



# CERNs Acceleratorer – en kort historisk introduktion

T. Pettersson  
October 2015

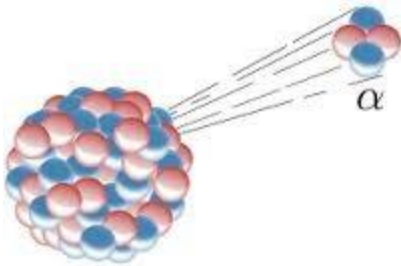


# Innehåll

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



# 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  $\sim 15,000$  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 accelerators accelererar partiklarna med elektriska fält som frekvensvarieras (Engelska: Radiofrequency - RF)
- Cirkulära accelerators 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 noggrannare hur en proton är sammansatt!

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

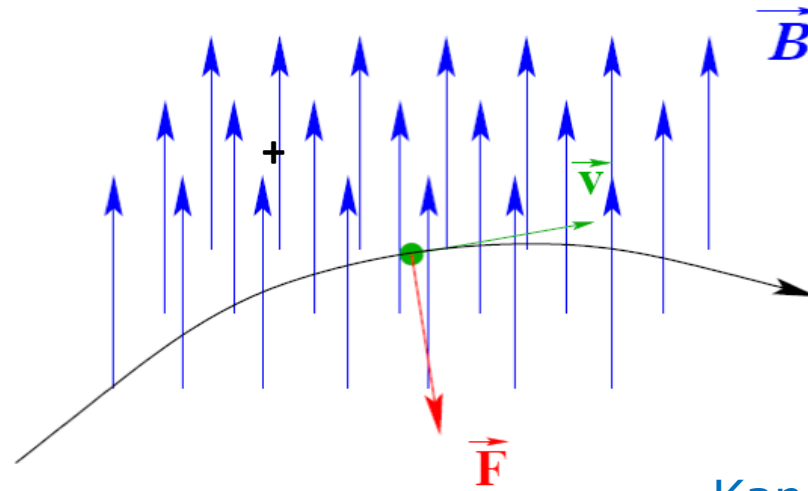
$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \Rightarrow E_k = \frac{1}{2} 6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2^2 \sim 7 \text{ TeV}$$

I LHC har varje proton samma rörelseenergi som flugan!

Men flugan har ~36 tusen trillioner atomkärnor!



# Tillgängliga krafter som verkar på laddade partiklar



Lorentz kraft:

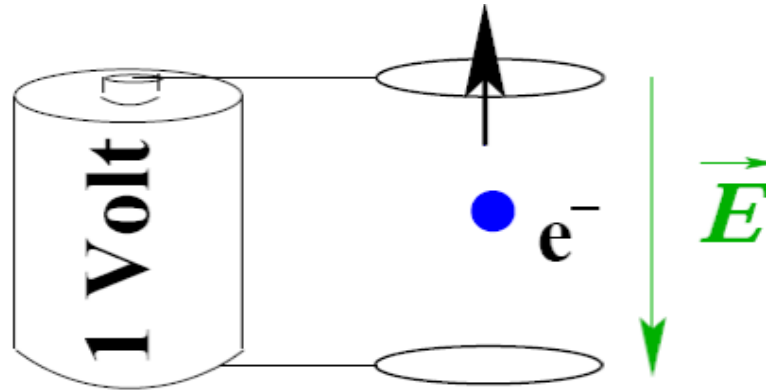
Kan styra en laddad partikels riktning

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

Kan accelerera laddade partiklar



# Enheter: ElektronVolt



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

*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:*

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

**Acceleration**

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

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

**Total energi**

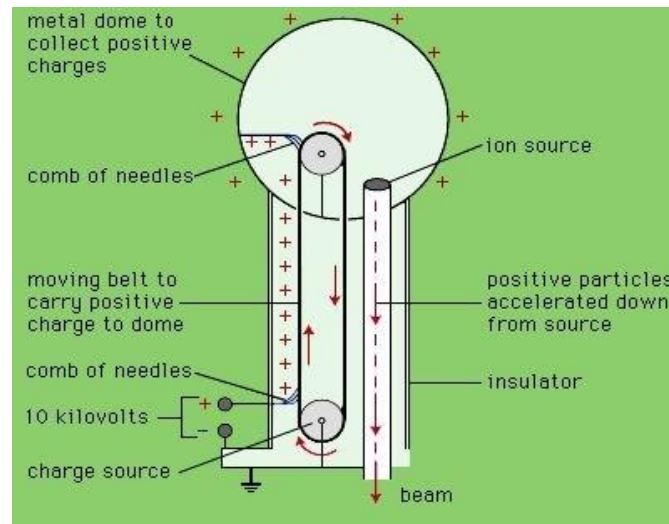
*$m$  är partikelns massa och  $c$  ljusets hastighet i vakuum.  
Massan för en elektron, med hastighet  $v \ll c$  är cirka 0.5 MeV.*

*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 acceleratoren, betatronen, och cyclotronen.





# Cyklotron - ~1929

Centripetalkrafter = -Centrifugalkrafter:

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

Kontinuerligt partikelflöde!

Omstuvning:

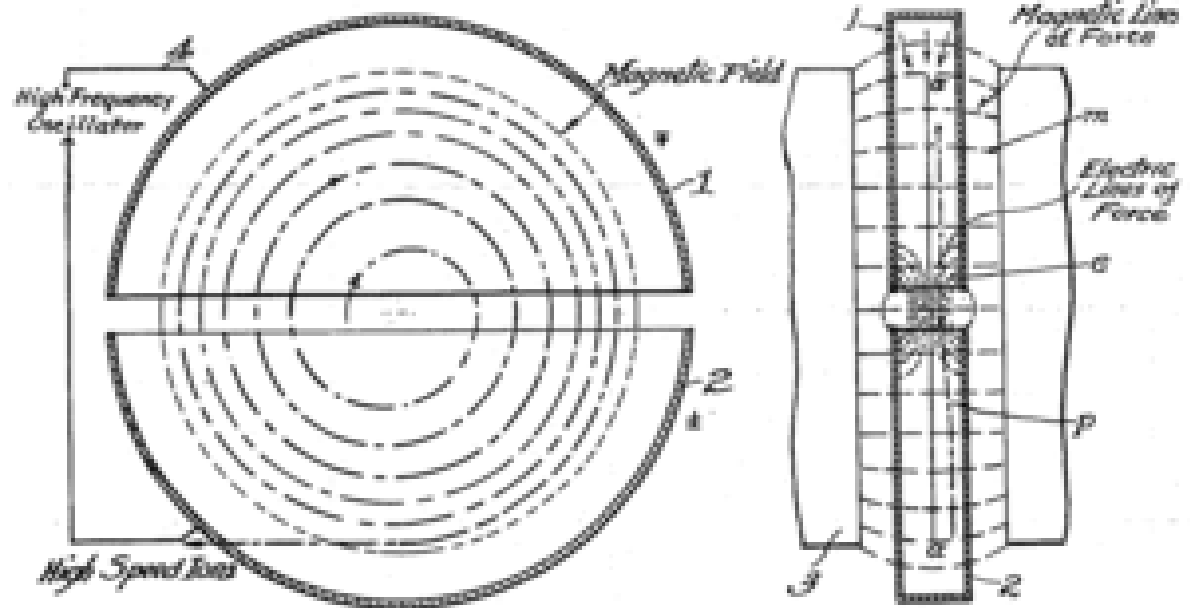
$$\frac{v}{r} = \frac{Bq}{m}$$

↓

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

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

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



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

# Cyklotronen kommer till CERN - 1957

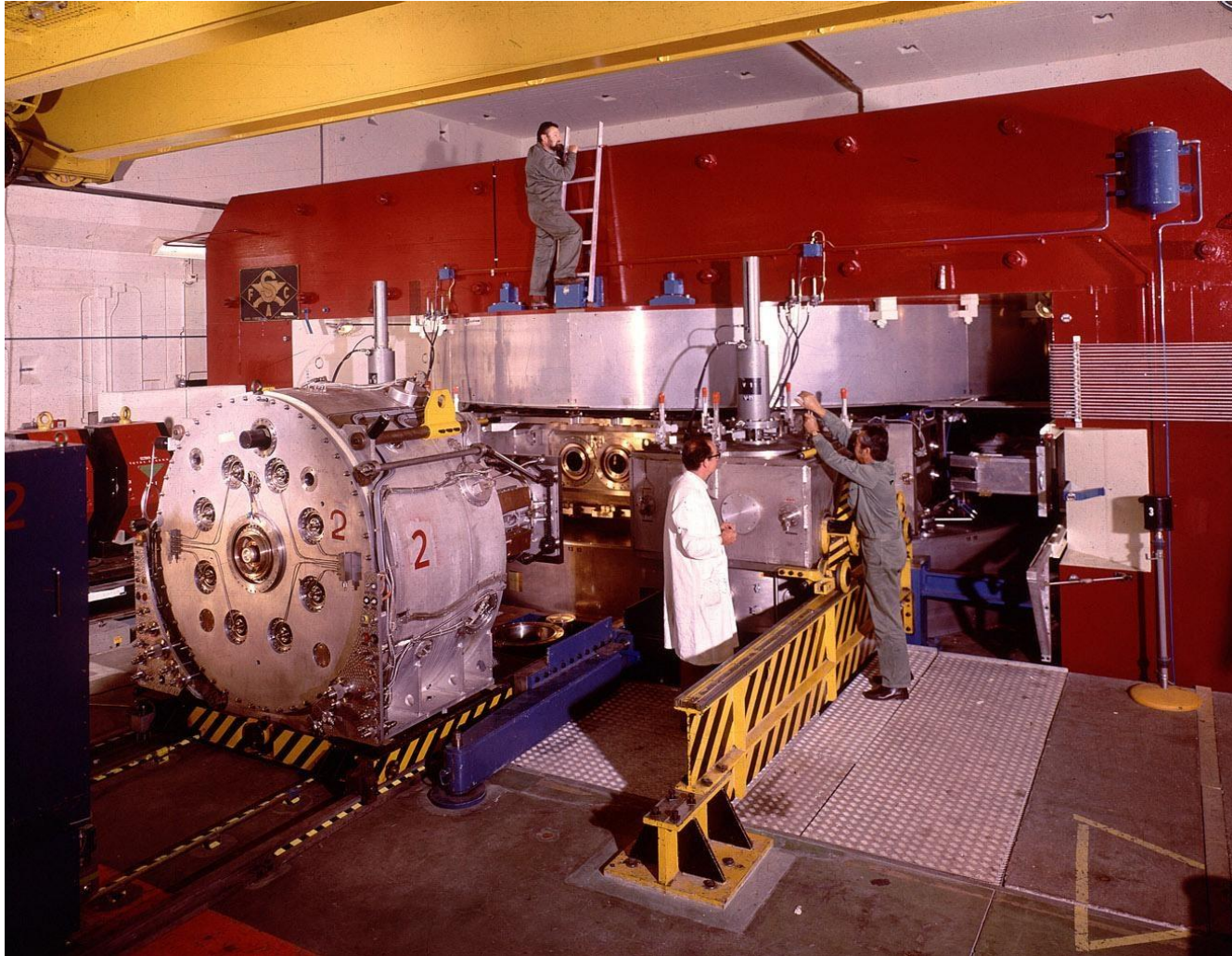


Max energi - 600 MeV

EDMS:1220969



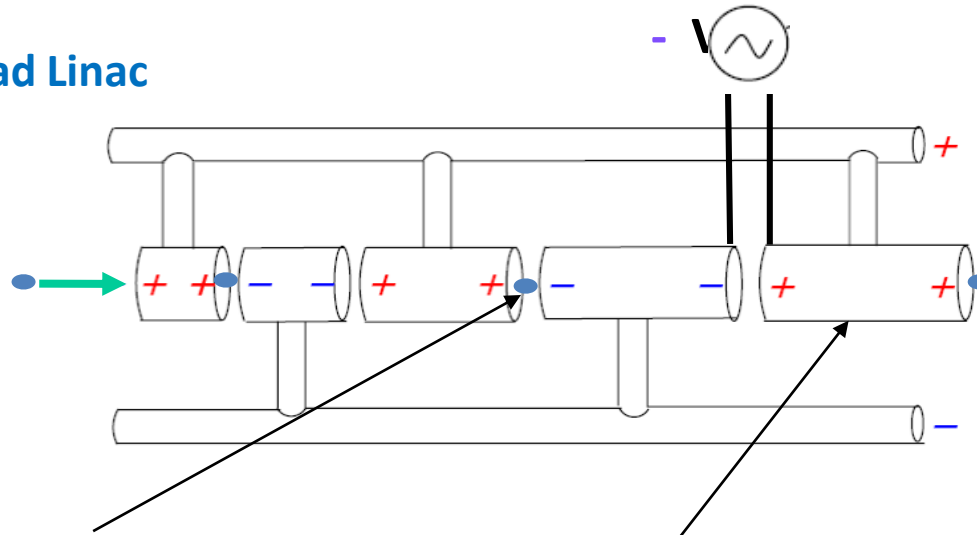
# Renoverad - kan besökas i Bat 300



EDMS:1220969

# Linjära accelerators

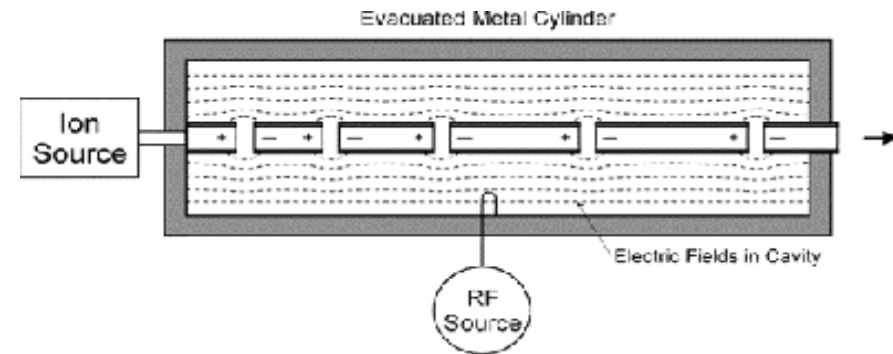
## Förenklad Linac



**Wideroe**  
**1928.**

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

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



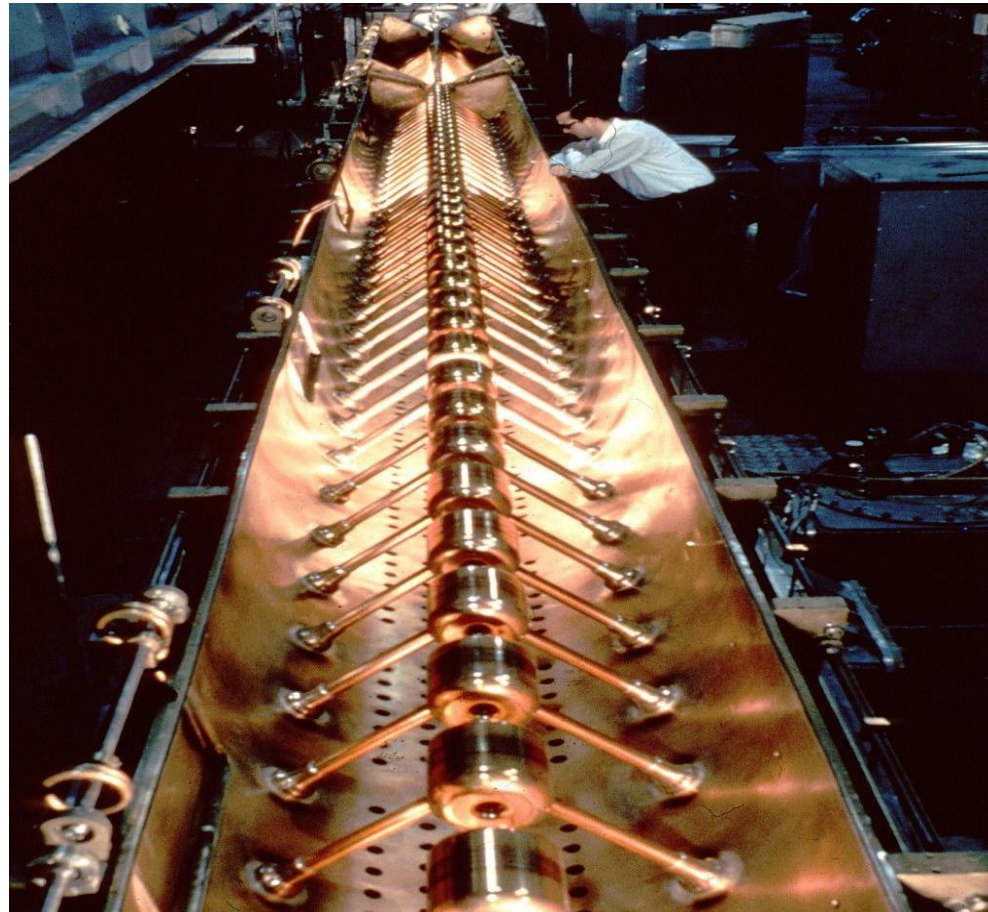
Alvarez: resonanstank eller "drift tube linac"



# 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



EDI

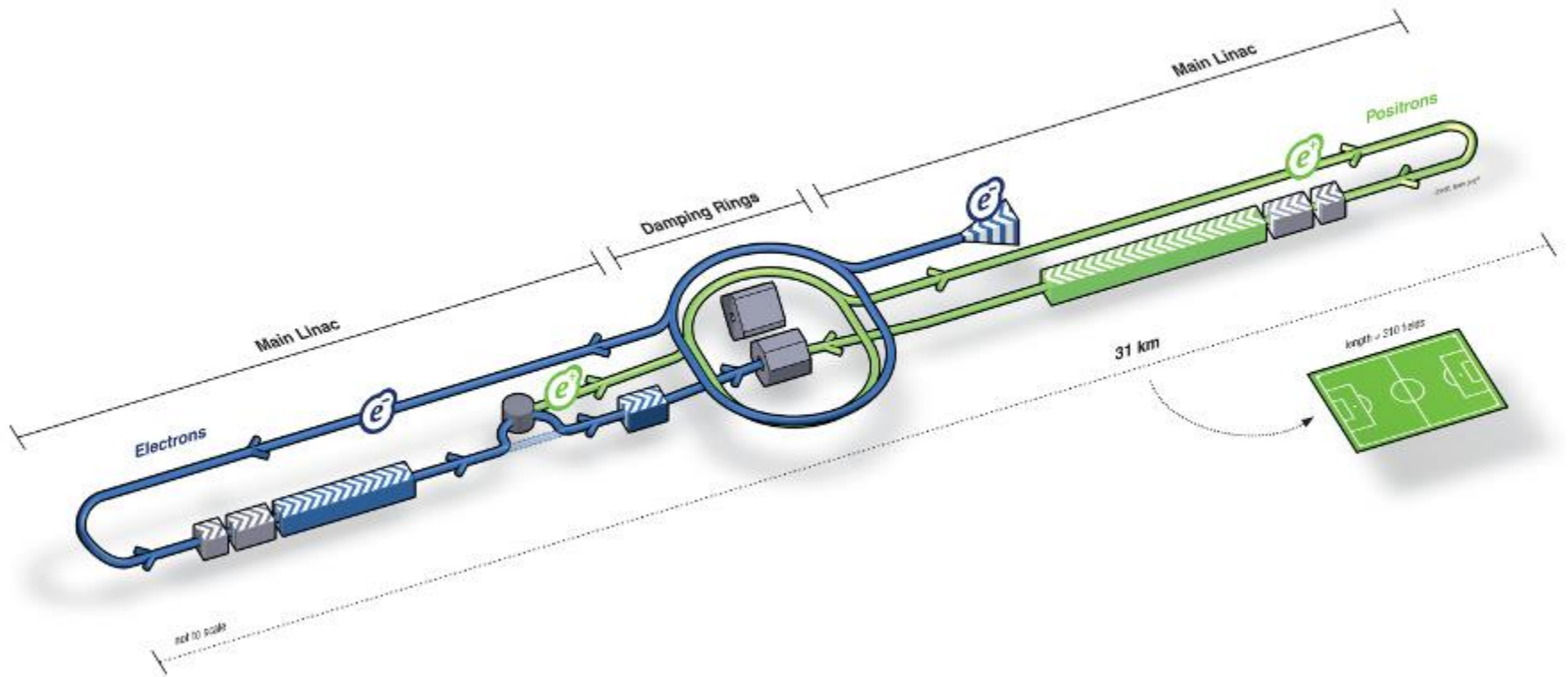


## Stanford Linear Accelerator – gränsen nådd (1960 talet..)?





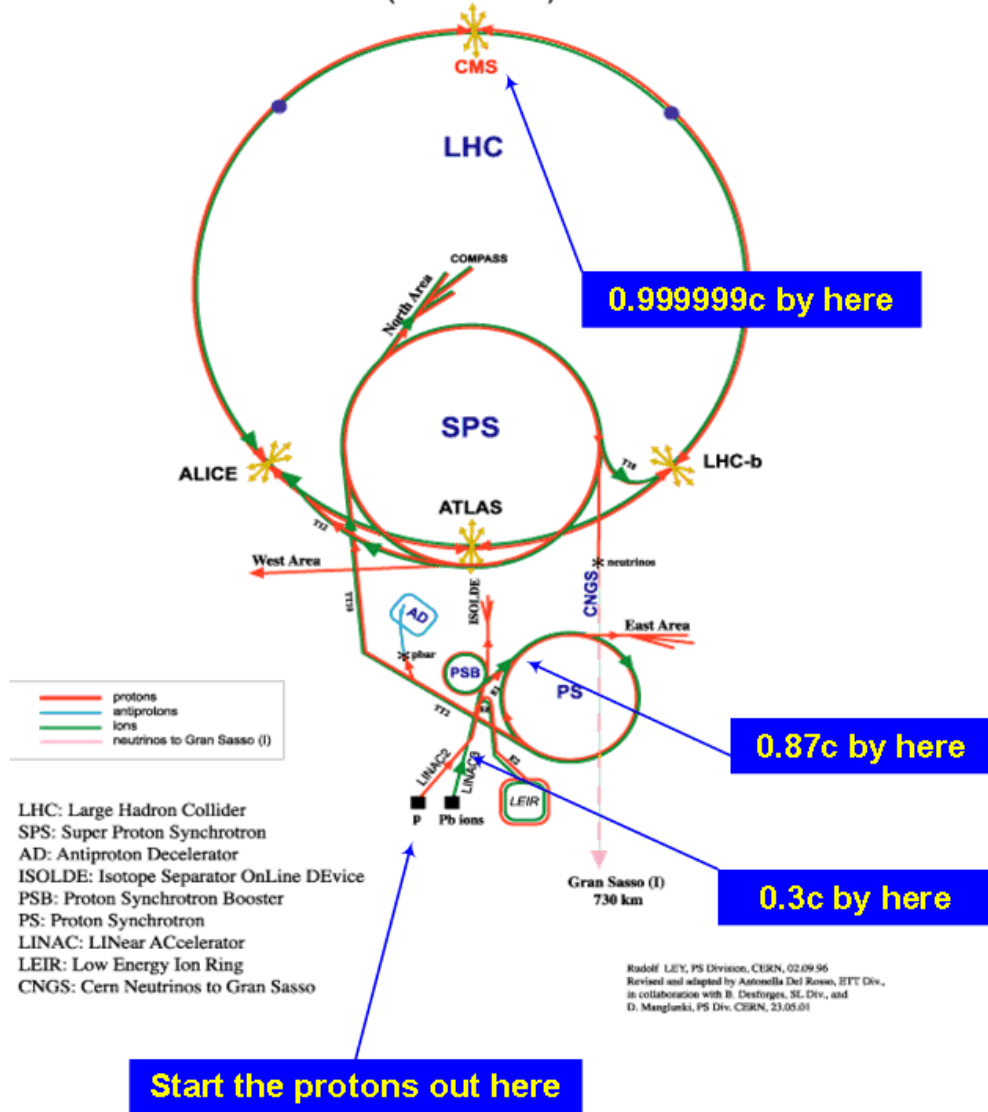
# International Linear Collider – lite längre till.. 2015(?)





# Acceleratorerna på CERN

CERN Accelerators  
(not to scale)

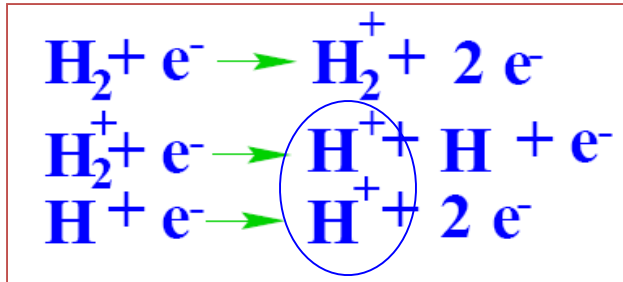
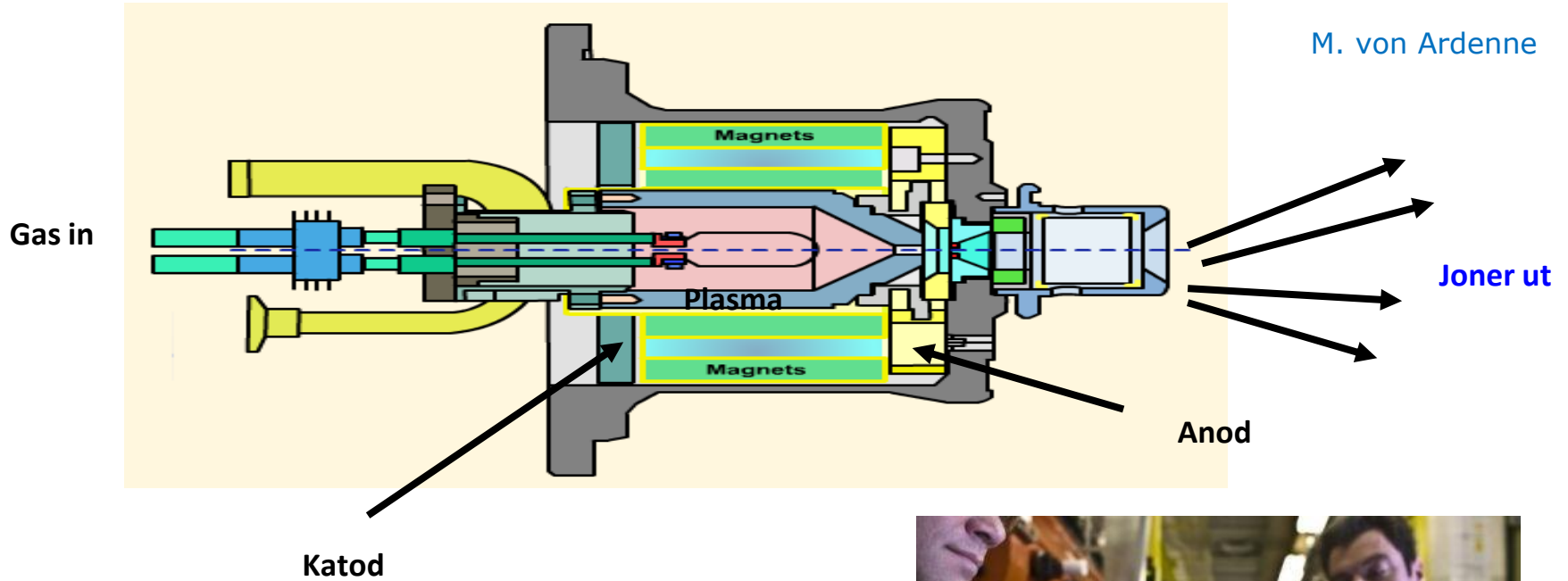


Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,  
 in collaboration with B. Desforges, SE Div., and  
 D. Mangunki, PS Div. CERN, 23.05.01



# Partikelkälla

Duoplasmatron från CERNs Linac-Hemsida



# Den första, den största



centimeter

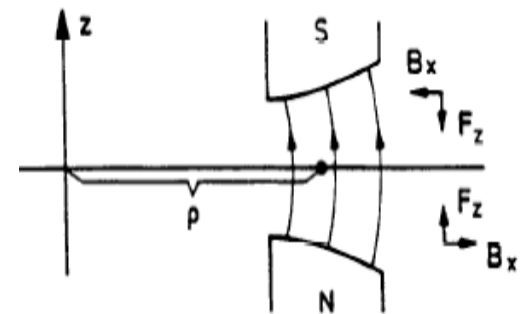
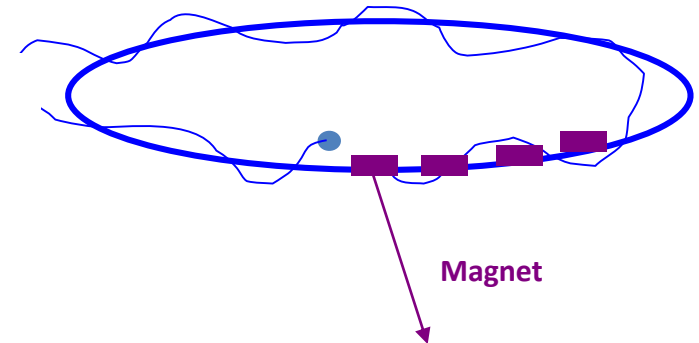
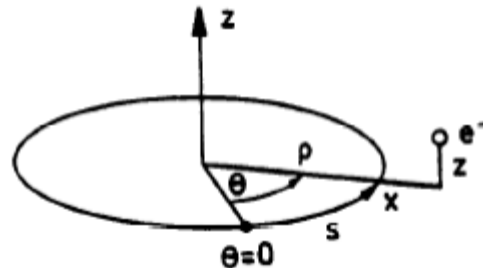
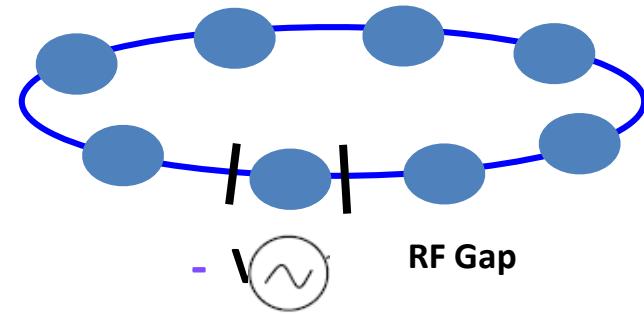


kilometer



# 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 acceleratoren: magnetfält och acceleration måste tillfredsställa stabilitetsvillkor.



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



# Magnettyper - Dipolen

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

$$F_x = -ev_s B_y$$

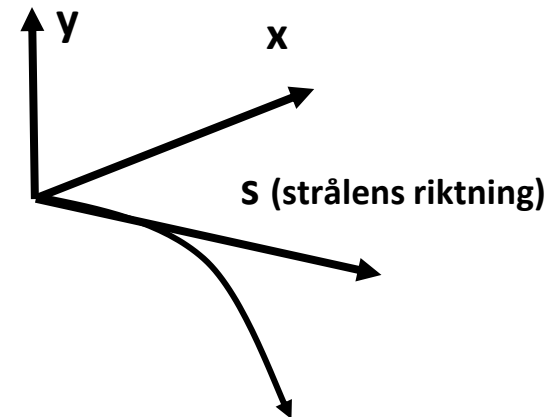
$$F_r = mv_s^2 / \rho$$

$$p = mv_s$$

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

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

Magnetisk styvhet  
"Magnetic rigidity"



# PS Dipol - 1956....

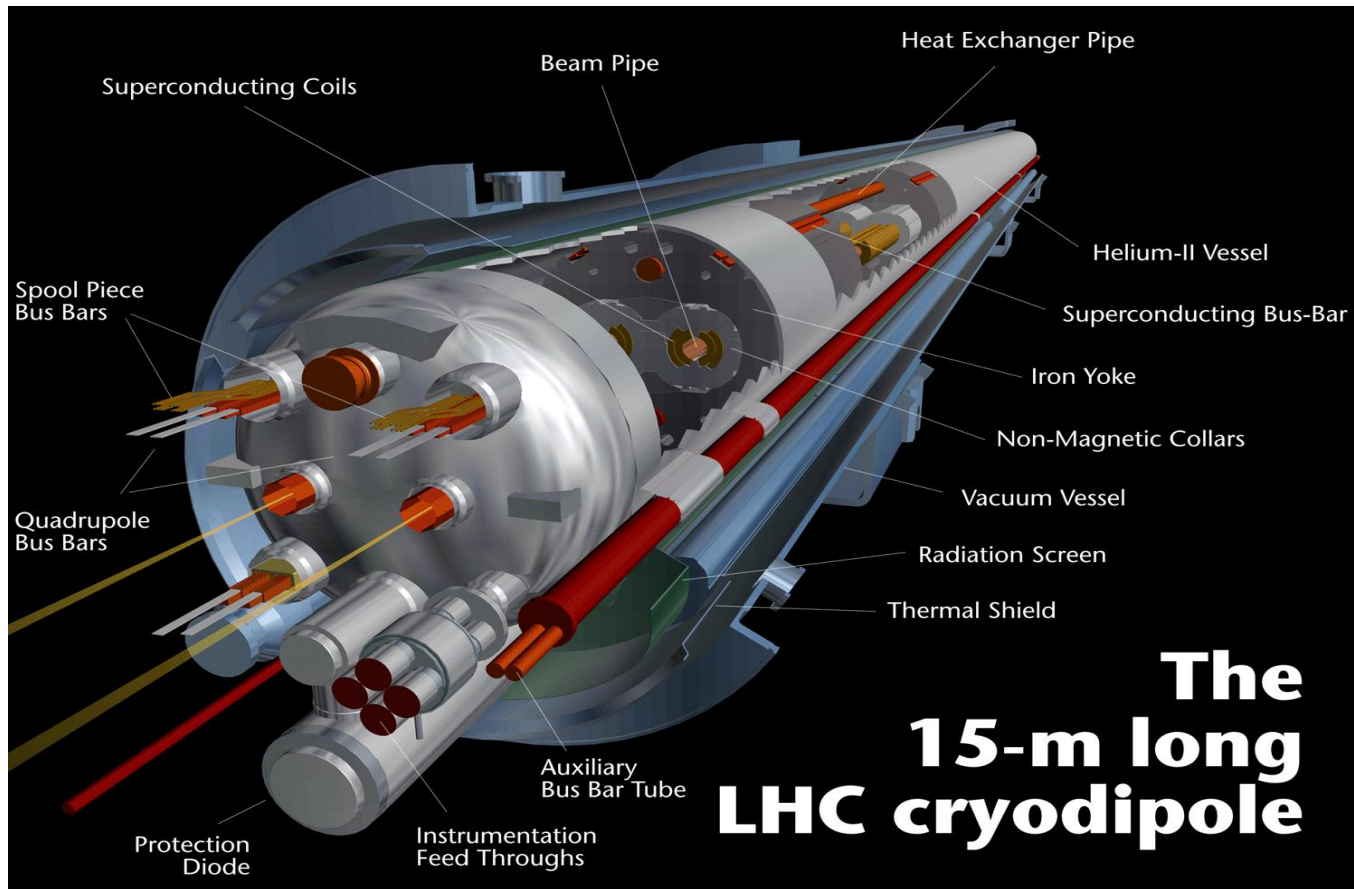




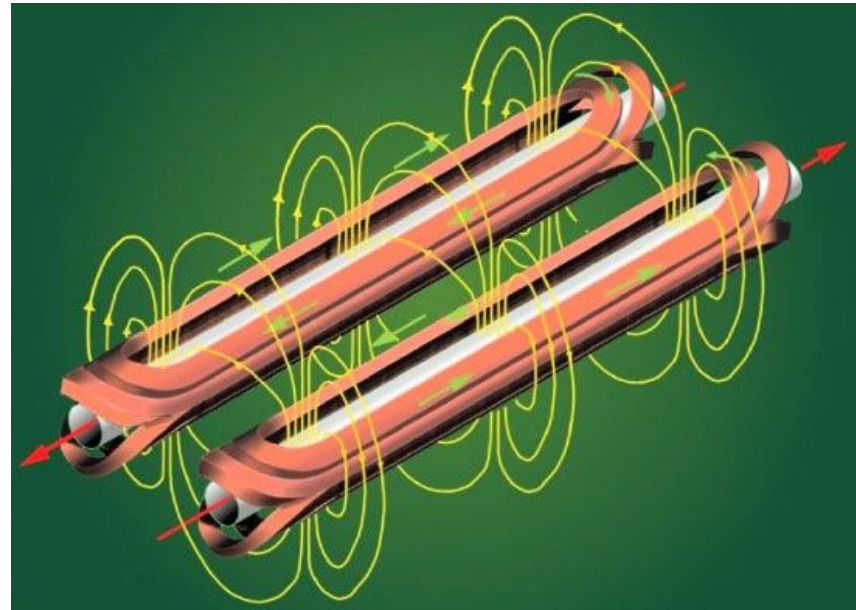
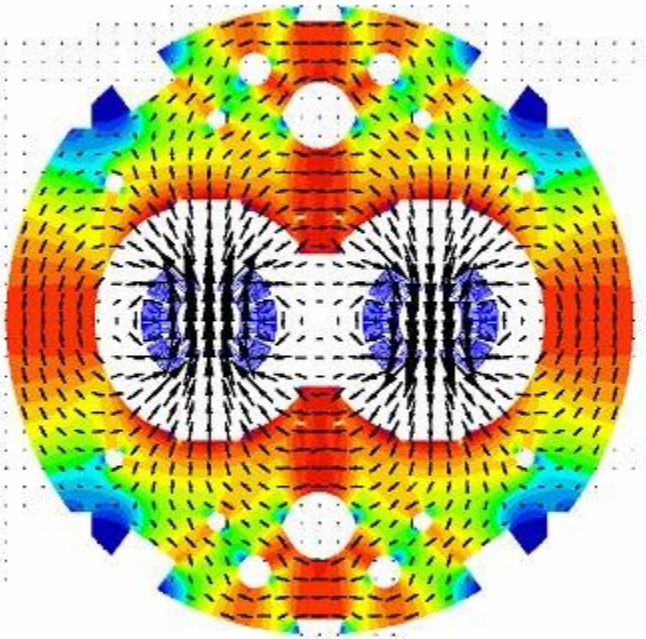
# Supraledande Dipol för LHC-2008

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

TEKNOLOGI



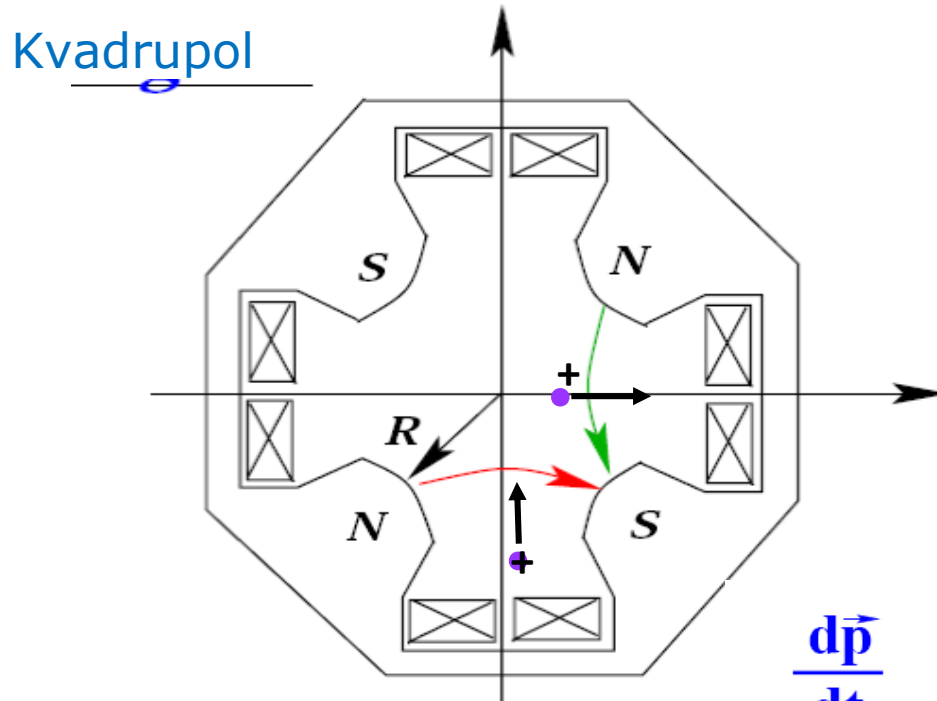
# LHC Dipol fält





# 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.



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

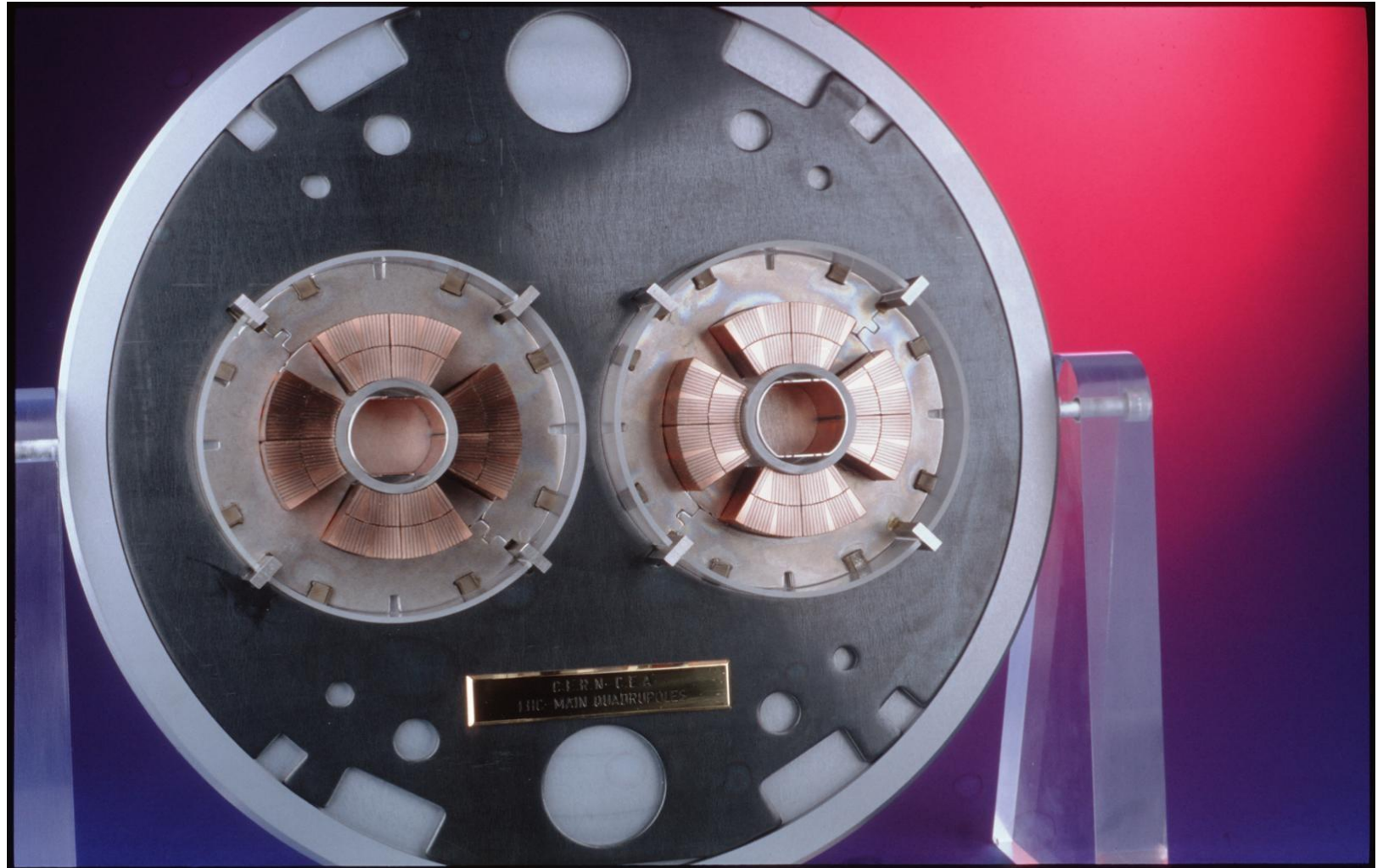
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = Q * \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

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





# LHC supraleedande kvadrupol - tvärsnitt 2008 5.3m/6.5 ton



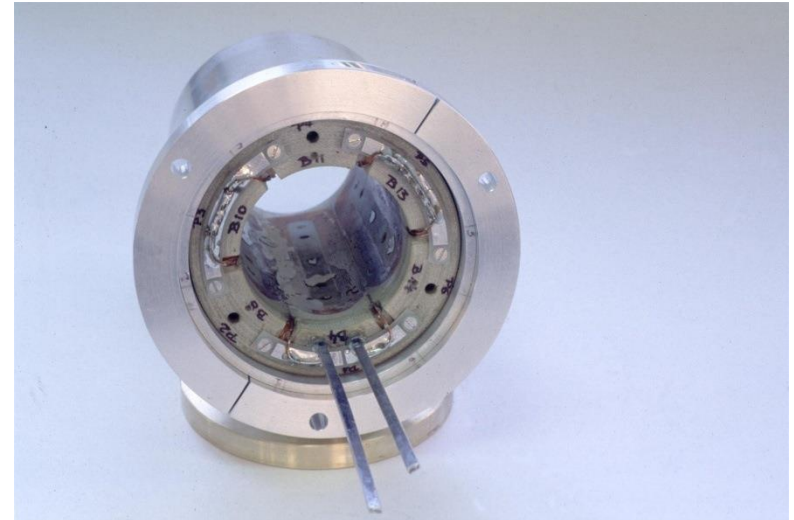
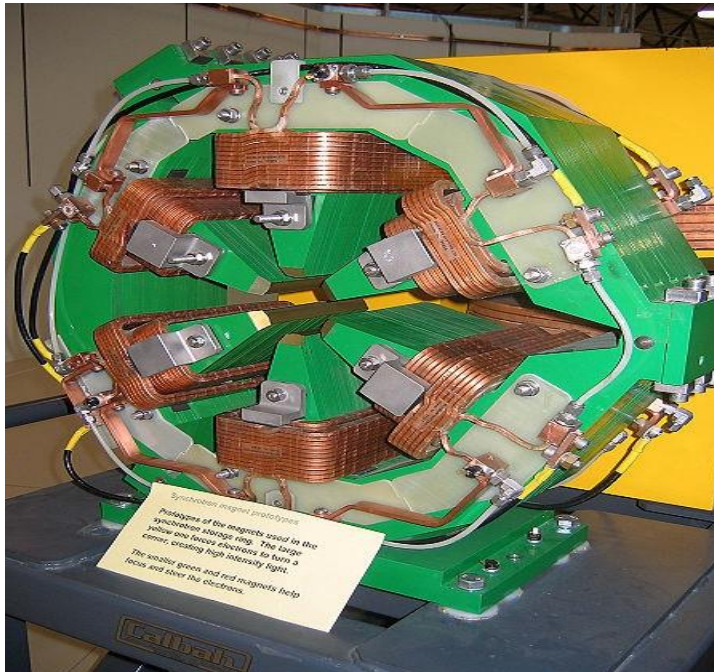
# LHC Kvadrupol 2009





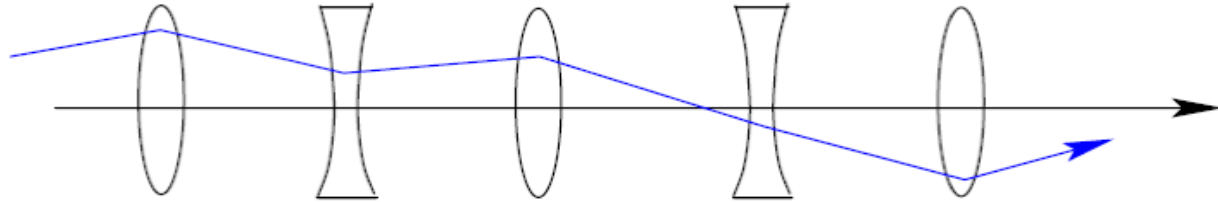
# Högre ordningens magneter

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



wikipedia

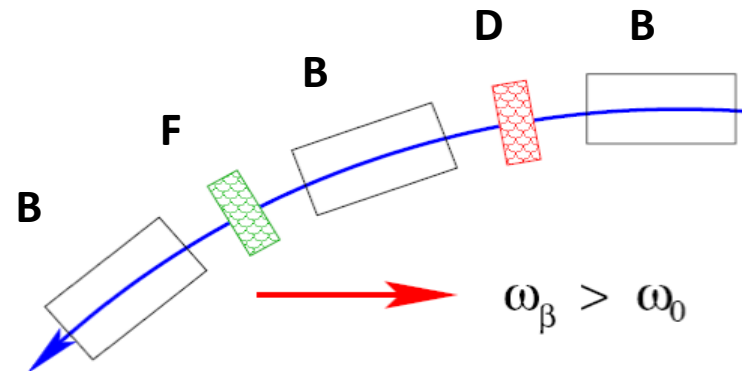
# Fokuseringsystemet



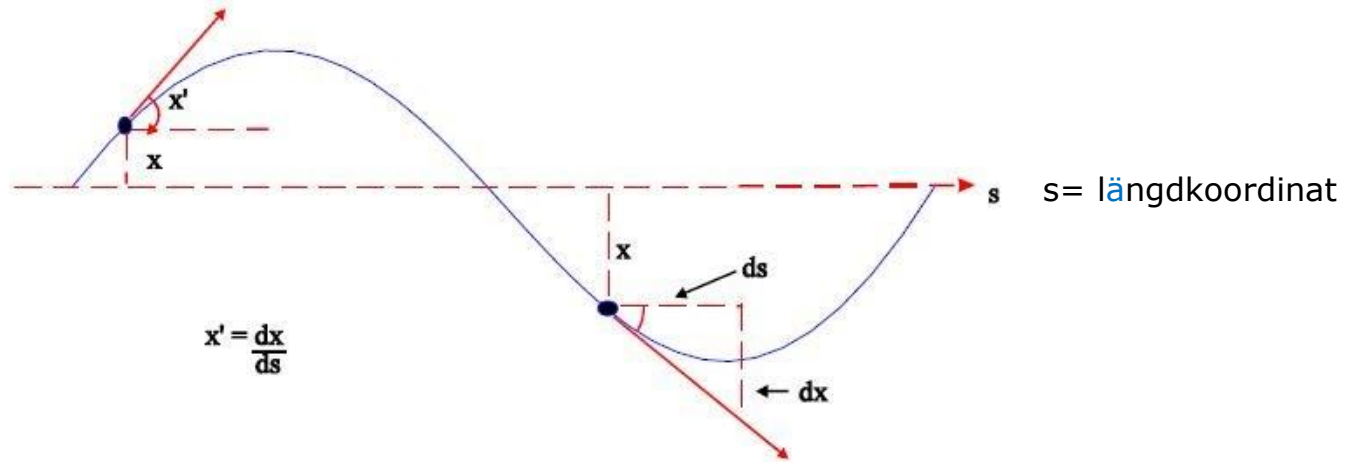
” Alternate gradient focusing” ger totalt fokuserande effekt (jämför optiska system i kameror t.ex.). Utvecklad av Brookhaven i AGS maskinen i slutet av 1950 talet.

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

Magnettyperna i linssystemet alterneras mellan fokuserande och defokuserande linser i de olika Planen.



# Partikelns position och vinkel runt maskinen



Partikelns position - karakteriserad av:  $(x(s)), (x'(s))$ . Oscillation(t)  $\rightarrow$  Oscillation(s)!

Ansats (Hills ekvation):

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

Definiera:

$\epsilon$  = transversal emittance, konstant och beroende av initialvillkoren.

$\beta(s)$  = amplitud modulering är en function av fokuseringstyrkan

$\psi(s)$  = fasen är en function av fokuseringstyrkan

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



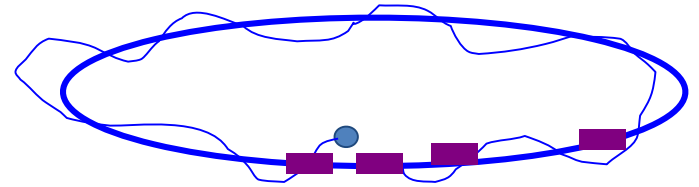
## Fokusering och oscillerande partiklar

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

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

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

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



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).

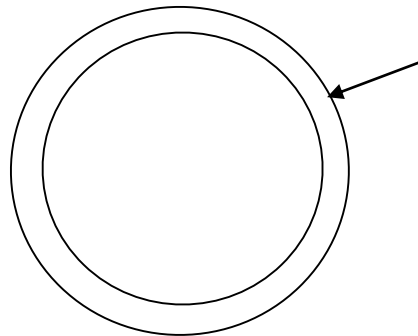
$L$  är ringens omkrets.



# Acceleration och partikelbanans radie

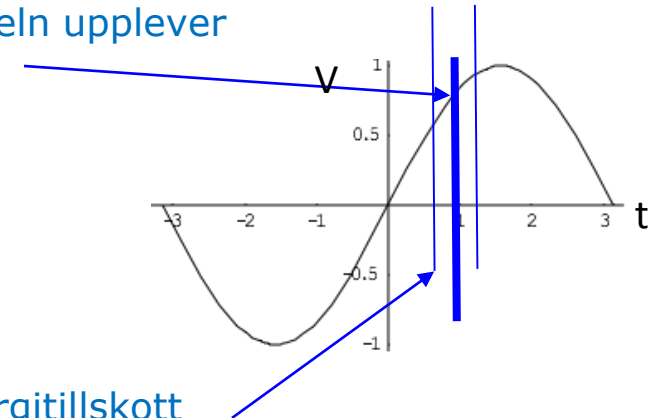
Magnetfältet ( $B$ ) och partikelns hastighet ( $v$ )

- > banan
- > omloppstiden
- > tiden för inträdande i RF kaviteten



$v$  ökar ->  
Radien större än  
referensradien

Detta är det elektriska fältet som referenspartikeln upplever



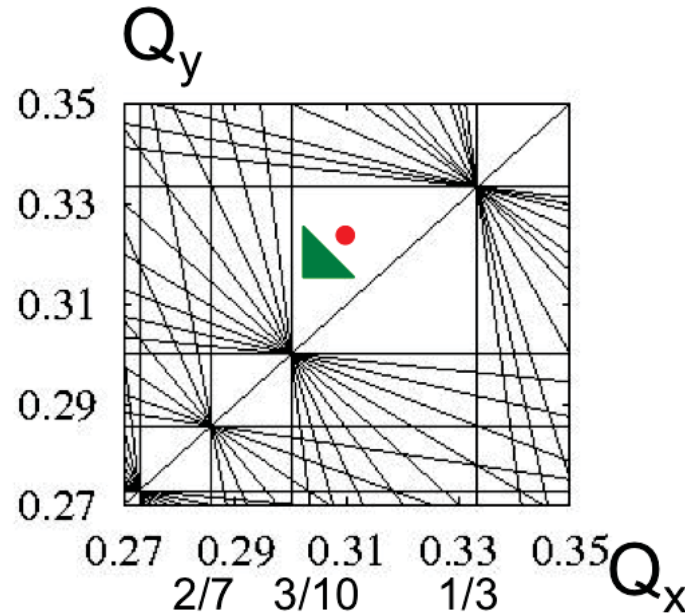
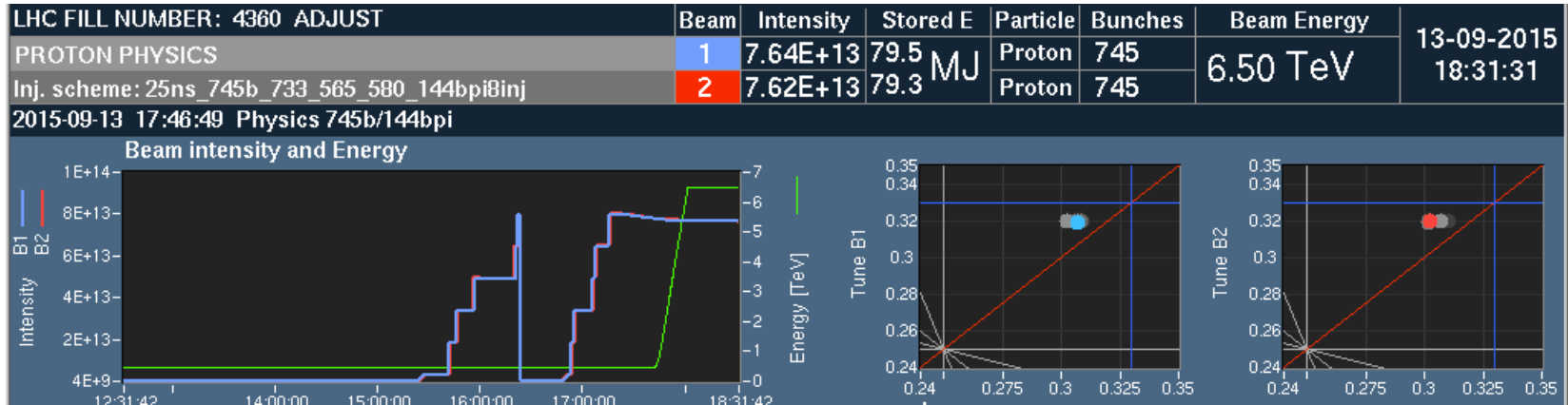
Tidig partikel får mindre energitillskott

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





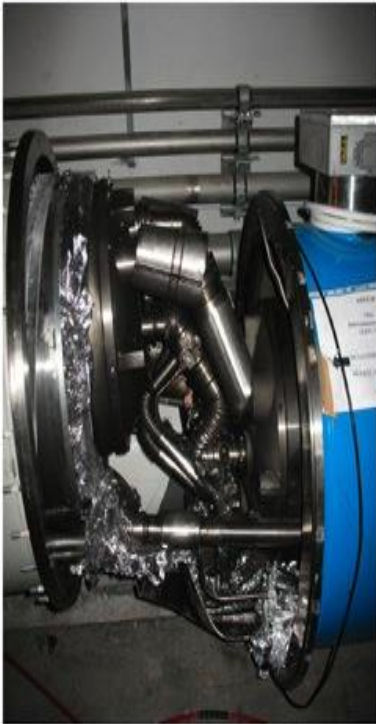
# Resonanser.....



# Krafter i spel

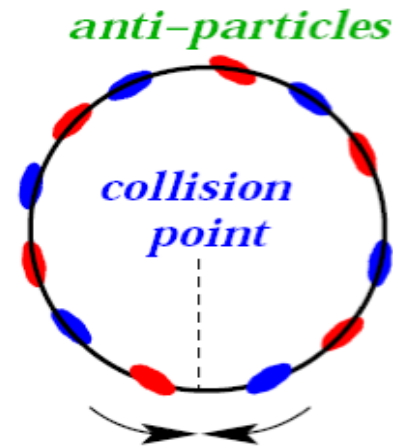
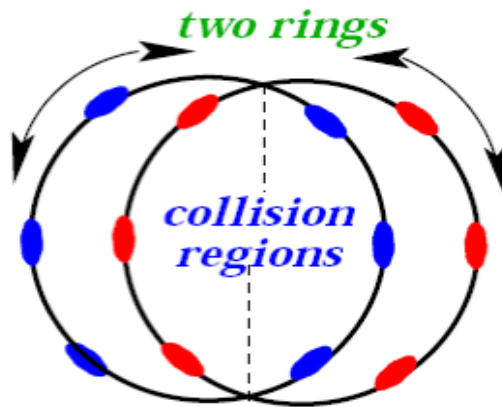


# Krafter i spel



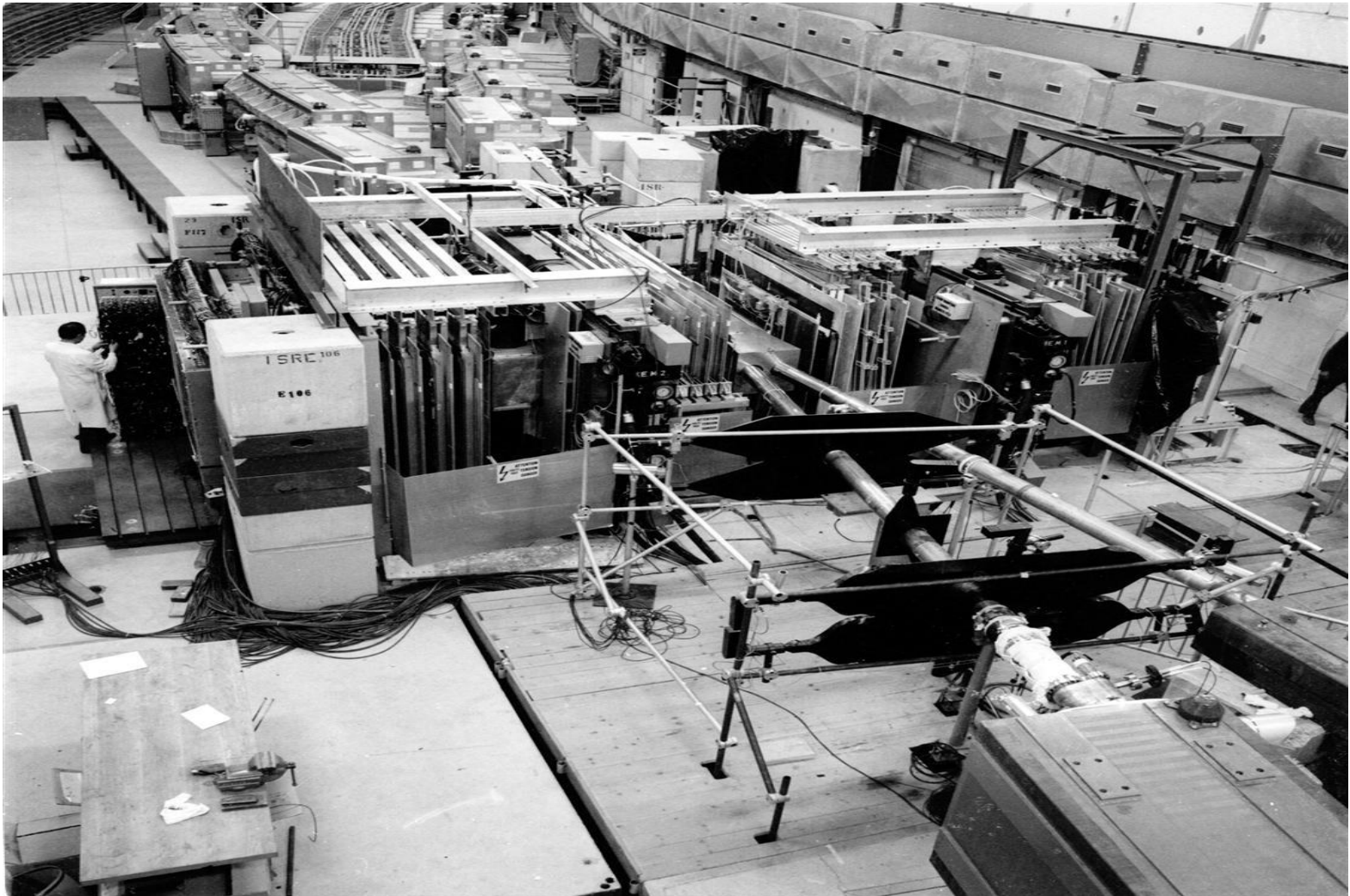


# Typer av "Kolliderare" acceleratorer



- Alla partiklar kolliderar inte på en gång → långa tider för experimental verksamhet
- Två strålar behövs
- Antipartiklar svåra (dyra) att producera ( $\sim 1$  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)

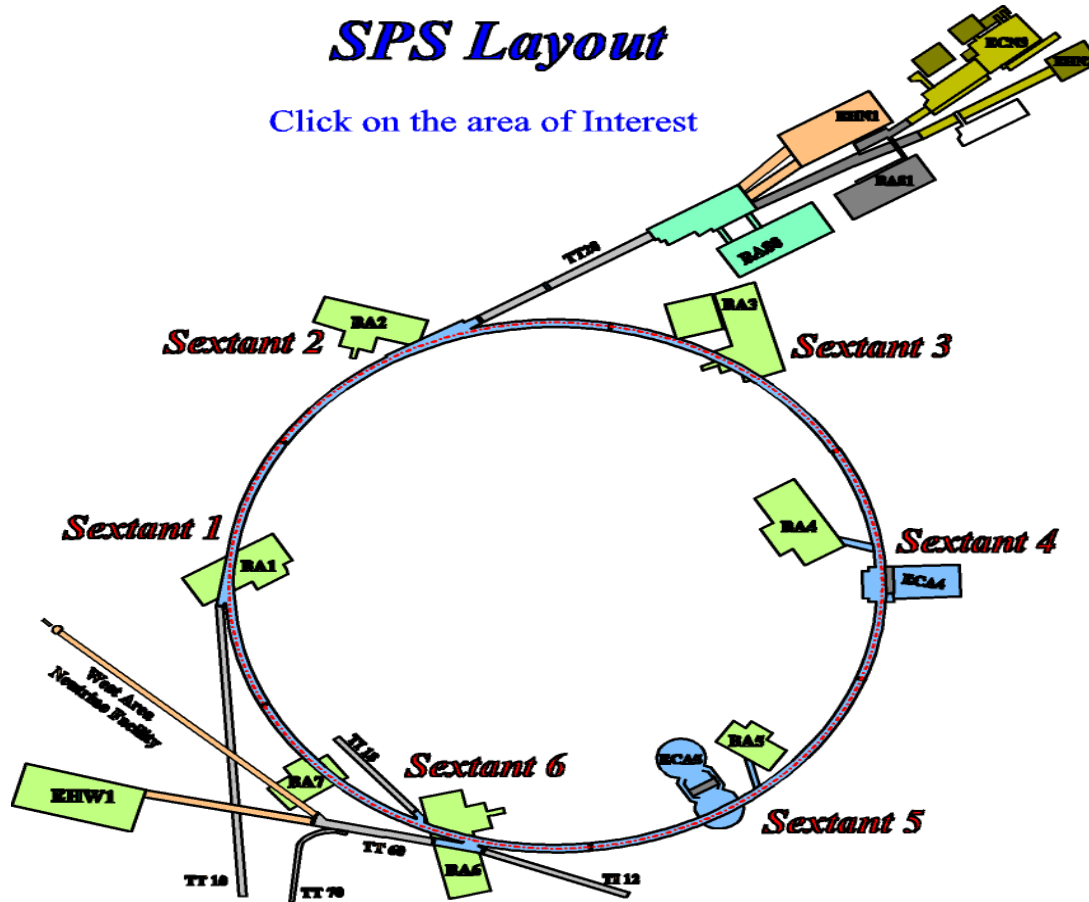




# En ring proton-antiproton SPS(1976)->SpS(1983)->SPS(1989)

## *SPS Layout*

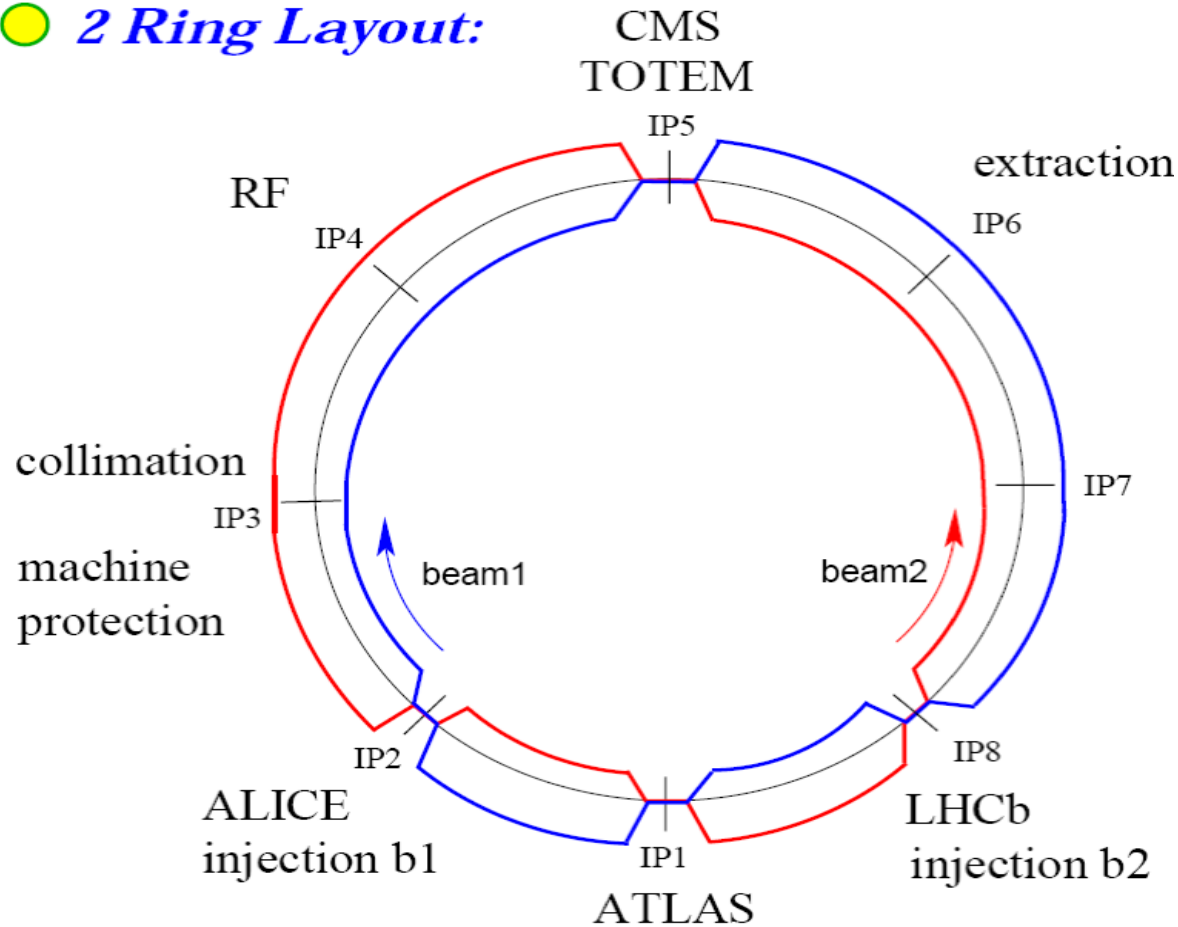
Click on the area of Interest





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

## ● *2 Ring Layout:*



# Antiproton, antimateria, joner



LEAR (idag LEIR) 75 m fyrkantig

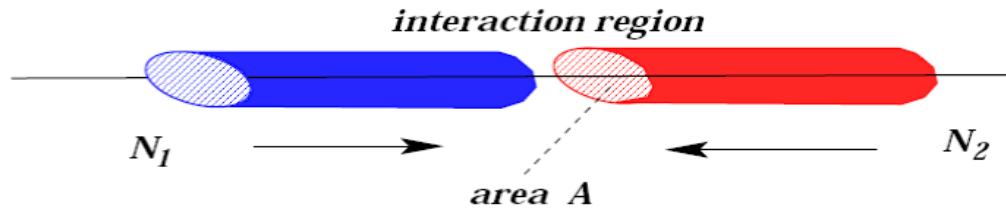




# Luminositet = f(strålens storlek)

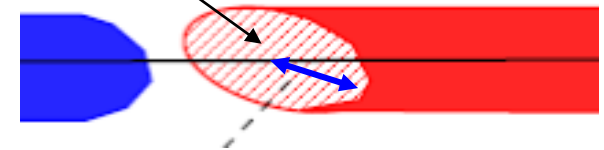
Strålen måste vara liten i kollisionspunkten

EXPERIMENT

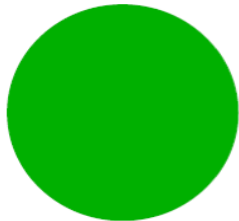


$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\epsilon\beta^*} F$$

$$\sigma = \sqrt{\epsilon\beta^*}$$



LHC:



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



$\beta_{IP} = 0.5 \text{ meter}$

Begränsningar:

Tillgänglig fältstyrka  
Magnetens öppning

Luminosity [E30 s-1 cm-2] [pb-1] [(mb)^-1]	ATLAS	ALICE	CMS	LHCb
	STANDBY	STANDBY	STANDBY	STANDBY
Instantaneous	1373.3	0.0	1204.0	0.3
Integrated fill	0.0	0.0	0.0	0.0
Integrated/h	0.0	0.0	0.0	0.0
beta * [m]	0.0	0.0	0.0	0.0



# Synkrotronstrålning

Kon av synkrotronljus



Elektromagnetiska vågor

Accelererande laddade partiklar sänder ut elektromagnetisk strålning

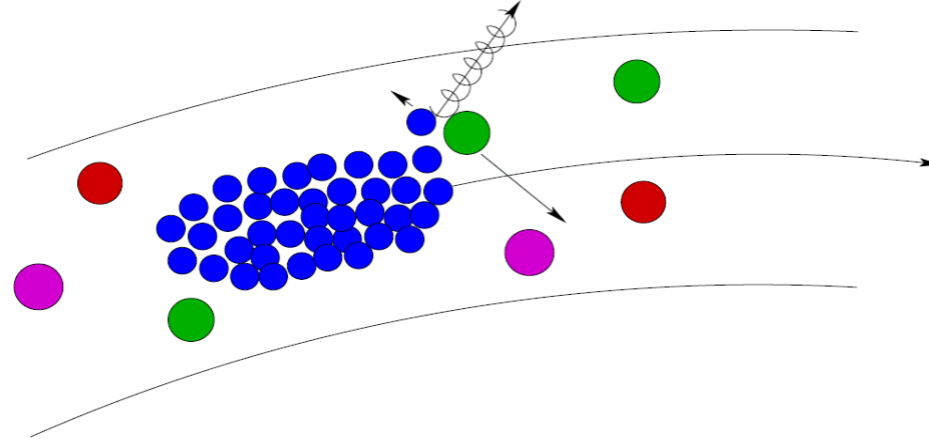
Radio signaler och röntgenstrålning

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

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

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

## Bremsstrahlung + Coulomb Scattering



- Förstoring "Blow up" av strålen
  - Partikelförluster
  - Önskade kollisioner i experimenten
  - Minskad luminositet
- 
- LHC :
  - Ultrahögt vacuum  $10^{-10}$  Torr ( $\sim 3$  million molekyler/cm<sup>3</sup>)
  - Vid 10,000 km höjd är trycket  $\sim 10^{-13}$  Torr

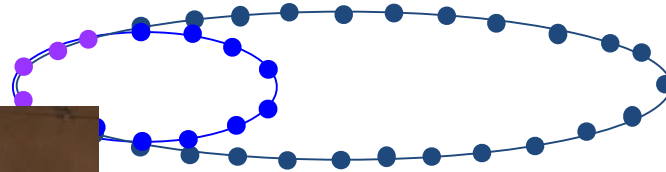


# Varför Supraledande Teknologi 1

Varför supraledande magneter?

Liten radie, mindre maskin.

Energibesparing, men infrastrukturen mycket mer komplex.



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

Kylskåp- XXXL.



# Varför Supraledande Teknologi 2

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

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



# Varför Supraledande teknologi 3



## ■ *LEP:*

$B = 0.135$  Tesla

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

$I = 4500$  A;  $R = 1$  m $\Omega$   $\rightarrow$   $P = 20$  kW / magnet

ca. 500 magnets  $\rightarrow$   $P = 10$  MW

## ■ *LHC:*

$$B \propto I$$

$\rightarrow$   $B_{\max} = 8.38$  T  $\rightarrow$   $I = 280000$  A

$\rightarrow$   $P = 78$  MW / magnet

ca. 500 magnets  $\rightarrow$   $P > 39$  GW



# Varför 7+7 TeV i LHC ?

TEKNOLOGI

■ **Synchrotron:**  $R = \text{const.}$

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

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

■ **Physics:**  $\rightarrow p = 7000 \text{ GeV}/c$

■ **LEP tunnel:**  $L = 27000 \text{ meter}$

$\rightarrow$  arcs:  $L = 22200 \text{ meter}$

$\rightarrow R = 3500 \text{ meter}$

■ **Bending and Focusing:**  $\rightarrow R = 2784 \text{ meter}$

$$\rightarrow B_{\text{max}} = 8.38 \text{ T} \rightarrow \begin{array}{l} \text{iron saturation: } 2 \text{ Tesla} \\ \text{earth: } 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ Tesla} \end{array}$$

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: ( $p^+$  /  $p^-$ )

■ *multi particle collisions*

→ *energy spread*

→ *discovery potential*

● Example:

$Z_0$

1985 Sp $\bar{p}$ S

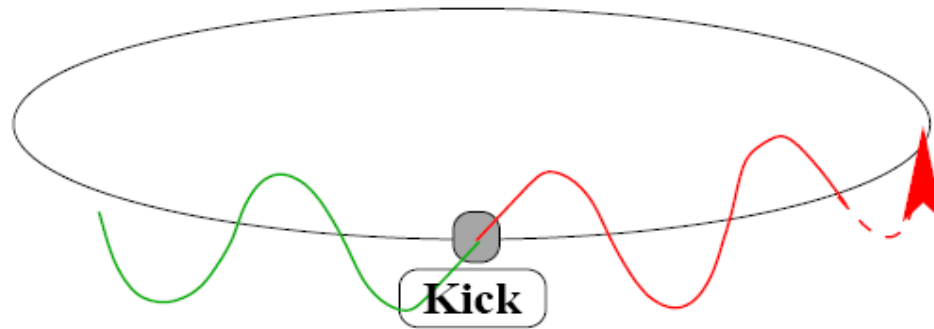
$p^+p^-$

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 upprepade "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

...

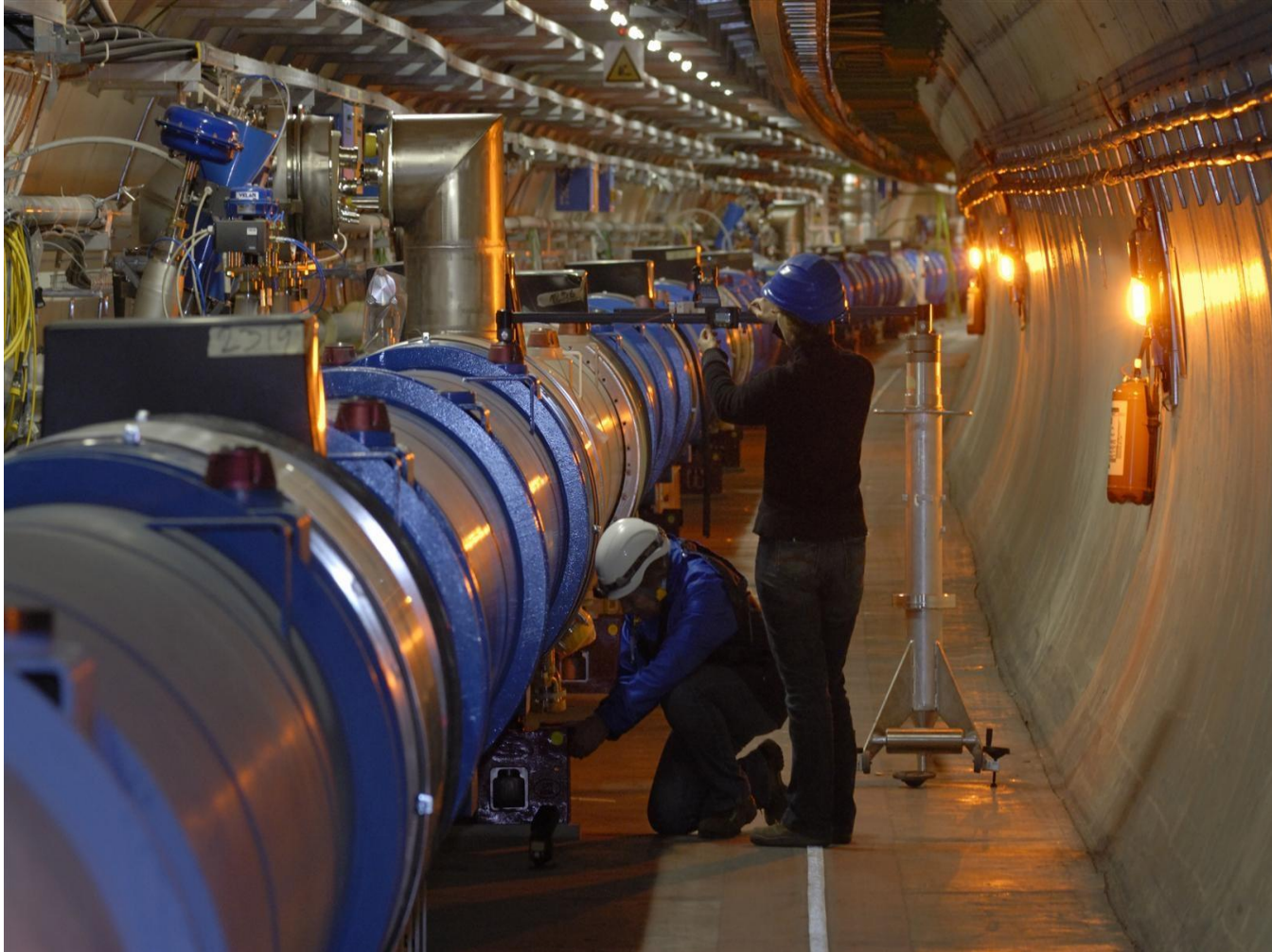
Magneterna måste kalibreras

Strömreglering i magneterna

...

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

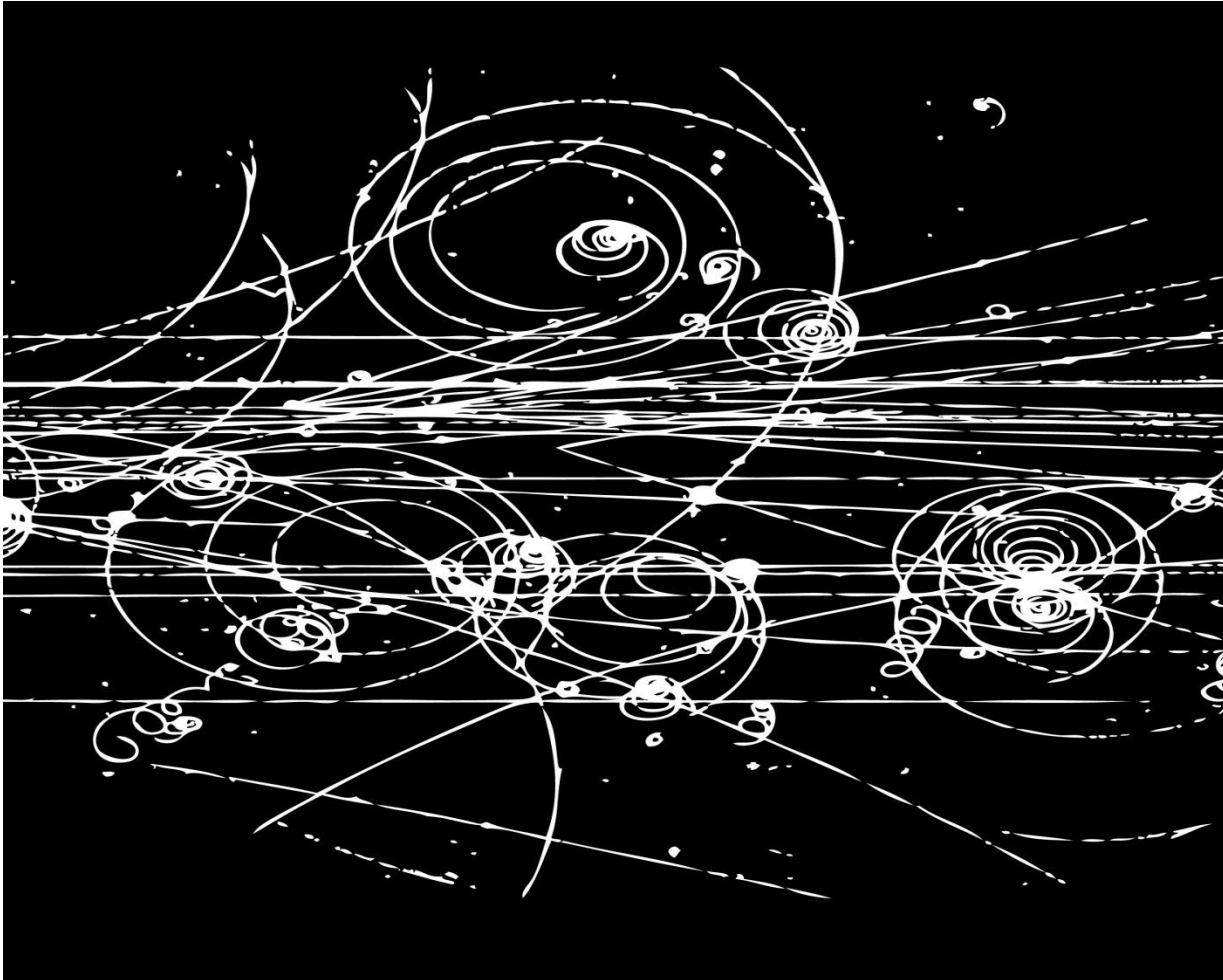
# Problemkällor - korrektion 1959/2007





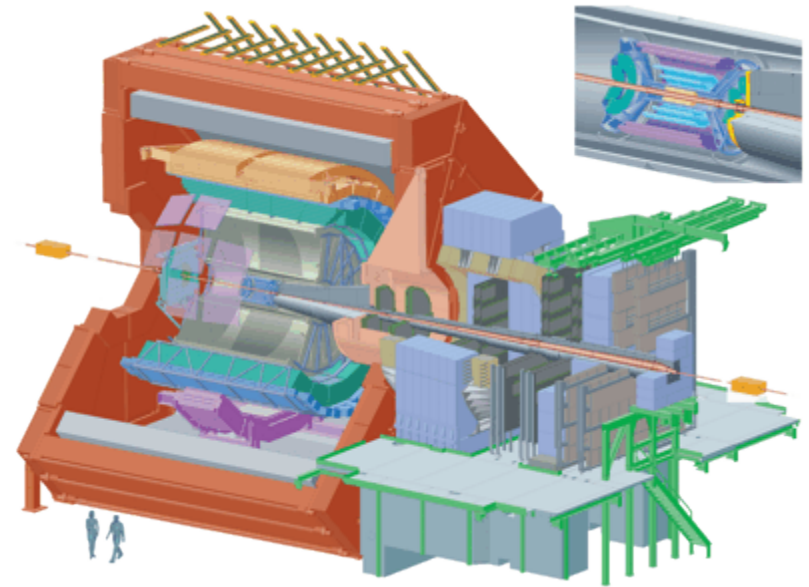
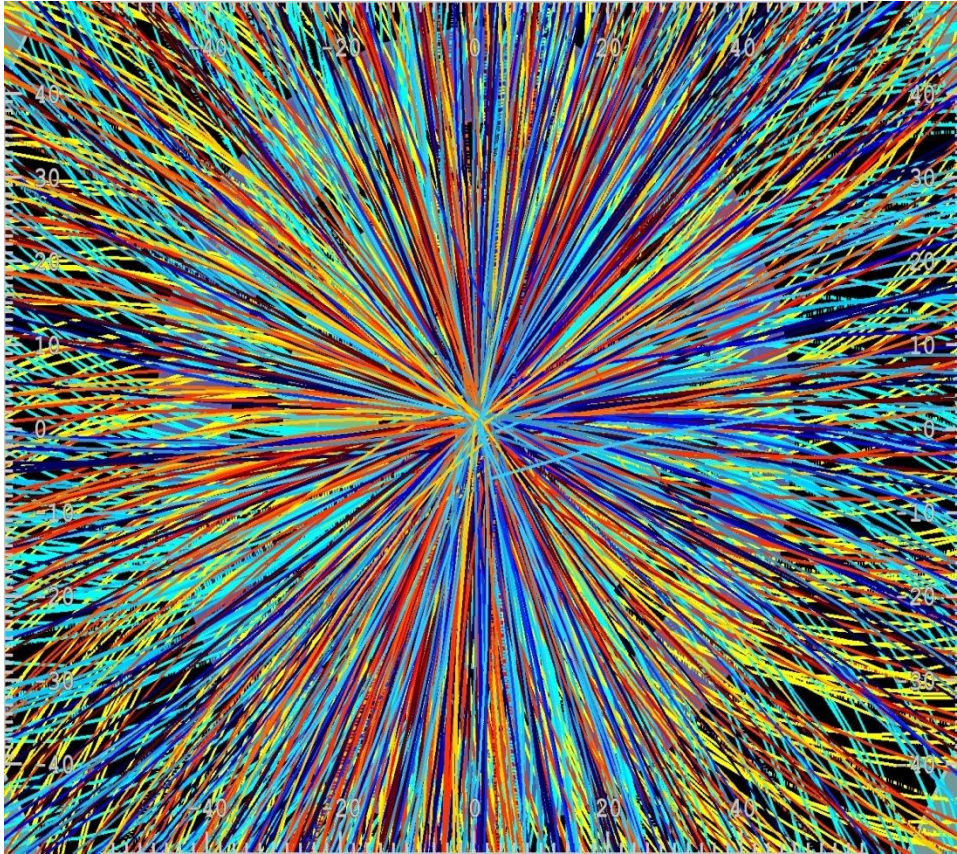
# Kollisioner i går

Bubbelkammaren 30 cm i diameter, fylls med flytande väte



# Kollisioner idag

ALICE@LHC





# Andra användningar av acceleratorer

More than **400 B€** of end products are produced, sterilized, or examined using industrial accelerators annually worldwide.

More than **24 000** particle accelerators have been built globally over the past **60 years** to produce charged particle beams for use in industrial processes. This number does not include the more than **11 000** particle accelerators that have been produced exclusively for medical therapy with electrons, ions, neutrons, or X-rays.

More than **24 000** patients have been treated by hadron therapy in Europe.

More than **75 000** patients have been treated by hadron therapy in the world.

Around **200** accelerators are used for research worldwide, with an estimated yearly consolidated cost of **1 B€**.

The world's largest particle accelerator, the Large Hadron Collider (LHC), is installed in a tunnel **27 km** in circumference, buried 50-175 m below ground.

The temperature of the superconducting magnets in the LHC reaches **-271 °C**. In contrast, the temperature at collision point is 1000 million times hotter than that of the Sun's core.





# CERN - för innovationer, upptäcka, publicera, dela





# Frågor?





# Referenser

- What do we need to understand and optimize the LHC  
O.S. Brüning, 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, 'Particle Accelerators', McGraw-Hill, 1962
  - Mario Conte and William McKay, 'An Introduction to the Physics of Particle Accelerators', World 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.



# Power consumption

As CERN's physics programme has evolved and expanded, physicists at the laboratory have used more powerful accelerators.

At peak consumption, usually from May to mid-December, CERN uses about 200 megawatts of power, which is about a third of the power consumption of a large city.

When the LHC is up and running the total average power for the whole CERN site will peak during July at about 180 MW of which:

- LHC cryogenics 27.5 MW

- LHC experiments 22 MW

If we include the base load for the whole site, the LHC contribution totals around 120 MW. (The number for just the LHC machine is around 100 MW.)

Energy

[Assume 720 hours per month for June, say, - 180 MW gives 130 GWh.]

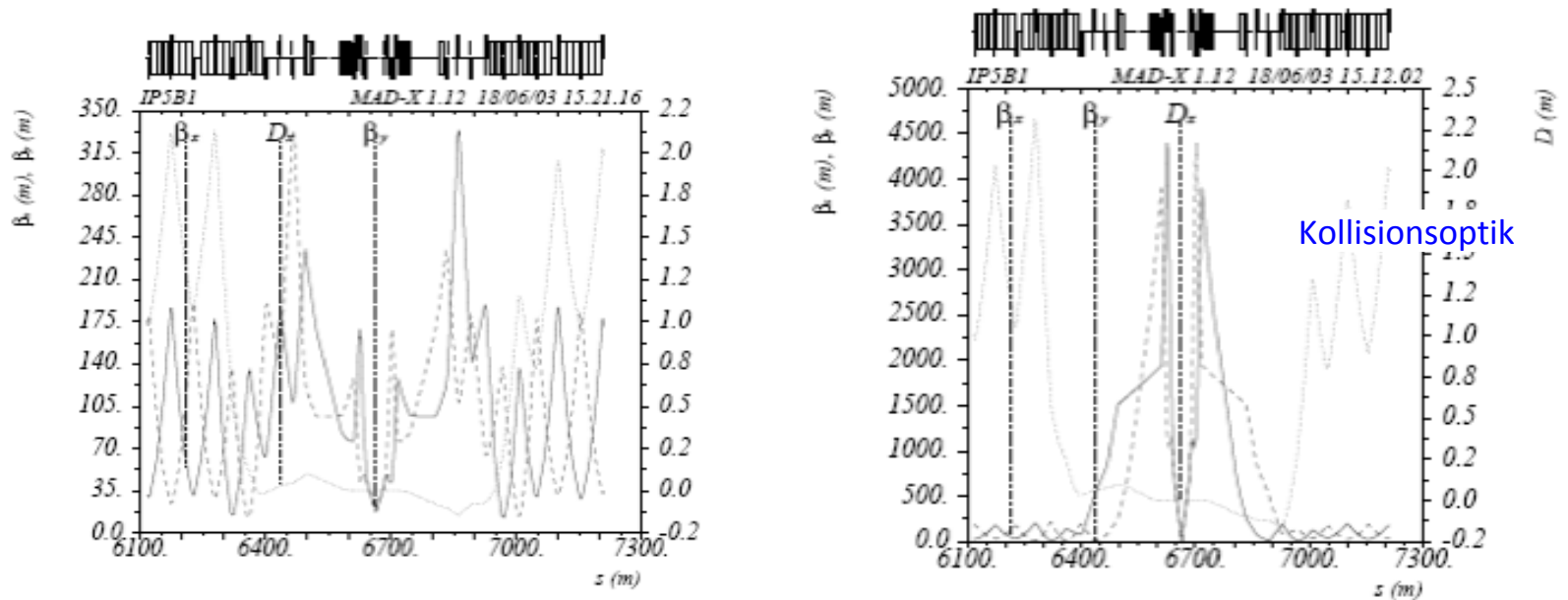
CERN predicted total for the year 2009 with LHC fully operational is around 1000 GWh of which around 700 GWh might be accounted for by the LHC.

The canton of Geneva uses 41 PJ/year (heating, transport, electricity) i.e. around 11.4 TWh, so CERN comes in at less than 1% of the total.



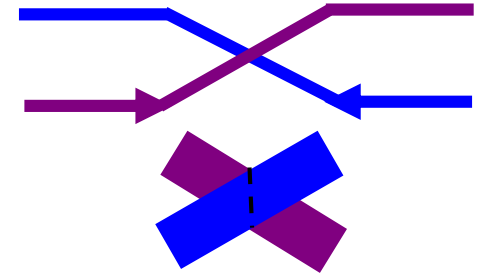
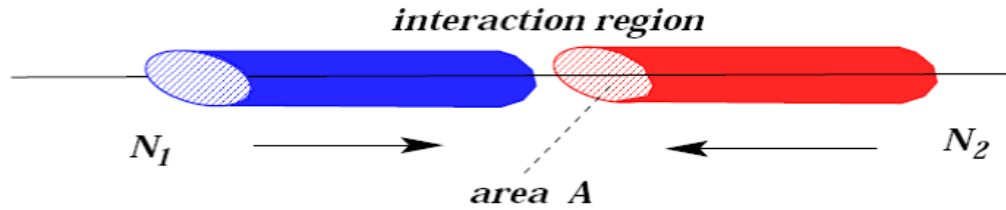
# Fokuseringen runt maskinen karakteriseras av beta funktionen

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





# Luminositet – vad som intresserar experimental fysikern



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

$$A = \pi \epsilon \beta *$$

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

Antal partiklar per grupp (två strålar)

Antal partikelgrupper i varje stråle

Omloppsfrekvensen

Formfaktor för vinkeln mellan strålarna ("crossing angle")

Emittans

Optisk beta funktion

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