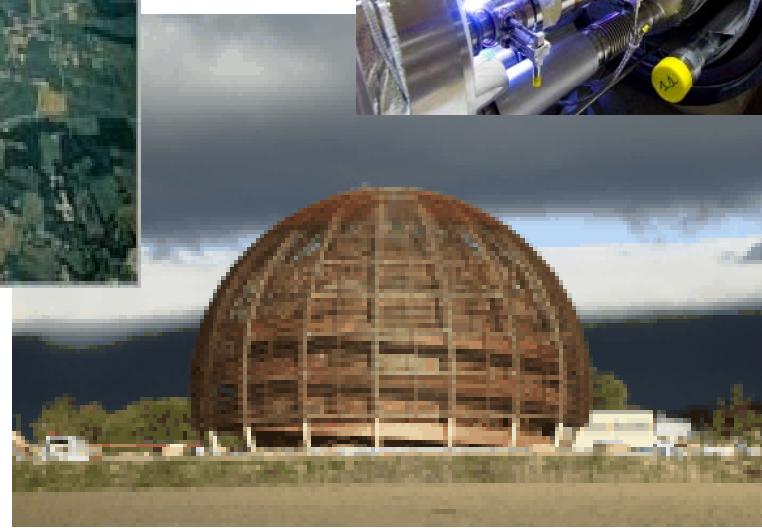
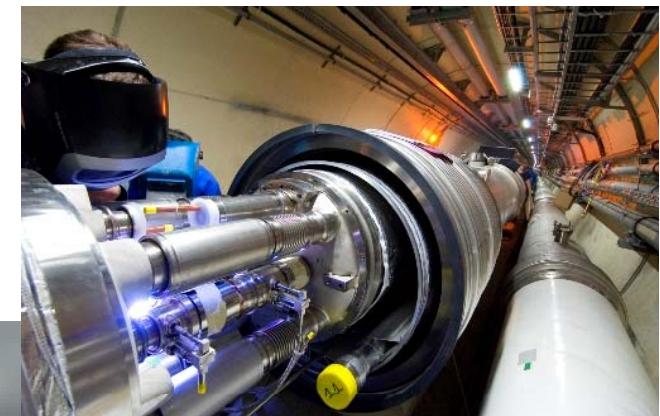


Acceleratorfysik, Introduktion

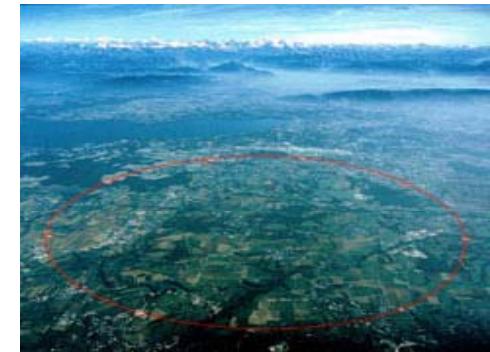
Olav Berrig (Beam physics group)



Baseret på Elena Wildners presentation - Oktober 2006.

Indholds fortægnelse

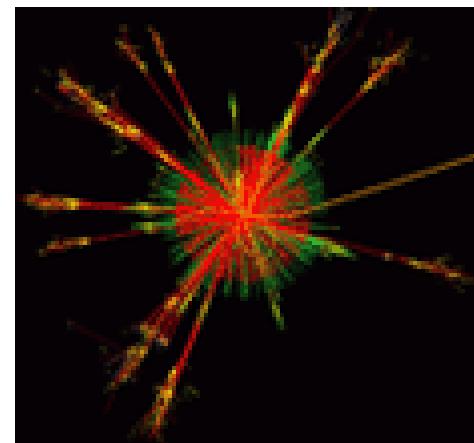
1. INDLEDNING
2. RELATIVITET I DAGLIGDAGEN
3. PARTIKEL KILDER OG ACCELERATION
4. SYNCHROTRONER
 1. Acceleration
 2. Kræfter som virker på partiklerne
 3. Styring
5. EXPERIMENTER
 1. "Targets", "Colliders"
 2. Luminositet
6. ACCELERATORTEKNOLOGI
 1. Vakuum
 2. Superledende magneter
7. EKSEMPEL: LHC
8. REFERENCER



© Copyright CERN

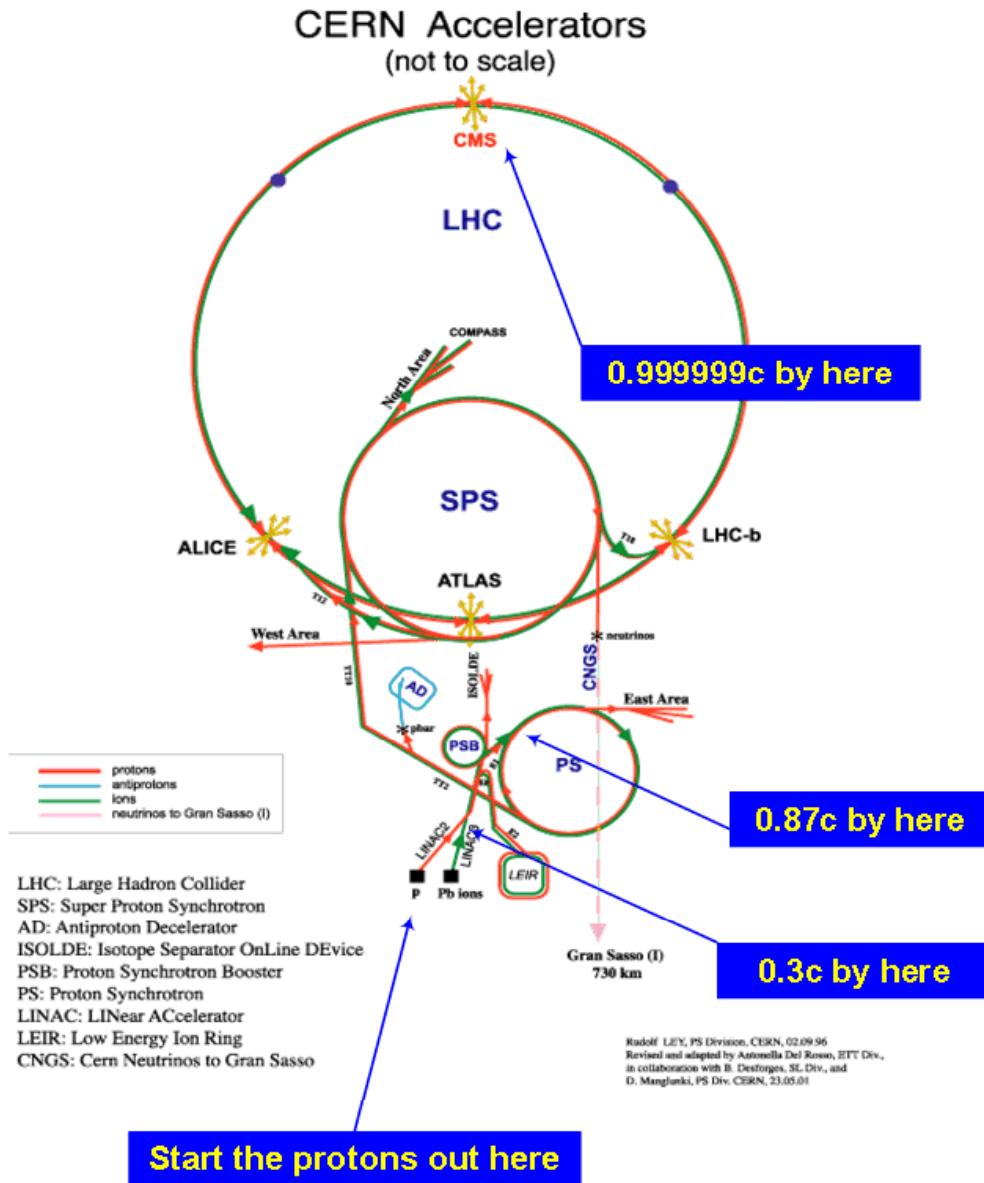
Hvor bruger man acceleratører?

- I gamle TV'er: Katodestrålerør
- Materialefysik
 - Fotoner fra elektroner
(=synkrotron stråling)
- Medicin
 - Røntgen, synkrotron stråling
 - Protoner og ioner
 - Radioaktive stoffer til diagnose:
Positron Emission Tomography (PET)
- Fysik



INDLEDNING

Acceleratorer på CERN



Energier:

Linac 50 MeV

PSB 1.4 GeV

PS 28 GeV

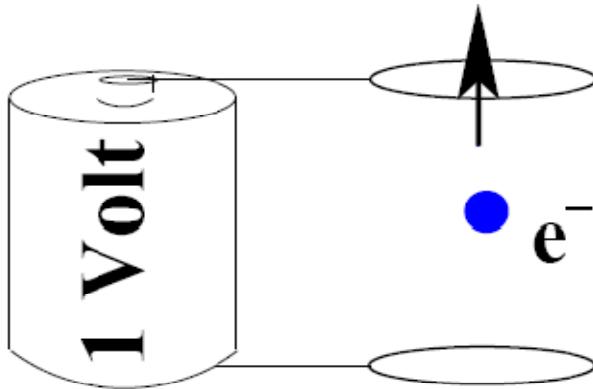
SPS 450 GeV

LHC 7 TeV

Enheder?

ACCELERATORKÆDEN

Enheder: ElektronVolt



Elektronvolt, energienhed med betegnelsen eV, anvendes som enhed for små energier (joule)

Acceleration

1 eV er mængden af kinetisk energi en elektron ($e \sim 1.602 \cdot 10^{-19} C$) vinder ved at blive accelereret gennem en elektrostatisk potentialforskel på én volt:

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

Indenfor partikelfysik anvendes elektronvolt også som enhed for masse, eftersom masse og energi er tæt knyttet via formlen:

$$E = mc^2, \quad m = \gamma m_0$$

m er partiklens masse og c lysets hastighed i vakuum.

Hvilemassen for en elektron er cirka $9.1091 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.5 \text{ MeV}$.

Hvilemassen for en proton er cirka $1.67252 \times 10^{-27} \text{ kg} = 0.93826 \text{ GeV}$

Total energi

Når partiklerne accelereres til hastigheder (v) som nærmer sig lysets (c):

vi må ta' hensyn til relativistiske effekter

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}; \quad \beta = v/c$$

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

Total energi

Hvile masse

Relativitet

ACCELERATORKÆDEN

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \gamma \cdot m_0$$

Massen af partiklen
bliver større - set fra
"laboratory frame"

$$\Delta L = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot \Delta L_0 = \frac{\Delta L_0}{\gamma}$$

Længden af et bundt
partikler bliver mindre -
set fra "laboratory frame"

$$\Delta t = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\gamma}$$

Tiden går langsommere -
set fra "laboratory frame"

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt}$$

$$F \approx m \cdot a^2 \leftarrow \text{Approximation}$$

$$E = m \cdot c^2 \quad \wedge \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \Rightarrow E \cong m_0 \cdot c^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

Hvordan ser vi relativistiske effekter i dagligdagen?

1. Beamen bliver mindre
2. Partiklernes hastighed overstiger aldrig lysets hastighed
3. Bøjnings vinklen af en magnet er en function af partiklernes bevægelsesmængde (og ikke af partiklernes hastighed)

Pythagoras for energier: $E^2 = E_0^2 + (P \cdot c)^2 \Leftrightarrow$
 $E^2 = (m_0 \cdot c)^2 + (P \cdot c)^2$

Da normalt $E \gg E_0$: $E \approx P \cdot c$ eller $P \approx \frac{E}{c}$

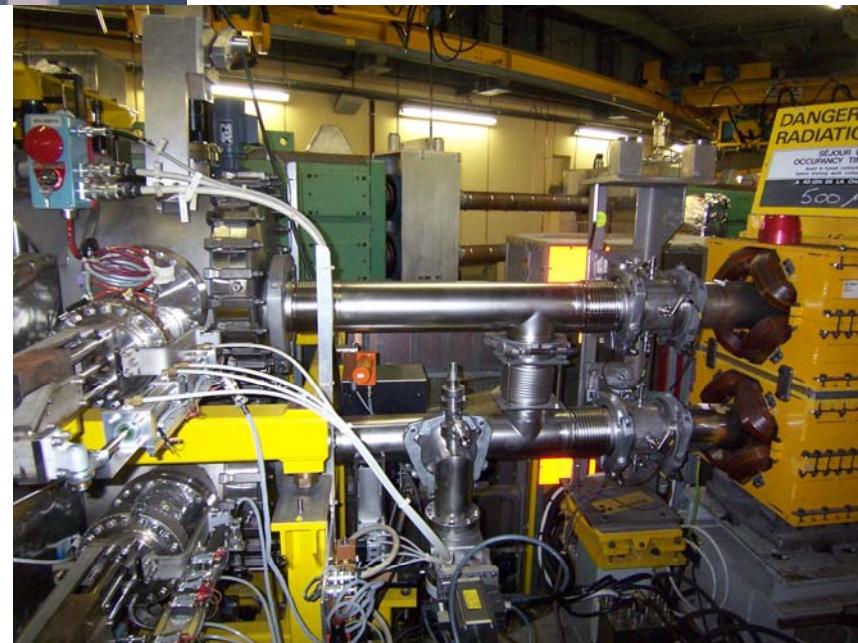
Enheden for bevægelsesmængde: GeV/c

ACCELERATORKÆDEN

Relativitet



**“beam line” fra
BOOSTER til PS**

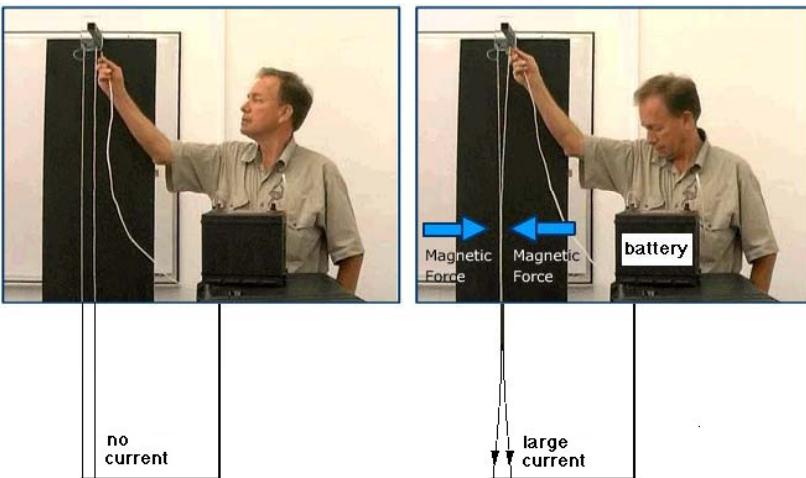


Beamen (=strålen) bliver tyndere når dens energi bliver højere. Et eksempel på “relativitet i aktion”

**LHC beam pipe
(450 GeV – 7 TeV)**

ACCELERATORKÆDEN

Relativitet



Samme princip som når to parallel ledninger tiltrækker hinanden og strømmen går i samme retning:
http://ocw.mit.edu/ans7870/8/8.02T/f04/visualizations/magnetostatics/14-SeriesWires/Series_640.mpg

Laboratory frame:

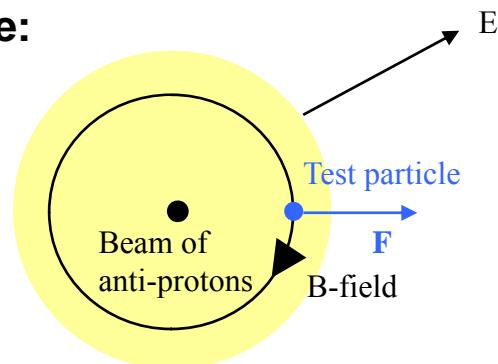
$$\overline{F} = q \cdot (\overline{E} + \overline{v} \times \overline{B})$$

$$\oint \epsilon_0 E \, dA = Q_{\text{inclosed}} (= \rho \pi r^2)$$

$$\oint H \, dl = I_{\text{inclosed}} (= \rho \pi r^2 v)$$

$$B = \mu_0 \cdot H, \quad c^2 \epsilon_0 \mu_0 = 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \rho = \text{charge density}$$

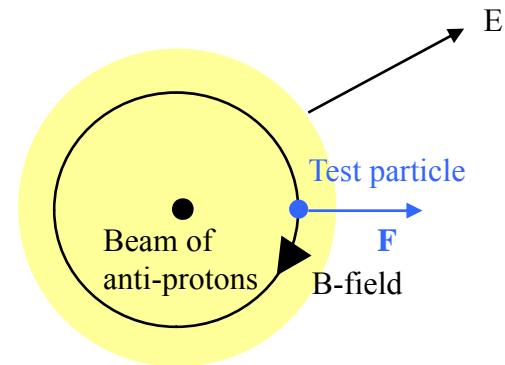
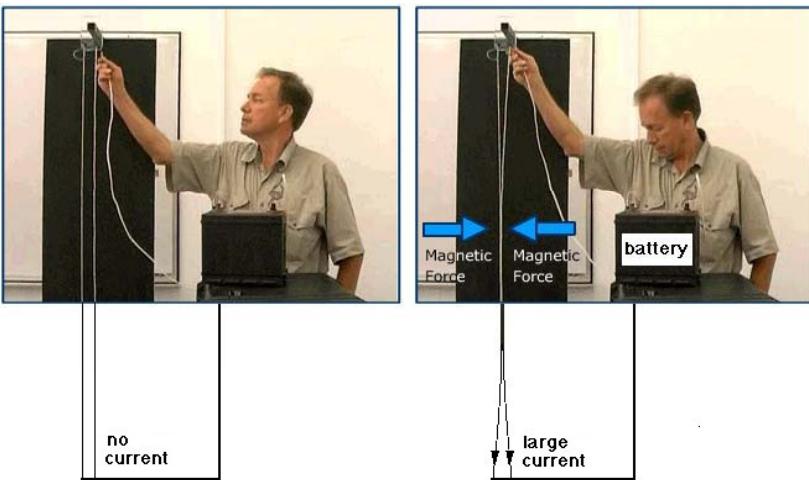


“The anti-protons go outwards and the current goes inwards”

$$F = \frac{q \cdot r \cdot \rho}{2 \cdot \epsilon_0} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \frac{q \cdot r \cdot \rho}{2 \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{\gamma^2}$$

ACCELERATORKÆDEN

Relativitet



Moving frame:

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}^* &= q \cdot \bar{E}^* = q \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{\rho^* \pi (r^*)^2}{2\pi r^*} \right) \\ r^* &= r, \quad \rho^* = \frac{1}{\gamma} \cdot \rho \\ \bar{F} &= \frac{d\bar{P}}{dt} = \frac{d\bar{P}^*}{\gamma \cdot dt^*} = \frac{1}{\gamma} \cdot \bar{F}^* \end{aligned} \right\}$$

Der er ikke noget magnet-felt set fra test partiklens reference system

$$F = \frac{q \cdot r \cdot \rho}{2 \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{\gamma^2}$$

Relativitet

ACCELERATORKÆDEN

RF frekvensen ændre sig (stort set) ikke med
stigende energi (over en vis energi).

Dvs. at partiklernes hastighed ændre sig ikke!

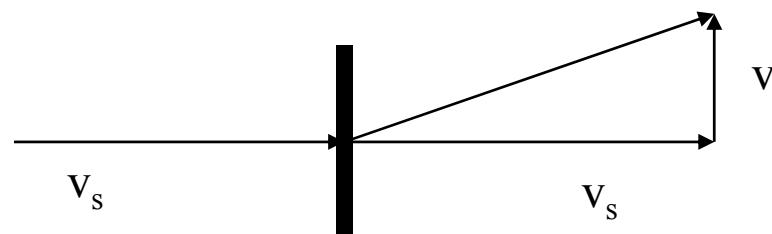
Et eksempel på relativitet

Vinklen som en partikel har når den har passeret en bøje magnet, afhænger af partiklens bevægelsesmasse (og ikke af dens hastighed; ved høj energi er hastigheden - stort set - konstant).

Dvs. at massen stiger med stigende hastighed

Et eksempel på relativitet

$$\frac{dx}{ds} = \frac{v_x}{v_s} = \frac{v_x \cdot m}{v_s \cdot m} = \frac{P_t}{P} = \frac{F_t \cdot dt}{P} \cong \frac{e \cdot v \cdot B \cdot dt}{P} = \frac{e \cdot \frac{dl}{dt} \cdot B \cdot dt}{P} = \frac{e \cdot \Delta l \cdot B}{P} = \frac{\Delta l \cdot B}{\frac{P}{e}}$$

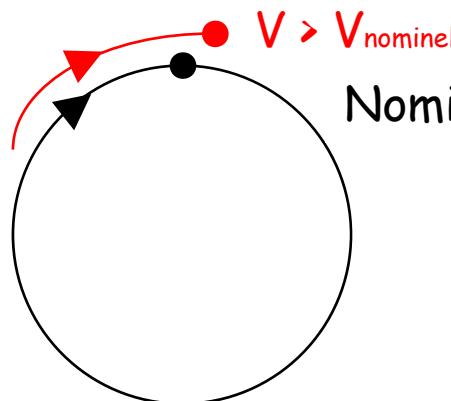


P/e = "Magnetic rigidity"

ACCELERATORKÆDEN

Relativitet

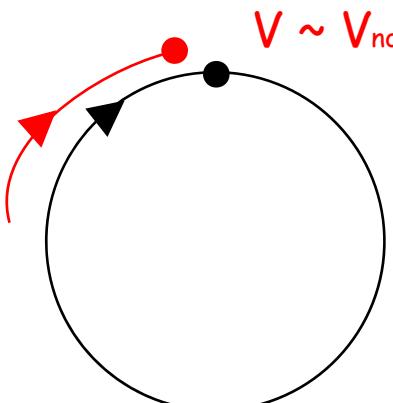
Når partiklernes nominelle energi er mindre end "the gamma transition energy", så vil en partikel med **større energi** end den nominelle have højere hastighed og have en hurtigere omløbshastighed.



$V > V_{\text{nominel}}$
Nominelle energi < "gamma transition energy"

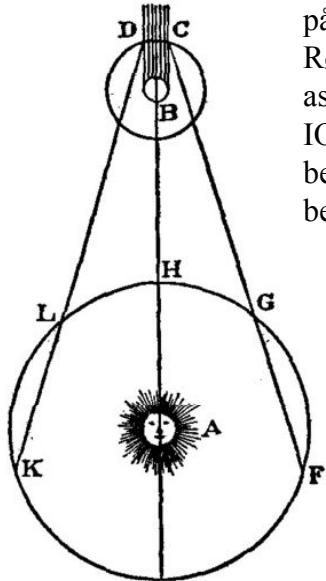
Et eksempel på relativitet

Når partiklernes nominelle energi er større end "the gamma transition energy", så vil en partikel med **større energi** end den nominelle have stort set samme hastighed som de andre, men da den har en større radius vil den have en langsommere omløbshastighed.

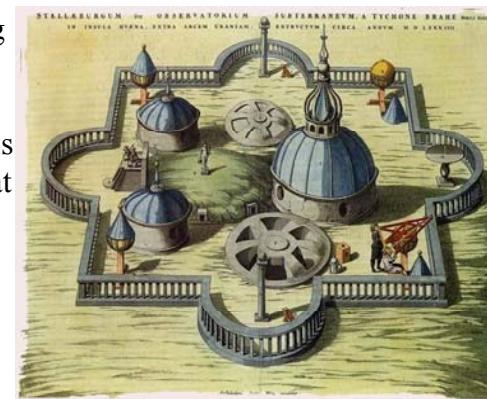


$V \sim V_{\text{nominel}}$
Nominelle energi > "gamma transition energy"

Ole Rømer måler - som den første - at lyset har en hastighed! Basis for relativitets teorien



Ole Rømer målte – i 1671 på Uranienborg (Stjerneborg) på øen Hven - omløbstiden på Io (en af Jupiters måner). I 1672 tog Rømer til Paris for at arbejde som Cassinis assistent. Cassini og Rømer observerede at IO's omløbstid var kortere når Jorden bevægede sig mod Jupiter end når Jorden bevægede sig væk fra Jupiter.



- B = Jupiter
- C, D = viser hvor Io træder hhv. ind i og ud af Jupiters skygge
- F,G = Jorden bevæger sig væk fra Jupiter >Io lang omløbstid
- K,L = Jorden bevæger sig hen mod Jupiter >Io kort omløbstid

Solen og Jupiter betragtes i denne sammenhæng som stationære, da Jupiters omløbstid om Solen er ca. 12 år, mens Jordens omløbstid om Solen er et år.

ACCELERATORKÆDEN

Relativitet

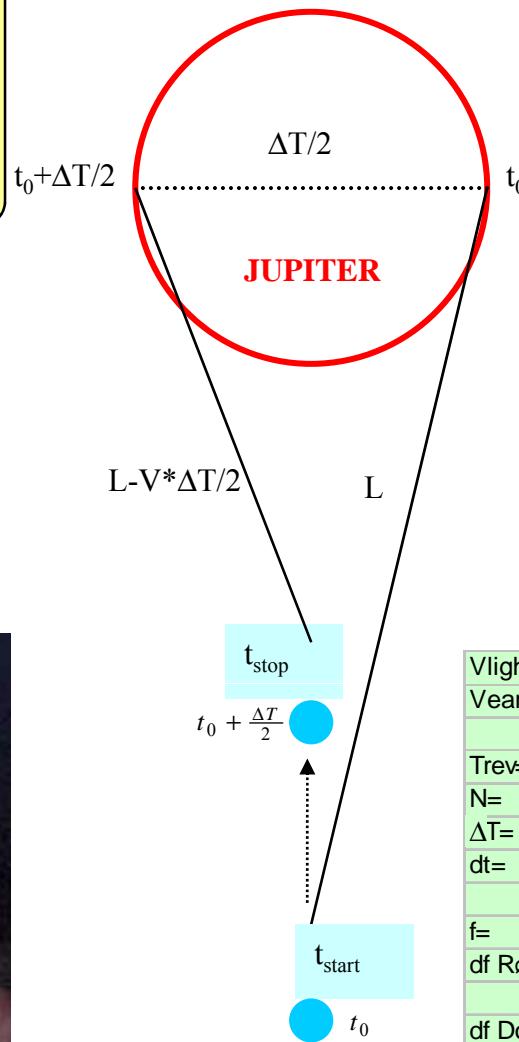
Hvad Rømer opdagede var et eksempel på Doppler effekten. Doppler effekten blev først kendt i 1842.

Rømer konkluderede at lyset havde en endelig hastighed (lyset tøvede).

DOPPLER EFFEKT

$$f_{observer} \cong \frac{1}{2 \cdot (t_{stop} - t_{start})}$$

$$f_{observer} \cong f_{source} + \frac{v_{observer}}{v_{wave}} \cdot f_{source}$$



$$t_{start} = t_0 + \frac{L}{v_{wave} + v_{observer}}$$

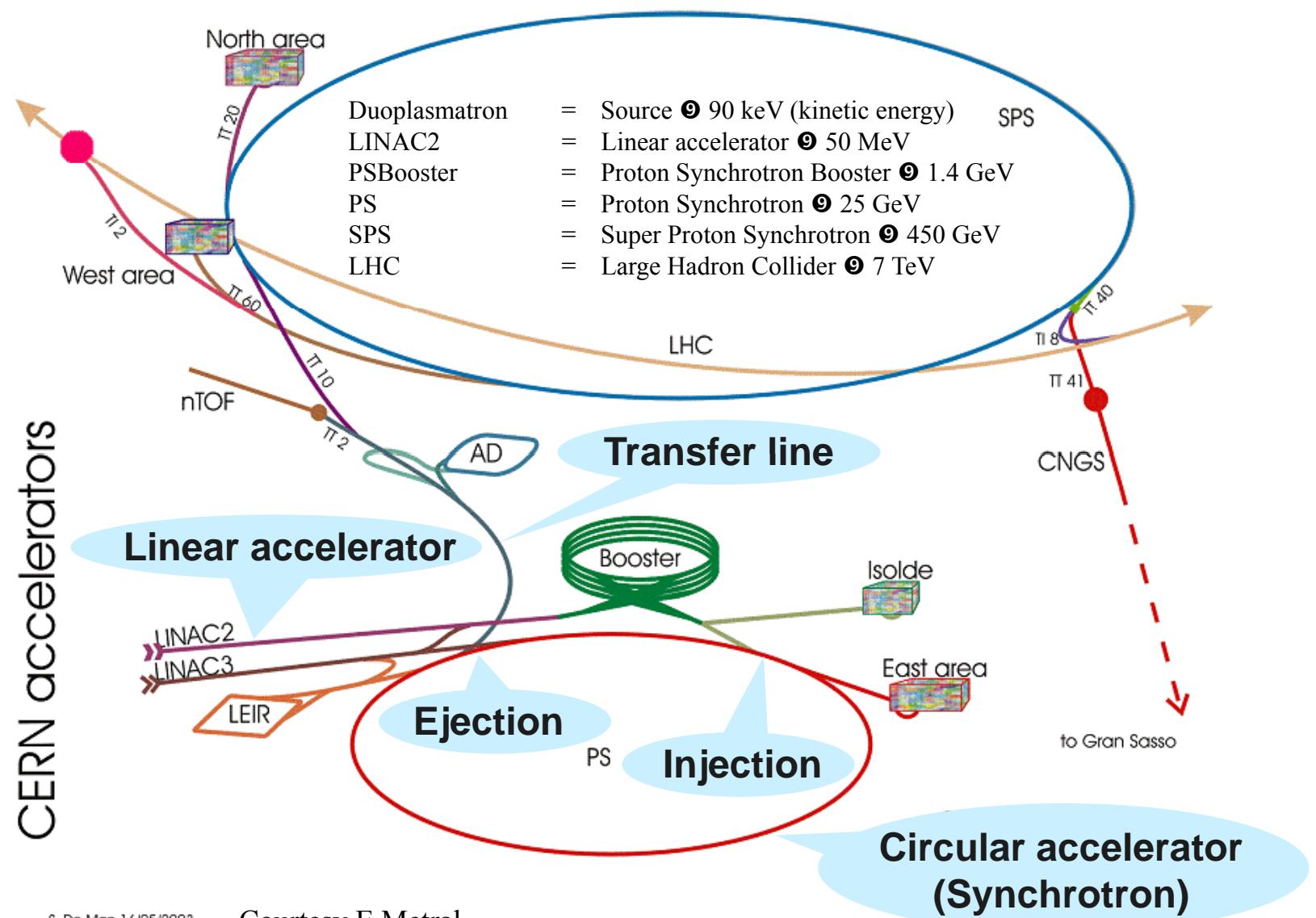
$$t_{stop} = t_0 + \frac{\Delta T}{2} + \frac{L - v_{observer} \frac{\Delta T}{2}}{v_{wave} + v_{observer}}$$

Fyrre omløb af Io — hvert på 42.5 timer — observeret når Jorden bevæger sig mod Jupiter tar 22 minutter kortere tid, end fyrre omløb af Io observeret når Jorden bevæger sig væk fra Jupiter

Vlight=	299792000	m/s (=c)			
Vearth=	29800	m/s			
Trev=	153000	s (=42.5 hours)			
N=	40	(revolutions)			
ΔT=	660	s (22 minutes / 2)			
dt=	16.5	s (=660/40)			
f=	6.54E-06	Hz (=1/Trev)			
df Rømer=	7.0486E-10	Hz (df~ ff*dt, Rømers måling)			
df Doppler=	6.50E-10	Hz (=v/c * f = Doppler formula)			
c(Rømer)=	2.76E+08	m/s (c=f*Vearth=df Rømer)			

Partikel kilder og acceleration

ACCELERATORKÆDEN



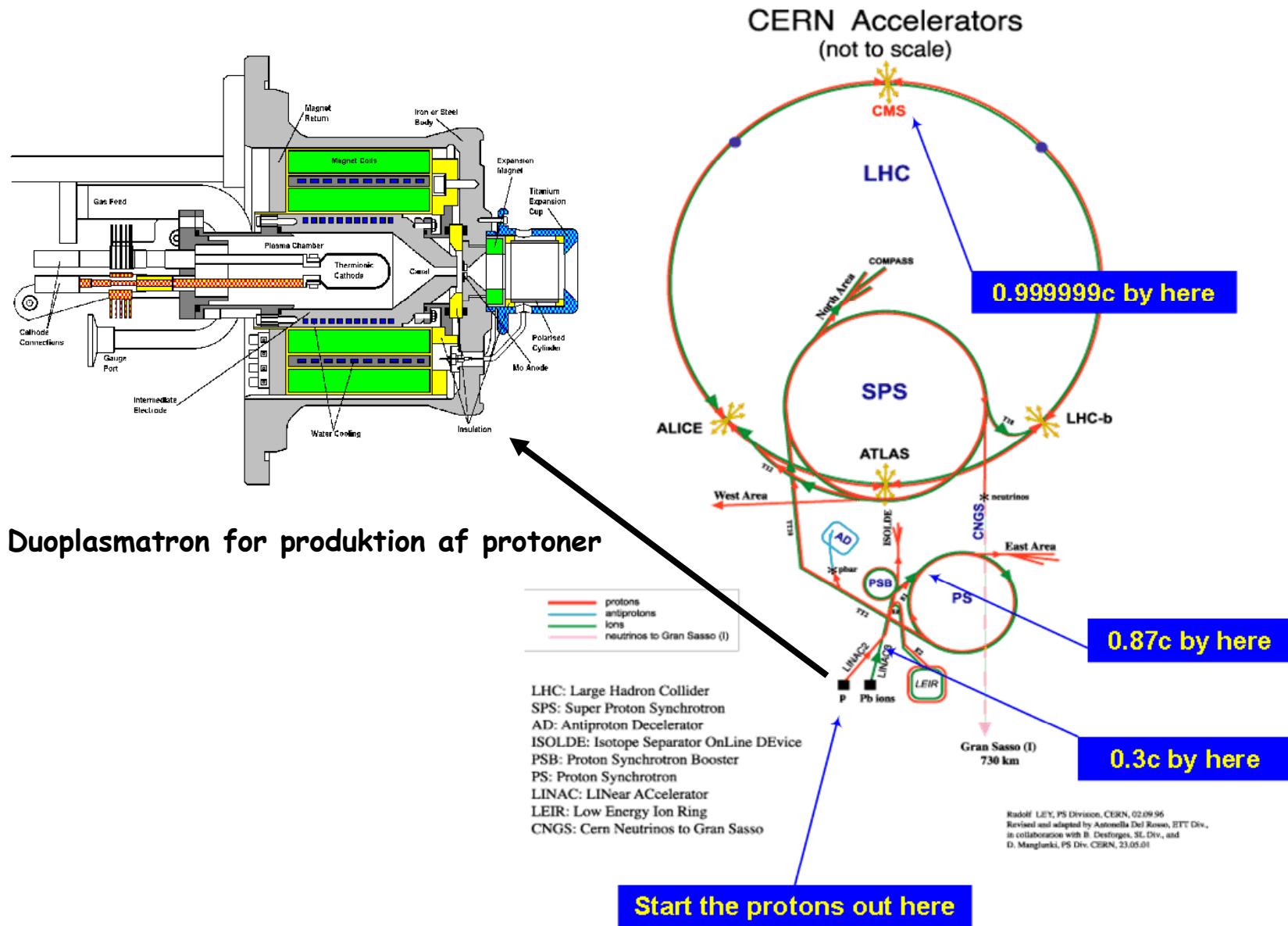
Partikel kilder og acceleration

ACCELERATORKÆDEN

- Naturlig radioaktivitet: alfa partiklar og elektroner. Alfa partikler har en energi på 5 MeV (svarer til hastigheden ~15,000 km/s)
- Partikler kan produceres ved at varme en gas op, så den bliver til et plasma
- Elektrostatiske felter anvendes for den første acceleration lige efter kilden
- Lineære acceleratorer accelererer partiklerne med Radio Frekvens (RF) felter
- Cirkulære acceleratorer anvender RF til acceleration og magnetiske felter til at styre positionen. Protoner accelereres i dag (2008+) til en energi på 7 TeV
- Partiklerne skal være i vakuum (rør eller tanke) for at de ikke skal kolidere med eller forstyrres af andre partikler

Partikel kilder 1

ACCELERATORKÆDEN



Partikel kilder 2

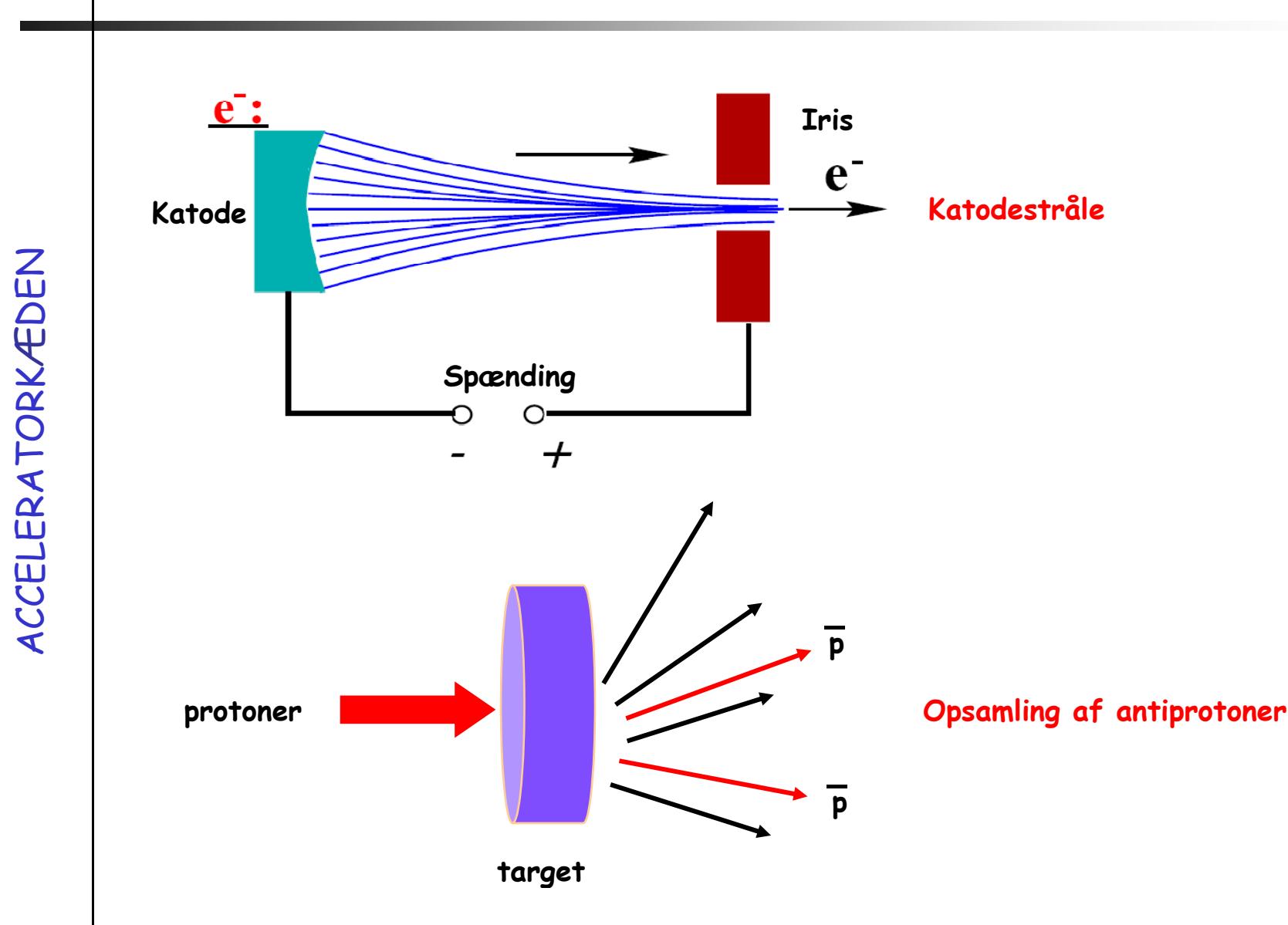
ACCELERATORKÆDEN

Navnet "Duoplasmatron" er et fancy navn for at varme brint-gas H₂ så meget op, at det bliver til et plasma - dvs. En blanding af protoner og elektroner.

I løbet af **et år** bruges en flaske H₂ gas, men mængden af protoner som bliver sendt ud i acceleratorerne er kun 3.3 mg.

Det svarer ca. et sukker krystal

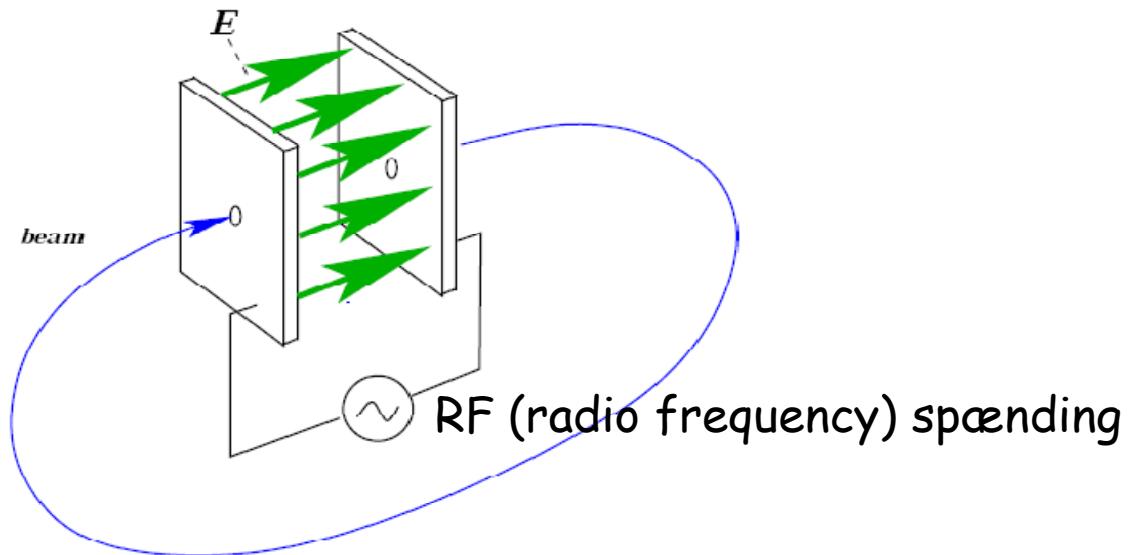
Partikel kilder 3



Tidsvarierende Elektrisk Felt

ACCELERATORKÆDEN

Acceleration cavity

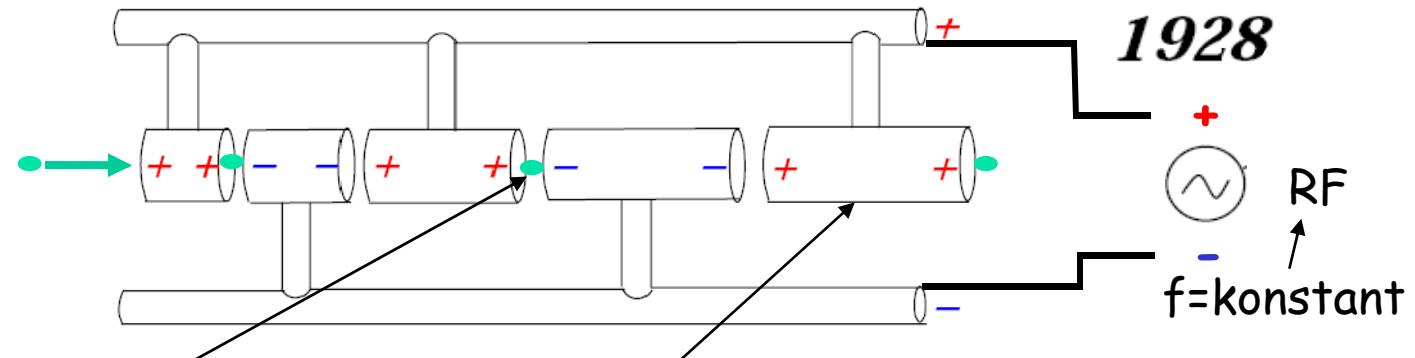


RF frekvensen skal tilpasses omløbstiden

Lineære acceleratorer

ACCELERATORKÆDEN

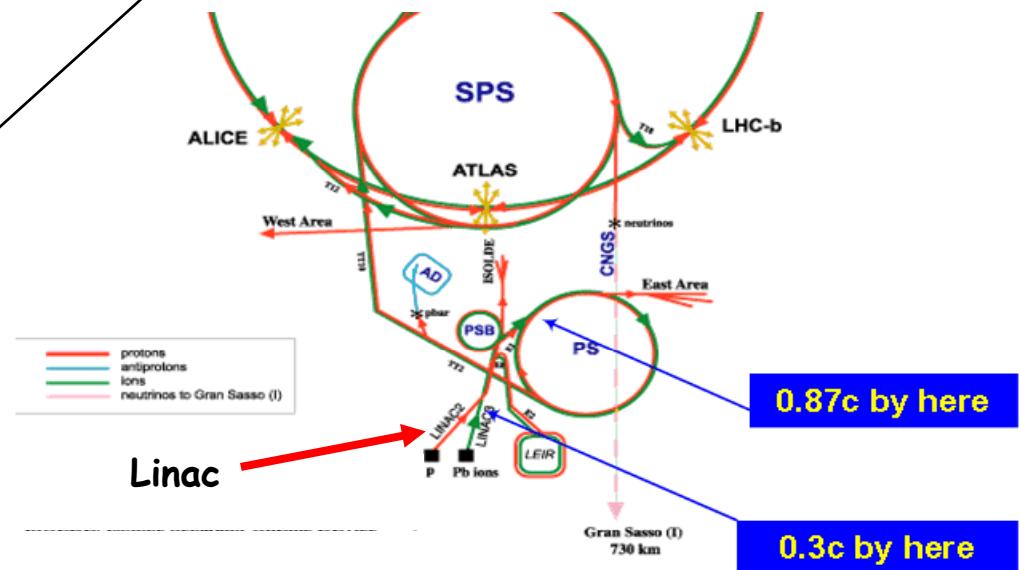
Forenklet Linac



Partiklerne grupperes for at
feltet skal ha' den rette retning
for en gruppe som netop passerer
gabet

Partiklernes hastighed øges, så
derfor øges modulernes længder
også for at være synkroniserede
med feltretningen over gabet

Alvarez: resonanstank



ACCELERATORKÆDEN

Cyklotronen

Centripetalkrafter = -Centrifugalkrafter:

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

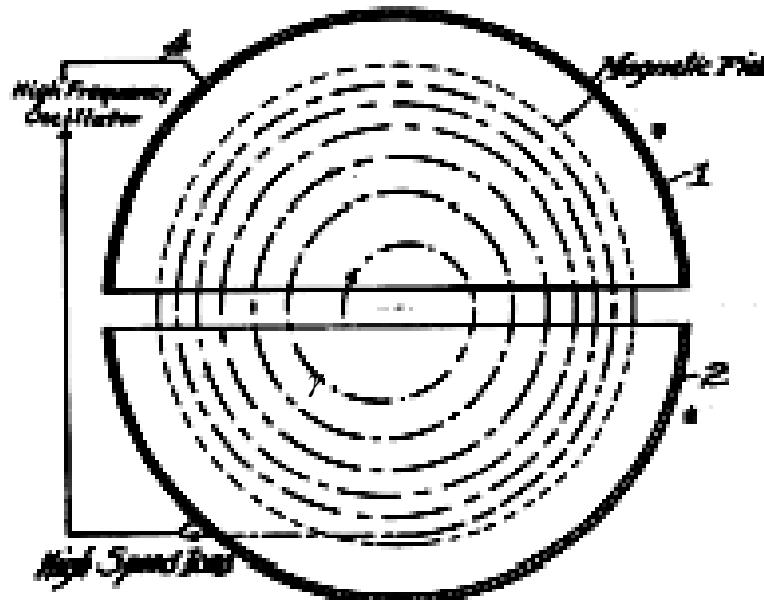
Omskrivning:

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

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

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

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



Cyklotron:

Konstant frekvens.

[massen ~ konstant]

Synkrocyklotron: frekvensen=funktion(massen)

[$m = \gamma m_0$]

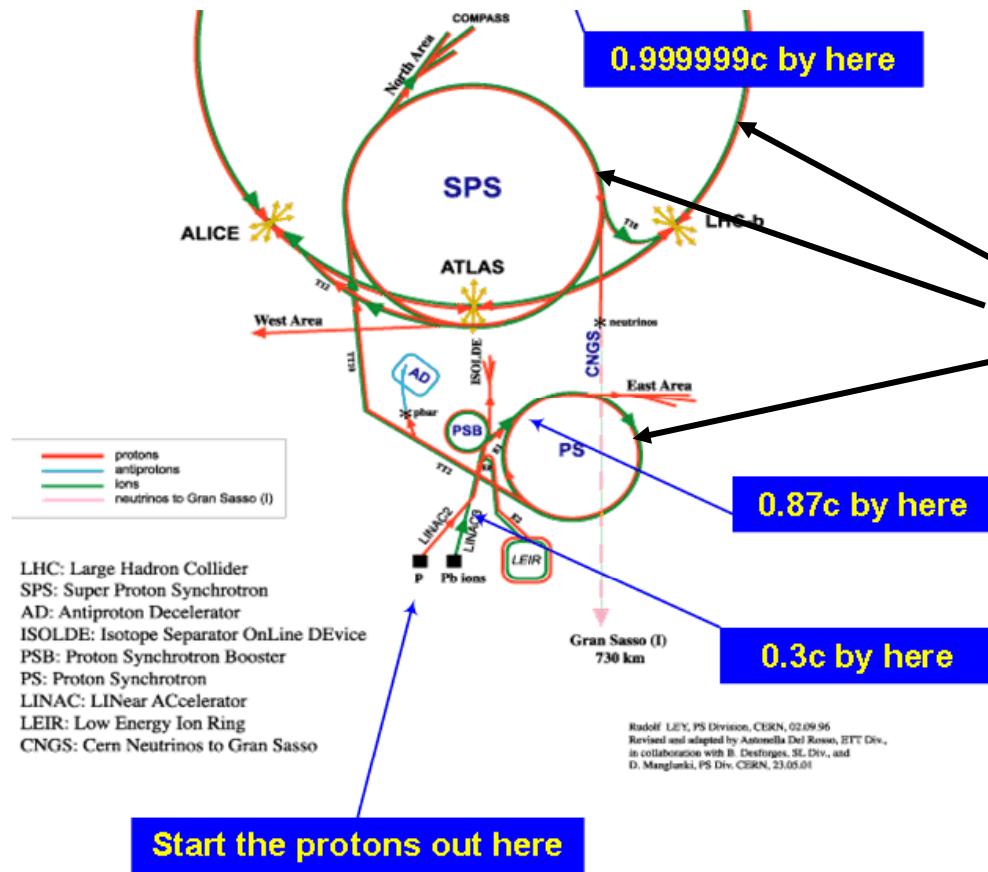
Isokron cyklotron: Konstant frekvens.

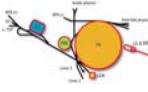
[$B = \text{function}(radius)$]



Synkrotroner på CERN

ACCELERATORKÆDEN



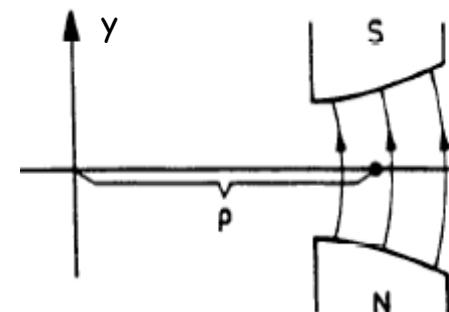
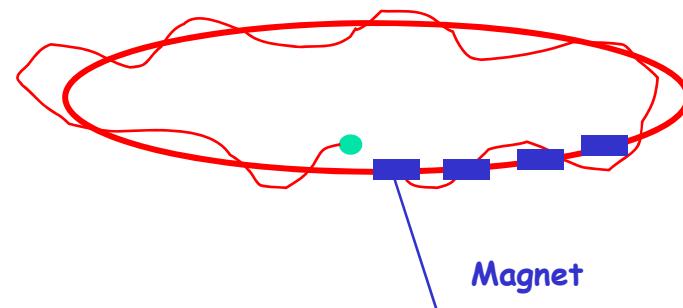
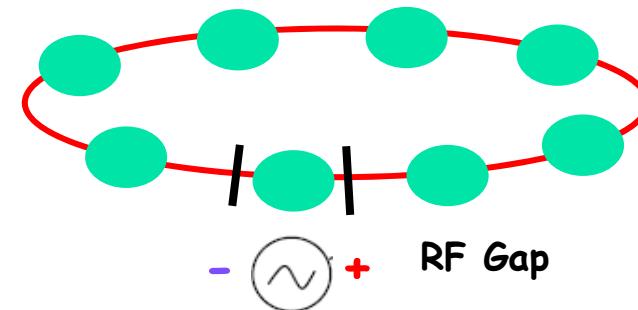
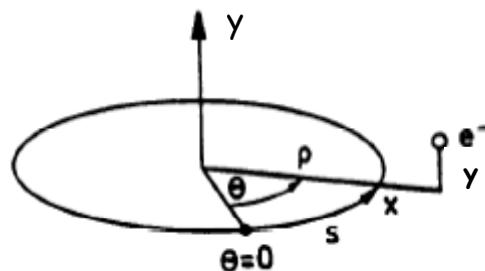


Synkrotronen

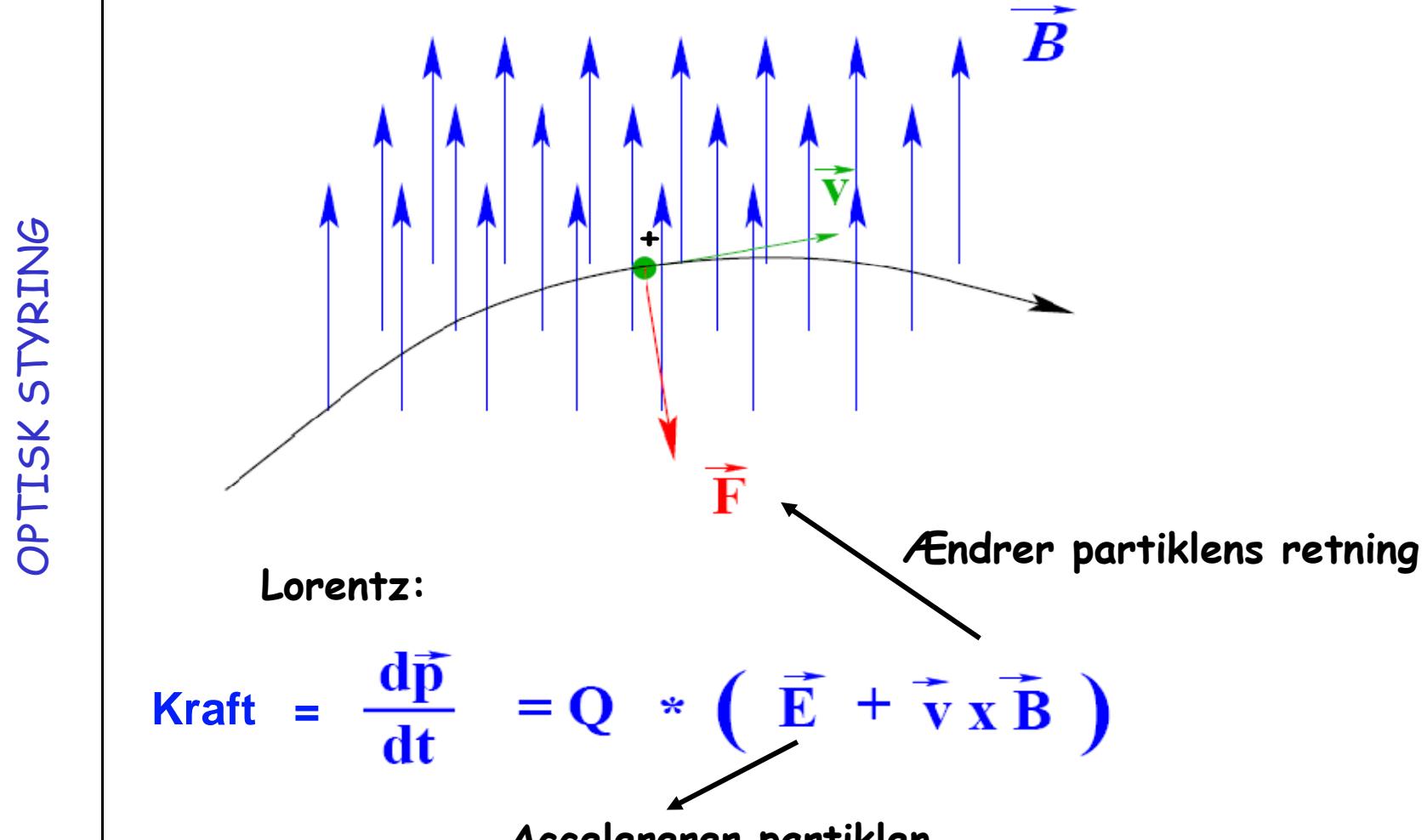
ACCELERATORKÆDEN

Grupper af partikler som cirkulerer synkront med RF feltet i de accelererende kaviteter

Hver partikel cirkulerer rundt i en teoretisk ideel bane rundt i acceleratoren: magnetfeltet og accelerationen skal tilfredsstille stabilitets vilkår



Kræfter som virker på Partiklerne



OPTISK STYRING

Dipolen

Dipolmagnet = bøjemagnet,
bøjer normalt kun i
horizontalplanet (vertikalt felt)

$$F_x = -ev_s B_y$$

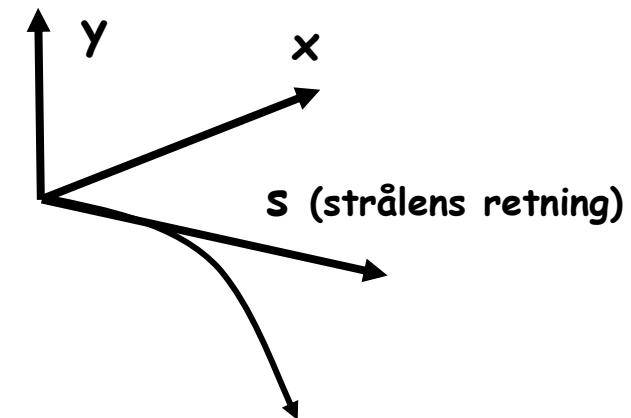
$$F_r = mv_s^2 / \rho$$

$$p = mv_s$$

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

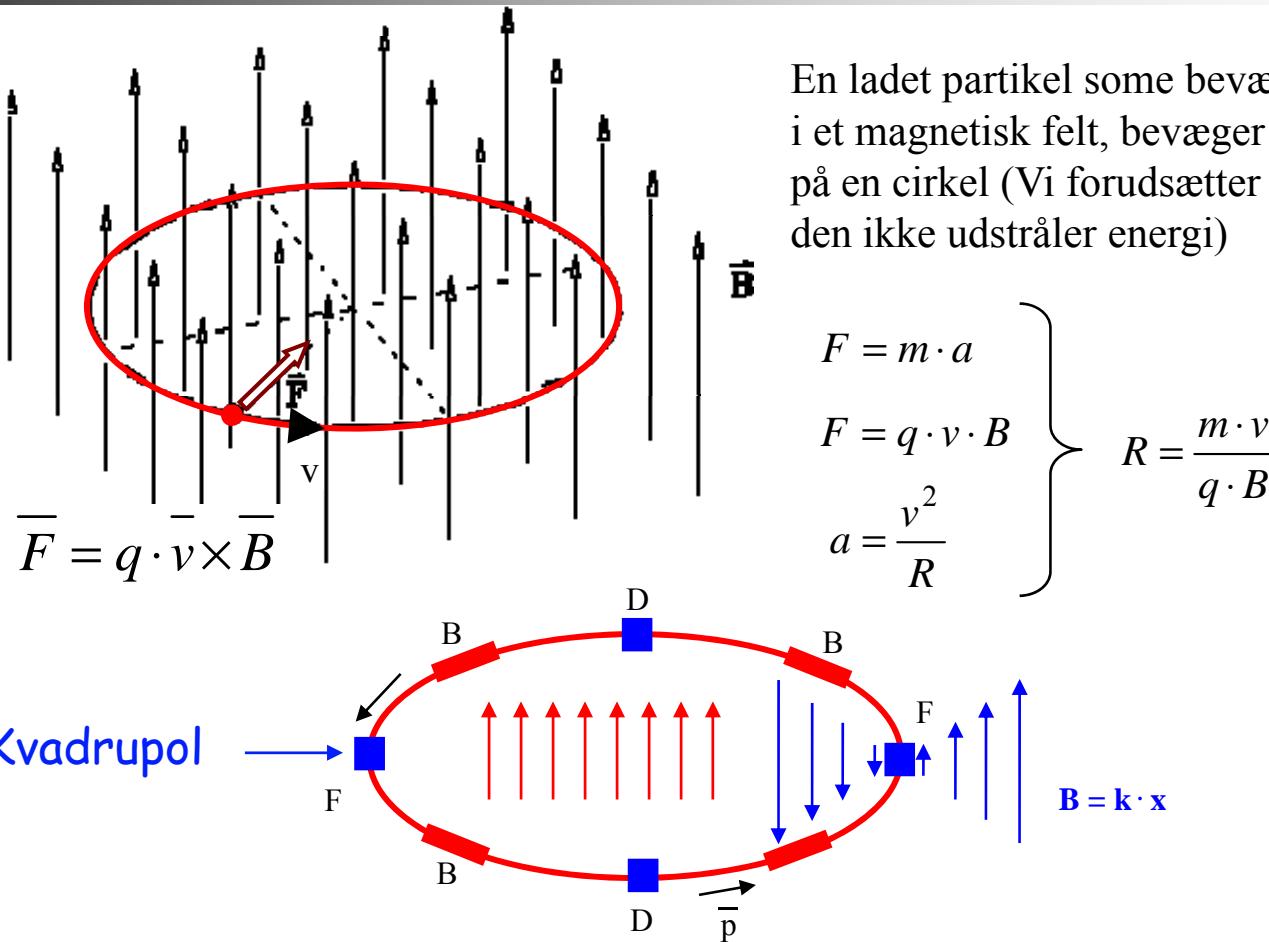
$$B\rho = \frac{p}{e}$$

Magnetisk stivhed
"Magnetic rigidity"



Kvadrupolen

OPTISK STYRING



En ladet partikel somme bevæger i et magnetisk felt, bevæger sig på en cirkel (Vi forudsætter at den ikke udstråler energi)

$$\left. \begin{aligned} F &= m \cdot a \\ F &= q \cdot v \cdot B \\ a &= \frac{v^2}{R} \end{aligned} \right\} R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Magnetfeltet stiger hvis partiklen passere på ydersiden af kvadrupolen, men bliver mindre på indersiden.
Partikler med forskellig energi bevæger sig på en radius, som er tæt på den nominelle radius

However, a quadrupole that is focusing in the x-direction is de-focusing in the y-direction. Luckily, the overall result of a focusing quadrupoles followed by a de-focusing quadrupole, is focusing.

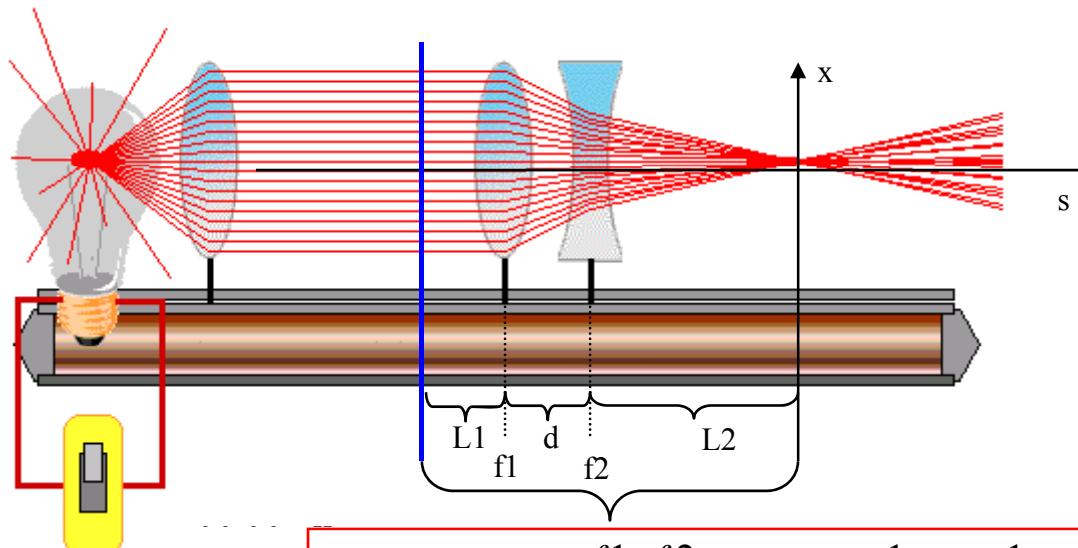
Fokuserings systemet

FOKUSERING

Kombinationen af en fokuserende og en de-fokuserende kvadrupol er fokuserende (under visse betingelser)

- Convex-concave
- Concave-convex

$f_1 \sim$ focal length of focusing quadrupole
 $f_2 \sim$ focal length of de-focusing quadrupole (negative)



$$L_{focus} = \frac{-f_1 \cdot f_2}{d - f_1 - f_2} \quad or \quad \frac{1}{L_{focus}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \cdot f_2}$$

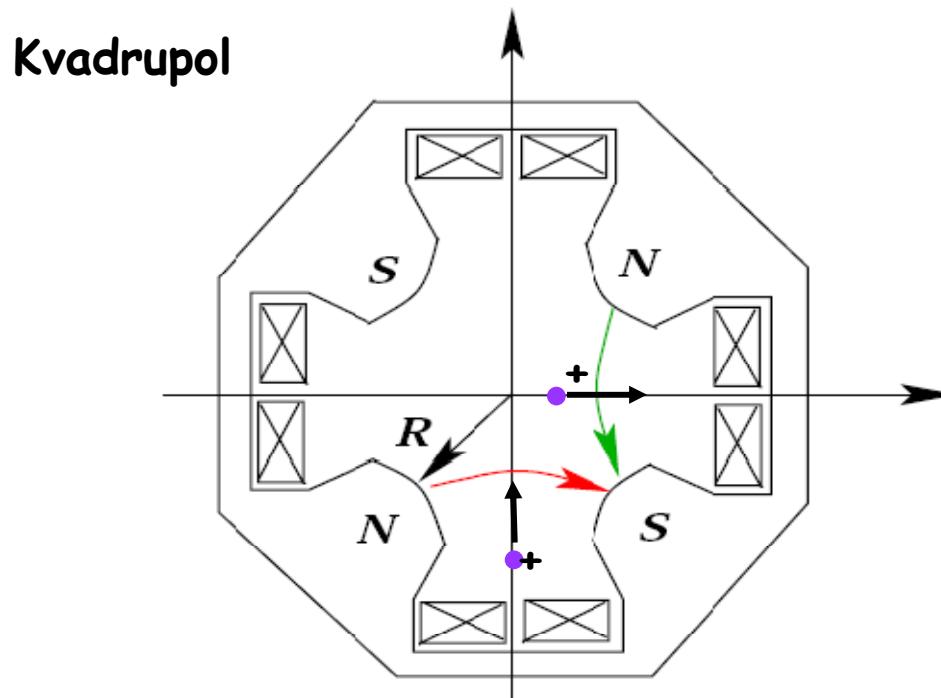
$$L_1 = \frac{d \cdot (f_1 - d)}{d - f_1 - f_2}$$

$$L_2 = \frac{-f_2 \cdot (f_1 - d)}{d - f_1 - f_2}$$

Fokuserings systemet: kvadrupolen

Partiklerne skal fokuseres for at holdes inde i acceleratoren.
Samme princip som i optisk system.

FOKUSERING



Positiv partikel som
bevæger sig imod os:

De-fokuserende i det
horizontale plan;

Fokuserende i det
vertikale plan

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

Vi ses I morgen

ACCELERATORKÆDEN

Spørgsmål og svar

Fokuserings systemet 3

FOKUSERING

Den optiske model for LHC er opbygget af magneter med

”Thin lens approximation”

$$MF = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Fokuserende kvadrupol. (} f_1 \text{ er positiv)}$$

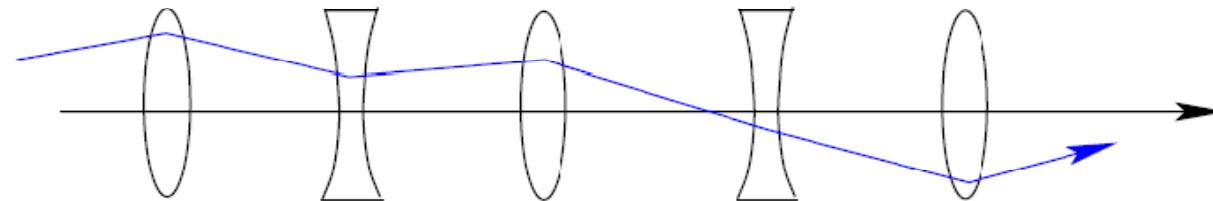
$$MD = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{De-Fokuserende kvadrupol. (} f_2 \text{ er negativ)}$$

$$ML = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Drift længde. (der er ikke nogen magnet)}$$

$$MB = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Bøje magnet. (præcis som en drift længde)}$$

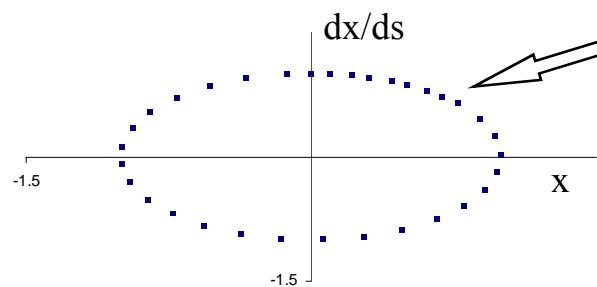
Hældning → $\left(\frac{x_1}{dx/ds_1} \right) = M \cdot \left(\frac{x_0}{dx/ds_0} \right)$ ← Horizontal afvigelse fra nominal position

Fokuserings systemet 1



"Alternate gradient focusing" = synkrotrondesign

FOKUSERING



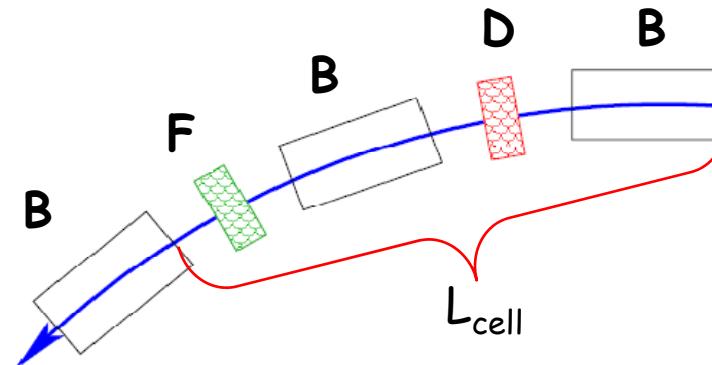
$$\left(\frac{x_1}{ds_1} \right) = M_{CELL} \cdot \left(\frac{x_0}{ds_0} \right)$$

$$M_{CELL} = ML \cdot MF \cdot ML \cdot MB \cdot ML \cdot MD \cdot ML \cdot MB$$

Kriterium for stabilitet:

$$L_{CELL} < 4 \cdot f$$

f = fokuserende længe af både fokuserende og de-fokuserende kvadrupoler





Oscillerende bevægelse

Hvis man giver en partikel et "kick" begynder den at udføre en oscillerende bevægelse, som bedst kan beskrives som en "mutileret" sinus bevægelse:

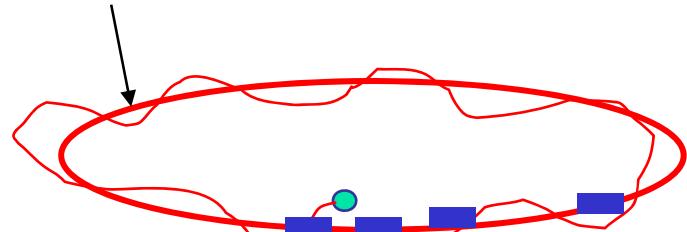
FOKUSERING



$$x(s) = A(s) \cdot \text{SIN}[\text{fase}(s)]$$

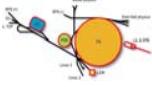
Perfekt sinus, på samme sted:

$$x_n = A \cdot \text{SIN}[2\pi \cdot Q \cdot n + \varphi]$$



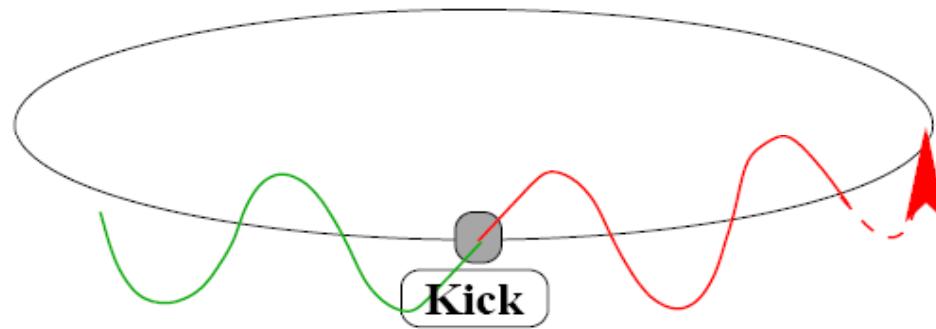
Oscillerende bevægelse med varierende amplitude!

Antallet af oscillationer på en omgang kaldes "tune" og betegnes Q . Q -værdien er forskellig i de to planer (horisontalt og vertikalt plan).



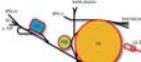
Det er meget svært at vælge en Q værdi

STYRING OG FOKUSERING



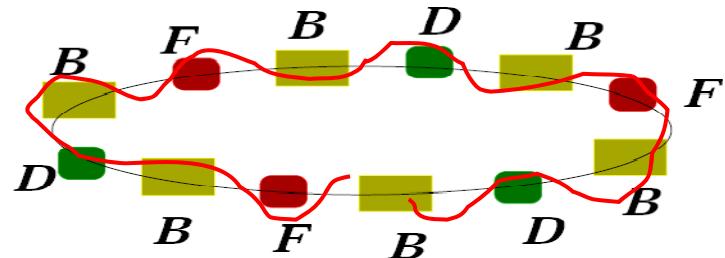
Q-værdien angiver antallet af oscillationer strålen gør per omgang; hvis denne værdi er et heltal så ser strålen samme "magnetfejl" omgang efter omgang og oscillations amplituden stiger proportionelt med antallet af omgange.

Derfor bør Q-værdien ikke være et heltal.



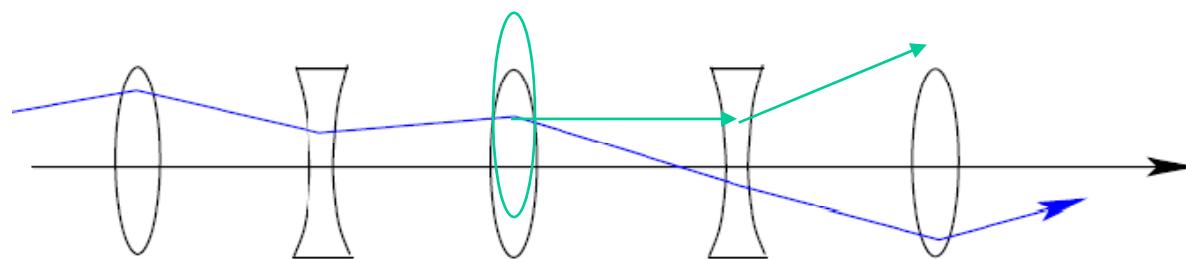
Sluttet strålebane (closed orbit) og magnetfejl

Partiklerne oscillerer teoretisk rundt i en "perfekt" beregnet bane



Magneterne er ikke perfekte, desuden kan de ikke op-linjeres perfekt.

For kvadrupolerne f.eks. betyder disse fejl at kraft ændringen blir for stor eller for lille for at fokusere partiklen ideal. Effekt: afbøjning af strålen.



$$F_x = g \cdot x$$

$$F_y = -g \cdot y$$

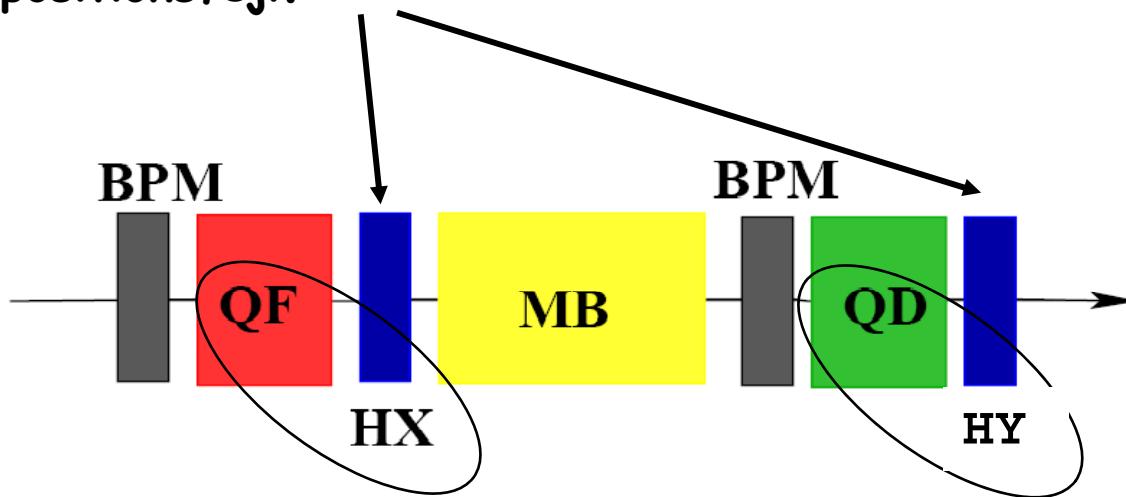


STYRING OG FOKUSERING

Korrektorer

En "Beam Position Monitor" anvendesn for at måle strålens centrum tæt på en kvadrupol. Strålen skal normalt passere gennem kvadrupolens centrum.

Små dipolmagneter anvendes for at korrigere eventuelle positionsfejl.



Andre typer af små magneter anvendes også for at korrigere diverse typer af fejl (ikke perfekt magnetfelt etc.)



STYRING OG FOKUSERING

Problem kilder

Typer af afvigelser som kan indvirke føleligt på stråle kvaliteten.

Bevægelser i jordskorpen

Toge

Månen

Årstider

Bygge arbejde

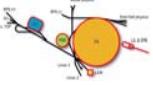
...

Magneterne skal kalibreres

Strømregulering i magneterne

...

Energien hos partiklerne skal svare til magnetfeltets styrke



Problem kilder

I en perfect accelerator(kun dipoler og kvadrupoler), vil partikler med nominel energi, bevæger sig ifølge differential ligningen:

$$\frac{dx^2}{ds^2} + K(s) \cdot x = 0 \quad \text{hvor:} \quad K(s) = K(O + s)$$

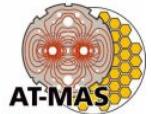
O = Acceleratorens omkreds

I en accelerator med magnetfejl, bevæger partikler med nominel energi sig ifølge differential ligningen:

$$\frac{dx^2}{ds^2} + K(s)x + K1(s) \cdot x^2 + K2(s) \cdot x^3 \dots = 0$$

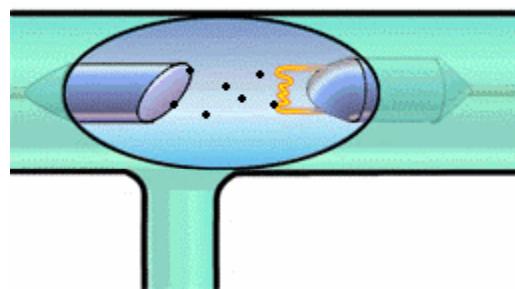
↑

Hvis $K2(s)$ eller $K3(s)$ etc. er forskellig fra nul, vil bevægelsen blive kaotisk for store værdier af x . Det betyder af størrelsen af beamen bliver begrænset - vi kalder det "Dynamic aperture"

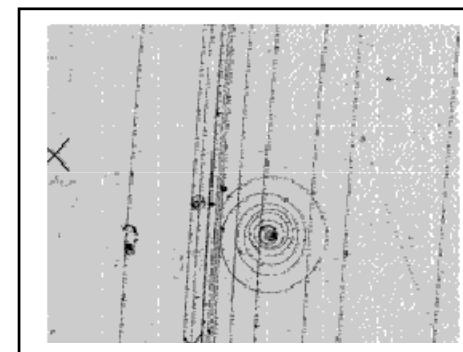


Synkrotron stråling I

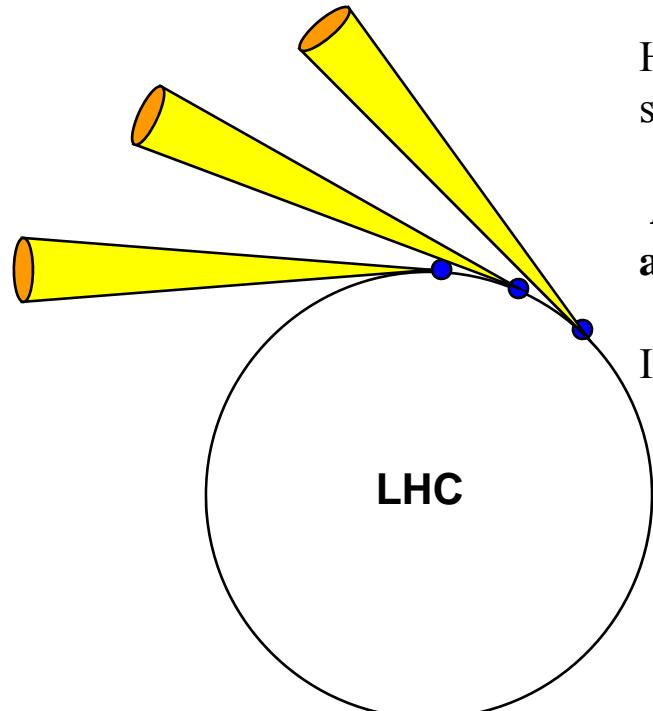
STYRING OG FOKUSERING



Røntgen stråling

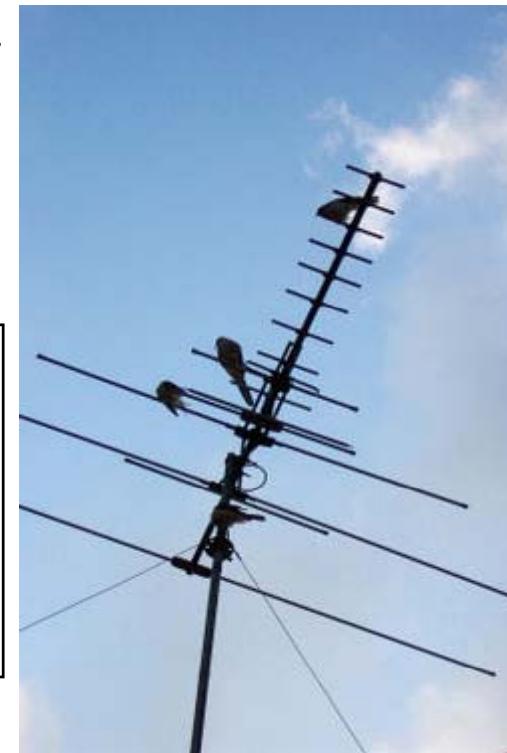


Elektron spiral



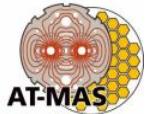
I LHC, variere strålingen fra infrarød til ultraviolet.

Radio og TV
antennær



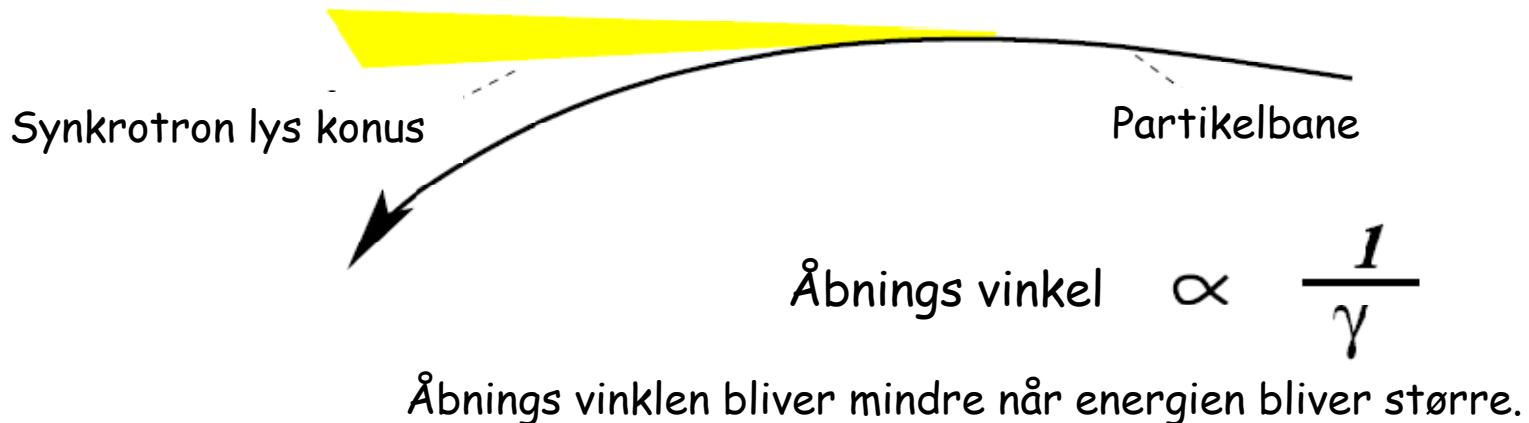
Hvert partikel bundt generere elektromagnetisk stråling, som kaldes "synchrotron radiation."

Alle ladede partikler som accelereres (eller de-accelereres) generere elektromagnetisk stråling.



Synkrotron stråling II

STYRING OG FOKUSERING



Det er et generelt princip at jo højere energi, desto mindre er udbredelsen.

Eks: Radiobølger er udbredt, lys bevæger sig i en ret linie.

Atmosfæren indeholder kun lidt He fordi det spreder sig ud i verdensrummet
(stor spredning i hastighederne for He atomer)

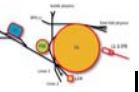
$$P \propto \frac{\gamma^4}{\rho^2}$$

$$E \propto \frac{\gamma^3}{\rho}$$

$$\text{LEP: } \gamma = 200000$$

$$\text{LHC: } \gamma = 7000$$

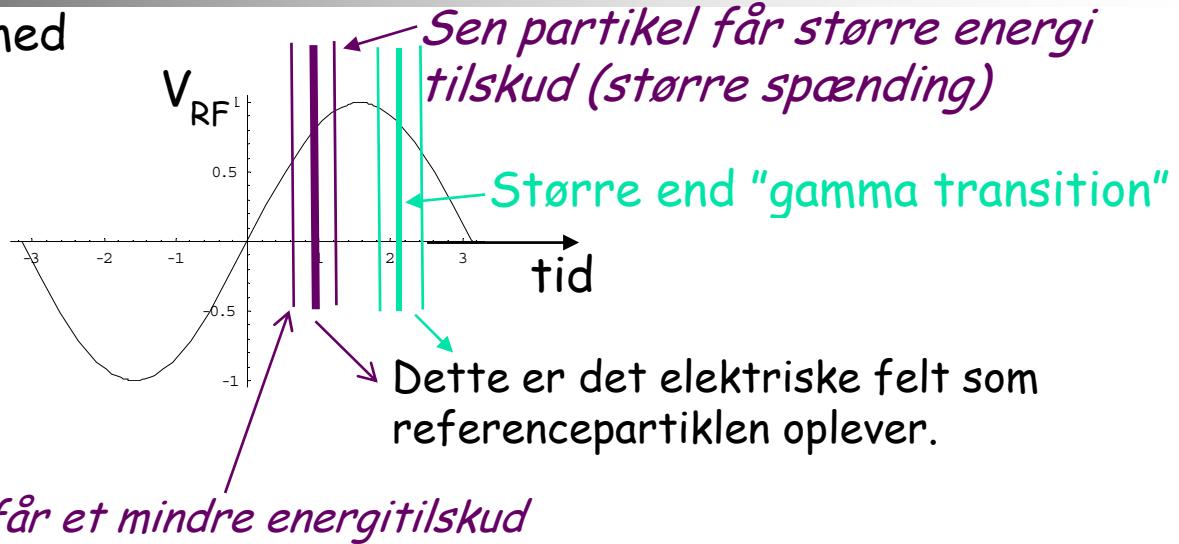
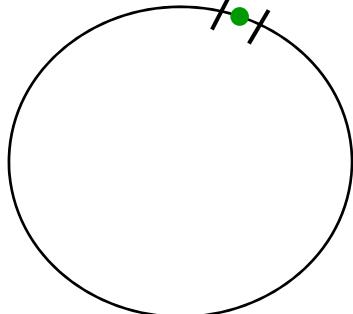
"Streak Camera" i LEP



ACCELERATION

Synchrotronen: acceleration

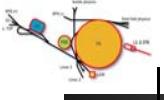
Accelererende gab med RF spænding



Når partiklernes norminelle energi er mindre end en vis energi ("gamma transition energy"), så vil en partikel med større energi end den nominelle have en større hastighed, og en hurtigere omløbstid. Partiklerne vil komme tidlige til det accelerererende gab og få for lidt energi tilskud. Der er negativt feedback!

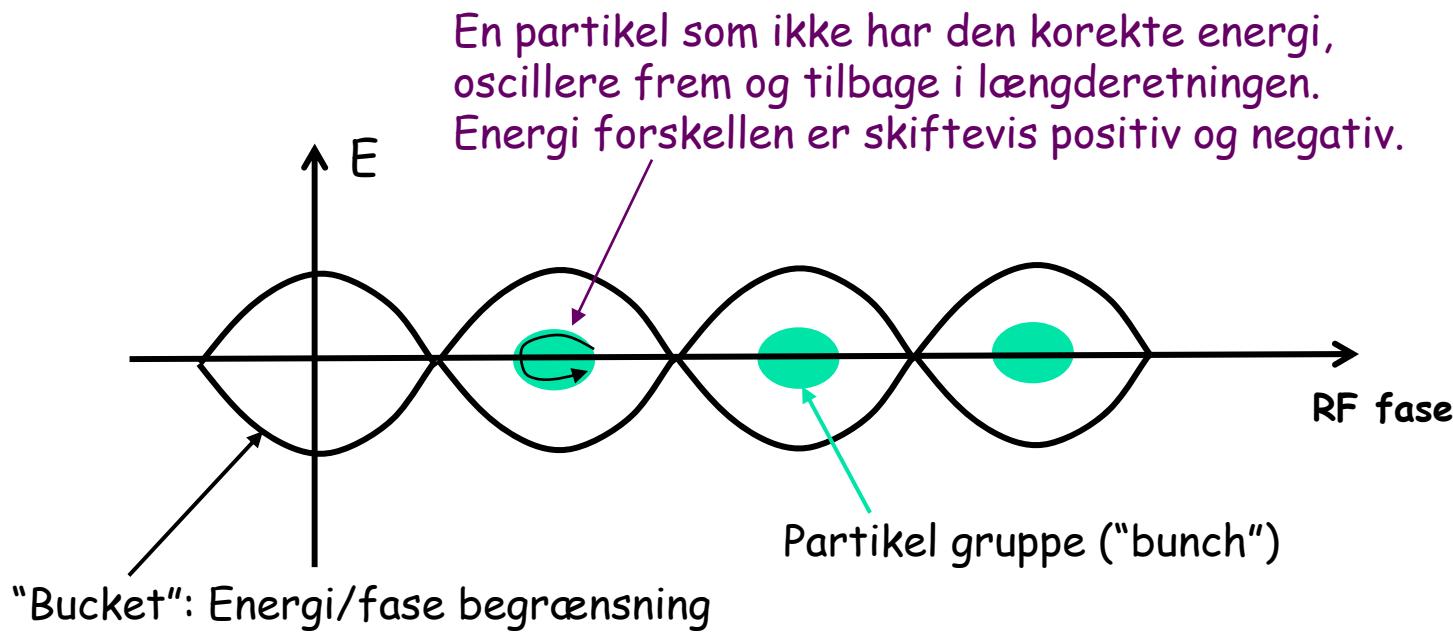
Når en partikels energi er højere end "gamma transition energy" så vil en partikel med større energi end den nominelle have en større radius (men stort set den samme hastighed som de nominelle partikler). Derfor vil en partikel med højere energi komme senere til accelerererende gab. Derfor ændres RF, så det svarer til et mindre energi tilskud. Der er igen negativt feedback!

Et eksempel på relativitet!



Synkrotronen: acceleration

ACCELERATION



EXPERIMENT



Experiment

Faste stråle mål "target":

Bombardere materiale med stråle som dirigeres ud af acceleratoren.

Boble kamre eller andre detektorer

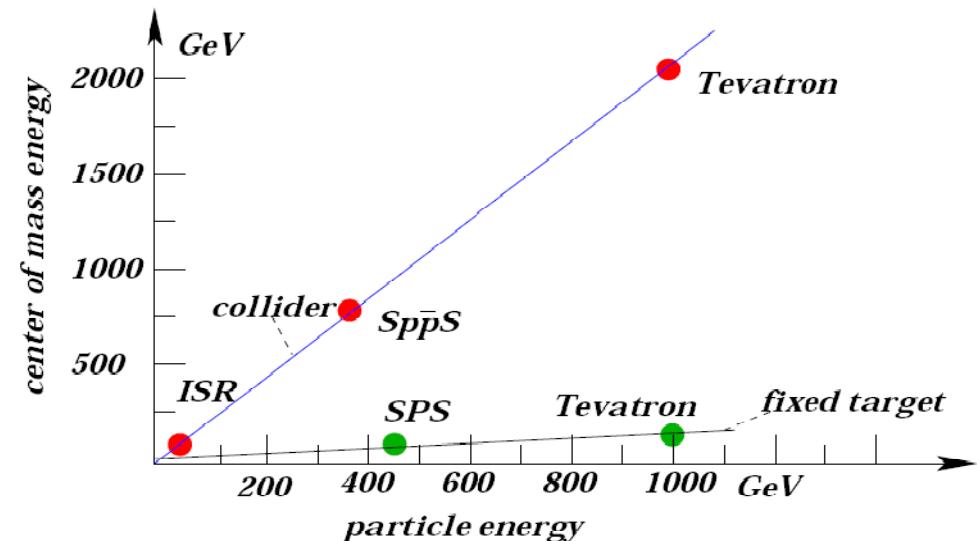
Tilgængelig energi beregnes relativt til systemets masse centrum.

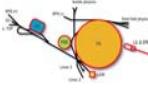
At kolidere partikler
bliver mere
interessant.

1960: elektron/positron
kollision

1970: proton antiproton
kollision

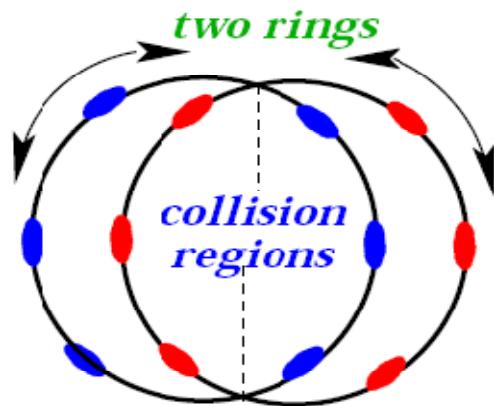
2000: ioner, guld



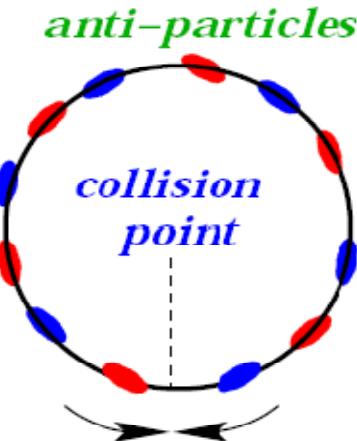


Kollisioner

EXPERIMENT



1. Kollisions vinkel
2. Man behøver to stråler



1. Antipartikler svære (dyre) at producere (~1 antiproton/ 10^6 protoner)
2. Strålerne påvirker hinanden: kræver separation



EXPERIMENT

Leptoner/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:

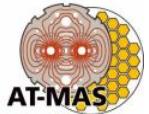
Z_o

1985 SpS

p^+p^-

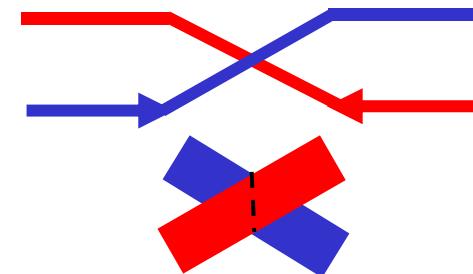
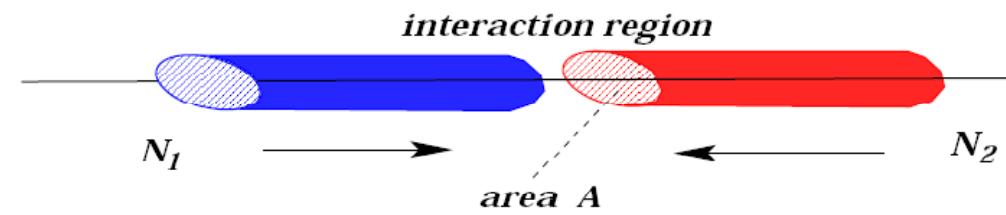
1990 LEP

e^+e^-



Luminositet

EXPERIMENT



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

$$P_{One_event} = \frac{N_b \cdot \sigma}{A}$$

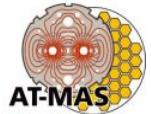
Nuclear cross-section \sim forenklet er det arealet som en partikel fylder (man er sikker på en kollision hvis en anden partikel rammer i dette areal)

Antal partikler per gruppe
(to stråler)

Antallet af partikelgrupper i hver stråle

$$L_{total} = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{A} F$$

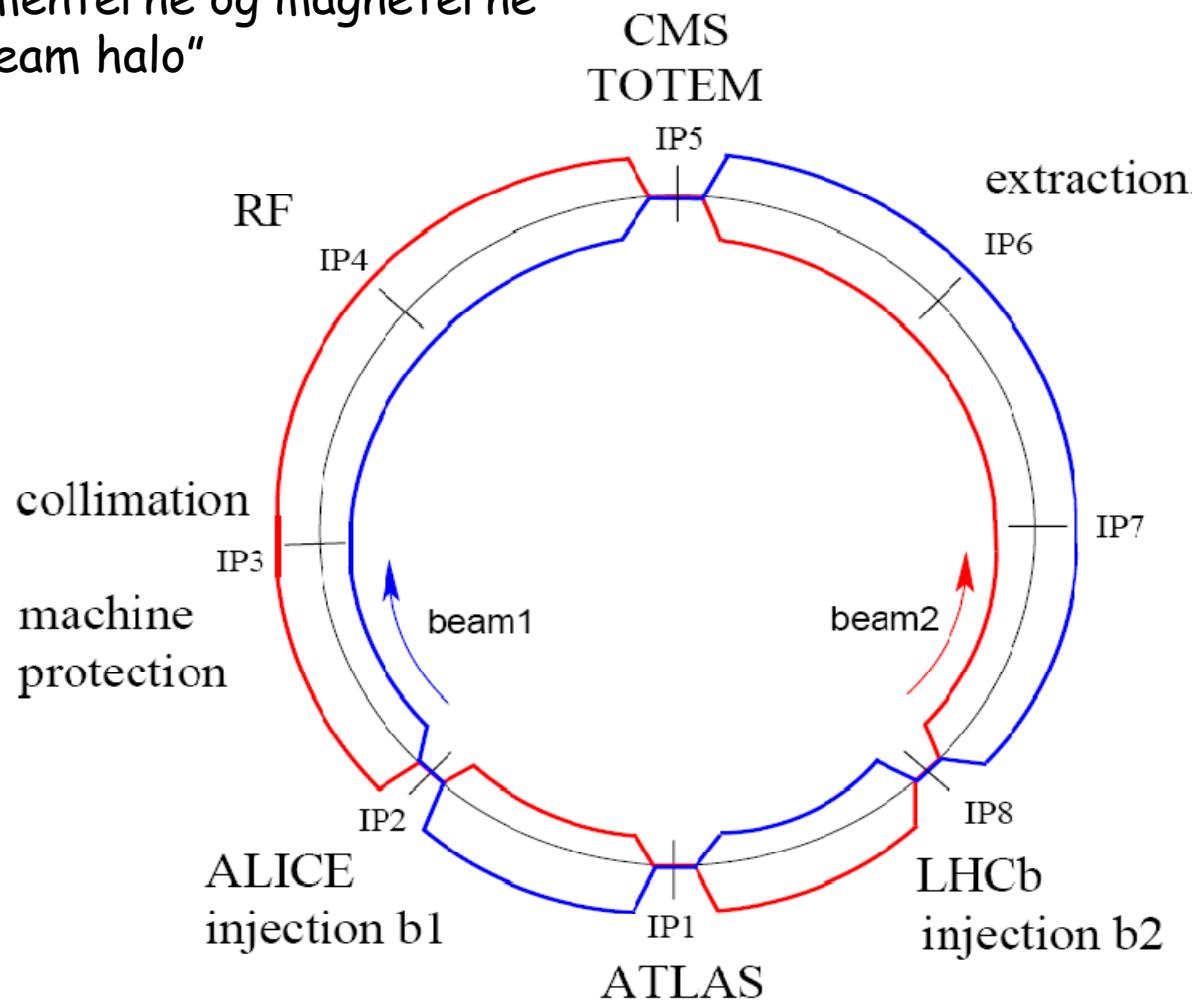
Omløbsfrekvensen
Formfaktor for vinklen mellem
strålerne ("crossing angle")



LHC

EXPERIMENT

Kollimation beskytter
experimenterne og magneterne
mod "beam halo"

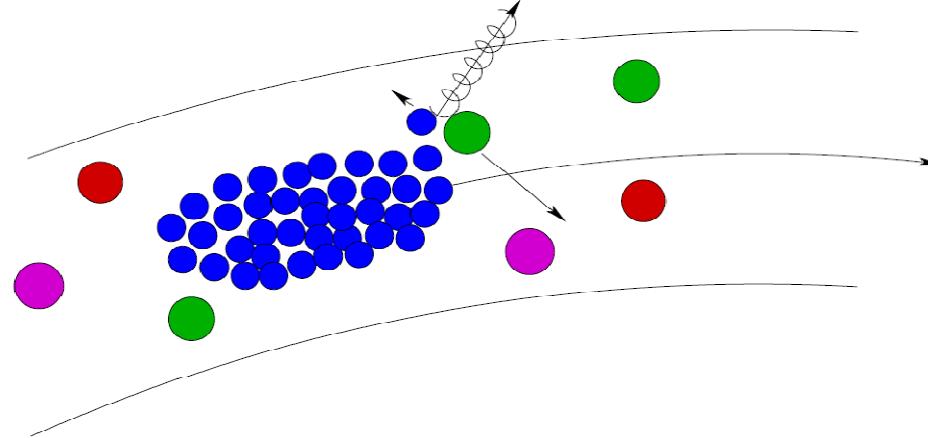




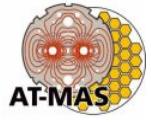
Vakuum

TEKNOLOGI

Bremsstrahlung + Coulomb Scattering



- "Blow up" af strålen
- Partikel tab
- Uønskede kollisioner i eksperimenterne (ATLAS,CMS,LHCb,ALICE)
- Formindsket luminositet



Synkrotron stråling, eksempel

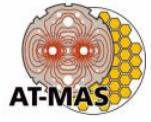
TEKNOLOGI

	E [GeV]	ρ [km]	N $[10^2]$	U [MeV]	P [MW]
LEP 1	45	3.1	4.7	260	1.2
LEP 2	100	3.1	4.7	2900	30
LEP2+	110	3.1	312	3900	44
LHC	7000	3.1	312	0.007	0.005

LEP 1 → Røntgen

LEP 2 → Gamma stråling

LHC → Ultraviolet lys

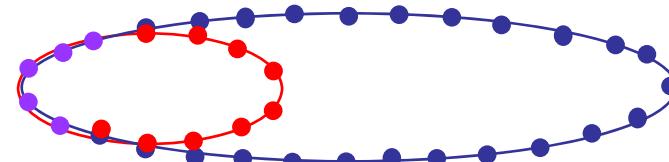


Hvorfor Superledende Teknologi 1

TEKNOLOGI

Hvorfor superledende magneter?

Lille radius, mindre accelerator, (næsten) ingen Ohm'ske tab



Energi besparelse, men infrastrukturen meget mere kompleks.



Hvorfor Superledende teknologi 2

TEKNOLOGI

■ *LEP:*

$B = 0.135 \text{ Tesla}$

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

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

$$\text{ca. 500 magnets} \rightarrow P = 10 \text{ MW}$$

■ *LHC:*

$$B \propto I$$

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



$$P = 78 \text{ MW / magnet}$$



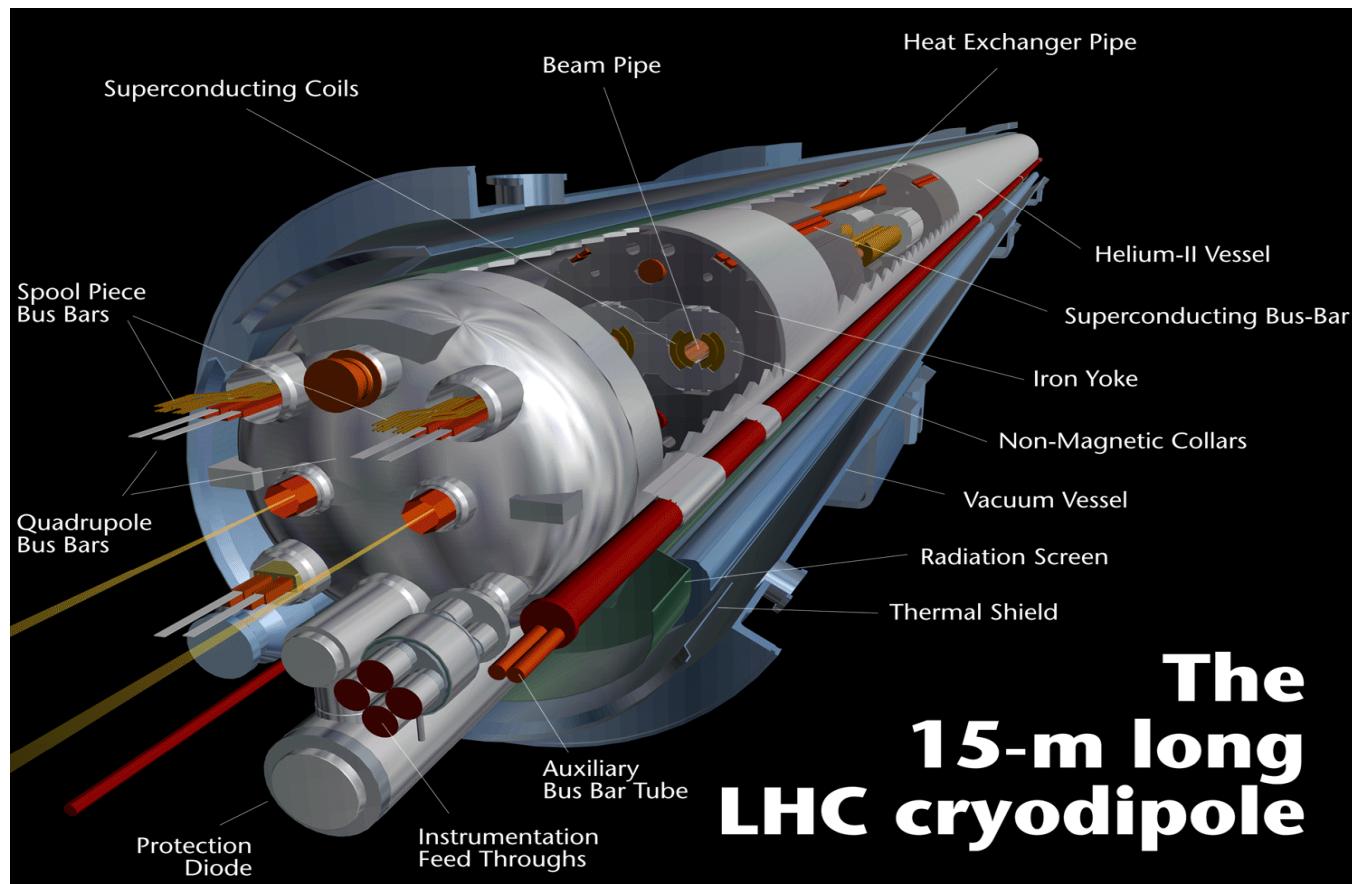
$$\text{ca. 500 magnets} \rightarrow$$

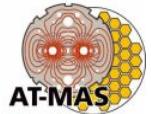
$$P > 39 \text{ GW}$$

Superledende Dipoler for LHC

LHC dipoler (1232 + reserver) bygget i 3 fabriker (Tyskland
Frankrig, Italien, meget stort og højteknologisk projekt)

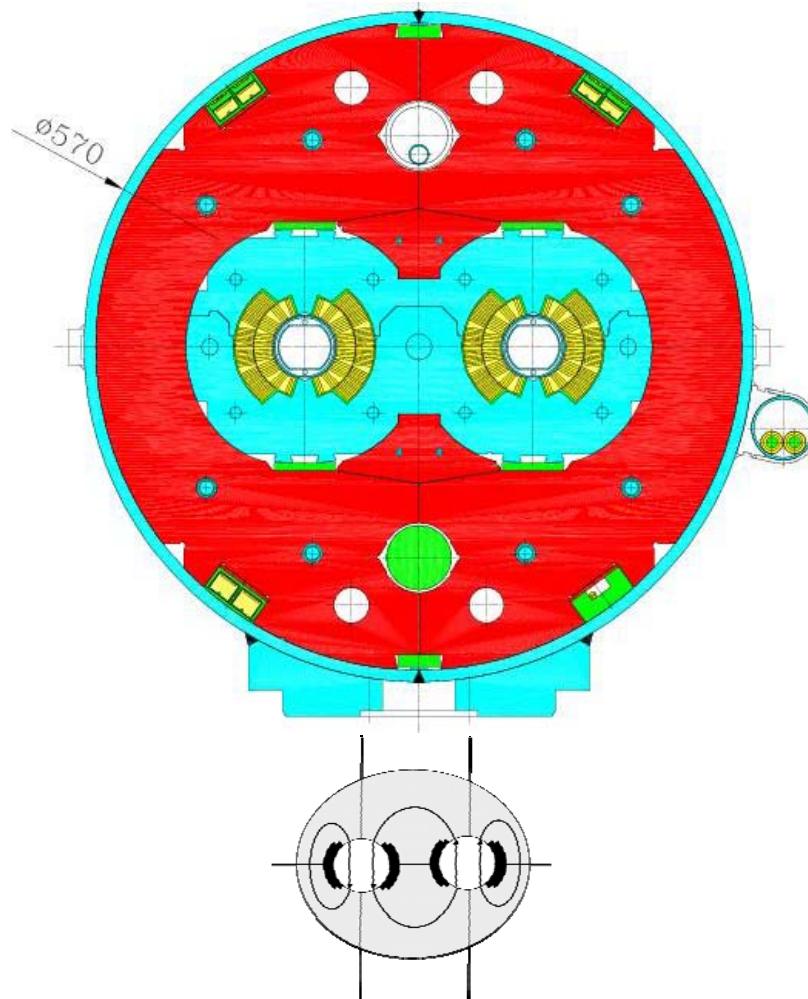
TEKNOLOGI





LHC Dipolen

TEKNOLOGI



"Two in one"
konstruktion

Arbejdstemperatur
1.9 K !





Hvorfor 8.40Tesla?

TEKNOLOGI

■ *Synchrotron:* $R = \text{const.}$

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

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

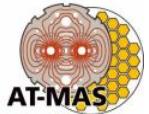
■ *LEP tunel:* $L = 27000 \text{ meter}$

→ arcs: $L = 22200 \text{ meter}$

→ $R = 3500 \text{ meter}$

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

→
$$B_{\max} = 8.38 \text{ T}$$
 → iron saturation: 2 Tesla
earth: $0.3 \cdot 10^{-4} \text{ Tesla}$



Exempel: LHC

EKSEMPEL: LHC

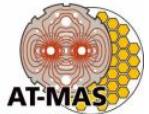
	Injection	Collision	
Proton energy:	450 GeV	7000 GeV	
Energy per beam:	23.2 MJ	362 MJ	1kg Toblerone=22.1MJ Courtesy V.Chohan
Synchrotron radiation:	1.15×10^{-1} eV	6.71×10^3 eV	
Magnetic bending field:	0.535 T	8.33 T	
Number of bunches:	2808		
Number of particles per bunch:	1.15×10^{11}		
Cirkulerende strøm:	0.582 A		
Antallet af bøje magneter:	1232		
Længde af en bøje magnet:	14.3 m		



Referencer 1

REFERENCER

- 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', 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.



Referencer 2

REFERENCER

- M. Sands, 'The Physics of Electron Storage Rings', SLAC-121, 1970.
 - E.D. Courant and H.S. Snyder, 'Theory of the Alternating-Gradient Synchrotron', *Annals of Physics* 3, 1-48 (1958).
 - CERN Accelerator School, RF Engineering for Particle Accelerators, CERN Report 92-03, 1992.
 - CERN Accelerator School, 50 Years of Synchrotrons, CERN Report 97-04, 1997.
 - E.J.N. Wilson, *Accelerators for the Twenty-First Century - A Review*, CERN Report 90-05, 1990.
- Special Topics and Detailed Information:
- J.D. Jackson, 'Classical Electrodynamics', Wiley, New York, 1975.
 - Lichtenberg and Lieberman, 'Regular and Stochastic Motion', Applied Mathematical Sciences 38, Springer Verlag.
 - A.W. Chao, 'Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators', Wiley, New York 1993.
 - M. Diens, M. Month and S. Turner, 'Frontiers of Particle Beams: Intensity Limitations', Springer-Verlag 1992, (ISBN 3-540-55250-2 or 0-387-55250-2) (Hilton Head Island 1990) 'Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators', Wiley, New York 1993.
 - R.A. Carrigan, F.R. Huson and M. Month, 'The State of Particle Accelerators and High Energy Physics', American Institute of Physics New York 1982, (ISBN 0-88318-191-6) (AIP 92 1981) 'Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators', Wiley, New York 1993.



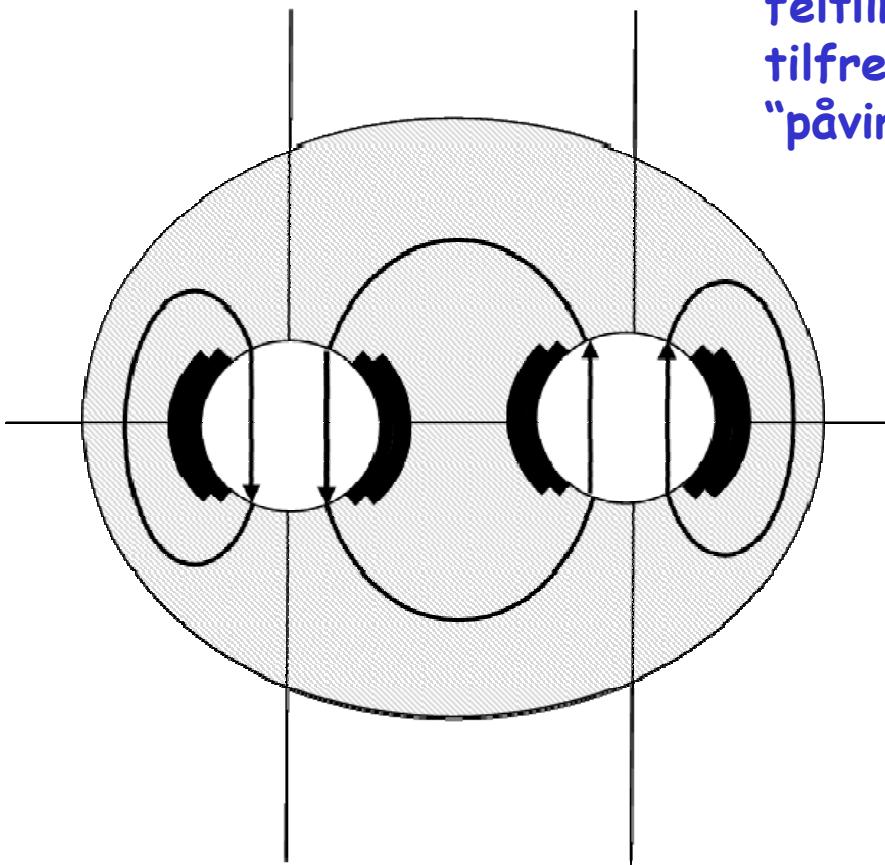
Referencer 3

REFERENCER

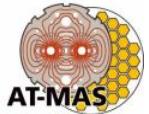
1. Lars Becker-Larsen: *Københavnerfortolkningen*, Produceret af Arentoft Film ApS med støtte fra Det Danske Filminstitut, Danmarks Radio, Undervisningsministeriet og Videnskabsministeriet (2005)
<http://www.dfi.dk>:
[Københavnerfortolkningen](#)
Lars Becker-Larsen, Danmark 2004 [DVD VHS](#)
2. http://webcast.cern.ch/home/pages/lecser_cds.php?prog_year=sslp_2007
3. MIT physics course (MIT open course ware): <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Chemistry/5-111Fall-2005/VideoLectures/index.htm>
4. M. Martini, An Introduction to Transverse Beam Dynamics in Accelerators, CERN/PS 96-11 (PA), 1996,
<http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/preprints/ps/ps-96-011.pdf>
5. L. Rinolfi, Longitudinal Beam Dynamics (Application to synchrotron), CERN/PS 2000-008 (LP), 2000,
<http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/preprints/ps/ps-2000-008.pdf>
6. Theoretical Aspects of the Behaviour of Beams in Accelerators and Storage Rings: International School of Particle Accelerators of the 'Ettore Majorana' Centre for Scientific Culture, 10-22 November 1976, Erice, Italy, M.H. Blewett (ed.), CERN report 77-13 (1977) http://preprints.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=cernrep&categ=Yellow_Report&id=77-13
7. CERN Accelerator School <http://cas.web.cern.ch/cas/>
8. K. Schindl, Space Charge, CERN-PS-99-012-DI, 1999
<http://doc.cern.ch/archive/electronic/cern/preprints/ps/ps-99-012.pdf>
9. A.W. Chao, Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators, New York: Wiley, 371 p, 1993 <http://www.slac.stanford.edu/~achao/wileybook.html>

Gensidig påvirkning af magnetiske felter

Spørgsmål



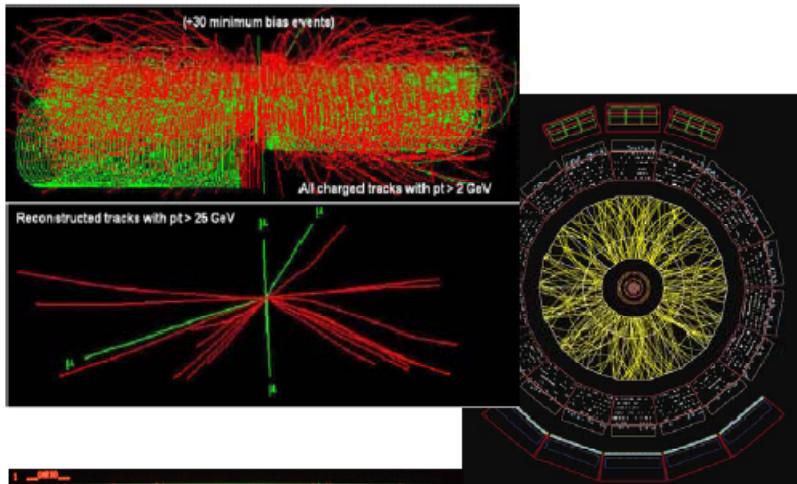
Magneten er konstrueret så at
feltlinjerne i hele magneten
tilfredsstiller kravet: Ingen
"påvirkning"



Fremtidige acceleratorprojekter

Spørgsmål

LHC: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$



ALICE:
Ion event

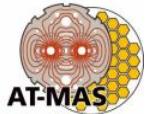
LEP event:
 $Z^0 \rightarrow 3 \text{ jets}$

Hadron Collider (p, ions):

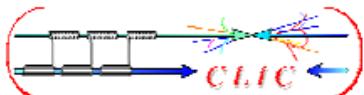
- Composite nature of protons
- Can only use p_t conservation
- Huge QCD background

Lepton Collider:

- Elementary particles
- Well defined initial state
- Beam polarization
- produces particles democratically
- Momentum conservation eases decay product analysis



Framtida acceleratorprojekt



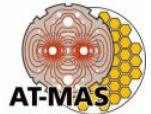
TeV e⁺e⁻ physics



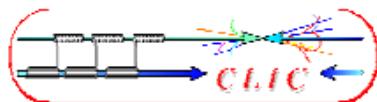
Spørgsmål

- Higgs physics
 - Tevatron/LHC should discover Higgs (or something else)
 - LC explore its properties in detail
- Supersymmetry
 - LC will complement the LHC particle spectrum
- Extra spatial dimensions
- New strong interactions
- ...

=> a lot of new territory to discover beyond the standard model



Fremtidige acceleratorprojekter

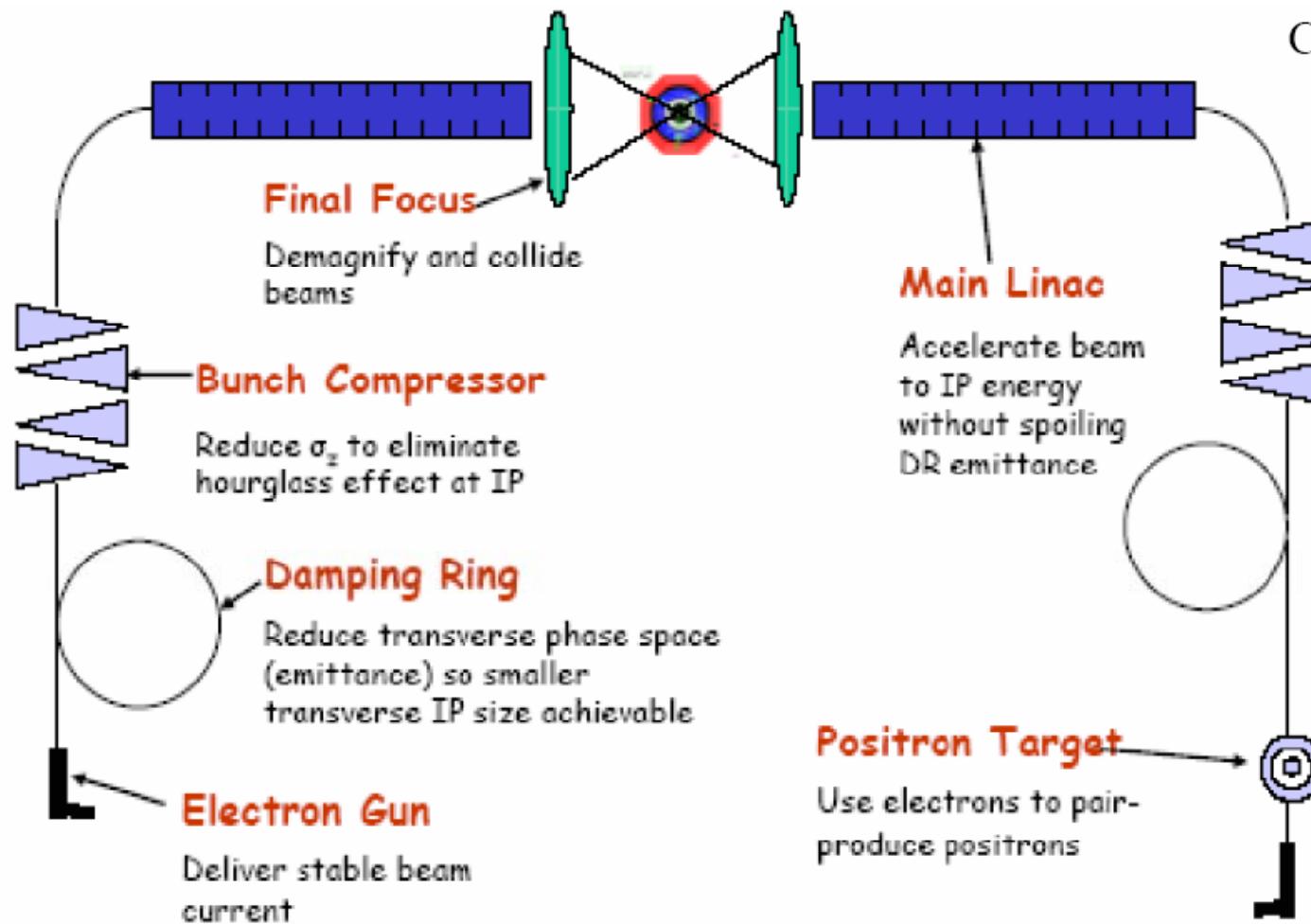


Generic Linear Collider



C.Pagan

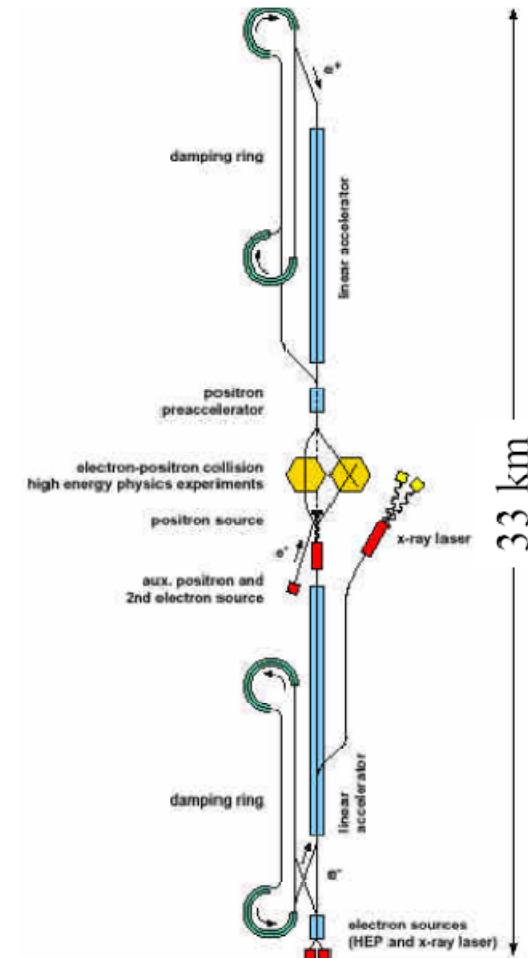
Spørsmål



Fremtidige acceleratorprojekter

Spørgsmål

- two projects presently under study:
- ILC (International Linear Collider)
 - Technology decision Aug 2004
 - Superconducting technology
 - 1.3 GHz RF frequency
 - $\sim 31 \text{ MV/m}$ accelerating gradient
 - **500 GeV** centre-of-mass energy
 - upgrade to **1 TeV** possible
- CLIC (Compact Linear Collider)
 - normalconducting technology
 - multi-TeV energy range (1-5 TeV)





Bremsstrahlung

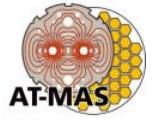
Spørgsmål

Bremsstrahlung (from the German *bremsen*, to brake and *Strahlung*, radiation, thus, "braking radiation"), is **electromagnetic radiation** produced by the acceleration of a charged particle, when deflected by **another charged particle, such as an atomic nucleus**.

The term is also used to refer to the process of producing the radiation.

Bremsstrahlung may also be referred to as free-free radiation. This refers to the **radiation that arises as a result of a charged particle that is free both before and after the deflection (acceleration) that causes the emission**.

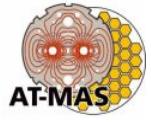
Strictly speaking, bremsstrahlung refers to **any radiation due to the acceleration of a charged particle**, which **includes synchrotron radiation**; however, it is frequently used (even when not speaking German) in the more literal and narrow sense of radiation from electrons stopping in matter.



Varmen fra cryo-systemet

Spørgsmål

Varmer kun udeluft - ikke vores kotorer



Antallet af kollisioner

Spørgsmål

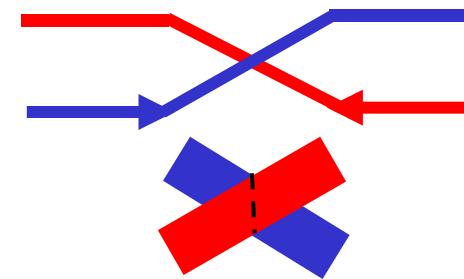
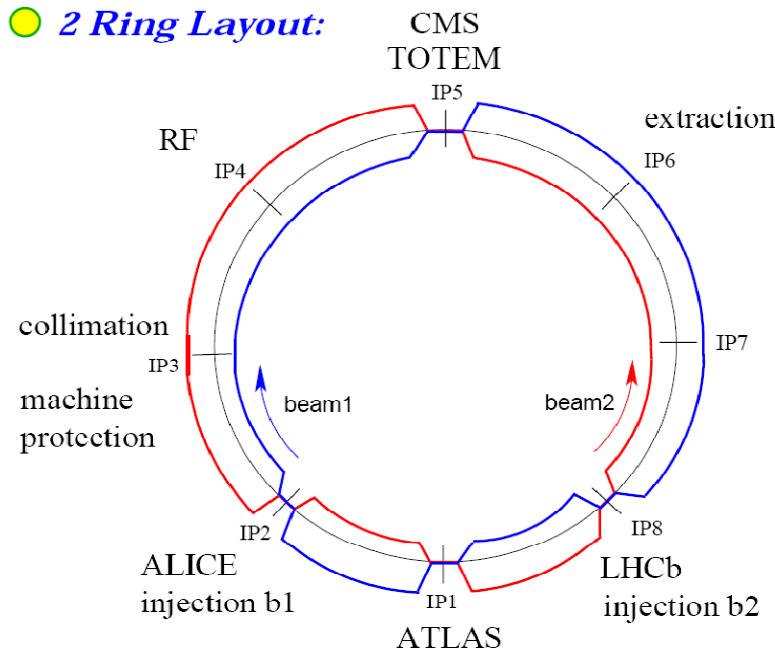
$$N_{ev}/sec = \sigma \cdot L$$

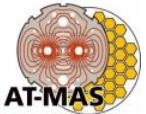
$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\varepsilon\beta} F$$



Hvor foregår kollisionerne

Spørsmål





Production Follow-Up of the LHC Main Dipoles 5

Extra slides

Field Description

In a current free region of space the field fulfils the following simplified Maxwell equations:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$$

If a two dimensional field is present, with only two non zero Cartesian components B_x and B_y , no longitudinal component, the following equations can be derived from the above

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x} \quad \frac{\partial B_x}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{\partial y}$$



Production Follow-Up of the LHC Main Dipoles 6

Extra slides

Referring to a reference system where x and y are orthogonal and where

$$z = x + iy$$

$$x = \text{Re}(z) \quad \text{and} \quad y = \text{Im}(z)$$

the total magnetic field B is defined in complex notation as:

$$\vec{B}(x, y) \equiv B_y(x, y) + iB_x(x, y)$$

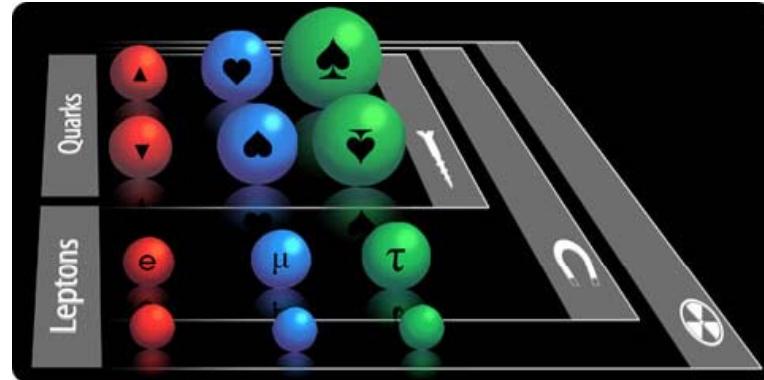
Cauchy-Riemann conditions provide a necessary and sufficient condition for the complex function $B(x, y)$ to be analytic in z

Physics Motivation 1

Extra slides

The Standard Model

- Sorts the elementary particles into **three families**.
- There are **two quarks** (and their antiparticles) and **two leptons** in each family:
 1. the "up" and "down" quarks, the electron and the electron-neutrino are in the first;
 2. the "strange" and the "charm" quark, the muon and the muon neutrino in the second;
 3. the "top" and the "bottom" quark, the tau and the tau neutrino in the third.



Generation 1 (ordinary matter)				
Fermion (Left-handed)	Symbol	Electric charge	Mas	
Electron	e	? 1	0.511 MeV	
Electron neutrino	ν_e	0	< 50 eV	
Positron	e^+	+1	0.511 MeV	
Electron antineutrino	ν_e^c	0	< 50 eV	
Up quark	u	+2/3	~5 MeV	
Down quark	d	? 1/3	~10 MeV	
Anti-up antiquark	u^c	? 2/3	~5 MeV	
Anti-down antiquark	d^c	+1/3	~10 MeV	

Physics Motivation 2

Extra slides

The Standard Model, "three generations"



Ordinary matter



What happens in our universe



How was created our universe

Generation 1 (ordinary matter)			
Fermion (Left-handed)	Symbol	Electric charge	Mas
Electron	e	? 1	0.511 MeV
Electron neutrino	ν_e	0	< 50 eV
Positron	e^+	+1	0.511 MeV
Electron antineutrino	$\bar{\nu}_e$	0	< 50 eV
Up quark	u	+2/3	~5 MeV
Down quark	d	? 1/3	~10 MeV
Anti-up antiquark	u^c	? 2/3	~5 MeV
Anti-down antiquark	d^c	+1/3	~10 MeV

Generation 2			
Fermion (Left-handed)	Symbol	Electric charge	Mass
Muon	μ	? 1	105.6 MeV
Muon neutrino	ν_μ	0	< 0.5 MeV
Anti-Muon	μ^+	+1	105.6 MeV
Muon antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$	0	< 0.5 MeV
Charm quark	c	+2/3	~1.5 GeV
Strange quark	s	? 1/3	~100 MeV
Anti-charm antiquark	c^c	? 2/3	~1.5 GeV
Anti-strange antiquark	s^c	+1/3	~100 MeV

Generation 3			
Fermion (Left-handed)	Symbol	Electric charge	Mass
Tau lepton	τ	? 1	1.784 GeV
Tau neutrino	ν_τ	0	< 70 MeV
Anti-Tau	τ^+	+1	1.784 GeV
Tau antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$	0	< 70 MeV
Top quark	t	+2/3	173 GeV
Bottom quark	b	? 1/3	~4.7 GeV
Anti-top antiquark	t^c	? 2/3	173 GeV
Anti-bottom antiquark	b^c	+1/3	~4.7 GeV

Extra slides

The CERN Laboratory

- Users contribute to the present large research project, the LHC, with in-kind services and equipment or directly with funding
- ALICE "A Large Ion Collider Experiment" will observe protons and lead ion collisions (strongly interacting matter, quark gluon plasma)
- ATLAS "A Toroidal LHC Apparatus" looks for Higgs bosons
- CMS "Compact Muon Solenoid" looks for Higgs bosons
- LHC-B, LHC Beauty experiment precise measurement on CP violation

