CERNs Acceleratorer – en kort introduktion

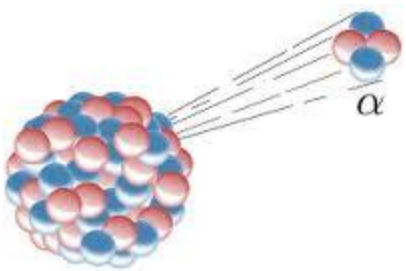
T. Pettersson

Innehåll

- Introduktion
- Acceleratorer?
- Grundläggande fysiklagar & enheter
- Lineära och circulära maskiner
- Några magnettyper
- Supraledande magneter
- Kolliderare och fasta mål
- Viktiga accelerator parametrar för fysikern
- Störkällor
- Acceleratorer i samhället.

Fina figurer och text : tack till E. Wildner

Partikelkällor och partikelacceleration(1/3)



wikipedia

- E. Rutherford (f. 1871) upptäckte att han kunde använda partiklar som strålade ut från radioaktiva material (alfa partiklar och elektroner) för att "titta in" in i atomer.
- Alfa partiklar har en energi runt 5 MeV (motsvarar en hastighet av ~15,000 km/s).
- Naturliga partikelkällor visade sig snabbt vara för begränsade och ohälsosamma……

Partikelkällor och partikelacceleration(2/3)

- Partiklarna måste vara i vakuum (rör eller tankar) för att inte kollidera med eller störas av andra partiklar av alla slag.
- En konstgjord källa med elektrostatiska fält användes för det första accelerations steget efter källan (Van de Graff,..) 1920
- Linjära acceleratorer accelererar partiklarna med elektriska fält som frekvensvarieras (Engelska: Radiofrequency - RF)
- Cirkulära acceleratorer använder RF for acceleration och elektromagnetiska fält for styrning och fokalisering.
- Ständig strävan mot högre energi för att se djupare och djupare in i atomen och dess kärna!

Partikelkällor och partikelacceleration(3/3)

- Högre energi låter oss:
  - Få kortare våglängder – bättre upplösning
  - Högre massa – nya partiklar
  - Gå bakåt i tiden
- Protoner kommer att acceleras till en energi av 7 TeV i LHC for att titta ännu nogrannare hur den är sammansatt!

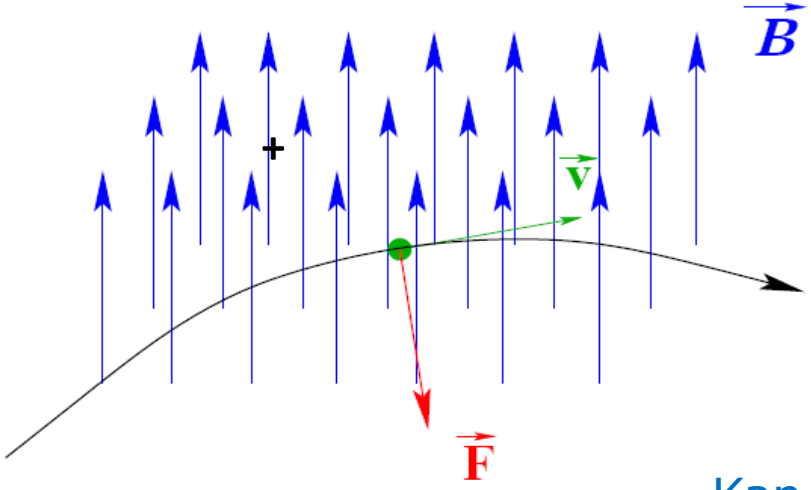
En fluga väger 60 mg och flyger 20 cm/s:

$$\mathbf{E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \Rightarrow E_k = \frac{1}{2}\, 6 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}2^{\,2} \sim 7\ TeV}$$

I LHC har <u>varje</u> proton samma rörelseenergi som flugan**!**

Men flugan har ~36 tusen trillioner atomkärnor!

Tillgängliga krafter som verkar på laddade partiklar



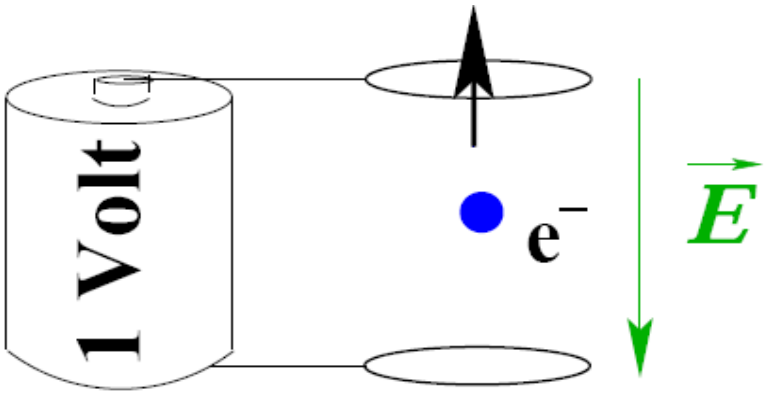
Kan styra en laddad partikels riktning

Lorentz kraft:

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

Kan accelerera laddade partiklar

Enheter: ElektronVolt



Elektronvolt, energienhet med beteckningen eV, används som enhet för små energier (joule)

Acceleration

1 eV definieras som den energi som åtgår för att flytta en elektron, vars laddning är e (ca. $1.602 \cdot 10^{-19}$ C) i ett elektriskt fält med styrkan 1 V/m sträckan 1 meter:

$1\ eV = 1.602 \cdot 10^{-19}$ joule.

Inom partikelfysik används elektronvolt även som enhet för massa, eftersom massa och energi är nära sammanbundet genom sambandet:

*E = mc^2, m=γ*m_0* $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$; $\beta = v/c$

Total energi

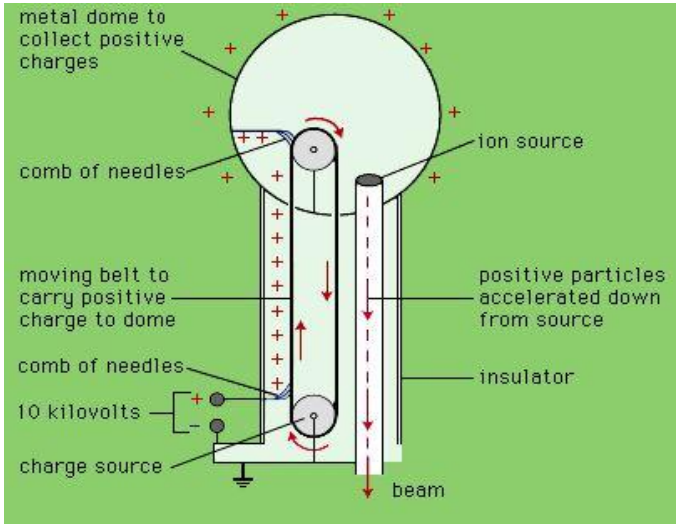
m är partikelns massa och c ljusets hastighet i vakuum.
Massan för en elektron, med hastighet v << c är cirka 0.5 MeV.

Från Wikipedia

Acceleratorer -1920…!

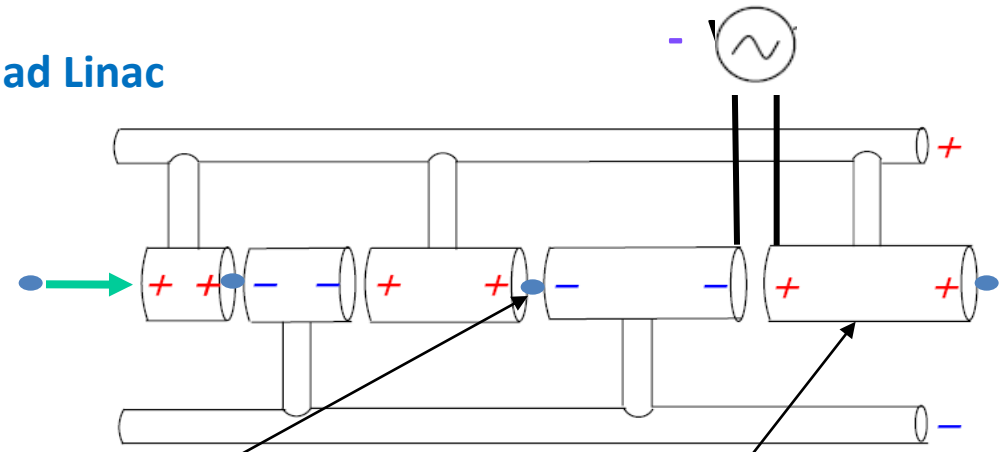
I tidiga acceleratorer var partikelns energi given av hur stor högspänning man kunde producera, t. ex. med en Van de Graaff-generator. Om spänningskällan ger en spänning på en miljon volt, accelerer den elektroner eller protoner till en energi på 1 megaelektronvolt (MeV) (och alfapartiklar till 2 MeV).

För att kringgå problemen med högspänningen, utvecklades linjära acceleratorer där en växelspänning har rätt polaritet när en grupp partiklar passerar gapet mellan två rörformiga elektroder. Rolf Widerøe, Gustav Ising, Leó Szilárd, Donald Kerst and Ernest Lawrence anses vara urfäderna, de ritade och byggde den första fungerande linjära partikel acceleratorn, betatronen, och cyclotronen.



Linjära acceleratorer

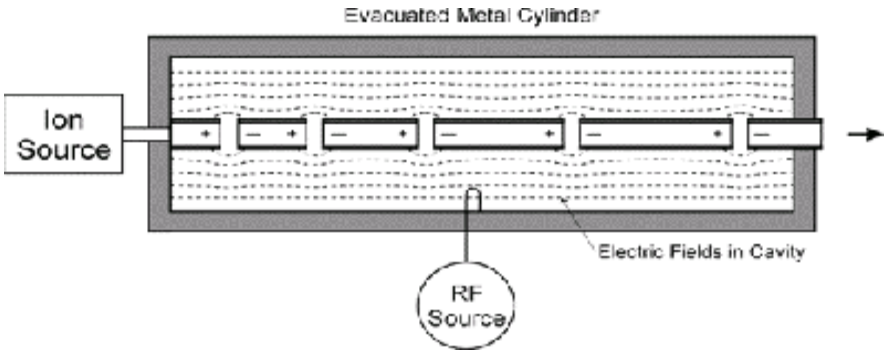
Förenklad Linac



Wideroe
1928.

Partiklarna grupperas för att fältet skall ha rätt rikning för en grupp som just då passerar gapet

Hastigheten hos partiklarna ökar, modulernas längder ökas för att vara synkronisererade med fältrikningen över gapet

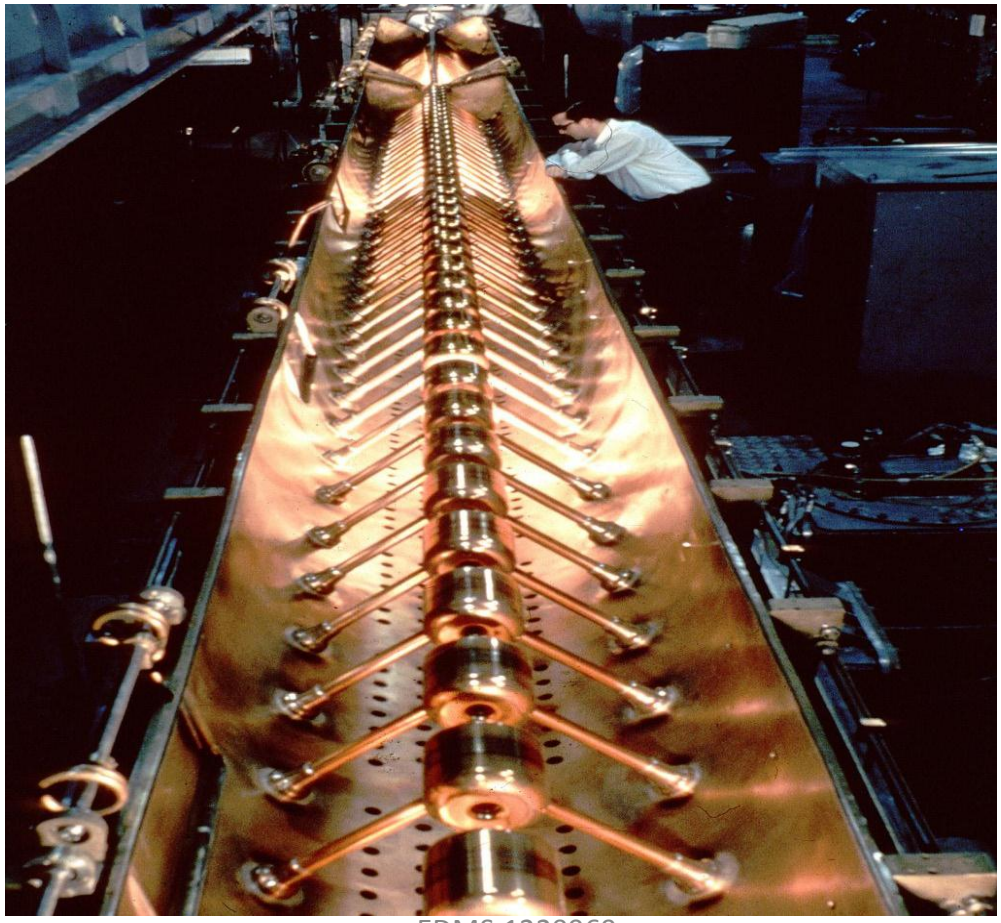


Alvarez: resonanstank eller ”drift tube linac”

LINAC - från ritning till verklighet

Partiklarna grupperas för att fältet skall ha rätt rikning för en grupp som just då passerar gapet

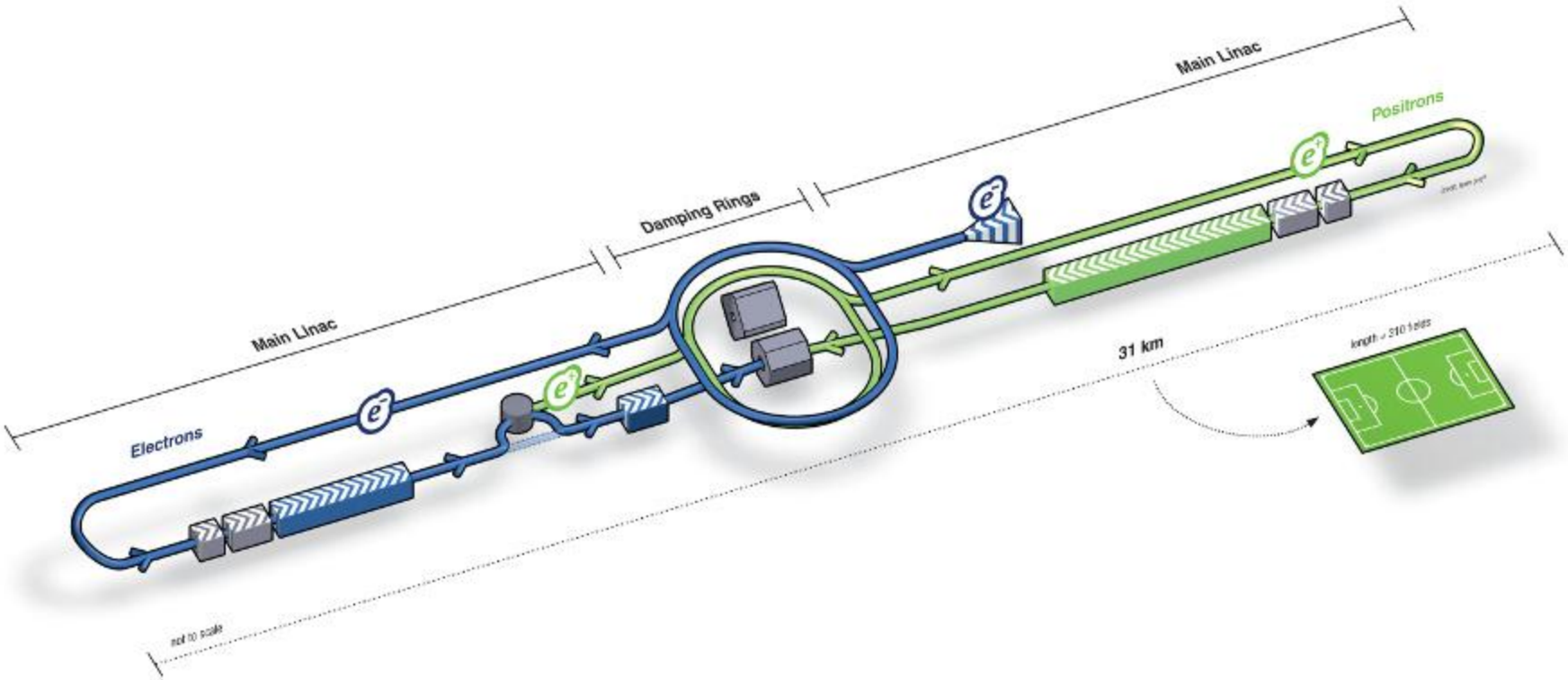
Hastigheten hos partiklarna ökar, modulernas längder ökas för att vara synkroniserade med fältrikningen över gapet



EDMS:1220969

Stanford Linear Acccelerator – gränsen nådd (1960 talet..)?

International Linear Collider – lite längre till.. 2015(?)



Cyklotron - ~1929

Centripetalkrafter=-Centrifugalkrafter:

$$\frac{mv^2}{r} = Bqv$$

Kontinuerligt partikelflöde!

Omstuvning:

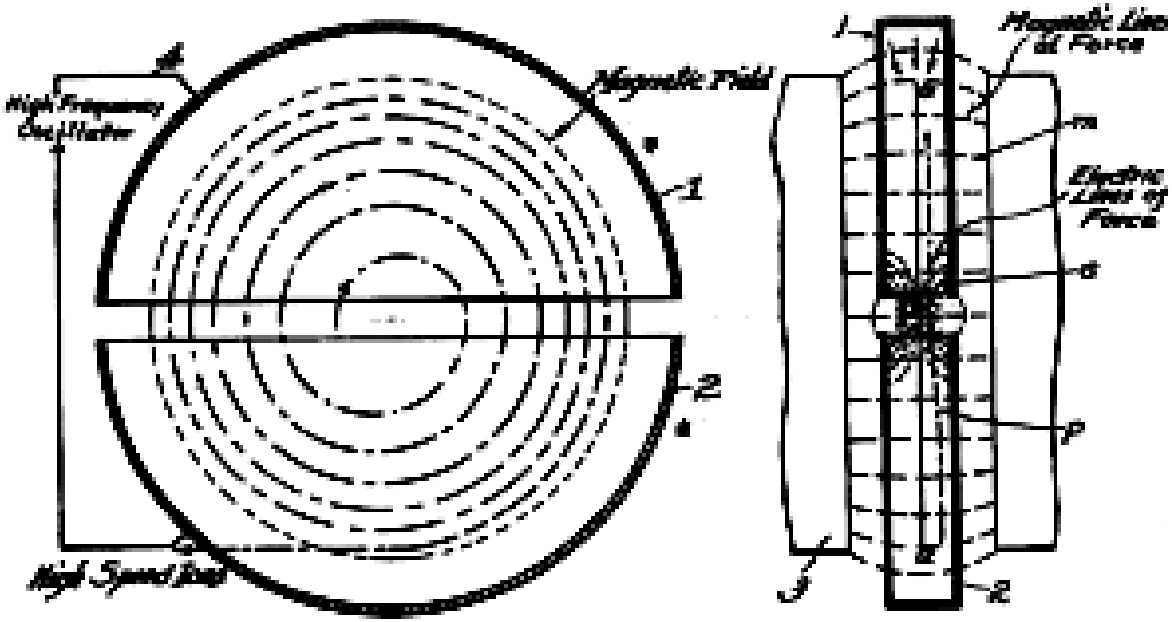
$$\frac{v}{r} = \frac{Bq}{m}$$

$$\downarrow$$

$$\omega = \frac{Bq}{m}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$f = \frac{Bq}{2m\pi}$$

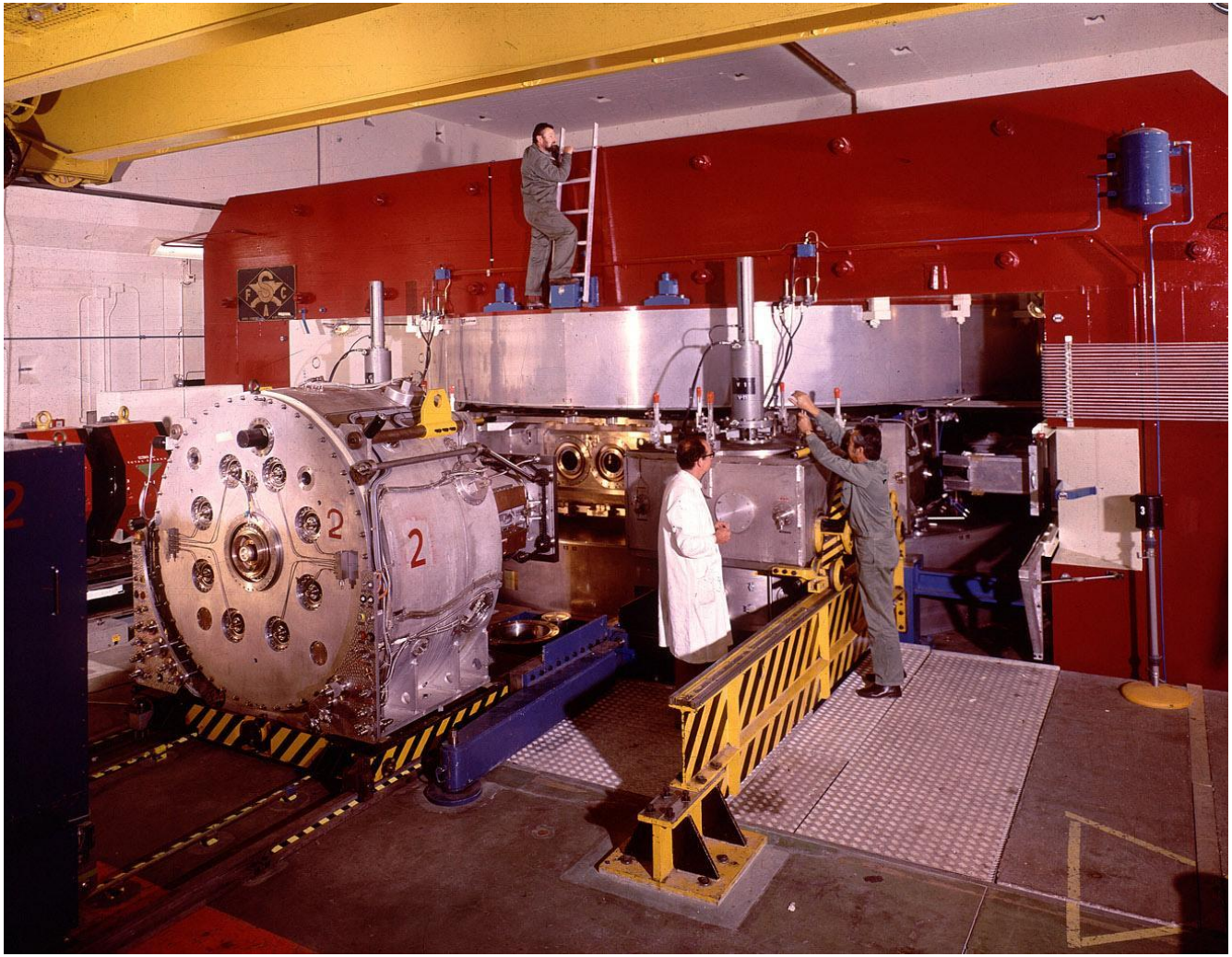


Frekvensen beror ej av radien, om massan är konstant. När partiklarna blir relativistiska gäller inte detta längre, frekvensen måste ändras med hastigheten: synkrocyklotron. Fältet kan också ökas med radien: isokron cyklotron

Cyklotronen kommer till CERN -1957

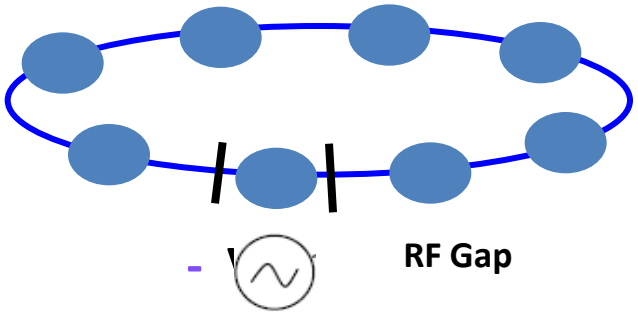
Max energi - 600 MeV

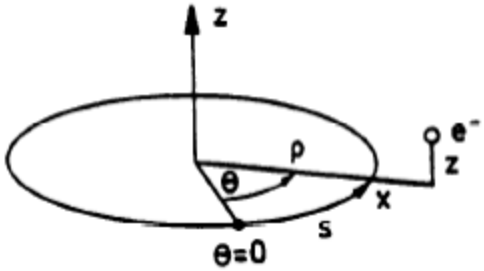
Och installerad

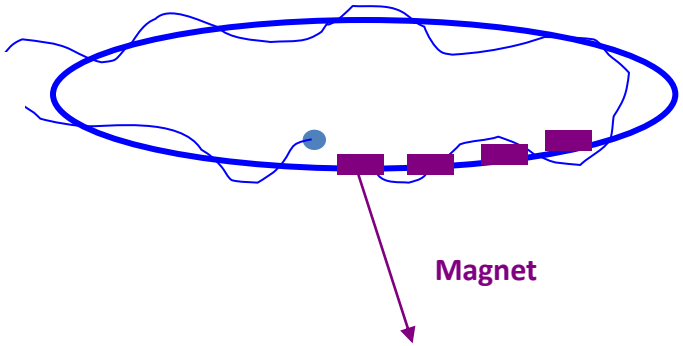


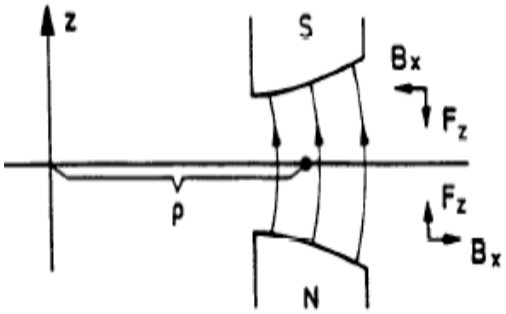
Högre partikel energier – Synkrotronen tas till hjälp

Gruppera partiklarna och låt de cirkulera synkront med RF fältet i kaviteterna. Vid varje passage tillförs energi. Varje partikel cirkulerar runt en teoretiskt ideal bana i acceleratorn: magnetfält och acceleration måste tillfredställa stabilitetsvillkor.









LHC:
Varje proton passerar det elektriskt fältet som är 2 x 8 MV = 16 MV och detta 11245 varv per sekund; total additionell energie per sekund är:
(16 MeV/varv) x (11245 varv/s)= $1.8 \cdot 10^5$ MeV/s eller 0.18 TeV/s;
för att nå 6.55 TeV tar det 6.55 / 0,18 = 36,4 s!

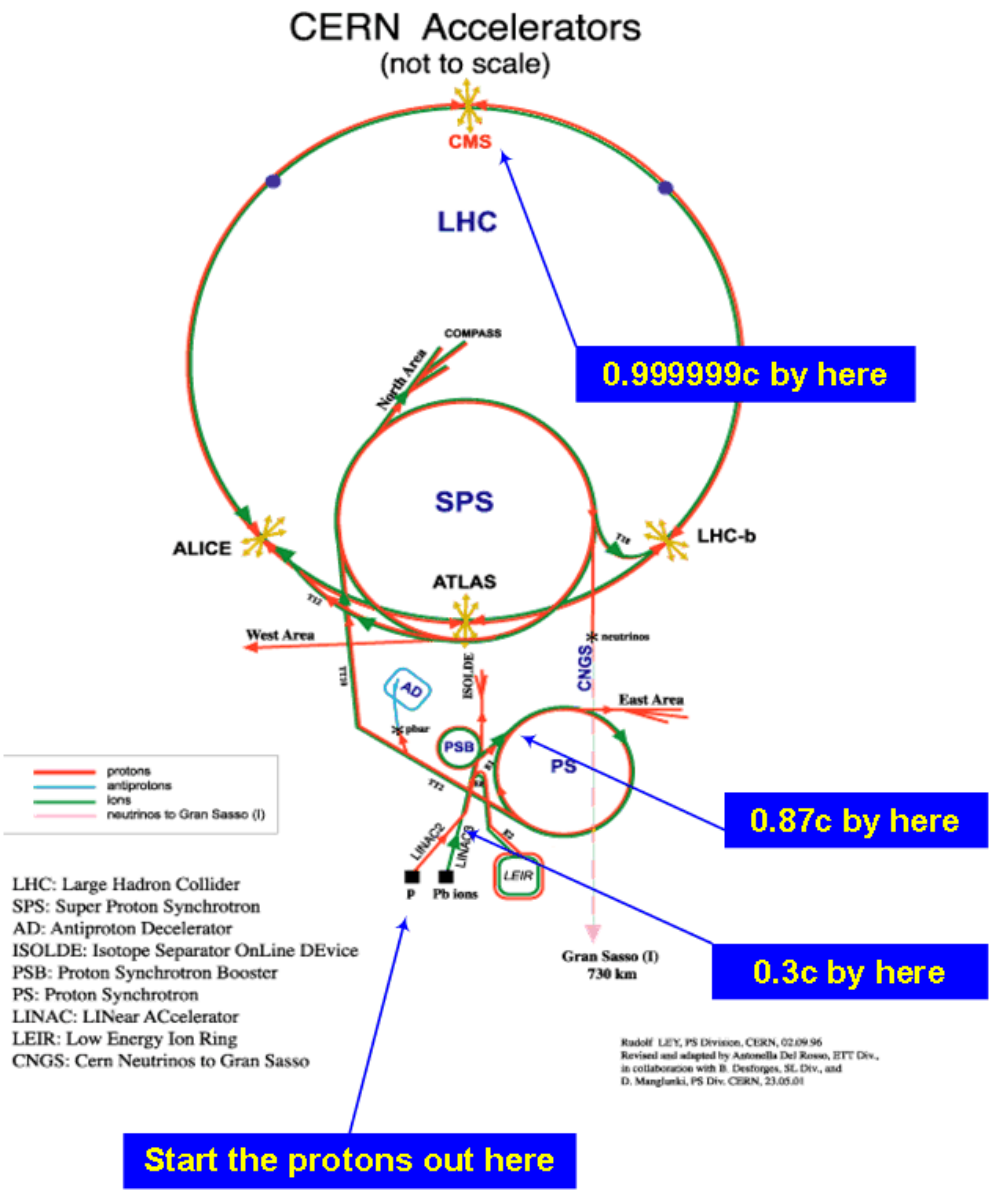
Den första, den största

centimeter

kilometer

Acceleratorerna på CERN

INLEDNING



Energier:

Linac 50 MeV

PSB 1.4 GeV

PS 28 GeV

SPS 450 GeV

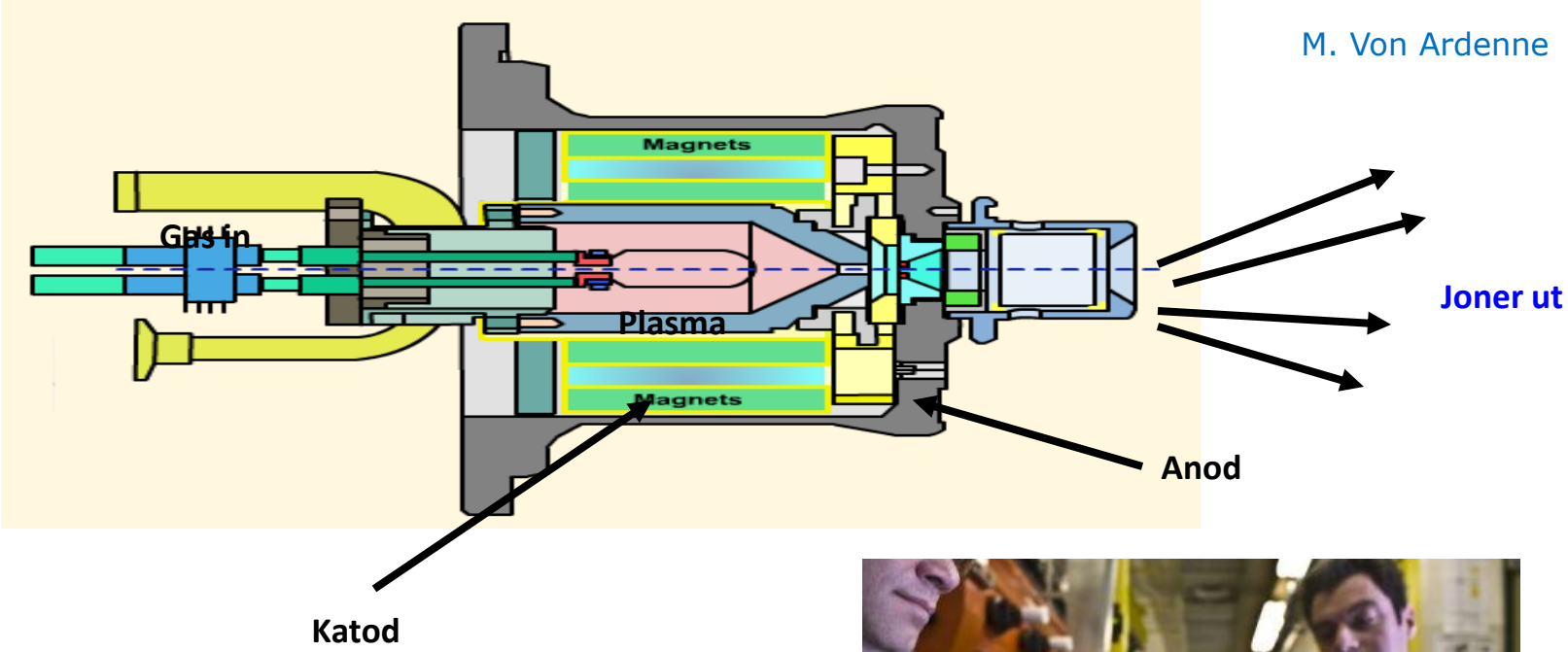
LHC 7 TeV

Enheter?

Partikelkälla

Duoplasmatron från CERNs Linac-Hemsida

M. Von Ardenne



$$H_2 + e^- \rightarrow H_2^+ + 2\,e^-$$
$$H_2^+ + e^- \rightarrow H^+ + H + e^-$$
$$H + e^- \rightarrow H^+ + 2\,e^-$$

Magnettyper - Dipolen

Dipolmagnet, horisontal typ (vertikalt fält); variant enligt behov! Används för styrning av strålen.

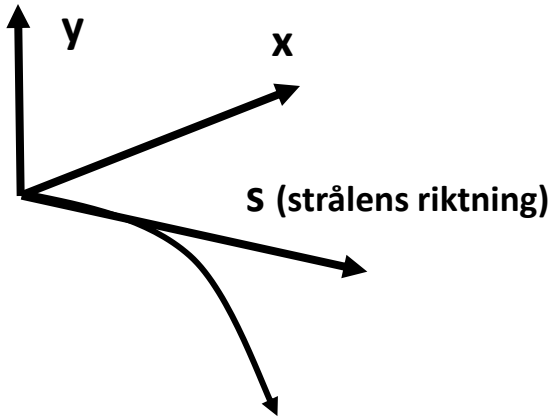
$$F_x = -ev_s B_y$$

$$F_r = mv_s^{\,2} / \rho$$

$$p = mv_s$$

$$\frac{1}{\rho(x,y,s)} = \frac{e}{p} B_y(x,y,s)$$

$$B\rho = \frac{p}{e}$$



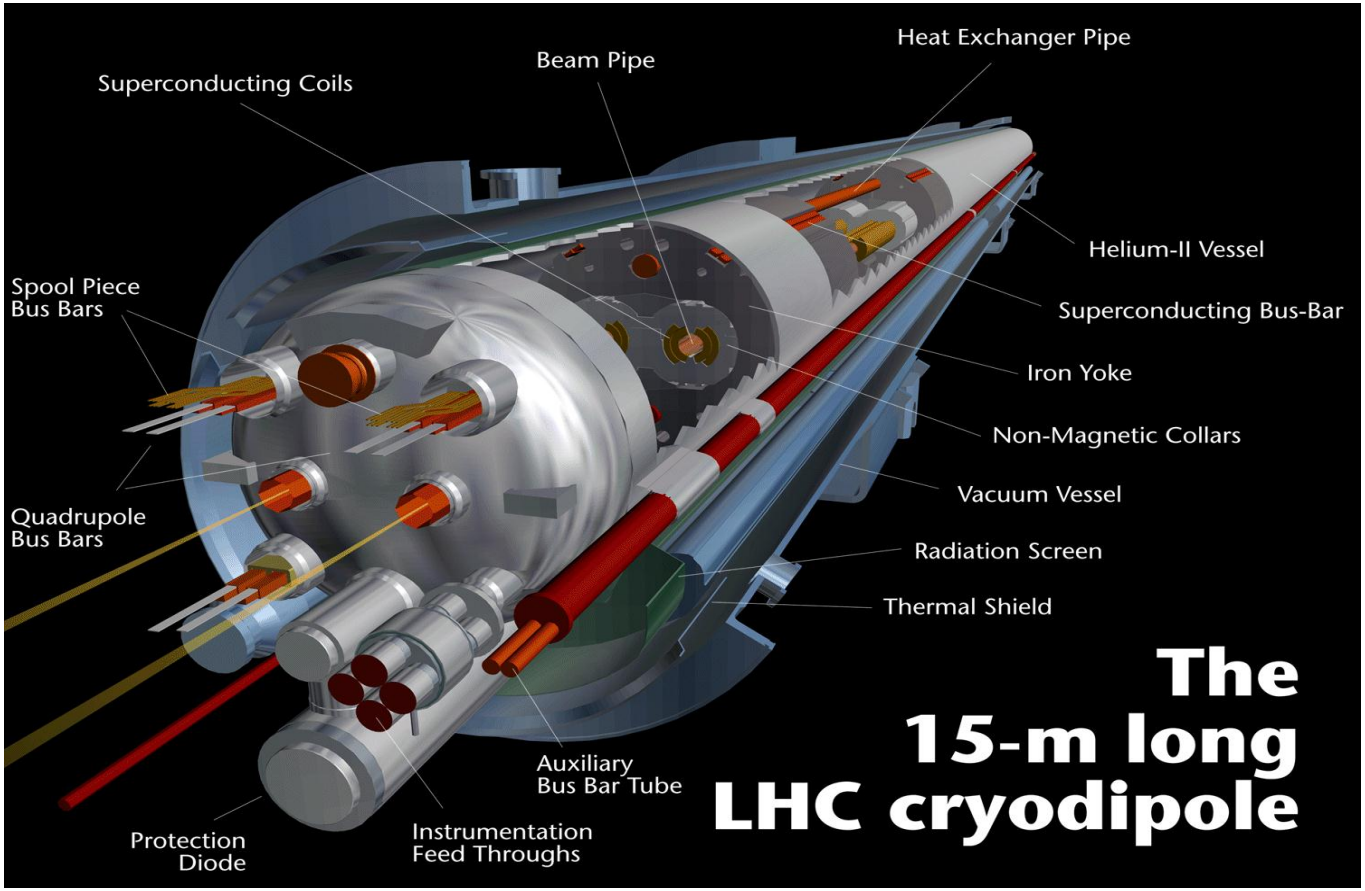
Magnetisk styvhet
”Magnetic rigidity”

PS Dipol – 1956….

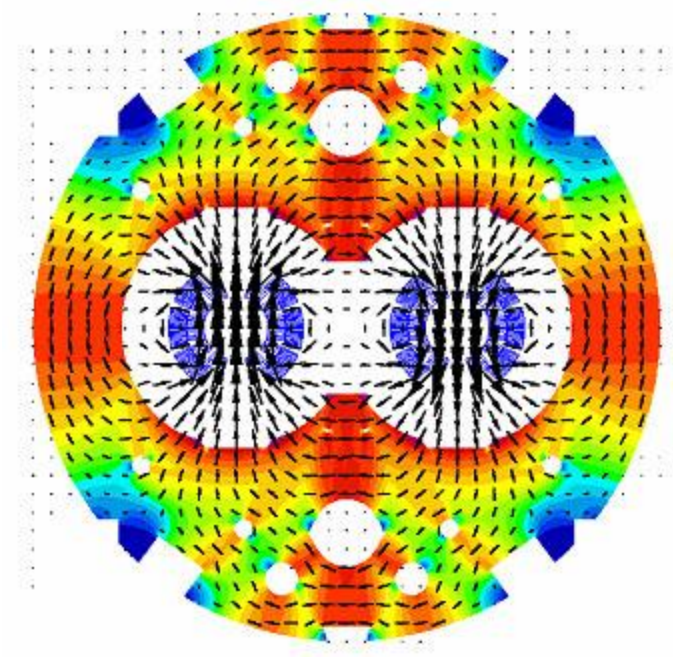
Supraledande Dipol för LHC-2008

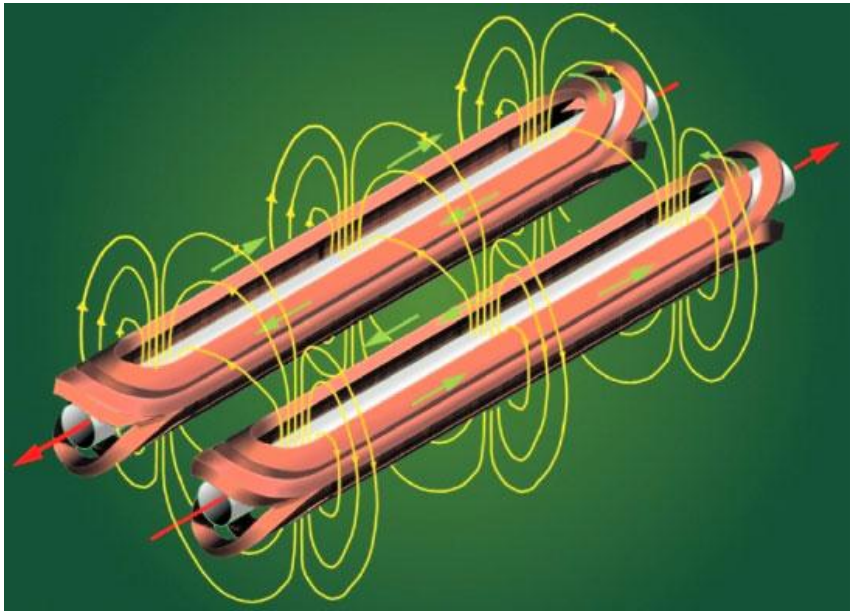
LHC dipolen (15m/30 ton - 1232 stycken installerade i tunneln)
Byggd i 3 fabriker (Tyskland Frankrike, Italien)

TEKNOLOGI

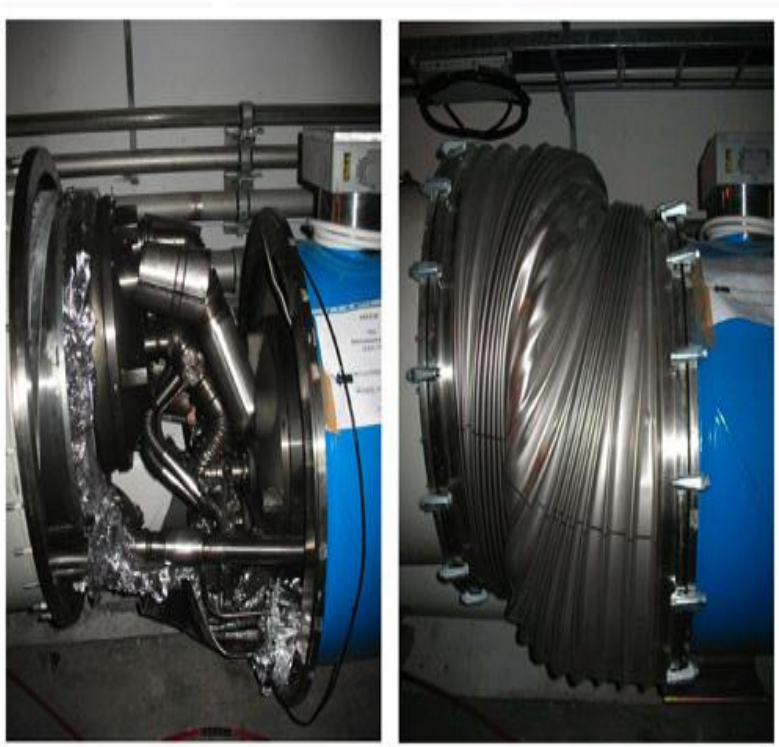


LHC Dipol fält





Krafter i spel

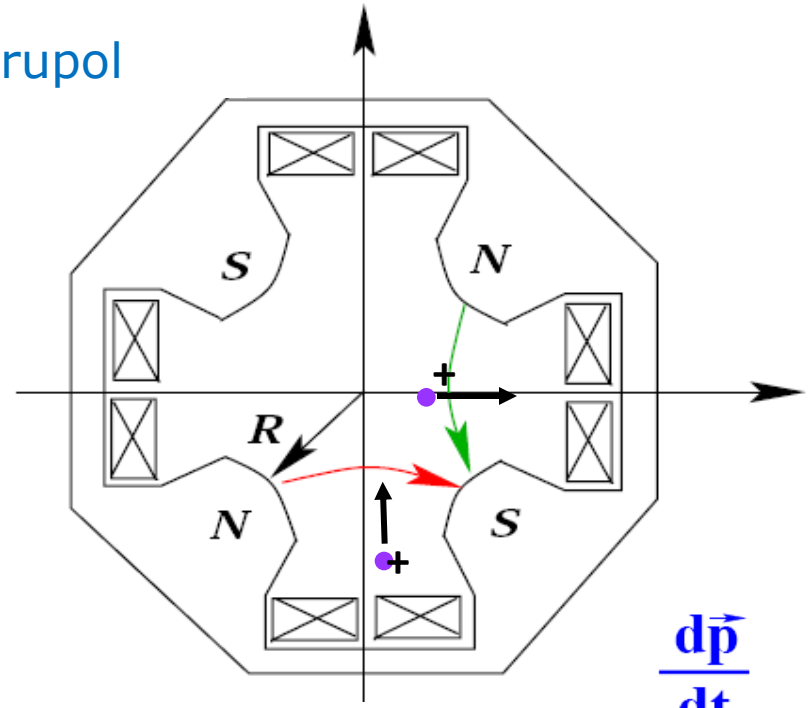


Krafter i spel

Magnettyper - kvadrupolen

Partiklarna måste fokuseras för stanna kvar i maskinen och för att kunna accelereras. Linser, i form av kvadrupoler, precis som i vanliga optiska system används.

Kvadrupol

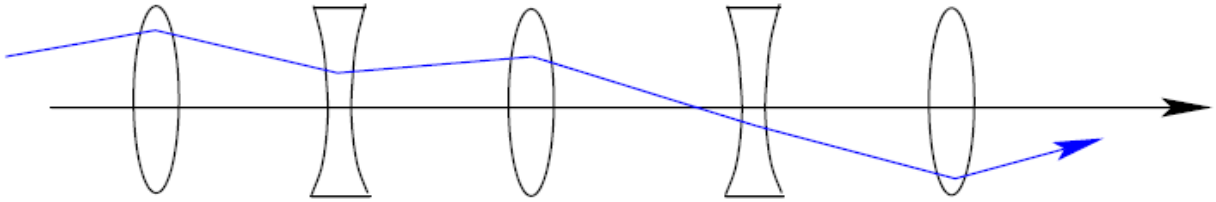


Positiv partikel som rör sig mot oss:
Defokuserande i det horizontella planet
fokuserande i det vertikala planet.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

Partiklar längre bort från magnetcentrum böjs av mer, de korrigeras hårdare

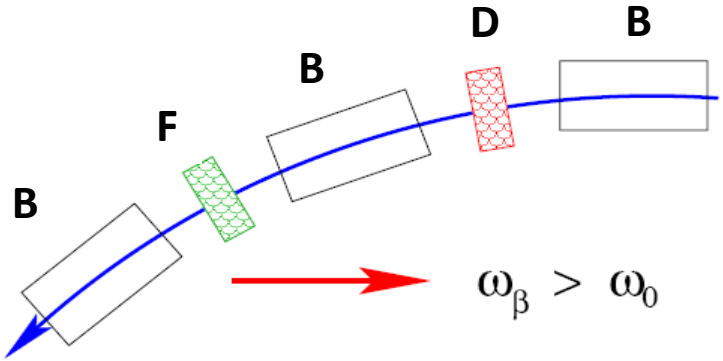
Fokuseringssystemet



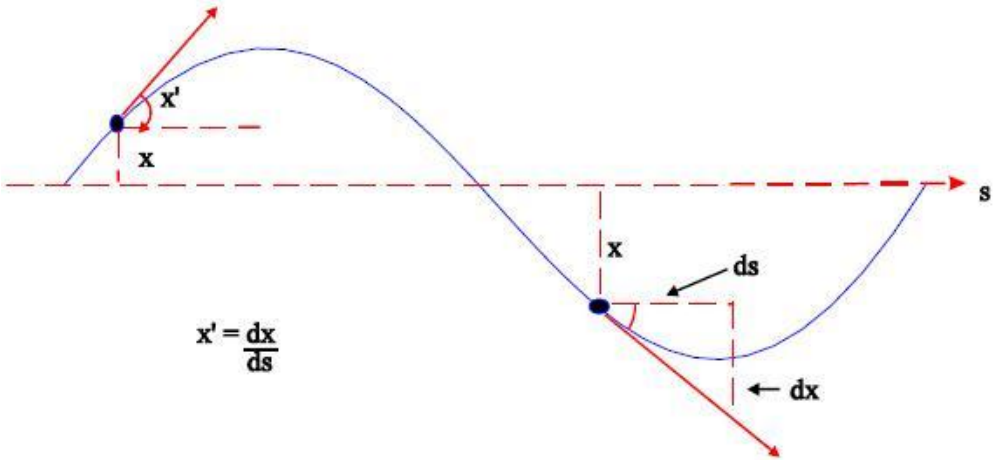
”Alternate gradient focusing” ger totalt fokuserande effekt (jämför optiska system i kameror t.ex.). Utvecklad av Brookhaven i AGS maskinen i slutet av 1950 talet.

Strålen tar mindre plats i vakumröret (amplituderna blir mindre), magnetfältet kan göras homogenare genom att magnetgapet blir mindre.

Magnettyperna i linssystemet alterneras mellan fokuserande och defokuserande lines.



Partikelns position och vinkel runt maskinen



s= längdkoordinat

Partikelns position - karakterised av: (x(s)), (x(s)'). Oscillation(t)->Oscillation(s)!
Ansats (Hills ekvation):

$d^2x/ds^2 + K(s)\cdot x(s) = 0$; K(s) är återföringskraften generad av magnetfälten;

Definiera:

ε = transversal emittance, konstant och beroende av initialvillkoren.
β(s) = amplitud modulering är en function av fokusseringstyrkan
ψ(s) = fasen är en function av fokusseringstyrkan

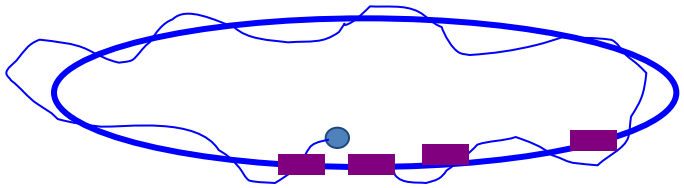
$$x = \sqrt{\varepsilon . \beta(s)} \cos(\Psi(s) + \phi)$$

Fokusering och oscillerande partiklar

Man kan härleda rörelsekvationer av typen (jämför enkel pendel):

$$x''(s) + \left(\frac{1}{\rho^2(s)} - k(s) \right) \cdot x(s) = \frac{1}{\rho(s)} \Delta p / p \quad ; \quad k = \frac{e}{p} \frac{\partial B_z}{\partial x}$$

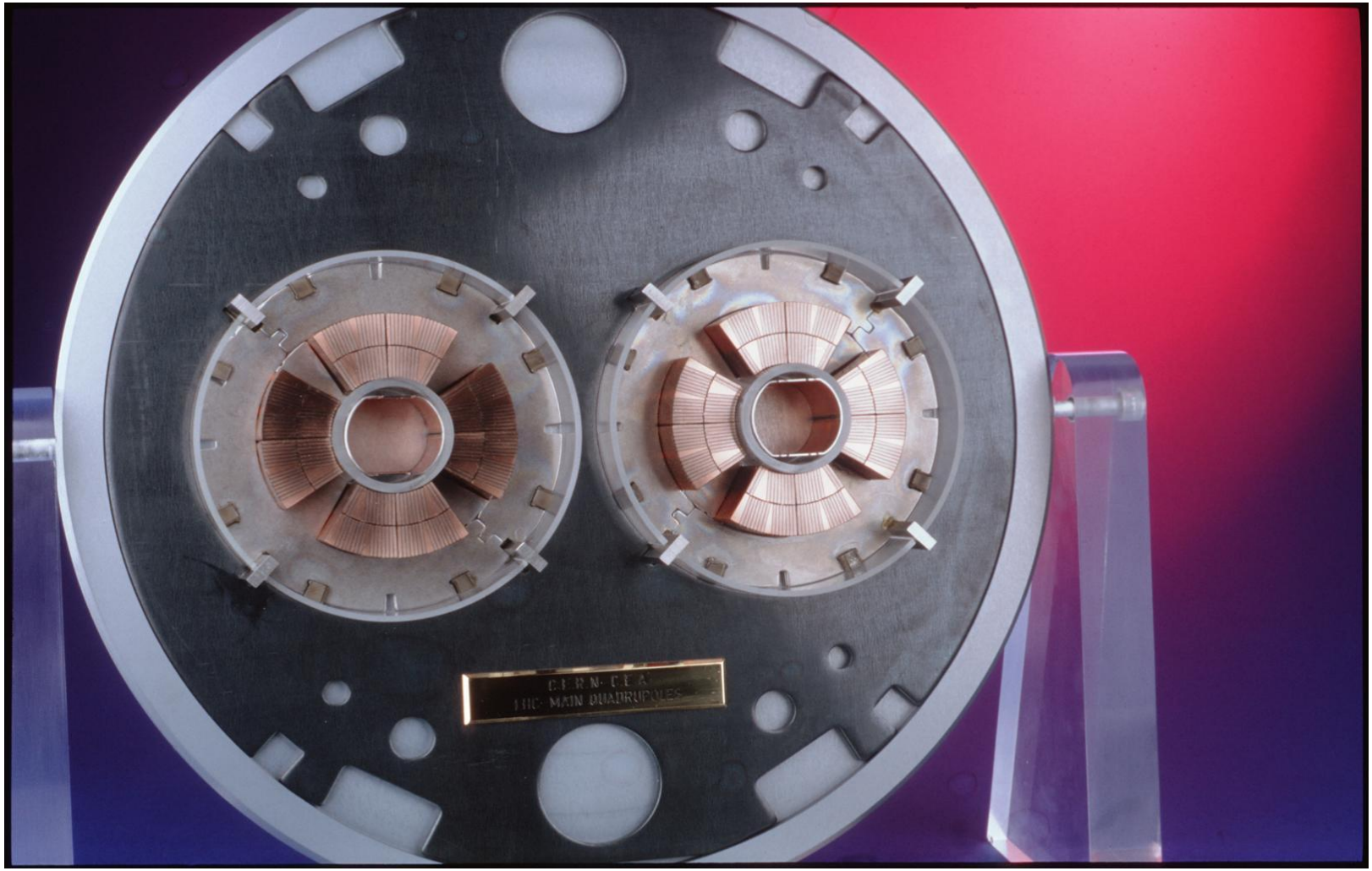
$$z''(s) + k(s) \cdot z(s) = 0$$



$$x(s) = \sqrt{\varepsilon \beta_x}(s) \cos\left(\frac{2\pi}{L} Q \cdot s + \delta\right)$$

Oscillerande rörelse med varierande amplitud!
Antalet oscillationer på ett varv kallas ”tune” och betecknas Q.
Q-värdet är olika i de två planen (horizontellt och vertikalt plan). L är ringens omkrets.

LHC supraledande kvadrupol - tvärsnitt 2008
5.3m/6.5 ton



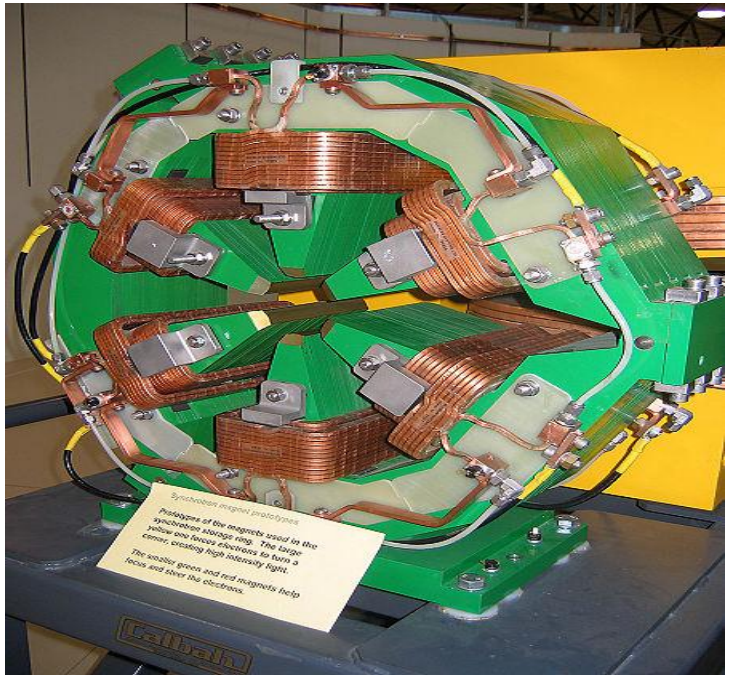
LHC Kvadrupol 2009

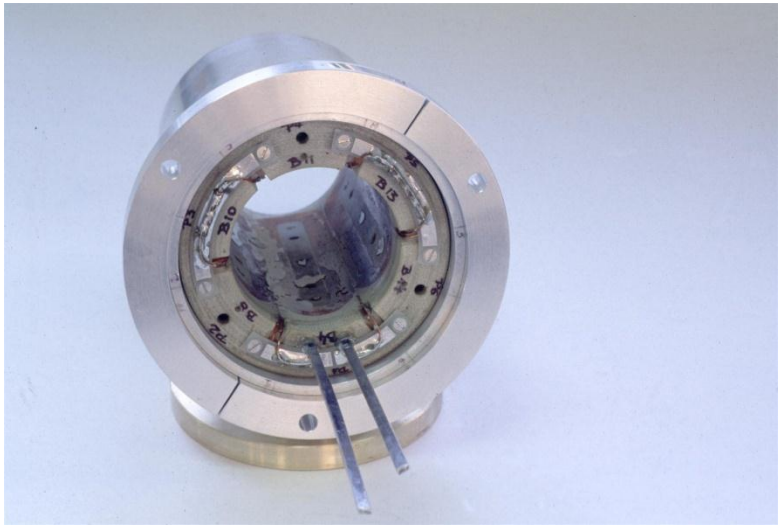
LHC Kvadrupol 2009

Högre ordningens magneter

Dipoler och kvadrupol magneter avlänkar partiklar med olika energier olika, en egenskap som kallas kromaticitet i analogi med optiken. Energispridningen som är inneboende is en partikelstråle get upphov till en spridning av fokusseringen och till instabiliteter.
Sextupol magneter (and högre ordningars magneter) används for att korrigera fenomenet men dessa ger också upphov till andra icke önskvärda ickelinjära rörelser.

wikipedia





Acceleration och partikelbanans radie

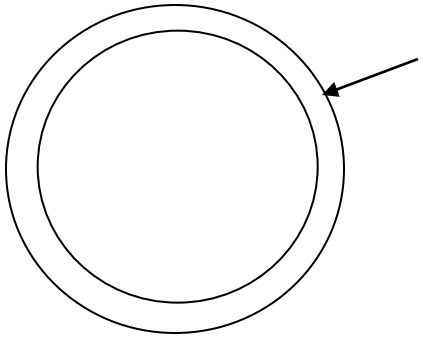
Magnetfältet (B) och partikelns hastighet (v)

-> banan

-> omloppstiden

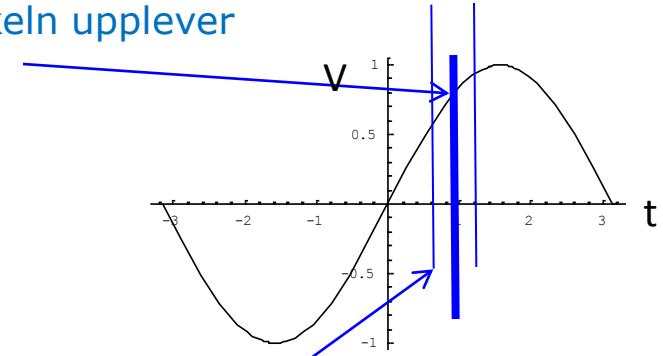
-> tiden för inträdande i RF kaviteten

Detta är det elektriska fältet som referenspartikeln upplever



v ökar ->

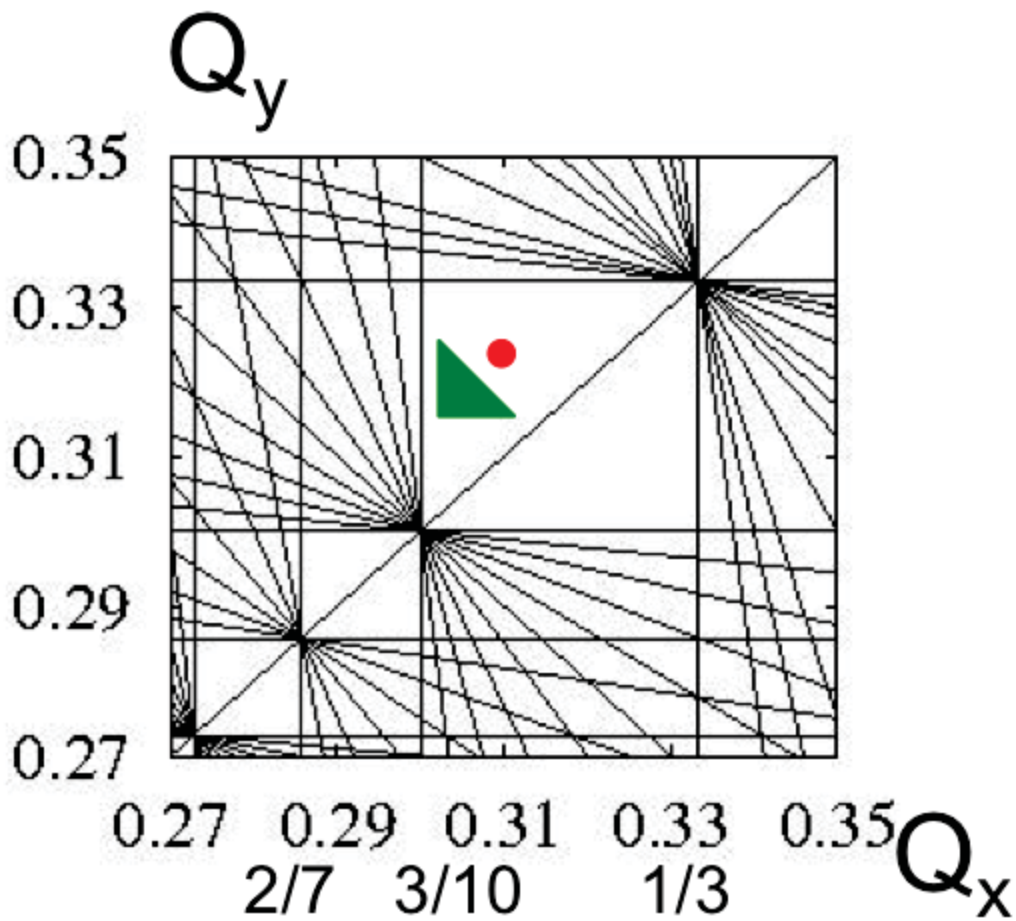
Radien större än referensradien



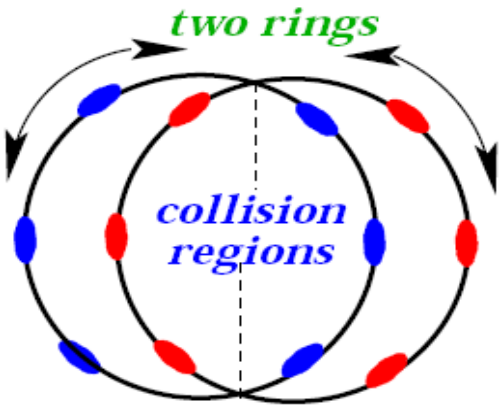
Tidig partikel får mindre energitillskott

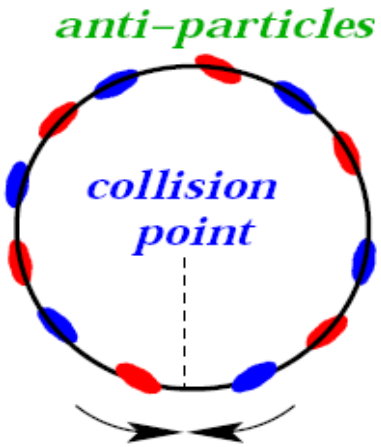
Allteftersom partiklarna accelereras måste magnetfältens styrka ökas och RF frekvensen justeras i takt för att hålla partiklarna kvar runt referensbanan!

Resonanser…..



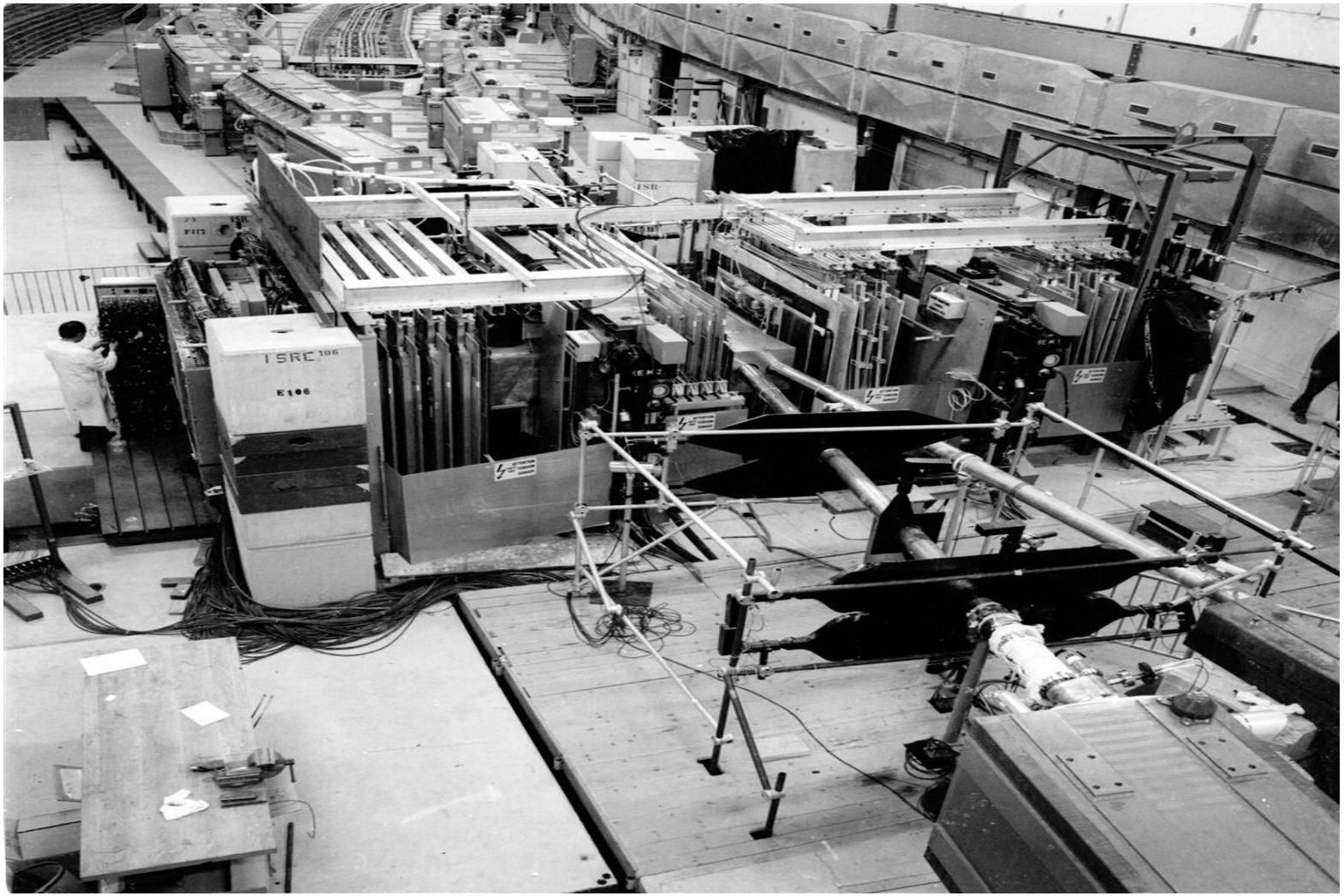
Typer av "Kolliderare" acceleratorer



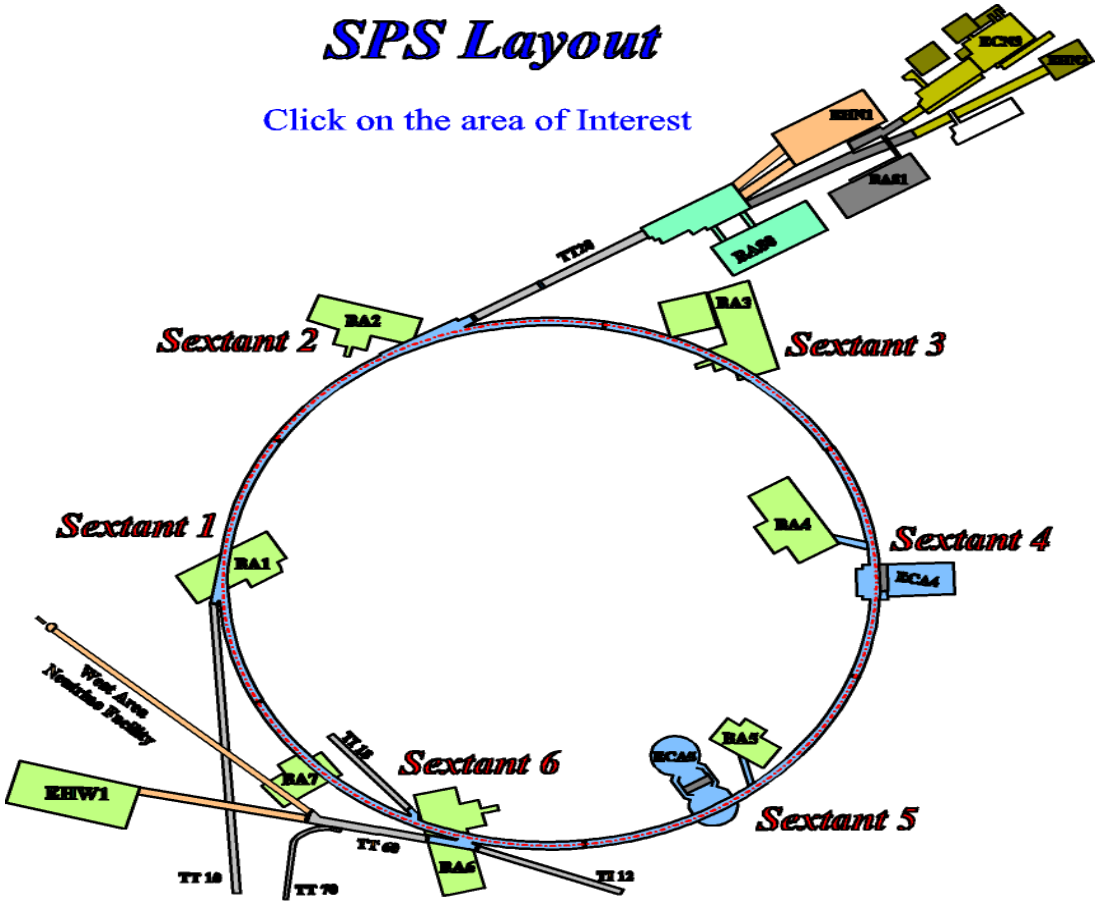


- Alla partiklar kolliderar inte på en gång-> långa tider for experimental verksamhet
- Två strålar behövs
- Antipartiklar svåra (dyra) att producera (~1 antiproton/10^6 protoner) (naturfenomen)
- Strålarna påverkar varandra: kräver separation runt hela ringen utom i kollisionspunkterna

Två ringar – Intersecting Storage Rings (1971-1984)
(proton-proton,ion-ion,proton-antiproton

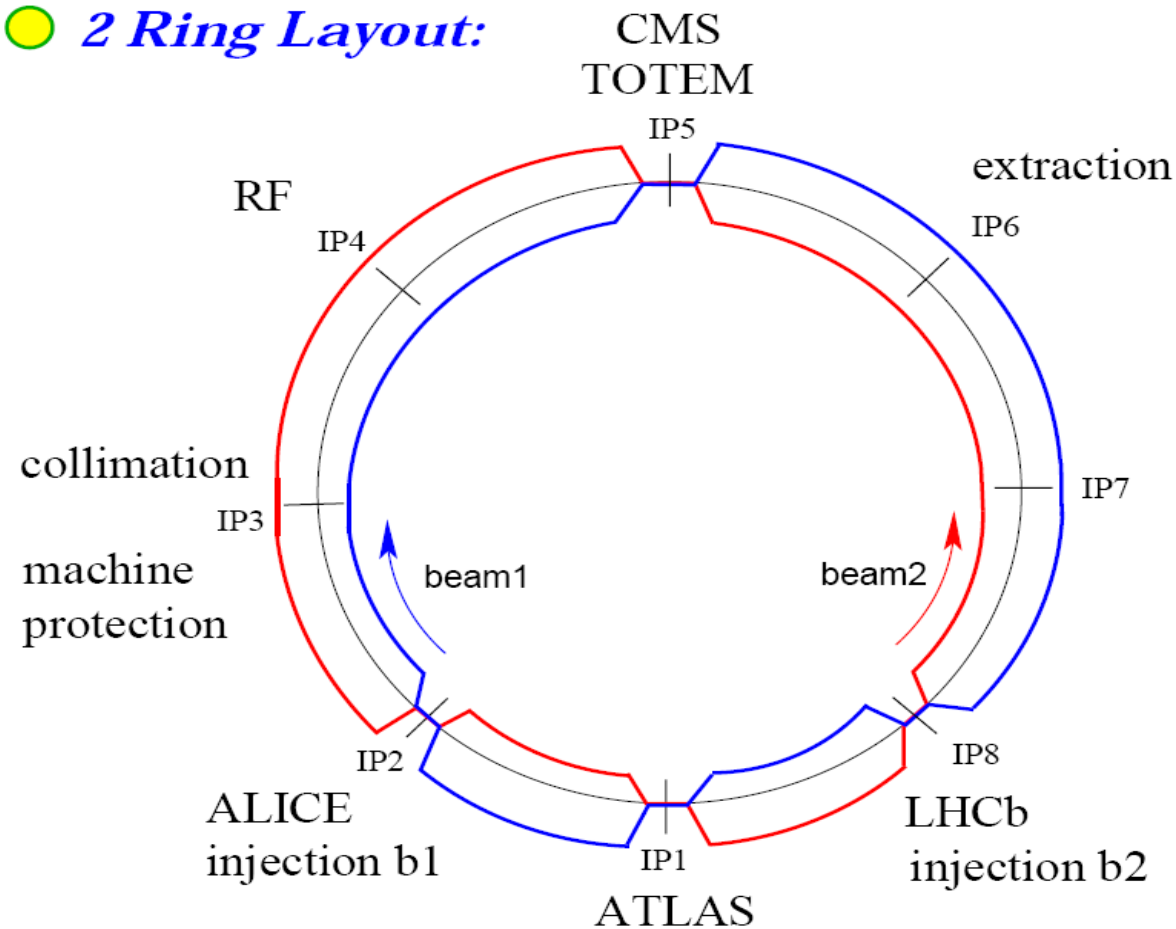


En ring proton-antiproton SPS(1976)->SppS(1983)->SPS(1989)



Två ringar in en magnet – LHC (2008) – proton-proton, jon-jon, jon-proton

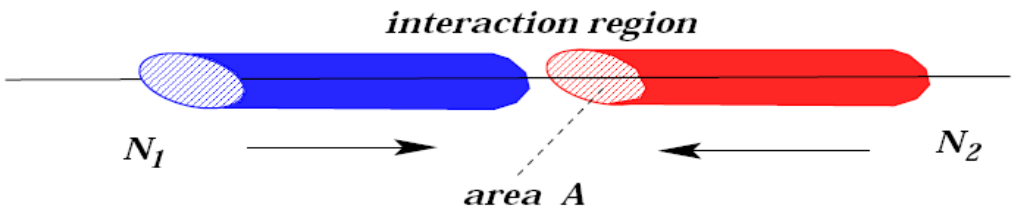
- ***2 Ring Layout:***

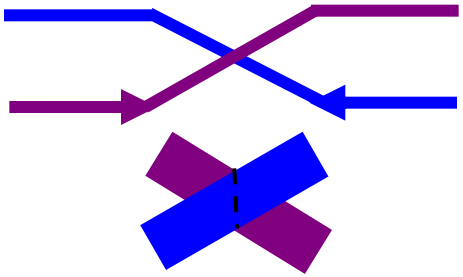


Antiproton, antimateria, joner

LEAR (idag LEIR) 75 m fyrkantig

Luminositet – vad som intresserar experimentalfysikern





$$A = \pi\varepsilon\beta *$$

$$N_{ev}/sec = \sigma \cdot L$$

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon\beta_x}(s)\cos(\frac{2\pi}{L}Q \cdot s + \delta)$$

Antal partiklar per grupp (två strålar)

Antal partikelgrupper i varje stråle

Omloppsfrekvensen

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\varepsilon\beta *} F$$

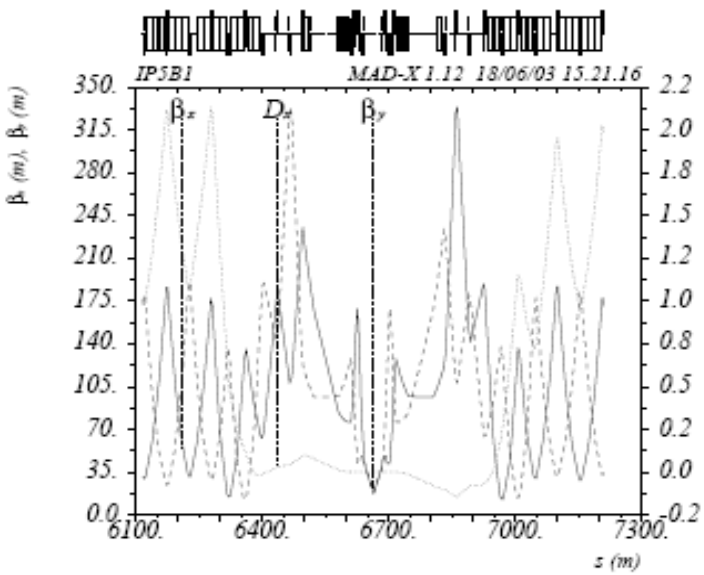
Formfaktor för vinkeln mellan strålarna ("crossing angle")

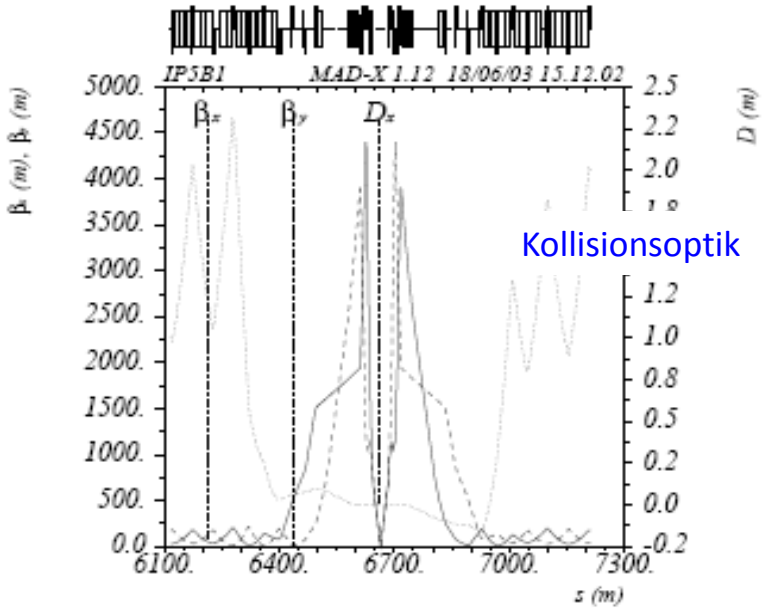
Emittans

Optisk beta funktion

Fokuseringen runt maskinen karakteriseras av beta funktionen

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon\beta_x}(s)\cos(\frac{2\pi}{L}Q\cdot s+\delta)$$

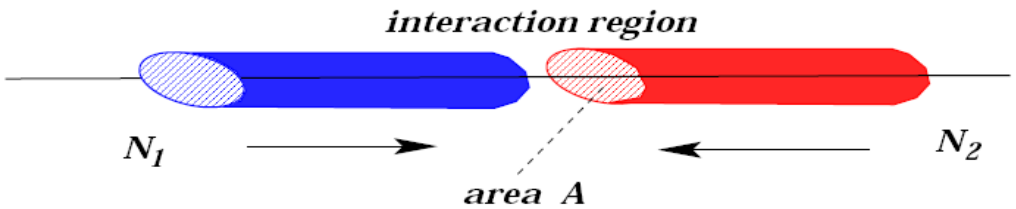




Luminositet = f(strålens storlek)

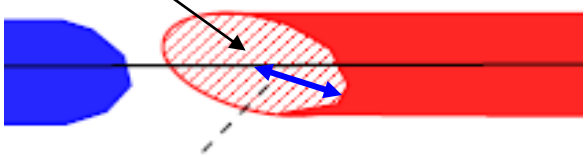
Strålen måste vara liten i kollisionspunkten

EXPERIMENT

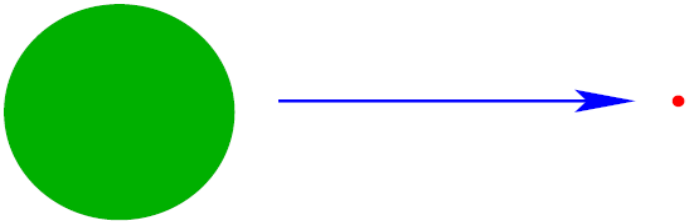


$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\varepsilon\beta *} F$$

$$\sigma = \sqrt{\varepsilon\beta *}$$



LHC:



$\langle\beta\rangle_{arc}$ = **80 meter**

β_{IP} = **0.5 meter**

Begränsningar: Tillgänglig fältstyrka

Magnetens öppning

Synkrotronstrålning

Kon av synkrotronljus

Öppningsvinkel $le \propto \frac{1}{\gamma}$

Elektromagnetiska vågor

Accelererande laddade partiklar sänder ut elektromagnetisk strålning

Radio signaler och röntgenstrålning

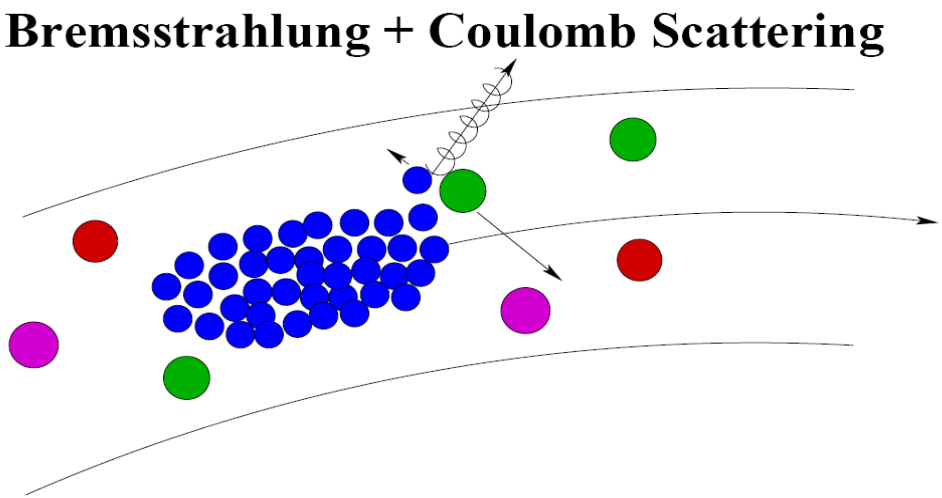
$$P \propto \frac{\gamma^4}{\rho^2} \qquad E \propto \frac{\gamma^3}{\rho}$$

LEP: $\gamma = 200000$
LHC: $\gamma = 7000$

$$E = mc^2 ; m = \gamma * m_0$$

Vacuum

TEKNOLOGI



- Förstoring "Blow up" av strålen
- Partikelförluster
- Oönskade kollisioner i experimenten
- Minskad luminositet

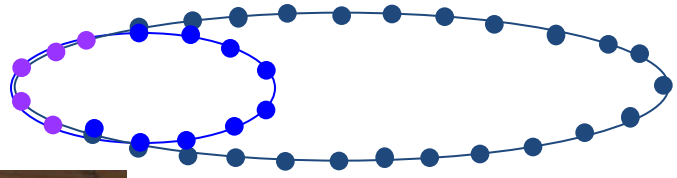
- LHC :
- Ultrahögt vacuum 10^{-10} Torr (~3 million molekyler/cm^3)
- vid 10,000 km höjd är trycket ~ 10^{-13} Torr

Varför Supraledande Teknologi 1

Varför supraledande magneter?

Liten radie, mindre maskin.

Energibesparing, men infrastrukturen mycket mer komplex.



$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev} \gamma}{4\pi \varepsilon_n \beta *} F$$

Kylskåp- XXXL.

Varför Supraledande Teknologi 2

Energibesparing, men infrastrukturen mycket mer komplex.
QRL – kryogenisk försörjningslinje för LHC

Krympning vid nedkylning
Dipolerna minskare med:
$\Delta L_T \approx 1232 \cdot (-0{,}043) \approx -53$ m (!)
Plus resterande maskin;
Totalt ~ -80 m

Varför Supraledande teknologi 3

LEP:

B = 0.135 Tesla

$$P = R \cdot I^2$$

I = 4500A; R = 1mΩ → P = 20 kW / magnet

ca. 500 magnets → P = 10 MW

LHC:

$$B \propto I$$

→ B_{max} **= 8.38 T** → I = 280000 A

→ P = 78 MW / magnet

ca. 500 magnets → P > 39 GW

Varför 7+7 TeV i LHC ?

TEKNOLOGI

- ***Synchrotron:*** ***R = const.***

$$r = \frac{m_0}{Q} \cdot \frac{\gamma}{B} \cdot v \rightarrow B \propto \gamma$$

$$\rightarrow \boxed{B[T] = \frac{1}{0.3} \cdot \frac{p[GeV/c]}{R[meter]}}$$

- ***Physics:*** → **p = 7000 GeV/c**
- ***LEP tunel:*** **L = 27000 meter**

→ **arcs: L = 22200 meter**

→ **R = 3500 meter**

- **Bending and Focusing:** → **R = 2784 meter**

$$\rightarrow \boxed{B_{max} = 8.38\ T} \rightarrow$$

iron sarturation: 2 Tesla
*earth: 0.3 * 10^{-4} Tesla*

100000 * jordens magnet fält)

När används respektive leptoner och hadroner?

Lepton versus Hadron Collider

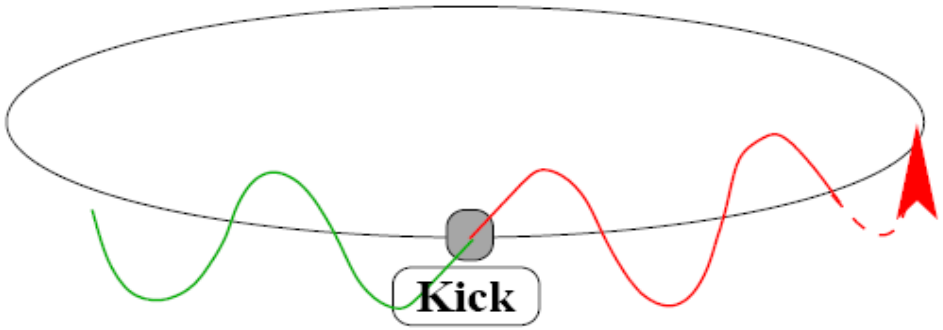
- **Leptons:** (e^+ / e^-)
  - elementary particles
    - → well defined energy
    - → precision experiments

- **Hadrons:** (p^+ / $\bar{p}$)
  - multi particle collisions
    - → energy spread
    - → discovery potential

- **Example:**

Z_0	1985 $Sp\bar{p}S$	p^+p^-
	1990 LEP	e^+e^-

Problemkällor 1



Q-värdet anger antalet oscillationer strålen gör per varv, om detta värde är ett heltal så ser strålen samma uprepade ”magnetfel” varv efter varv . Därför bör inte Q-värdet vara inte ett heltal.

Man bör ha ett tillräckligt bra magnetfält för att slippa resonansfenomen. Icke önskvärda typer av fält (som exempelvis sextupolära, octupolära etc.) är av storleksordningen 10^{-4} relativt det önskade fältet (dipol i en avböjande magnet, kvadrupol i en fokuserande magnet etc.) för LHC

Problemkällor 2

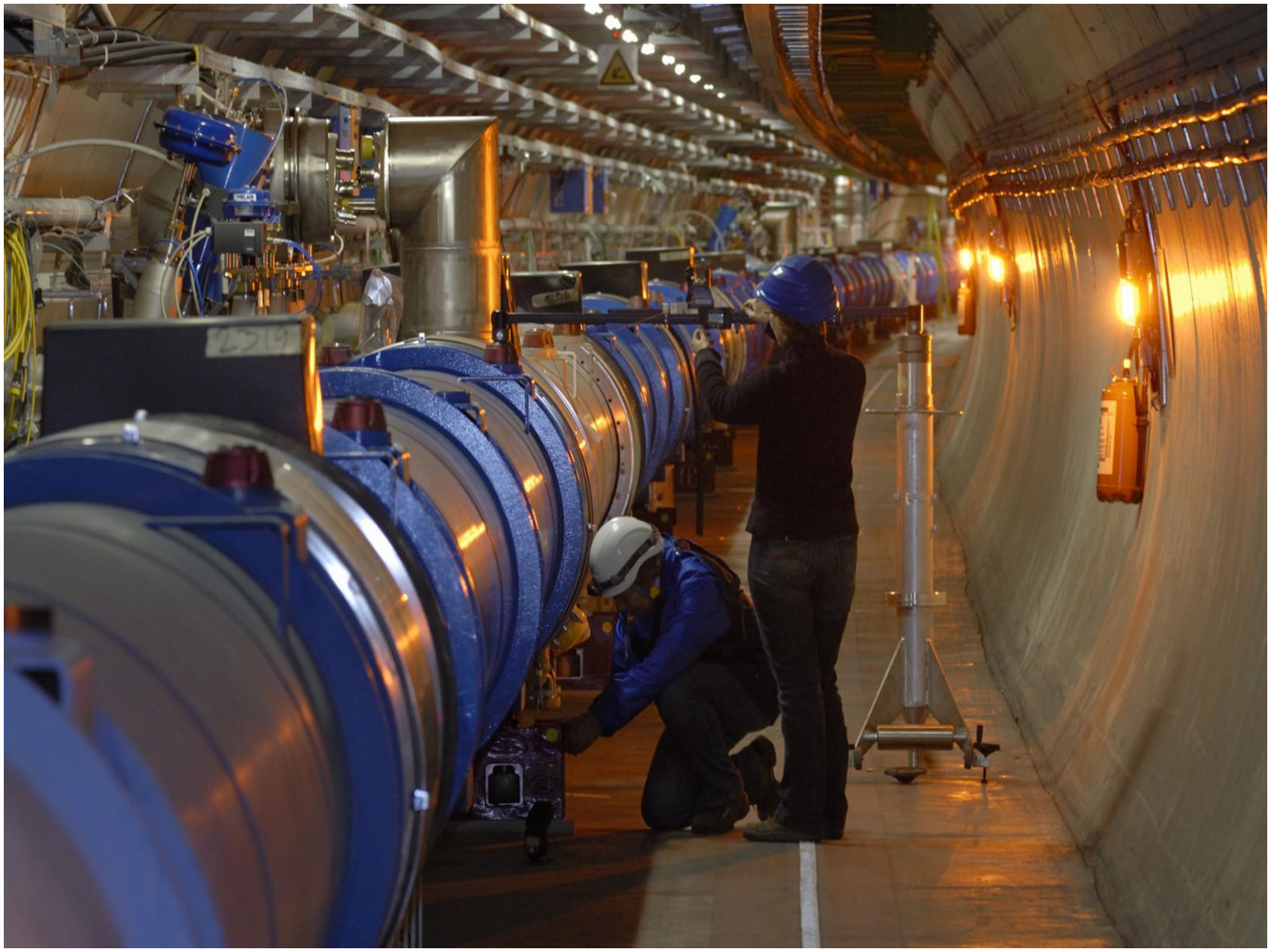
Typer av avvikelser som kan inverka menligt på strålkvaliteten.

Rörelser i jordskorpan
Tåg
Månen
Årstider
Byggnation
...

Magneterna måste kalibreras
Strömreglering i magneterna
...

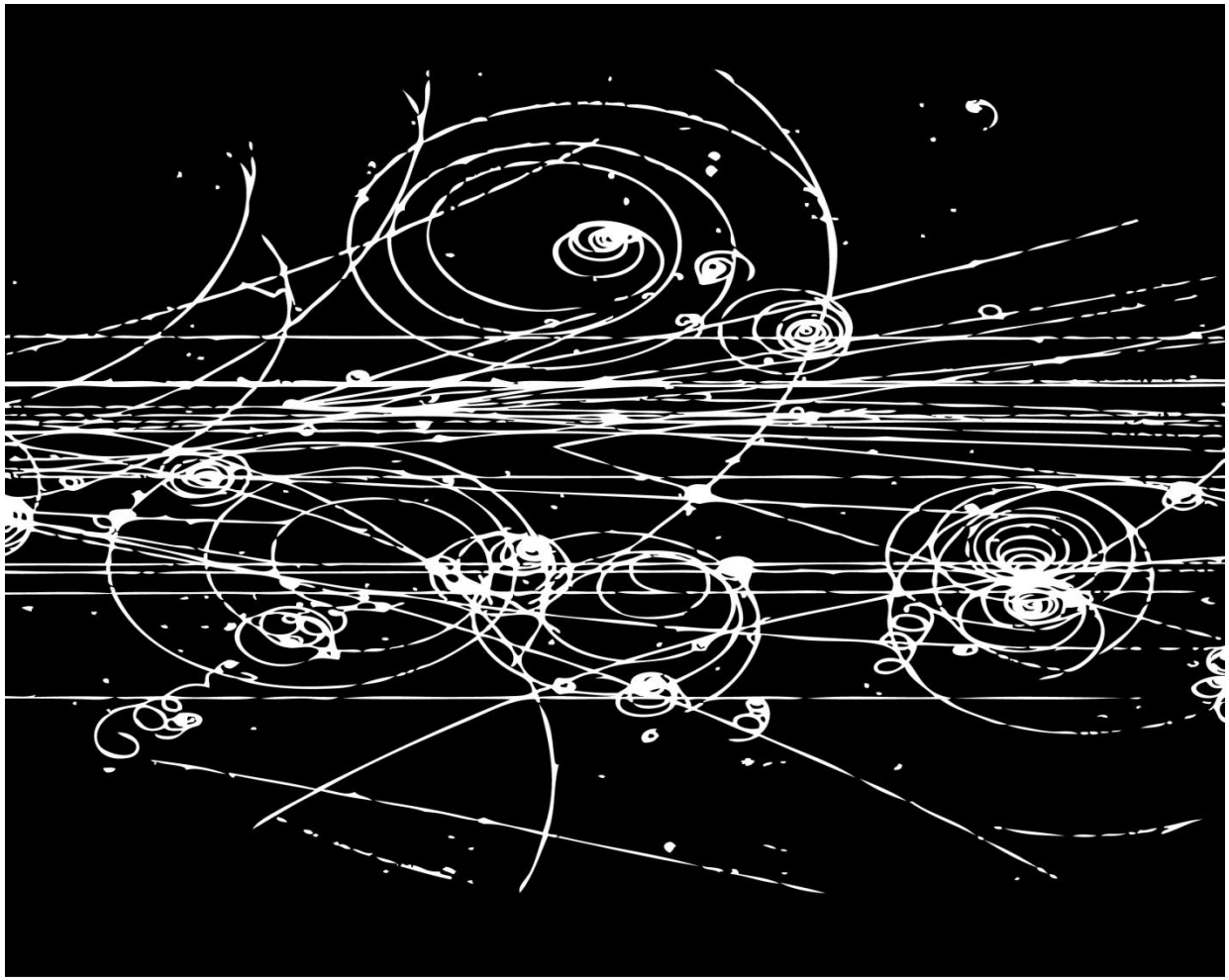
Energin hos partiklarna måste svara mot magnetfältens styrkor för att ha avsedda banor

Problemkällor – korrektion 1959/2007



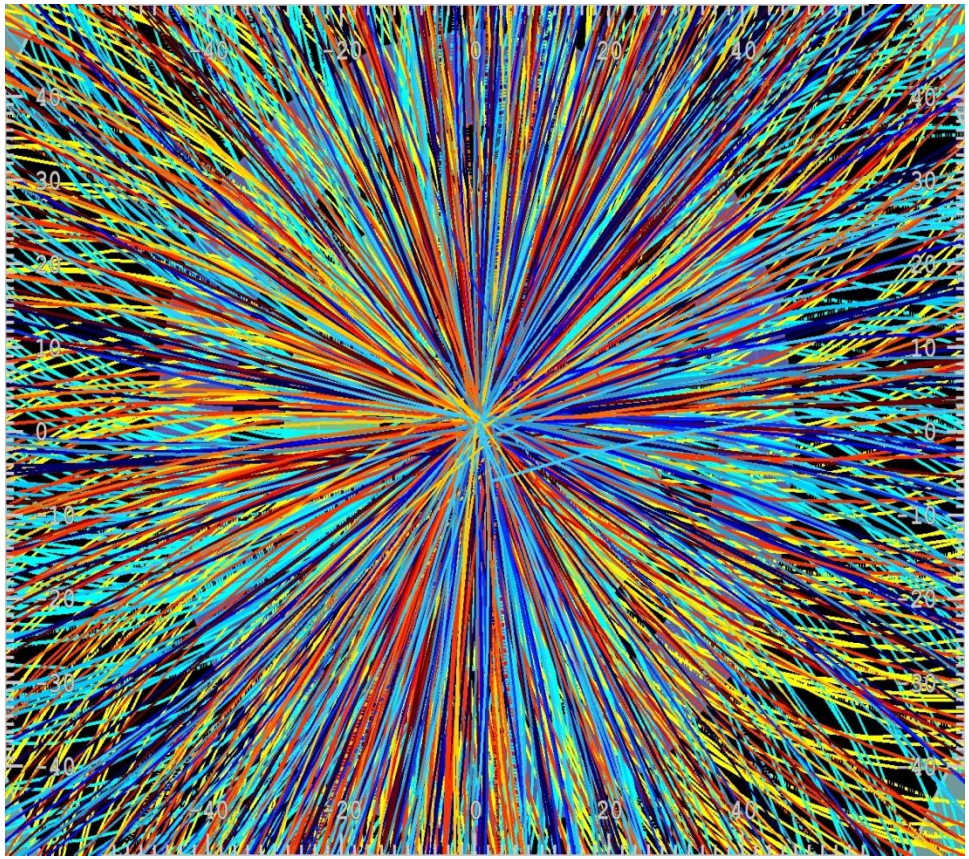
Kollisioner i går

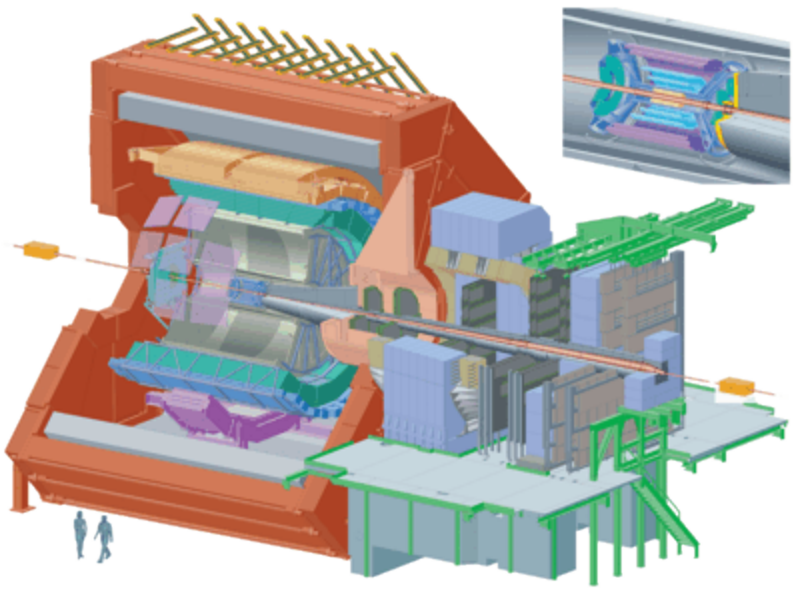
Bubbelkammaren 30 cm i diameter, fylls med flytande väte



Kollisioner idag

ALICE@LHC



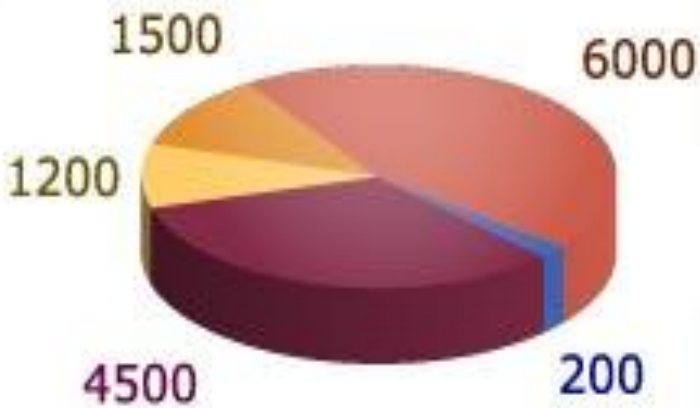


Andra användningar av acceleratorer

General industrial use:
Sterilisation, imaging

Research accelerators:
Particles, synchrotron light used in biomedical, physics, chemistry, biology, material research

Radiotherapy:
Cancer treatment with X-rays, protons and other particles



Ion implantation, surface modifications:
Controlled semiconductor doping; Changing properties of surfaces

Radioisotope production:
Cancer treatment; imaging organs for medical use

CERN - för innovation, upptäcka, publicera, dela

Fragor?

Referenser

What do we need to understand and optimize the LHC
O.S. Br¨uning, CERN, Geneva, Switzerland
M.S. Livingston and E.M.McMillan, 'History of the Cyclotron', Physics Today, 1959
• S. Weinberg, 'The Discovery of Subatomic Particles', Scientific American Library, 1983. (ISBN 0-7167-1488-4 or 0-7167-1489-2 [pbk]) (539.12 WEI)
• C. Pellegrini, 'The Development of Colliders', AIP Press, 1995. (ISBN 1-56396-349-3) (93:621.384 PEL)
• P. Waloschek, 'The Infancy of Particle Accelerators', DESY 94-039, 1994.
• R. Carrigan and W.P. Trower, 'Particles and Forces - At the Heart of the Matter', Readings from Scientific American, W.H. Freeman and Company, 1990.
• Leon Lederman, 'The God Particle', Delta books 1994
• Lillian Hoddeson (editor), 'The rise of the standard model: particle physics in the 1960s and 1970s', Cambridge University Press, 1997
• S.Weinberg, 'Reflections on Big Science', MIT Press, 1967 (5(04) WEI)
Introduction to Particle Accelerator Physics:
• J.J. Livingood, 'Principles of Cyclic Particle Accelerators', D. Van Nostrand Company, 1961
• M.S. Livingston and J.P. Blewett, 'Partticle Accelerators', McGraw-Hill, 1962
• Mario Conte and William McKay, 'An Introduction to the Physics of Particle Accelerators', Word Scientific, 1991
• H.Wiedemann, 'Particle Accelerator Physics', Springer Verlag, 1993.
• CERN Accelerator School, General Accelerator Physics Course, CERN Report 85-19, 1985.
• CERN Accelerator School, Second General Accelerator Physics Course, CERN Report 87-10, 1987.
• CERN Accelerator School, Fourth General Accelerator Physics Course, CERN Report 91-04, 1991.