

# Kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás anizotrópiája

Bántó Balázs

Eötvös Loránd University

- Robert Henry Dicke 1941-ben, az M.I.T. sugárlaboratóriumában radar fejlesztésén dolgozva 20 K alatti hőmérsékletű „zajt” érzékelt.
- A háttérsugárzás létezését George Gamow, Ralph Alpher és Robert Hermann jósolta meg 1948-ban, de ellenőrizhetetlennek vélt előrejelzésük nem talált nagy visszhangra.
- 1961-ben Ed Ohm a Bell Laboratories kürtantennájának beállítása közben  $3,3 \pm 3$  K zajt detektált. Szovjet csillagászok (Andrej G. Doroskevics és Igor Novikov) számítottak az ősrobbanásból visszamaradó háttérsugárzásra, 1964-ben publikálták, hogy ennek kimutatására az Ohm-féle kürtantenna lenne a legalkalmasabb, azt azonban, hogy ezt a sugárzást Ohm már megmérte, egy fordítási hiba miatt nem vették észre a cikkben.

- Robert Henry Dicke 1941-ben, az M.I.T. sugárlaboratóriumában radar fejlesztésén dolgozva 20 K alatti hőmérsékletű „zajt” érzékelt.
- A háttérsugárzás létezését George Gamow, Ralph Alpher és Robert Hermann jósolta meg 1948-ban, de ellenőrizhetetlennek vélt előrejelzésük nem talált nagy visszhangra.
- 1961-ben Ed Ohm a Bell Laboratories kürtantennájának beállítása közben  $3,3 \pm 3$  K zajt detektált. Szovjet csillagászok (Andrej G. Doroskevics és Igor Novikov) számítottak az ősrobbanásból visszamaradó háttérsugárzásra, 1964-ben publikálták, hogy ennek kimutatására az Ohm-féle kürtantenna lenne a legalkalmasabb, azt azonban, hogy ezt a sugárzást Ohm már megmérte, egy fordítási hiba miatt nem vették észre a cikkben.

- Robert Henry Dicke 1941-ben, az M.I.T. sugárlaboratóriumában radar fejlesztésén dolgozva 20 K alatti hőmérsékletű „zajt” érzékelt.
- A háttérsugárzás létezését George Gamow, Ralph Alpher és Robert Hermann jósolta meg 1948-ban, de ellenőrizhetetlennek vélt előrejelzésük nem talált nagy visszhangra.
- 1961-ben Ed Ohm a Bell Laboratories kürtantennájának beállítása közben  $3,3 \pm 3$  K zajt detektált. Szovjet csillagászok (Andrej G. Doroskevics és Igor Novikov) számítottak az ősrobbanásból visszamaradó háttérsugárzásra, 1964-ben publikálták, hogy ennek kimutatására az Ohm-féle kürtantenna lenne a legalkalmasabb, azt azonban, hogy ezt a sugárzást Ohm már megmérte, egy fordítási hiba miatt nem vették észre a cikkben.

- 1963-ban Arno Penzias és Robert Woodrow Wilson a Bell Laboratories telephelyén kezdte rádiócsillagászatra használni az ott álló, műholdas kommunikációra szánt kürtantennát
- Konzultáltak a Princetoni Egyetem Jim Peebles és Robert H. Dicke vezette kutatócsoportjával ("Boys, we've been scooped").
- Penzias és Wilson ezt erősen kételkedve fogadta, mivel az állandó állapot általuk vallott elvében efféle sugárzásnak nem volt helye. Ennek ellenére a sugárzás felfedezéséért 1978-ban ők kaptak fizikai Nobel-díjat, és nem Dicke.

- 1963-ban Arno Penzias és Robert Woodrow Wilson a Bell Laboratories telephelyén kezdte rádiócsillagászatra használni az ott álló, műholdas kommunikációra szánt kürtantennát
- Konzultáltak a Princetoni Egyetem Jim Peebles és Robert H. Dicke vezette kutatócsoportjával ("Boys, we've been scooped").
- Penzias és Wilson ezt erősen kételkedve fogadta, mivel az állandó állapot általuk vallott elvében efféle sugárzásnak nem volt helye. Ennek ellenére a sugárzás felfedezéséért 1978-ban ők kaptak fizikai Nobel-díjat, és nem Dicke.

- 1963-ban Arno Penzias és Robert Woodrow Wilson a Bell Laboratories telephelyén kezdte rádiócsillagászatra használni az ott álló, műholdas kommunikációra szánt kürtantennát
- Konzultáltak a Princetoni Egyetem Jim Peebles és Robert H. Dicke vezette kutatócsoportjával ("Boys, we've been scooped").
- Penzias és Wilson ezt erősen kételkedve fogadta, mivel az állandó állapot általuk vallott elvében efféle sugárzásnak nem volt helye. Ennek ellenére a sugárzás felfedezéséért 1978-ban ők kaptak fizikai Nobel-díjat, és nem Dicke.

- Harrison, Peebles, Yu és Zeldovics megállapította, hogy a korai világegyetemnek  $10^{-4}$  vagy  $10^{-5}$  nagyságrendű inhomogenitásokat kellett tartalmaznia.
- Később Rasid Szunyajev kiszámította, milyenek kell látszania ennek az inhomogenitásnak.
- Egyre szigorúbb korlátokat sikerült megfigyelésekkel elérni az anizotrópia felső határára, de az anizotrópiát csak a 1992-ben COBE műhold Differential Microwave Radiometer nevű műszere mutatta ki (2006 Nóbél díj).



- Harrison, Peebles, Yu és Zeldovics megállapította, hogy a korai világegyetemnek  $10^{-4}$  vagy  $10^{-5}$  nagyságrendű inhomogenitásokat kellett tartalmaznia.
- Később Rasid Szunyajev kiszámította, milyenek kell látszania ennek az inhomogenitásnak.
- Egyre szigorúbb korlátokat sikerült megfigyelésekkel elérni az anizotrópia felső határára, de az anizotrópiát csak a 1992-ben COBE műhold Differential Microwave Radiometer nevű műszere mutatta ki (2006 Nóbél díj).

- Harrison, Peebles, Yu és Zeldovics megállapította, hogy a korai világegyetemnek  $10^{-4}$  vagy  $10^{-5}$  nagyságrendű inhomogenitásokat kellett tartalmaznia.
- Később Rasid Szunyajev kiszámította, milyenek kell látszania ennek az inhomogenitásnak.
- Egyre szigorúbb korlátokat sikerült megfigyelésekkel elérni az anizotrópia felső határára, de az anizotrópiát csak a 1992-ben COBE műhold Differential Microwave Radiometer nevű műszere mutatta ki (2006 Nóbél díj).

- Elektromágneses sugárzás, ami az egész világegyetemet kitölti.
- Energiaeloszlása 2,725 kelvin hőmérsékletű feketetest-sugárzásnak felel meg, melynek maximuma a mikrohullámú frekvenciatartományba esik: 160,4 GHz-nél (1,9 mm-es hullámhossznál) található.
- Az ősrobbanás után nagyjából 380 000 évvel az atommagok és elektronok összeálltak atomokká, és a fotonok (fény) számára a világegyetem átlátszóvá vált.
- A Világegyetem tágulása miatt, amelyet a vöröseltolódás jelensége igazol, a hőmérséklete lecsökkent.

- Elektromágneses sugárzás, ami az egész világegyetemet kitölti.
- Energiaeloszlása 2,725 kelvin hőmérsékletű feketetest-sugárzásnak felel meg, melynek maximuma a mikrohullámú frekvenciatartományba esik: 160,4 GHz-nél (1,9 mm-es hullámhossznál) található.
- Az ősrobbanás után nagyjából 380 000 évvel az atommagok és elektronok összeálltak atomokká, és a fotonok (fény) számára a világegyetem átlátszóvá vált.
- A Világegyetem tágulása miatt, amelyet a vöröseltolódás jelensége igazol, a hőmérséklete lecsökkent.

- Elektromágneses sugárzás, ami az egész világegyetemet kitölti.
- Energiaeloszlása 2,725 kelvin hőmérsékletű feketetest-sugárzásnak felel meg, melynek maximuma a mikrohullámú frekvenciatartományba esik: 160,4 GHz-nél (1,9 mm-es hullámhossznál) található.
- Az ősrobbanás után nagyjából 380 000 évvel az atommagok és elektronok összeálltak atomokká, és a fotonok (fény) számára a világegyetem átlátszóvá vált.
- A Világegyetem tágulása miatt, amelyet a vöröseltolódás jelensége igazol, a hőmérséklete lecsökkent.

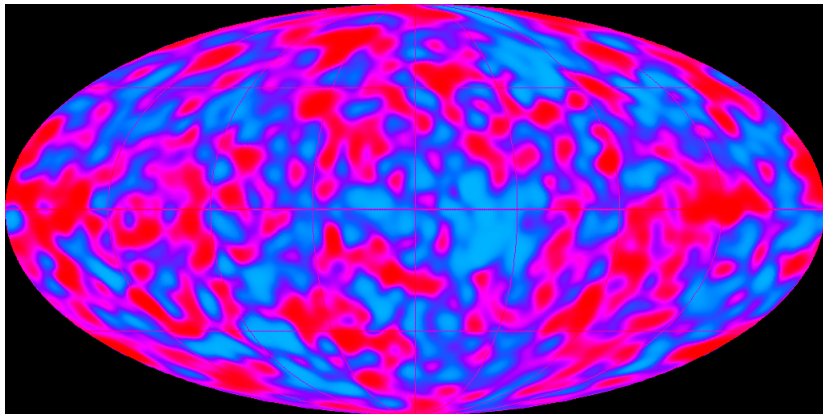
- Elektromágneses sugárzás, ami az egész világegyetemet kitölti.
- Energiaeloszlása 2,725 kelvin hőmérsékletű feketetest-sugárzásnak felel meg, melynek maximuma a mikrohullámú frekvenciatartományba esik: 160,4 GHz-nél (1,9 mm-es hullámhossznál) található.
- Az ősrobbanás után nagyjából 380 000 évvel az atommagok és elektronok összeálltak atomokká, és a fotonok (fény) számára a világegyetem átlátszóvá vált.
- A Világegyetem tágulása miatt, amelyet a vöröseltolódás jelensége igazol, a hőmérséklete lecsökkent.

- A sugárzás minden irányból egyenletesen érkezik hozzánk 1 százvezredrész pontossággal.
- Ebből származik nagyjából a világegyetem teljes sűrűségének  $5 \cdot 10^{-5}$ -ed része.
- Az ősrobbanás-elmélet két legnagyobb sikere a majdnem tökéletes feketetest-sugárzás megjósolása és a háttérsugárzás anizotrópiájának részletes megjósolása.

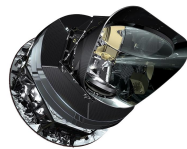
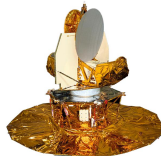
- A sugárzás minden irányból egyenletesen érkezik hozzánk 1 százezredrész pontossággal.
- Ebből származik nagyjából a világegyetem teljes sűrűségének  $5 \cdot 10^{-5}$ -ed része.
- Az ősrobbanás-elmélet két legnagyobb sikere a majdnem tökéletes feketetest-sugárzás megjósolása és a háttérsugárzás anizotrópiájának részletes megjósolása.



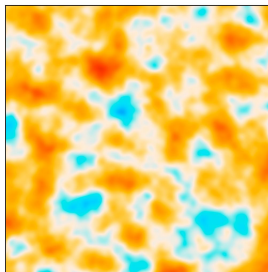
- A sugárzás minden irányból egyenletesen érkezik hozzánk 1 százezredrész pontossággal.
- Ebből származik nagyjából a világegyetem teljes sűrűségének  $5 \cdot 10^{-5}$ -ed része.
- Az ősrobbanás-elmélet két legnagyobb sikere a majdnem tökéletes feketetest-sugárzás megjósolása és a háttérsugárzás anizotrópiájának részletes megjósolása.



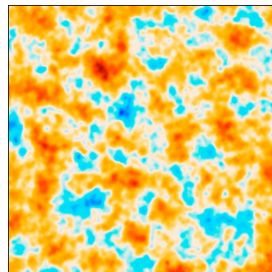
# Felbontás fejlődése



COBE



WMAP



Planck

- Gömbfüggvények: gömbfelületen definiált speciális függvények
- Teljes ortonormált rendszert alkotnak, s ezáltal bármilyen függvény kifejezhető segítségükkel ( $\sim$  Fourier sorban a sin és cos)
- $Y_l^m(\vartheta, \phi) = N e^{im\phi} P_l^m(\cos\vartheta)$
- $-l \leq m \leq l$ .
- A hőmérsékleti anizotrópia mezőt érdemes kifejezni ezen a bázison

- Gömbfüggvények: gömbfelületen definiált speciális függvények
- Teljes ortonormált rendszert alkotnak, s ezáltal bármilyen függvény kifejezhető segítségükkel ( $\sim$  Fourier sorban a sin és cos)
- $Y_l^m(\vartheta, \phi) = N e^{im\phi} P_l^m(\cos\vartheta)$
- $-l \leq m \leq l$ .
- A hőmérsékleti anizotrópia mezőt érdemes kifejteni ezen a bázison

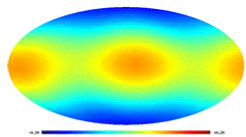
- Gömbfüggvények: gömbfelületen definiált speciális függvények
- Teljes ortonormált rendszert alkotnak, s ezáltal bármilyen függvény kifejezhető segítségükkel ( $\sim$  Fourier sorban a sin és cos)
- $Y_l^m(\vartheta, \phi) = Ne^{im\phi} P_l^m(\cos\vartheta)$
- $-l \leq m \leq l$ .
- A hőmérsékleti anizotrópia mezőt érdemes kifejezni ezen a bázison

- Gömbfüggvények: gömbfelületen definiált speciális függvények
- Teljes ortonormált rendszert alkotnak, s ezáltal bármilyen függvény kifejezhető segítségükkel ( $\sim$  Fourier sorban a sin és cos)
- $Y_l^m(\vartheta, \phi) = N e^{im\phi} P_l^m(\cos\vartheta)$
- $-l \leq m \leq l$ .
- A hőmérsékleti anizotrópia mezőt érdemes kifejtetni ezen a bázison

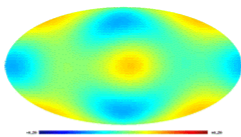
- Gömbfüggvények: gömbfelületen definiált speciális függvények
- Teljes ortonormált rendszert alkotnak, s ezáltal bármilyen függvény kifejezhető segítségükkel ( $\sim$  Fourier sorban a sin és cos)
- $Y_l^m(\vartheta, \phi) = N e^{im\phi} P_l^m(\cos\vartheta)$
- $-l \leq m \leq l$ .
- A hőmérsékleti anizotrópia mezőt érdemes kifejteni ezen a bázison



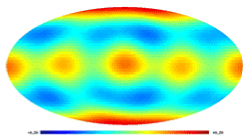
# Gömbfüggvények



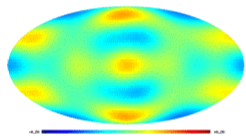
$\ell = 2$



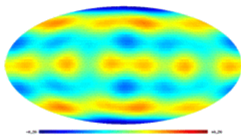
$\ell = 3$



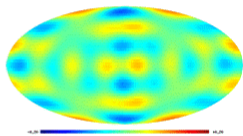
$\ell = 4$



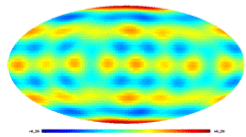
$\ell = 5$



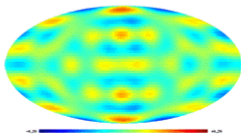
$\ell = 6$



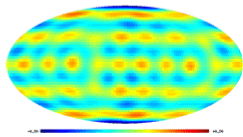
$\ell = 7$



$\ell = 8$

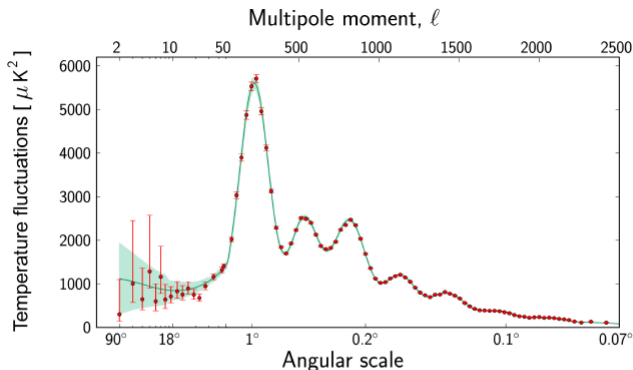


$\ell = 9$



$\ell = 10$

# CMB - fluktuációk szögspektruma (WMAP)



6.21. ábra. A CMB-fluktuációk szögspektruma, azaz a foltok relatív fényessége a foltok (multipólus-momentum  $l$  rendje által, illetve szögben kifejezett) méretének függvényében a Planck űrszonda 2013-ban közzétett eredményei alapján [<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=51555>].

- A feketetest-sugárzástól való eltérések a lecsatolódáskori fluktuációkat tükrözik
- Azóta más hatások is alakították a spektrumot (másodlagos anizotrópia, ezeket le kell vonni)
- Dipól anizotrópia: a Lokális csoport  $627 \text{ km/s}$  sebességgel halad a CMB által definiált vonatkoztatási rendszerhez képest. A sugárzás melegebbnek érződik a haladási irányba.
- Sachs-Wolfe effektus: nagyobb sűrűségű helyeken mélyebb a gravitációs potenciál, így a kilépő fotonok gravitációs vöröseltolódása is nagyobb (kicsi "I"-nél).
- Halmazok lencsézése is kihat a háttérsugárzás spektrumára.

- A feketetest-sugárzástól való eltérések a lecsatolódáskori fluktuációkat tükrözik
- Azóta más hatások is alakították a spektrumot (másodlagos anizotrópia, ezeket le kell vonni)
- Dipól anizotrópia: a Lokális csoport  $627 \text{ km/s}$  sebességgel halad a CMB által definiált vonatkoztatási rendszerhez képest. A sugárzás melegebbnek érződik a haladási irányba.
- Sachs-Wolfe effektus: nagyobb sűrűségű helyeken mélyebb a gravitációs potenciál, így a kilépő fotonok gravitációs vöröseltolódása is nagyobb (kicsi "I"-nél).
- Halmazok lencsézése is kihat a háttérsugárzás spektrumára.

- A feketetest-sugárzástól való eltérések a lecsatolódáskori fluktuációkat tükrözik
- Azóta más hatások is alakították a spektrumot (másodlagos anizotrópia, ezeket le kell vonni)
- Dipól anizotrópia: a Lokális csoport  $627 \text{ km/s}$  sebességgel halad a CMB által definiált vonatkoztatási rendszerhez képest. A sugárzás melegebbnek érződik a haladási irányba.
- Sachs-Wolfe effektus: nagyobb sűrűségű helyeken mélyebb a gravitációs potenciál, így a kilépő fotonok gravitációs vöröseltolódása is nagyobb (kicsi "I"-nél).
- Halmazok lencsézése is kihat a háttérsugárzás spektrumára.

- A feketetest-sugárzástól való eltérések a lecsatolódáskori fluktuációkat tükrözik
- Azóta más hatások is alakították a spektrumot (másodlagos anizotrópia, ezeket le kell vonni)
- Dipól anizotrópia: a Lokális csoport  $627 \text{ km/s}$  sebességgel halad a CMB által definiált vonatkoztatási rendszerhez képest. A sugárzás melegebbnek érződik a haladási irányba.
- Sachs-Wolfe effektus: nagyobb sűrűségű helyeken mélyebb a gravitációs potenciál, így a kilépő fotonok gravitációs vöröseltolódása is nagyobb (kicsi "I"-nél).
- Halmazok lencsézése is kihat a háttérsugárzás spektrumára.

- A feketetest-sugárzástól való eltérések a lecsatolódáskori fluktuációkat tükrözik
- Azóta más hatások is alakították a spektrumot (másodlagos anizotrópia, ezeket le kell vonni)
- Dipól anizotrópia: a Lokális csoport  $627 \text{ km/s}$  sebességgel halad a CMB által definiált vonatkoztatási rendszerhez képest. A sugárzás melegebbnek érződik a haladási irányba.
- Sachs-Wolfe effektus: nagyobb sűrűségű helyeken mélyebb a gravitációs potenciál, így a kilépő fotonok gravitációs vöröseltolódása is nagyobb (kicsi "I"-nél).
- Halmazok lencsézése is kihat a háttérsugárzás spektrumára.

- Sunyaev - Zel'dovich - effektusok:
  - a spektrum torzul, amikor a háttérsugárzás fotonjai a galaxishalmazokon lévő forró, intenzív röntgensugárzást kibocsátó gázba hatolnak.
  - a fotonok újra szóródnak a gáz szabad elektronjain, és energiát kapva tőlük megváltozik a hullámhosszuk, így a sugárzás hőmérséklete is.
  - ennek köszönhetően a legnagyobb hőmérséklet - ingadozásokat a galaxishalmaok irányába észleljük.
- ESA video



- Sunyaev - Zel'dovich - effektusok:
  - a spektrum torzul, amikor a háttérsugárzás fotonjai a galaxishalmazokon lévő forró, intenzív röntgensugárzást kibocsátó gázba hatolnak.
  - a fotonok újra szóródnak a gáz szabad elektronjain, és energiát kapva tőlük megváltozik a hullámhosszuk, így a sugárzás hőmérséklete is.
  - ennek köszönhetően a legnagyobb hőmérséklet - ingadozásokat a galaxishalmazok irányába észleljük.
- ESA video

- Sunyaev - Zel'dovich - effektusok:
  - a spektrum torzul, amikor a háttérsugárzás fotonjai a galaxishalmazokon lévő forró, intenzív röntgensugárzást kibocsátó gázba hatolnak.
  - a fotonok újra szóródnak a gáz szabad elektronjain, és energiát kapva tőlük megváltozik a hullámhosszuk, így a sugárzás hőmérséklete is.
  - ennek köszönhetően a legnagyobb hőmérséklet - ingadozásokat a galaxishalmazok irányába észleljük.
- ESA video

- Sunyaev - Zel'dovich - effektusok:
  - a spektrum torzul, amikor a háttérsugárzás fotonjai a galaxishalmazokon lévő forró, intenzív röntgensugárzást kibocsátó gázba hatolnak.
  - a fotonok újra szóródnak a gáz szabad elektronjain, és energiát kapva tőlük megváltozik a hullámhosszuk, így a sugárzás hőmérséklete is.
  - ennek köszönhetően a legnagyobb hőmérséklet - ingadozásokat a galaxishalmazok irányába észleljük.
- ESA video

- Sunyaev - Zel'dovich - effektusok:
  - a spektrum torzul, amikor a háttérsugárzás fotonjai a galaxishalmazokon lévő forró, intenzív röntgensugárzást kibocsátó gázba hatolnak.
  - a fotonok újra szóródnak a gáz szabad elektronjain, és energiát kapva tőlük megváltozik a hullámhosszuk, így a sugárzás hőmérséklete is.
  - ennek köszönhetően a legnagyobb hőmérséklet - ingadozásokat a galaxishalmazok irányába észleljük.
- ESA video

- Diffúziós(Silk-) csillapodás: A rekombináció alatt a fotonok a magasabb hőmérsékletű helyekről folyamatos szórásokon átesve hidegebb területek felé diffundálnak.
  - ez a termalizáció azon skálán hatásos, amelyet a foton bolyongása során befuthatott a lecsatolódásig.
  - a csillapodás a spektrum harmadik csúcsát követően várható

- Diffúziós(Silk-) csillapodás: A rekombináció alatt a fotonok a magasabb hőmérsékletű helyekről folyamatos szórásokon átesve hidegebb területek felé diffundálnak.
  - ez a termalizáció azon skálán hatásos, amelyet a foton bolyongása során befuthatott a lecsatolódásig.
  - a csillapodás a spektrum harmadik csúcsát követően várható

- Diffúziós(Silk-) csillapodás: A rekombináció alatt a fotonok a magasabb hőmérsékletű helyekről folyamatos szórásokon átesve hidegebb területek felé diffundálnak.
  - ez a termalizáció azon skálán hatásos, amelyet a foton bolyongása során befuthatott a lecsatolódásig.
  - a csillapodás a spektrum harmadik csúcsát követően várható

- A kezdeti kvantum fluktuációkból az infláció során a plazmában perturbációk jöttek létre, amelyek sötét anyagból, barionokból neutrínókból és fotonokból álltak.
- A korai Univerzum forró plazmájában az anyag és sugárzás kölcsönhatása nyomást hozott létre, amely a gravitációs vonzással ellentétes irányban fejtette ki hatását.
- A két hatás eredményeképp a plazma a hanghullámokhoz hasonló oszcillációkban képes részt venni.
- A túlnyomás hatására adott perturbációs centrumból akusztikus gömbhullám indult útnak.



- A kezdeti kvantum fluktuációkból az infláció során a plazmában perturbációk jöttek létre, amelyek sötét anyagból, barionokból neutrínókból és fotonokból álltak.
- A korai Univerzum forró plazmájában az anyag és sugárzás kölcsönhatása nyomást hozott létre, amely a gravitációs vonzással ellentétes irányban fejtette ki hatását.
- A két hatás eredményeképp a plazma a hanghullámokhoz hasonló oszcillációkban képes részt venni.
- A túlnyomás hatására adott perturbációs centrumból akusztikus gömbhullám indult útnak.

- A kezdeti kvantum fluktuációkból az infláció során a plazmában perturbációk jöttek létre, amelyek sötét anyagból, barionokból neutrínókból és fotonokból álltak.
- A korai Univerzum forró plazmájában az anyag és sugárzás kölcsönhatása nyomást hozott létre, amely a gravitációs vonzással ellentétes irányban fejtette ki hatását.
- A két hatás eredményeképp a plazma a hanghullámokhoz hasonló oszcillációkban képes részt venni.
- A túlnyomás hatására adott perturbációs centrumból akusztikus gömbhullám indult útnak.

- A kezdeti kvantum fluktuációkból az infláció során a plazmában perturbációk jöttek létre, amelyek sötét anyagból, barionokból neutrínókból és fotonokból álltak.
- A korai Univerzum forró plazmájában az anyag és sugárzás kölcsönhatása nyomást hozott létre, amely a gravitációs vonzással ellentétes irányban fejtette ki hatását.
- A két hatás eredményeképp a plazma a hanghullámokhoz hasonló oszcillációkban képes részt venni.
- A túlnyomás hatására adott perturbációs centrumból akusztikus gömbhullám indult útnak.

- A sötét anyagnak nincs nyomása, így a perturbáció közepén maradt, a barionok és a fotonok viszont távolodtak, egészen a lecsatolódásig.
- Ekkor a fotonok kiléptek a plazmakölcsönhatásból, és már szabadon, háttérsugárzásként terjedtek szét, míg a barionok megtorpantak.
- A hanghorizont a gömb sugara a lecsatolódáskor.
- Ekkor a gömbfelületen és a centrumban nagyobb a barionsűrűség, így várható, hogy a struktúra elsősorban itt alakul ki (ESA video).
- A galaxisok mai elhelyezkedését vizsgálva, a hanghorizont elvben meghatározható.

- A sötét anyagnak nincs nyomása, így a perturbáció közepén maradt, a barionok és a fotonok viszont távolodtak, egészen a lecsatolódásig.
- Ekkor a fotonok kiléptek a plazmakölcsönhatásból, és már szabadon, háttérsugárzásként terjedtek szét, míg a barionok megtorpantak.
- A hanghorizont a gömb sugara a lecsatolódáskor.
- Ekkor a gömbfelületen és a centrumban nagyobb a barionsűrűség, így várható, hogy a struktúra elsősorban itt alakul ki (ESA video).
- A galaxisok mai elhelyezkedését vizsgálva, a hanghorizont elvben meghatározható.

- A sötét anyagnak nincs nyomása, így a perturbáció közepén maradt, a barionok és a fotonok viszont távolodtak, egészen a lecsatolódásig.
- Ekkor a fotonok kiléptek a plazmakölcsönhatásból, és már szabadon, háttérsugárzásként terjedtek szét, míg a barionok megtorpantak.
- A hanghorizont a gömb sugara a lecsatolódáskor.
- Ekkor a gömbfelületen és a centrumban nagyobb a barionsűrűség, így várható, hogy a struktúra elsősorban itt alakul ki (ESA video).
- A galaxisok mai elhelyezkedését vizsgálva, a hanghorizont elvben meghatározható.

- A sötét anyagnak nincs nyomása, így a perturbáció közepén maradt, a barionok és a fotonok viszont távolodtak, egészen a lecsatolódásig.
- Ekkor a fotonok kiléptek a plazmakölcsönhatásból, és már szabadon, háttérsugárzásként terjedtek szét, míg a barionok megtorpantak.
- A hanghorizont a gömb sugara a lecsatolódáskor.
- Ekkor a gömbfelületen és a centrumban nagyobb a barionsűrűség, így várható, hogy a struktúra elsősorban itt alakul ki (ESA video).
- A galaxisok mai elhelyezkedését vizsgálva, a hanghorizont elvben meghatározható.

- A sötét anyagnak nincs nyomása, így a perturbáció közepén maradt, a barionok és a fotonok viszont távolodtak, egészen a lecsatolódásig.
- Ekkor a fotonok kiléptek a plazmakölcsönhatásból, és már szabadon, háttérsugárzásként terjedtek szét, míg a barionok megtorpantak.
- A hanghorizont a gömb sugara a lecsatolódáskor.
- Ekkor a gömbfelületen és a centrumban nagyobb a barionsűrűség, így várható, hogy a struktúra elsősorban itt alakul ki (ESA video).
- A galaxisok mai elhelyezkedését vizsgálva, a hanghorizont elvben meghatározható.



- Bonyolult viszont, hiszen nem egy, hanem számtalan perturbáció létezett az infláció során, és a hanghorizont sugarú gömbök átmetszették egymást.
- SDSS méréseiben a hanghorizont 150 Mpc-nek adódott.
- A hanghorizont mérete közvetve meghatározza az Univerzum sötét anyag + barionikus anyag tartalmát
- Különböző barionikus/sötét anyag és foton arányok különböző terjedési sebességhez vezetnek a korai Univerzum perturbáció fejlődésében.
- Megmutatható, hogy a rekombináció előtt a hanghorizont alatti hullámhosszú perturbációk oszcillálnak.
- Az akusztikus oszcillációk az utolsó szórásnál "befagynak" a CMB-be.

- Bonyolult viszont, hiszen nem egy, hanem számtalan perturbáció létezett az infláció során, és a hanghorizont sugarú gömbök átmetszették egymást.
- SDSS méréseiben a hanghorizont 150 Mpc-nek adódott.
- A hanghorizont mérete közvetve meghatározza az Univerzum sötét anyag + barionikus anyag tartalmát
- Különböző barionikus/sötét anyag és foton arányok különböző terjedési sebességhez vezetnek a korai Univerzum perturbáció fejlődésében.
- Megmutatható, hogy a rekombináció előtt a hanghorizont alatti hullámhosszú perturbációk oszcillálnak.
- Az akusztikus oszcillációk az utolsó szórásnál "befagynak" a CMB-be.

- Bonyolult viszont, hiszen nem egy, hanem számtalan perturbáció létezett az infláció során, és a hanghorizont sugarú gömbök átmetszették egymást.
- SDSS méréseiben a hanghorizont 150 Mpc-nek adódott.
- A hanghorizont mérete közvetve meghatározza az Univerzum sötét anyag + barionikus anyag tartalmát
- Különböző barionikus/sötét anyag és foton arányok különböző terjedési sebességhez vezetnek a korai Univerzum perturbáció fejlődésében.
- Megmutatható, hogy a rekombináció előtt a hanghorizont alatti hullámhosszú perturbációk oszcillálnak.
- Az akusztikus oszcillációk az utolsó szórásnál "befagynak" a CMB-be.

- Bonyolult viszont, hiszen nem egy, hanem számtalan perturbáció létezett az infláció során, és a hanghorizont sugarú gömbök átmetszették egymást.
- SDSS méréseiben a hanghorizont 150 Mpc-nek adódott.
- A hanghorizont mérete közvetve meghatározza az Univerzum sötét anyag + barionikus anyag tartalmát
- Különböző barionikus/sötét anyag és foton arányok különböző terjedési sebességhez vezetnek a korai Univerzum perturbáció fejlődésében.
- Megmutatható, hogy a rekombináció előtt a hanghorizont alatti hullámhosszú perturbációk oszcillálnak.
- Az akusztikus oszcillációk az utolsó szórásnál "befagynak" a CMB-be.

- Bonyolult viszont, hiszen nem egy, hanem számtalan perturbáció létezett az infláció során, és a hanghorizont sugarú gömbök átmetszették egymást.
- SDSS méréseiben a hanghorizont 150 Mpc-nek adódott.
- A hanghorizont mérete közvetve meghatározza az Univerzum sötét anyag + barionikus anyag tartalmát
- Különböző barionikus/sötét anyag és foton arányok különböző terjedési sebességhez vezetnek a korai Univerzum perturbáció fejlődésében.
- Megmutatható, hogy a rekombináció előtt a hanghorizont alatti hullámhosszú perturbációk oszcillálnak.
- Az akusztikus oszcillációk az utolsó szórásnál "befagynak" a CMB-be.

- Bonyolult viszont, hiszen nem egy, hanem számtalan perturbáció létezett az infláció során, és a hanghorizont sugarú gömbök átmetszették egymást.
- SDSS méréseiben a hanghorizont 150 Mpc-nek adódott.
- A hanghorizont mérete közvetve meghatározza az Univerzum sötét anyag + barionikus anyag tartalmát
- Különböző barionikus/sötét anyag és foton arányok különböző terjedési sebességhez vezetnek a korai Univerzum perturbáció fejlődésében.
- Megmutatható, hogy a rekombináció előtt a hanghorizont alatti hullámhosszú perturbációk oszcillálnak.
- Az akusztikus oszcillációk az utolsó szórásnál "befagynak" a CMB-be.

- Első csúcs: mérete függ a Friedmann-univerzum anyagi tartalmától (sötét energia, sötét anyag, barion, sugárzás), helyzete pedig a Friedmann-univerzum görbületétől.
- Második csúcs: hasonló paraméterektől függ, mint az első, de másképp kell figyelembe venni őket
- Harmadik csúcs: az  $n_l$  spektrál indexre a legérzékenyebb
- A csúcsok relatív helyzete függ az aktuális perturbációs modelltől:
  - adiabatikus: a csúcsokat pontosan reprodukálják  $\implies$  alátámasztja az infláció elméletét
  - izogörbületi: nem egyezik az eredményekkel  $\implies$  kizárja a kozmikus húrok elméletét

- Első csúcs: mérete függ a Friedmann-univerzum anyagi tartalmától (sötét energia, sötét anyag, barion, sugárzás), helyzete pedig a Friedmann-univerzum görbületétől.
- Második csúcs: hasonló paraméterektől függ, mint az első, de másképp kell figyelembe venni őket
- Harmadik csúcs: az  $n_l$  spektrál indexre a legérzékenyebb
- A csúcsok relatív helyzete függ az aktuális perturbációs modelltől:
  - adiabatikus: a csúcsokat pontosan reprodukálják  $\implies$  alátámasztja az infláció elméletét
  - izogörbületi: nem egyezik az eredményekkel  $\implies$  kizárja a kozmikus húrok elméletét



- Első csúcs: mérete függ a Friedmann-univerzum anyagi tartalmától (sötét energia, sötét anyag, barion, sugárzás), helyzete pedig a Friedmann-univerzum görbületétől.
- Második csúcs: hasonló paraméterektől függ, mint az első, de másképp kell figyelembe venni őket
- Harmadik csúcs: az  $n_l$  spektrál indexre a legérzékenyebb
- A csúcsok relatív helyzete függ az aktuális perturbációs modelltől:
  - adiabatikus: a csúcsokat pontosan reprodukálják  $\implies$  alátámasztja az infláció elméletét
  - izogörbületi: nem egyezik az eredményekkel  $\implies$  kizárja a kozmikus húrok elméletét

- Első csúcs: mérete függ a Friedmann-univerzum anyagi tartalmától (sötét energia, sötét anyag, barion, sugárzás), helyzete pedig a Friedmann-univerzum görbületétől.
- Második csúcs: hasonló paraméterektől függ, mint az első, de másképp kell figyelembe venni őket
- Harmadik csúcs: az  $n_l$  spektrál indexre a legérzékenyebb
- A csúcsok relatív helyzete függ az aktuális perturbációs modelltől:
  - adiabatikus: a csúcsokat pontosan reprodukálják  $\implies$  alátámasztja az infláció elméletét
  - izogörbületi: nem egyezik az eredményekkel  $\implies$  kizárja a kozmikus húrok elméletét

- Első csúcs: mérete függ a Friedmann-univerzum anyagi tartalmától (sötét energia, sötét anyag, barion, sugárzás), helyzete pedig a Friedmann-univerzum görbületétől.
- Második csúcs: hasonló paraméterektől függ, mint az első, de másképp kell figyelembe venni őket
- Harmadik csúcs: az  $n_l$  spektrál indexre a legérzékenyebb
- A csúcsok relatív helyzete függ az aktuális perturbációs modelltől:
  - adiabatikus: a csúcsokat pontosan reprodukálják  $\implies$  alátámasztja az infláció elméletét
  - izogörbületi: nem egyezik az eredményekkel  $\implies$  kizárja a kozmikus húrok elméletét

- Első csúcs: mérete függ a Friedmann-univerzum anyagi tartalmától (sötét energia, sötét anyag, barion, sugárzás), helyzete pedig a Friedmann-univerzum görbületétől.
- Második csúcs: hasonló paraméterektől függ, mint az első, de másképp kell figyelembe venni őket
- Harmadik csúcs: az  $n_l$  spektrál indexre a legérzékenyebb
- A csúcsok relatív helyzete függ az aktuális perturbációs modelltől:
  - adiabatikus: a csúcsokat pontosan reprodukálják  $\implies$  alátámasztja az infláció elméletét
  - izogörbületes: nem egyezik az eredményekkel  $\implies$  kizárja a kozmikus húrok elméletét

# Planck műhold



- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)

- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)

- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)



- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)

- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)

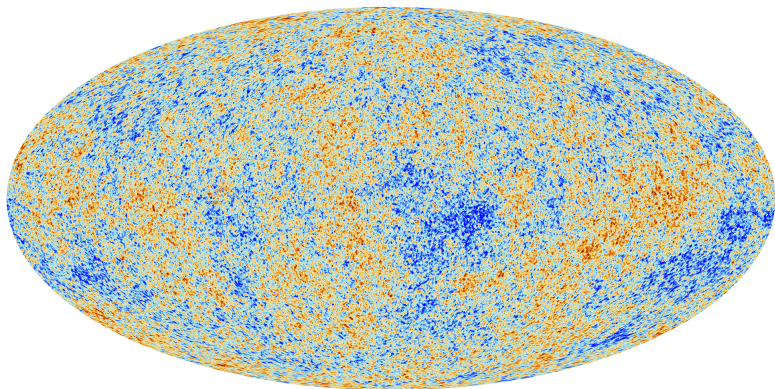
- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)

- ESA készítette a mikrohullámú háttérsugárzás a korábbi műholdaknál (COBE, WMAP) pontosabb felmérésére.
- 2009 május 14-én bocsátották fel
- A Szunyajev-Zeldovics effektus segítségével elvégzi a Világegyetem látható részében lévő galaxishalmazok katalogizálását is.
- A műhold méretei: nagyjából  $4,2 \times 4,2$  m
- A Planck-műhold két fő műszerrel rendelkezik:
  - Low Frequency Instrument: 27 GHz - 77 GHz (52 db bolometrikus detektor)
  - High Frequency Instrument: 83 GHz - 1 THz (22 db hangolt rádióvevő)

- Az érzékelt hullámhossz-tartomány: 1 cm és 0,35 mm közötti.
- A Planck 6 hónaponként feltérképezi a teljes égboltot 9 különböző frekvencián. (a műszerek annyira érzékenyek, mintha a Földről a Holdon lévő nyúl testhőmérsékletét akarnánk megmérni).
- A legnagyobb munka a “háttérzaj” kiküszöbölése.

- Az érzékelt hullámhossz-tartomány: 1 cm és 0,35 mm közötti.
- A Planck 6 hónaponként feltérképezi a teljes égboltot 9 különböző frekvencián. (a műszerek annyira érzékenyek, mintha a Földről a Holdon lévő nyúl testhőmérsékletét akarnánk megmérni).
- A legnagyobb munka a “háttérzaj” kiküszöbölése.

- Az érzékelt hullámhossz-tartomány: 1 cm és 0,35 mm közötti.
- A Planck 6 hónaponként feltérképezi a teljes égboltot 9 különböző frekvencián. (a műszerek annyira érzékenyek, mintha a Földről a Holdon lévő nyúl testhőmérsékletét akarnánk megmérni).
- A legnagyobb munka a “háttérzaj” kiküszöbölése.





- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model

- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model



- Fluktuációk kezdete:  $10^{-30} s$
- Univerzum kora:  $13.798 \pm 0.037$  milliárd év
- “Rendes” anyag:  $4.82 \pm 0.05\%$
- Sötét anyag:  $25.8 \pm 0.4\%$
- Sötét energia:  $69 \pm 1\%$
- Hubble-állandó:  $67.80 \pm 0.77$  (km/s)Mpc
- Skaláris spektrál index:  $n_s = 0.9624$
- $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02 \implies$  sík geometria
- Alátámasztott kozmológiai modellek: Infláció, Lambda-CDM model