

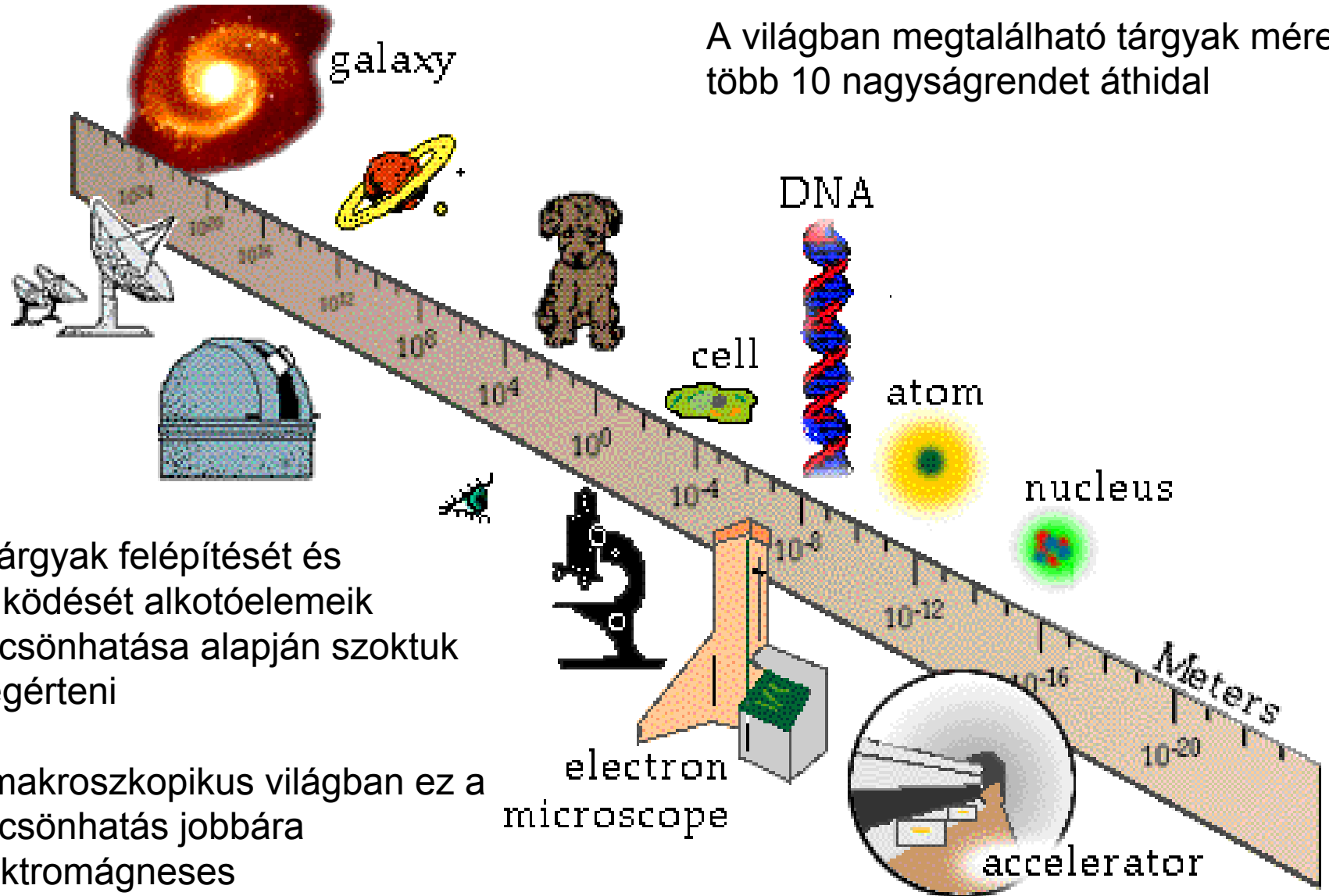
Gyorsítók

Veszprémi Viktor
ATOMKI, Debrecen

Supported by OTKA MB08-80137

Hogyan látunk különböző méreteket?

A világban megtalálható tárgyak mérete több 10 nagyságrendet áthidal

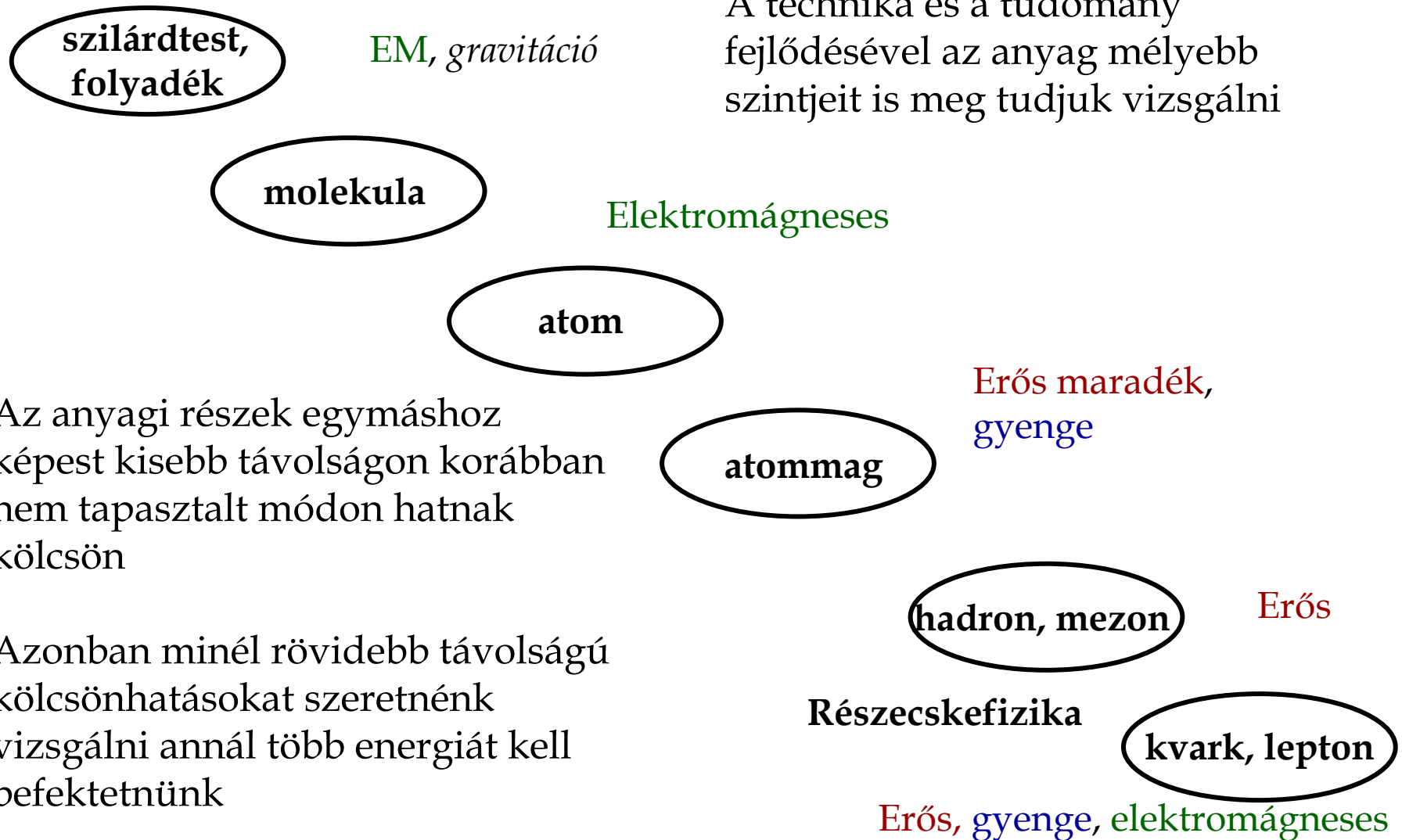


A tárgyak felépítését és működését alkotóelemeik kölcsönhatása alapján szoktuk mérteni

A makroszkopikus világban ez a kölcsönhatás jobbra elektromágneses

Az anyag felépítése

A technika és a tudomány fejlődésével az anyag mélyebb szintjeit is meg tudjuk vizsgálni

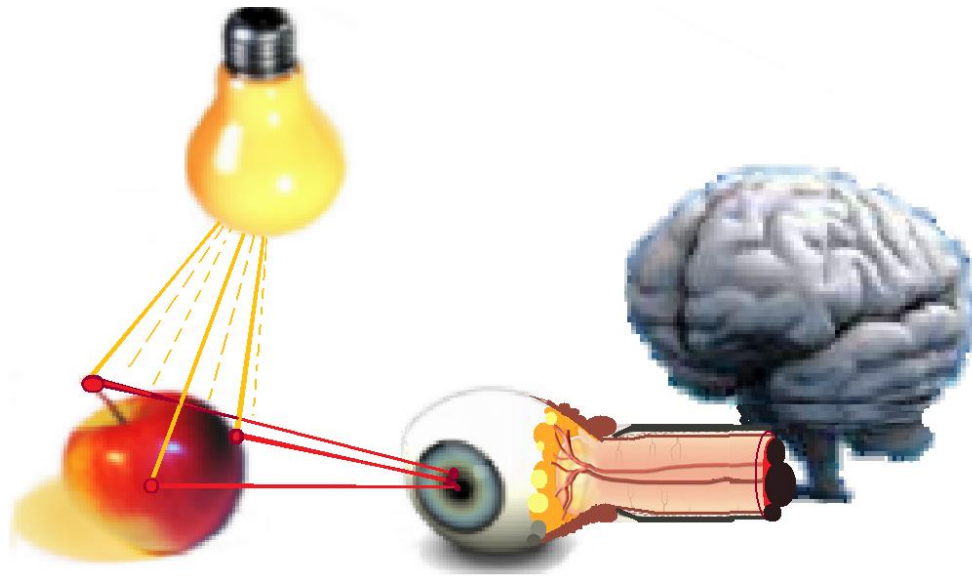


Az anyagi részek egymáshoz képest kisebb távolságon korábban nem tapasztalt módon hatnak kölcsön

Azonban minél rövidebb távolságú kölcsönhatásokat szeretnénk vizsgálni annál több energiát kell befektetnünk

Tárgyak vizsgálata

- Kölsön kell velük hatnunk: rátekintéssel, tapintással
 - Pl. világítsuk meg őket:



- A megismerés kezdeti módszere az elektromágneses kölcsönhatás
- Látható fény felbontása mikroszkópban ~ 1 mikron. Ez a fény hullámhosszától függ, ami egyben az energiáját is meghatározza.

Tárgyak mélyebb vizsgálata

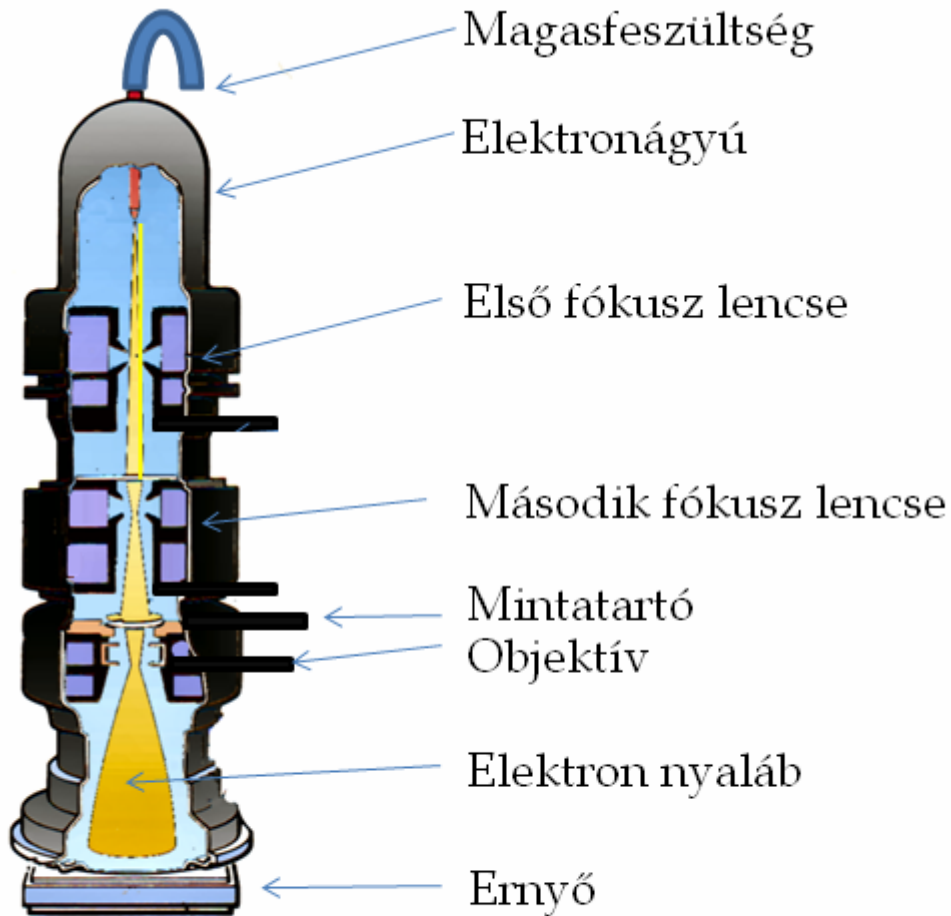
- A részecskék hullám tulajdonsága, De Broglie - egyenlet:

$$\lambda = \frac{hc}{pc} \quad \text{és} \quad pc \approx \sqrt{2 \cdot KE \cdot m_0 c^2}$$

ahol $hc = 1239.8 \text{ eV nm}$

- Tömeggel rendelkező részecskék hullámhossza rövidebb!
- Egy 40 keV kinetikus energiájú és 0.511 MeV nyugalmi tömegű elektron De Broglie hullámhossza $\sim 1 \text{ nm}$
- Egy elektron-sugáron alapuló mikroszkóp felbontása a hagyományos optikáinak 1000-szerese

Az elektronmikroszkóp



Forrás: Wikipedia



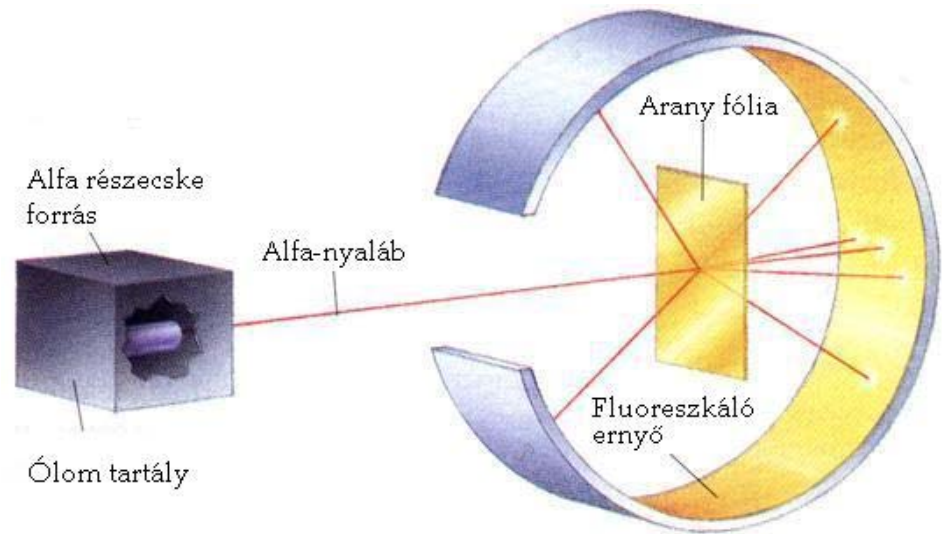
Hangyafej, forrás: Wikipedia

Pásztázó mikroszkóp

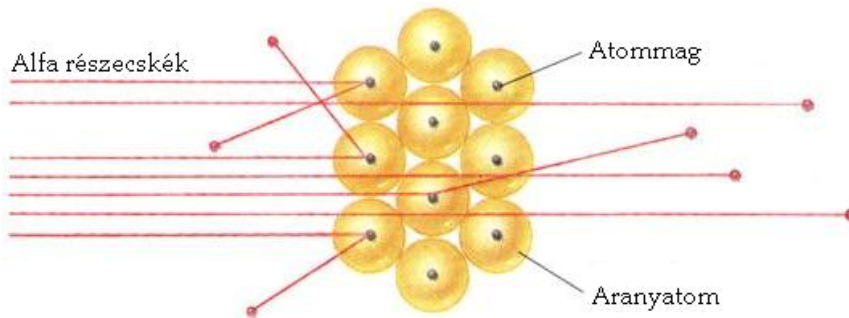
- ~ 0.5 nm felbontás
- ~ 40 keV kinetikus energia
- Atomok mérete ~ 0.1 nm

„Képkalkotás” az atomfizikában

- Rutherford kísérlet
 - az atommag felfedezése
- Alfa részecskékkel (hélium) bombázott arany fóliát



<http://sun.menloschool.org/~dspence/chemistry/atomic/>



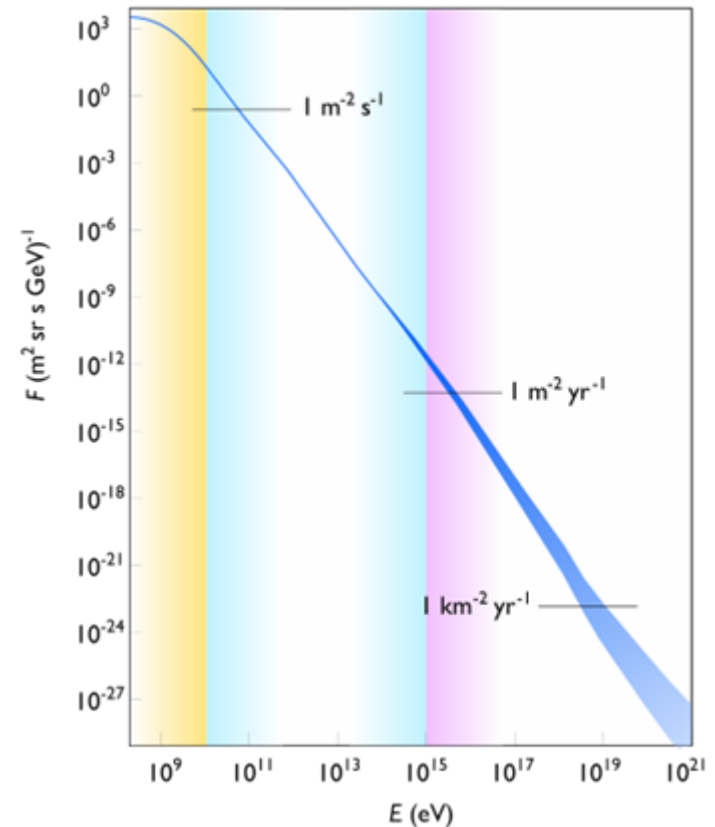
- Ha a fólia homogén lenne, az alfa részecskék csak előre szóródnának
- Visszafelé is szóródó részecskéket is mért!

A kísérleti részecskefizika kellékei

- A kísérleti eszközünk felbontását az határozza meg, hogy mennyi energiát tudunk egy pontba gyűjteni
 - Ez növelhető a nyaláb részecskéinek megválasztásával,
 - és a részecskék kinetikus energiájának fokozásával
- Egy részecskefizikai kísérletben tehát szükségünk van
 - Nagyenergiás részecske forrásra (letapogató nyaláb)
 - Vizsgálandó céltárgyakra
 - Szóródó részecskék mérésére alkalmas „képalkotó” eszközökre

A természet sugárzó forrásai

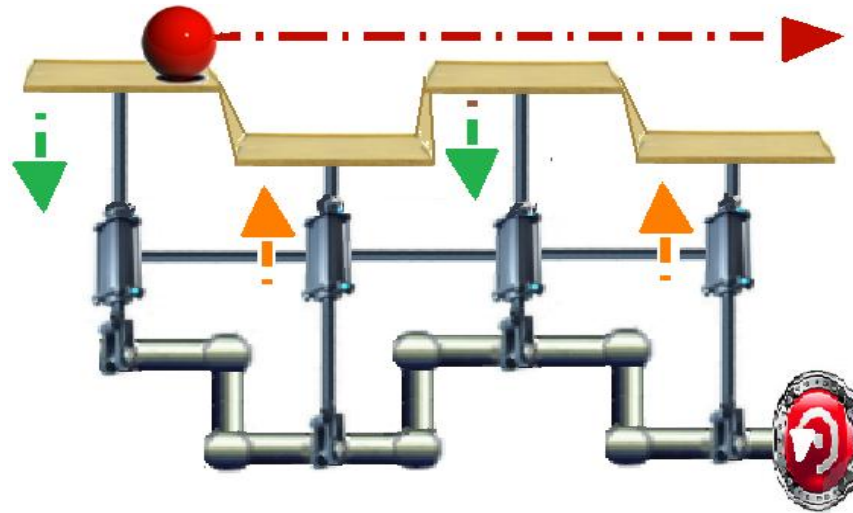
- Radioaktív források
 - Alfa (hélium atom) <5 MeV
 - Béta (elektron) <3 MeV
- Kozmikus sugárzás
 - ~90% proton, ~10% alfa részecske
 - Max. energia $3 \cdot 10^{20}$ eV
 - A légkör felső részéből müonok
- Hátrányuk
 - nem jól meghatározott (néha nem elég) energiával
 - nem a megfelelő helyen jelennek meg
 - alacsony számban



Kozmikus sugárzás fluxusa az energia függvényében.
Forrás: Wikipedia

Megoldás: részecske gyorsítók

- Első gyorsító: Lineáris (The Incredible Machine)



- A golyó lendületet nyer a csúszkán
- A platók szintet váltanak amíg a golyó rajtuk gurul

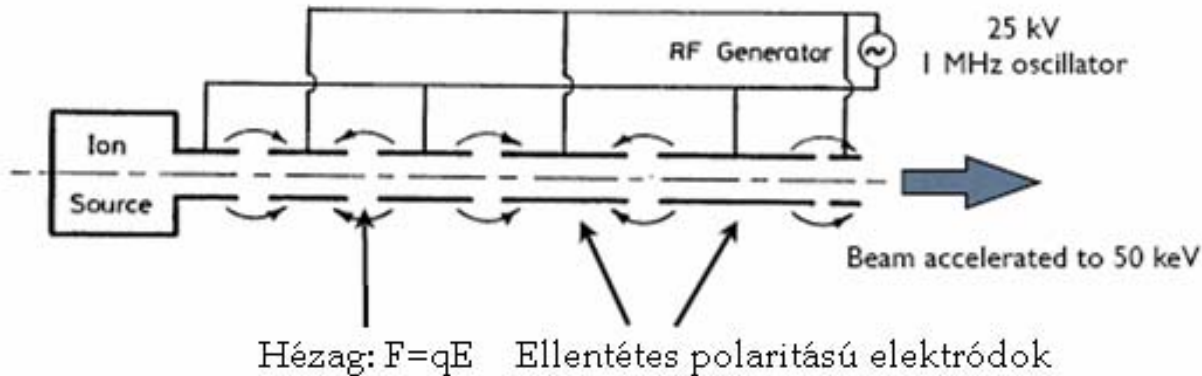
Mitől gyorsul a részecske?

- Használjuk ki hogy elektromosan töltöttek
Lorentz erő:

$$\vec{F}(t) = q[\vec{E}(t) + \vec{v}(t) \times \vec{B}(t)]$$

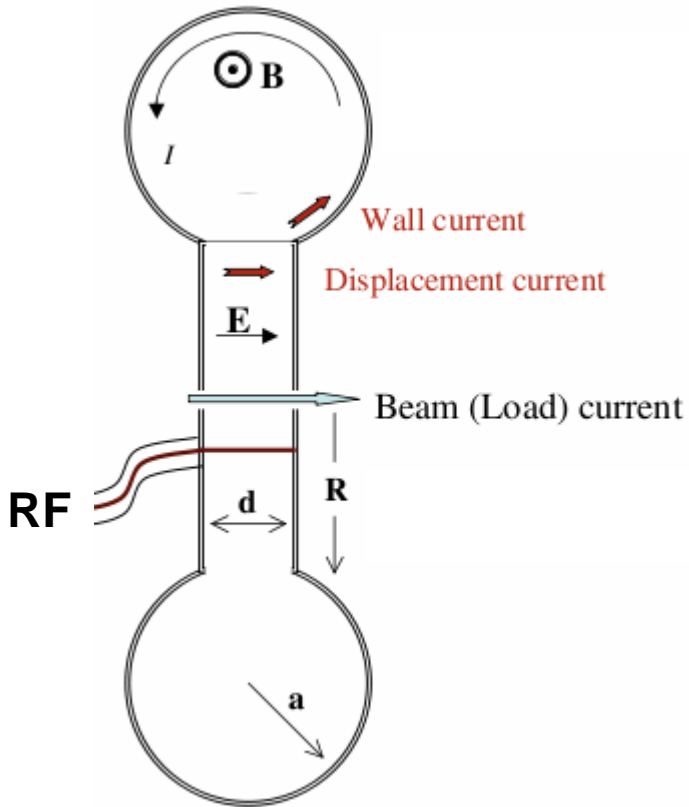
- **Elektromos tér (E)** gyorsítja a töltött részecskéket
 - Magasabb plató \rightarrow magasabb elektromos potenciál
 - Változó mágneses tér is létrehozhat elektromos teret!
- **Mágneses tér (B)** csak az irányukat változtatja meg

Lineáris Gyorsító



- Első tervek (1928) szerint drift kamrákból épült fel
 - Egyre hosszabb kamrákra van szükség, ahogy az ionok sebessége nő
 - A gyorsított ionok sebessége még nem relativisztikus
- Az előállított nyaláb energiáját a kamrák mérete, illetve az oszcillátorral előállítható frekvencia és amplitúdó felső határa szabja meg
 - 10 cm-es hézag mellett, már \sim GHz-es frekvenciára van szükség

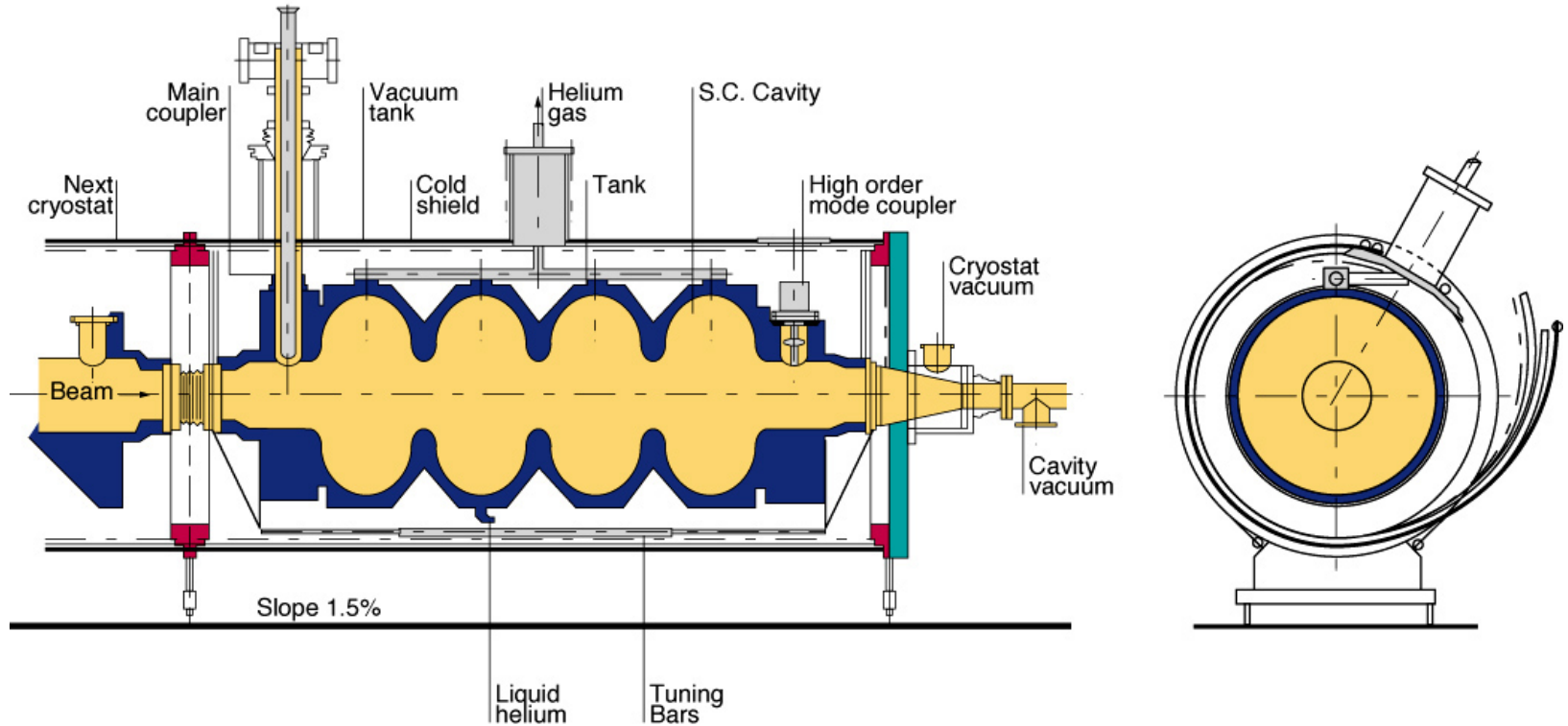
RF üregrezonátor



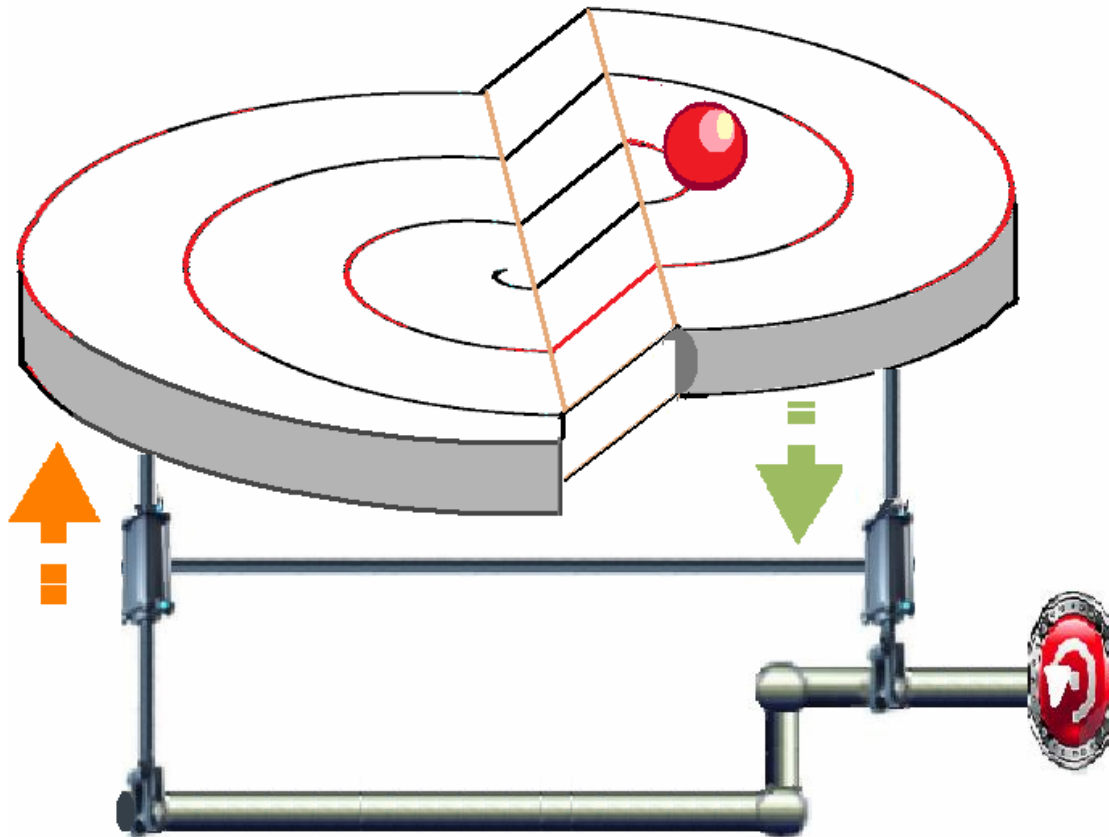
- A bemenő rádiófrekvenciás váltóáram körbejár a felső és alsó gyűrűn
- Az áram egy „fánk” alakú mágneses teret indukál, ami egy nyaláb-irányú elektromos teret kelt
- Az így keltett változó elektromos tér
 - gyorsítja a részecskét
 - újabb mágneses teret generál, tehát kialakul egy rezgő rendszer
- A CLIC 30 GHz-es rezonátorral működne a tervek szerint

Modern lineáris gyorsító

SUPERCONDUCTING CAVITY WITH ITS CRYOSTAT



Még több gyorsítás ciklotronnal



Csigaalakba feltekert lineáris gyorsító helyet takarít meg, megjelenése szinte egyidejű a lineáris gyorsítóval

A ciklotron

- Ismét segítségül hívjuk a Lorentz-erőt:

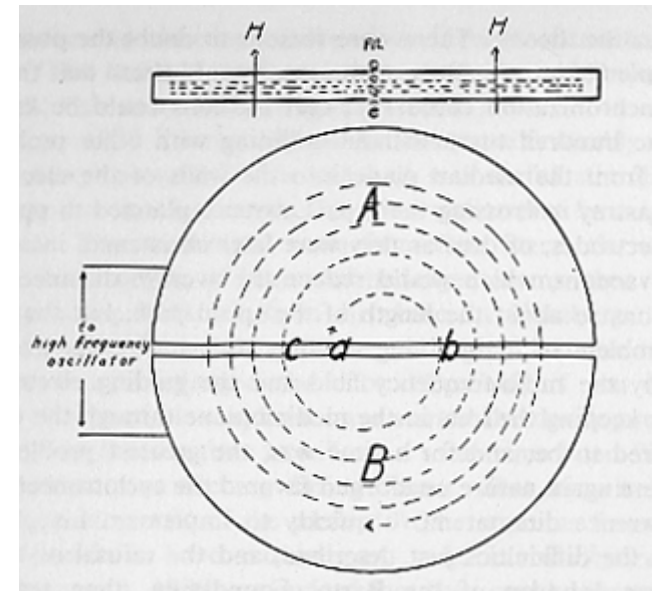
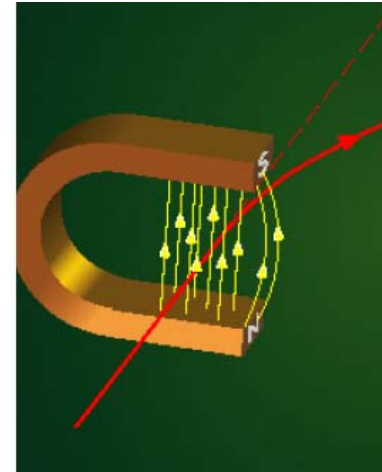
$$F_r = m \frac{v^2}{r}, \quad F_B = qvB$$

Ebből a sugarat kifejezve

$$r = m \frac{v}{qB}, \quad \text{mivel} \quad \omega = \frac{v}{r},$$

A szögsebesség, $\omega = \frac{qB}{m}$, konstans
mágneses mező esetén állandó!

- Gyorsítás a két „D” közötti hézagban
 - Az elektromos tér váltakozásának frekvenciája konstans
 - Phys. Rev. 40, **19** (1932)

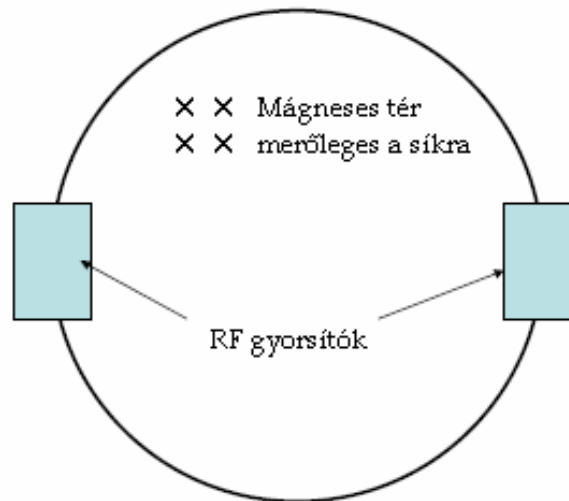


A ciklotron

- Ciklotron energiáját a mágneses tér, vagyis a „D” mérete korlátozza
 - A mágneses tér a részecske pályájának az oszcillációja miatt homogén sem lehet
- A mozgás egyenlete átírható így:
$$mc^2 = \frac{qBc^2}{\omega}$$
 - Ebből következik, hogy relativisztikus sebességeknél a körsebesség csökken, a részecske fázisa eltolódik!
- A tömegnövekedés miatt, a maximálisan elérhető energia ~10 MeV volt
- A megoldást az RF forrás frekvenciamodulációja hozta

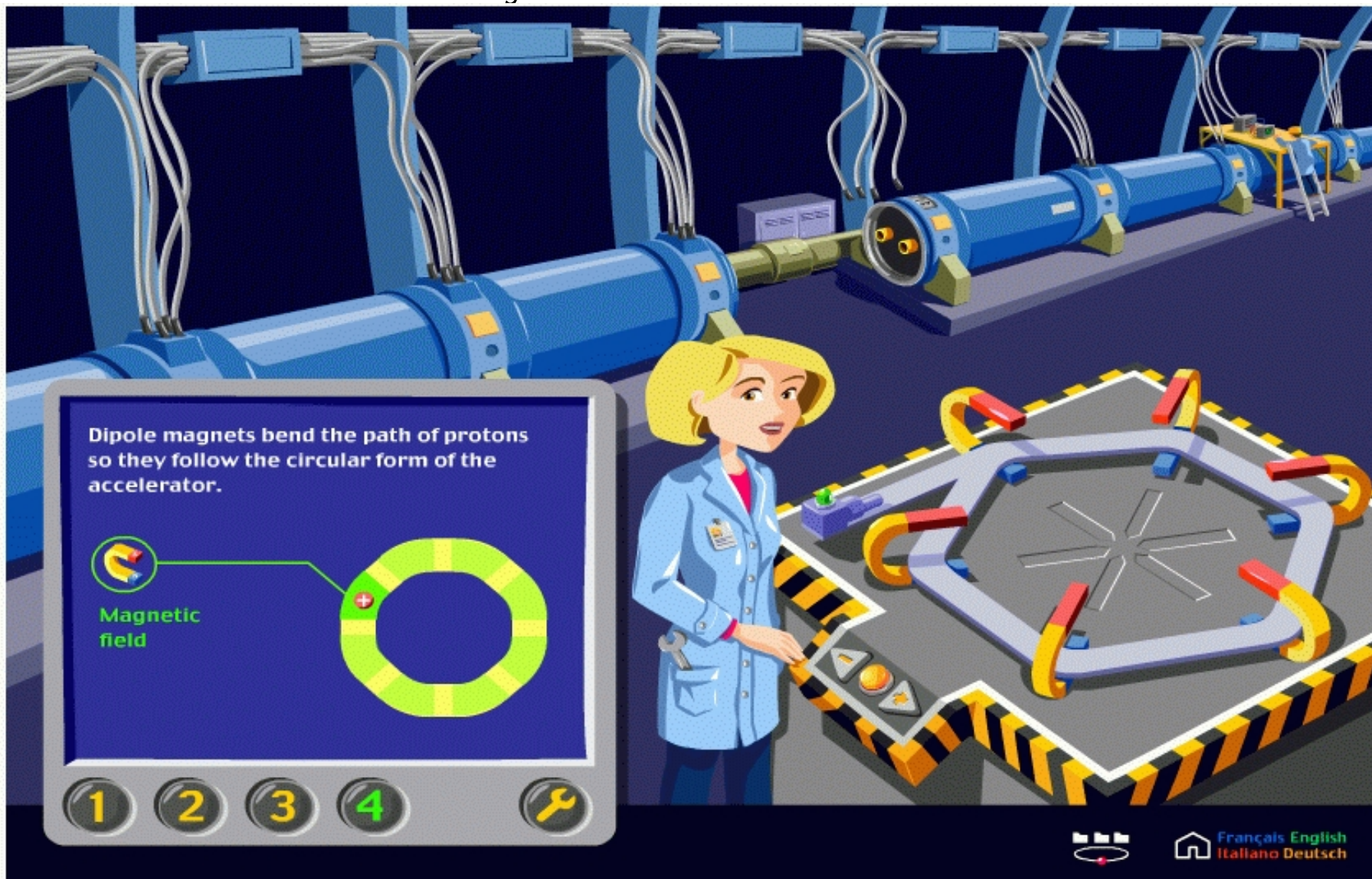
A szinkrotron

- A szinkrotronban a frekvencia és a mágneses tér változtatásával a részecske körpályán tartható
 - A gyorsító csövén kívül nincs szükség mágneses térre!
- A gyorsítás a fázis-stabilizáció elvén működik: a stacionárius pályához képes hamar érkező részecskék energiája nő – tehát lassulnak, a később érkezők energiája csökken, tehát gyorsulnak. Oszcilláció az egyensúlyi pálya körül.



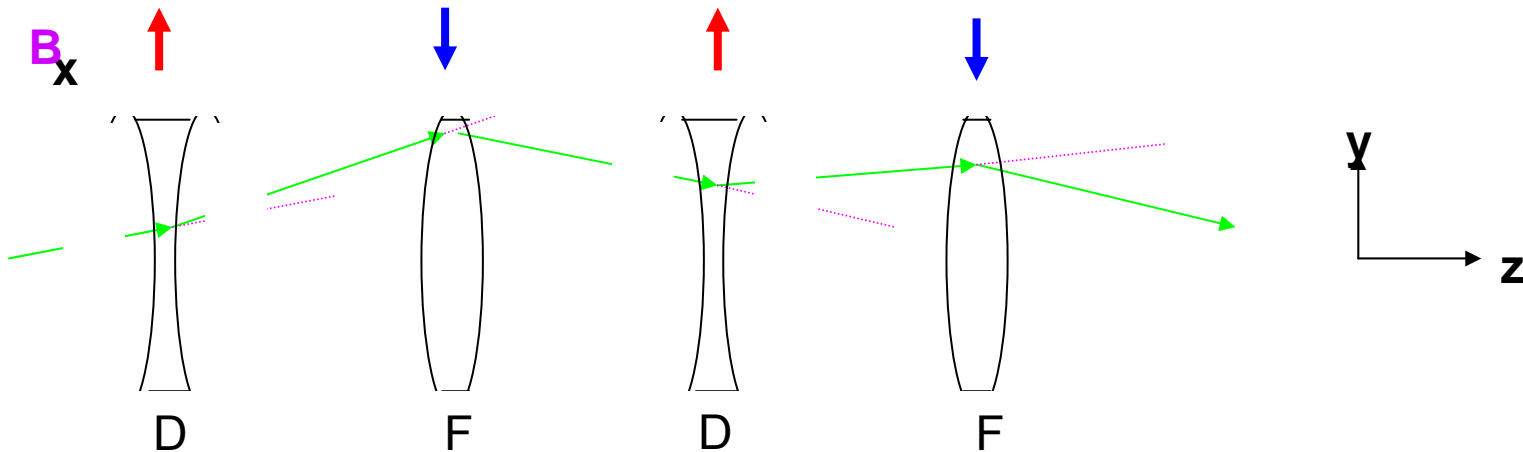
- A részecskék energiája fokozatosan növelhető a frekvencia modulációjával, a részecskék mindig az aktuális energiának megfelelő pályára állnak be

Gyorsítás csőben



Részecske-nyaláb instabilitásai

- Több részecskét keringetünk egyszerre
 - Azonos töltések taszítják egymást
 - Párhuzamos áramok vonzóak
- Instabil nyaláb, fókuszálni kell. Megoldás: további mágnesek
- Az y -ban **F**ókuszáló mágnes x -ben **D**efókuszálóként működik, és viszont



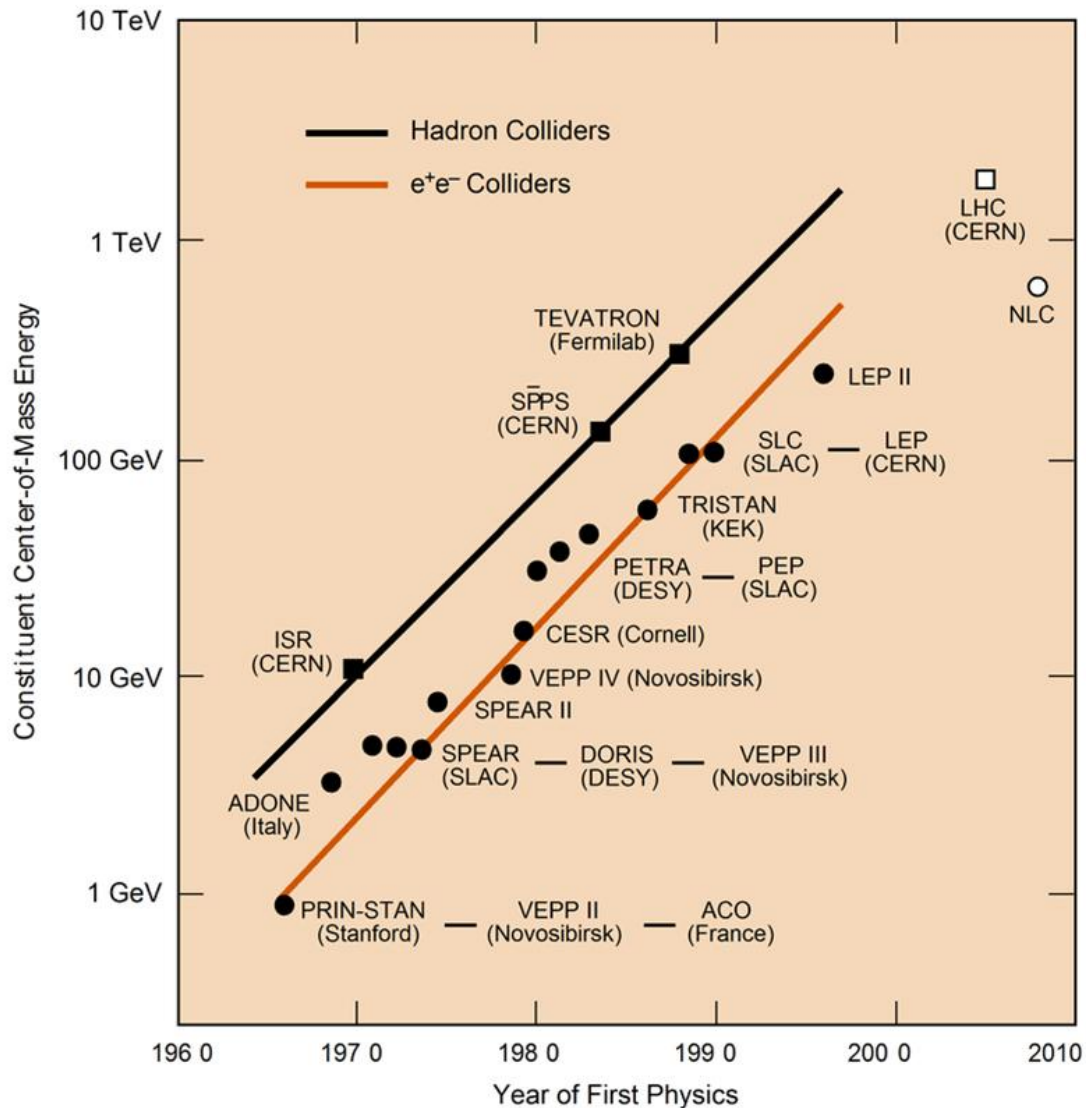
Fókuszálás kvadрупól mágnessel



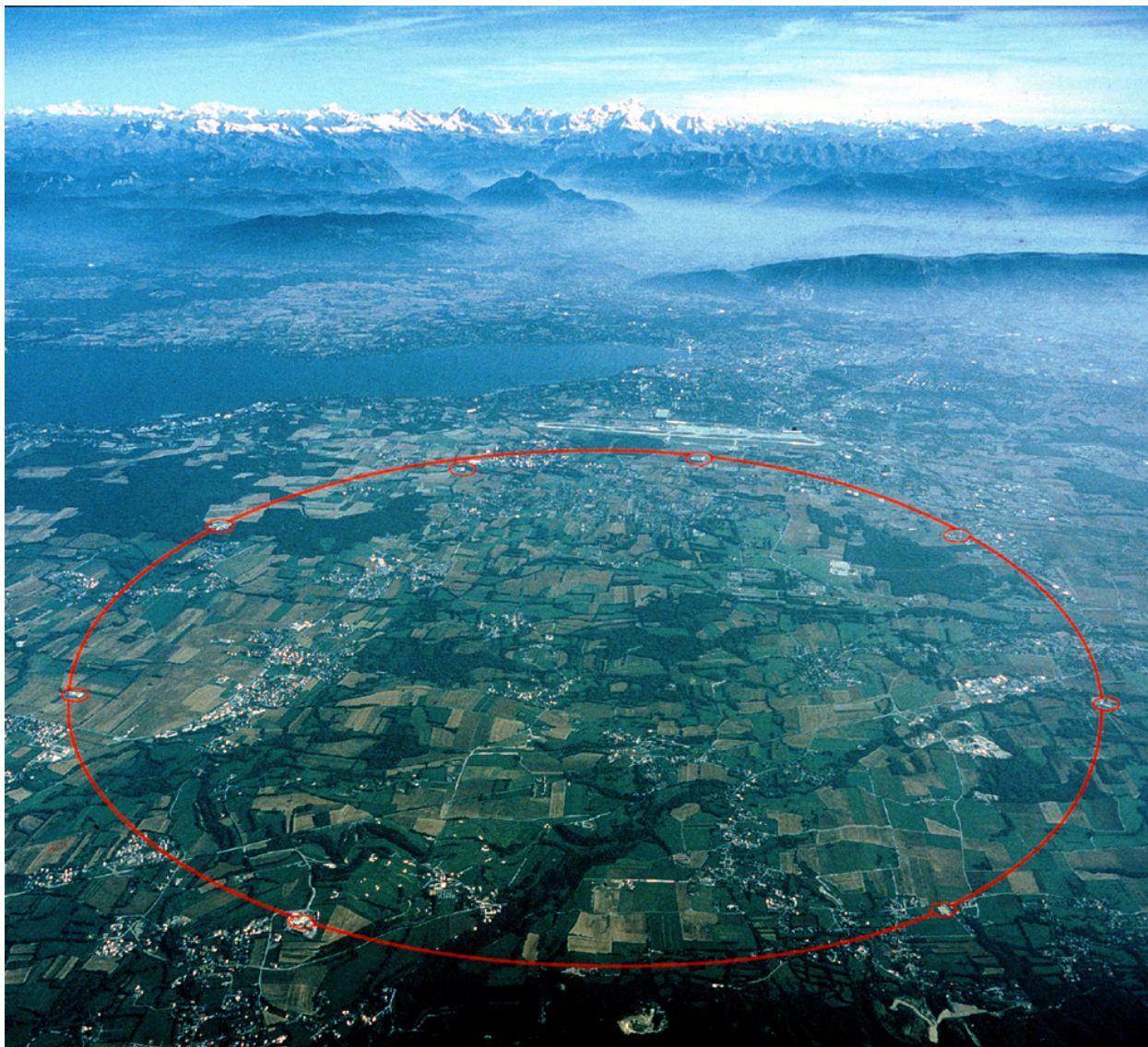
Részecskegyorsítók kellékei

- Töltött részecskék forrása
- RF gyorsító üregek
- Hangolható terű dipolmágnesek kör alakba rendezve
- Fókuszáló kvadrupol mágnesek, terelő lemezek

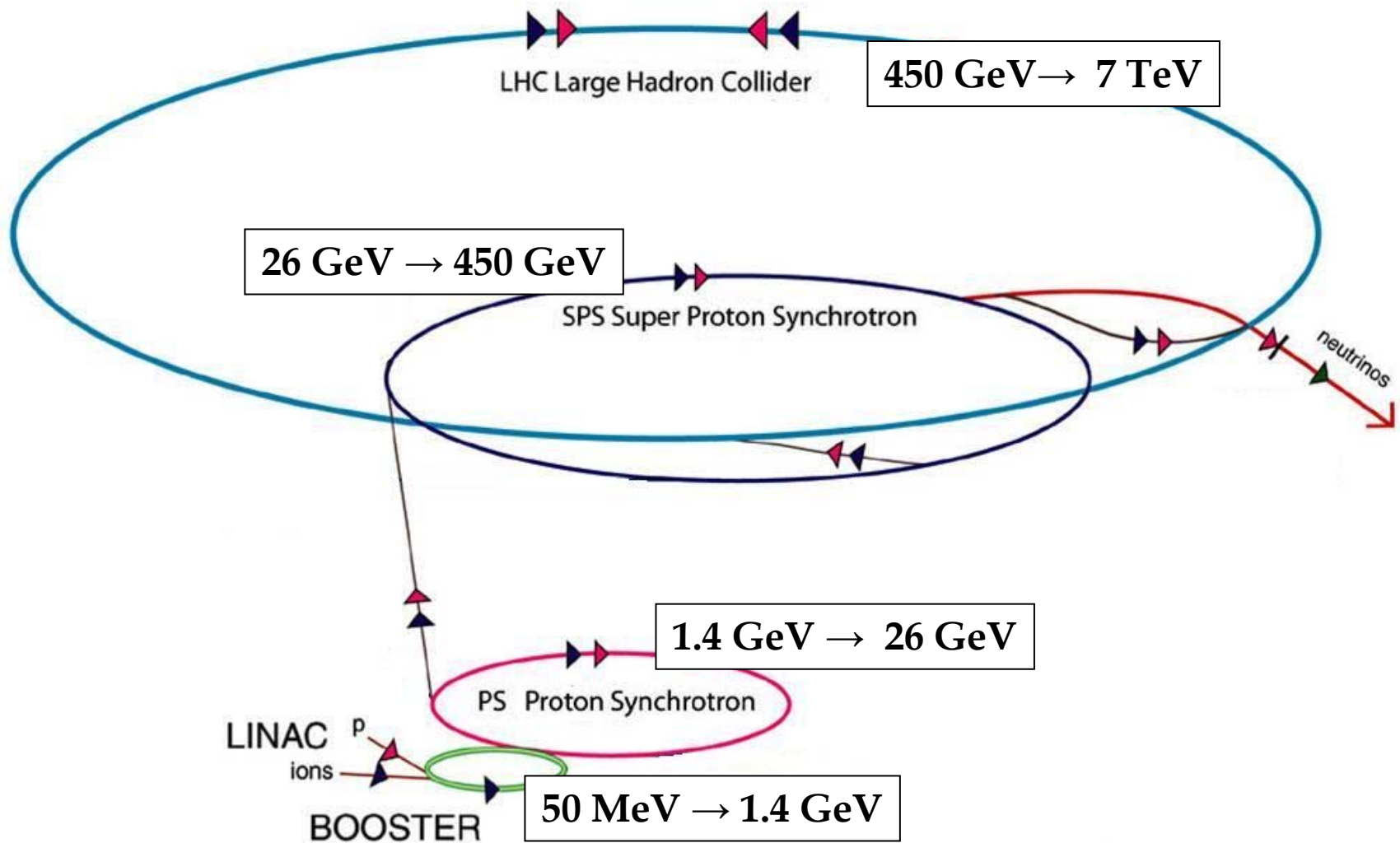
A világ gyorsítói



A Nagy Hadronütköztető (LHC)



Az LHC gyorsító-komplexuma

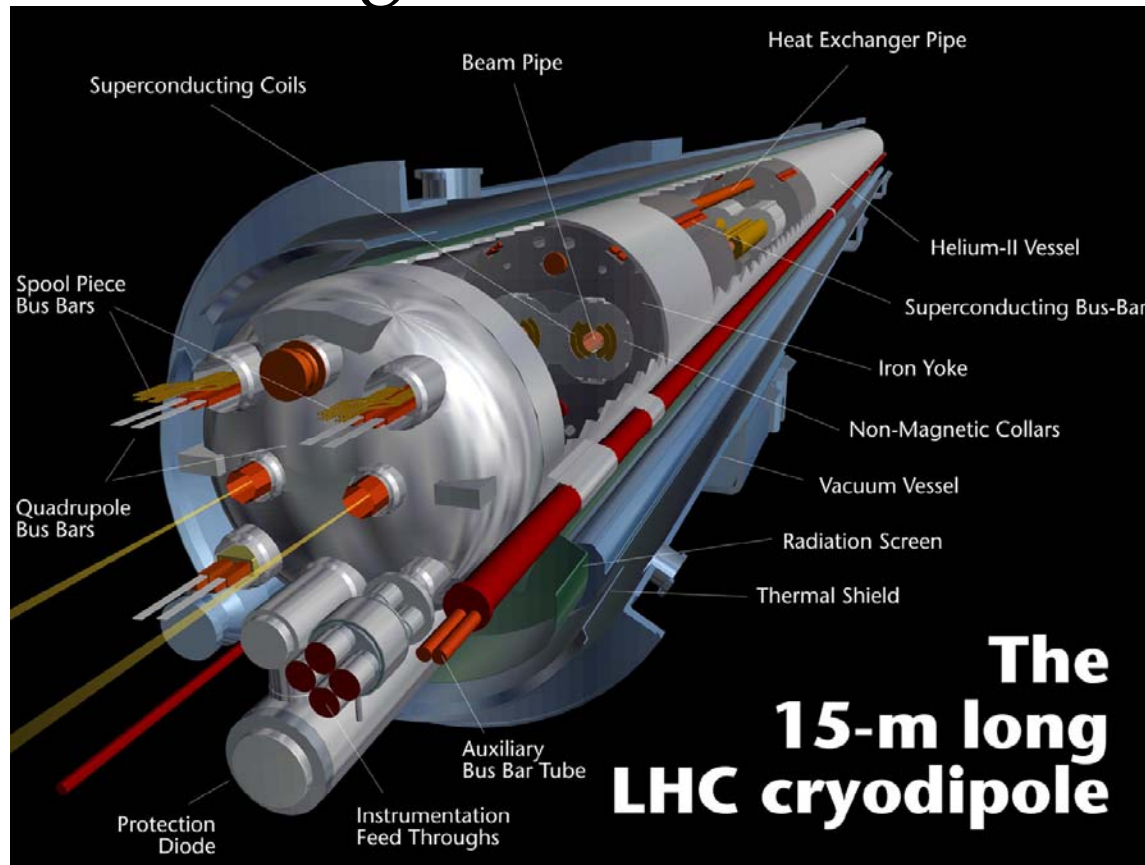


Az LHC alagút



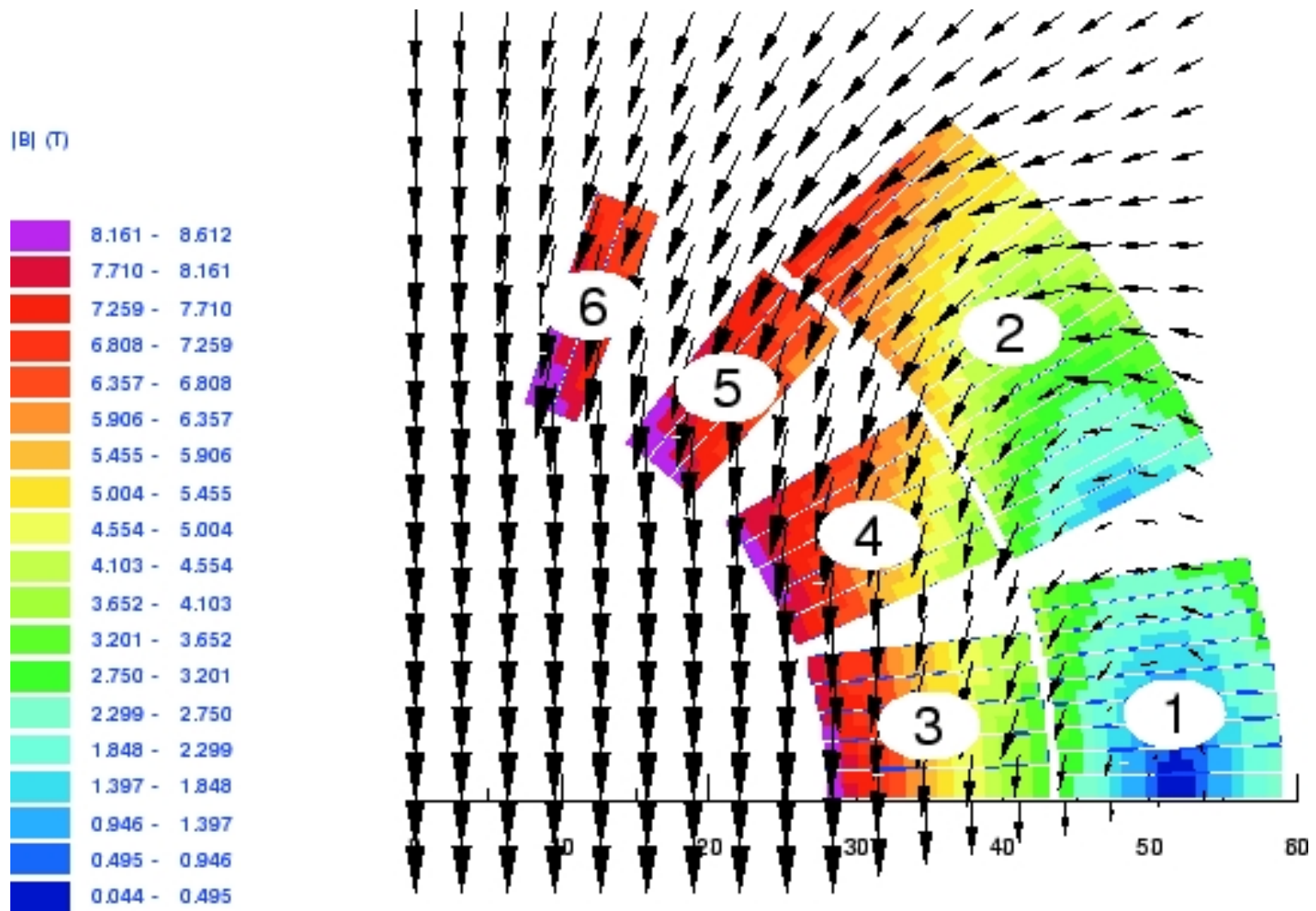
- 27 km terület, 50 – 127 méter mélyen, 3.8 méter átmérőjű alagút
- Proton (7 TeV) vagy nehézion (2.75 TeV/n) nyalábok
- 4 perc 20 másodperc töltési idő
- 20 perc gyorsítás

A mágnesek szerkezete



- 8.4 T mágneses tér, 11700 A árammal
- Szupravezető mágnesek 1.9 K folyékony héliumban
- 14.3 méter hosszú, 35 tonna
- 1232 darab, darabonként félmillió svájci frank

A dipólmágnesek tere



A mágnesek leengedése az alagútba

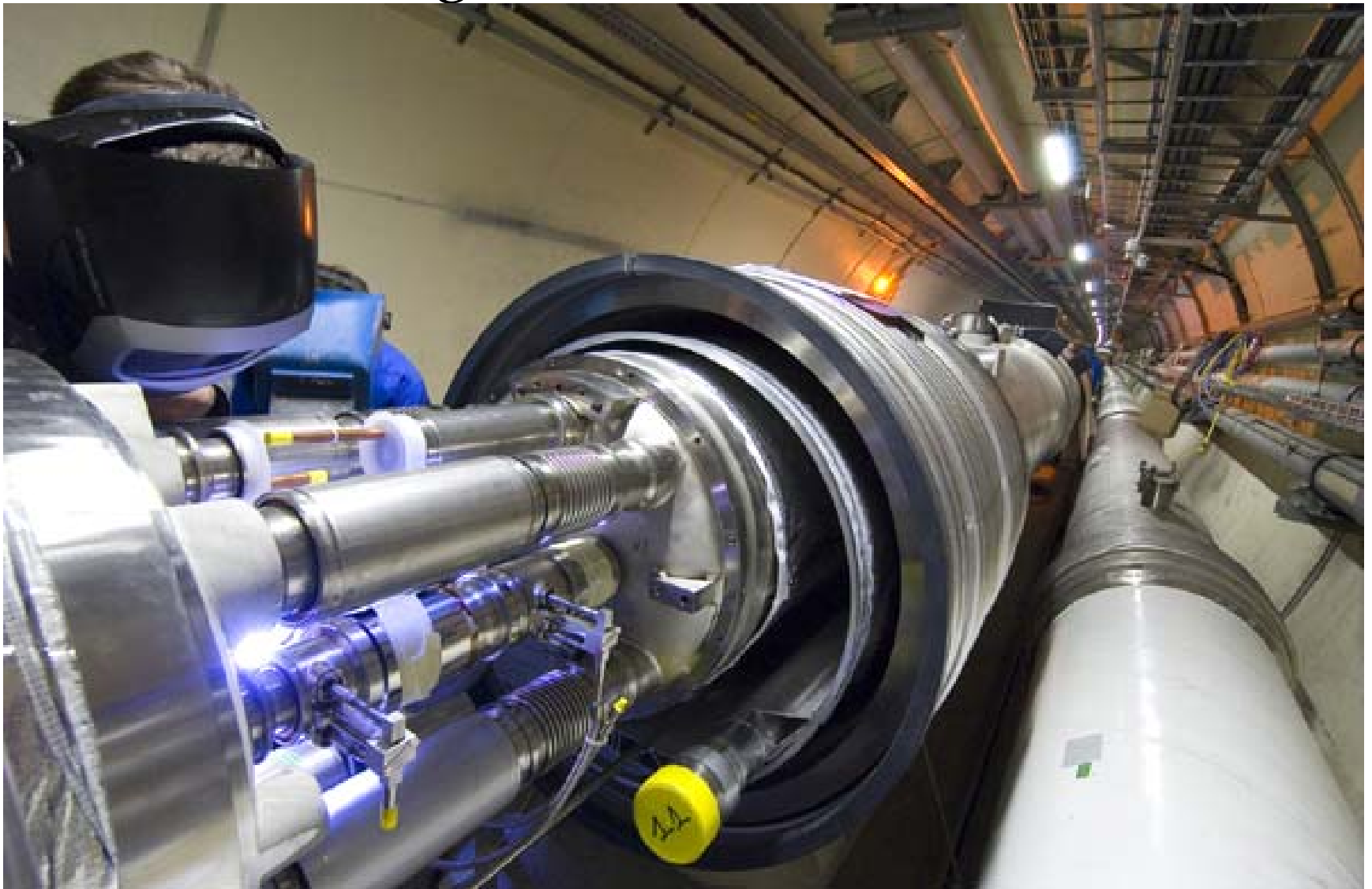


2010. augusztus 16.

Hungarian Teacher Program, CERN

29

A mágnesek összeszerelése

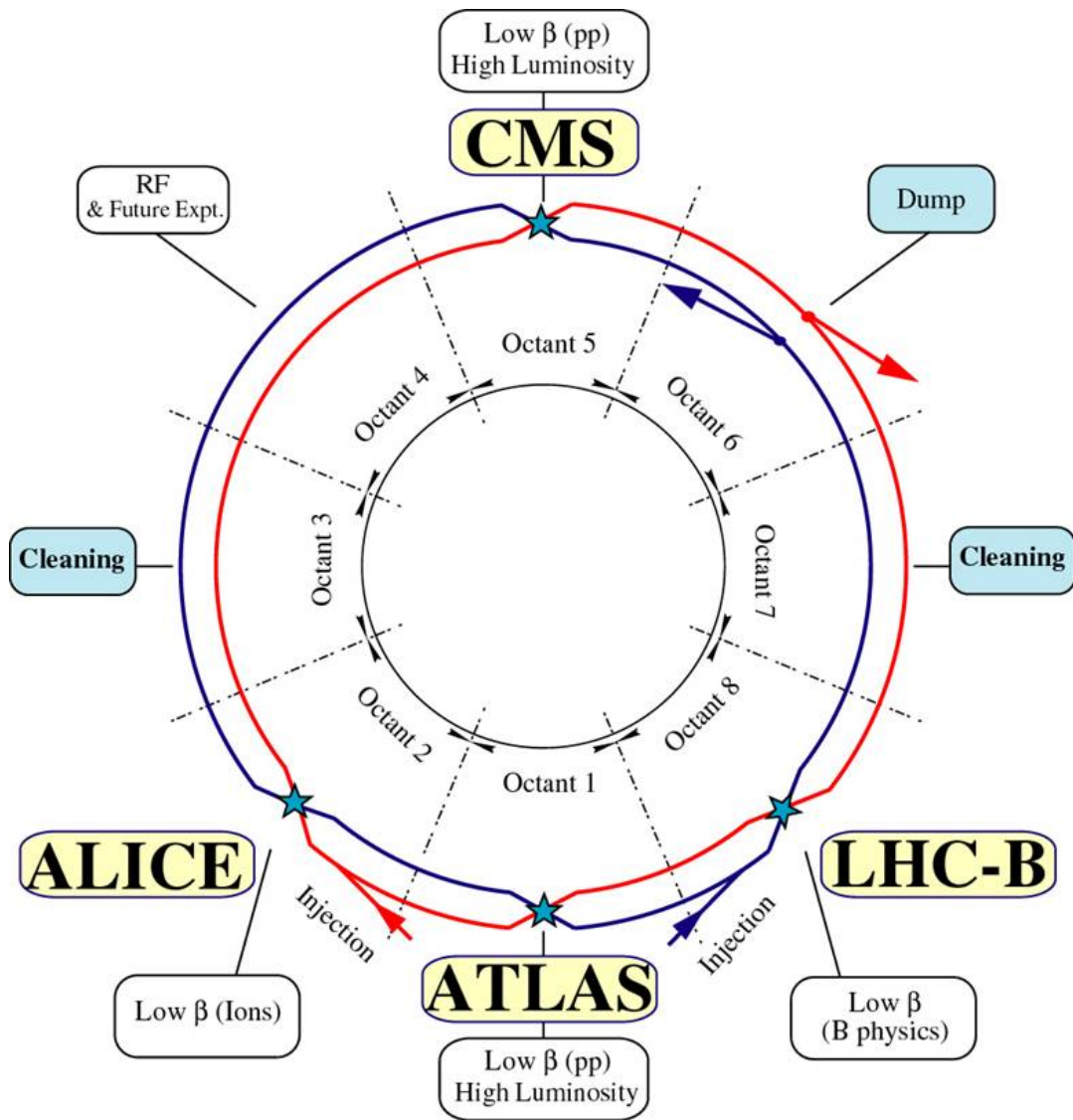


2010. augusztus 16.

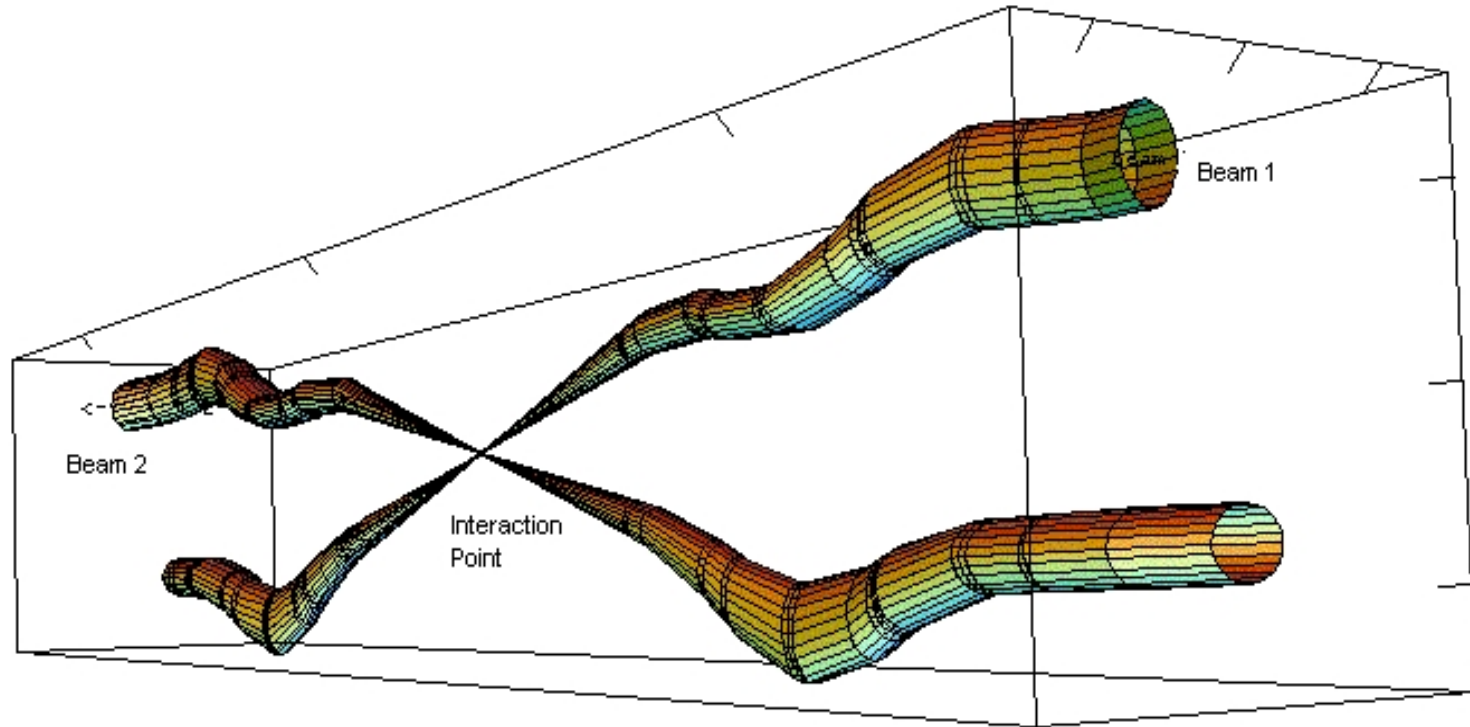
Hungarian Teacher Program, CERN

30

Az LHC detektorai



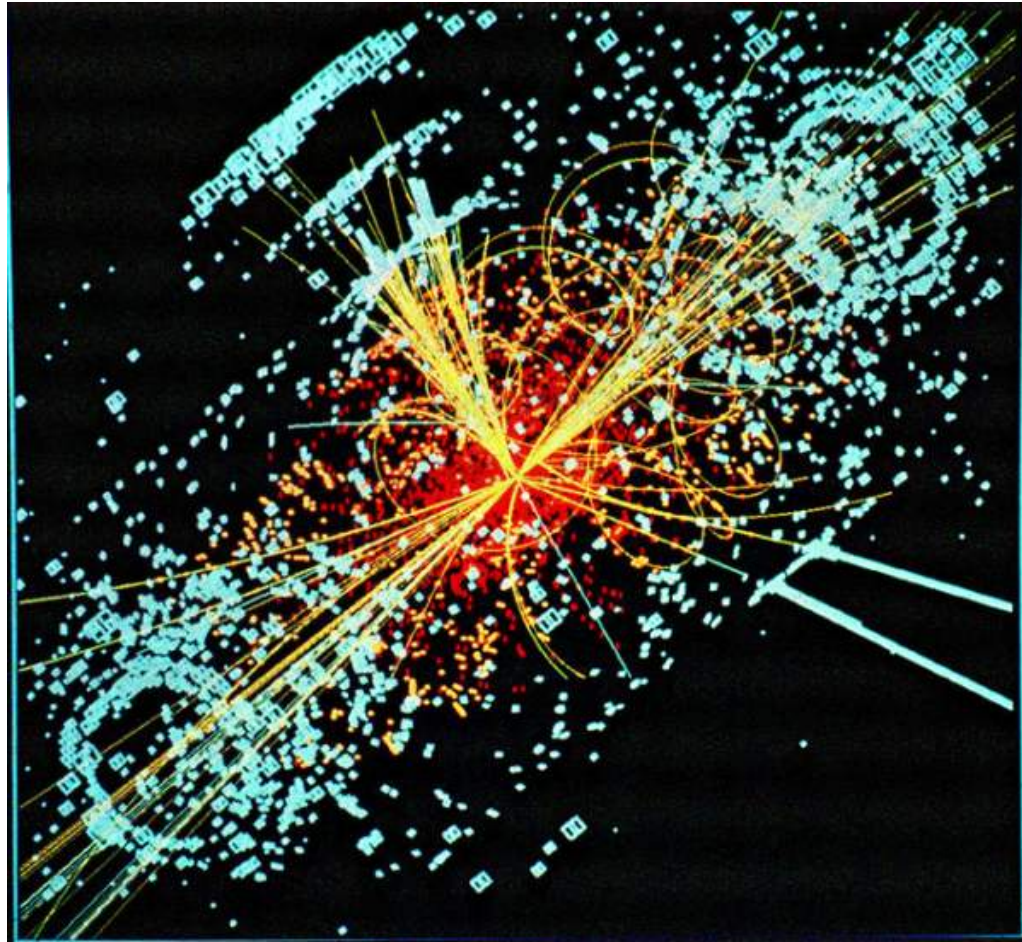
Nyalábok keresztezése



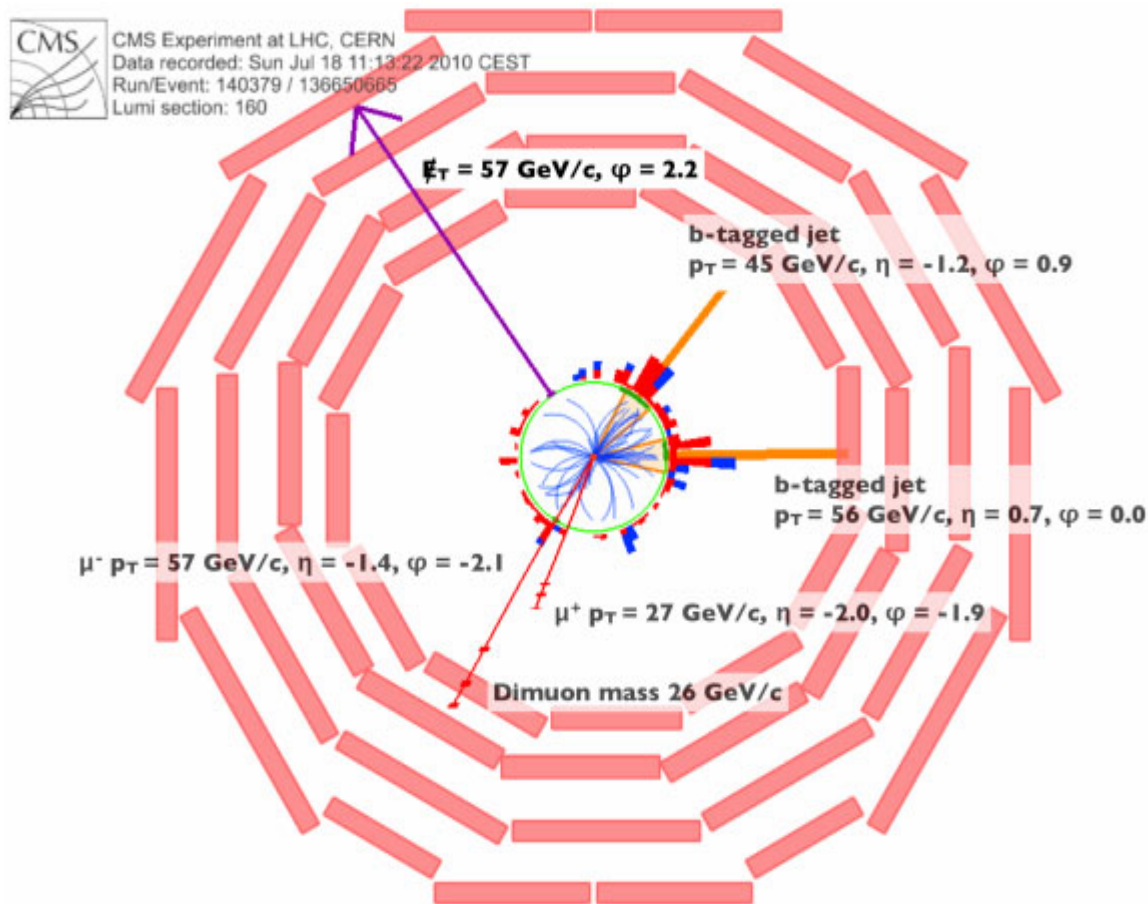
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

- Vékony nyalábbbán, 2808 csomagok sorakozik
- Csomag: 100.000 millió proton, 16 mikron átmérő, néhány cm hosszú
- 25 ns időközökben kereszteződnek, átlagban 20 ütközést keltve
- 800 millió ütközés másodpercenként

Egy „esemény” képe



Egy top-szerű „esemény” képe



Összefoglalás

- A részecskefizika részecskék kis távolságból történő szóródását tanulmányozza, ebből a részecskék közötti kölcsönhatásokra modelleket alkot
- Ennek a módszernek jelenleg elengedhetetlen eszközei a gyorsítók
- Az LHC beindulása óta az eddigi legnagyobb energián produkál ütközéseket
- A létrejött eseményekben új fizikai jelenségek, új részecskék megjelenését várjuk.