

A sötét anyag (és a sötét energia) kihívása

A sötét anyag létezésének nyomai
(A sötét energia létezésének nyomai)

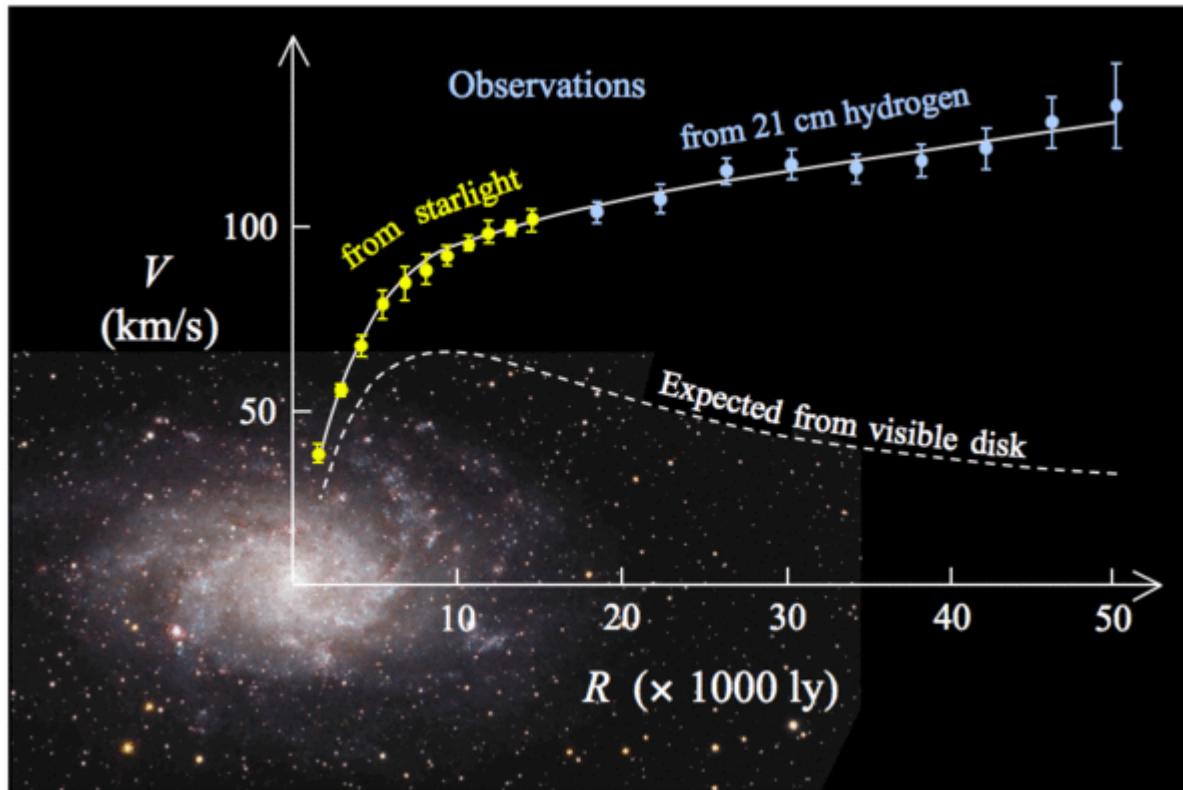
Sötét anyag – nem-világító csillagászati objektumok

Miért gondoljuk, hogy a sötét anyag
elemi részecskékből áll?

Gyengén kölcsönható nagytömegű elemi részek (WIMP)

A fénnel keveredő könnyű elemi részek (axionok)

A sötét anyagra utaló első nyom



A galaxis középpontja körüli forgás sebessége nagyobb tömegre utal, mint amit a csillagok alapján várnak.

Vera Rubin (1980)

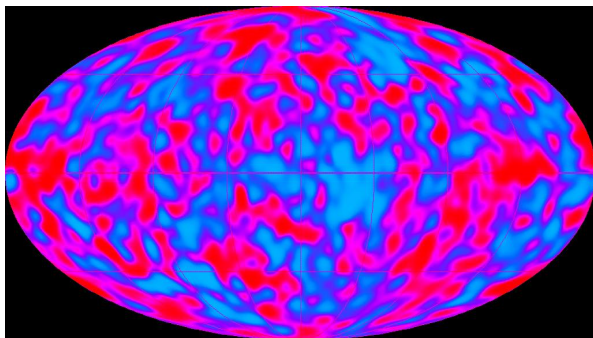
A legfontosabb hírnök: a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás

Hidrogén atom a tágulva lehűlő Univerzumban:

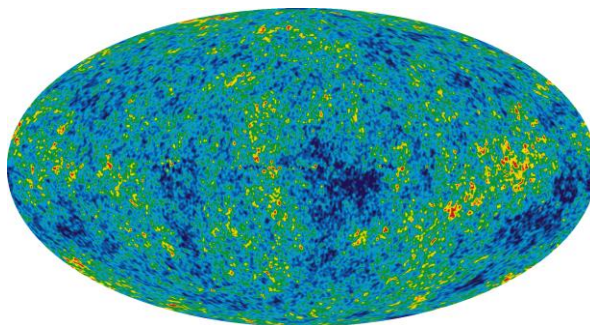
$T=3000\text{K}$ fotonok energiája nem éri el a H-atom gerjesztésének küszöbét: lecsatolódás

Háttérsugárzásnak a jelenlegi Univerzumban mért átlagos hőmérséklete: $2,725\text{K}$

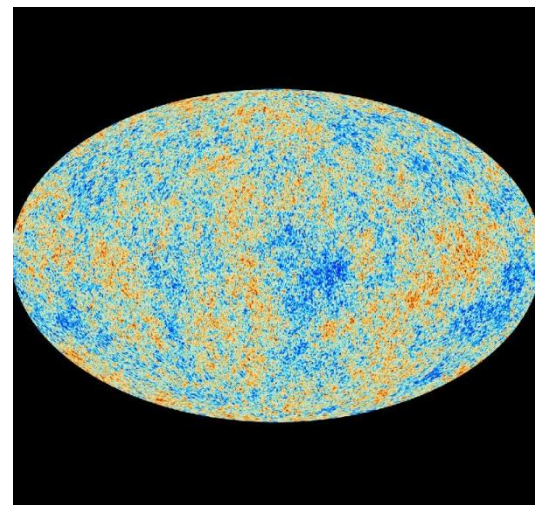
COBE (1992)



WMAP (2001-09)



PLANCK (2011-13)



Az összes anyagsűrűség nagyon pontosan megfelel az ún. „kritikus” sűrűségnek:

Kozmikus léptékben a térbeli geometria euklideszi sík-metrikájú

Független hírnök: **Big Bang nukleoszintézis**

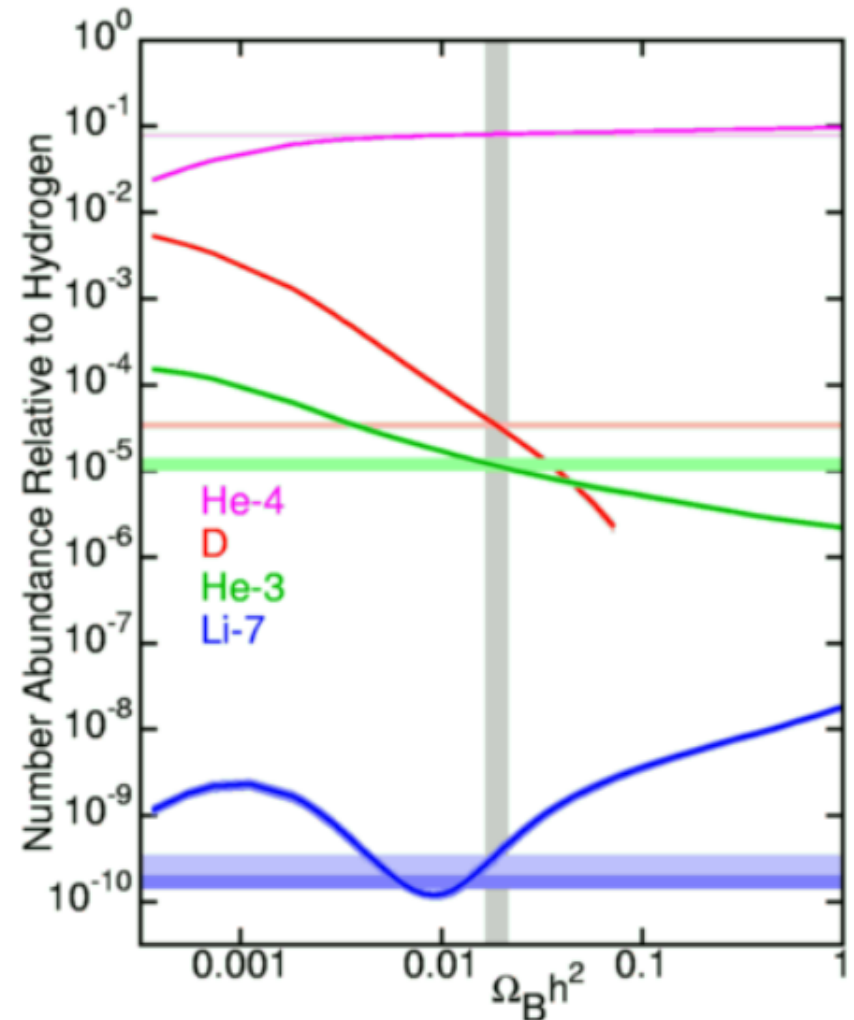
A KMHS által észlelt anyagsűrűség sűrűség meghaladja a

primordiális könnyű atommagok

megfigyelt gyakoriságának értelmezéséhez szükséges fényt sugározni képes anyag sűrűségét

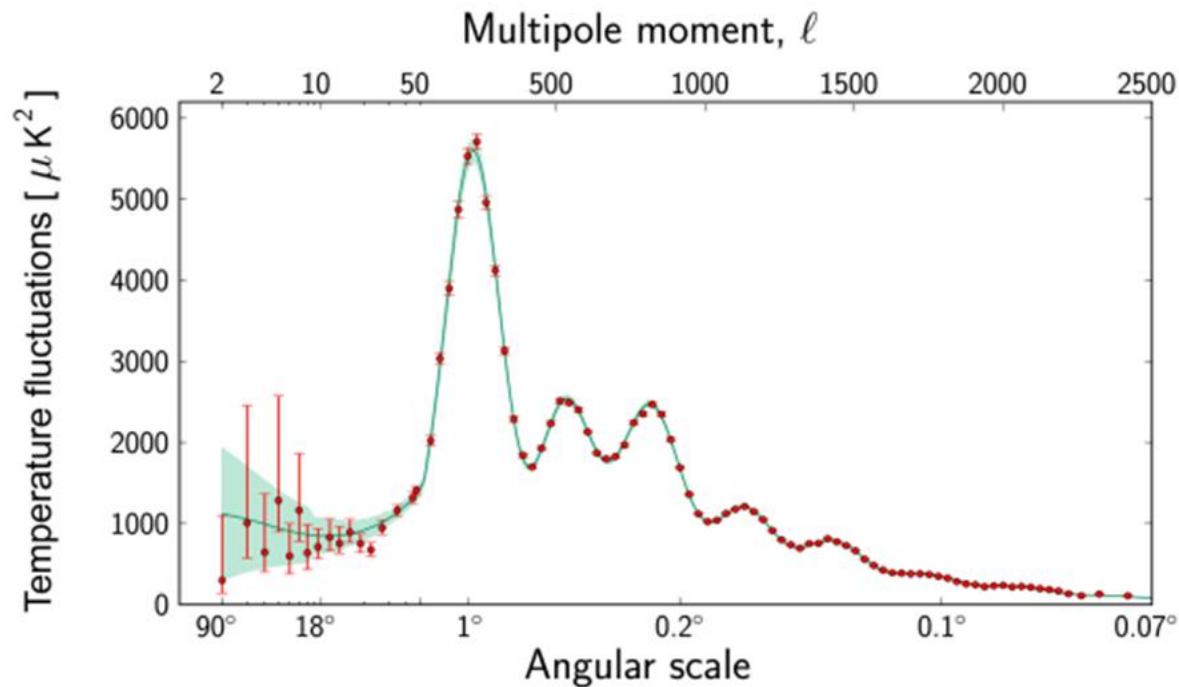
Barionikus sűrűség nem több a kritikus sűrűség 5%-ánál

(Gond:
a Li-7 koncentráció fele az elméleti jóslatnak)



A legfontosabb hírnök: a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás

Irányfüggő hőmérsékletingadozások **multipólus eloszlásából** kiolvasható az emisszió időszakában az álló hanghullámokkal analízálható sűrűség-ingadozások irányfüggésében fellépő korreláció



PLANCK

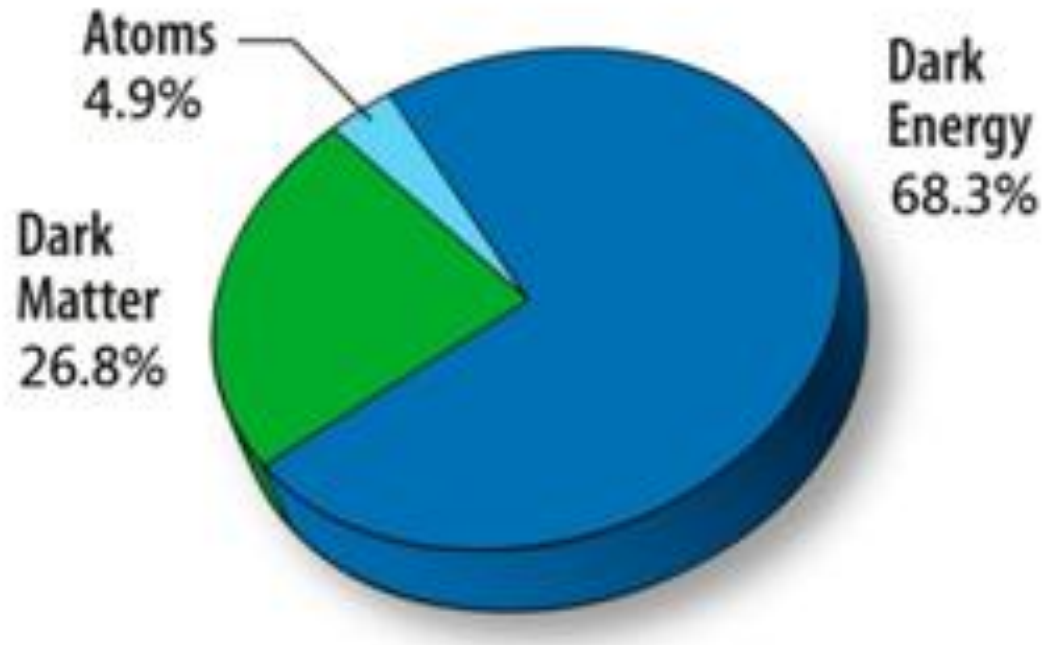
Következtetés: a nem-relativisztikus részecskék sűrűsége a „kritikus” sűrűség kb. 30%-a

A fénytelen anyagrész az Univerzumban

Kb. 70% jól leírható kozmológiai állandóval:

független energiasűrűség, negatív nyomás
SÖTÉT ENERGIA

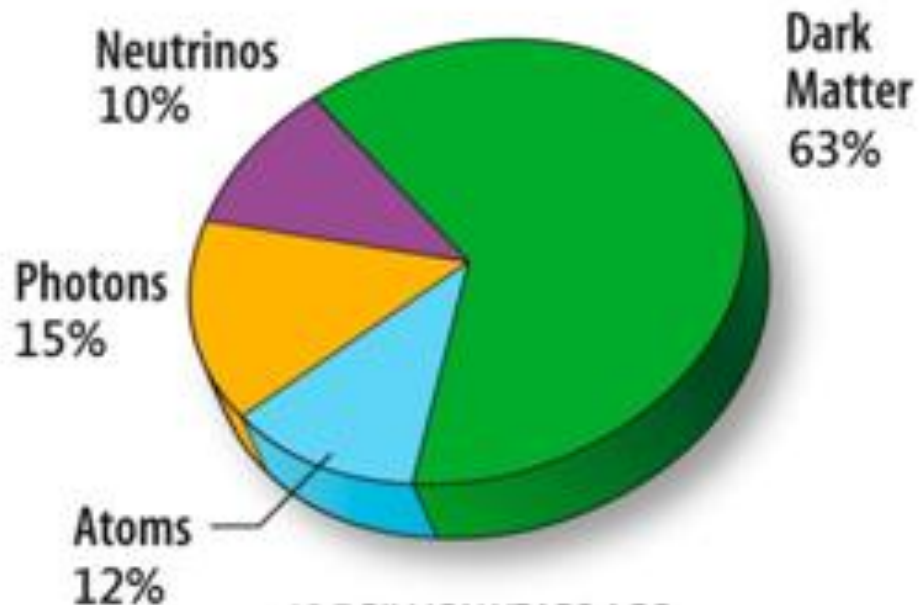
Most



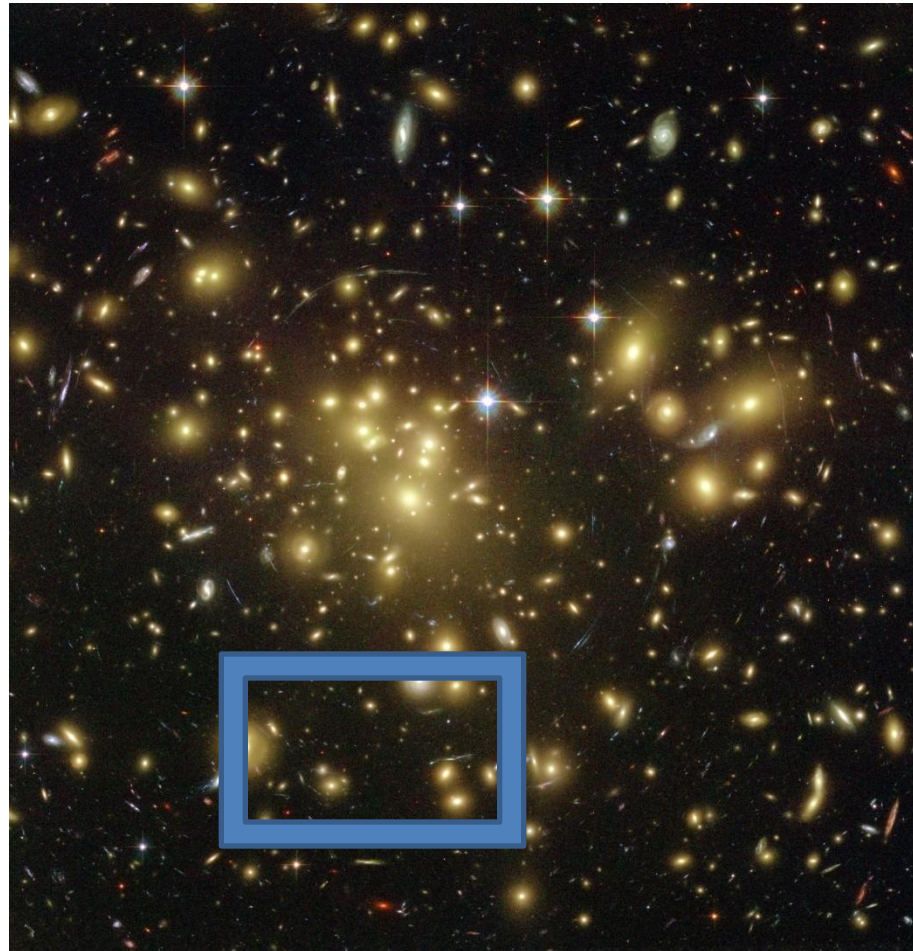
A fénytelen anyagrész az Univerzumban

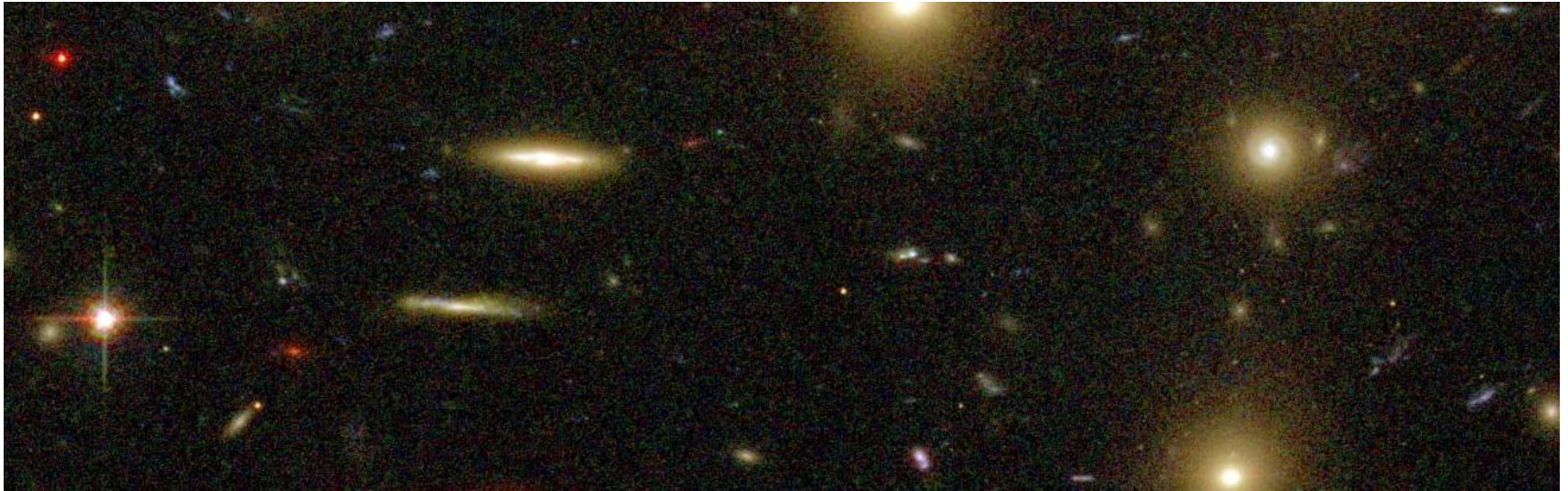
Időfejlődés visszafelé: Friedmann-egyenlet

közel
14 milliárd
évvel
ezelőtt



Gravitációs lencse fényelhajlással láthatóvá tett **sötét anyag**





Az általános relativitás elmélet megjósolja
a galaxis anyagán áthaladó fénnnyel alkotott
kép torzulása mértékéből
az útján közbenső tömeg nagyságát

a sötét és a sugárzó anyag elváló fényképe

Egymáson áthaladó

„ütköző” galaxisok

Röntgen-fényt

kibocsátó anyagának áthaladása

(Chandra műhold felvétele)



a sötét és a sugárzó anyag elváló fényképe

Egymáson áthaladó

„ütköző” galaxisok

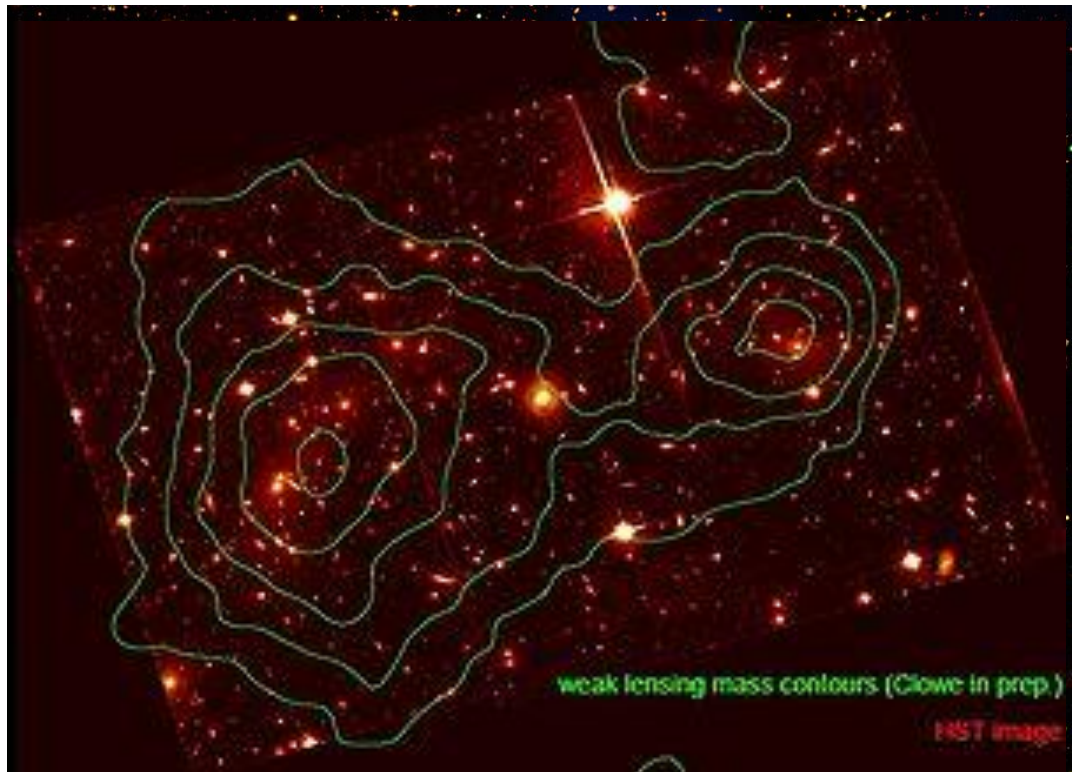
gyengén kölcsönható (sötét)

anyagi összetevőit erősebben

szétválnak

(Hubble műhold felvételének
értékelése

gravitációs lencsehatás alapján)



a sötét és a sugárzó anyag elváló fényképe

Egymáson áthaladó

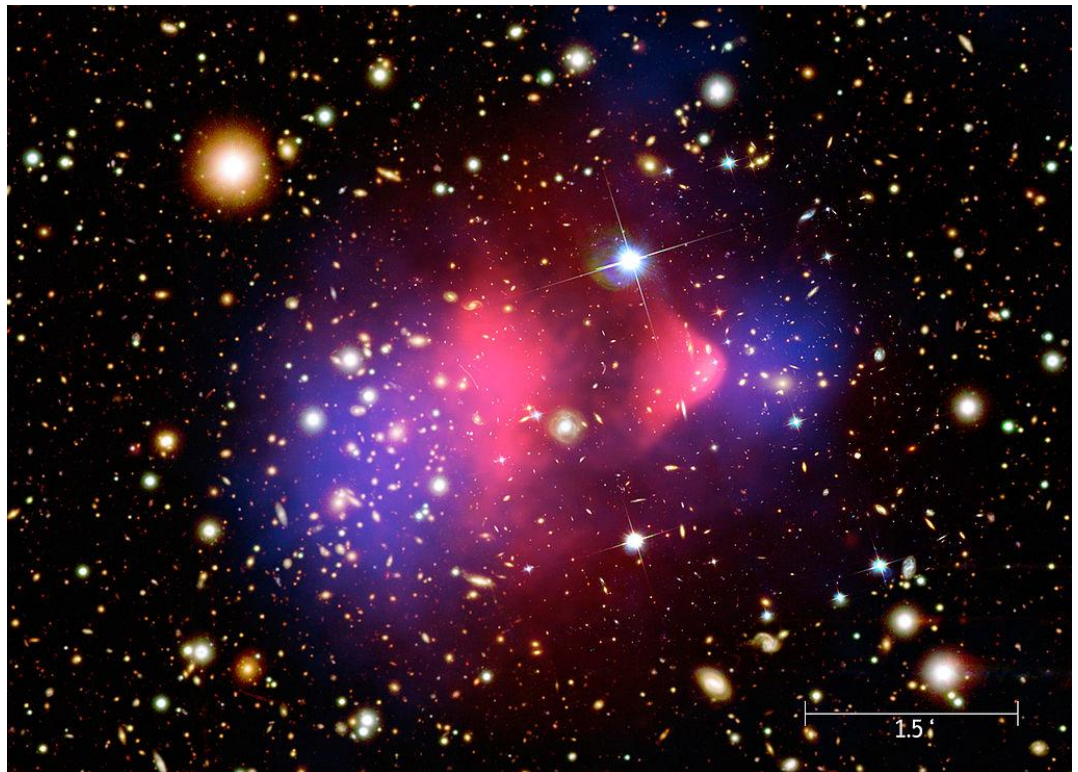
„ütköző” galaxisok

fénykibocsátó , illetve

gyengén kölcsönható

anyagi összetevői különböző

mértékű erőhatást szenvednek



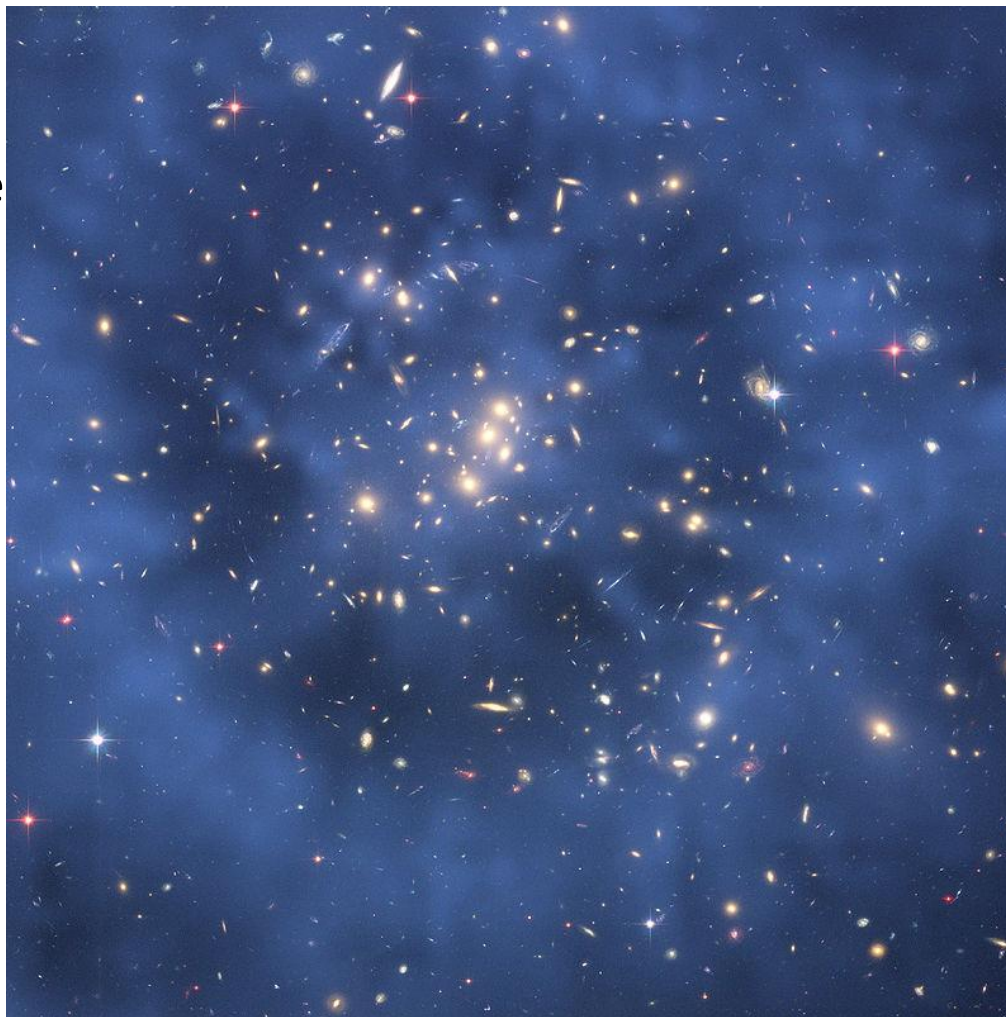
Láthatóvá tett láthatatlan anyag

Hubble teleszkóp felvétele
2007

Sötét anyag gyűrű a

Cl 0024+17 jelű galaxis

lencsehatása alapján

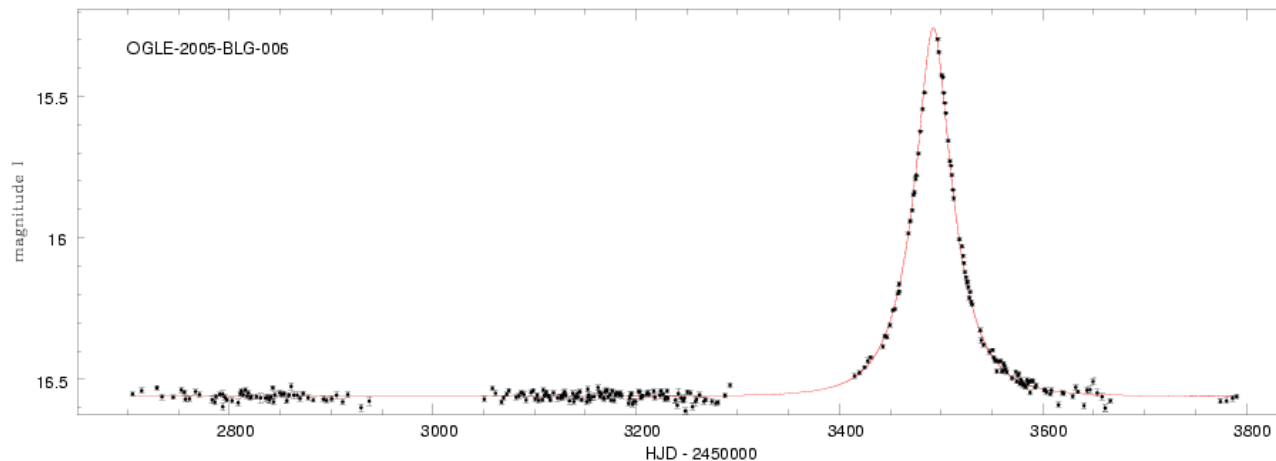


Miből áll a sötét anyag?

Az első elképzelés (1987-89): **MACHO** -- Massive Compact Halo Objects

Mikro-lencsehatás

távoli pontszerű objektum fénye áthaladó sötét objektumon felerősödik!



Galaktikus környezetünkben több millió csillag fényének 5-10 évig tartó megfigyelése
Konklúzió:

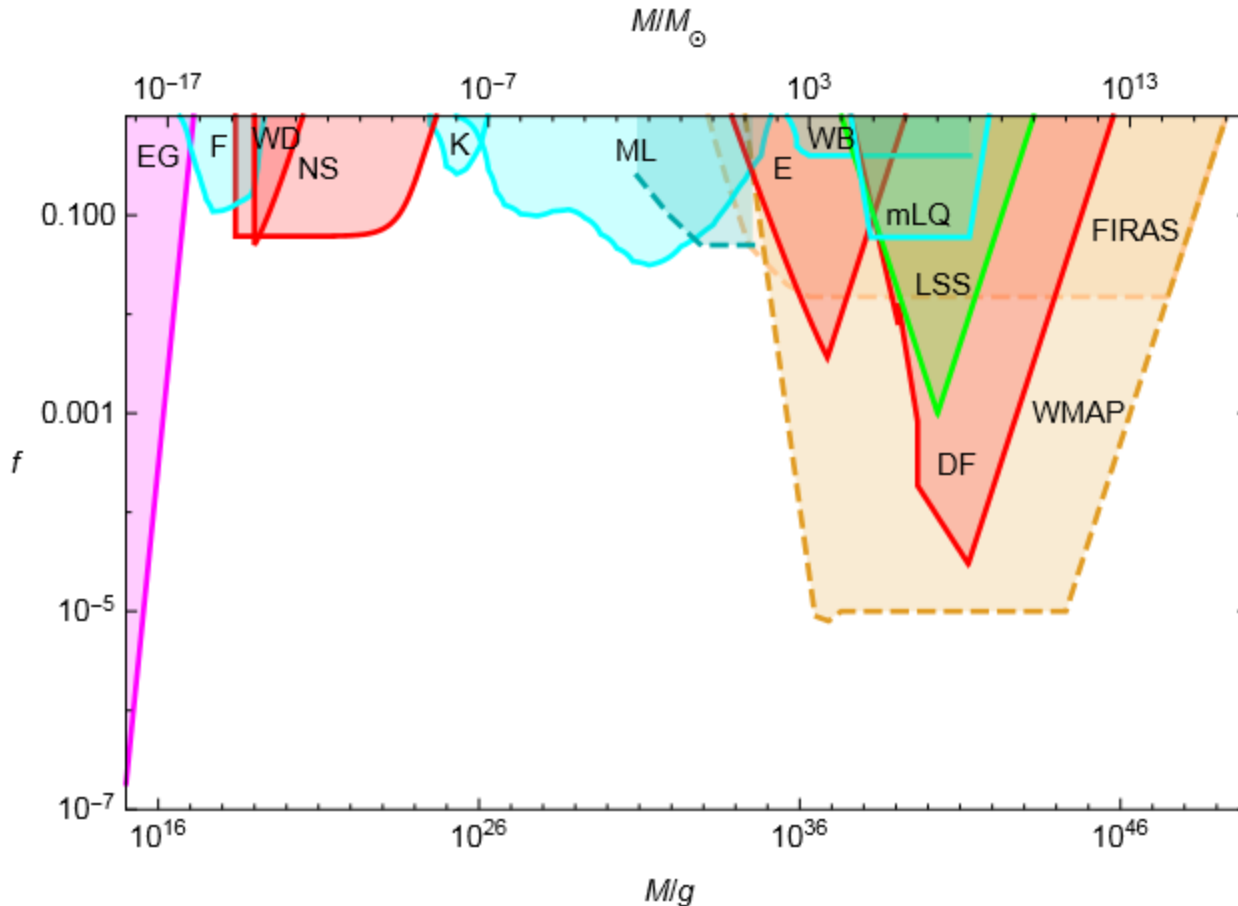
0.001 – 0.4 Nap-tömegű **barna törpék** anyagtartalma

nem éri el a sötét anyag sűrűségnek 10%-át

Miből áll a sötét anyag?

Egy feltámasztott elképzelés: **primordiális fekete lyukak?**

Sűrűség fluktuációk közvetlen kollapszusa sugárzás-dominált korszakban



Korlátok
a fekete lyukak relatív
előfordulási sűrűségére (**f**):

PBH Párolgás

Lencsézés
(femto-mikro-milli)

Dinamikai hatás
(távoli kettős csillagok
felhasználása, stb.)

PBH fluktuációk
és nagyléptékű szerkezet

CMB spektrum torzítása

Miből áll a sötét anyag?

GW150924 eseménnyel társítható eseményráta reprodukálása:

1. modell: S. Bird, I. Cholis, J.B. Munoz, Y. Ali-Haimoud, M. Kamionkowski, E.D. Kovetz, A. Raccanelli, A.G. Riess. Phys. Rev. Lett., **116**, 201301, 2016.

$M_{\text{BH}} \sim 30 M_{\text{nap}}$ BH-k véletlenszerű találkozásakor puha gravitációs sugárzás hatására kötött BH-BH állapot keletkezik, bespirálozik $\rightarrow$ kemény GW emisszió

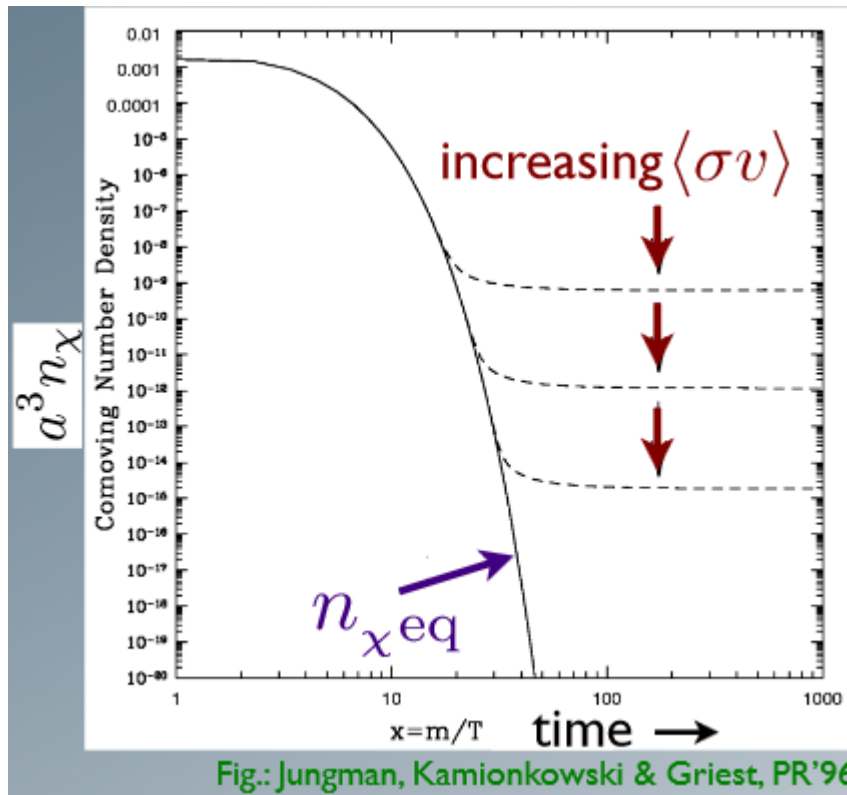
A rátát akkor lehet értelmezni, ha a PB a DM domináns alkotója: $f \sim 1$

2.modell: M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. **117**, 061101, 2016

$M_{\text{BH}} \sim 30 M_{\text{nap}}$ BH-párok harmadik BH árapály erejének hatására mindig erősen excentrikus keringési pályát alakítanak ki, ami az összeolvadási időt erősen befolyásolja $\rightarrow f \sim 10^{-7}$

Miből áll a sötét anyag?

Feltételezve önmagával annihilálódó χ részecskét (Majorana fermion, szuperszimmetria)



$$\Omega_{\chi} h^2 \sim \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle}$$

A gyenge kölcsönhatási
hatáskeresztmetszettel azonos
nagyságrend
0,1-0,3 maradék anyagsűrűséget ad

WIMP = **W**eakly
Interacting
Massive
Particle

A kinetikus egyenlet megoldása

Egy (nem szuperszimmetrikus) elméleti modell

Shaposhnikov és munkatársai (2005 → máig):

nuMSM – jobbkezes steril neutrínókkal kiegészített Standard Modell

Megmagyarázza: a sötét anyagot ($m_{R3} \sim \text{keV}$), a balkezes neutrínók kis tömegét az Univerzum barion-aszimmetriájának eredetét (lepton-aszimmetriából)

Ballesteros, Redondo, Ringwald, Tamarit (2016. október)

nuMSM hiányosságai: milyen elemi rész játssza az inflaton szerepét?
mi lyen mechanizmus magyarázza, hogy
a kvarkokra nem sérül a CP-szimmetria?
lehet-e metastabil a Higgs-tér alapállapota?

Javaslat: nuMSM kiegészítése komplex skalár térrel, amelyhez csatolódik egy szín-triplet fermion tér, új globális U(1) szimmetria

Higgs-szektor stabilizálódik, skalár tér abszolút értéke – inflaton, fázisa -- axion

WIMP kölcsönhatás közvetlen észlelése

Nagytisztaságú

nátrium-jodid egykristályokból

összeállított detektor

a Gran Sasso hegység mélyén

a sötét anyag részecskéi által

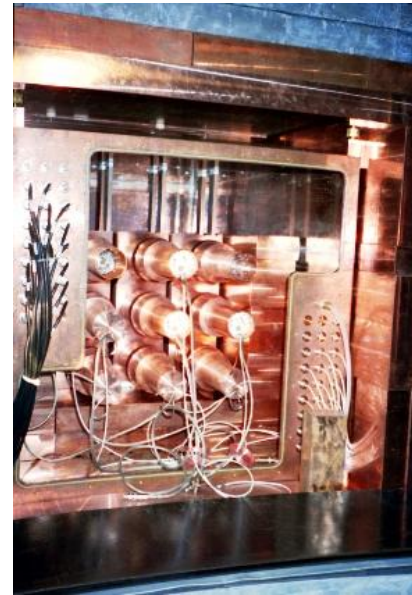
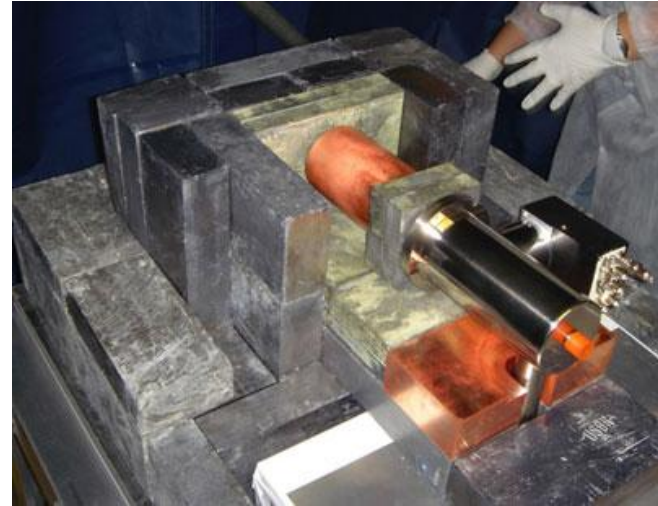
meglökött jód rácsrezgést kelt,

hővé alakul, amit

szcintillációs felvillanások

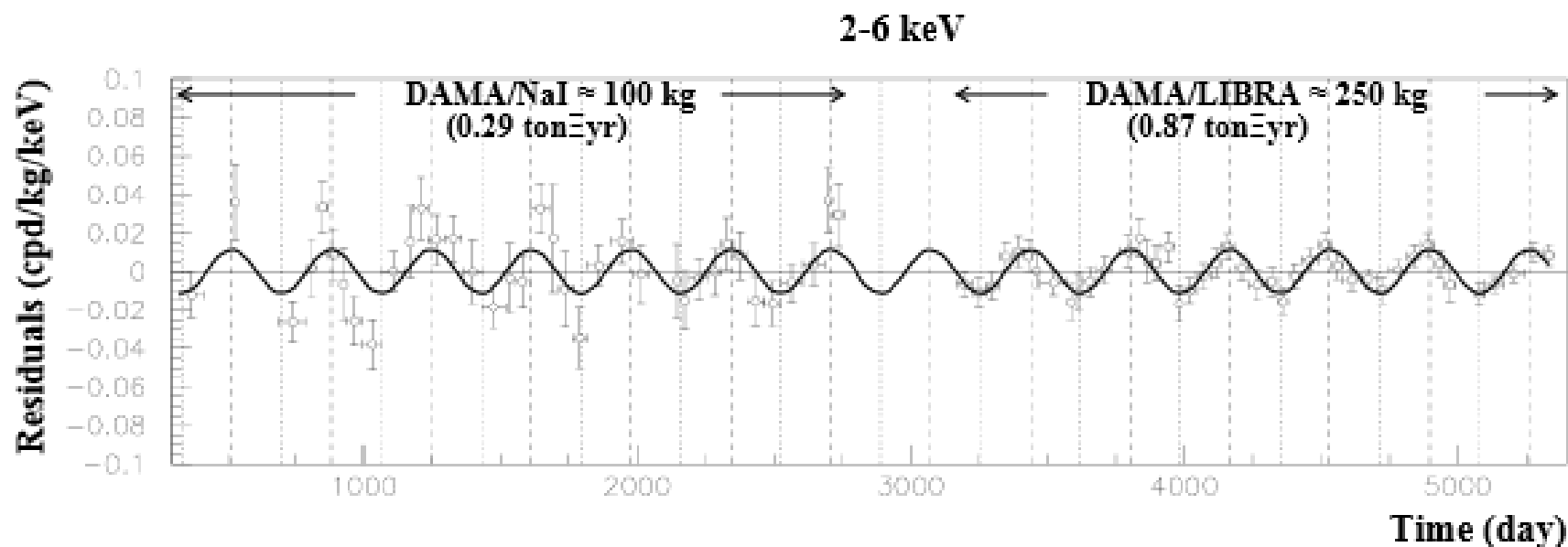
formájában lehet észlelni.

(DAMA/LIBRA együttműködés)

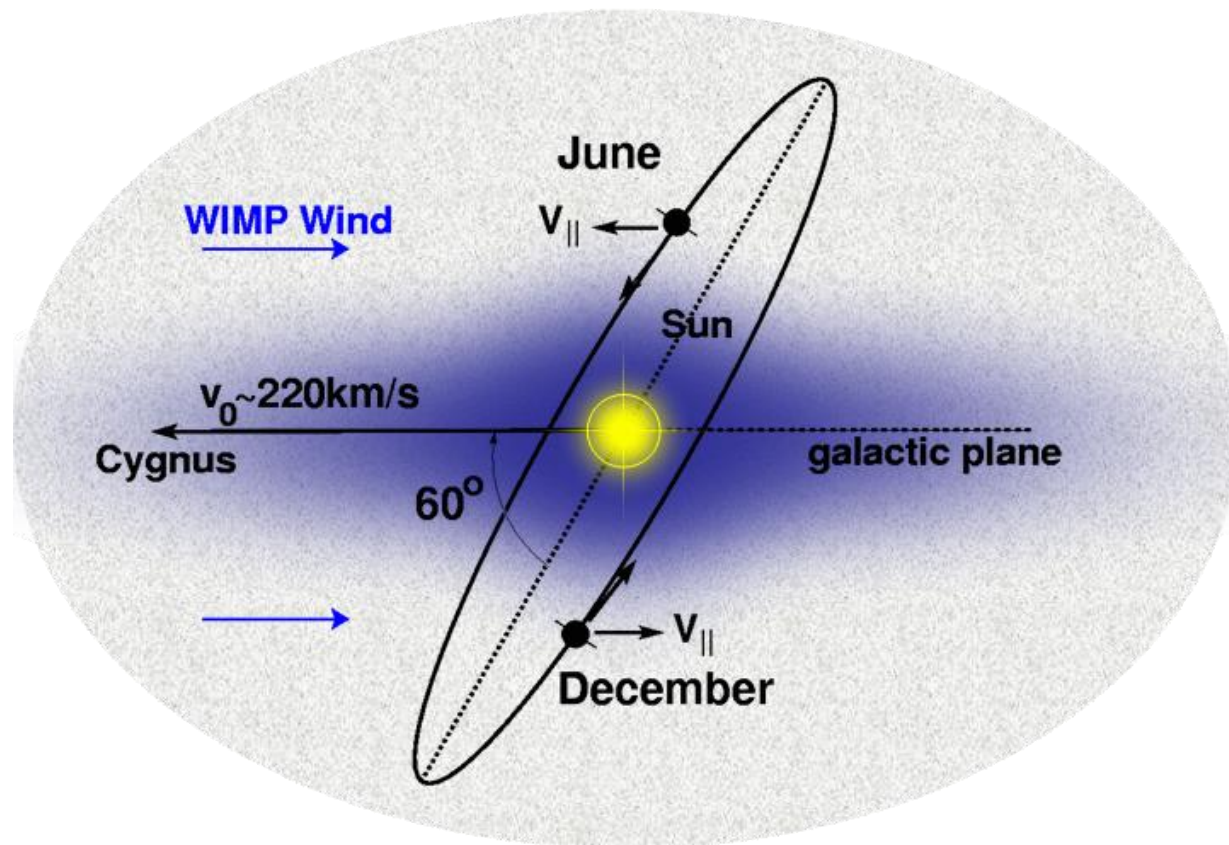


WIMP kölcsönhatás észlelése

7 éves ciklus megfigyelése a szcintillációs jel erősségében

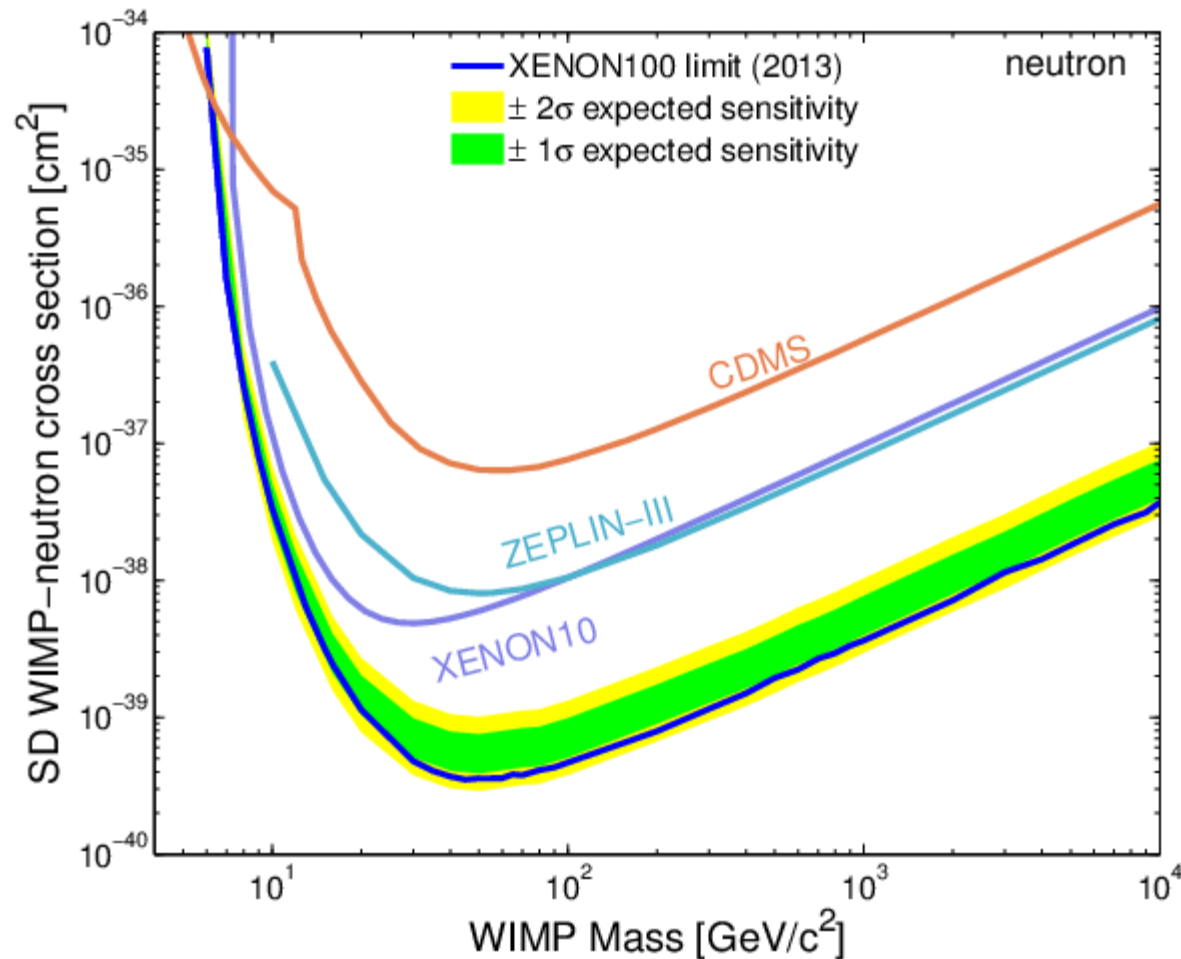


WIMP kölcsönhatás észlelése



Ismétlés: COSINE kísérlet (Dél-Korea) 2018-ra tervezi megismételni NaI-kristállyal

WIMP kölcsönhatás keresése más kísérletekben



WIMP kutatás jövője

Támogatott amerikai projektek célja: egy nagyságrenddel megnövelt érzékenység

XENON1T (Gran Sasso, Olaszország):

3,5 tonna folyékony halmazállapotú Xe-atom WIMP-gerjesztésével
emittált foton észlelése (terv szerint 2016 márciustól)

SuperCDMS az SNO laboratóriumban (Kanada):

WIMP-pel ütköző atom visszalökődéséből keletkező
fonon keltésének észlelése (100 kg Si/Ge félvezető detektorban)

LZ (Sanford, USA) :

7 tonna folyékony halmazállapotú Xe-atom WIMP-gerjesztésével
emittált foton észlelése

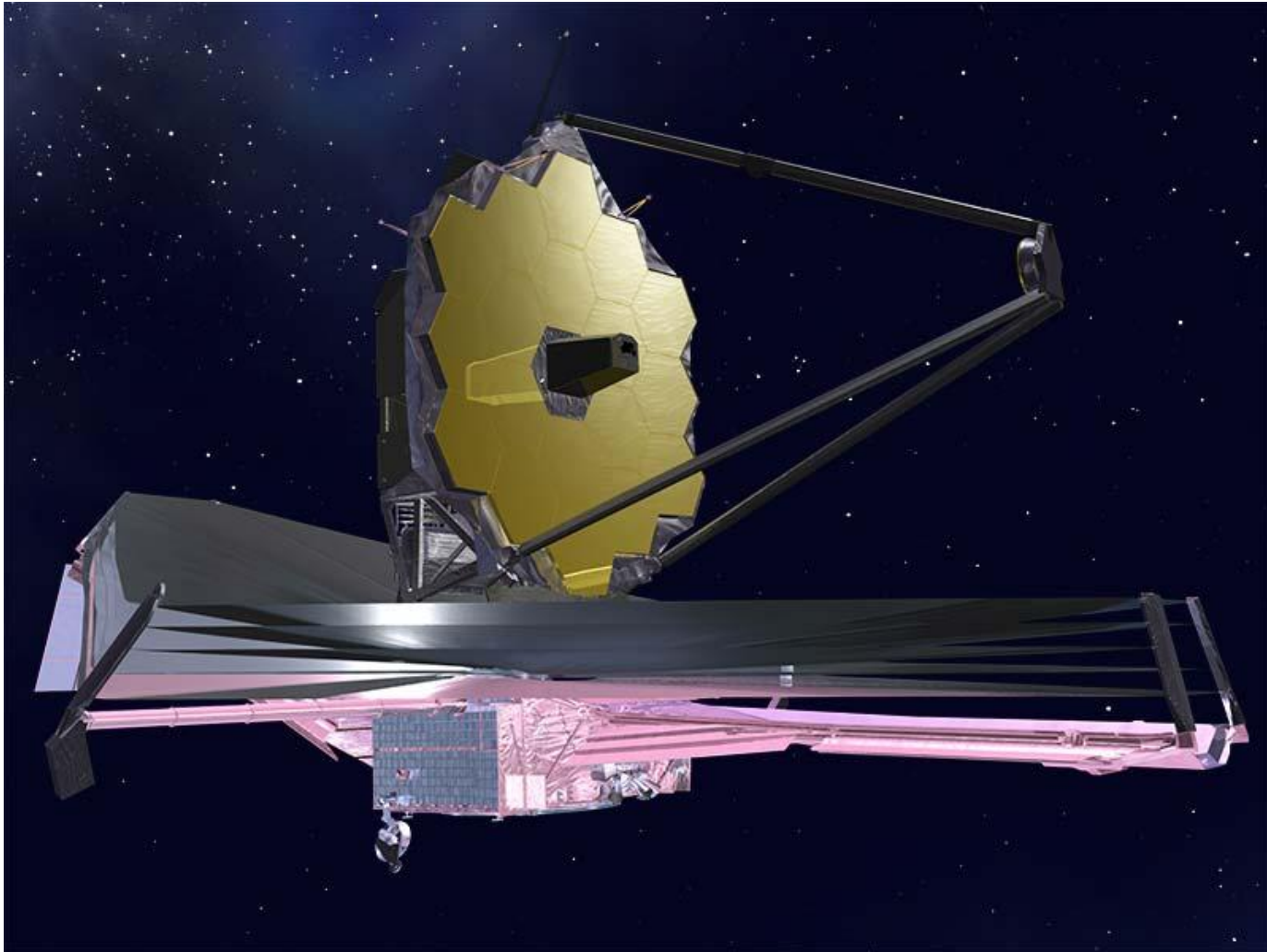
Közvetett észlelés: WIMP annihilációból származó röntgensugárzás műholdas mérése
a centrális szupermasszív fekete lyuk irányából

Sötét anyag annihilationából
felszabaduló sugárzás nyomásával
stabilizált csillagok már 400 millió
évvel az ősrobbanás után létezhettek

Kathleen Freese



James Webb űrteleszkóp 2018



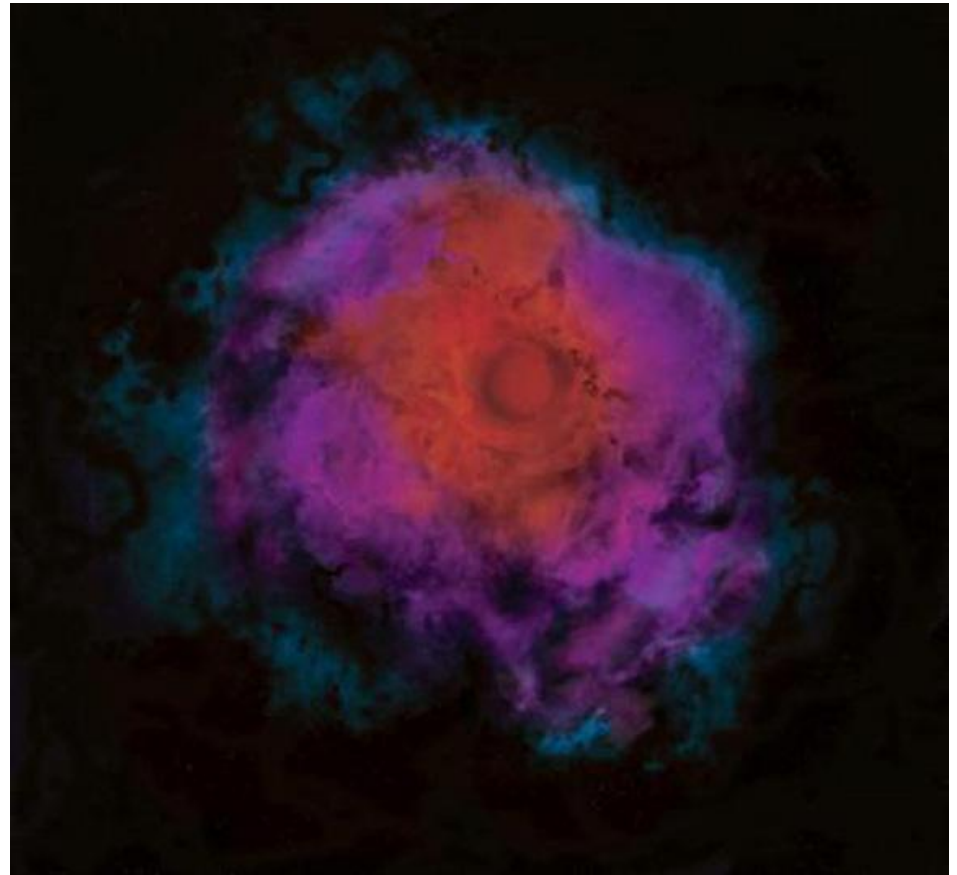
A sötét anyag részecskéi páronként fénné sugároznak szét

Az ősrobbanás közelében nagyobb sűrűségű anyagban

Gyakoribb annihiláció – intenzív fénytermelés

A fény nyomása stabilizálja a gravitációsan önmagába hulló sötét anyagot

**A Webb-távcső észlelni képes
ezeket a
legősibb fényforrásokat!**



A sötét anyag kifogyásával a sötét csillag összeroskad

Sűrűsége növekedésével beindul az ismert fúziós energiatermelés

A csillag kivilágosodik



Könnyű sötét részecske létezésének esélye: az **axion**

Az axion-mező létezésének részecskefizikai háttere a klasszikus elméletből következő axiális kvarkáram megmaradás

$$\partial_\mu j_5^\mu = \partial_\mu (\bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi)_{class} = 0$$

anomális sérülése

$$\partial_\mu j_5^\mu = \frac{g^2 N}{32\pi^2} F_a^{\mu\nu} \widetilde{F}_{a\mu\nu}, \quad \widetilde{F}_{a\mu\nu} = \frac{1}{2} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} F_{a\alpha\beta}$$

Következmény

kiegészítő járulék a QCD hatáshoz, amely sérti a kombinált CP-invarianciát

$$S_{eff} = S_{QCD} + \theta_{eff} \frac{g^2}{32\pi^2} \int d^4x F_a^{\mu\nu} \widetilde{F}_{a\mu\nu}$$

Könnyű sötét részecske létezésének esélye: az **axion**

Megfigyelhető következmény a neutron elektromos dipólus momentuma:

$$d_n \approx e\Theta m_{\text{kvarc}}/M_{\text{neutron}}^2 < 10^{-26} \text{ ecm} \quad \rightarrow \quad \Theta < \mathbf{10^{-9}}$$

**Miért nem sérül CP az erős kölcsönhatásokban,
szemben az elektromos kölcsönhatásokkal?**

Dinamikai ok: Θ -t $a(x)$ mező helyettesíti, amelynek **minimuma** állítja be Θ -t közel nullára.

$$L = L_{\text{SM}} + \theta_{\text{total}} \frac{g^2}{32\pi^2} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu} - \frac{1}{2} \partial^\mu a \partial_\mu a \\ + L_{\text{int}}[\partial^\mu a / f_a; \psi] + \frac{a}{f_a} \zeta \frac{g^2}{32\pi^2} F_a^{\mu\nu} \tilde{F}_{a\mu\nu}$$

Könnyű sötét részecske létezésének esélye: az **axion**

A QCD kölcsönhatás által generált effektív axion-potenciál:

$$V_{\text{eff}} \sim \cos[\theta_{\text{total}} + \xi \langle a \rangle / f_a]$$

kiejti a QCD anomáliából származó együtthatót.

Az axion tulajdonságai:

újabb U(1) spontán sérülő szimmetria (pseudo)Goldstone bozonja

Jellemző energiaskála f_a $m_a \sim 0,6 \text{ eV} (10^7 \text{ GeV}/f_a)$ (alsó korlát: 10^{-6} eV)

Axion-foton keveredés $\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} \sim -g_{a\gamma\gamma} (\alpha_s/\pi)(a/f_a)EB$

$\langle a \rangle$ nulla impulzusú kvantumaiból álló kondenzátum oszcillációi
– sötét anyag energiasűrűsége

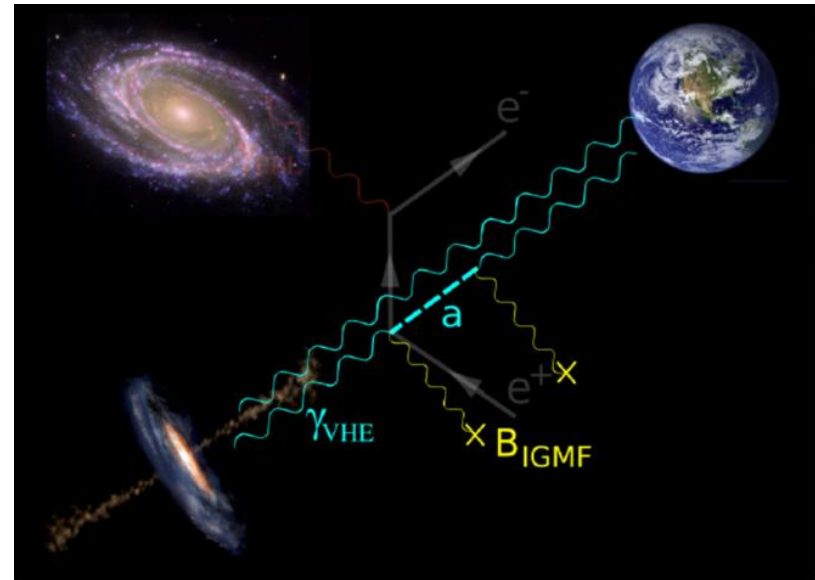
Könnyű sötét részecske létezésére utaló megfigyelések

Aktív galaxis magok (AGN) intenzív röntgen sugárzás forrásai

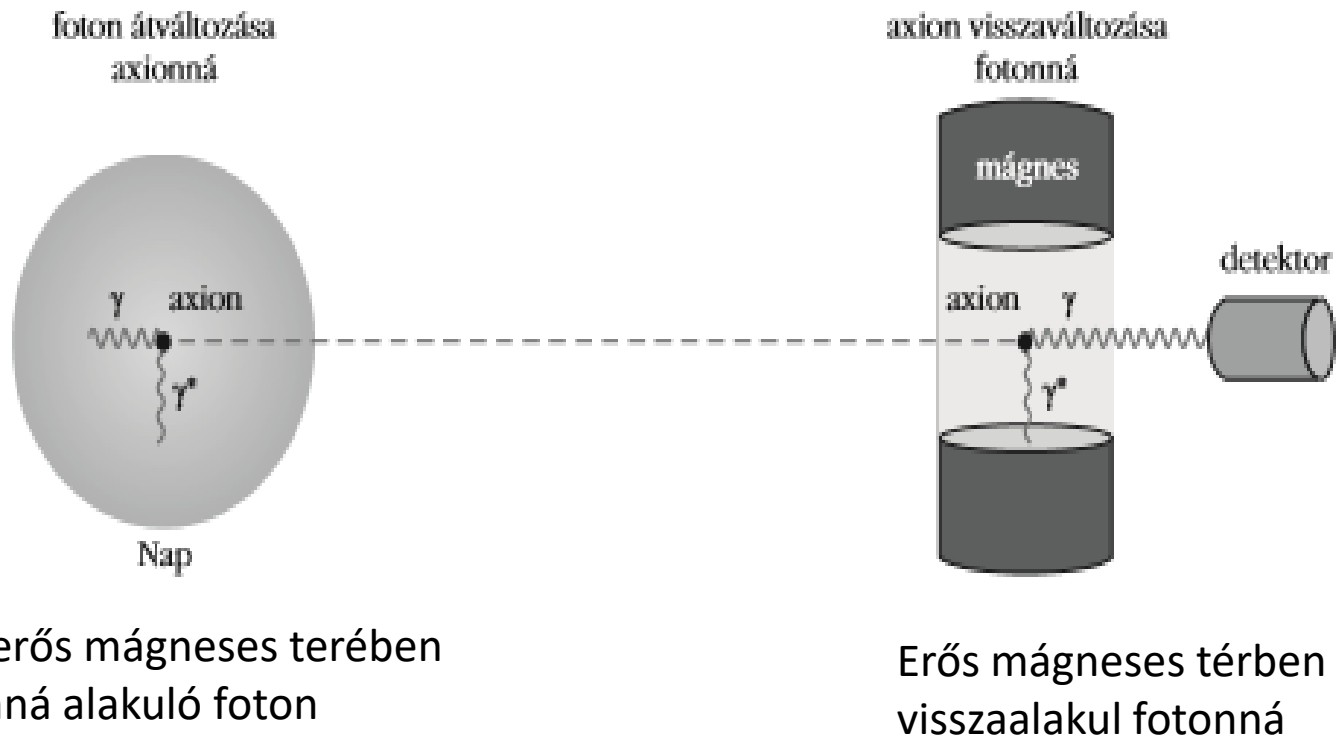
Távoli források AGN-fotonjai nem érhetik el a Földet
az extragalaktikus háttér fotonokon történő párkeltés miatt

Ellenkező tapasztalat (2009) értelmezése:

a foton a galaktikus mágneses tér
közreműködésével átoszcillál könnyű
elektromágnesesen nem kölcsönható
axionba,
amelynek jóval kisebb a szórási
hatáskeresztszete a háttérfotonokkal



A helioszkóp elve



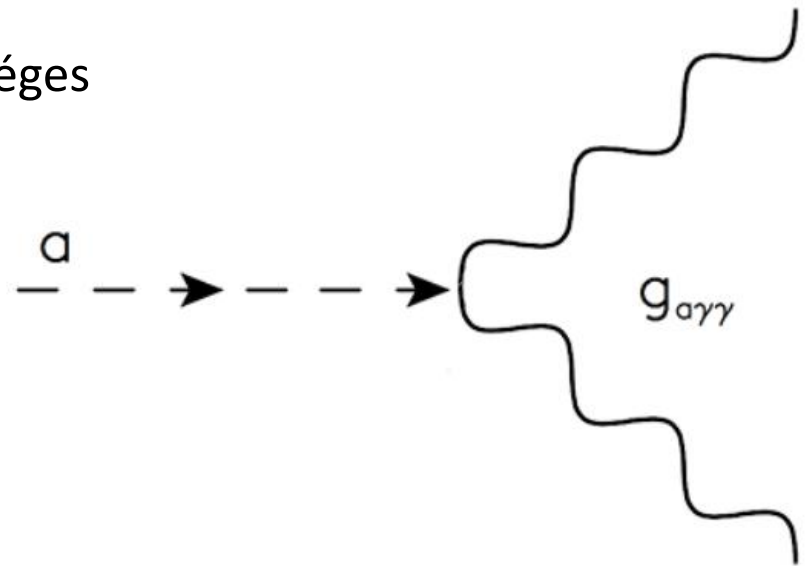
CAST: CERN Axion Solar Telescope

Axion keltés és detektálás földi laboratóriumban

Axion elbomlása két fotonba

Felerősítve üregrezonátorral,

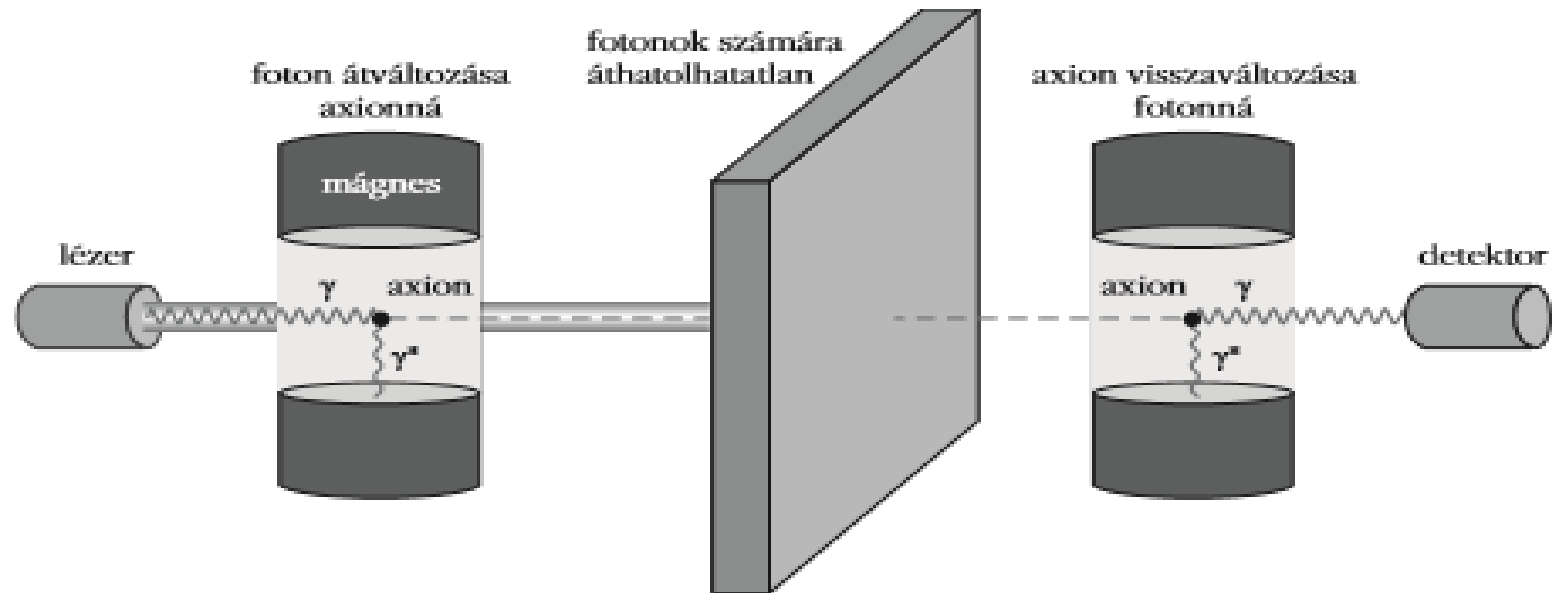
Axion tömeg függvényében változó
frekvencia: hangolható rezonátor szükséges



ADMX kísérlet (Seattle, USA)

Első fázis 2010-ben zárult

Axion keltés és detektálás földi laboratóriumban



Az axion kutatásának jövője

ALP-II (Hamburg) átsugárzás a falon 2. generáció: 2016-19

ADMX-Gen2 (Axion Dark Matter Experiment) 2.generáció: 2016-19

Sötét foton?

A sötét anyag alkotórészei között ható elektromágnesség erőtere

A fotonnal való keveredése révén nyilvánulhat meg

Paramétereit a $g-2$ anomália magyarázatához igazítják

Krasznahorkay et al. (PRL 116, 042501 (2016))

gerjesztett Be8 elektron-pozitron bomlási csatornában észlelt
17 keV-es rezonancia lehetséges interpretációja

A sötét anyag
elemi alkotórészeinek felfedezése
a XXI. század fizikájának
talán legfontosabb kihívása

Sötét energia megkérdőjelezve?

CMB: Az Univerzum térgeometriája sík: $\rho=\rho_c$ $\Omega=1$

$$\Omega = \Omega_m + \Omega_?$$

Független megfigyelések

Gyorsuló tágulás:

S_n la statisztikai kételyek

DE

Barion akusztikus oszcilláció: foton+barion folyadék nagy hullámhosszú rezgéseinek lenyomata a galaxiseloszlásban

Gyenge lencsézés: háttérforrás képének 1-10%-os gravitációs torzulása előtér galaxisok hatására

Klaszter-számlálás: A nagytömegű galaxis-klaszterek sűrűségének fejlődését a vörös eltolódással megjósolja a kozmológiai modell

CMB multipólus szerkezetének értelmezése a Standard Kozmológiai Modellel