

Nehézion-ütköztetők, részecskegyorsítók

NAGYENERGIÁS NEHÉZIONFIZIKA, AVAGY A TÖKÉLETES KVARKFOLYADÉK

Miről lesz szó?

- Mire jók a részecskegyorsítók
 - Hogyan állítjuk elő a részecskenyalábokat
 - Hogyan lehet részecskéket gyorsítani
 - Elektrosztatikus gyorsítók
 - Lineáris gyorsítók
 - Cirkuláris gyorsítók
 - A RHIC és az LHC gyorsító rendszere
- + ha marad idő:
- Részecskedetektálás alapjai, detektortípusok

Mire jók a részecskegyorsítók?

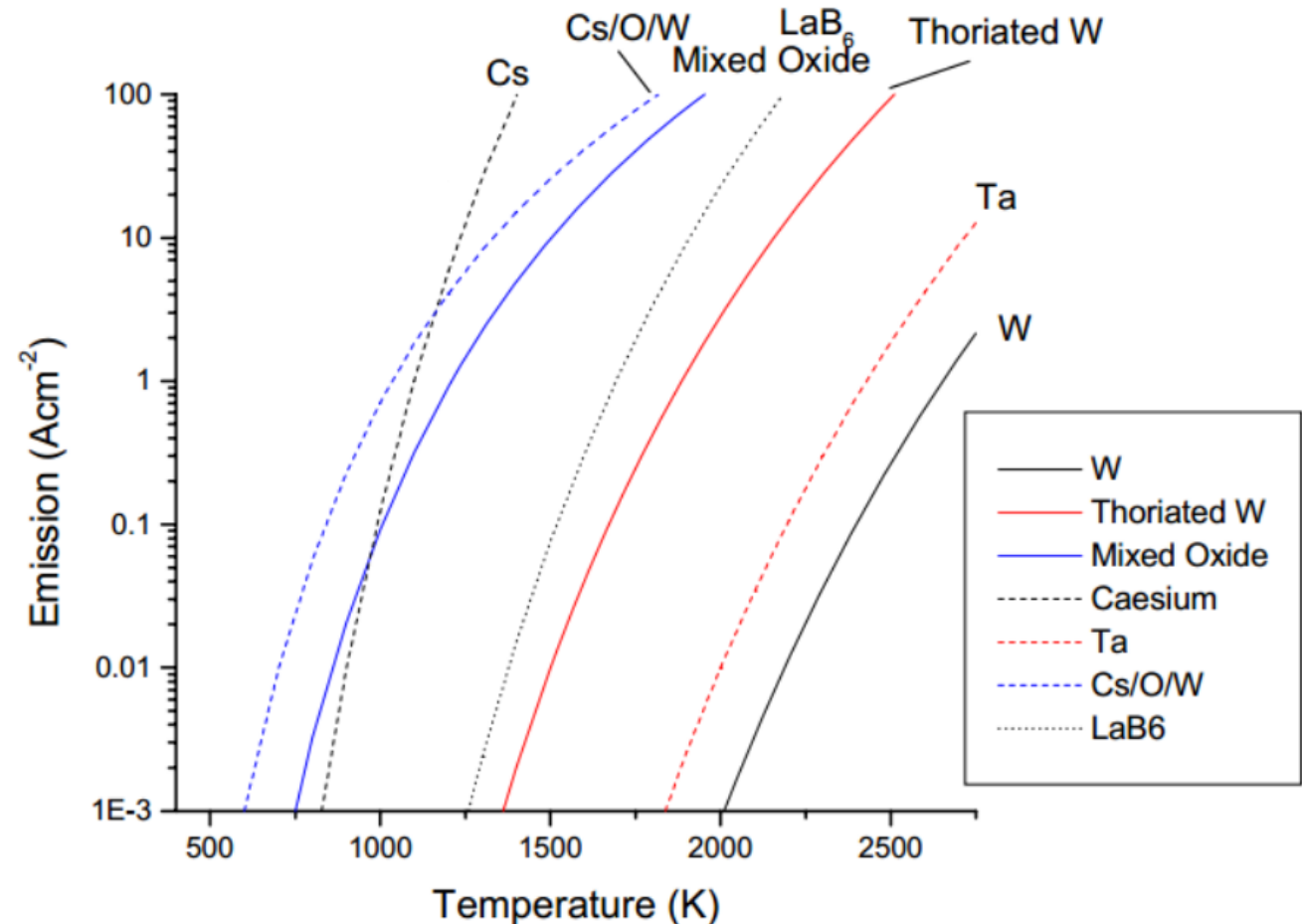
- Részecskefizikai kutatások
(RHIC, LHC, Tevatron, LEP, SLC, stb.)
- Orvosi felhasználás
(sugárterápia, mesterséges izotópok előállítása)
- Ipari felhasználás
(élelmiszeripar, elektronikai ipar, modern anyagok fejlesztése)

Hogyan állítjuk elő a részecskenyalábokat?

- Milyen részecskeforrásokat akarunk előállítani?
 - Elektronok
 - Pozitronok
 - Ionok
 - Pion
 - Müon
 - Neutron

Elektronforrások – termikus katódok

- **Elektron kibocsájtó katód**
– az elektronokat a kilépési energia fölé kell vinni, pl. fűtéssel
- **Jó katód anyag:** magas hőmérsékletet kibír, alacsony a kilépési energiája



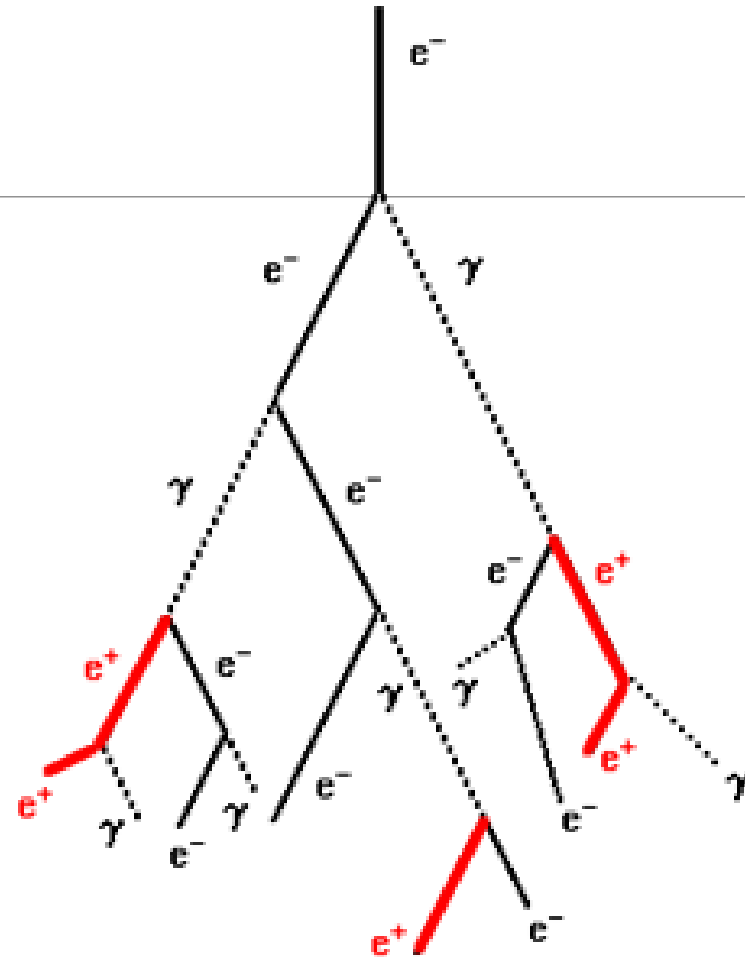
Elektronforrások – fotokatódok

- Fotoelektronsokszorozó elve
- Beérkező nagy energiájú foton elektront lök ki
- **Kvantumhatásfok (Q_e):** az 1 beeső fotonra eső várható elektronszám – minél nagyobb annál jobb
- Fémek – kilépési energia az UV tartományban, alacsony kvantumhatásfok
- Félvezetők hatékonyabbak

Általában kis kinetikus energiával lépnek ki az elektronok, gondosan tervezett elektródák tere gyorsítja és húzza ki a katód közeléből

Pozitronforrások

- **Intenzív elektronnyaláb** (néhány GeV - 20 GeV)
- közvetlenül egy **nagy rendszámú targetnek** ütközik
- **elektromágneses zápor** – sok **pozitron** keletkezik

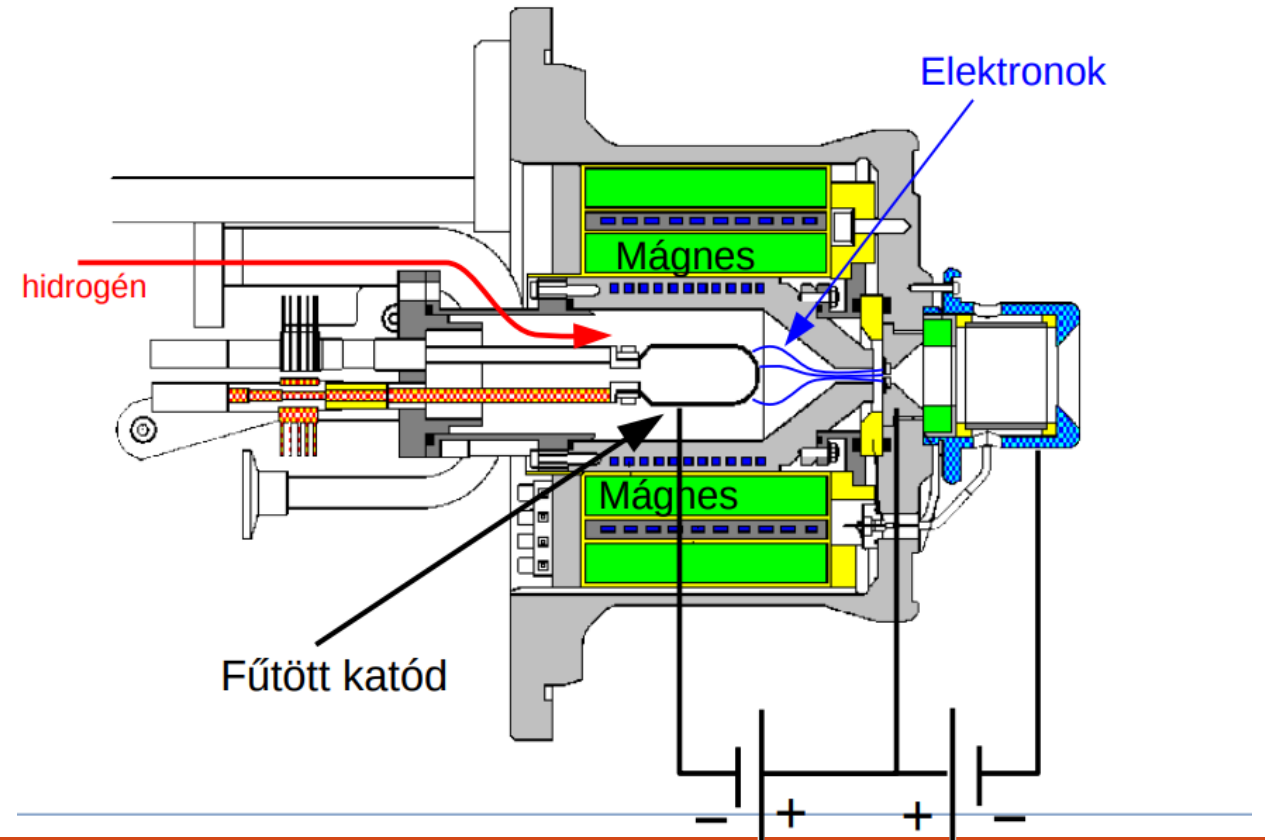


Ion-, proton-, pion-, müonnyaláb

- Proton: hidrogén ionizálással
- Ion: gáz ionizálással
- Antiproton: protonnyaláb rálövése céltárgyra, kiválogatás
- Pion, kaon, müon hasonlóan, illetve müon nyaláb pion nyaláb bomlásából

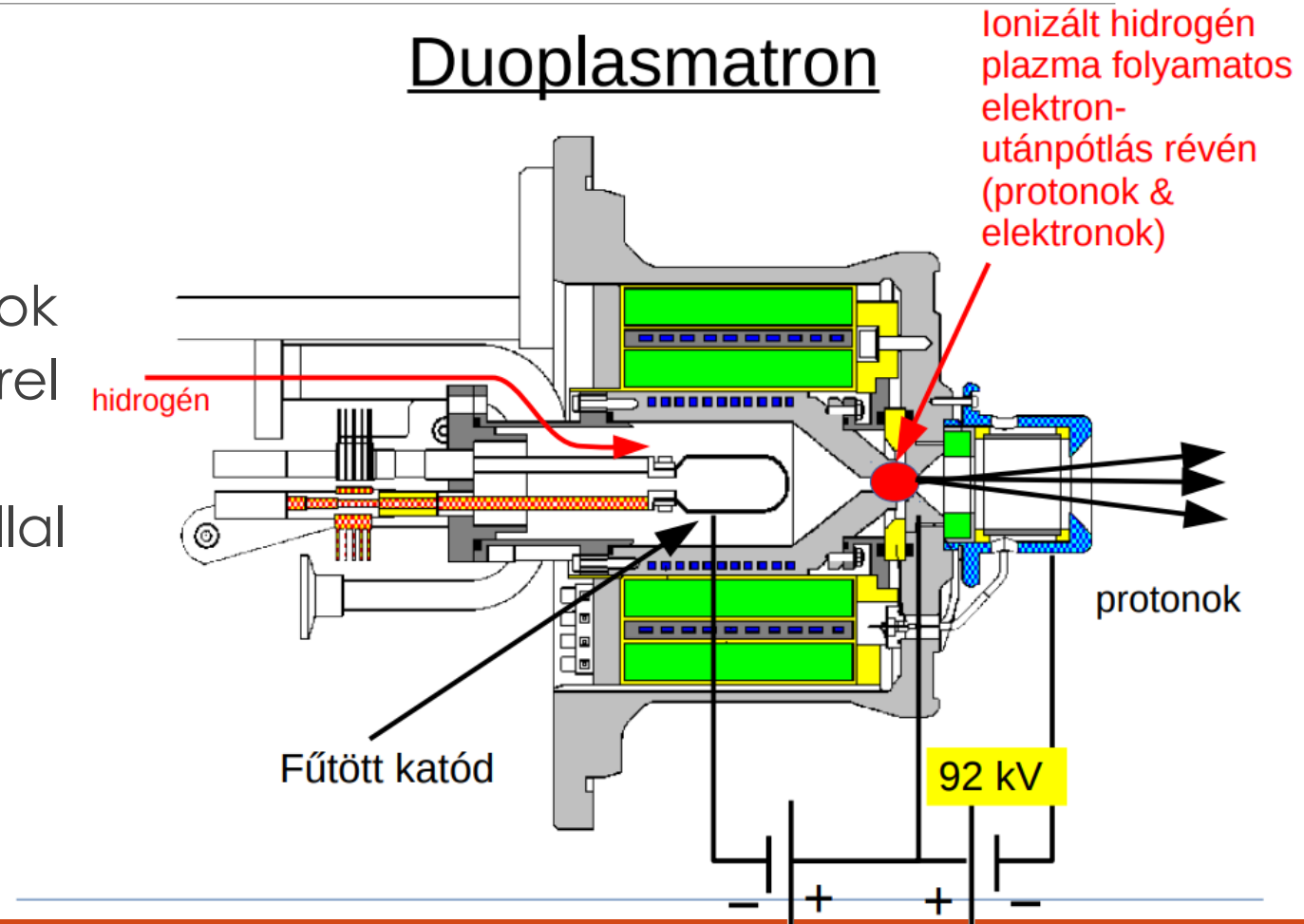
LHC protonnyaláb

- LINAC2-ben indul a protonnyaláb
- Hidrogéngáz – hidrogénplazma – elektronok leválasztása elektromos térrel – protonok fókusználása rádiófrekvenciás kvadropollal – protonok gyorsítása relativisztikus sebességre az ALVAREZ LINAC-al



LHC protonnyaláb

- LINAC2-ben indul a protonnyaláb
- Hidrogéngáz – hidrogénplazma – elektronok leválasztása elektromos térrel – protonok fókusználása rádiófrekvenciás kvadropollal – protonok gyorsítása relativisztikus sebességre az ALVAREZ LINAC-al



LHC ionnyaláb

- **Pb gáz** gyártása kemencében lassú melegítéssel fémes ólomból
 - 10 g ára 12000 USD, 500 mg kell / 2 hét, csupán 2 USD / óra
- **Plazmakamrában** 30 ms alatt átlagosan 29 töltést veszít a Pb atom
- **LINAC3**-ban ionnyaláb formálása (4.5 MeV / nukleon)
- **Low Energy Ion Ring** – 300 nm vastag fóliákon halad át a nyaláb, eddig átlagosan 54 töltést veszítenek (72 MeV / nukleon)
- **PS** – további gyorsítás (5.9 GeV / nukleon), újabb fólián megy keresztül a nyaláb, létrejön a Pb⁸²⁺ ionnyaláb
- **SPS** – 177 GeV / nukleon

Hogyan lehet részecskéket gyorsítani?

- Töltött részecskék elektromágneses térben:

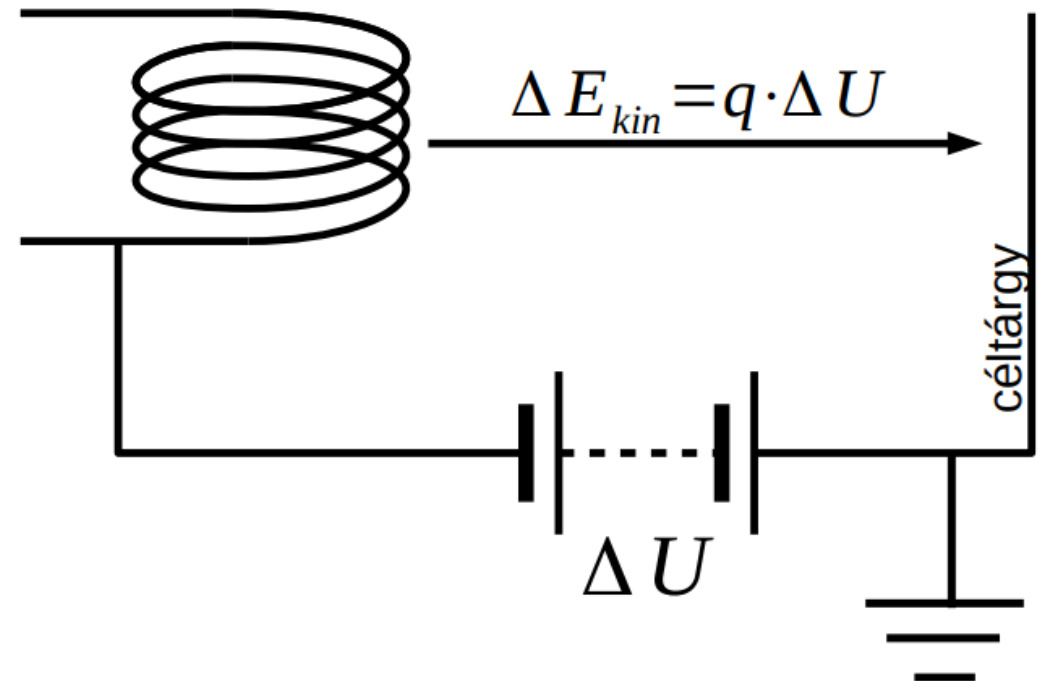
$$F = qE + qv \times B$$

- **Elektromos tér gyorsít, mágneses tér eltérít!**
- Gyorsítók fajtái:
 - Elektrosztatikus gyorsítók
 - Lineáris gyorsítók
 - Cirkuláris gyorsítók

Elektrosztatikus gyorsítás

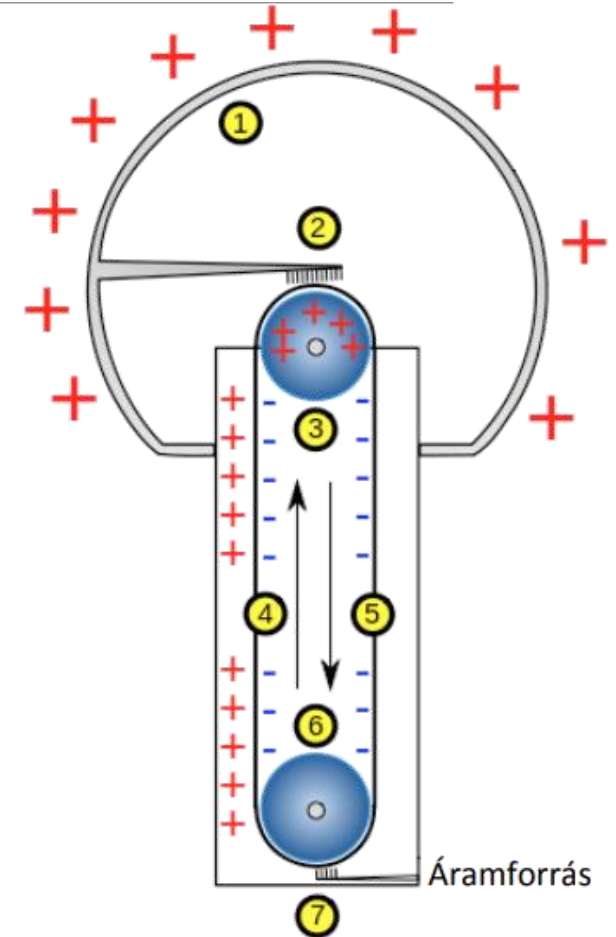
- Target vagy forrás magas potenciálon (MV)
- Single pass, azaz nem tudjuk mágnesekkel újra és újra átvezetni a részecskéket a gyorsító részen
- Elektrosztatikus gyorsítók fajtái:

Cockcroft-Walton,
Van de Graaff,
tandem Van de Graaff



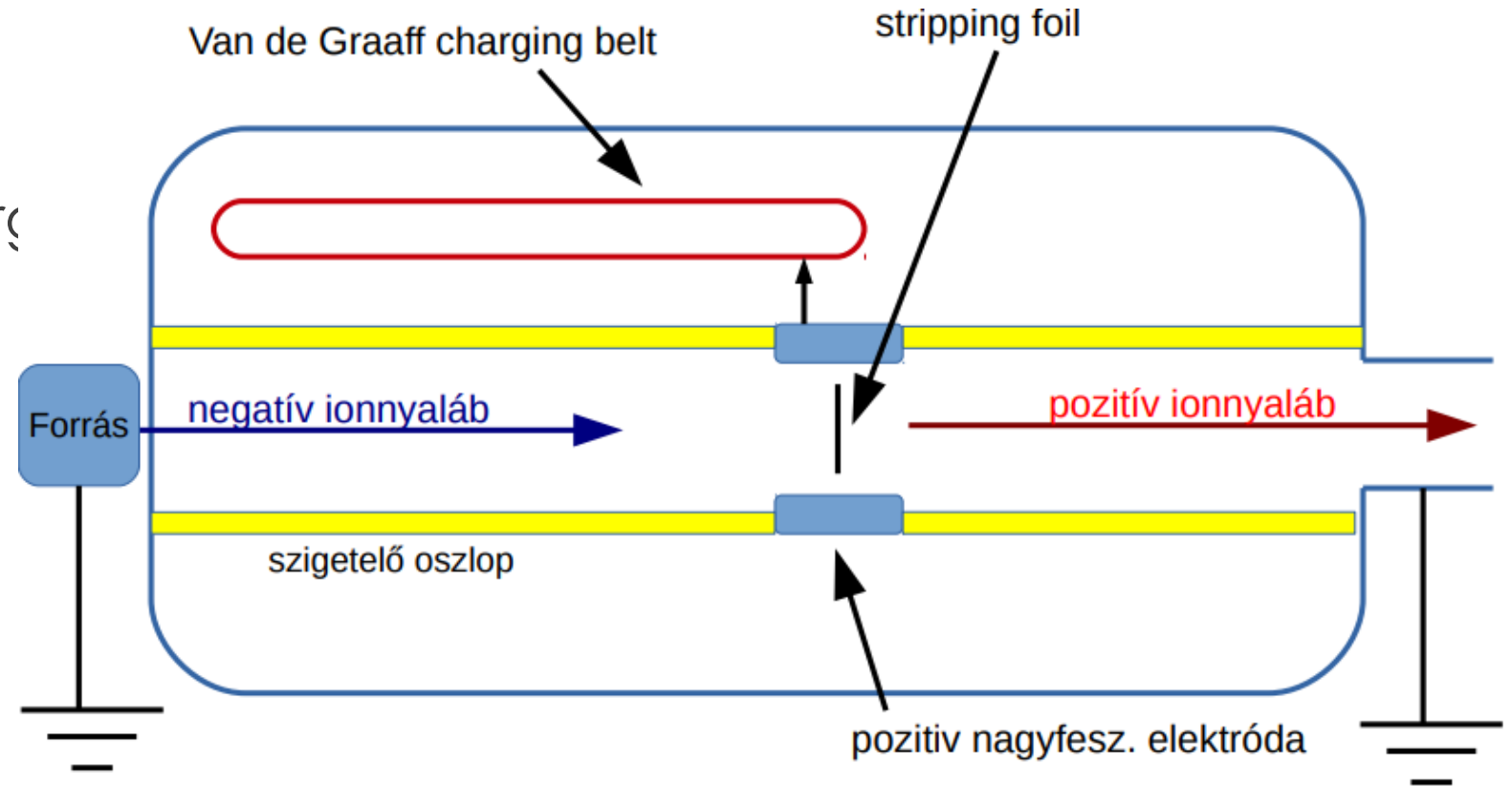
Van de Graaff generátor

- Szigetelő oszlop tetején nagy fémgömb (1)
- Egy elektromos motor (6) meghajtja a szigetelő oszlopon belüli vezető anyagból készült szíjat (4,5) két korong segítségével (3,6)
- A szíj két végén fémfésű van (2, 7). Az alsó (7) egy áramforráshoz kötve biztosítja a folyamatos töltésellátást. A szíj (4) a töltéseket felviszi a felső fémfésűhöz (2), ami eljuttatja őket a nagy fémgömb elektródához (1)
- A felhalmozol töltés, potenciál különbséget hoz létre az elektróda (1) és a föld között.
- A Van de Graf gyorsító egy óriási Van de Graf generátor egy belső gyorsítócsővel



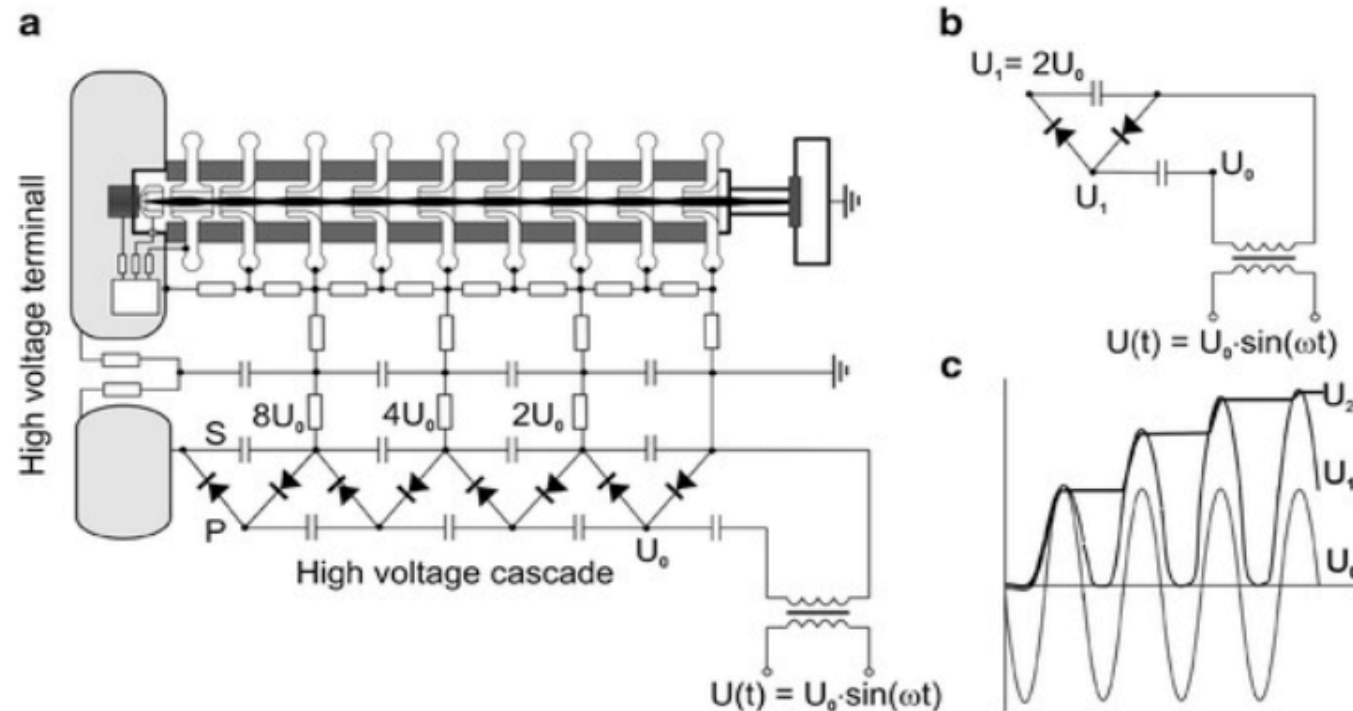
Tandem Van de Graaff

- Előnyök:
 - 2x energia
 - Forrás és céltárgy is földelt lehet
- Limitációk:
 - Ált. 1x-esen negatív ion kell



Cockroft-Walton gyorsító

- Komplex elektromos áramkör, feszültség sokszorozó kaszkád használatán alapul
- Váltófeszültségből egyenfeszültség, diódák mint kapcsoló áramkörök



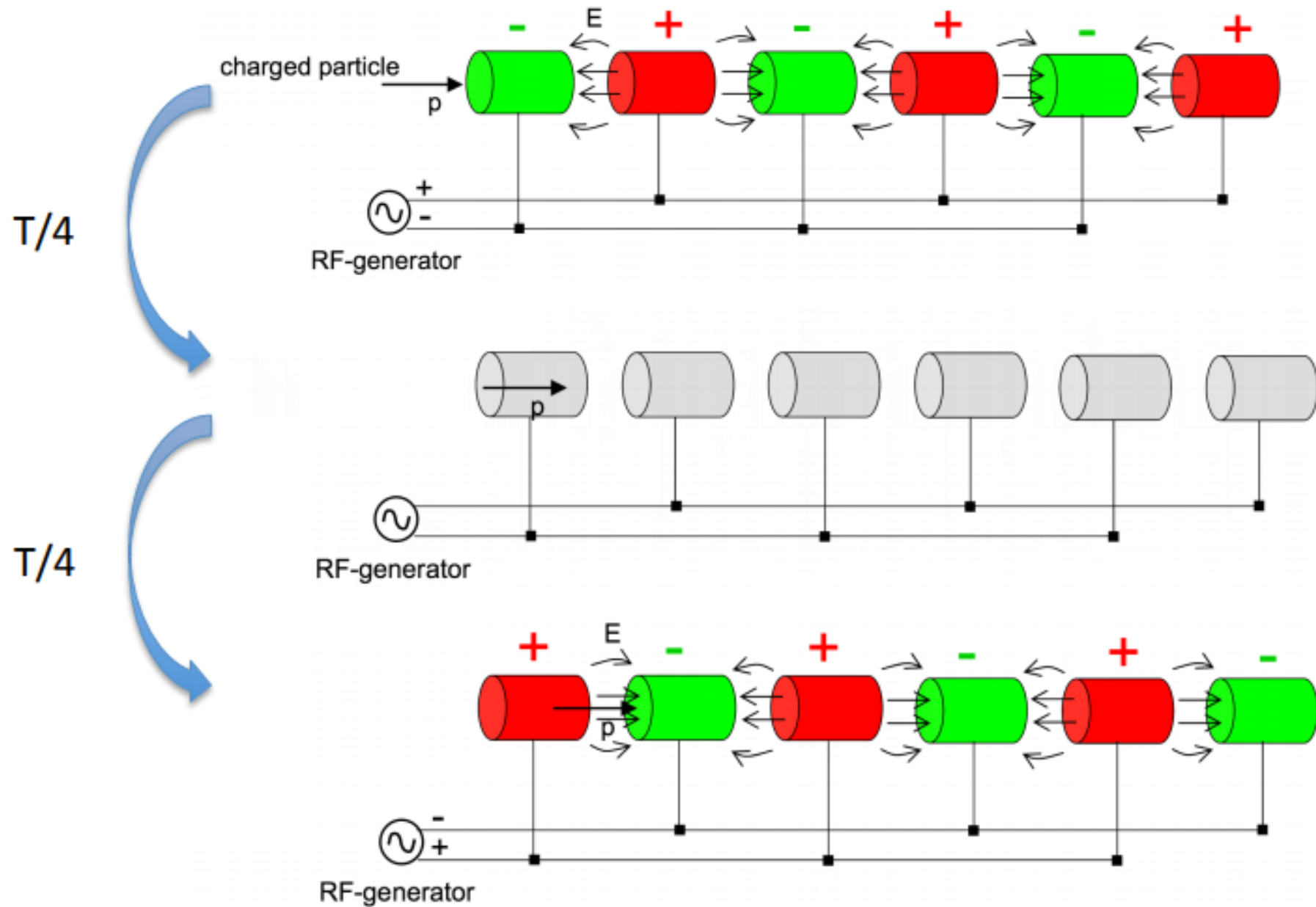
Cockroft-Walton gyorsító



Lineáris gyorsítók

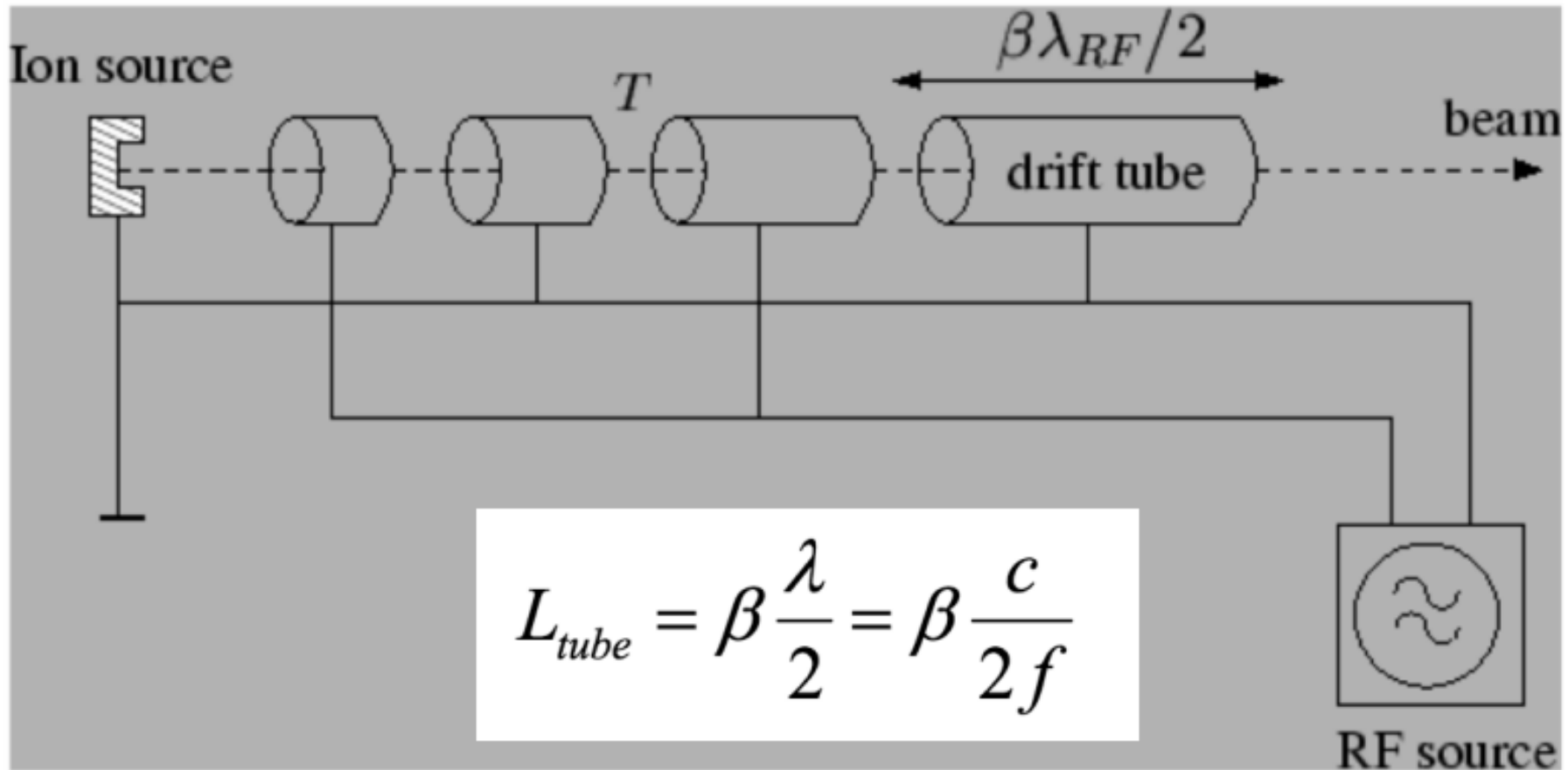
- Rádiófrekvenciás részecskegyorsítás
- Konceptió: Ising, 1924
- Nem szükséges, hogy a gyorsító tér egyidőben rendelkezésre álljon, elég csak ott, ahol a részecske van
- Wideröe LINAC (1928):
- Csövek közötti rés gyorsít, csövek hossza a sebességgel egyre nő
- RF 180° -ot vált mialatt a részecske az egyik réstől a másikig jut

Wideroe (1928): apply acceleration voltage several times to particle beam



$$\beta < 1$$

v sebesség nő \rightarrow csőhossz nő



original Wideroe drift-tube principle

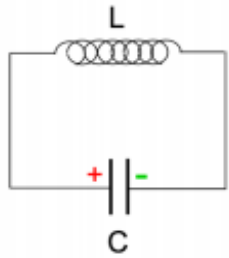
Wideröe LINAC

- A részecskék csomagokban utaznak
- A csomagok a RF periódusaival szinkronban haladnak
- Ennek feltétele: $L = v T/2$
- Csak alacsony frekvencián (< 10 MHz) használható
- Max frekvencián: $f = 10$ MHz, $\beta=1$, $L = 30$ m
- Ultrarelativistikus részecskékre nem praktikus

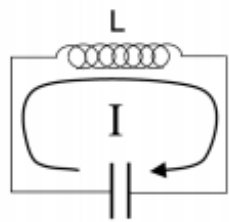
Alvarez LINAC (1946)

- A gyorsító struktúra egyetlen RF üregrezonátorra transzformálható
- EM állóhullám egy dobozba zárva
- Nagyobb frekvenciák, rövidebb gyorsító
- DESY proton LINAC:
 $E_{\text{total}} = 988 \text{ MeV}$, $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$, $E_{\text{kin}} = 50 \text{ MeV}$, $\beta = 0.3$
- GSI Unilac:
 $E = 20 \text{ MeV / nucleon}$, $\beta = 0.04-0.6$

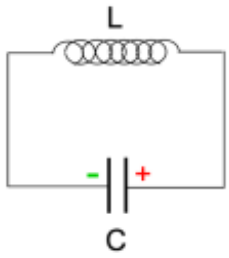
LC circuit analogy:



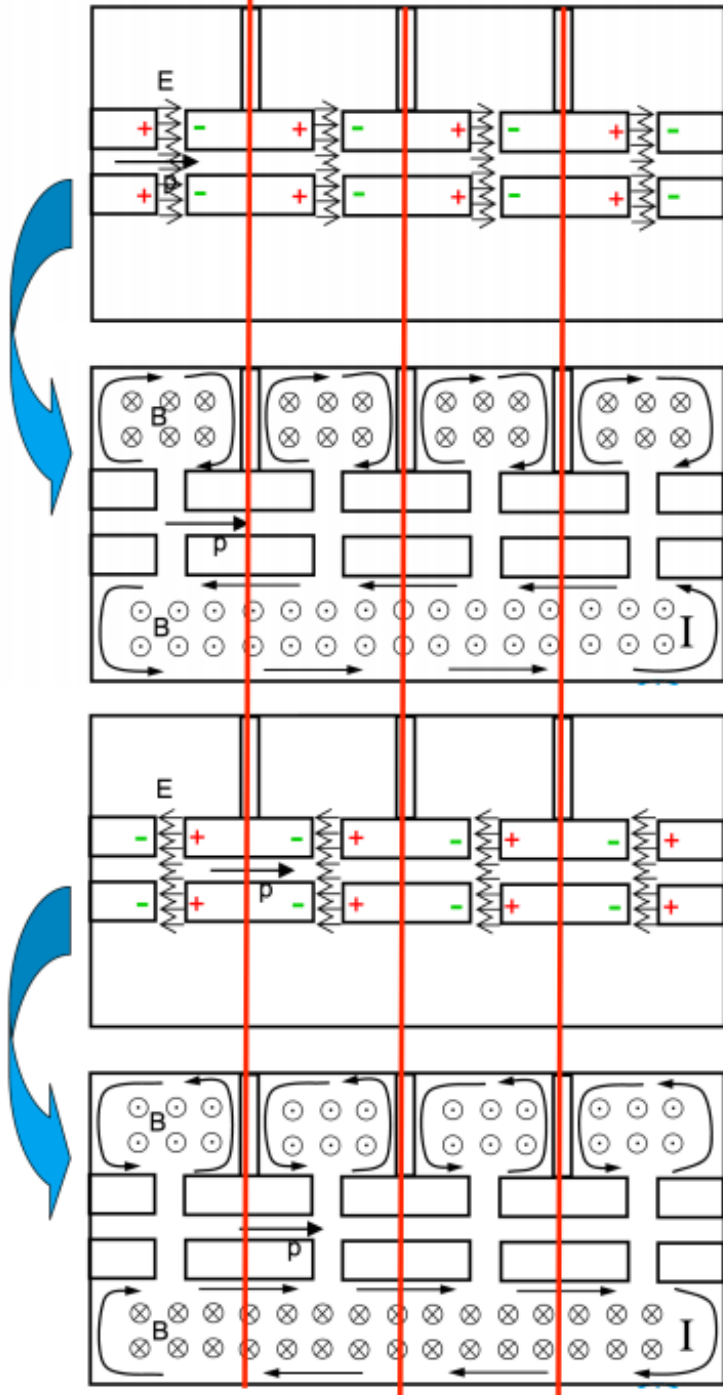
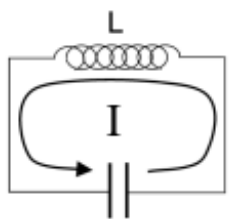
a quarter of a period later:



half a period later:



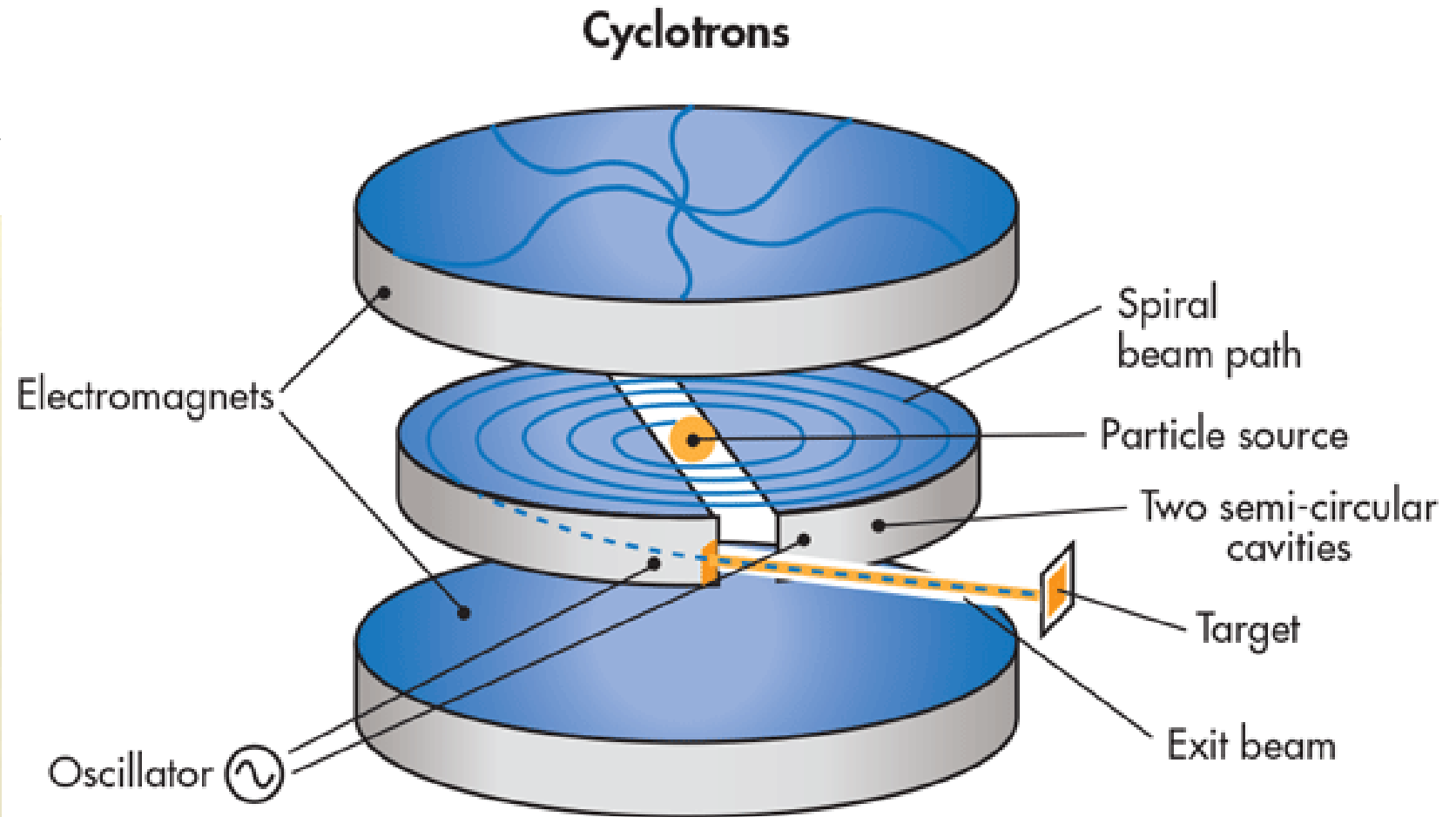
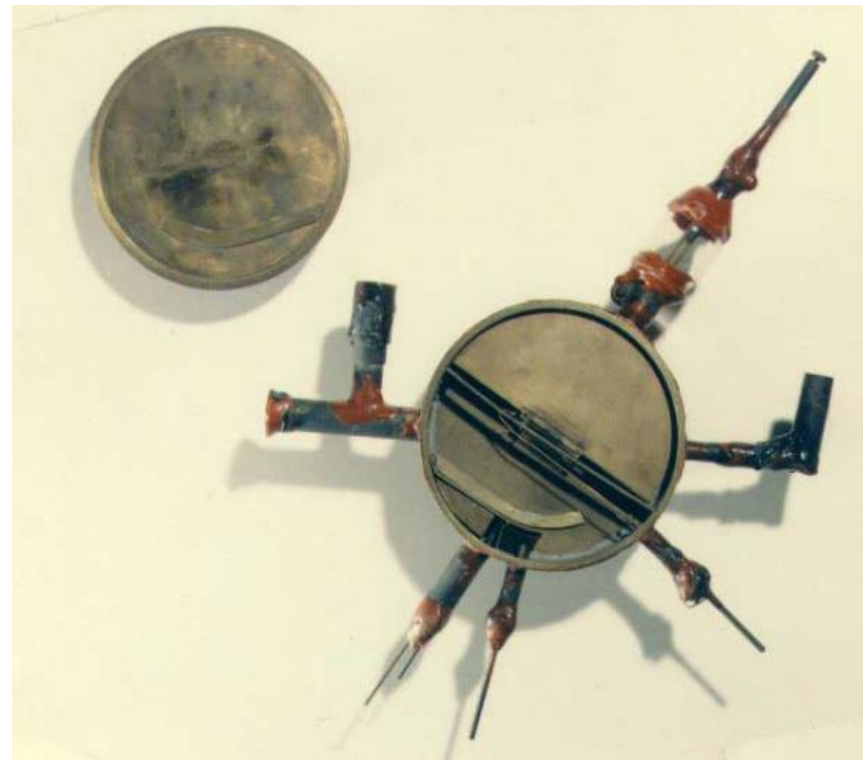
3 quarters of a period later:



Cirkuláris gyorsítók

- Vezessük át a nyalábot ugyanazon a gyorsító struktúrán mágnesek segítségével!
- Ciklotron - Lawrence & Livingston (1931)
- Konstans mágneses tér, körpálya
- Növekvő energia – nő a ciklotronsugár – $BR=p/q$
- Nemrelativisztikus tartományban a keringési frekvencia energiafüggetlen:
- $$f_{cyc} = \frac{v}{2\pi R} = \frac{v}{2\pi} \cdot \frac{qB}{p} = \frac{qB}{2\pi} \cdot \frac{v}{p} = \frac{qB}{2\pi} \cdot \frac{1}{m}$$
- Ciklotron rezonancia – két D elektróda között gerjesztő rádiófrekvencia megegyezik a ciklotron frekvenciával
- Két D-elektróda közti tér minden áthaladásnál gyorsít

Ciklotron



Ciklotron – relativisztikus korlát

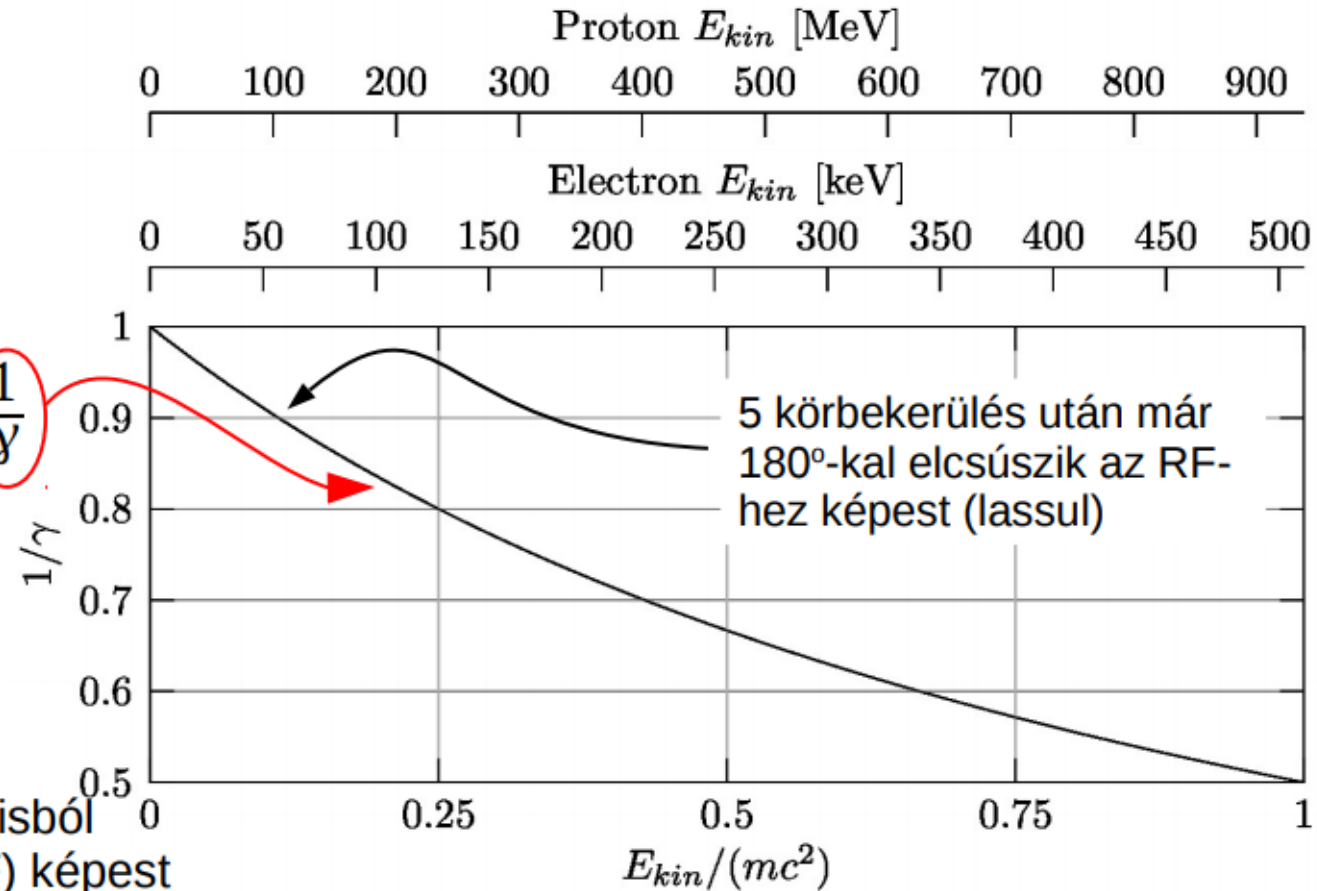
- $f_{cyc} = \frac{qBv}{2\pi\rho}$
- klasszikus formula:
 $\rho = mv$, $v/\rho =$ és
 f konstans
- Relativisztikus formula –
momentum
(pályasugár) nő,
de sebesség
szaturálódik

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \gamma m v$$

$$\frac{v}{p} = \frac{1}{\gamma m}$$

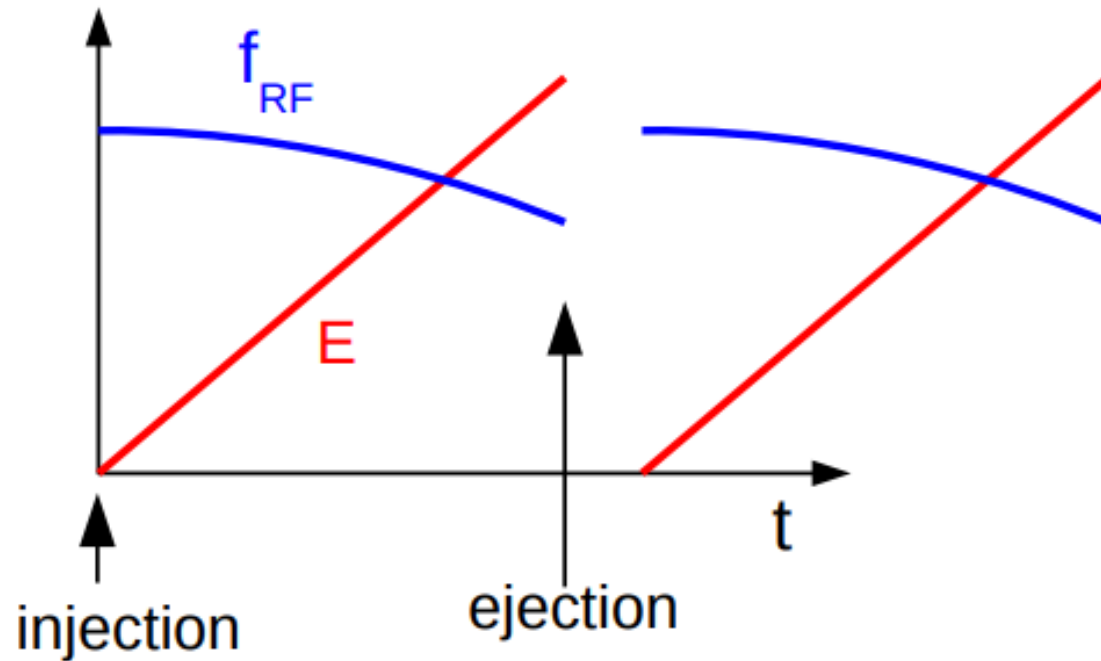
$$f_{cyc} = \frac{qB}{2\pi m} \frac{1}{\gamma} = f_{cyc}^{class} \frac{1}{\gamma}$$

- Már néhány-10 MeV-es protonokra is néhány% eltérés
- Részecske kiesik fázisból a gyorsító térhez (RF) képest



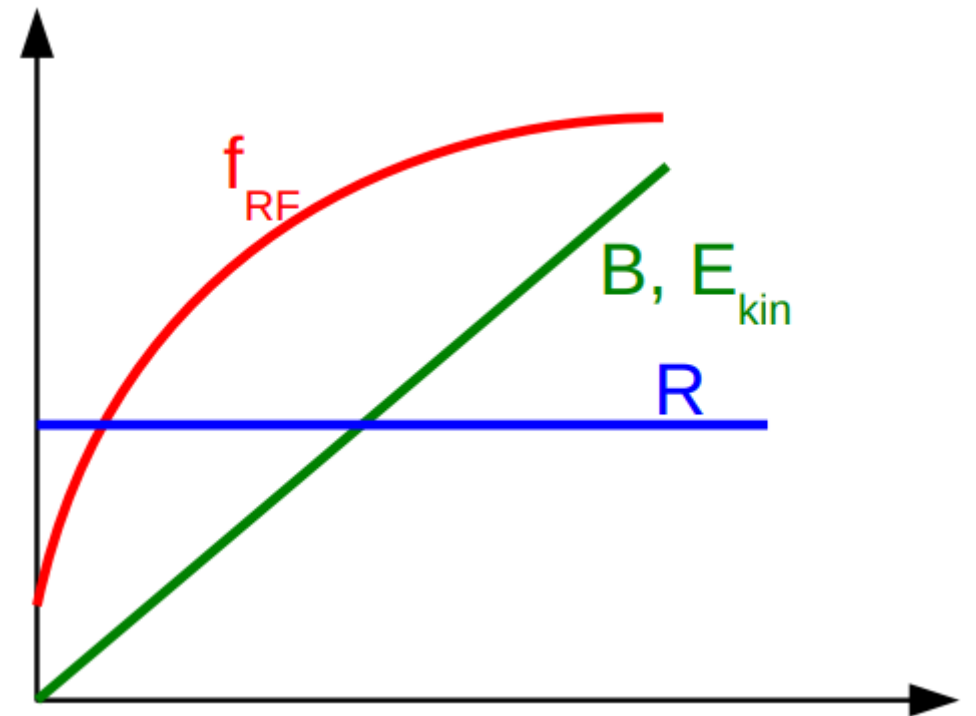
Szinkro-ciklotron

- energia növekedésével szinkronban csökkentik a rádiófrekvenciát



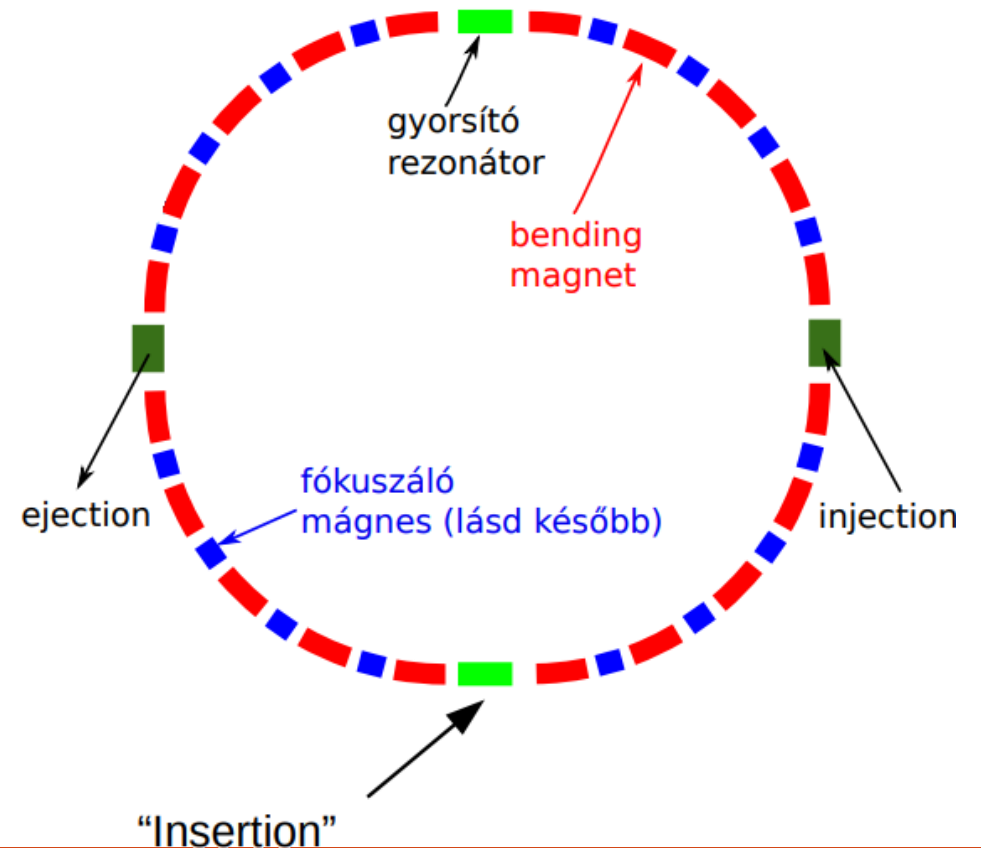
Szinkrotron – gyorsító/tárológyűrű

- Gyorsító **frekvencia** és a **mágneses tér idővel nő**, hogy a részecskepálya sugara ne változzon
- Elég csak a körpálya mentén létrehozni mágneses teret
- Jóval nagyobb gyorsítók építhetők!
- Ütköztetőgyűrűként (két szembefutó nyaláb) a tkp energia jelentősen megnő a fix-targethez képest

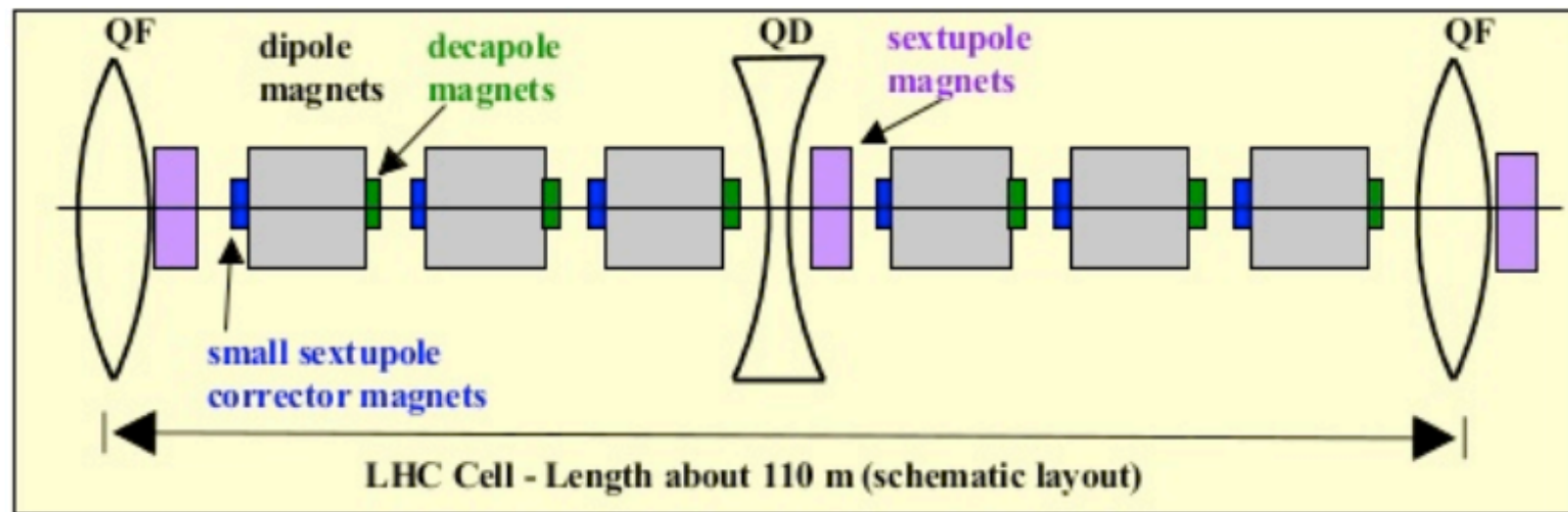
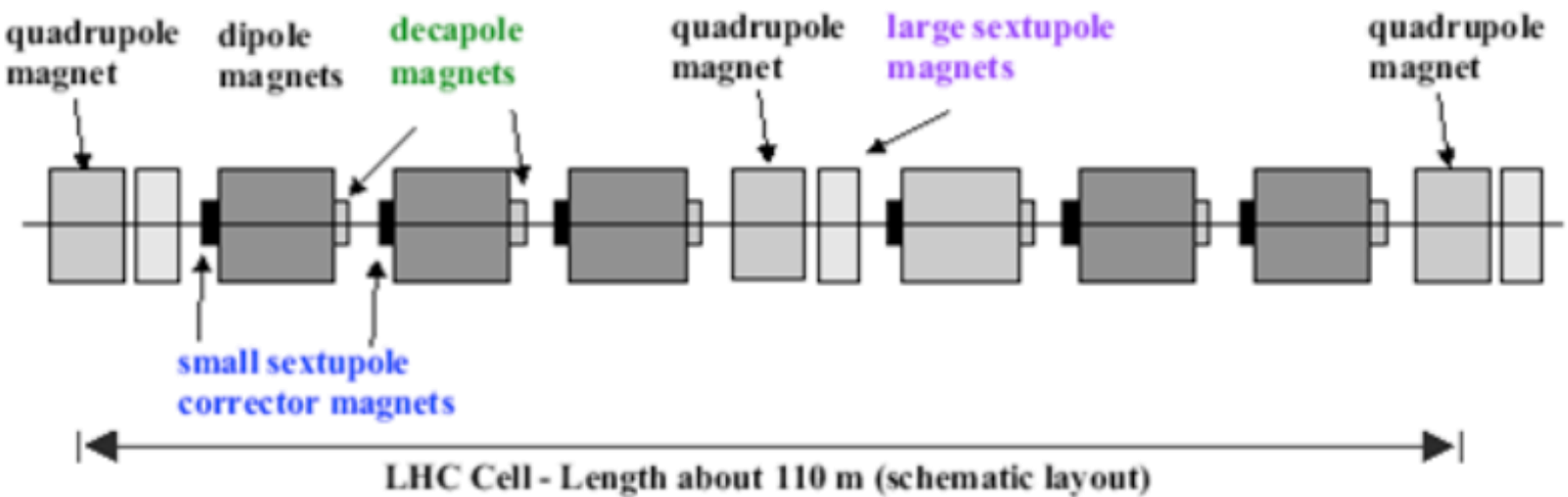


Szinkrotron – gyorsító/tárológyűrű

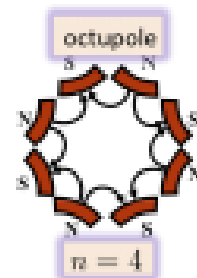
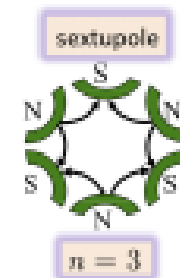
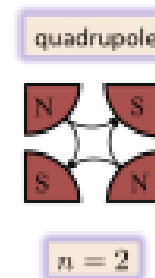
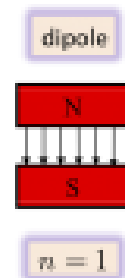
- Gyorsító frekvencia és a mágneses tér idővel nő, hogy a részecskepálya sugara ne változzon
- Elég csak a körpálya mentén létrehozni mágneses teret
- Jóval nagyobb gyorsítók építhetők!
- Ütköztetőgyűrűként (két szembefutó nyaláb) a tkp energia jelentősen megnő a fix-targethez képest
- Eltérítés és fókuszálás szerepét külön mágnesek látják el



LHC mágnes rendszere



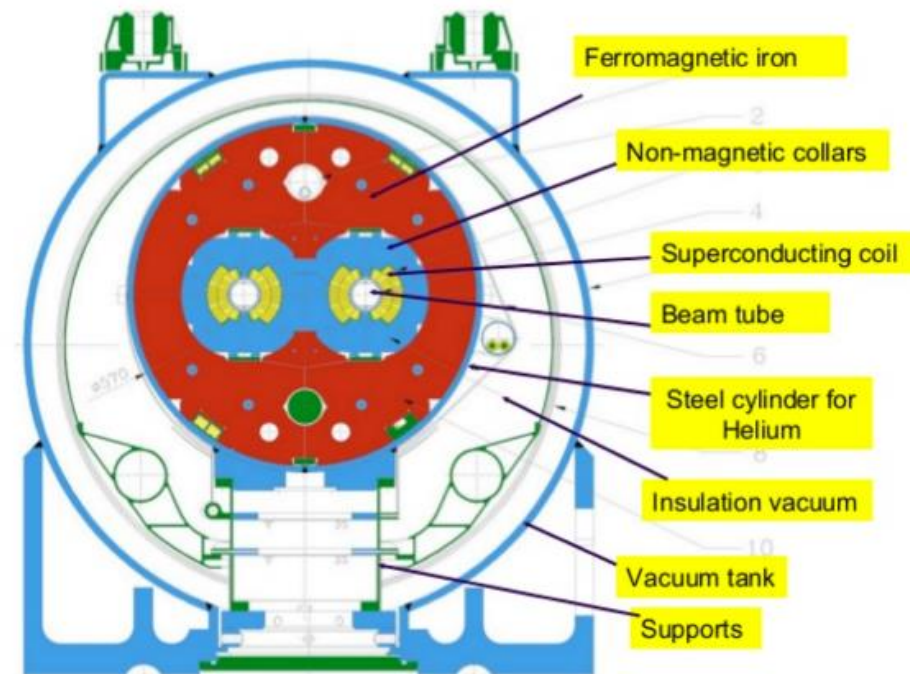
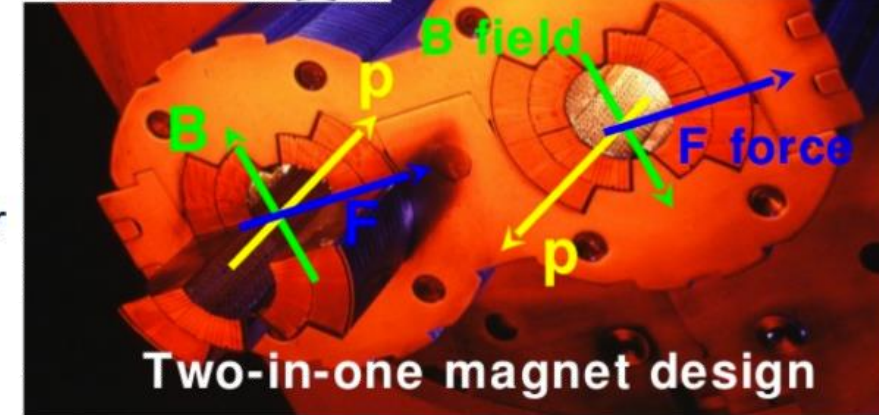
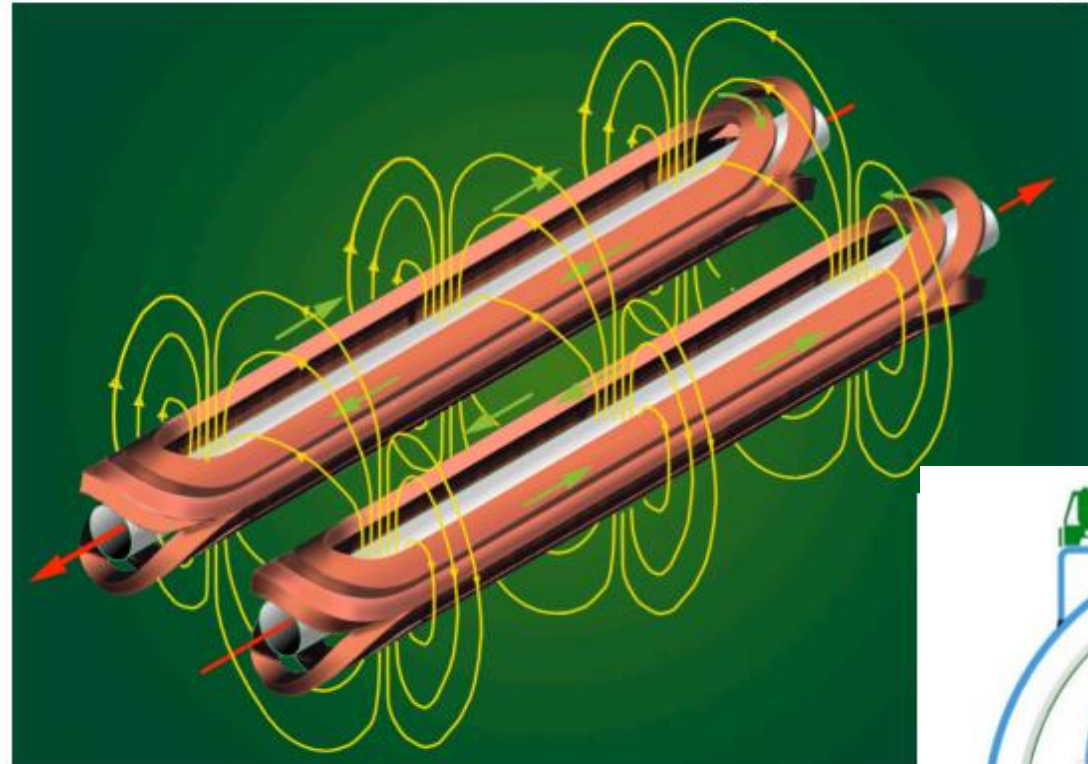
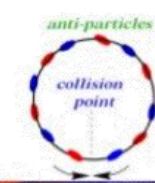
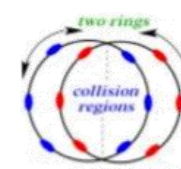
- **Dipol mágnesek** körpályán tartják a nyalábot
- **Kvadrupol mágnesek** fókuszálják a nyalábot
- **Multipol mágnesek** korrigálnak, a dipol mágnesek végénél javítják a dipol mágnesek terének eltéréseit



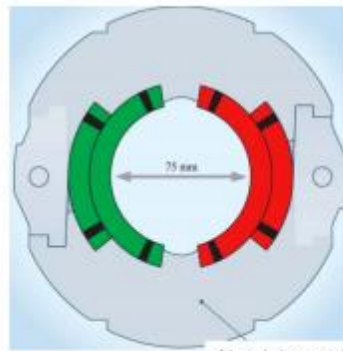
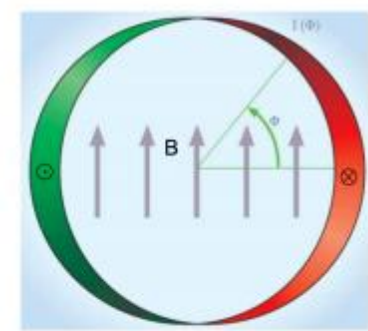
LHC dipól mágnesek

11800 A @ 8.3 T

Tekercsek pozíciójának nagyon pontosnak kell lennie, hogy a dipól tér minősége jó legyen

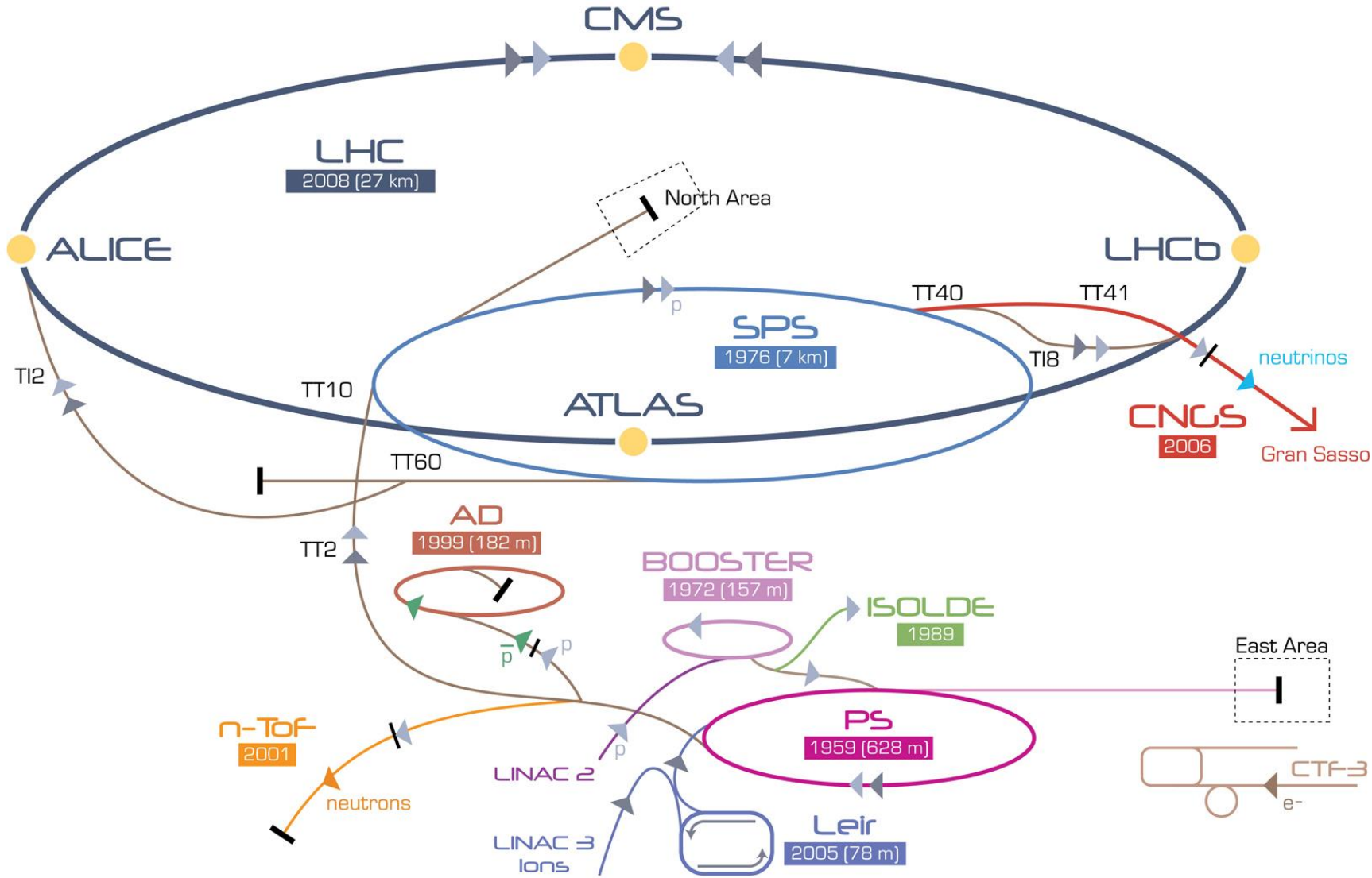


Weight (magnet + cryostat) ~ 30 tons, length 15 m



Aluminium collar

Az LHC gyorsító-rendszere



- TKP energia 14 TeV
- Bunch-crossing: 40 MHz
- Csomag/nyaláb: 2808
- Proton/csomag: $1.15 \cdot 10^{11}$

▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ \leftrightarrow proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF-3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

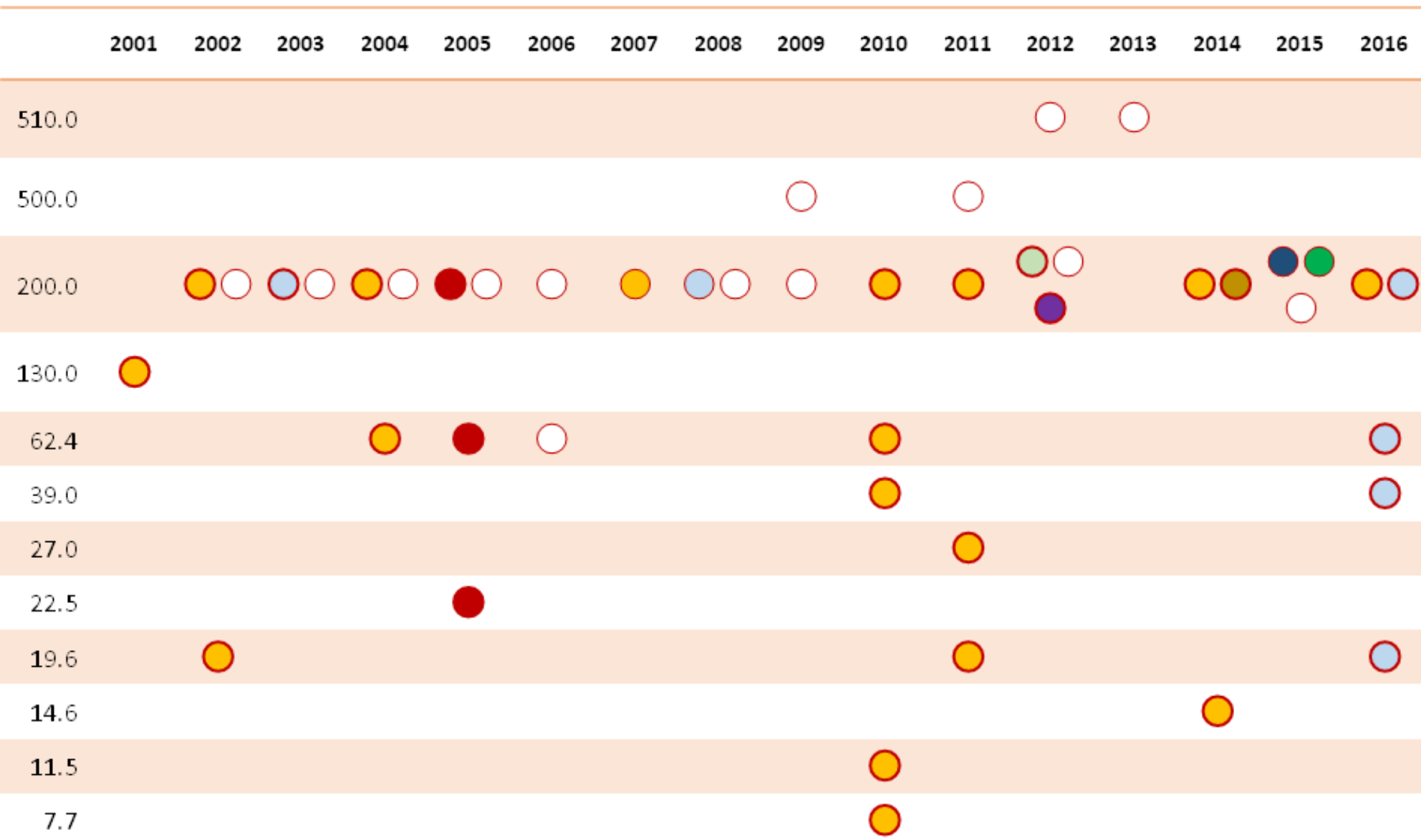
Az LHC számokban

	LHC (CERN)		
Physics start date	2009	2015 (expected)	2023 (HL-LHC)
Physics end date	—		
Particles collided	pp		
Maximum beam energy (TeV)	4.0	6.5	7.0
Maximum delivered integrated luminosity per exp. (fb^{-1})	23.3 at 4.0 TeV 6.1 at 3.5 TeV	40/y to 60/y	250/y
Luminosity ($10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	7.7×10^3	$(1 - 2) \times 10^4$	5.0×10^4 (leveled)
Time between collisions (ns)	49.90	24.95	24.95
Full crossing angle (μ rad)	290	298	590
Energy spread (units 10^{-3})	0.1445	0.105	0.123
Bunch length (cm)	9.4	9	9
Beam radius (10^{-6} m)	18.8	11.1	7.4
Free space at interaction point (m)	38	38	38
Initial luminosity decay time, $-L/(dL/dt)$ (hr)	≈ 6	≈ 6	≈ 6 (leveled)
Turn-around time (min)	180	240	240
Injection energy (TeV)	0.450	0.450	0.450
Transverse emittance ($10^{-9}\pi$ rad-m)	0.59	0.28	0.36
β^* , ampl. function at interaction point (m)	0.6	0.45	0.15
Beam-beam tune shift per crossing (units 10^{-4})	72	79	110
RF frequency (MHz)	400.8	400.8	400.8
Particles per bunch (units 10^{10})	16	12	22
Bunches per ring per species	1380	2508	2760
Average beam current per species (mA)	400	540	1200

Circumference (km)	26.659
Interaction regions	4 total, 2 high \mathcal{L}
Magnetic length of dipole (m)	14.3
Length of standard cell (m)	106.90
Phase advance per cell (deg)	90
Dipoles in ring	1232 main dipoles
Quadrupoles in ring	482 2-in-1 24 1-in-1
Magnet type	s.c. 2 in 1 cold iron
Peak magnetic field (T)	8.3

A RHIC gyorsító- rendszere





RHIC Beam Energy Scan

See details at <http://www.rhichome.bnl.gov/RHIC/Runs/>