Gyorsítók

Veszprémi Viktor
ATOMKI, Debrecen

Supported by OTKA MB08-80137

A részecskefizika célja

Az anyagi részek szubatomi távolságon a makroszkopikus világban nem tapasztalt módon hatnak kölcsön

szilárdtest, folyadék

EM, *gravitáció*

molekula

Elektromágneses

atom

Erős maradék, gyenge

atommag

A részecskefizikában mi ezeket a kölcsönhatásokat szeretnénk tanulmányozni a benne résztvevő részecskék megfigyelésével

hadron, mezon

Erős

Rövidebb távolság feloldásához több energiát kell egy pontba összpontosítanunk

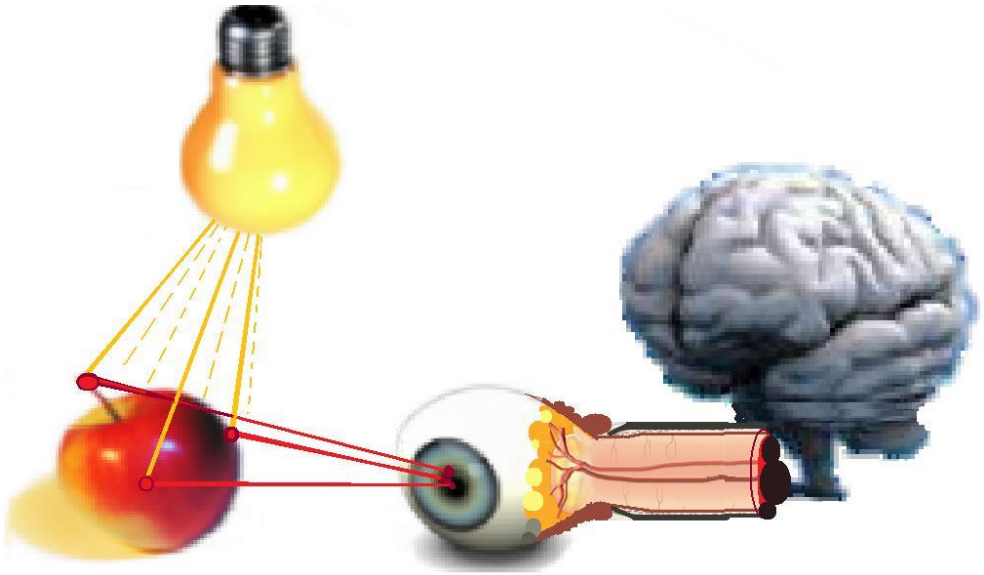
Részecskefizika

kvark, lepton

Erős, gyenge, elektromágneses

Makroszkopikus tárgyak vizsgálata

- Kölcsön kell velük hatnunk, például világítsuk meg őket:



- A megismerés kezdeti módszere az elektromágneses kölcsönhatás

- Látható fény felbontása mikroszkópban ~1 mikron. Ez a látható fény hullámhosszától függ, amit annak energiája egyértelműen meghatároz

Tárgyak mélyebb vizsgálata

- A részecskék hullám tulajdonsága, De Broglie - egyenlet:

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

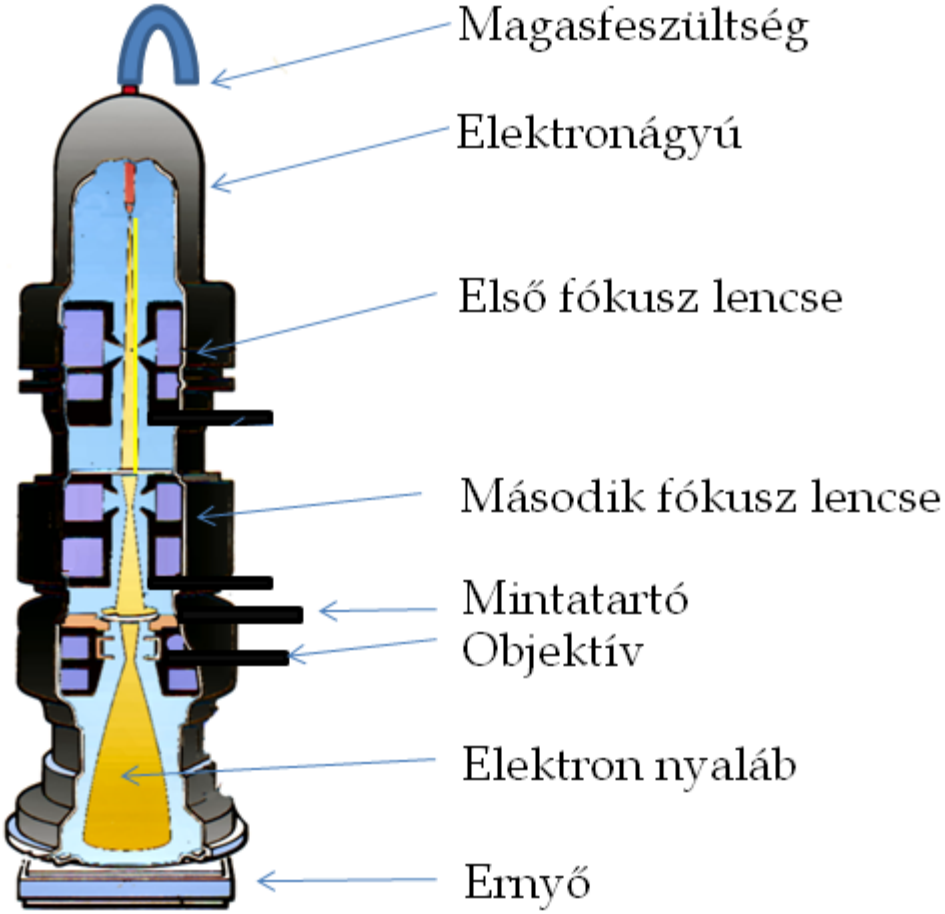
ahol $hc = 1239.8 \quad eV\ nm$

- Tömeggel rendelkező részecskék hullámhossza rövidebb!

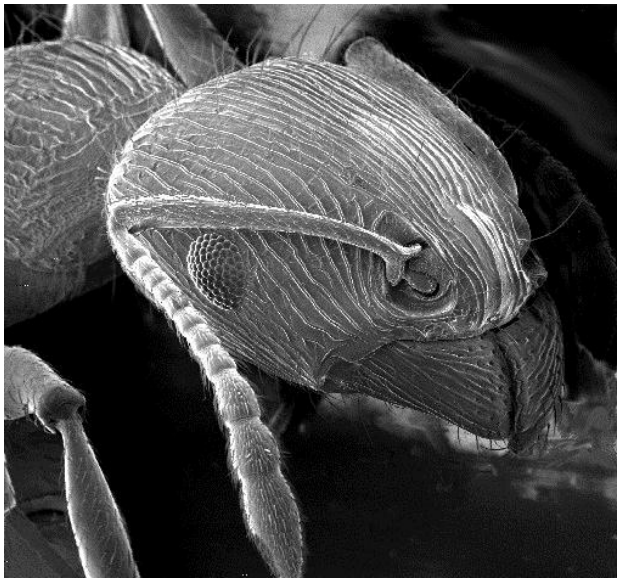
- Egy 40 keV kinetikus energiájú és 0.511 MeV nyugalmi tömegű elektron De Broglie hullámhossza ~1 nm

- Egy elektron-sugáron alapuló mikroszkóp felbontása a hagyományos optikainak 1000-szerese

Az elektronmikroszkóp



Forrás: Wikipedia



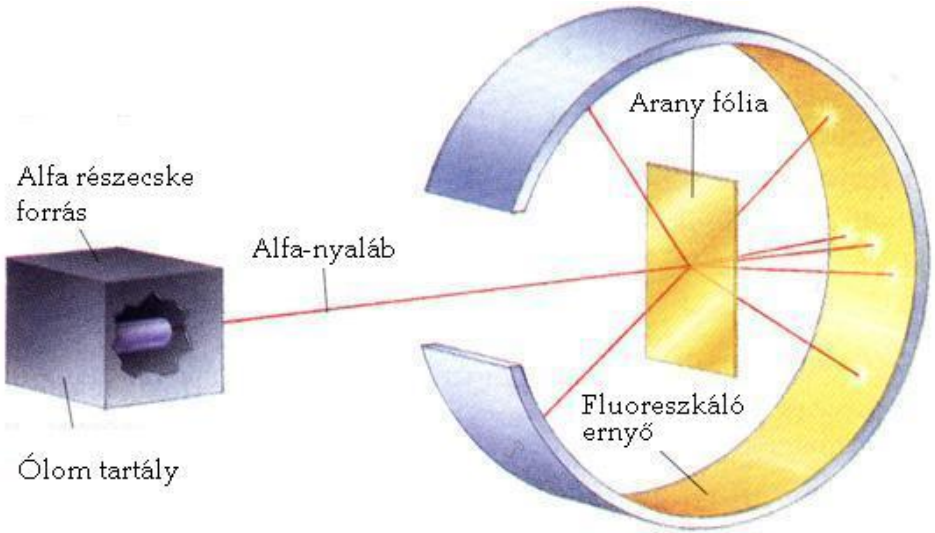
Hangyafej, forrás: Wikipedia

Pásztázó mikroszkóp

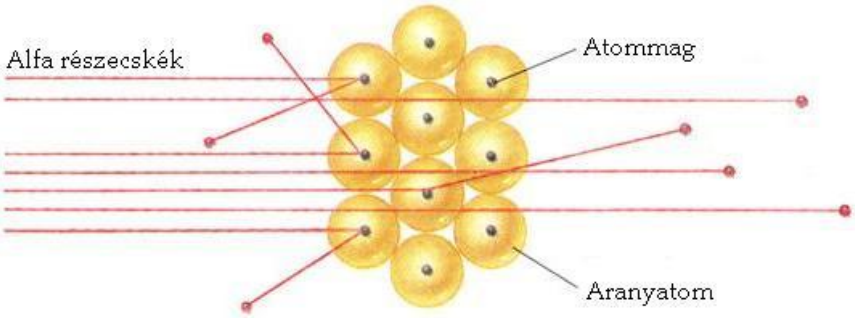
- ~0.5 nm felbontás
- ~40 keV kinetikus energia
- Atomok mérete ~0.1 nm

„Képalkotás” az atomfizikában

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



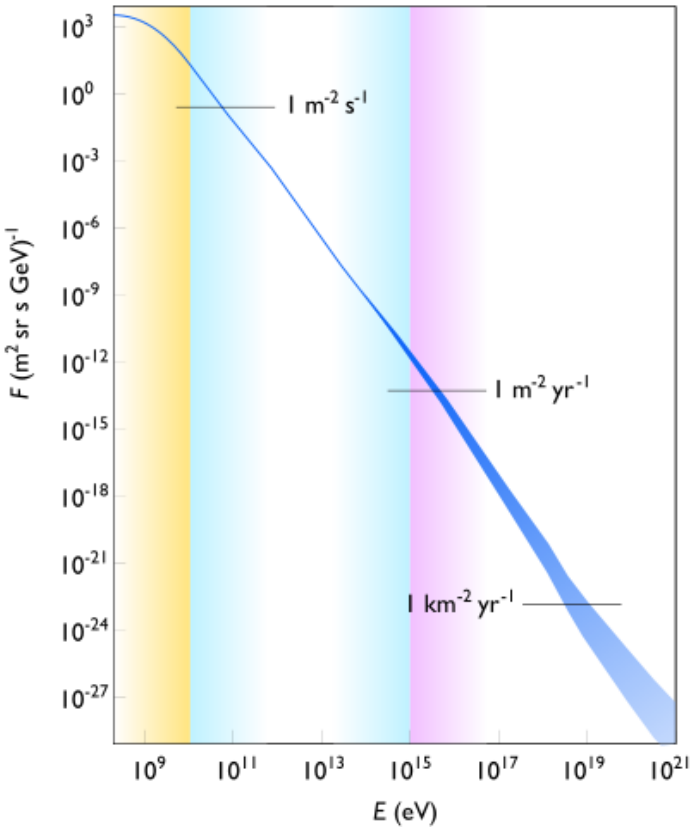
http://sun.menloschool.org/~dspence/chemistry/atomic/



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

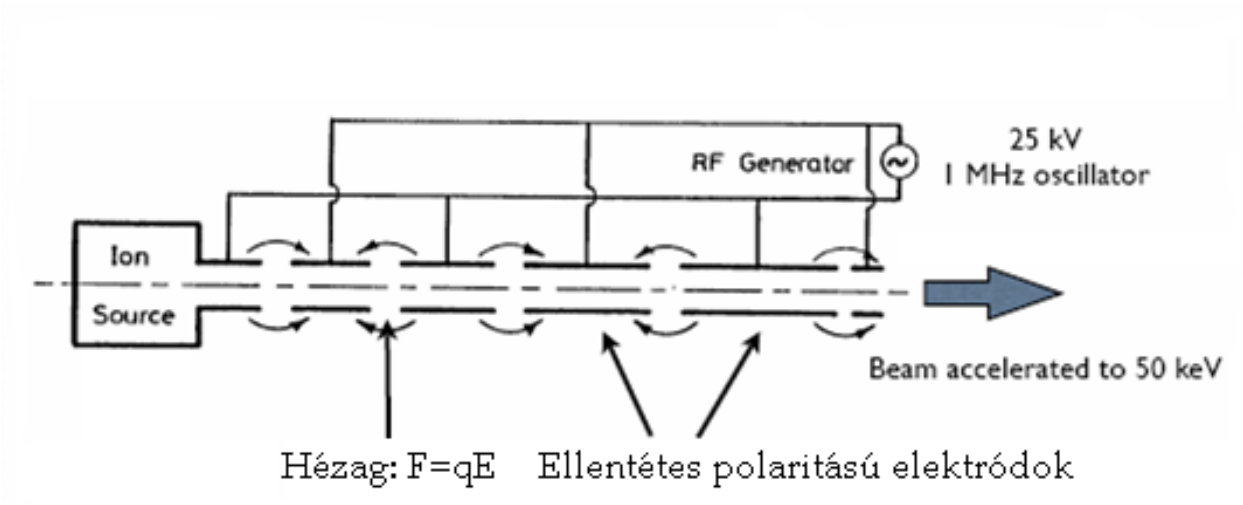
A természet sugárzó forrásai

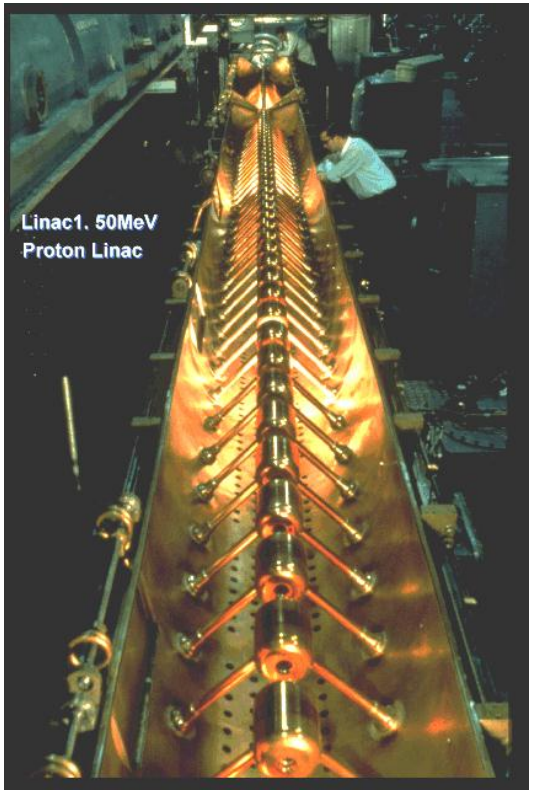
- Radioaktív források
  - Alfa (hélium atom) <5 MeV
  - Béta (elektron) <3 MeV
- Kozmikus sugárzás
  - ~90% proton, ~10% alfa részecske
  - Max. energia $3*10^{20}$ eV
  - A légkör felső részéből müonok
- Hátrányuk
  - nem jól meghatározott (néha nem elég) energiával
  - nem a megfelelő helyen jelennek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



Kozmikus sugárzás fluxusa az energia függvényében.
Forrás: Wikipedia

A lineáris gyorsító





- Alvarez lineáris gyorsító vákuum kamrákból épült fel (eredeti ötlet 1928-ból)
  - 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 ~ GHz-es frekvenciára van szükség

Még több gyorsítás kör alakban: a ciklotron

- Ismét segítségül hívjuk a Lorentz-erőt:

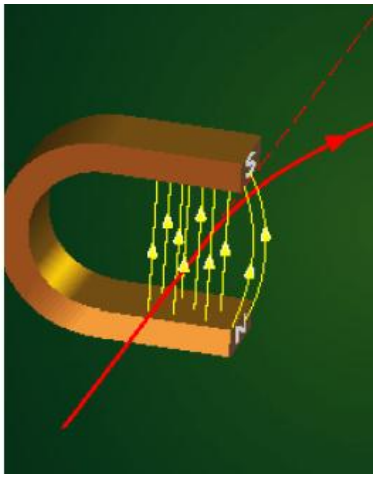
$$F_r = m\frac{v^2}{r}, \qquad F_B = qvB$$

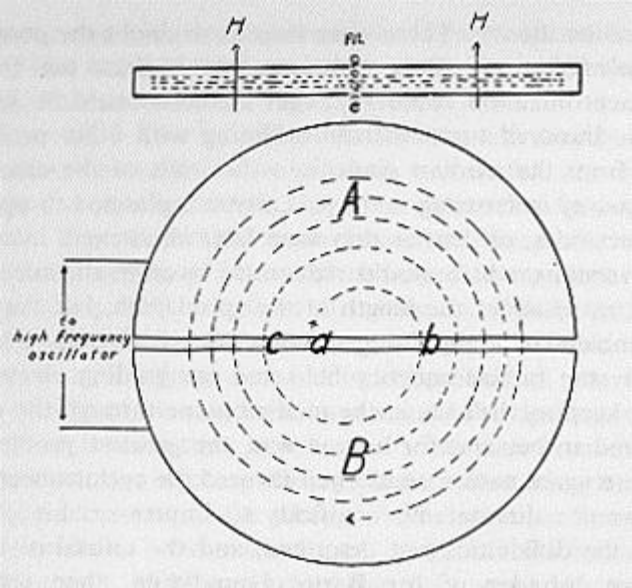
Ebből a sugarat kifejezve

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

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 ciklotronok korlátai

- 1. probléma: Ciklotron energiáját a mágneses tér, vagyis a „D” mérete korlátozza
  - A mágneses tér a részecske pályájának az oszcillációja miatt homogén sem lehet

- 2. probléma: A mozgás egyenlete átírható így:

$$mc^2 = \frac{qBc^2}{\omega}$$

  - Ebből következik, hogy relativisztikus sebességeknél a körsebesség csökken, a részecske fázisa eltolódik!

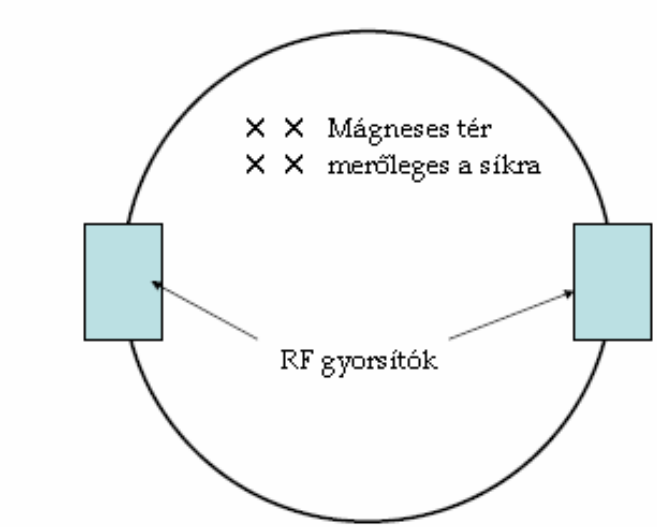
- A tömegnövekedés miatt, a maximálisan elérhető energia ~10 MeV

- Megoldás: az RF forrás frekvencia (szinkrociklotron) és/vagy a mágneses tér hangolása

A szinkrotron

- A szinkrotronban a frekvencia és a mágneses tér változtatásával a részecske körpályán tartható

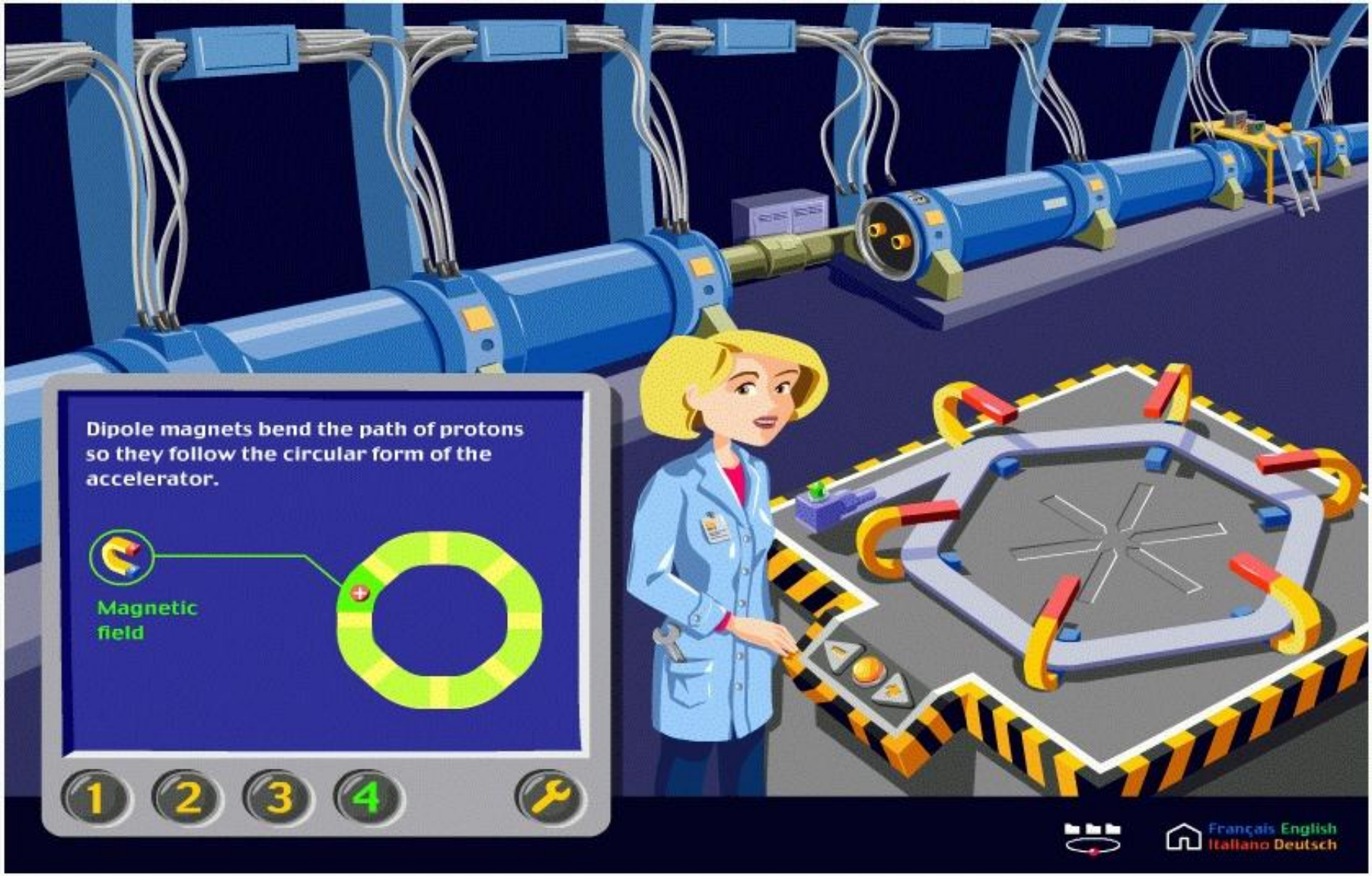
- A gyorsítás a fázis-stabilizáció elvén működik: a stacionárius pályához képes hamar érkező részecskék energiája nő – tehát lassulnak, a később érkezők energiája csökken, tehát gyorsulnak. Oszcilláció az egyensúlyi pálya körül.



$$mc^2 = \frac{qBc^2}{\omega}$$

- A részecskék energiája fokozatosan növelhető a frekvencia modulációjával, a részecskék mindig az aktuális energiának megfelelő pályára állnak be
  - A gyorsító csövén kívül nincs szükség mágneses térre!

Hogyan tartsuk pályán a részecskéket?

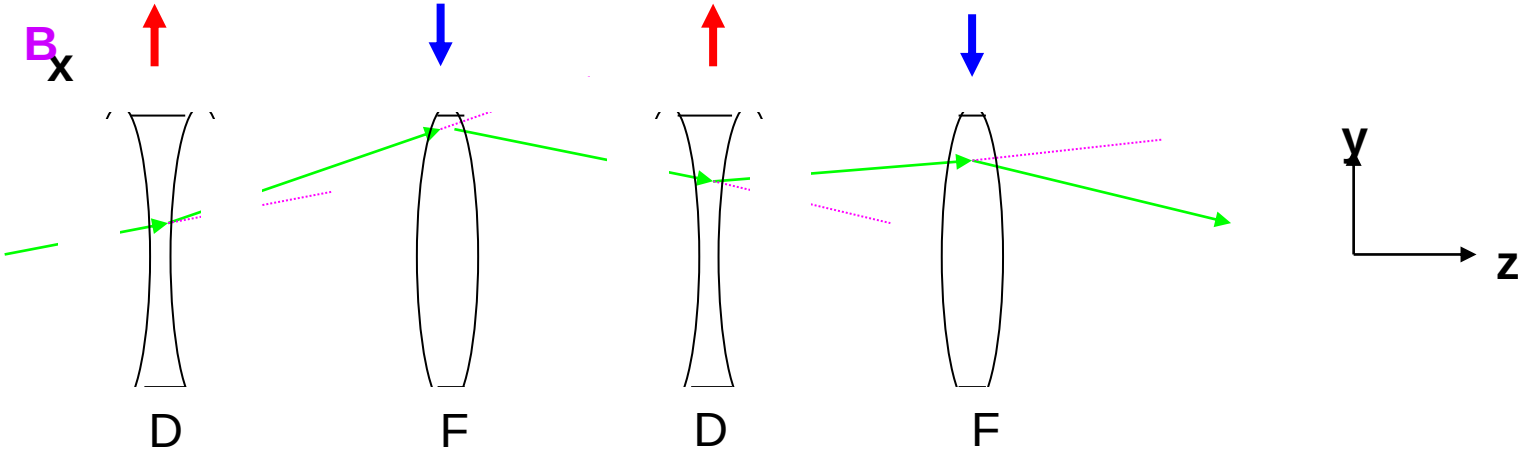


Részecske-nyaláb instabilitásai

- Több részecskét keringetünk egyszerre
  - Azonos töltések taszítják egymást
  - Párhuzamos áramok vonzóak

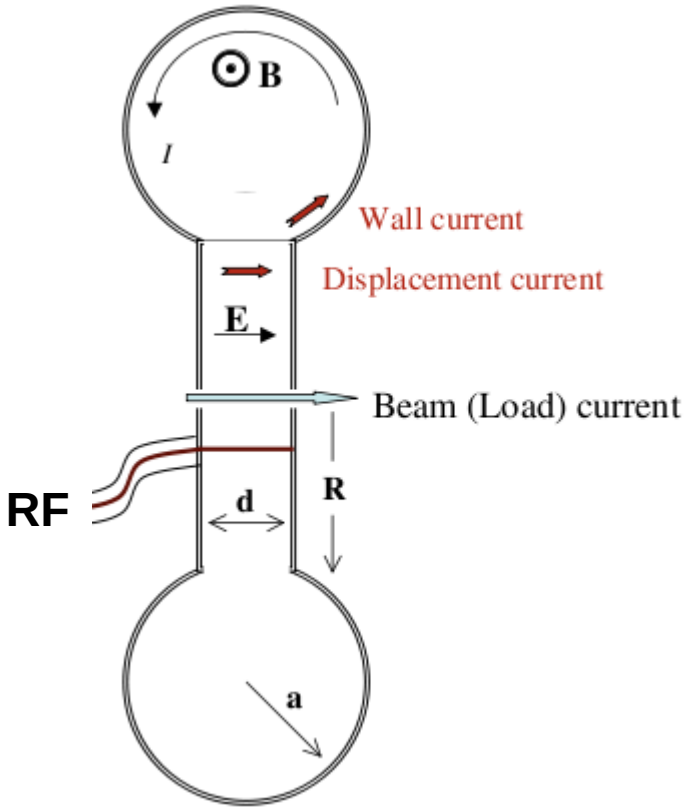
- Instabil nyaláb, fókuszálni kell. Megoldás: további mágnesek

- Az y-ban **F**ókuszáló mágnes x-ben **D**efókuszálóként működik, és viszont



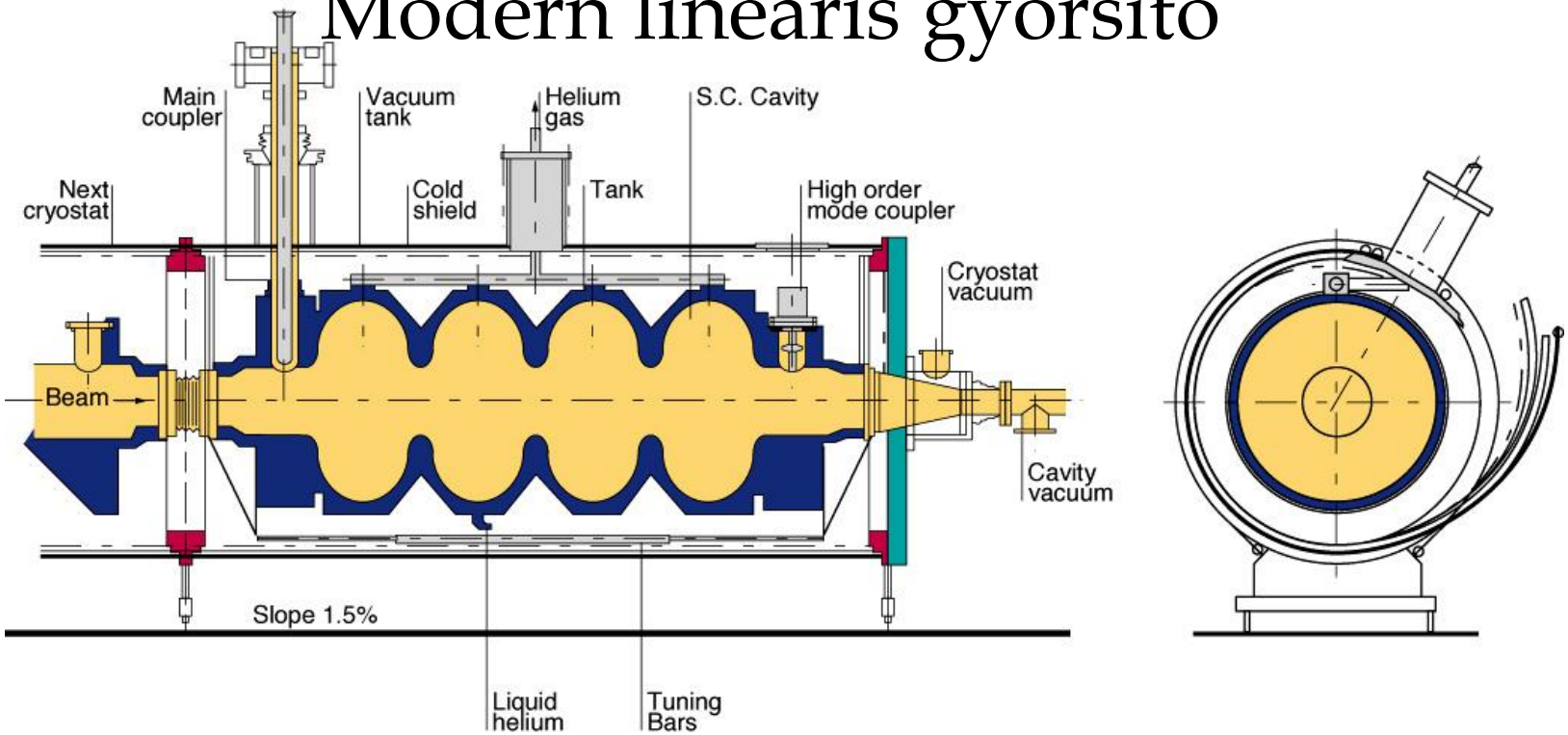
Fókuszálás kvadrupól mágnessel

RF gyorsítók: üregrezonátor



- Egy RF „antennát” egy speciális „fánk” alakú, zárt vezető vesz körül
- A bemenő rádiófrekvenciás jel változó elektromos teret hoz létre (képen vízszintesen), amelynek hatására áram jár körbe a „fánk” kör alakú metszete mentén
- Az áram egy tórusz alakú mágneses teret indukál, ami a tórusz szimmetria-tengelyével párhuzamosan, az elektromos tér változásával ellentétes irányú teret kelt. Tehát ez egy oszcilláló rendszer!
- Megfelelő gerjesztéssel meghatározott frekvencián változó elektromos tér jön létre
  - Gyorsítja a jó fázisban érkező részecskéket
  - A bejövő nyalábot, koherens „csomagokra” bontja

Modern lineáris gyorsító



- Több rezonáló egység a csomag részecskéit tovább gyorsítja, így egy csomagokból álló, gyorsított részecskenyalábokat kibocsátó „ágyút” kapunk

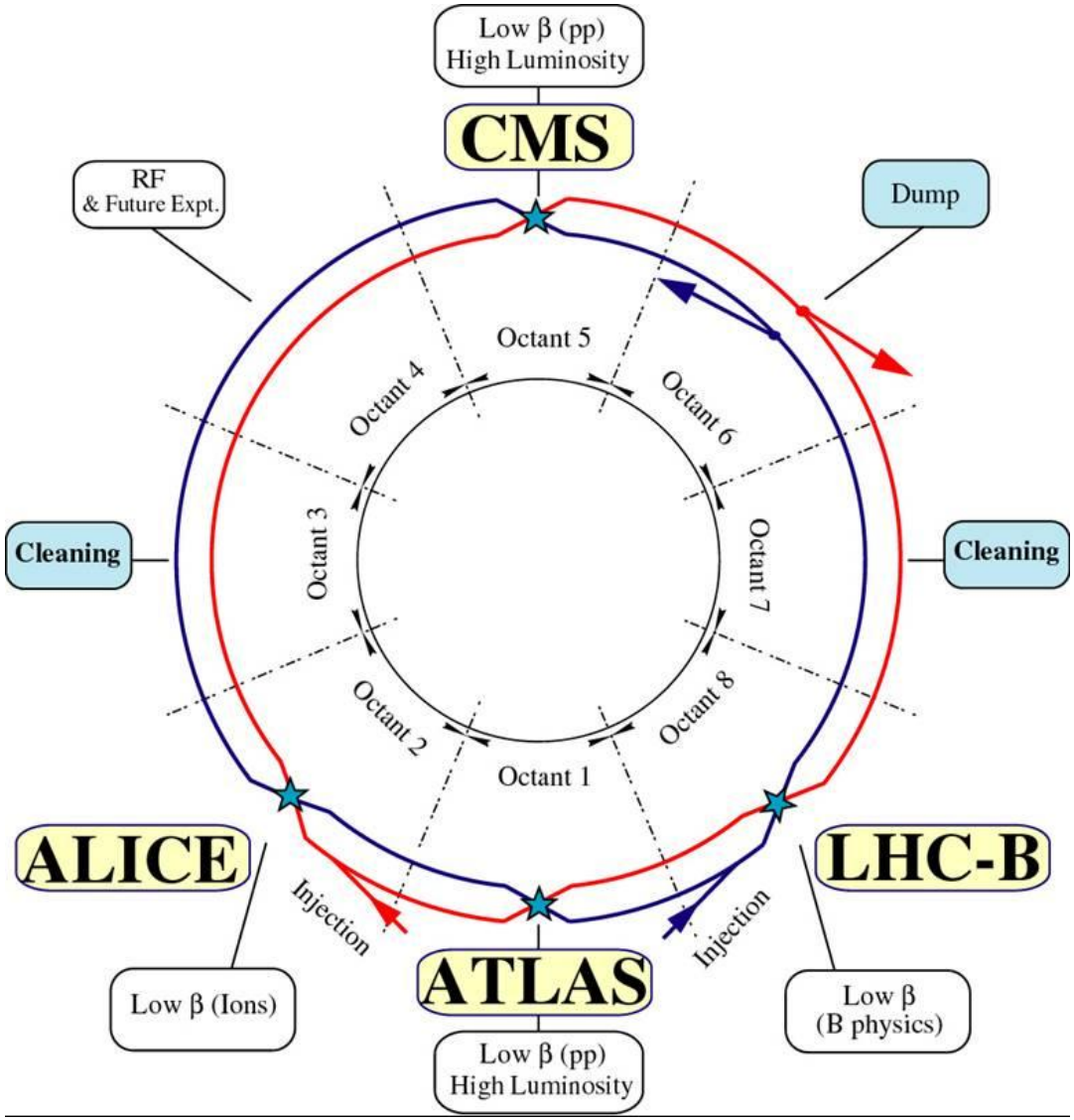
- Pl. a CLIC 30 GHz-es rezonátorral működne a tervek szerint

Összefoglalva: részecskegyorsítók kellékei

- Töltött részecskék forrása
- RF gyorsító egységek
- Hangolható terű dipolmágnesek kör alakba rendezve
- Hangolható fókuszáló és defókuszáló kvadrupol mágnesek

A Nagy Hadronütköztető (LHC)

Az LHC elemeinek elrendezése



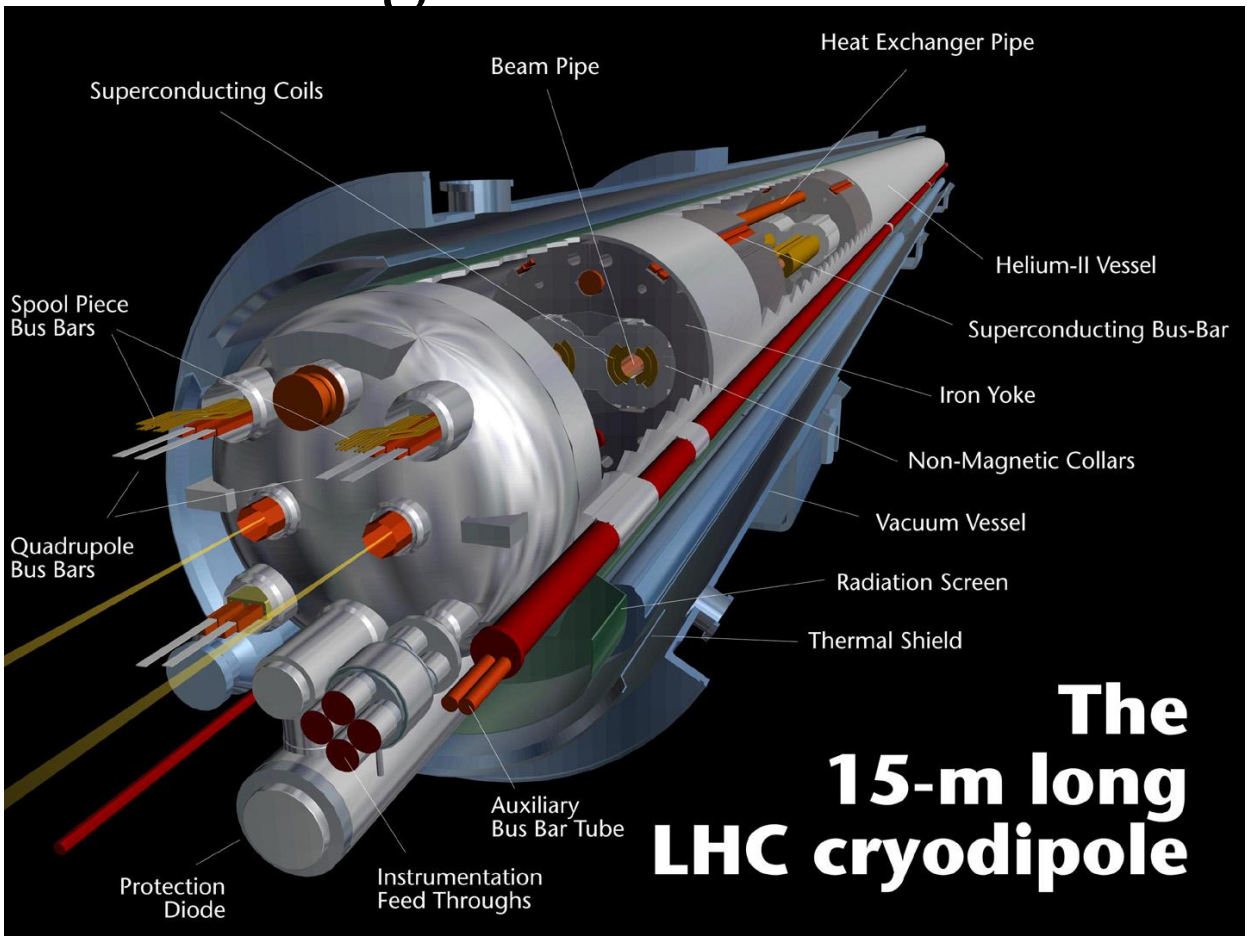
Az LHC alagút

- 27 km kerületű, 50 – 127 méter mélyen, 3.8 méter átmérőjű alagút
- Proton (7 TeV) vagy nehézion (2.75 TeV/n) ütközések

A mágnesek leengedése az alagútba

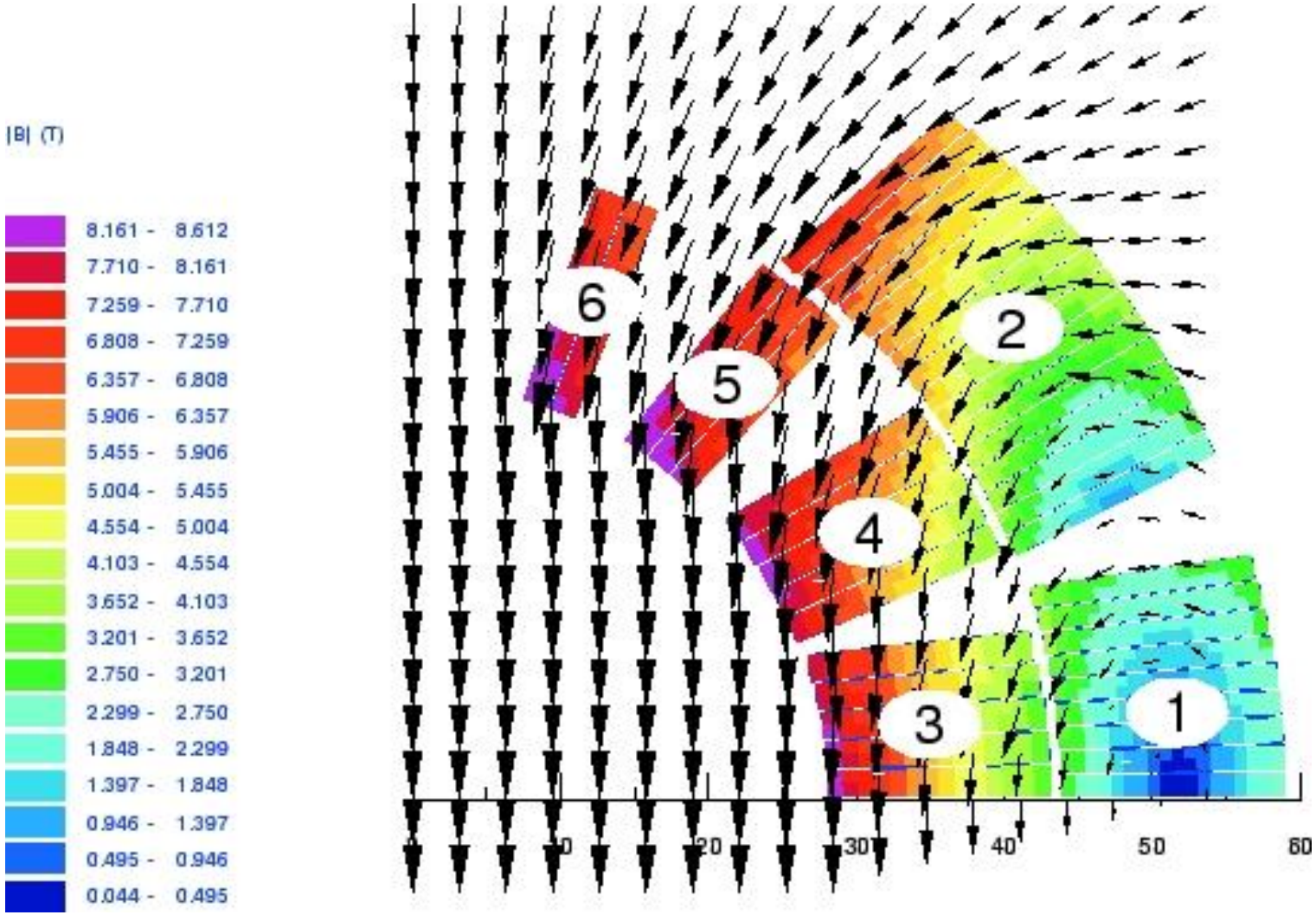
- 14.3 méter hosszú, 35 tonna
- 1232 darab, darabonként félmillió svájci frank

A mágnesek szerkezete



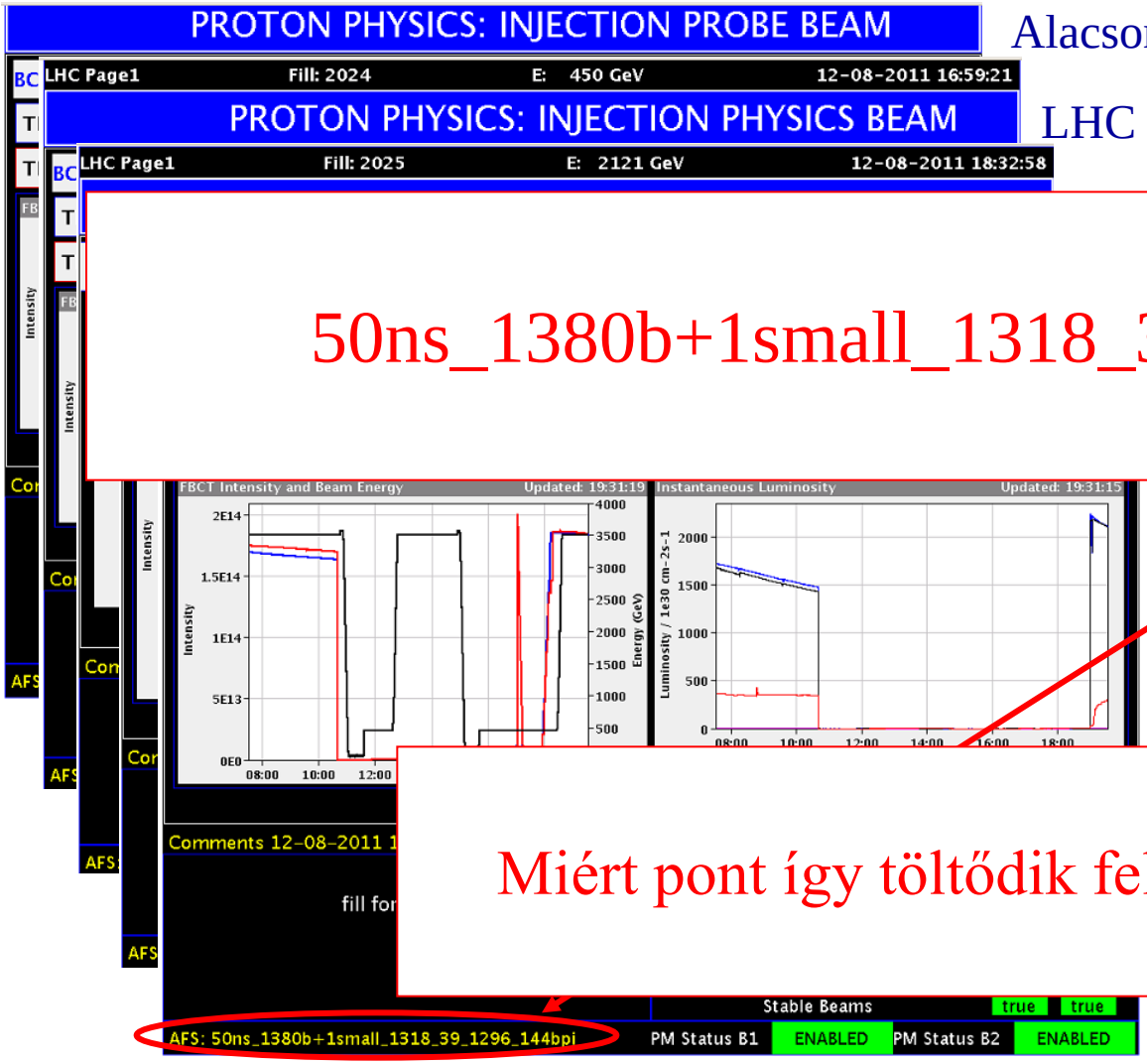
- 8.4 T mágneses tér, 11700 A árammal
- Szupravezető mágnesek 1.9 K folyékony héliumban

A dipólmágnesek tere



Az LHC feltöltésének lépései

<Gyorsító üzemmódja>: <folyamat állapota>



Alacsony intenzitású tesztnyaláb belövése

LHC feltöltése nagy intenzitáson

50ns_1380b+1small_1318_39_1296_144bpi

Áram (körönként): 1.85 * 10^{14} p

Nyalábok kitöltési módja:

- csomagok távolsága 50 ns

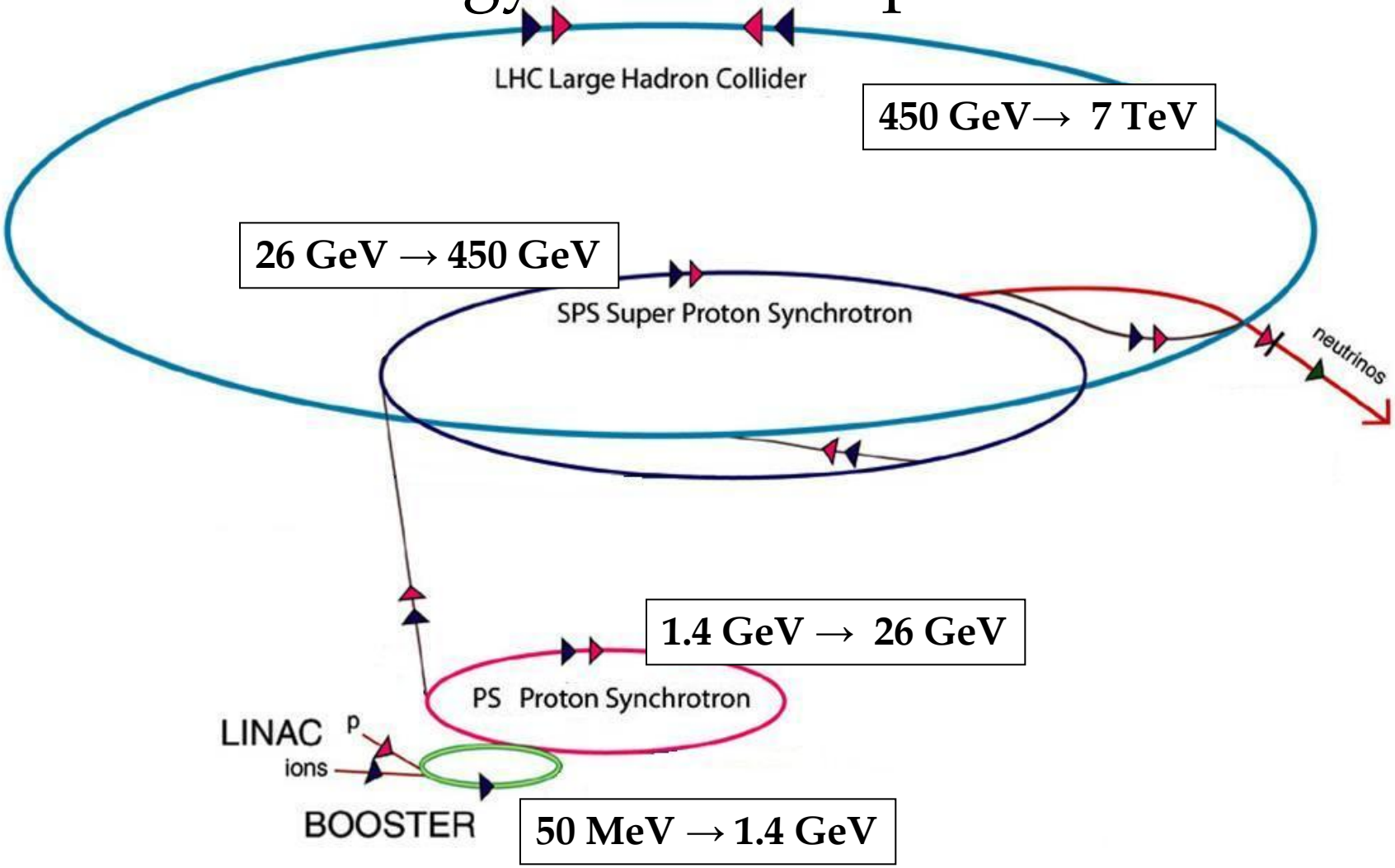
hát 13.4*10^{10} p

Miért pont így töltődik fel az LHC?

CMS-ben

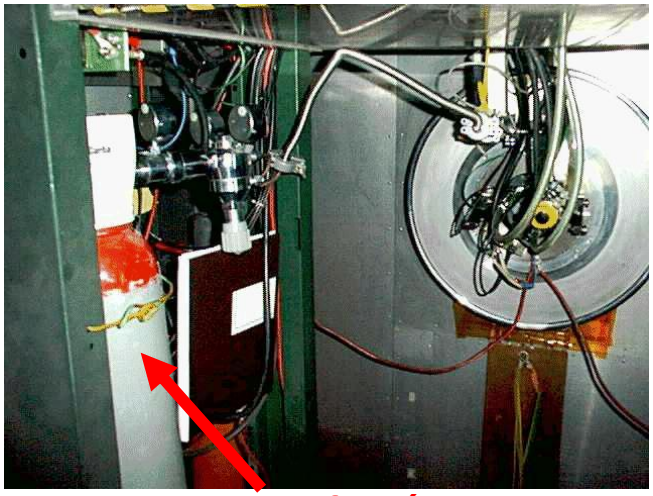
csomag, tehát 1930*10^{10} p került betöltésre

Az LHC gyorsító-komplexuma



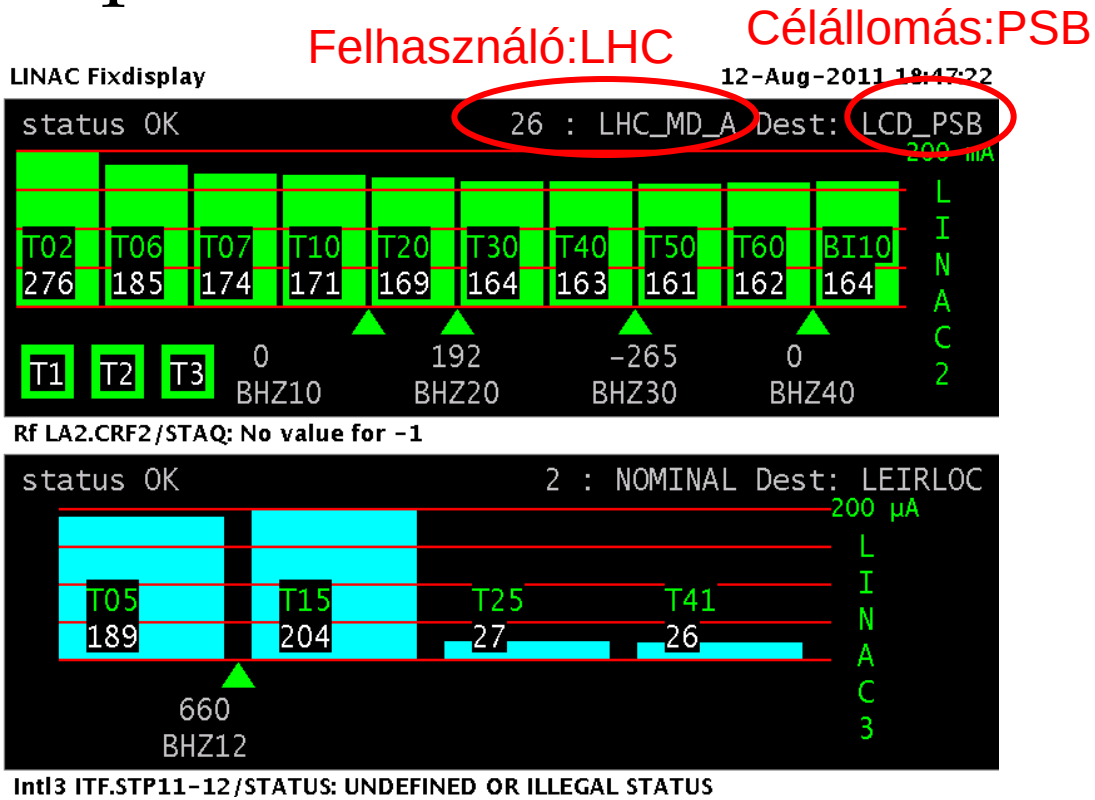
Érdekes összefoglaló angolul: http://www.youtube.com/watch?v=qQNpucos9wc

A Linac 2 proton forrás



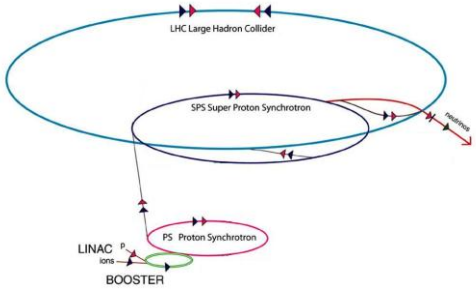
Proton forrás

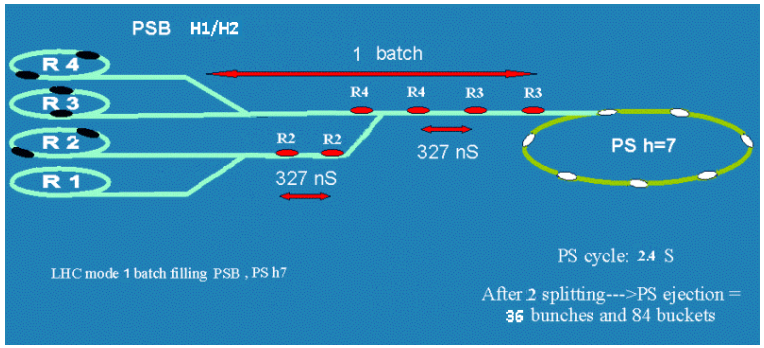
Linac 2



- Linac 2 látja el a PS Boostert (és másokat is) 50 MeV-es protonokkal 1 Hz-es frekvenciával
- A zöld oszlopok mutatják az impulzusok áramerősségét

PS Booster





PSB Fixdisplay - W 32 12-Aug-2011 18:37:40

Thu 11 Aug 2011 16:45

Supervisor : J.Tan 163812

Felhasználó: LHC

Használt gyűrűk

Kimenő protonok

Cél:PS

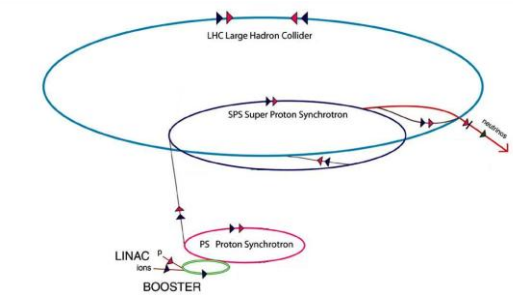
BPNM	User	Pls	Inj.	Acc.	b.Ej.E10	Ej.E10	Dest.
23	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	390	375	PS
24	LHC_MD_B	4	●●●●	○○●●	184	182	PS
25	ZERO	24	○○○○	○○○○	0.02	0.00	BDUMP
26	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	383	371	PS
27	LHC_MD_B	4	●●●●	○○●●	190	187	PS
28	LHCPROBE	11	●●●●	○○●○	1.10	7.16	BDUMP
29	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	387	375	PS
30	LHC_MD_B	4	●●●●	○○●●	185	182	PS
31	ZERO	24	○○○○	○○○○	0.00	0.00	BDUMP
32	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	380	368	PS
33	LHC_MD_B	4	●●●●	○○●●	191	187	PS
34	LHCPROBE	11					BDUMP
	EASTB						PS

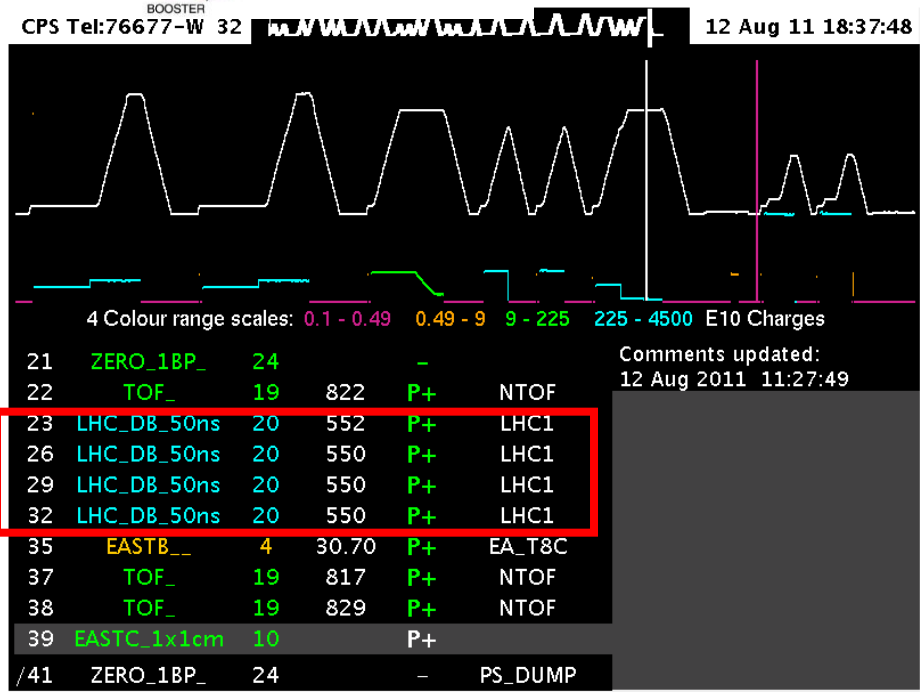
34/41 No Message

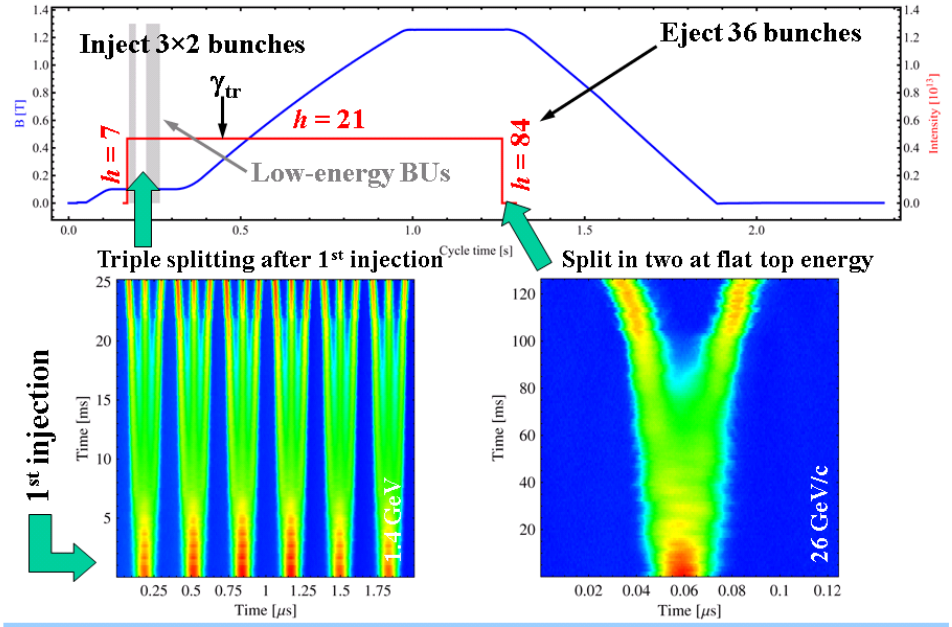
- A PS Booster 4 gyűrűből áll
- Gyűrűnként két csomag vonható ki két lépésben
- A protonok energiája 1.4 GeV

- Látható, hogy a PS Boster 4+2 gyűrűjéből továbbítódik 6 csomagban kb. $550*10^{10}$ proton (371+187) a PS-be
- Összesen 4 ilyen adag van, tehát 24 csomagban kb. $2200*10^{10}$ proton távozik nagyjából egy időben

A Proton Synchrotron

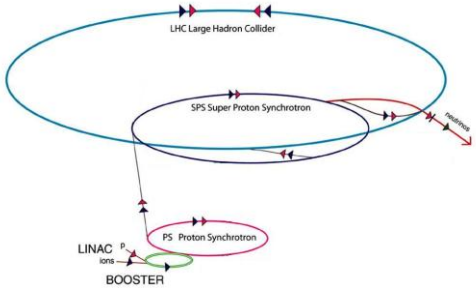




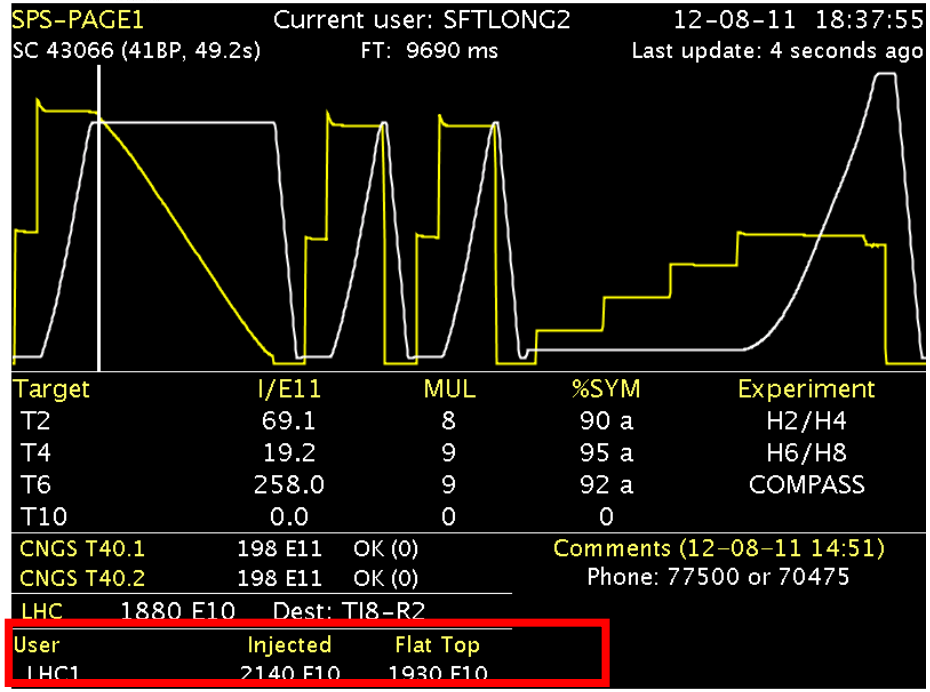


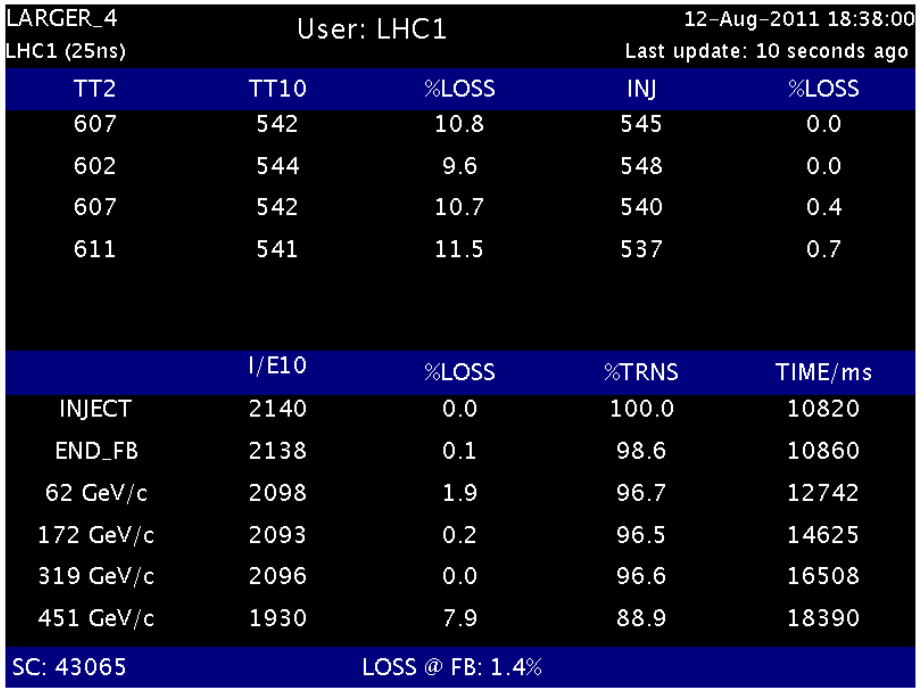
→ Each bunch from the Booster divided by 6 → 6 × 3 × 2 = 36

- A PS minden adag minden csomagját először szétválasztja 3 részre, felgyorsítja 26 GeV-re, majd kettéválasztja
- Az SPS négy adagban összesen 4*36=144 csomagot kap, amely $2200*10^{10}$ protont tartalmaz



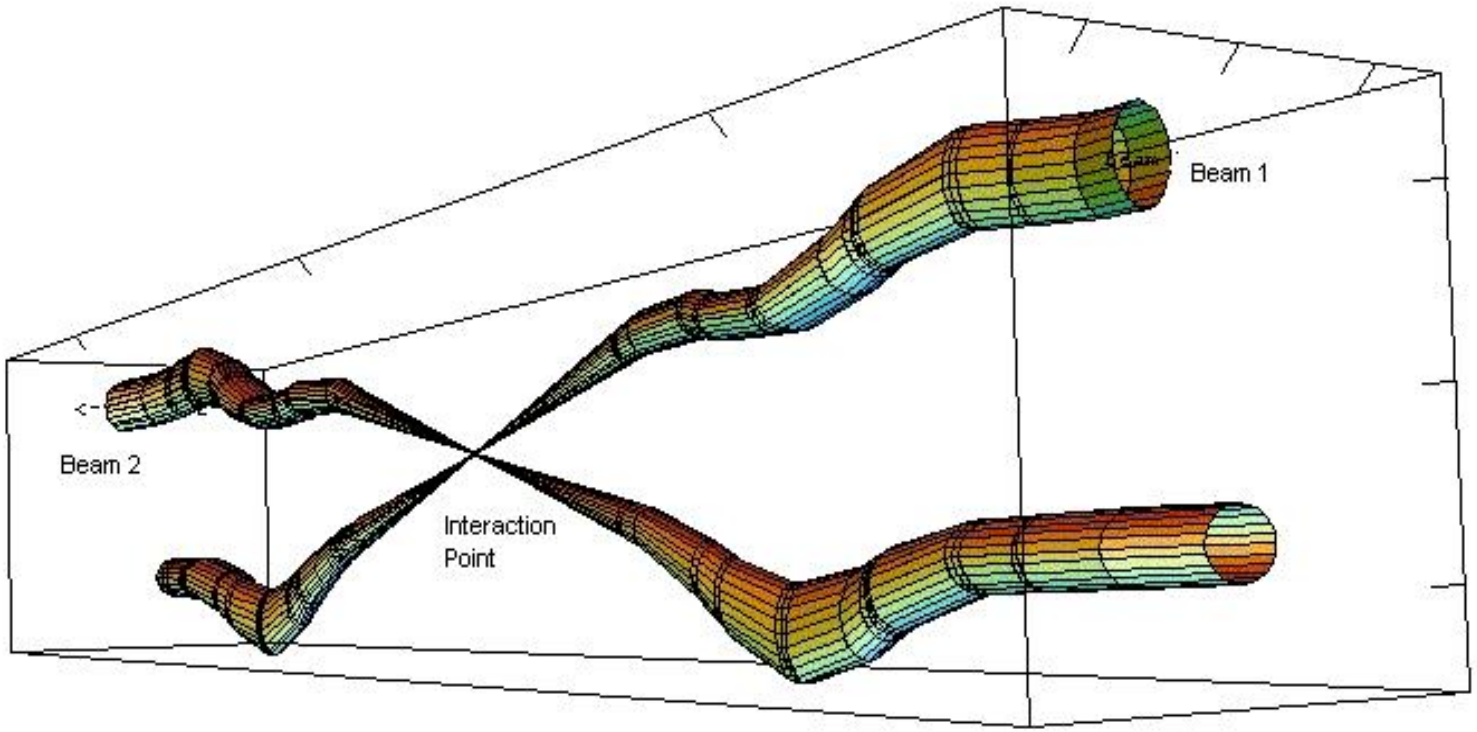
Super Proton Synchrotron





- Az SPS a beérkező 144 csomagot 450 GeV-re gyorsítja
- A jobboldali képernyő a protonok veszteségét mutatja
- Végül $1930*10^{10}$ proton 144 csomagban injektálódik az LHC-ba

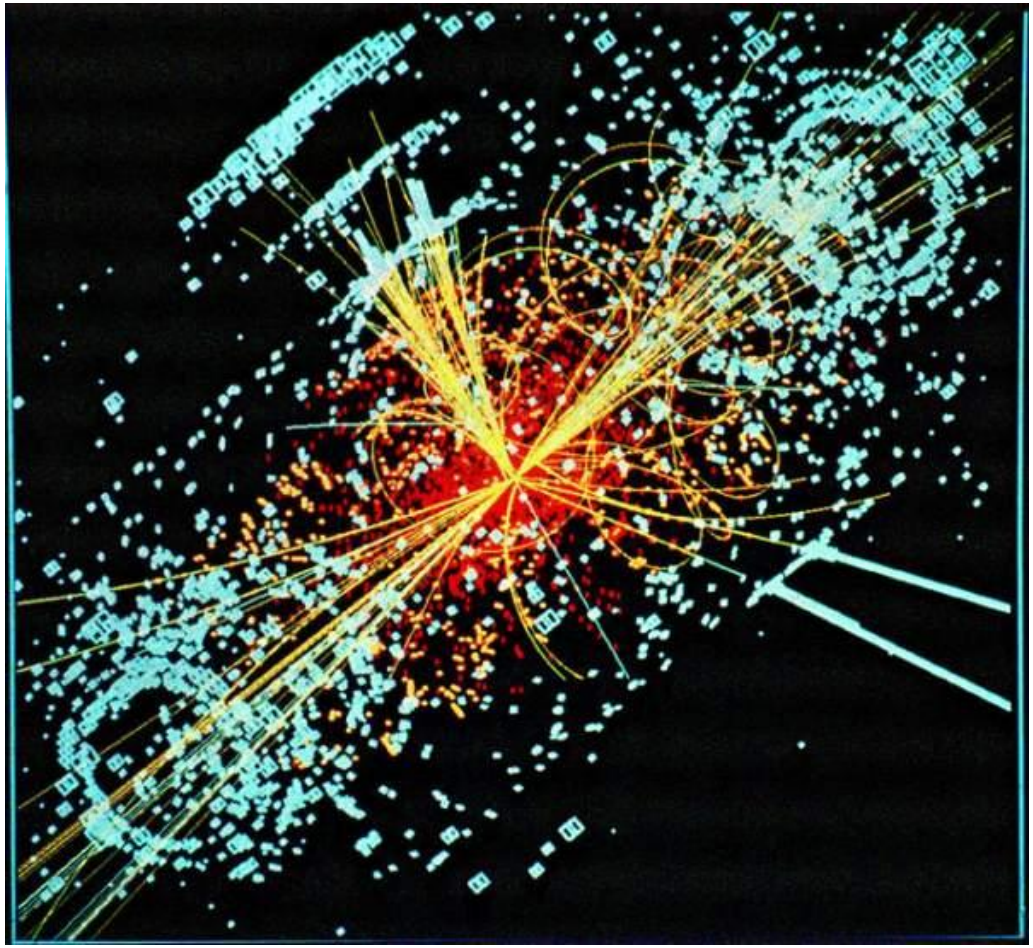
Nyalábok keresztezése



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

- Vékony nyalábban, max. ~3000 csomag sorakozhat
- Csomag: ~130 milliárd proton, 16 mikron átmérő, néhány cm hosszú
- 25 ns időközökben fognak kereszteződni, átlagban 20 ütközést keltve
- ~800 millió proton-proton ütközés másodpercenként

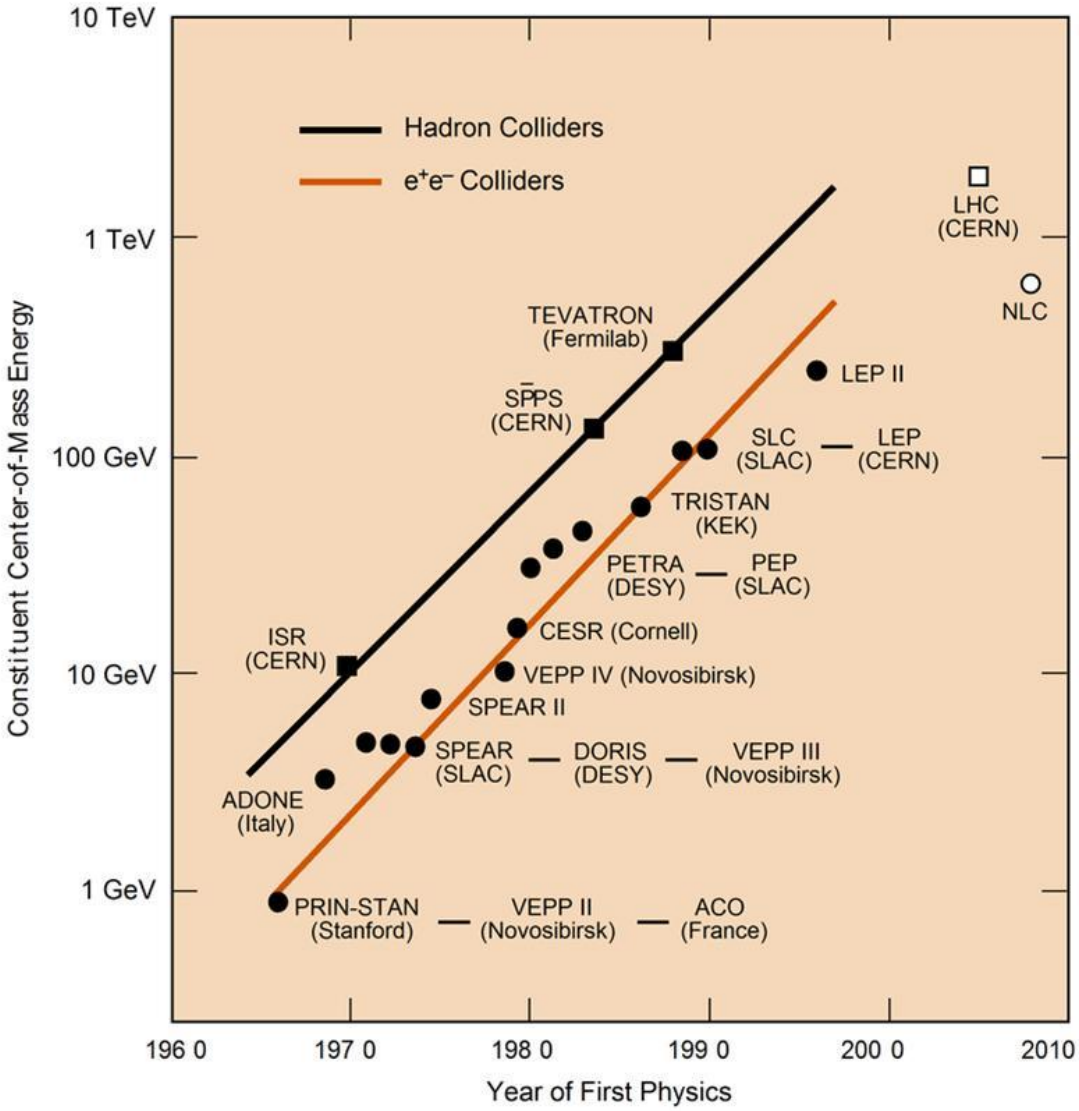
Egy „esemény” képe



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.

A világ gyorsítói



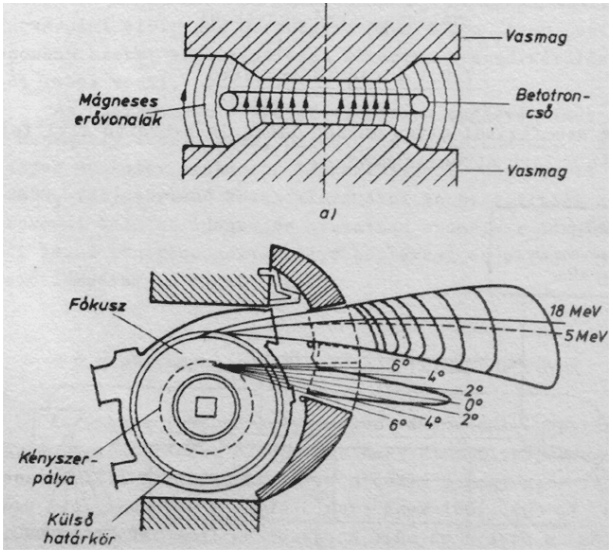
Gyorsítós fizika néhány eredménye

- Különböző típusú gyorsítók különböző célokra alkalmasak
  - e+e-: az ütközés energiája pontosan állítható, de alacsonyabb; „tisztább” végállapotok →precíziós mérésre alkalmasabb
  - p+p-: nagyobb energia érhető el, végállapotok sokszínűbbek → felfedezésre alkalmasabb

- Eredmények (a lista természetesen nem teljes):
  - SPS (CERN): p+p- ütközés, a W/Z-bozonok felfedezése
  - LEP (CERN): e+e- ütközés, a Z-bozon precíziós mérése
  - Tevatron (Fermilab): p+p- ütközés, felfedezte a top (legnehezebb) kvarkot
  - HERA (DESY): e-p+ ütközés, erős kölcsönhatás, proton struktúrája
  - RHIC (Brookhaven): Au-Au ütközés, a kvark-glüon plazma megfigyelése

Alternatív megoldás: a betatron

- Elektronoknál szinte minden sebesség relativisztikus
- Az elektrongyorsító (betatron) eredeti ötlete is az 1920-as évekből származik
  - Az elektron körszimmetrikus mágneses térben, B(r), R sugarú pályán kering
  - A mágnes tér hangolható, az elektron gyorsítását a változó mágneses fluxus által keltett örvényes elektromos tér végzi
  - Alapfeltétel: a mágneses fluxus és B(R) arányosan nő, és a fluxus kétszer akkora, mint egy B(R) homogén mágneses téré lenne (Wideröe után)



- Az ötletet Kerst tette működőképessé (1940) meghatározva a stabil pályához szükséges B(r) alakját