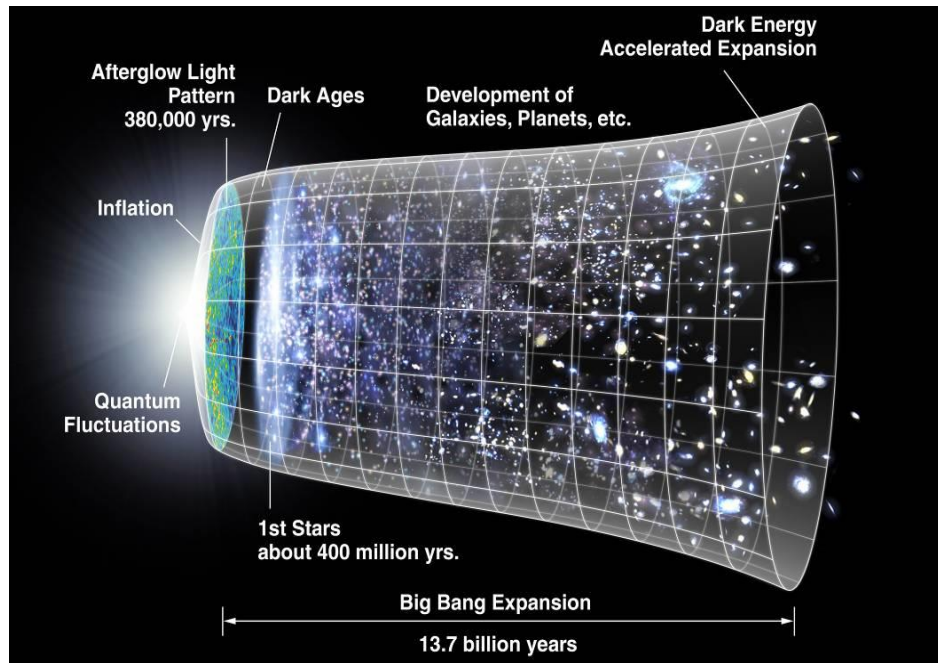


# Gyorsítók

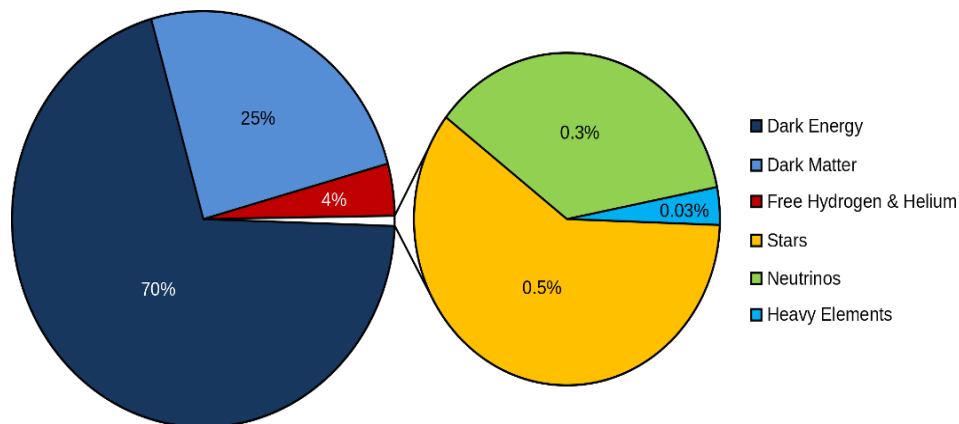
Veszprémi Viktor  
Wigner Fizikai Kutatóközpont

OTKA NK81447

# A részecskefizika alapkérdései



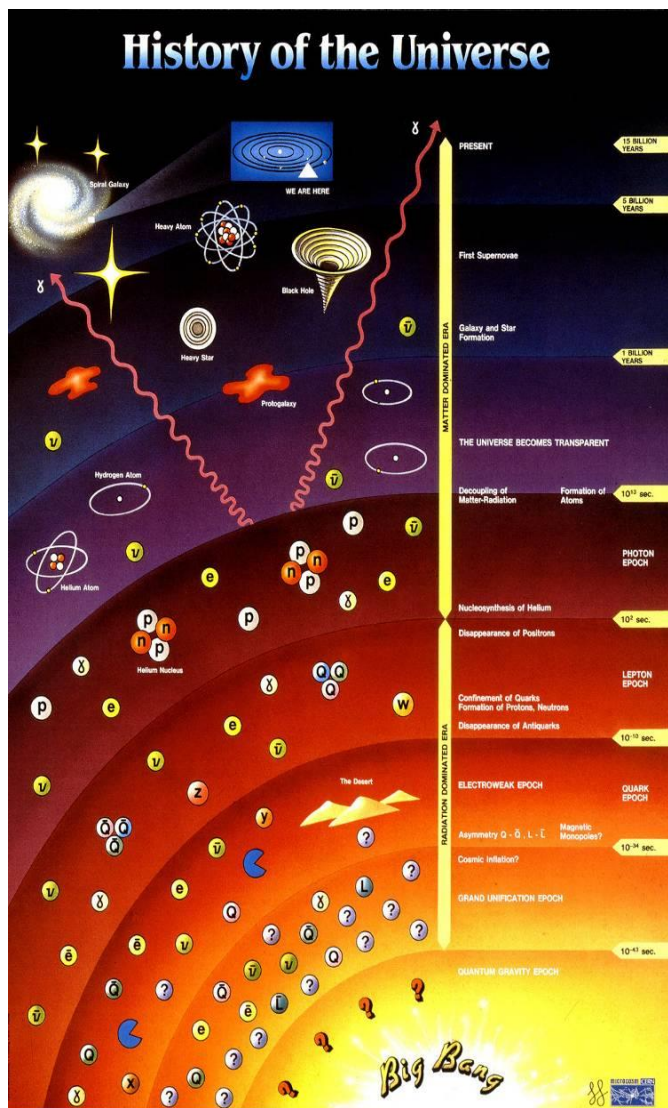
- Hogyan alakult ki a Világegyetem?
- Miből áll? Mi tartja össze?
- Minden alkotóelemről számot tudunk adni?



Az ismert, megfigyelhető anyag a VE ~5%-át alkotja

**A maradék 95% eredete nem ismert!**

# Hogyan alakult ki?



- Az Univerzum korábbi állapotában
  - Kisebbs méret -- nagyobb hőmérséklet
  - Más-más jellemző fizikai törvények
- A tágulás során az anyag „kifagyott”
  - Új struktúra jelent meg, újfajta fizikai tulajdonságokkal



# Miből áll, mi tartja össze?

szilárdtest,  
folyadék

EM, gravitáció

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

molekula

Elektromágneses

atom

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

atommag

Erős maradék,  
gyenge

Rövidebb távolság feloldásához  
több energiát kell egy pontba  
összpontosítanunk

hadron, mezon

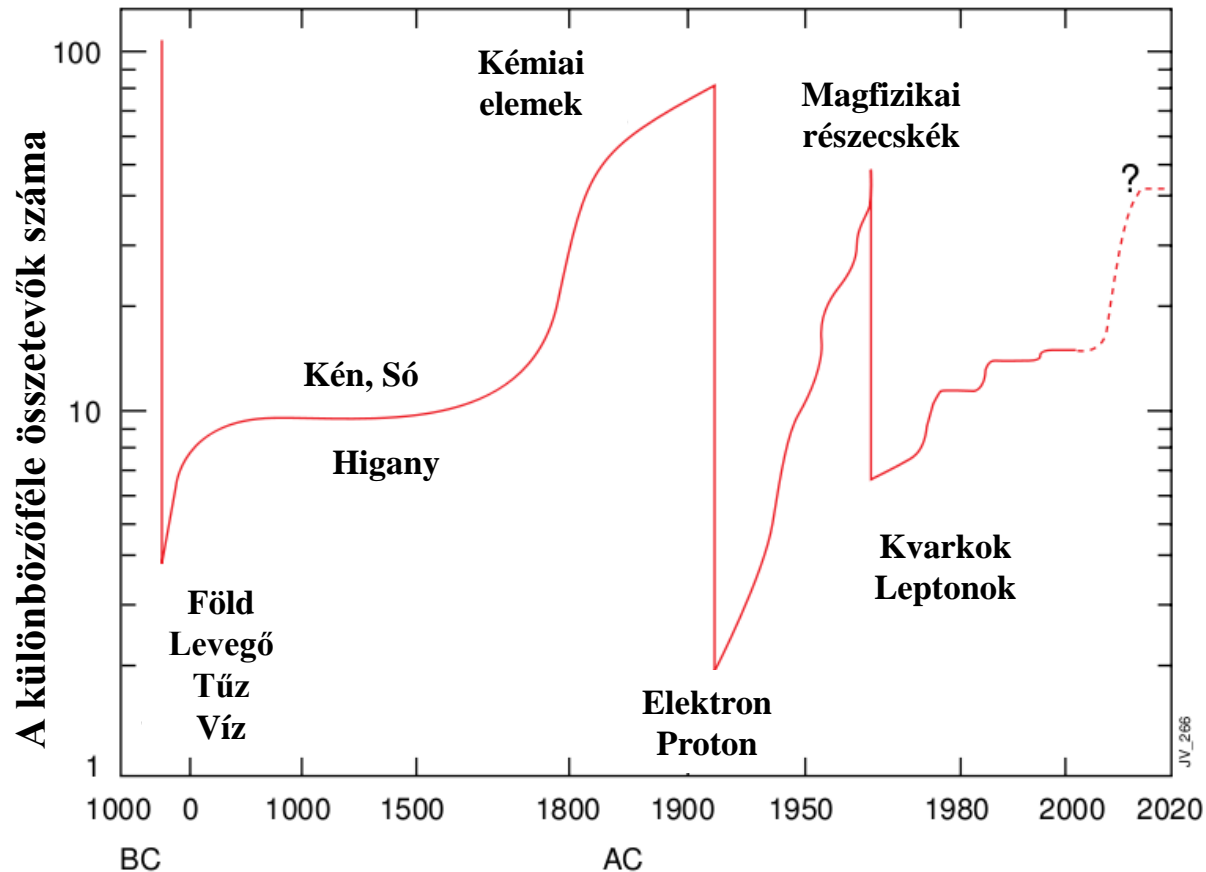
Erős

Részecskefizika

kvark, lepton

Erős, gyenge, elektromágneses

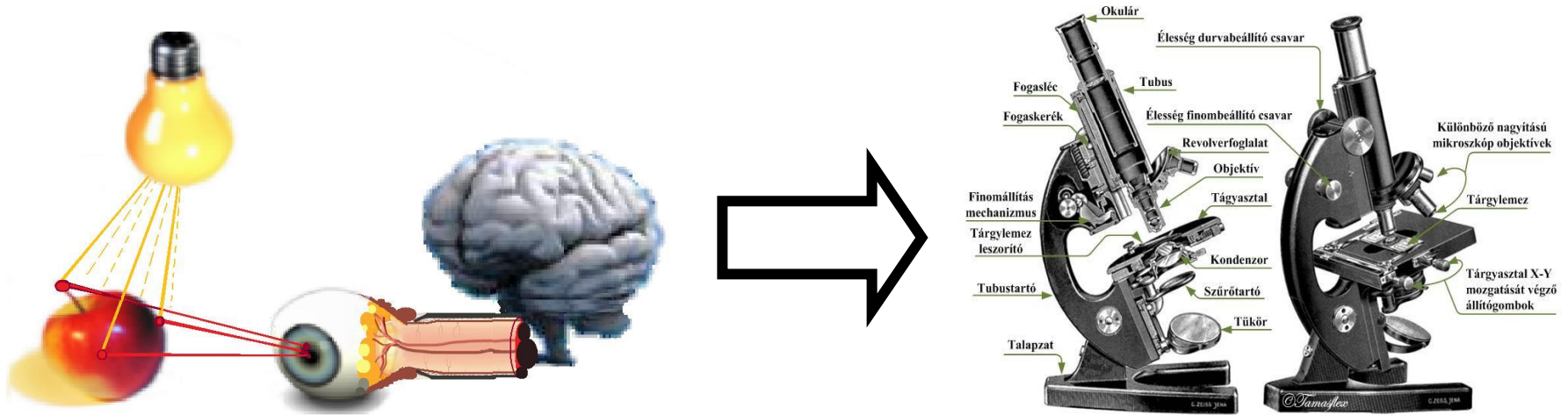
# Hányféle alkotóelemből áll?



**Az anyag vizsgálatának technikai lehetőségei időben fejlődnek**

# Makroszkopikus tárgyak vizsgálata

- Kölcsön kell velük hatnunk, például világítsuk meg őket:



- A megismerés kezdeti módszere az elektromágneses kölcsönhatás
- Látható fény felbontása mikroszkópban  $\sim 1$  mikron. Ez a látható fény hullámhosszától függ, amit annak energiája egyértelműen meghatároz

# Nagyobb felbontás kisebb hullámhosszal

- A részecskék hullám tulajdonsága, De Broglie - egyenlet:

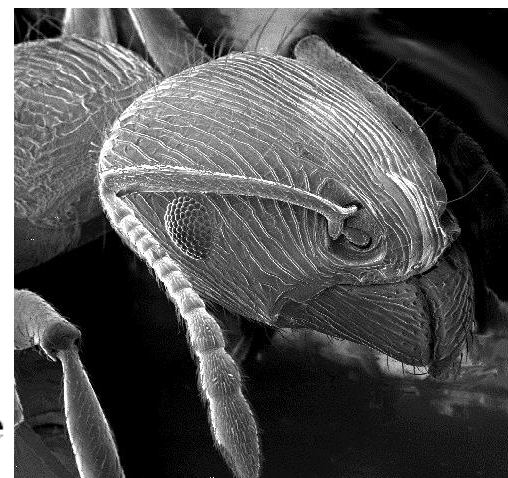
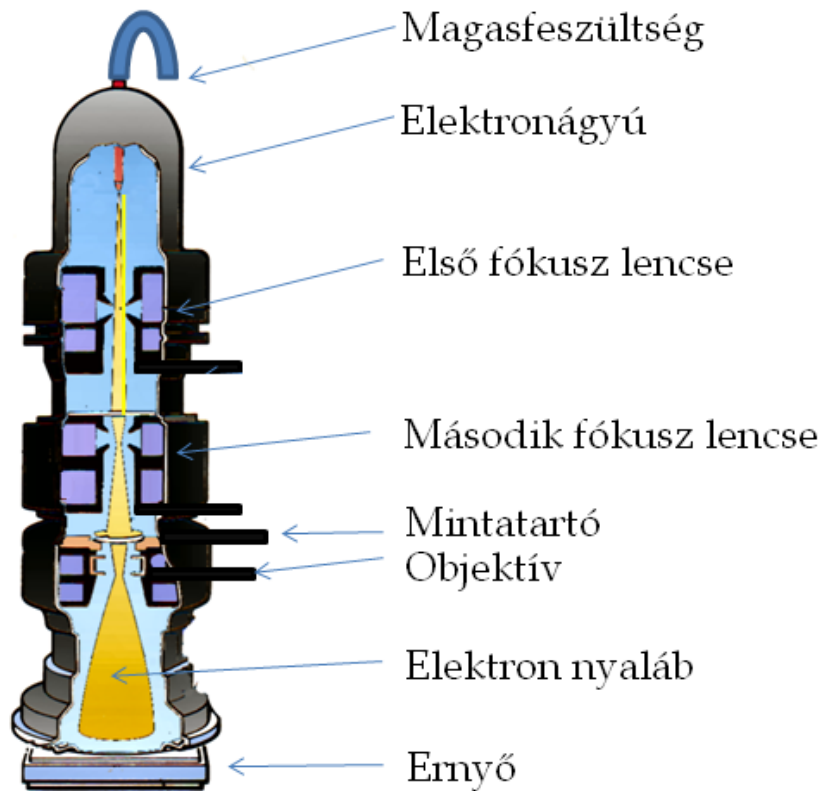
$$\lambda = \frac{hc}{pc} \quad \text{és} \quad pc \approx \sqrt{2 \cdot KE \cdot m_0 c^2}$$

ahol  $hc = 1239,8 \text{ eV nm}$

(1 eV = egy elektron potenciális energiája 1 V feszültségen)

- Nyugalmi tömeggel rendelkező részecskék hullámhossza rövidebb!
- Egy 40.000 eV **kinetikus energiájú (KE)** de 511.000 eV **nyugalmi tömegű ( $m_0 c^2$ )** elektron De Broglie hullámhossza  $\sim 0,004 \text{ nm}$ !

# Az elektronmikroszkóp



Hangyafej, forrás: Wikipedia

## Pásztázó mikroszkóp

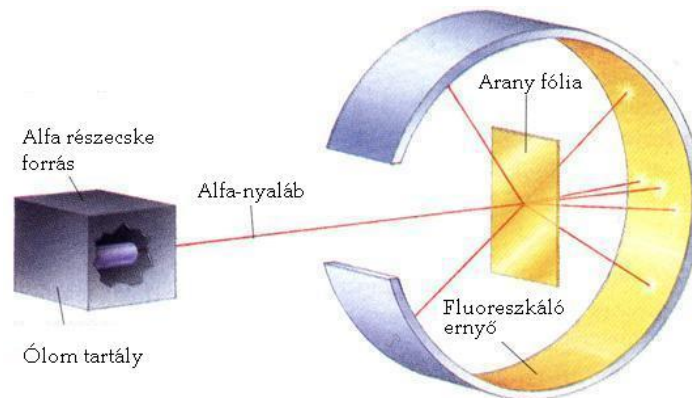
- ~40 keV kinetikus energia
- ~0,1 nm felbontás (leginkább a lencsék miatt)
- **Kb. atomi méret!**

Transzmissziós  
elektronmikroszkóp a Wigner FK-  
ban  
2013. augusztus 12.

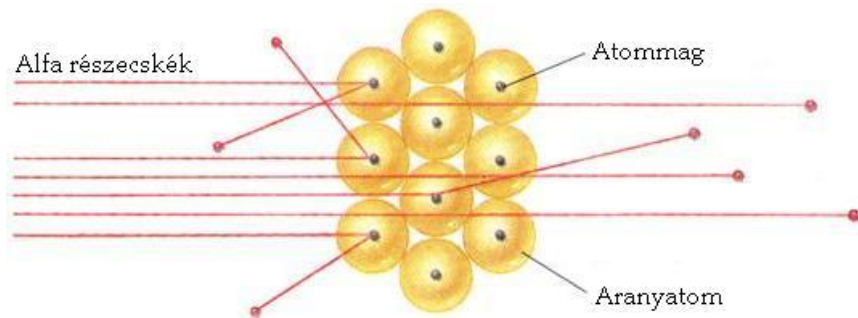


# „Képzalkotás” az atomfizikában

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



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

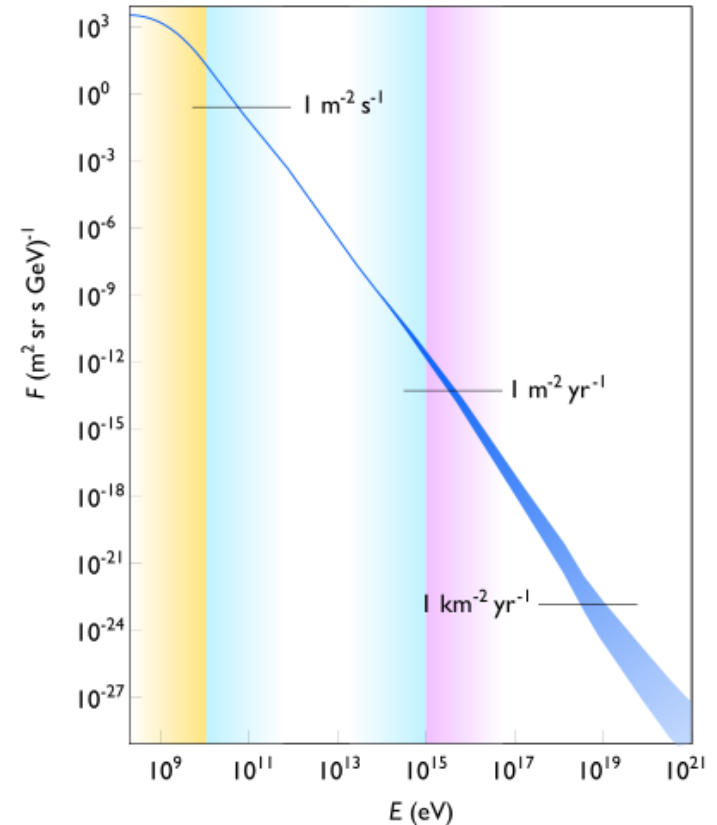


- Ha a fólia homogén lenne, az alfa részecskék csak előre szóródnának
- Sajnos a szóró részecskék tömege azonban tovább nem növelhető!

Növeljük a kinetikus energiát!

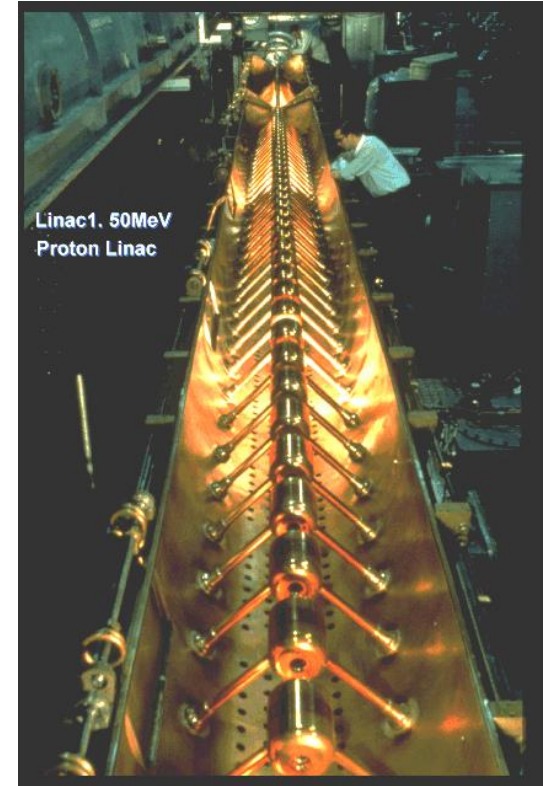
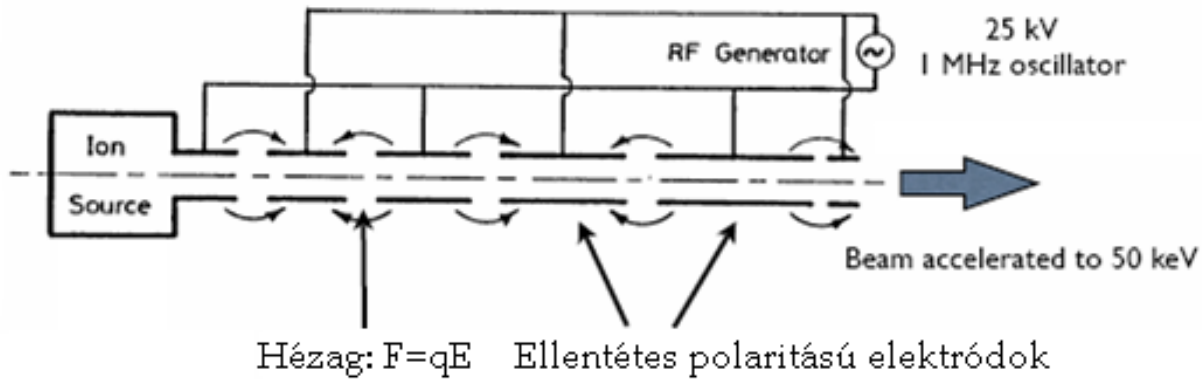
# A természet nagyenergiás sugárzó forrásai

- 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:

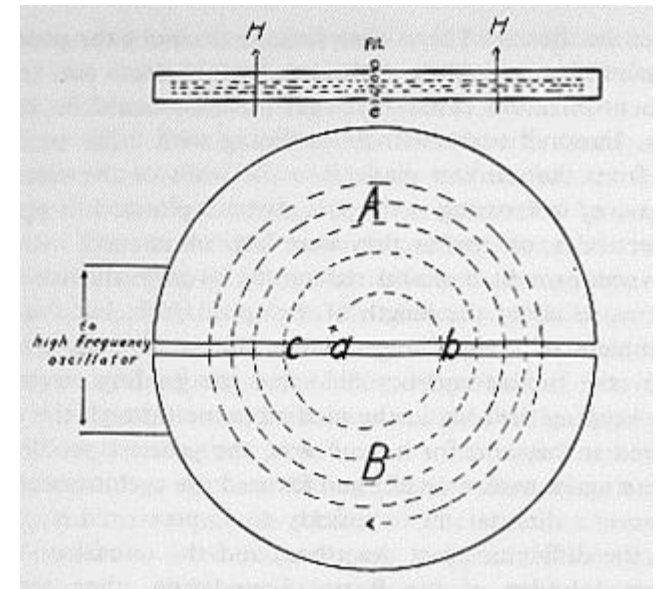
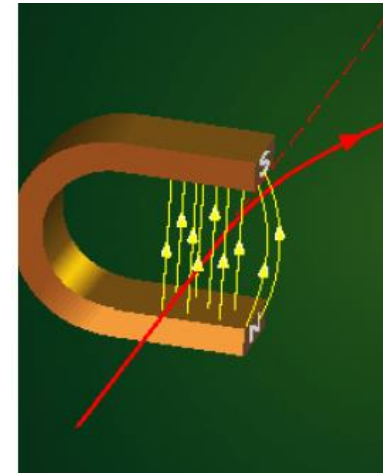
$$F_r = m \frac{v^2}{r}, \quad F_B = qvB$$

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!

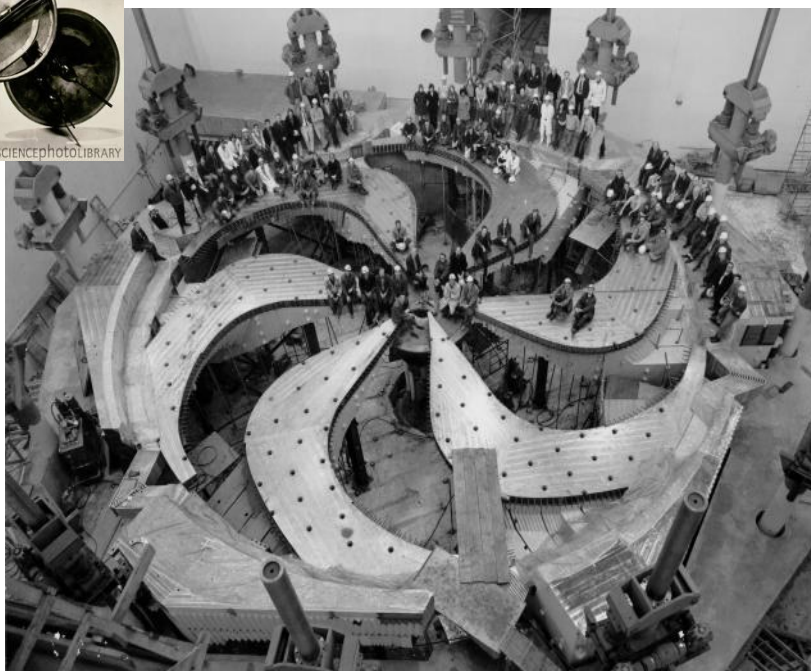
- Gyorsítás a két „D” közötti hézagban
  - Az elektromos tér váltakozásának frekvenciája konstans
  - Phys. Rev. 40, **19** (1932)



Az első  
ciklotron



# Ciklotron és egyéb gyorsítók



500 MeV proton ciklotron  
(legnagyobb méretű)  
TRIUMF, Kanada

1 TeV Tevatron, Fermilab, USA

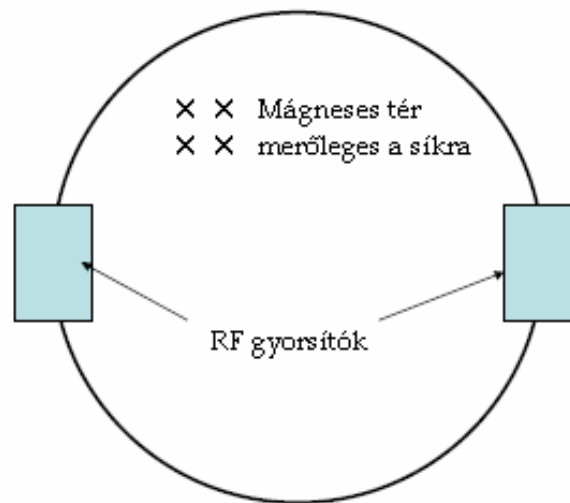


# A ciklotronok korlátai

- 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  $\sim 10$  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.

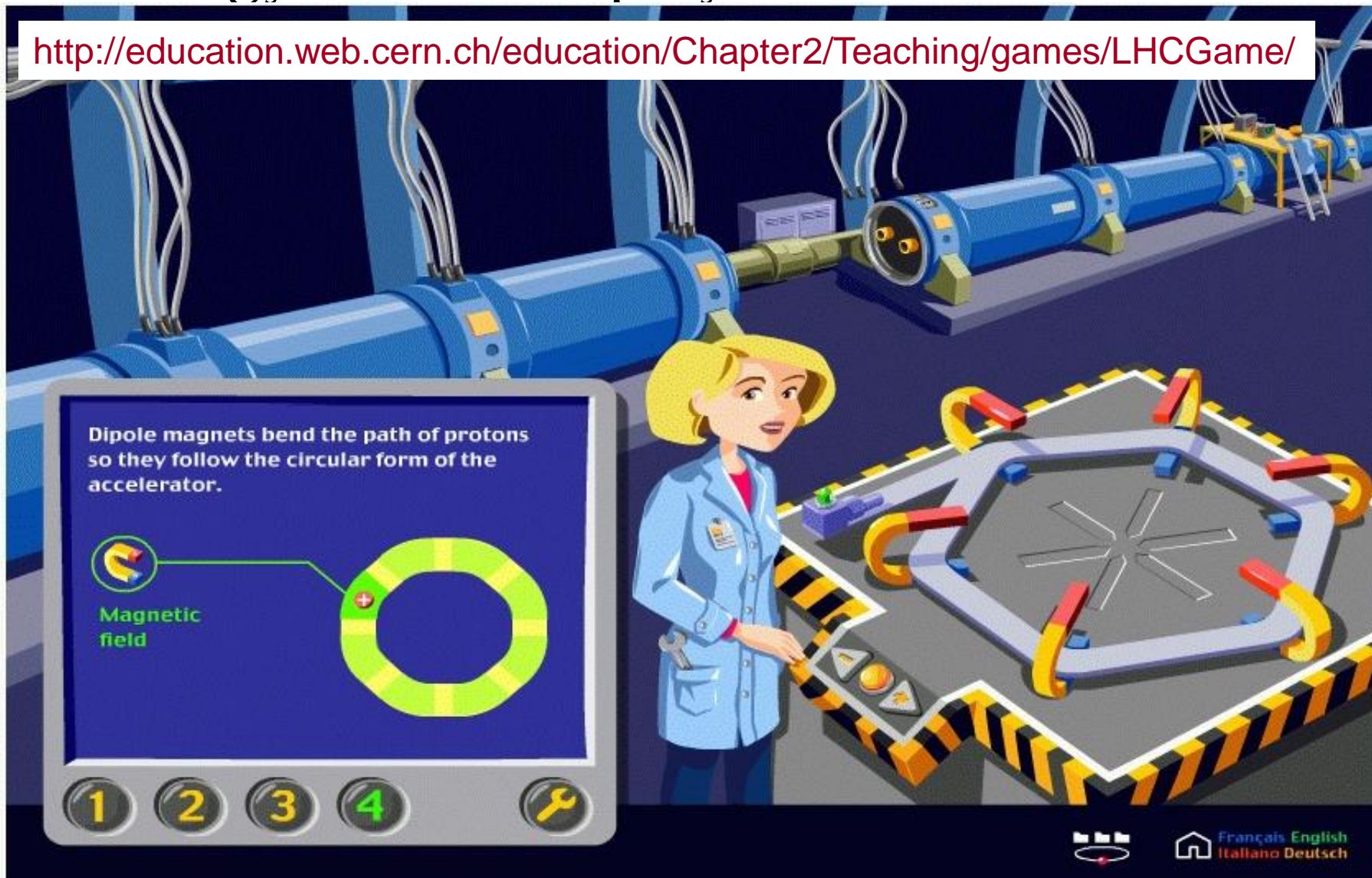


$$mc^2 = \frac{qBc^2}{\omega}$$

- 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 tartjuk pályán a részecskéket?

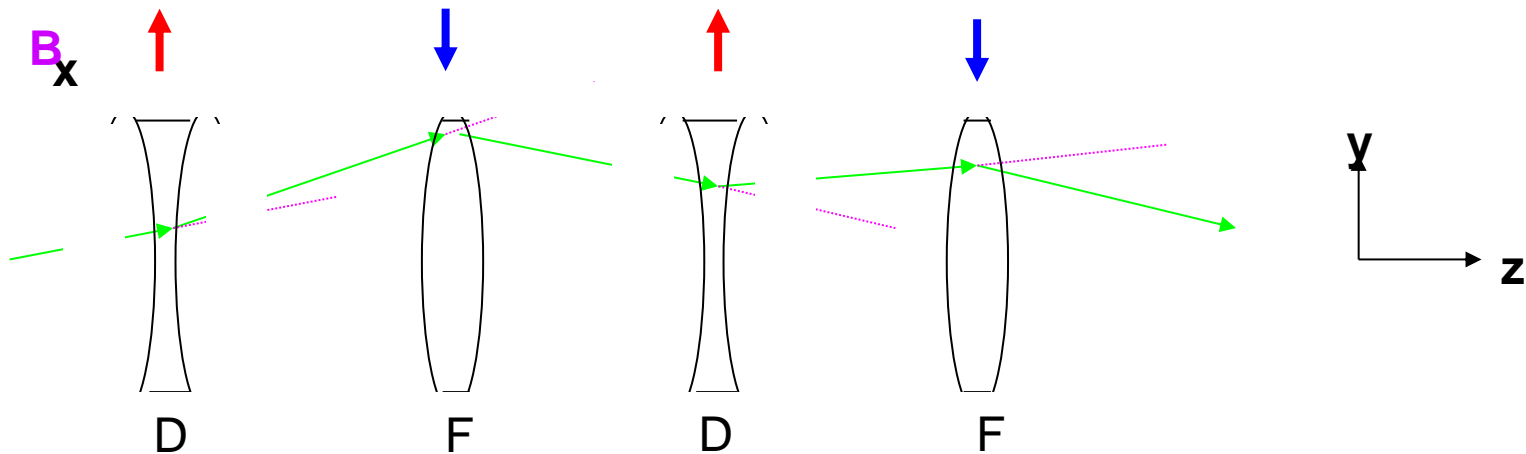
<http://education.web.cern.ch/education/Chapter2/Teaching/games/LHCGame/>





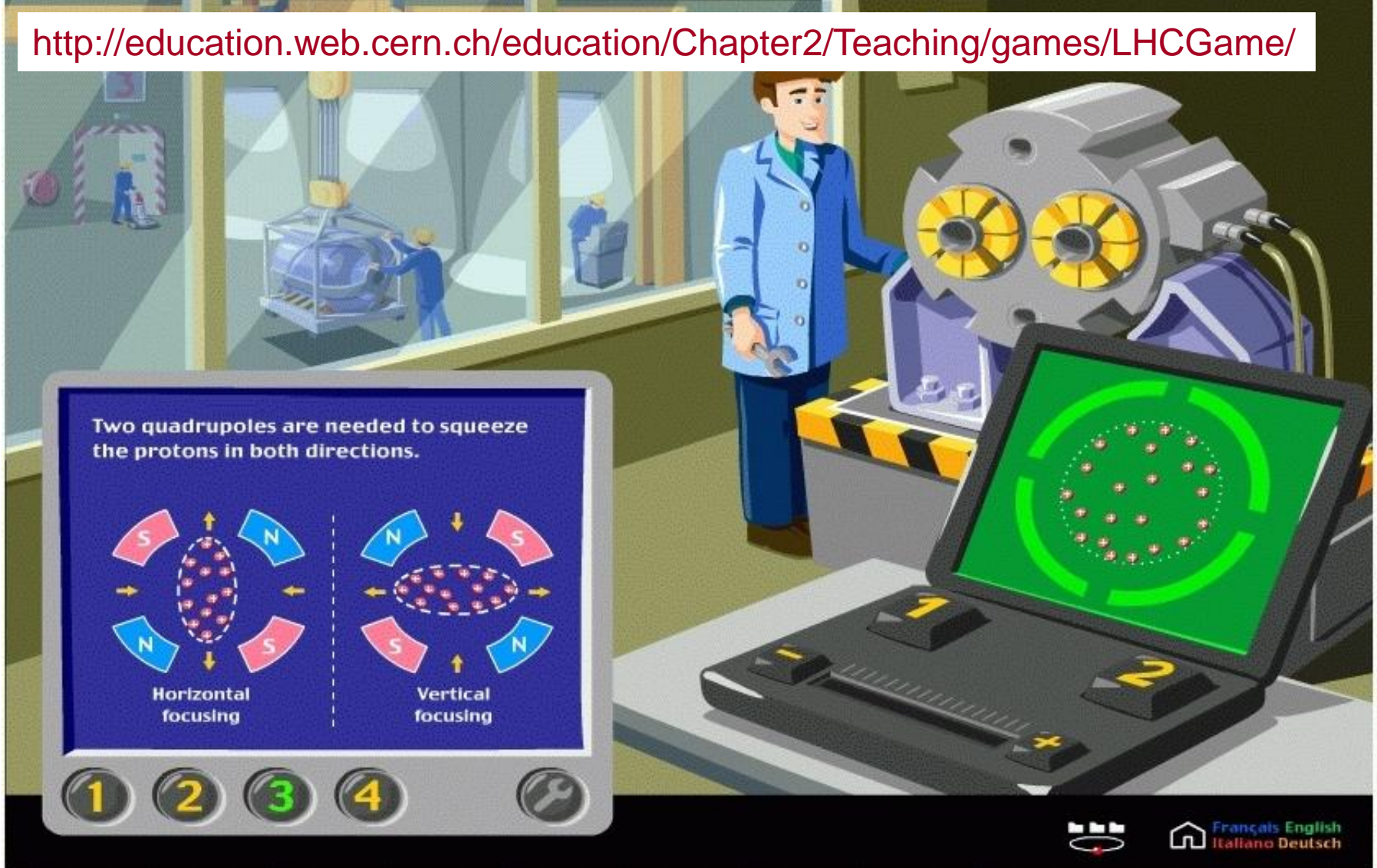
# Részecske-nyaláb instabilitásai

- 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

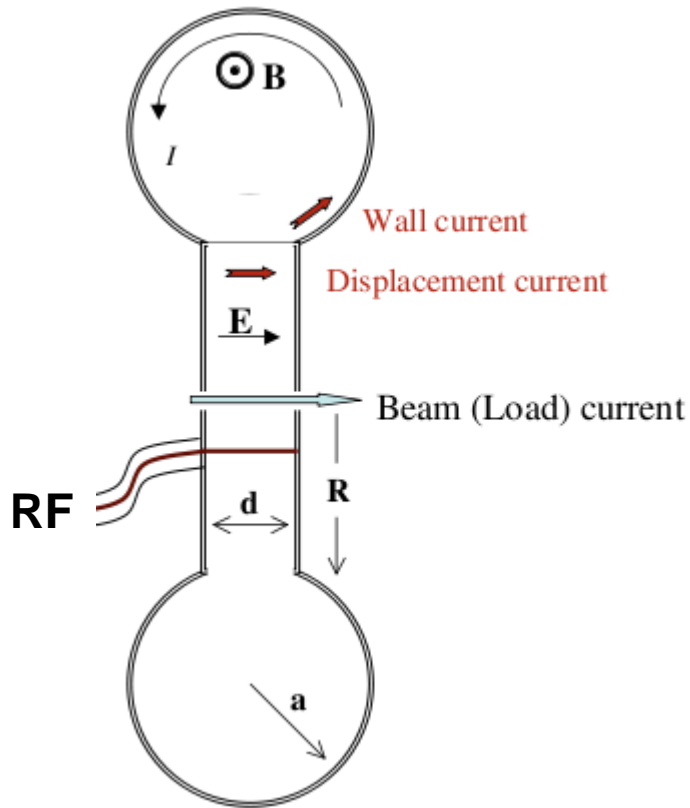


# Fókuszálás kvadрупól mágnessel

<http://education.web.cern.ch/education/Chapter2/Teaching/games/LHCGame/>

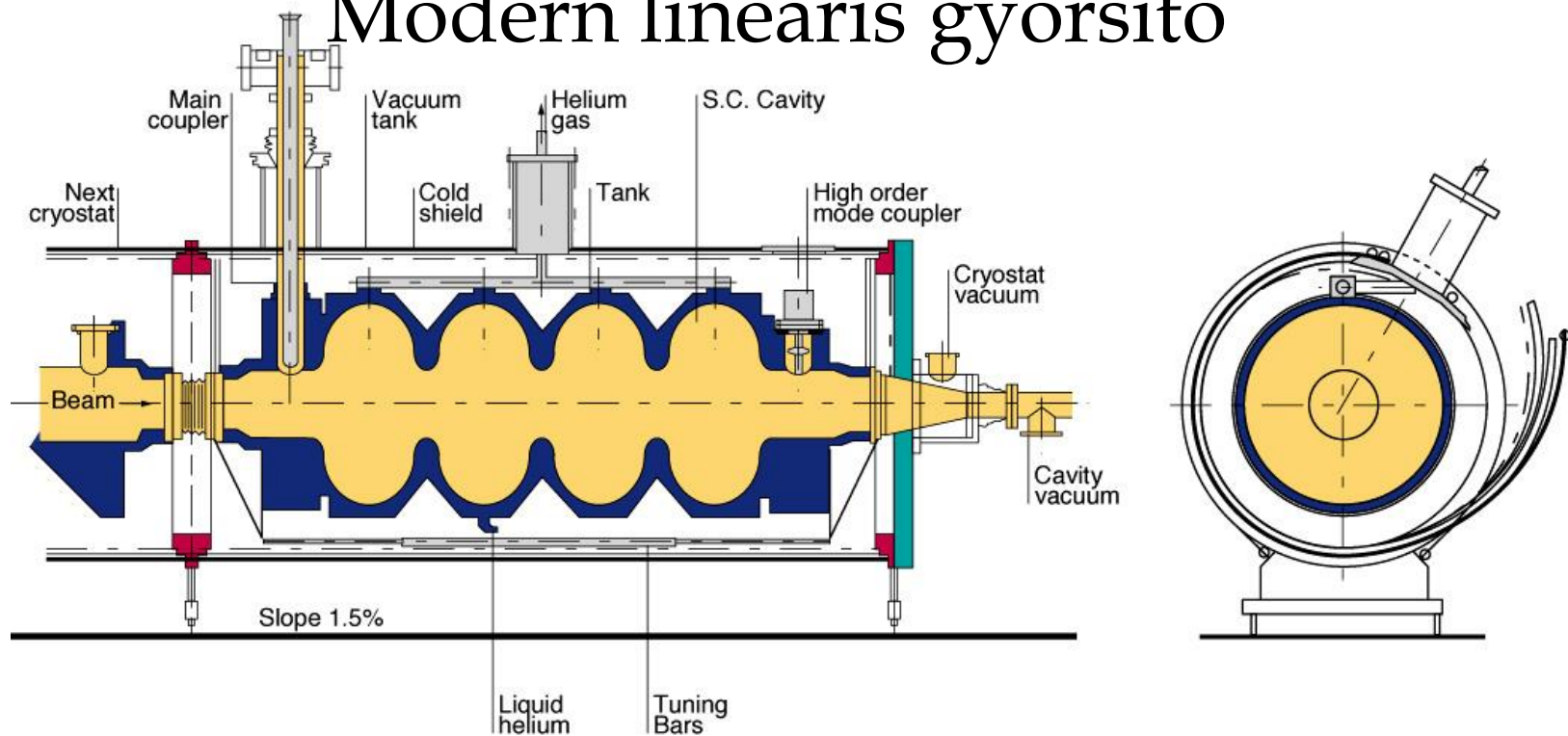


# RF gyorsítók: üregrezonátor



- 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

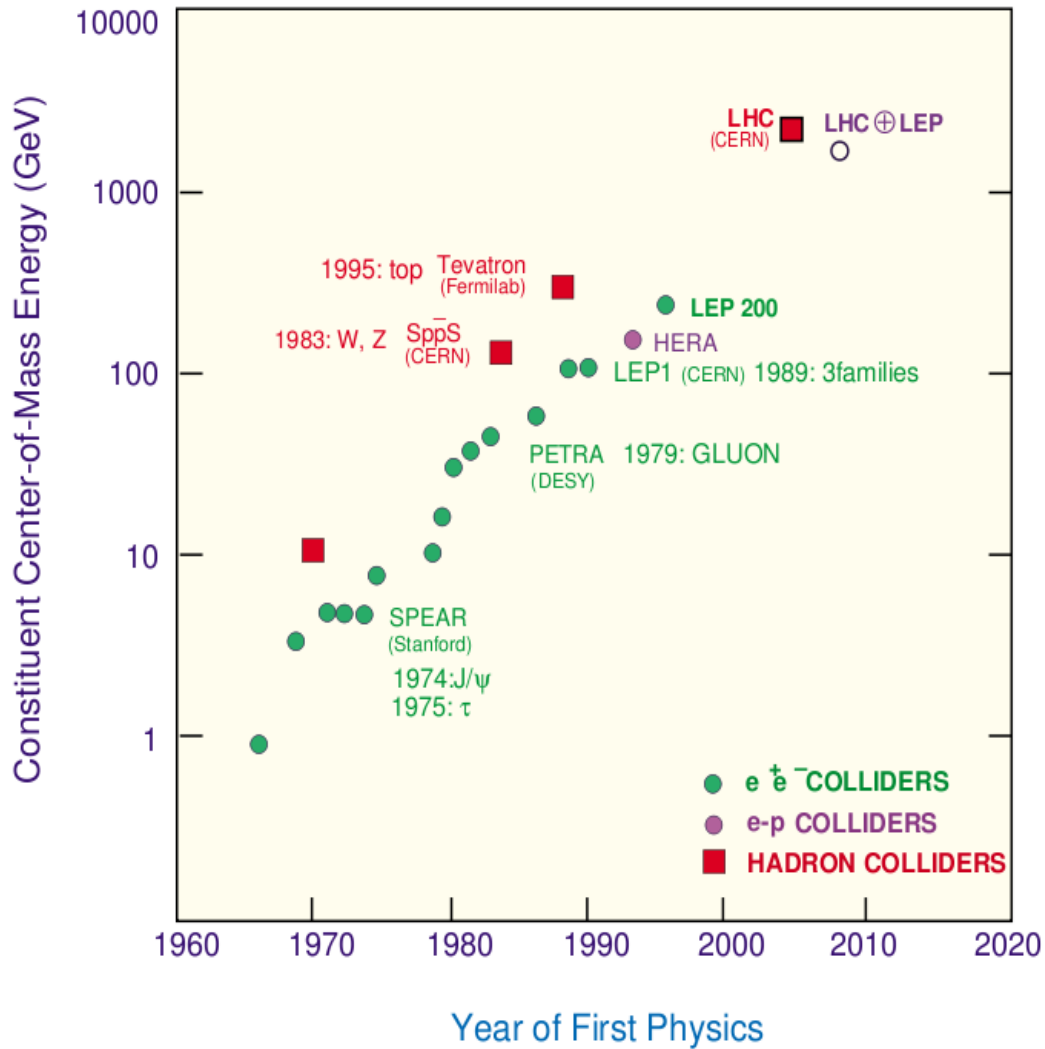
C 510

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

# Összefoglalva: részecskegyorsítók kellékei

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

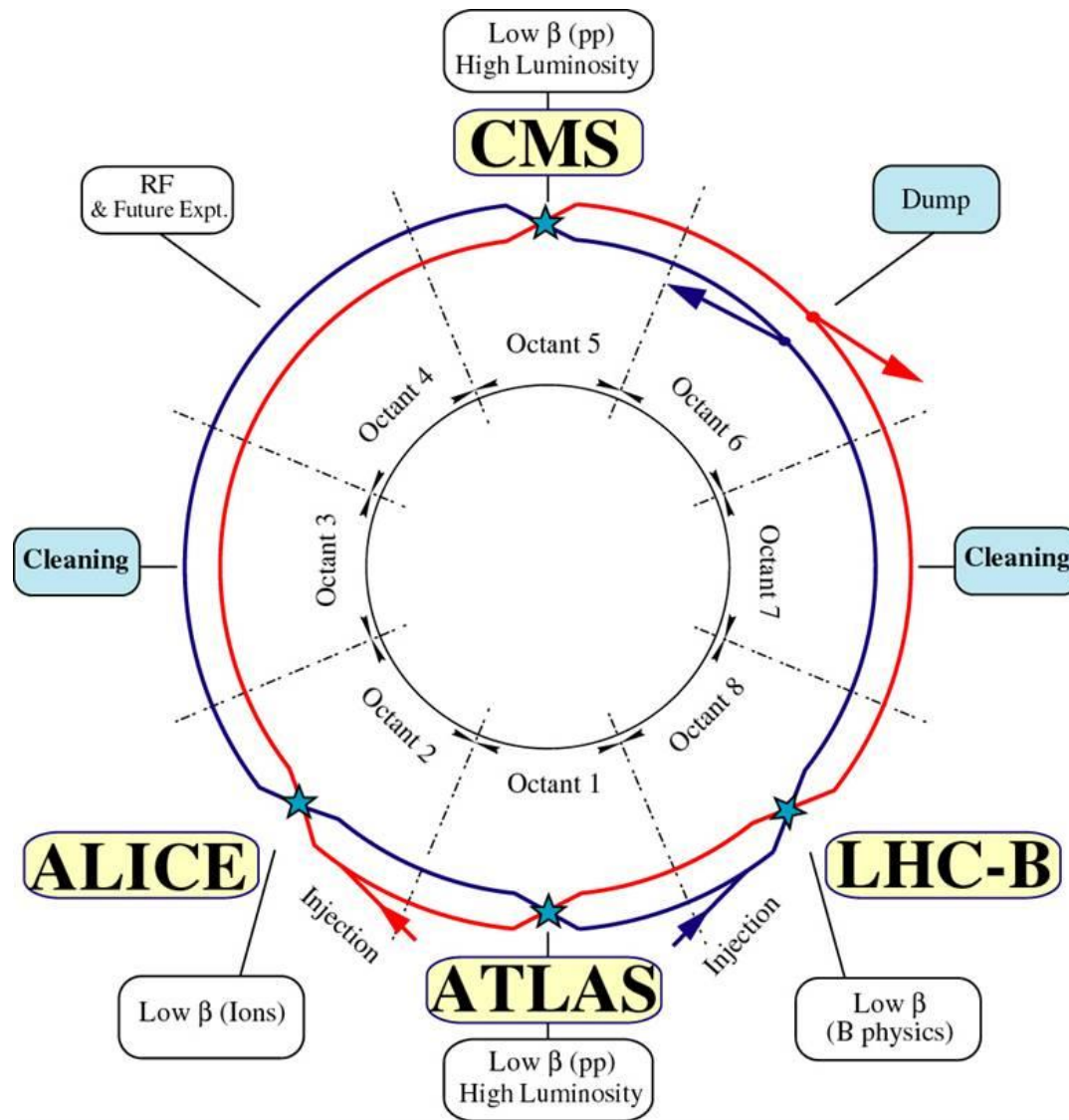
# A Világ gyorsítói



# A Nagy Hadronütköztető (LHC)



# Az LHC elemeinek elrendezése



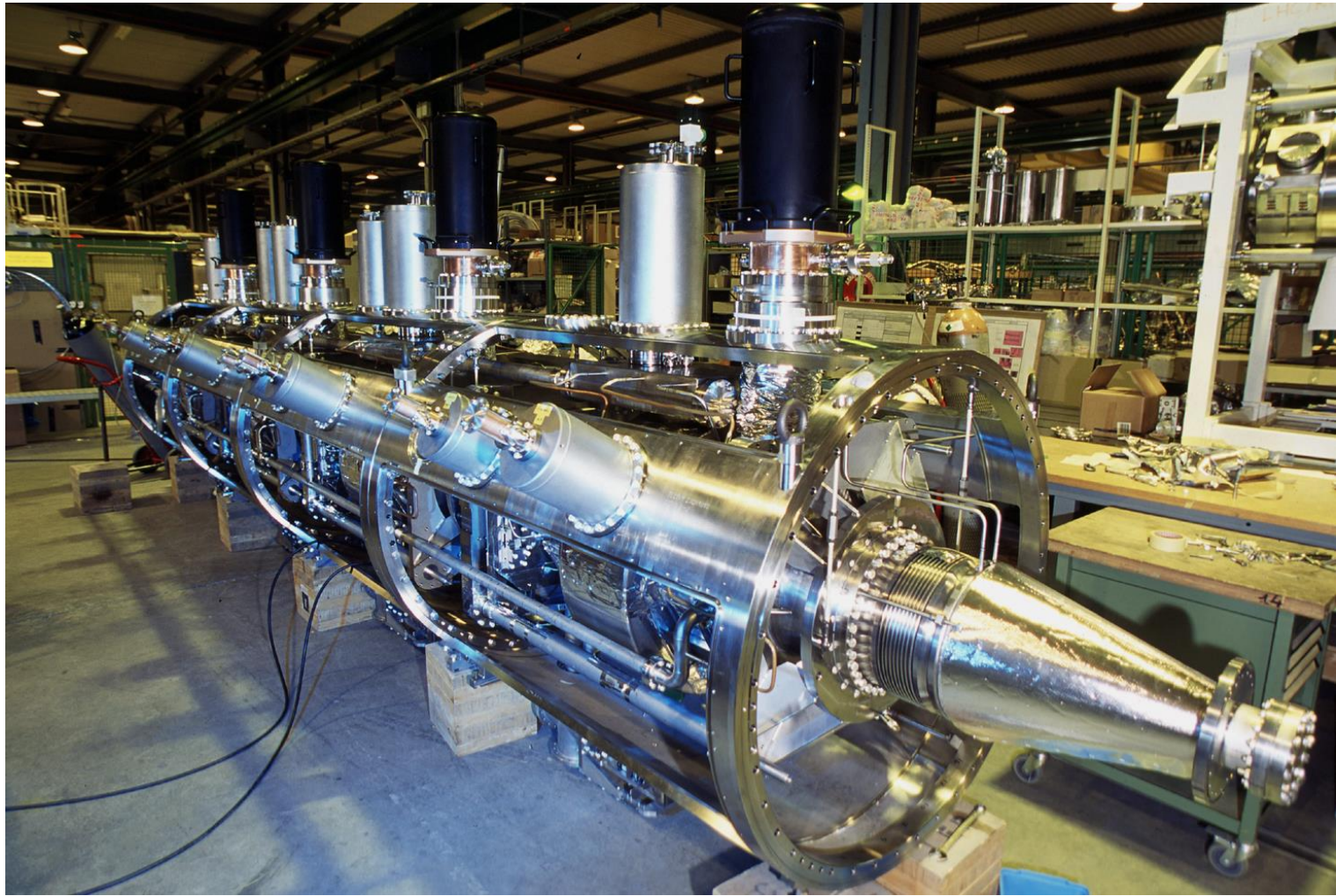


# Az LHC alagút



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

# Az LHC négy gyorsító moduljának egyike



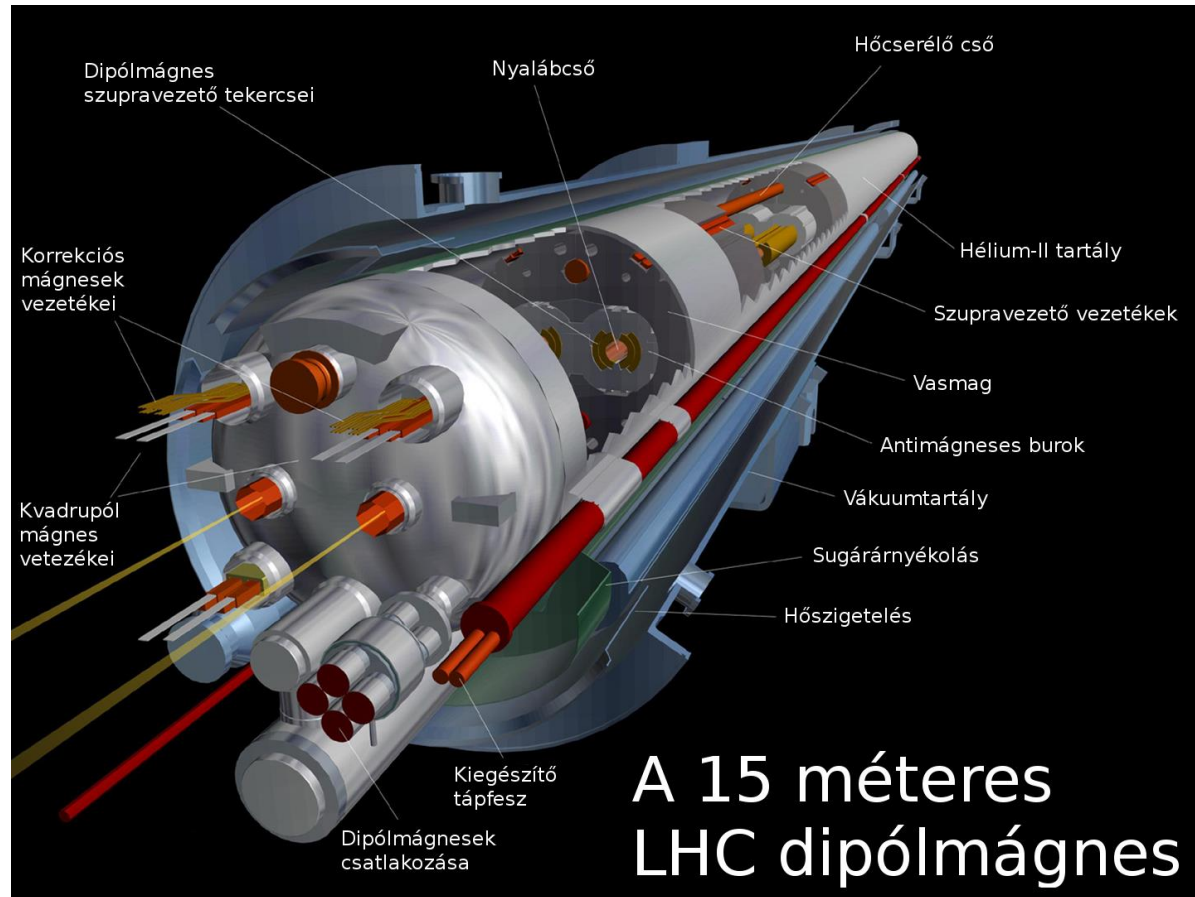
- Négy-négy üregből épül fel, és összesen 8 MeV gyorsításra képes

# A mágnesek leengedése az alagútba



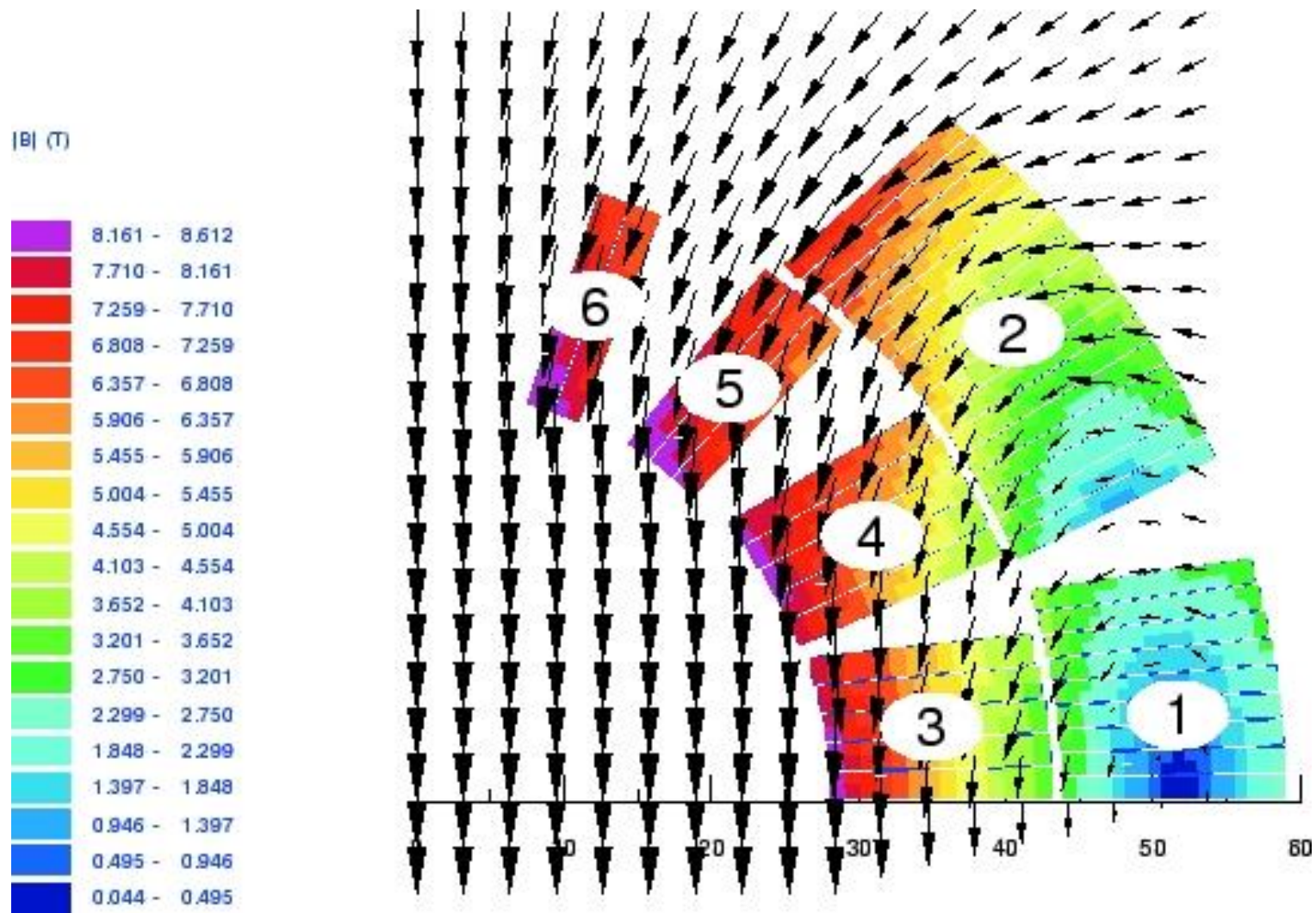
- 14.3 méter hosszú, 35 tonna
- 1232 darab, darabonként félmillió svájci frank

# A mágnesek szerkezete



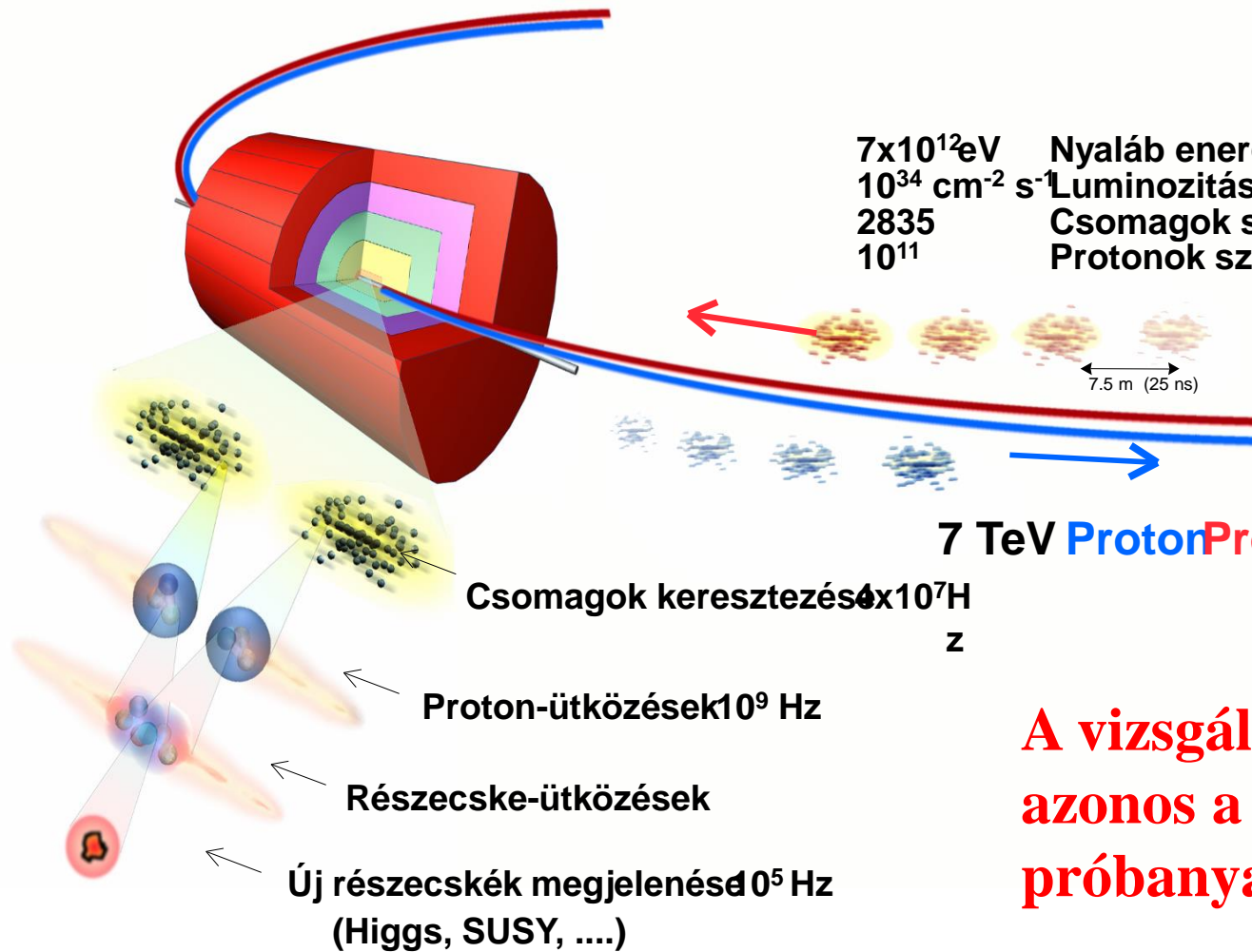
- 8.4 T mágneses tér, 11700 A árammal
- Szupravezető mágnesek 1.9 K folyékony héliumban

# A dipólmágnesek tere



# Az LHC nyalábjai

$7 \times 10^{12} \text{ eV}$  Nyaláb energia  
 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  Luminozitás  
 2835 Csomagok száma nyalábonként  
 $10^{11}$  Protonok száma csomagonként



**A vizsgálandó céltárgy  
 azonos a  
 próbanyalábbal**

# Az LHC egy korai feltöltésének lépései

<Gyorsító üzemmódja>: <folyamat állapota>

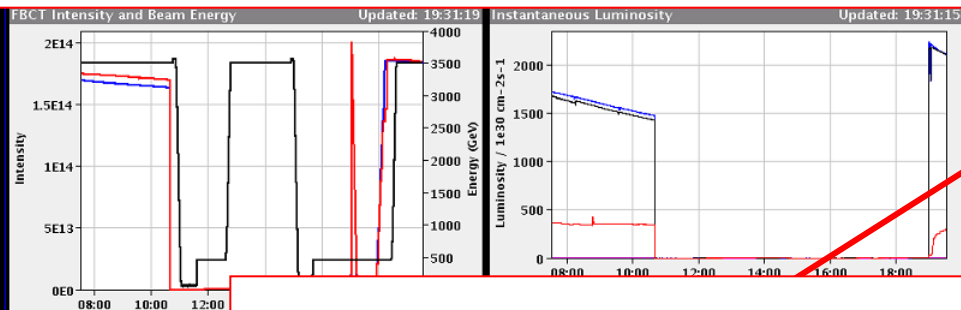
PROTON PHYSICS: INJECTION PROBE BEAM

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

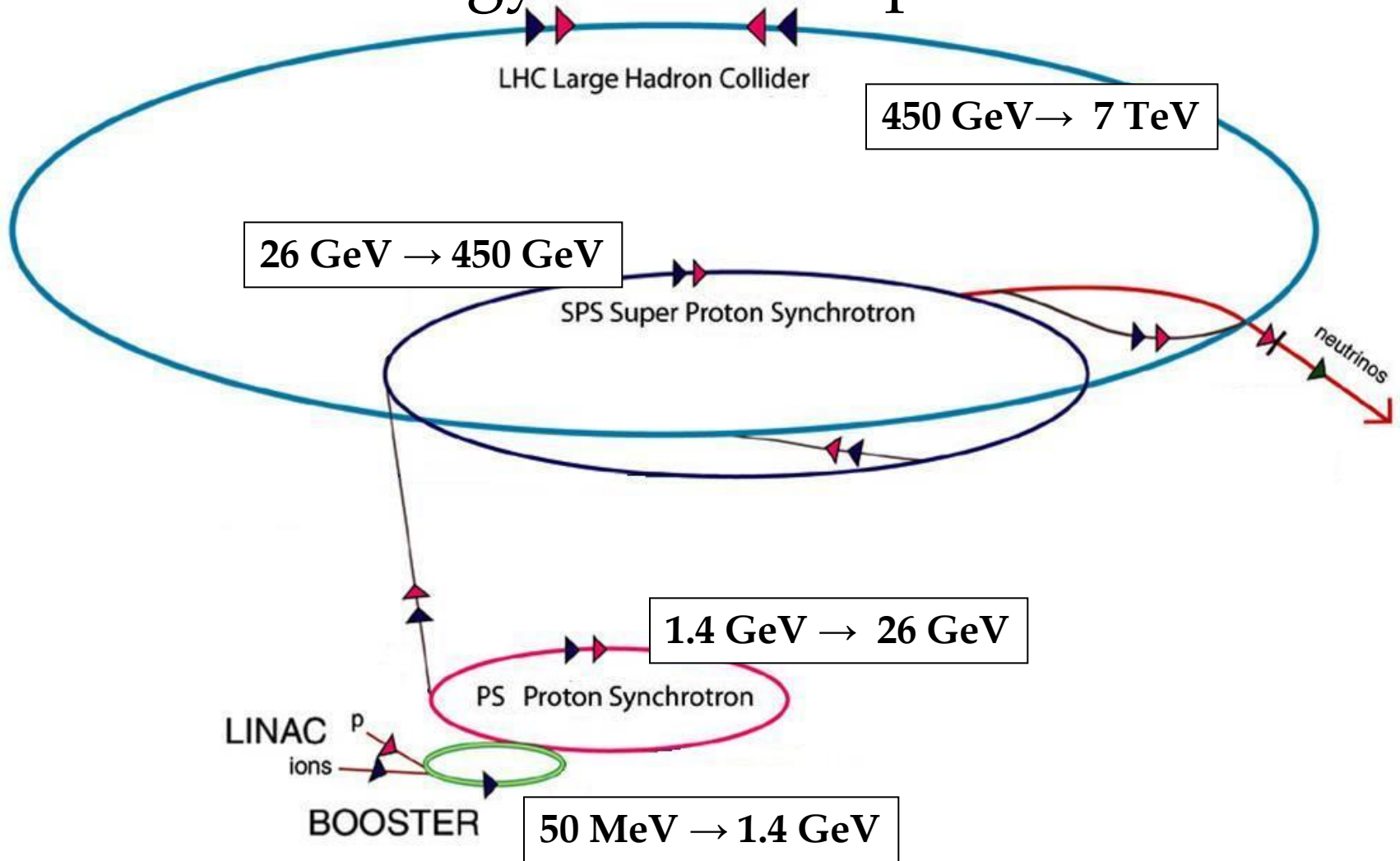
hát  $13.4 \cdot 10^{10}$  p

CMS-ben

csomag, tehát

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

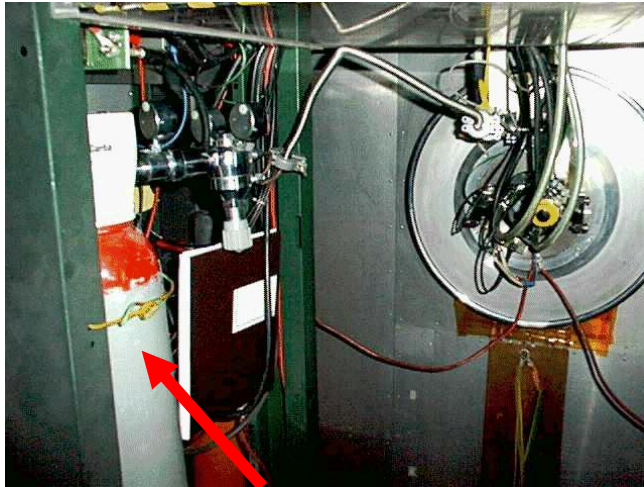
# Az LHC gyorsító-komplexuma



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



# A Linac 2 proton forrás



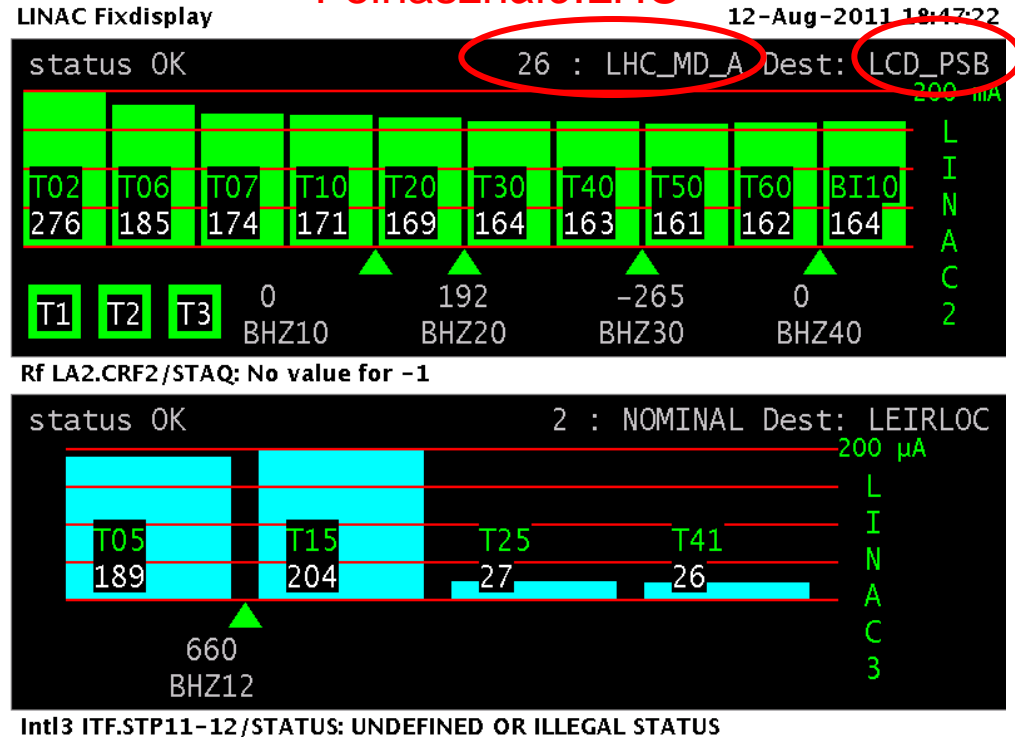
Proton forrás



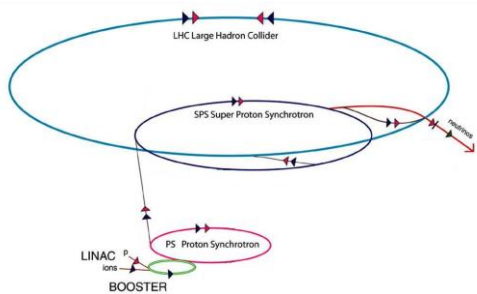
Linac 2

2013. augusztus 12.

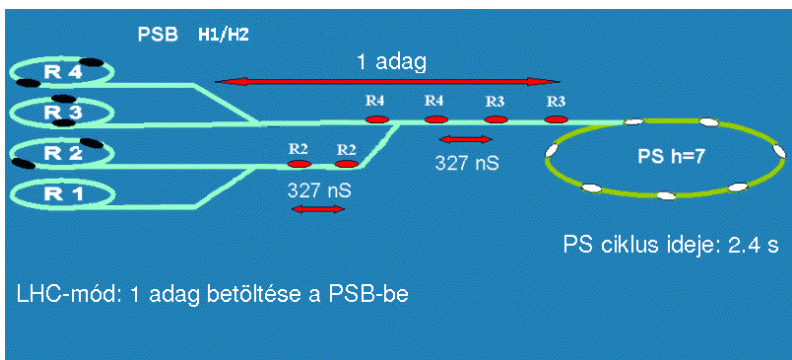
Felhasználó:LHC Célállomás:PSB



- 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

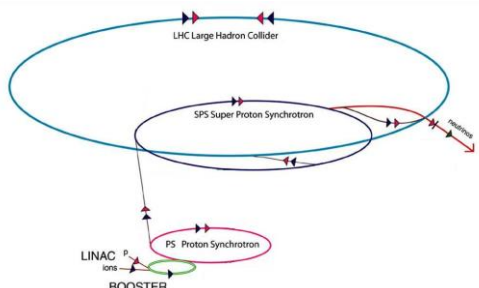
BPNM	User	Pls	Inj.	Acc.	b.Ej.E10	Ej.E10	Dest.
23	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	390	375	PS
24	LHC_MD_B	4	●●●●	○○●●	184	182	PS
25	ZERO	24	○○○○	○○○○	0.02	0.00	BDUMP
26	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	383	371	PS
27	LHC_MD_B	4	●●●●	○○●●	190	187	PS
28	LHCPROBE	11	●●●●	○○●●	1.10	7.16	BDUMP
29	LHC_MD_A	21	●●●●	●●●●	387	375	PS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

Cél: PS

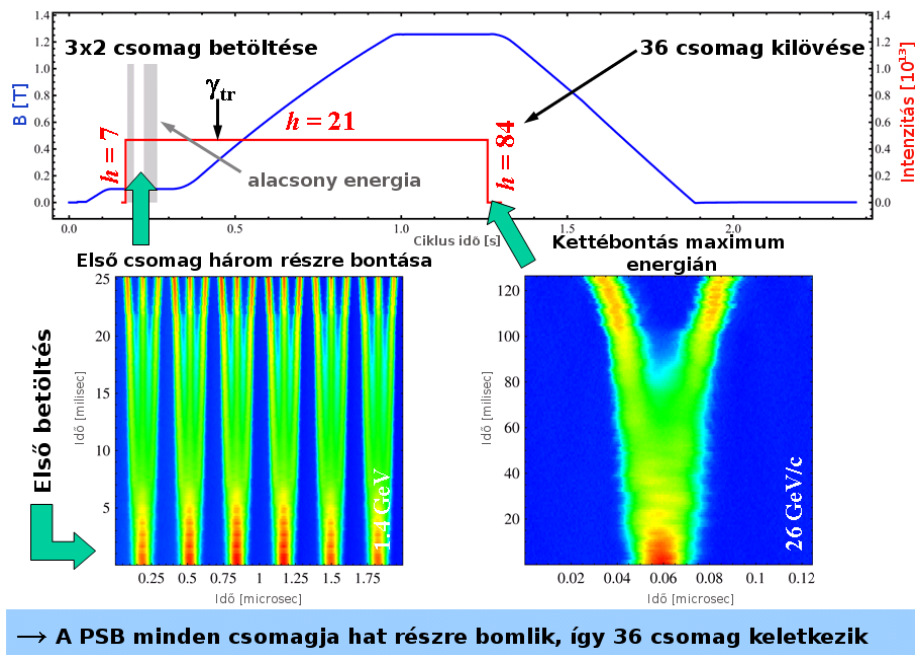
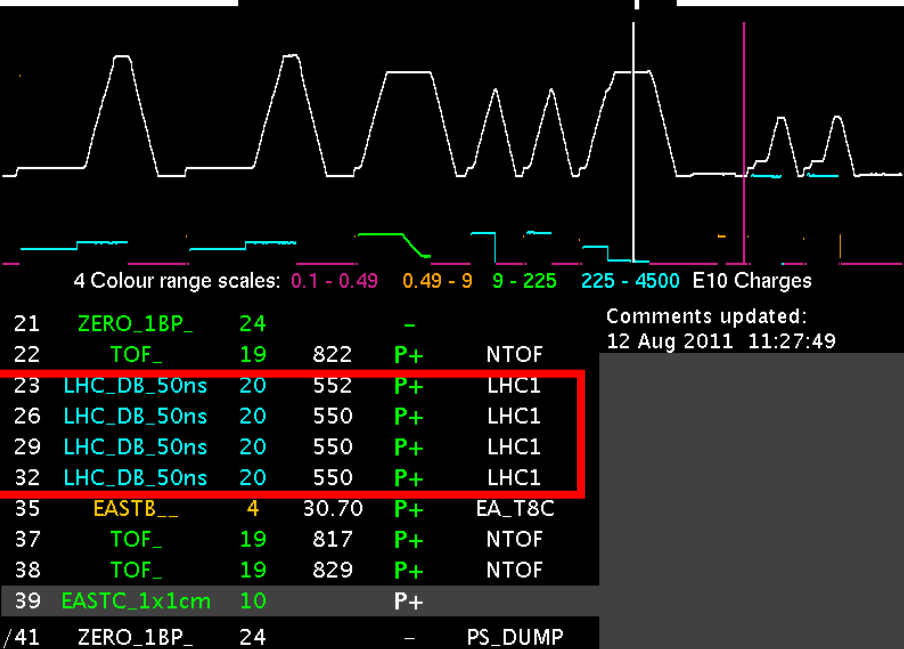


- A PS Booster 4 gyűrűből áll
- Gyűrűként két csomag vonható ki két lépésben
- A protonok energiája 1.4 GeV
- Látható, hogy a PS Booster 4+2 gyűrűjéből továbbítódik **6 csomagban** kb.  $550 \cdot 10^{10}$  proton ( $371+187$ ) a PS-be
- Összesen 4 ilyen adag van, tehát 24 csomagban kb.  $2200 \cdot 10^{10}$  proton távozik nagyjából egy időben

# A Proton Synchrotron

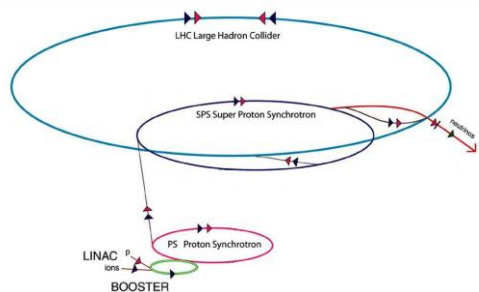


CPS Tel:76677-W 32 12 Aug 11 18:37:48



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

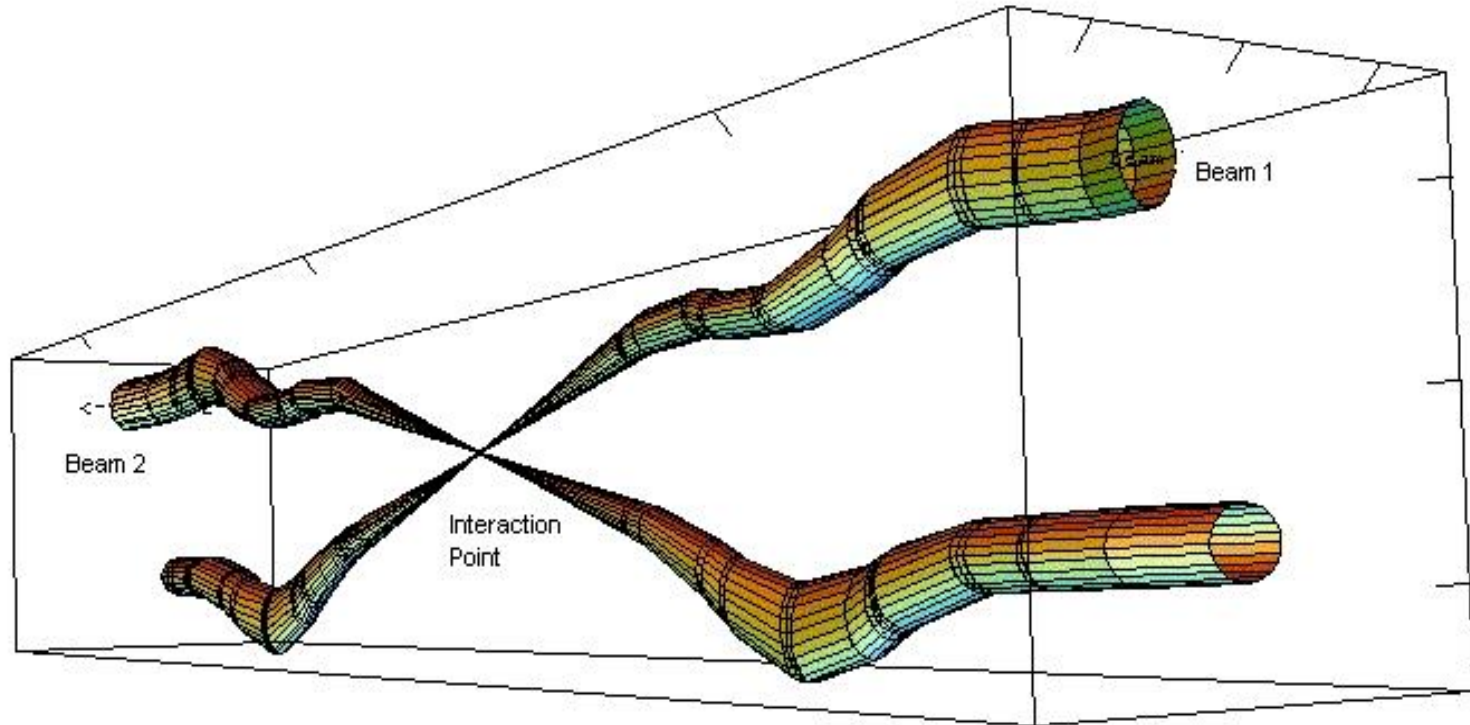
TT2	TT10	%LOSS	INJ	%LOSS
607	542	10.8	545	0.0
602	544	9.6	548	0.0
607	542	10.7	540	0.4
611	541	11.5	537	0.7

	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-be

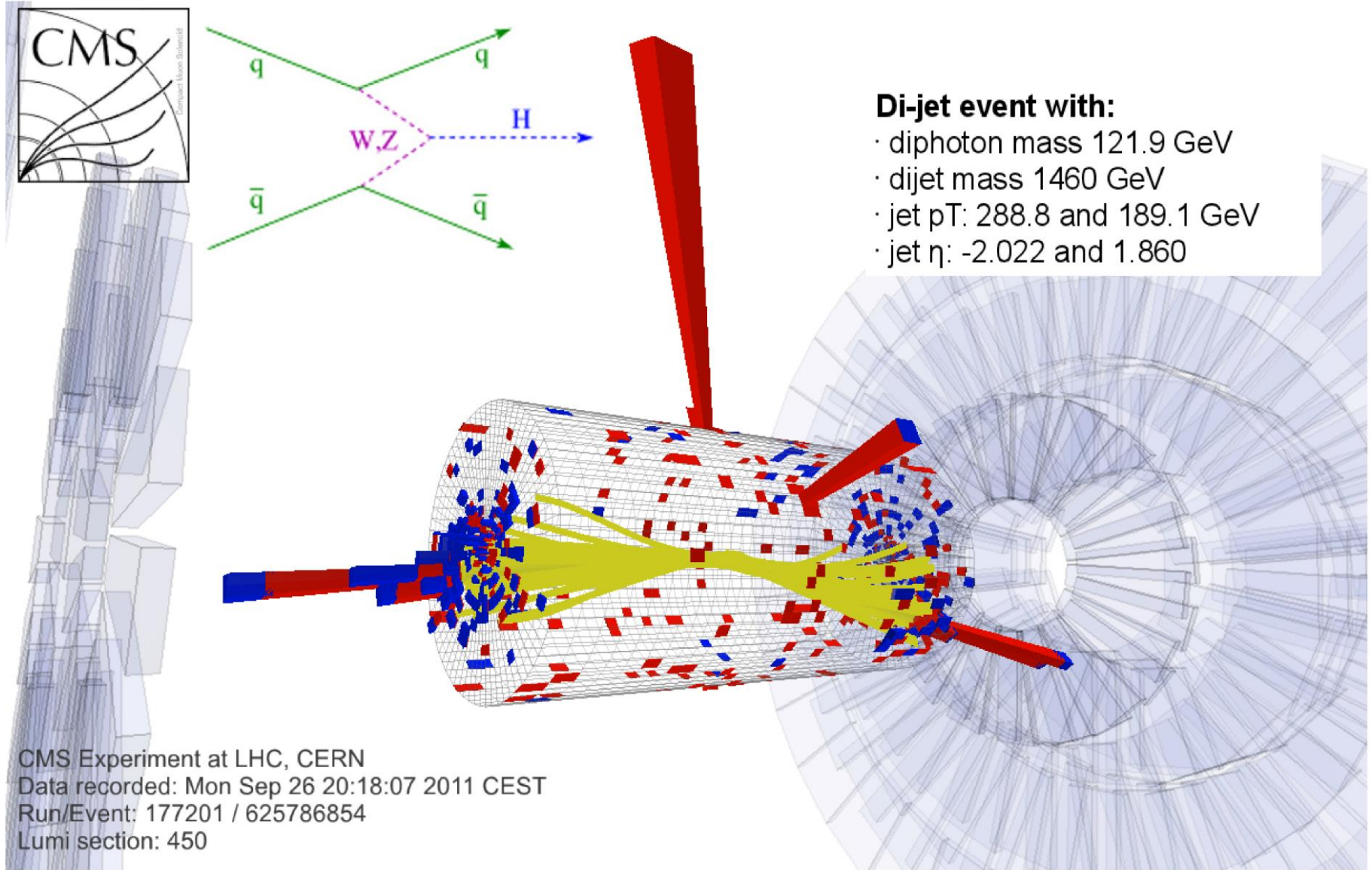
# Nyalábok keresztezése



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

- Vékony nyalábban, max.  $\sim 3000$  csomag sorakozhat
- Csomag:  $\sim 130$  milliárd proton, 16 mikron átmérő, néhány cm hosszú
- 25 ns időközökben kereszteződnek, több tucat ütközést keltve
- $\sim 1$  milliárd 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 produkált ütközéseket
- A létrejött eseményekben új fizikai jelenségek, a felfedezett Higgs bozonon túl, további részecskék megjelenését várjuk.





# Gyorsító fizika néhány eredménye

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

