

Részecskegyorsítók

Veres Dóra¹

Köszönet Barna Dánielnek² az inspirációért, ábrákért, animációkért

¹dora.erzsebet.veres@cern.ch

²barna.daniel@wigner.hu

Az előadás tartalma tömören

- **Mi** az a részecskegyorsító?
- **Hol** használunk részecskegyorsítókat?
- **Miért** van szükség nagyenergiás részecskegyorsítókra?
- **Hogyan** működnek a részecskegyorsítók?
- **Miért** érdemes gyorsítófizikával foglalkozni?
- **Mivel** kelthetjük fel a diákok érdeklődését?

Mi az a részecskegyorsító?

Adott

- energiájú/momentumú,
- méretű és fókuszáltságú,
- idő-struktúrájú,
- típusú

részecskenyalábot állít elő statikus vagy változó **elektromágneses terek segítségével**

Mi az a részecskegyorsító?

Mágneses tér B:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- nem végez munkát \Rightarrow nem tudja növelni az energiát, **nem gyorsít**
- eltérít, fókuszál, ...
- részecske sebességétől függ \rightarrow nagy energián is hatékony

Elektromos tér E:

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

- tudja növelni az energiát, **gyorsít**
- persze eltéríteni, fókuszálni is tud
- részecske sebességétől független \rightarrow csak alacsony energián hatékony

Mi az a részecskegyorsító?

Mágneses tér B:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- nem végez munkát \Rightarrow nem tudja növelni az energiát, **nem gyorsít**
- eltérít, fókuszál, ...
- részecske sebességétől függ \rightarrow nagy energián is hatékony

Elektromos tér E:

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

- tudja növelni az energiát, **gyorsít**
- persze eltéríteni, fókuszálni is tud
- részecske sebességétől független \rightarrow csak alacsony energián hatékony

Nagy energián ($v = c$): $1 \text{ T} \leftrightarrow 300 \text{ MVm}^{-1}$
Mágneses teret használunk eltérítésre, fókuszálásra
Elektromos teret használunk gyorsításra

Hol használunk részecskegyorsítókat?

Világszerte ~30000 részecskegyorsító üzemel

44% sugárterápiás felhasználás

41% ion implantáció (félvezető gyártás, fém felületkezelés)

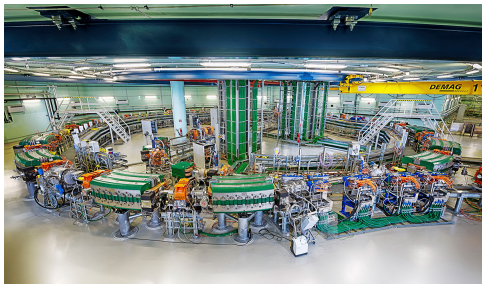
9% egyéb ipari felhasználás (anyagfeldolgozás, fertőtlenítés, tartósítás)

4% orvosi biológiai és egyéb alacsony-energiás kutatás

1% **nagyenergiás fizika**

1% egyéb (anyagtudomány, bio-üzemanyag gyártás, vízkezelés)

Hol használunk részecskegyorsítókat?

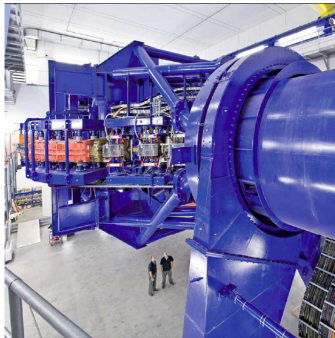


MedAustron, Bécsújhely

Proton Therapy Center, Prága



Hol használunk részecskegyorsítókat?



HIT, Heidelberg



Hol használunk részecskegyorsítókat?



Miért van szükség nagyenergiás részecskegyorsítókra?

Hogy minél kisebb részecskéket tanulmányozhassunk

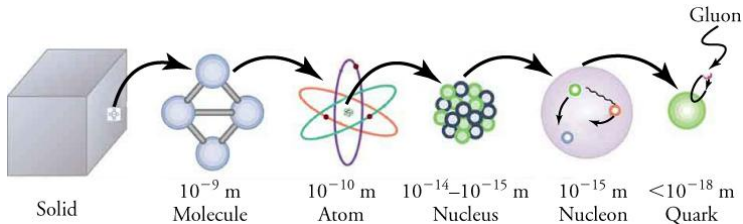
de Broglie: $\lambda = \frac{h}{p}$

nagyobb energia (momentum)
→ kisebb hullámhossz →
nagyobb felbontás

Hogy minél nagyobb tömegű új részecskéket fedezzünk fel

Einstein: $E = mc^2$

nagyobb energia → nagyobb tömeg



Hogyan működnek a részecskegyorsítók?

Kezdetek: elektrosztatikus gyorsítók

Van de Graaff, KFKI

Cockroft-Walton, CERN



Elektromos átütés veszélye
Limit: néhány MeV



Kezdetek: elektrosztatikus gyorsítók

Van de Graaff, KFKI

Cockroft-Walton, CERN



Nem lehetne ugyanazt a teret többször felhasználni?

Kezdetek: elektrosztatikus gyorsítók

Van de Graaff, KFKI

Cockroft-Walton, CERN

Elektromos átütés veszélye

Limit: néhány MeV

Az elektrosztatikus tér konzervatív

⇒ **limitet nem lehet túllépni többszöri áthaladással**



Nem lehetne ugyanazt a teret többször felhasználni?

NEM!

Kezdetek: elektrosztatikus gyorsítók

Van de Graaff, KFKI

Cockroft-Walton, CERN

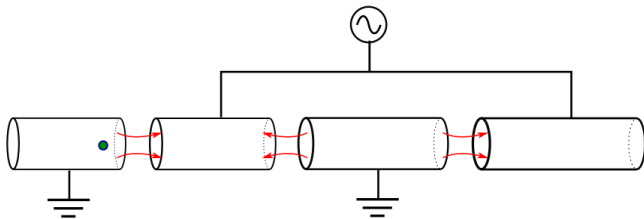
Elektromos átütés veszélye
Limit: néhány MeV
Az elektrosztatikus tér konzervatív
⇒ limitet nem lehet túllépni többszöri áthaladással



Ha az elektrosztatikus tér nem működik, akkor hogyan tovább?

Wideroe Linac

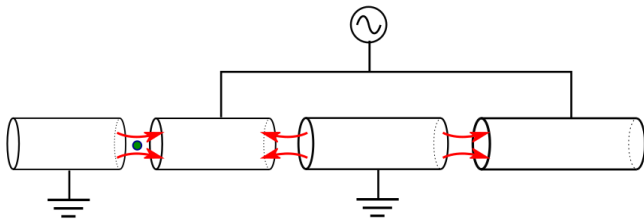
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

Wideroe Linac

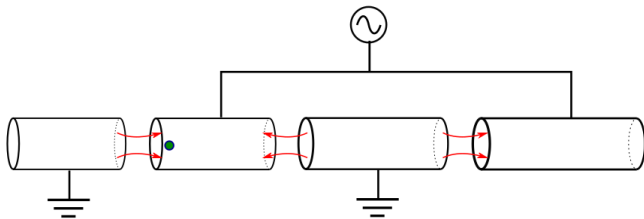
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

Wideroe Linac

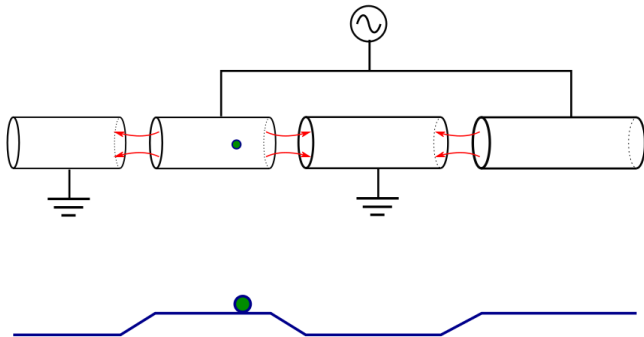
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

Wideroe Linac

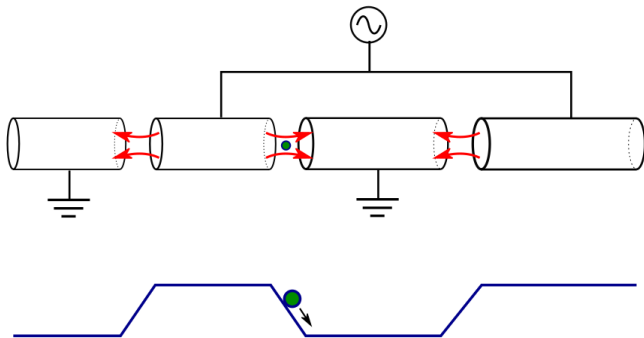
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

Wideroe Linac

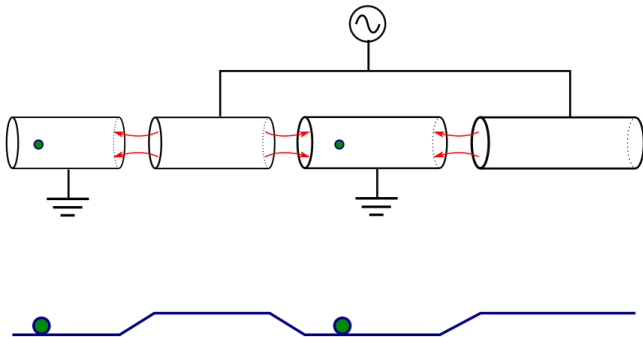
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

Wideroe Linac

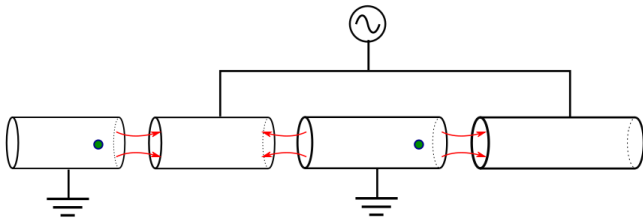
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

Wideroe Linac

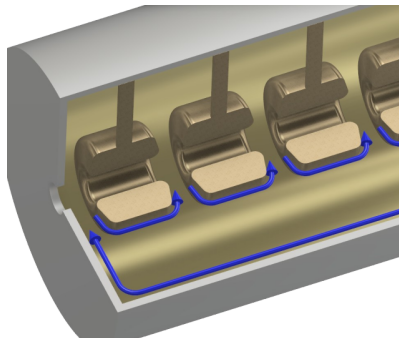
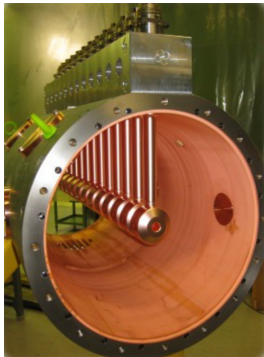
- **Időben változó elektromos tér!**
- Komponensek között max ΔV feszültség, de a maximum energia $E = nq\Delta V$
- Csak jó fázisban érkező részecskék gyorsulnak \rightarrow részecskék csomagokban érkeznek



animáció

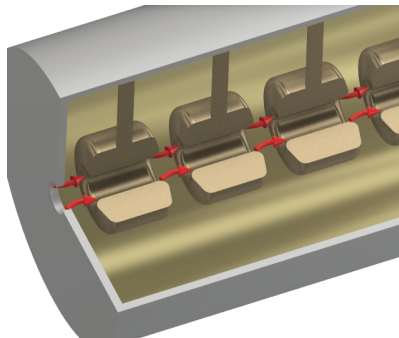
Alvarez (drift tube) Linac

- Mágneses és **elektromos** energia egymásba oszcillál
- Oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható
- Fókuszálás a drift tube-okban
- **Limit: gyorsító hossza \Rightarrow körkörös gyorsító, ugyanazt a gyorsító struktúrát többször felhasználni**



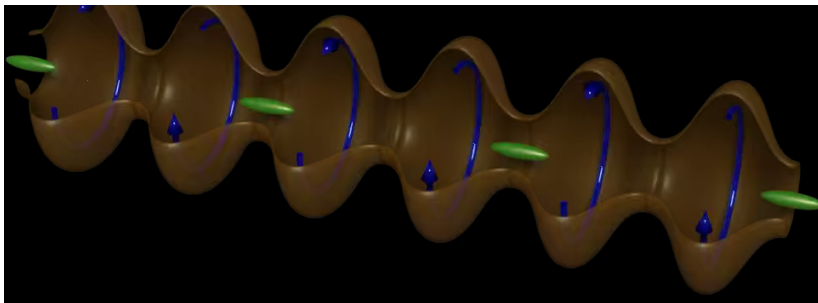
Alvarez (drift tube) Linac

- Mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál
- Oszcilláció kis energiabefektetéssel fenntartható
- Fókuszálás a drift tube-okban
- **Limit: gyorsító hossza \Rightarrow körkörös gyorsító, ugyanazt a gyorsító struktúrát többször felhasználni**



Sokcellás gyorsító rezonátor

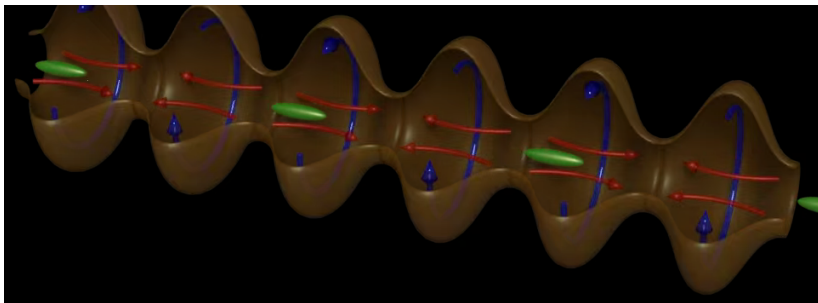
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

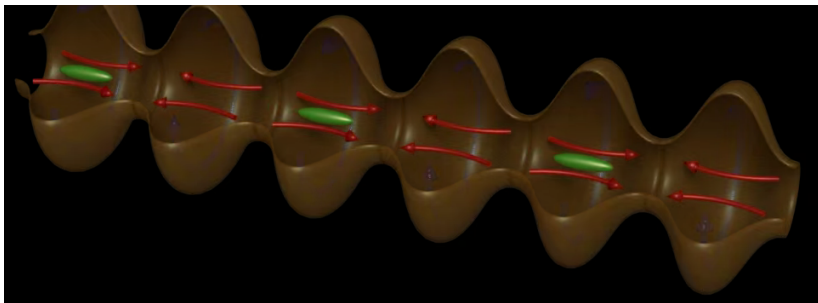
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

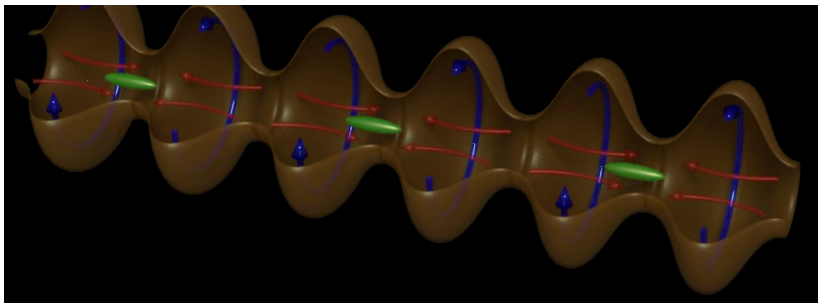
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

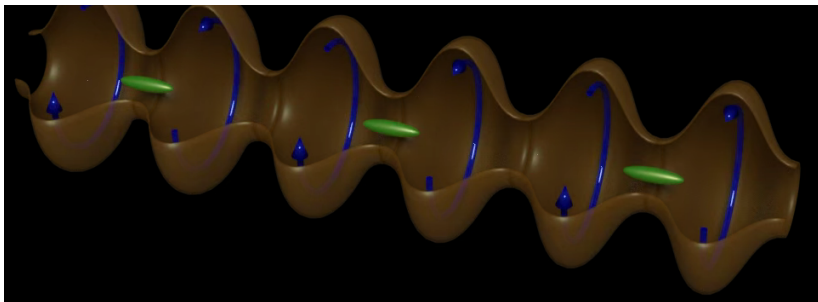
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

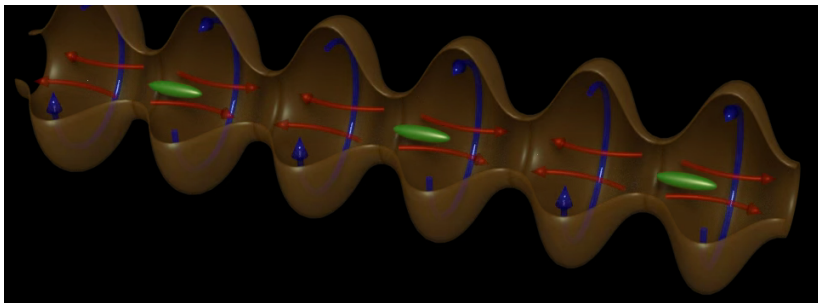
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

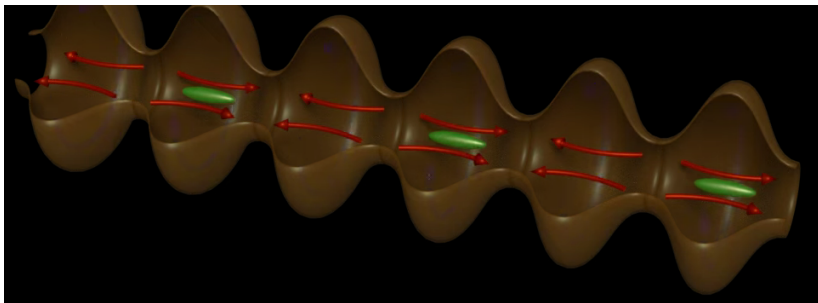
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

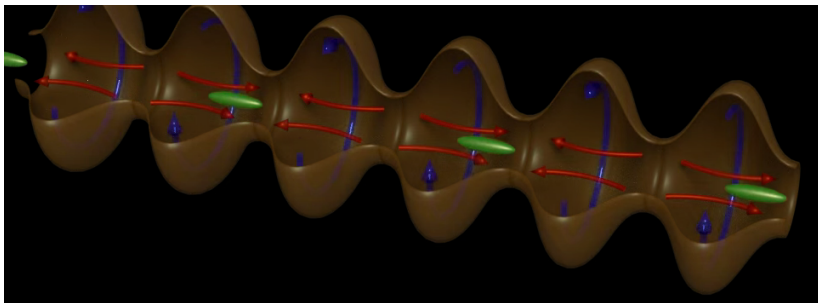
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

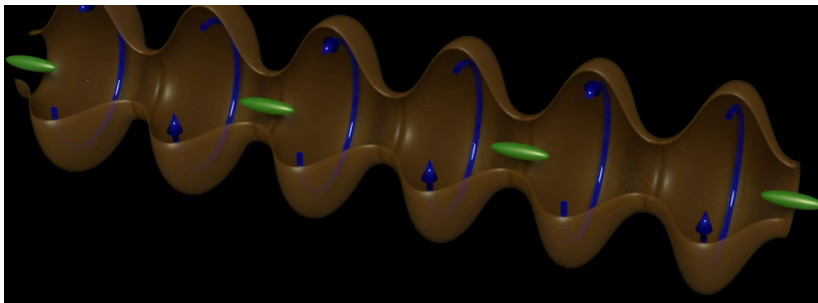
- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál



animáció

Sokcellás gyorsító rezonátor

- Ugyanaz az elv: mágneses és elektromos energia egymásba oszcillál

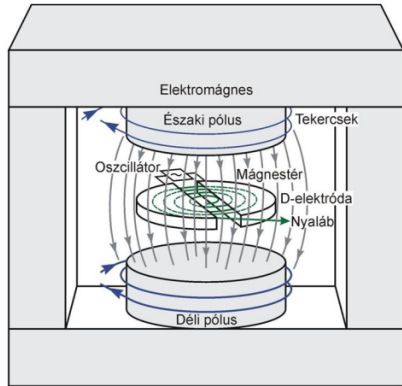


animáció

Kitérő: ciklotron

- Amíg $v \ll c$,
 - momentummal arányosan nő a pálya sugara, részecskék spirál utat járnak be
 - a keringési frekvencia nem változik, a részecske szinkronban marad a gyorsító feszültséggel
- Relativisztikus eset: szinkrociklotron
 - a gyorsító feszültség frekvenciája csökken, ahogy nő a részecske energiája

$$f = \frac{qB}{2\pi\gamma m_0}$$



Kitérő: ciklotron

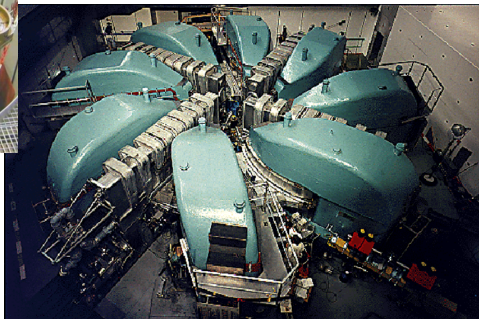


PSI Ring Cyclotron, 590 MeV

- moduláris, szektor mágnesekkel
- box rezonátorok
- kutatási célra

PSI COMET, 100-230 MeV

- szupravezető → kompakt
- AVF (egy pólus, spirál alakban megmunkálva)
- D alakú RF elektróda
- sugárterápiás célra



Szinkrotron

Miért gyűrű?

- Ugyanaz a gyorsító rezonátor többször felhasználható
- Ellentétes irányban köröző nyalábok ütközhetnek \Rightarrow nagyobb tömegközépponti energia
- Ütközést túlélő részecskék tovább körözhetnek

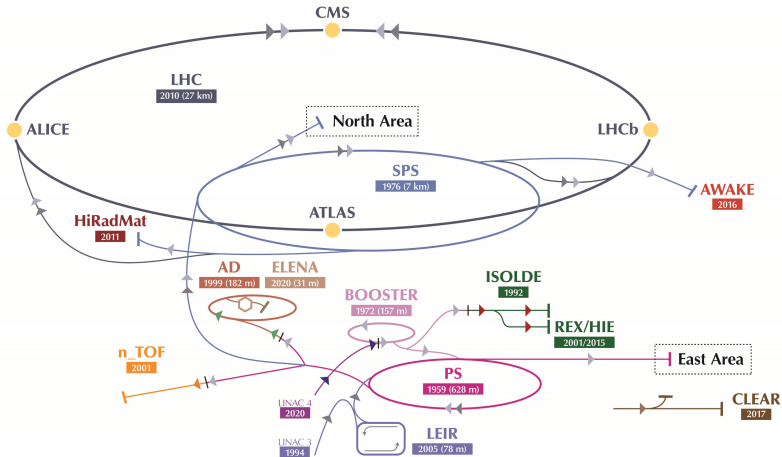
Miért "szinkro"?

A nyaláb energiájával szinkronban kell növelni a

- mágnesek terét – hogy ugyanazon a körpályán haladhasson a nyaláb
- gyorsító rezonátor frekvenciáját – mivel csökken a keringési idő

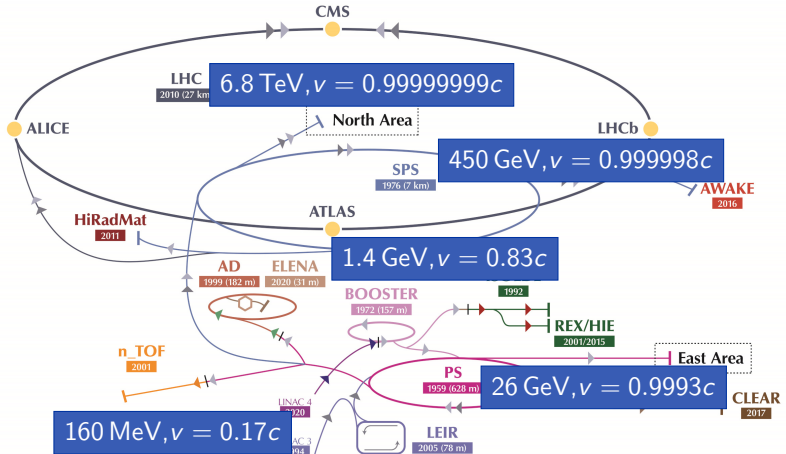
Szinkrotron

A CERN gyorsító komplexuma:



Szinkrotron

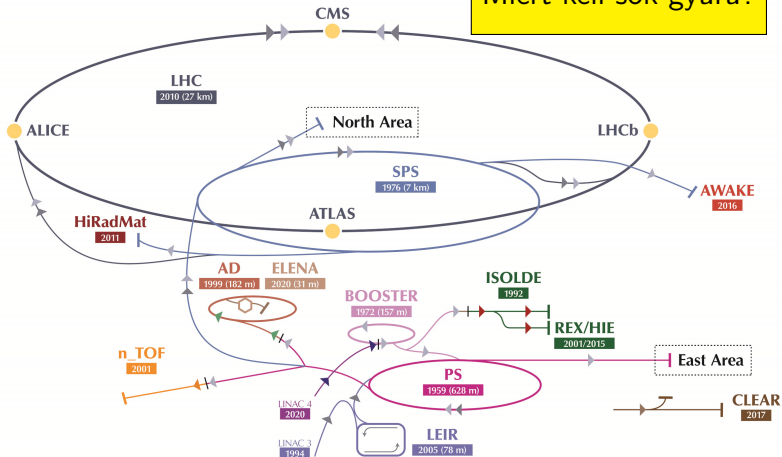
A CERN gyorsító komplexuma:



Szinkrotron

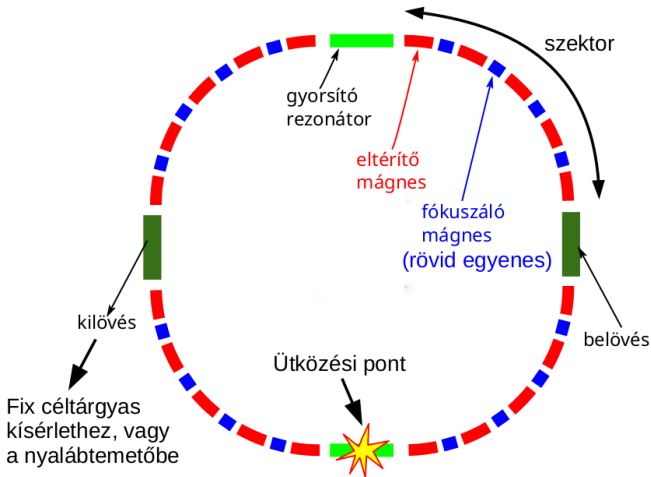
A CERN gyorsító komplexuma:

Miért kell sok gyűrű?



Szinkrotron

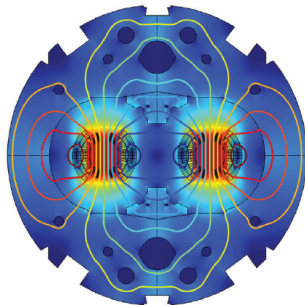
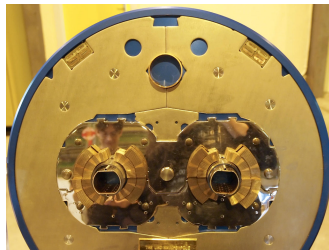
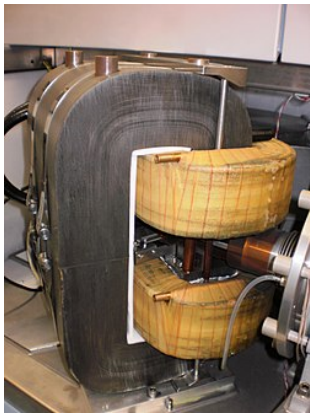
Az erősen fókuszáló szinkrotron főbb komponensei:



Szinkrotron

Eltérítő mágnesek

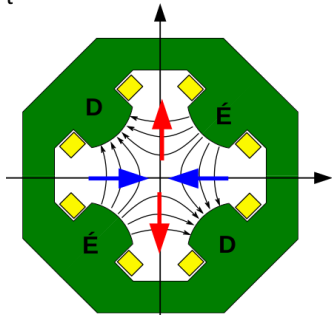
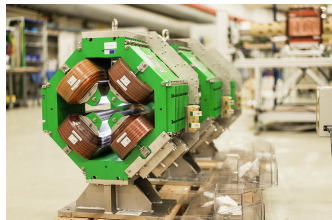
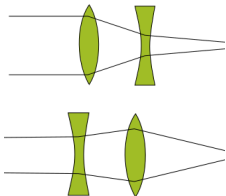
- 2 pólusú, dipól mágnes
- homogén mágneses tér



Szinkrotron

Fókuszáló mágnesek

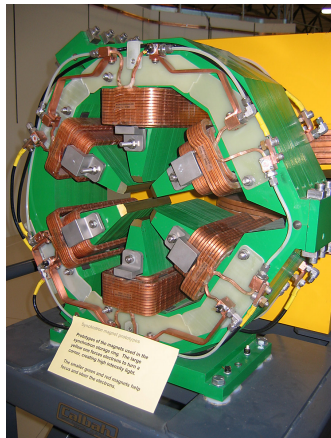
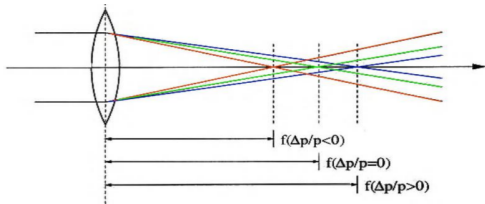
- A nyaláb mindig valamennyire széttartó → ideális pályától eltérő részecskéket vissza kell téríteni
- 4 pólus, kvadrupól mágnes
- Egyik síkban fókuszál, másikban defókuszál
- Egymás után 90° -kal elforgatva = nettó fókuszálás



Szinkrotron

Korrekciók

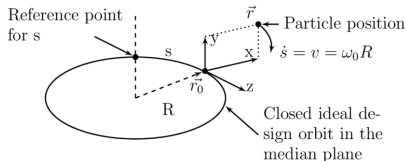
- Ideálistól enyhén eltérő momentumú részecskéket a kvadrupólok eltérően fókuszálják (chromaticity)
 - Szextupól mágnesekkel korrigálható
- ... egyéb magasabb rendű korrekciók



Szinkrotron

A részecskék mozgása

- Együttlmozgó, Frenet-Serret koordináta rendszer:



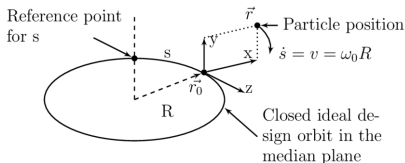
- Mozgásegyenlet:

$$x''(s) + K(s)x(s) = 0$$

Szinkrotron

A részecskék mozgása

- Együttmozgó, Frenet-Serret koordináta rendszer:



- Mozgásegyenlet:

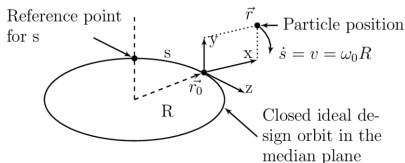
Ismerős?

$$x''(s) + K(s)x(s) = 0$$

Szinkrotron

A részecskék mozgása

- Együttmozgó, Frenet-Serret koordináta rendszer:



- Mozgásegyenlet:

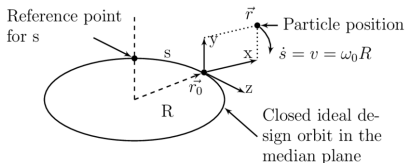
$$x'' + K x = 0$$

Harmonikus oszcillátor

Szinkrotron

A részecskék mozgása

- Együttmozgó, Frenet-Serret koordináta rendszer:



- Mozgásegyenlet:

$$x''(s) + K(s)x(s) = 0$$

Hill egyenlet

Szinkrotron

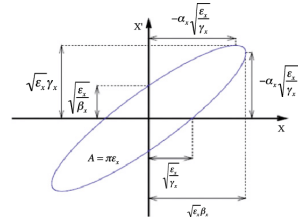
A részecskék mozgása

- A mozgásegyenlet megoldása:

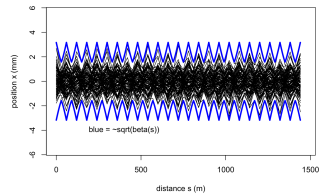
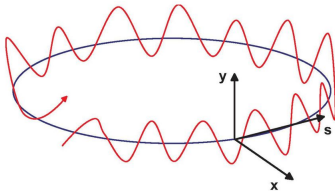
$$x(s) = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\beta(s)} \cos[\Psi(s) + \phi]$$

$$x'(s) = -\frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\beta(s)}} [\alpha(s) \cos(\Psi(s) + \phi) + \sin(\Psi(s) + \phi)]$$

- A részecskék az ideális pálya körül oszcillálnak (betatron oszcilláció)
- Az $x - x'$ fázistérben a részecskék ellipsziseken mozognak



schematic of betatron oscillation around storage ring



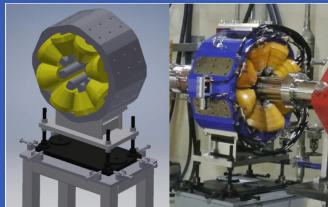
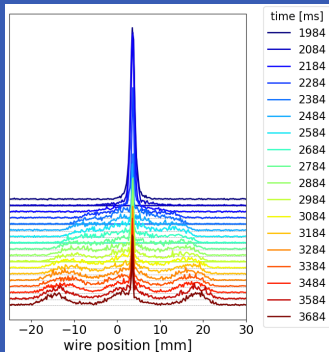
További összetevők madártávlatból

(single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika

További összetevők madártávlatból

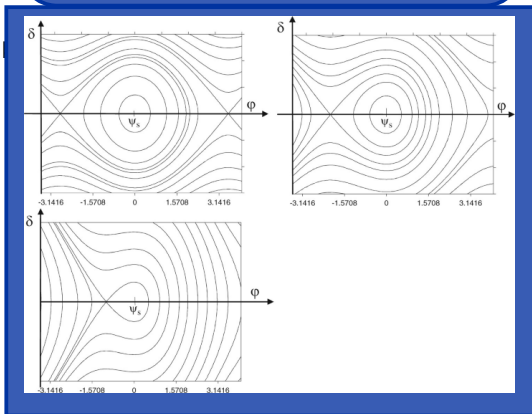
- (single-particle) lineáris transzverz

(single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika, longitudinális nyalábdinamika, RF gyorsítás
- (single-particle) transzverz nyaláboptika



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika

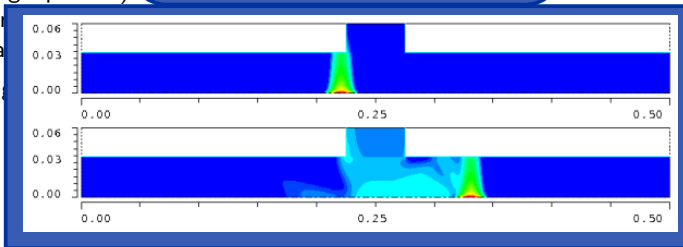
space charge, wakefields, impedancia

- (single-particle)

tra

nya

- lon



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és

nyaláb-nyaláb kölcsönhatás

- (single-particle) nem

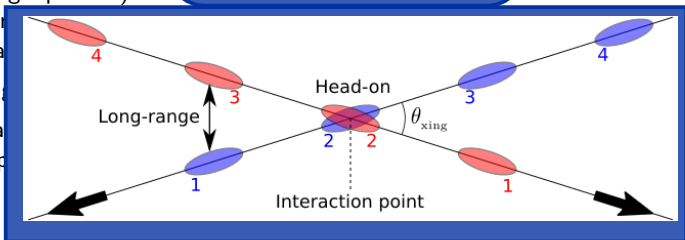
tra

nya

- long

- spa

imp



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és

elektron felhő

- (single-particle) nem

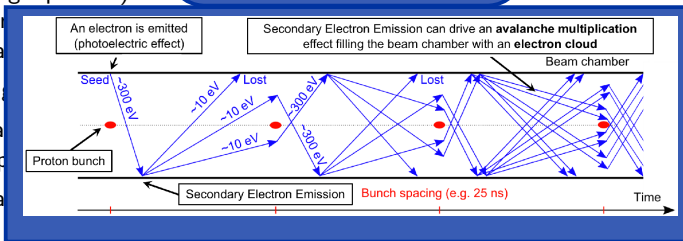
tra
nya

- lon

- spa

imp

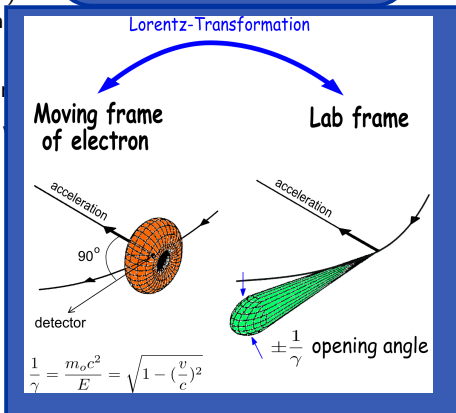
- nya



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyaláboptika
- longitudinális
- space charge, impedancia
- nyaláb-nyaláb
- elektron felhő

szinkrotronsugárzás



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz

nyalábdin

becsatolás, kicsatolás, gyorsítók közötti transzfer

- (single-pa

tra

nya

- lon

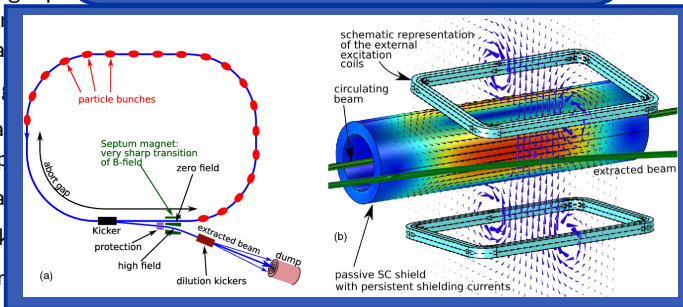
- spa

imp

- nya

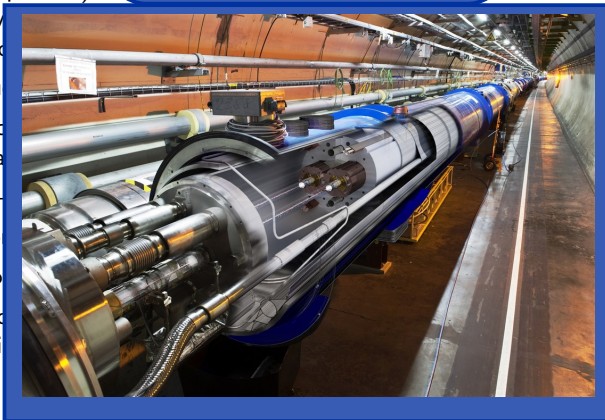
- elek

- szir



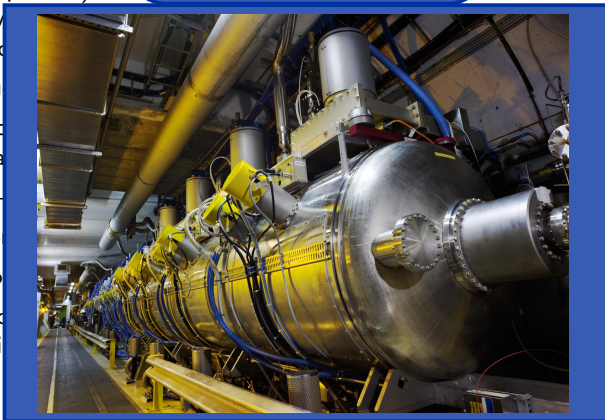
További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és normál és szupravezető mágnesek
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika
- longitudinális nyalábdinamika
- space charge impedancia
- nyalábdinamika
- elektrostatikus
- szinkrotron
- becsapódási
- közötti



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és RF üregrezonátorok szupravezető mágnesek
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika
- longitudinális nyalábdinamika
- space charge hatások impedanciák
- nyalábdinamika
- elektrostatikus hatások
- szinkrotron hatások
- becsapódások közötti hatások



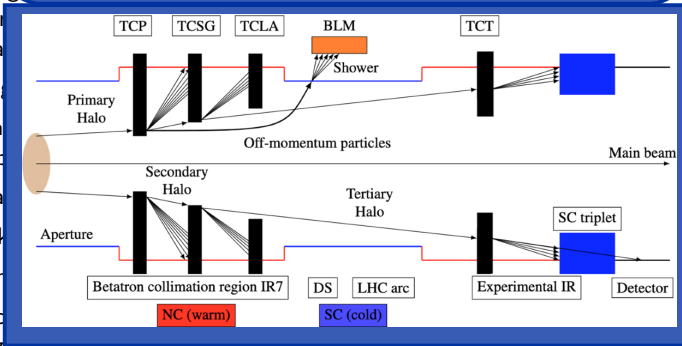
További összetevők madártávlatból

kriogenika

- (single-particle) lineáris nyalábdinamika és nyaláboptika és szupravezető mágnesek
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika
 - RF üregrezonátorok
- longitudinális nyalábdinamika, RF
- space charge, wakefields, impedancia
- nyaláb-nyaláb kölcsönhatás
- elektron felhő
- szinkrotronsugárzás
- becsatolás, kicsatolás, gyorsítók közötti transzfer

További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz
- ny
- collimation, sugárvédelem, részecske-anyag kölcsönhatás mágnesek



További összetevők madártávlatból

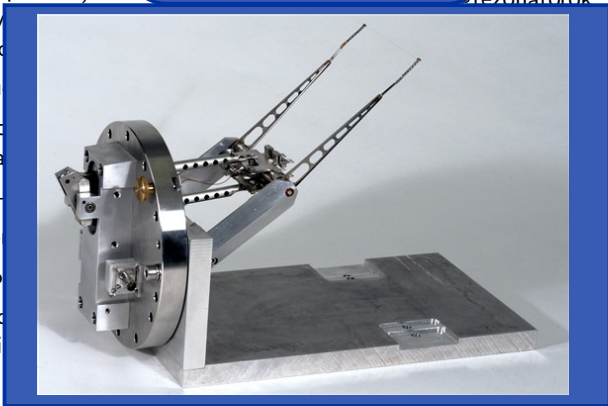
vákuum technológia

- (single-particle) lineáris nyalábdinamika és nyaláboptika
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika
- longitudinális nyalábdinamika, RF
- space charge, wakefields, impedancia
- nyaláb-nyaláb kölcsönhatás
- elektron felhő
- szinkrotronsugárzás
- becsatolás, kicsatolás, gyorsítók közötti transzfer
- szupravezető mágnesek
- RF üregrezonátorok
- kriogenika
- collimation, részecske-anyag kölcsönhatás, sugárzásvédelem

További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és nyalábdinamika és nyalábdinamika
 - (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika és nyalábdinamika
 - longitudinális nyalábdinamika
 - space charge impedancia
 - nyalábdinamika
 - elektrostatikus nyalábdinamika
 - szinkrotron nyalábdinamika
 - becsapódási nyalábdinamika közötti
- szupravezető mágnesek
- rezonátorok
- anyag védelem

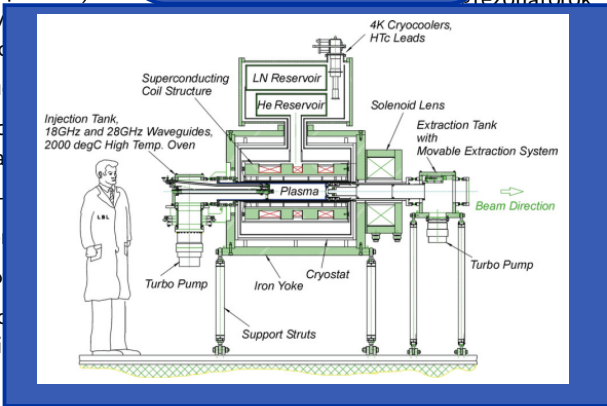
nyalábdinamika



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és **források, céltárgyak** szupravezető mágnesek
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika rezonátorok

- longitudinális nyalábdinamika
- space charge hatások impedanciák
- nyalábdinamika
- elektrostatikus hatások
- szinkrotron hatások
- becstől a megsemmisítésig közötti hatások



További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris nyalábdinamika és **vezérlő rendszerek, software** és szupravezető mágnesek
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika
- longitudinális nyalábdinamika, RF
- space charge, wakefields, impedancia
- nyaláb-nyaláb kölcsönhatás
- elektron felhő
- szinkrotronsugárzás
- becsatolás, kicsatolás, gyorsítók közötti transzfer
- RF üregrezonátorok
- kriogenika
- collimation, részecske-anyag kölcsönhatás, sugárzásvédelem
- vákuum technológia
- nyalábdiaosztika
- források, céltárgyak

További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és **robotika** szupravezető mágnesek
- (single-particle) nemlineáris rezonátorok
- transzverz nyaláb
- longitudinális
- space charge impedancia
- nyaláb-szélesség
- elektrostatikus
- szinkrotron
- becsapódások közötti



-anyag
svédelem

ftware

További összetevők madártávlatból

- (single-particle) lineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika
- (single-particle) nemlineáris transzverz nyalábdinamika és nyaláboptika
- longitudinális nyalábdinamika, RF
- space charge, wakefields, impedancia
- nyaláb-nyaláb kölcsönhatás
- elektron felhő
- szinkrotronsugárzás
- becsatolás, kicsatolás, gyorsítók közötti transzfer
- normál és szupravezető mágnesek
- RF üregrezonátorok
- kriogenika
- collimation, részecske-anyag kölcsönhatás, sugárzásvédelem
- vákuum technológia
- nyalábdiaosztika
- források, céltárgyak
- vezérlő rendszerek, software
- robotika

Miért érdemes gyorsítófizikával foglalkozni?

Miért érdemes gyorsítófizikával foglalkozni?

- A fizika sok különböző területe olvad össze benne
- Változatos és komplex tudásra lehet szert tenni
- Mindenki megtalálhatja benne a neki tetsző munkát
 - elmélet, szimuláció, mérés, adatelemzés, szoftverfejlesztés, komponensek tervezése, legyártása, tesztelése, operátori munka
- Van jövő, vannak tervek
 - Létező gyorsítók upgrade-jei
 - Új gyorsítók

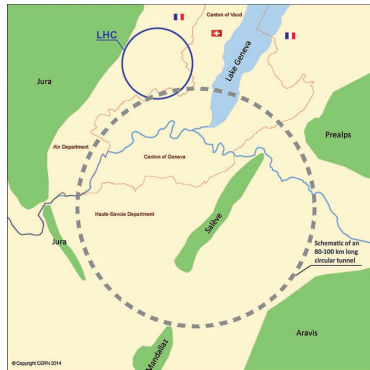
Miért érdemes gyorsítófizikával foglalkozni?

- A fizika sok különböző területe olvad össze benne
- Változatos és komplex tudásra lehet szert tenni
- Mindenki megtalálhatja benne a neki tetsző munkát
 - elmélet, szimuláció, mérés, adatelemzés, szoftverfejlesztés, komponensek tervezése, legyártása, tesztelése, operátori munka
- Van jövő, vannak tervek
 - Létező gyorsítók upgrade-jei
 - **Új gyorsítók**

A jövő gyorsítói (?)

Future Circular Collider (FCC), CERN

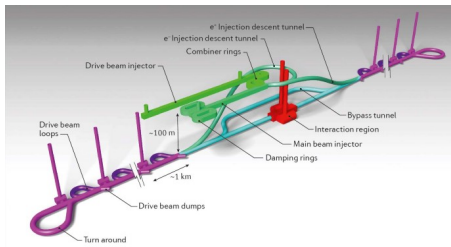
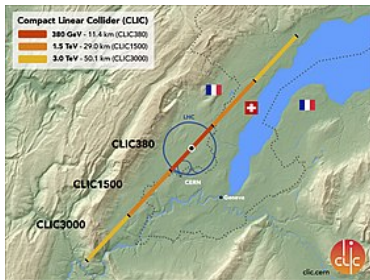
- ~ 90 km területű gyűrű
- két fázis:
 - FCC-ee: elektron-pozitron ütköztető, precíziós mérések (Z, top, Higgs)
 - FCC-hh: hadron ütköztető, 100 TeV tömegközépponti energia, új fizika
- operáció ~ 2040 -tól



A jövő gyorsítói (?)

Compact Linear Collider (CLIC), CERN

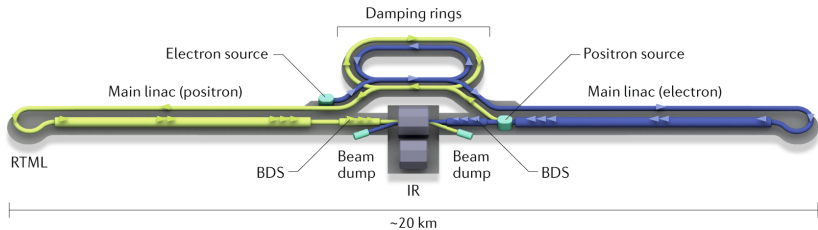
- lineáris elektron-pozitron ütköztető
- 11-50 km, akár 3 TeV tömegközépponti energia
- precíziós mérések (Higgs)



A jövő gyorsítói (?)

International Linear Collider (ILC), Japán?

- lineáris elektron-positron ütköztető
- 30-50 km, 500 GeV tömegközépponti energia



Mivel kelthetjük fel a diákok
érdeklődését?

Mivel kelthetjük fel a diákok érdeklődését?

"Fun facts"

- Az LHC-hez legyártott 6000-9000 szupravezető nióbbium-titán szál 10-szer vékonyabb egy emberi hajnál. Egymás után pakolva Föld-Nap távot oda-vissza 6-szor elérnék még kb 150 Föld-Hold táv extrával
- Az LHC-nek kb 1 millió évbe telne elhasználni 1 g hidrogént
- Az LHC-ben ultramagas vákuum van, a nyomás kb annyi, mint a Holdon
- Az LHC két nyalábjának pontos ütköztetése azt a precizitást igényli, mintha két kötőtűt akarnánk ütköztetni az Atlanti óceán ellentétes partjairól indítva
- Az LHC gyűrűje "érzi" a Hold gravitációjának hatását, a nyalábok pályáját ennek megfelelően korrigálni kell.

Mivel kelthetjük fel a diákok érdeklődését?

Érdekes/meghökkenítő számolások

- Az LHC-ben $2808 \cdot 10^{11}$ protont tartalmazó csomag kering nyalábonként. Egy proton energiája 6.8 TeV. Mekkora a teljes nyaláb energiája? Ez mekkora tömegű 100 km/h sebességű jármű mozgási energiájának felel meg?
- Mekkora a nyaláb impulzusa? Ez hogy viszonyul az előző jármű impulzusához?
- Mekkora tömegű rezes tudna megolvasztani ez az energia?
- 1 LHC dipól mágnesben tárolt energia 7 MJ. Mekkora sebességre lehetne felgyorsítani ezzel egy 1 t-ás járművet?
 - Mi történik ezzel az energiával, ha egy szupravezető mágnes kis ponton normál vezetővé válik (quench)?
- Az LHC kerülete 27 km. Egy ütközési ciklus kb 10 óra. Mekkora utat tesznek meg ez alatt a részecskék? Hányszor mennek át a svájci-francia határon?

Mivel kelthetjük fel a diákok érdeklődését?

Gimis korban, fiatal egyetemistaként is ki lehet jutni a CERN-be!

- gyakornok/trainee program
- nyári diák program
- Beamline for Schools verseny

Köszönöm a figyelmet!

