

Pásztor Gabriella
Fizikai és Csillagászati Intézet



A sötét anyag keresése

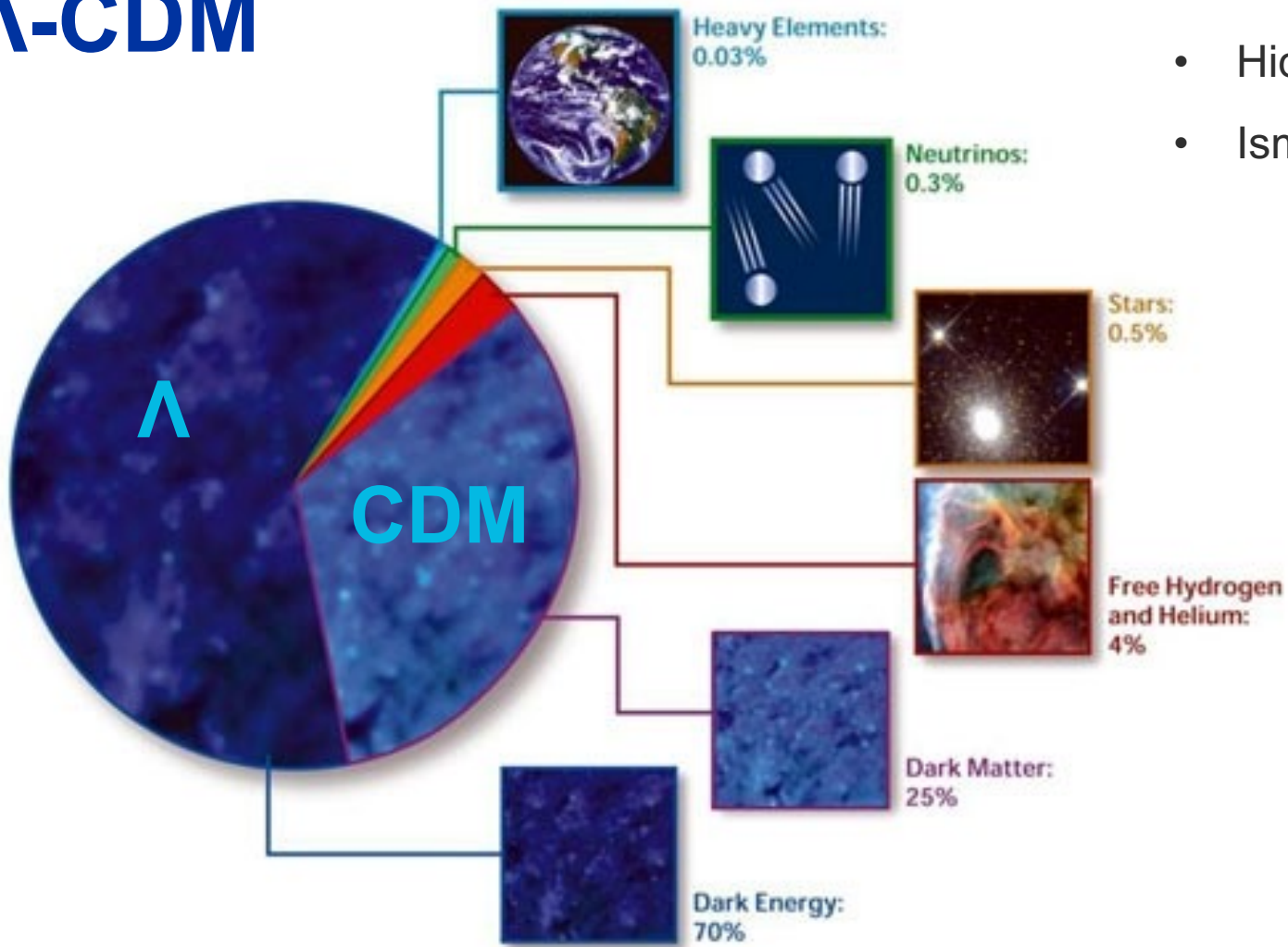
2024. május 15.

MTA Részecskefizikai Tudományos Bizottság CERN 70 ülészaka



A kozmológia standard modellje

Λ -CDM



- Kozmológiai konstans (Λ) = sötét energia
- Hideg sötét anyag (cold dark matter, CDM)
- Ismert „barionos” anyag

⇒ **A részecskefizika standard modellje (SM)**

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III	Bozonok (kölcsonhatások)	
tömeg →	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
név →	u u-kvark	c c-kvark	t t-kvark	γ foton	H Higgs-bozon
	d d-kvark	s s-kvark	b b-kvark	g gluon	
	ν_e elektron-neutrínó	ν_μ műon-neutrínó	ν_τ tau-neutrínó	Z⁰ Z-bozon	
	e elektron	μ műon	τ tau	W[±] W-bozon	

Gyorsulva táguló “sötét” világegyetem

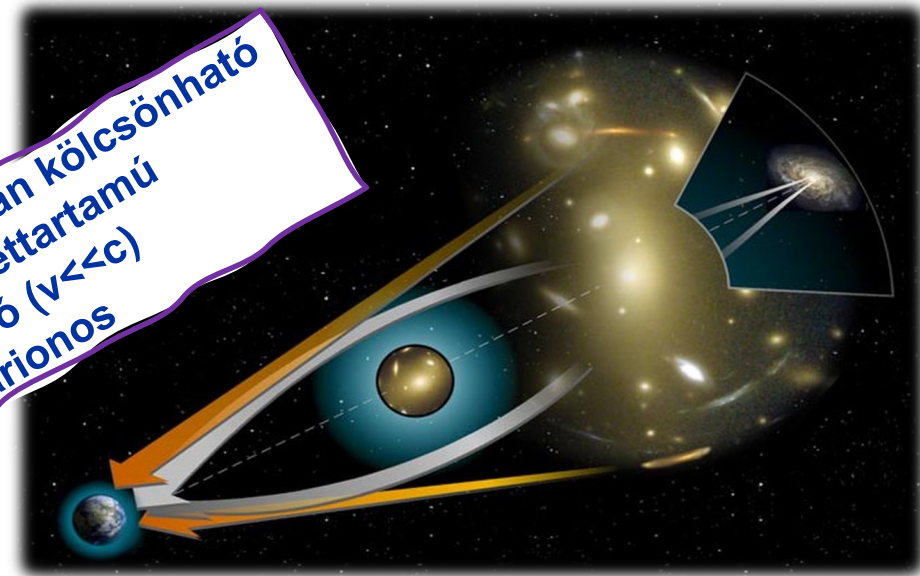
- Hubble-törvényen $v = H \cdot r$ alapuló megfigyelések: Ia típusú szupernovák, ...
- Világegyetem nagy skálájú szerkezete
- Ősrobbanásból származó kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás
- Könnyű elemek (H, He, Li) gyakorisága

Milyen “új”
fizika hajtja?

Domináns anyagforma: sötét anyag (DM)

- Nem nyel el, bocsájt ki észlelhető sugárzást \Rightarrow sötét
- Csak gravitációs hatásából következtetünk létére \Rightarrow anyag
- Galaxisok forgása
- Fény elhajlása nagy galaxisklaszterek körül
 - Hamarosan indul: Vera Rubin Obszervatórium, Simonyi Survey Telescope, Chile, Legacy Survey of Space and Time

Gravitációsan kölcsönható
Hosszú élettartamú
Nem forró ($v \ll c$)
Nem barionos



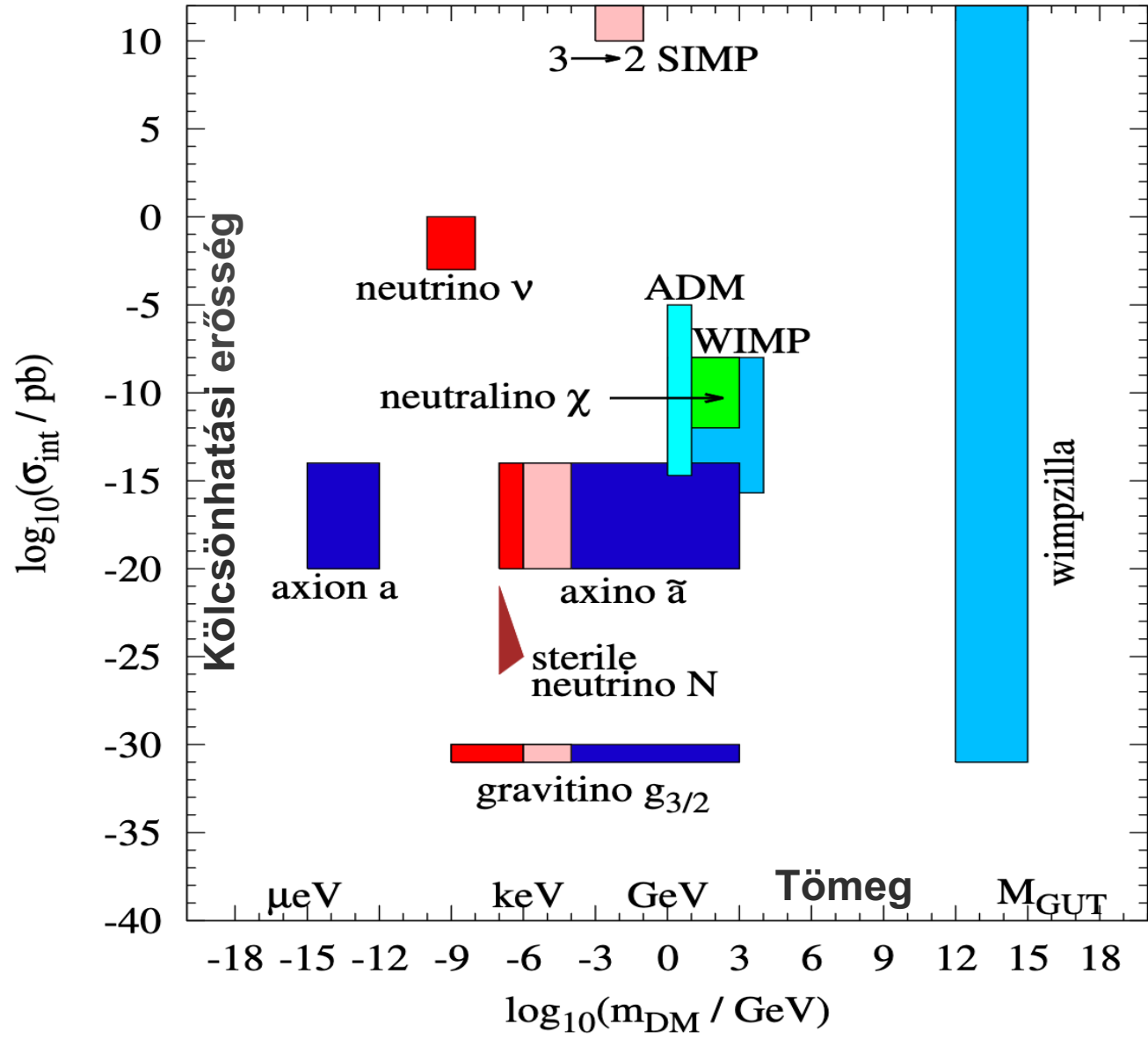
Sötét anyag jelöltek

Rengeteg lehetséges modell

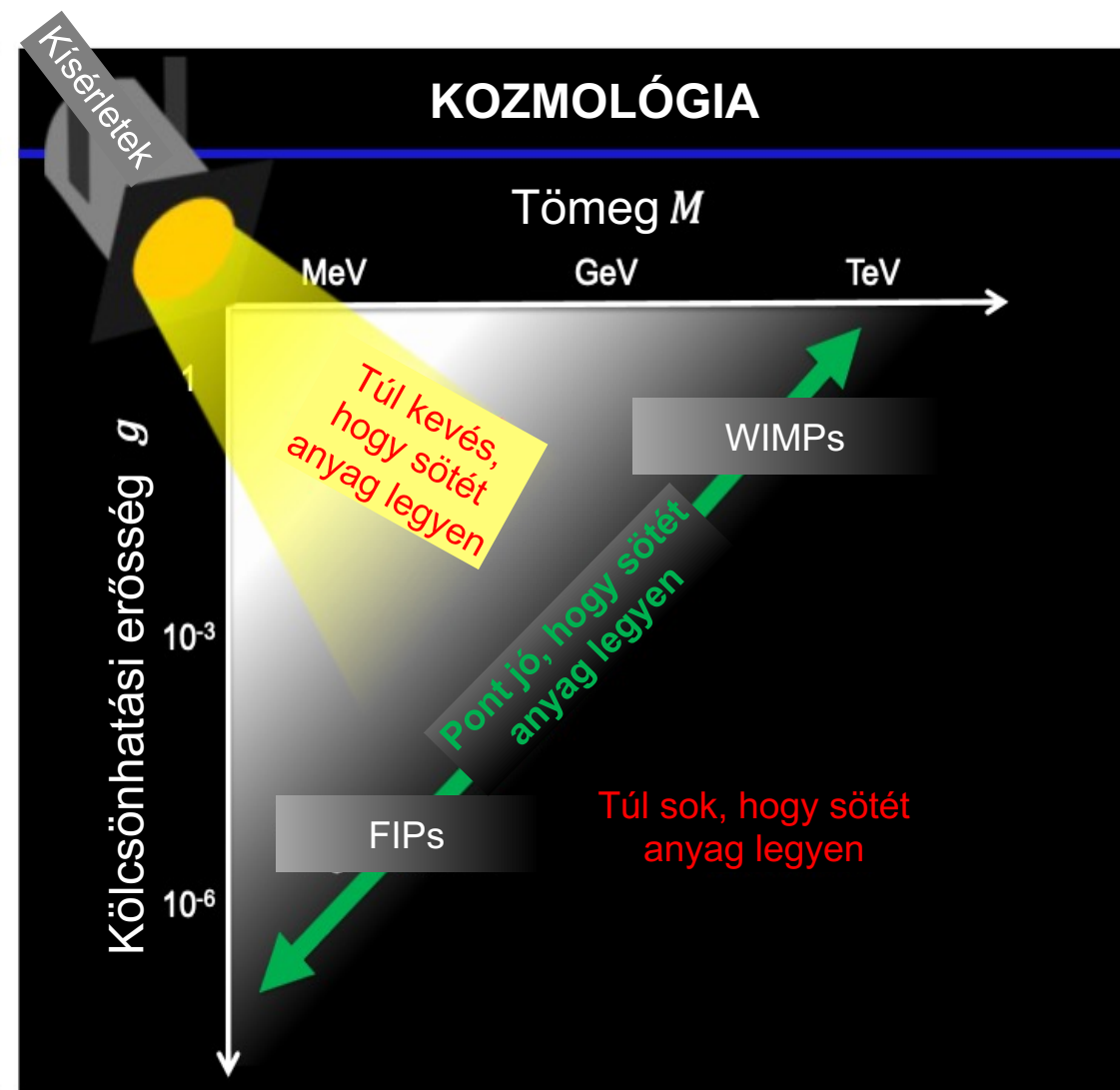
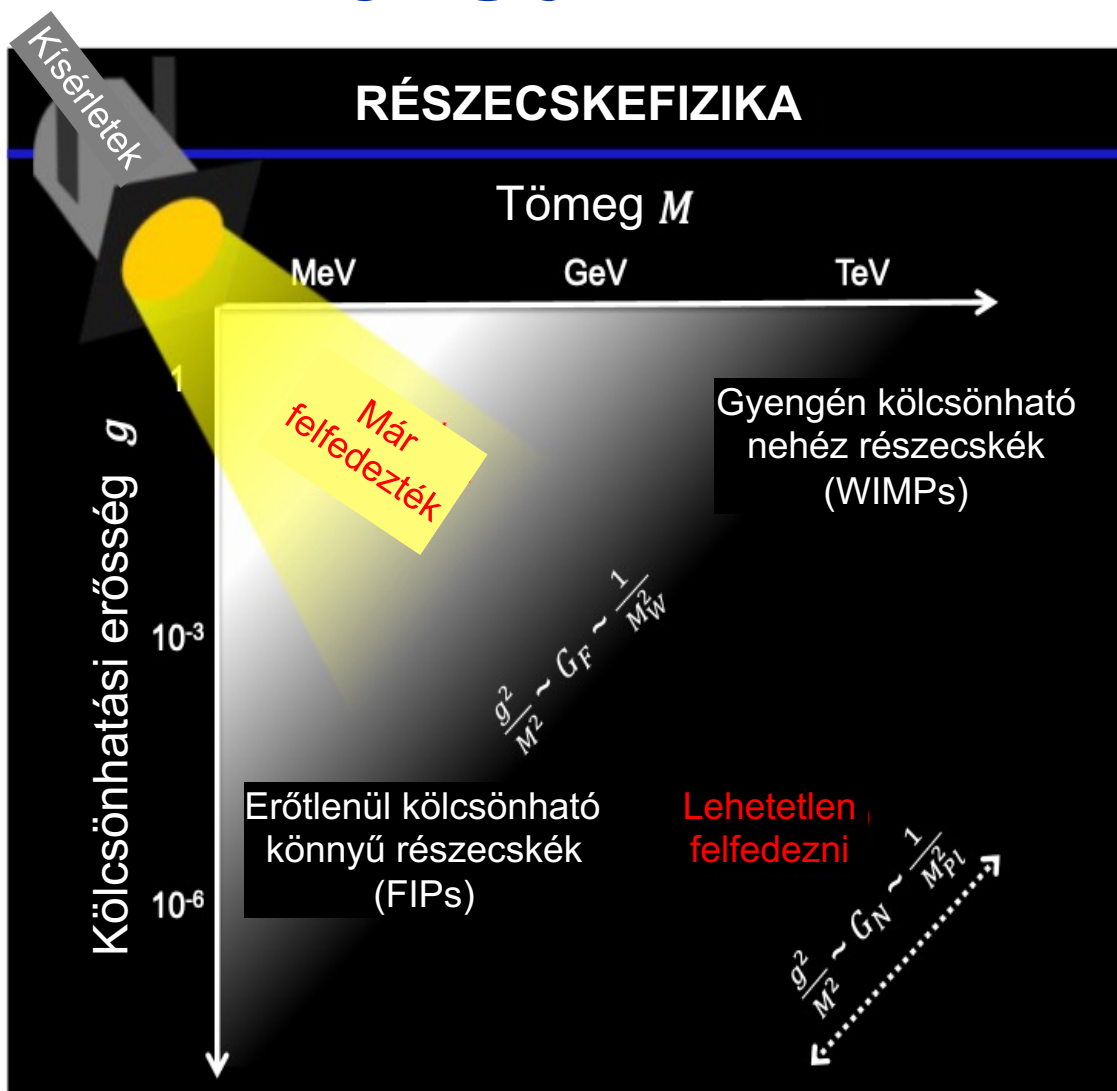
Széles tömeg- és kölcsönhatási erősség tartomány →

Takarékosság elve:

Milyen más nyitott problémát old meg a részecskefizikában?

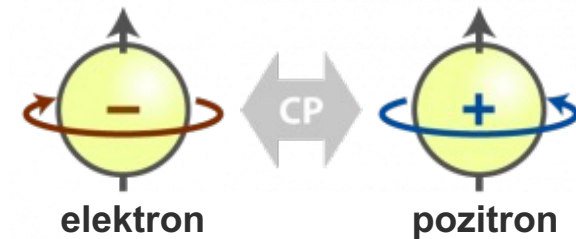


Sötét anyag jelöltek



Erős kölcsönhatás nem CP-sértő \Rightarrow Axion sötét anyag

- Kvantummechanikai totalitárius elv: Minden, ami nem tilos, kötelező.
- Gyenge kölcsönhatásban sérül a *töltéstükrözés* \times *tértükrözés* szimmetria részecskék és antirészecskék kicsit másképpen viselkednek

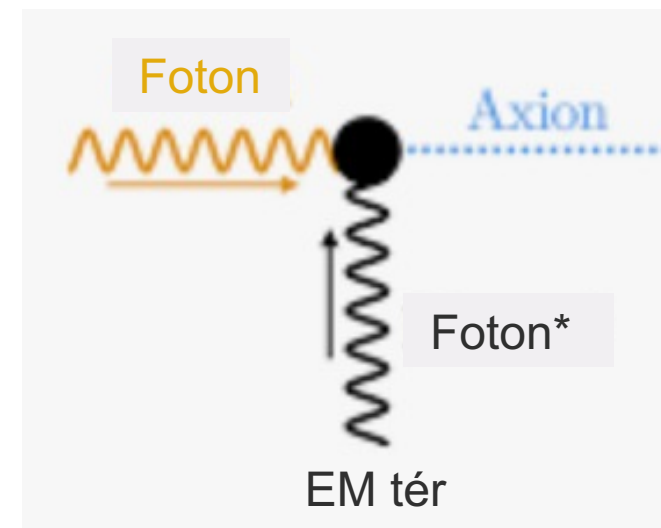


Mi akadályozza meg CP-sértő folyamatok lejátszódását az erős kölcsönhatás során?

Egy új szimmetria!

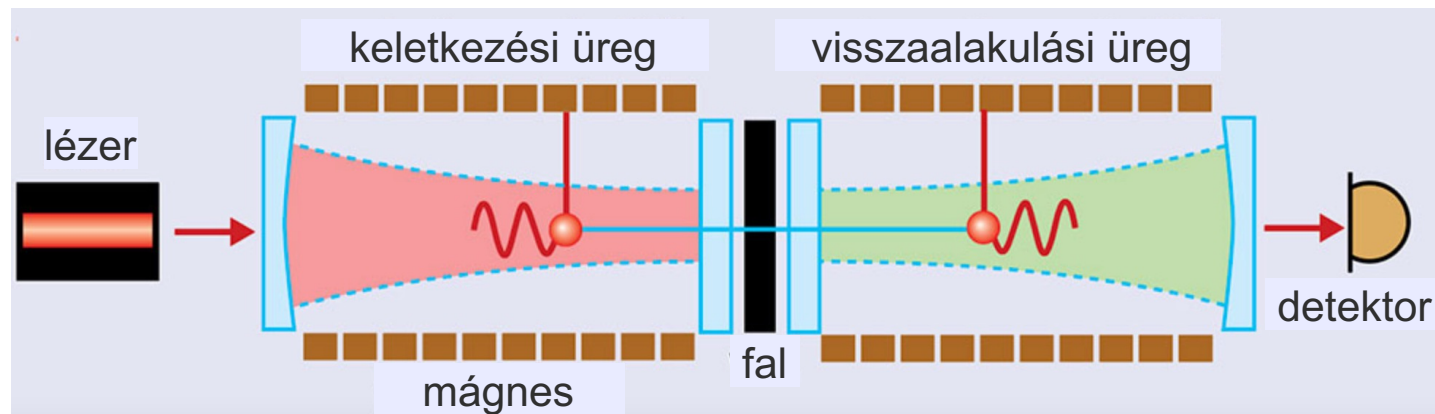
\rightarrow Új semleges részecske: **axion**, sötét anyag jelölt

- **Kis energiájú axionok** a galaxisok (Tejút) sötétanyag-koronájában
- **Keletkezhetnek** ma is a csillagok (Nap) belsejében és laboratóriumban fotonokból erős elektromágneses térben

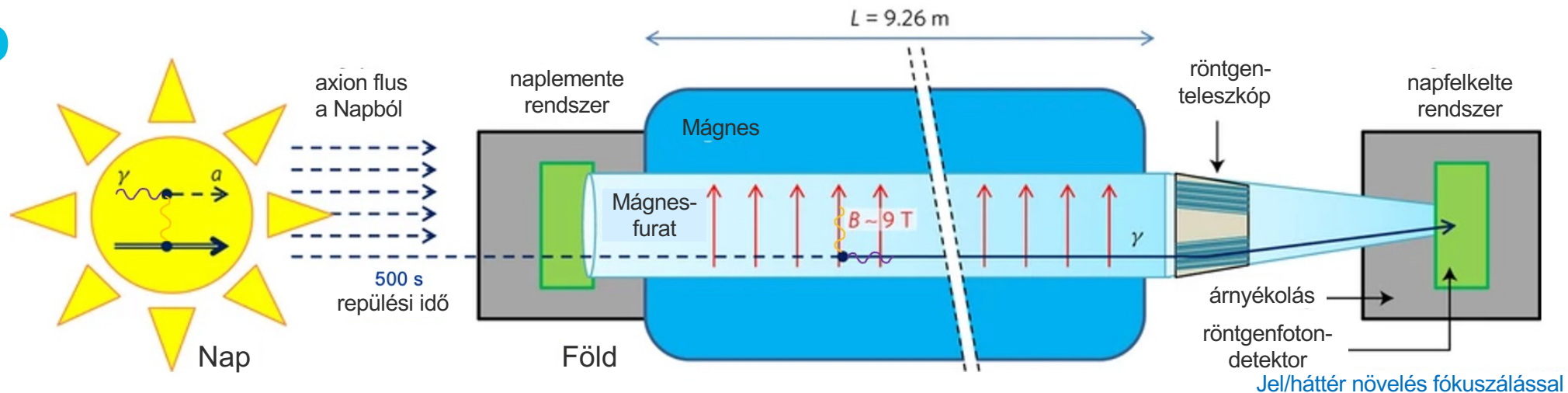


Axion keresés: változatos kísérletek

Fény a falon át



Helioszkóp



CAST (CERN Axion Solar Telescope): axion helioszkóp

Részecskefizikai és csillagászati elemek

- LHC szupravezető dipólus mágnes nyalábcsöve, mint távcső
- Röntgen-fotonokat fókuszáló tükörrendszer
- Fotondetektorok a teleszkóp mindkét végén



Nap követése (napkelte / naplemente)

A várt háttérnek megfelelő eredmény

CAST (CERN Axion Solar Telescope): axion helioszkóp

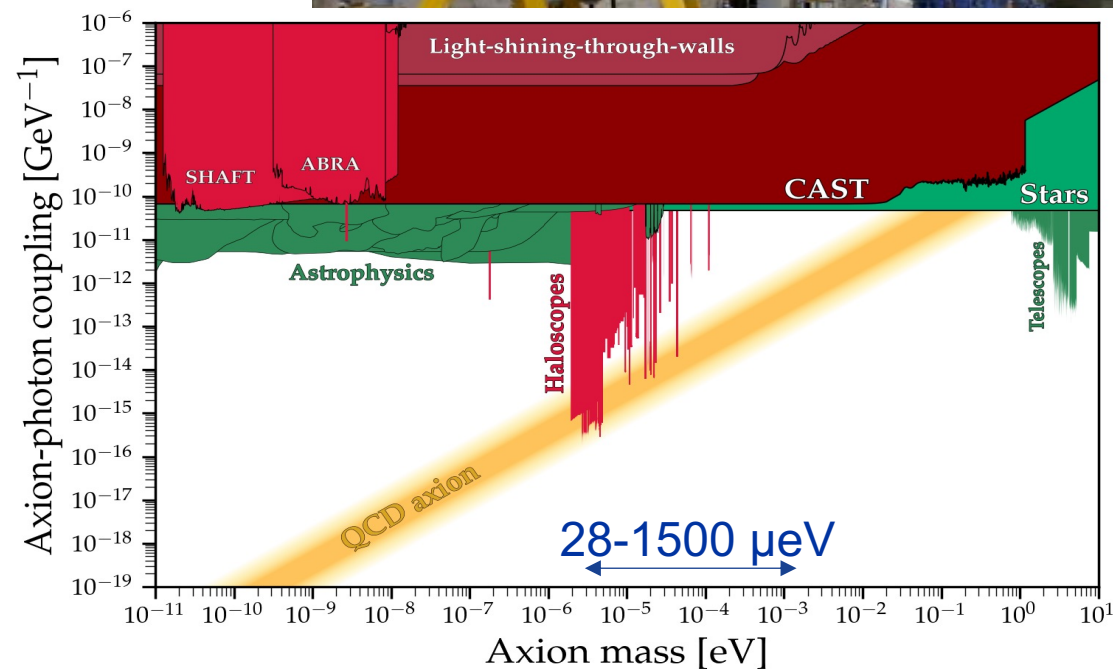
Részecskefizikai és csillagászati elemek

- LHC szupravezető dipólus mágnes nyalábcsöve, mint távcső
- Röntgen-fotonokat fókuszáló tükörrendszer
- Fotondetektorok a teleszkóp mindkét végén

Nap követése (napkelte / naplemente)

A várt háttérnek megfelelő eredmény

Következő generációs kísérlet:
International Axion Observatory (IAXO)



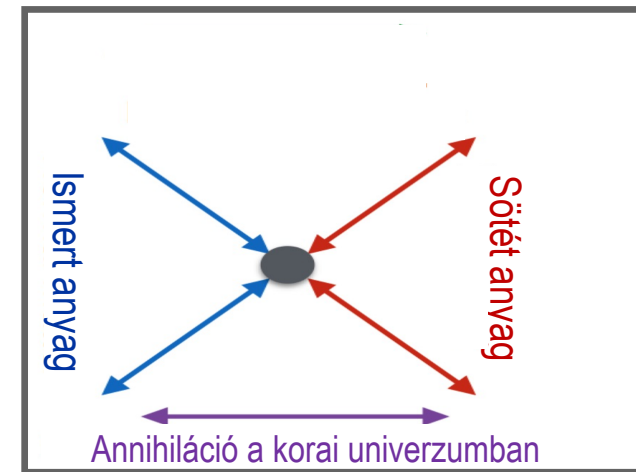
**Korlátok
a modell-
paramétereken**

Rácstérelméleti jóslat 
100 - 50% axion sötétanyag

WIMP (gyengén kölcsönható nehéz részecske) csoda

1) Termikus kifagyási (freeze-out) modell

- Korai univerzum: részecskék termikus egyensúlyban
- Hőmérséklet csökken → kölcsönhatás túl gyenge az egyensúly fenntartásához → kifagyás (kémiai szétcsatolás)



WIMP (gyengén kölcsönható nehéz részecske) csoda

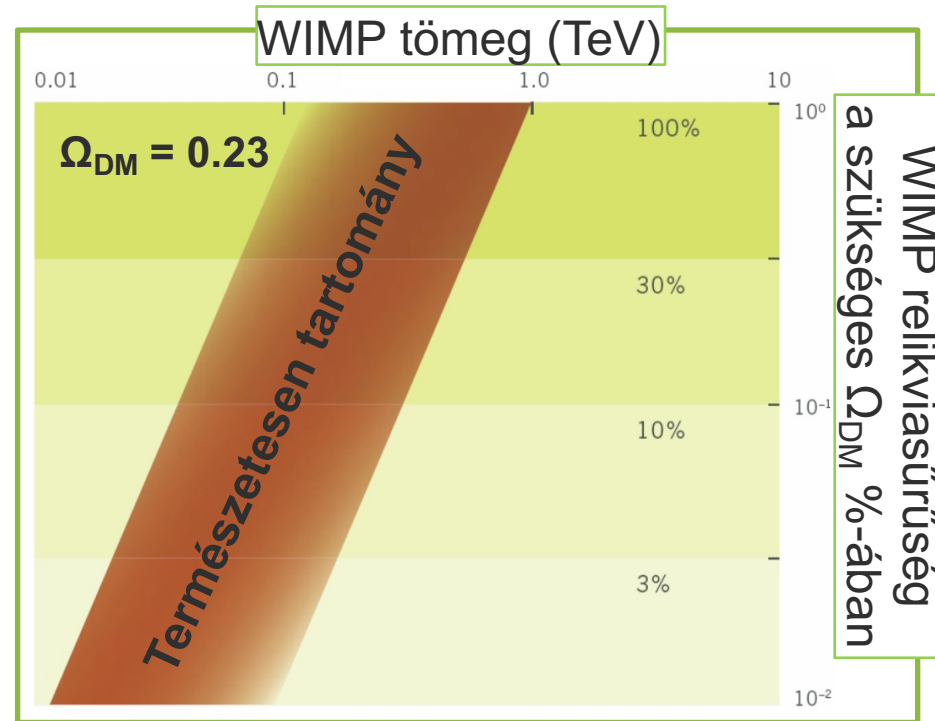
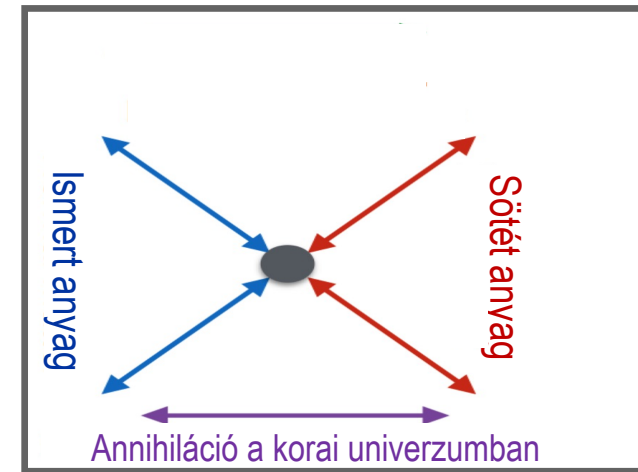
1) Termikus kifagyási (freeze-out) modell

- Korai univerzum: részecskék termikus egyensúlyban
- Hőmérséklet csökken → kölcsönhatás túl gyenge az egyensúly fenntartásához → kifagyás (kémiai szétcsatolás)

⇒ visszaadja a szükséges sötétanyagsűrűséget gyengén kölcsönható, $m \approx 0.1-1$ TeV részecskékre

2) Számos jól motivált SM kiterjesztésben megjelenik

Effektív DM – SM kölcsönhatás



WIMP (gyengén kölcsönható nehéz részecske) csoda

Effektív DM – SM kölcsönhatás


1) Termikus kifagyási (freeze-out) modell

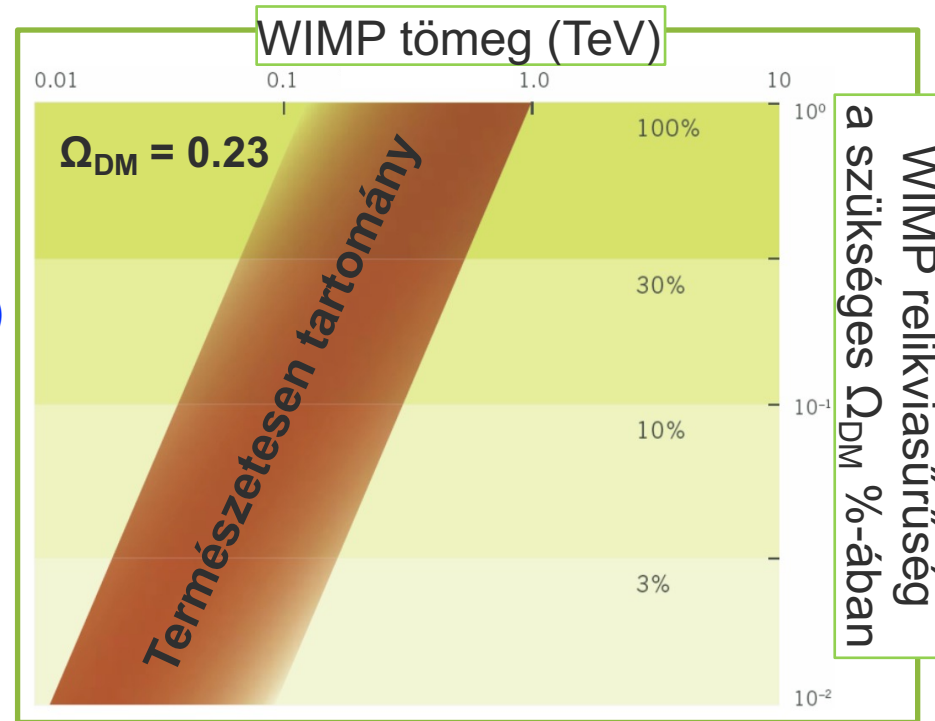
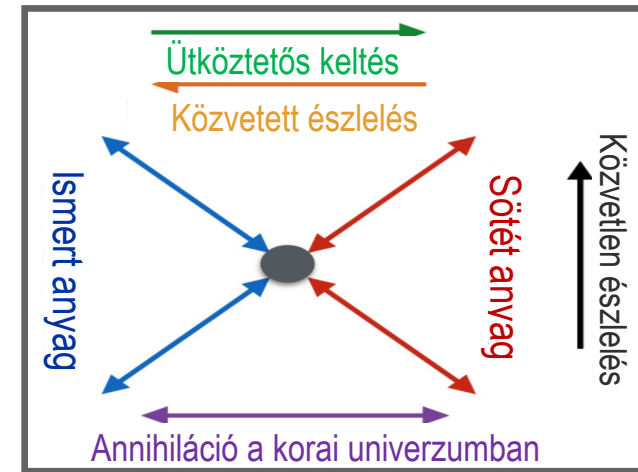
- Korai univerzum: részecskék termikus egyensúlyban
- Hőmérséklet csökken → kölcsönhatás túl gyenge az egyensúly fenntartásához → kifagyás (kémiai szétcsatolás)

⇒ visszaadja a szükséges sötétanyagsűrűséget gyengén kölcsönható, $m \approx 0.1-1$ TeV részecskékre

2) Számos jól motivált SM kiterjesztésben megjelenik

3) Kísérletileg tanulmányozható több módon (“komplementaritás”)

- **DM-szórás barionos anyagon** → közvetlen észlelés
- **DM-annihiláció** → közvetett észlelés:
 γ -sugarak a világűrben és a földön, neutrínók, antirészecskék
- **DM-keltés gyorsítóval** ⇒ LHC 



SUSY sötét anyag

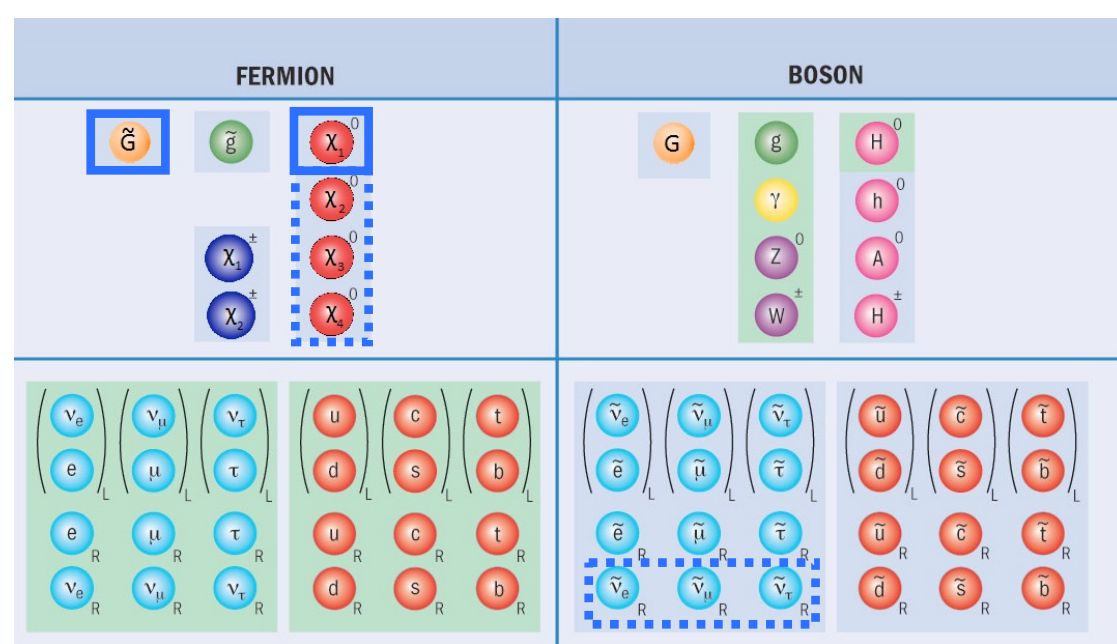
Fermion – bozon szimmetria → szuperpartnerek

Azonos kvantumszámok, kölcsönhatások

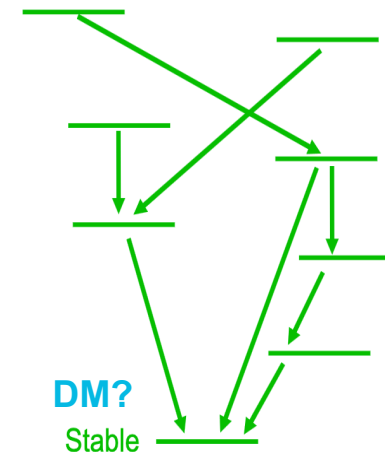
$\Delta\text{spin}=1/2$, $\Delta\text{tömeg}$

Válasz számos nyitott kérdésre

Sötét anyag: legkönnyebb SUSY részecske
stabil + színtelen, semleges



New Particle States



SUSY sötét anyag

Fermion – bozon szimmetria → szuperpartnerek

Azonos kvantumszámok, kölcsönhatások

$\Delta\text{spin}=1/2$, $\Delta\text{tömeg}$

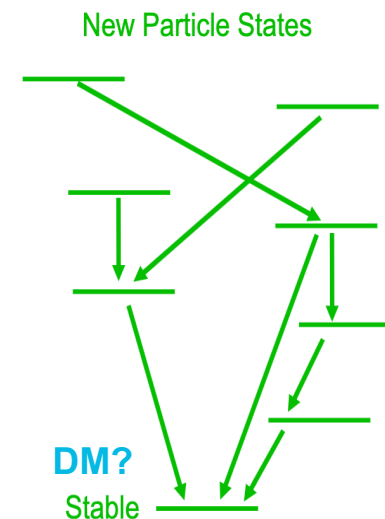
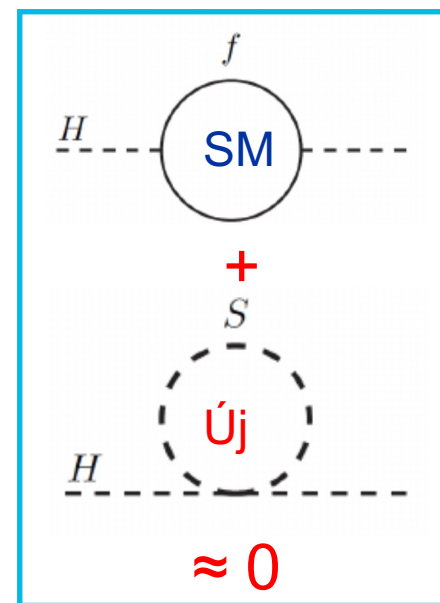
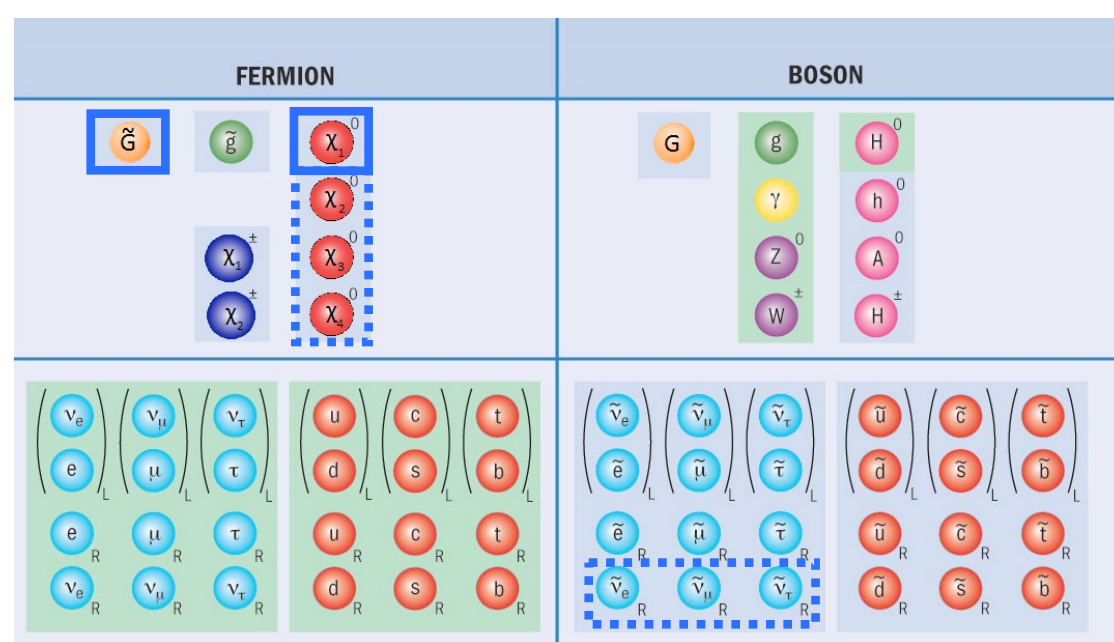
Válasz számos nyitott kérdésre

Sötét anyag: legkönnyebb SUSY részecske

stabil + színtelen, semleges

Higgs-bozon „alacsony” tömege a M_{Planck} -hoz képest

SM és szuperpartner kvantumkorrekciók kioltják egymást



SUSY sötét anyag

Fermion – bozon szimmetria → szuperpartnerek

Azonos kvantumszámok, kölcsönhatások

$\Delta\text{spin}=1/2$, $\Delta\text{tömeg}$

Válasz számos nyitott kérdésre

Sötét anyag: legkönnyebb SUSY részecske

stabil + színtelen, semleges

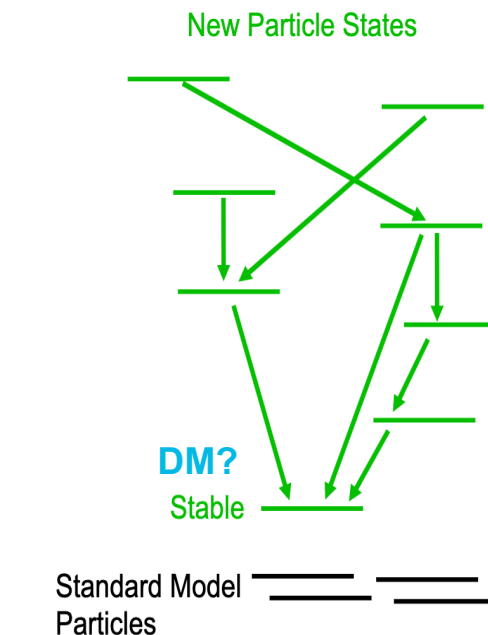
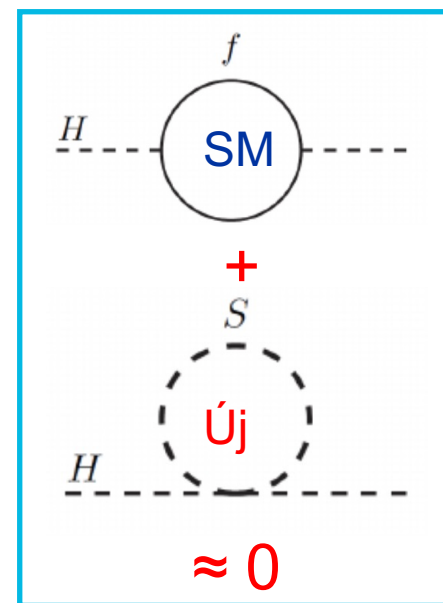
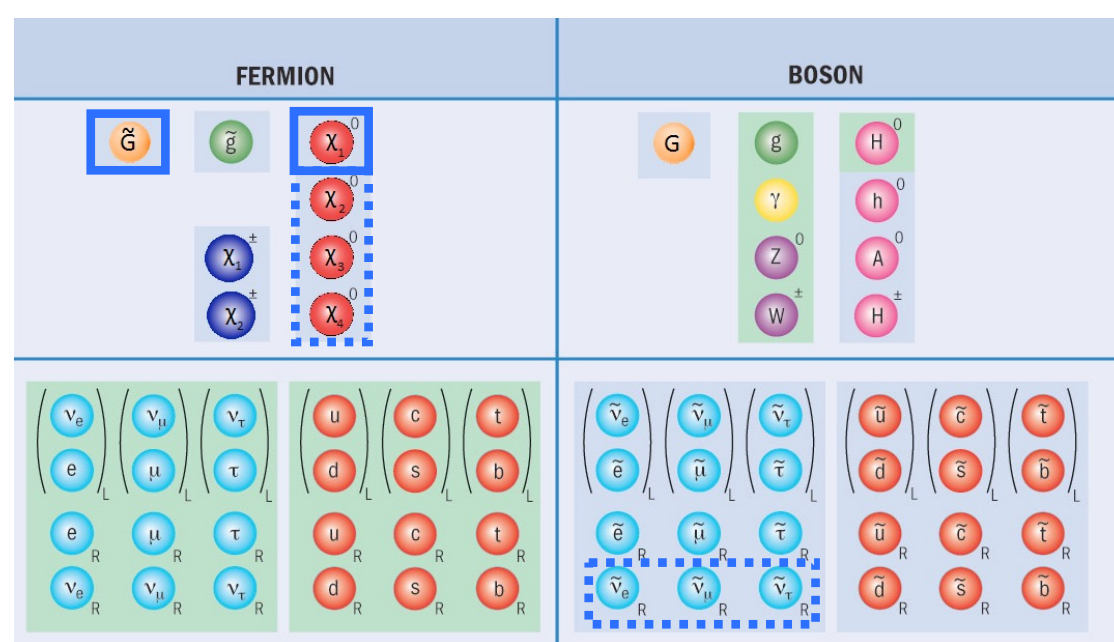
Higgs-bozon „alacsony” tömege a M_{Planck} -hoz képest

SM és szuperpartner kvantumkorrekciók kioltják egymást

Kölcsönhatások egyesítése nagy energián $\sim 10^{16}$ GeV


Korlátok SM precíziós mérésekből, gyorsítás (LHC) 

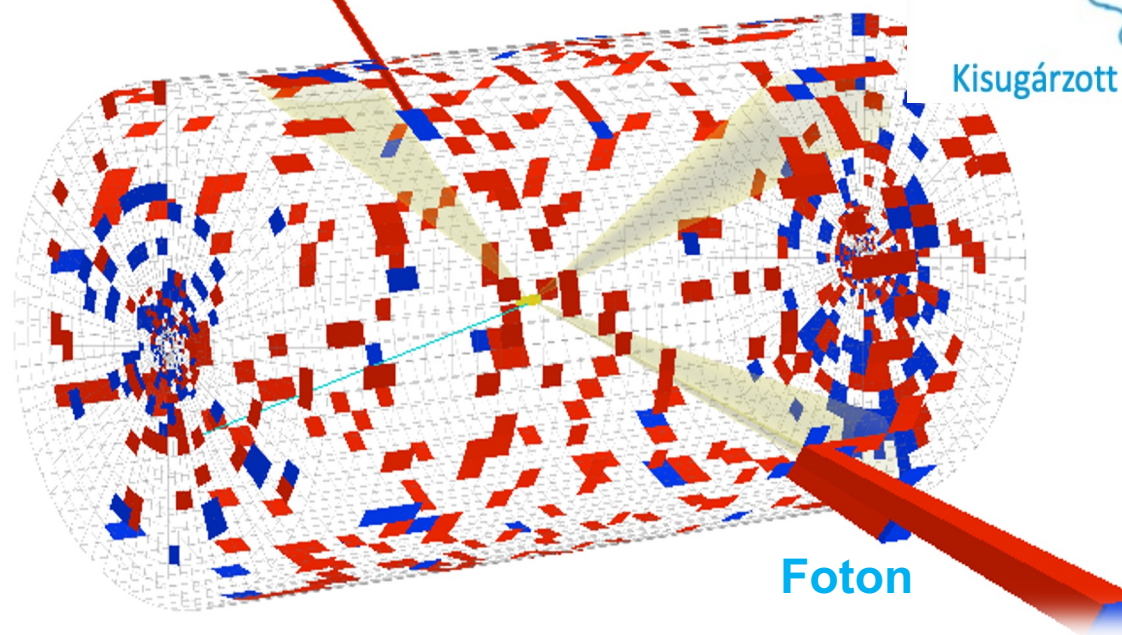
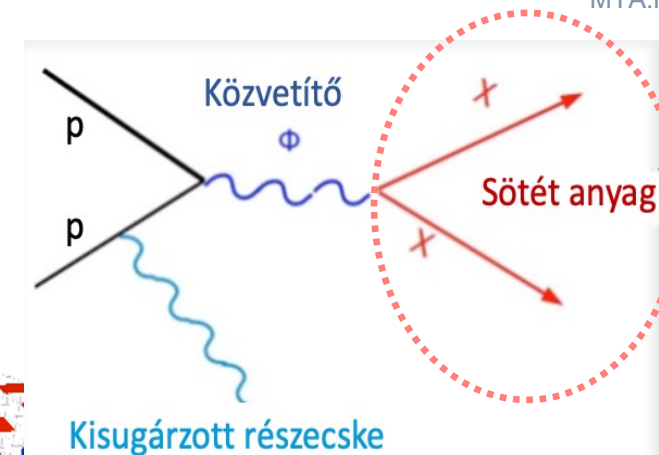
kísérletekből és közvetlen sötétanyag keresésekből



Sötét anyag keresés az LHC-n

Rengeteg lehetséges DM-modell

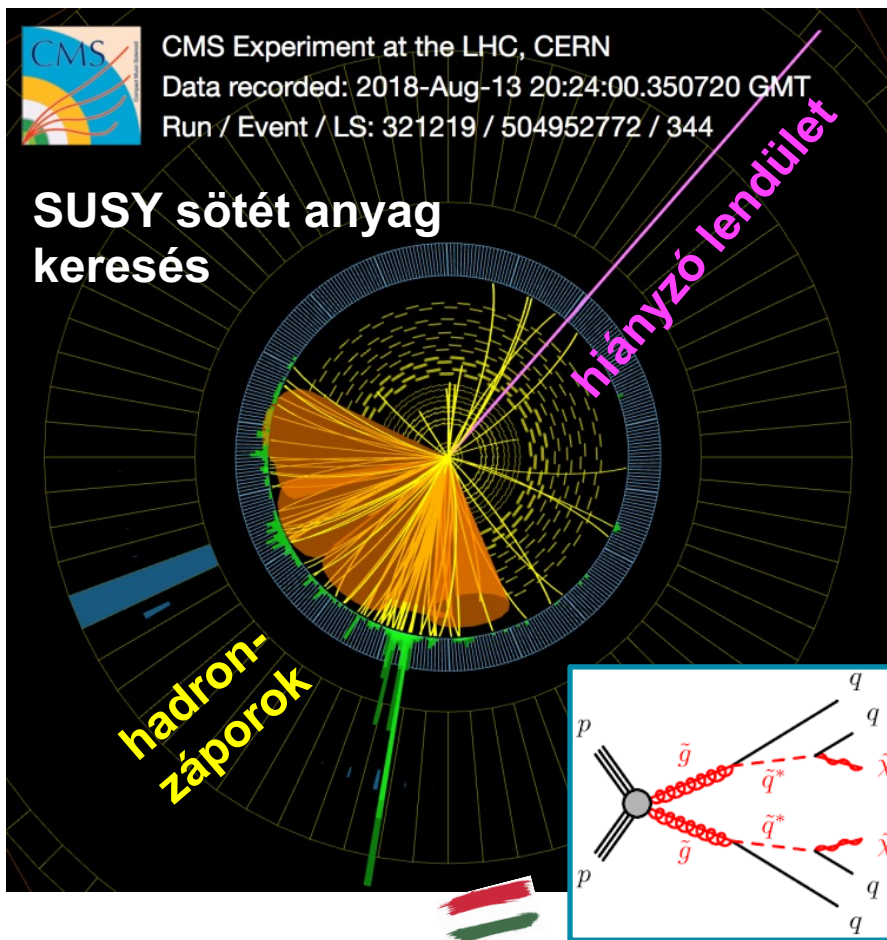
- DM+X (pl. DM + foton)
- SUSY DM megjelenés szuperpartner keletkezést követő bomlási sorban 



- **Sötét anyag** nem (nagyon ritkán) hat kölcsön a detektorral
- A vele **együttesen keletkező SM részecskéket** észleljük
- Lendület megmarad, de **a sötét anyag által elvitt része** láthatatlan

Sötétanyag keresés a CMS detektorral

Sötét anyag keresés:
jellegzetes “láthatatlan” hiányzó lendület

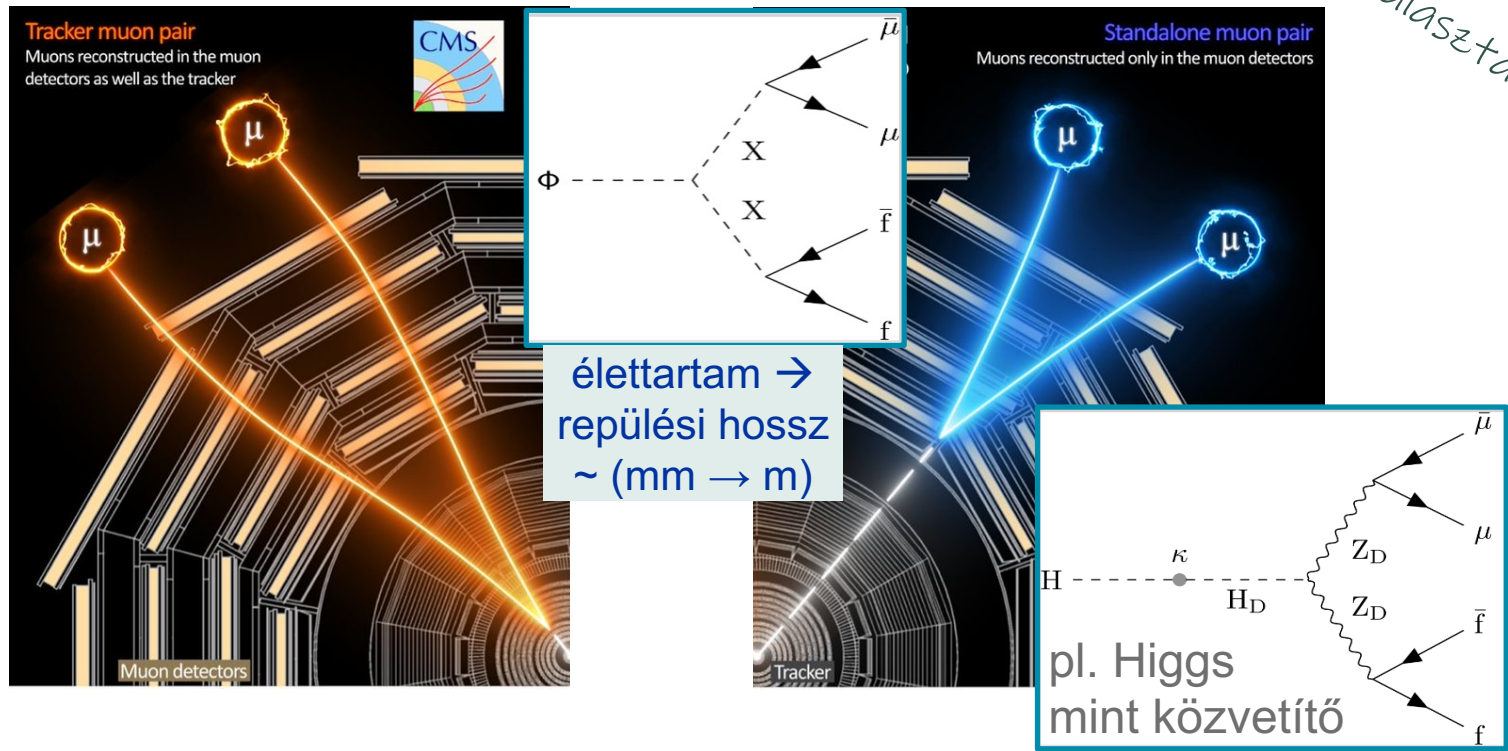
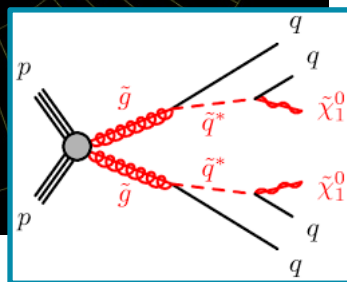
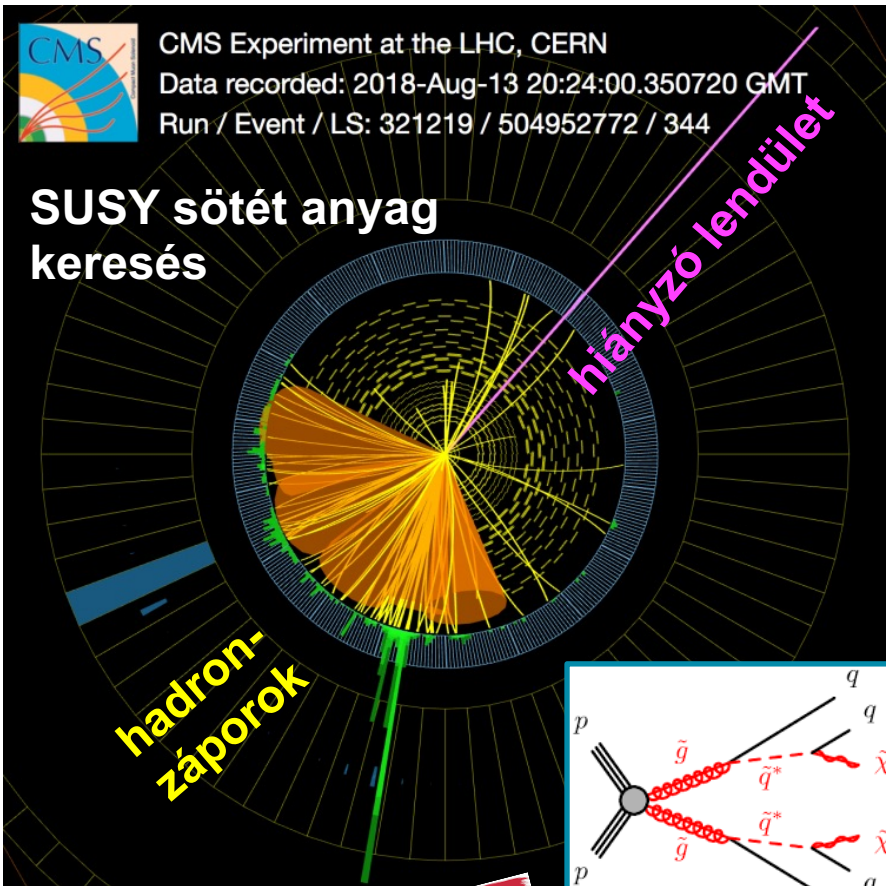


Sötétanyag keresés a CMS detektorral

Műion detektorok
Belső nyomkövető
Valós idejű
eseménykiválasztás

Sötét anyag keresés:
jellegzetes "láthatatlan" hiányzó lendület

SM – sötét szektor közvetítő részecske keresés:
"látható" azonnali vagy késleltetett bomlásai

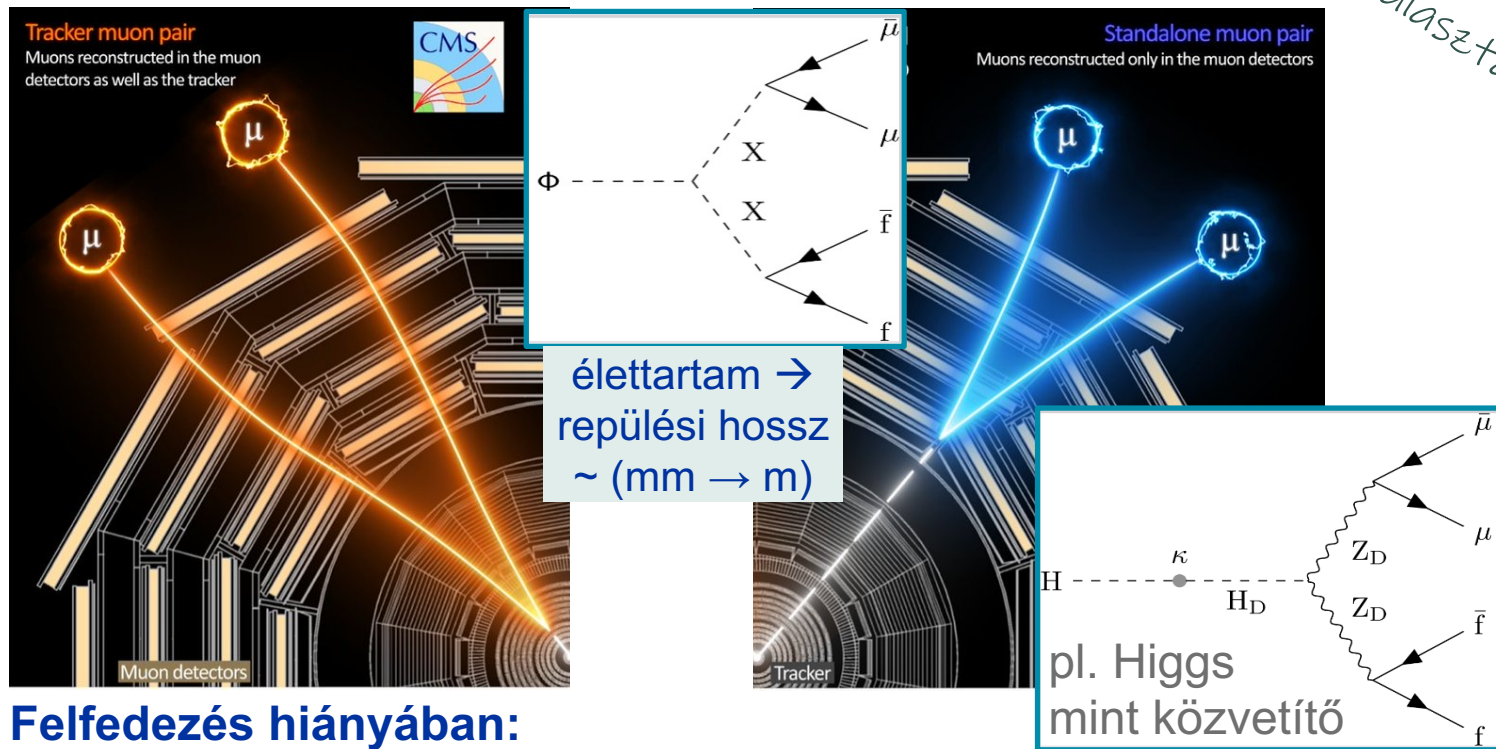
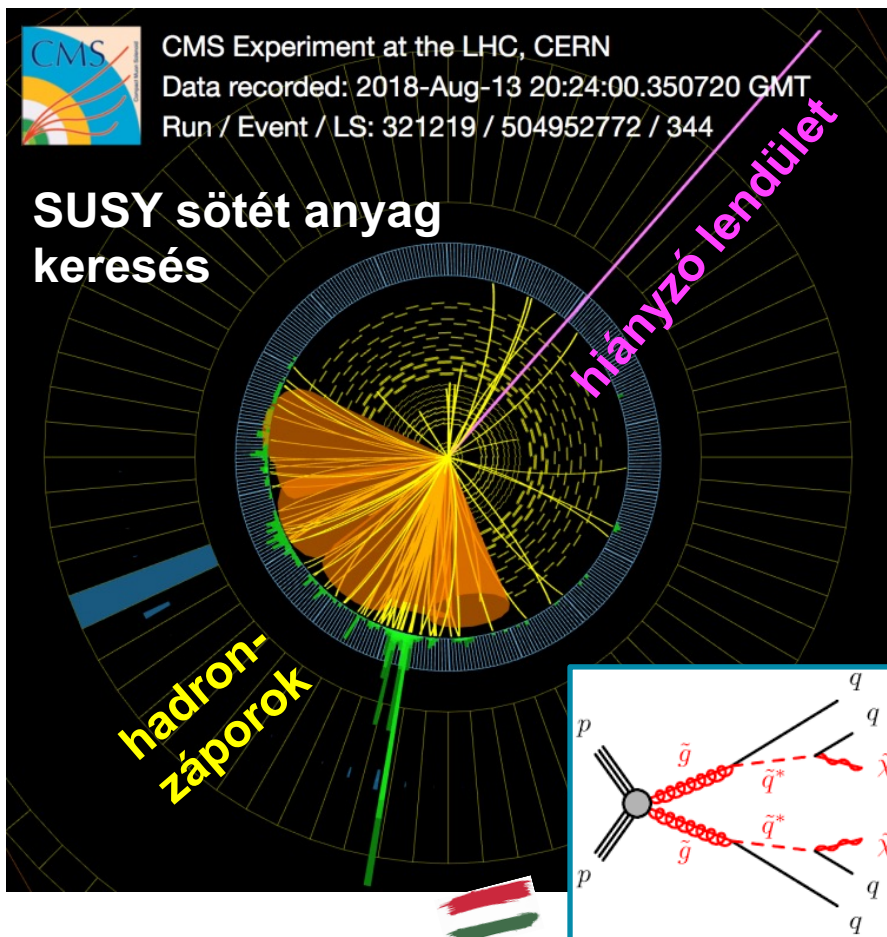


Sötétanyag keresés a CMS detektorral

Műion detektorok
Belső nyomkövető
Valós idejű
eseménykiválasztás

Sötét anyag keresés:
jellegzetes "láthatatlan" hiányzó lendület

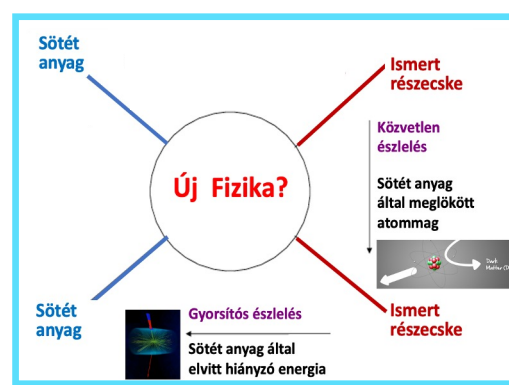
SM – sötét szektor közvetítő részecske keresés:
"látható" azonnali vagy késleltetett bomlásai



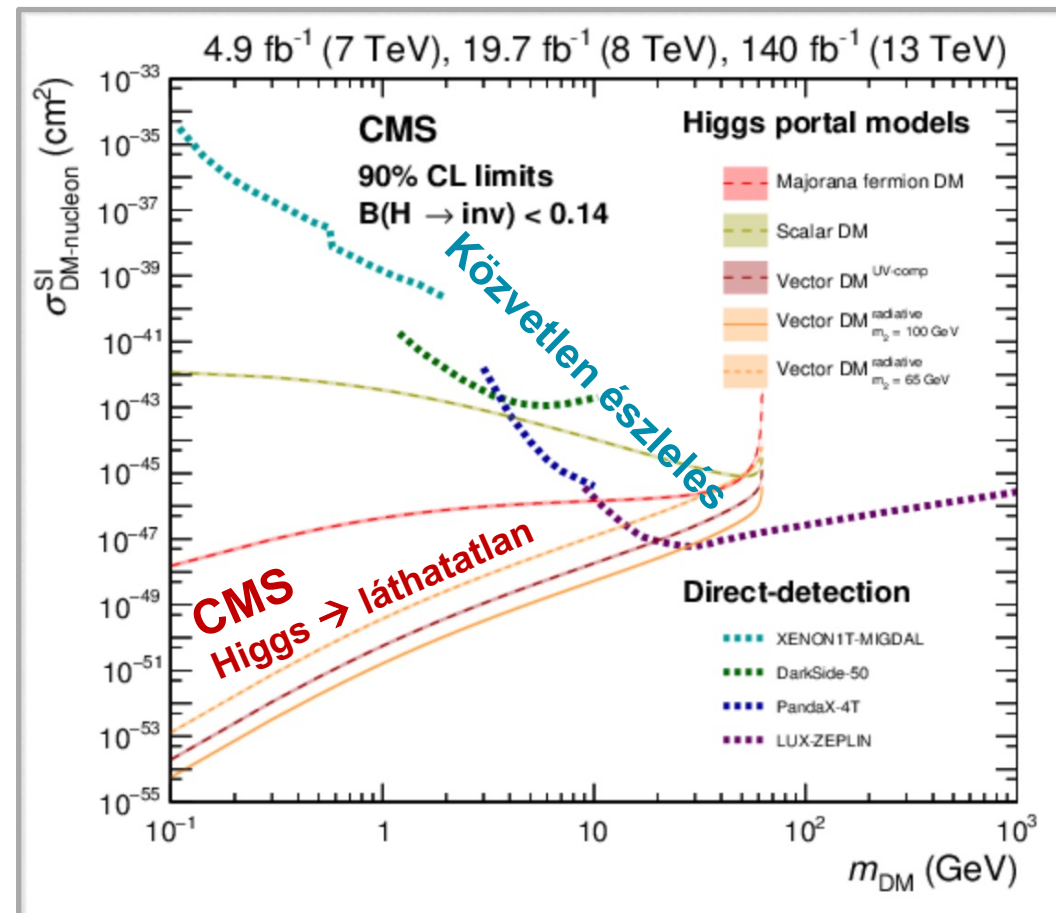
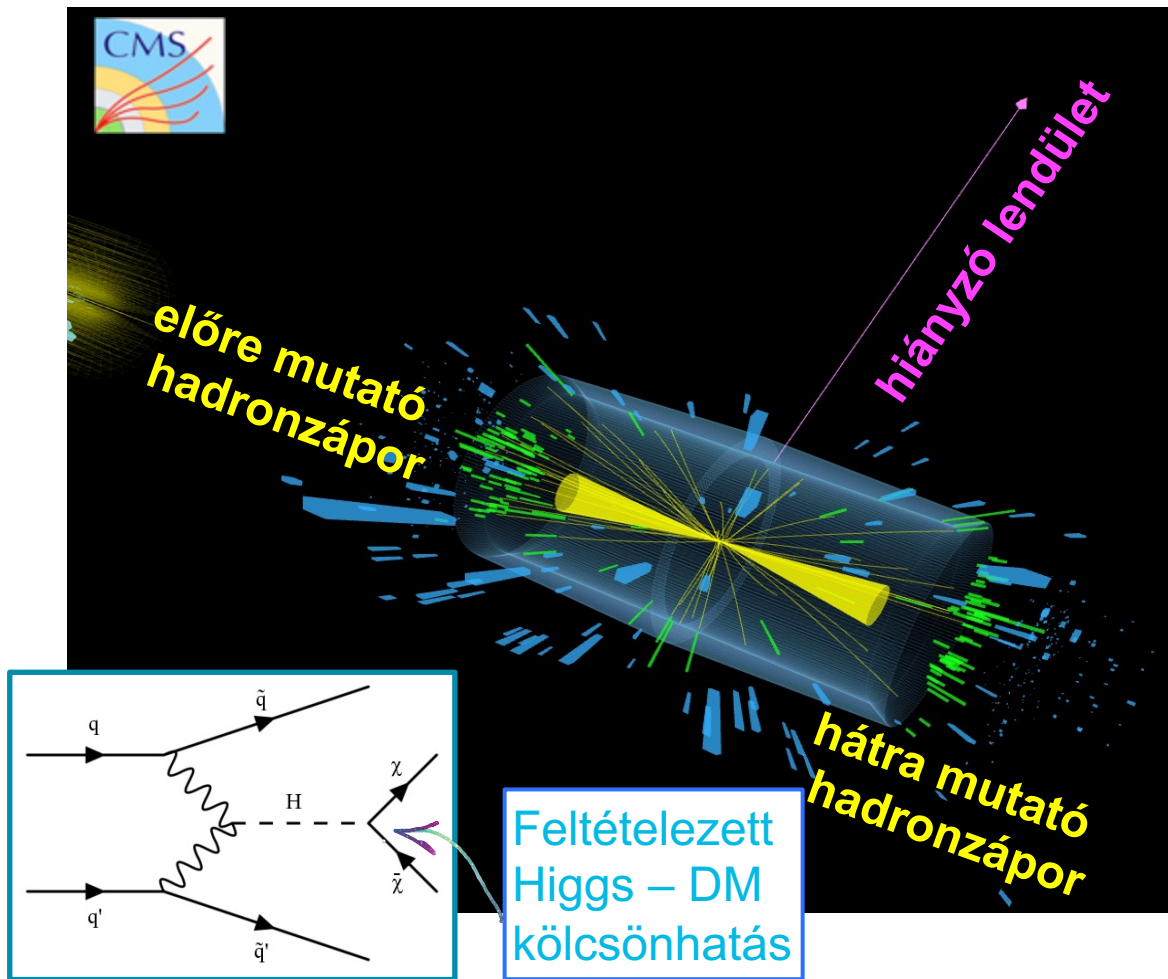
Felfedezés hiányában:

korlátok a modellparamétereken (közvetítő és DM tömeg, csatolás)
→ Modellek kísérleti kizárása

Higgs-keletkezés: ablak a sötét anyagra?



A **gyorsító**s és a **közvetlen észlelés** keresések kiegészítik egymást



Megújuló CMS detektor a HL-LHC-re

Gyenge kölcsönhatás, ritka részecskék
→ rengeteg adat szükséges

Nagy Luminozitású Nagy Hadronütköztető (HL-LHC) 2029-től

- 140-200 pp ütközés 0.3 ns alatt (jelenleg 50-60)
- 10 cm hosszú ütközési zóna: 0.5-1 mm-enként lesz egy pp ütközés

Rengeteg kirepülő részecskét kell elkülöníteni, útját, lendületét pontosan rekonstruálni, fajtáját azonosítani

Egy lényegében új detektor építése zajlik

- Pontosabb időfelbontás: 30 ps
- Finomabb térbeli felosztás: 100 M → 2000 M csatorna
- Új gyors, sugárzásálló elektronika
- Nagyobb számítógépes kapacitás



Időzítő detektor 
Debreceni Egyetem

 ATOMKI
Müon spektrométer

Kaloriméterek

2 GIGAPIXELES FÉNYKÉP
40 MILLIÓSZOR MP-ENKÉNT

Szilícium nyomkövető

 Wigner FK

BRIL luminozitás-,
nyalábállapot- és
sugárzásmérő 

ELTE

Total weight	: 14000 tonnes
Overall diameter	: 15.0 m
Overall length	: 28.7 m
Magnetic field	: 3.8 T

A rejtett szektor kutatása

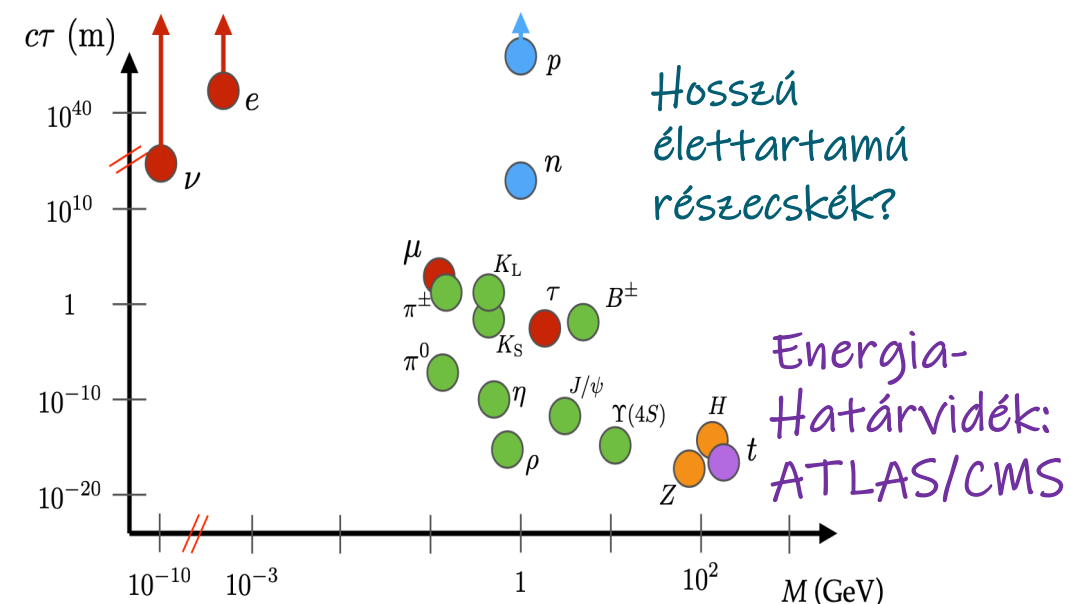
Miért nem látjuk a várt új részecskéket a kísérletekben?

Túl nehezek?

Túl erőtlenül hatnak kölcsön?

- Hosszabb repülési hossz bomlás előtt?

Intenzitáshatárvidék



A rejtett szektor kutatása

Miért nem látjuk a várt új részecskéket a kísérletekben?

Túl nehezek?

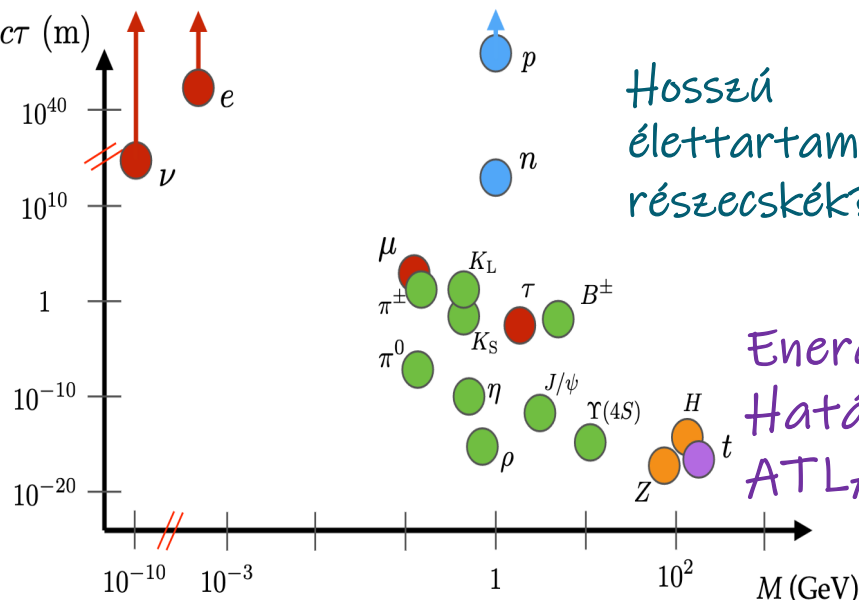
Túl erőtlenül hatnak kölcsön?

- Hosszabb repülési hossz bomlás előtt?

Intenzitáshatárvidék

Hosszú élettartamú részecskék?

Energia-Határvidék: ATLAS/CMS

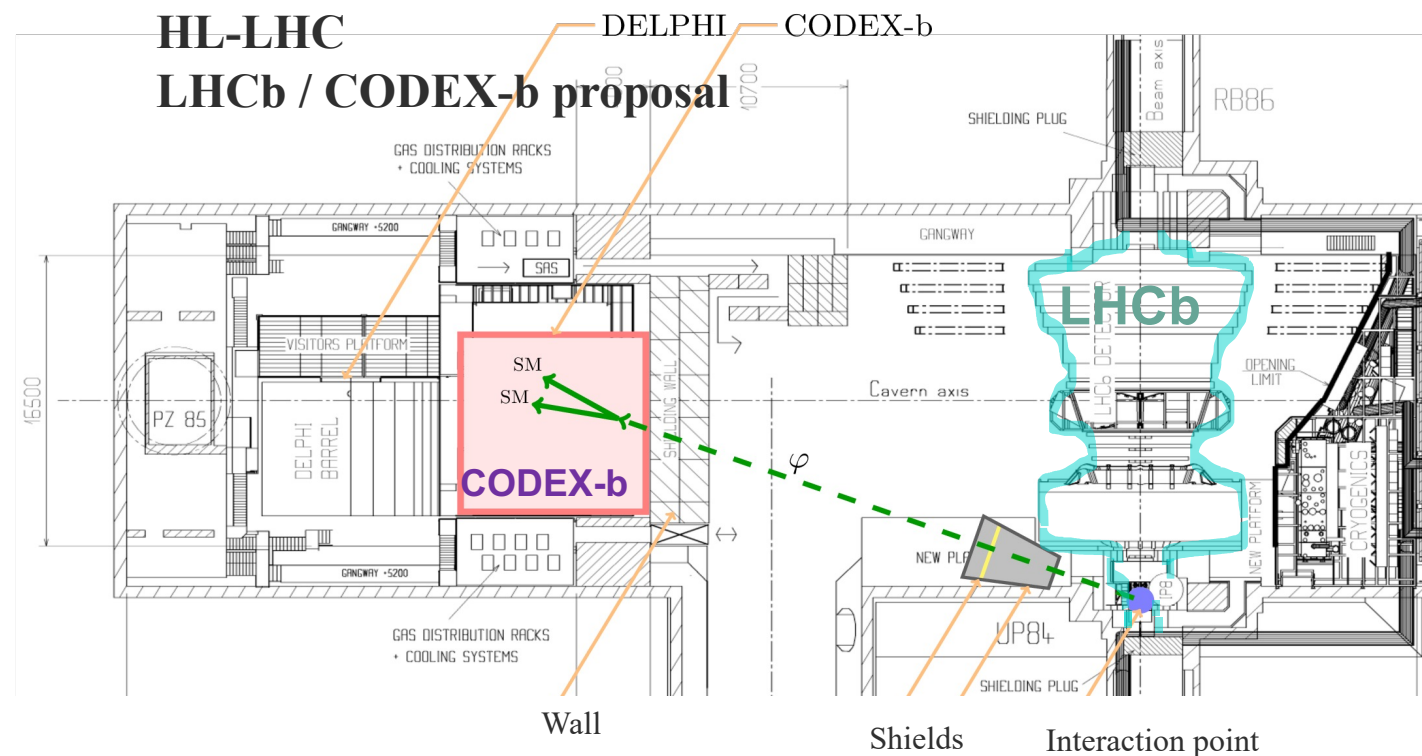


CODEX-b:

Hosszú élettartamú ($c\tau > 20$ m) gyengén kölcsönható részecskék kutatása az LHCb transzverzális aldetektoraként



LHCb: b-hadron bomlások tanulmányozása



Távolabb bomló részecskék észlelését is lehetővé teszi

SHiP (Search For Hidden Particles): elemi részecskék keresése a csatolási határvidéken

- Most jóváhagyott nyalábtemető (rögzített céltárgyas) kísérlet
- $6 \cdot 10^{20}$ p / 15 év, 2031-től
- Kiegészíti az LHC melletti nagy energiás és precíziós ízfizikai méréseket
- Hadronok bomlásában és fotonok kölcsönhatásaiban keletkező egzotikus nagyon erőtlenül kölcsönható részecskék keresése
- Könnyű DM észlelés atomi elektron vagy atommag visszaszórással
- Szupergyenge csatolások vizsgálata MeV - 10 GeV tömegtartományban

