

Új Fizika: az ismeretlen nyomában a Nagy Hadronütköztetővel

Pásztor Gabriella

MTA – ELTE Lendület CMS

Részecske és Magfizikai Kutatócsoport

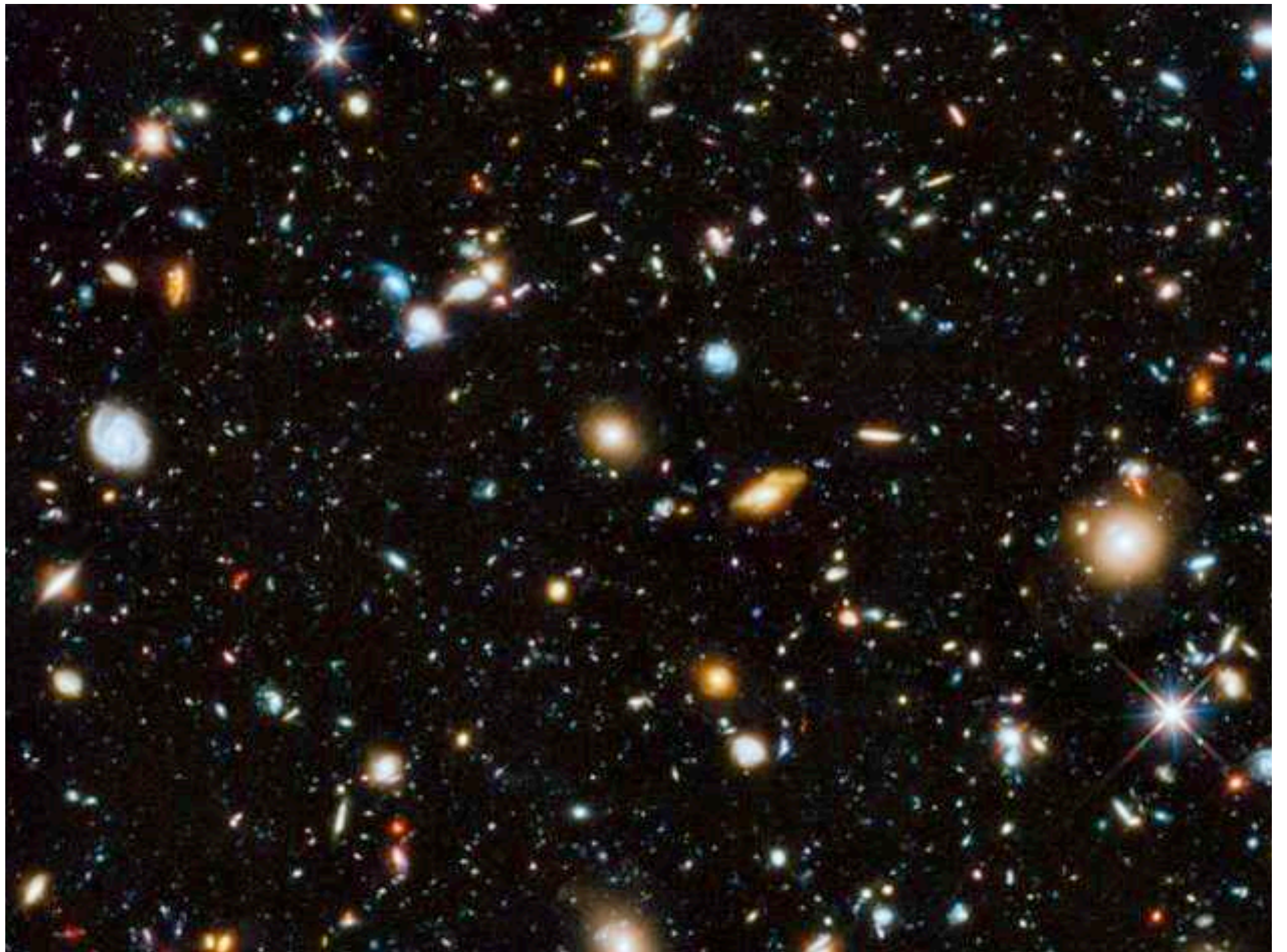
ELTE TTK Atomfizikai Tanszék



Az atomoktól a csillagokig
Közérthető fizika, nem csak középiskolásoknak
Budapest, 2016. október 6.

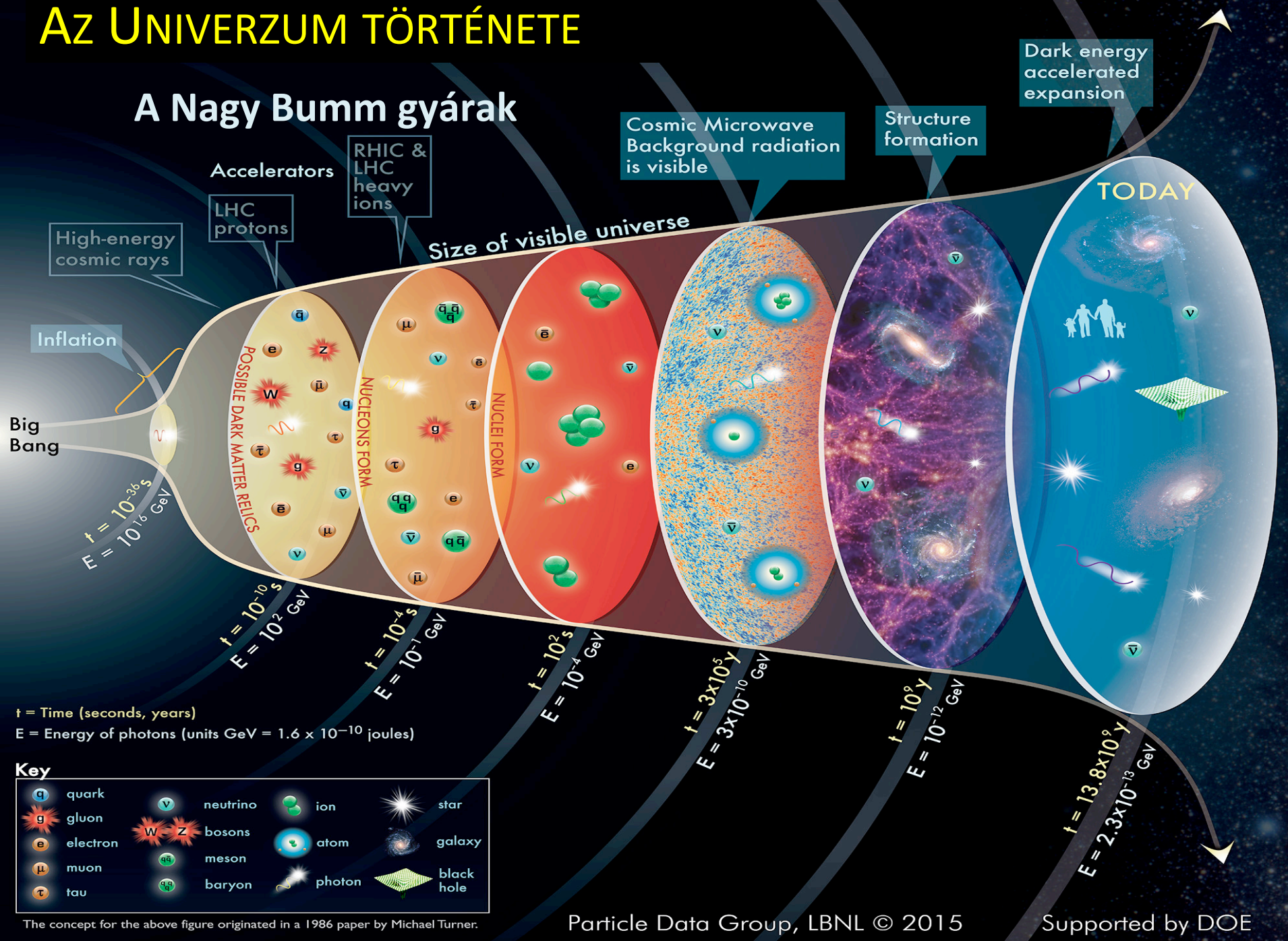
<http://gpasztor.web.cern.ch/gpasztor/>
E-mail: gpasztor@caesar.elte.hu





AZ UNIVERZUM TÖRTÉNETE

A Nagy Bumm gyárak



t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

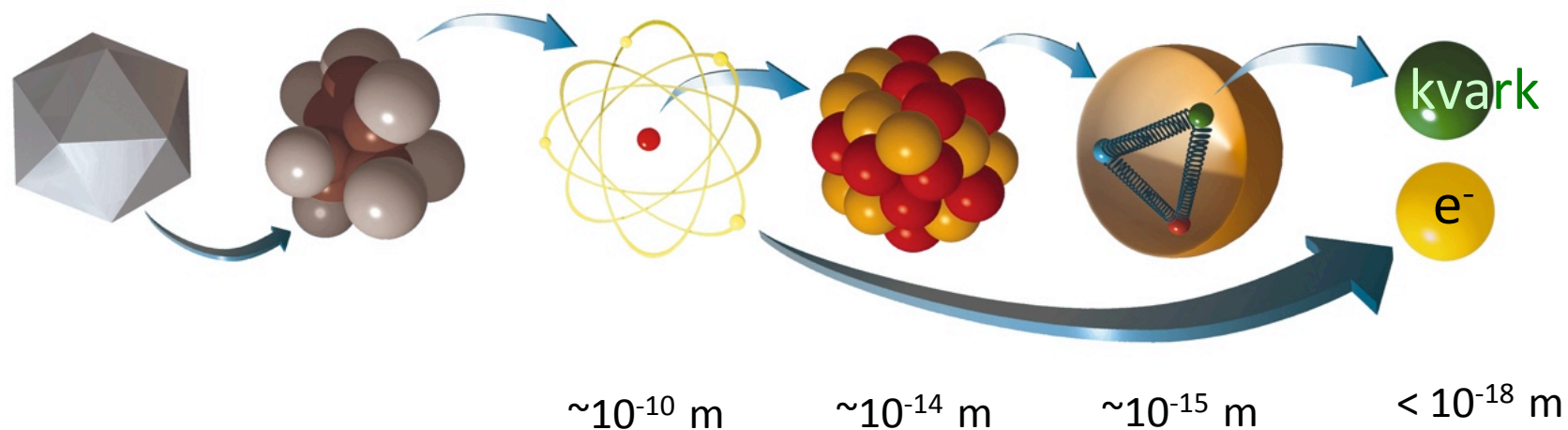
q	quark	v	neutrino	ion	star
g	gluon	W, Z	bosons	atom	galaxy
e	electron	q \bar{q}	meson	photon	black hole
μ	muon	qqq	baryon		
τ	tau				

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

Az anyag szerkezete

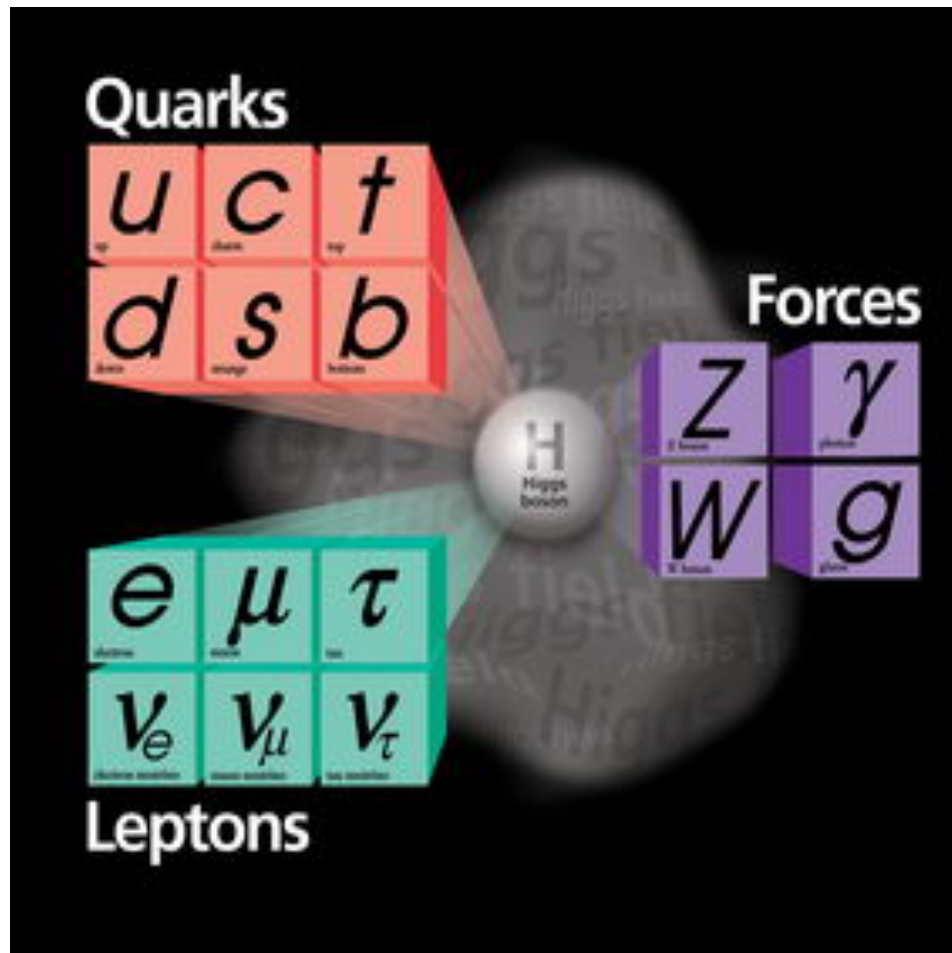


Az elemi részecskékről bővebben: AtomCsill 2007. szeptember 27.

Katz Sándor (ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék):

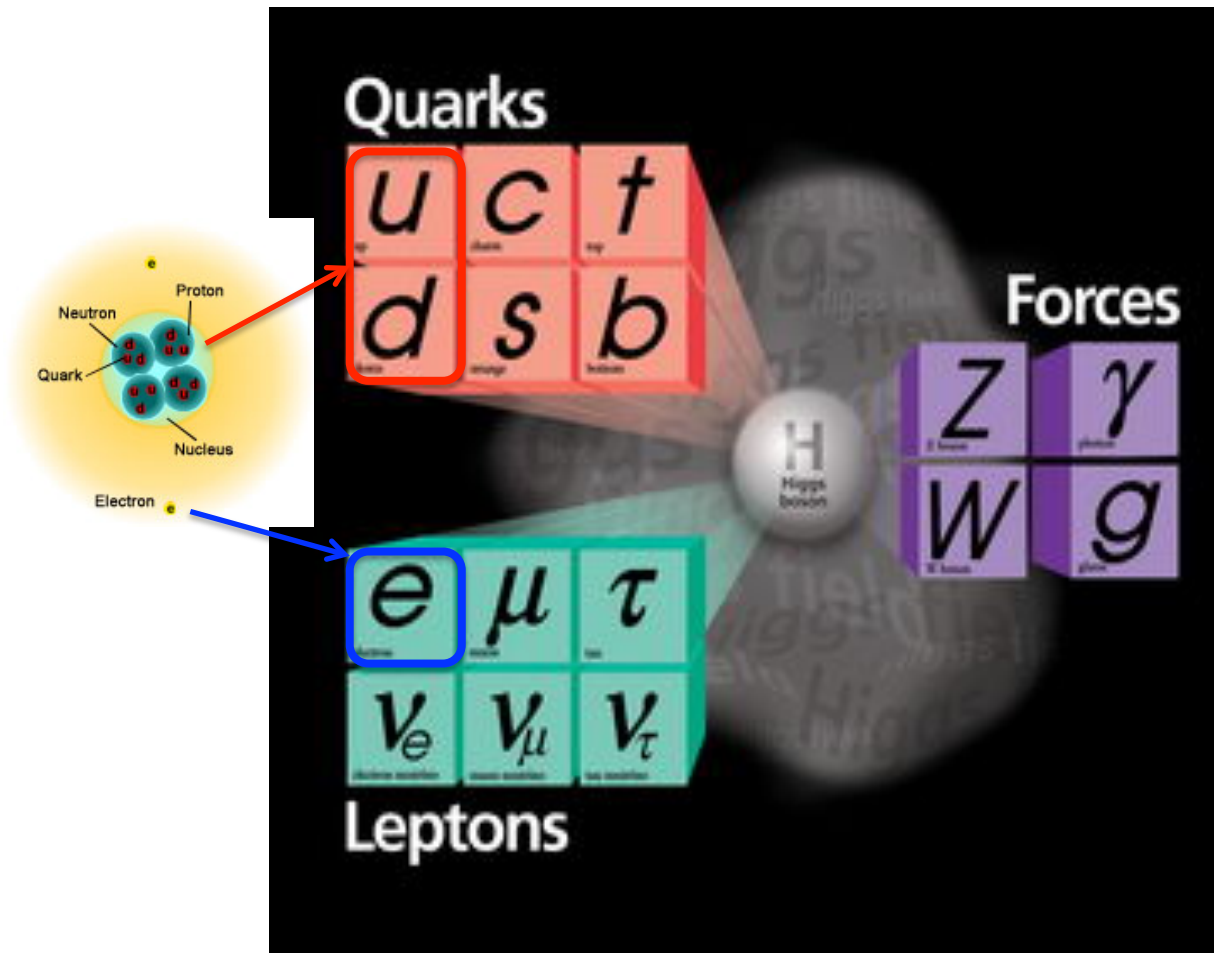
Az elemi részek fizikája és az anyag eredete az Univerzumban

Elemi részecskék és kölcsönhatásaik



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

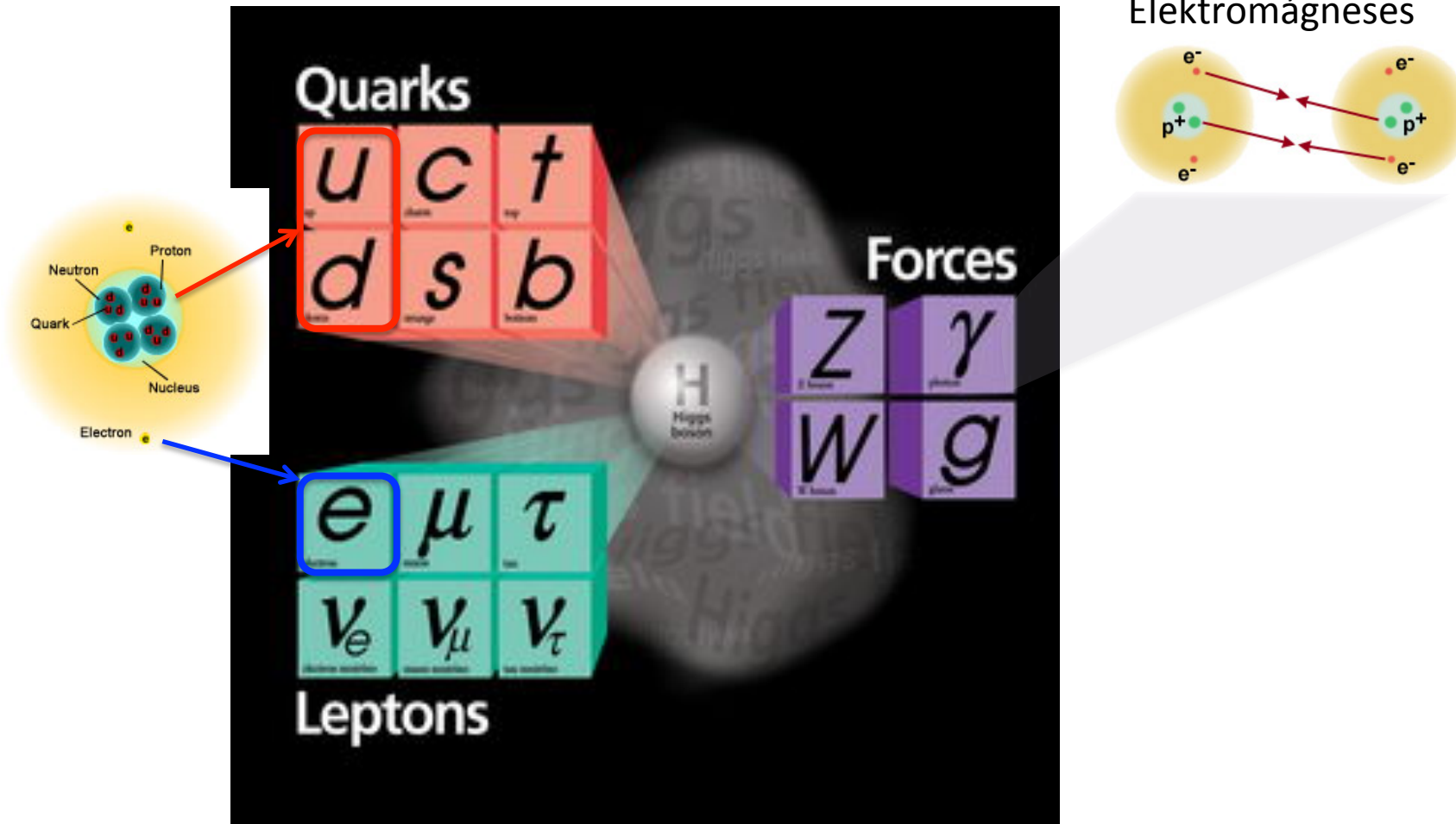
Az anyag építőkövei



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

Az anyag építőkövei

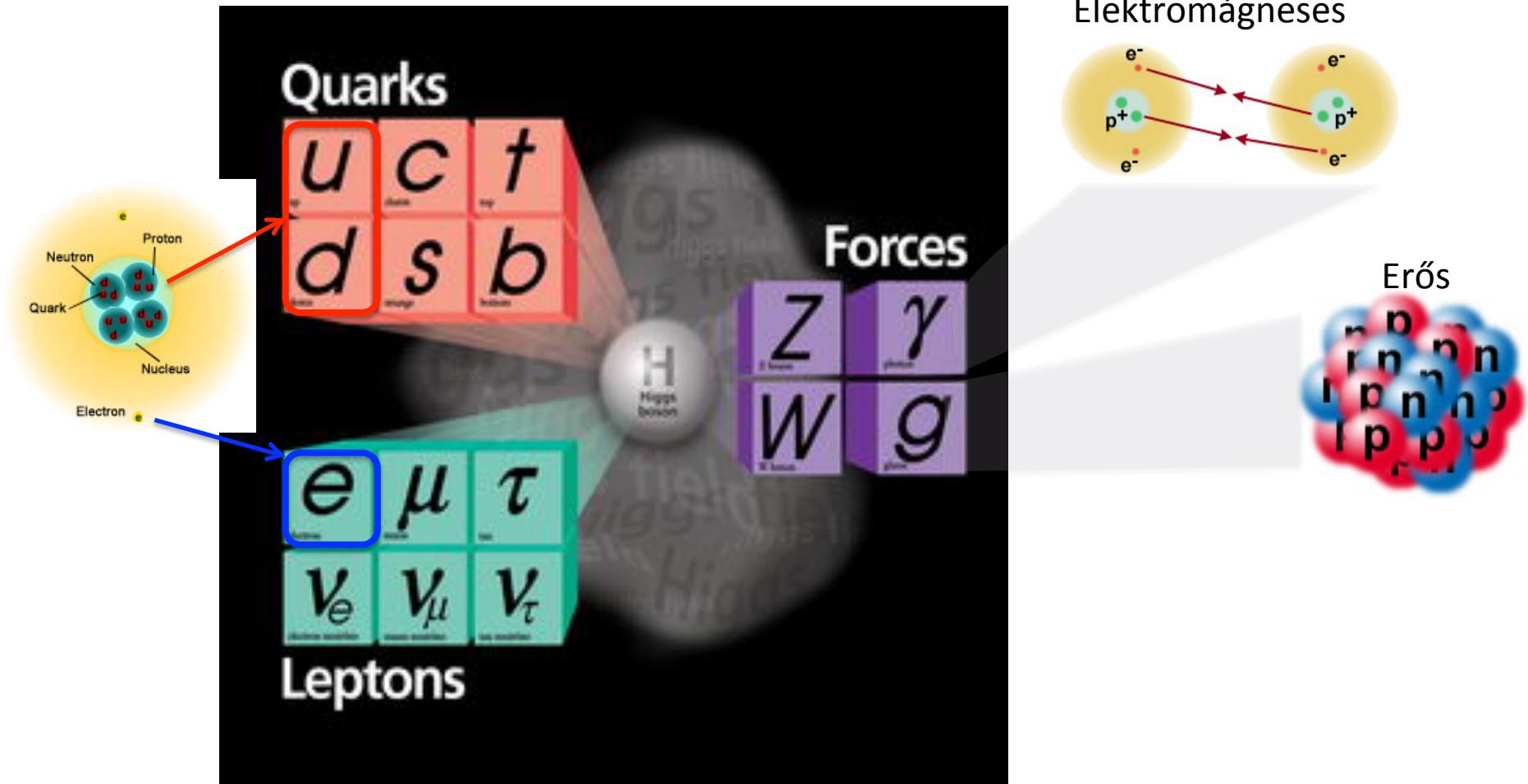
Kölcsönhatások közvetítői



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

Az anyag építőkövei

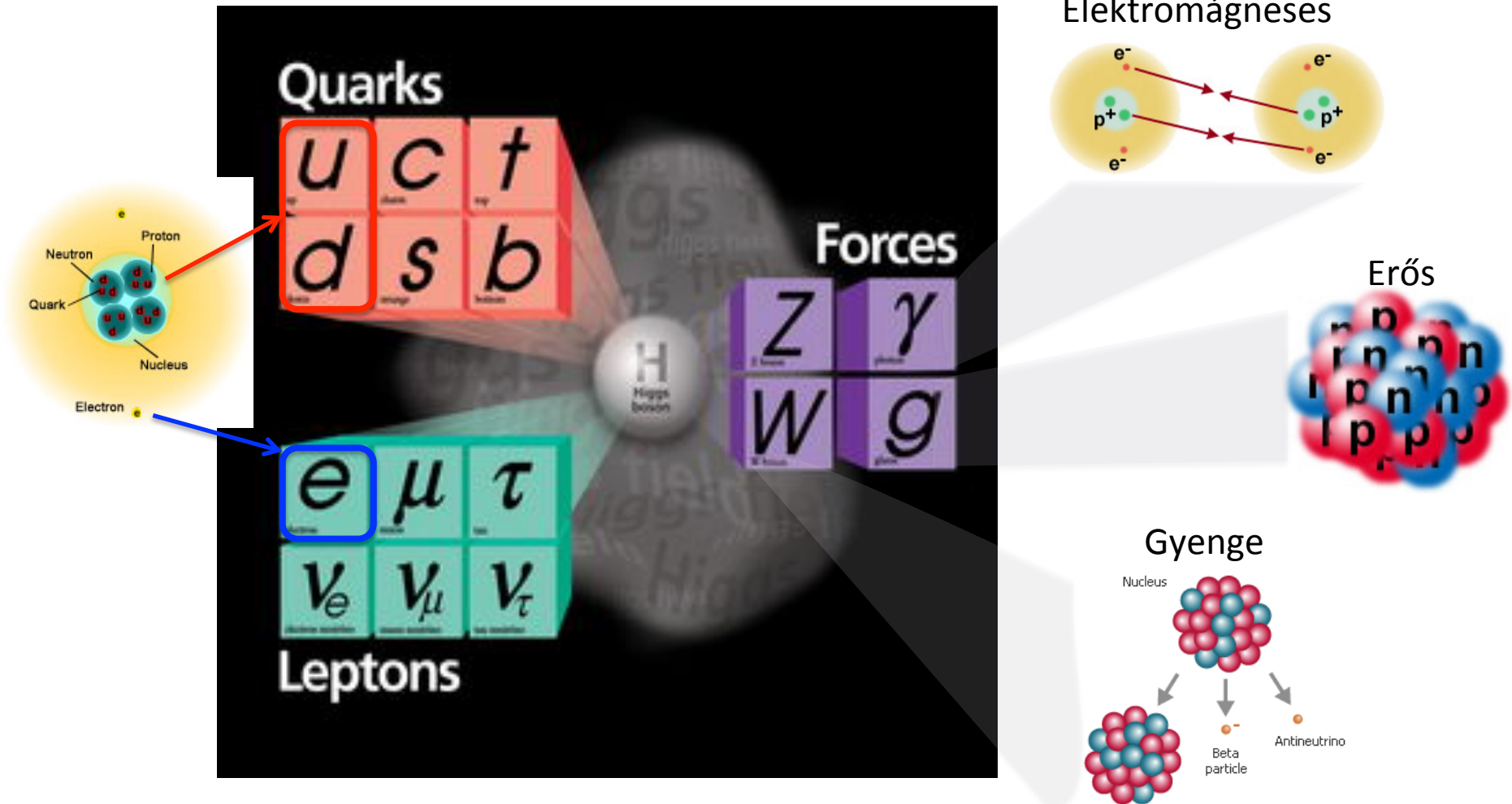
Kölcsönhatások közvetítői



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

Az anyag építőkövei

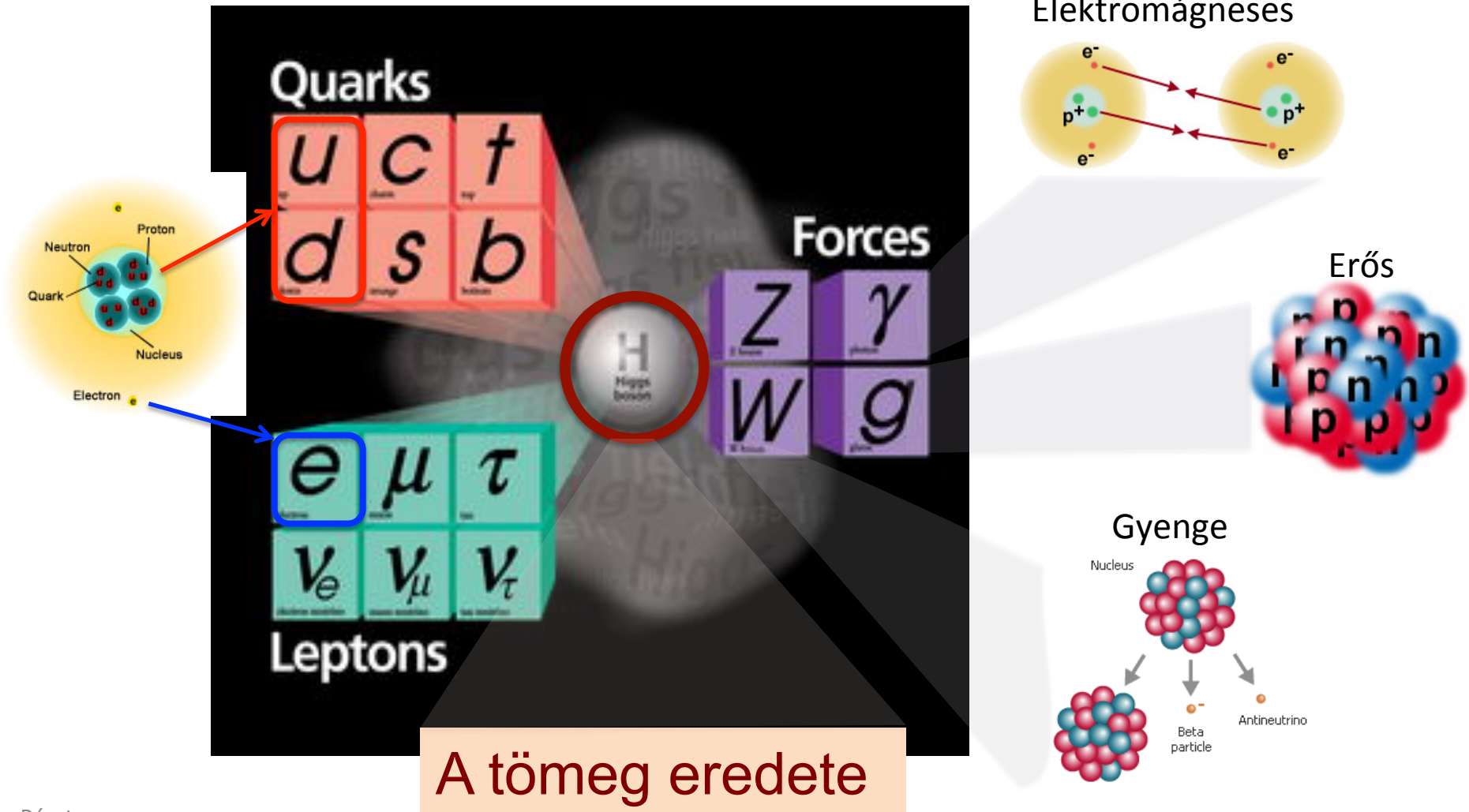
Kölcsönhatások közvetítői



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

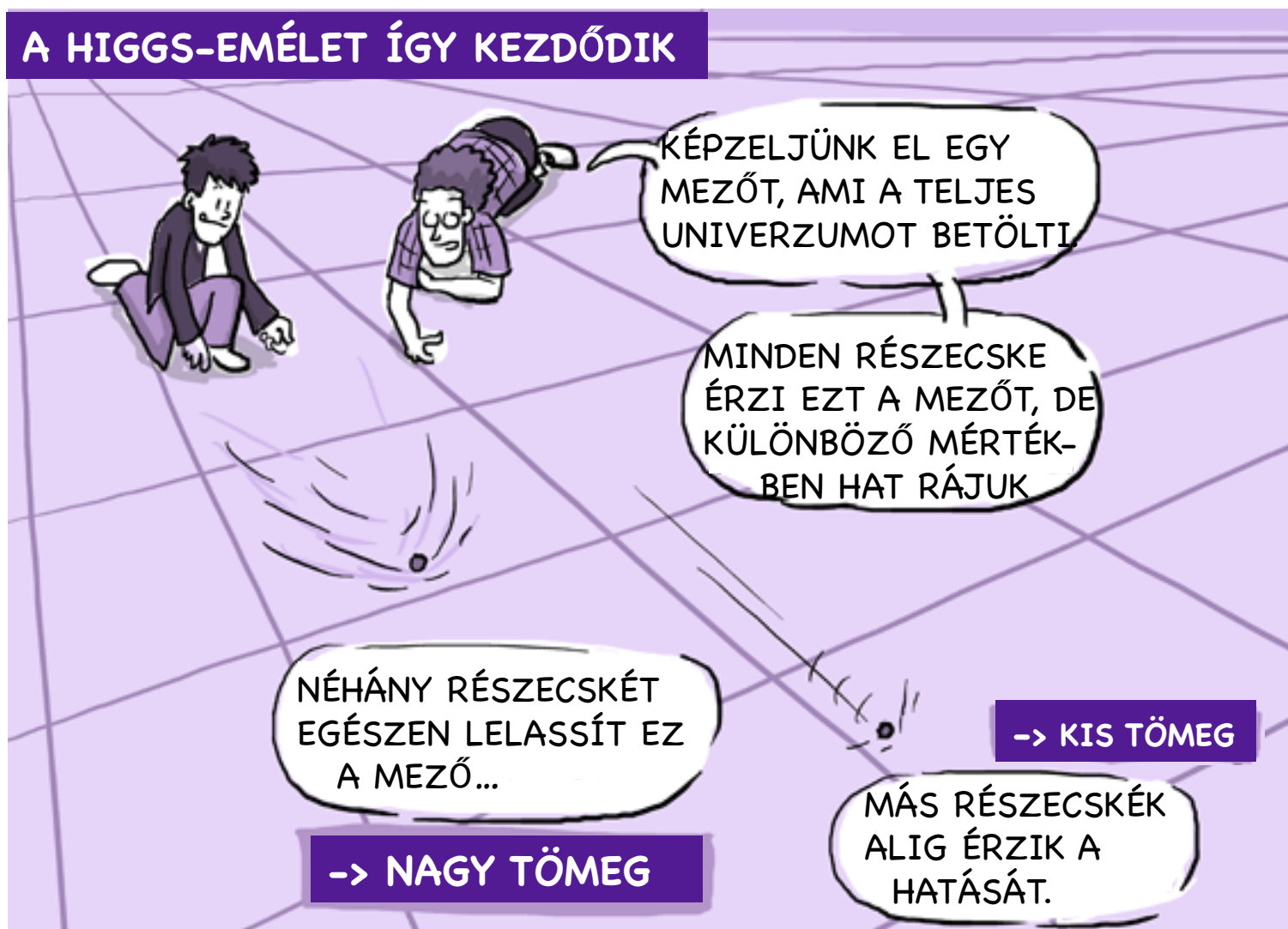
Az anyag építőkövei

Kölcsönhatások közvetítői



A Higgs-tér és a tömeg

A HIGGS-EMÉLET ÍGY KEZDŐDIK



Lásd még: AtomCsill 2012. szeptember 13.

A Higgs-tér



Az Erő egy energiamező, amit az élőlények összessége kelt. Körbevesz minket, átjár minket: összetartja a galaxist.



Englert, Higgs
2013

A Higgs-tér egy energiamező, amelyet Prof. Peter Higgs javasolt. Körbevesz minket, átjár minket: összetartja a galaxist. Tömeget adva neki,

- Ha nem lenne Higgs-tér → az elektron tömege nulla lenne
- nem képződhetnének stabil atomok
- nem alakulhatna ki élet az Univerzumban

2012. július 4.



The Economist
 JULY 27th - 31st 2012
 Economist.com

In praise of charter schools
 Britain's banking scandal spreads
 Volkswagen overtakes the rest
 A power struggle at the Vatican
 When Lonesome George met Nora

A giant leap for science

Finding the Higgs boson

Volume 716, Issue 1, 17 September 2012
 ISSN 0370-2698
 ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
 SciVerse ScienceDirect

Science

23 December 2012 \$18

BREAKTHROUGH of the YEAR
 The **HIGGS BOSON**

AAAS

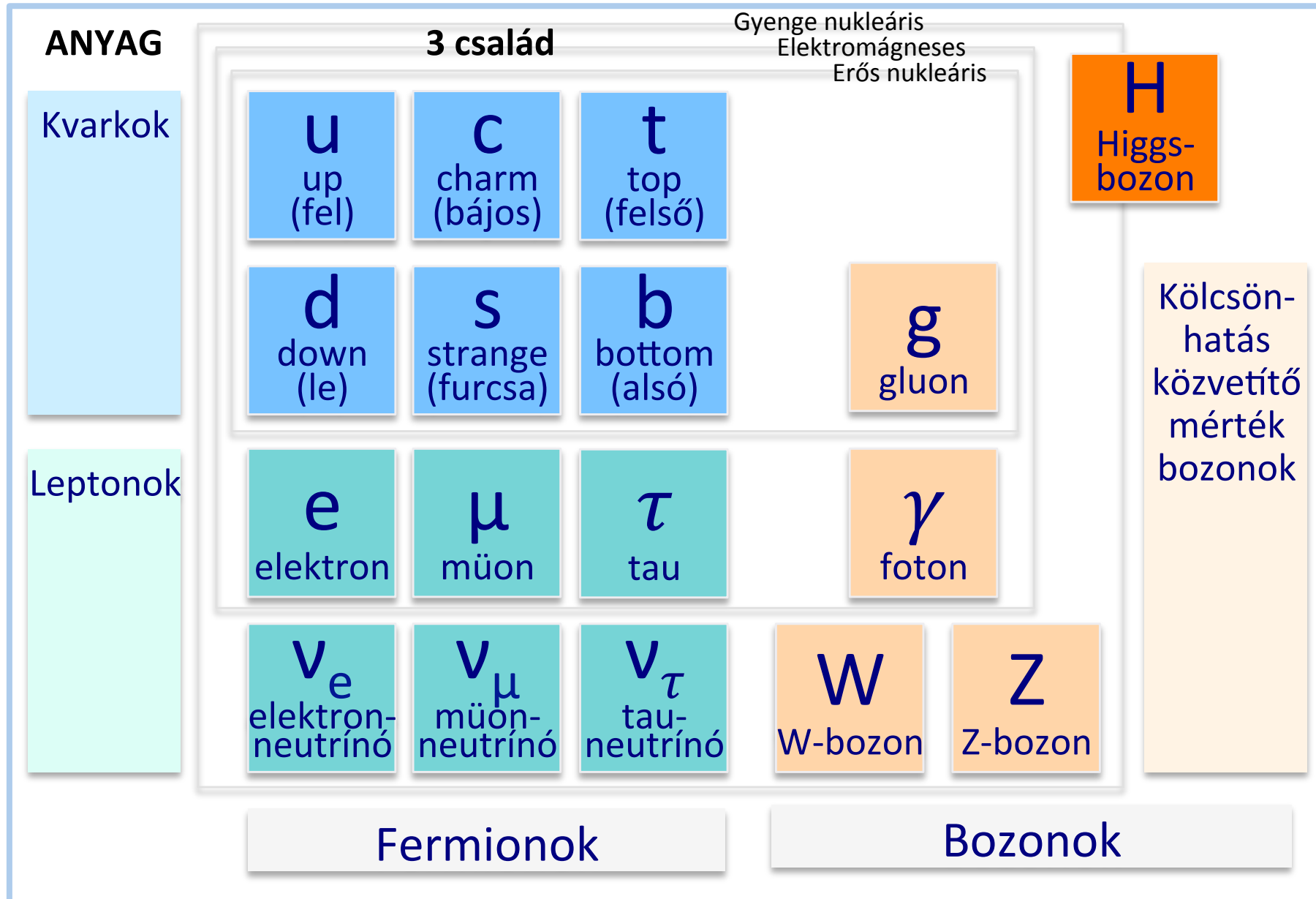


A 2013-as fizikai Nobel-díjat François Englert és Peter W. Higgs közösen nyerte el "Egy mechanizmus elméleti felfedezéséért, amely hozzájárul ahhoz, hogy megértsük a szubatomi részecskék tömegének az eredetét, és amelyet a közelmúltban megerősítettek a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél működő ATLAS és a CMS kísérletek a megjósolt elemi részecske felfedezésével." (magán fordítás)



2013. október 8.

Elemi részecskék a Standard Modellben



Status quo

- A részecskefizika Standard Modellje teljes a 2012-ben felfedezett Higgs-bozonnal, és jól leírja a laboratóriumokban, nagy energiájú részecskeütközésekben észlelt jelenségeket
- A mikro- és makrovilágot, az Univerzumot (egészen) jól értjük?!?



Nem egészen!

Kémiai elemek periódusos rendszere

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	
	I. A																	VIII. A	
1.	1 H 1,008 hidrogén																	2 He 4,0 hélium	
2.	3 Li 6,9 lítium	4 Be 9,0 berillium																	
3.	11 Na 23,0 nátrium	12 Mg 24,3 magnézium																	
4.	19 K 39,1 kálium	20 Ca 40,1 kalcium	21 Sc 45,0 szkandium	22 Ti 47,9 títán	23 V 50,9 vanádium	24 Cr 51,9 króm	25 Mn 54,9 mangán	26 Fe 55,8 vas	27 Co 58,9 kobalt	28 Ni 58,7 nikkel	29 Cu 63,5 réz	30 Zn 65,3 cink	31 Ga 69,7 gallium	32 Ge 72,5 germánium	33 As 74,9 arzén	34 Se 78,9 szelén	35 Br 79,9 bróm	36 Kr 83,8 kripton	
5.	37 Rb 85,5 rubídium	38 Sr 87,6 stroncium	39 Y 88,9 itrium	40 Zr 91,2 cirkónium	41 Nb 92,9 nióbium	42 Mo 95,9 molibdén	43 Tc (98) technécium	44 Ru 101,0 ruténium	45 Rh 102,9 ródium	46 Pd 106,4 palládium	47 Ag 107,8 ezüst	48 Cd 112,4 kadmium	49 In 114,8 indium	50 Sn 118,6 órn	51 Sb 121,7 antimon	52 Te 127,6 tellúr	53 I 126,9 jód	54 Xe 131,3 xenon	
6.	55 Cs 132,9 cézium	56 Ba 137,0 bárium	57 La 138,9 lantán	72 Hf 178,5 hafnium	73 Ta 180,9 tantál	74 W 183,8 volfrám	75 Re 186,2 rénium	76 Os 190,2 ozmium	77 Ir 192,2 irídium	78 Pt 195,0 platina	79 Au 196,9 arany	80 Hg 200,5 higany	81 Tl 204,3 tallium	82 Pb 207,1 ólom	83 Bi 208,9 bizmut	84 Po (210) polónium	85 At (210) asztácium	86 Rn (222) radon	
7.	87 Fr (223) francium	88 Ra (226) rádiium	89 Ac (227) aktínium	104 Rf (261) rutherfordium	105 Db (262) dubnium	106 Sg (263) seaborgium	107 Bh (262) bohrium	108 Hs (265) hassium	109 Mt (268) meitnerium	110 Uun (269) ununilium	111 Uuu (272) ununanium	112 Uub (277) ununbium							

rendszer szám — II — 0,9 — elektronegativitás

vegyjel — Na — 1 — elektronszerkezet

relatív atomtömeg — 23,0 — 2 —

nátrium — név

- s-mező eleme
- p-mező eleme
- d-mező eleme
- f-mező eleme

Az anyagok halmazállapota standard-állapotban (a szöglet halmazállapotát külön nem jelöljük)

58 Ce 140,1 cérium	59 Pr 140,9 praezodimium	60 Nd 144,2 neodimium	61 Pm (147) prometheum	62 Sm 150,4 szamárium	63 Eu 152,0 európium	64 Gd 157,2 gadolinium	65 Tb 158,9 terbium	66 Dy 162,5 diszpróziium	67 Ho 164,9 holmium	68 Er 167,2 erbiium	69 Tm 168,9 tullium	70 Yb 173,0 itterbium	71 Lu 174,9 lutécium
90 Th 232,0 tórium	91 Pa (231) protaktínium	92 U 238,0 urán	93 Np (237) neptúnium	94 Pu (242) plutónium	95 Am (243) americium	96 Cm (247) kürium	97 Bk (247) berkélium	98 Cf (249) kalifornium	99 Es (254) einsteinium	100 Fm (253) fermium	101 Md (256) mendelévium	102 No (254) nobélium	103 Lr (257) laurencium

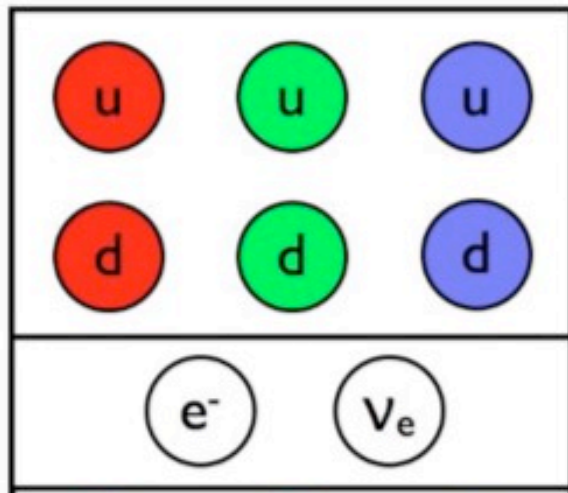
Elemi részecskék bővebben

Kvarkok: nem csupán elektromosan töltöttek, az erős kölcsönhatás szintöltésével is rendelkeznek
 Anti-részecskék: azonos tömeg, ellentétes töltések

Színes kvarkok	u	u	u	c	c	c	t	t	t				
	d	d	d	s	s	s	b	b	b				
Leptonok	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ							
	\bar{u}	\bar{u}	\bar{u}	\bar{c}	\bar{c}	\bar{c}	\bar{t}	\bar{t}	\bar{t}				
Színes anti-kvarkok	\bar{d}	\bar{d}	\bar{d}	\bar{s}	\bar{s}	\bar{s}	\bar{b}	\bar{b}	\bar{b}				
	\bar{e}^+	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\mu}^+$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\tau}^+$	$\bar{\nu}_\tau$							
Anti-leptonok							γ	W^-	W^+	Z^0	H		
Bozonok	g	g	g	g	g	g	g	g	γ	W^-	W^+	Z^0	H

Nyitott kérdések az Univerzumról

- **Összefüggéseket** keresünk a részecskék, kölcsönhatások mért tulajdonságai között: ezek, ahogy régen a periódusos rendszer esetében is, rámutathatnak mélyebb struktúrákra
 - **Miért van három fermion család? Van esetleg több is?**
 - **Egy családon belül miért ad az elektromos töltések összege 0-át?**



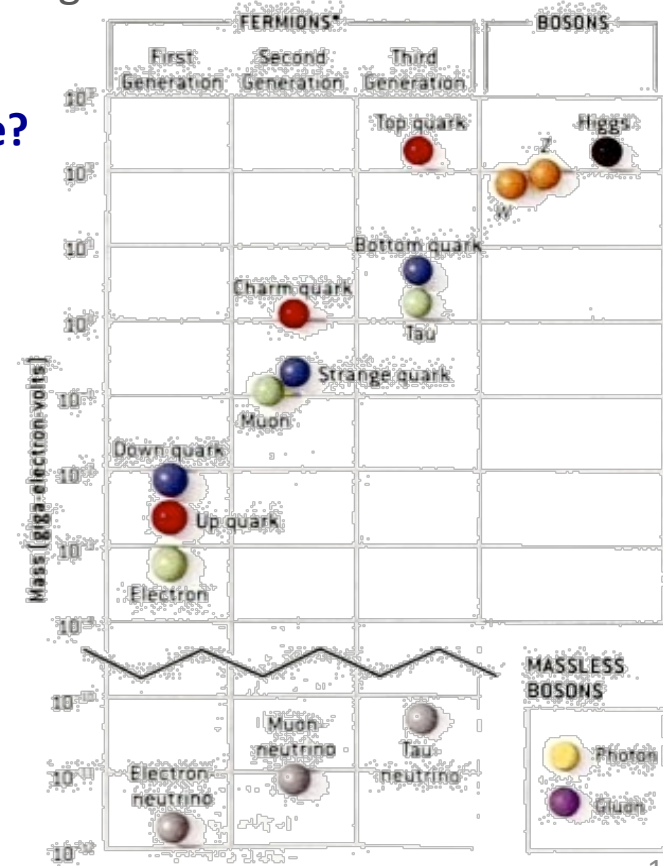
$$3 * +2/3 = +2$$

$$3 * -1/3 = -1$$

$$-1 + 0 = -1$$

Nyitott kérdések az Univerzumról

- **Összefüggéseket** keresünk a részecskék, kölcsönhatások mért tulajdonságai között: ezek, ahogy régen a periódusos rendszer esetében is, rámutathatnak mélyebb struktúrákra
 - Miért van három fermion család? Van esetleg több is?
 - Egy családon belül miért ad az elektromos töltések összege 0-át?
 - **Miért olyan különböző tömegűek a fermionok?**
 - **Miért van a neutrínóknak kicsi, de nem nulla tömege?**



Nyitott kérdések az Univerzumról

- **Összefüggéseket** keresünk a részecskék, kölcsönhatások mért tulajdonságai között: ezek, ahogy régen a periódusos rendszer esetében is, rámutathatnak mélyebb struktúrákra
 - Miért van három fermion család? Van esetleg több is?
 - Egy családon belül miért ad az elektromos töltések összege 0-át?
 - Miért olyan különböző tömegűek a fermionok?
 - Miért van a neutrínóknak kicsi, de nem nulla tömege?
 - **Miért olyan gyenge a gravitációs kölcsönhatás?**

A kölcsönhatások tulajdonságai					
tulajdonság	erős		gyenge (elektrogyenge)	elektromágneses	gravitációs (nem az SM része)
	alapvető	visszamaradó			
amire hat	színtöltés	lásd magyarázat	íz	elektromos töltés	tömeg, energia, lendület
ezek a részecskék érzik	kvarkok, gluonok	hadronok	kvarkok, leptonok	elektr. töltöttek	minden
közvetítő részecske	gluonok	mezonok	W^-, W^+, Z^0 -bozon	γ -foton	graviton (még nem figyelték meg)
relatív erősség két up kvarkra	25	–	0,8	1	10^{-41}
10 ⁻¹⁸ m					
3·10 ⁻¹⁷ m	60	–	10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴¹
két proton az atommagban	–	20	10 ⁻⁷	1	10 ⁻³⁶

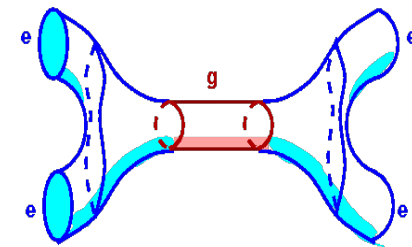
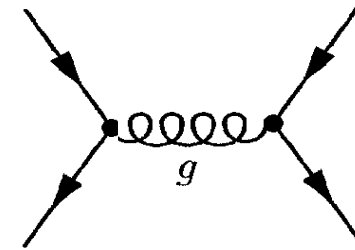
“Hierarchia probléma”: gravitációs erőnek a többi erőhöz viszonyított gyengesége

Nyitott kérdések az Univerzumról

- Egy minden ismert kölcsönhatást magába foglaló **alapvető elméletet** keresünk („Theory of Everything”): a Standard Modell nem tartalmazza a gravitációt
 - Talán húrelméleti alapokon nyugszik?

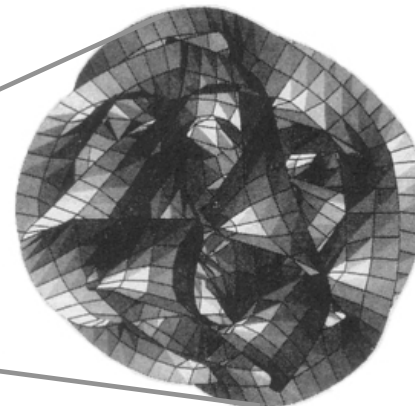
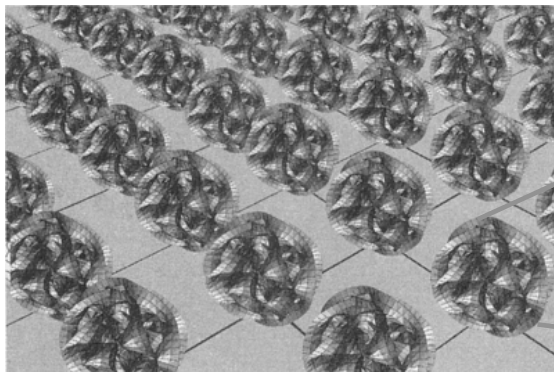
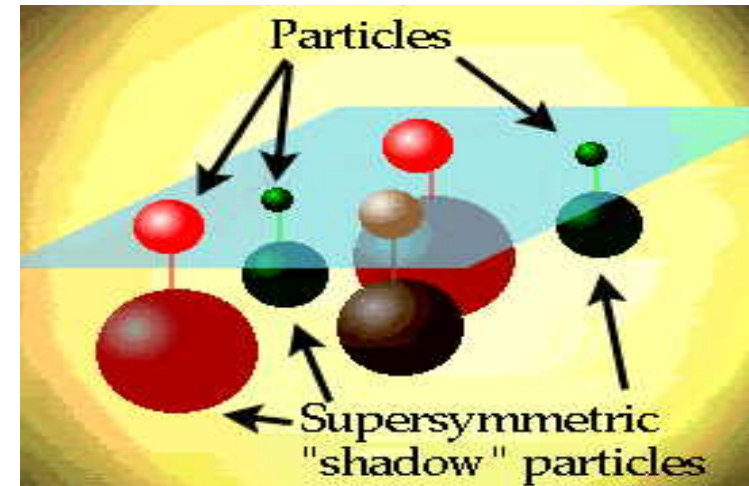
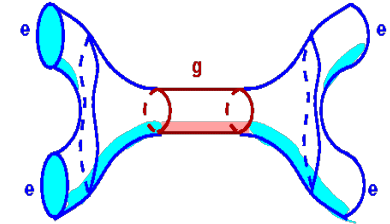
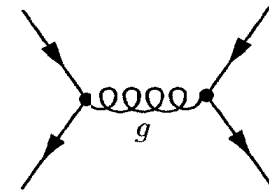
Húrelmélet

- A kvantum-gravitáció elméletéhez össze kell egyeztetni az általános relativitáselméletet és a kvantummechanikát
- A relativisztikus kvantum-mechanika (KM) szerint a kölcsönhatások a speciális relativitáselmélet sima tér-idéjében pontszerűen (0-távolságon) mennek végbe
- Az általános relativitás elmélet szerint a tér-időt a benne lévő anyag alakítja
- A KM nem alkalmazható a gravitonra, a gravitáció feltételezett spin-2 közvetítő részecskéjére: a graviton viselkedése 0-távolságon nem értelmezhető
- Húrelméletben a részecskék nem pontszerűek, hanem kis elemi hurok rezgései
- A kölcsönhatások a részecskék között nem 0-távolságon, hanem a hurok méretének skáláján mennek végbe, ezzel feloldódhat az általános relativitáselmélet és a kvantum-mechanika közti ellentmondás
- A részecskék tulajdonságait az elemi hurok rezonancia frekvenciája határozza meg: különböző rezgésekhez különböző elemi részecskék tartoznak



Húr-elmélet?!?

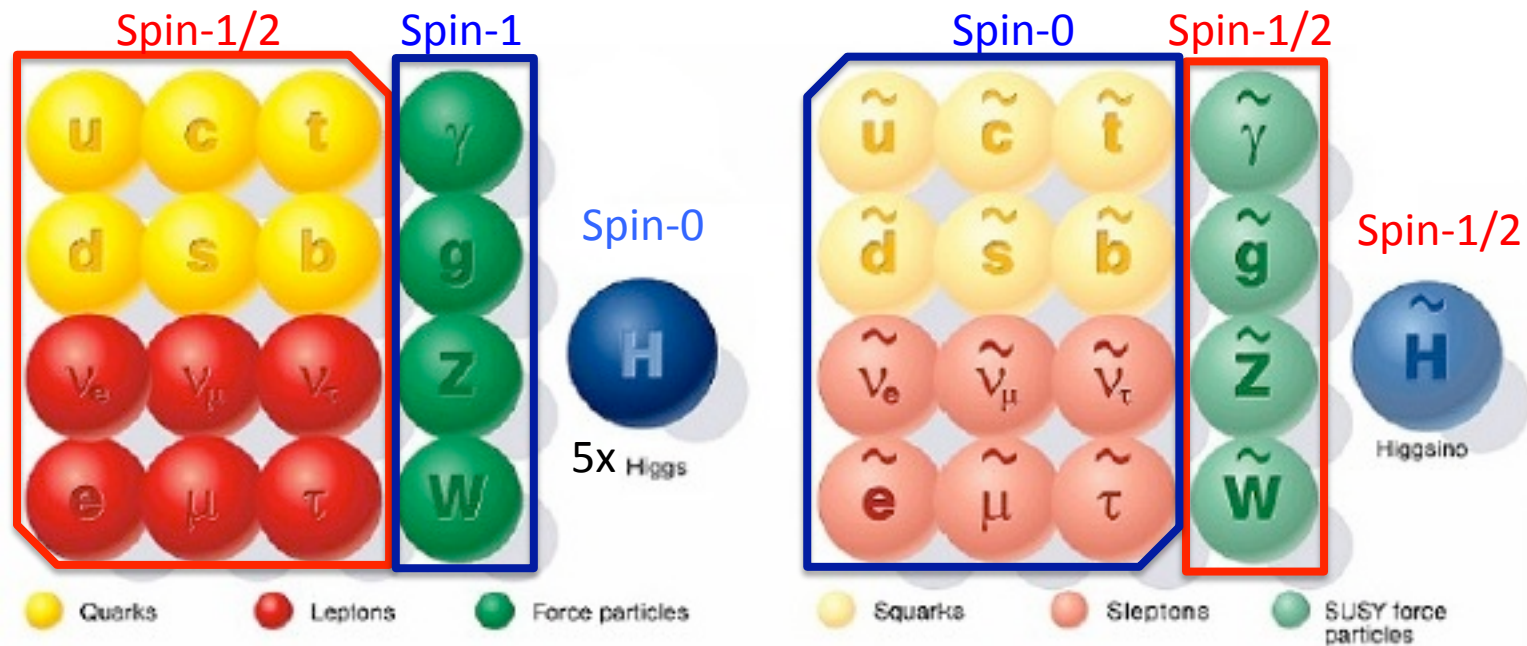
- Egy lehetséges jelölt a relativisztikus kvantummechanika és a gravitáció egyesítésére... DE...
- Természetes energia skála:
Planck energia $\sim 10^{19}$ GeV
- Nem tanulmányozható közvetlenül az LHC-n (sem jövőbeli részecskegyorsítóknál)!!!
- Általános jóslatok
 - Szuperszimmetria
 - További térbeli dimenziók (11-dimenziós tér-idő)



Extra spatial dimensions:
artistic representation of
6D Calabi-Yau space

Szuperszimmetria (SUSY)

- Szimmetria a fermionok (mint a SM anyag-részecskéi) és a bozonok (mint a SM kölcsönhatásközvetítói) között
- A tér-idő legáltalánosabb szimmetriája
- Minden ismert részecskének jóval egy eddig még nem észlelt pártját
- A legkönnyebb SUSY partner ideális sötét anyag jelölt!

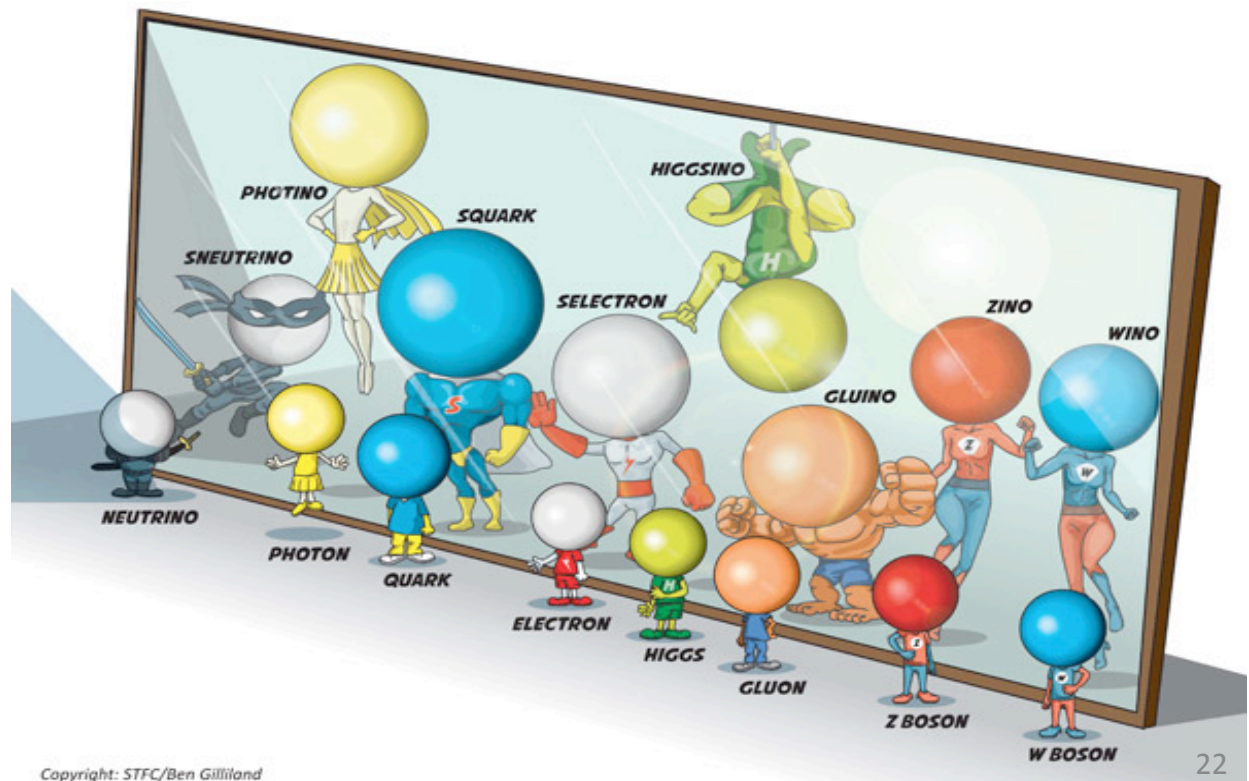


Standard particles

SUSY particles

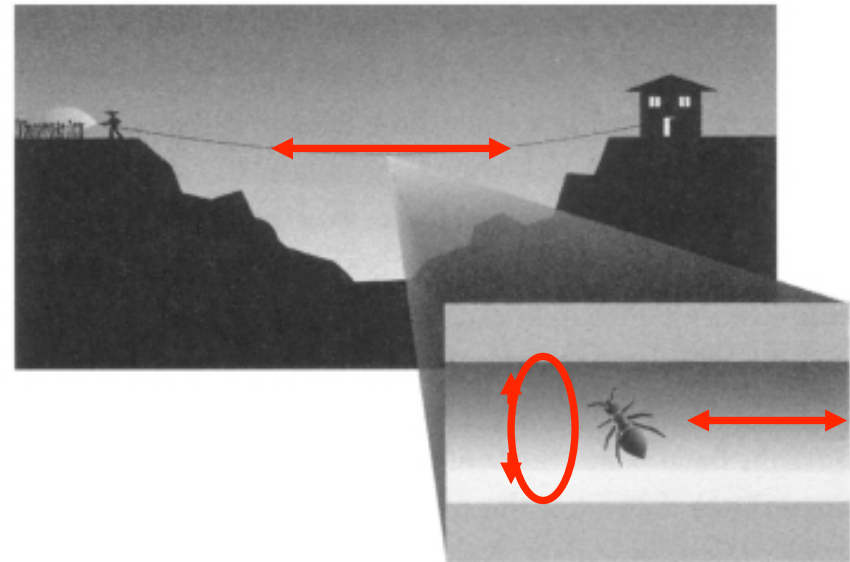
Szuperszimmetria (SUSY)

- Szimmetria a fermionok (mint a SM anyag-részecskéi) és a bozonok (mint a SM kölcsönhatásközvetítői) között
- A tér-idő legáltalánosabb szimmetriája
- Minden ismert részecskének jóval egy eddig még nem észlelt pártját
- A legkönnyebb SUSY partner (ha elektromosan semleges és gyengén kölcsönható) ideális sötét anyag jelölt!



További térbeli dimenziók

- Mi a dimenzió?
Azon koordináták száma, amelyek szükségesek egy pont helyének megadásához, térben és időben
- Hogyan lehetségesek további / extra térbeli dimenziók (ED)?
- A 3D tér minden pontjába képzeljünk el nagyon kicsi felcsavarodott (kompakt) dimenziókat
- A nagyon kicsi dimenziókat nem tudjuk észlelni és hatásuk sem érezhető nagyobb skálákon



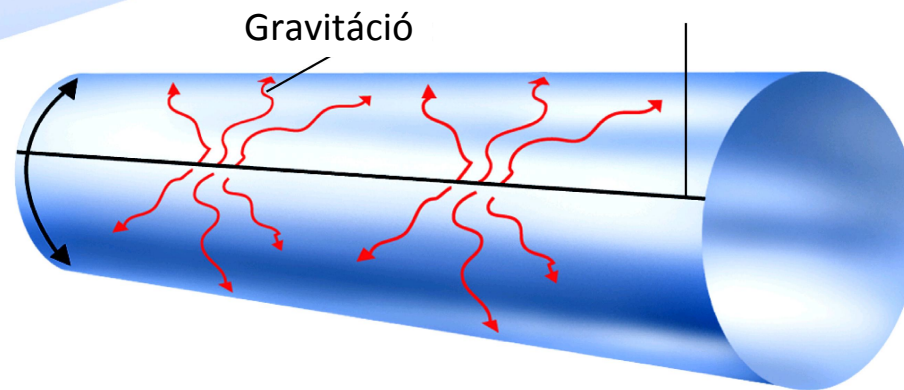
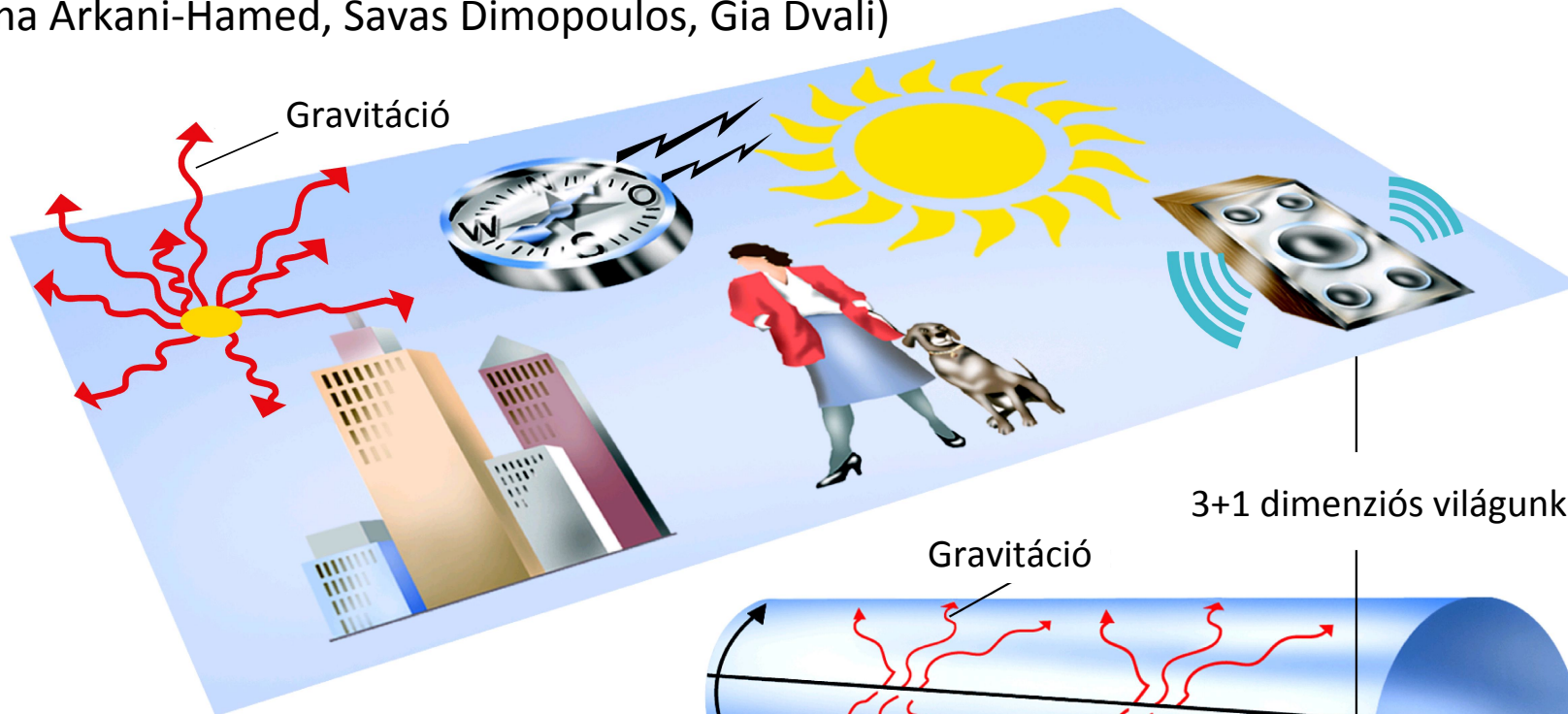
Miért jók az extra dimenziók?

- 1919-ben Theodor Kaluza a gravitáció és az elektromágnesesség egyesítésének problémáján dolgozva észrevette, hogy egy új felcsavarodott dimenziót hozzáadva a szokásos általános relativitáselméletbeli tér-időhöz vissza kaphatjuk a Maxwell-egyenleteket
- Bár az Oskar Klein által finomított elmélet ellentmond a megfigyeléseknek, az ED-k kulcsfontosságúak a gravitáció és a többi kölcsönhatás egyesítéséhez
- A húrelmélet 6 (7) ED létezését jósolja
- 1998-ban az ED-s elméletek újra felvirágoztak, mert felmerült a sub-mm méretű, a közeljövő technikájával észlelhető dimenziók létezésének lehetősége

Bővebben: AtomCsill 2009. február 12.
Cynolter Gábor (ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék):
Extra dimenziók

A nagy extra dimenziók ADD modellje

(Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos, Gia Dvali)



Extra dimenzió feltekert, kicsi (sugár R)

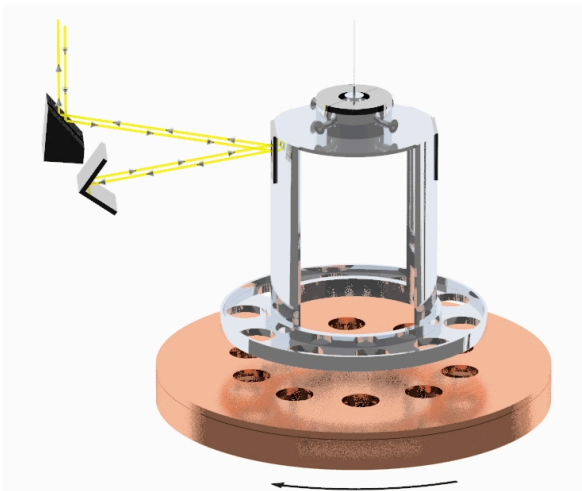
Gravitáció gyenge 3+1 dimenzióban a rejtett térfogat miatt:

$$M_{\text{Planck}}^2 = V_n M_{\text{Planck}[4+n]}^{2+n}$$

Gravitációs potenciál módosul $r \ll R$ esetén:

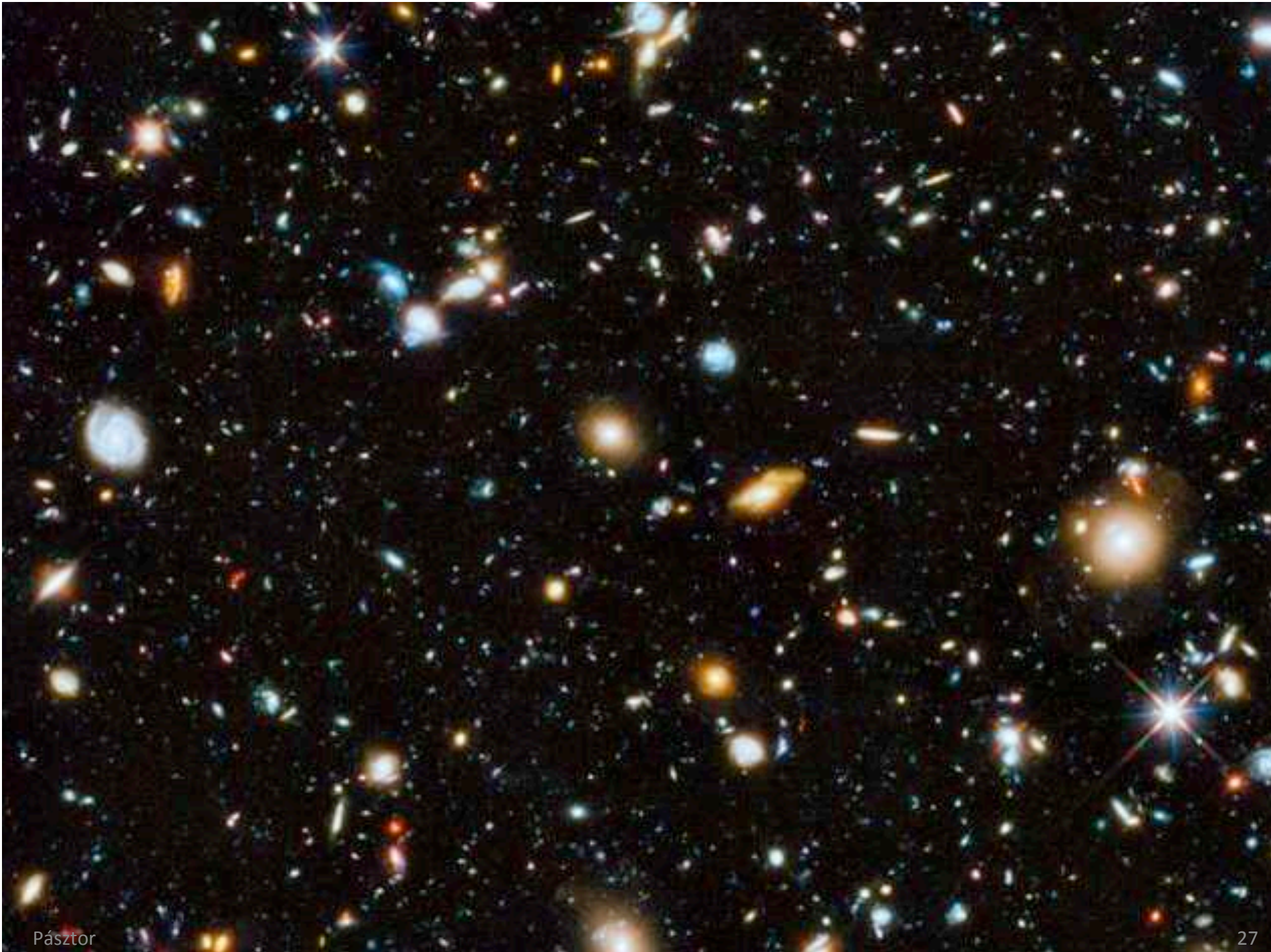
$$V(r) = m_1 m_2 / M_{\text{Planck}[4+n]}^{2+n} r^{1+n}$$

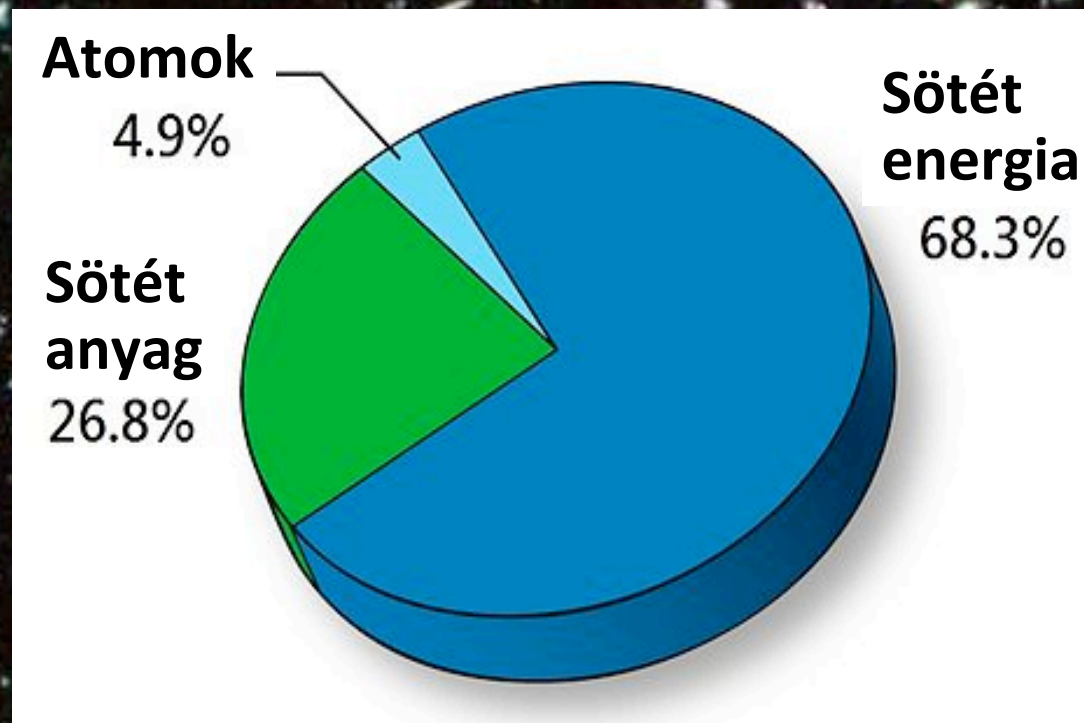
Öt-Wash kísérlet (Uni Washington, Seattle), ~ 0.2 mm



Nyitott kérdések az Univerzumról

- Egy minden ismert kölcsönhatást magába foglaló **alapvető elméletet** keresünk („Theory of Everything”): a Standard Modell nem tartalmazza a gravitációt
 - Talán húrelméleti alapokon nyugszik?
 - **Vannak további térbeli dimenziók?**
 - **Szuperszimmetrikus a természet?**
 - **Léteznek eddig fel nem fedezett, új kölcsönhatások?**





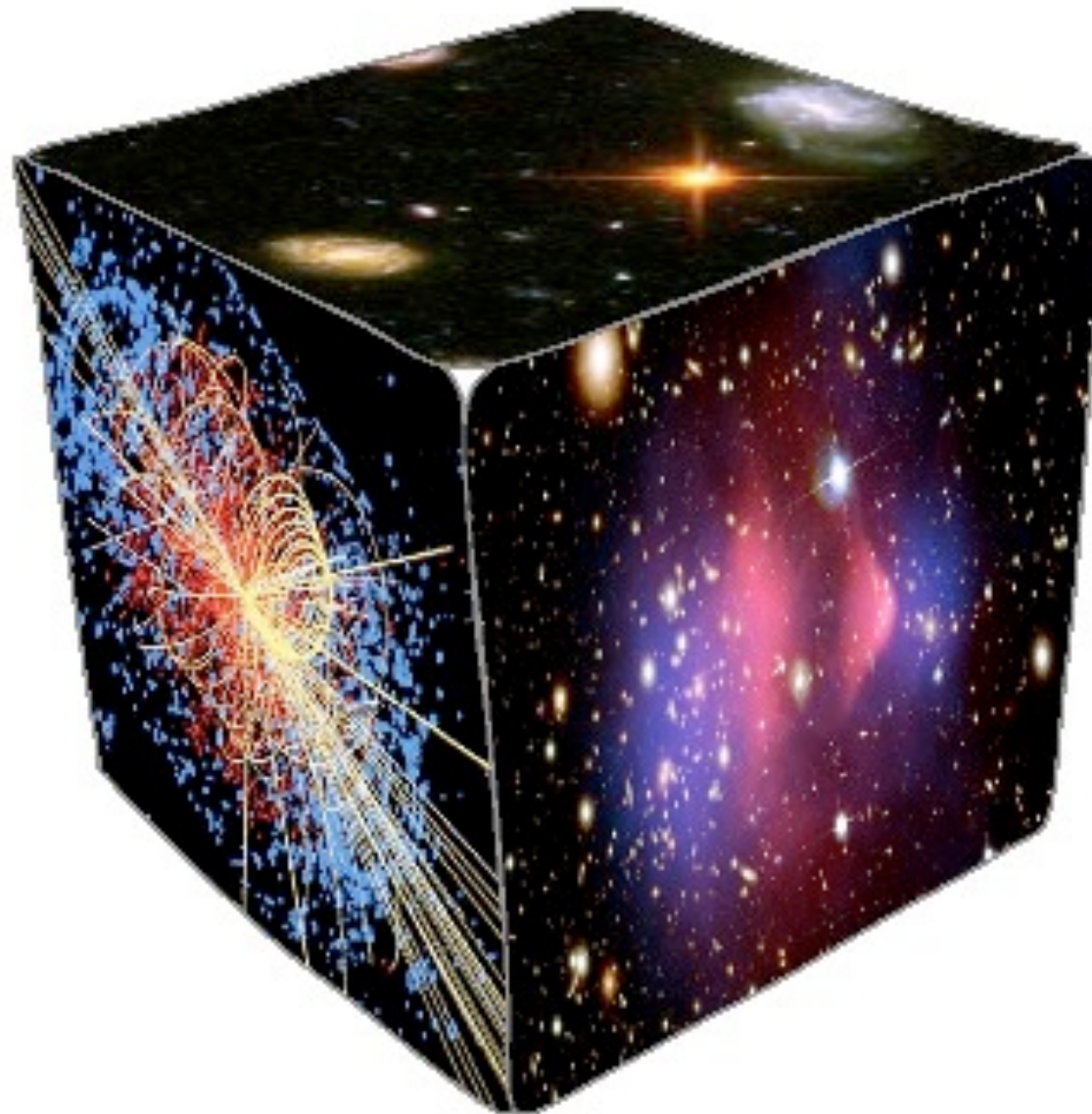
Lásd még: AtomCsill 2016. szeptember 8.
Dávid Gyula (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék): A sötét anyag nyomában

Nyitott kérdések az Univerzumról

- Egy minden ismert kölcsönhatást magába foglaló **alapvető elméletet** keresünk („Theory of Everything”): a Standard Modell nem tartalmazza a gravitációt
 - Talán húrelméleti alapokon nyugszik?
 - Vannak további térbeli dimenziók?
 - **Szuperszimmetrikus a természet?**
 - Léteznek eddig fel nem fedezett, új kölcsönhatások?
- Mi az Univerzum 95%?
Mi a sötét anyag? A sötét energia?
- Miért dominál az anyag az antianyag fölött a természetben?

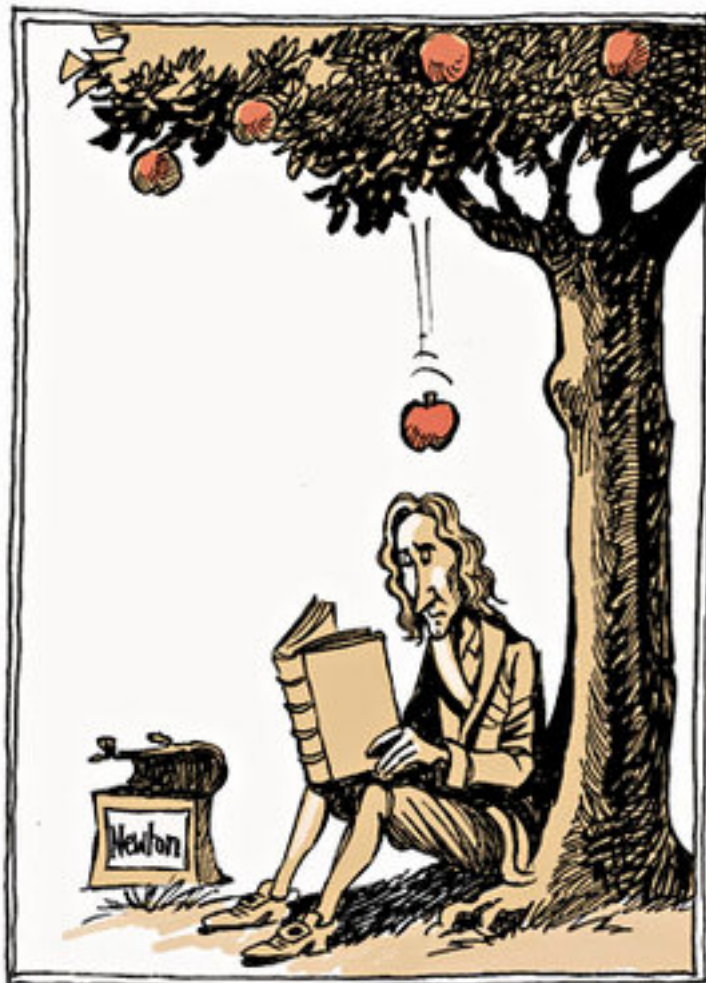


Csináljunk sötét anyagot a laboratóriumban!

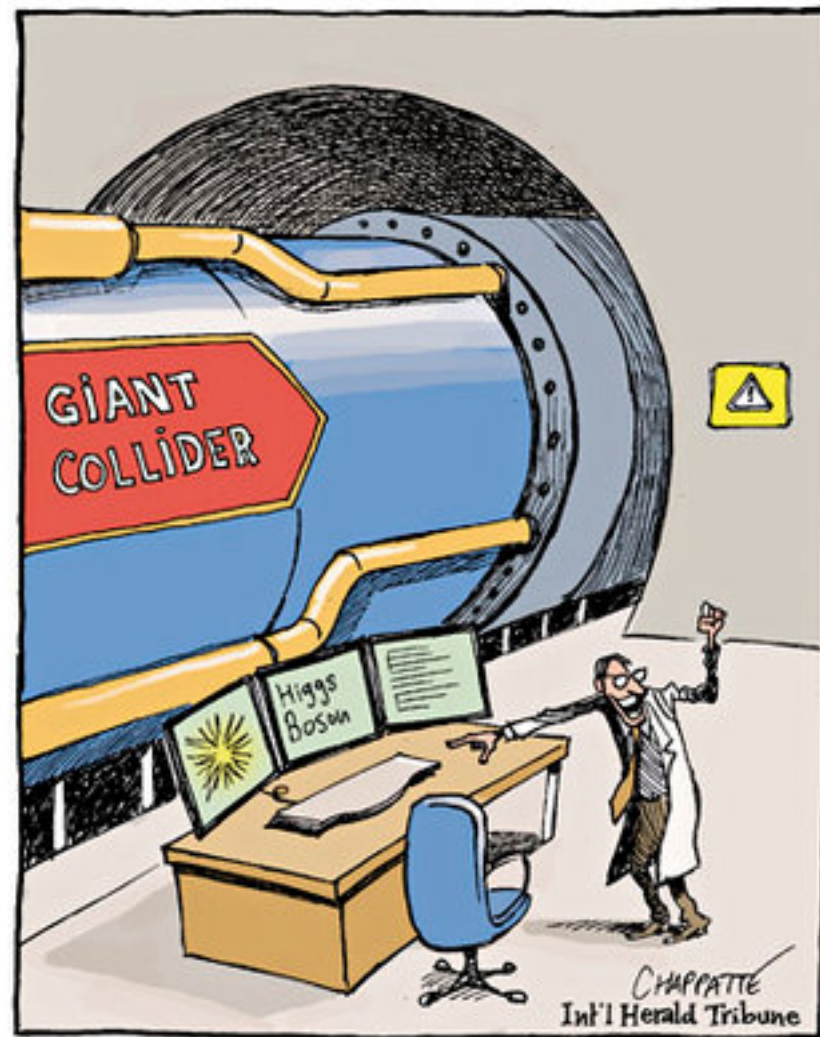


A világot megváltoztató ütközések

Collisions That Changed The World

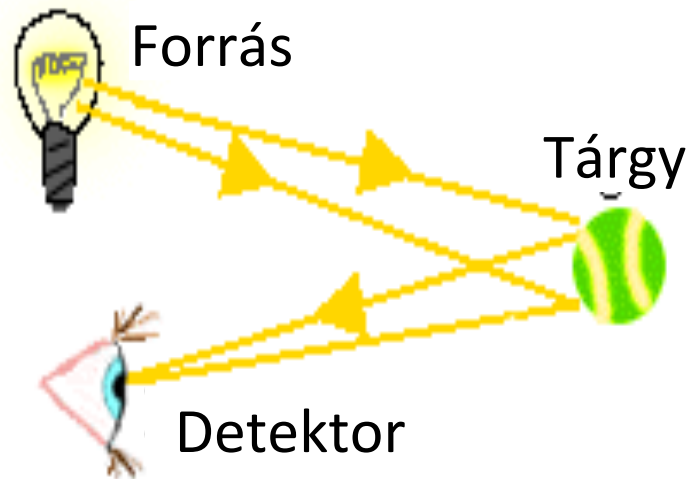


Gravitáció, Newton, 1665



Higgs-bozon (a tömeg eredete), CERN, 2012

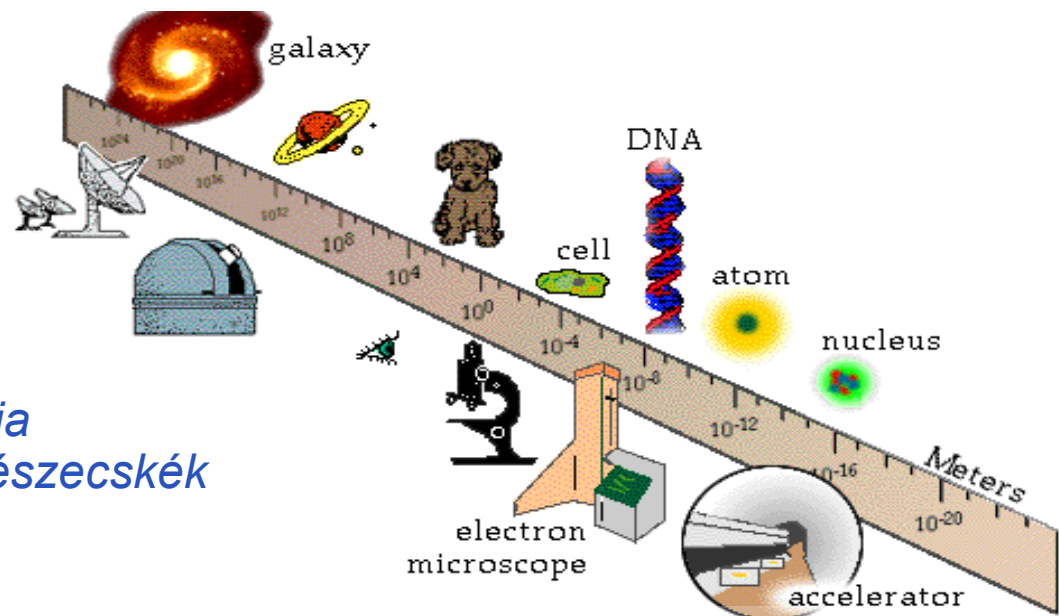
Hogyan vizsgálhatjuk a (mikro)világot?



- A képminőség függ a forrás hullámhosszától, minél kisebb λ , annál kisebb tárgyakat vizsgálhatunk
- Látható fény: $\lambda \sim 500$ nm
- Egy atomnál kisebb objektum vizsgálatához nagy energiájú részecskék szükségesek:
 $\lambda = h/p$ (anyag hullámok)

A részecskegyorsítók két feladatot is megoldanak:

- ❑ *A nagy impulzusú (= kis hullámhosszúságú) részecskék kis méreteket is 'látnak'*
- ❑ *A felgyorsított részecskék energiája becsapódáskor új, nagy tömegű részecskék keltésére fordítódhat ($E = mc^2$)*



Bővebben: AtomCsill 2007. december 20., Veres Gábor (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék),
Milyen eszközökkel figyelhetők meg a világ legkisebb alkotórészei?

CERN Accelerator Complex

A gyűrűk ura

Lake Geneva

Large Hadron Collider
(LHC)

Geneva
Airport

CERN LAB 2 (France)

Super Proton Synchrotron
(SPS)

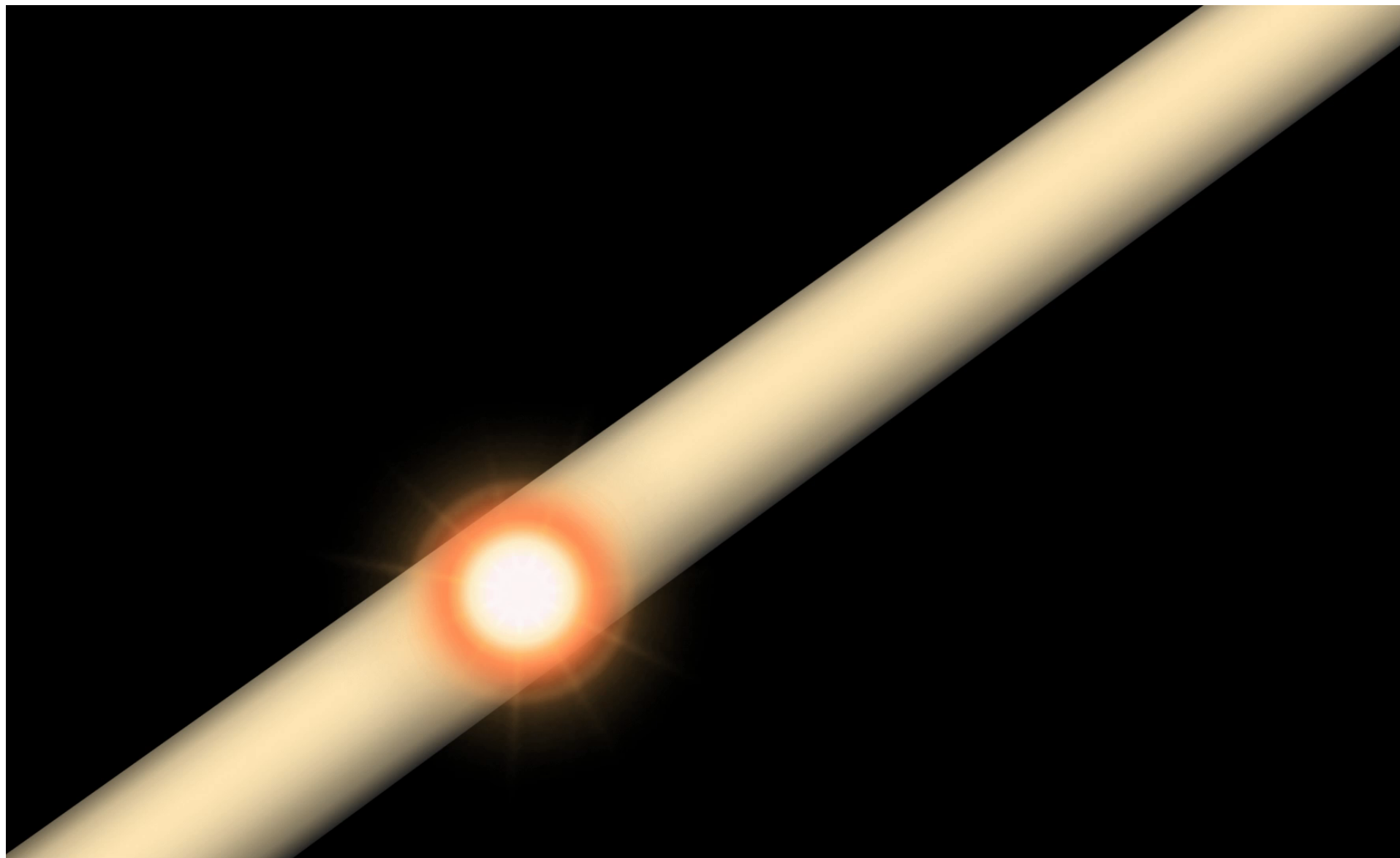
Proton Synchrotron
(PS)

27km long

150m underground

CERN LAB 1 (Switzerland)

Nagyenergiás ütközések az LHC-ben



A kísérleti berendezés: CMS @ LHC

Tömegközépponti energia: 14 TeV

13 TeV @ 2015-2016

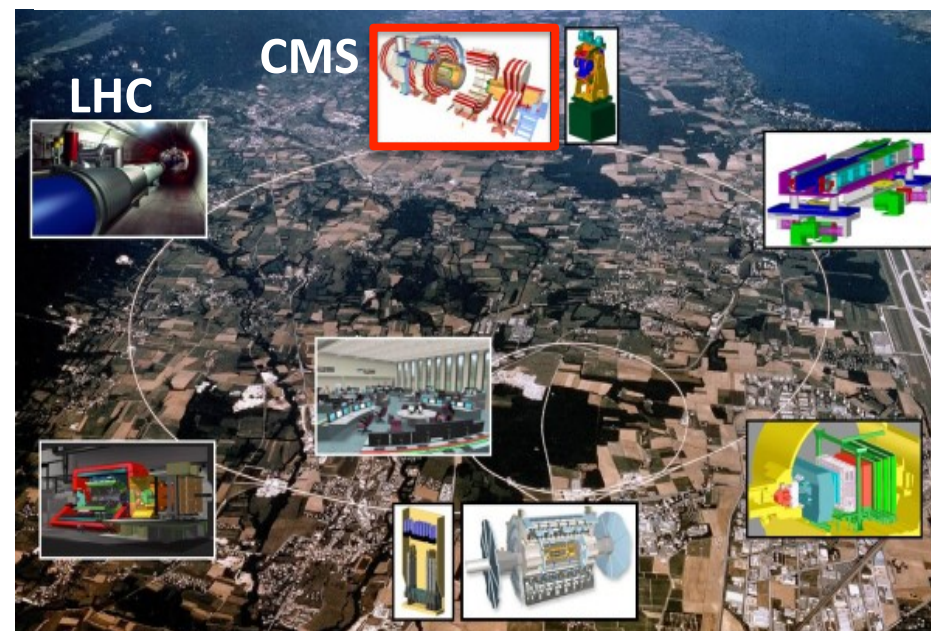
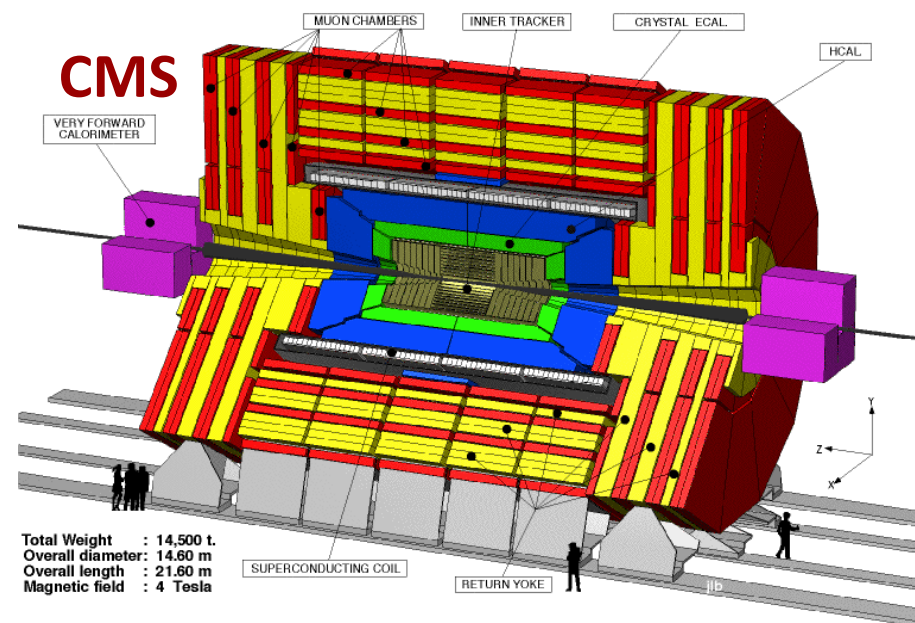
Csomag találkozás: 40 MHz

Csomag/nyaláb: 2808

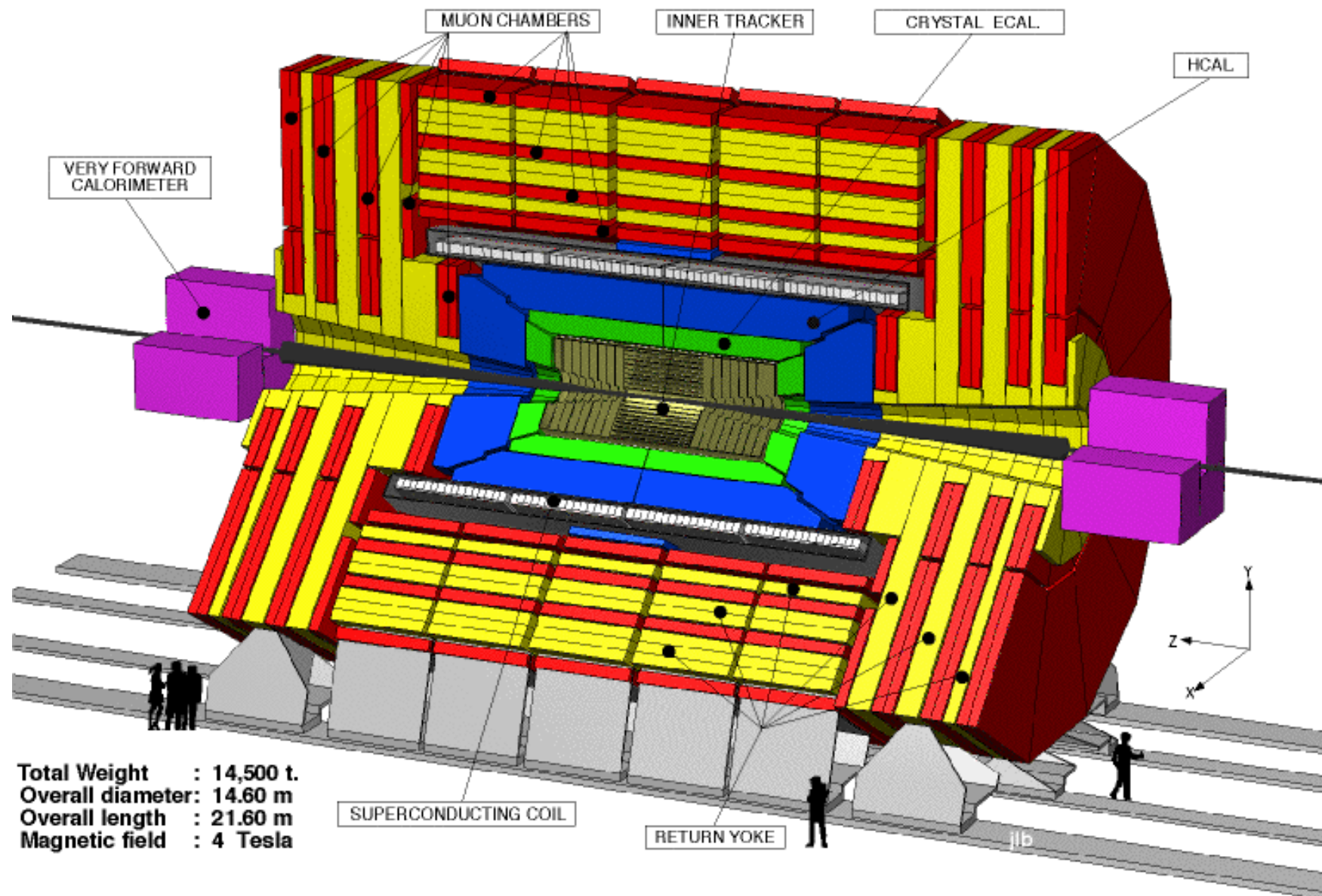
Proton/csomag: $1.15 \cdot 10^{11}$

Pillanatnyi luminozitás: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

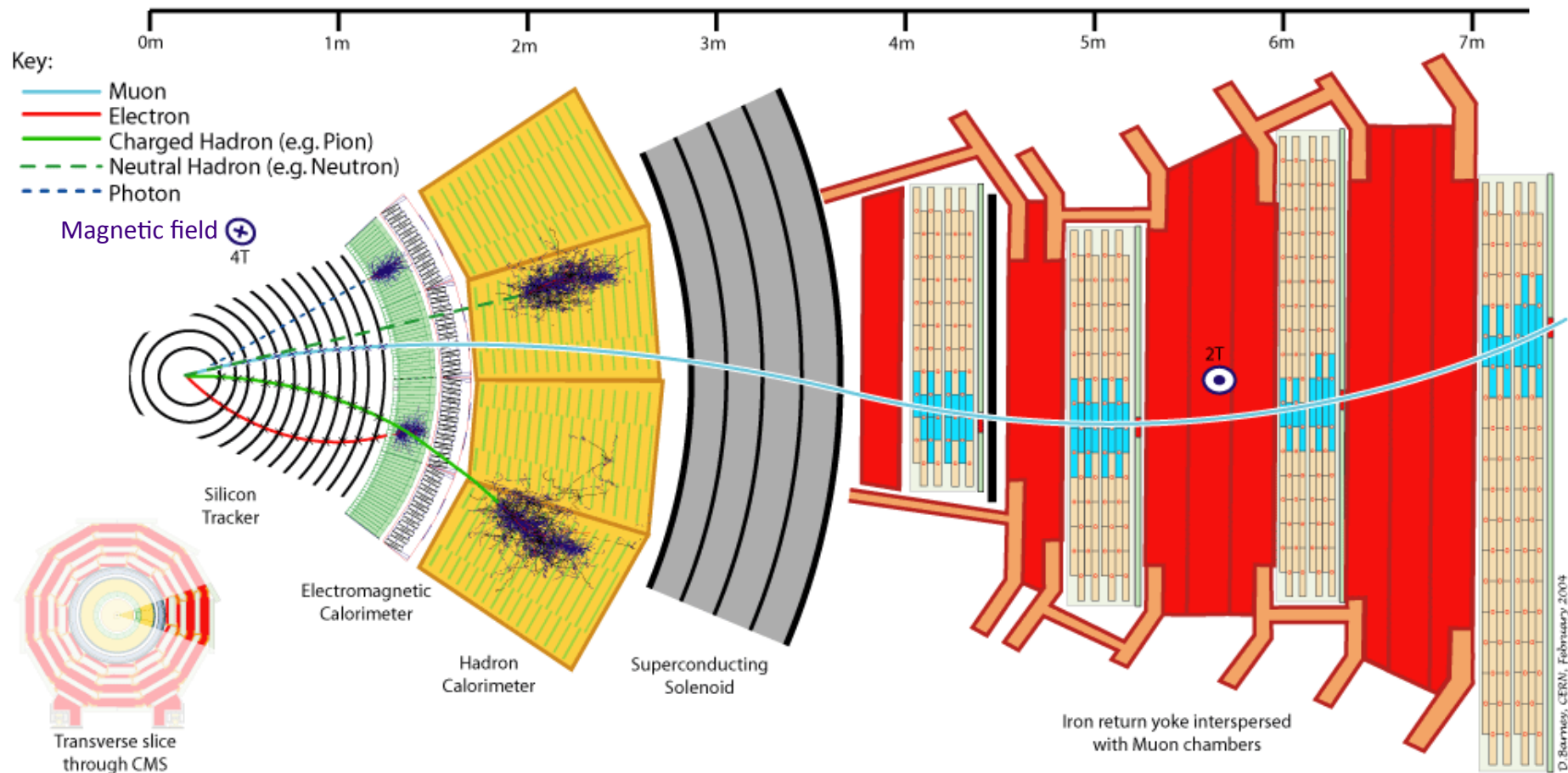
túlteljesítve: $1.5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



A kísérleti berendezés: CMS @ LHC

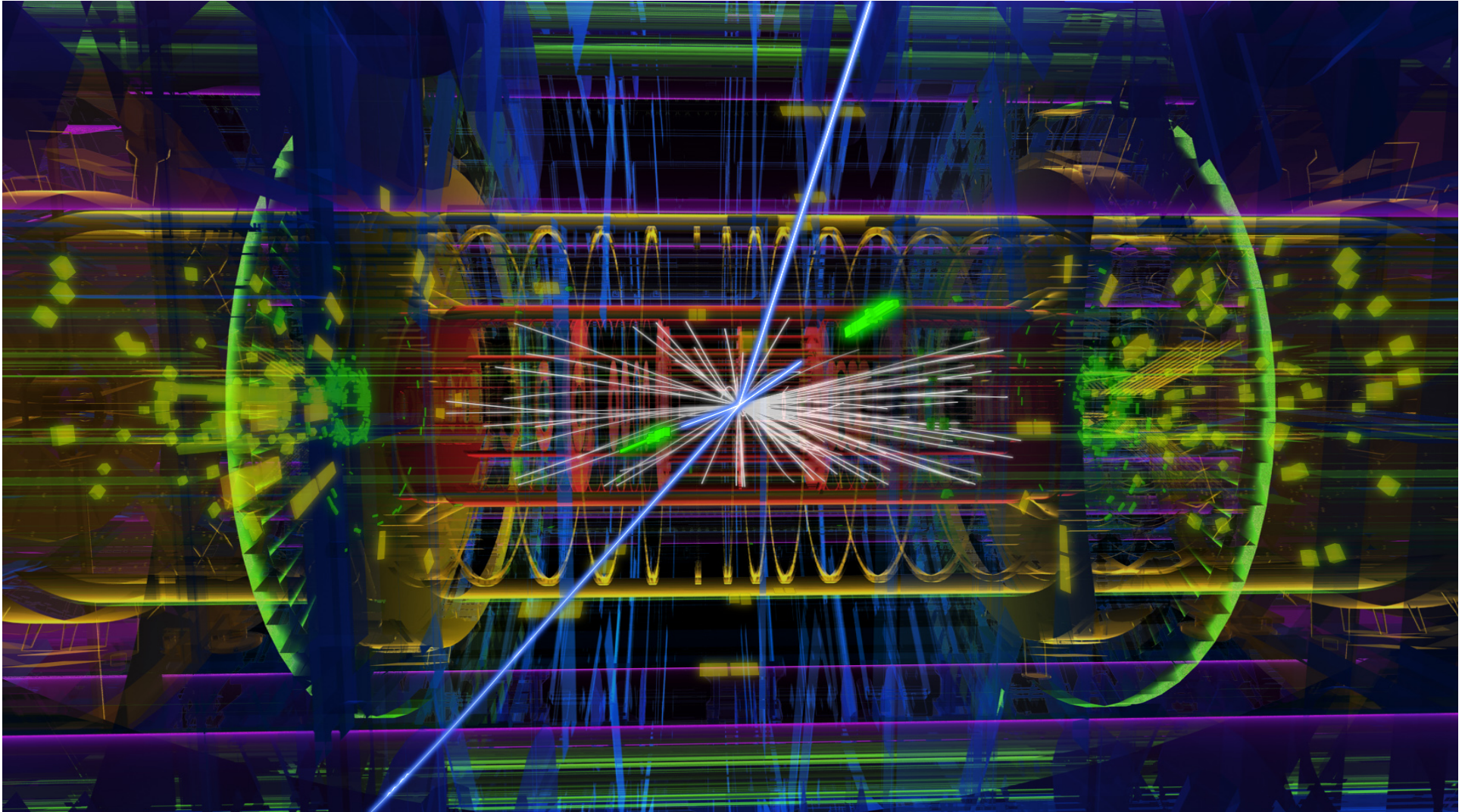


Részecske detektálás és azonosítás



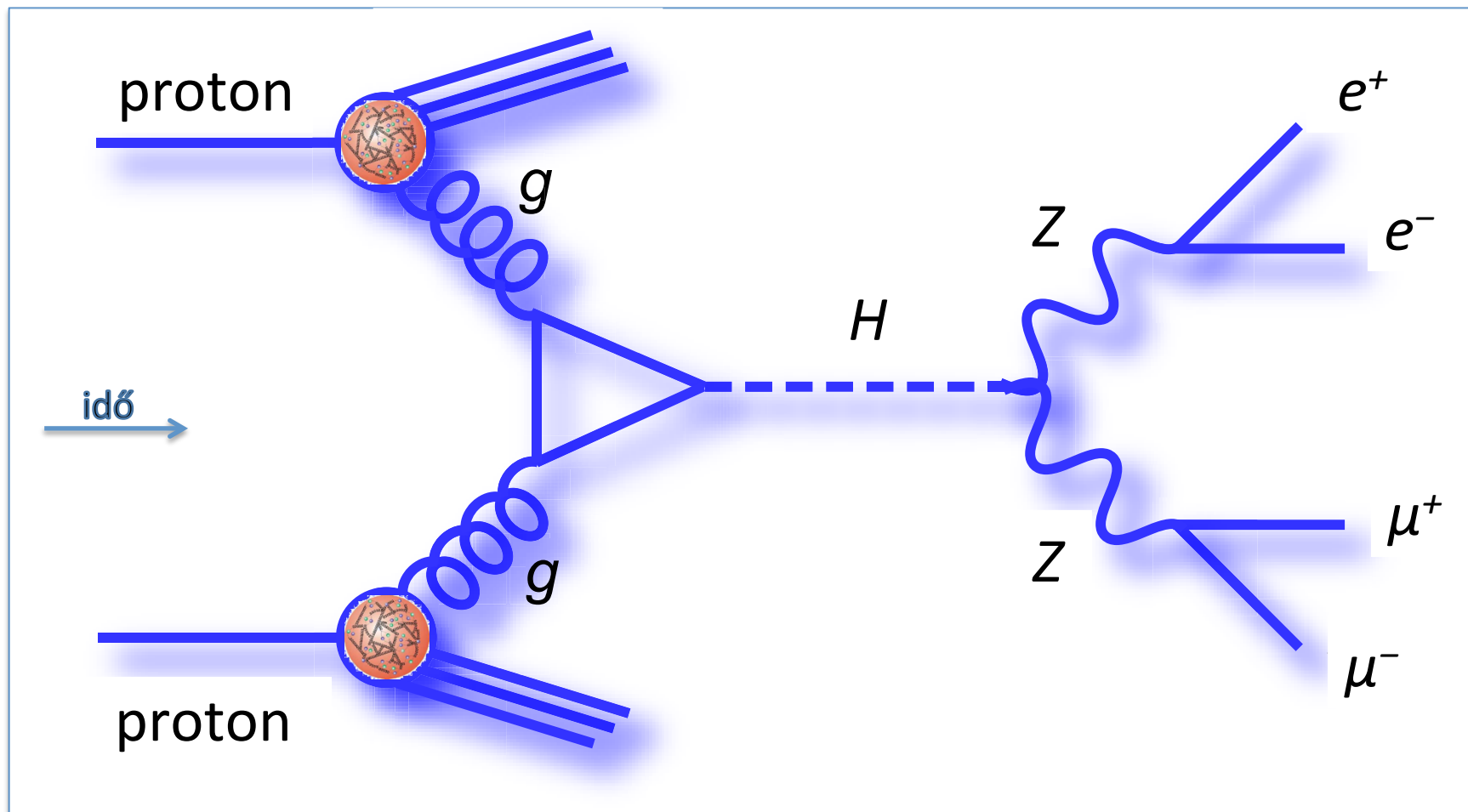
Lásd még: 2014. április 10. Varga Dezső (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont):
A részecskefizika eszköztára: felfedezések és detektorok

Csúcsvadászat: hogyan fedezzünk fel egy új részecskét?



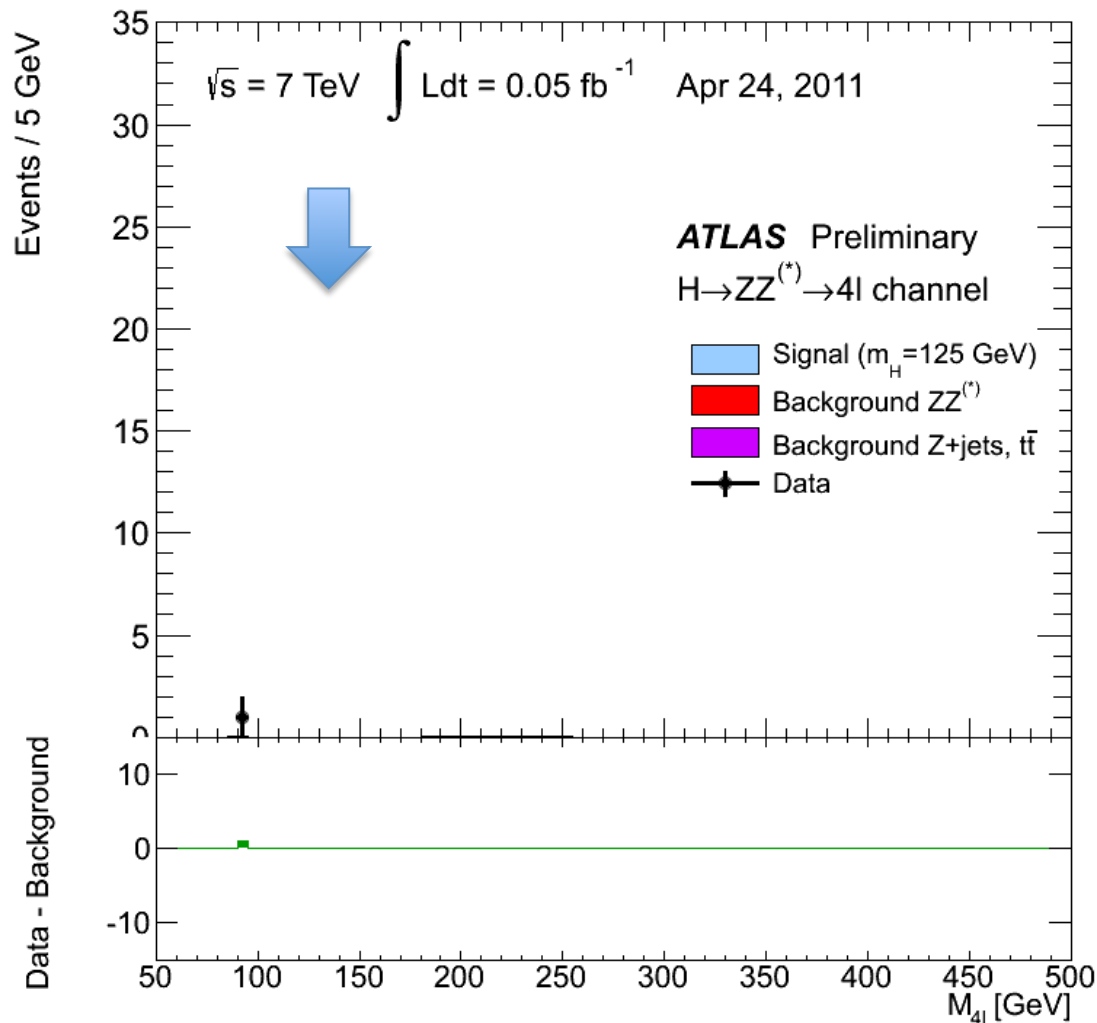
Csúcsvadászat 1.

Elmélet: Higgs-boszon keletkezés



$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$: felfedezés folyamata

Higgs-jelölt eseményekben rekonstruált 4-lepton tömeg



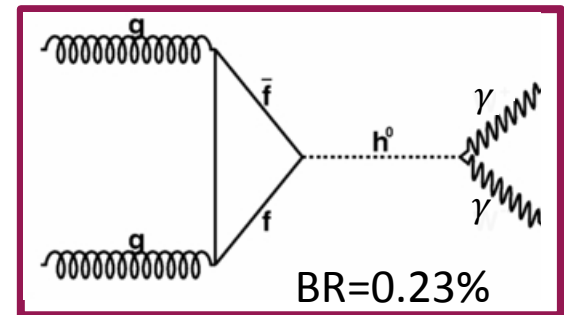
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$m^2 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{c^2} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\vec{p}_i}{c} \right)^2$$

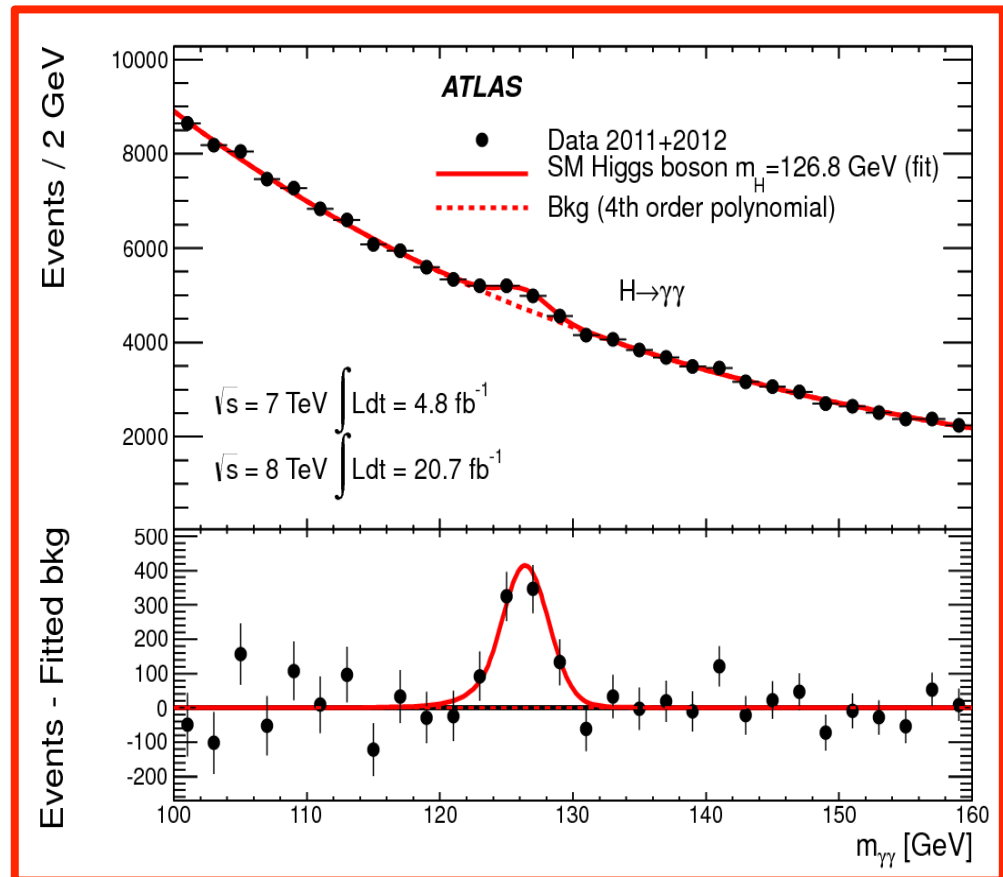
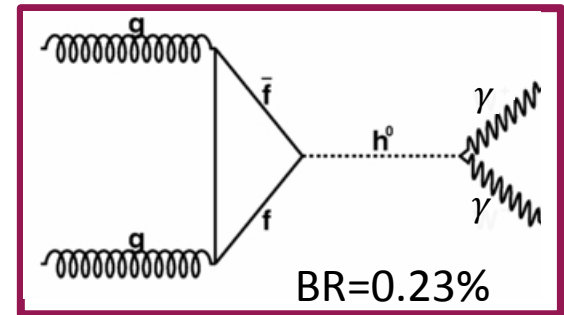
Esemény többlet 125 GeV-nél
 (~ 130 x proton tömeg)
 egy jelentős háttér felett

Más végállapotokban is:
 $H \rightarrow \gamma\gamma, WW, \tau\tau, bb$

$H \rightarrow \gamma\gamma$

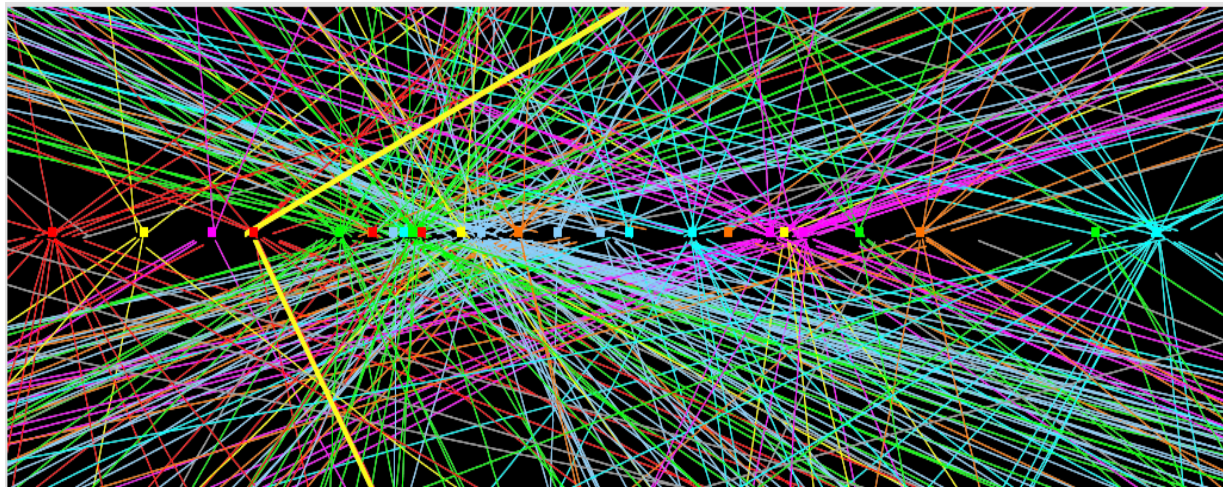


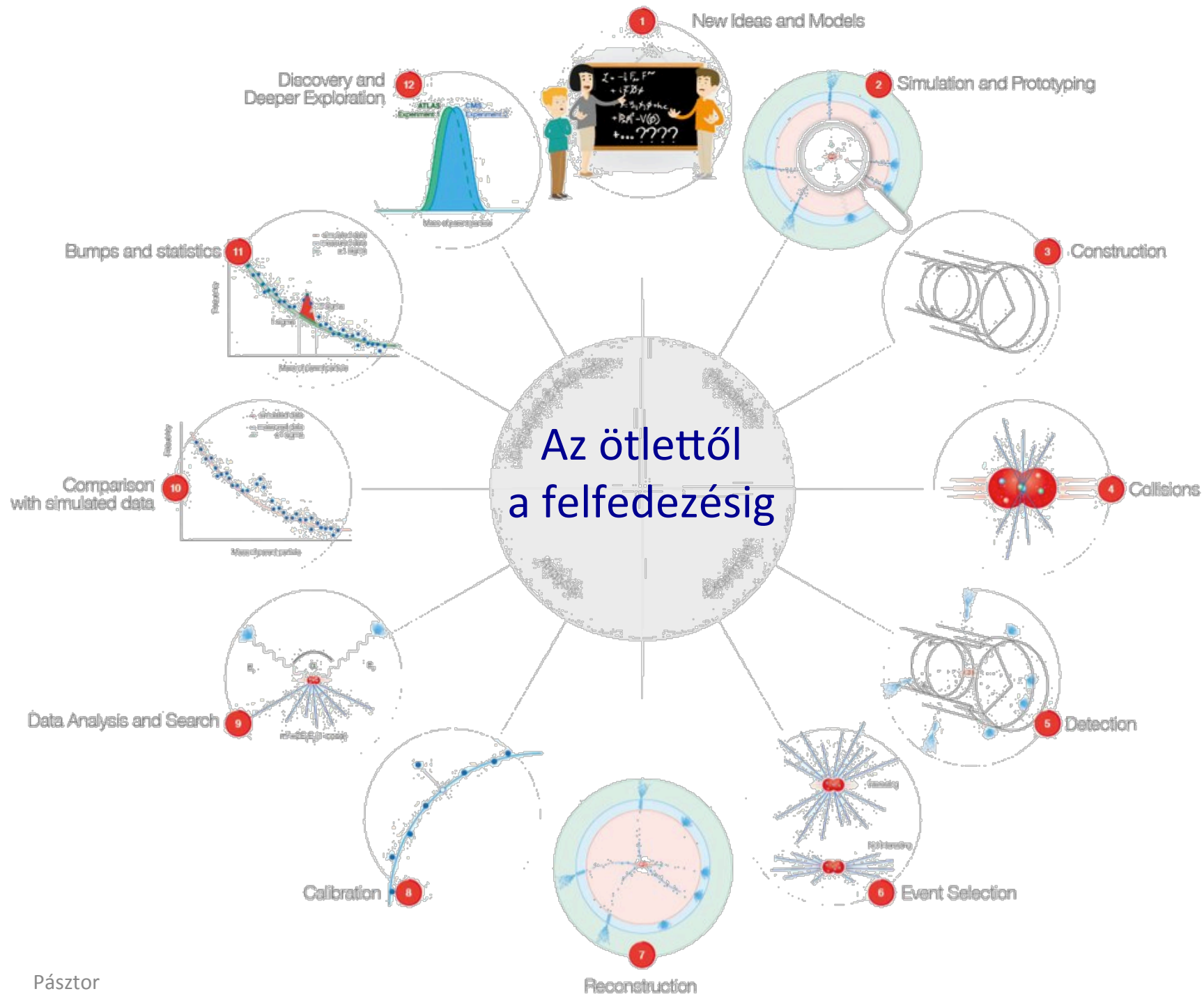
$H \rightarrow \gamma\gamma$



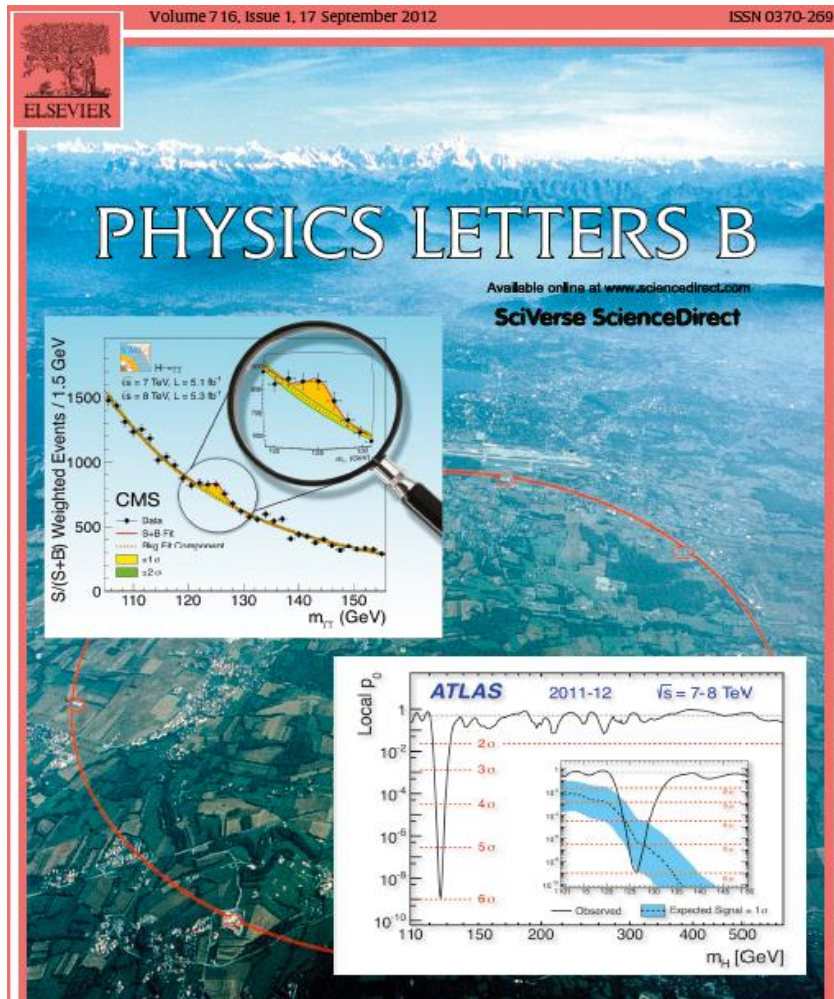
A kísérleti kihívás

- Nagyon ritka eseményeket keresünk:
csak ~ 3 Higgs-bozon keletkezik 10 milliárd p-p ütközésben
- Nagyon gyorsan kell dönteni, hogy egy adott ütközés adatait megtartjuk-e:
csupán 2-3 esemény tárolható el 100 000 p-p csomag találkozásból
 - Az érdekes események kiválasztása két lépcsőben történik
 1. lépés (célelektronika): 3 ezred mp alatt 1/400
 2. lépés (számítógép): 0.2 mp alatt további 1/100, összesen 1/40000
- Több (2016-ban tipikusan 20-45) p-p ütközés nyalábcsomag találkozásonként
 - Az érdekes részecskék nyomát egy nagyon zsúfolt környezetben kell megtalálnunk





Az ötlettől a felfedezésig



1964: BEH-mechanizmus

- Robert Brout, Francois Englert
- **Peter Higgs (spin=0 bozon)**

1967: Standard Modell

- Salam, Weinberg és sokan mások
- [Kísérleti bizonyítékok sora támasztja alá a SM-t, de a Higgs-bozon rejtve marad]

1984: A Nagy Hadronütköztető (LHC) ötlete

1994: Az LHC építésének jóváhagyása

2009: Az LHC adatgyűjtés kezdete

2012 nyár: LHC (ATLAS és CMS) felfedez egy Higgs-szerű részecskét

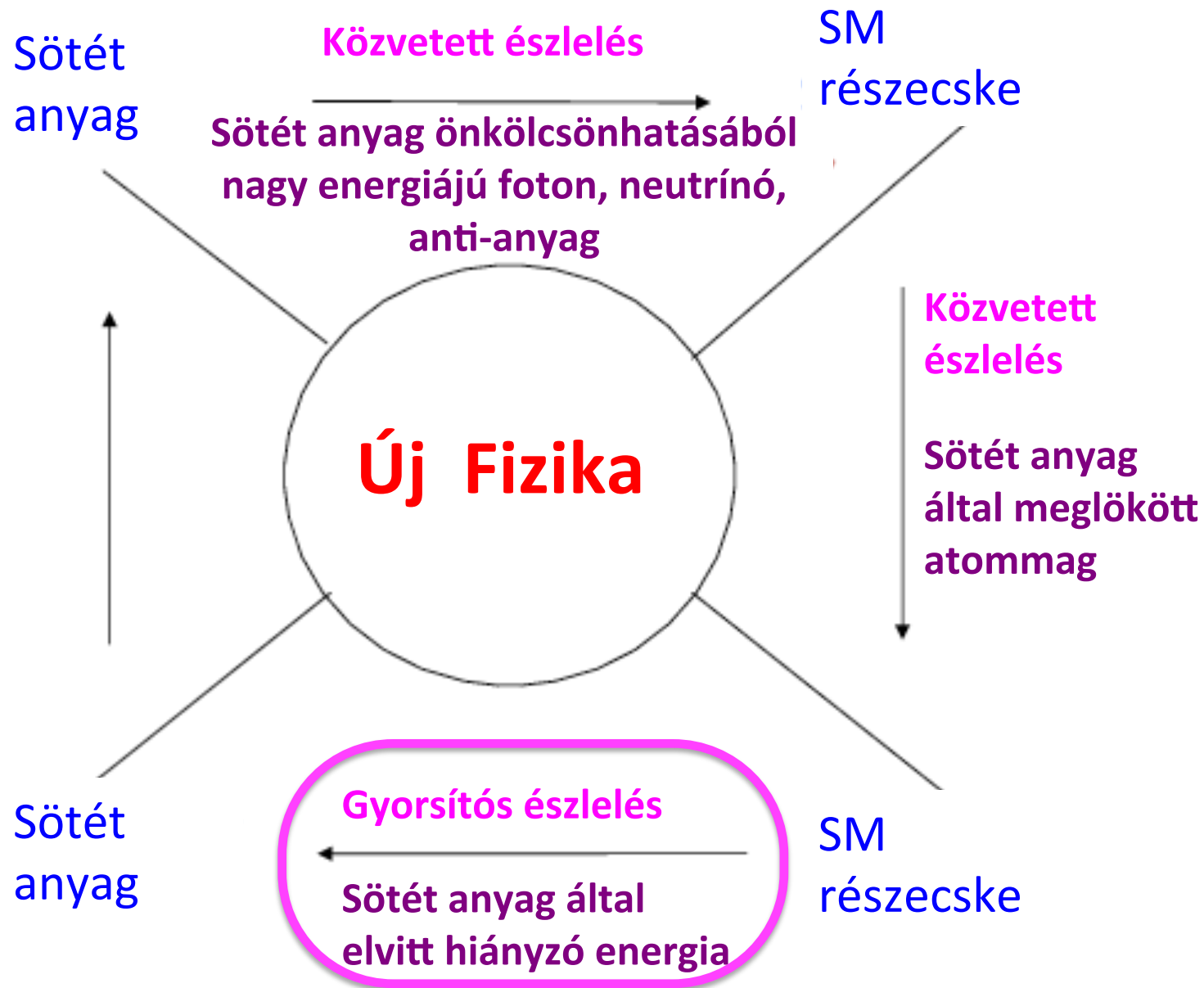
2013 tavasz: A részecske tulajdonságai jól egyeznek a Higgs várákozással (csatolások, spin)

2013 ősz: Fizikai Nobel díj: Englert és Higgs

Hogyan kereshetjük a sötét anyagot?



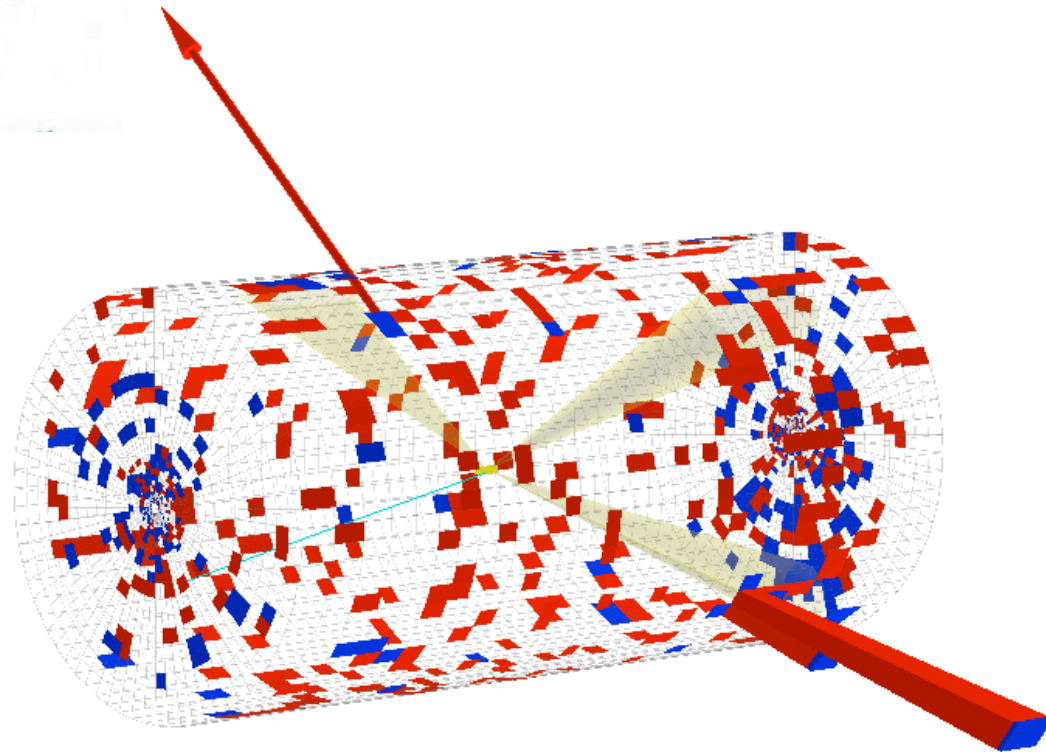
Hogyan kereshetjük a sötét anyagot?



A sötét anyag nyomában

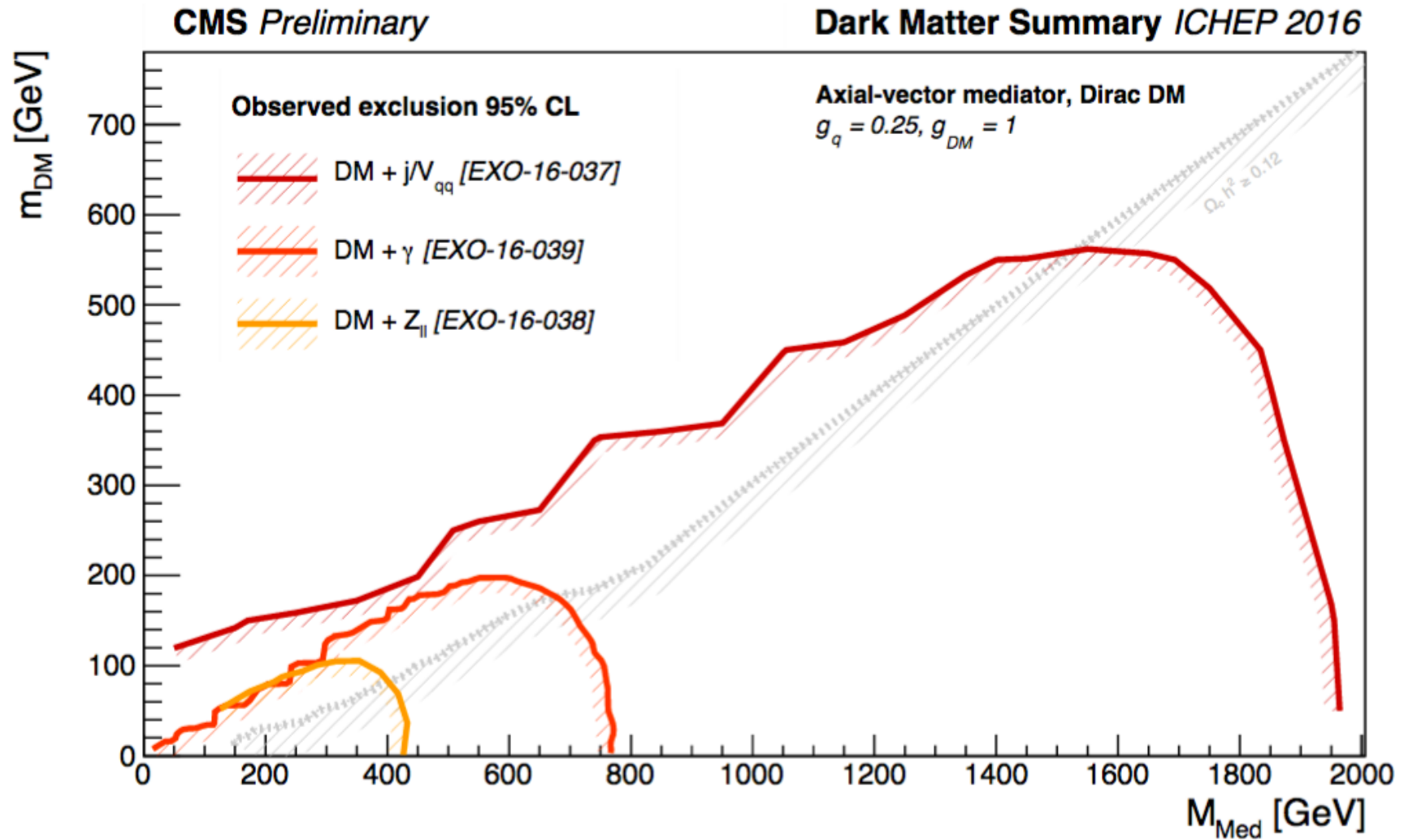


Kisugárzott részecske
(foton, W, Z, Higgs-bozon, gluon),
hogy észrevegyük az eseményt



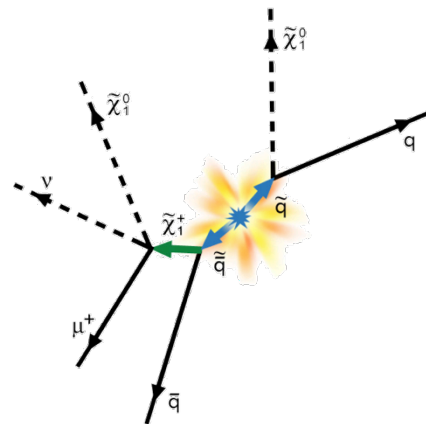
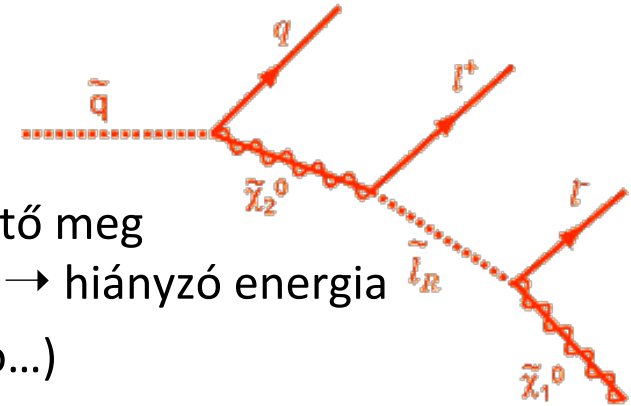
Foton + hiányzó energia

Eredmények

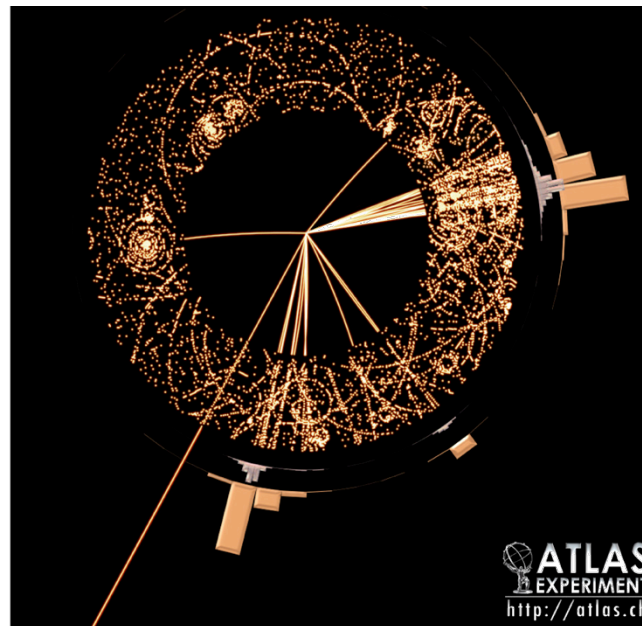


SUSY részecskék, SUSY sötét anyag keresése

- Ha a SUSY részecskék tömege $O(\text{TeV})$, amely energia tartományt bizonyos elméleti megfontolások elényben részesítenek, az LHC-n észlelhetünk SUSY részecskéket
- Ha az R-paritás megmarad, keletkezés párban, bomlás közönséges és SUSY részecskékre, gyakran több lépésben
- Általában a legkönnyebb SUSY részecske nem figyelhető meg (semleges, gyengén kölcsönható... sötét anyag jelölt!) → hiányzó energia
 - Természete a modelltől függ (neutralinó, gravitínó...)



q = quark μ = muon
 \tilde{q} = squark ν = neutrino
 \bar{q} = anti-quark $\tilde{\chi}_1^+$ = chargino
 $\tilde{\bar{q}}$ = anti-squark $\tilde{\chi}_1^0$ = neutralino
 (lightest super-partner)



ATLAS
 EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Hiányzó energia

Hogyan mérjük?

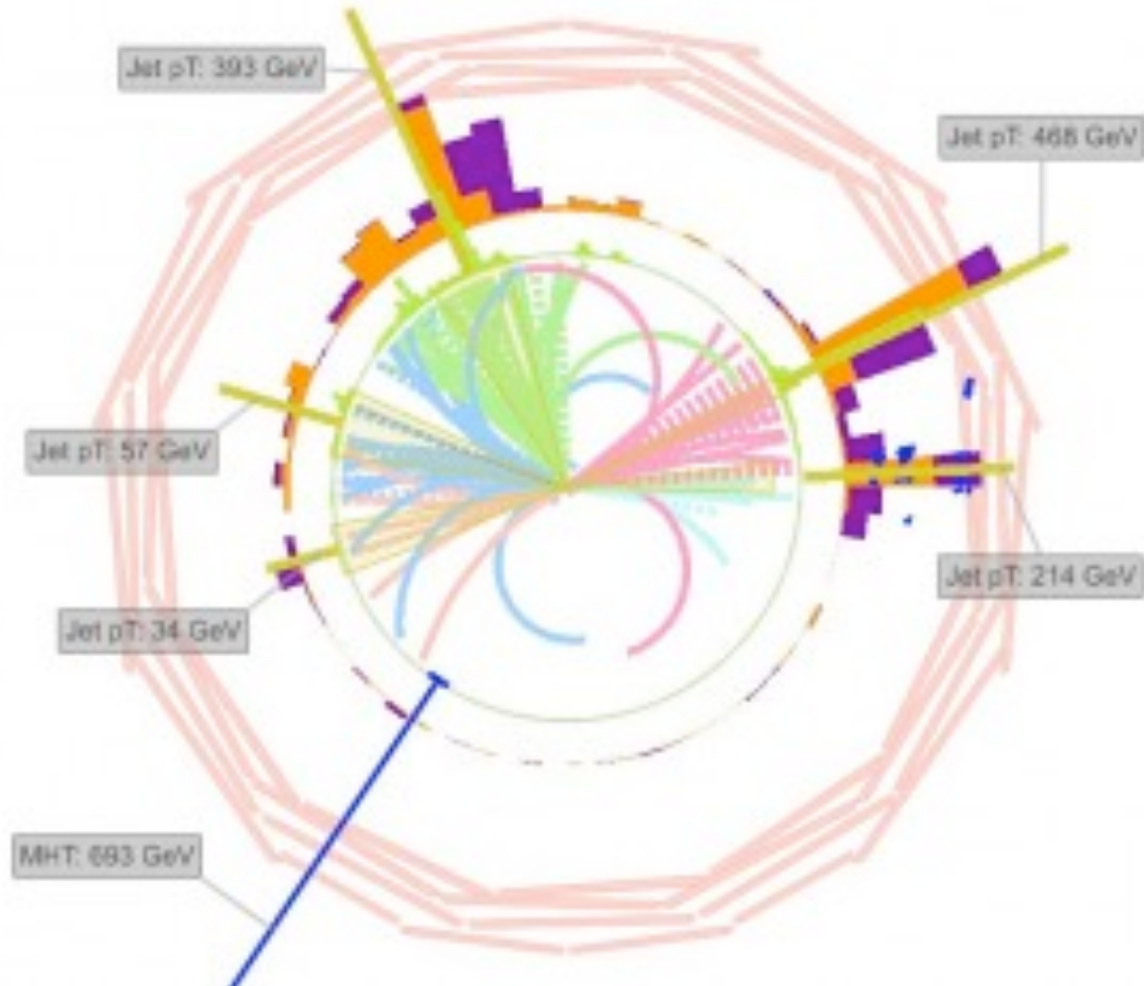
- Összegezzük a rekonstruált fizikai objektumok (elektronok, müonok, fotonok, hadronzárporok, ...) impulzusát: Σp

- Energia- és impulzus megmaradásból (elhanyagolva a részecskék nyugalmi tömegének megfelelő energiát kinemtikus energiájukhoz képest):

$$E_{\text{hiányzó}} = |\Sigma p|$$



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Oct 26 07:13:54 2010 CEST
Run/Event: 148953 / 70626194
Lumi section: 49



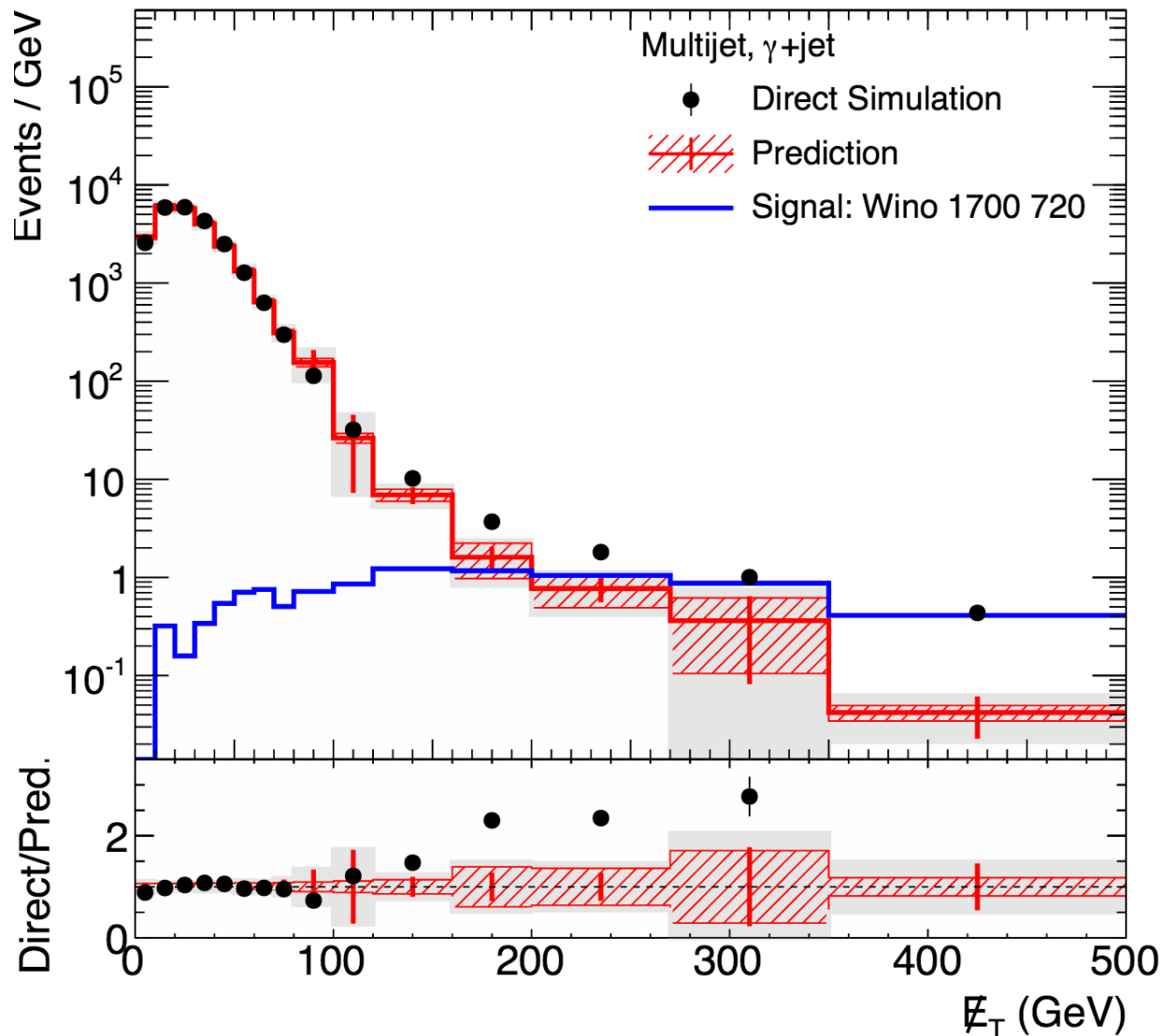
Hiányzó energia

Hogyan mérjük?

- Összegezzük a rekonstruált fizikai objektumok (elektronok, müonok, fotonok, hadronzárporok, ...) impulzusát: Σp

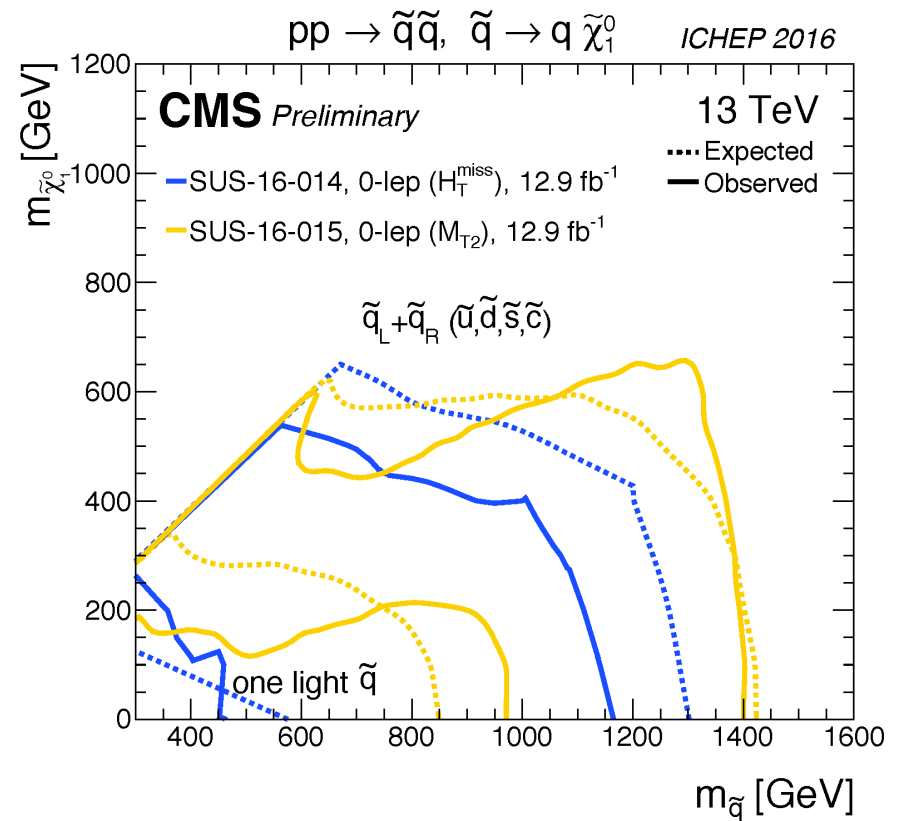
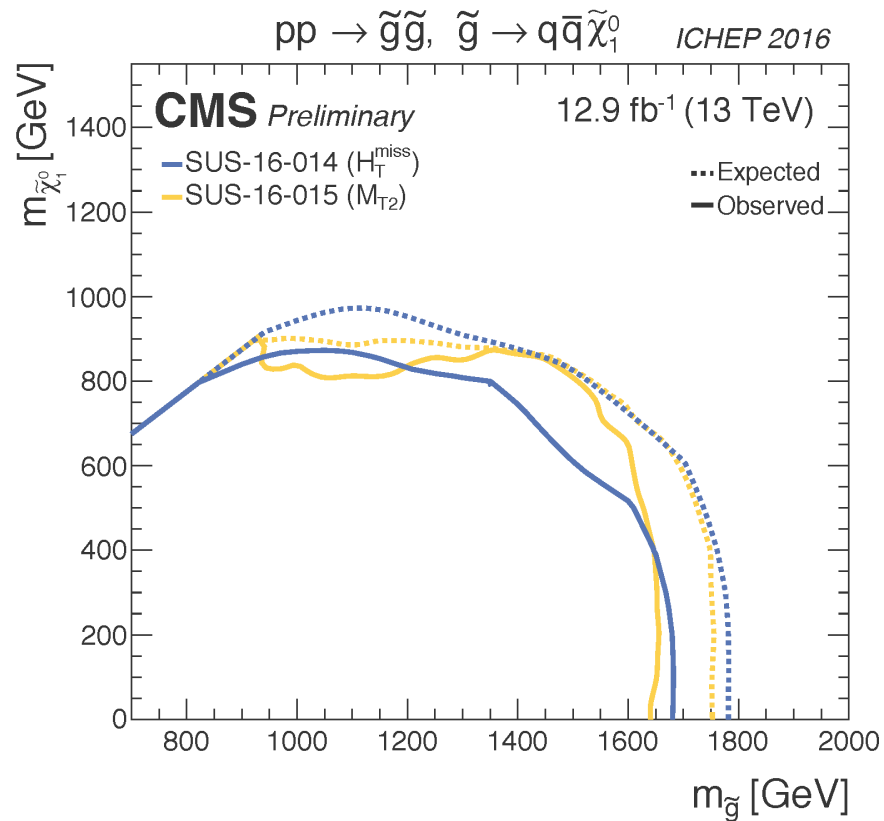
- Energia- és impulzus megmaradásból (elhanyagolva a részecskék nyugalmi tömegének megfelelő energiát kinemtikus energiájukhoz képest):

$$E_{\text{hiányzó}} = |\Sigma p|$$



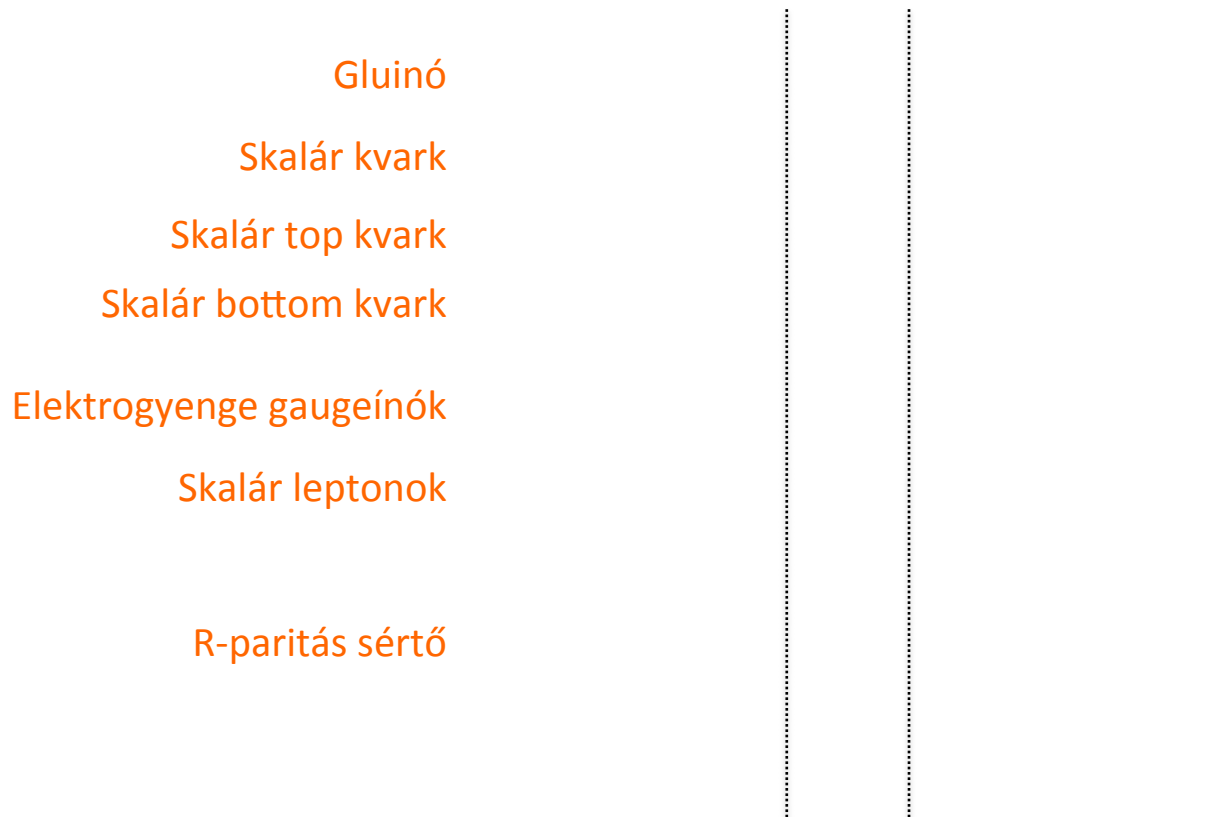
SUSY részecskék keresése

- Nagyszámú modell, sok lehetséges végállapot, (egyelőre negatív) eredmények sokasága
- Korlátok a modell paramétereken, a partnerrészecskék tömegén



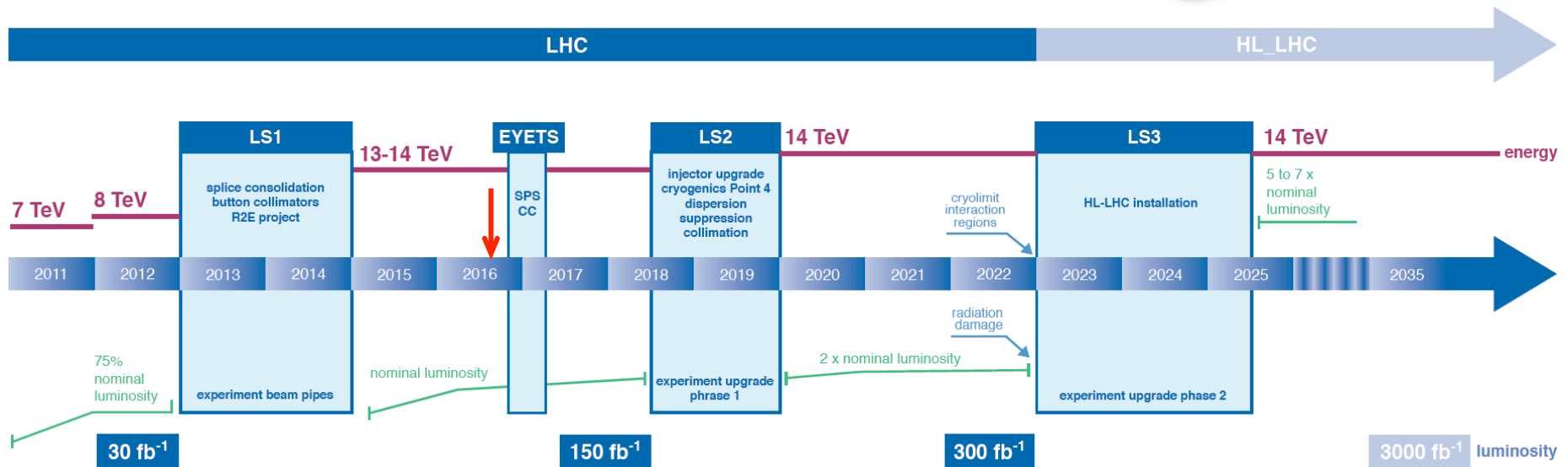
SUSY részecskék keresése

- Nagyszámú modell, sok lehetséges végállapot, (egyelőre negatív) eredmények sokasága
- Korlátok a modell paramétereken, a partnerrészecskék tömegén



LHC tervek

LHC / HL-LHC Plan

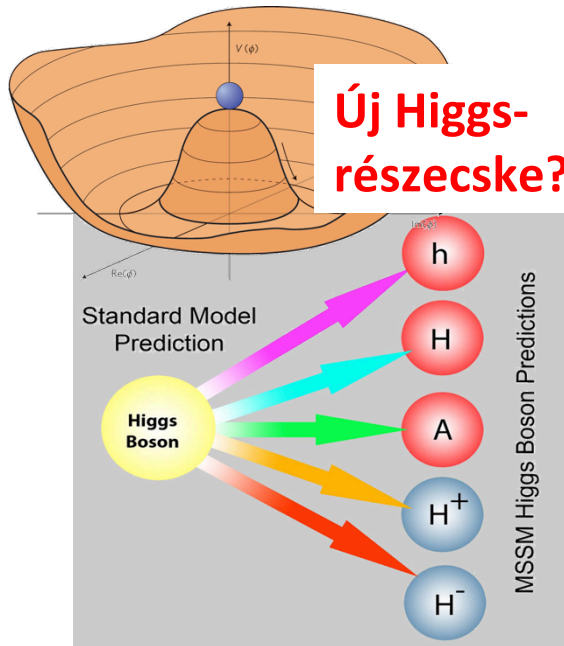


Még csupán az elején járunk az LHC programnak (csupán a gyűjtendő adatok 1-2%-ánál)

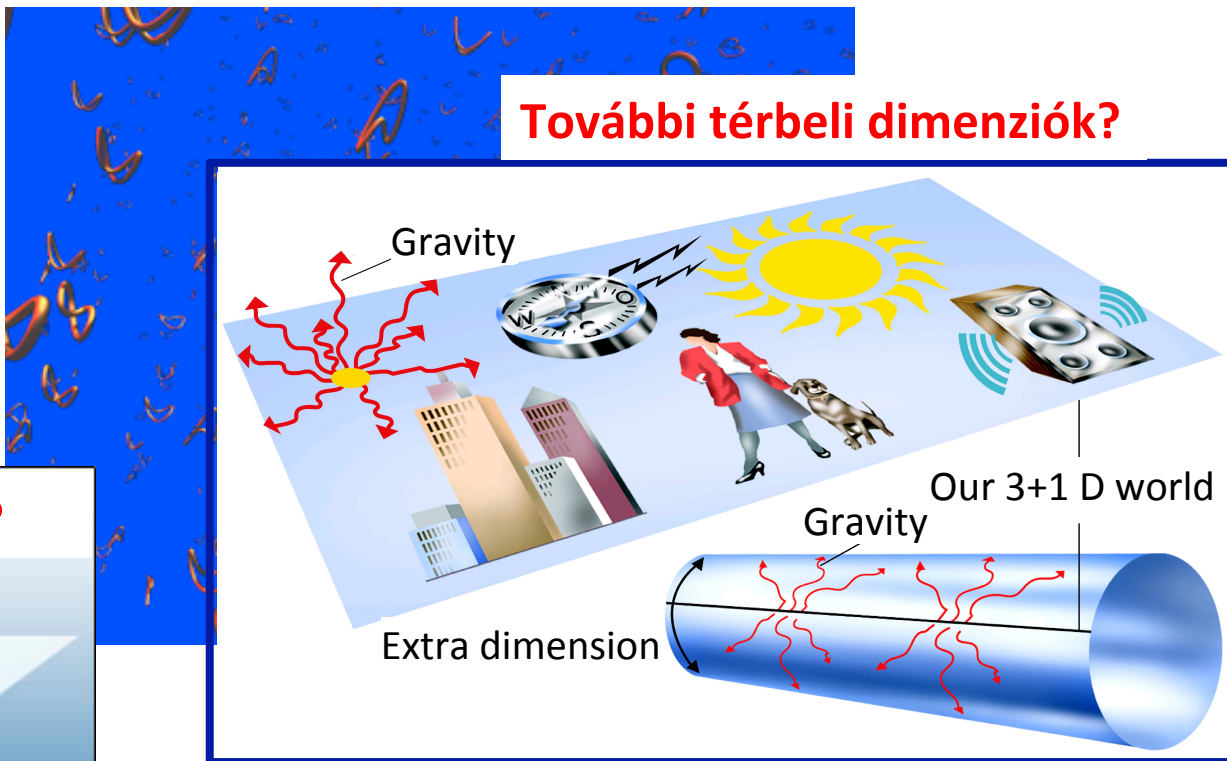
Új eredmények (és - reményeink szerint - új felfedezések) kapujában...

Mit hoz(hat) a jövő?

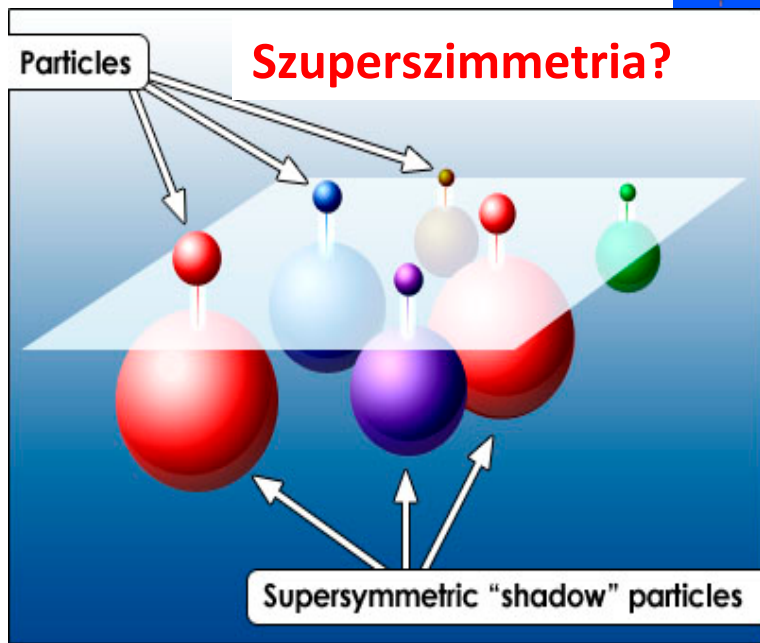
Új Higgs-részecske?



További térbeli dimenziók?

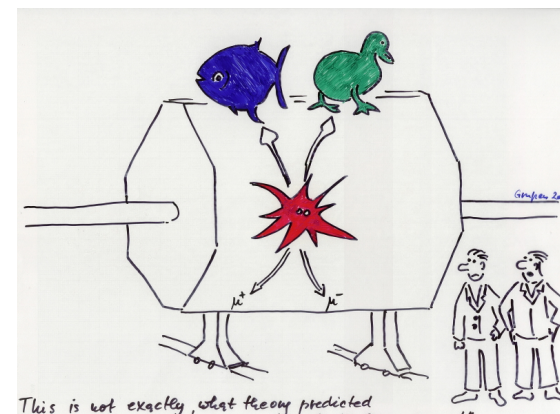


Szuperszimmetria?



Új kölcsönhatások?

Nem várt meglepetés?



Kapcsolódó AtomCsill előadások (<http://atomcsill.elte.hu/>)

- 2016. szeptember 8. Dávid Gyula (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
A sötét anyag nyomában
- 2014. április 10. Varga Dezső (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont):
A részecskefizika eszköztára: felfedezések és detektorok
- 2012. szeptember 13. Dávid Gyula (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
A tömeg eredete és a Higgs-mező
- 2011. május 19. Barnaföldi Gergely (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont):
Mi lehet a következő Nobel-díj a CERN LHC-nél?
- 2010. november 18. Varga Dezső (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
A legkisebb részecskék a világ legnagyobb gyorsítójában
- 2009. február 12. Cynolter Gábor (ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék):
Extra dimenziók
- 2007. december 20. Veres Gábor (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
Milyen eszközökkel figyelhetők meg a világ legkisebb alkotórészei?
- 2007. szeptember 27. Katz Sándor (ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék):
Az elemi részek fizikája és az anyag eredete az Univerzumban