

A sötét anyag és sötét energia rejtélye

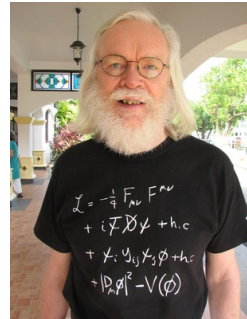
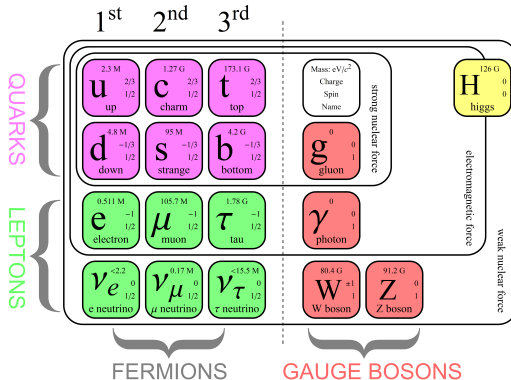
Cynolter Gábor

MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

Részecskefizika Határok Nélkül
2018. november 17. ELTE TTK



A Standard Modell példátlan sikere, 3+1 kcsh



Kísérletek → Szimmetriák + Belső ellentmondásmentesség

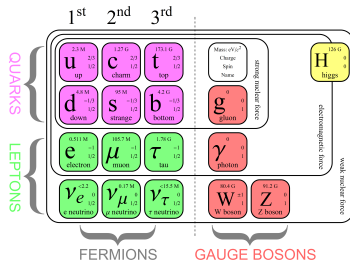
Leírja az összes földi nagyenergiás kísérletet

Kimaradt gravitáció - közvetíti $m=0$ **graviton (g)**

Standard Modell hiányosságai

Kísérleti:

- **Neutrínó tömeg** - oszcilláció, ízrezgés megoldás + ν_R "jobbkezes" neutrínók
- **Barion asszimetria** -
Miért van több anyag, mint antianyag
- **Sötét anyag** ($\rightarrow$ SM kiterjesztése)
- **Sötét energia** (?, nem részecskefiz.)

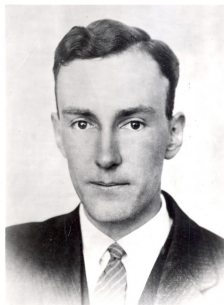


Elméleti:

- sok (~ 20) és nagyon különböző paraméter,
- miért 3 család,
- töltéskvantálás ($|Q_e| = Q_p$), semleges H-atom
- ...

- 1 Gravitációs hatás látható objektumok közt
Galaxis (csillag) rotációs görbék
- 2 Gravitációs lencsehatás
- 3 CMB, Kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás
Anizotrópia, modell és mérés
- 4 Struktúrák kialakulása (BAO), fejlődése, szimulációk
- 5 Ősrobbanásban nukleonok kialakulása
(Big Bang nukleoszintézis)

Sötét Anyag (DM) gravitációs hatásából



Jan Ort 1932

Csillagok sebessége nagyobb, mint
amit a **látható** galaxis indokol,
3x tömeg
→ halvány vagy eltakart csillagok

Elfeledték jó 30 évre



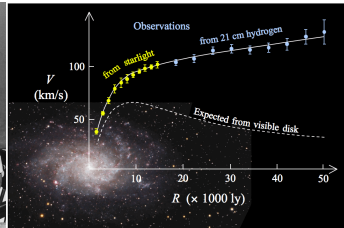
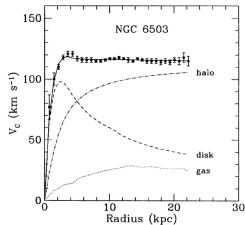
Fritz Zwicky 1933, „kellemetlen”

Galaxisok sebessége a Szűz és Kóma g.
halmazokban **min. 10x a látható**
anyagból számoltnál

→ galaxisok tömegének jó része számunkra
láthatatlan anyag- DM

Sötét Anyag galaxis rotációs görbe, Vera Rubin

1963-65 első PhD és csillagásznő a Palomar Observatóriumban
Galaxis(ok)ban mérte csillagok sebességét,
A fénylő anyagból kisebb sebesség



A galaxisoknak nagy kiterjedésű udvara (halo) van
A galaxisban a sötét anyag tömege 10x a világító anyagénak

Newton $1/r^2$ erőtvény 0.1 mm-től a érvényes Naprendszt.

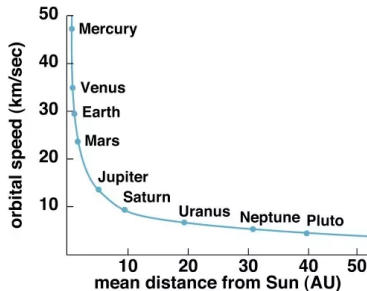
Bolygók sebessége és távolsága,

számolható a Nap tömege is

$$m \frac{v^2}{r} = \gamma \frac{mM}{r^2}$$

$$v^2 = \gamma M \cdot \frac{1}{r} \sim 1/r$$

ha $M = \rho \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \rightarrow v \sim r$ középén!



(b)
Copyright © Addison Wesley

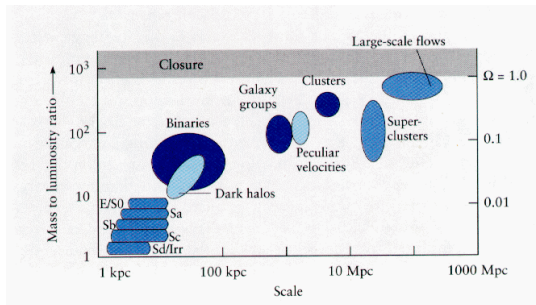
A Naprendszerben nagy sűrűségek, kevés, semmi sötét anyag
Mégis Zwicky óta: az Univerzum anyagának nagy része sötét

Newton is tudta, fény elhajlik (nagy) tömeg mellett,
Általános Relativitáselm. 2x, Eddington napfogy. mérés 1919



- Fényesedés, pont képe-ívelt vonal(ak)
- Lensing smile, 2 galaxis (SDSSCGB 8842.3 and SDSSCGB 8842.4)
- Bullet, ágyúgolyó klaszter ütköző galaxishalmazok
Rózsaszín: forró gáz, ütközésben lemaradt,
Kék: DM halo lencsézésből számolva, nem ütközik

Sötét Anyag, növekvő szerep



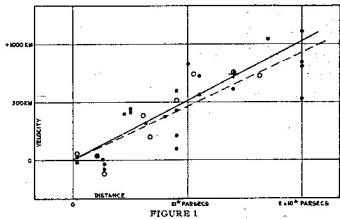
Nagyobb skálákon egyre nagyobb a gravitáló (nagyrészt DM) és a fénylő anyag aránya

Nézzünk még messzebb, legmesszebb, ameddig a „szem” ellát!

-CMB Kozmikus háttérsugárzás 3. pont és jön a sötét energia

Gyorsuló Táguló Világegyetem, Hubble törvény

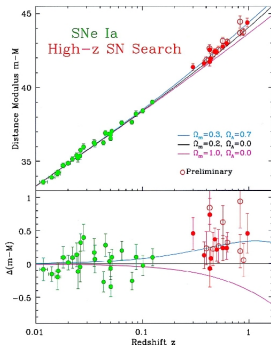
Objektumok sebességének és távolságának mérése



Hubble, 1929,
Virgo klaszterben galaxisok
Univerzum tágul, lineáris törvény,

$$v = H_0 * D$$

$H_0 \simeq 67 - 73 \frac{\text{km}}{\text{s}} \text{Mpc}^{-1}$ (500, 100/50)
redshift-sebesség összefüggés, $z \simeq \frac{v}{c}$
Nagyobb z-re, táv-ra is lineáris tv.



luminozitás-távolság redshift távoli
Standard gyertya **SN Ia szupernóvákra**
Távoli SN -halványabb-messzebb-
gyorsuló tágulás (felfújódás)
Nobel díj 2011- S.Perlmutter, B.P.
Schmidt, A.G. Riess

Medig tágul a Világegyetem?

Klasszikus mechanika: összenergia, mint a feldobott kő

$$E_m + V = \frac{1}{2} \sum m_i v_i^2 - \sum_{i,j} \gamma \frac{m_i m_j}{r} = E$$

VE sorsa:	E	>0	örök tágulás
	E	=0	kritikus, $\rho_c \sim 5 \text{ H-atom}/m^3$
	E	<0	tágul majd összeomlik

$$\rho = \Omega \rho_c$$

Tömeg $\sim$ energiasűrűséget kritikushoz képest mérjük

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 + \dots, \quad \Omega_{világito} \sim 0,4\%$$

VE sorsa	Ω	>1	örök tágulás
	Ω	=1	kritikus
	Ω	<1	tágul majd zutty

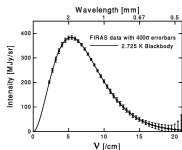
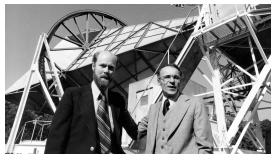
$$\Omega_X = ? \text{ mérhető}$$

CMB, Kozmikus Mikrohullámú Háttérsugárzás

A 380 ezer éves VE képe, plazma után rekombináció, semleges atomok létrejöttek a sugárzás átjárhatta.

Tágulással hűlt 3000->3K-re

Penzias és Wilson 1965
mikrohullámú antenna próba



Irányfüggetlen, 10^{-5} fluktuációk

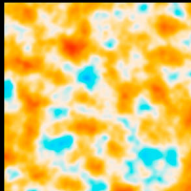
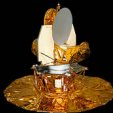
Tökéletes fekete test sugárzás

Nobel díj 1978 P&W és 2006 COBE műhold kísérlet

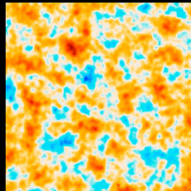
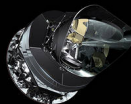
Légkör (üvegház) zavaró hatását kiszűrni, műholdak
COBE 1989- , WMAP 2001-, PLANCK (ESA) 2009-



COBE

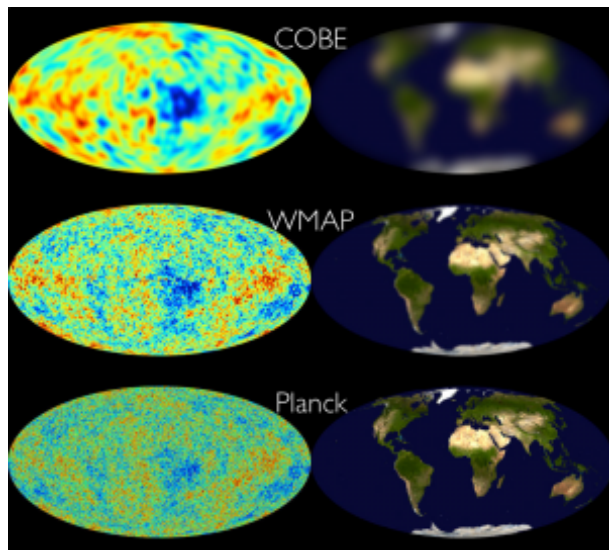


WMAP



Planck

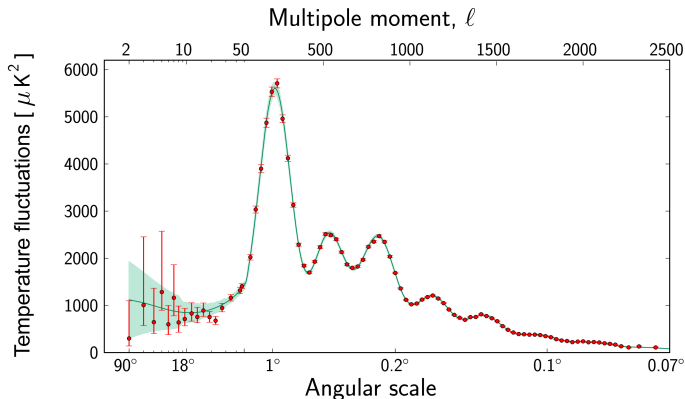
CMB mérése műholdakkal



Leggyakoribb fluktuáció 1 fokos

CMB, háttérsugárzás (T-ingadozás) power-spektruma

Az Univerzum hangja és felharmornikusai, Planck



6 paraméterrel illesztett ΛCDM modell, egyezés

Első csúcs helye Ω_{teljes} -től függ - kritikusság

Második csúcs magassága Ω_b barionikus anyag aránya

További bizonyítékok: VE nagyléptékű szerkezet SDSS,

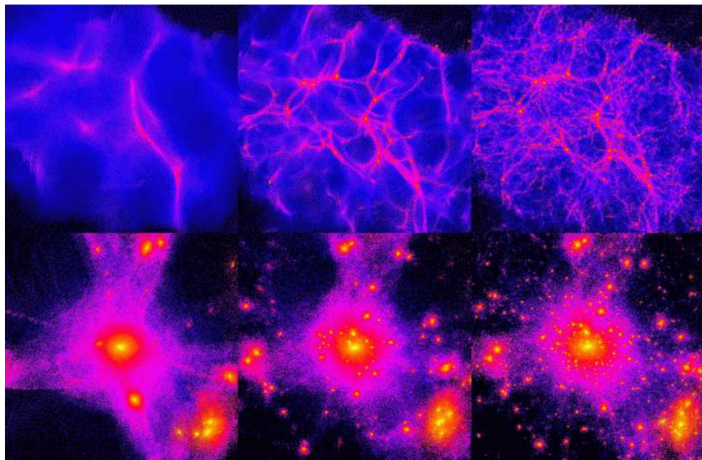
Teljes szimulációk sötét anyaggal

Sötét anyag, Forró, meleg, hideg struktúráképződés

Hot DM

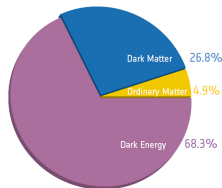
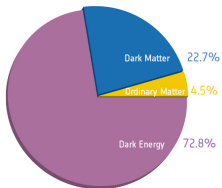
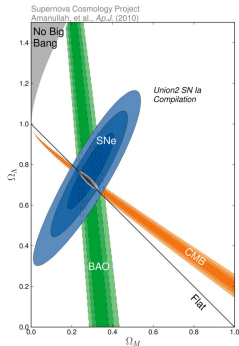
Warm DM

Cold DM



A Λ CDM modell szimuláció, visszaadja az Univerzum struktúráját

Világegyetem torta receptje, összetevői, 2015-



Három kozmológiai mérés,

$$1 = \Omega = \Omega_\Lambda + \Omega_{DM} + \Omega_B,$$

$$\Omega_\Lambda = 0.685 \pm 0.013 \text{ és neutrínók } 0.3 \% \quad \Omega_{DM} h^2 = 0.1197 \pm 0.0022,$$

$$H_0 = 67.31 \pm 0.96 (km Mpc^{-1} s^{-1}) \text{ Univerzum életkora } 13.8 \text{ Mrd év}$$

BAO: Rekombinációig a bar. anyagot 150 Mpc-ig hajtja a nyomáshullám és a sugárzás, mérhető galaxispárok távolságában SDSS (Sloan Digital Sky Survey)

Mi lehet a sötét energia?

Λ



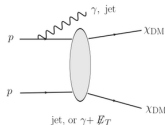
Egy szám, konstans az Einstein egyenletben,
Egyre fontosabb a táguló Univerzumban
Einstein statikus Univerzum érdekében vezette be, pletykák

Mi lehet a sötét anyag (DM)

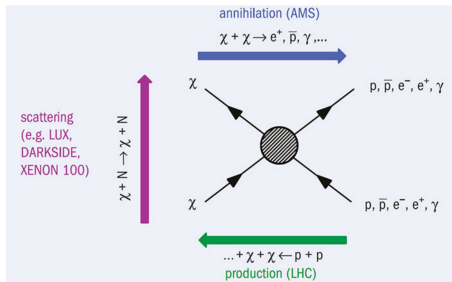
- **MOND**- Nincs: nagy skálán módosított gravitáció, nem $1/r^2$, közvetlen kísérlet csak Naprendszerig,
 - Nukleoszintézis, szép geometriai törvények, klasszikus fluxus
- **Barionos anyag**
 - bolygók, fehér törpék
 - **MACHO** (Massive Compact Halo Object), barna, fekete törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak (A. Riess GW után!)
 - gázfelhők
- **MÁS**, nem barionos anyag, **semleges, gyengén/nem hat kölcsön** ismert részecskékkel, nagy ∞ élettartamú
 - **CDM**, tudjuk, hogy hideg, COLD, nem relativisztikus a lecsatolódáskor, neutrínó hot és kevés
 - **WIMP**- Weakly Interacting Massive Particles, részecskefizikusok favoritja, de még rejtőzködik
 - Steril - Jobbkezes, nehéz neutrínók
 - **axionok**, hipotetikus ultrakönnyű skalár részecskék, erős kcsh.

Ugyanaz a Feynman-gráf más irányból nézve

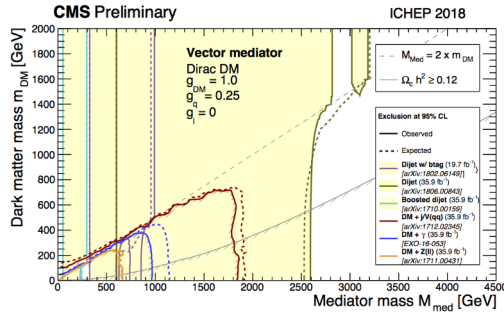
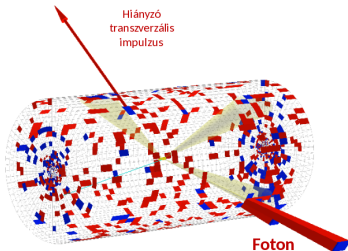
- **Gyorsító** - gyenge kcsh nincs nyom hiányzó energia, impulzus kisugárzott részecske



- **Közvetlenül-Visszalökődés** - rugalmas szórás atommagon mélyen a föld alatt -kizárások
- **Közvetett** szétsugárzásra utaló jelek, (éles) csúcsok a világűrben



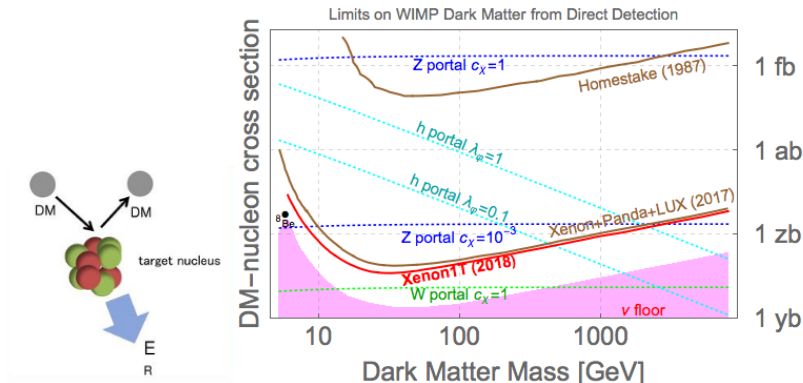
Közvetítő részecskék feltételezésével



Csak kizárások

Sötét anyag direkt korlátok bányákból

WIMP keresés, H vagy Z közvetítéssel

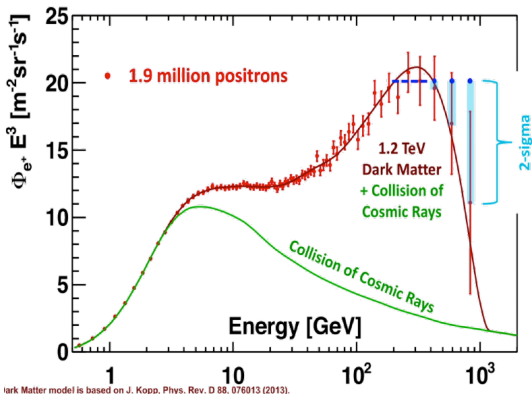


WIMP Miracle, csoda nem él, Z és H csatolások elnyomva!

H, Z bozonhoz g_{gyenge} csatolással $m=10\text{-}1000$ GeV részecske jó sötét anyag jelölt volt a direkt mérések növekedése előtt
Axion meV tömeggel népszerű jelölt

AMS @ISS, Alpha Magnetic Spectrometer Nki Űrállomáson

Kozmikus sugárzás pontos mérése, e^+ , e^- , p , $\bar{p}$...

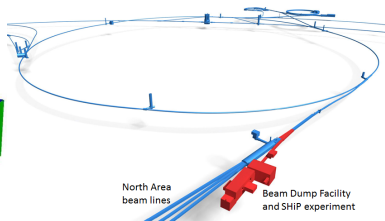
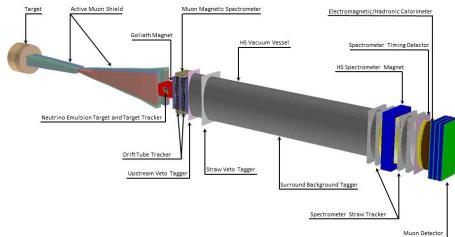


Sötét Anyag jelölt, nem szingifikáns

„Direkt” Sötét anyag kísérlet a CERNben, SHiP

Search for **H**idden **P**articles -tervezet

Rejtett, lassan bomló sötét DM részecskék keresésére



SPS 400 GeV protonnyaláb rögzített céltárgy

- „Sötét Anyag” létezését számos megfigyelés támasztja alá
- Lehet nem részecskefizikai eredetű, de MOND módosított gravitáció igazán egzotikus
- Sokféle összetevőből állhat, különbözik a SM részecskéitől
- Stabilitás - új megmaradó szimmetria, (SUSY R-paritás, de attól független), Új részecskék $R=-1$, ismertek $R=1$, csak párosan kelthető, stabil
- Sötét Energia (Λ) beírható egyenleteinkbe, de nem értjük, furcsa állapotegyenlet, negatív nyomásnak felel meg (tágulás)