

Részecskegyorsítók

Barna Dániel

barna.daniel@wigner.hu

<http://wigner.hu/~barna>

Wigner Fizikai Kutatóközpont

- Mértékegységek, töltött részecskék manipulálása
 - Részecskegyorsítók a mindennapi életünkben
 - Miért akarunk **nagyenergiás** gyorsítókat?
 - A klasszikus nagyenergiás gyorsítók részei és alapelvek
 - Egyéb gyorsító típusok
 - Kitekintés, tervek...
-

Részecskegyorsítók 1 mondatban

- Cél: adott

- energiával/impulzussal (illetve ezek szórásával)
- mérettel és fókuszáltsággal
- részecsketípussal
- idő-struktúrával

rendelkező részecskenyaláb előállítás.

- Módszer:

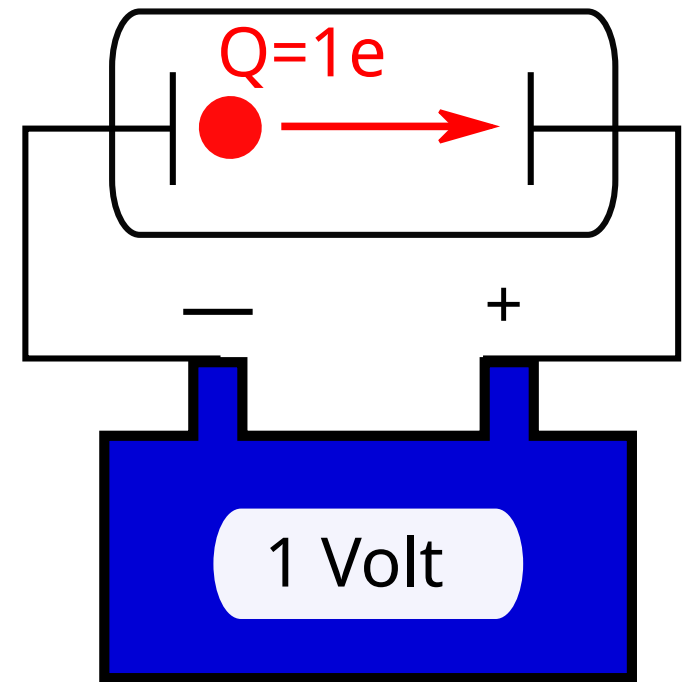
- Folyamatos fókuszálás (ne szaladjon szét a nyaláb)
 - Gyorsítás
 - Egyenes (egyszeri áthaladás) vagy körkörös (többszöri áthaladás) pályán
 - Elektromágneses kölcsönhatás segítségével
-

Mértékegységek

Töltött részecskék manipulálása

Energia mértékegység

- 1 elektronvolt = $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV
keV = 1000 eV
MeV = 10^6 eV
GeV = 10^9 eV
TeV = 10^{12} eV

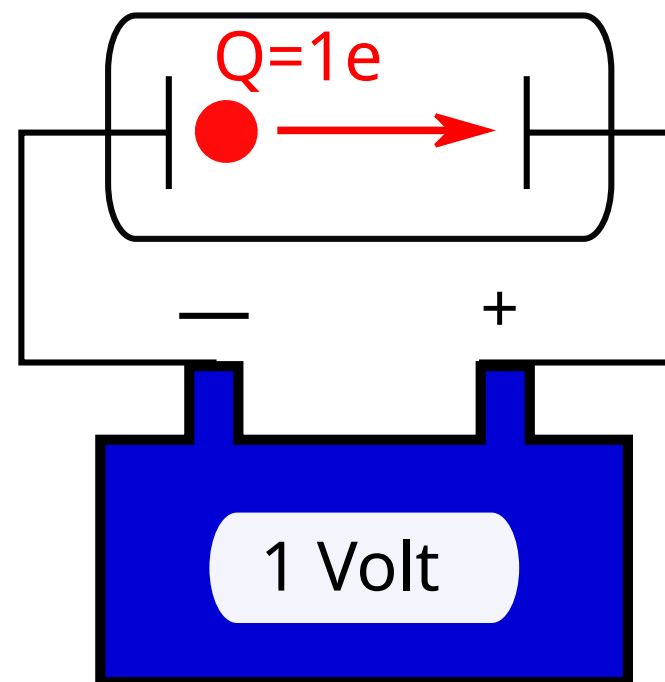


Nagyenergiás fizika

Brutálisan nagy energia

Energia mértékegység

- 1 elektronvolt = $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV
keV = 1000 eV
MeV = 10^6 eV
GeV = 10^9 eV
TeV = 10^{12} eV



Egy átlagos termetű hangya helyzeti energiája ? mm magasságban



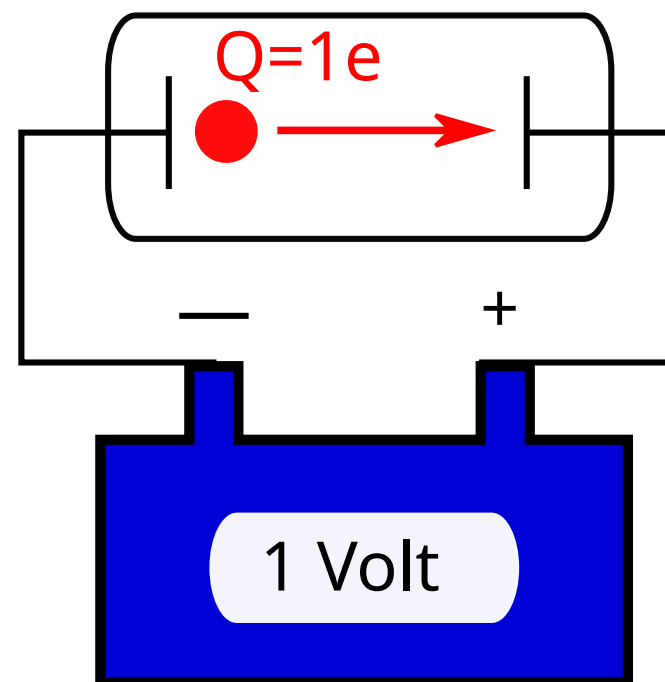
? mm

Energia mértékegység

- 1 elektronvolt = $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV
keV = 1000 eV
MeV = 10^6 eV
GeV = 10^9 eV
TeV = 10^{12} eV

Ez tényleg extrém energia???

2 mm



Egy átlagos termetű hangya helyzeti energiája 2 mm magasságban



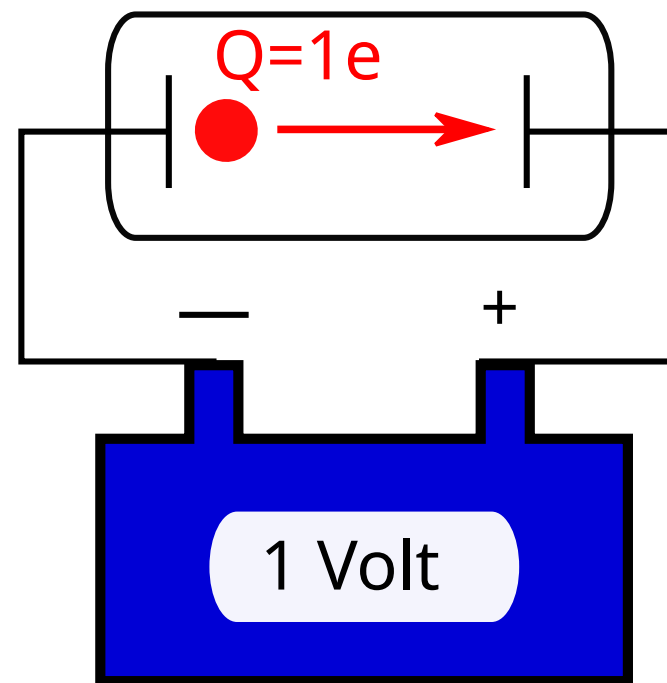
Energia mértékegység

- 1 elektronvolt = $e \cdot V$
- 1 elemi töltésű részecske 1 Volt potenciálkülönbség befutása során szerzett energiája
- eV
keV = 1000 eV
MeV = 10^6 eV
GeV = 10^9 eV
TeV = 10^{12} eV

Ez tényleg extrém energia???

Egyetlen protonnak igen!!

2 mm



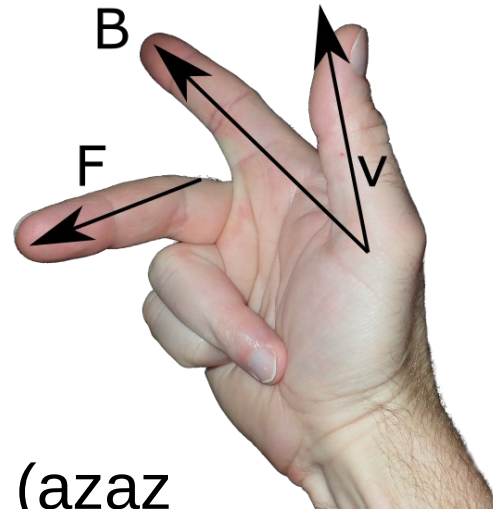
Egy átlagos termetű hangya
helyzeti energiája 2 mm magasságban



Töltött részecskék manipulálása

Mágneses tér: B

$$F = q \vec{v} \times \vec{B}$$



- Munkát nem végez (azaz **NEM “GYORSÍT”, nem tudja növelni az energiát!!!**)
- Csak **ELTÉRÍT**
- A részecske sebességével nő, tehát nagy energián hatékony

Elektromos tér: E

$$F = q \vec{E}$$

- **CSAK az elektromos tér tud “gyorsítani” - mármint növelni az energiát**
- Természetesen eltéríteni is tud, de..
- ..nem növekszik a részecske sebességével
- Kis energián praktikus eltérítésre, fókuszálásra

Nagy energián ($v=c$): 1 Tesla \leftrightarrow 300 millió Volt/méter

- Mágneseket használunk eltérítésre és fókuszálásra
- Elektromos teret gyorsításra

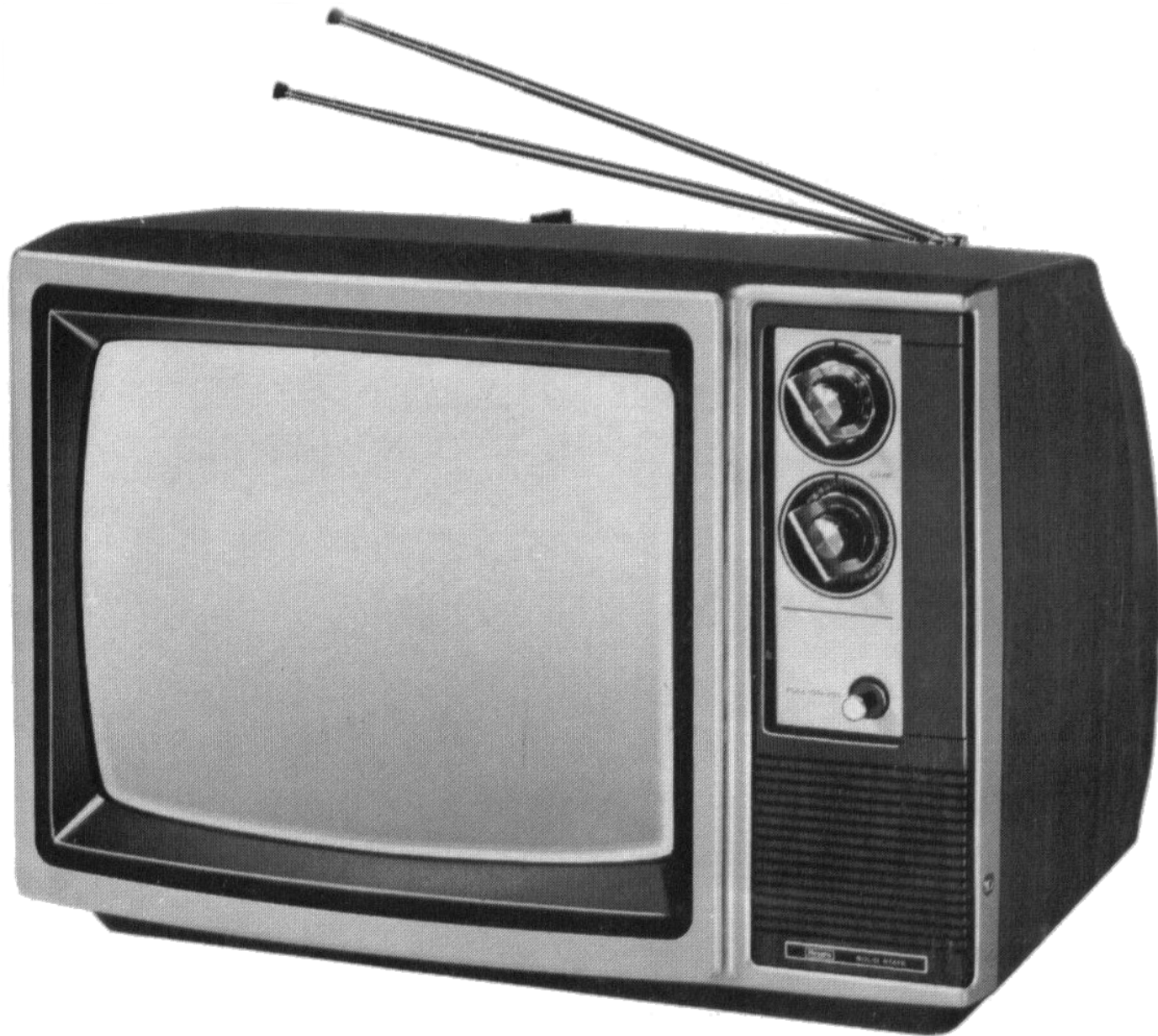
Részecskegyorsítók a mindennapi életünkben, a háztartásban

- http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/talks/frzap1_talk.pdf

Ezeket/őket nem nevezzük részecskegyorsítónak



Ezt sem, pedig az: katódsugaras TV

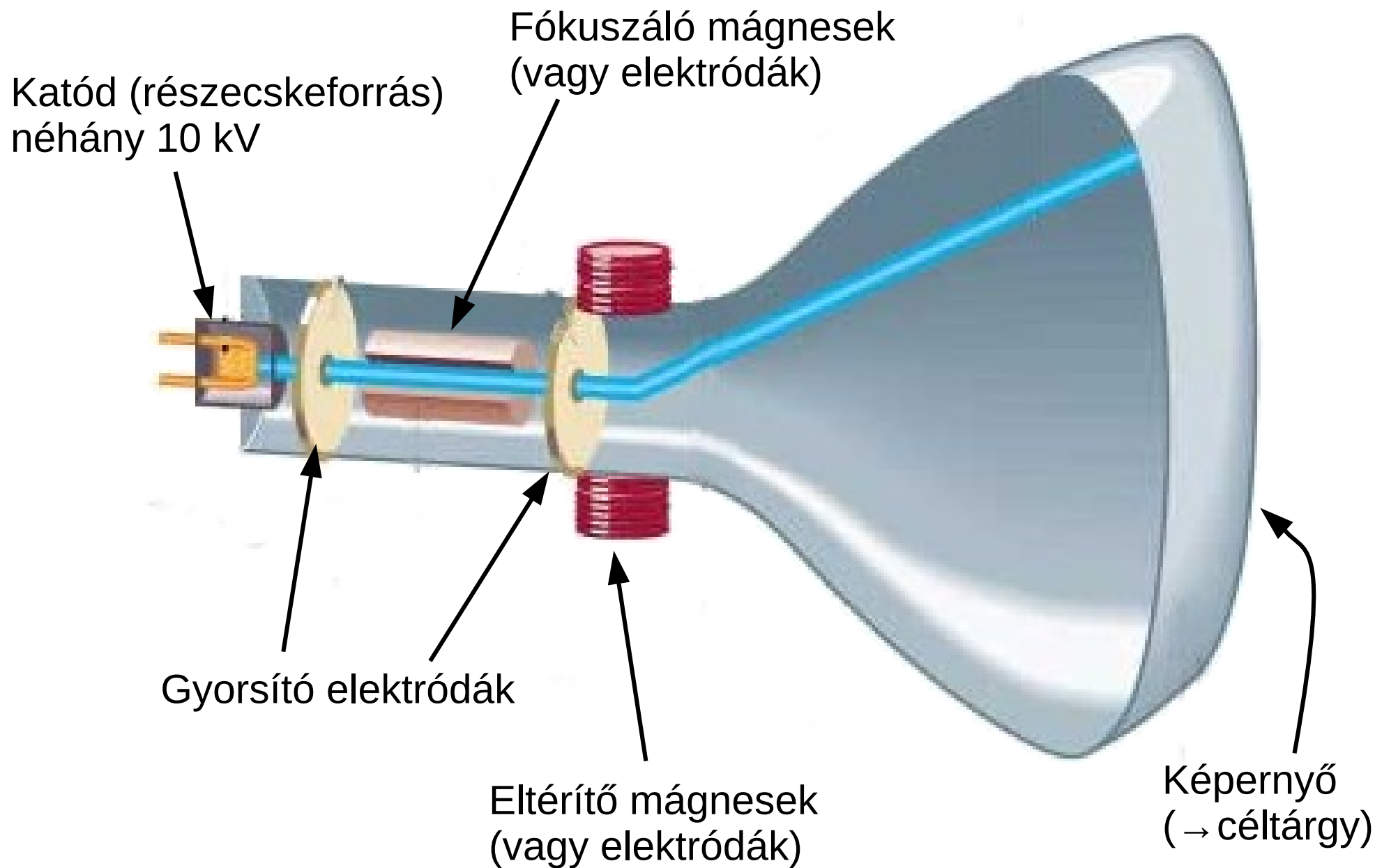


Ezt sem, pedig az: katódsugaras TV



<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Crt14.jpg>

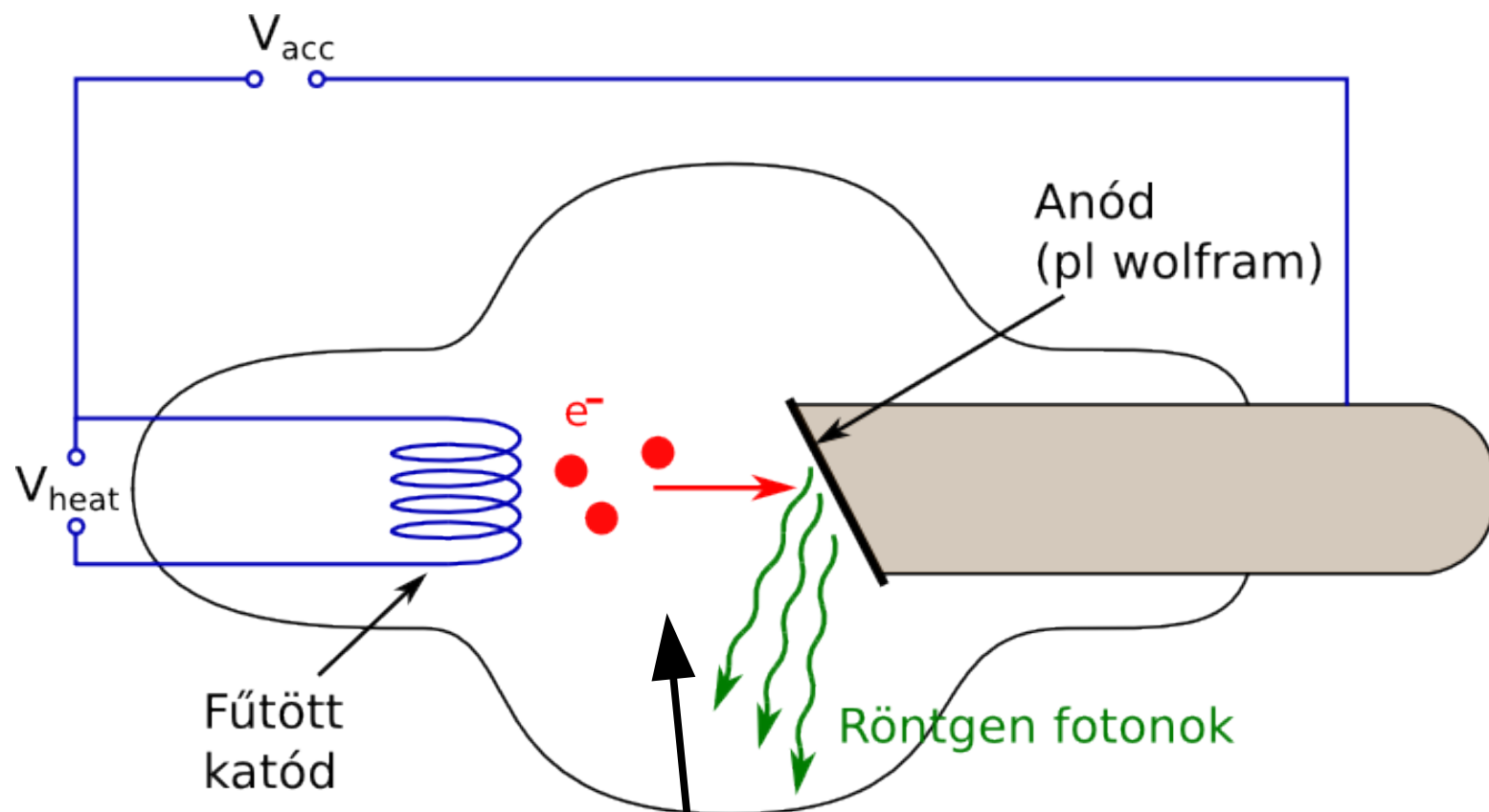
Ezt sem, pedig az: katódsugaras TV



Katódsugaras TV

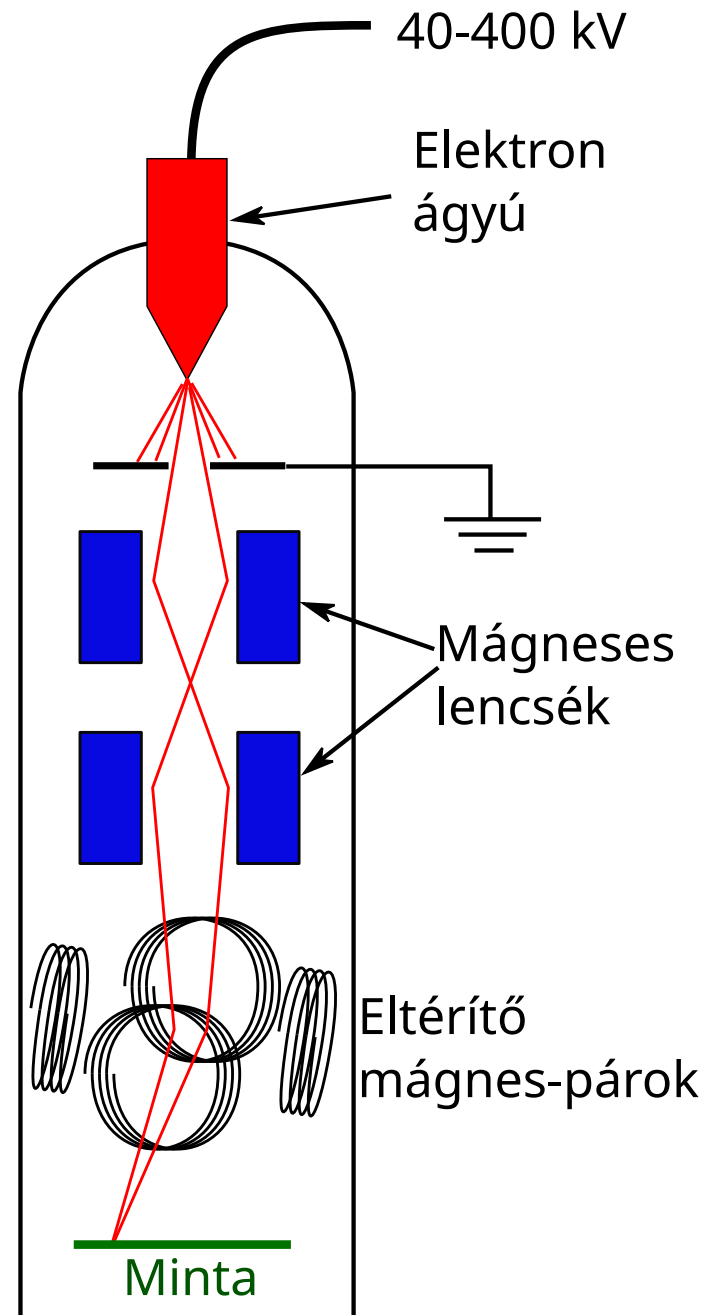
- Ne dobjuk ki a régi TV-t, vigyük be a fizika szertárba!
- Ki tudja meddig találunk még ilyen egyáltalán
- Olcsó és nagyon tanulságos szemléltetőeszköz
- Egy erős mágnessel (pl. rossz merevlemezből lehet kiszerezni) lehet demonstrálni a mágneses tér hatását az elektronokra

Röntgen-cső

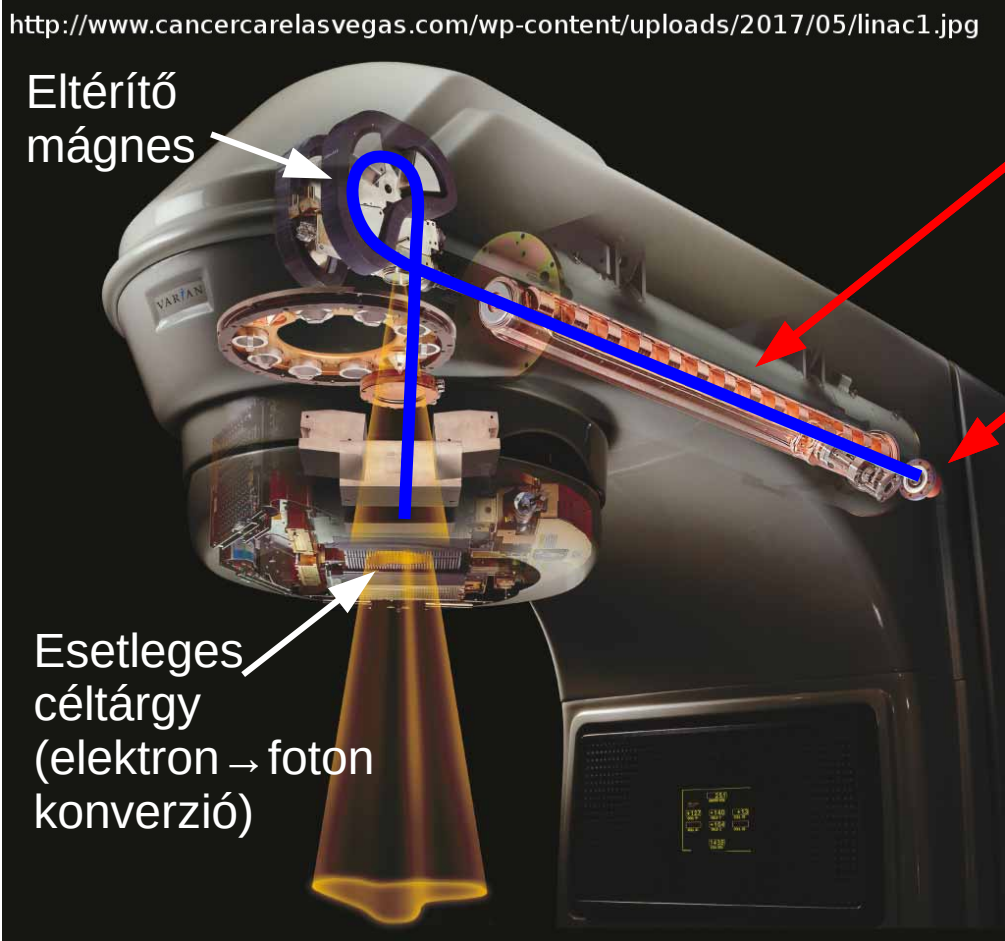


10-100 keV mini
elektrosztatikus
elektron-gyorsító

Elektron mikroszkóp



Orvosi alkalmazás: fotonterápia



Rádiófrekvenciás lineáris gyorsító (linac)

Részecskeforrás (elektronágyú)



Orvosi alkalmazás: protonterápia

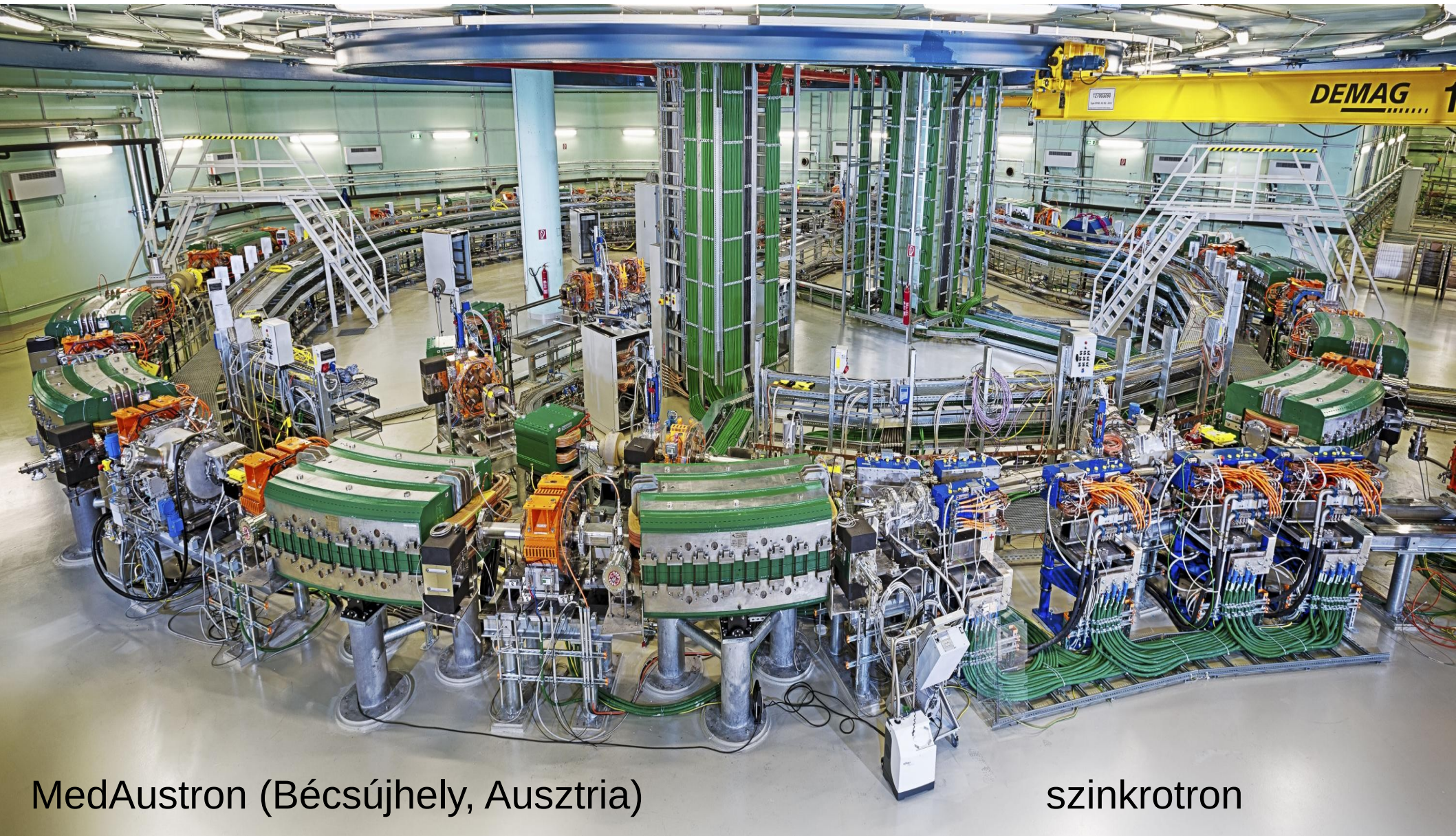
Proton
Therapy
Center

Prága



Ciklotron

Orvosi alkalmazás: hadronterápia (p, C)



MedAustron (Bécsújhely, Ausztria)

szinkrotron

Anyagvizsgálat



Wigner Fizikai Kutatóközpont

- 5 MeV-es protonnyaláb
- PIXE – roncsolásmentes vizsgálatok
- Eredetiség-vizsgálat
- Rejtett rétegek felfedezése
- Anyagösszetétel vizsgálata

Félvezetőgyártás, ion implantáció



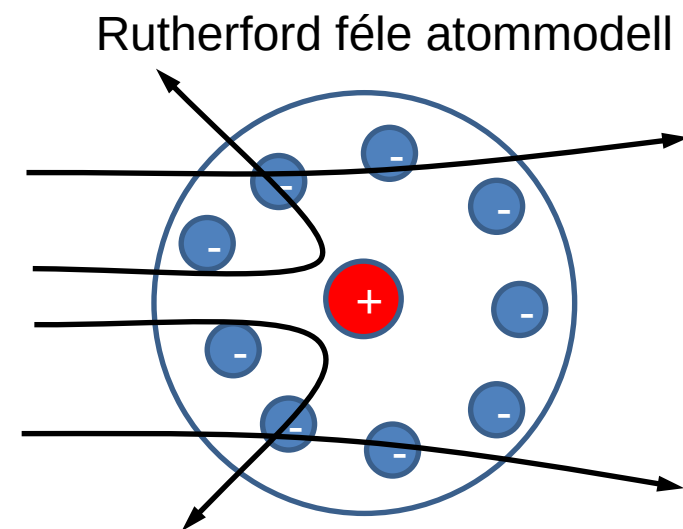
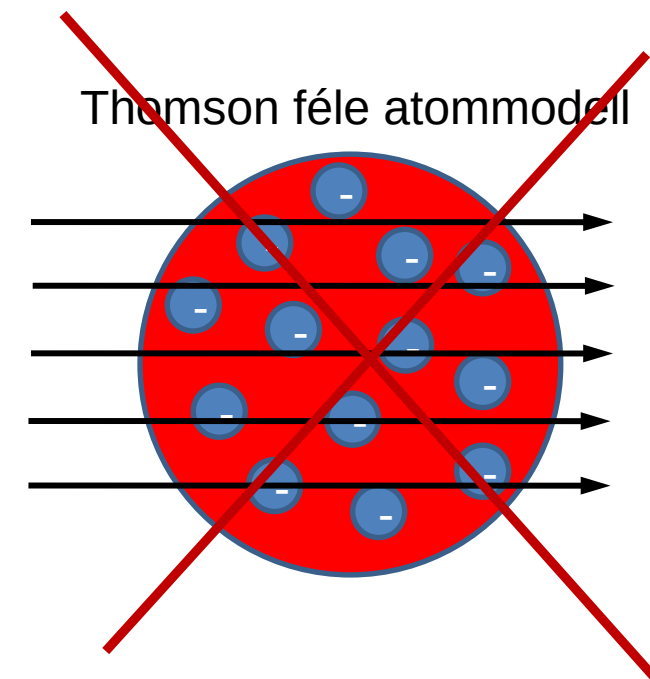
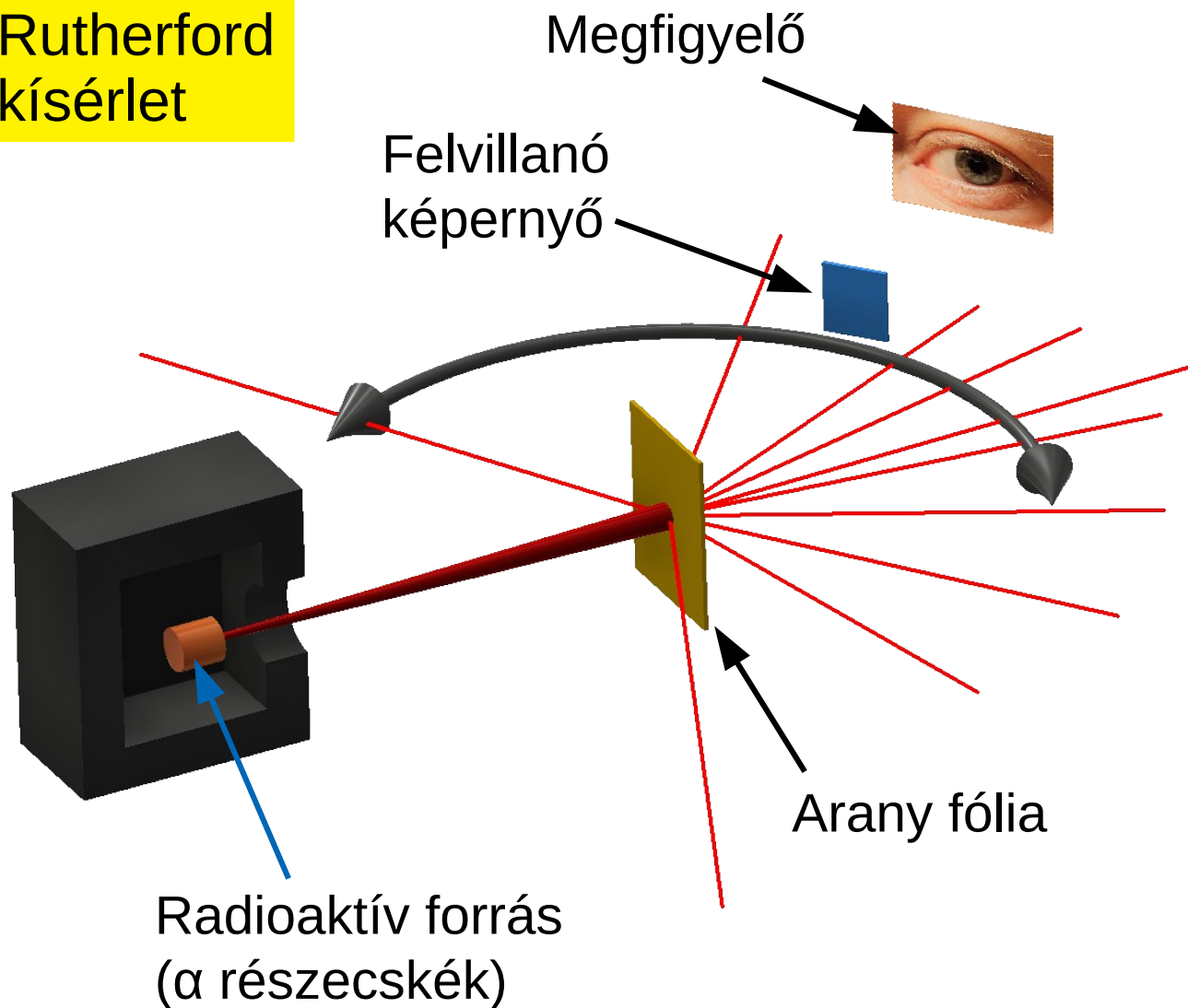
Részecskegyorsítók felhasználása világszerte

- Világszerte kb. 30000 részecskegyorsító üzemel
- 44% sugárterápiás kezelés (60-250 MeV)
- 41% ion implantáció (~ 100 keV nagyságrend), pl
 - félvezető gyártás (számítógépek, mikroelektronika)
 - fém felületkezelés (pl nitrogén implantáció) késekbe, fűrőhegyekbe
- ipari alkalmazás, kutatás
- élelmiszeripar (fertőtlenítés, tartósítás, csomagolás)
- orvosbiológiai alkalmazás, kutatás
- orvosi rádióizotóp gyártás
- 1% nagyenergiás (>1 GeV) fizika
 - Energia világcsúcstartó: LHC 14 TeV (7+7 TeV)

Miért akarunk nagyenergiás gyorsítókat?

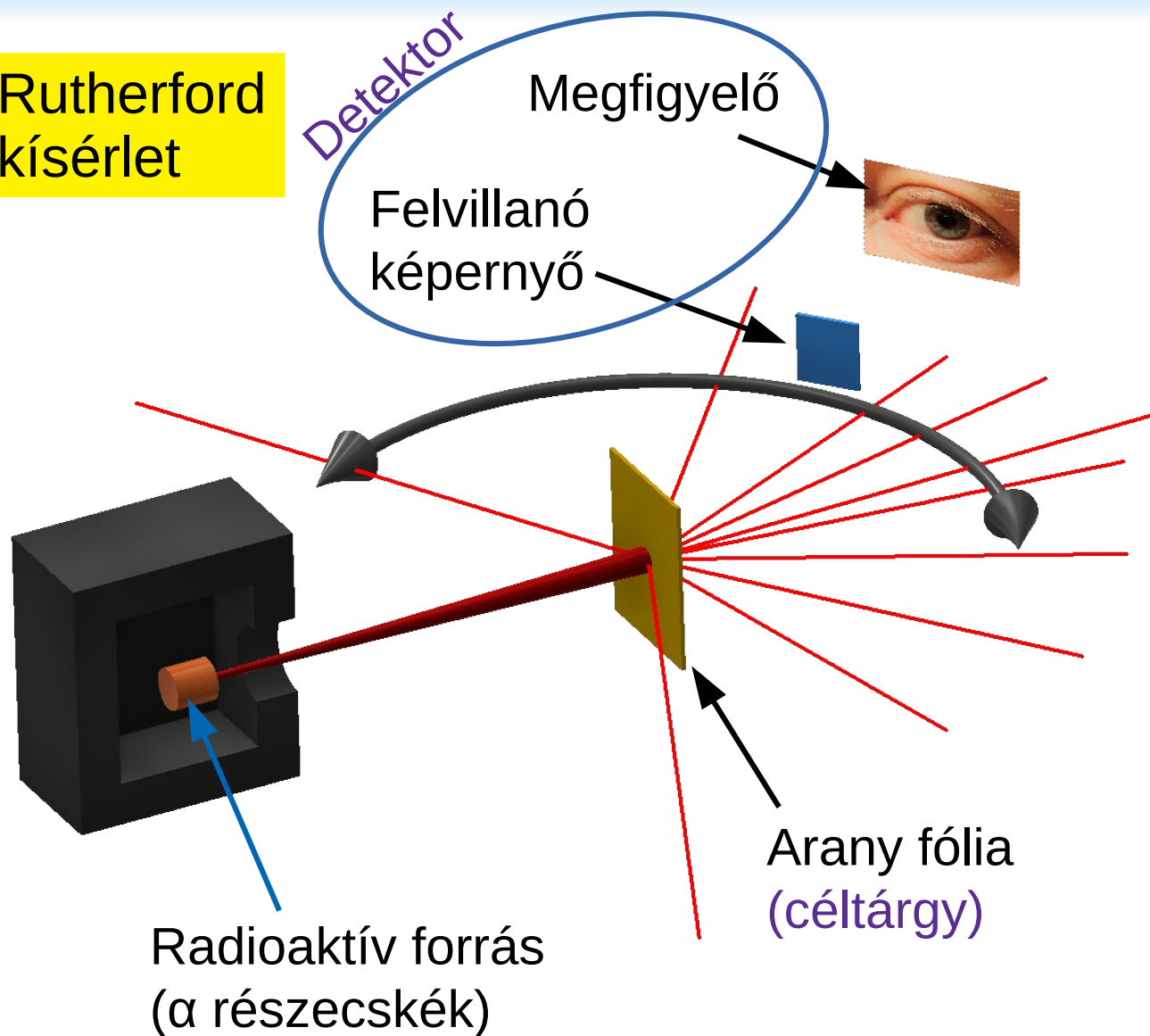
A részecskefizika hajnala

Rutherford kísérlet



A részecskefizika hajnala

Rutherford
kísérlet

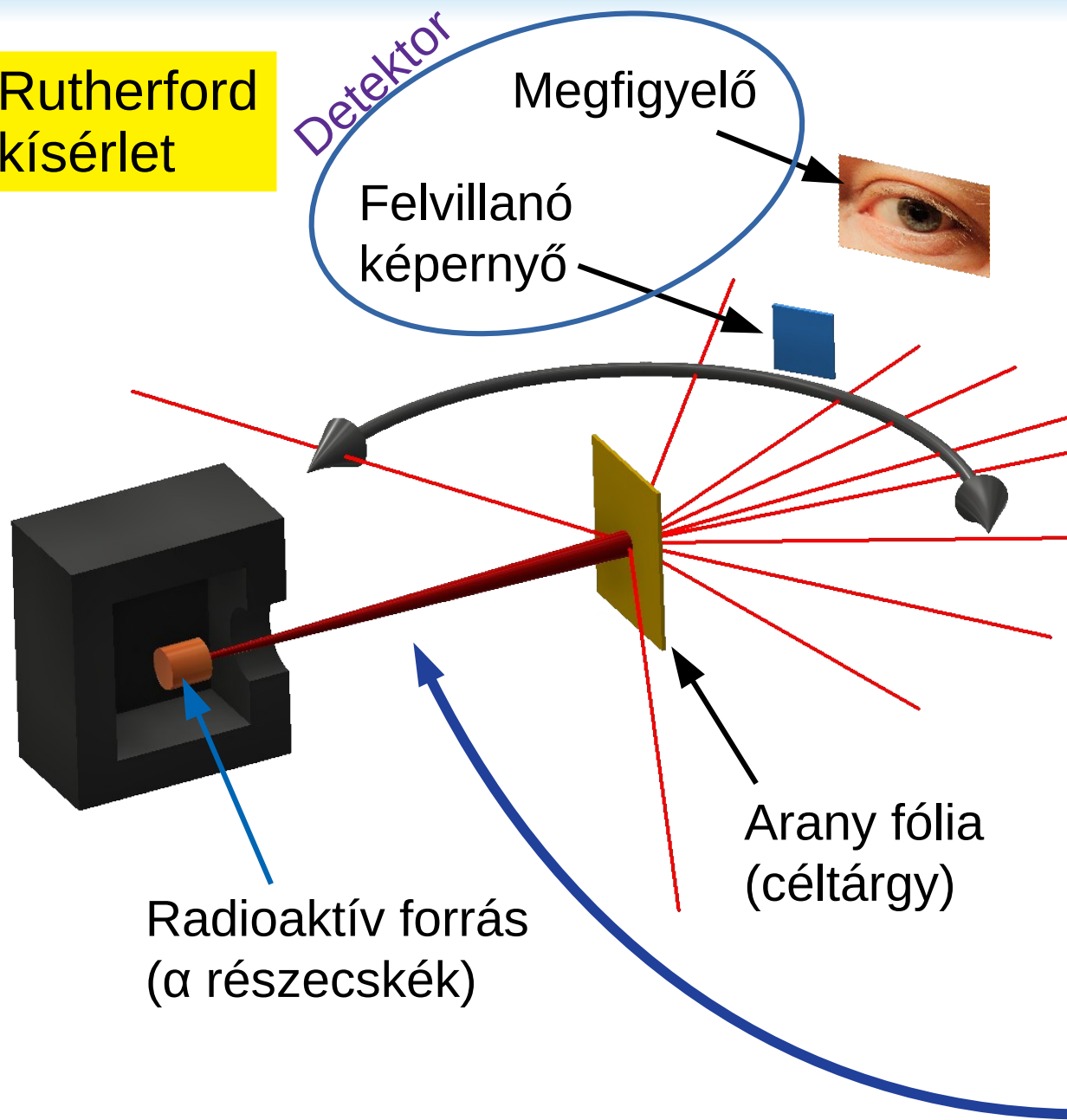


A mai
részecskefizikai
kísérletek szinte
minden eleme
megtalálható volt...

Mi hiányzott mégis?

A részecskefizika hajnala

Rutherford
kísérlet



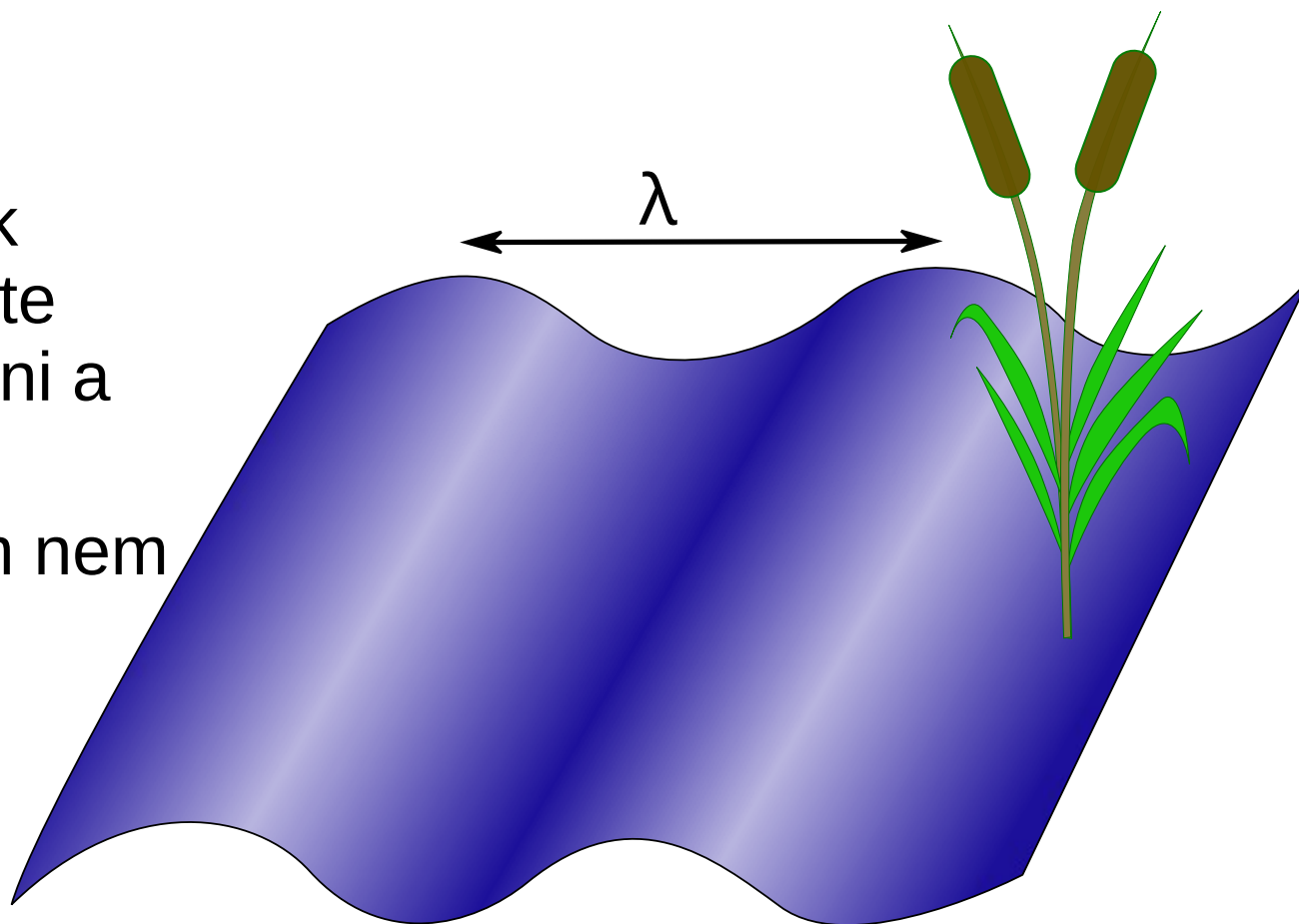
Rutherford (1927):
„Szükségünk van egy 10 millió volt körüli feszültség előállítására képes berendezésre, [.....] Szükségünk van továbbá egy vákumcsőre, amiben ez a feszültség előállítható.... „

magyarul: kéne egy
részecskegyorsító ide...

Apropó mikroszkóp....

A mikroszkóp felbontását a használt fény (vagy általában: sugárzás) hullámhossza limitálja.

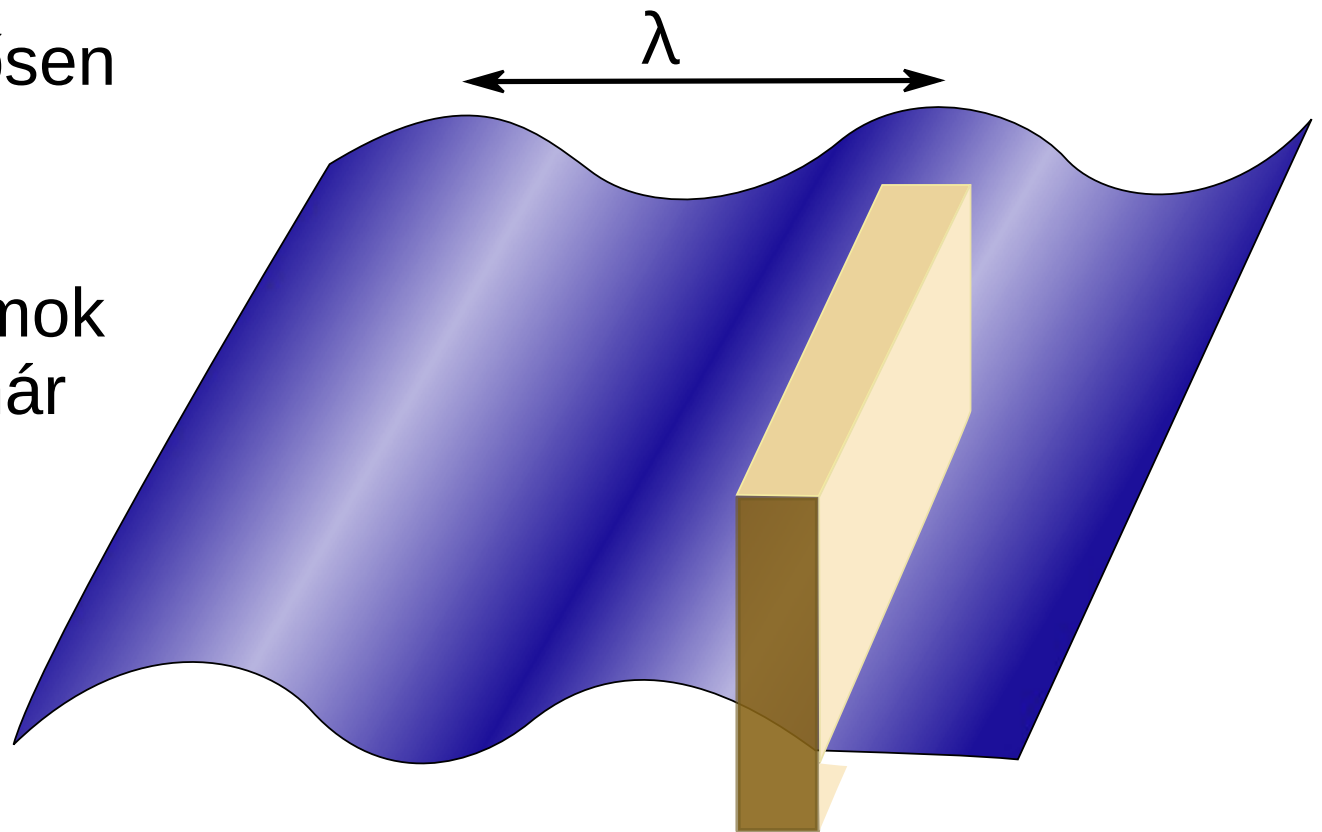
- Nádszál $\ll \lambda$
- A nádszál “nem sok vizet zavar”, mögötte nem fog megváltozni a hullámforma
- Ez a hosszú hullám nem alkalmas a kis objektumok feltérképezésére



Apropó mikroszkóp....

A mikroszkóp felbontását a használt fény (vagy általában: sugárzás) hullámhossza limitálja.

- $F \approx \lambda$
- A fal mögött jelentősen megváltozik a hullámforma
- Ekkora (λ) objektumok feltérképezésére már használható ez a hullám

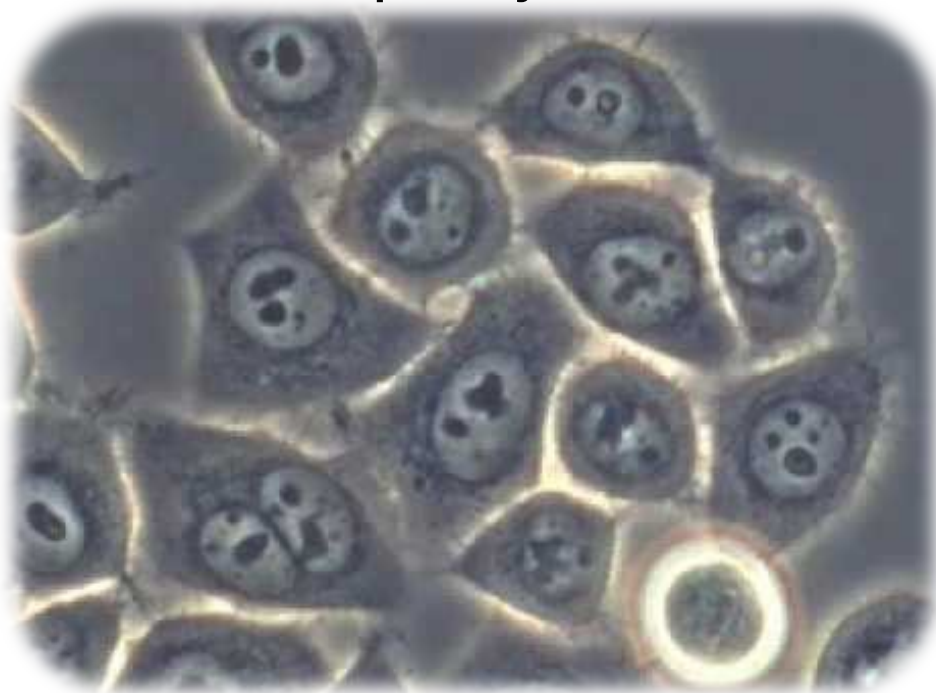


Apropó mikroszkóp....

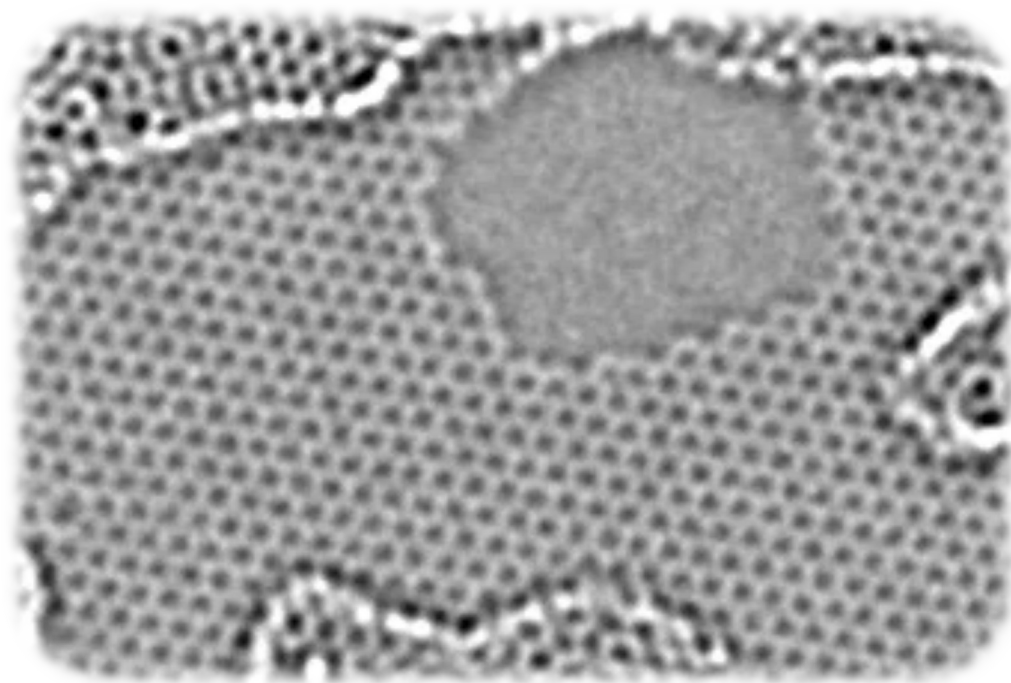
de Broglie összefüggés: $\lambda = \frac{h}{p}$

Nagyobb energia (impulzus) → rövidebb hullámhossz
→ nagyobb felbontás

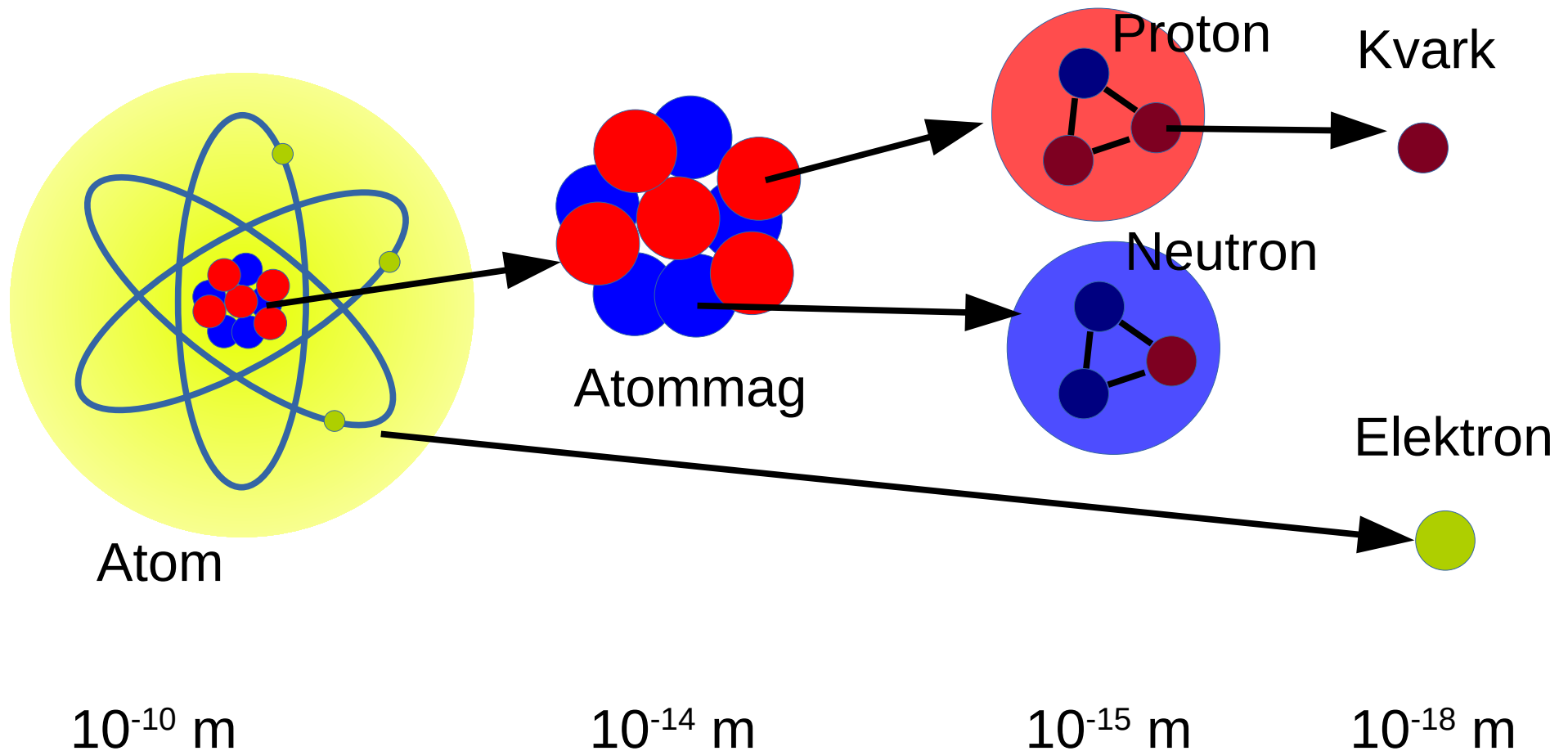
Fény: pár száz nm
pl sejtek



Elektronok: 100 pm alatt
atomok



Mit látunk még nagyobb energiájú hullámokkal? (azaz: mi van még kisebb skálán?)



Mi másért kell nagy energia – új részecskék keltése

$$E = m c^2$$

Minél nagyobb energia áll rendelkezésünkre -

annál nagyobb tömegű új, eddig nem látott részecskéket hozhatunk létre az ütközésekben, fedezhetünk fel

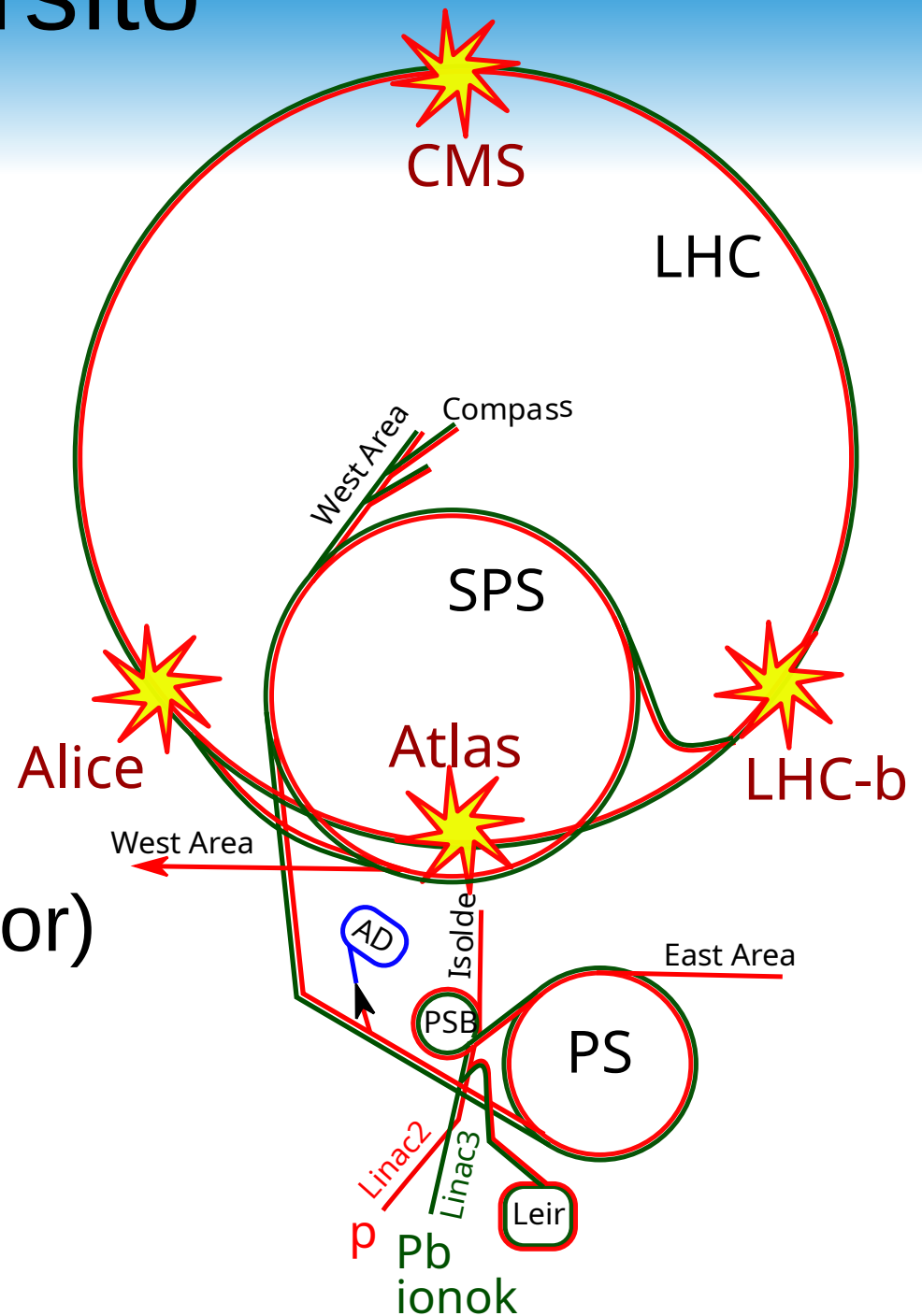
Miben más még mint a “hagyományos” mikroszkópok?

- Sokkal nagyobb
- “Hagyományos” mikroszkópban “valami más objektumot” vizsgálunk egy adott sugárzással
- A nagyenergiás gyorsítóknál használt “hullám” v. “sugárzás” által vizsgált “minta” már gyakran saját maga... :
- ha két nyalábot egymásnak ütköztetünk.

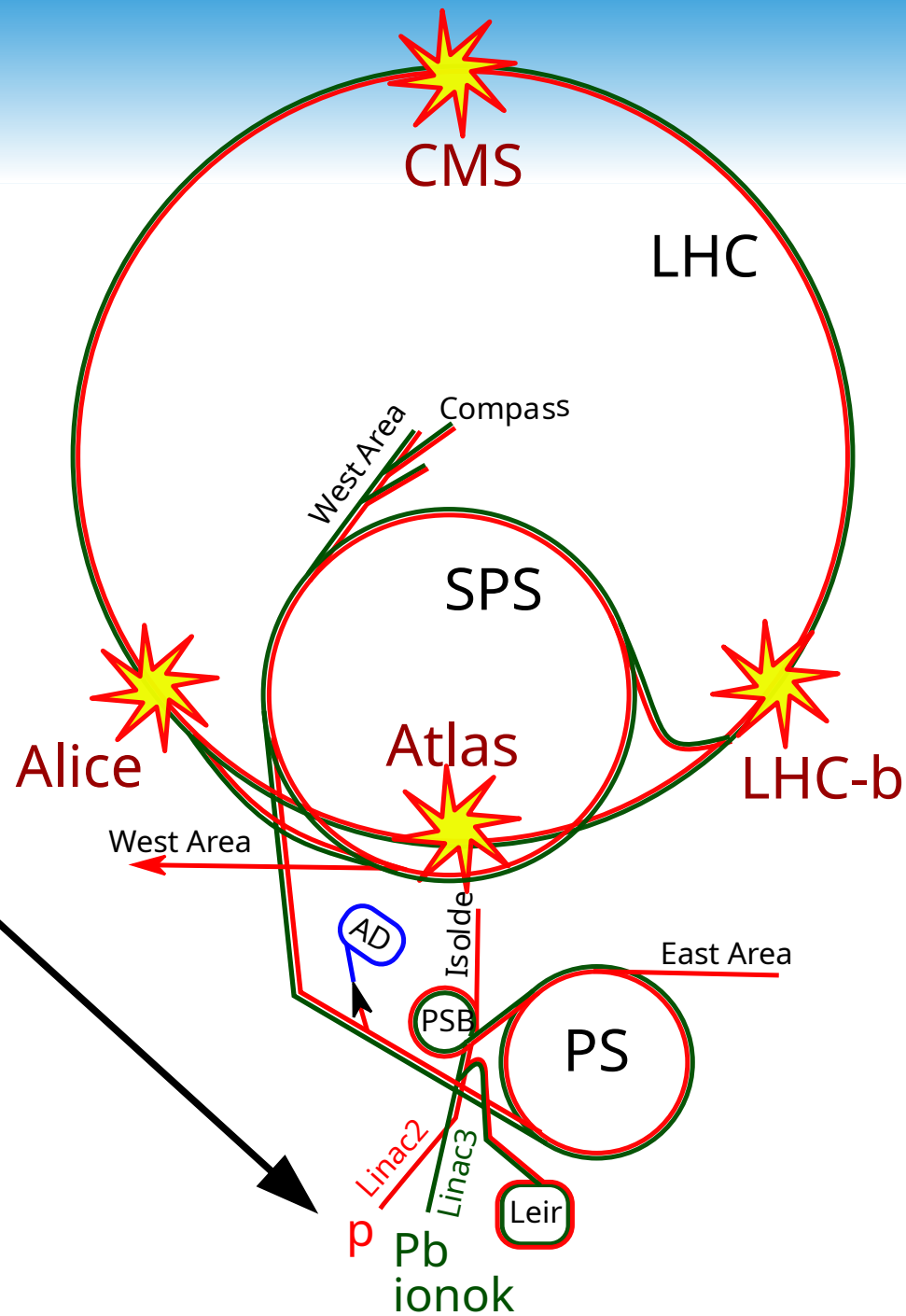
Klasszikus nagyenergiás gyorsítórendszerek és alkotóelemeik

Nagyenergiás gyorsító komplexumok

- Több fokozatból állnak:
- Forrás
- Lineáris szakasz (linac = **linear accelerator**)
- Gyűrű szakaszok



A részecskeforrás



Mennyi hidrogént fogyasztunk?

CERN-LHC:

- $\sim 10^{11}$ proton egy csomagban
- 2808 csomag kering egy irányban
- $\sim 5 \times 10^{14}$ proton van egyszerre a gyűrűben
- 10 óránként töltik újra a gyűrűt
- **10^6 év alatt használ el (az LHC) 1 g hidrogént**
- A teljes CERN gyorsítókomplexum (más gyorsítók és kísérletek) összesen kb 50x ennyi hidrogént fogyasztanak.

Paul Scherrer Institute (PSI) – Svájc
Ciklotron gyorsító, a világ legintenzívebb,
folyamatos proton nyalábja: 2.2 mA
500 nap alatt 1 g hidrogént

(kitérő: elektrosztatikus gyorsítás)



- KFKI Wigner Fizikai Kutatóközpont **Van de Graaff** gyorsítója
- Elektrosztatikus gyorsító
- Mekkora energia... azaz hány volt???

(kitérő: elektrosztatikus gyorsítás)

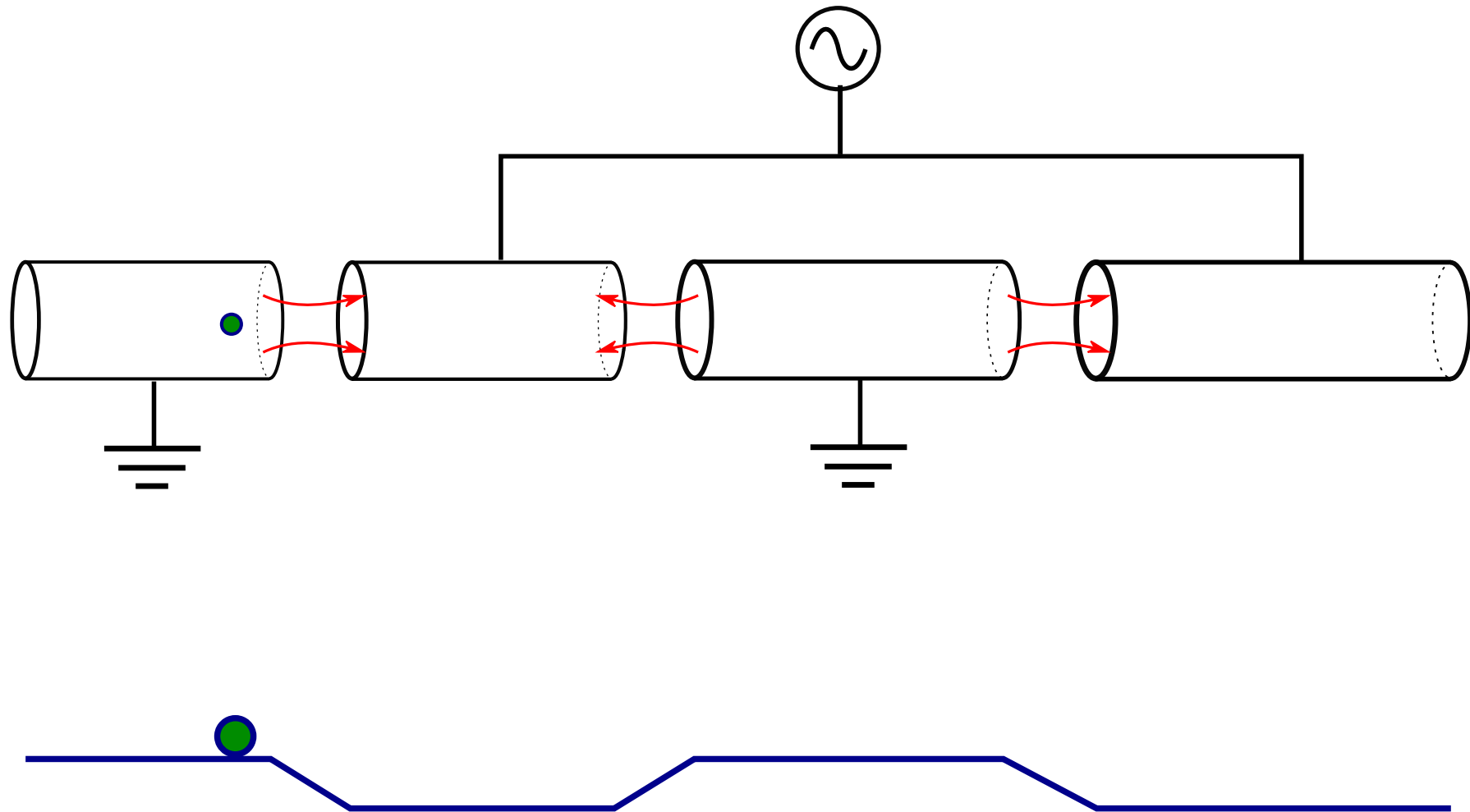


- KFKI Wigner Fizikai Kutatóközpont **Van de Graaff** gyorsítója
- Elektrosztatikus gyorsító
- Mekkora energia... azaz hány volt???
- **5 MeV → 5 millió volt!**
- Nagy méretek
- Elektromos átütés veszélye
- Nem nagyon lehet ezt az energiát meghaladni
- (A fizika szertár nagyon hatásos eszköze egy Van de Graaff generátor!!!)

Magasabb energia – hogyan?

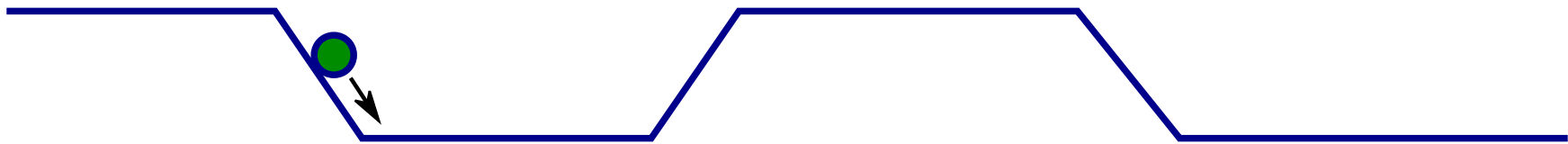
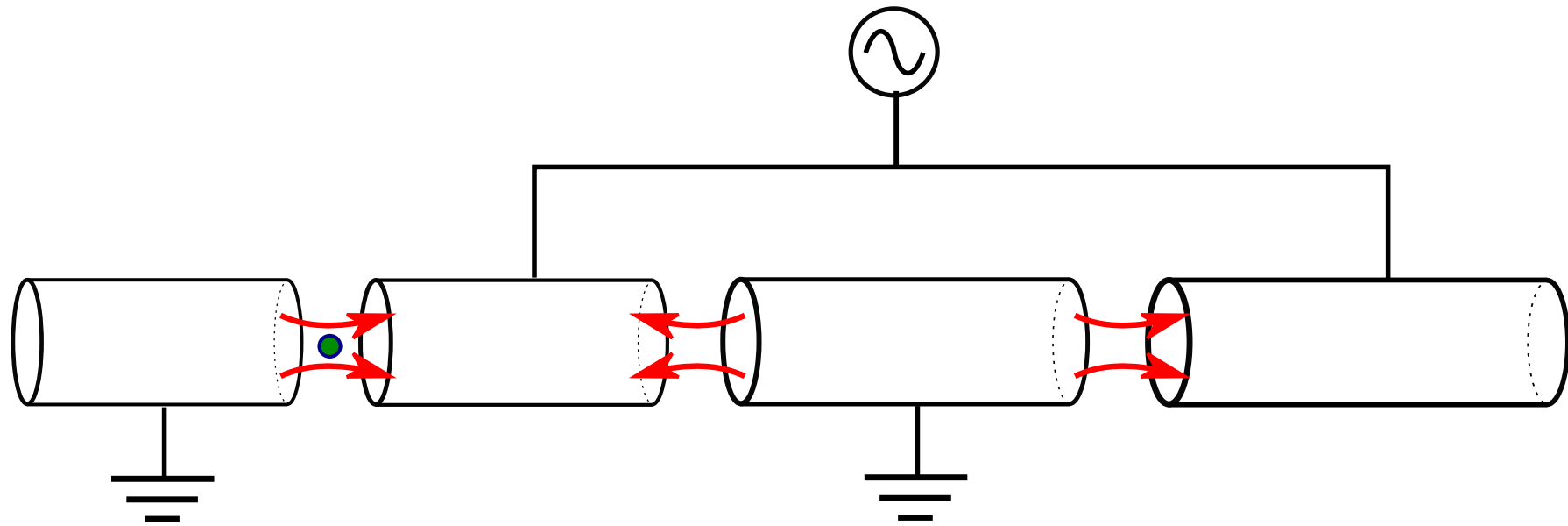
- Nem lehetne valahogyan többször felhasználni ugyanazt a teret? Minden áthaladásnál gyorsítana...
- NEM – az elektrosztatikus tér konzervatív, a részecske mozgási energiája kizárólag a helyének a függvénye, függetlenül attól, hogy milyen úton jutott oda.
- Ha az elektrosztatikus térrel ez nem működik, talán időben változó tér.... ?
- **IGEN!**

Wideroe linac



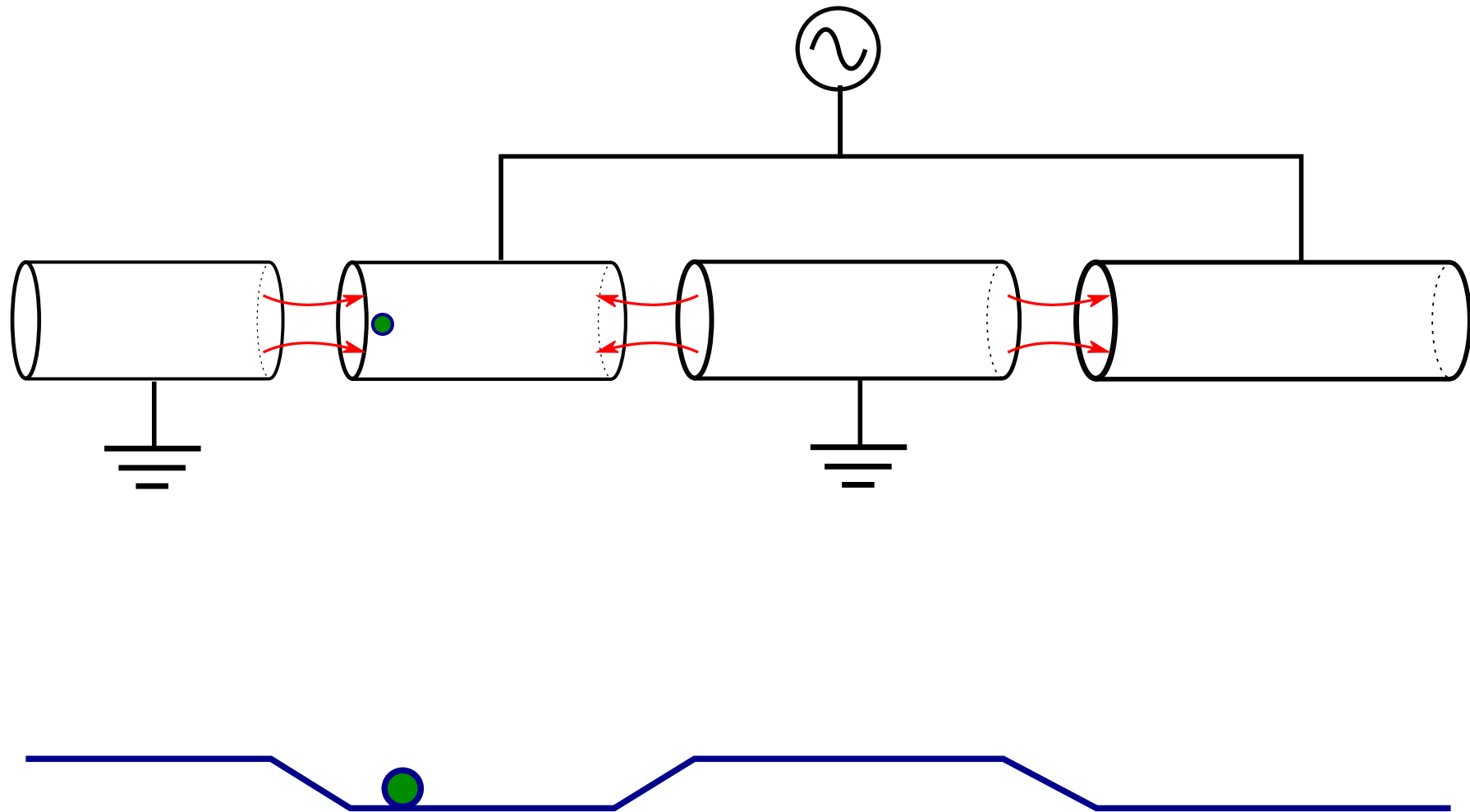
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac



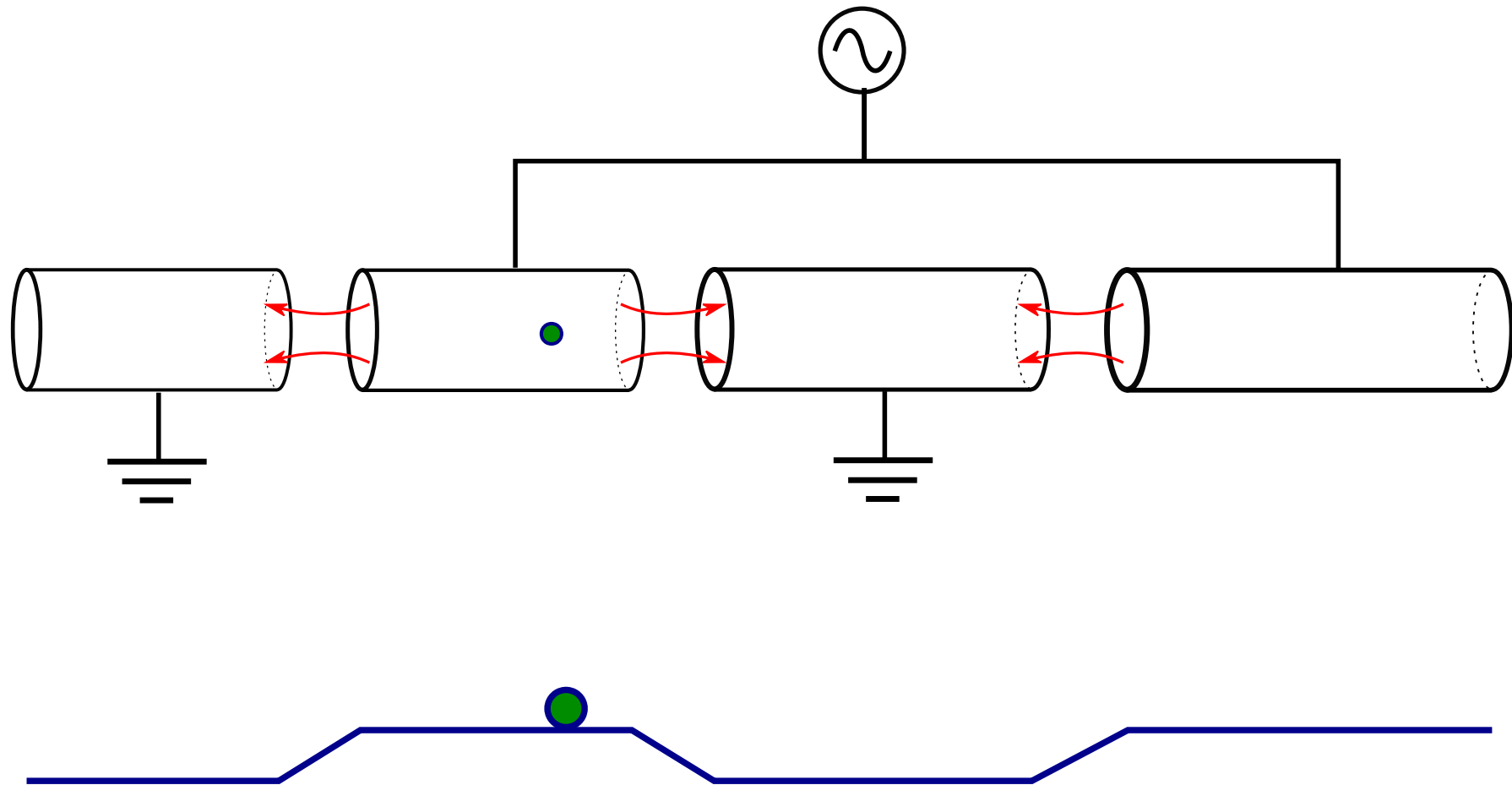
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac



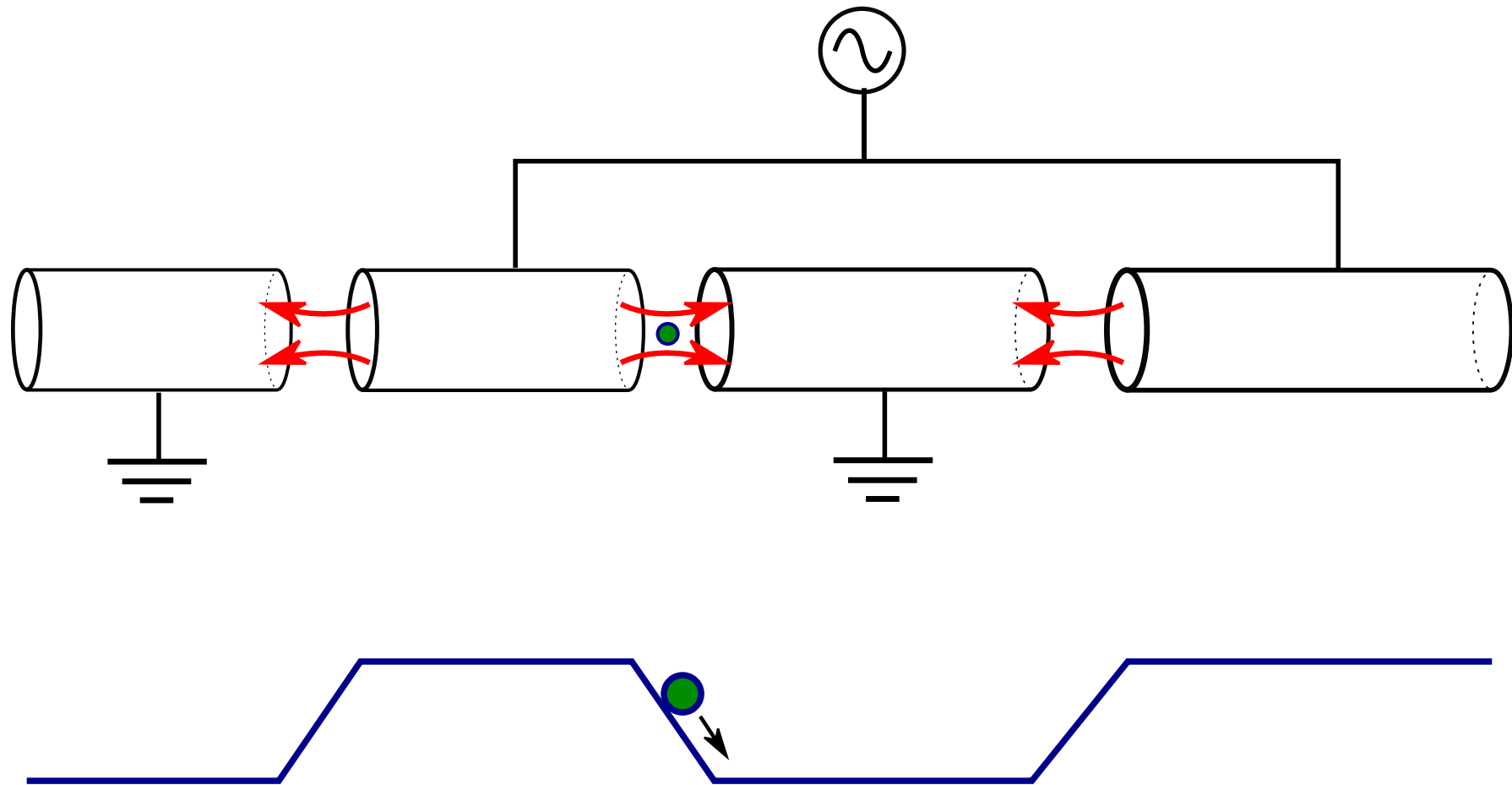
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac



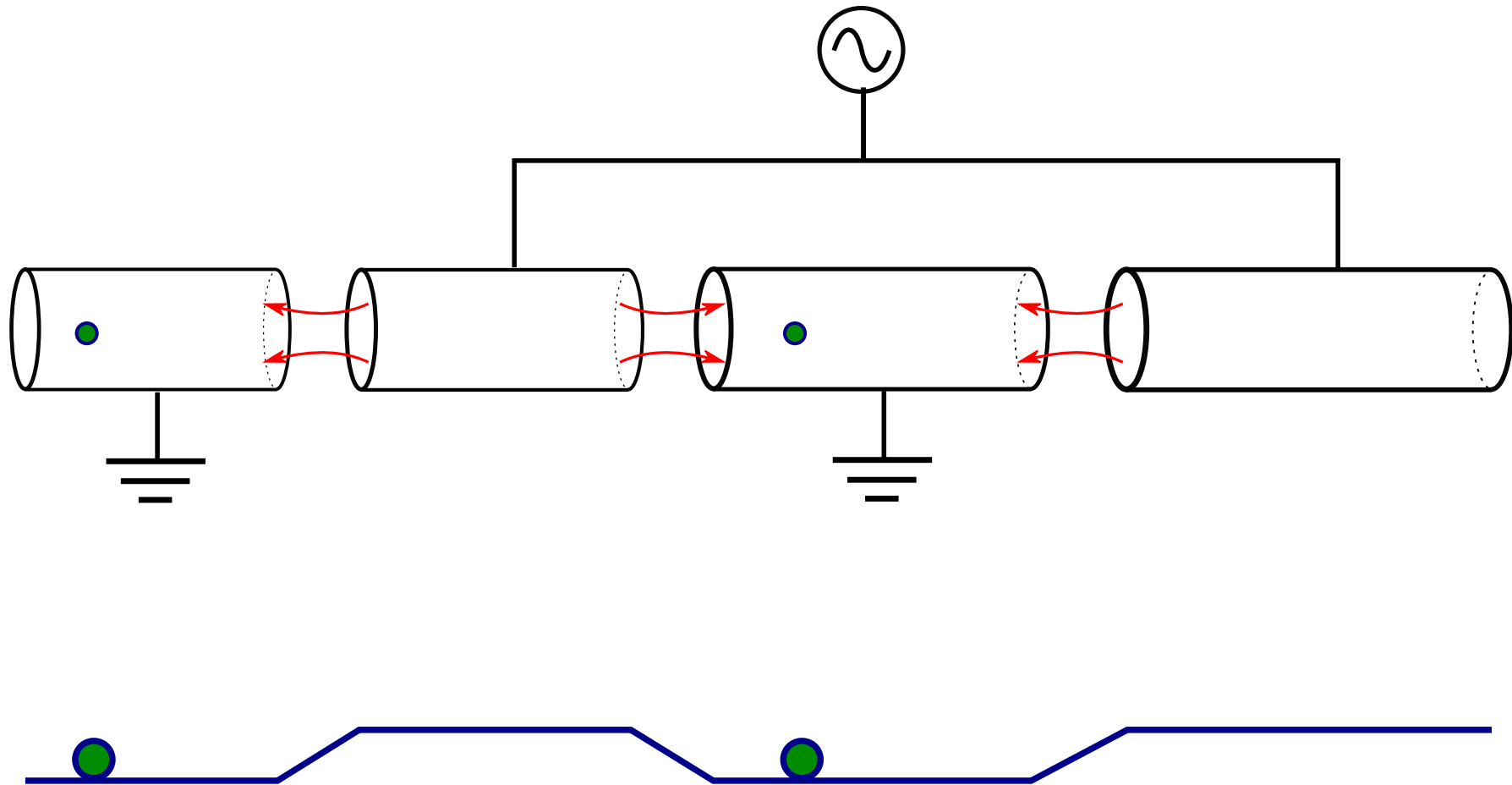
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac



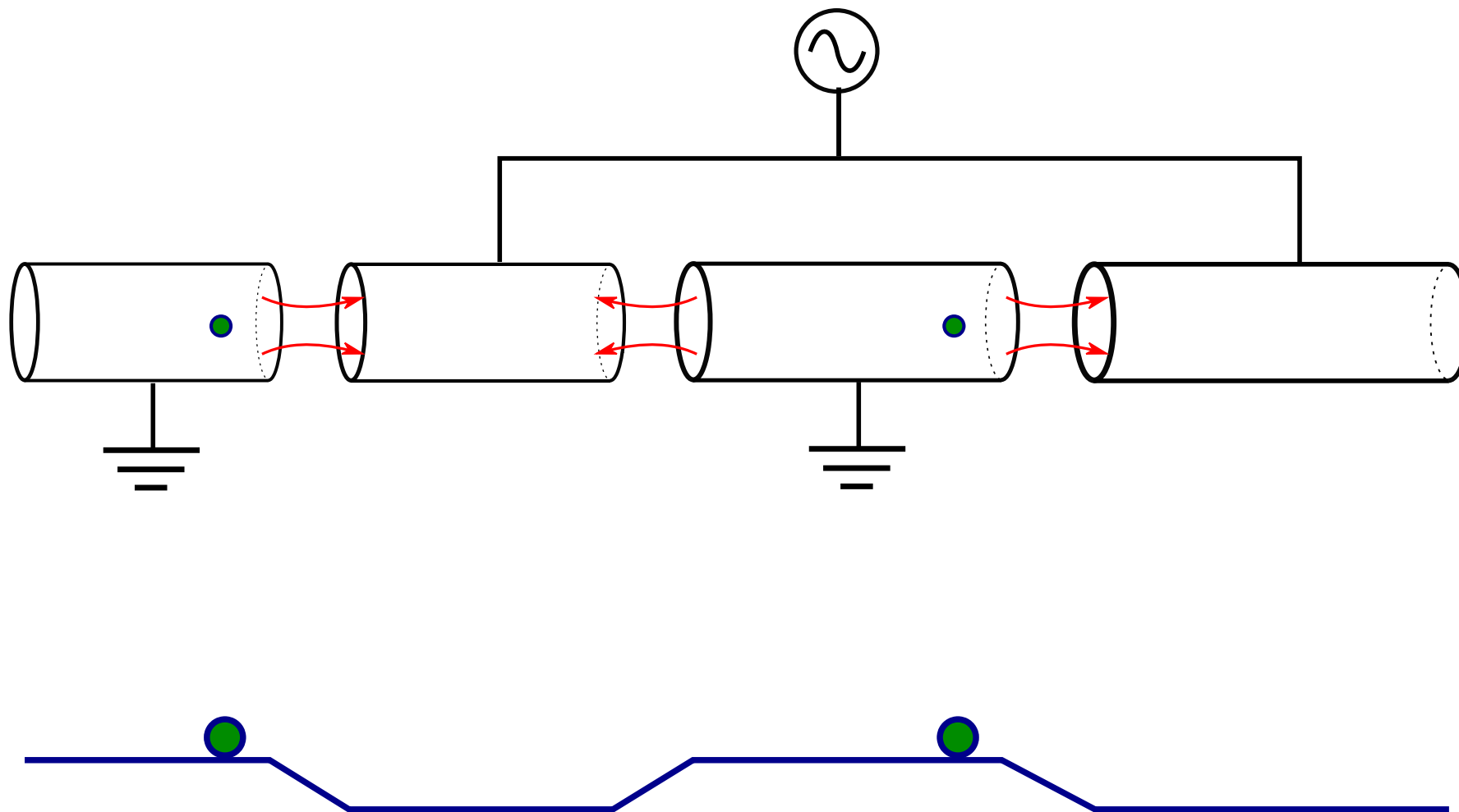
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac



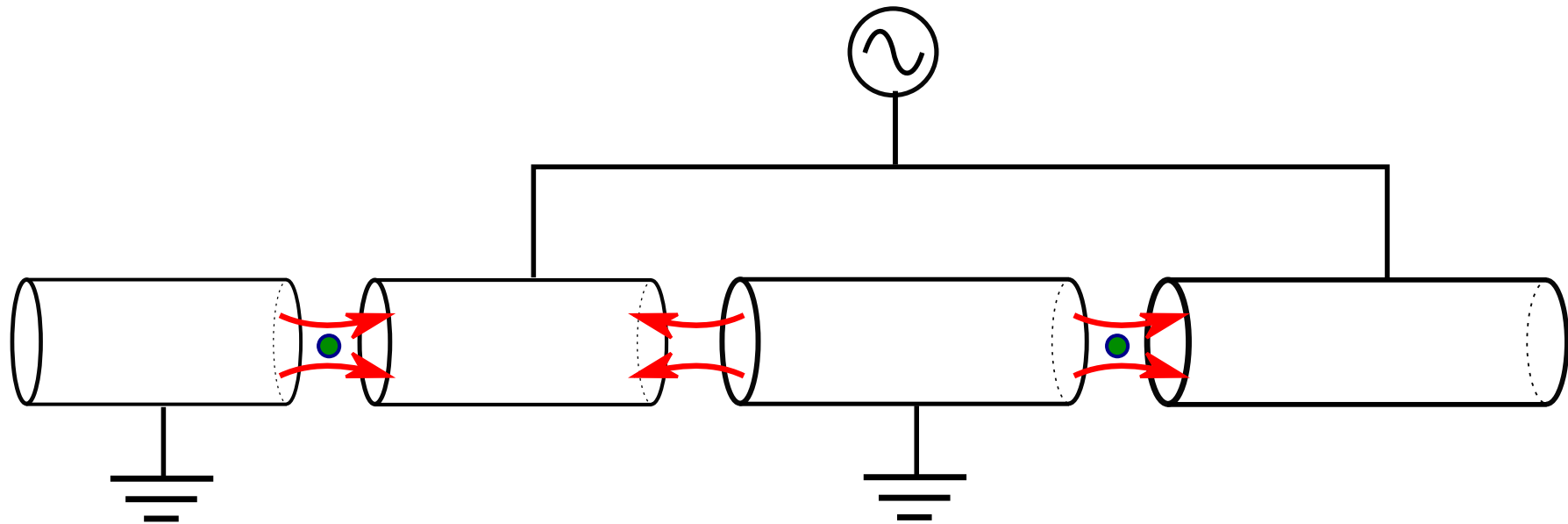
<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac

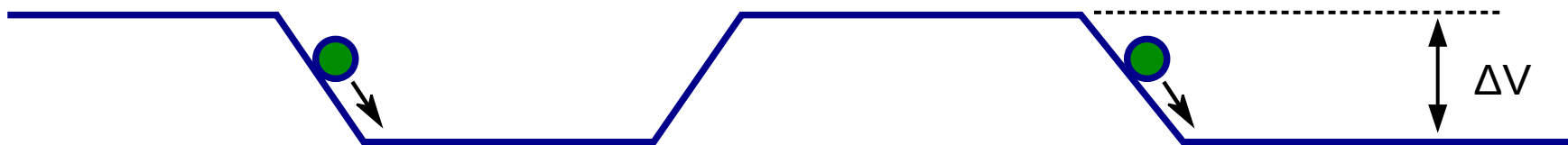


<http://wigner.mta.hu/~barna/content/Lectures/Illustration of RF acceleration principle.webm>

Wideroe linac



- Csak a megfelelő fázisban érkező részecskék gyorsulnak
- A részecskék tehát **szinkronizált csomagokban** jönnek!



- A komponensek között max. ΔV feszültség
- De a végső energia n-szer ennyi: $E = n \cdot q \cdot \Delta V$

A gyakorlatban
nem használják!

Rezonátor...



Rezonátor...



Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mozgási** és **helyzeti**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Rezonátor...



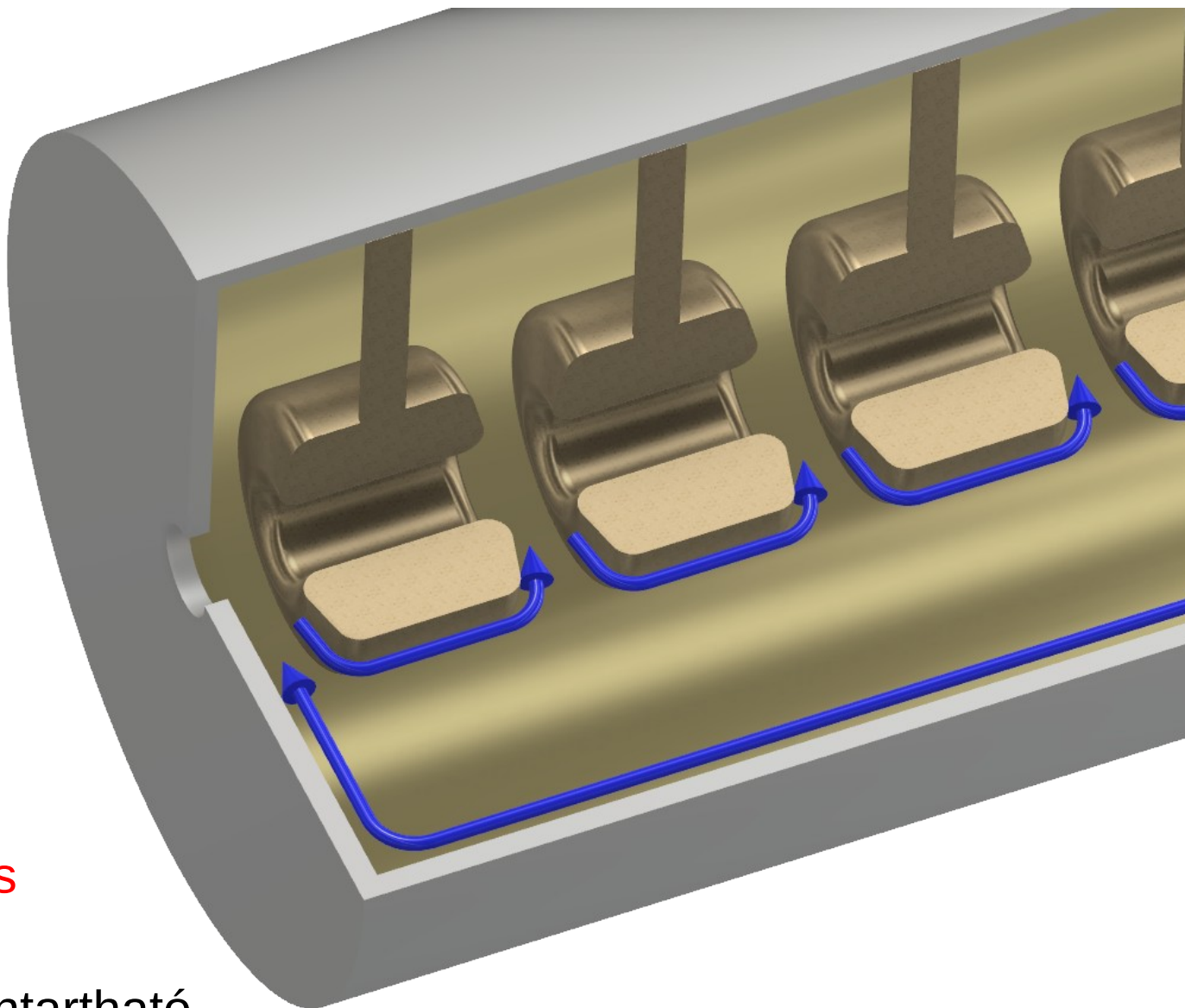
Wideroe linac:
“az erővel
rángatott
megoldás”



Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mozgási** és **helyzeti**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

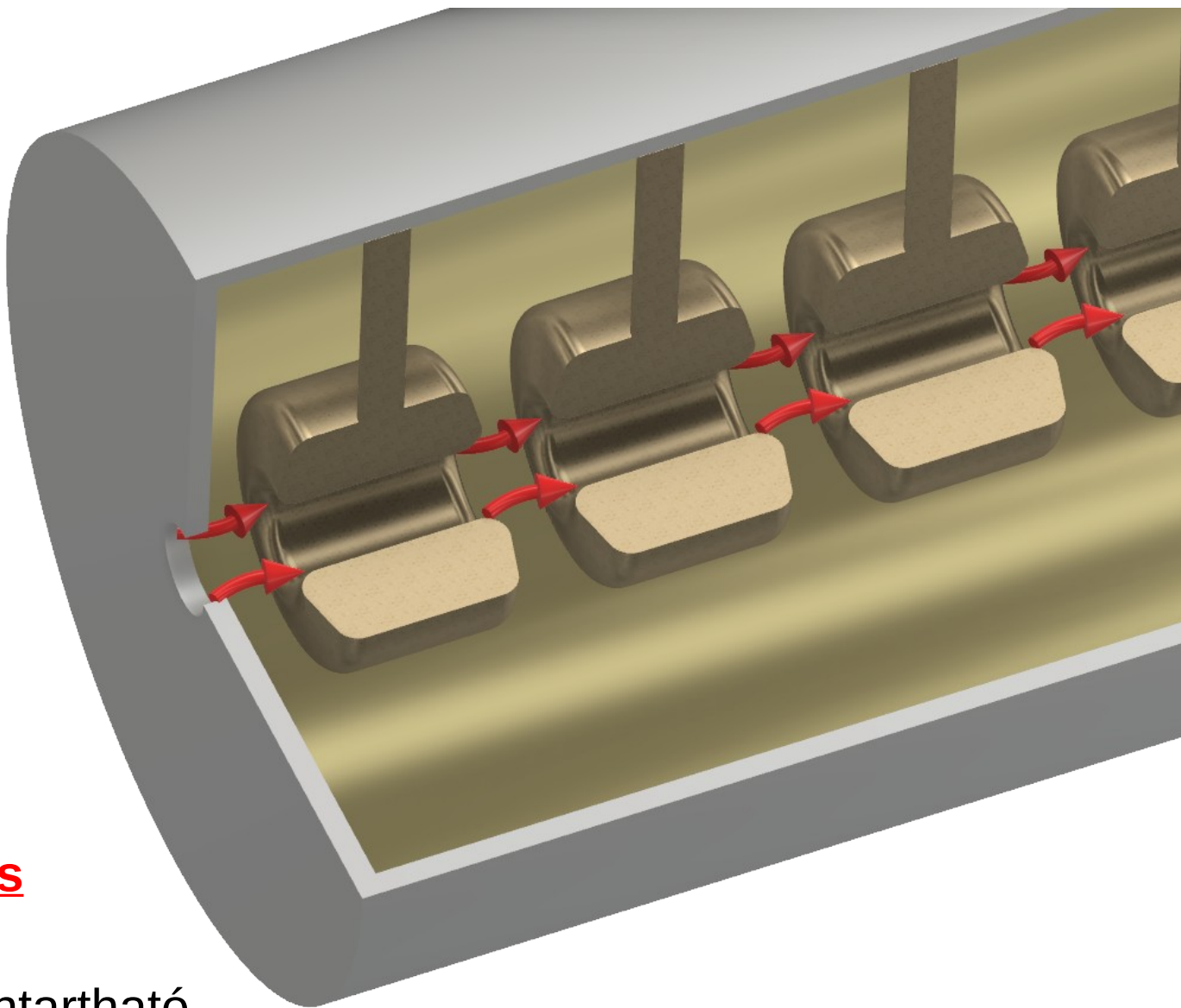
Alvarez (vagy drift tube) linac



Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

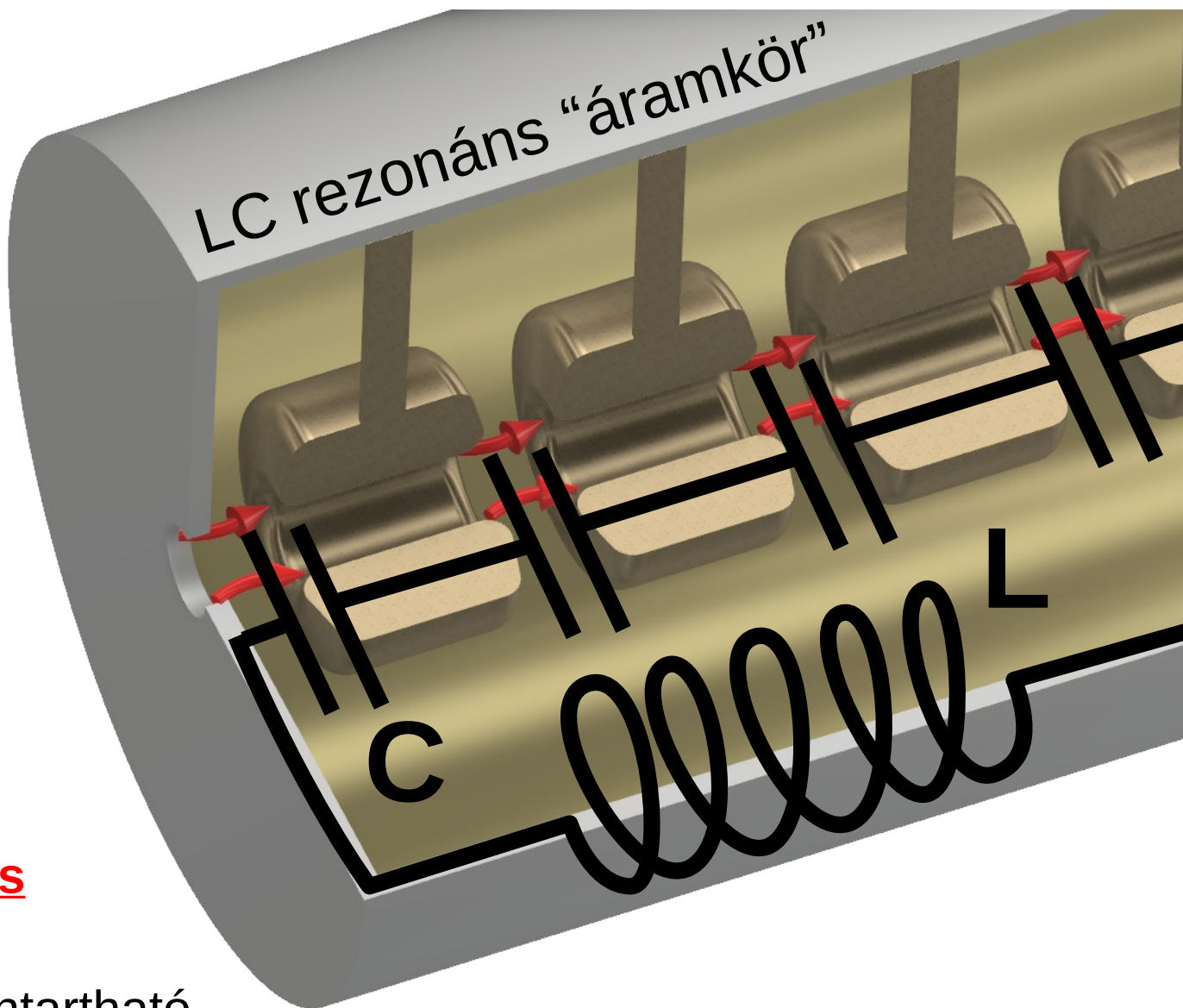
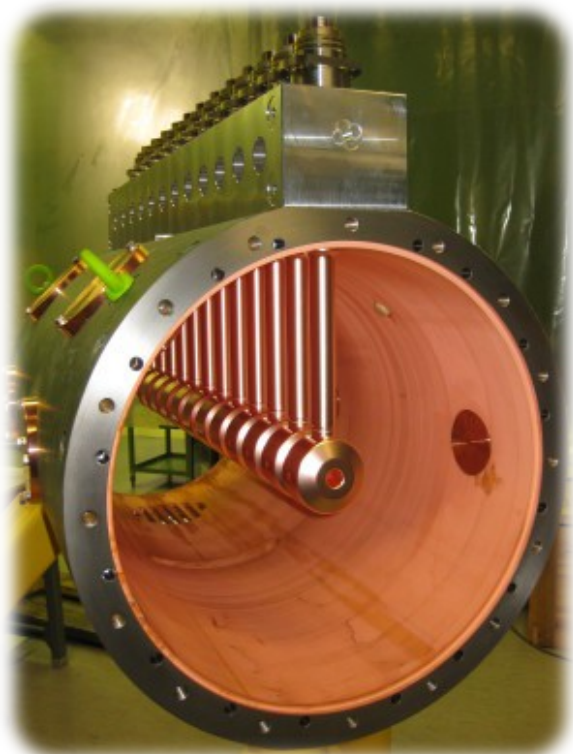
Alvarez (vagy drift tube) linac



Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Alvarez (vagy drift tube) linac

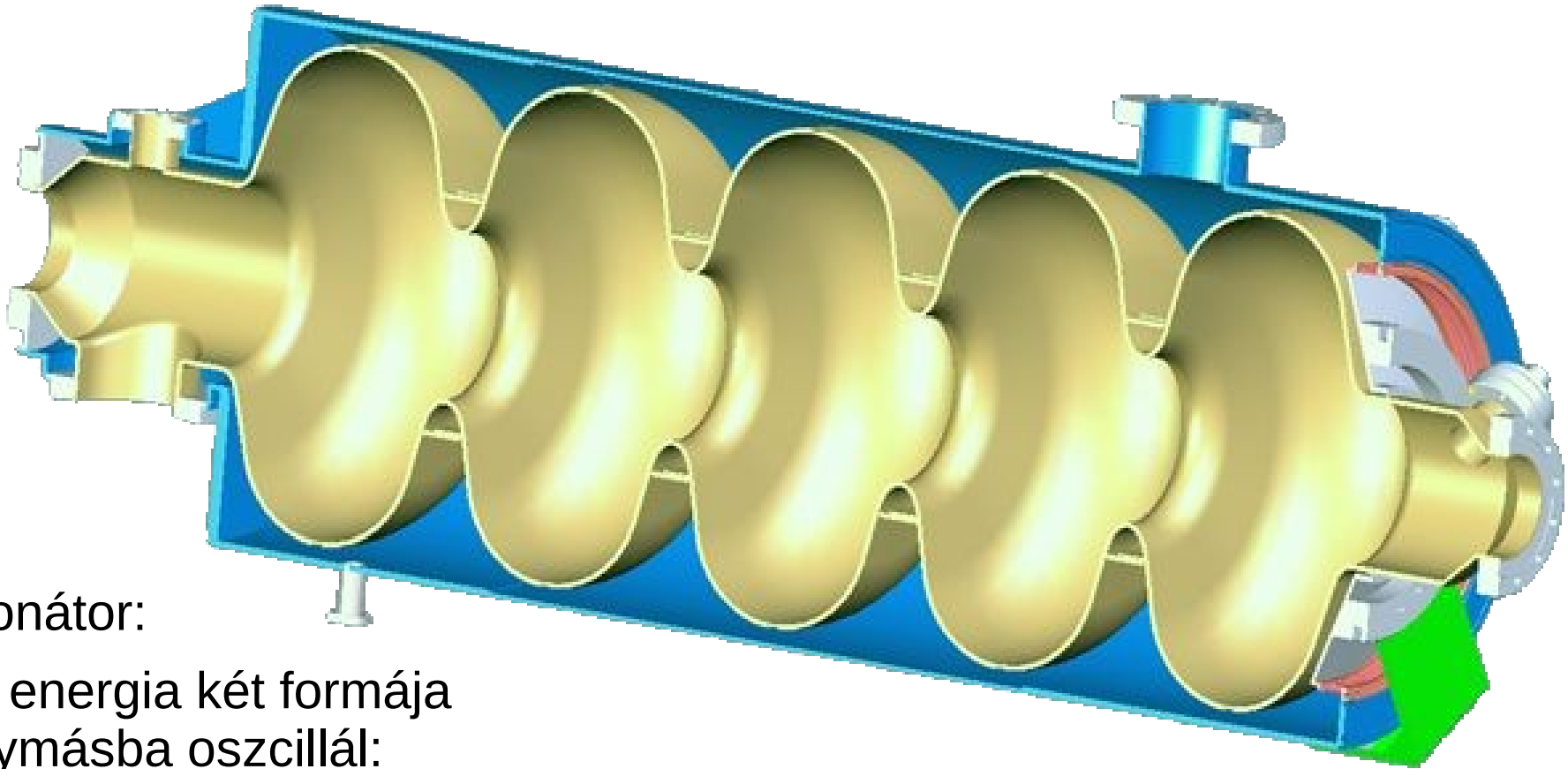


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

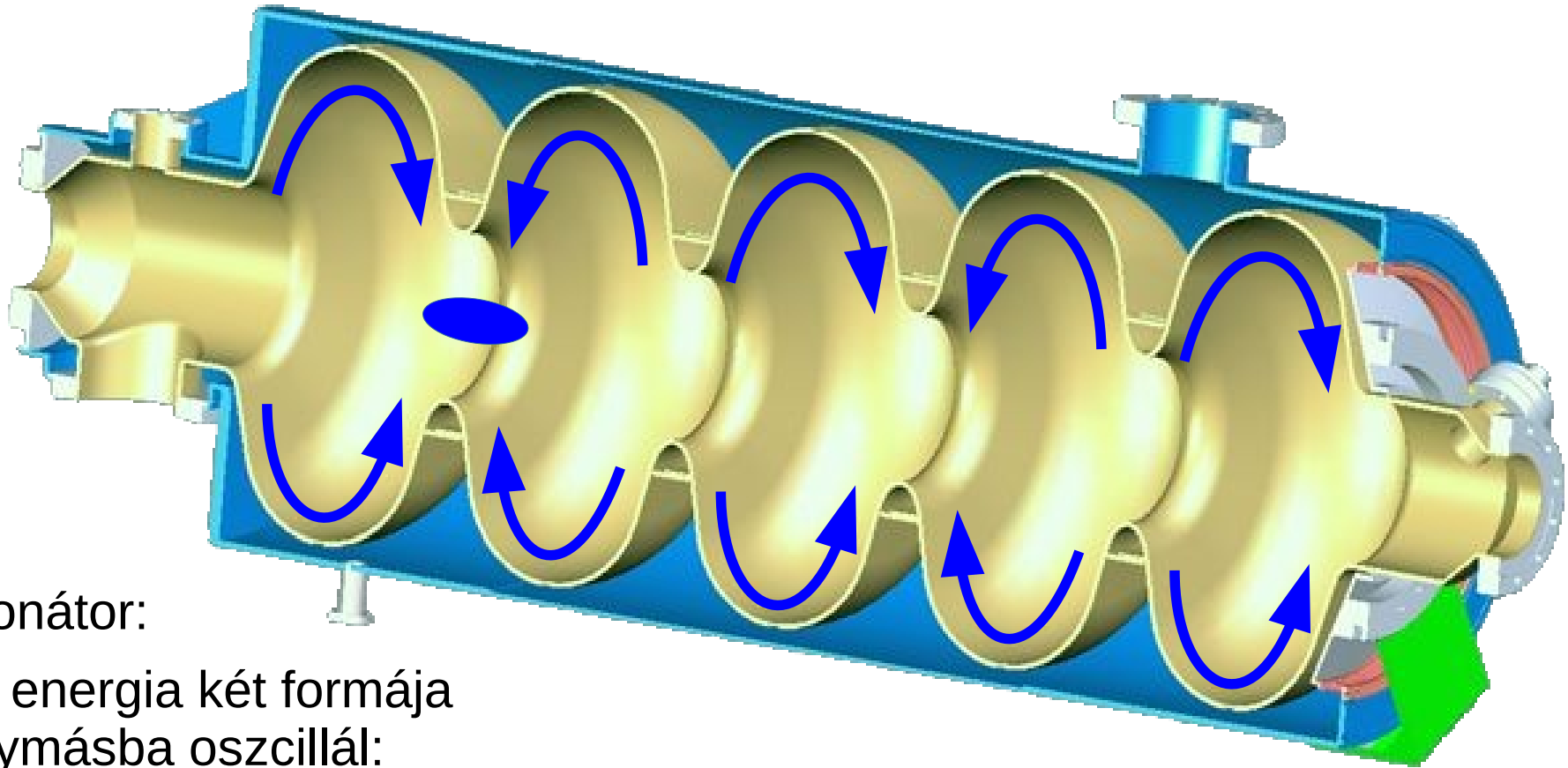


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

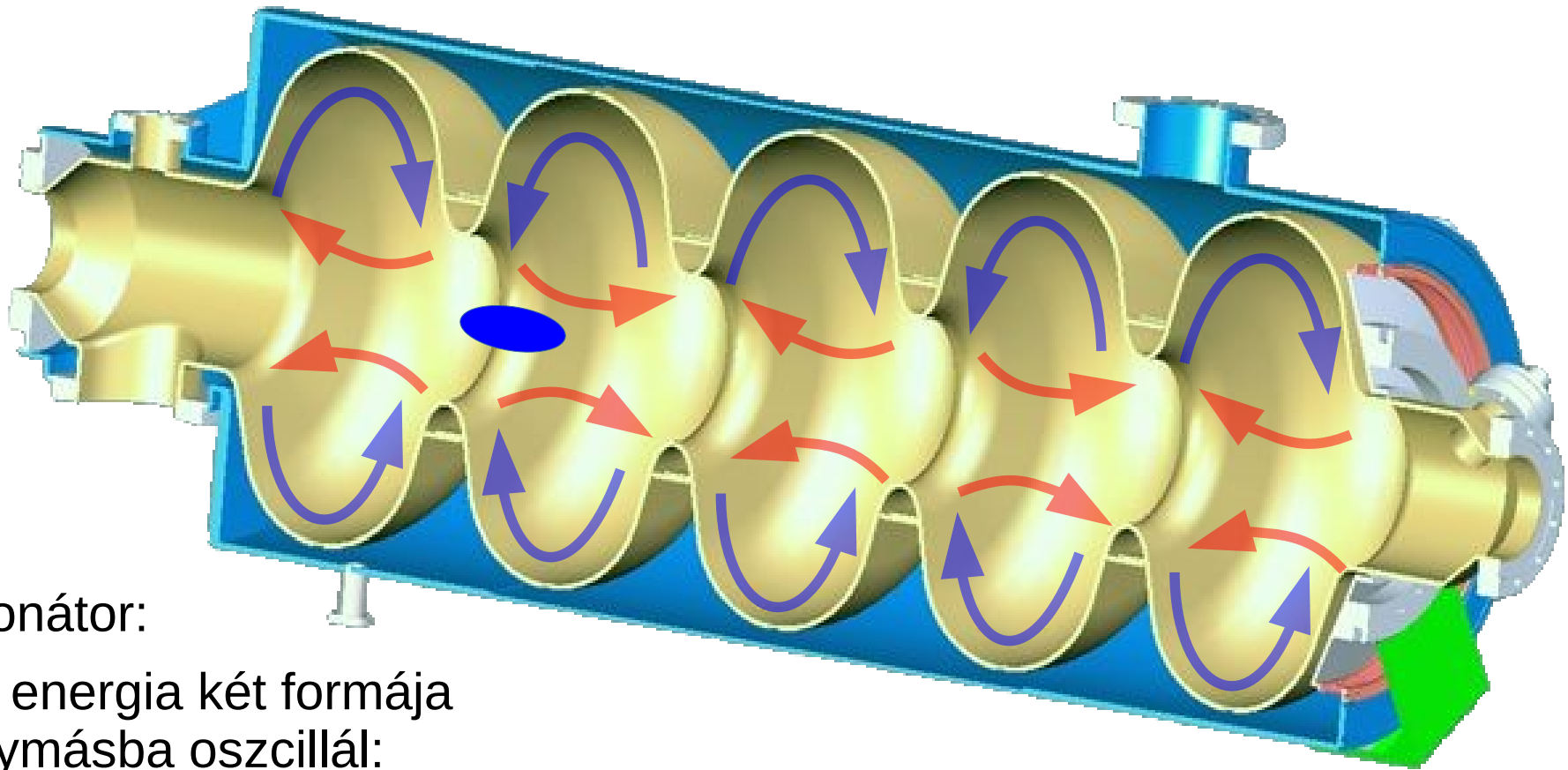


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

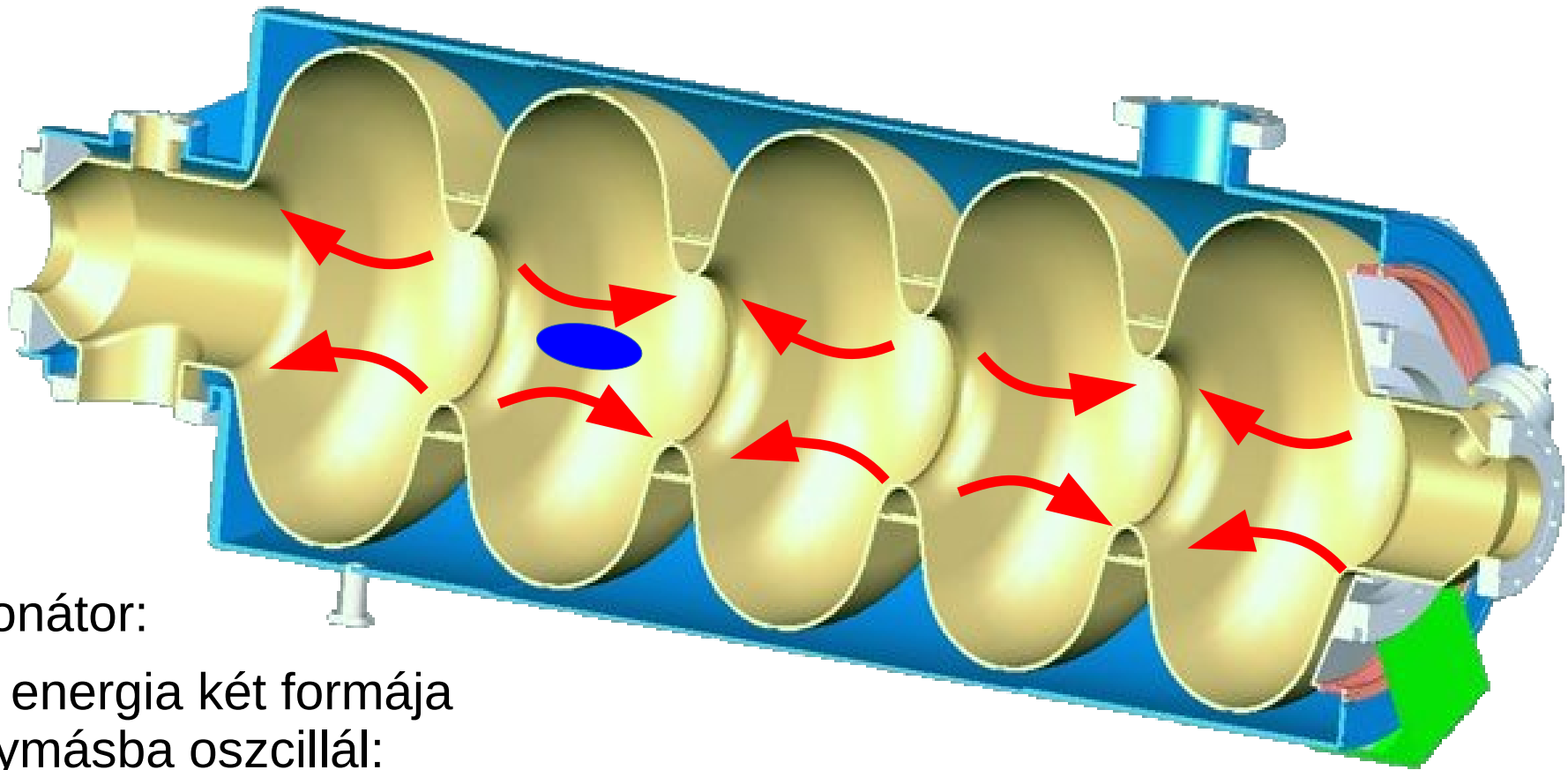


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

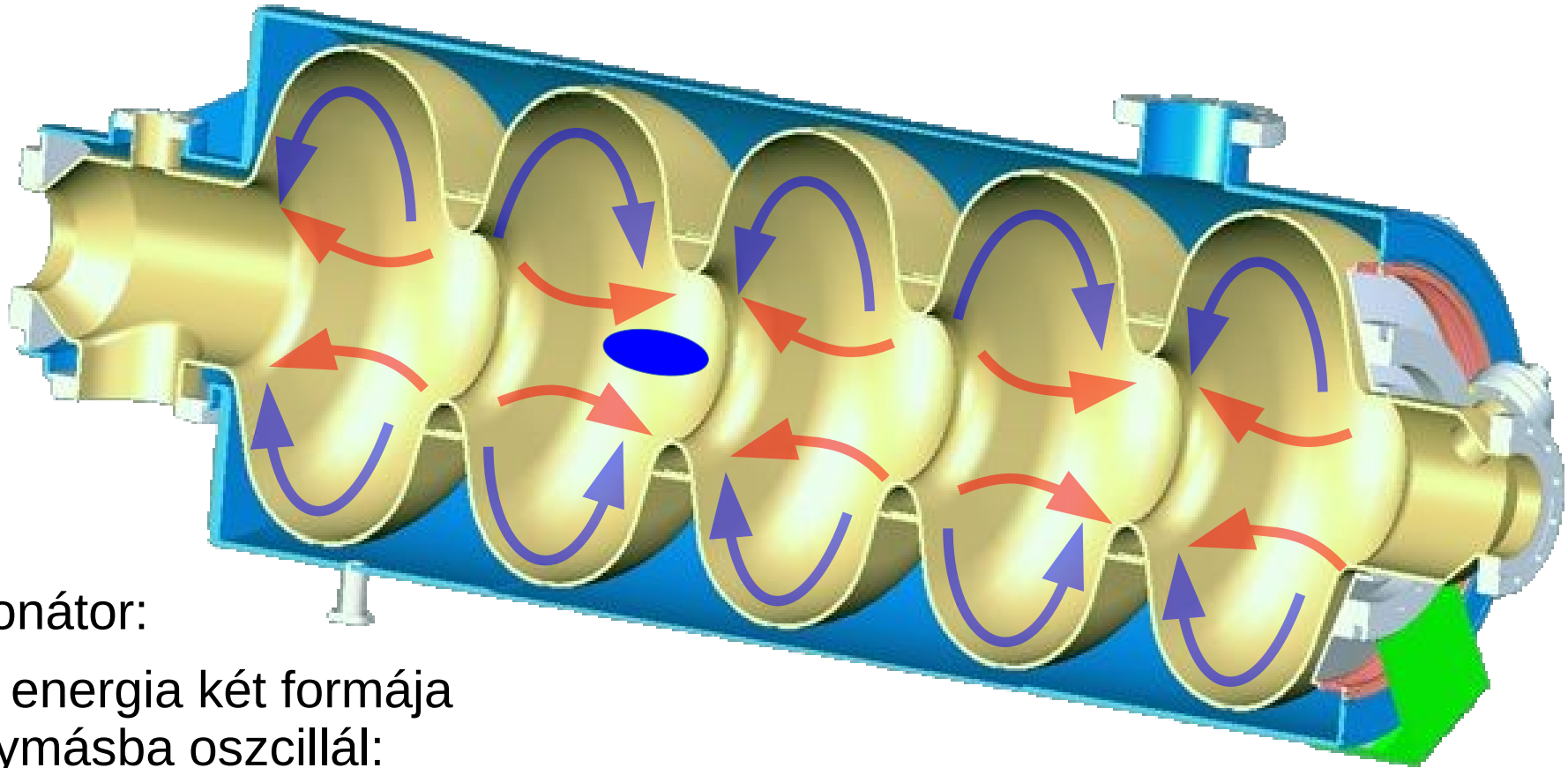


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

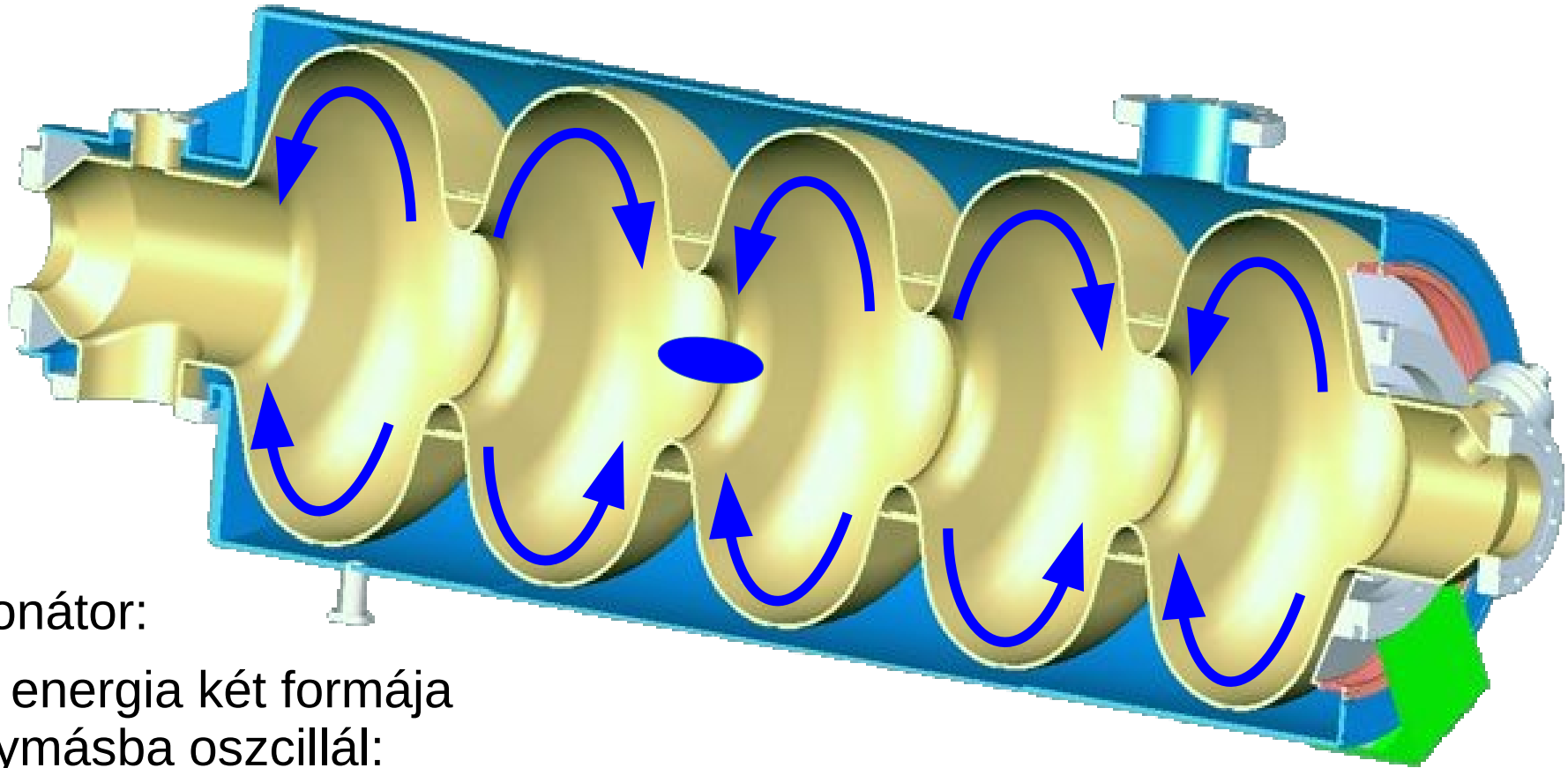


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

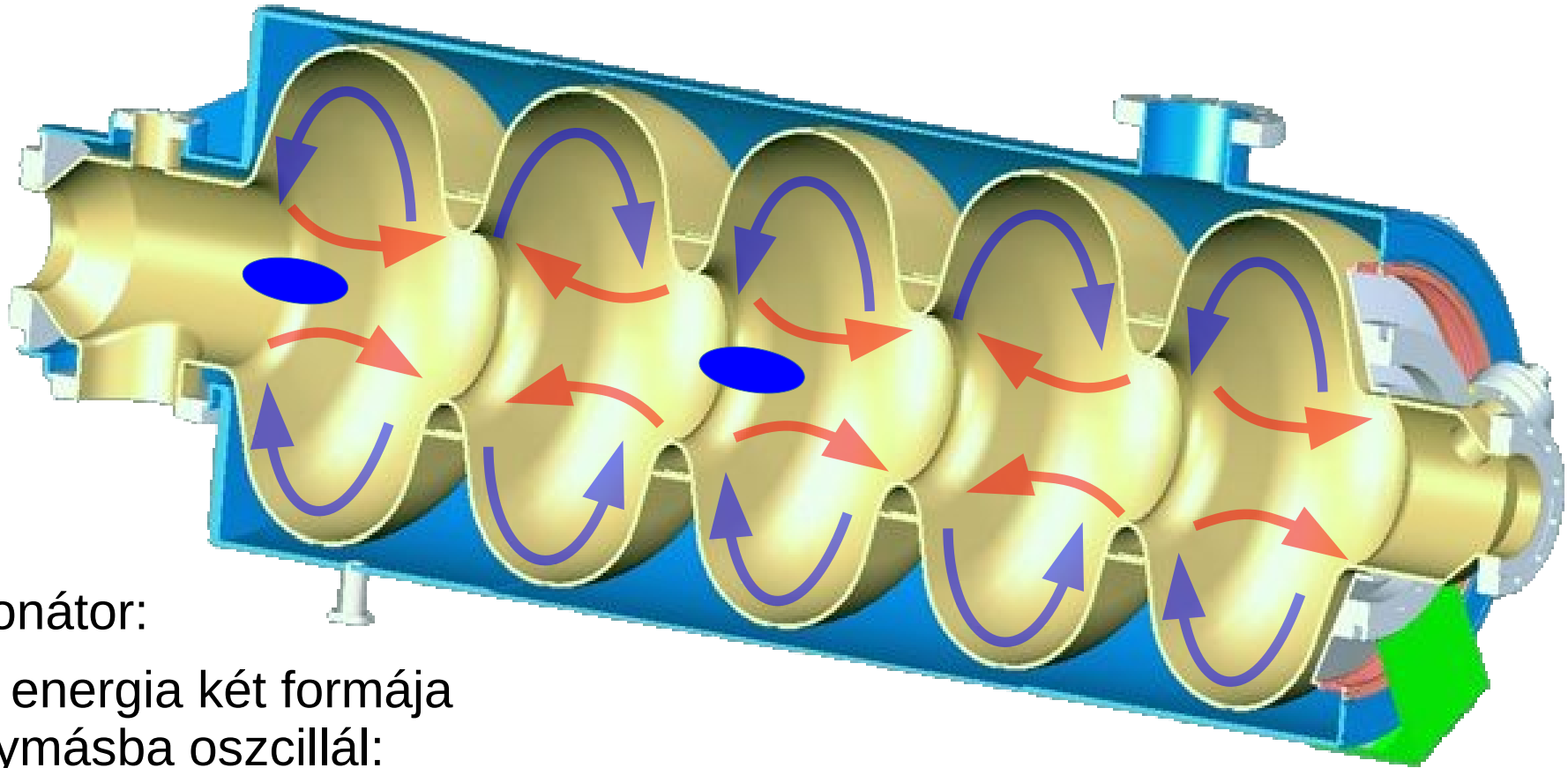


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

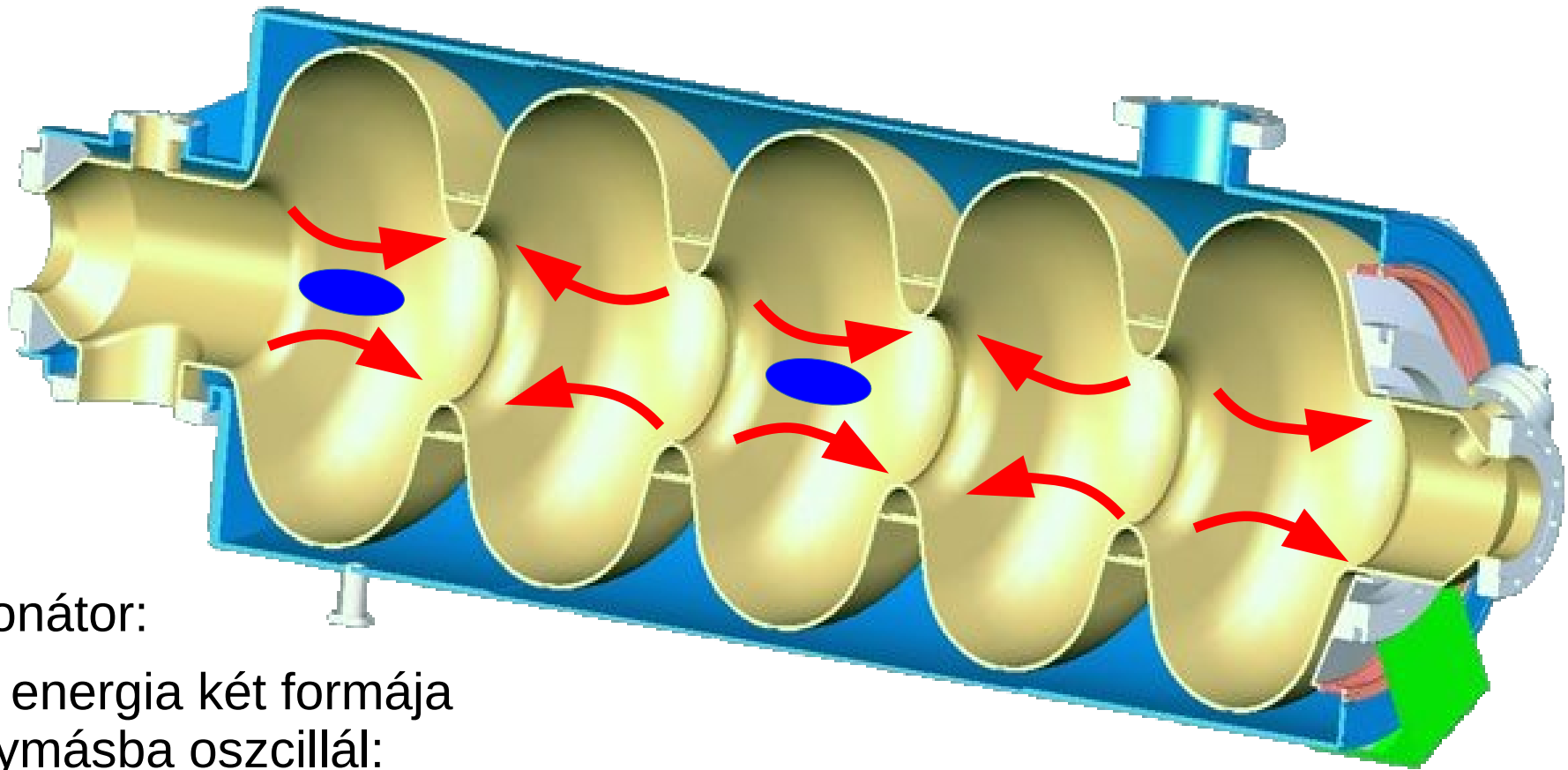


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál: **mágneses** és **elektromos**
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>

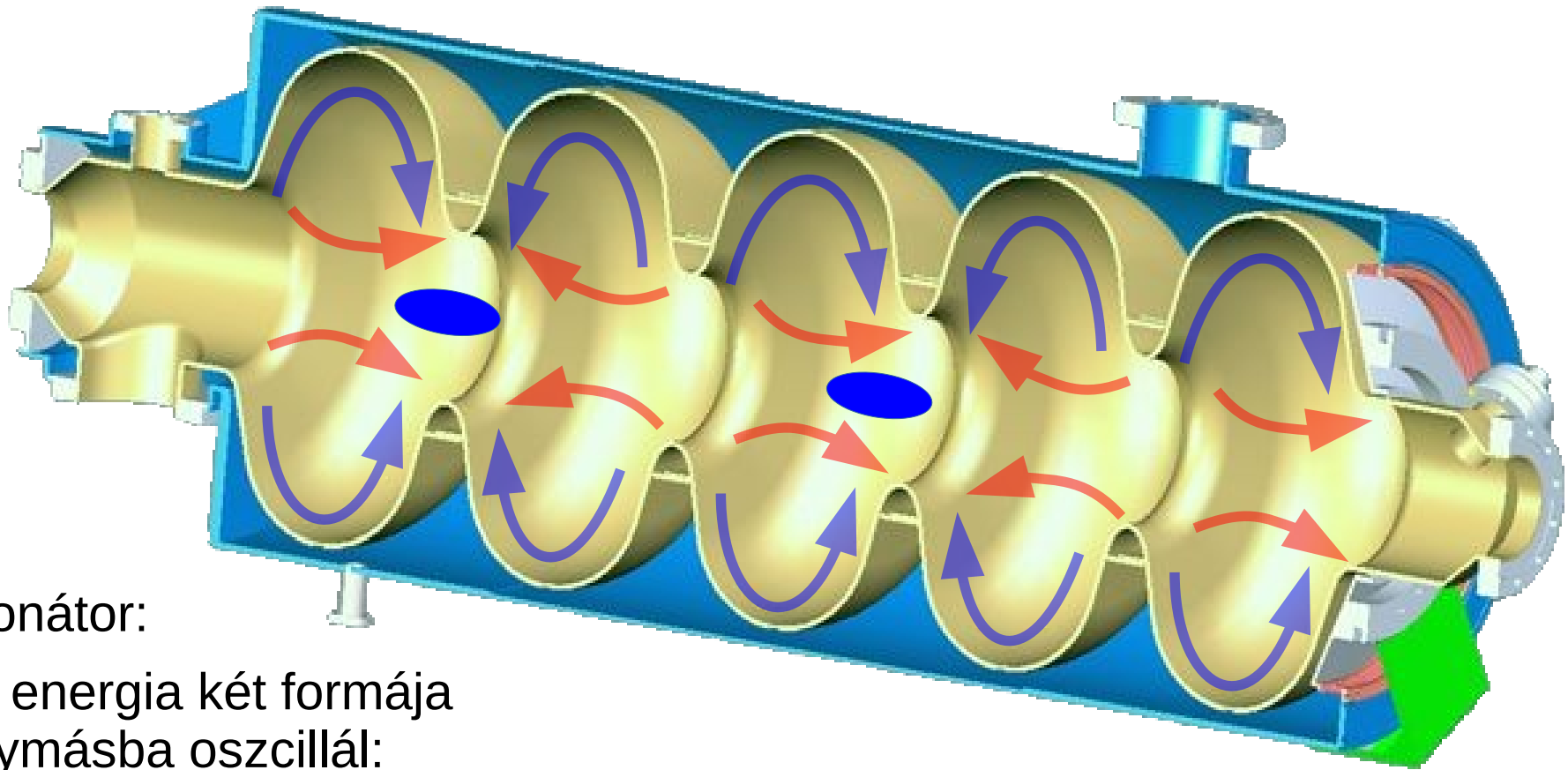


Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

Sokcellás gyorsító rezonátor

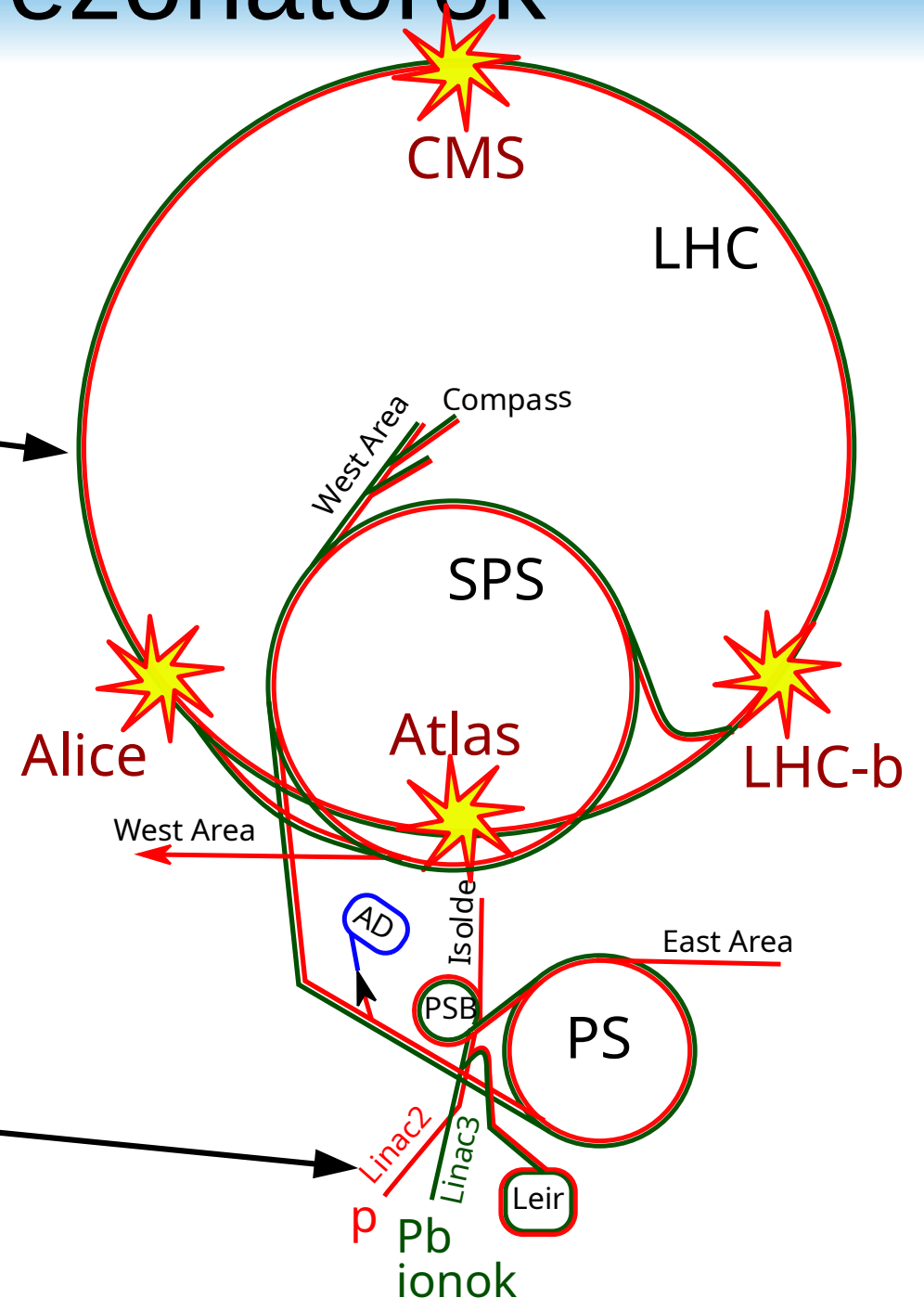
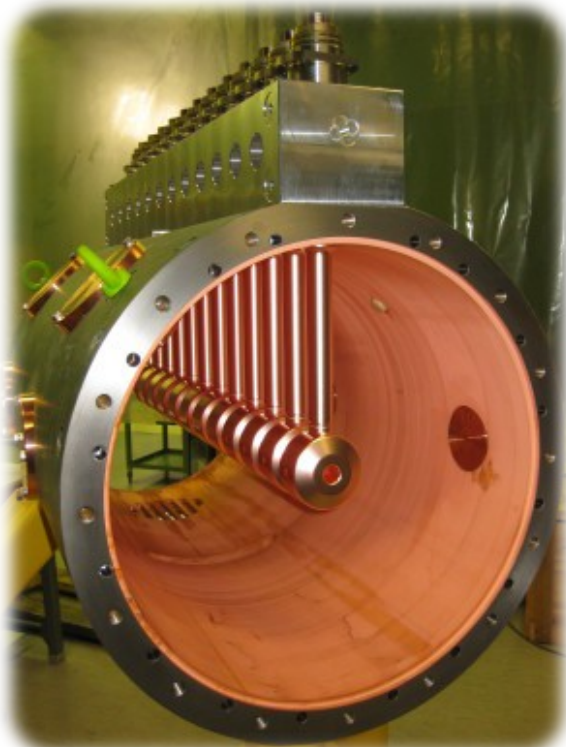
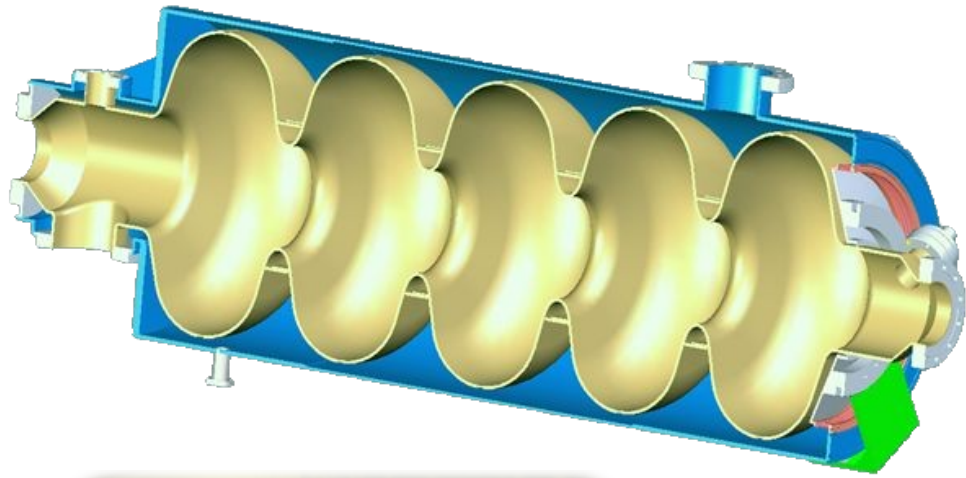
<http://wigner.hu/~barna/content/Lectures/Tesla cavity illustration.webm>



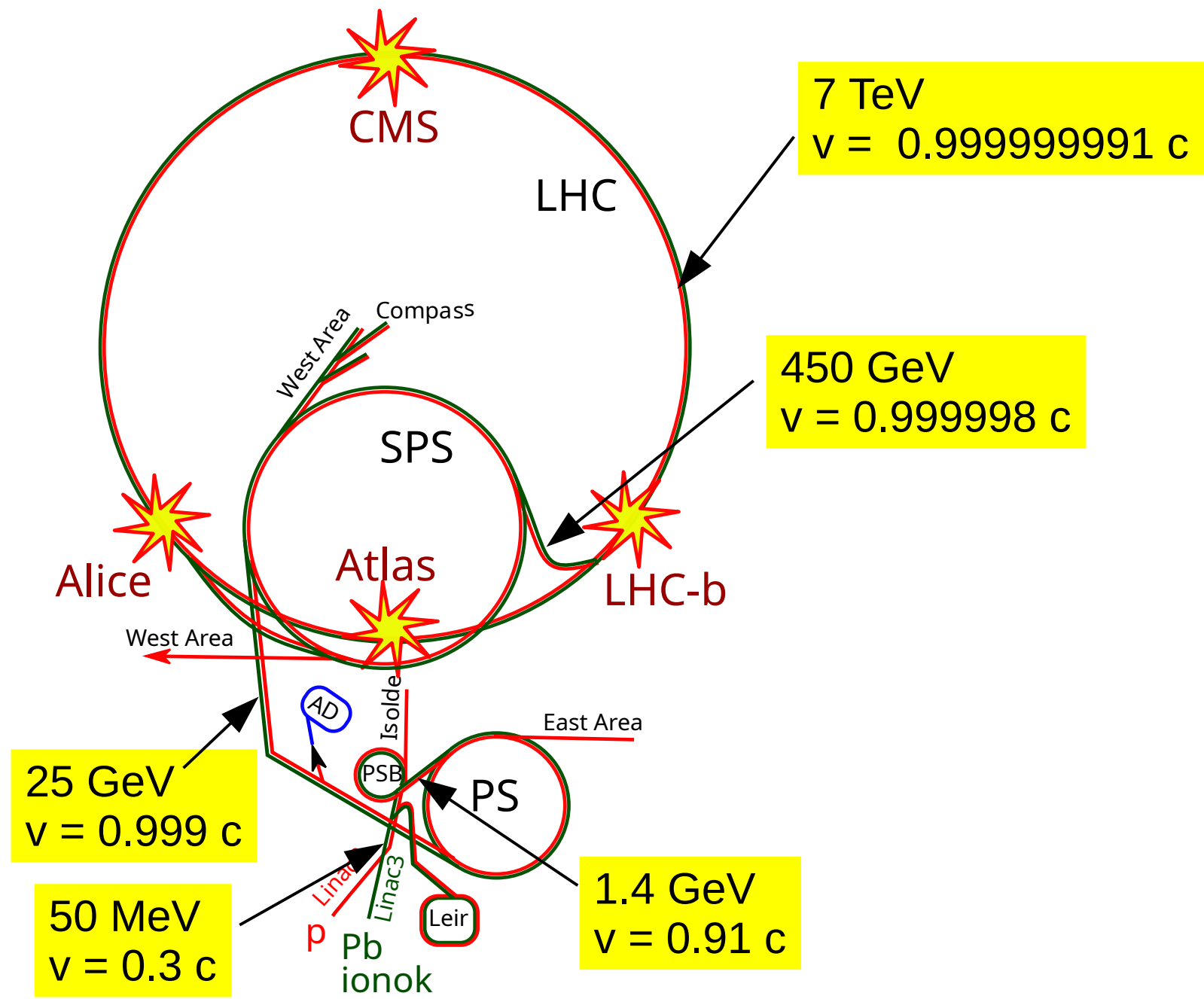
Rezonátor:

- Az energia két formája egymásba oszcillál:
mágneses és elektromos
- Az oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható (veszteségek pótlása)

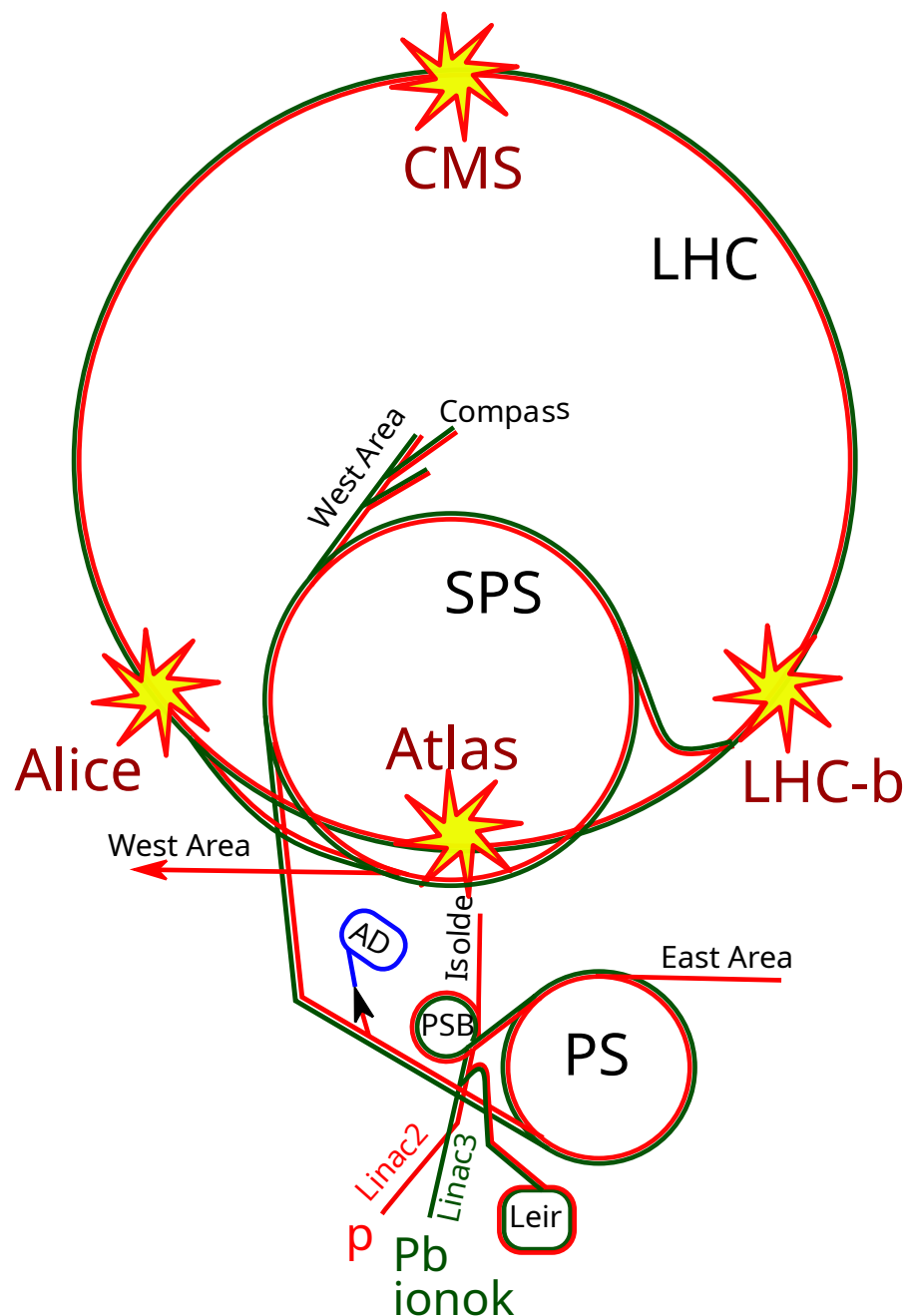
A gyorsító rezonátorok



A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



A gyűrű gyorsítószakasz(ok)



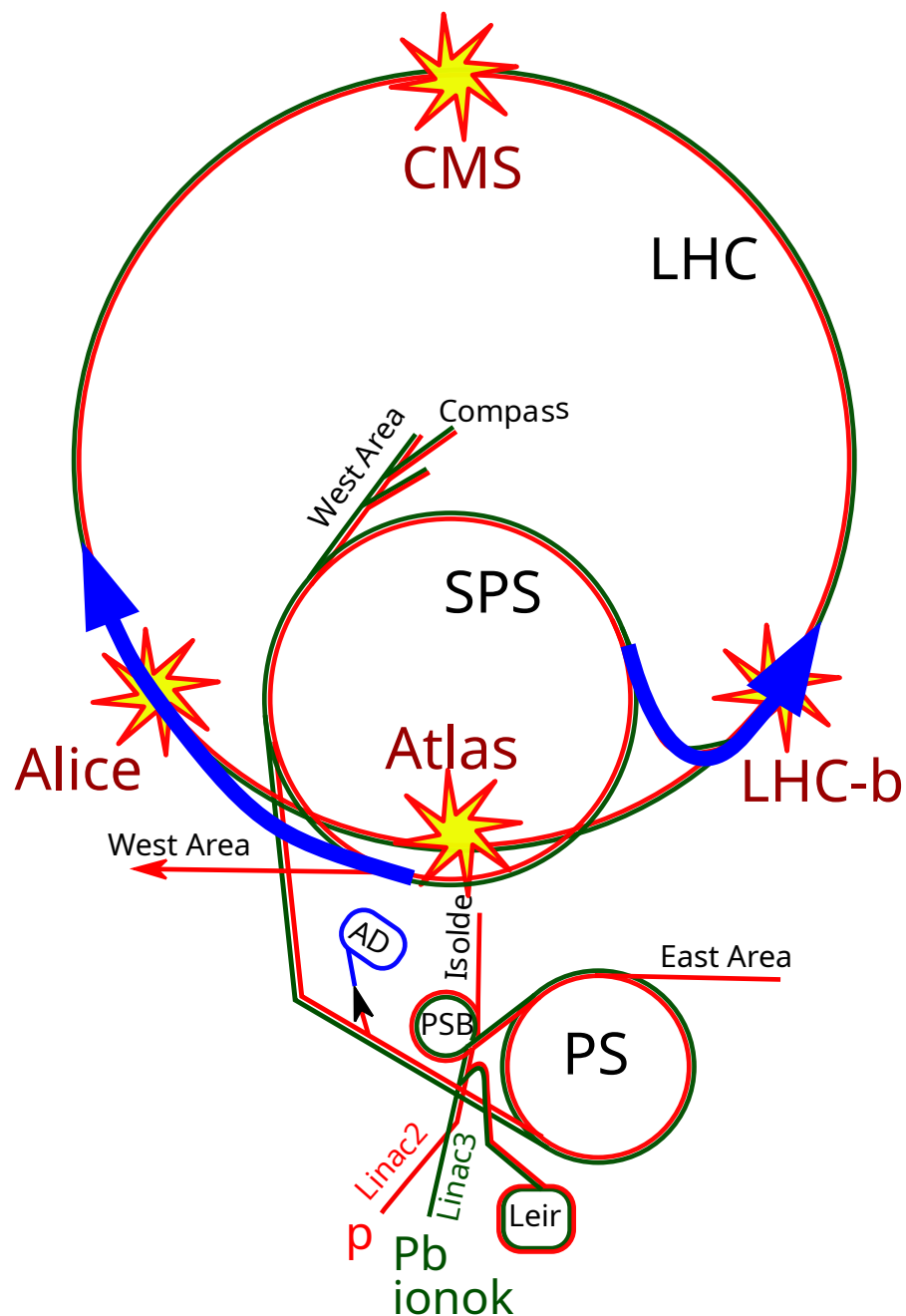
Miért gyűrű?

- Ugyanaz a **gyorsítórezonátor** többször is felhasználható
- Szemben futó nyalábokat lehet ütköztetni – jóval **nagyobb tömegközépponti energia**
- A nem ütköző részecskék “kapnak egy új esélyt”

Miért több gyűrű?

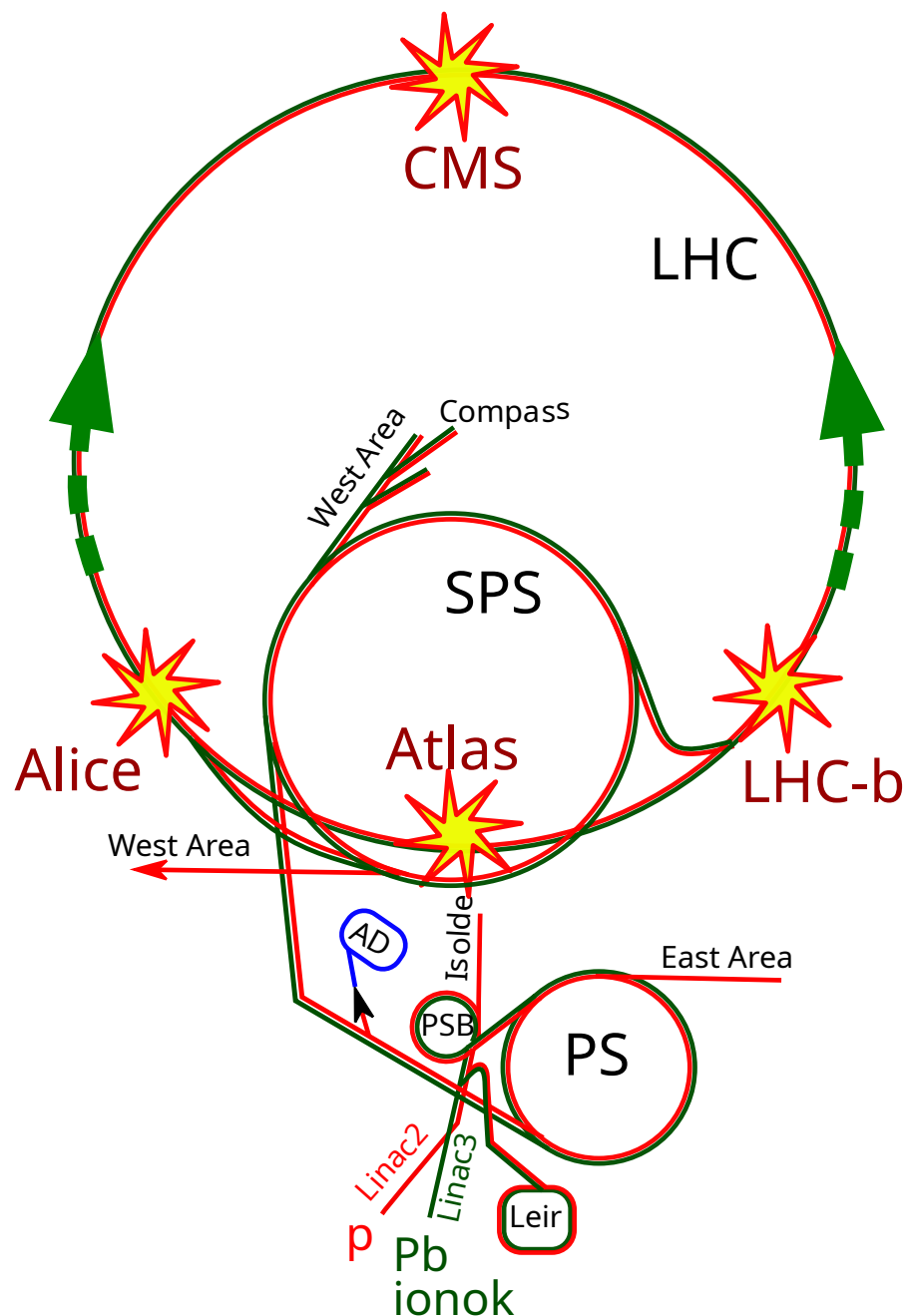
- Egy gyűrű kb. 1 nagyságrendet tud növelni az energián
- Egyre nagyobb gyűrűk

LHC működési ciklusa



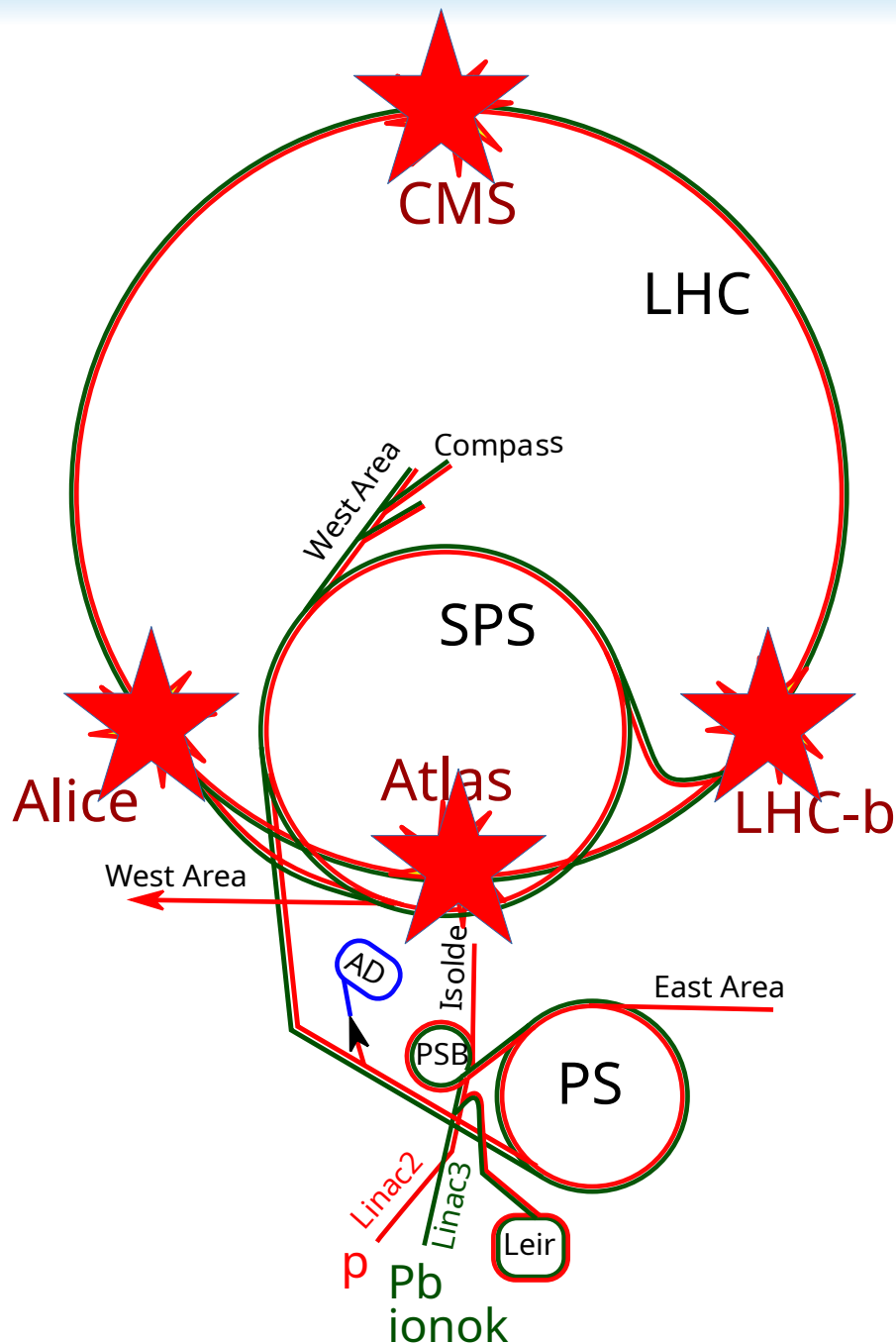
- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban

LHC működési ciklusa



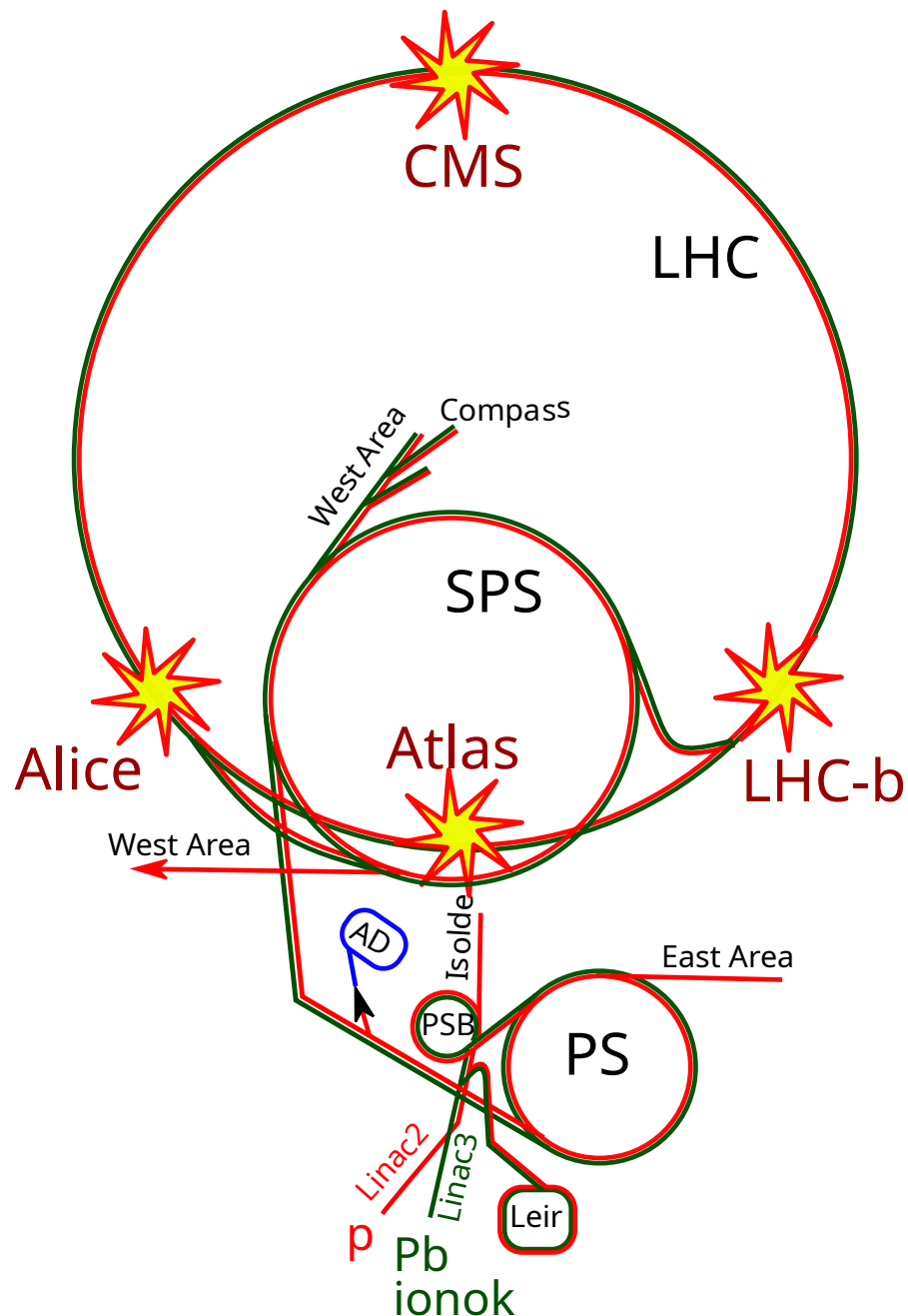
- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás

LHC működési ciklusa



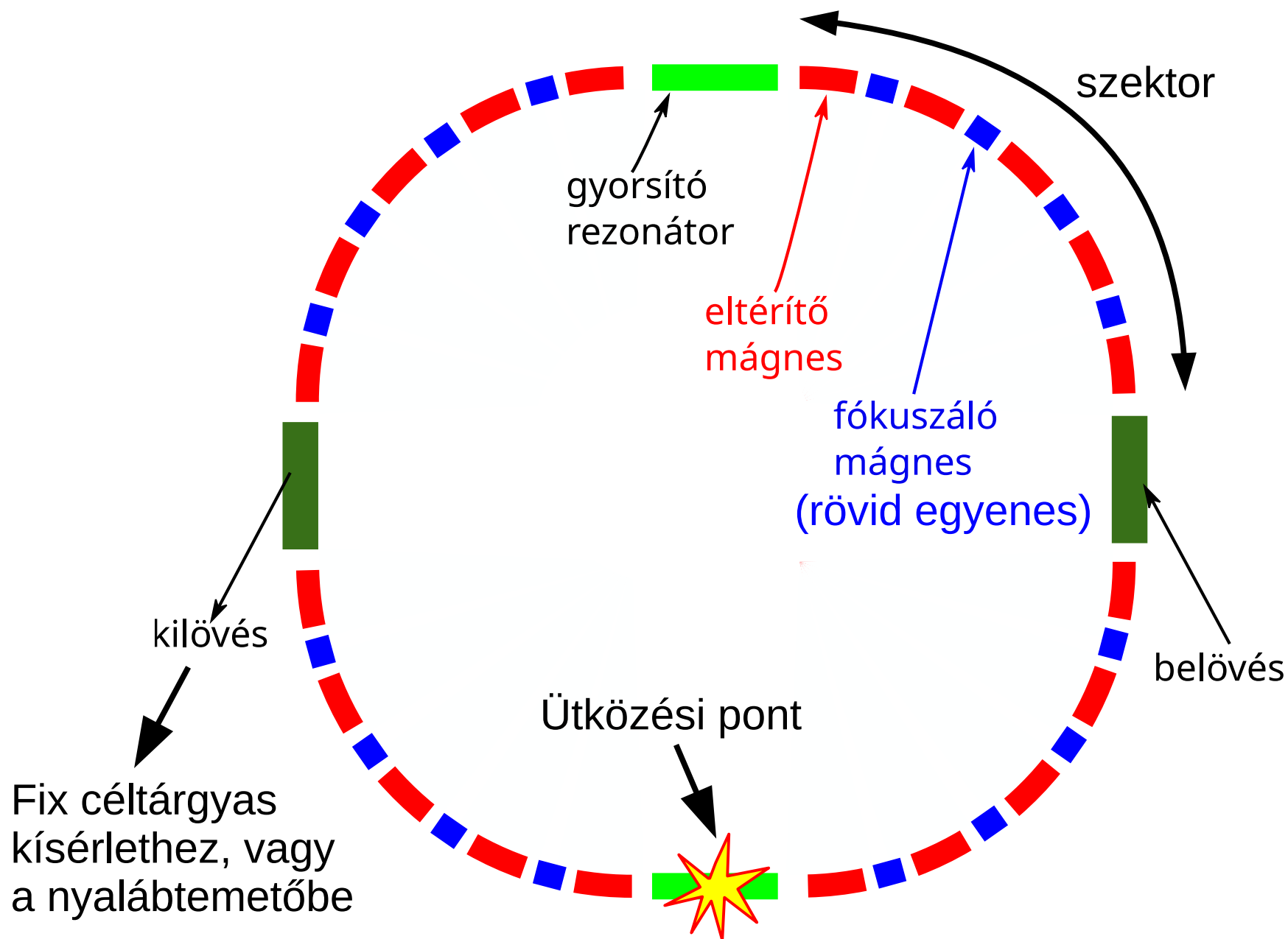
- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás
- **Ütköztetés (~10 óra)**
(eközben az SPS kiszolgálja az álló céltárgyas kísérleteket)

LHC működési ciklusa

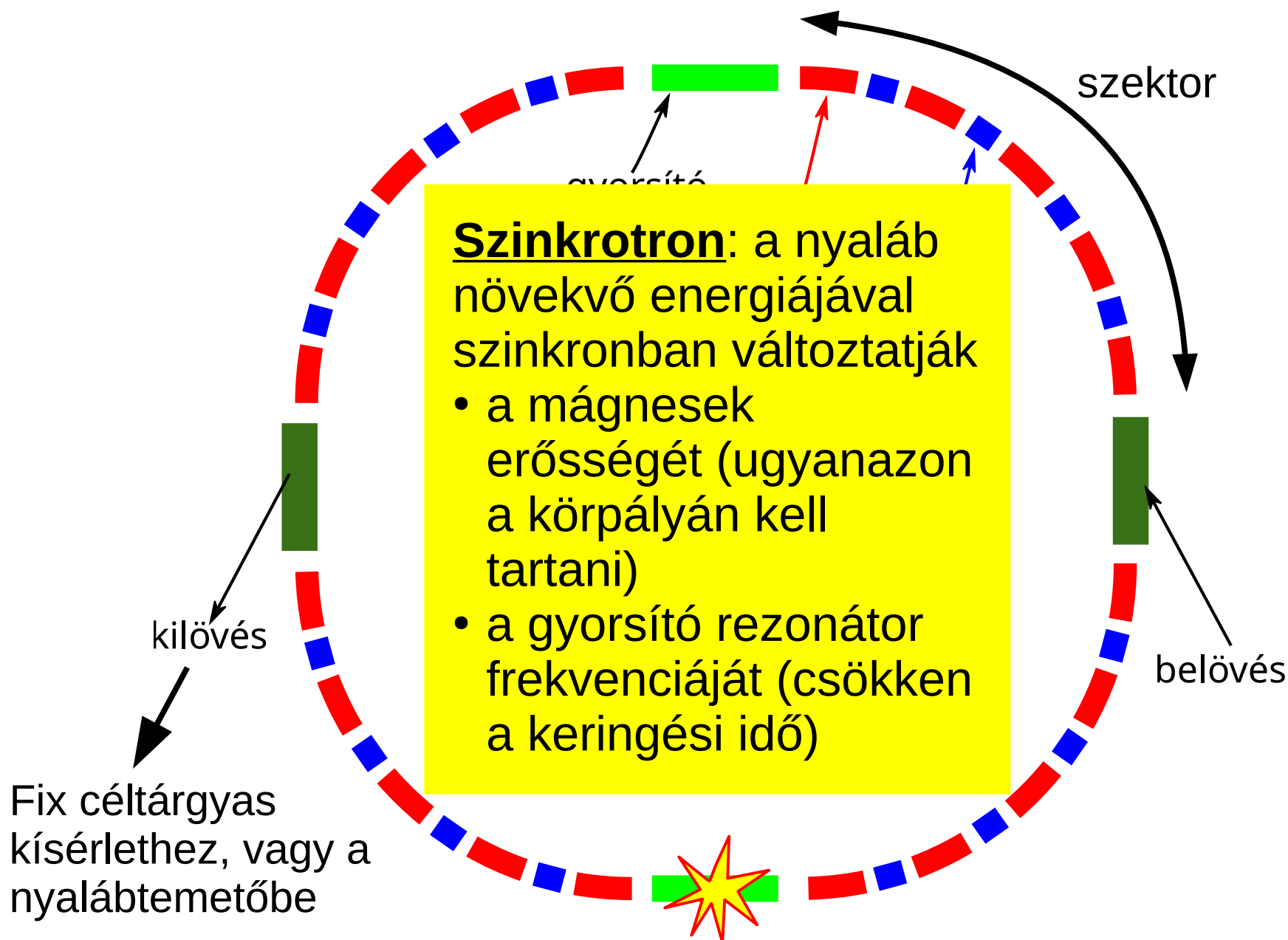


- Feltöltés egyik irányban
- Feltöltés másik irányban
- Gyorsítás
- **Ütköztetés (~10 óra)**
(eközben az SPS kiszolgálja az álló céltárgyas kísérleteket)
- Kilövés a nyalábtemetőbe
- Mágnesek terének visszacsökkentése
- Újrainicializáció, stb...

A gyűrű gyorsítószakasz: szinkrotron

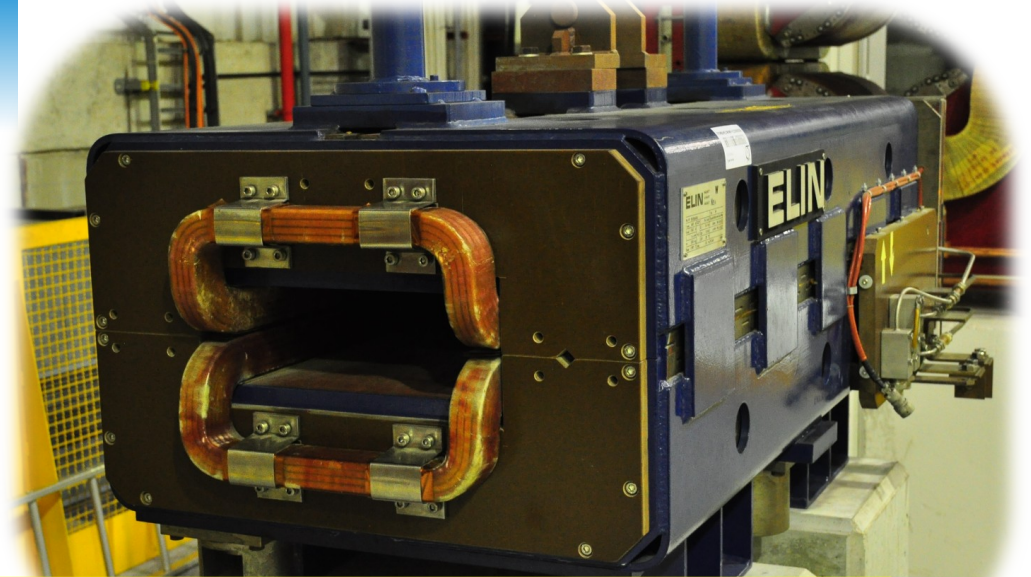


A gyűrű gyorsítószakasz: szinkrotron

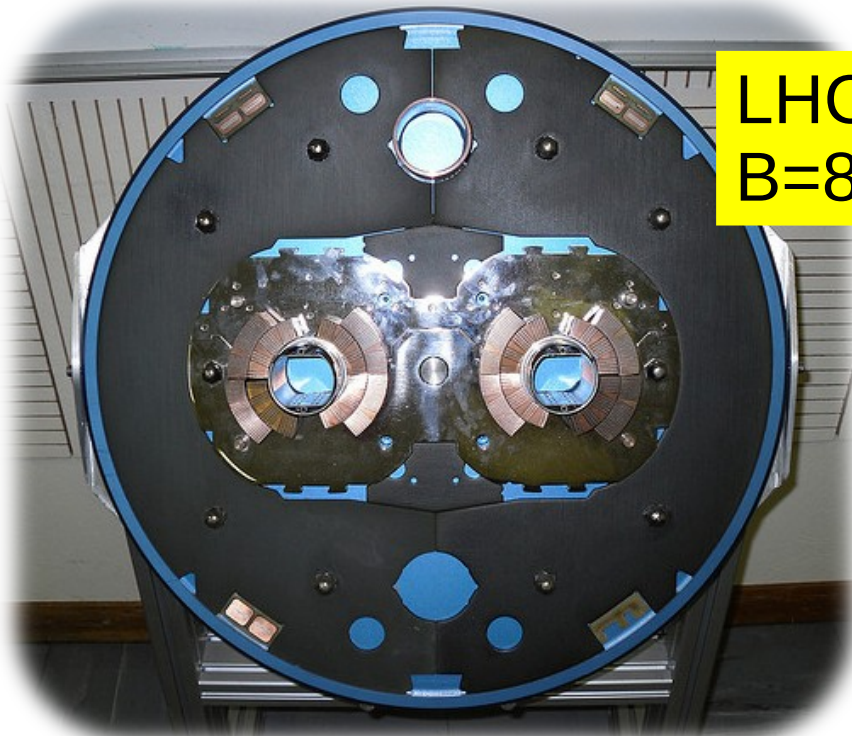


Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



Normál vezető dipól mágnes

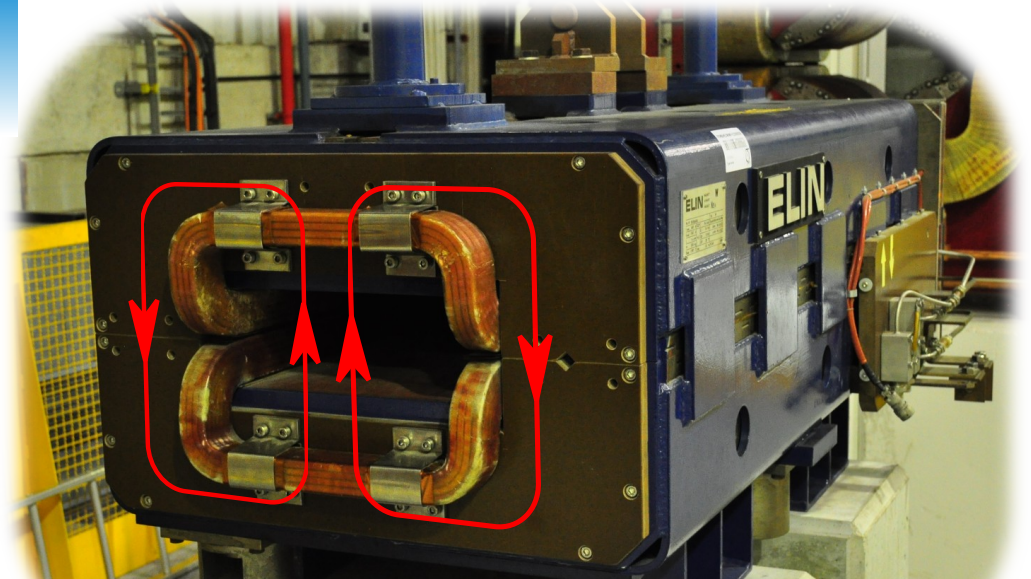


LHC szupravezető mágnesei
 $B=8.4$ Tesla, $T=1.9$ Kelvin

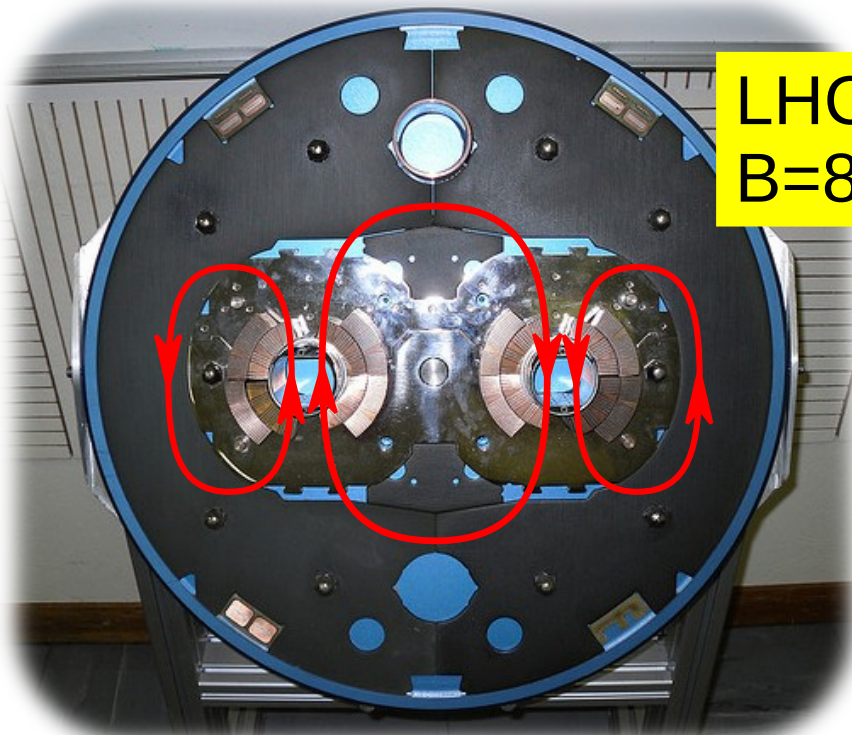


Eltérítő mágnesek

Cél: homogén mágneses teret létrehozni



Normál vezető dipól mágnes

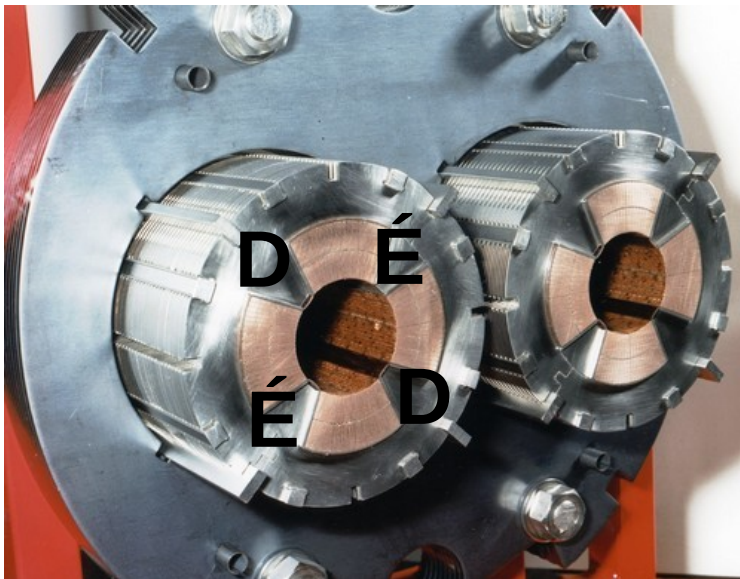
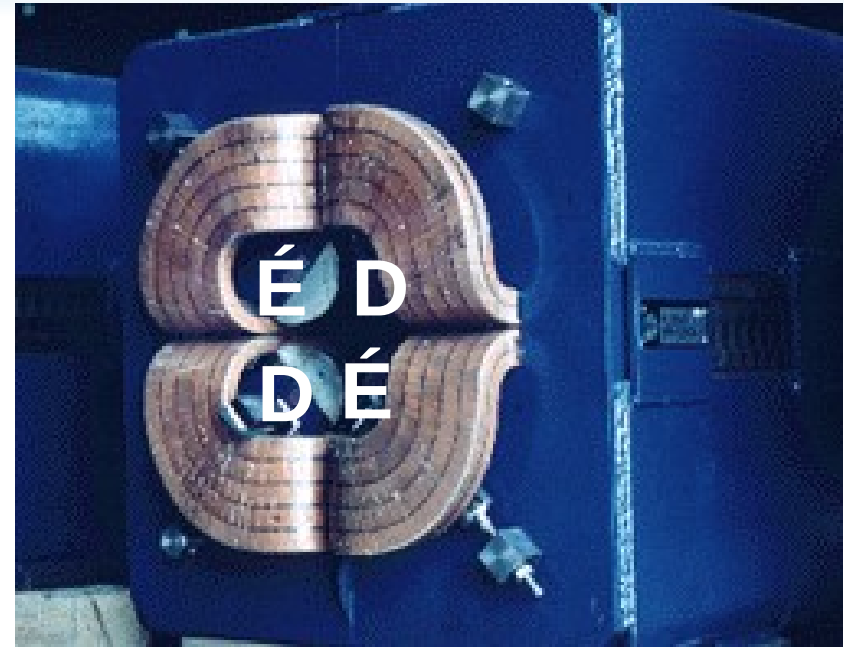


LHC szupravezető mágnesei
 $B=8.4$ Tesla, $T=1.9$ Kelvin



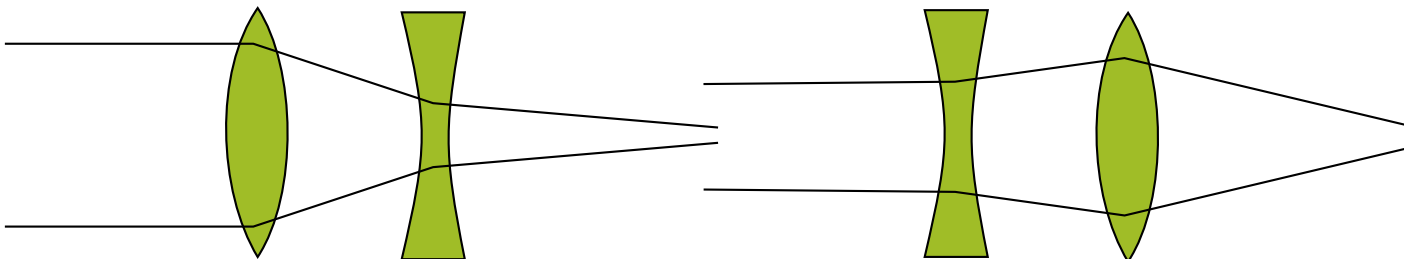
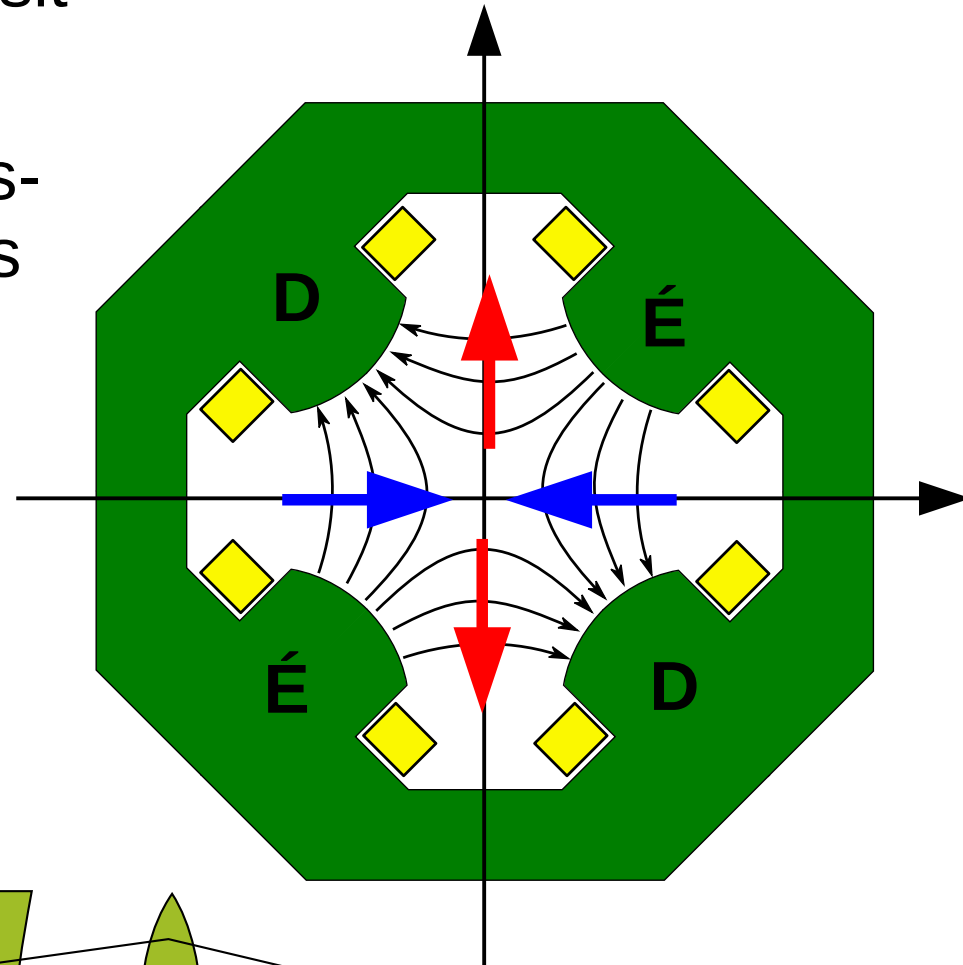
Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

- Egy valódi nyalábban mindig kicsit széttartó részecskék vannak
- Az ideális pályától eltérő részecskéket vissza kell téríteni a helyes nyomvonalra



Fókuszáló mágnesek – az egyenes szakaszokban

- Egy valódi nyalábban mindig kicsit széttartó részecskék vannak
- Az ideális pályától eltérő részecskéket vissza kell téríteni a helyes nyomvonalra
- Egyik síkban **fókuszál**,
másikban **defókuszál**
- Váltakozva egymás után:
eredő fókuszálás
(optikai analógia):

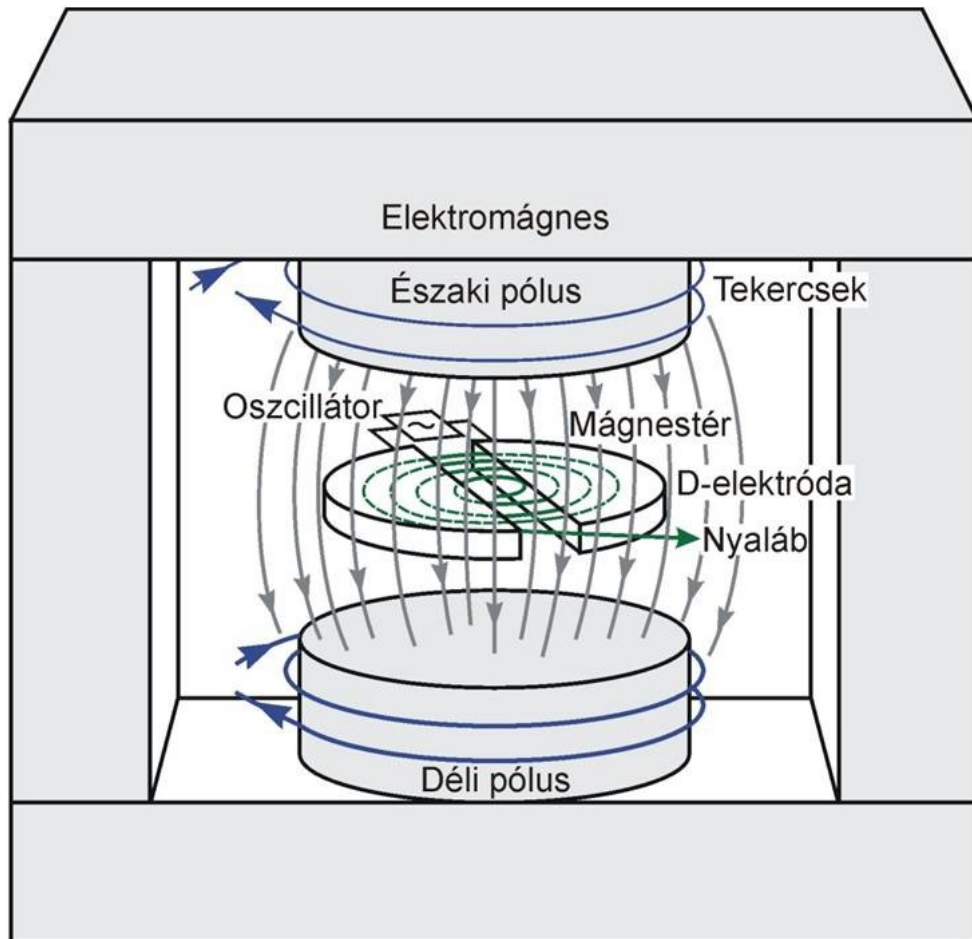


Más gyorsítófajták:

- **Ciklotron**
- **Betatron**
- **Induction linac**
- **Microtron**
- **Rhodotron**
- **stb...**

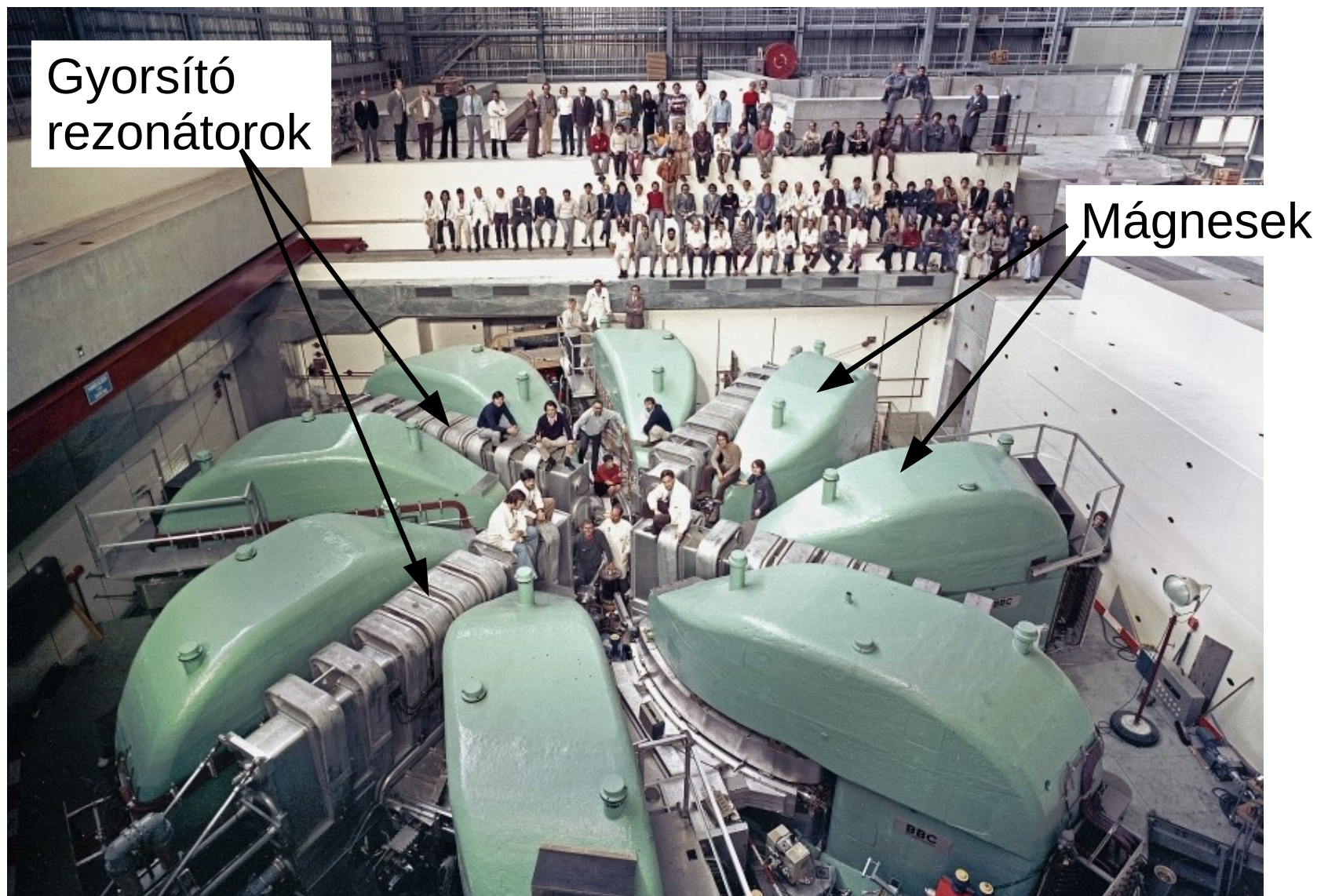
Ciklotron

- Amíg **nemrelativisztikus**: impulzussal arányosan nő
 - a pályasugár (megtett út)
 - sebesség
- A keringési **frekvencia nem változik**
- Részecske **szinkronban marad** a gyorsító, váltakozó térrel
- Wideroe linac “felcsavarva”



Lawrence & Livingston: első ciklotron (1931)

Ciklotron: Paul Scherrer Institut (CH)



- 590 MeV, proton
- Kutatási, ipari célokra

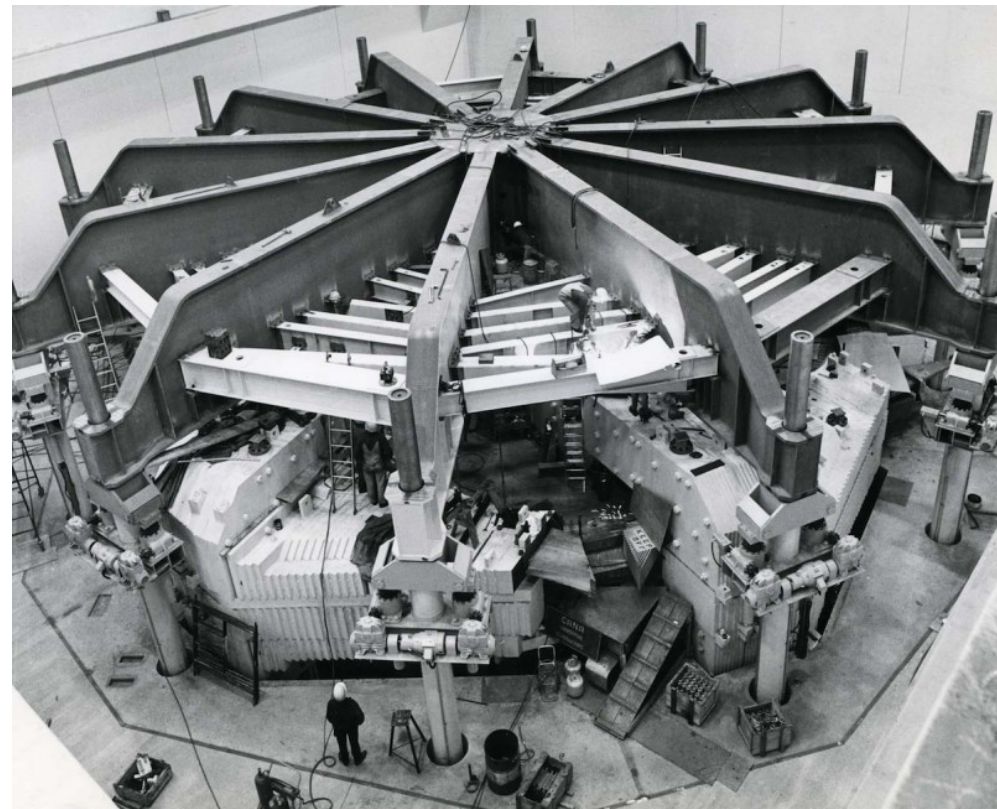
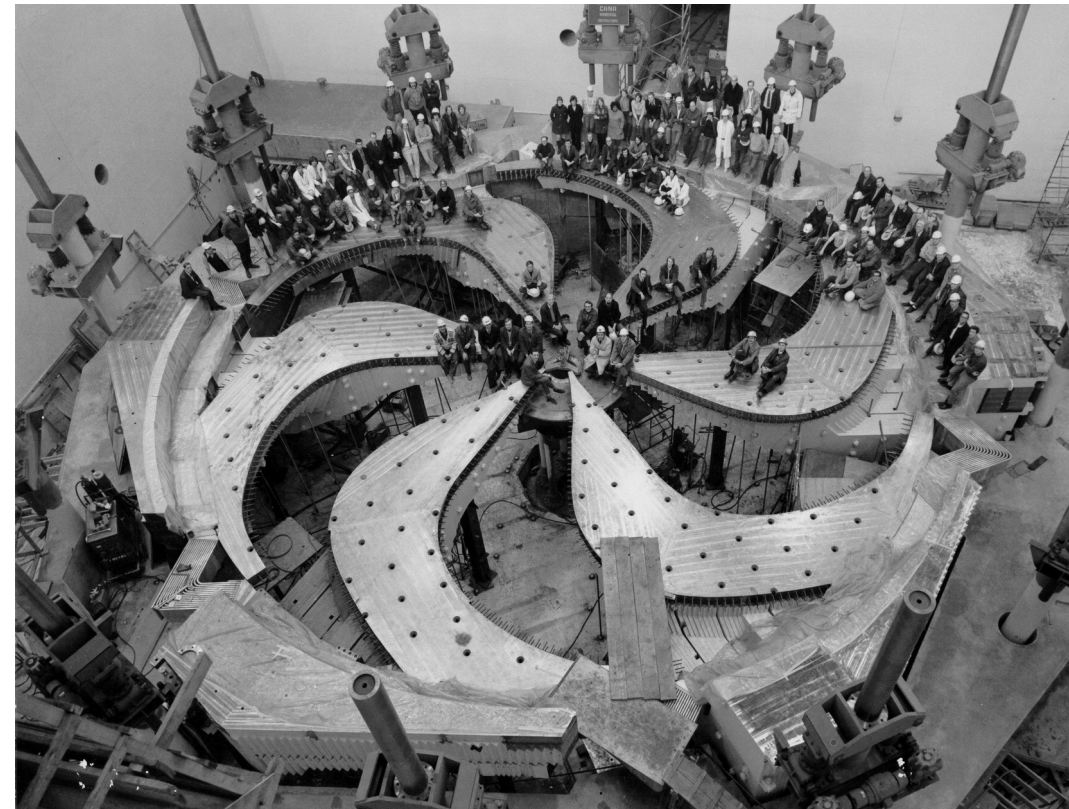
Ciklotron: Paul Scherrer Institut (CH)

- COMET
- Szupravezető mágnes
→ kompakt
- 250 MeV, proton
- Sugárterápiás célra



Ciklotron: TRIUMF (Kanada)

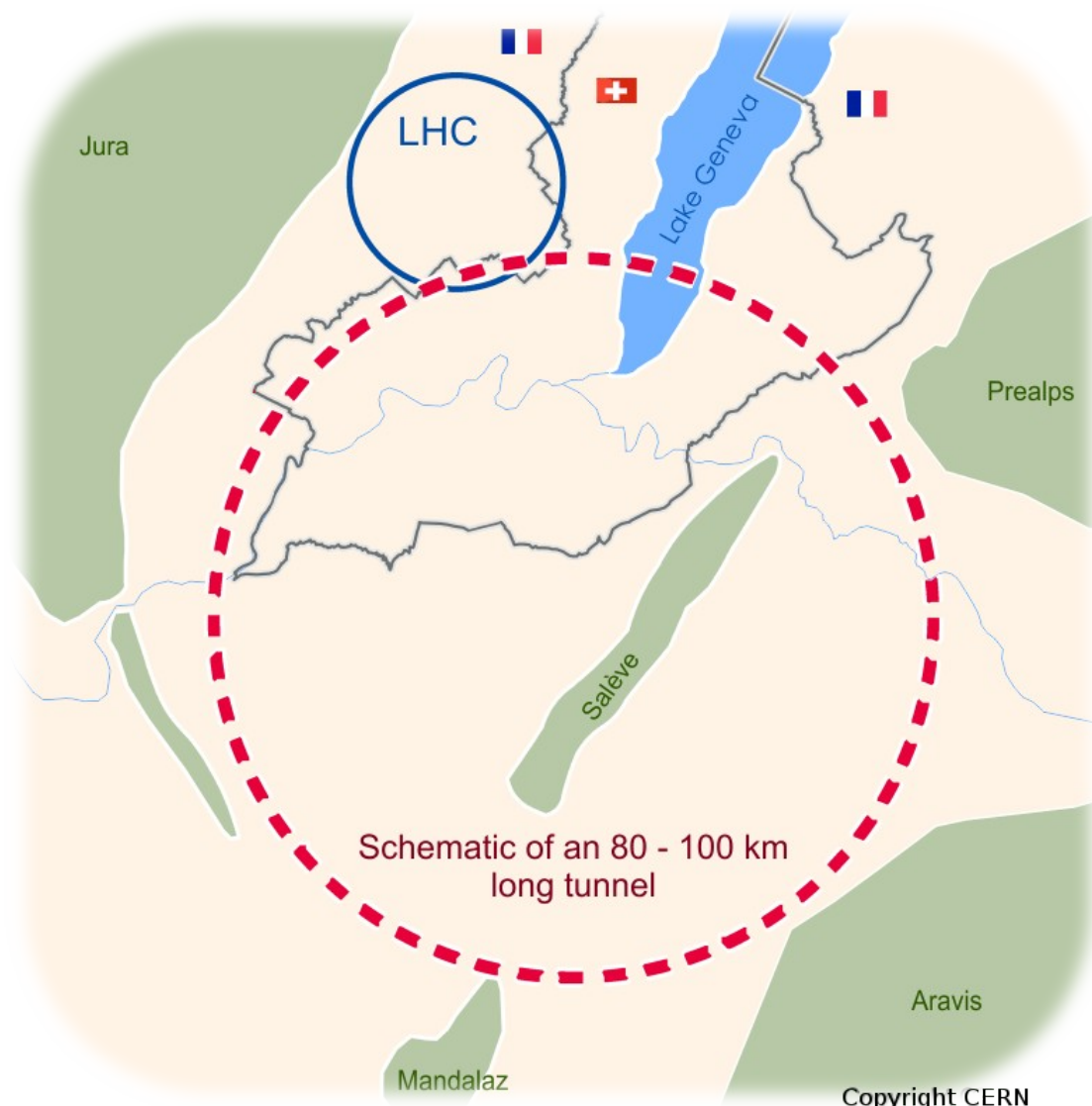
- 520 MeV, proton
- Kutatási célra



Kitekintés: tervek

Kitekintés: FCC (CERN)

- FCC – Future Circular Collider
- 100 km kerületű, 50+50 TeV ütközési energiájú proton-proton ütköztető
- Komoly technikai kihívások...
- ...de a gyorsítás elveiben nem új

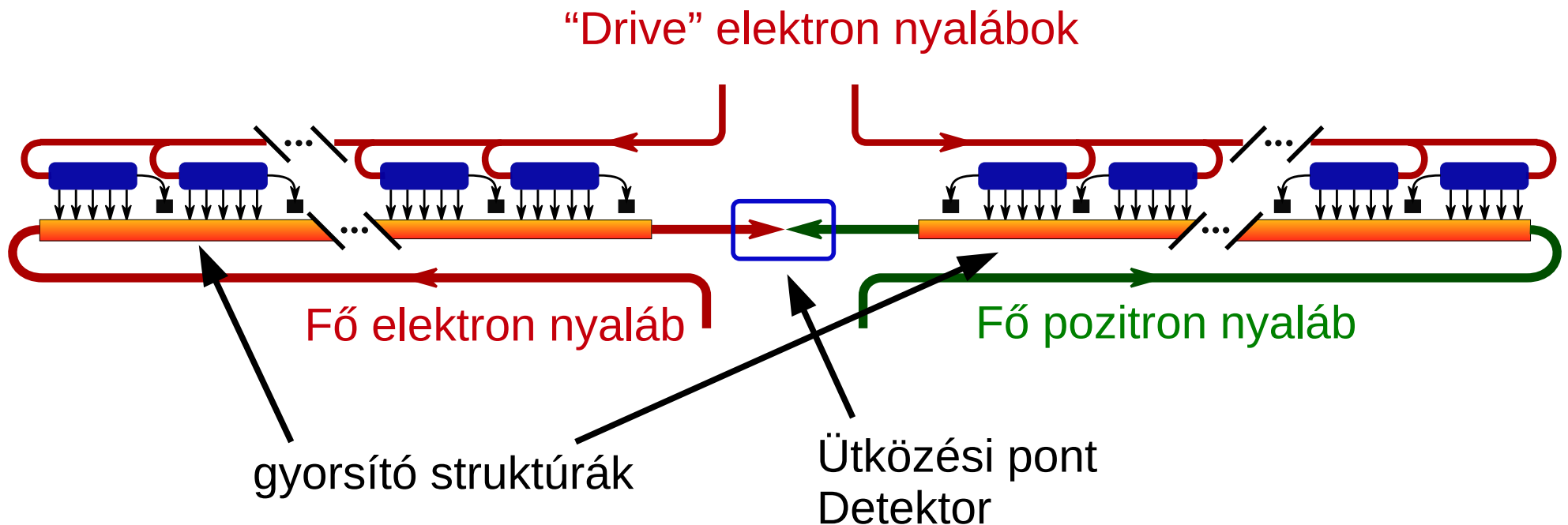


Kitekintés: Kínai super proton collider

- 52 km kerületű
- 240 GeV ütközési energiájú elektron-pozitron ütköztető
- 35+35 TeV ütközési energiájú proton-proton ütköztető

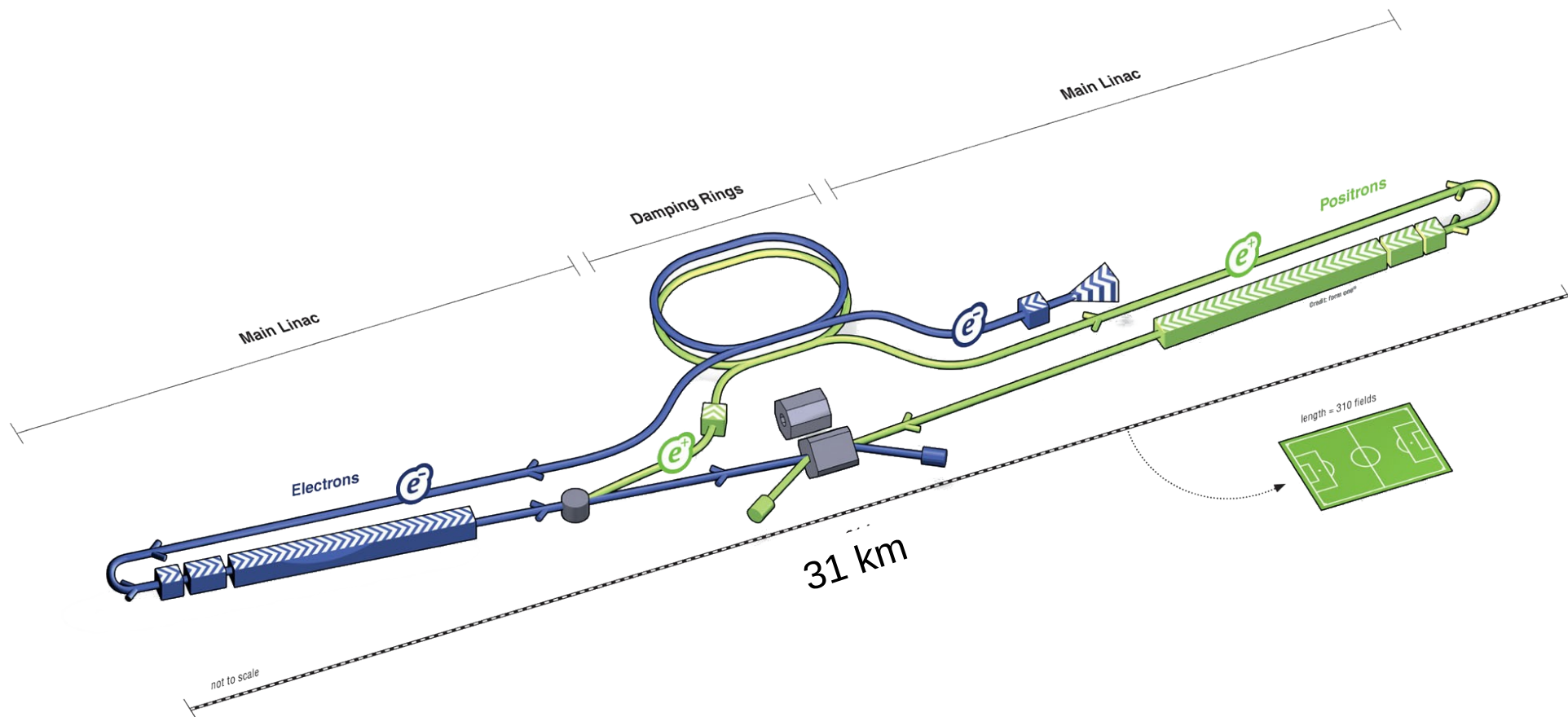
Kitekintés: CLIC

- **C**ompact **L**inear **C**ollider (@ CERN)
- Lineáris elektron-pozitron ütköztető
- 3 TeV teljes ütközési energia



Kitekintés: ILC

- **I**nternational **L**inear **C**ollider (Japán?)
- Lineáris elektron-pozitron ütköztető
- 500 GeV ütközési energia, 31 km hossz



Összefoglalás

- Akár a mindennapokban is találkozhatunk “részecskegyorsítókkal”, amik ugyanazokat az elveket használják, mint az “igazi” részecskegyorsítók
- Ha nem is “találkozunk” velük, a környezetünk nagyon sok eszközét “gyorsítók gyártották”
- Az egyre nagyobb energiák azért kellenek, hogy
 - egyre kisebb részecskékbe is “bele tudjunk nézni”
 - új, nagy tömegű részecskéket fedezhessünk fel
- Nagy energiákat több gyorsítófokozattal érhetünk el: forrás → lineáris → gyűrű(k)
- Kísérletek lehetnek ütköző-nyalábosak vagy fix céltárgyasak
- Igen ambíciózus gyorsítóépítési tervek...



Ismerős
valahonnan?

Mit tehettek Ti.....?

.... azért, hogy én ne érezzem ugyanezt?

- Kérdezetek: barna.daniel@wigner.hu
- Javasoljatok témákat, illusztrációkat, amik felkerülhetnének ide:
<https://wigner.hu/~barna/index.php?page=Lectures>
- Számoljátok ki a következő kérdéseket, csodálkozzatok el az eredményeken. Diákoknak is kiadható, motiváló feladatok.
- Írjátok meg, ha meglepő volt, javasoljatok további érdekes kérdéseket.

Érdemes kiszámolni (és diákokkal is kiszámoltatni) durva számok fognak kijönni

- LHC: 2808 csomag kering 1 irányban, 10^{11} proton van egy csomagban, egy proton energiája 7 TeV. Mekkora a teljes nyaláb energiája? Mekkora tömegű, $v=100$ km/h sebességű járműnek ugyanekkora a mozgási energiája?
- Mekkora a nyaláb össz-impulzusa? Mekkora az előző kérdésben szereplő jármű impulzusa?
- Mekkora tömegű vasat tudna megolvasztani ez az energia?
- 1 eltérítő (dipól) mágnesben tárolt mágneses energia 7 MJ. Mekkora sebességre lehetne felgyorsítani ezzel az energiával egy 1 tonnás járművet?
- A teljes LHC-ban 1232 (ezerkétszázharminckettő!) dipól mágnes van. Mekkora az ezekben tárolt összes energia? Mi történik ezzel az energiával amikor a gyűrűt újrainicializálják a következő ciklusra?
- Mennyi az összes LHC dipól mágnes egyszeri le- és vissza-kapcsolásának áramszámlája?
- Az LHC kerülete 27 km. Egy ütközési ciklus tipikusan 10 óra. Mekkora utat tesznek meg ez alatt a részecskék? Ez alatt hányszor mennek át a svájci-francia országhatáron?

Ami az eddigiekből kimaradt, de nagyon érdekes és elgondolkodtató

- Hogyan tudjuk a részecskéket a gyűrűkből ki, illetve a gyűrűkbe belőni?
- Nem taszítják egymást a nyaláb azonos töltésű részecskéi? Hogyan maradnak mégis együtt nyalábként?
- Mi történik, ha egy szupravezető mágnes “elszáll” (quench) és egy kis ponton normál vezetővé válik?
- Mi történik ekkor a nyalábbal?
- Hogyan tudunk egyáltalán megszabadulni ettől a borzalmas energiát tároló nyalábtól?
- A gyorsításhoz a részecskéknak csomagokban kell érkezniük. Hogyan maradnak együtt órákon keresztül, “csomagokban”, jóllehet a sebességük mindig kicsit eltérő?

Mit tehettek Ti, hogy ne történjen ez?

Hirdessétek, hogy már gimnazista korban is ki lehet jönni a CERN-be, és részt venni a munkában



- Szakály Marcell (2017 és 2018 nyár)
Fazekas Mihály gimnázium, Budapest
– gyorsítók [Barna D.]
- Veres Dóra Erzsébet (2018 nyár)
Fazekas Mihály gimnázium, Budapest
– gyorsítók [Barna D.]
- Kiss Gergely (2018 nyár)
Fazekas Mihály gimnázium, Budapest
– infó [Máthé Zoltán, Krasznahorkay Attila]