

$$T(\vartheta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$

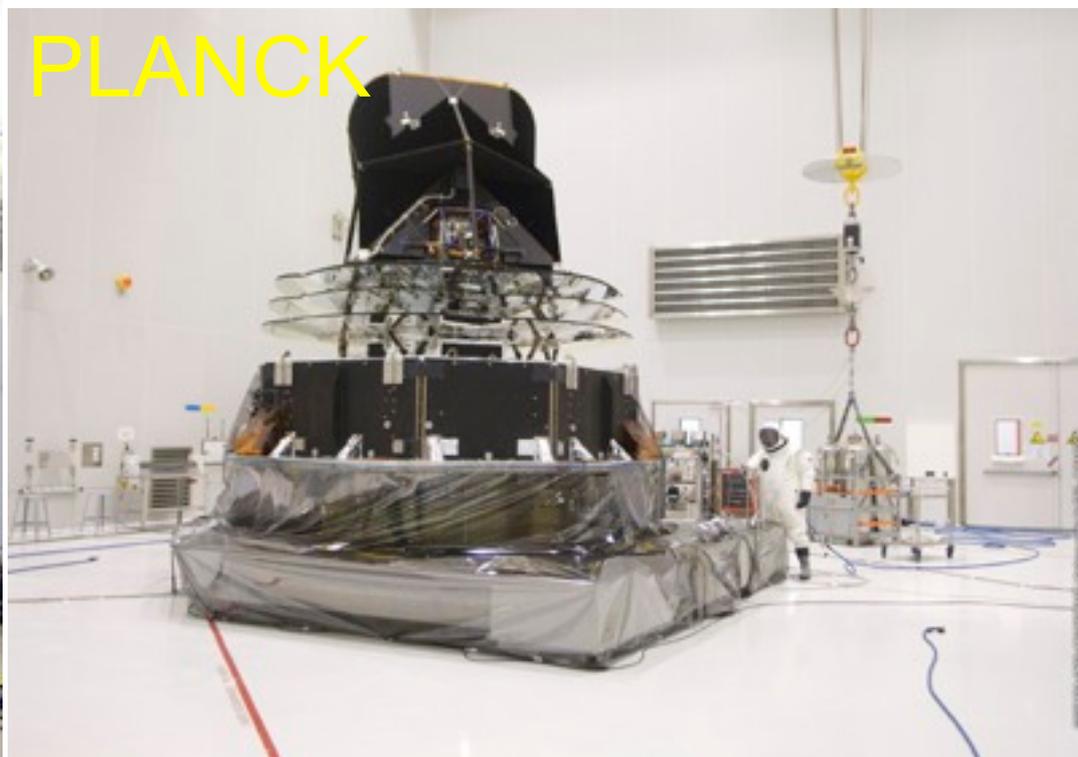
# Felső légköri kísérletek



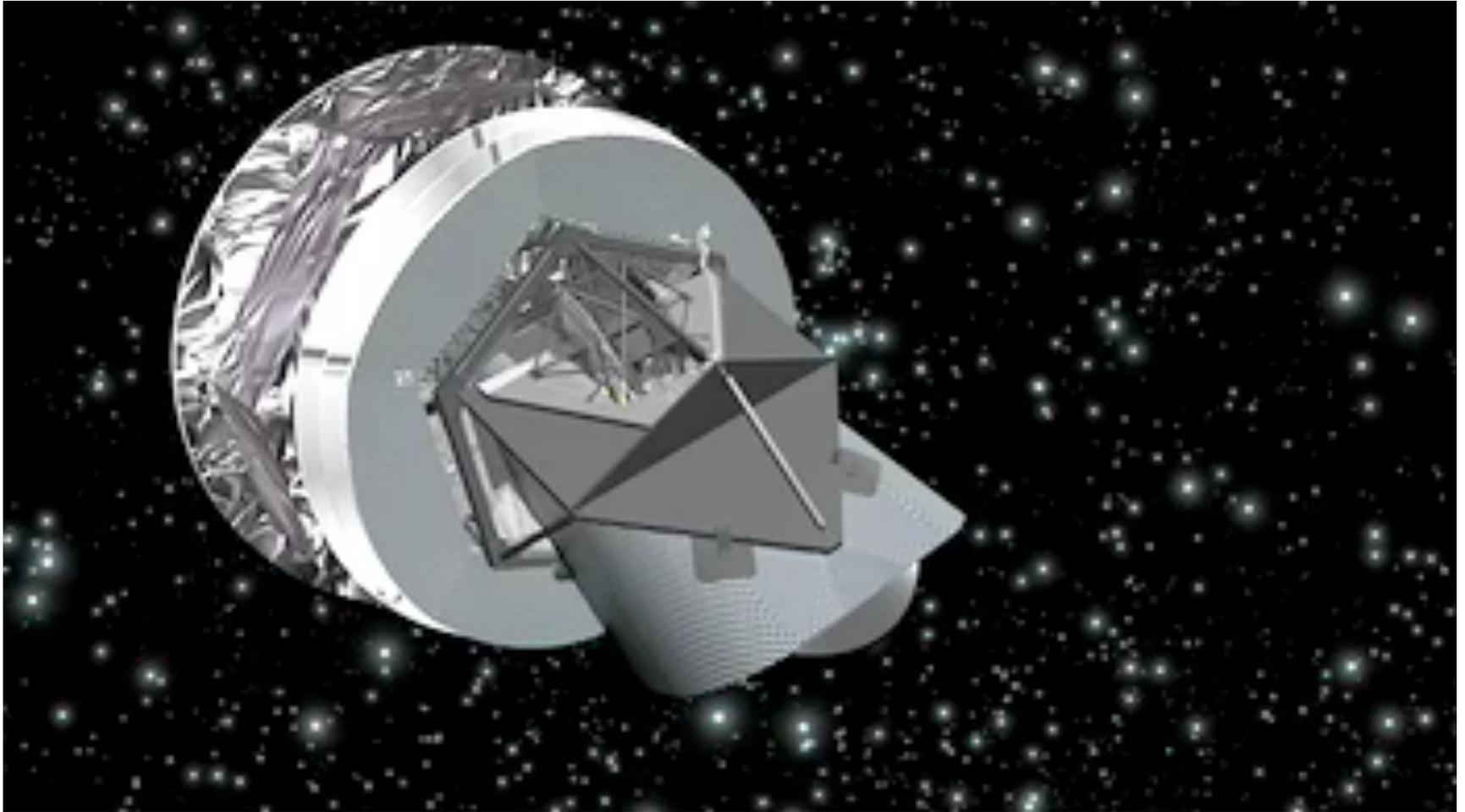
EPSHEP Cocconi-prize 2011:

„a kozmikus háttérsugárzás anizotrópiájának tanulmányozásában elért kimagasló eredményeikért”

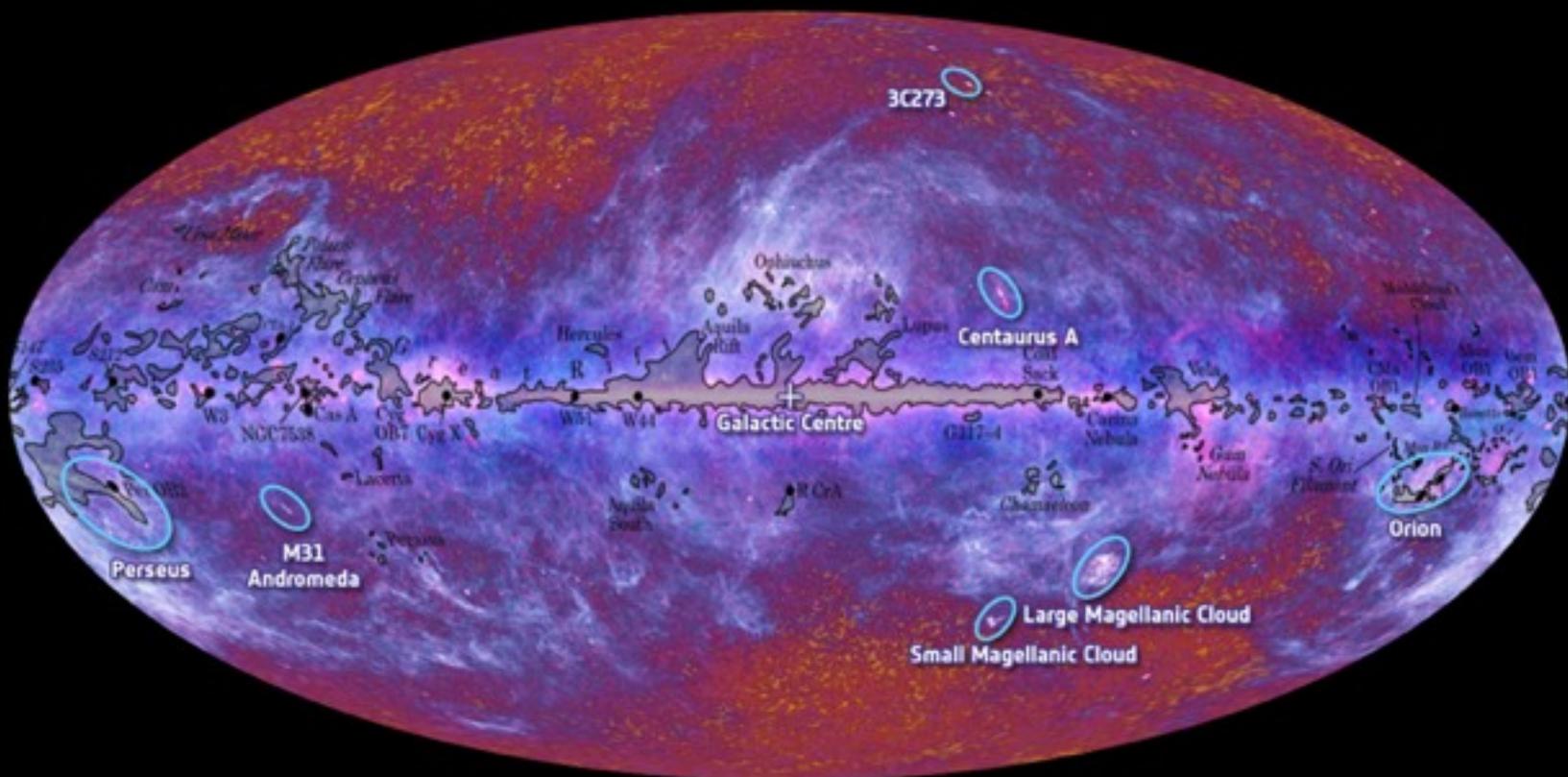
# Kísérlet a világűrben



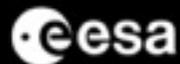
# Planck "sugara"



# Első Planck égbolt (9 hónap alatt)



The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

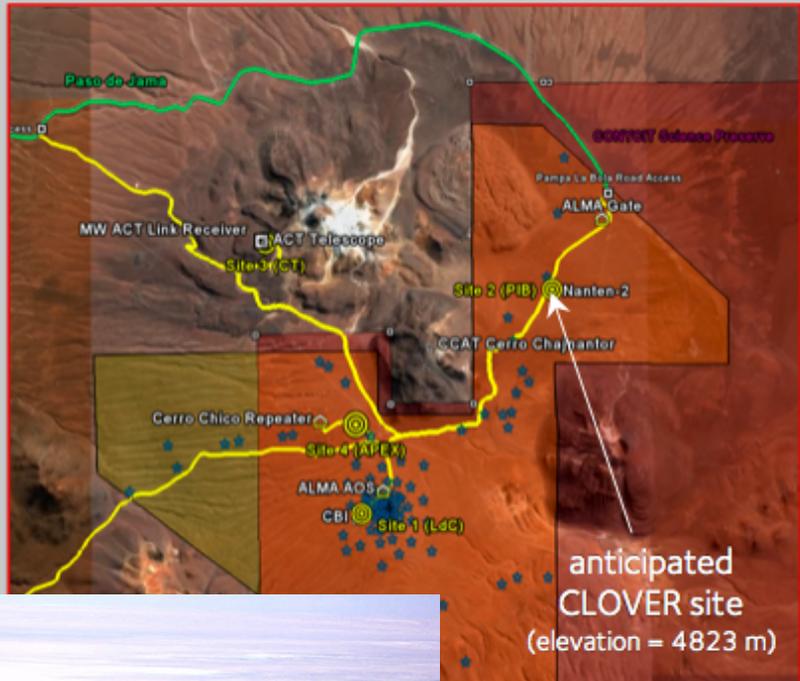
# Kísérletek az Antarktiszon



Tiszta égbolt

# További kísérletek: Andok tetején (Atacama, Cerro Toco)

## CLOVER Site: Atacama, Chile



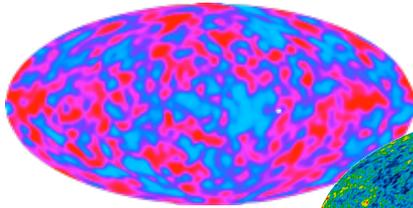
ACT



# Az újszülött VE egyre szebb képe

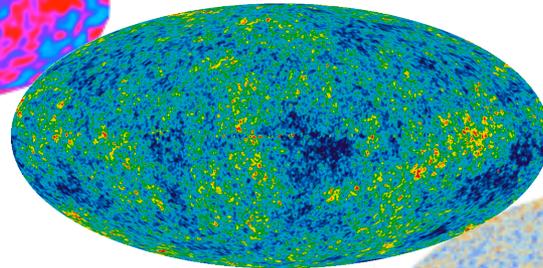
COBE

1992



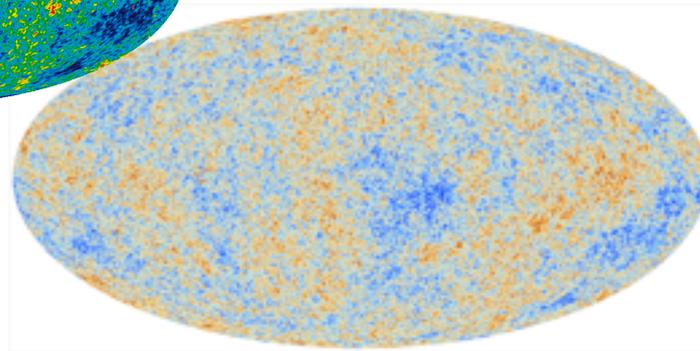
WMAP

2003



PLANCK

2013



ACT, SPT

...

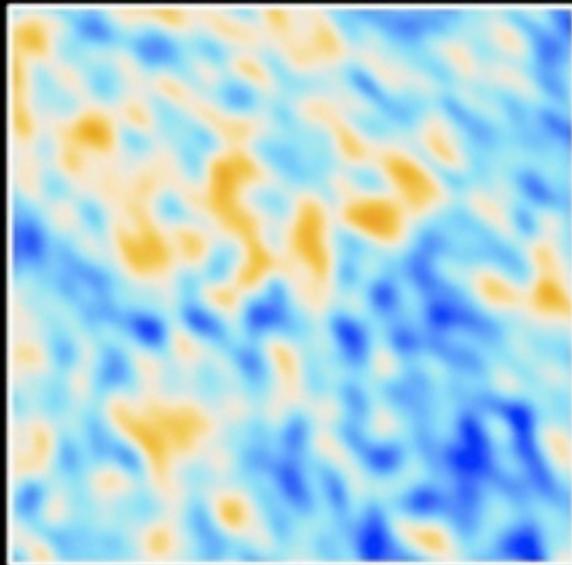
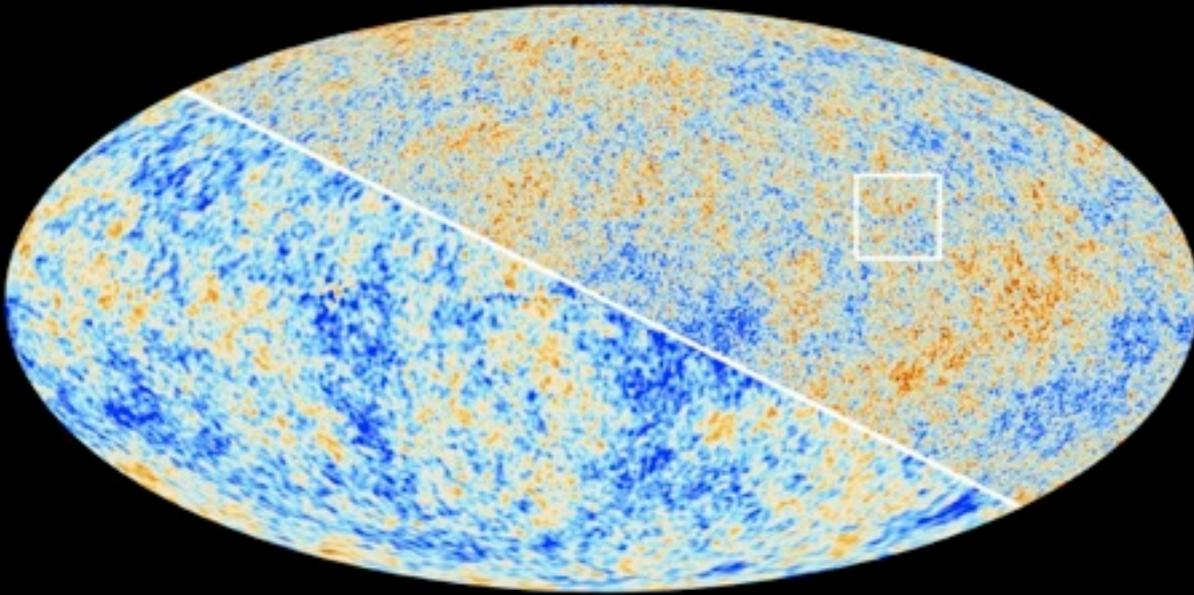
$\sim 7^\circ$

$\sim 0.3^\circ$

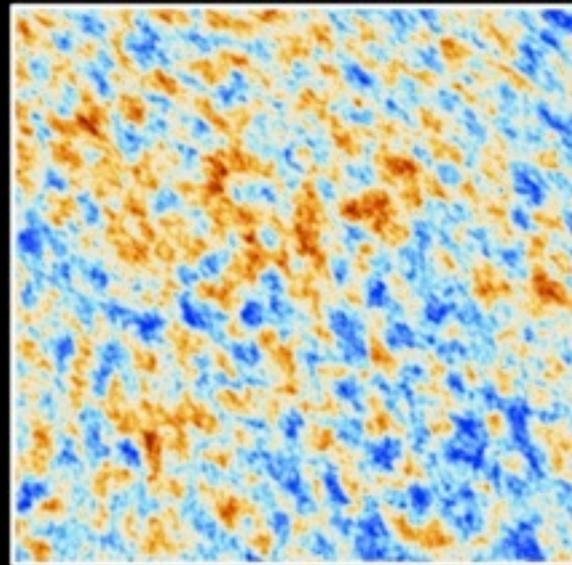
$\sim 0.1^\circ$

$\sim 0.02^\circ$

*The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP*

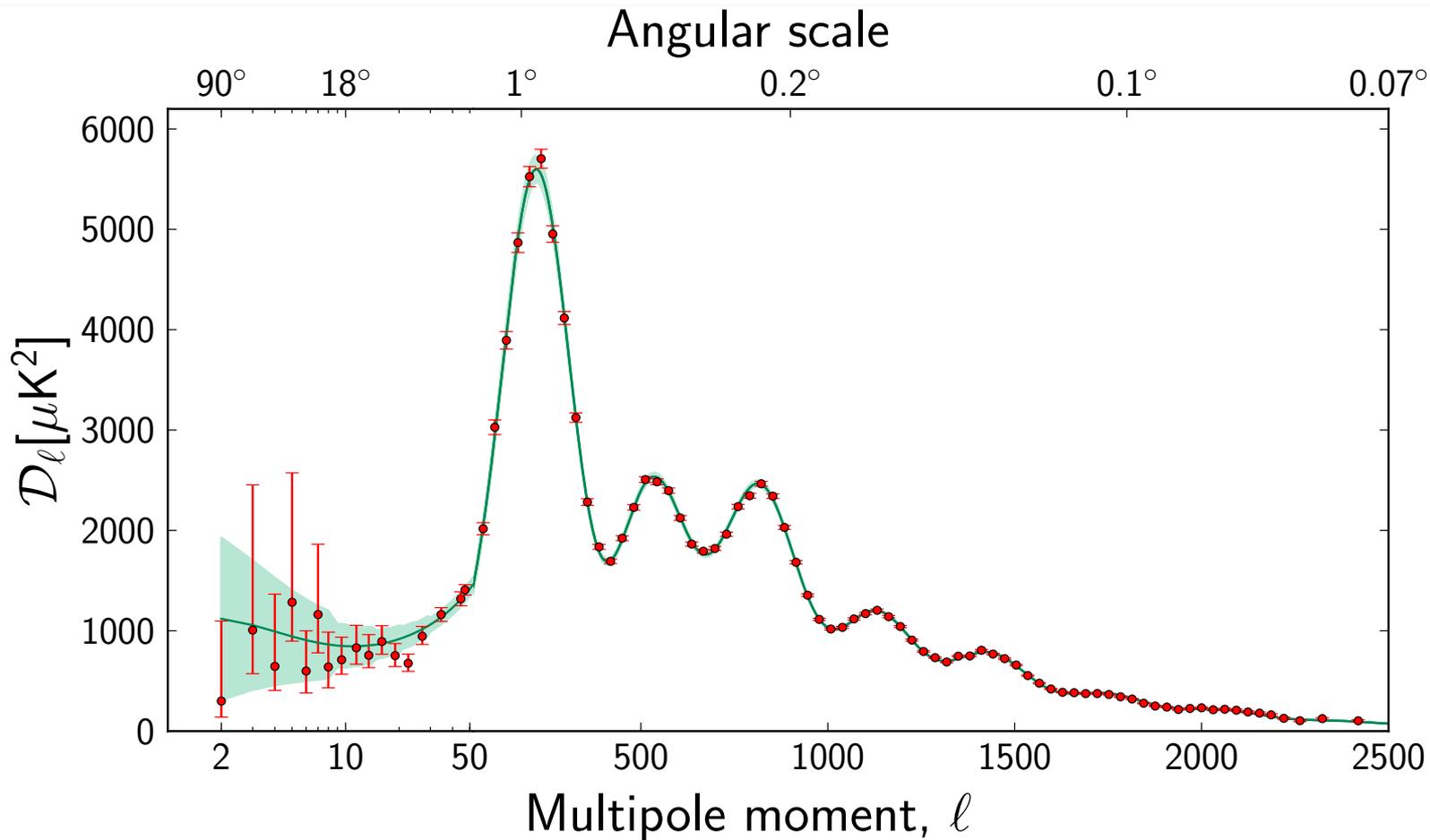


*WMAP*



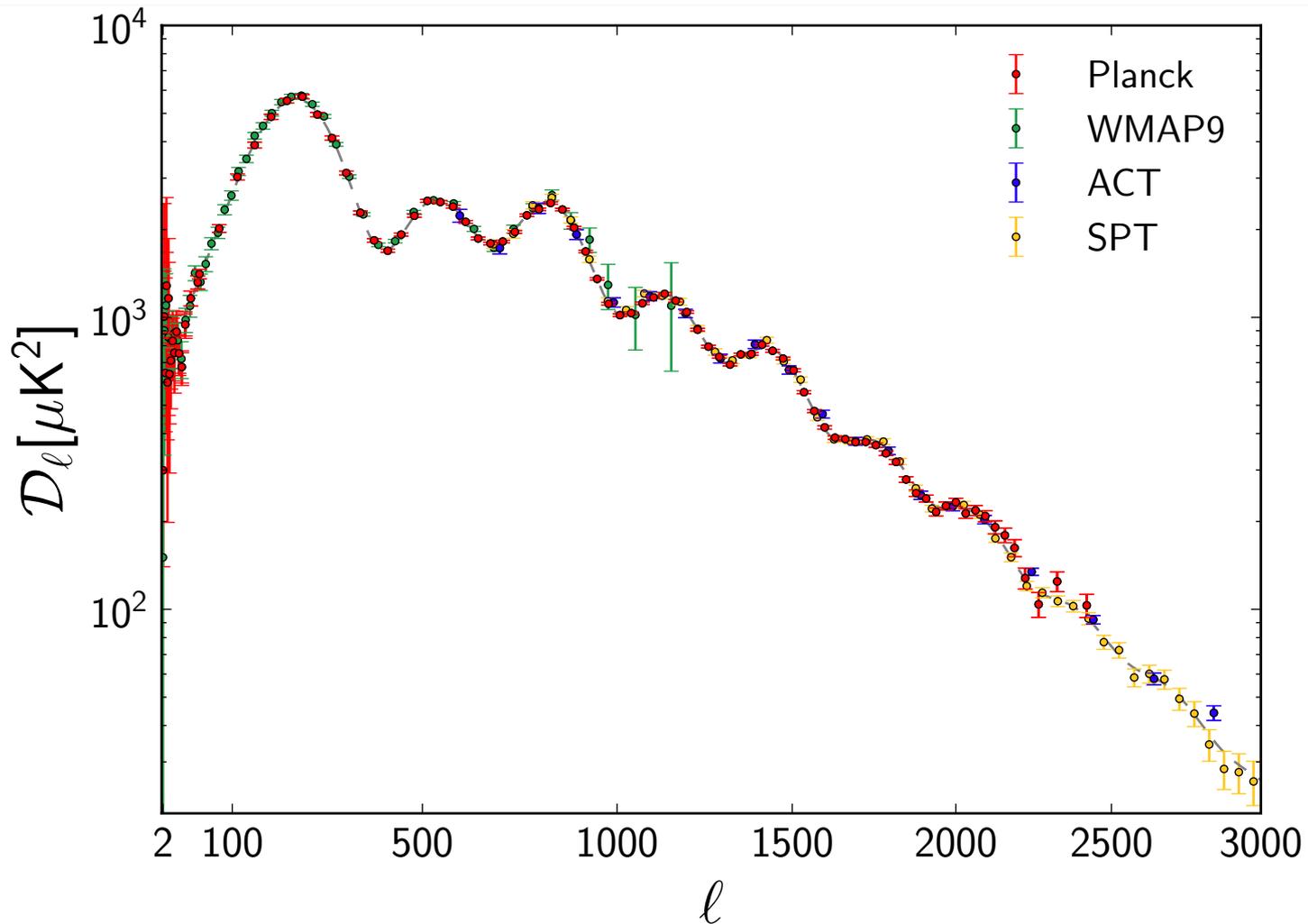
*Planck*

# Hatványspektrum a Planck szerint



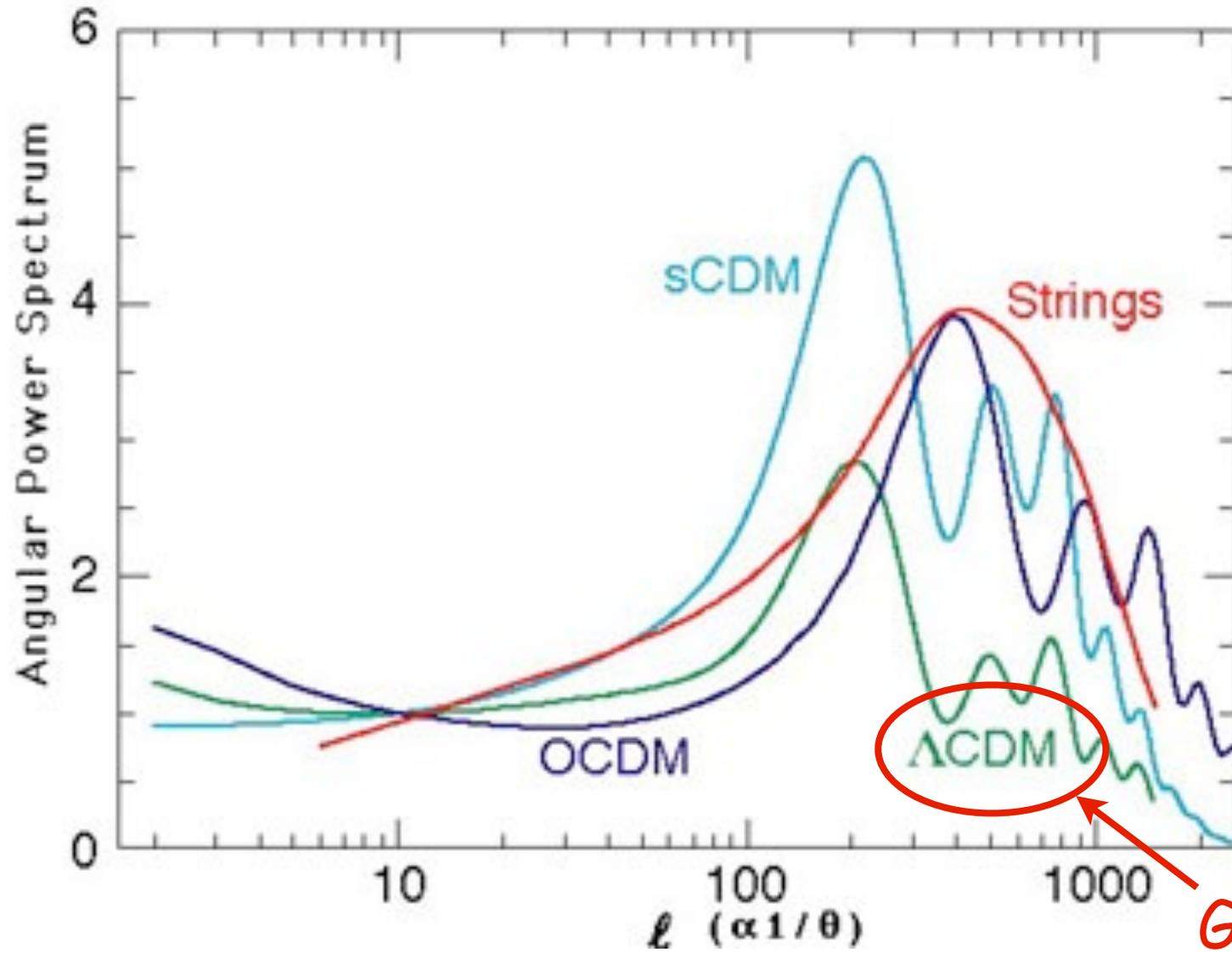
**Fig. 19.** The temperature angular power spectrum of the primary CMB from *Planck*, showing a precise measurement of seven acoustic peaks, that are well fit by a simple six-parameter  $\Lambda$ CDM theoretical model (the model plotted is the one labelled [Planck+WP+highL] in Planck Collaboration XVI (2013)). The shaded area around the best-fit curve represents cosmic variance, including the sky cut used. The error bars on individual points also include cosmic variance. The horizontal axis is logarithmic up to  $\ell = 50$ , and linear beyond. The vertical scale is  $\ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$ . The measured spectrum shown here is exactly the same as the one shown in Fig. 1 of Planck Collaboration XVI (2013), but it has been rebinned to show better the low- $\ell$  region.

## Az ismert hatványspektrum



**Fig. 25.** Measured angular power spectra of *Planck*, WMAP9, ACT, and SPT. The model plotted is *Planck*'s best-fit model including *Planck* temperature, WMAP polarization, ACT, and SPT (the model is labelled [Planck+WP+HighL] in Planck Collaboration XVI (2013)). Error bars include cosmic variance. The horizontal axis is  $\ell^{0.8}$ .

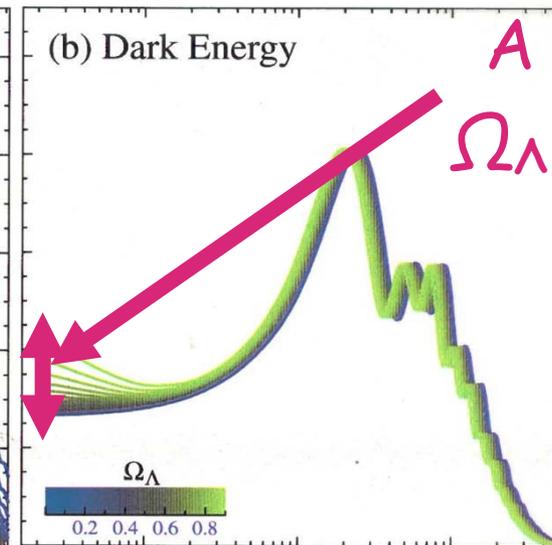
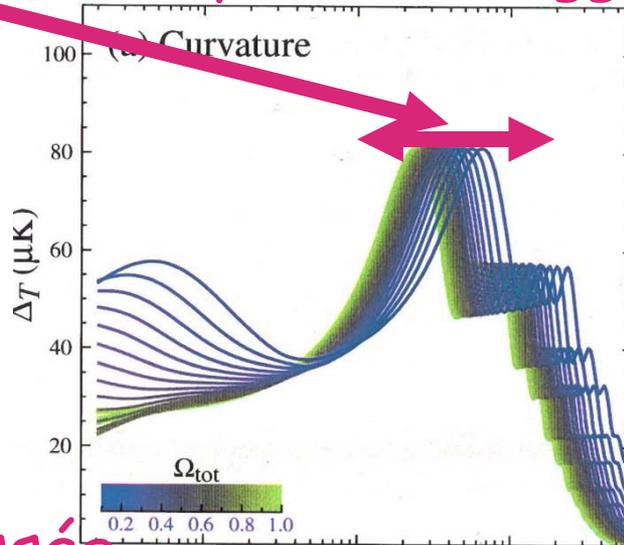
# Modelljóslatok hatványspektrumra ( $\Lambda$ CDM: hat-paraméteres illesztés)



**Győztes**

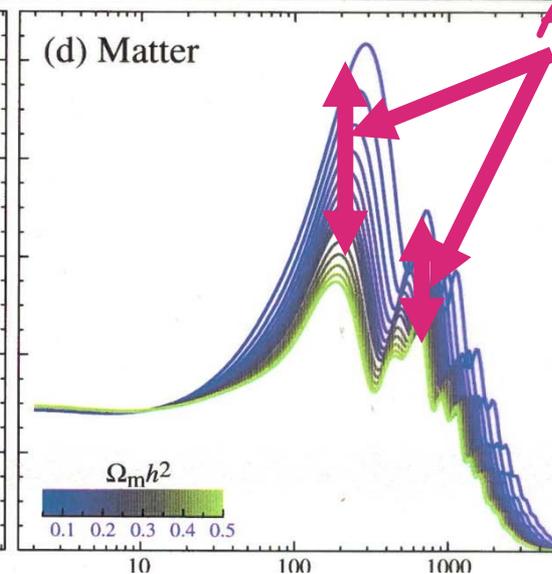
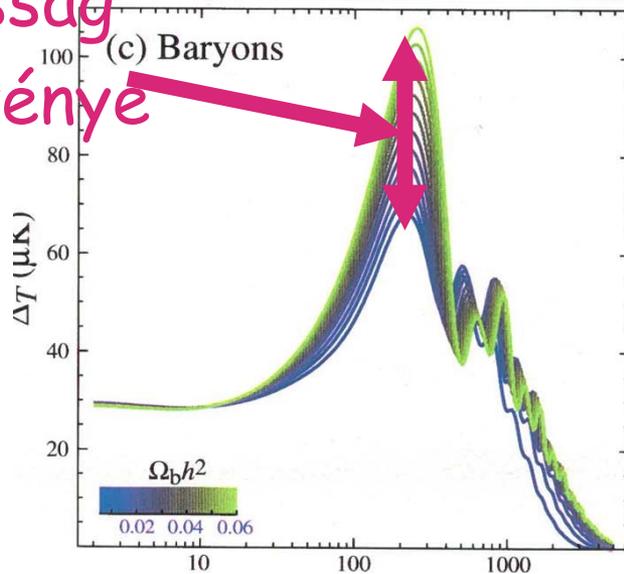
# A hatványspektrumból nyerhető adatok

Az első csúcs helye  $\Omega$ -tól függ



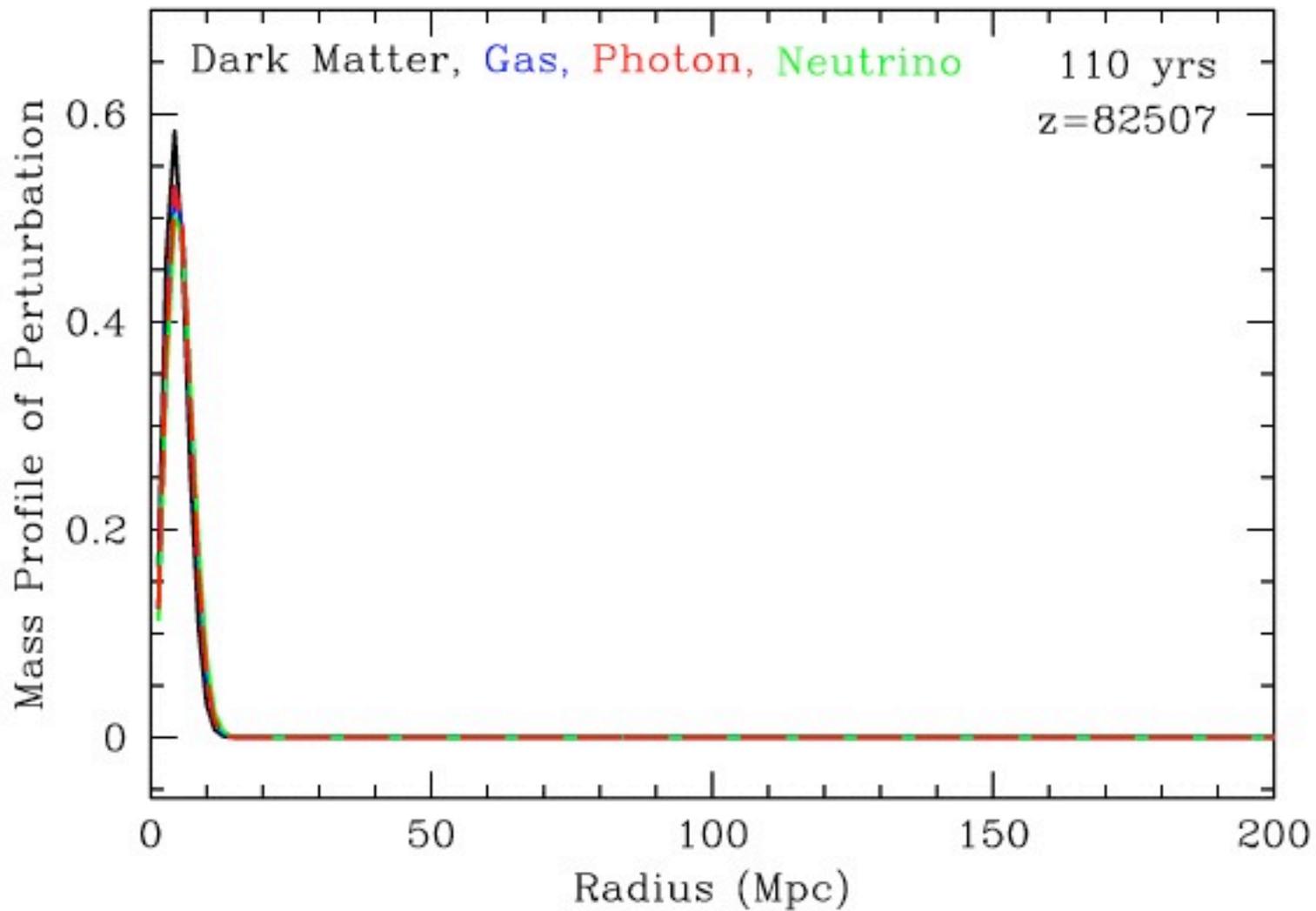
A magasság  $\Omega_\Lambda$  függvénye

A magasság  $\Omega_B$  függvénye

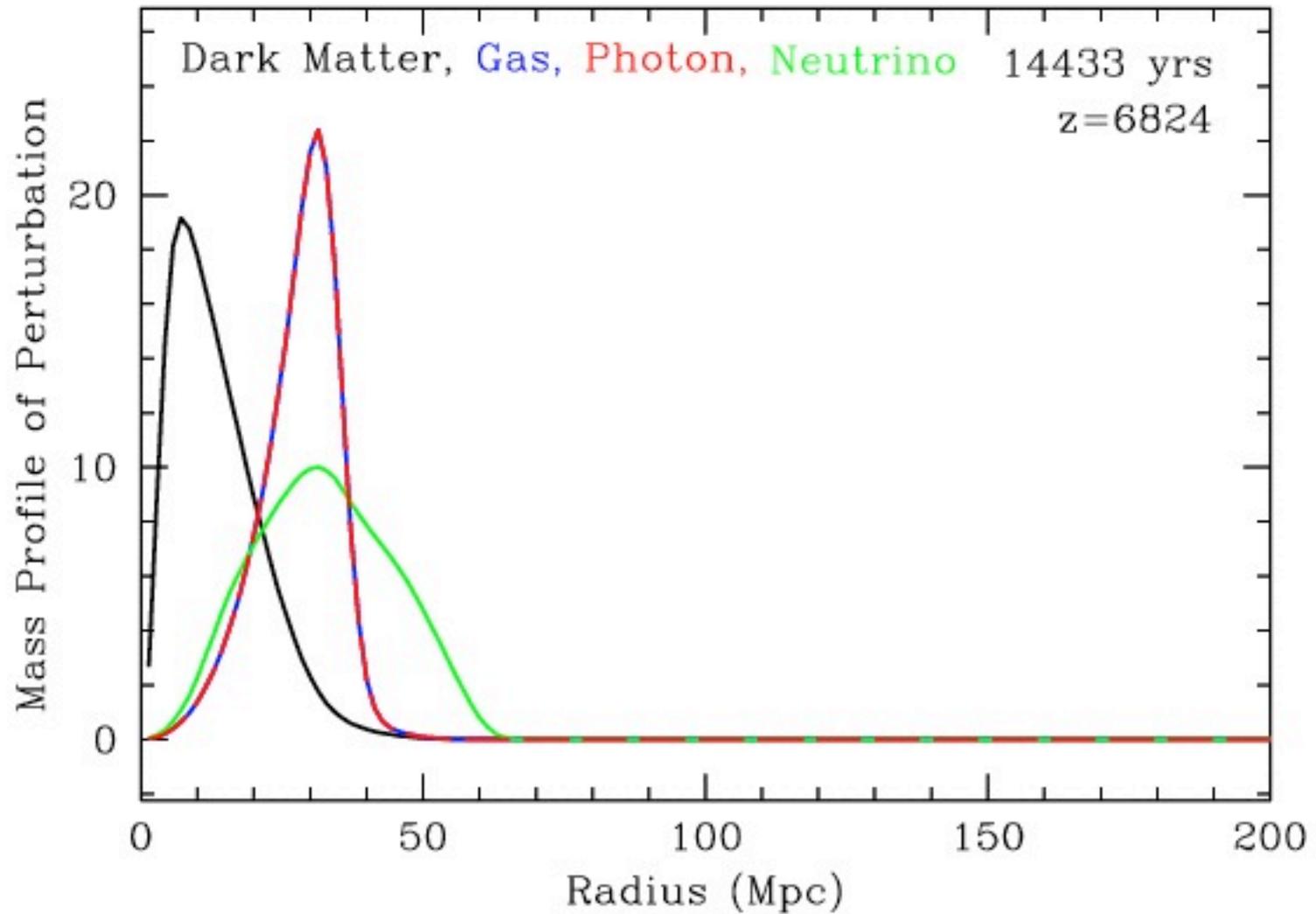


A magasságok  $\Omega_m$  függvényei

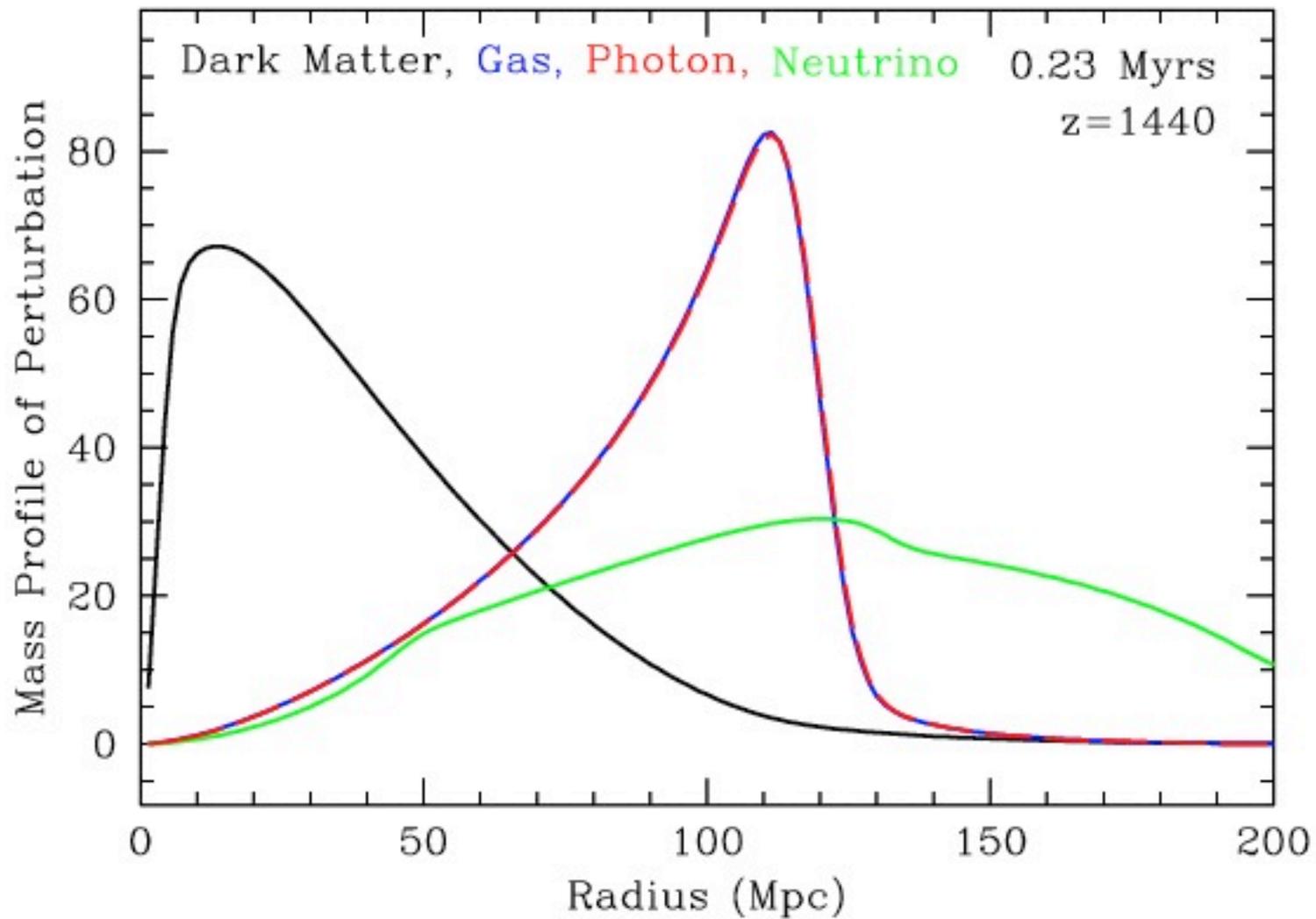
# Barionos anyag oszcillációja (BAO)



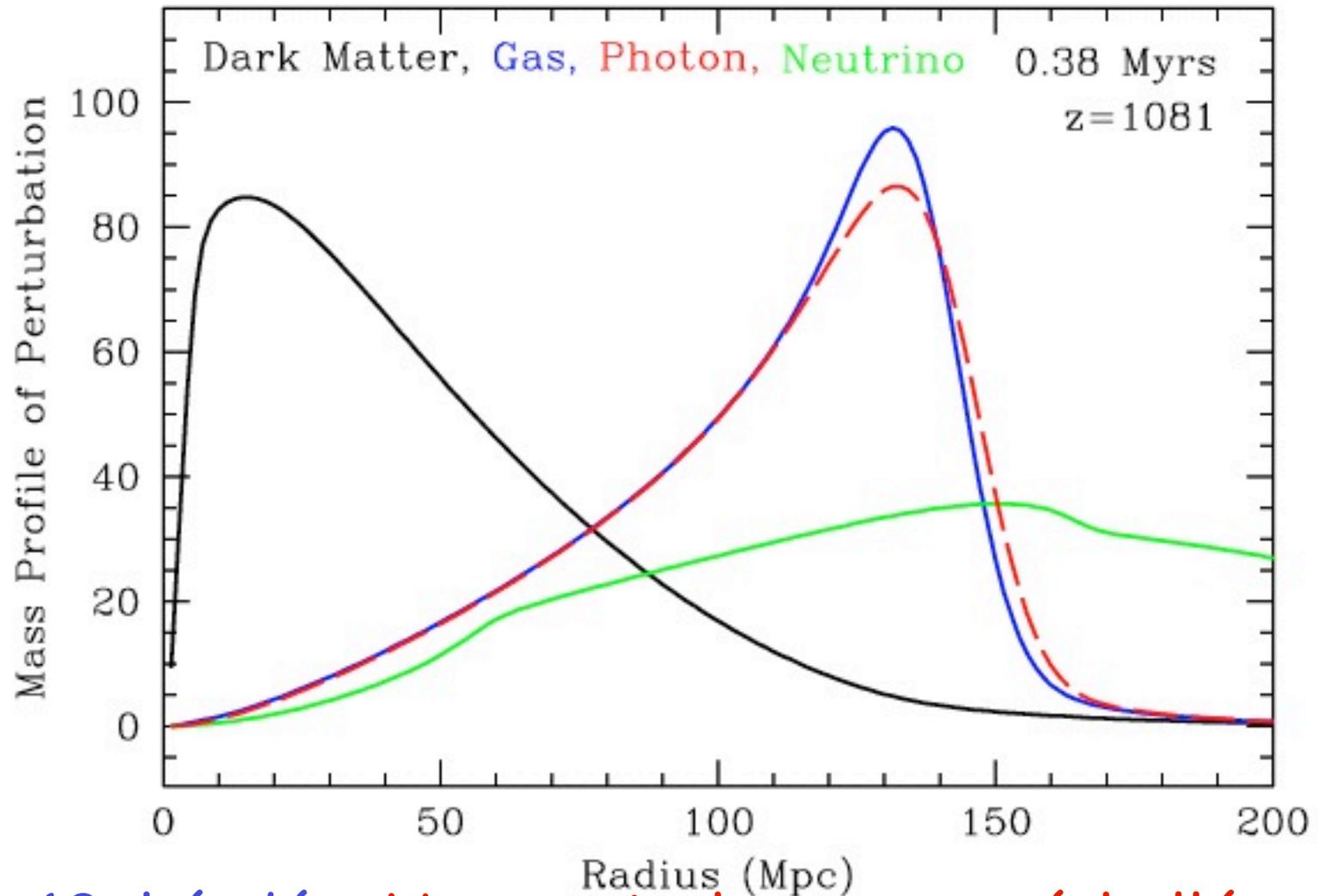
# Barionos anyag oszcillációja (BAO)



## Barionos anyag oszcillációja (BAO)

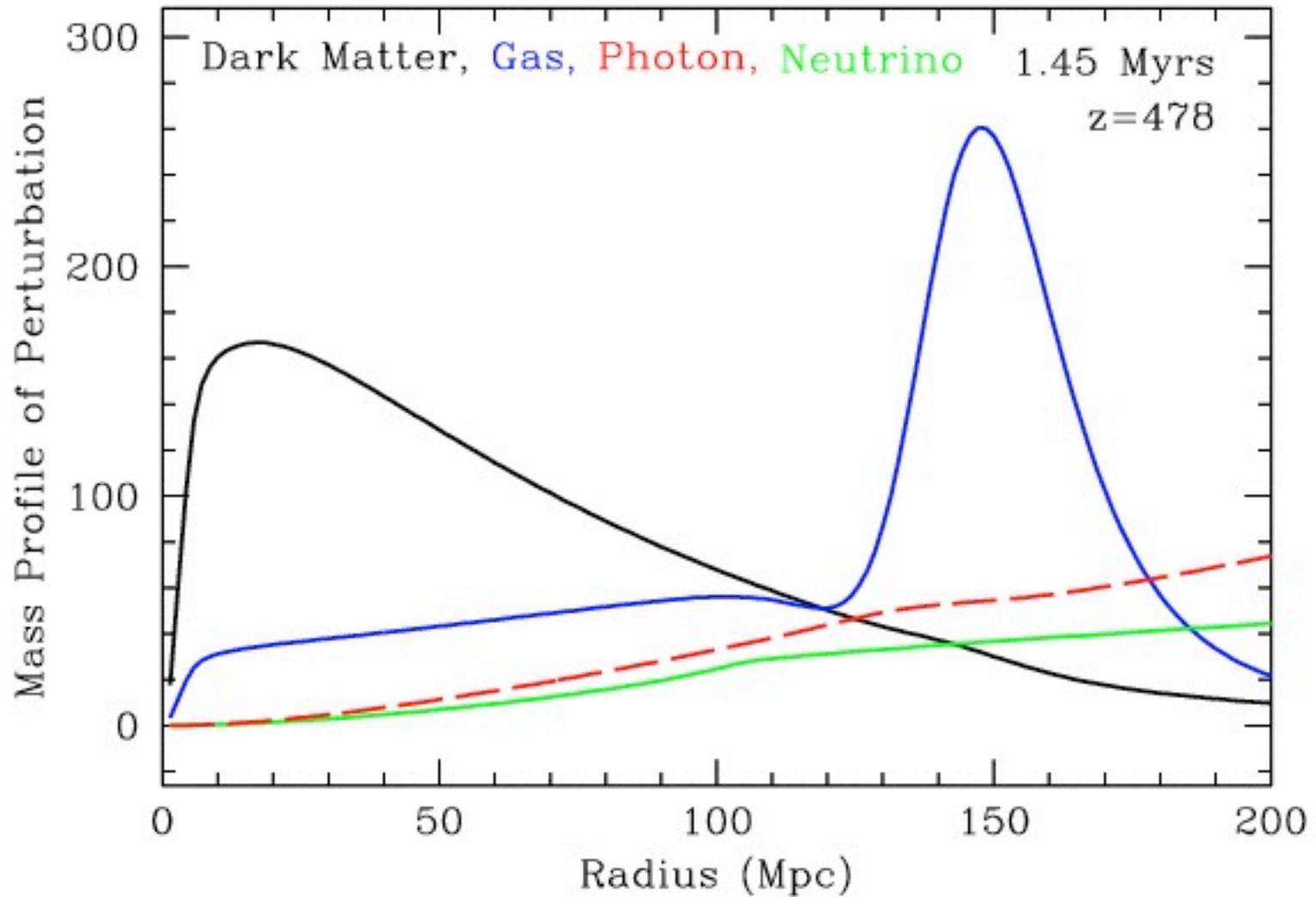


## Barionos anyag oszcillációja (BAO)

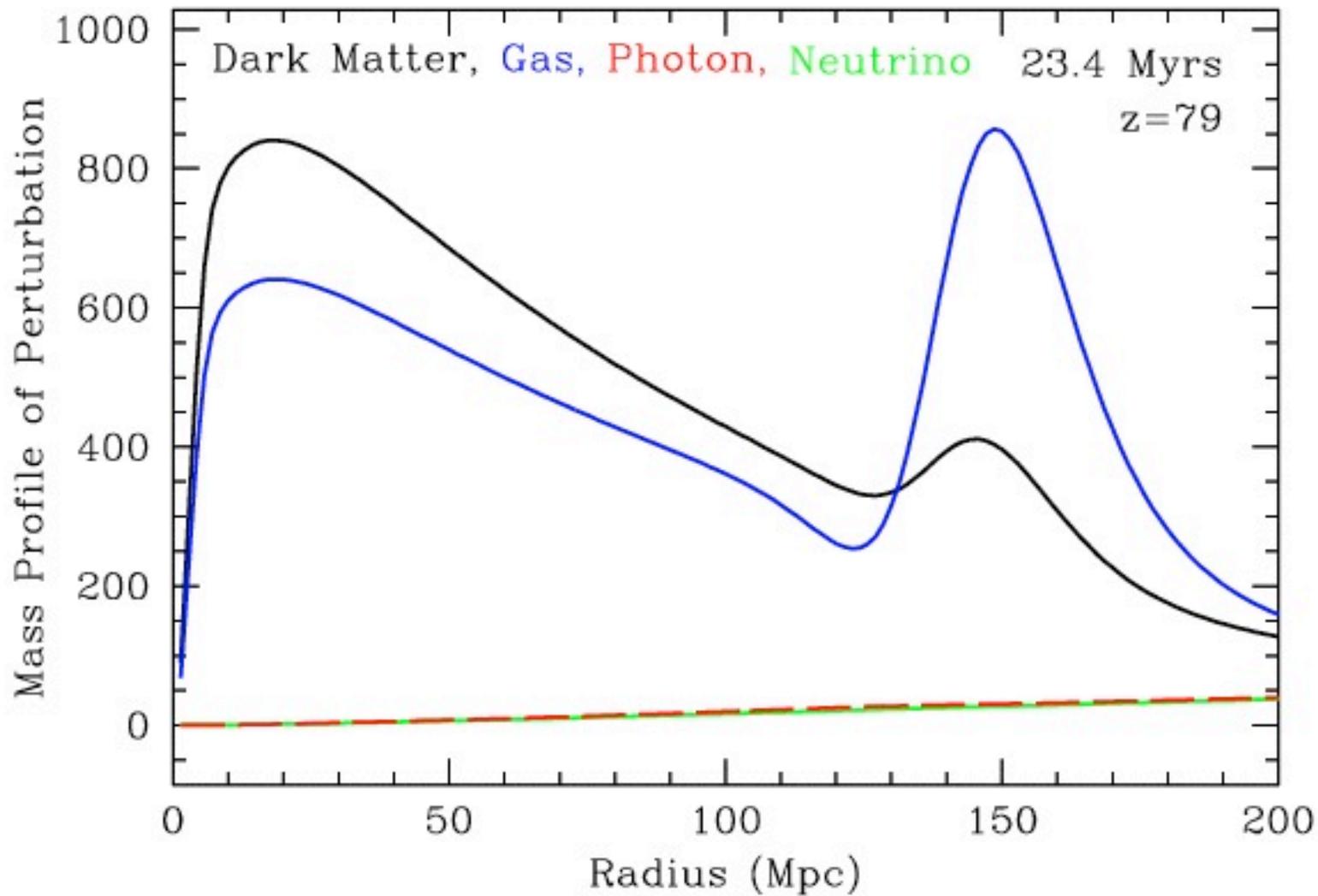


10. kérdés: Hogyan juthat a nyomáshullám  
379ezer év alatt 130Mpc távolságra?

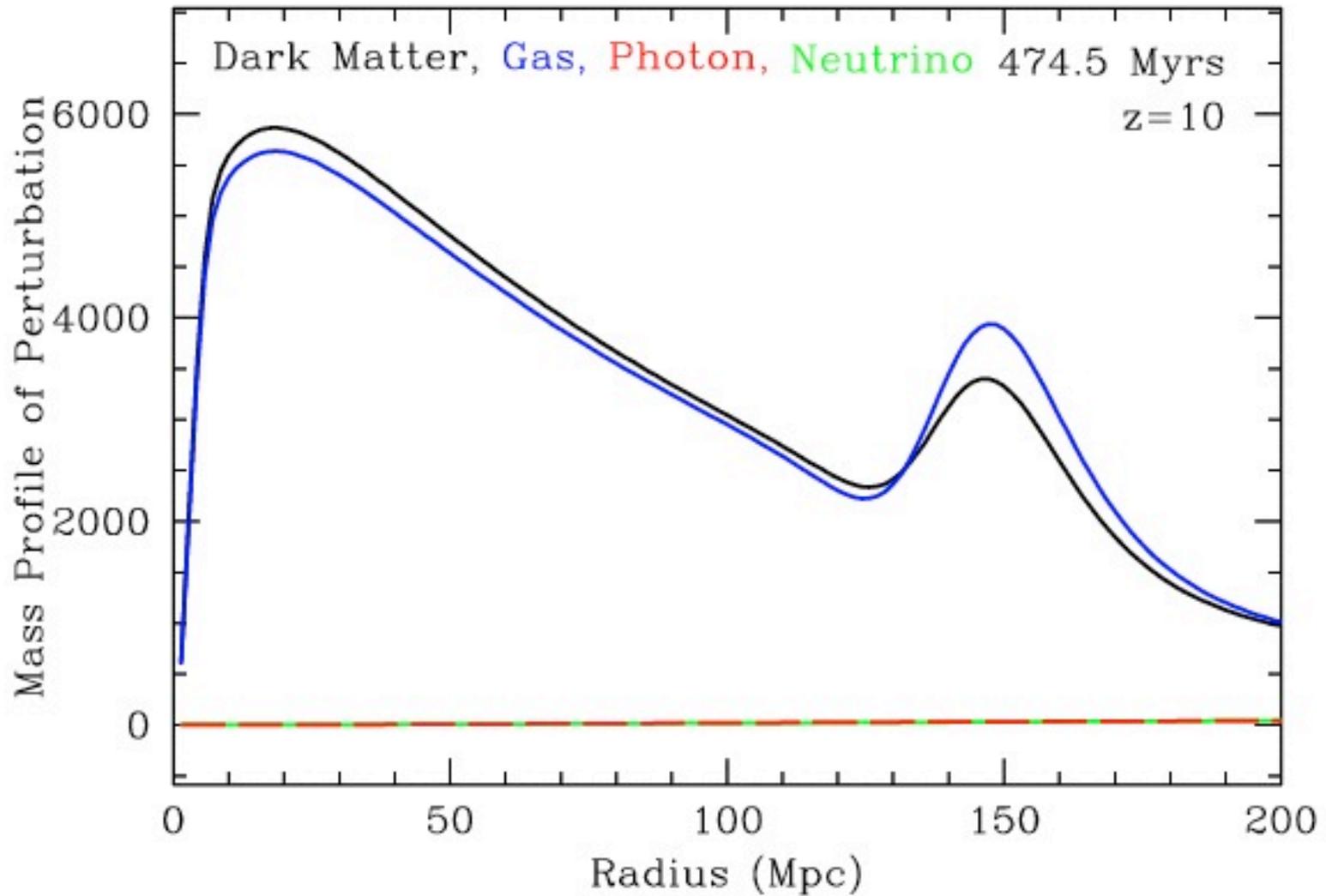
# Barionos anyag oszcillációja (BAO)



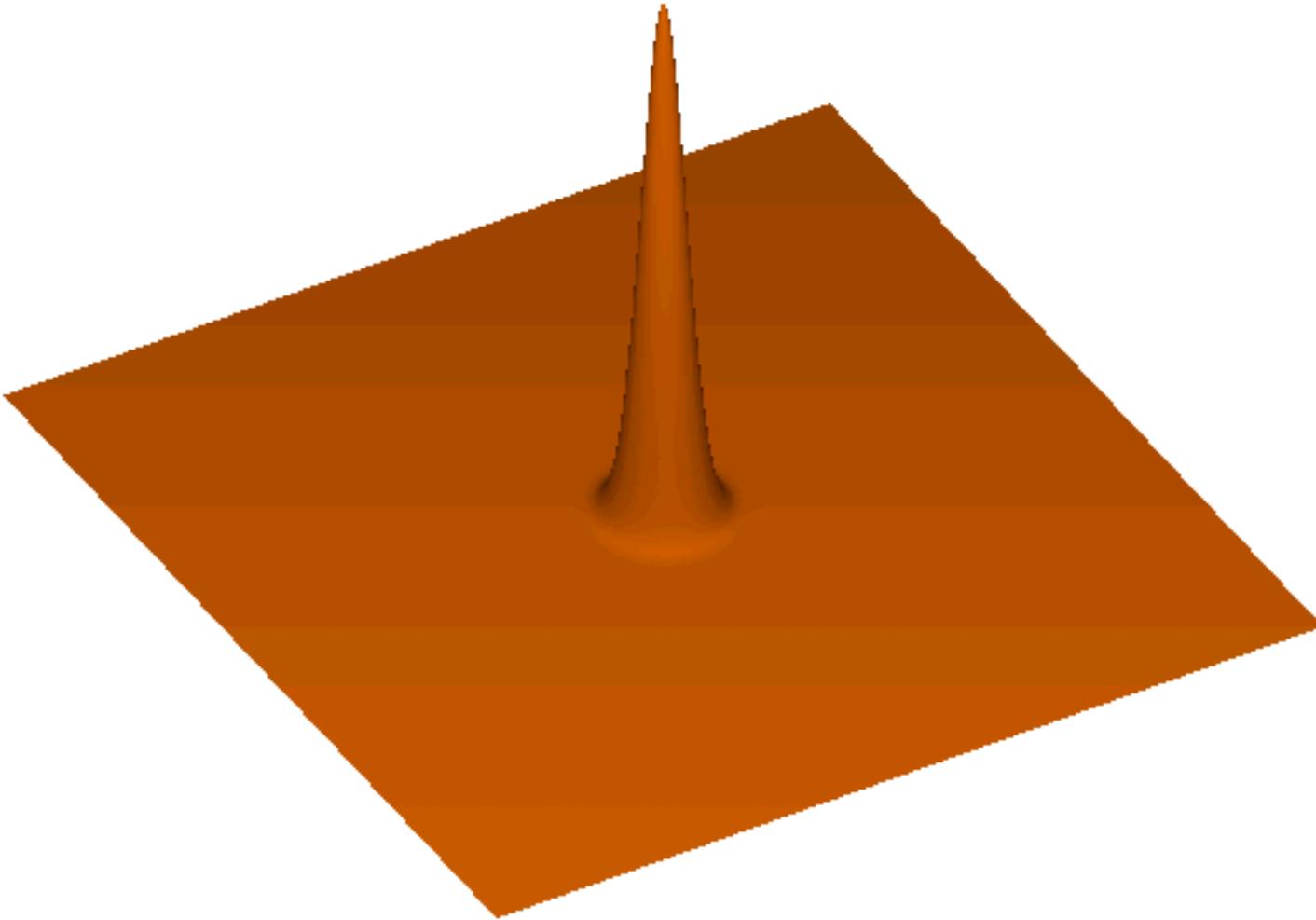
## Barionos anyag oszcillációja (BAO)



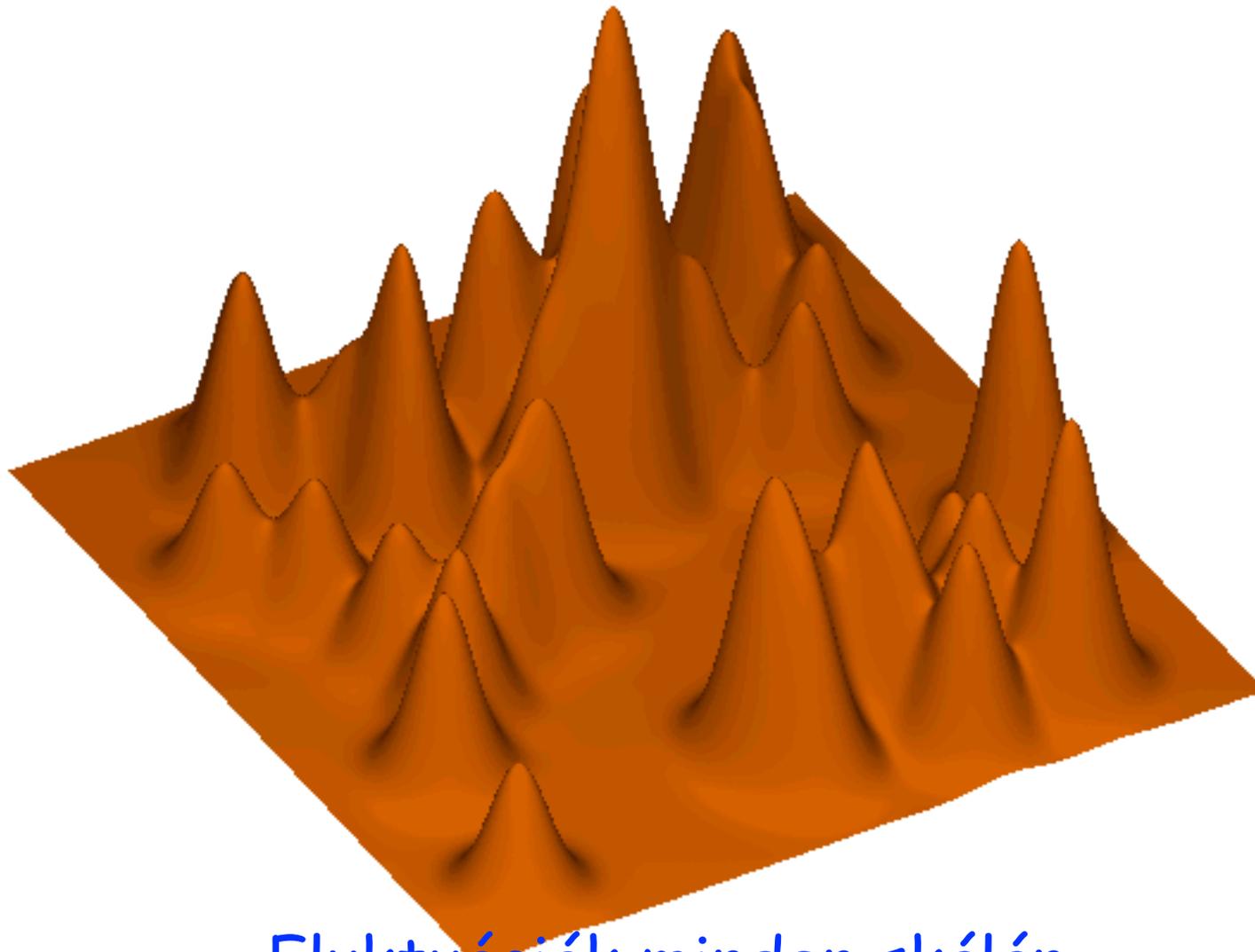
# Barionos anyag oszcillációja (BAO)



# Barionos anyag oszcillációja (BAO)



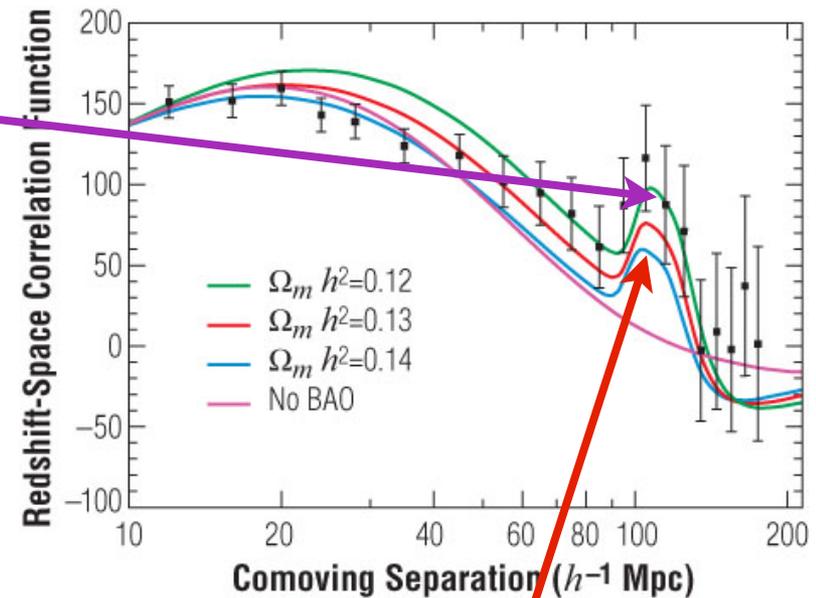
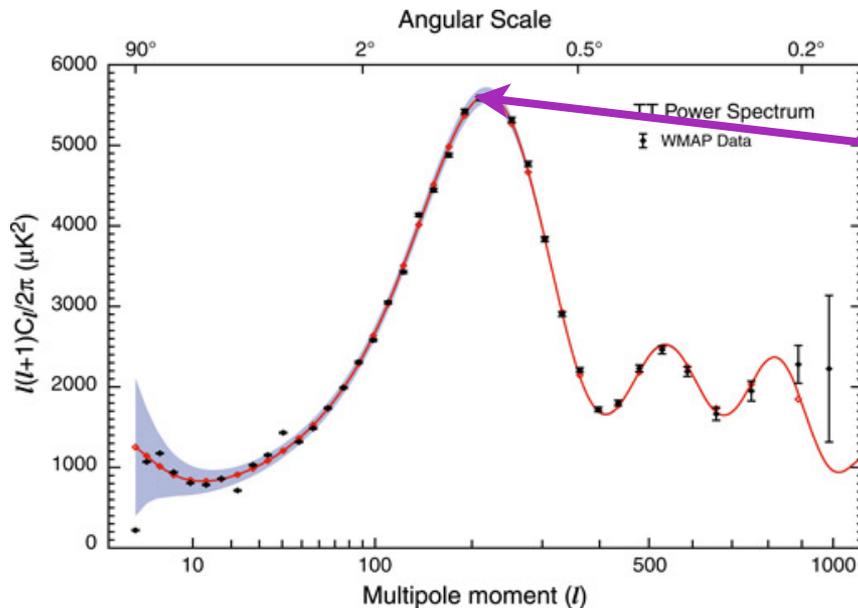
## Barionos anyag oszcillációja (BAO)



Fluktuációk minden skálán,  
de létezik egy különleges skála:  $\sim 150\text{Mpc}$

# Barionos anyag oszcillációja (BAO)

Két találmásra kiválasztott csillagrendszer távolsága  
gyakrabban 150Mpc, mint 140Mpc, vagy 160 Mpc

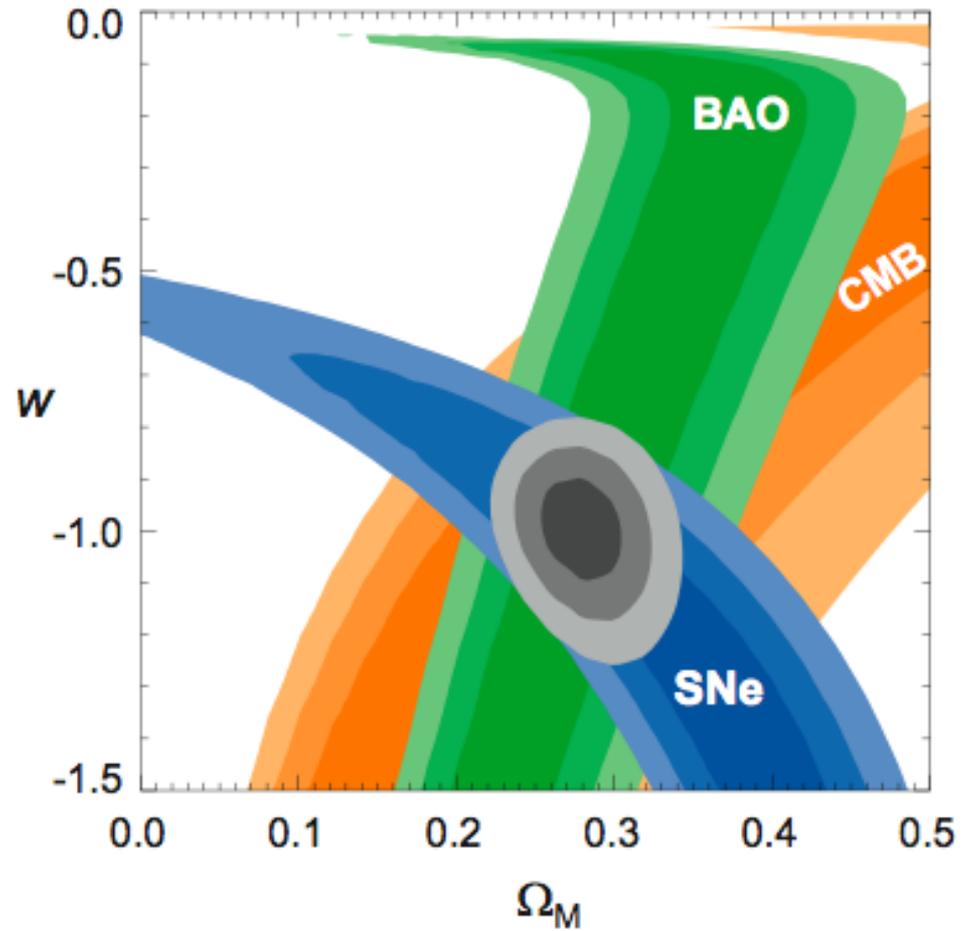
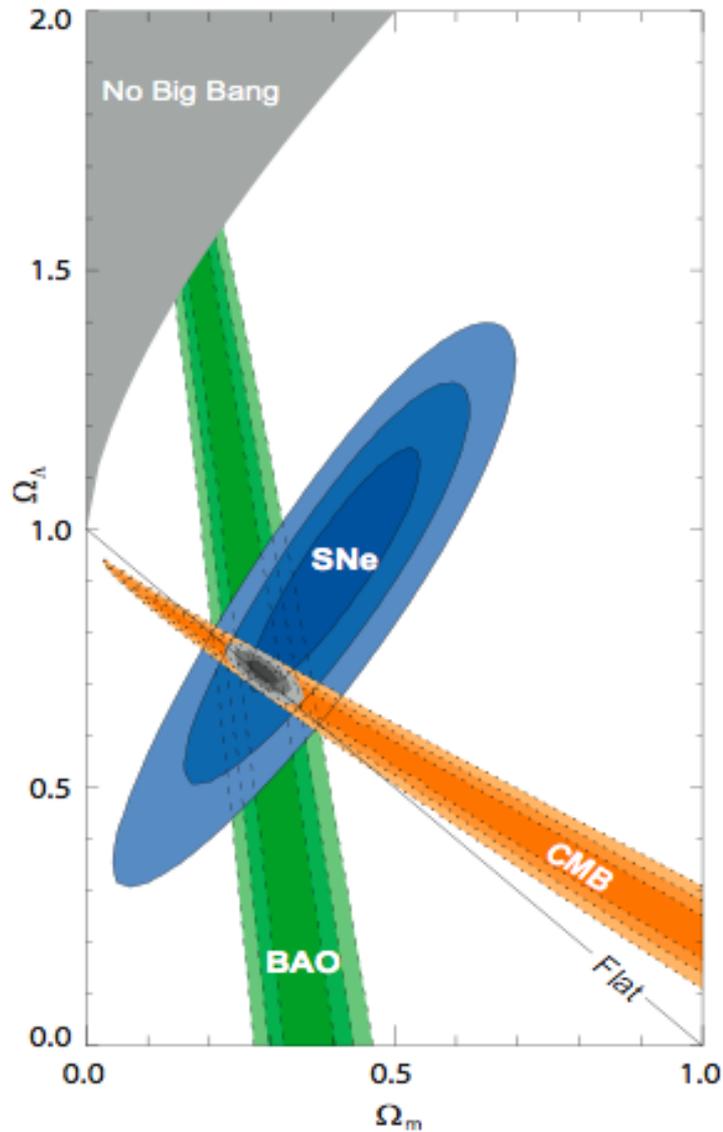


Fluktuációk minden skálán,

de létezik egy különleges skála:  $\sim 150\text{Mpc}$

# Az Sloan Digital Sky Survey adatait elemzik

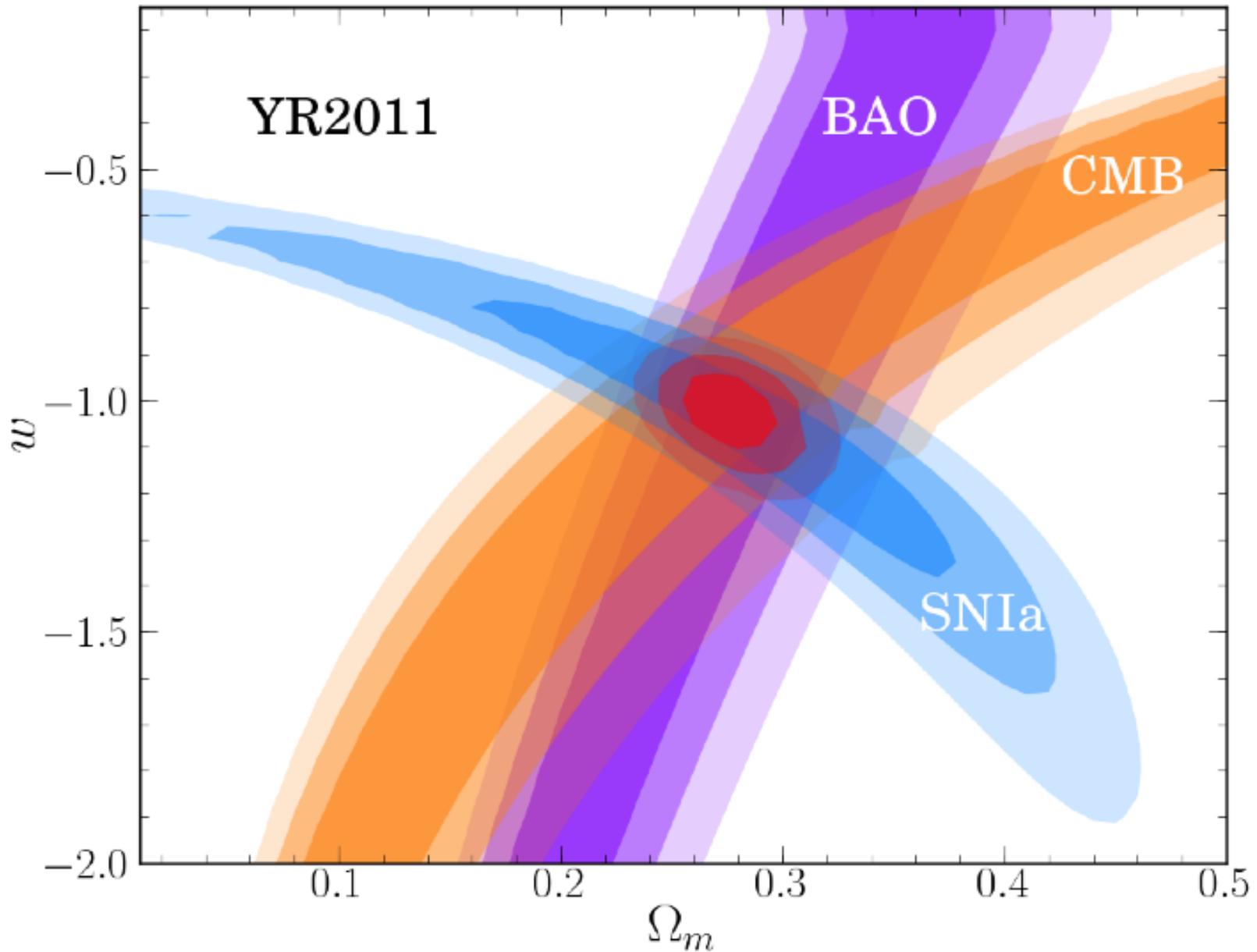
## A három nagyágyú: SNIa, CMB, BAO



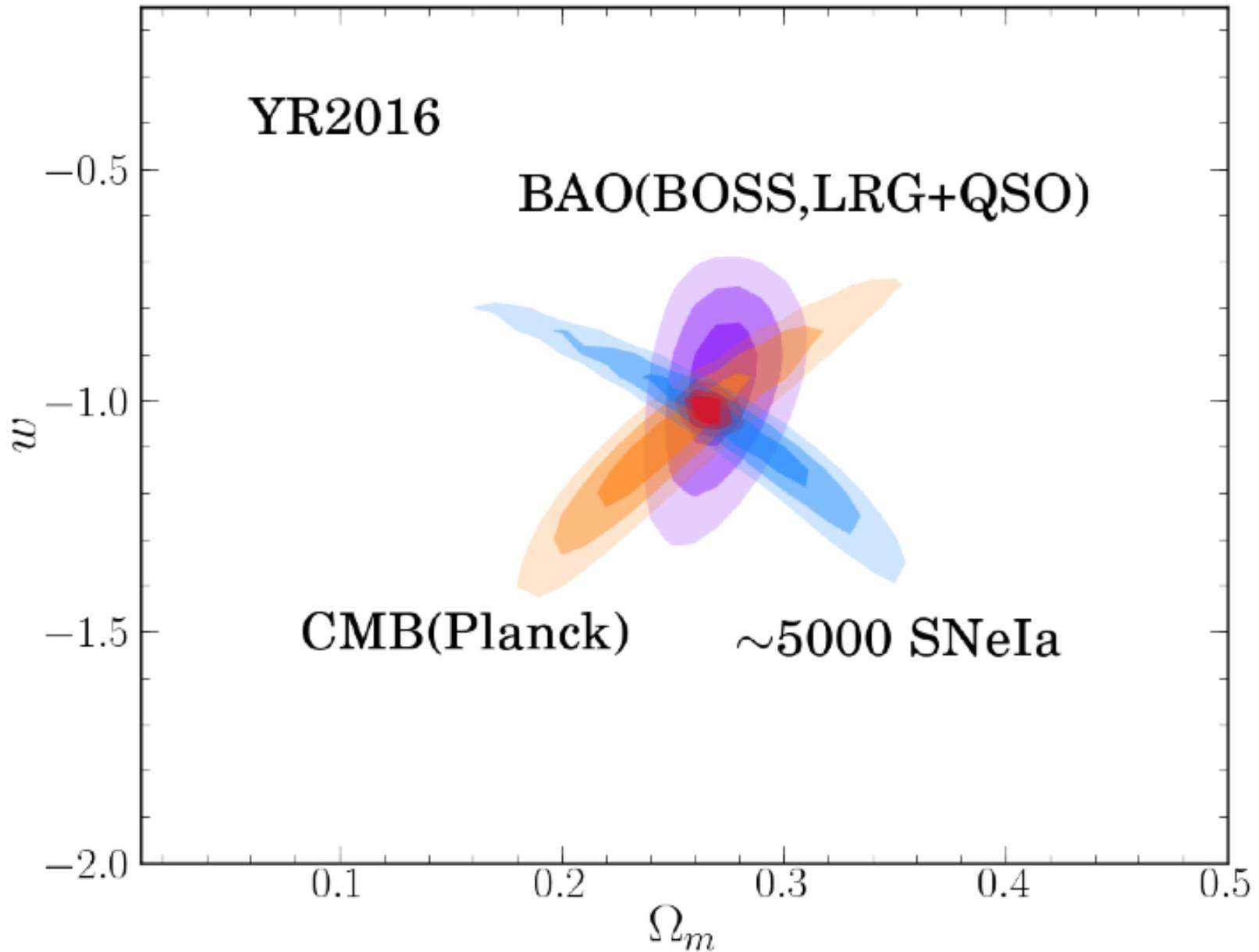
# Mi a sötét energia?

- A sötét energia a VE gyorsuló tágulásának egy lehetséges és népszerű magyarázata.
- Két változatát képzelik
  - Kozmológiai állandó, ami a teret mindenütt kitöltő homogén energiasűrűség
  - Mindent kitöltő homogén skalármező (nem a Higgs!)
- **Állapotegyenlet (nyomás  $\propto$  energiasűrűség)**  
$$p=w\varepsilon$$
  - 11. kérdés:  $w=?$  nem-relativisztikus ideális gáz esetén
  - Relativisztikus ideális gáz:  $w=1/3$
  - Kozmológiai állandó:  $w=-1$

## A három nagyágú: SNIa, CMB, BAO



# A három nagyhagyú: SNIa, CMB, BAO



## Kozmológiai paraméterek

mennyiség	2003	2013 (Planck)
$H_0$	$71^{+4}_{-3}$ km/s/Mpc	$68.3 \pm 1.2$ km/s/Mpc
$\Omega_0$	$1.02 \pm 0.02$	$1.000 \pm 0.028$
$\Omega_m$	$0.27 \pm 0.04$	$0.314 \pm 0.020$
$\Omega_b$	$0.044 \pm 0.004$	$0.0492 \pm 0.007$
$\Omega_\Lambda$	$0.73 \pm 0.04$	$0.686 \pm 0.020$
$T_{VE}$	$(13.7 \pm 0.2)$ Gév	$(13.813 \pm 0.058)$ Gév
$T_{rekom}$	$(379 \pm 8)$ ezer év	

Kitérő:

$$\begin{array}{l} \Omega = 1 \text{ esetén:} \\ \text{Hubble-törvény:} \\ \text{Első oldaról:} \end{array} \left. \begin{array}{l} H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \\ \dot{R} = HR \\ \rho \propto R^{-n} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$n \neq 0: \dot{R} R^{\frac{n}{2}-1} = \frac{2}{n} \frac{d}{dt} \left( R^{\frac{n}{2}} \right) = \text{const} \Rightarrow R \propto t^{\frac{2}{n}}, \quad H \propto \frac{2}{nt}$$

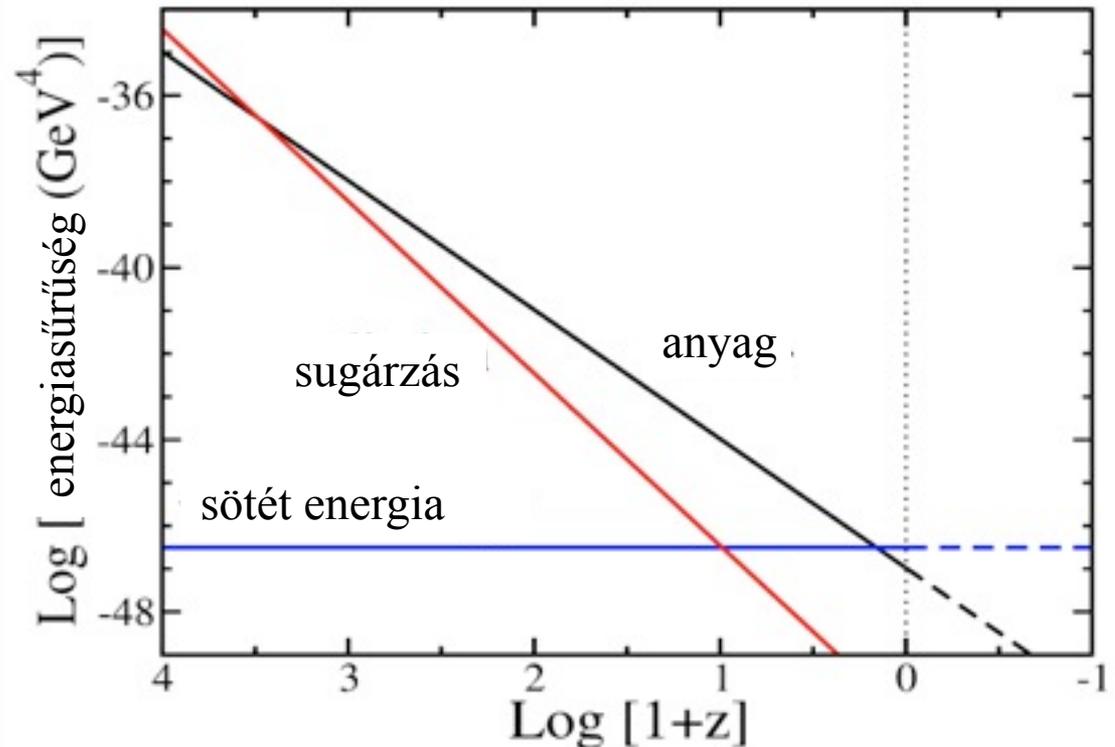
$$n = 0: \dot{R} = HR \Rightarrow R \propto e^{Ht}, \quad H = \text{const}$$

# A VE történetének három szakasza

1. sugárzási szakasz  
 $R \propto t^{1/2}$ ,  $H \propto 1/(2t)$ ,  
termosztát,  $t < 10^4$  év

2. anyagi szakasz  
 $R \propto t^{2/3}$ ,  $H \propto 2/(3t)$ ,  
csomósodás,  $(10^4 < t < 10^{10})$  év

3. sötét energia  
 $R \propto e^{Ht}$ ,  $H = \text{const}$ ,  
gyorsuló tágulás,  
 $t > 10^{10}$  év



# Mi lehet a sötét anyag?

VE-ben keressük:

- **Barionos**: önálló kutatási területek
  - bolygók
  - fehér törpék
  - **MACHO**-k (**M**assive **C**ompact **H**alo **O**bject): barna, fekete törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak
  - gázfelhők
- **WIMP**-ek

Laboratóriumban keressük:

- **Nem barionos** (ismeretlen), gyengén hat kölcsön a barionos anyaggal
    - „forró” (közel fénysebességű, **HDM**): neutrínók (kevés)
    - „hideg” (lassú, **CDM**): **W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**article (**WIMP**)
- Részecskefizikusok kedvence, de egyelőre nem sikerült találni

Netalán a gravitáció módosul nagy skálán?

# HSA (CDM) részecskejelöltek (WIMPEk)

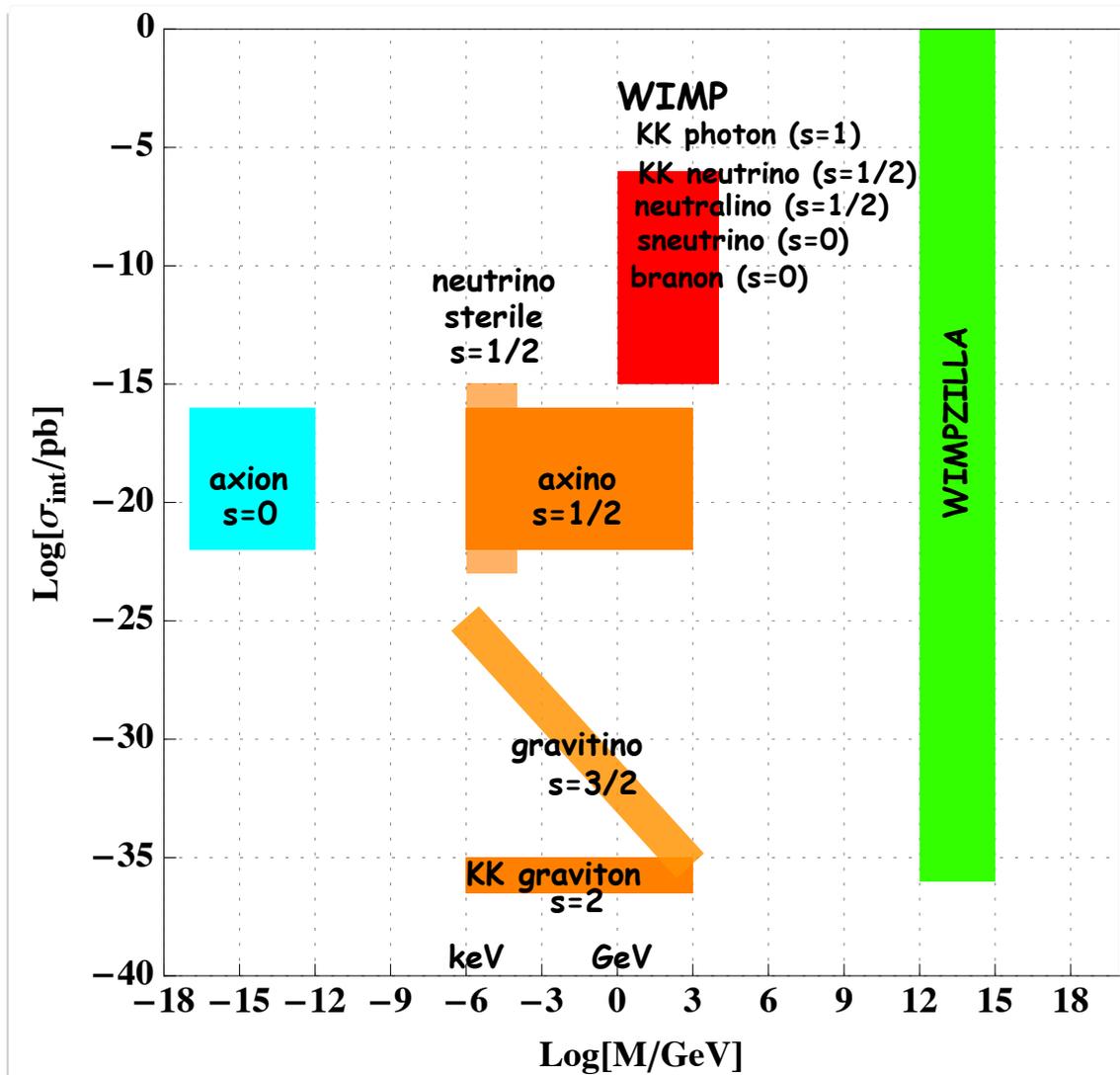
- Szükséges egy kétértékű megmaradó mennyiség (D-szimmetria):
  - $D = +1$  SM részecskék esetén
  - $D = -1$  újfajta részecskék esetén

⇒ A legkönnyebb  $D = -1$  részecske stabil

⇒ Ha elektromosan semleges, tömege  $> GeV/c^2$  akkor lehetséges SA jelölt, pl.:

jelölt	spin	nyugalmi energia
inert Higgs	0	50 GeV
LSP (neutralínó)	$\frac{1}{2}$	10 GeV-10TeV
Kaluza-Klein részecske	$\frac{1}{2}$	TeV

...de van sok más javaslat is

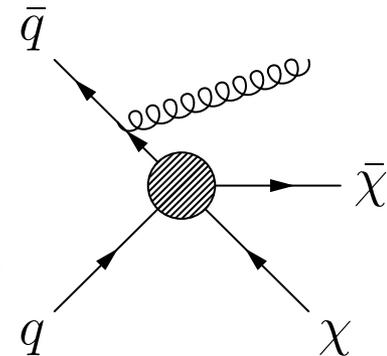
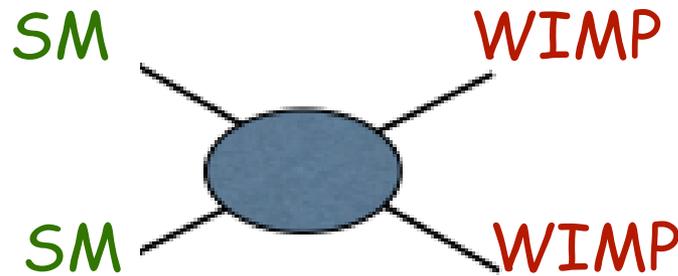


# Legnépszerűbb WIMP: LSP

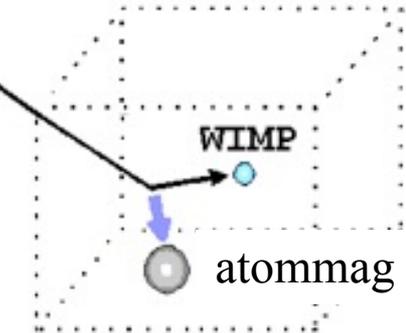
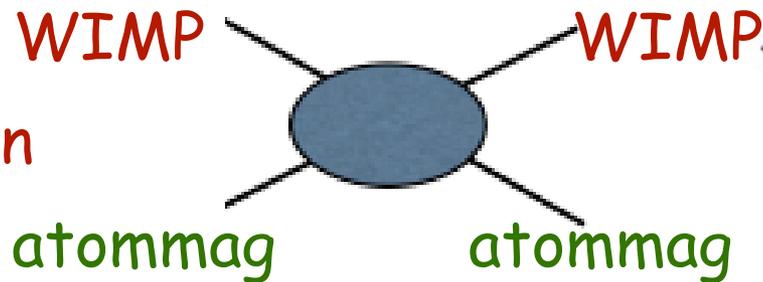
- $D = R = (-1)^{3B+2S+L}$       R-paritás
  - 12. kérdés: Mekkora az u-kvark és a muon R-paritása?
  - $R = -1$  s-fermionokra
- Ha a legkönnyebb s-részecske semleges (neutralínó), akkor SA jelölt
- Az ilyen s-részecske közvetve felfedezhető az LHC-n (hiányzó energia a jele)
  - Egy minimális lehetőség: inert Higgs
- A SM Higgs-mechanizmus minimális kiterjesztése feltételezett D-szimmetriával
  - A  $D = -1$ -es Higgs-részecske az SA jelölt (fermionokkal nem hat kölcsön)

# WIMP-ek keresése

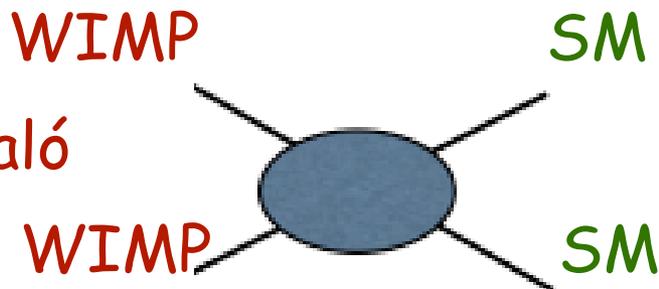
- gyorsítóval:  
események hiányzó energiával



- közvetlenül:  
rugalmas szórás  
atommagon mélyen  
a felszín alatt



- közvetve:  
szétsugárzásra utaló  
jel a világűrben



# Felfedezésre ítéelve?

## The Decade of the WIMP

Ce sera la décennie de la matière noire !

SCIENTIFIC  
AMERICAN™

### Dark Matter Mystery May Soon Be Solved

Experiments to detect dark matter, which scientists believe makes up about a quarter of the universe, are underway and may yield direct evidence within a decade

THE DAILY  
GREAT DISCOVERIES CHANNEL  
GALAXY

December 22, 2012

"We're on the Threshold of Unraveling the Biggest Mystery in Modern Physics" --World's Dark-Matter Cosmologists

SCIENCE TODAY BEYOND THE HEADLINES

TOP STORY: FEBRUARY 20, 2013

### Decade of Dark Matter

Should we declare this the decade of the WIMPs? Before you

SCIENCE

### 'Decade of dark matter' begins

ADRIAN CHO

Last updated 12:26 31/07/2012

Like

45

Tweet

5

PHYS.ORG

### Scientists sense breakthroughs in dark-matter mystery

Feb 18, 2013 by Jean-Louis Santini

## La traque de la matière noire touche t-elle à sa fin

BFMTV > Planète > Espace

Univers : le mystère de la matière noire bientôt résolu ?

Le Point.fr - Publié le 22/02/2013 à 16:33 - Modifié le 22/02/2013 à 16:41

La piste de la mystérieuse matière noire se précise...

nature  
International weekly journal of science

18 November 2010

Gianfranco Bertone

The moment of truth for WIMP dark matter

majd meglátjuk...

# Értjük-e ezeket a kérdéseket?

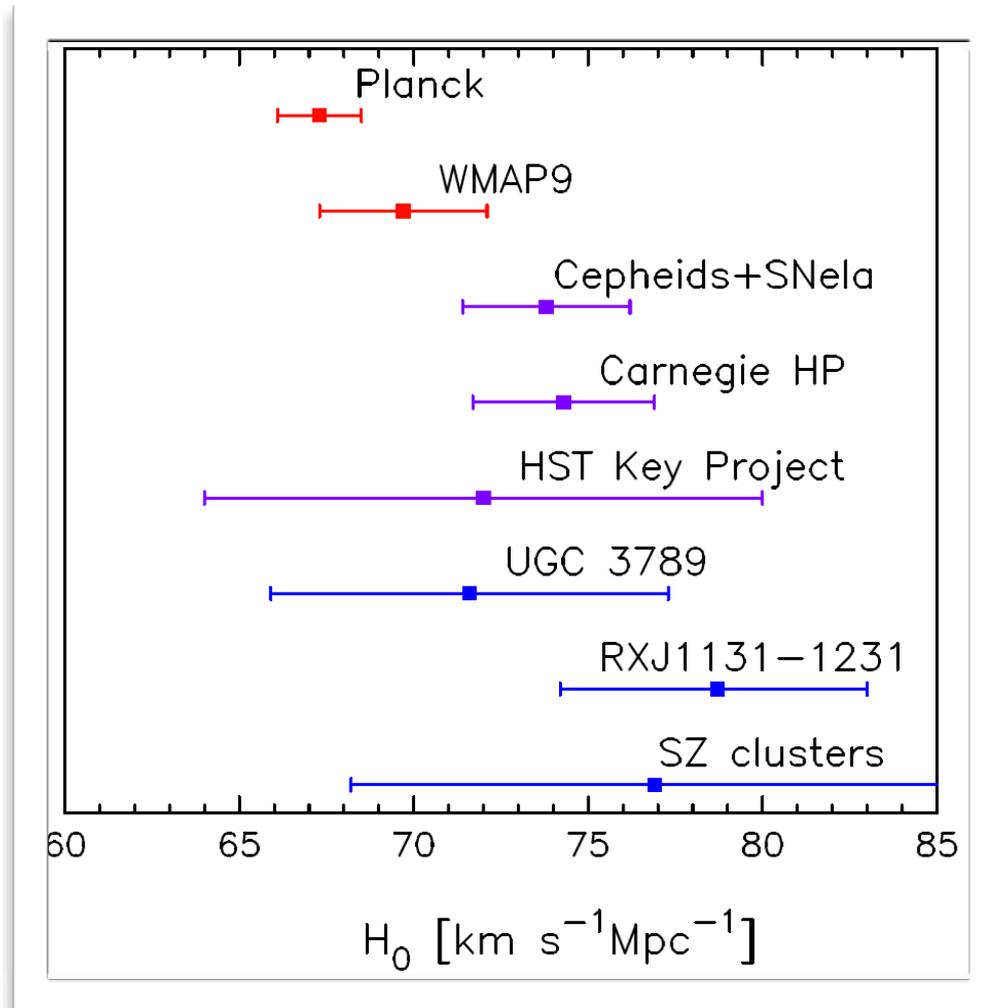
- Vannak-e eddig fel nem fedezett természeti törvények?
- Hogyan érthetjük meg a sötét energia rejtélyét?
- Létezik-e több mint három tér-dimenzió?
- Egyesülnek-e az alapvető kölcsönhatások?
- Miért van oly sokfajta elemi részecske? Van-e esetleg több?
- Mi a sötét anyag?
- Elő tudjuk-e állítani laboratóriumban a sötét anyagot?
- Hogyan keletkezett a Világegyetem?
- Hová tűnt az antianyag?

# Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE születése után 0,02 mp-cel, 13,8 milliárd ( $\pm 1\%$ ) évvel ezelőtt nagy sűrűségű és hőmérsékletű elektromágneses plazmával (elektron, pozitron, foton, kevéske proton és neutron) volt kitöltve
- A VE tágult és hűlt. A harmadik perc végén hőmérséklete 900 millió K alá süllyedt. Ekkor kialakultak a könnyű elemek (H, He, Li, Be, B)
- 379 ezer évvel később hőmérséklete 3000 K-re süllyedt. Ekkor kialakultak a semleges atomok, így a sugárzás és anyag közötti kölcsönhatás megszűnt. Ettől kezdve a sugárzás szabadon tágult a VE-mel és hűlt a ma mérhető 2,73 K-es értékre.
- Első csillagok 200 millió évvel később gyulladtak ki.

# Hogyan látjuk ma a világot?

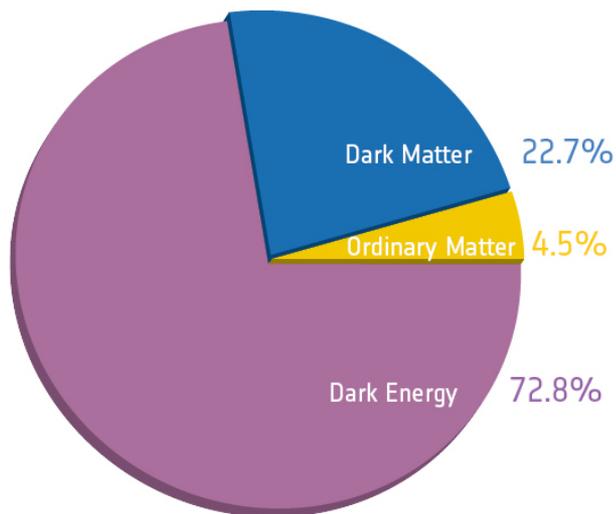
- A VE tágulását meghatározó Hubble-állandó értéke  $67.3 \pm 1.2$  (km/s)/Mpc (Planck)
- Az adatok jelenlegi értelmezése szerint a VE örökké tágulni fog, ...



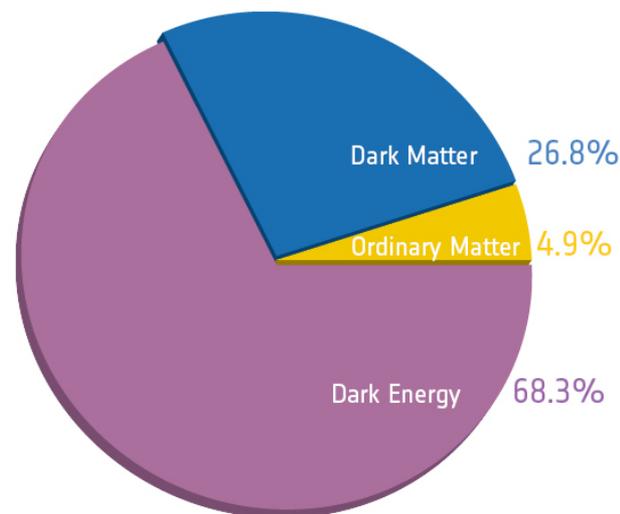
# Hogyan látjuk ma a világot?

- A VE tömegének 5%-a a bennünket is felépítő atomokból áll. 27%-a olyan hideg „sötét anyag”, amelyet laboratóriumban nem sikerült előállítani. 68%-a ismeretlen eredetű „sötét energia”. Mindez csak 100 Mpc léptékben, nem a Földön!

Planck előtt:



Planck után:



- Az első 0,02 másodperc történéseire is lehet következtetni a WMAP/Planck adataiból (felfűvódás?) és részecskefizikai kísérletekből

Aki nem hiszi, járjon utána...

*Vége*

