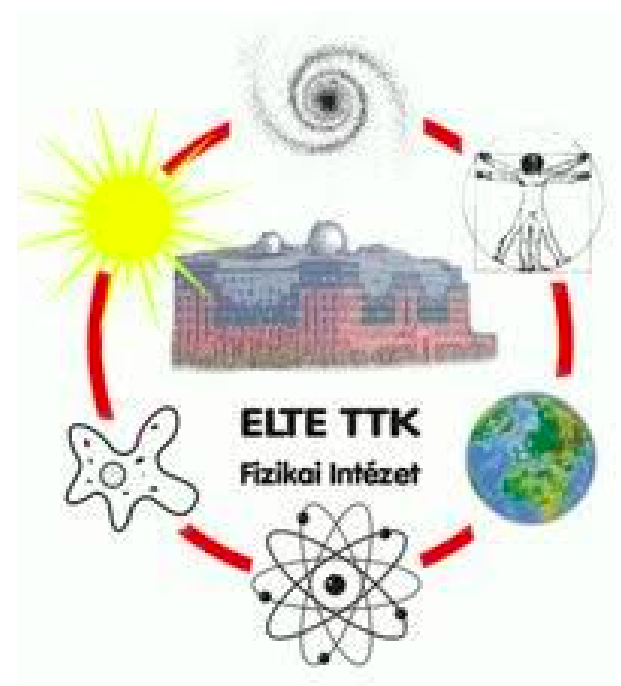
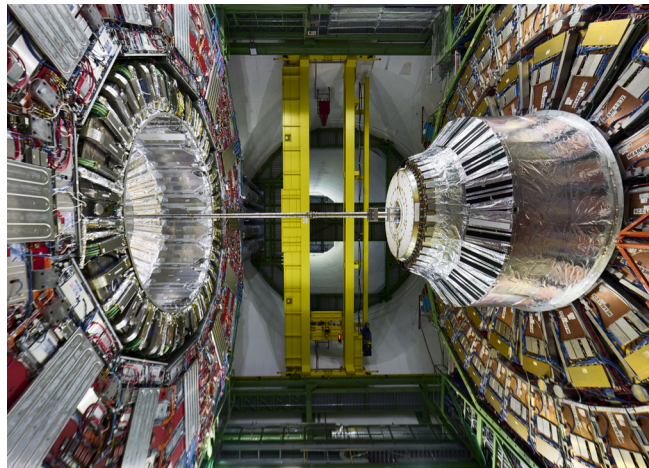


Honnan tudjuk, amit a részecskékről tudunk? Trükkös felfedezések, és ami mögöttük van

Veres Gábor

ELTE TTK

Fizikai és Csillagászati Intézet
Atomfizikai Tanszék



Az atomoktól a csillagokig – előadássorozat
2025. március 20.

Néhány kérdés

Olyan dolgokról tanulunk, amiket szabad szemmel nem látunk.

Honnan tudjuk, amit a részecskékről tudunk?

Miért és mikor lehetünk **meggyőződve** valamiről, és mikor nem?

Hogyan születnek a nagy kísérleti **felfedezések**?

Honnan indultunk és hová jutottunk a részecskék és viselkedésük tanulmányozásában?

Lehet, hogy szabad szemmel is **látjuk** őket?

Hogyan tegyünk fel egyáltalán **kérdéseket**?

Miért fontos az **elméleti** és a **kísérleti** fizika kapcsolata?



A MÓDSZERES TUDOMÁNYOS MEGISMERÉS

A minket körülvevő **VALÓSÁG** megértésében a **MÓDSZERES TUDOMÁNYOS MEGISMERÉS** nyújt segítséget. A dolgokról és a világról alkotott **TUDÁS**unkat ezáltal lehet a legmegbízhatóbban elmélyíteni.

Nem akkor mondjuk egy következtetésre, hogy tudományos, ha az a következtetés pontos, hanem ha az út, amin a következtetésre eljutottunk, **REPRODUKÁLHATÓ**, azaz megismételhető. Ha egy kísérletet azonos körülmények közt többször megismétlünk, akkor azt várjuk, hogy mindig ugyanaz legyen az eredménye. A módszeres tudományos megismerés kísérletező, azaz kísérleteken, próbákon és megfigyeléseken alapul – sok tudós szerint épp ez a legszórakoztatóbb része a munkájuknak!

A KÍSÉRLETEZŐ TUDOMÁNYOS MEGISMERÉS LEGFONTOSABB LÉPÉSEI:

1. Egy jelenség megfigyelése, és a jelenséggel kapcsolatosan felmerülő kérdések pontos megfogalmazása.
2. Hipotézis felállítása, azaz a jelenség egy lehetséges magyarázatának kitalálása.
3. Egy kísérlet megtervezése és elvégzése, a hipotézis helyességének ellenőrzésére.
4. A kísérleti eredmények elemzése.
5. A kísérlet megismétlése különböző körülmények közt.
6. A következtetések levonása és egy szabályszerűség megállapítása.



Fizika

A **Természet** tudománya, **megfigyeléseken** alapul!

Nagyon fejlett **matematikai modellekkel** a legtöbb jelenséget le tudjuk írni (ld. a következő AtomCsill előadást!)

Ezekkel a modellekkel **jósolni** is tudunk

De vigyázat: kaotikus rendszerek,
pontatlan modellek

A jóslatok teszik lehetővé a modellek **cáfolatát**

“Sikerült már bebizonyítani az ... elméletet?”

Általában kísérlettel NEM!

Cáfolni lehet, vagy egyre több
alátámasztó mérést végezni



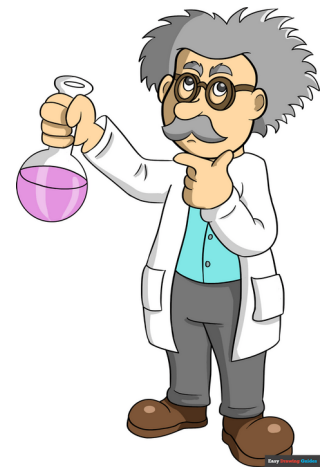
Fizika

“Ez NEM egy kísérlet, ez a valóság!”
(idézet egy plakátról,
villamosmegálló, Petőfi híd budai hídfő)

A fizikában éppen a **kísérletekre**
alapozva ismerjük meg a **valóságot!**



Fizika



Gyakori hiba mérések kiértékelésekor (ELTE):

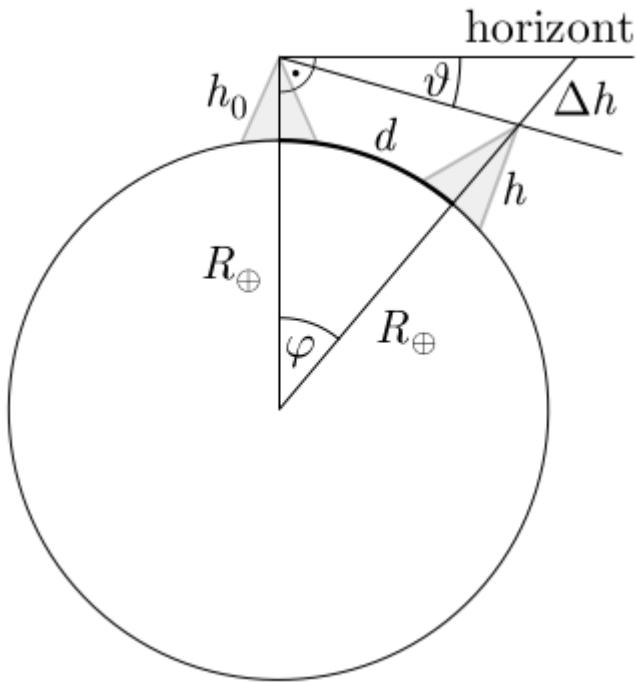
“Ez, amit kaptam, és amit a saját szememmel látok, nem lehet jó eredmény, mert az *elméleti fizika* nem ezt jósolja!”

De valójában:

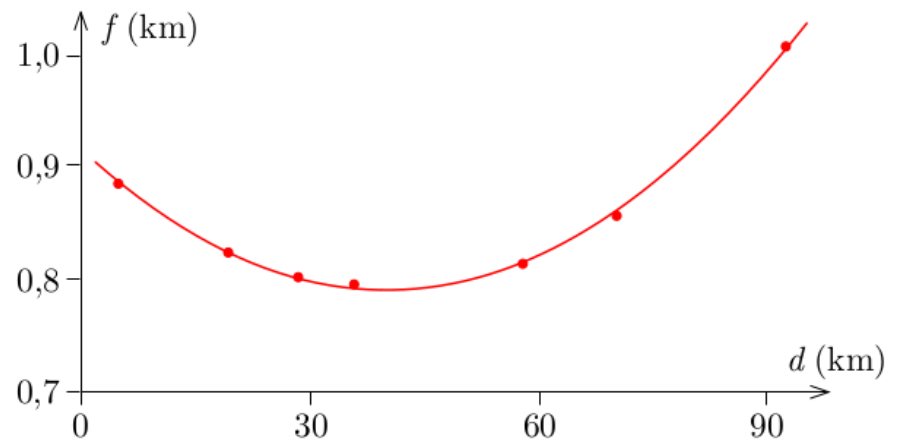
- Az “elméleti fizika” nem mondhat ellent kísérleteknek!
- Valóban elronthattam valamit a mérésnél, de sokkal gyakrabban:
 - Elszámoltam a jó elméleti modellből kiindulva az eredményt
 - Nem jó modellt választottam
 - Nem jól értelmeztem az eredményt
 - Nem jól hanyagoltam el lényegtelen részleteket
 - Nem jól becsültem meg a mérési bizonytalanságokat

Lapos-e a Föld?

Nem kell *elhinnünk* senkinek, hiszen saját magunk is megmérhetjük a Föld sugarát!

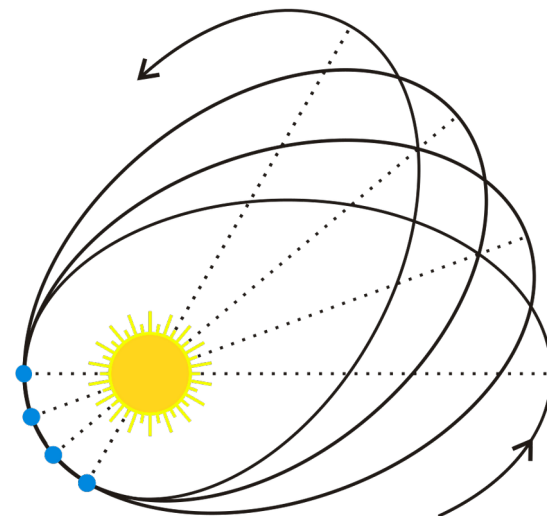


Varga Vázsony, Veres Gábor, Vankó Péter:
"A Föld sugarának mérése egy tájképről"
Középiskolai Matematikai Lapok, 2025. február



Foglalkozzunk kis részletekkel?

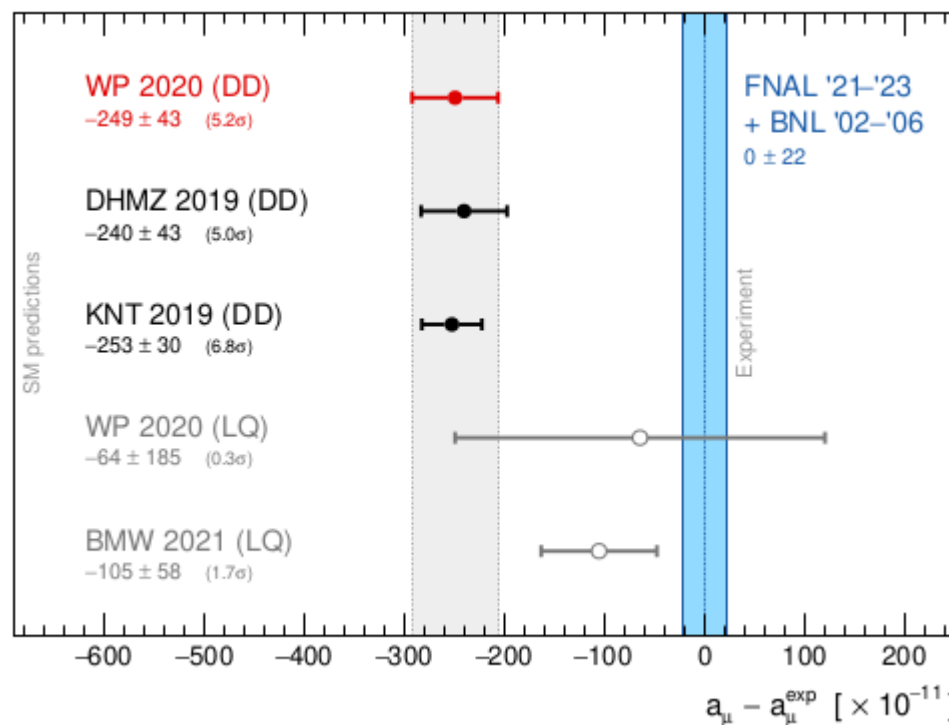
Kepler-pályák: Merkúr precesszió csak 7"/év
Gravitáció? Ált. rel.? GPS



Müon g-faktor:
-2.00233184123(82)

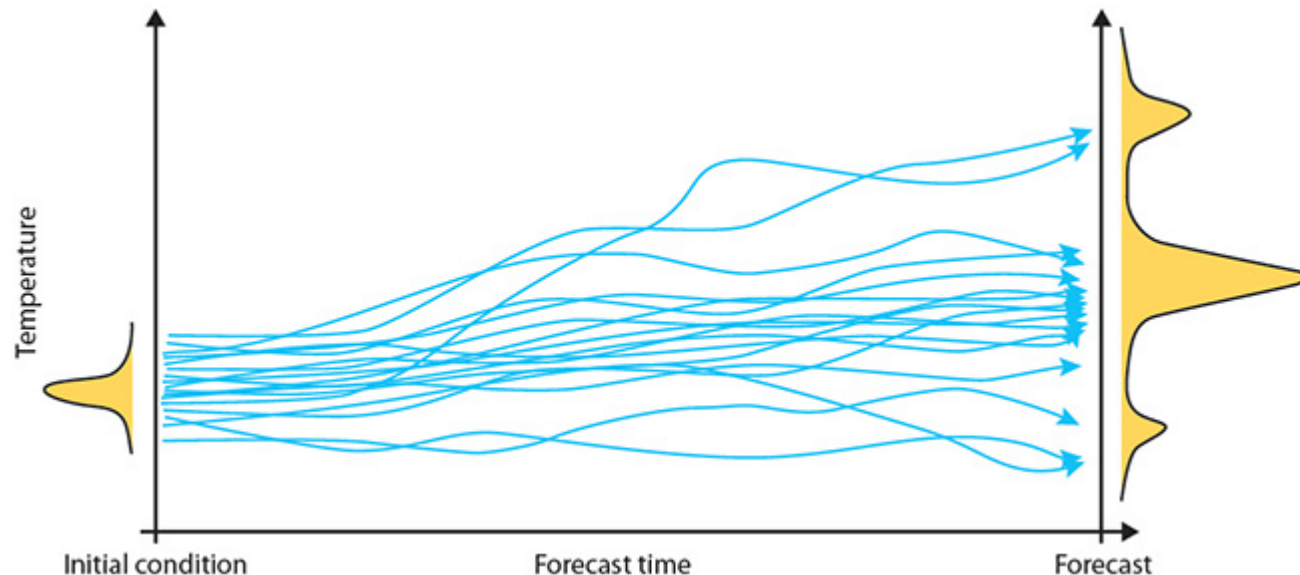
(elektron esetén:
kvantum-elektrodinamika)

Standard Modellen túli fizika?



Mérési bizonytalanság

- Miért fontos a mérési bizonytalanság (pontosság) meghatározása?
 - Elméletekkel való összehasonlítás (elméletek cáfolata csak így lehetséges)
 - Más mérési eredményekkel is lehetnek konfliktusok, fontos előrelépést jelenthetnek
 - Modellekbe való beépíthetőség (pl. klíma)



A Tudomány sohasem tévedhet?

De *igen*, ez is a kutatás velejárója! Senki sem tévedhetetlen, de a tudományos *közösség* és *módszer* segít ilyen helyzetekben.

Curie házaspár: felfedezi, hogy a rádiumsók állandóan hőt fejlesztenek!

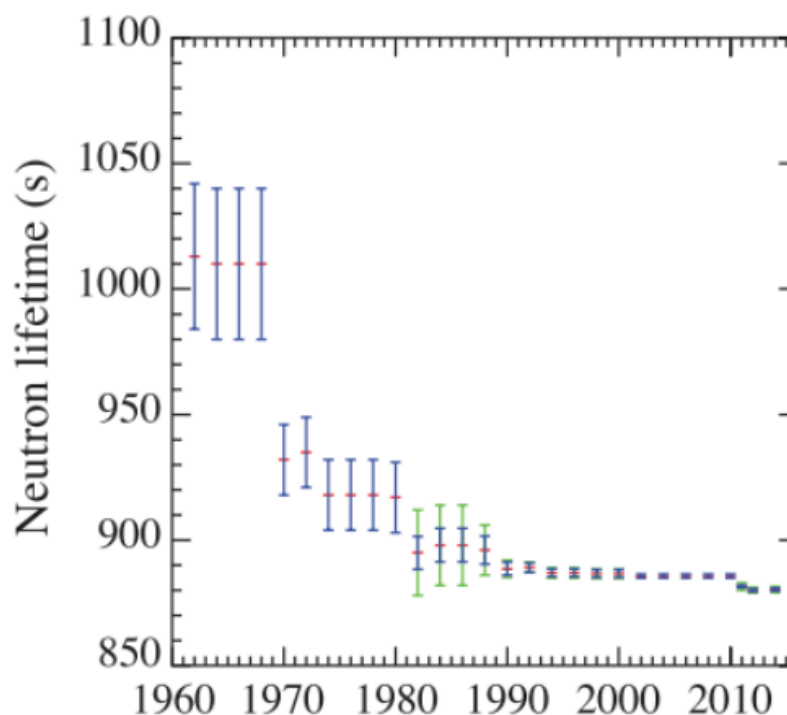
A hőtermelés „időben nem változik” (ma már tudjuk: $T_{1/2}=1600$ év)

A radioaktív atomok energia-átalakítók, külső, ismeretlen energiaforrást használnak (*hibás*)

Neutron élettartam...

Pentakvark...

Neutrínók...



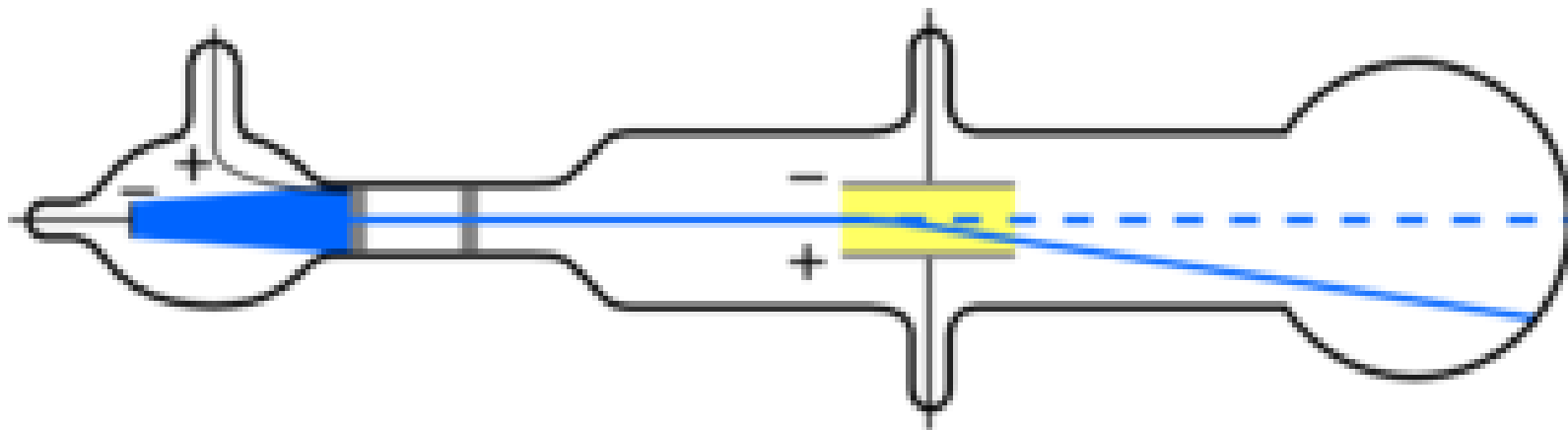
Elektron e/m

1897 Az elektron e/m meghatározása:
Joseph John Thomson (1906: Nobel-díj)

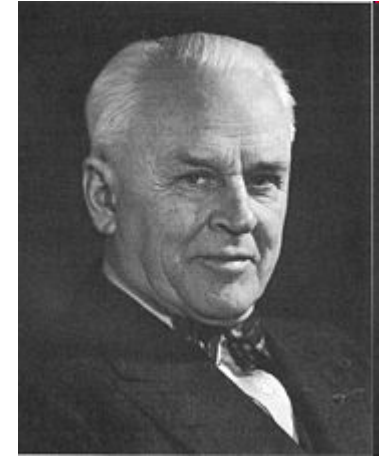
Mérés: mágneses térben való **eltérülés** és a sugarak
fékeződése által keltett **hő** összevetése

A részecskék tömege független attól hogy milyen
anyagból jöttek ki! Univerzális építőelem.

Megfelelő vákuumban az elektromos és mágneses
eltérítés összehasonlításával töltés-tömeg
arány. Több mint *ezerszer nagyobb mint a H-ion
esetén!*

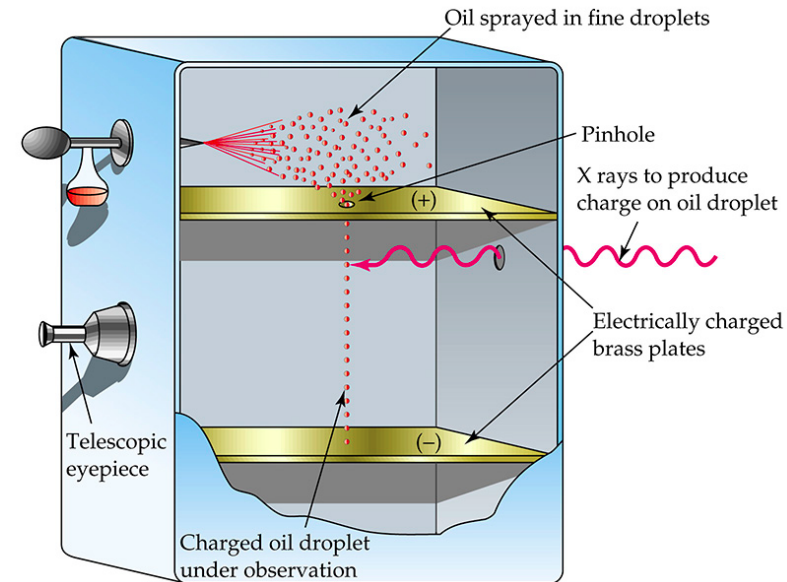


Elektron töltése



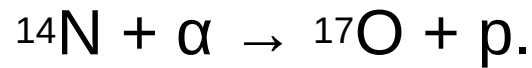
- 1913, Robert A. Millikan (Nobel-díj: 1923)
- Kis olajcseppek levegőben, elektromos térben,
 - gravitáció és elektromos tér hatására mozognak
 - Levegő viszkozitása miatt egyenletes sebességre állnak be
 - sebességüket mérte

- Világossá vált, hogy a *töltés kvantált*, nem folytonos
- Híres kijelentése, hogy „*az atom energiája soha nem lesz felhasználható* (ha kifogyunk a szénből), ..., a Természet bolondbiztos teremtményeinek nincs semmilyen, a szétesésükkel felszabadítható energiája.”

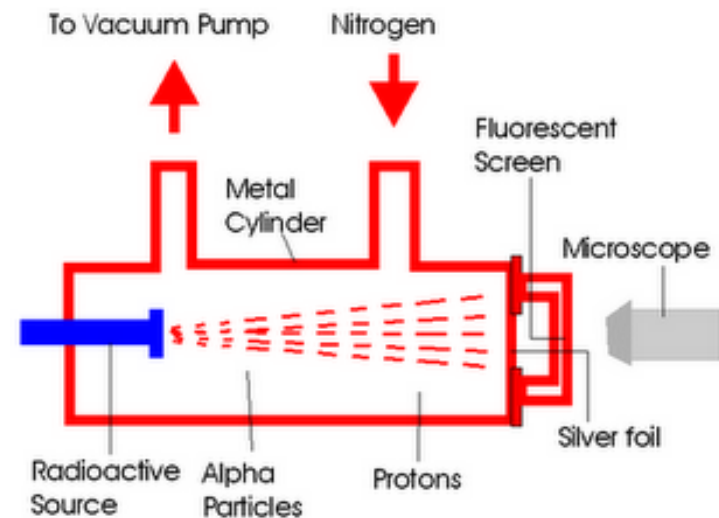
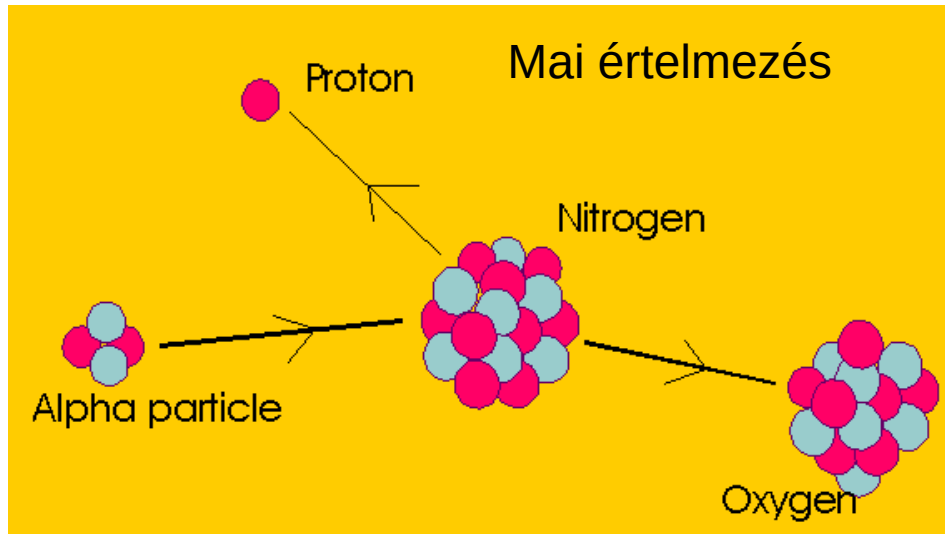


Proton

- **1919, Rutherford:** természetes eredetű alfa-részecskékkel bombázott nitrogént, és a szcintillációs detektorán *hidrogén-ionokra* jellemző jeleket figyelt meg!
- A hidrogén atommagok tehát benne voltak a nitrogén atommagban, ... csak onnan jöhettek...!
- Rutherford ezzel elvégezte a világ első magátalakítását:

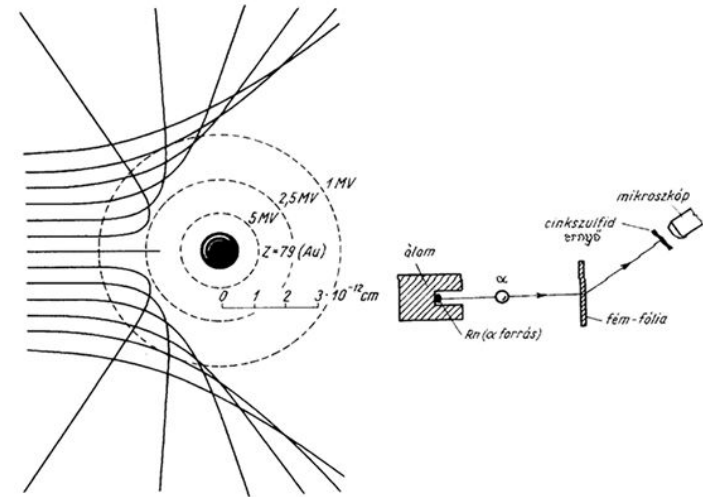


- A proton energiája nagyobb volt, mint az alfáé!



Atommag

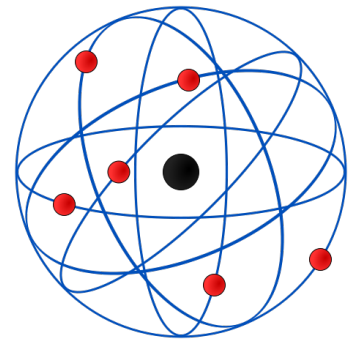
- A szóródás szögeloszlása
(ϑ szög valószínűsége)
pontszerű szórócentrumnak
megfelelő: $1/\sin^4(\vartheta/2)$



- Az atommag méretére felső határ a legkisebb megközelítés távolsága:

$$E_{kin} + E_{helyzeti} = \frac{1}{2}mv^2 + 0 = 0 + \frac{Z_{\alpha}Z_{Au}ke^2}{r} = 5 \text{ MeV}$$

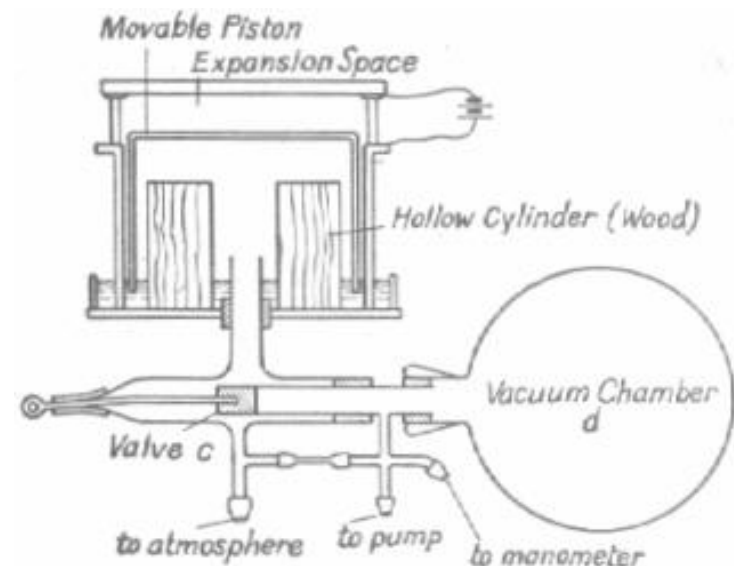
$$r = \frac{2 \cdot 79 \cdot 1,44 \text{ MeV fm}}{5 \text{ MeV}} = 45,5 \text{ fm}$$



Nem is láthatatlanok a részecskék?

- Charles T. R. Wilson (Nobel-díj: 1927)
 - skót fizikus, optikai jelenségeket vizsgált ködben
- Túltelített víz- vagy alkoholgőz
- Ionizáló részecskék ionokat hoznak létre
- Az ionok jó kondenzációs magvak
- A ködképződés rajtuk indul el
- Fényképen rögzíthetők a részecskenyomok
- Másik változata: diffúziós ködkamra, hűtéssel (szárazjég, folyékony N), állandóan működőképes

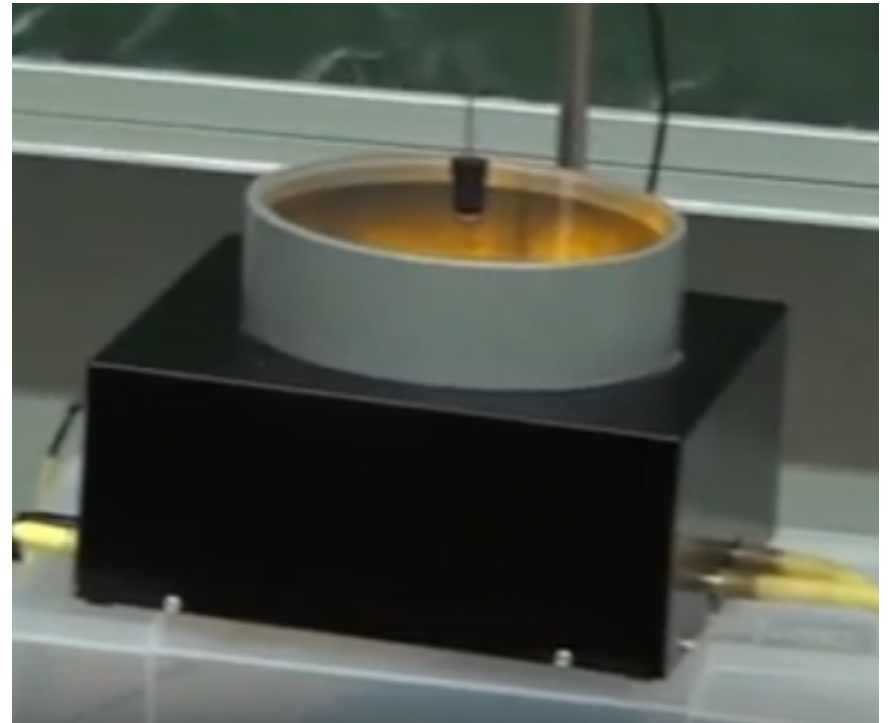
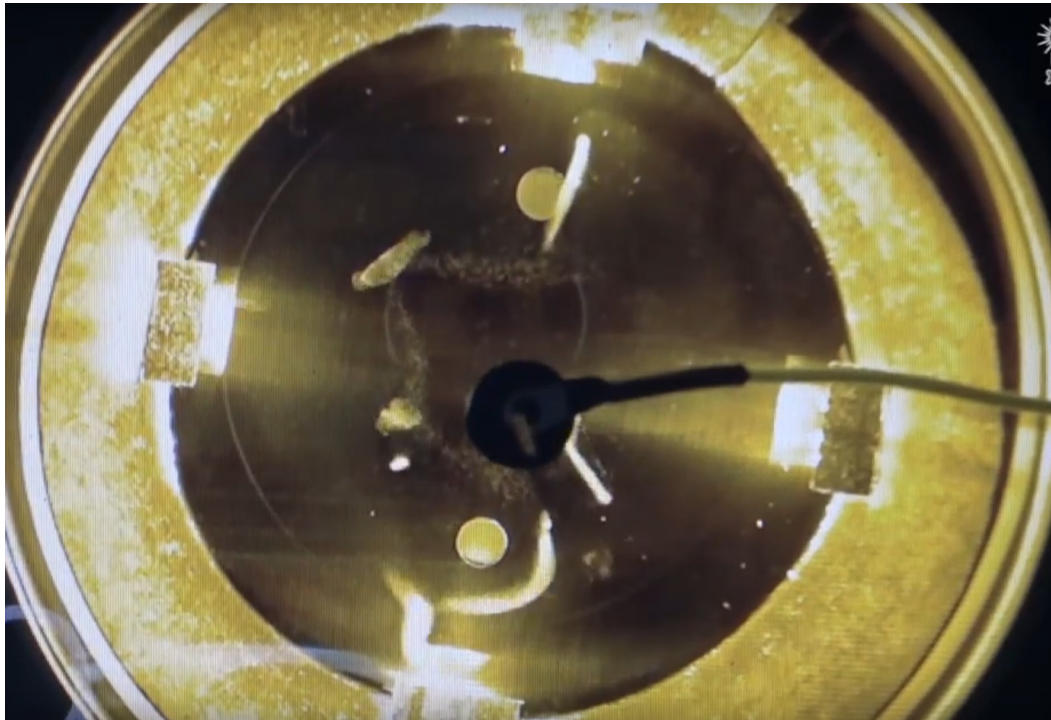
Ködkamra



Ködkamra

ELTE, hallgatói labor

<https://www.youtube.com/watch?v=RP8lmoOZYbY>

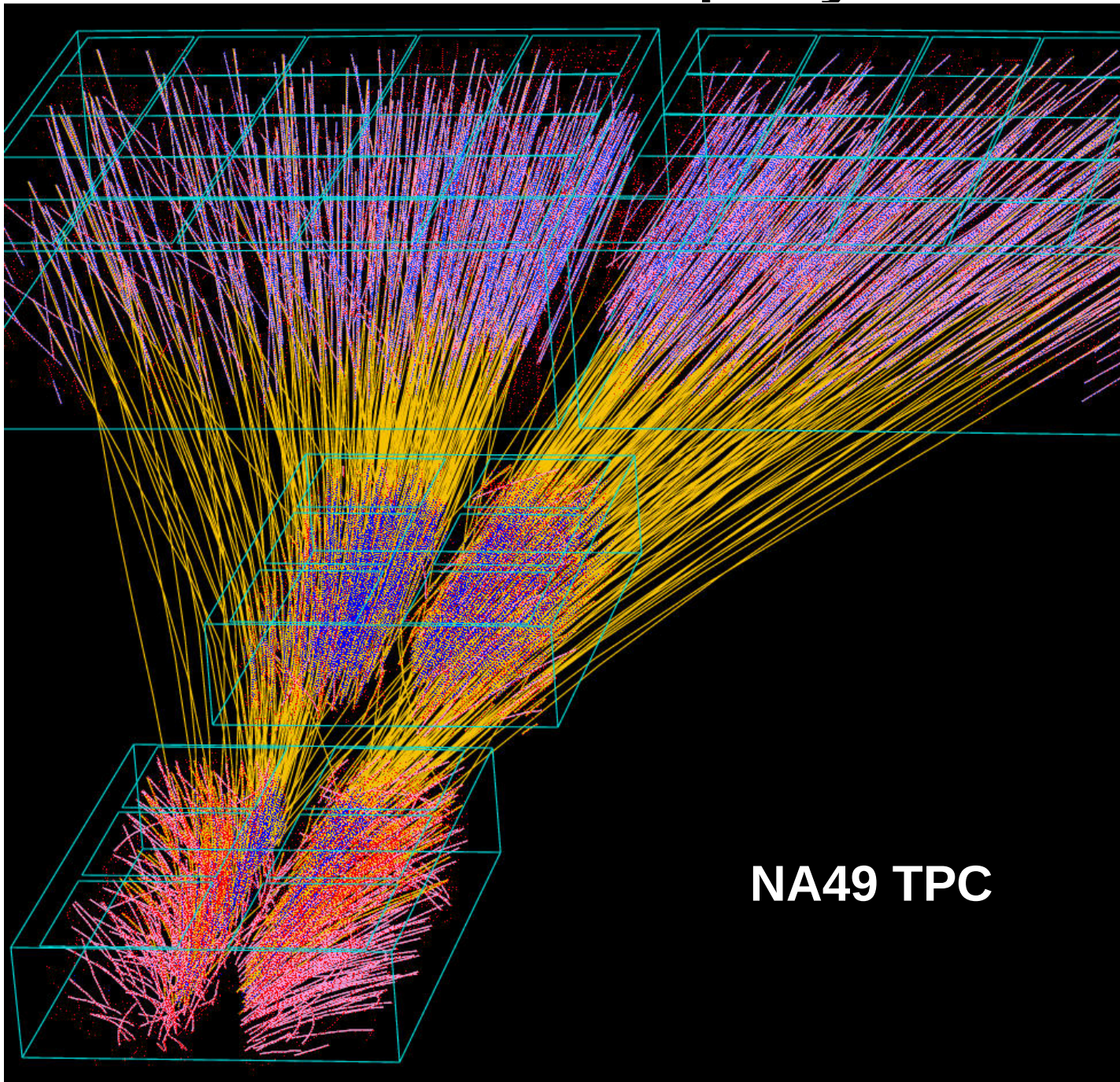


Ködkamra

- Felhőképződés vizsgálata kozmikus sugárzás hatására
- A Nap szerepe a klíma változásaiban az ipari forradalom előtt
- Kis mennyiségű, különleges vegyületek, aeroszolok szerepe a felhőképződésben
- Klímamodellek jelentős bizonytalanságainak pontosítása



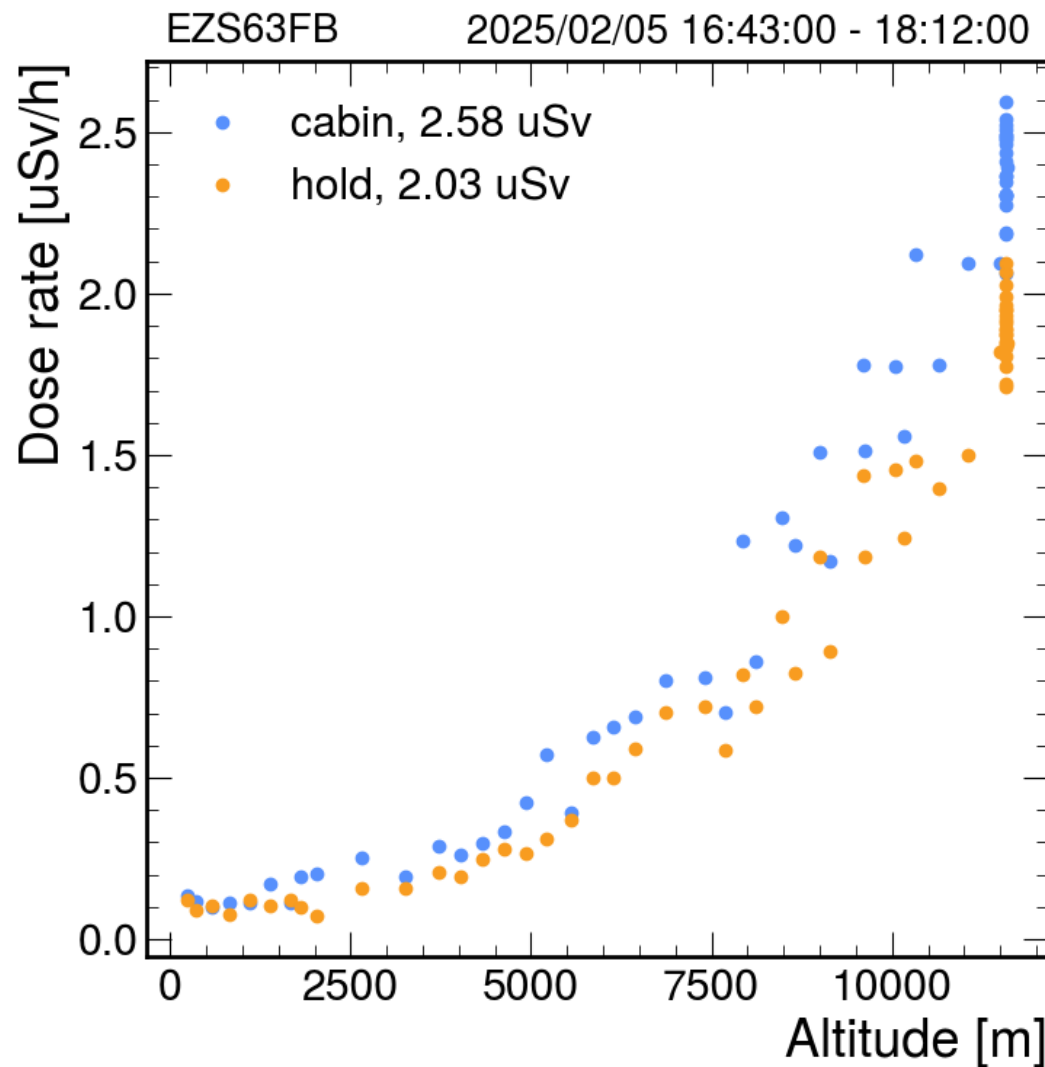
Részecskék pályái



Kozmikus sugárzás?

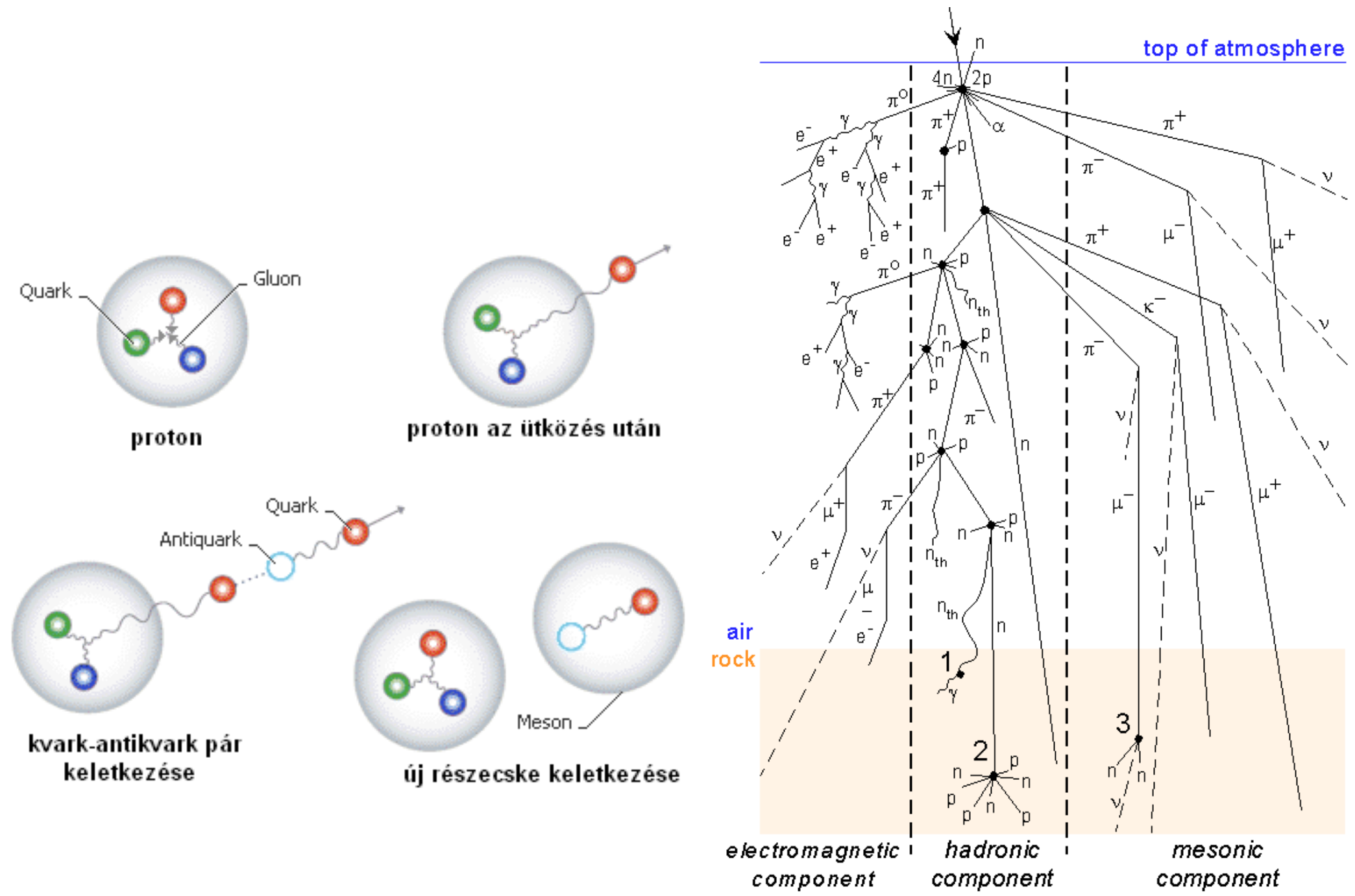
A tengerszint feletti
magassággal növekszik!

Nem lehet a Föld
radioaktivitása miatt!



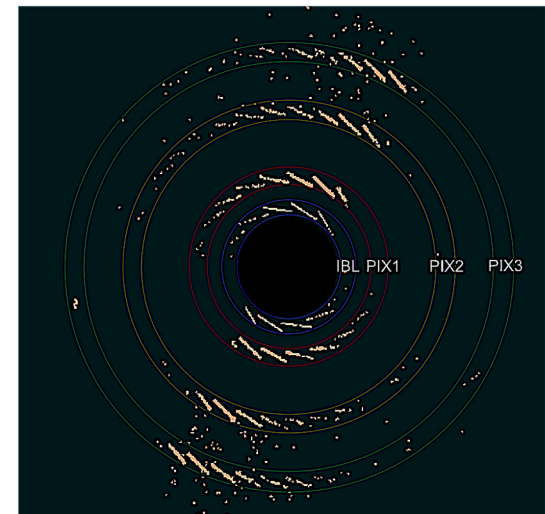
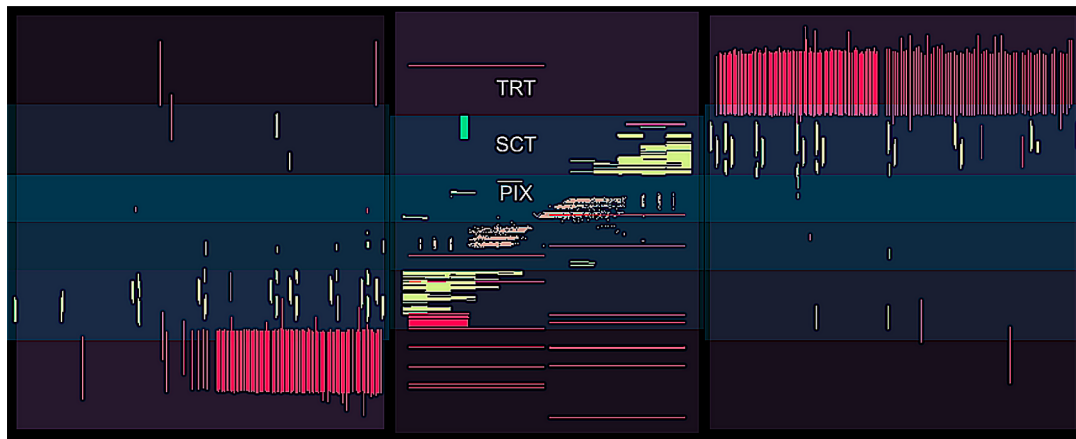
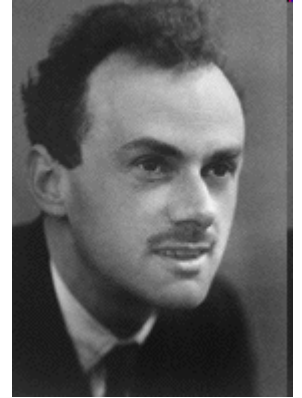
Major Péter (ELTE) mérése
egy repülőút során, 2025.

Kozmikus sugárzás



Antirészecskék?

- P. A. M. Dirac (1933 Nobel-díj)
- Dirac-egyenlet (1928)
- **Megjósolta** az antirészecskék létezését elméleti (matematikai) alapon
- A kvantum-elektrodinamika (QED) atyja
- Mágneses monopólus és elektromos töltés kvantumának kapcsolata (jóslat): a mai napig kutatási terület



Antielektron (pozitron), 1932

Carl David Anderson (Nobel-díj: 1936):

ködkamra

ólomlemezen áthaladó **kozmikus sugárzás**

1300 db fénykép, 15 pozitív track

mágneses tér

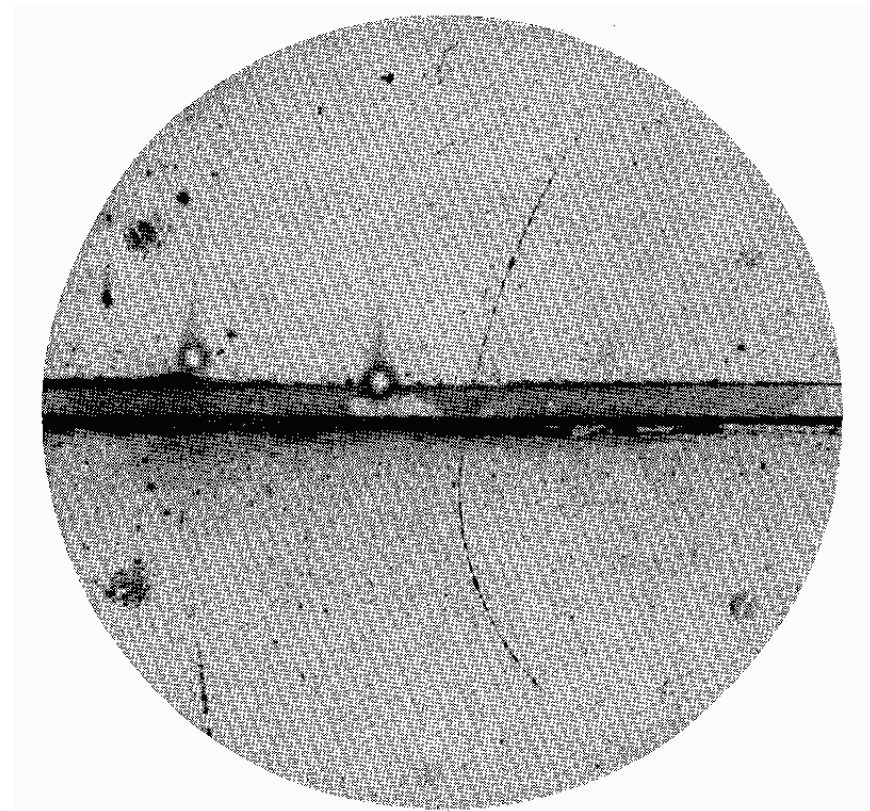
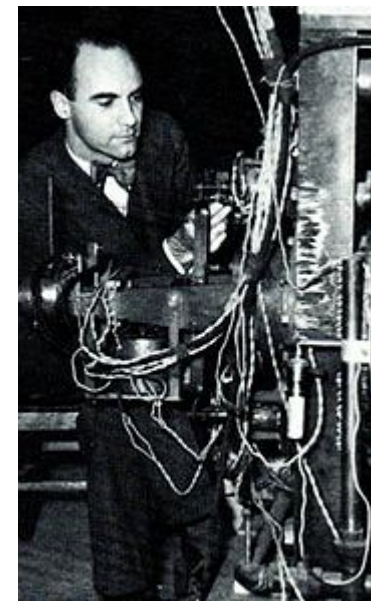
proton kizárható (Pb lemez)

Energiavesztesség, ionizáció: a **töltés**
biztosan kevesebb mint 2 egységnyi

Görbület és ionizáció: a **tömeg** kisebb
mint az elektrontömeg 20-szorosa!

Mindig más részecskékkel együtt látható.

Az első **ANTI**részecske!



Pozitron

SPECIAL ARTICLES

THE APPARENT EXISTENCE OF EASILY DEFLECTABLE POSITIVES

Up to the present a positive electron has always been found with an associated mass 1,850 times that associated with the negative electron. In measuring the energies of charged particles produced by cosmic rays some tracks have recently been found which seem to be produced by positive particles, but if so the masses of these particles must be small compared to the mass of the proton. The evidence for this statement is found in several photographs, three of which are discussed below.

In one instance, in which a lead plate of 6 mm thickness was inserted in the cloud-chamber, tracks of a particle were observed above and below the lead. The curvature due to the magnetic field was measurable both above and below the lead. There are the following alternative interpretations:

(1) a positive particle of small mass penetrates the lead plate and loses about two thirds of its energy; or

(2) two particles are simultaneously ejected from

the lead, in one direction a positive particle of small mass, in the opposite direction an electron; or

(3) an electron of about 20,000,000 volts energy penetrates the lead plate and emerges with an energy of 60,000,000 volts, having gained 40,000,000 volts energy in traversing the lead; or

(4) the chance occurrence of two independent electron tracks in the chamber, so placed as to give the appearance of one particle traversing the lead plate.

In another instance two tracks of opposite curvature appear below the lead. The alternative interpretations are:

(1) a positive particle of small mass and an electron emerging from the same point in the lead; or

(2) a positive particle of small mass strikes the lead and rebounds with a loss in energy; or

(3) an electron of about 20,000,000 volts energy strikes the lead and rebounds with 30,000,000 volts energy; or

(4) the chance occurrence of two independent electron tracks.

In the third instance two tracks appear below the lead plate. The alternative interpretations are:

(1) a positive particle of small mass and another positive particle emerge from the same point in the lead; or

(2) a 4,000,000 volt electron rebounds from the lead producing the second track; but here a difficulty is met with, since a change in the sign of the charge would have to be assumed to take place in the rebound of the electron; or

(3) the chance occurrence of two independent tracks.

For the interpretation of these effects it seems necessary to call upon a positively charged particle having a mass comparable with that of an electron, or else admit the chance occurrence of independent tracks on the same photograph so placed as to indicate a common point of origin of two particles. The latter possibility on a probability basis is exceedingly unlikely.

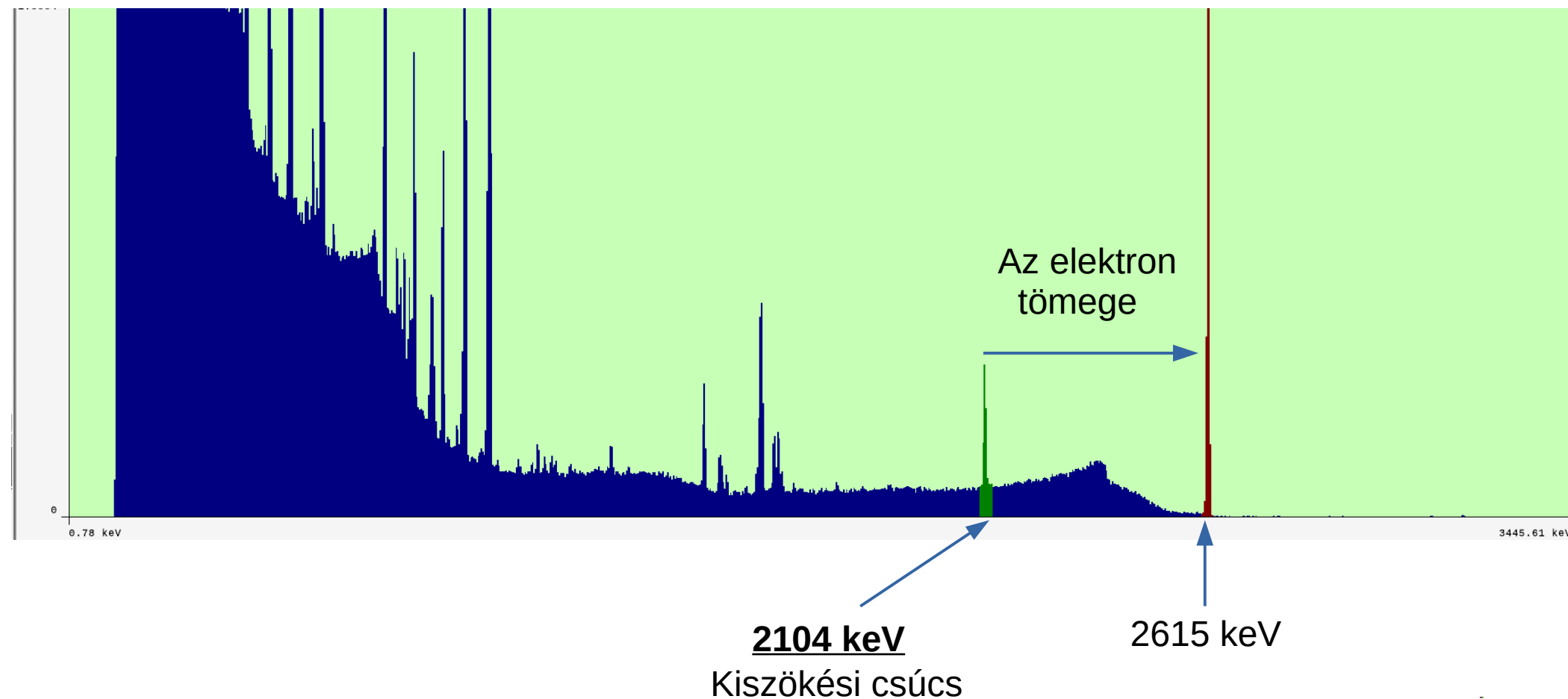
The interpretation of these tracks as due to protons, or other heavier nuclei, is ruled out on the basis of range and curvature. Protons or heavier nuclei of the observed curvatures could not have ranges as great as those observed. The specific-ionization is close to that for an electron of the same curvature, hence indicating a positively-charged particle comparable in mass and magnitude of charge with an electron.

CARL D. ANDERSON

CALIFORNIA INSTITUTE
OF TECHNOLOGY,
SEPTEMBER 1, 1932

“A könnyen eltéríthető pozitív
részcskék látszólagos létezése”

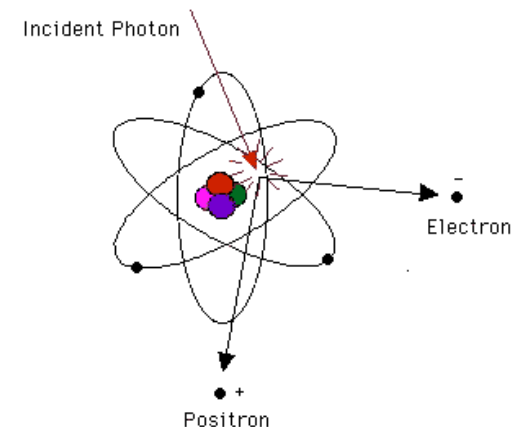
További bizonyíték antirészecskére



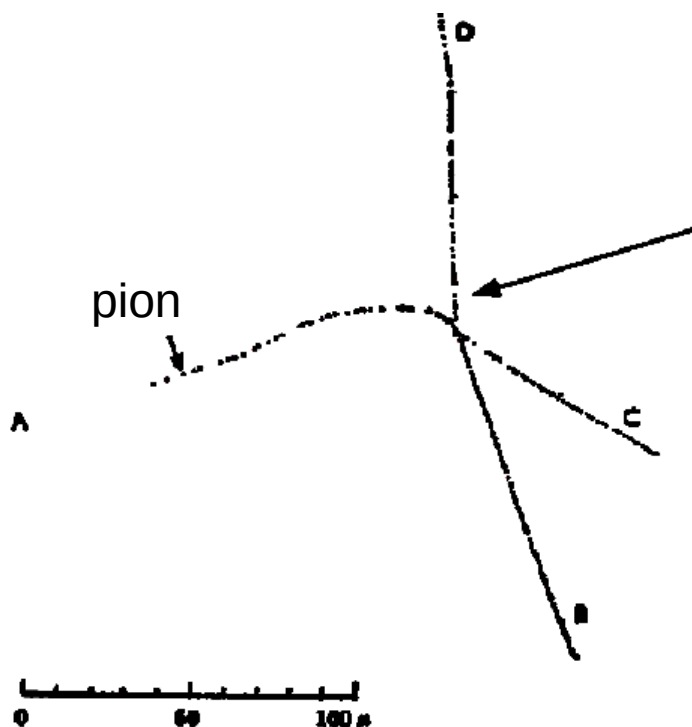
Tórium minta gamma-spektruma
ELTE, hallgatói labor

Elektron-pozitron párkeltés:

Atommag vagy más részecske közelében
A foton energiája egy elektron-pozitron pár
keltésére, és azok mozgási energiájára fordítódik.
Ehhez legalább $2m_e c^2$ foton-energia kell (2×511 keV).



Az első megfigyelt pion



Miért új részecske a bal oldali track?

- elektron nem lehet, túl messzire eljutott
- müon nem lehet, túl sok nukleáris kölcsönhatás fordult elő
- proton nem lehet, túl sokszor szóródik



1947 Cecil Powell (Nobel-díj: 1950), Lattes
Bristol
fotoemulzió (Ag)
hegytető
 kozmikus sugárzás

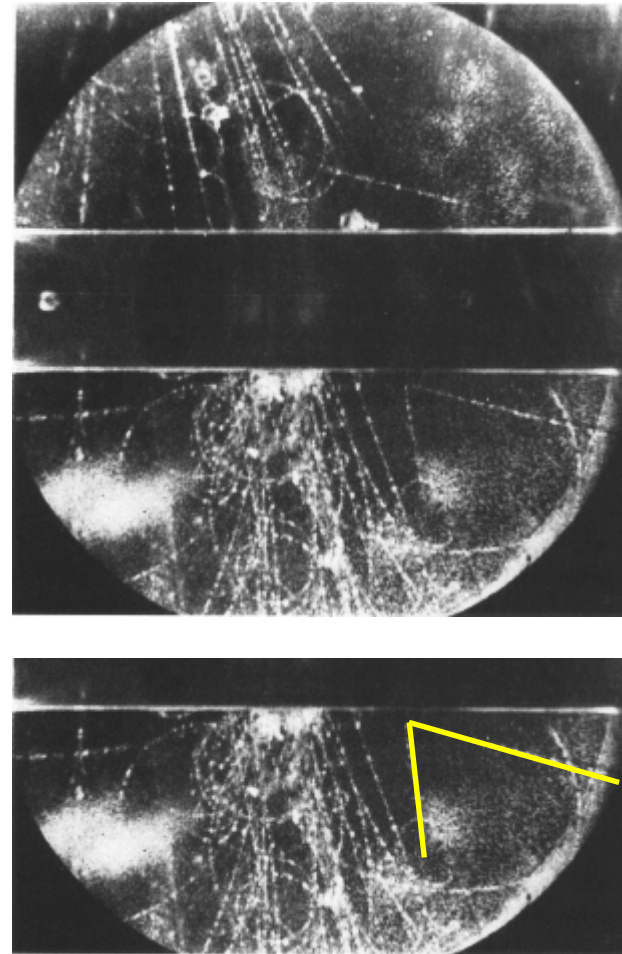
V-részecske

felfedezés: 1946, Rochester, Butler

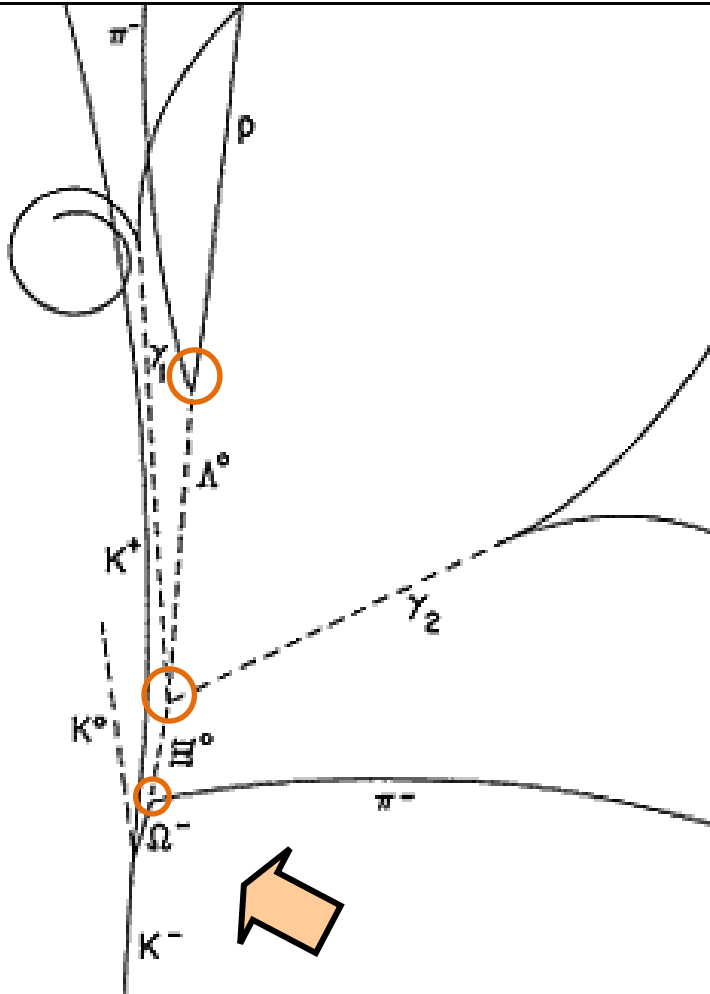
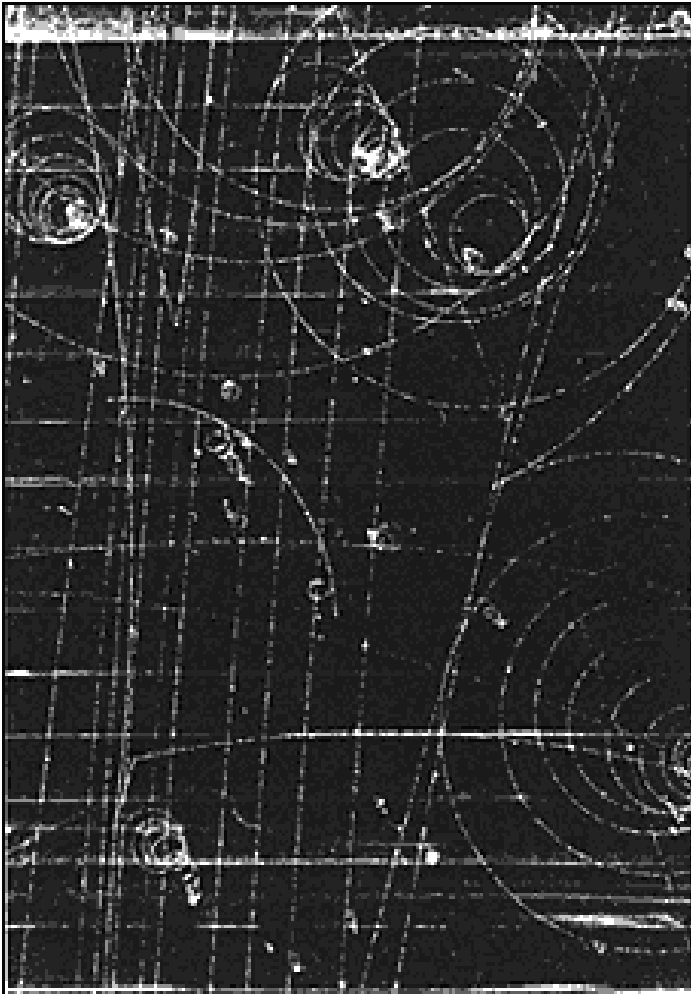
ezen a képen egy **semleges részecske bomlásakor** két töltött részecske (töltött pionok) nyoma villa alakot (sárga) rajzol ki

A kozmikus sugárzás hatására az elnyelő ólomban keletkezett.

Nem lehet e^-e^+ pár (közelebb kéne lenniük!), nem lehet pion- vagy müonbomlás (lendület megmaradás), hanem egy **új semleges részecske**, tömege a pionénál nagyobb (kb. fél protontömeg), neve **kaon** lett.



Az Ω^- részecske, 1964



Nicholas Samios

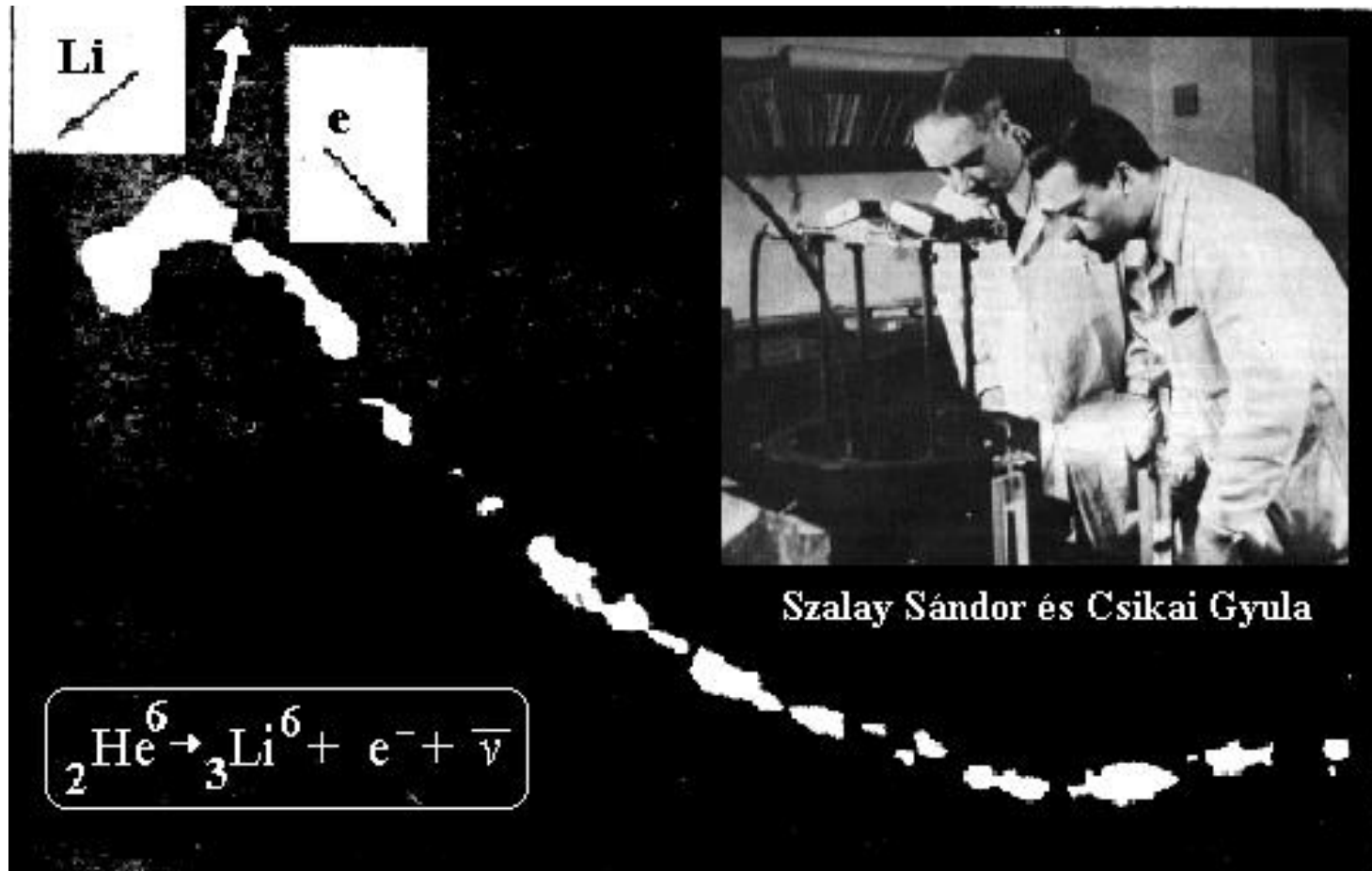
Brookhaven
National
Laboratory



Kaonok nyalábja! Ez a részecskét előtte megjósolták
A második bomlásterméke is ritka, ... $\rightarrow$ ritkaság $s = -3$!!!

Valaminek a hűlt helye?

A Szalay–Csikai-kísérlet

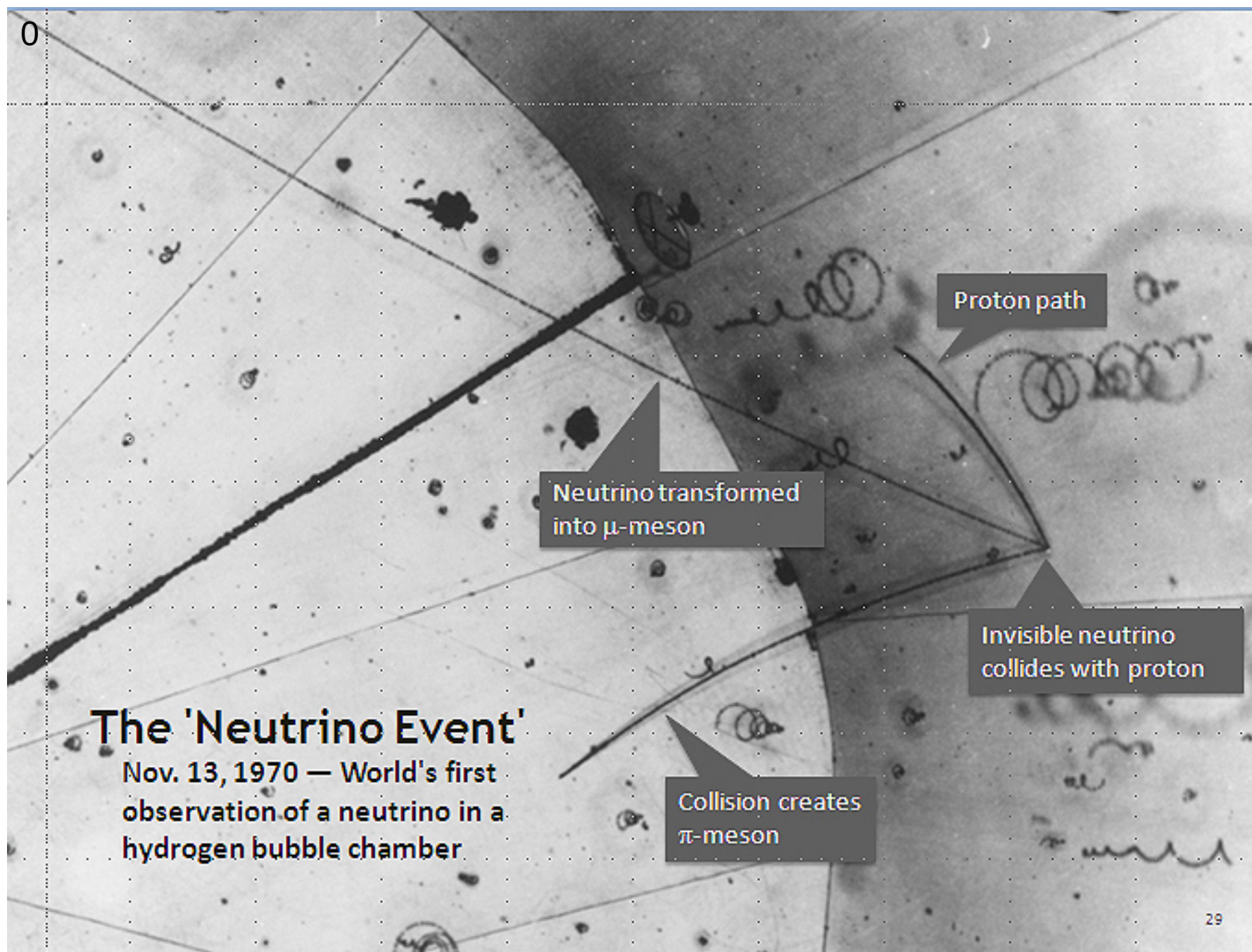


A neutrínó „hűlt helye”, ködkamrafelvétel, Debrecen, 1957

Vastag nyom – lítium, vékony az elektron, az összlendület nem 0

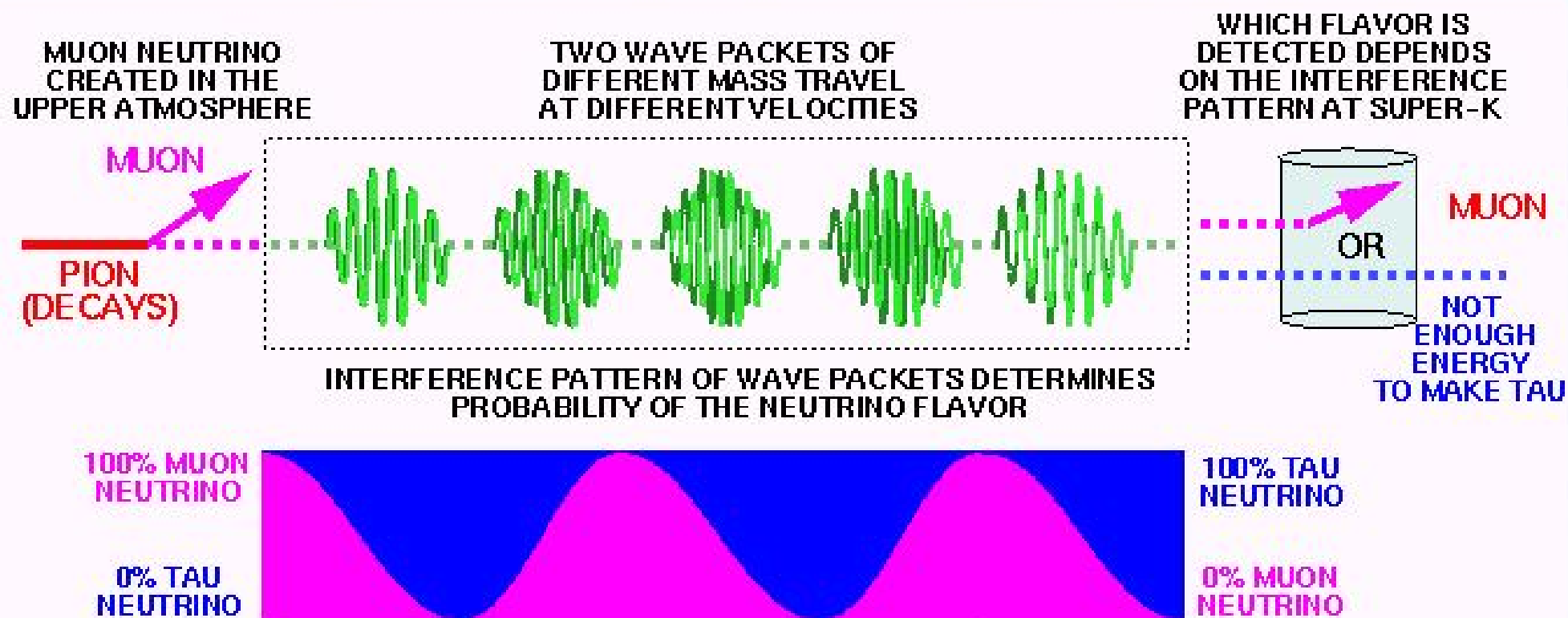
Kell, hogy legyen egy láthatatlan részecske is!

Neutrínó-megfigyelés, 1970



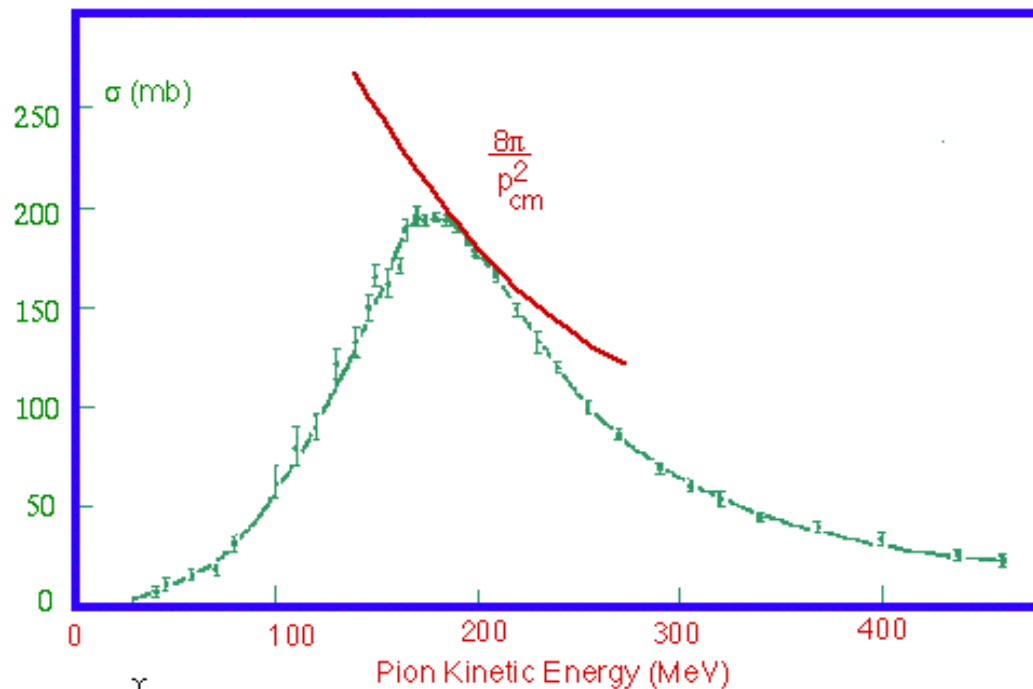
Neutrínók tömege

Oszcilláció a neutrínók eltérő tömege miatt



Rezonanciák

π^+p total cross section: $\Delta^{++}(1236)$



Mass: $M = 1232$ MeV

Full Width: $\Gamma = 120$ MeV

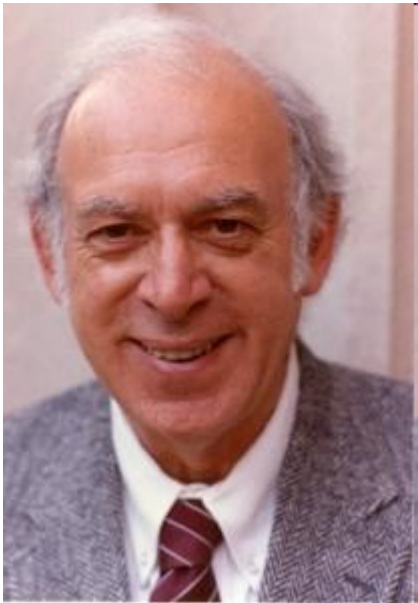
Spin: $3/2$

Branching Ratio : $BR(\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p) = 99.5\%$

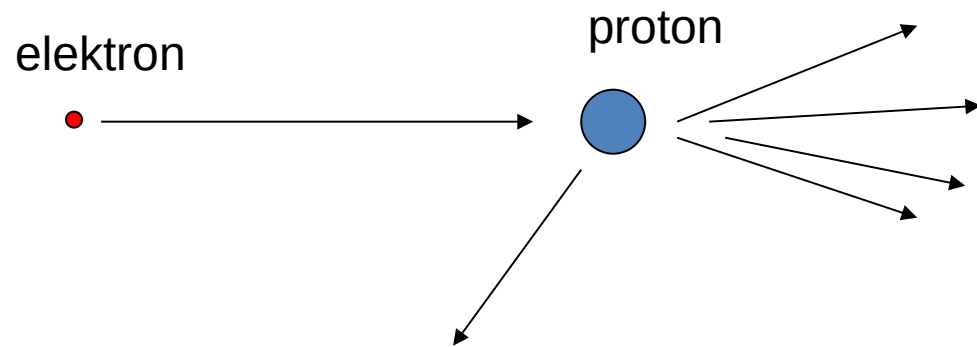
$\pi^+ + p$ ütközés hatáskeresztmetszete:
rezonanciacsúcs
részecskének értelmezzük: Δ^{++}

Kvarkok: 1968

1968-69: szórás kísérletek Stanfordban: a protonnak belső szerkezete van!



Jerome I. Friedman (1930-)
Nobel-díj: 1990

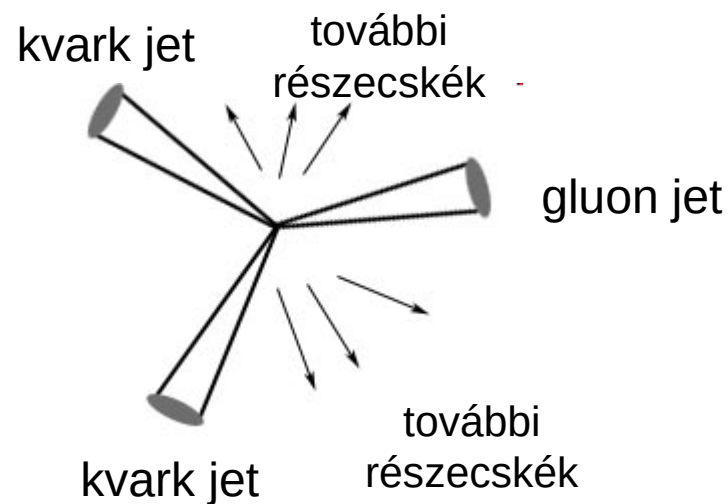
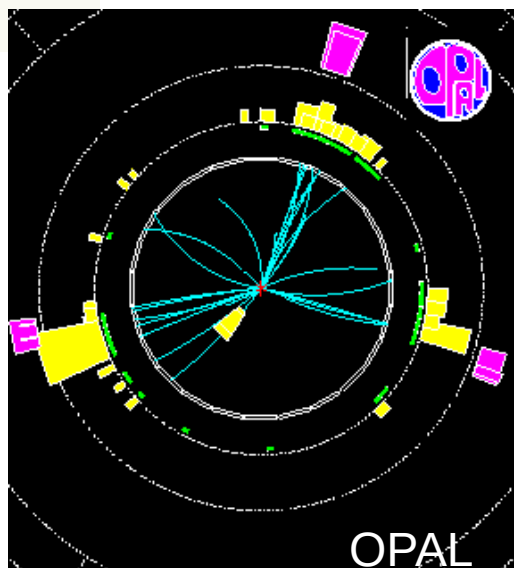
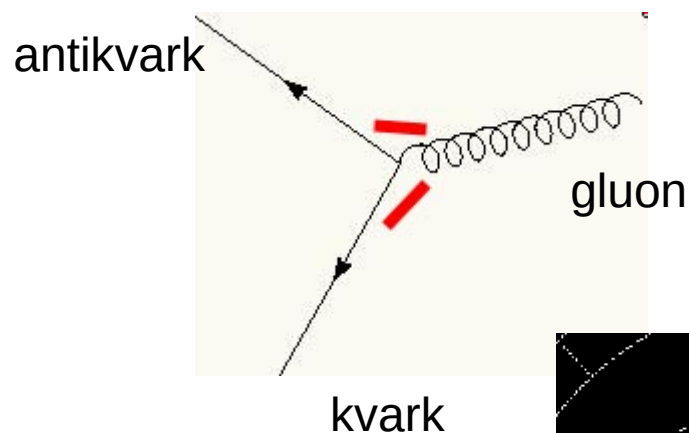


gyakran különösen nagy
szögben is szóródnak az elektronok!
ez csak akkor lehet, ha a protonban
vannak apró alkotórészek.

Hasonló a Rutherford-kísérlethez!

Gluonok: 1979

- Három-jet események bizonyítják a létét
- Elektron-pozitron ütközések, PETRA kísérlet, Hamburg

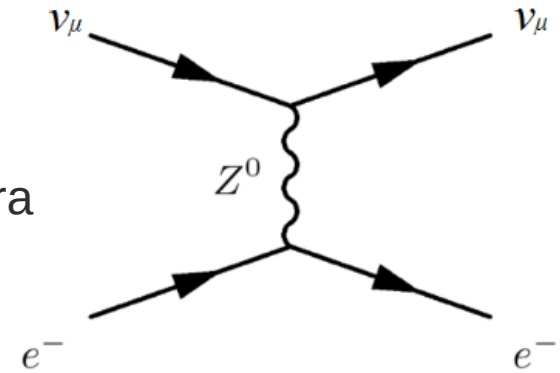


A Z bozon közvetlen felfedezése

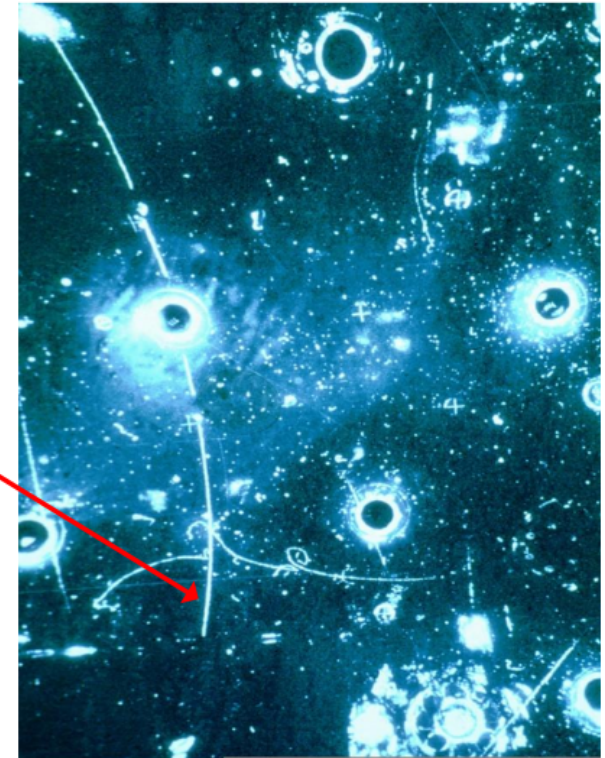


A Gargamelle buborékkamra

(műon-) Neutrínó nyalábot irányítottak a buborékkamrára

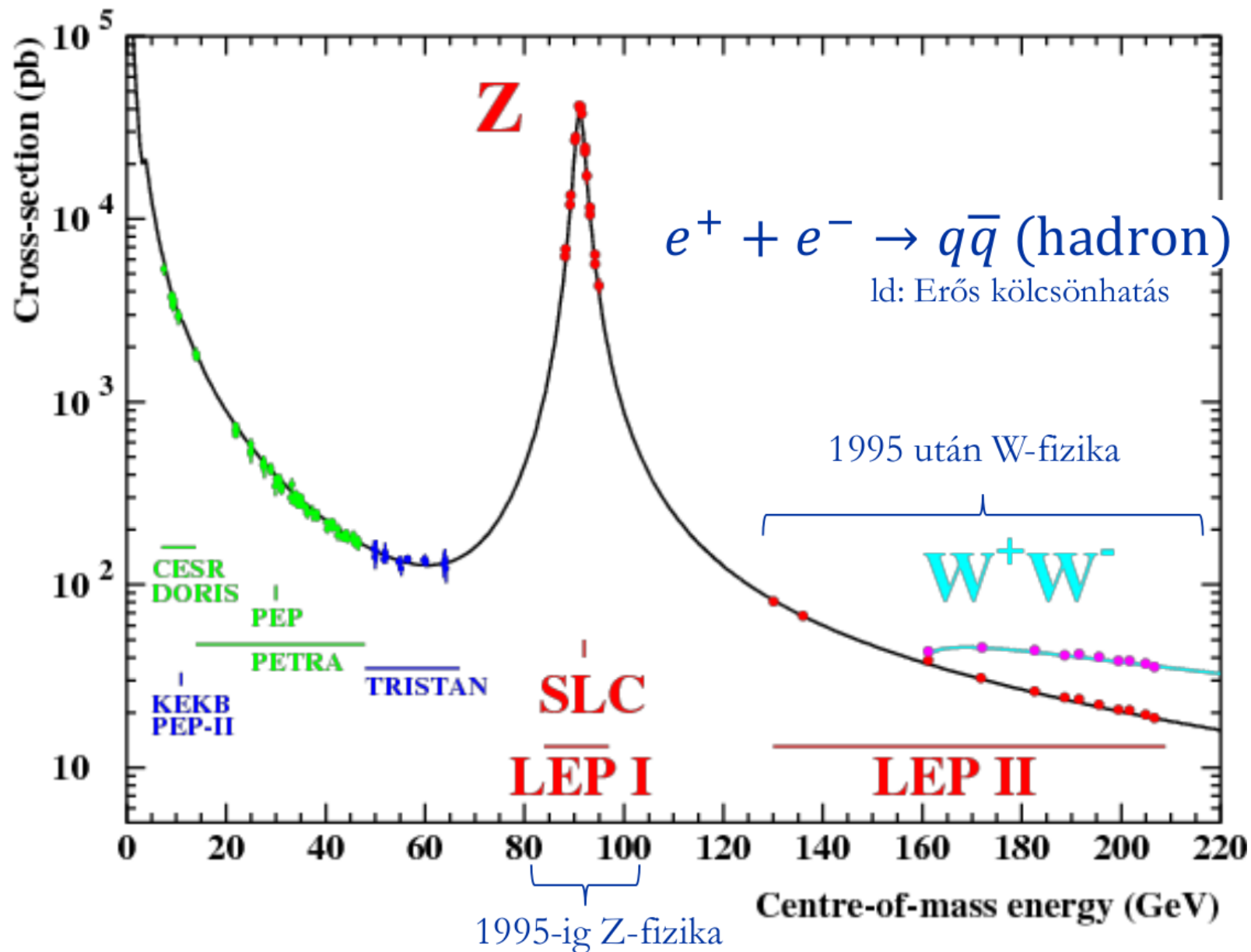


- A neutrínó meglöki az elektront, amely így lendületet nyer!
- A kamrában „**semmiből**” kiinduló **elektronnyom**
- > 1 millió képen összesen 3 esemény!
- Glashow, Weinberg és Salam 1979-ben Nobel díjat kap

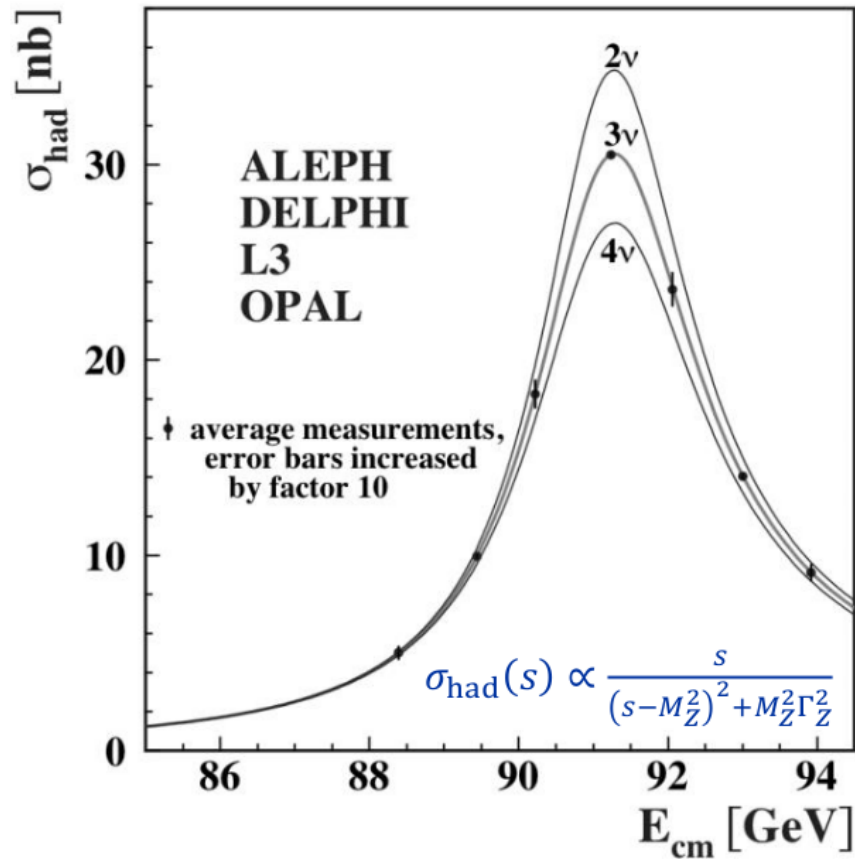


cds.cern.ch/record/39468

Z bozonok gyártása



Részecskecsaládok száma?

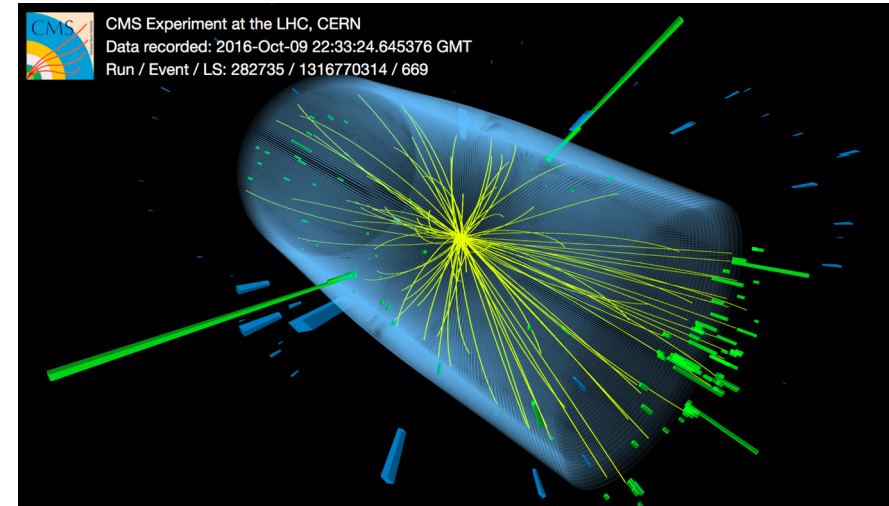
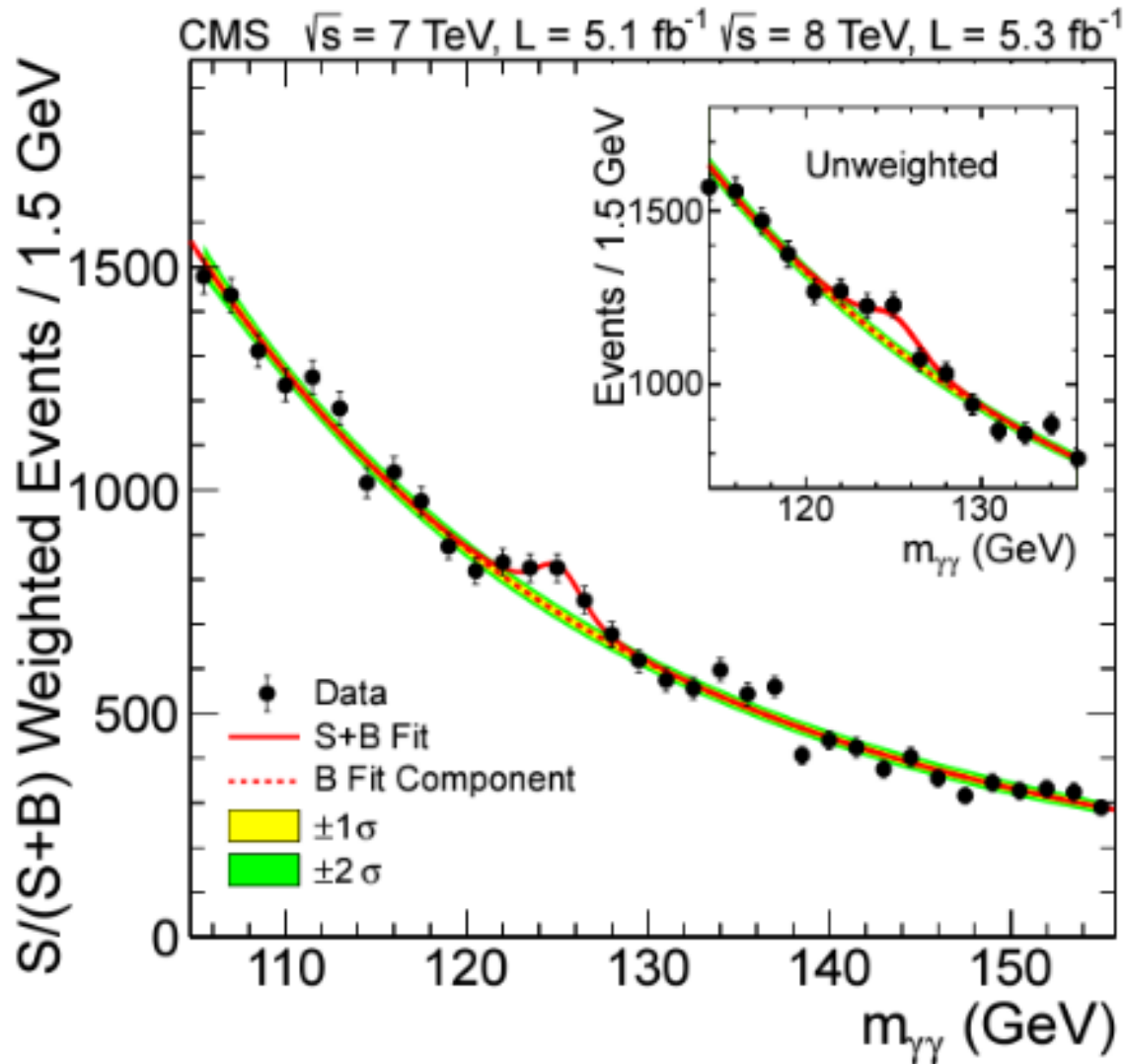


$$\Gamma_Z = \Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{\text{had.}} + N_\nu \Gamma_{\nu\nu}$$

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$

$$e^+ + e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow q\bar{q} \text{ (hadron)}$$

Higgs bozon, 2012



Honnan tudunk a részecskékről?

Látjuk őket (vagy a nyomaikat): ködkamra, buborékkamra, szikrakamra

Elektromos jelet keltenek: félvezető nyomkövető, gáztöltésű detektorok... számítógépes rekonstrukció

Csak a **hűlt helyüket** látjuk: neutrínók, hiányzó energia

Nem látjuk őket, de valamit “**meglöknek**”: neutrínók, sötét anyag?

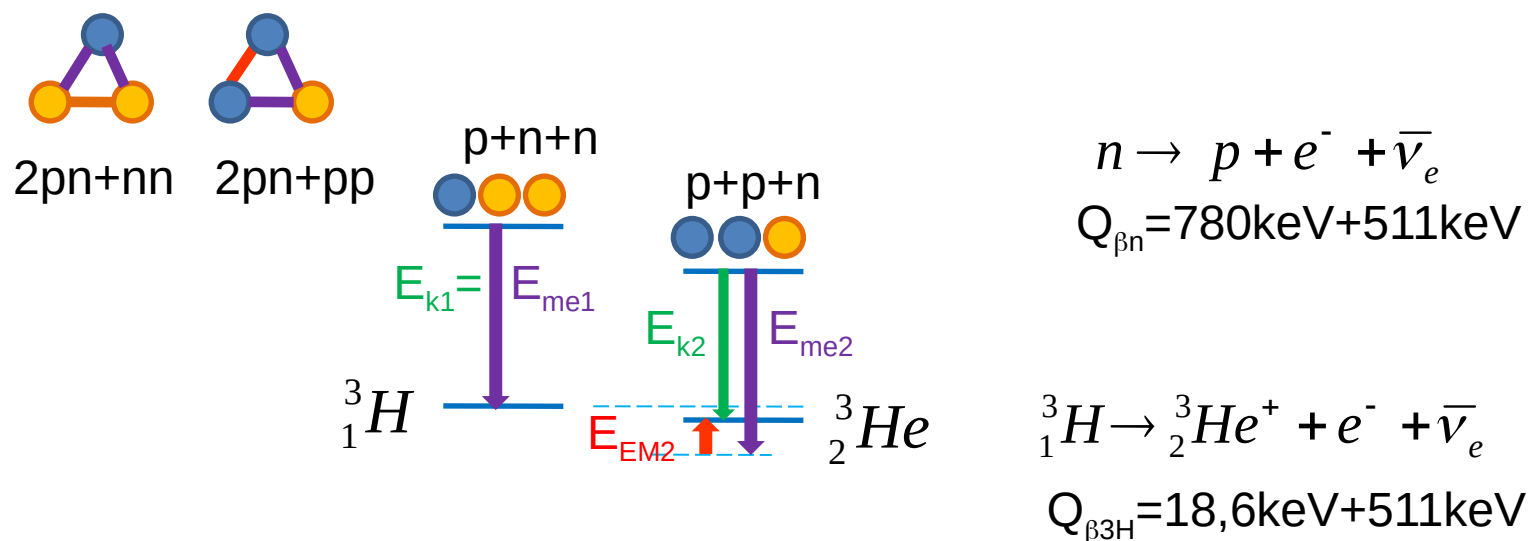
A **bomlástermékeiket** látjuk: V-részecskék, Higgs

Megsemmisülnek, ha mással találkoznak: antirészecskék

Rezonancia-jelenséget látunk (pl. részecskék ütközésekor)

Nemcsak részecskék, erők is!

Magerő: a neutronok, vagy a protonok között erősebb?



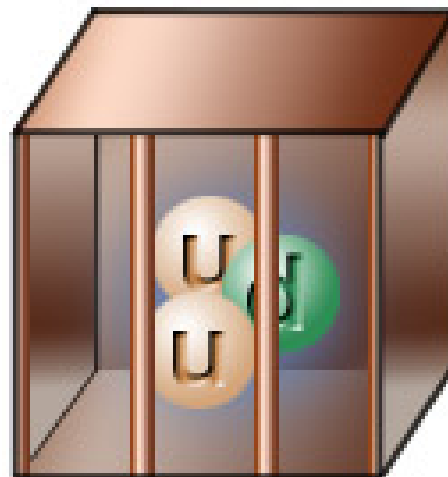
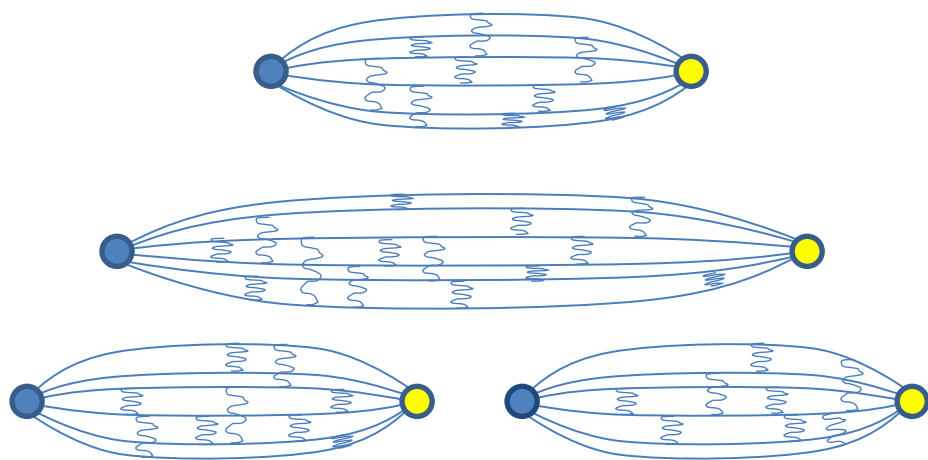
$$E_{k1} - E_{k2} = 780 \text{ keV} - 18,6 \text{ keV} = 761,4 \text{ keV}$$

$$E_{EM2} \approx (3/5) \text{ ke}^2 / R = 0,6 \cdot 1,44 \text{ MeV fm} / 1,15 \text{ fm} = 750 \text{ keV}$$

$$E_{me1} - E_{me2} = E_{k1} - E_{k2} - E_{EM2} = 760 \text{ keV} - 750 \text{ keV} \approx 0 \text{ keV}$$

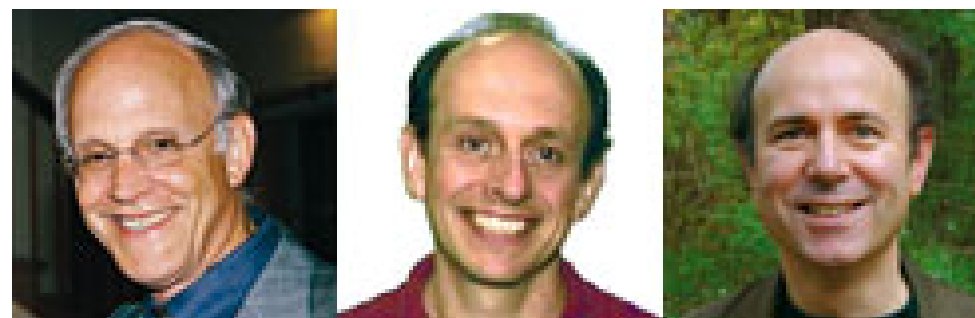
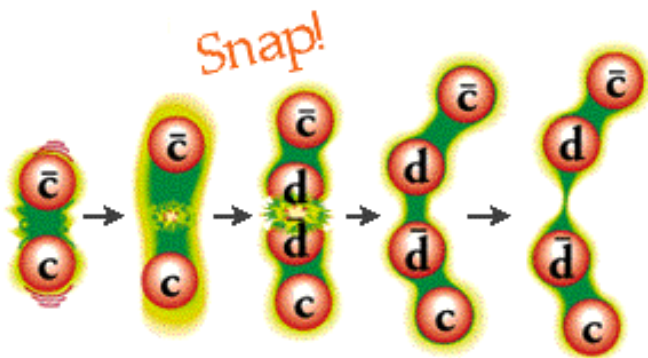
$$E_{nn} = E_{pp}$$

Kvark-bezárás



2004. Nobel-díj

Kvarkbezárás

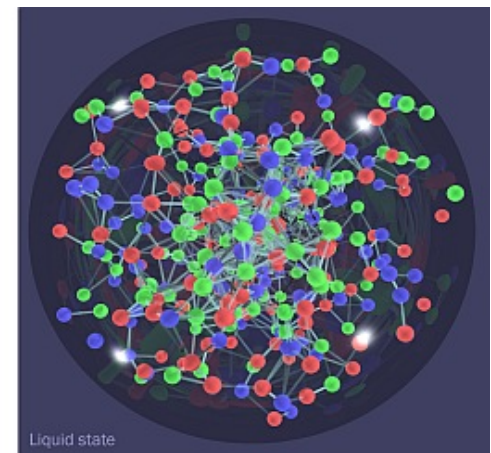
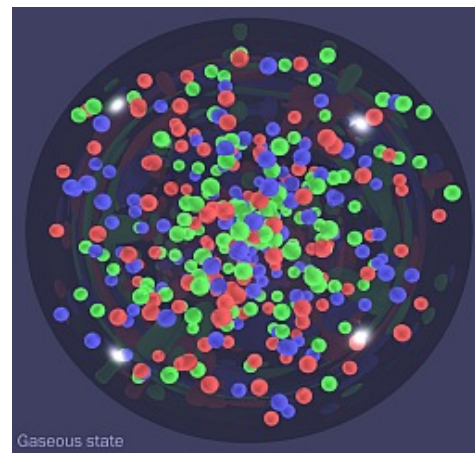
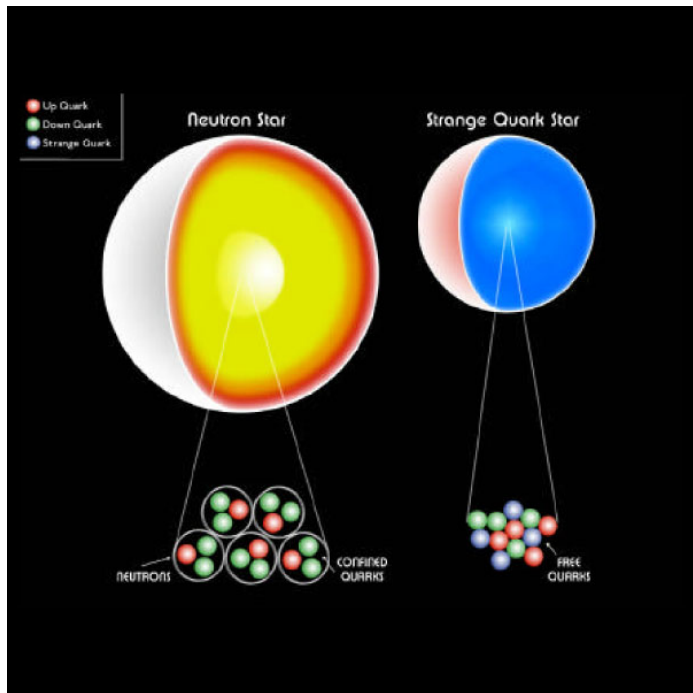
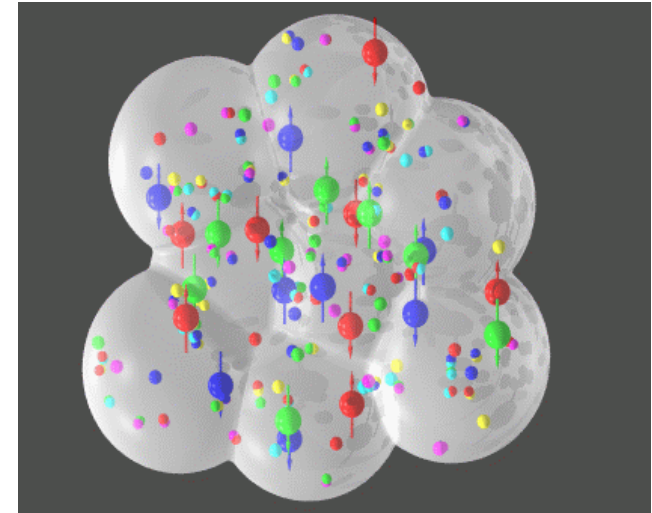
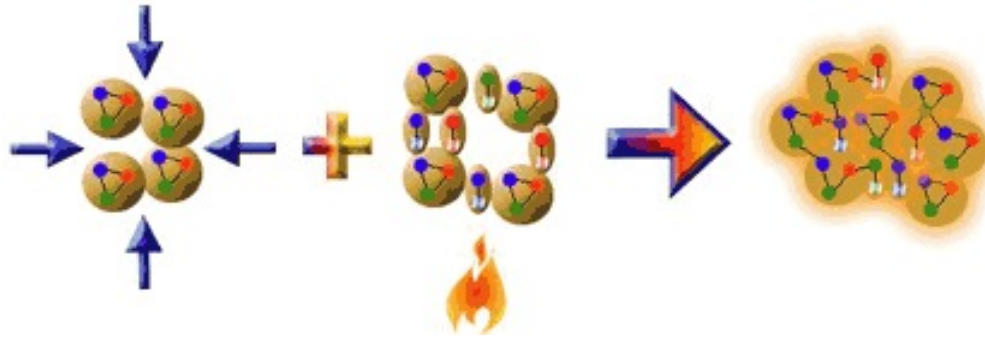


David J. Gross H. David Politzer Frank Wilczek

aszimptotikus szabadság

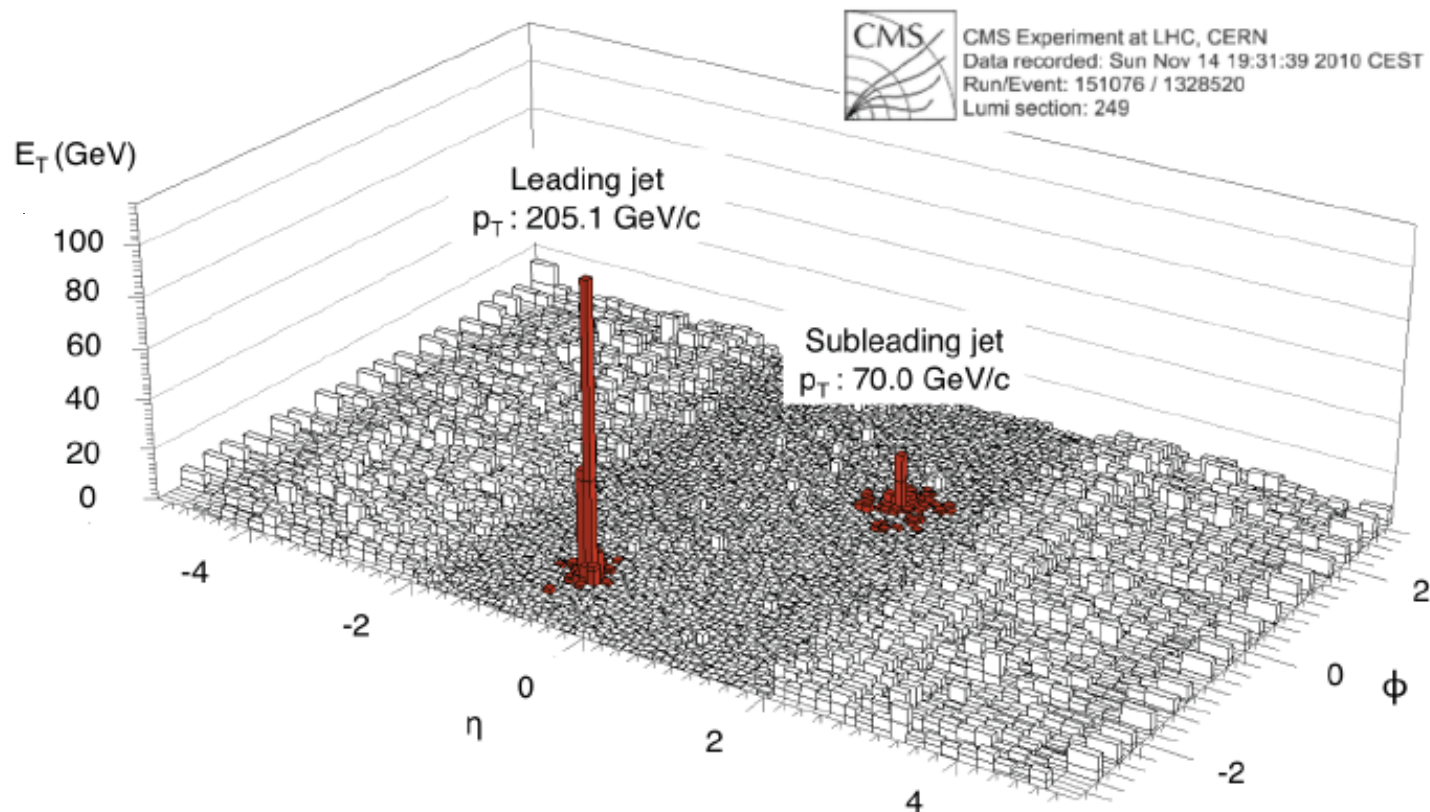
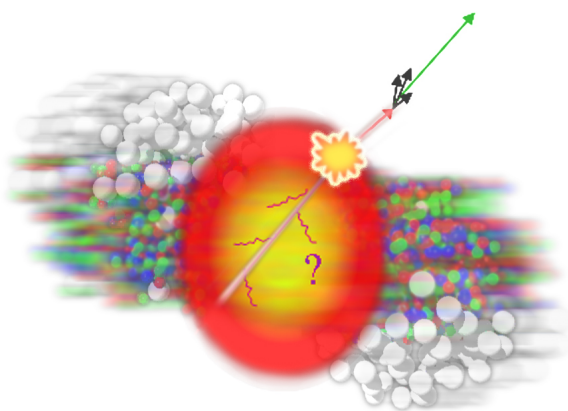
Nagy energiás ütközésekben
a kvarkok szabadnak látszanak

Kvark-gluon anyag

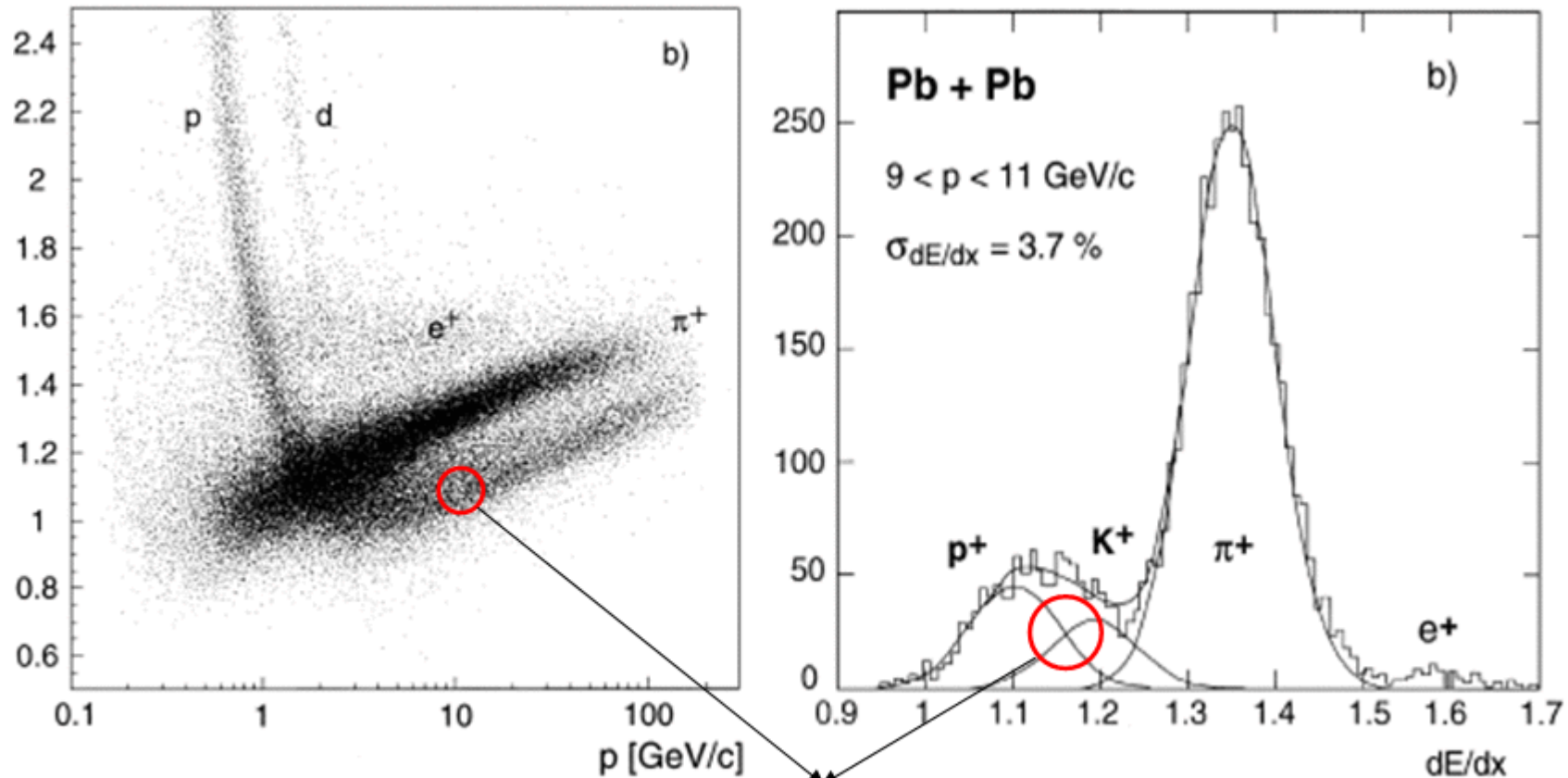


Ragacsos kvark-gluon anyag

Nehézion-ütközések (Pb+Pb), CERN LHC, 2010. november:
Az ellentétes irányban kirepülő jet-ek közül
az egyik rengeteg energiát veszít!



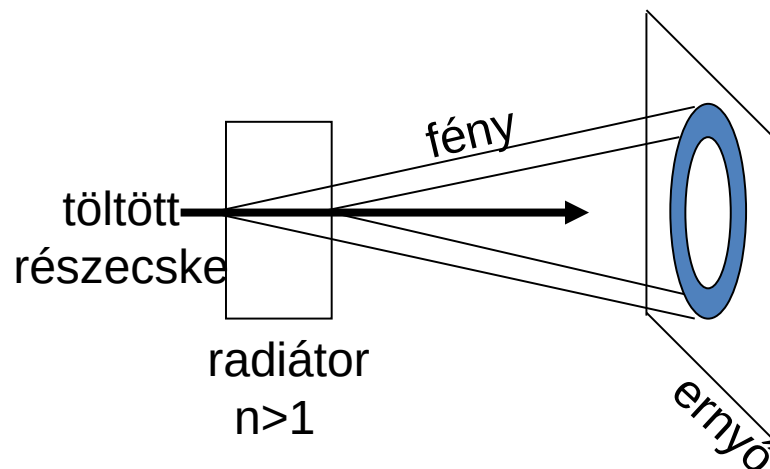
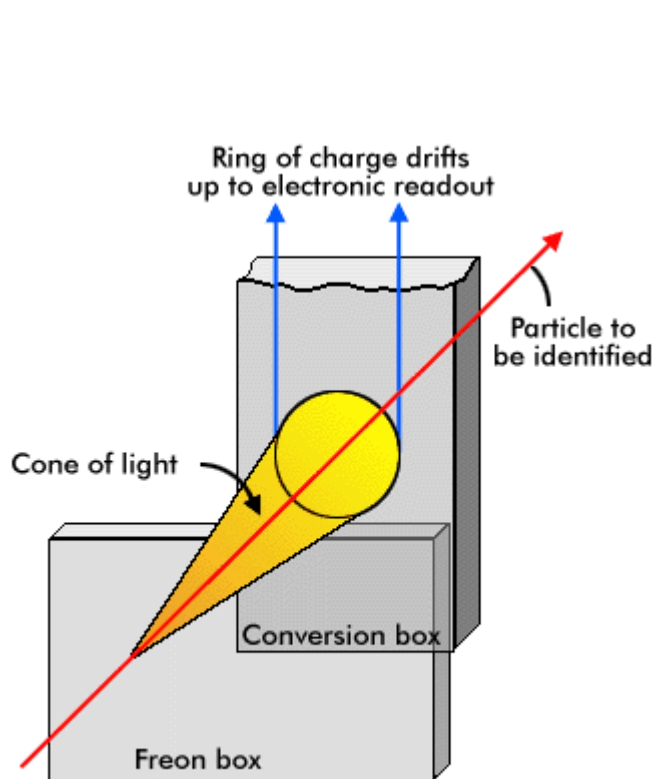
Részecskék felismerése



Az **impulzust** könnyű mérni mágneses térben a részecskepálya görbületéből
Az ionizáció (dE/dx) csak a **sebességtől** és a töltéstől függ
A különböző tömegű részecskék szétválnak az ábrán!

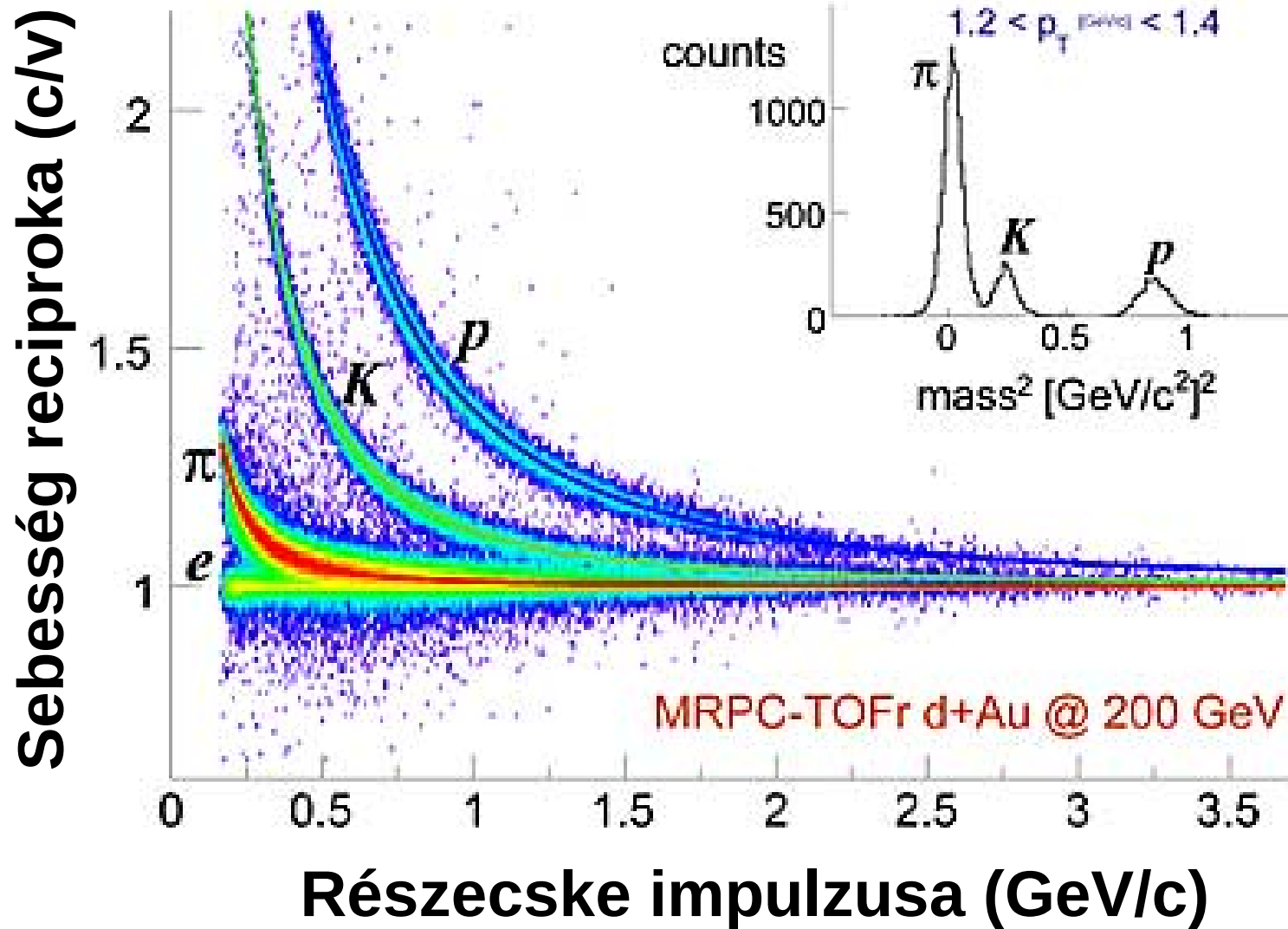
Részecskék felismerése

Cserenkov-detektor



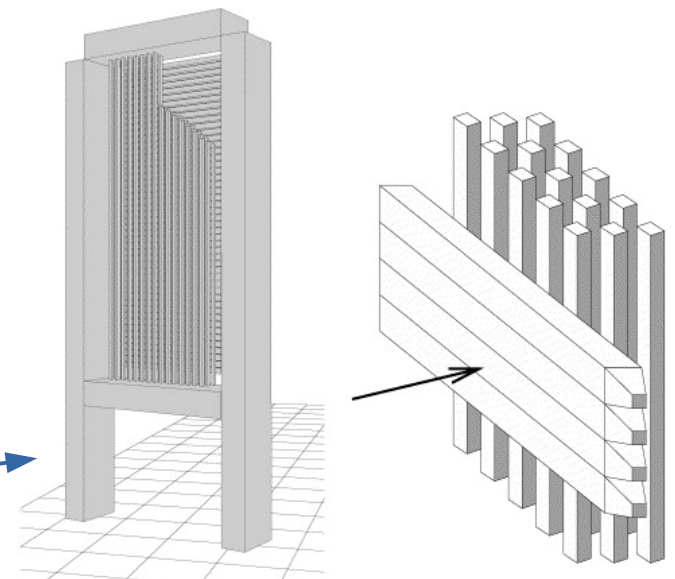
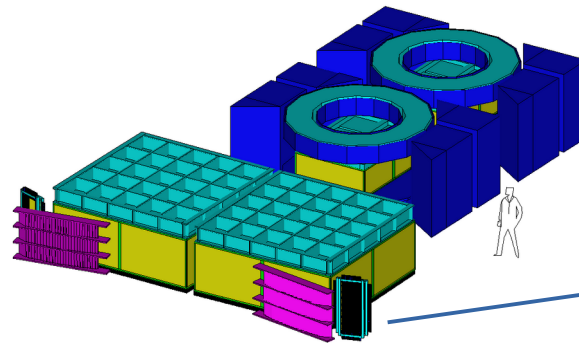
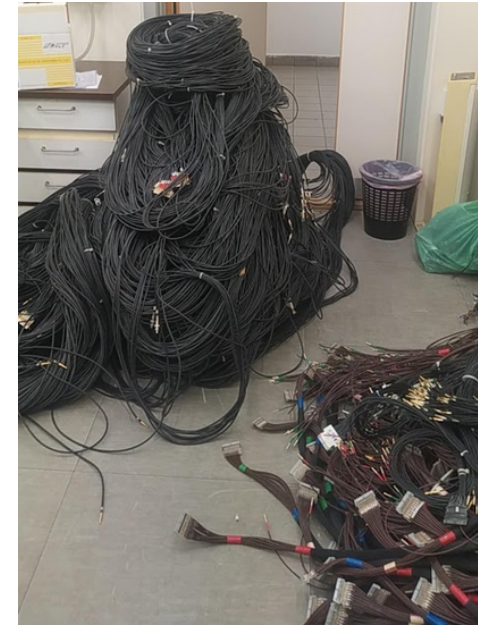
A fotonokat detektáljuk (pl PMT, fotodióda)
Körlap vagy körgyűrű vagy körvonal alakú
mintázatokat keresünk (ellipszis is lehet).

Részecskék felismerése



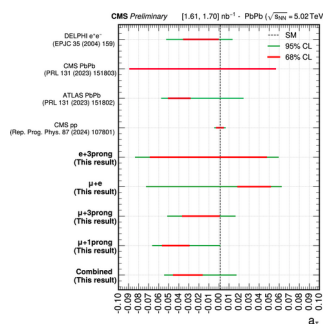
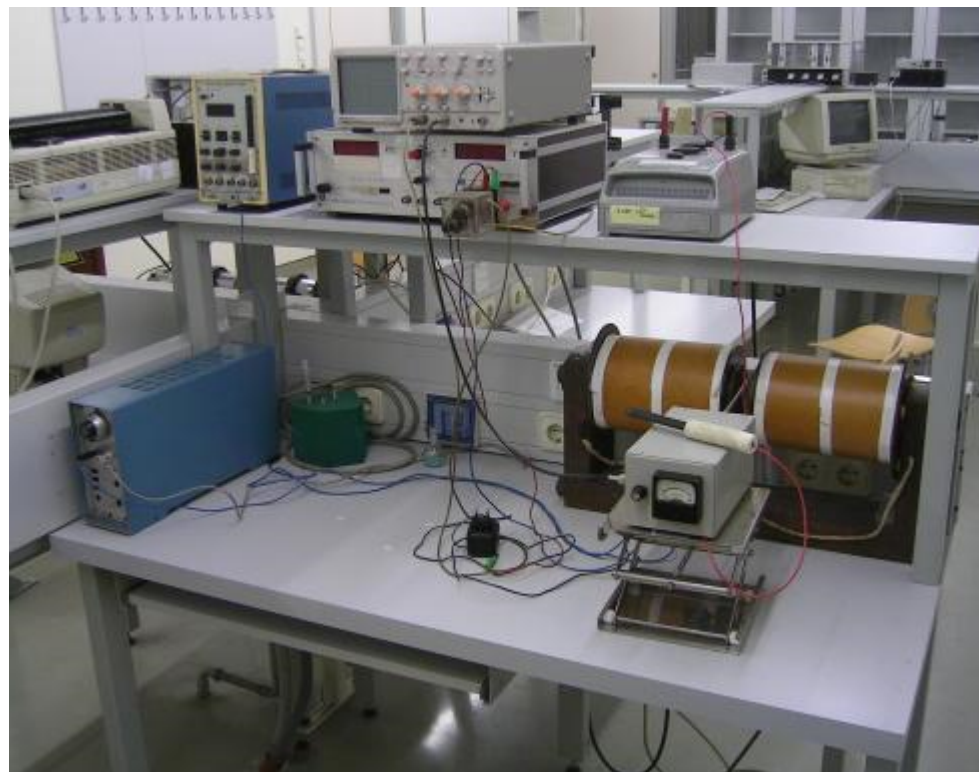
Repülési idő mérése (műonok)

ELTE, hallgatói labor



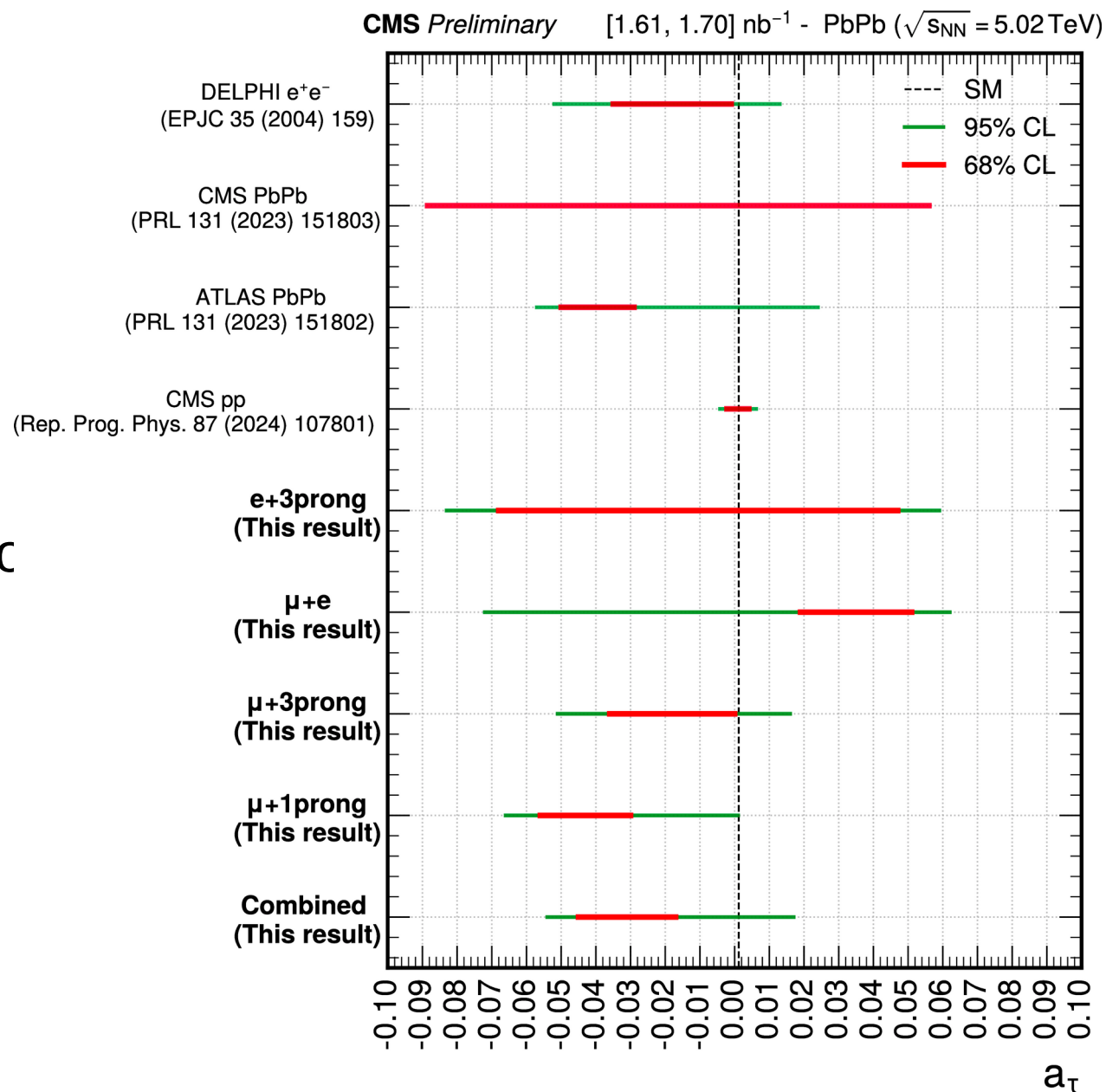
Részecskék tulajdonságai

- Példa: proton mágneses momentuma. *Milyen erős mágnes egy proton?*
- Rádiófrekvenciás tekercs jósági tényezőjét mérjük (elnyelődés a mintában), változtatva a mágneses teret és a rádiófrekvenciát
- (ELTE, hallgatói labor)
- Tau részecskére: ma sem tudjuk!



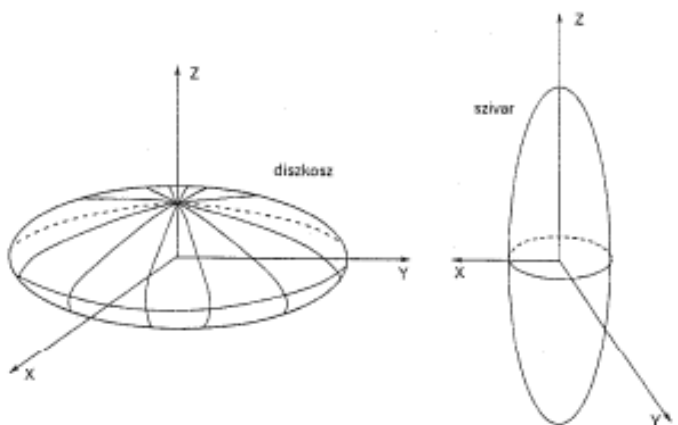
Részecskék tulajdonságai

- Mágneses momentum
- Tau részecskére: ma sem tudjuk (pontc



Részecskék tulajdonságai

- Példa: atommagok elektromos kvardupól-momentuma
- Mössbauer-effektus, 10^{-15} pontosságú relatív energiamérés
- (ELTE, hallgatói labor)



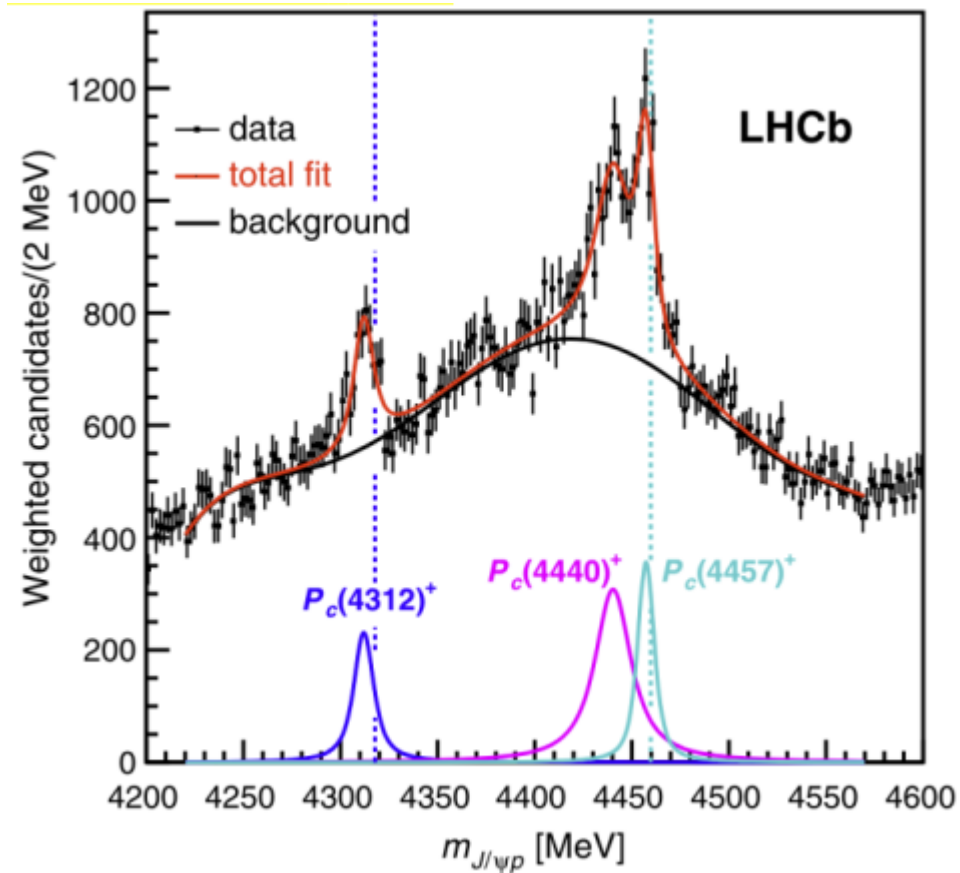
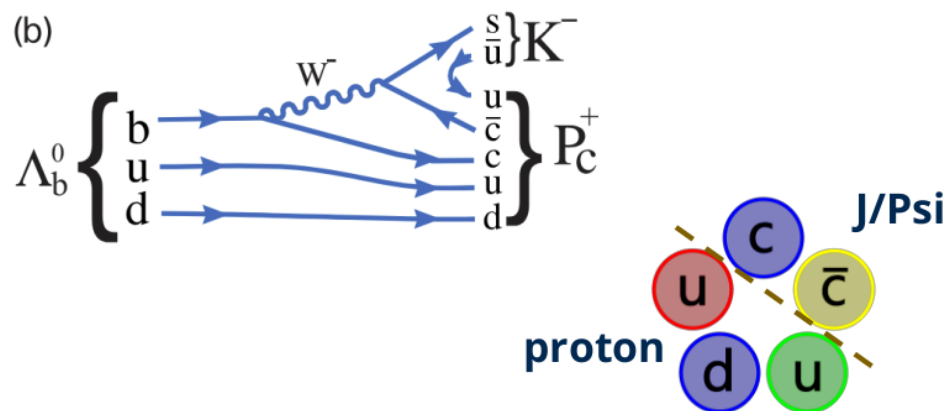
A megismert *elemi* részecskék

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

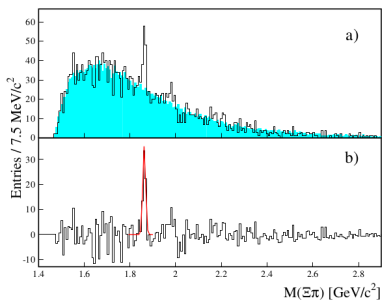
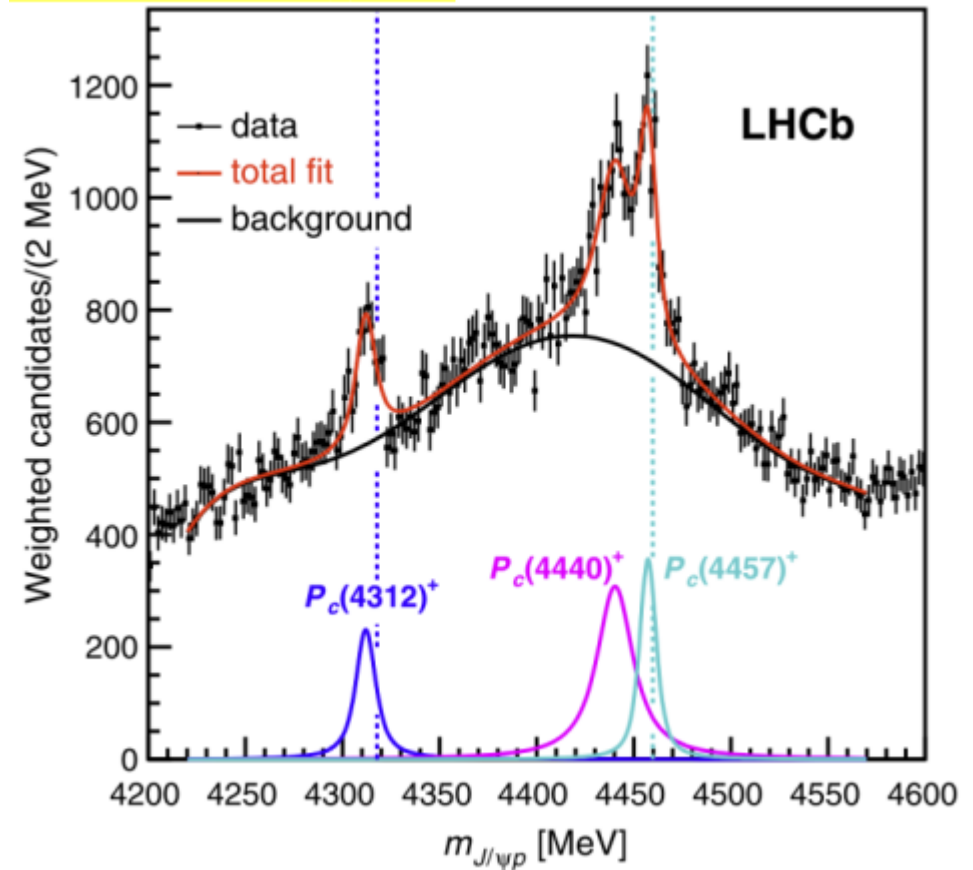
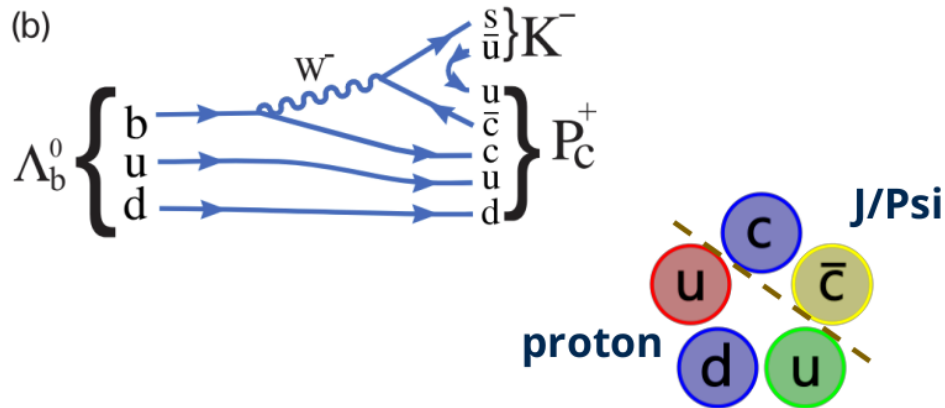
	I	II	III		
tömeg→	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
név→	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
	4,8 MeV/c ² $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d-kvark	95 MeV/c ² $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s-kvark	4,2 GeV/c ² $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b-kvark	0 0 1 gluon	
Kvarkok					
	<2,2 eV/c ² 0 $\frac{1}{2}$ elektron-neutrínó	<0,17 MeV/c ² 0 $\frac{1}{2}$ műon-neutrínó	<15,5 MeV/c ² 0 $\frac{1}{2}$ tau-neutrínó	91,2 GeV/c ² 0 1 Z ⁰ Z-bozon	
	0,511 MeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$ elektron	105,7 MeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$ műon	1,777 GeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$ tau	80,4 GeV/c ² ± 1 1 W [±] W-bozon	
Leptonok					

Bozonok (kölsönhatások)

Pentakvarkok, 2015



Pentakvarkok, 2015



Observation of an Exotic $S = -2$, $Q = -2$ Baryon Resonance in Proton-Proton Collisions at the CERN SPS

Phys.Rev.Lett.92:042003,2004

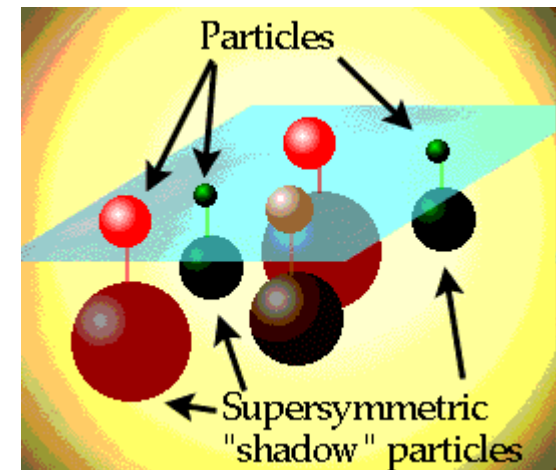
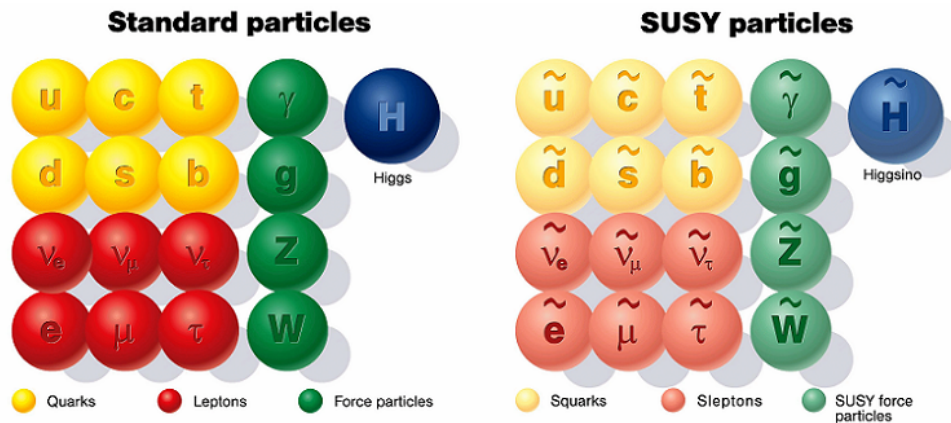
Szuperszimmetria

A feles és egész spinű részecskéket összekötő „tükrözés” (bozon-fermion)
Ezt a szimmetriát nem figyelték még meg.

A részecskefizika **nagy problémáit oldaná meg**, ha létezne:

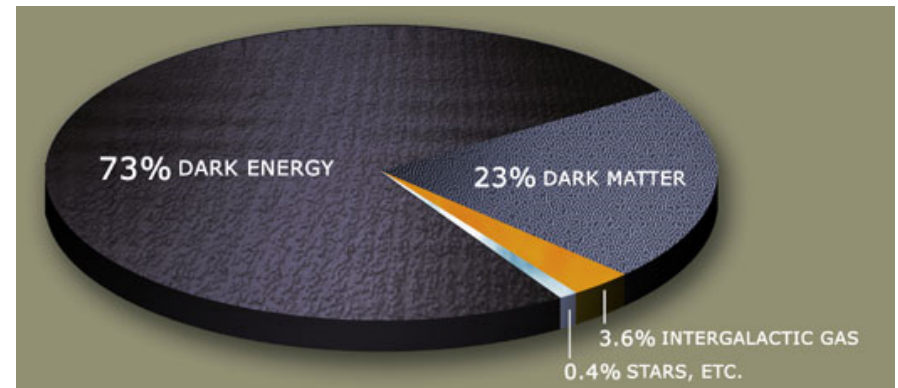
- Hierarchia-probléma: a részecskék tömege sokkal nagyobb lenne, mint amekkorát kísérletileg kapunk, ha nincs finomhangolás
- Gyenge, erős és elektromágneses kölcsönhatás egyesítése.

Miért erősebb 32 nagyságrenddel a gyenge kölcsönhatás a gravitációnál?
Óriási kvantum-korrekciók.

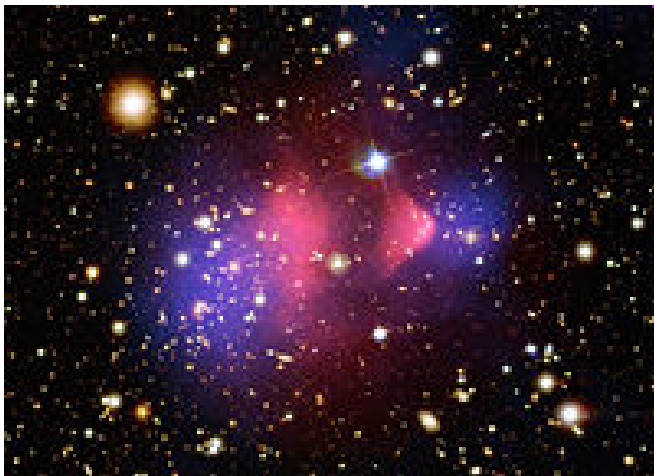


Miből áll a Világegyetem?

Csak az Univerzum 4% -a áll az ismert részecskékből. A többi:
22%: **sötét anyag** és
74%: **sötét energia**



Sötét anyag: nem hat kölcsön az elektromágneses sugárzással, de a gravitációs hatásai érezhetőek (galaxisok forgása, kozmikus mikrohullámú háttér...).



↓

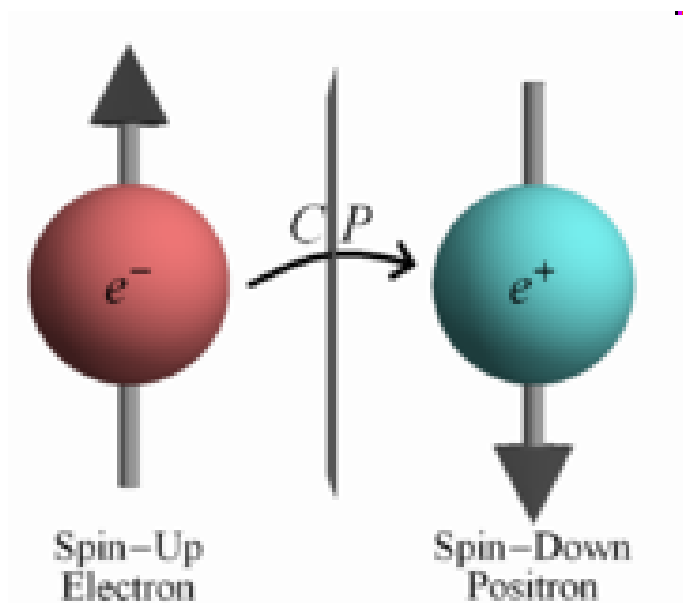
Mi lehet a sötét anyag?
Axionok, steril neutrínók, WIMP-ek...
Legkönnyebb szuperszimmetrikus részecskék

Bullet cluster: két galaxishalmaz ütközése
szokásos anyag: **piros**
gravitáló anyag: **kék**

Anyag - antianyag

Az Ősrobbanás során anyag és antianyag is keletkezett, melyek megsemmisülnek, ha találkoznak.

Miért van akkor ma sokkal több anyag, mint antianyag?



CP szimmetria: tértükrözés+”töltéskonjugálás”

A gyenge kölcsönhatás sérti ezt a szimmetriát.

Semleges kaonok és B mezonok bomlásánál vizsgálható. (LHCb kísérlet)

Az Ősrobbanás utáni másodpercekben a CP-sértés kellett az anyag-antianyag egyensúly felbomlásához.
(KÜLÖNBEN csak fotonok lézethnének!)

A Standard Modell sajnos nem ad elegendő mértékű CP-sértést ehhez.

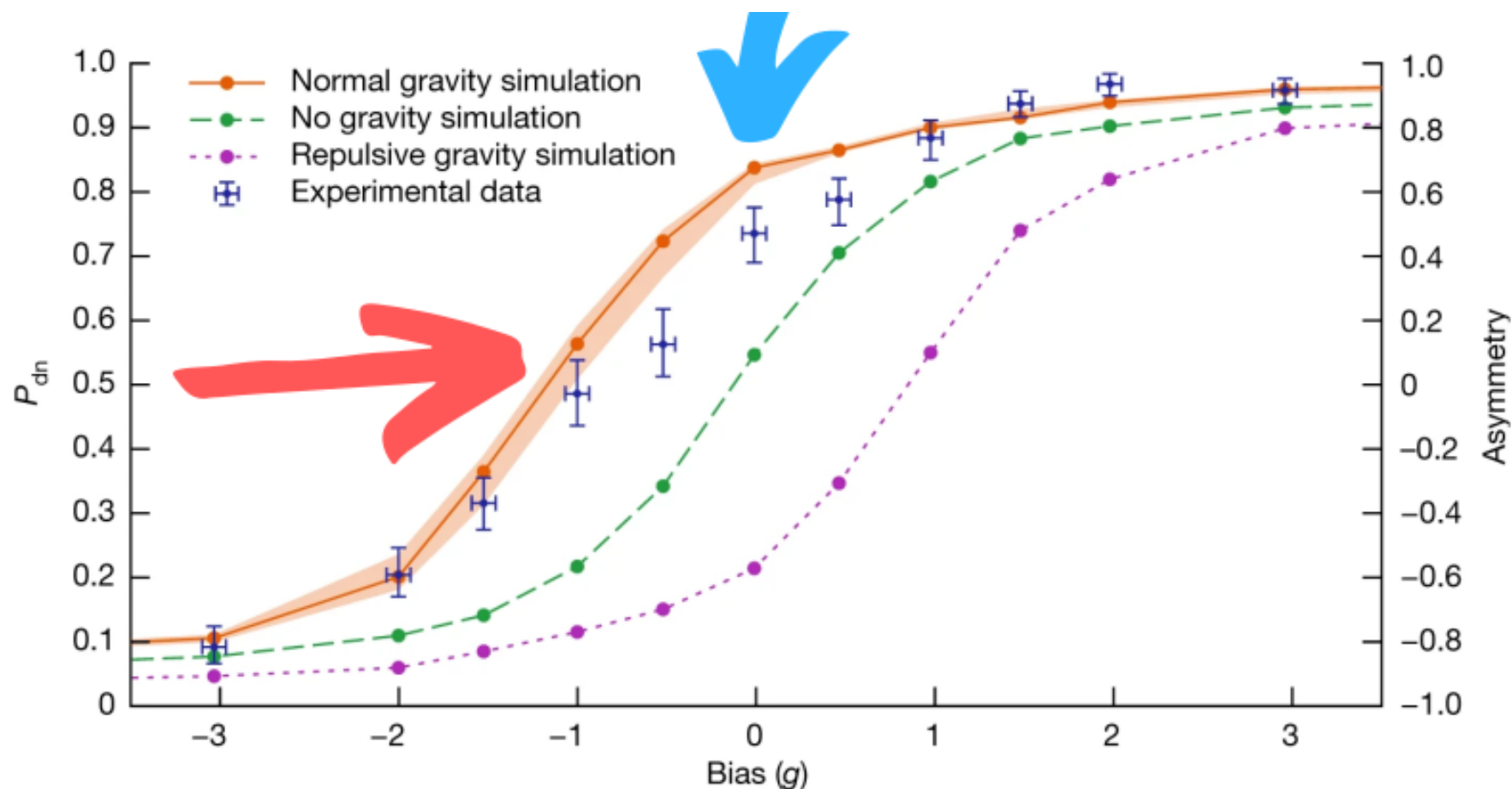
Antianyag a világűrben?



AMS kísérlet
Nemzetközi Űrállomás, 2011 – 2035?

Antigravitáció?

Felfelé esik-e az antianyag? Nem!!!! (CERN, 2023, ALPHA-g kísérlet)



A következő 70 év... FCC

Future Circular Collider

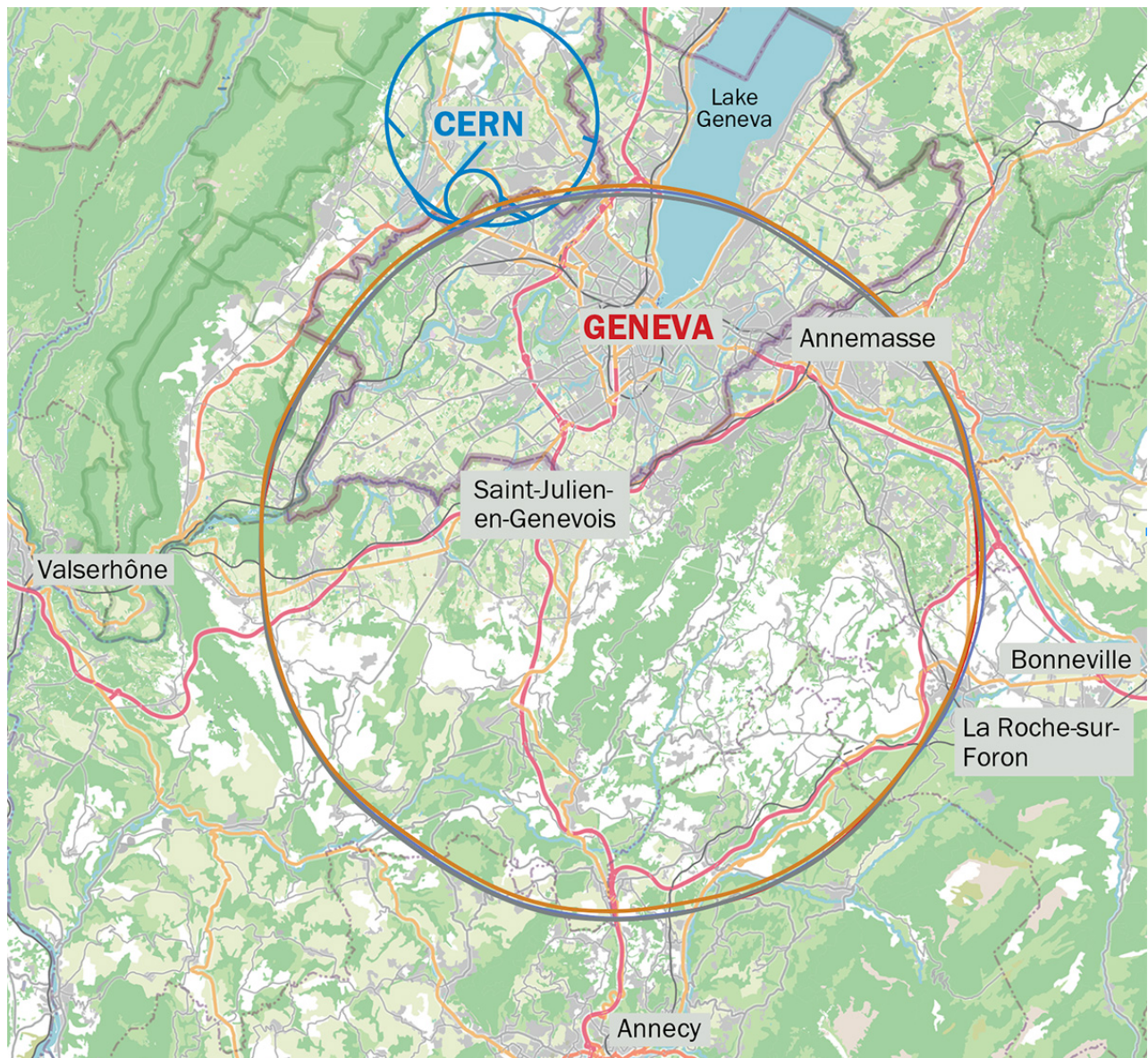
91 km hosszú alagút,
15 GCHF

2028: döntés

FCC-ee: 2045-2060,
elektron-pozitron
ütközések

FCC-hh: 2070-**2095**,
proton és nehézion
ütközések

Sötét anyag, nehéz
részecskék, új fizika,
precíziós Higgs mérések...



Hozzájárulás a tudományhoz

“Van-e középiskolásként nekem is esélyem felfedezni valamit?”

Igen, teljes mértékben!

A következő 70 évre már egészen konkrét tervek vannak!

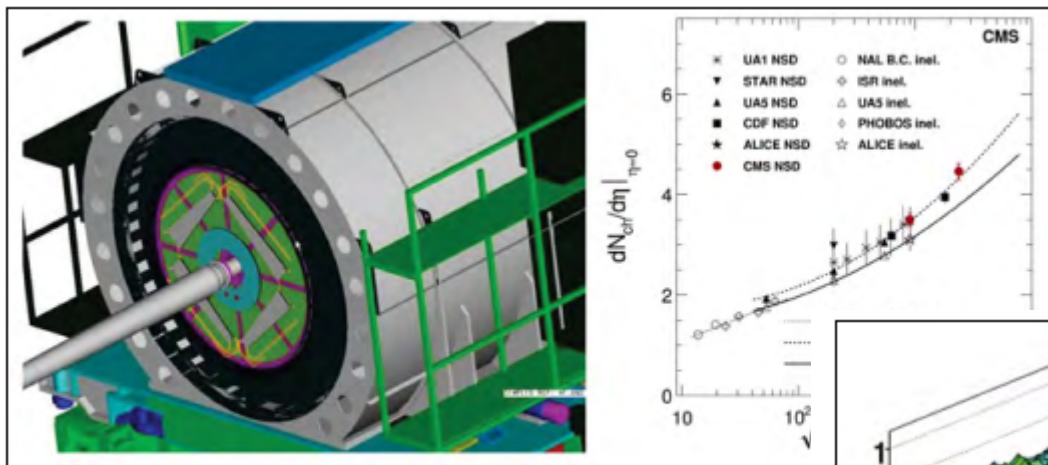
Magyarként is sikeres munkát végezhetünk!

A NAGY HADRONÜTKÖZTETŐ ELSŐ SIKEREI

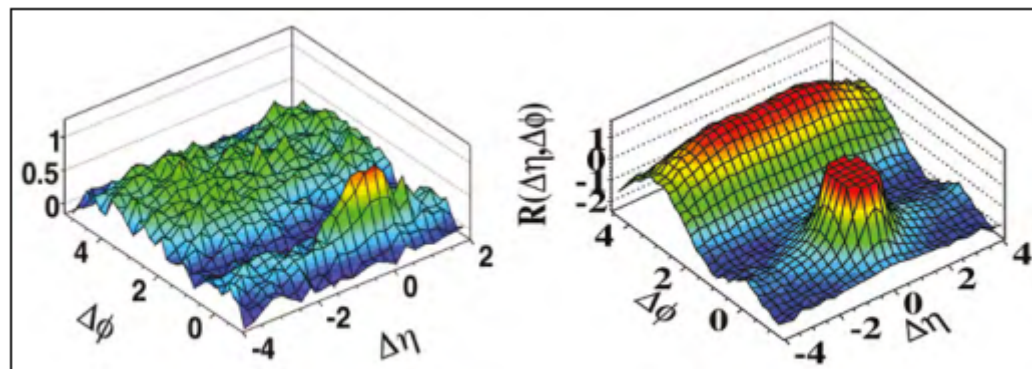
Veres I. Gábor

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: Gabor.Veres@cern.ch



2. ábra. a nyalábszcintillátor számláló (körgyűrű és rombuszok), amely az első ütkö CMS detektorában (bal oldal), valamint az első publikációban közölt eredmény a k máról az ütközési energia függvényében (jobb oldal [1])



3. ábra. Kétrészecske-korrelációk arany-arany (bal oldal [3]) és nagy multiplicitású proton-proton (jobb oldal [4]) ütközésekben



1. ábra. A Compact Muon Solenoid (CMS) kísérleti berendezés vázlatos rajza

Régebbi AtomCsill előadások

<https://atomcsill.elte.hu/NEW/events/tags/kiserleti-reszecskefizika/>

Kozmikus sugárzás, neutrínók:

Dávid Gyula: A Föld, mint fizikai laboratórium, 2006. jan. 12.

Patkós András: Részecskék az Univerzumban, 2006. feb. 16.

Veres Gábor: Kozmikus sugárzás a laborban...?, 2019. jan. 31.

Horváth Ákos: Négymillió éves neutrínók nyomában, 2019. dec. 5.

Nehézion-fizika:

Csörgő Tamás: Magyarok Amerikában – Forró nyomon az Ősanyag nyomában, 2007. okt. 11.

Lévai Péter: Nehézion ütközések az európai Szupergyorsítóban, 2008. márc. 27.

Csanád Máté: A millió tonnás dobókocka – hogyan működik az atommag anyaga? 2025. márc. 6.

Magfúzió:

Zoletnik Sándor: Hideg poroltó a földi Nap tüzésének elfújására, 2022. nov. 10.

Régebbi AtomCsill előadások

Müon tomográfia:

Barnaföldi Gergely: Kincskeresés kozmikus müonokkal, 2011. okt. 13.

Varga Dezső: Kozmikus Röntgen-kép vulkánokról és hegyekről,
2019. márc. 21.

Plazma hullám gyorsítás:

Tóth Csaba: Hullámlovas elektronok, avagy: hogyan gyorsítsunk
elemi részecskéket lézerfénnel plazmákban, 2013. dec. 12.

Alkalmazások és Future Circular Collider, jövő:

Barnaföldi Gergely: Részecskegyorsítók a hétköznapi életben —
ipari alkalmazások kezdőknek és haladóknak, 2016. feb. 4.

Barnaföldi Gergely: FCC, gyorsító a Nagy Hadronütköztetőn túl...
2018. feb. 1.

Varga Dezső: A részecskefizika útkereső kora – megérténénk-e
a kérdést, ha a Világegyetem válaszolna?, 2024. feb. 8.

Régebbi AtomCsill előadások

Nagy Hadronütköztető (LHC):

Varga Dezső: A legkisebb részecskék a világ legnagyobb gyorsítójában, 2010. nov. 18.

Pásztor Gabriella: Új Fizika: az ismeretlen nyomában a Nagy Hadronütköztetővel, 2016. okt. 6.

Veres Gábor: Mit talált a Nagy Hadronütköztető a Higgs-bozon felfedezése óta?, 2021. okt. 7.

Barnaföldi Gergely: Mi lehet a következő Nobel-díj a CERN LHC-nél? 2011. máj. 19.

Részecskefizikai detektorok, gyorsítók:

Veres Gábor: Milyen eszközökkel figyelhetők meg a világ legkisebb alkotórészei? 2007. dec. 20.

Varga Dezső: A részecskefizika eszköztára: felfedezések és detektorok, 2014. ápr. 10.

Antianyag:

Sótér Anna: Mérlegen az antianyag, 2015. márc. 12.,

Sótér Anna: Eötvös-kísérlet egzotikus atomokkal, 2023. márc. 23₆₂

MTA: 200. évforduló

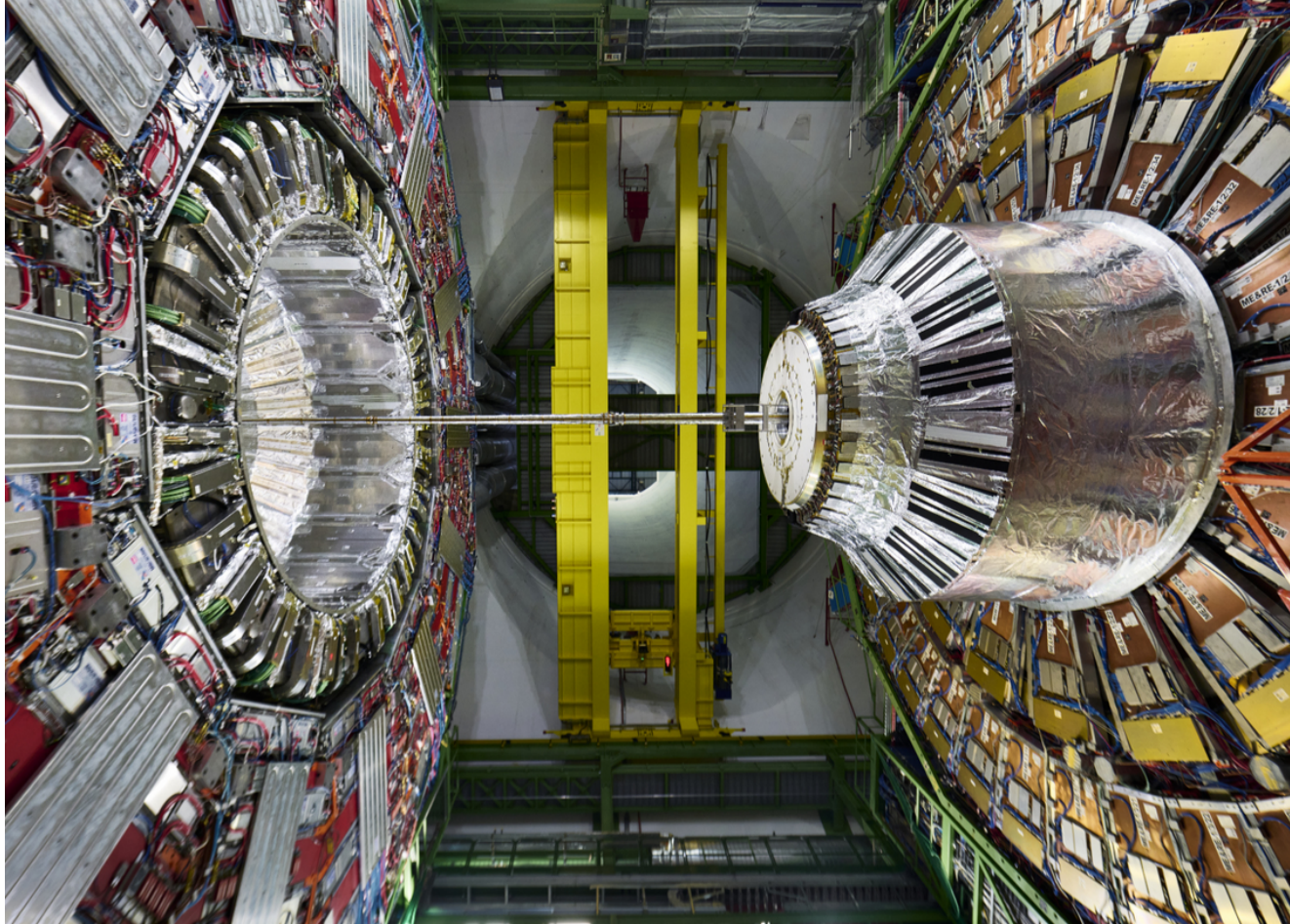
A Magyar Tudomány éve

Kiállítások (fizika is): MTA székház, Nemzeti Múzeum

<https://mta200.hu/>



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!



<https://videos.cern.ch/record/2300132>
<https://www.youtube.com/watch?v=2U0-NI-1GEk>

<https://physics.elte.hu/cms-qcd>