

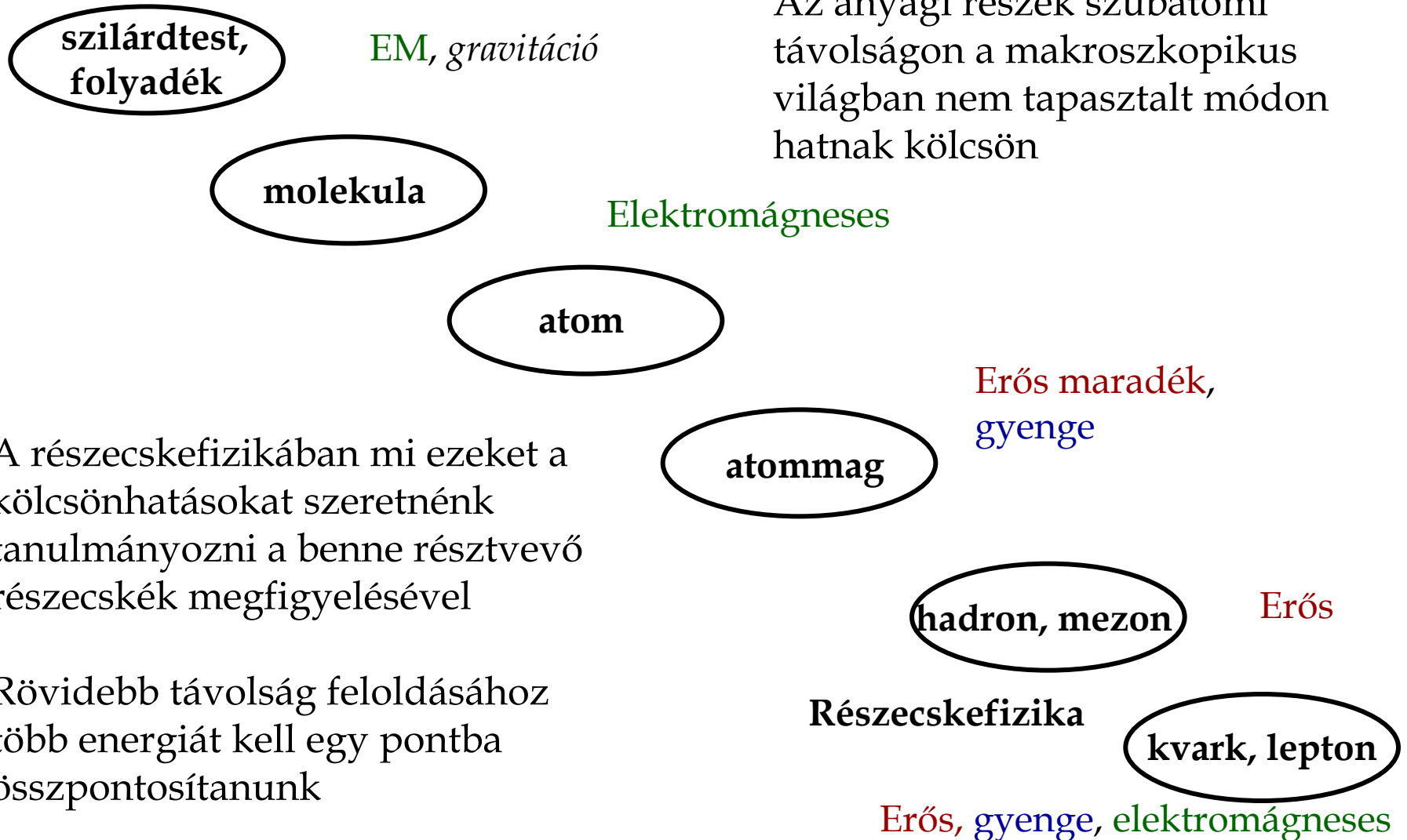
Gyorsítók

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

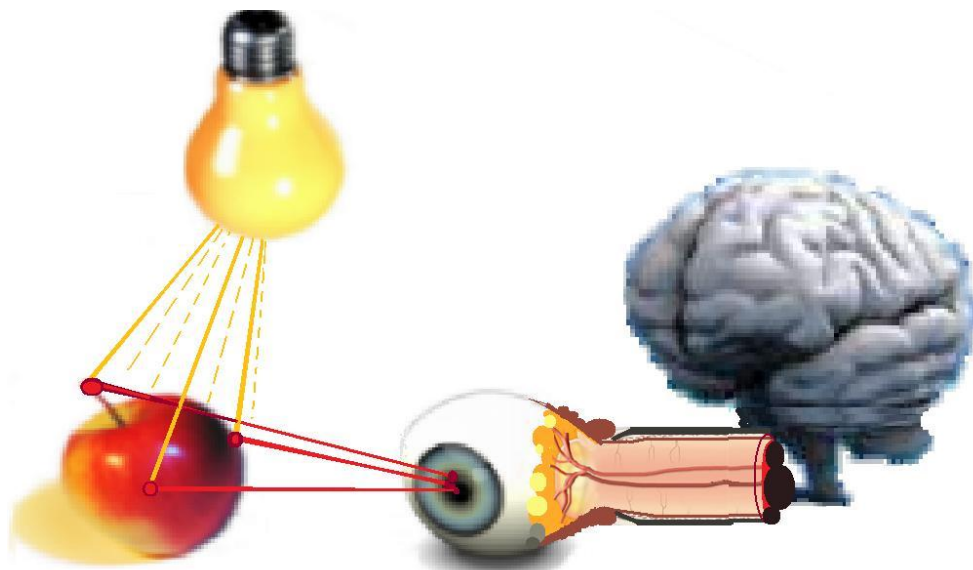


A részecskefizikában mi ezeket a kölcsönhatásokat szeretnénk tanulmányozni a benne résztvevő részecskék megfigyelésével

Rövidebb távolság feloldásához több energiát kell egy pontba összpontosítanunk

Tárgyak vizsgálata

- Kölcson 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

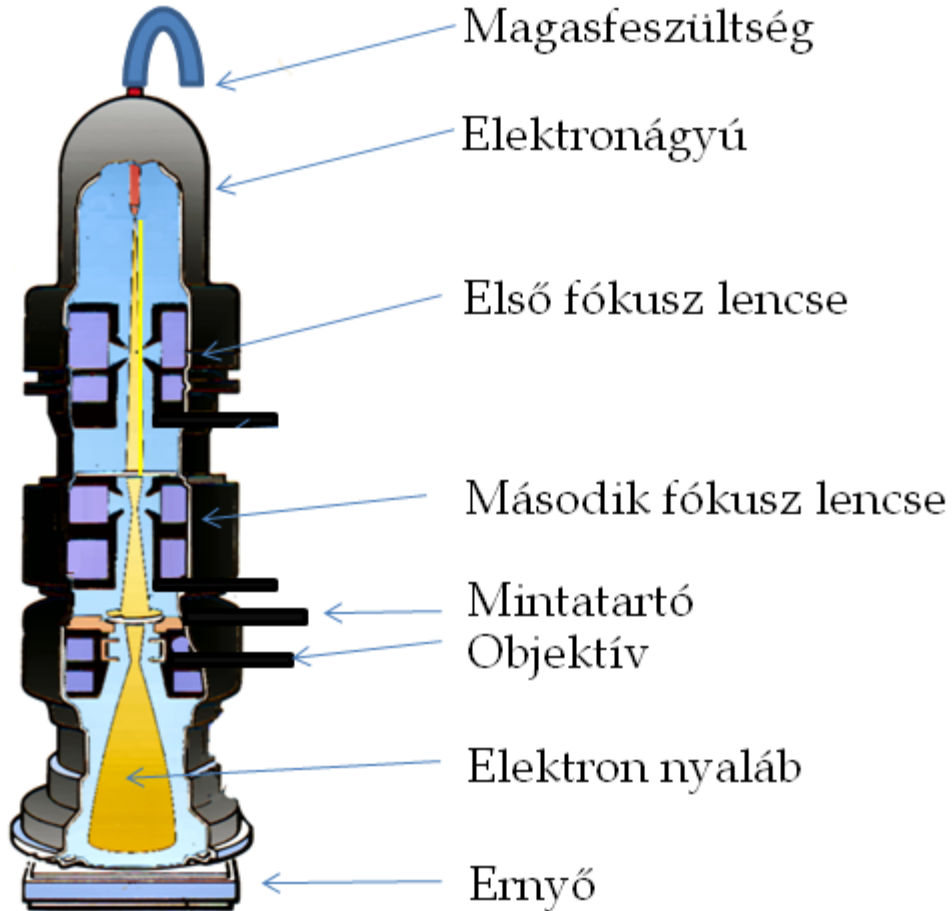
- A részecskék hullám tulajdonsága, De Broglie - egyenlet:

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

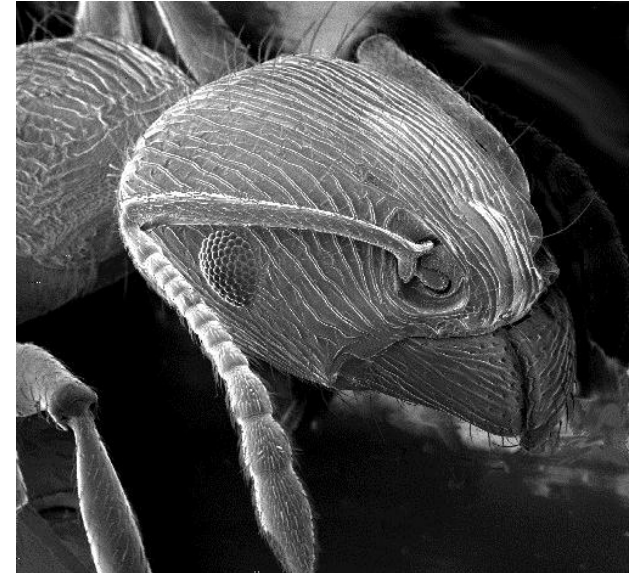
ahol $hc = 1239.8 \text{ eV nm}$

- 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 optikainak 1000-szerese

Az elektronmikroszkóp



Forrás: Wikipedia



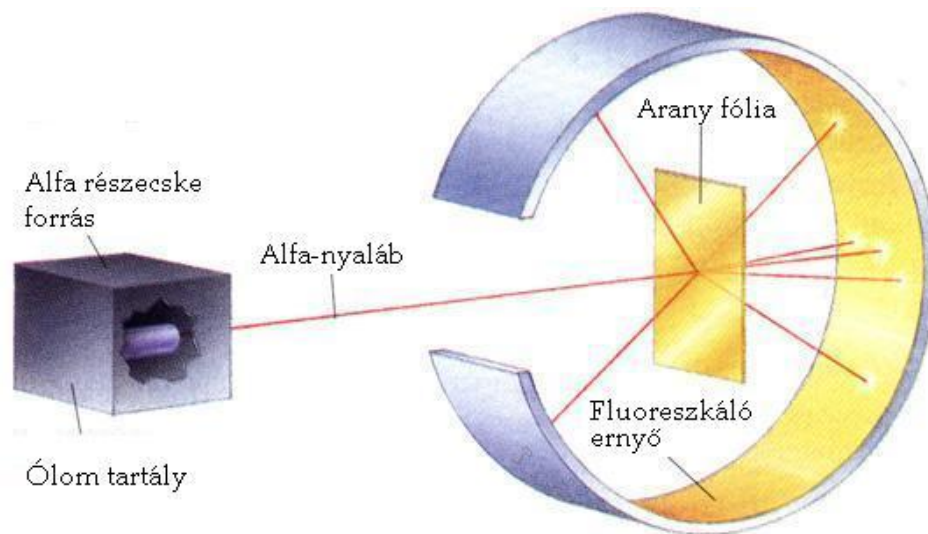
Hangyafej, forrás: Wikipedia

Pásztázó mikroszkóp

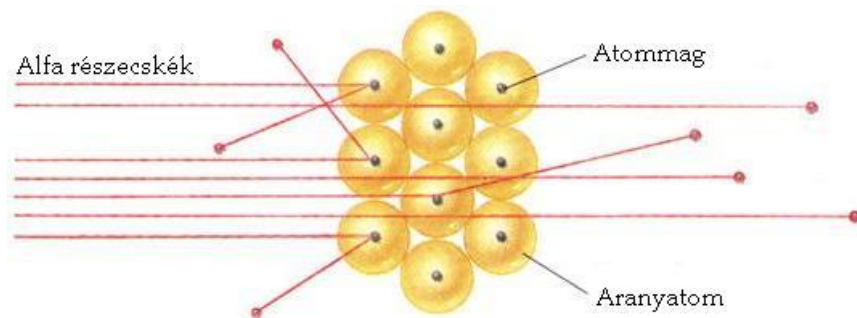
- ~ 0.5 nm felbontás
- ~ 40 keV kinetikus energia
- Atomok mérete ~ 0.1 nm

„Képkalkotás” az atomfizikában

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



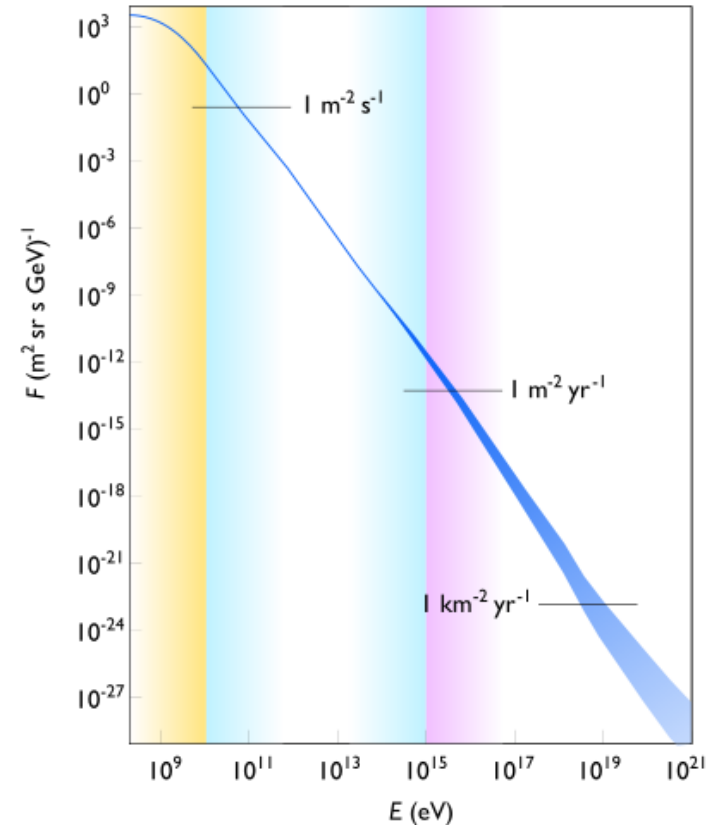
<http://sun.menloschool.org/~dspence/chemistry/atomic/>



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

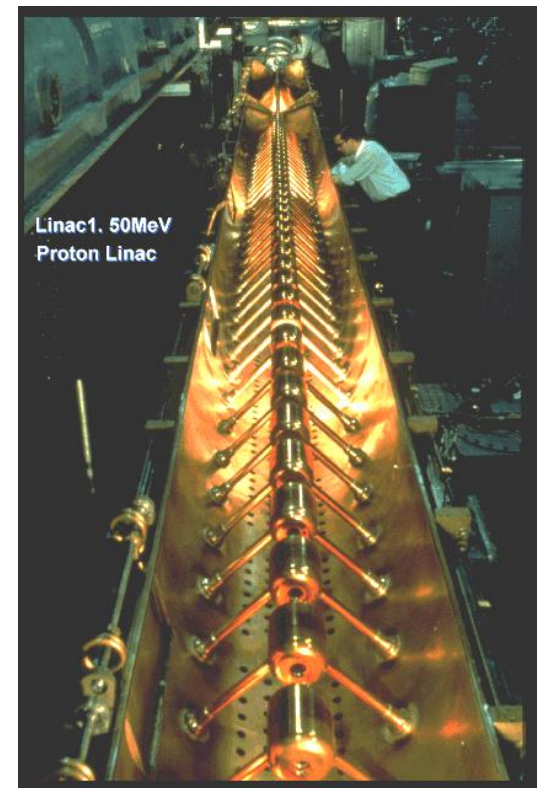
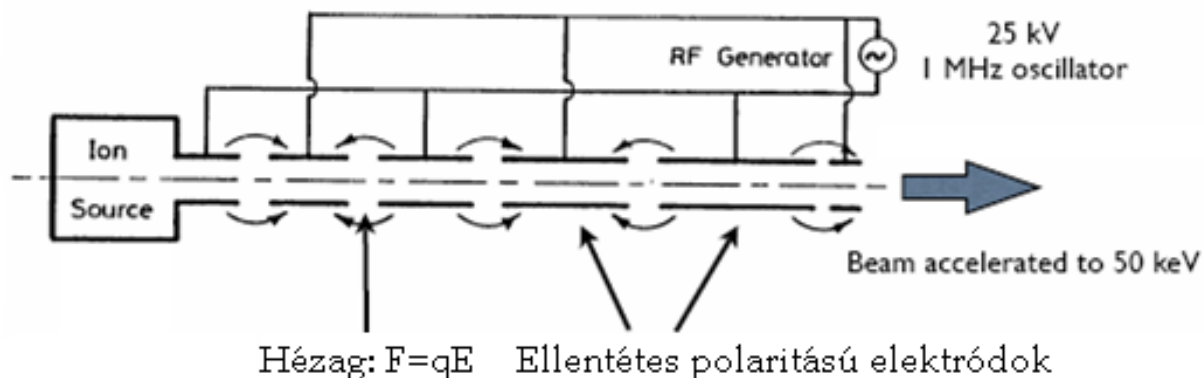
A természet sugárzó forrásai

- Radioaktív források
 - Alfa (hélium atom) <5 MeV
 - Béta (elektron) <3 MeV
- Kozmikus sugárzás
 - $\sim 90\%$ proton, $\sim 10\%$ 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
 - 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:

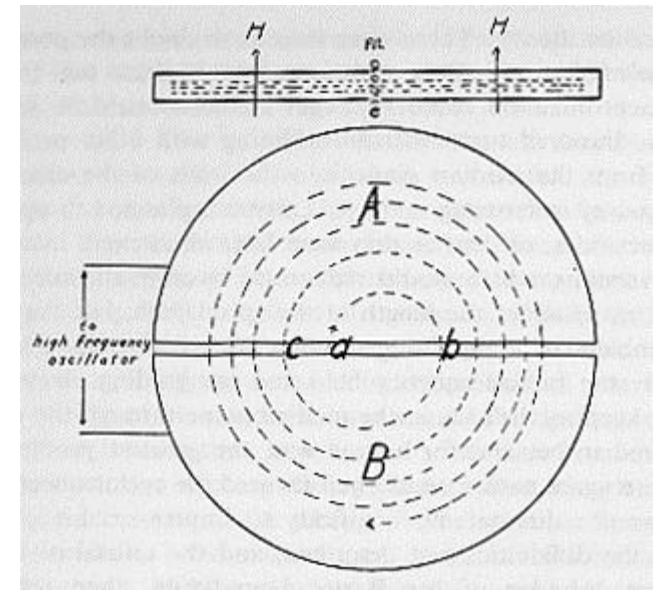
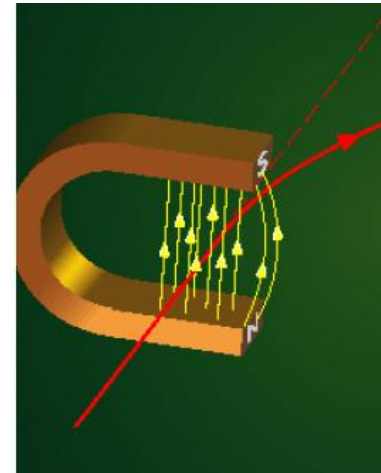
$$F_r = m \frac{v^2}{r}, \quad F_B = qvB$$

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 ciklotronok korlátai

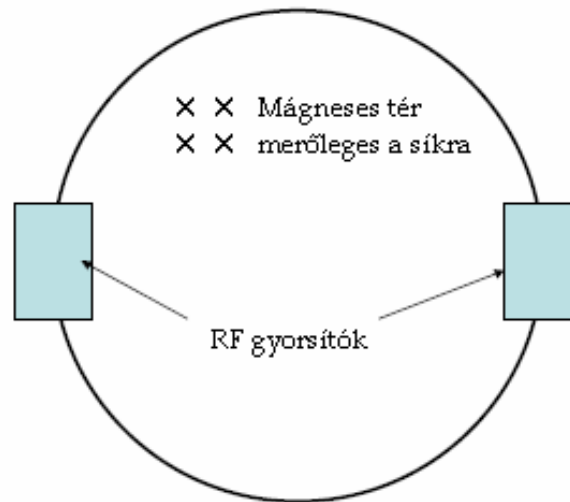
- 1. probléma: Ciklotron energiáját a mágneses tér, vagyis a „D” mérete korlátozza
 - A mágneses tér a részecske pályájának az oszcillációja miatt homogén sem lehet
- 2. probléma: A mozgás egyenlete átírható így:

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

- 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

Megoldás: A szinkrotron

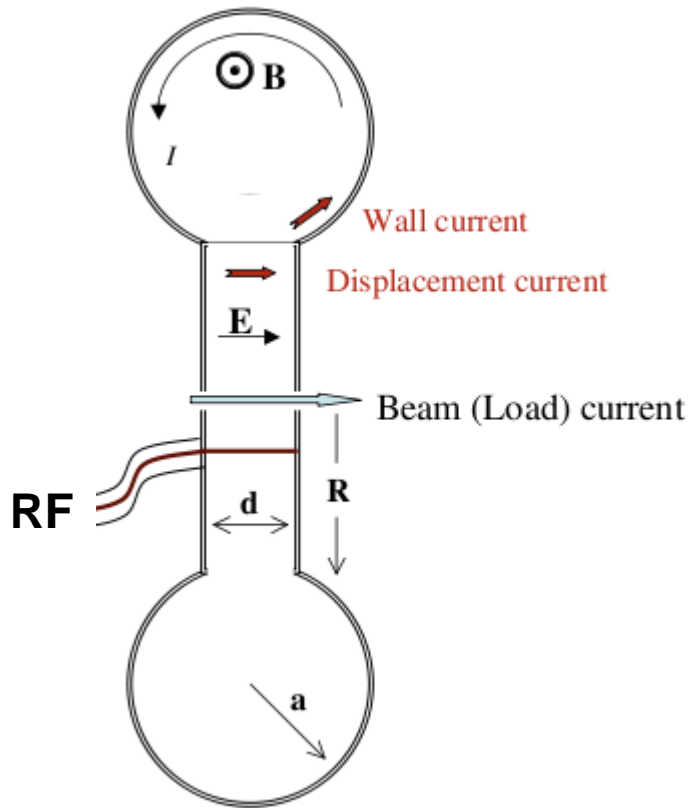
- A szinkrotronban a frekvencia és a mágneses tér változtatásával a részecske körpályán tartható
 - A gyorsító csövén kívül nincs szükség mágneses térrel!
- A gyorsítás a fázis-stabilizáció elvén működik: a stacionárius pályához képes hamar érkező részecskék energiája nő – tehát lassulnak, a később érkezők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



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

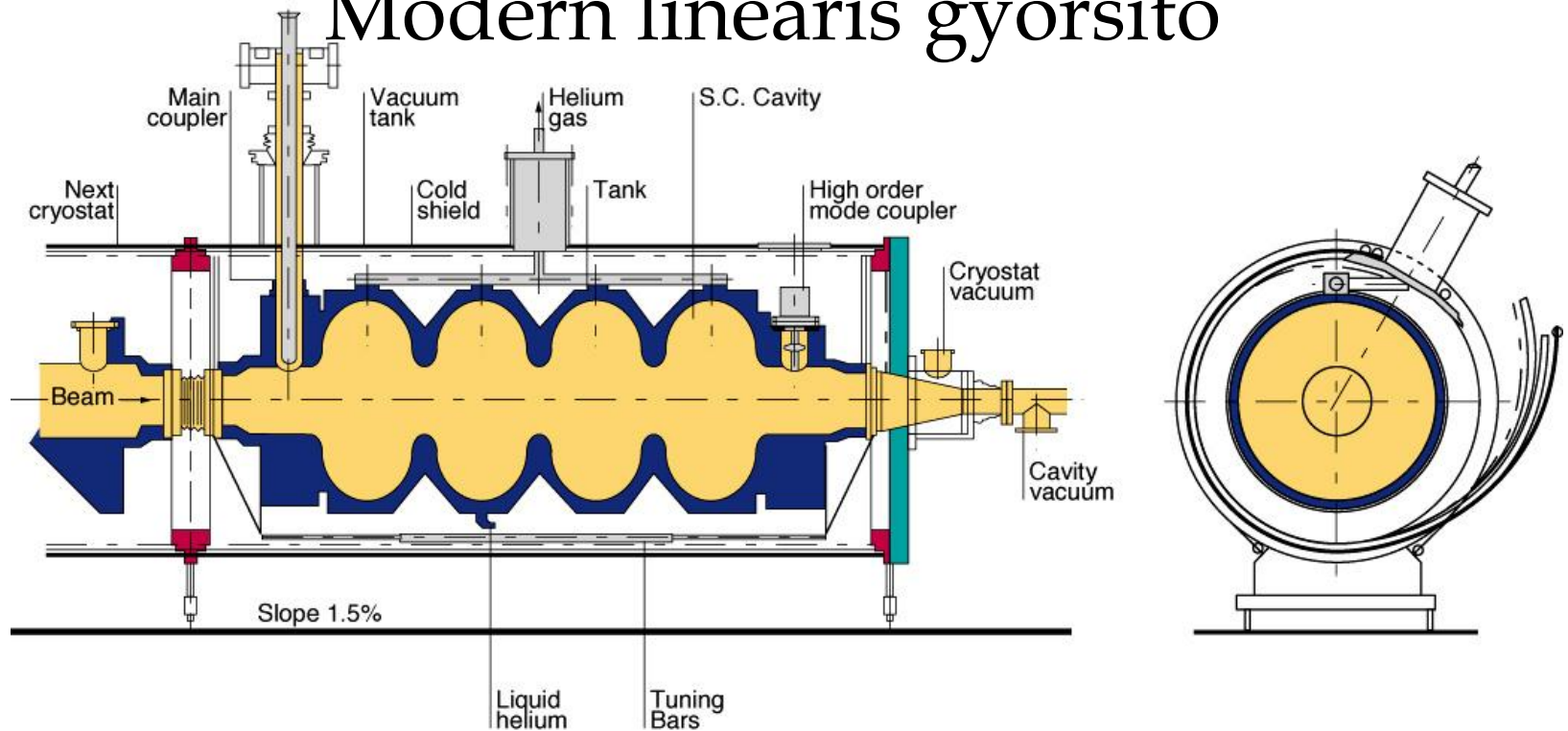
- A részecskék energiája fokozatosan növelhető a frekvencia modulációjával, a részecskék mindig az aktuális energiának megfelelő pályára állnak be

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

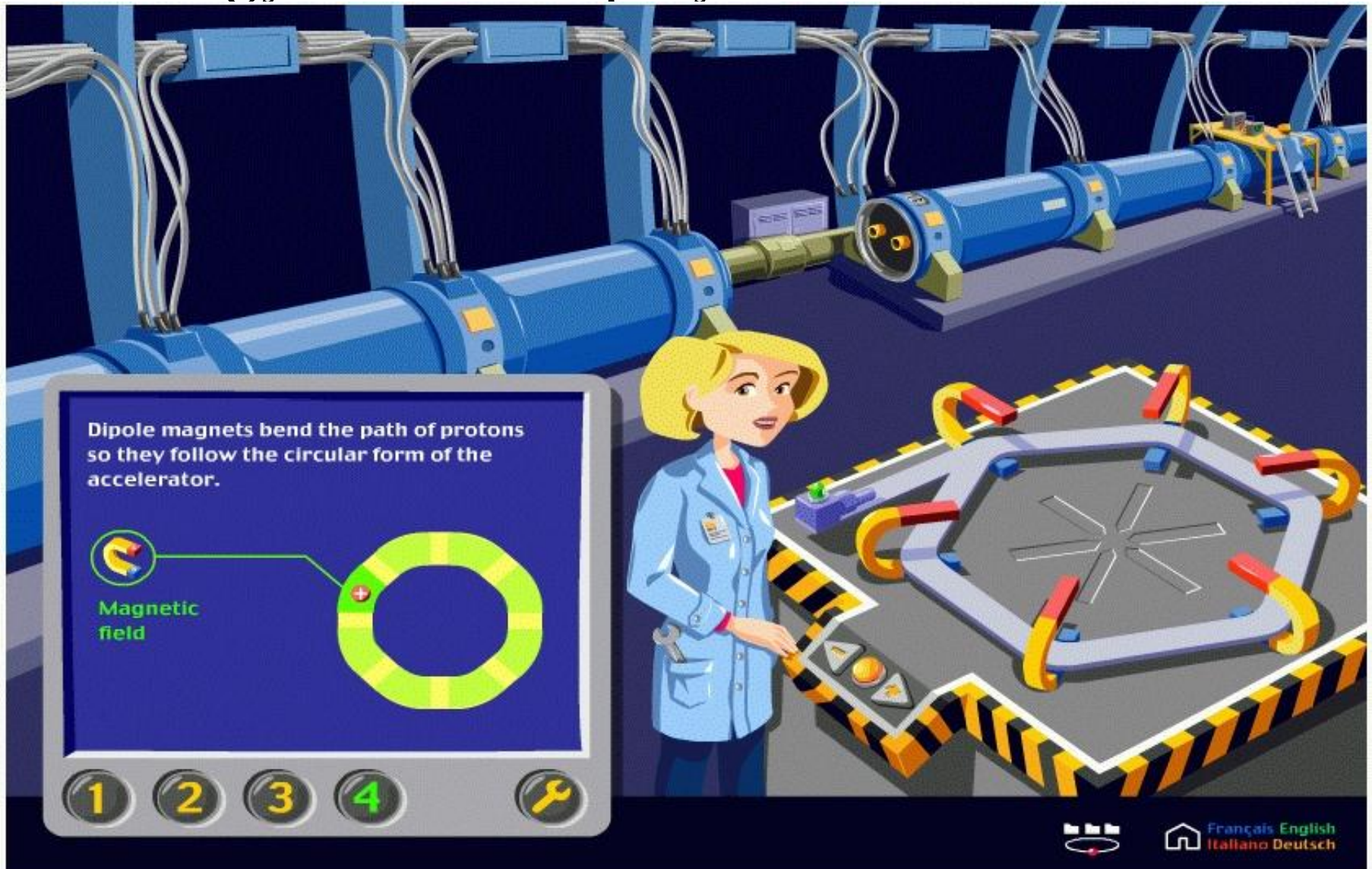


- Több rezonáló egység a csomag részecskéit tovább gyorsítja, így egy csomagokból álló, gyorsított részecskenyalábokat kibocsátó „ágyút” kapunk

C 510

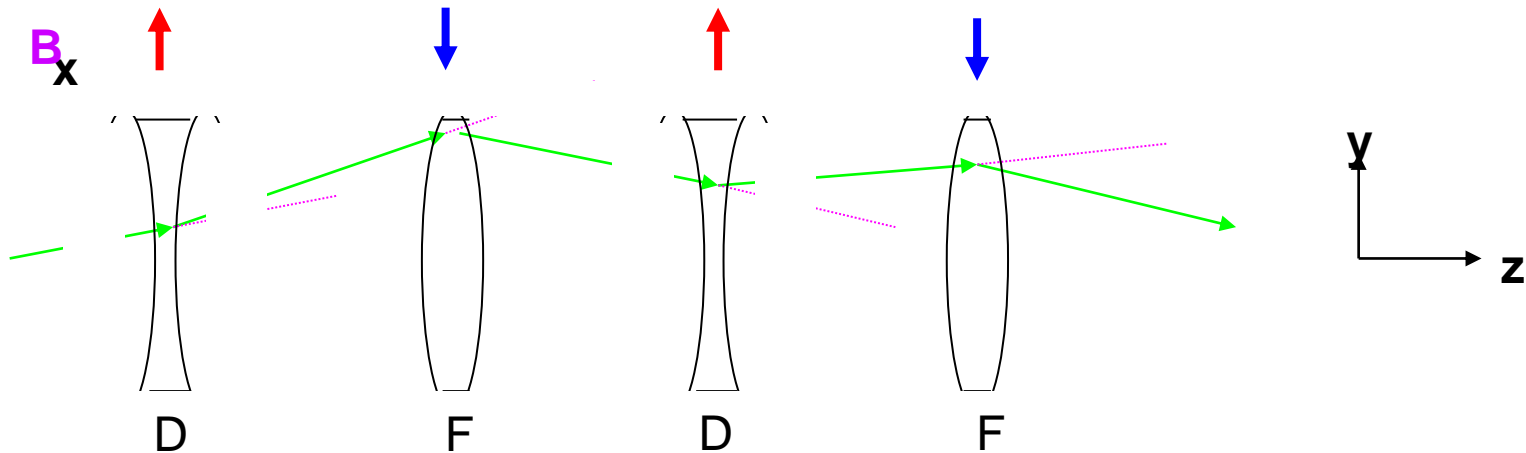
- Pl. a CLIC 30 GHz-es rezonátorral működne a tervek szerint

Hogyan tartjuk 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 Fókuszáló mágnes x -ben Defókuszálóként működik, és viszont



Fókuszálás kvadрупól mágnessel



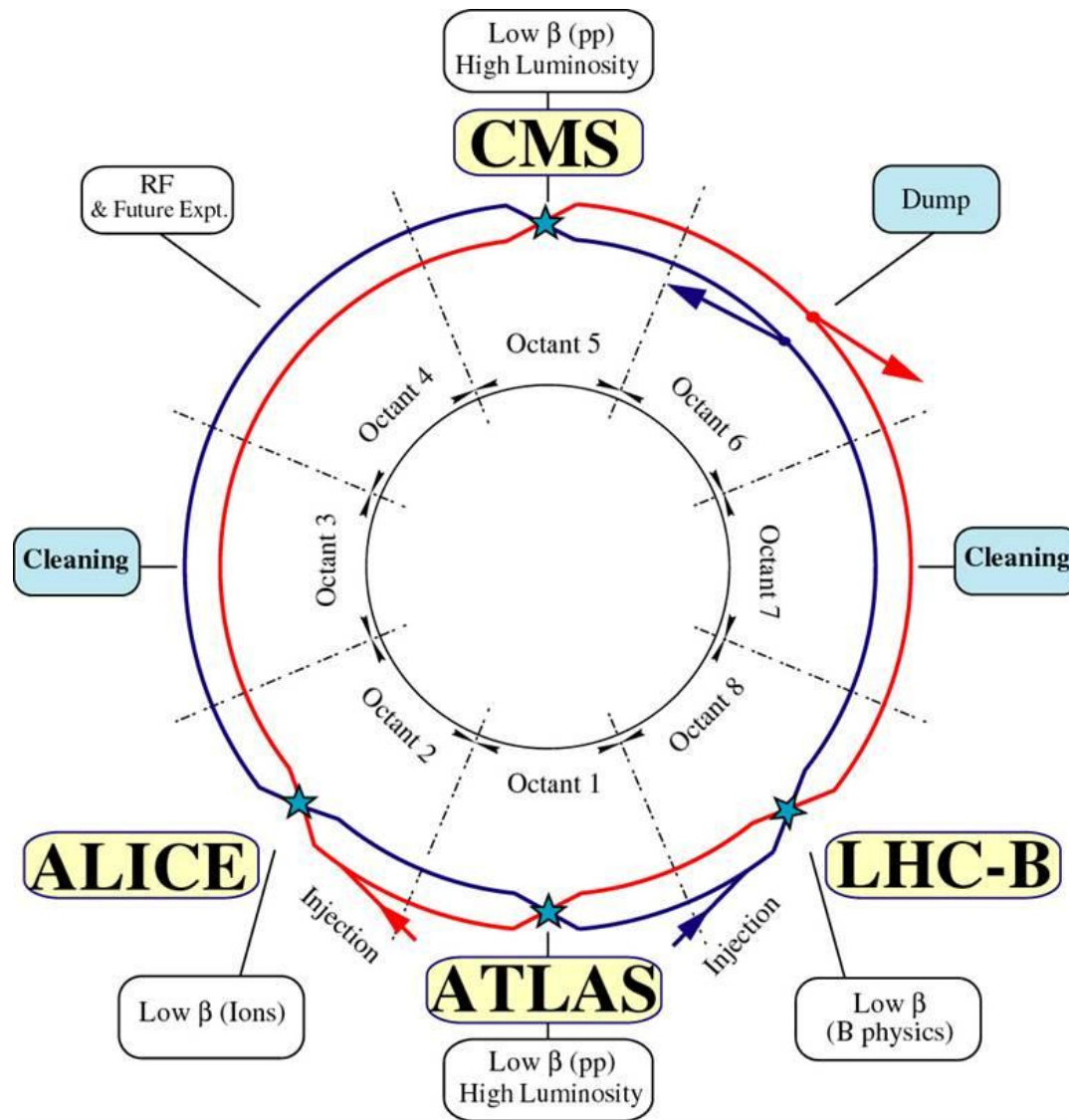
Összefoglalva: részecskegyorsítók kellékei

- 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

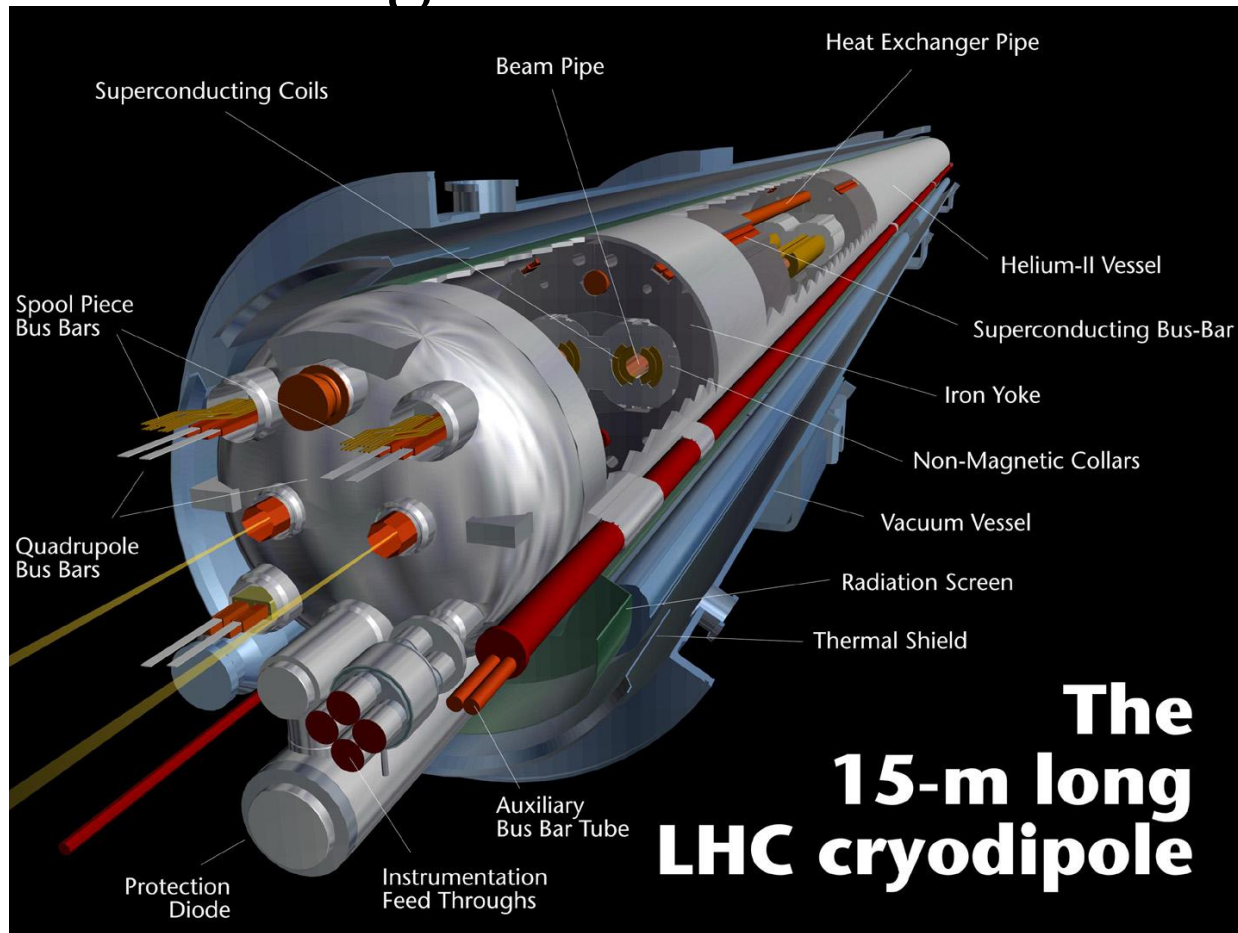


- 14.3 méter hosszú, 35 tonna
- 1232 darab, darabonként félmillió svájci frank

2011. augusztus 18.

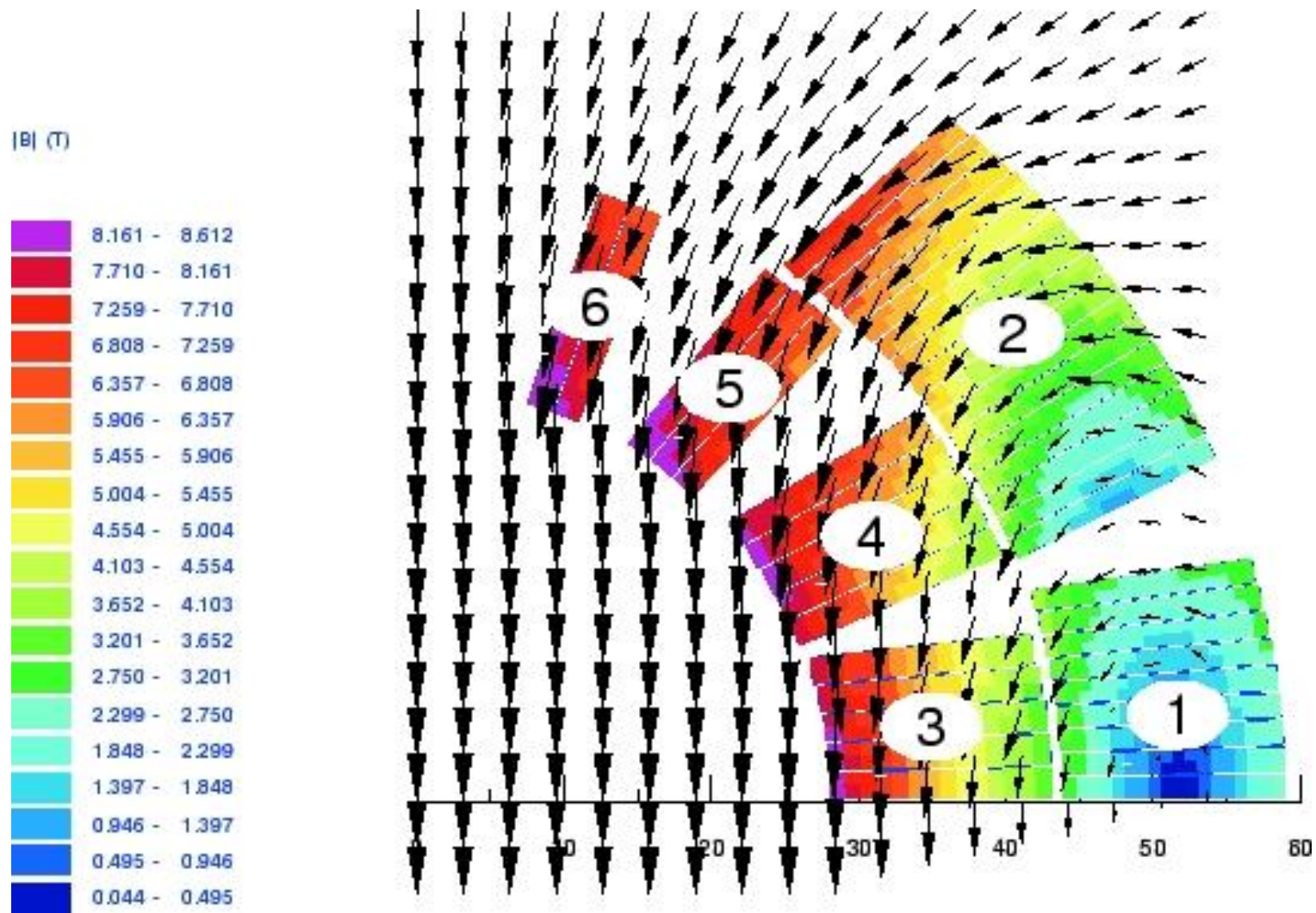
Hungarian Teacher Program, CERN

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>

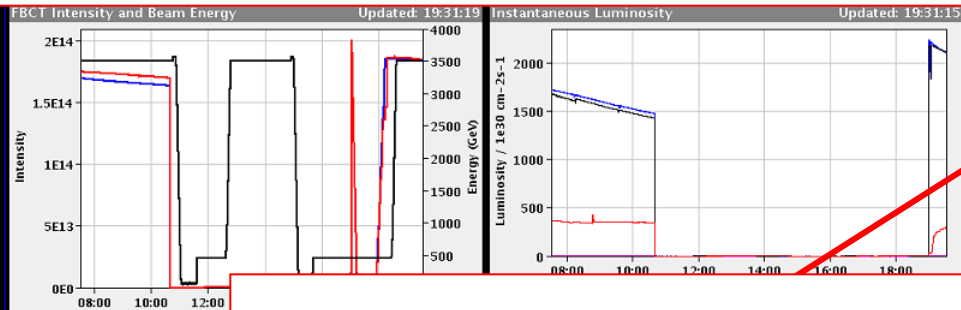
PROTON PHYSICS: INJECTION PROBE BEAM

Alacsony intenzitású tesztnyaláb belövése

PROTON PHYSICS: INJECTION PHYSICS BEAM

LHC feltöltése nagy intenzitáson

50ns_1380b+1small_1318_39_1296_144bpi



Áram (körönként): $1.85 \cdot 10^{14}$ p

Nyalábok kitöltési módja:

- csomagok távolsága 50 ns

Miért pont így töltődik fel az LHC?

AFS: 50ns_1380b+1small_1318_39_1296_144bpi

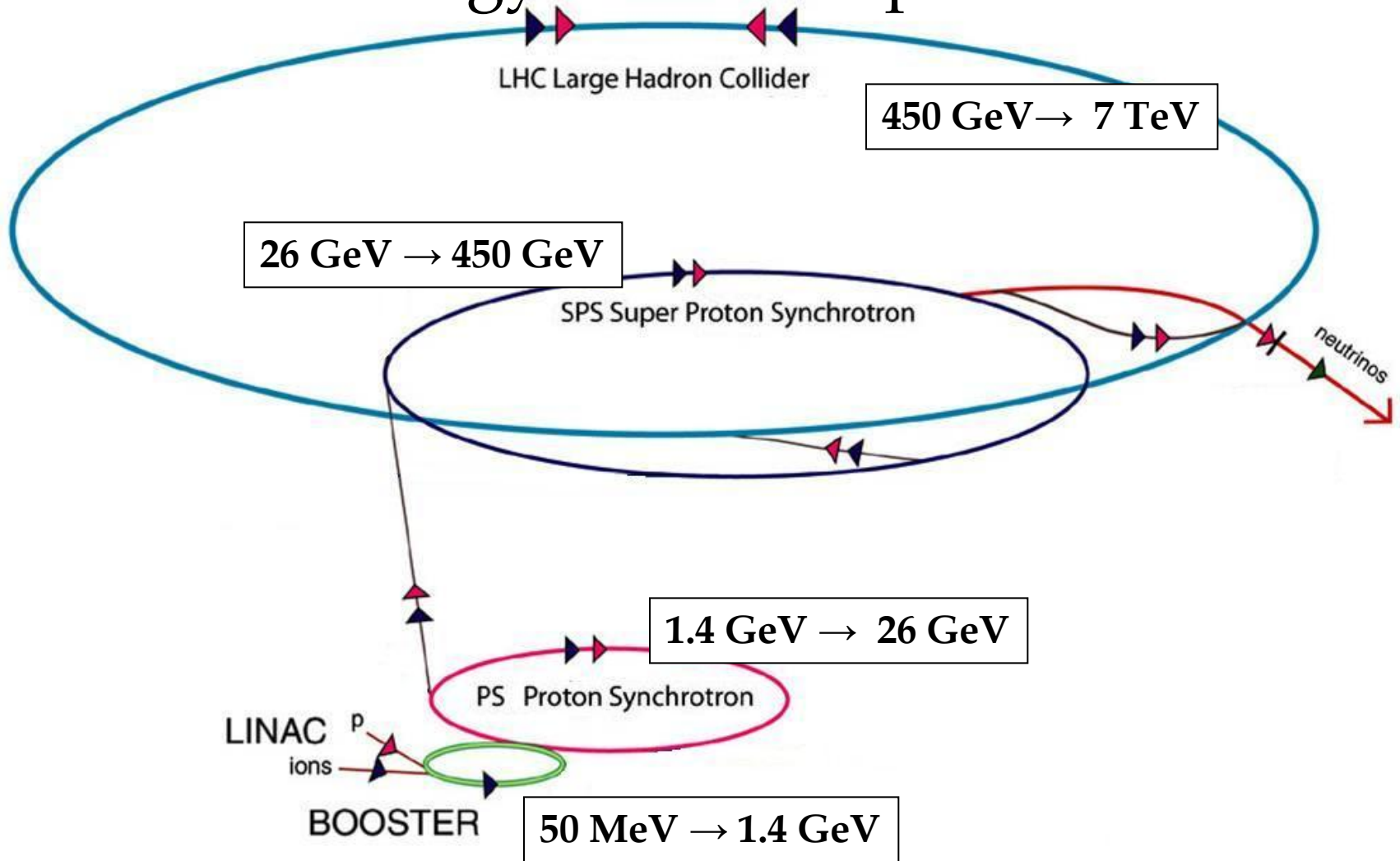
hát $13.4 \cdot 10^{10}$ p

CMS-ben

csomag, tehát

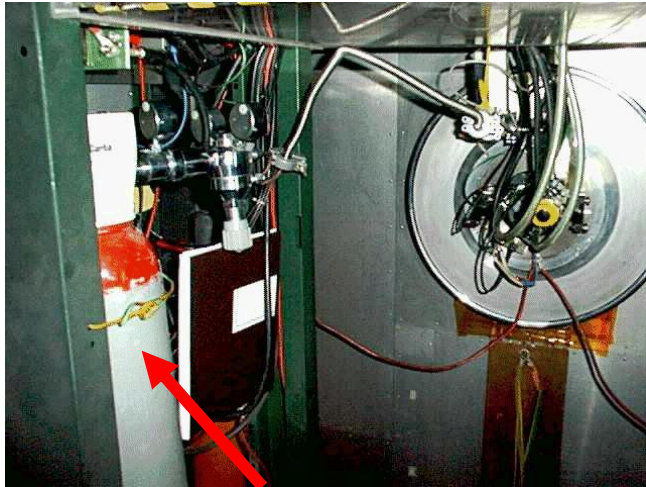
$1930 \cdot 10^{10}$ p került betöltésre

Az LHC gyorsító-komplexuma



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

A Linac 2 proton forrás



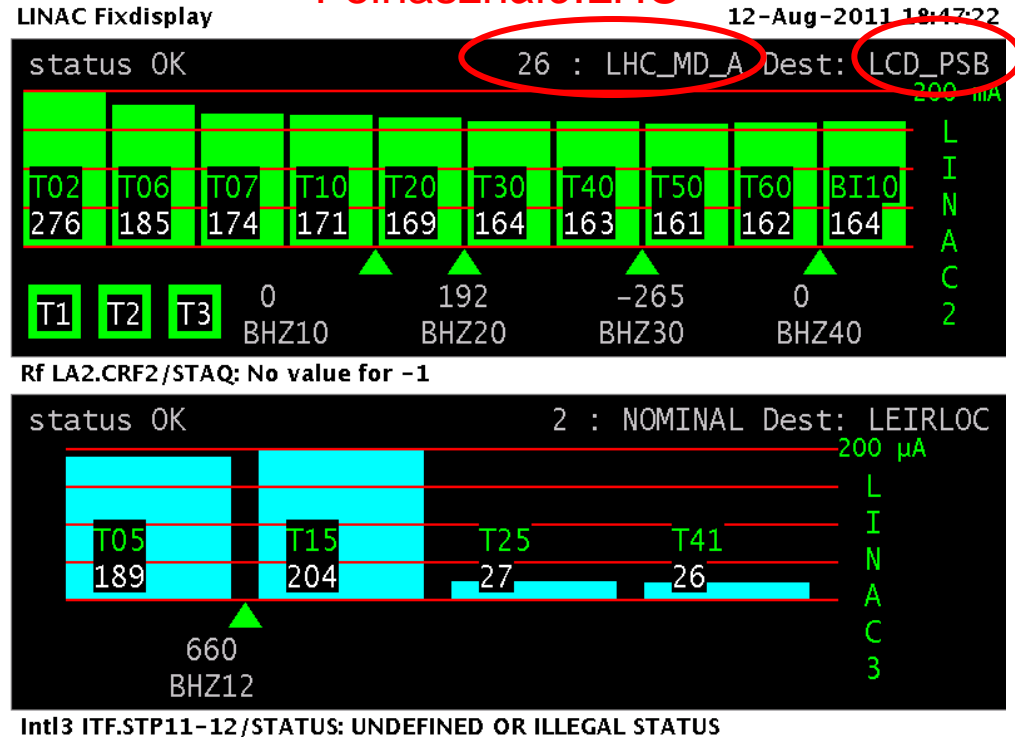
Proton forrás



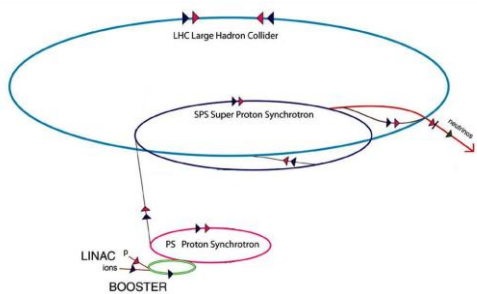
Linac 2

2011. augusztus 18.

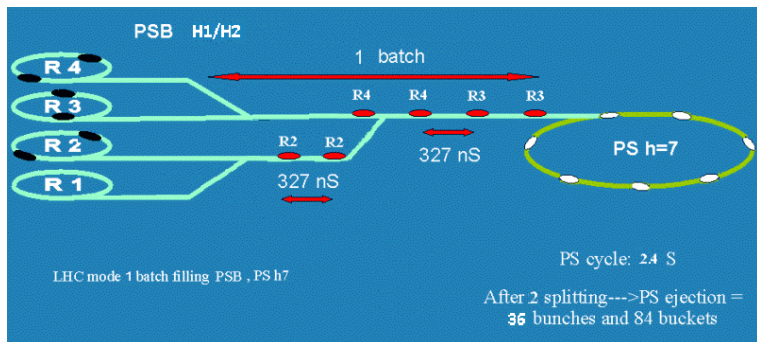
Felhasználó:LHC Célállomás:PSB



- 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

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

• A PS Booster 4 gyűrűből áll

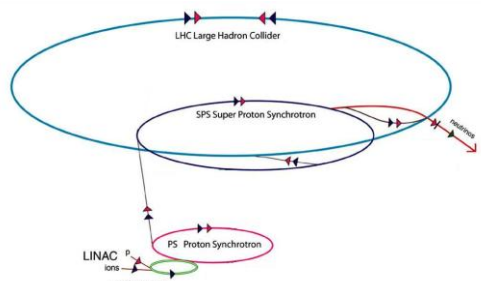
• Gyűrűként két csomag vonható ki két lépésben

• A protonok energiája 1.4 GeV

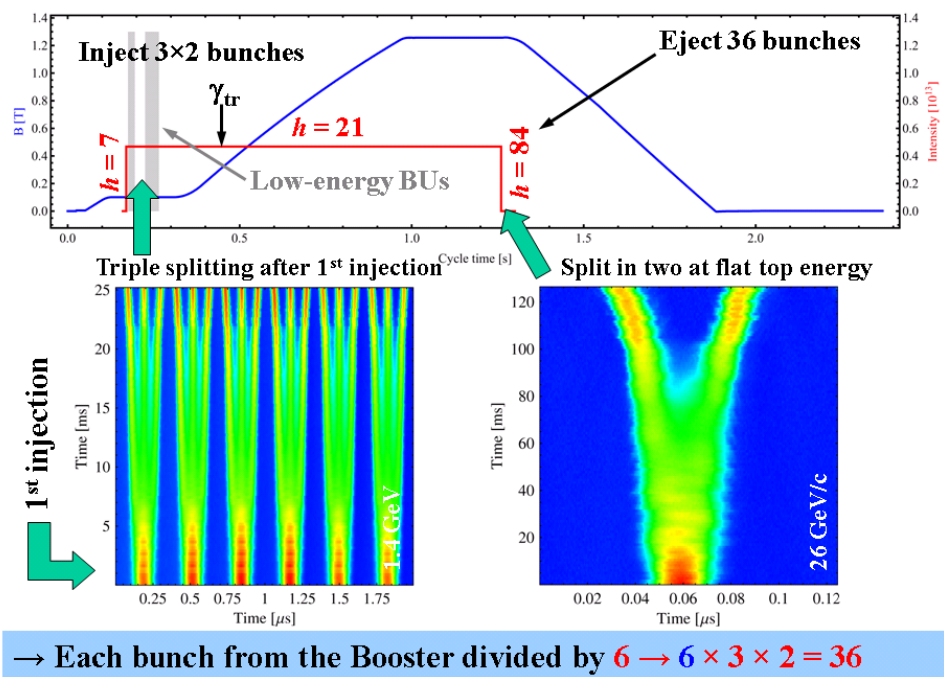
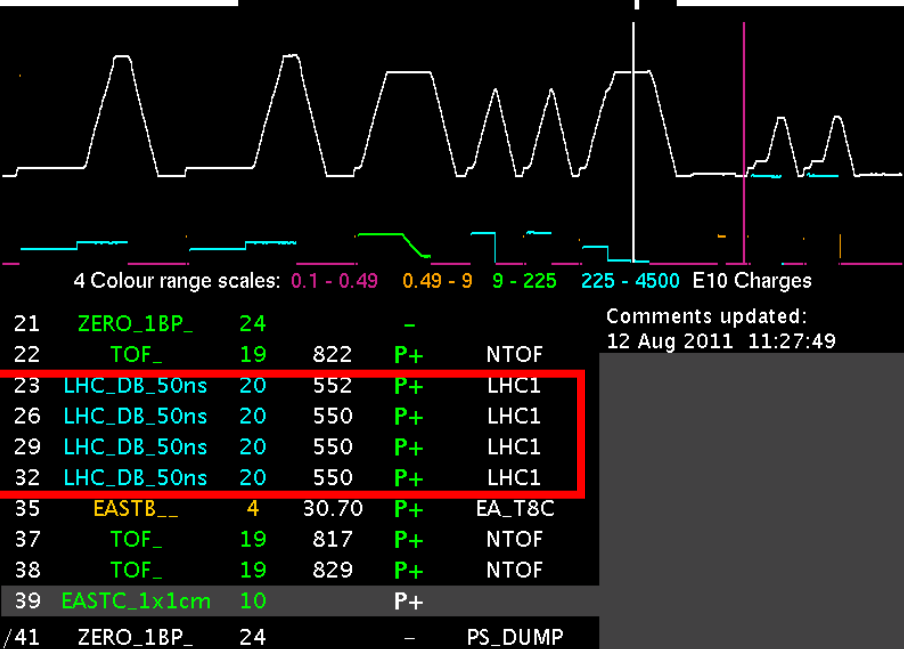
• Látható, hogy a PS Booster 4+2 gyűrűjéből továbbítódik 6 csomagban kb. $550 \cdot 10^{10}$ proton ($371+187$) a PS-be

• Összesen 4 ilyen adag van, tehát 24 csomagban kb. $2200 \cdot 10^{10}$ proton távozik nagyjából egy időben

A Proton Synchrotron

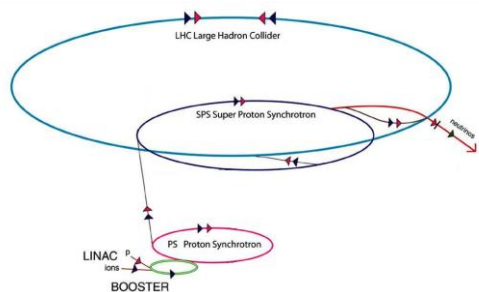


CPS Tel:76677-W 32 12 Aug 11 18:37:48



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

Super Proton Synchrotron



SPS-PAGE1 Current user: SFTLONG2 12-08-11 18:37:55
 SC 43066 (41BP, 49.2s) FT: 9690 ms Last update: 4 seconds ago

Target	I/E11	MUL	%SYM	Experiment
T2	69.1	8	90 a	H2/H4
T4	19.2	9	95 a	H6/H8
T6	258.0	9	92 a	COMPASS
T10	0.0	0	0	

CNGS T40.1	198 E11	OK (0)	Comments (12-08-11 14:51)	
CNGS T40.2	198 E11	OK (0)	Phone: 77500 or 70475	
LHC	1880 E10	Dest: T18-R2		
User	Injected	Flat Top		
LHC1	2140 E10	1930 E10		

LARGER_4 User: LHC1 12-Aug-2011 18:38:00
 LHC1 (25ns) Last update: 10 seconds ago

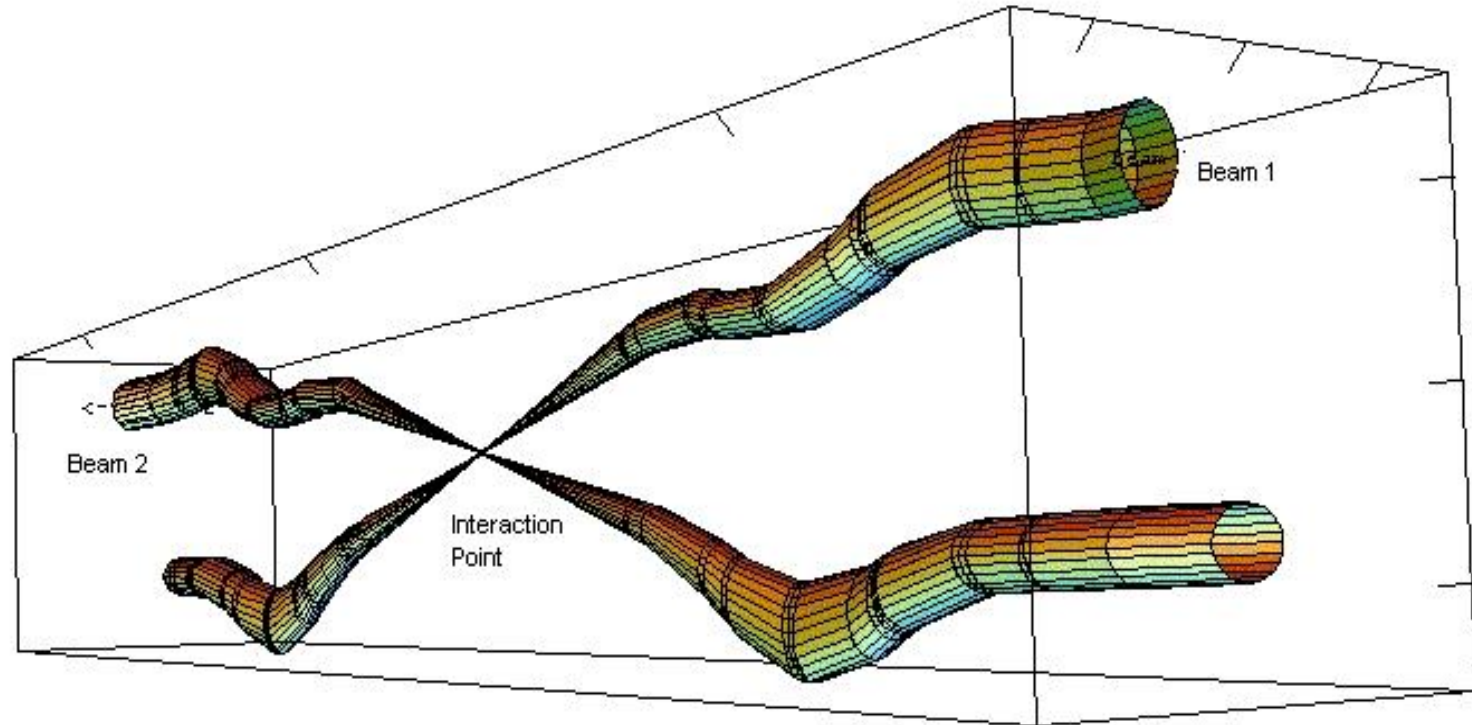
TT2	TT10	%LOSS	INJ	%LOSS
607	542	10.8	545	0.0
602	544	9.6	548	0.0
607	542	10.7	540	0.4
611	541	11.5	537	0.7

	I/E10	%LOSS	%TRNS	TIME/ms
INJECT	2140	0.0	100.0	10820
END_FB	2138	0.1	98.6	10860
62 GeV/c	2098	1.9	96.7	12742
172 GeV/c	2093	0.2	96.5	14625
319 GeV/c	2096	0.0	96.6	16508
451 GeV/c	1930	7.9	88.9	18390

SC: 43065 LOSS @ FB: 1.4%

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

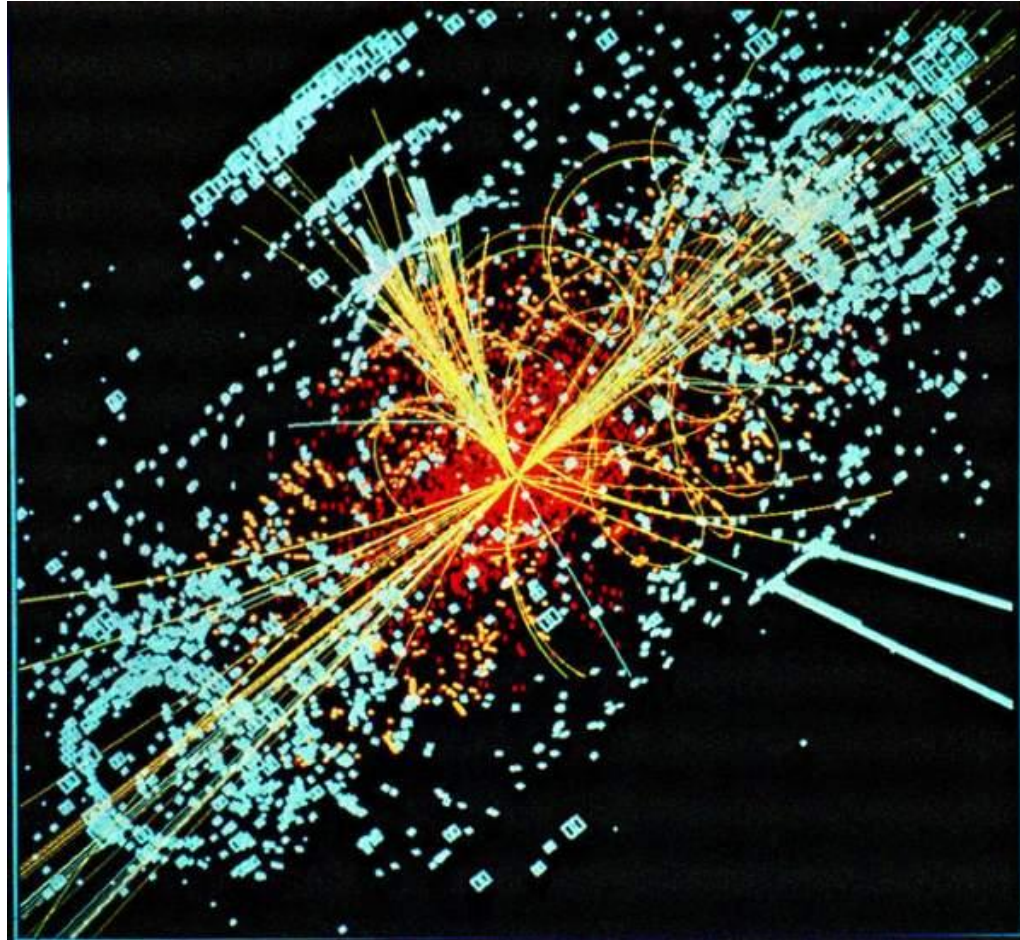
Nyalábok keresztezése



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

- Vékony nyalábbb, 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

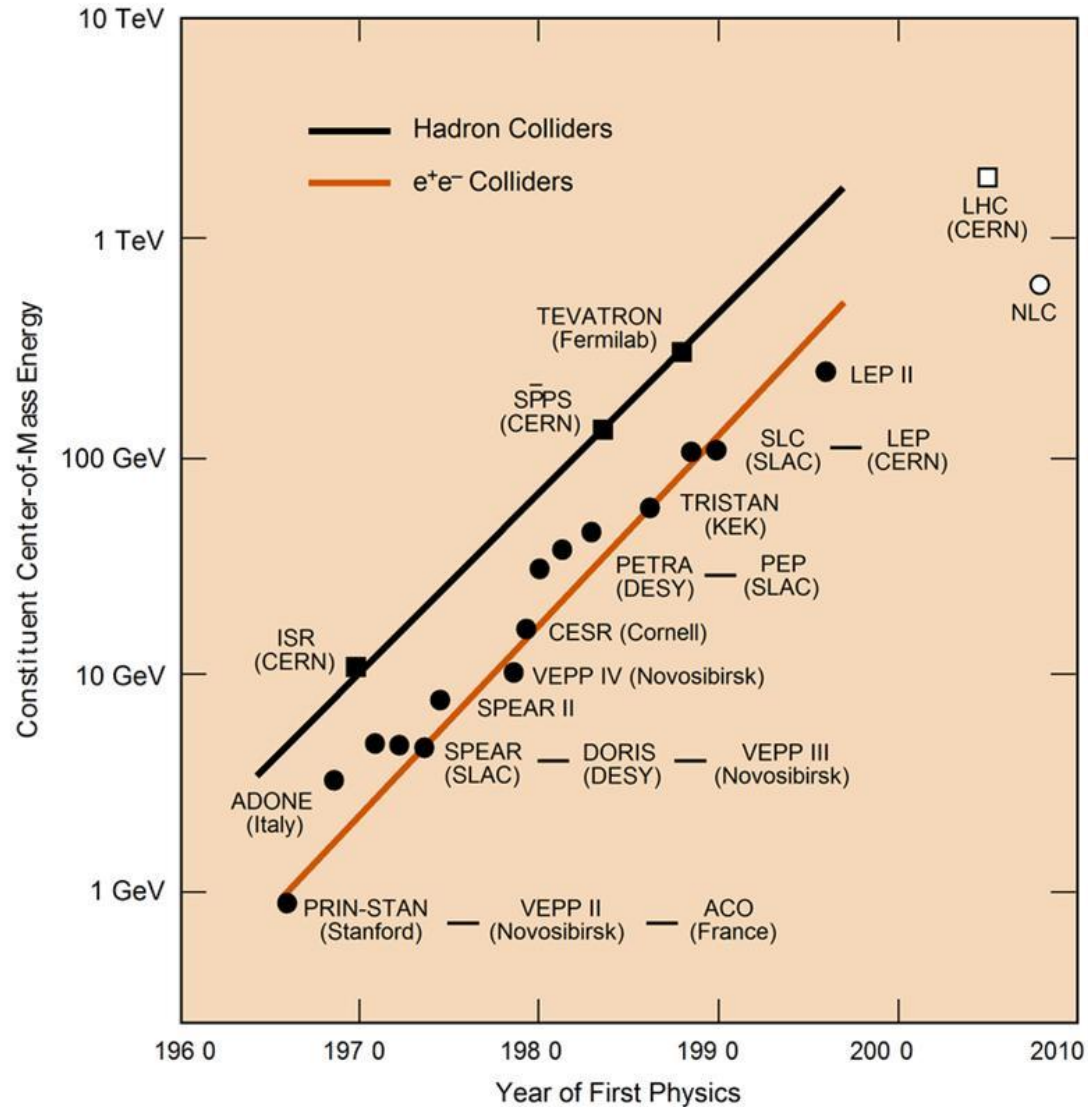
Egy „esemény” képe



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



Gyorsító 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 $\vec{B}(R)$ homogén mágneses téré lenne (Wideröe után)
- Az ötletet Kerst tette működőképpé (1940) meghatározva a stabil pályához szükséges $B(r)$ alakját

