

Acceleratorer

Niels Hertel
ISA,
Århus Universitet

Email: hertel@phys.au.dk

Web: www.isa.au.dk



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Motivation for at bygge acceleratorer

Fysikforskning var i starten den eneste motivation for at bygge acceleratorer, idet vi undersøger ting ved at se på deres vekselvirkning med partikler med kendte egenskaber.



Fysikforskning med accelerator

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008



Ernest Rutherford

Rutherford lavede de første accelerator-eksperimenter i 1909 **uden en accelerator!**

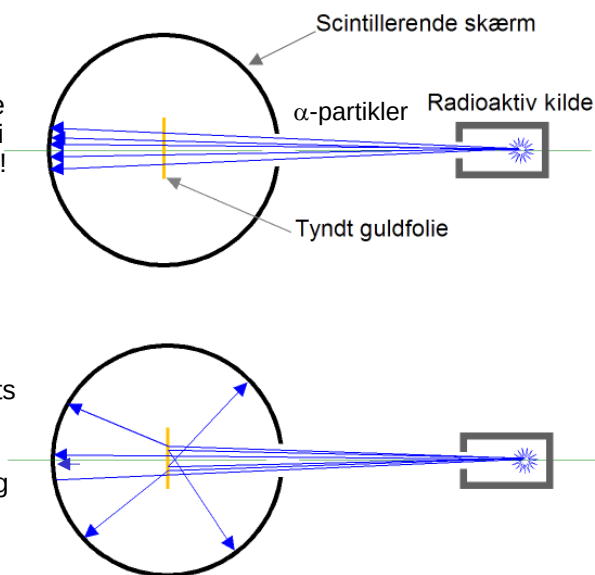
Eksperimentet:

Øverst til højre ses det forventede resultat jvf. den gældende teori.

Nederst det observerede resultat, der påviste atomets struktur.

Det skabte behov for at kunne lave kontrollerede og veldefinerede stråler af atomare partikler.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008



Kraft på ladede partikler

Lorentzkraften:
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = e \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

p: impuls, F: kraft, e: ladning, E: elektrisk felt, v: hastighed, B: magnetfelt.

Til acceleration skal benyttes elektriske felter.

Til styring benyttes magnetfelter (eller E-felter ved lave energier)

Typiske DC E-felter er på 100-1000 kV/m.

Typiske B-felter er på 0.1-2.0 Tesla for normalt ledende, og op til 8 Tesla for superledende magneter.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Lidt om praktiske enheder

Elektrisk ladning regnes i enheder af elementarladningen.

I denne enhed har en proton en ladning på +1, og en elektron en ladning på -1.

Energi regnes i elektronvolt, eV.

1 eV er den energi en partikel med en ladning på 1 opnår ved at gennemløbe et spændingsfald på 1V.

Accelererer vi således en enhedsladning med en spænding på 20kV opnår den en energi på 20keV.

I acceleratorfysik ses ofte enhederne

MeV = 10^6 eV (Megaelektronvolt)

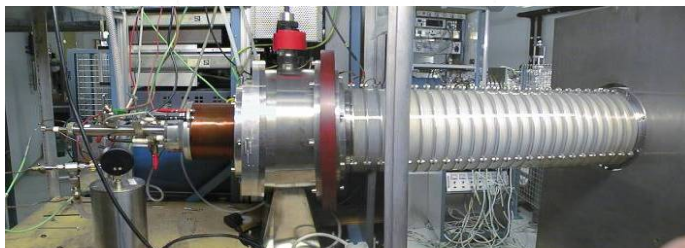
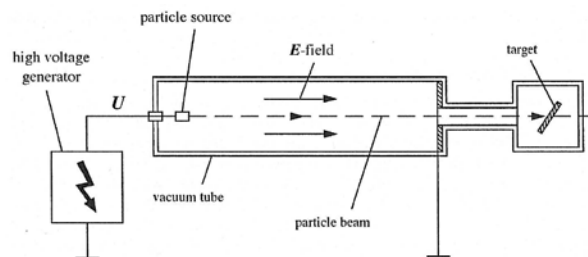
GeV = 10^9 eV (Gigaelektronvolt)

TeV = 10^{12} eV (Teraelektronvolt)

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

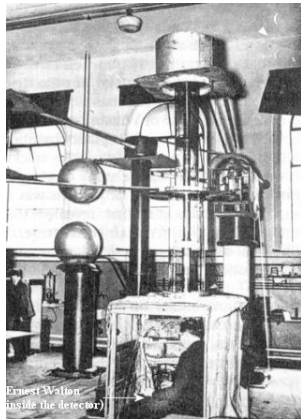
Acceleratorens udvikling

~1930: Første elektrostatiske (DC) acceleratorer.

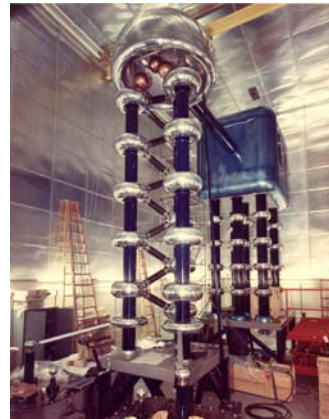


Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Cockroft-Walton acceleratorer



Den originale Cockroft-Walton
400keV accelerator fra 1932

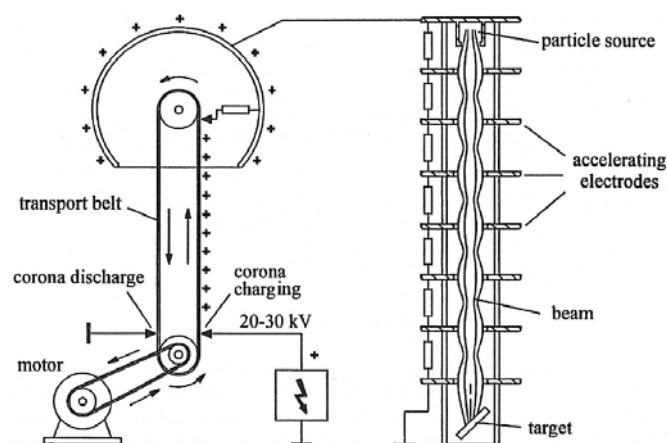


En Cockroft-Walton accelerator
fra Brookhaven ~1965

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

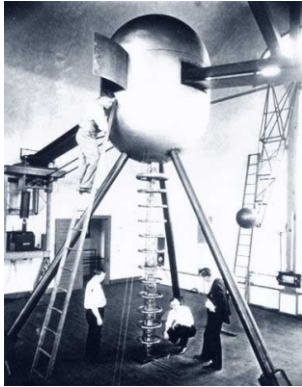
Van de Graaf HV generator

1931: Van de Graaf generatoren. Op til 10MeV.

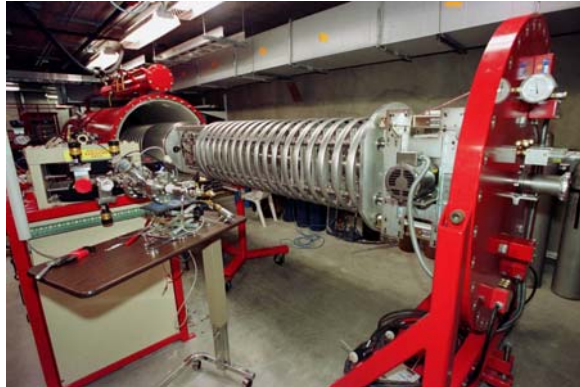


Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Van de Graaf acceleratorer



Arbejde med en tidlig Van de Graaf accelerator.
Ca. 1936



En moderne Van de Graaf tandem accelerator fra
Madison/Wisconsin

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Motivation for stadig højere energier

Kort bølglængde, jvf. **deBroglie**: $\lambda = h/p$.

($h=6.6 \cdot 10^{-34}$ J*s er Plancks konstant, p er impulsen og λ er bølglængden)

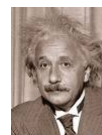
Med en kortere bølglængde kan man observere finere detaljer.



Dannelse af andre partikler: jvf. **Einstein**: $E=mc^2$.

(E er energi, m er massen og $c=3 \cdot 10^8$ m/s er lysets hastighed i vacuum)

Med høj energi til rådighed i et sammenstød er der mulighed for at danne andre partikler med høj masse (energi).



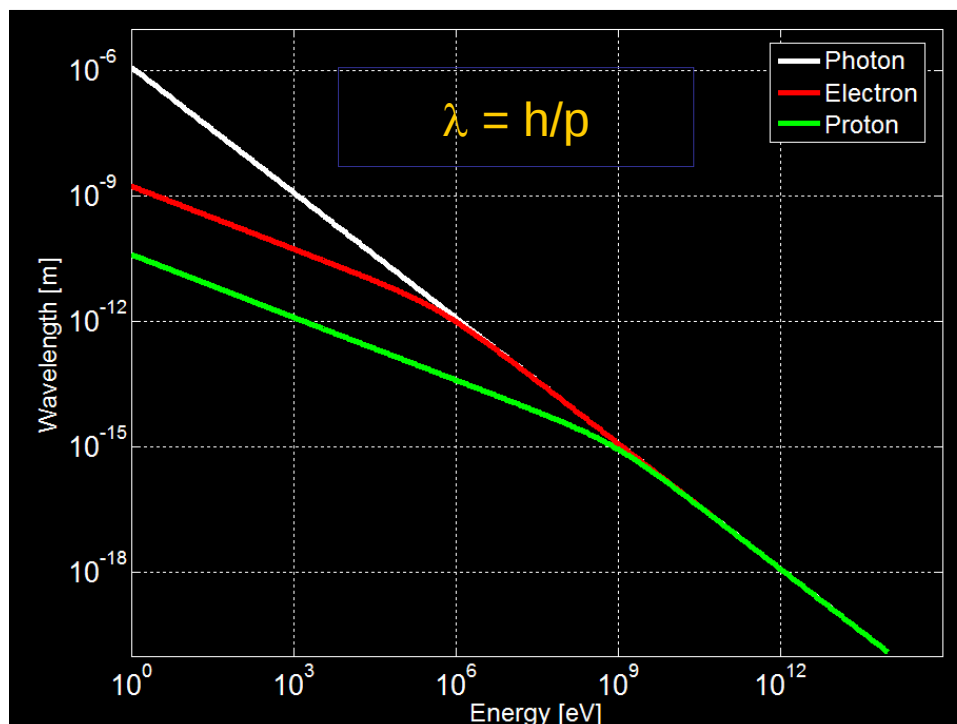
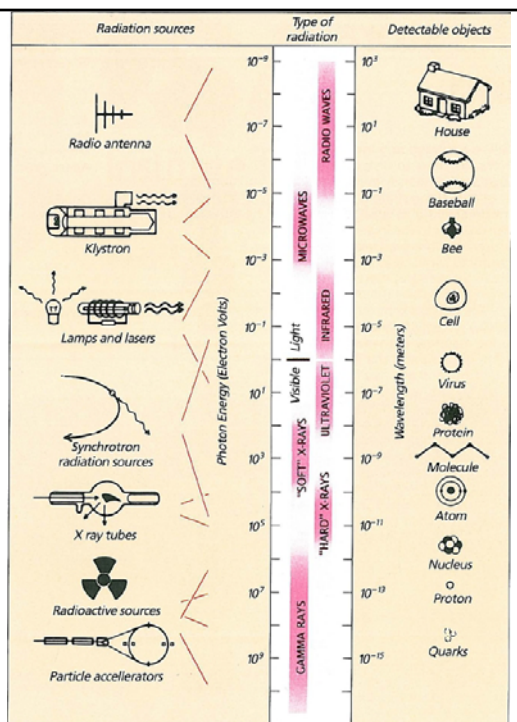
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

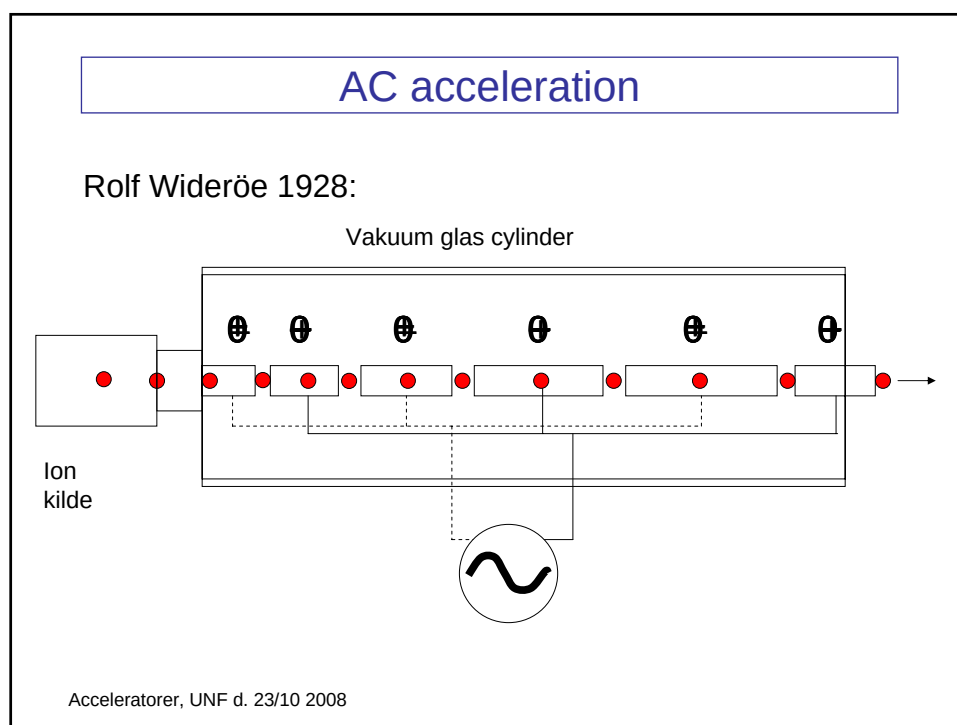
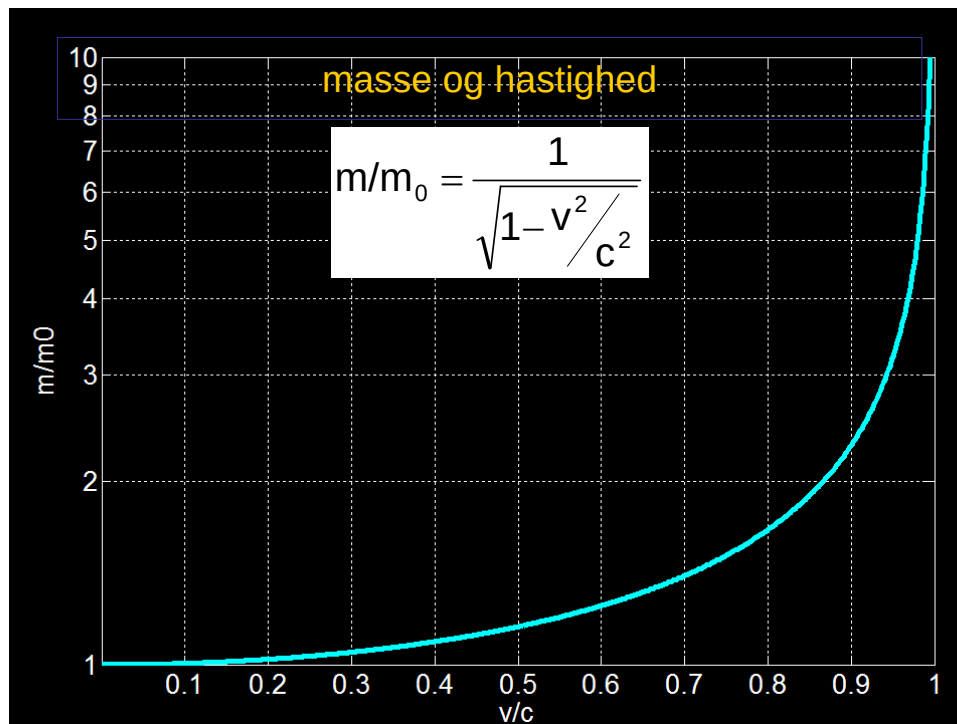
Energi og bølgelængde

På figuren er strålingskilder og detekterbare objekter vist for et stort energiområde, helt fra radiobølger til højenergetiske partikler fra accelerators.

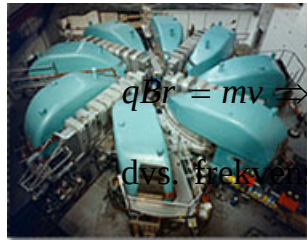
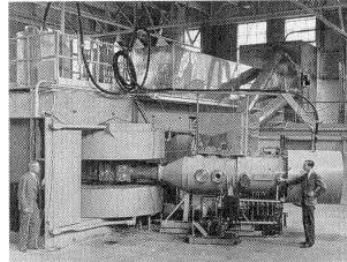
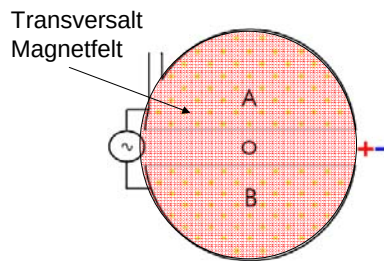
Bemærk hvor lidt synligt lys fylder i området.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008





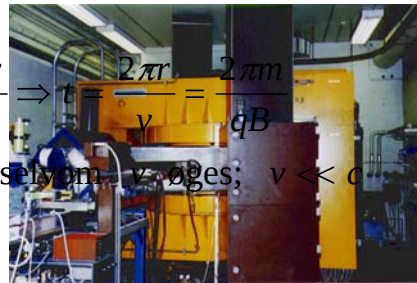
Cyklotronen, den første cirkulære radio-frekvens accelerator



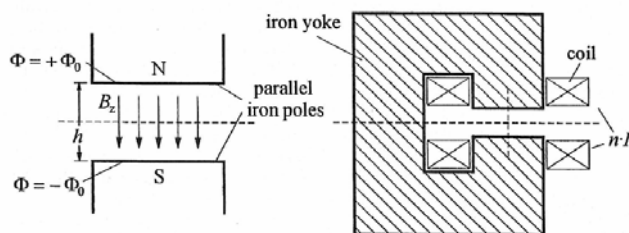
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

$$qBr = mv \Rightarrow r = \frac{mv}{qB} \Rightarrow r = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

dvs. frekvens fast selv om v øges; $v \ll c$



Styring: Dipolmagneter

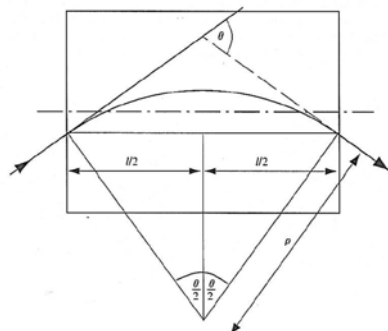


En dipolmagnet

I en dipolmagnet som vist ovenfor bestemmer feltet B og energien E partiklens afbøjningsradius r .

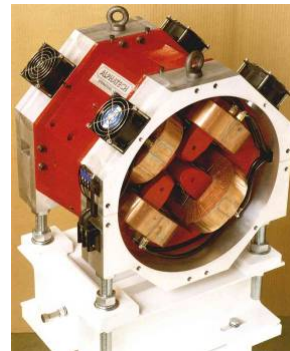
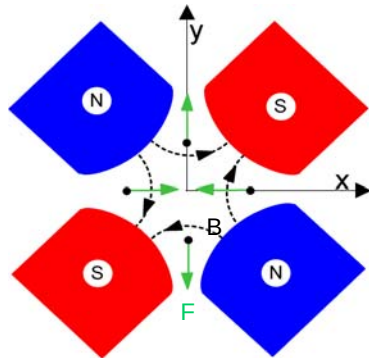
Generelt gælder

$$Br = p/q$$



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Fokusering: Kvadrupolmagneter



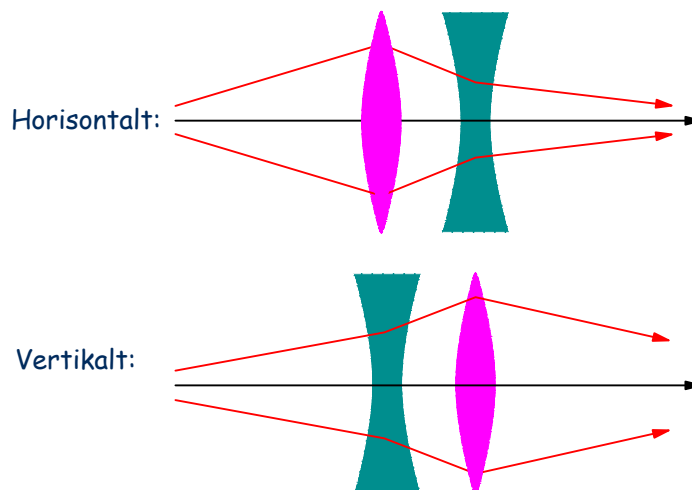
$$B_y \propto x \text{ og } B_x \propto y$$

$$F_x \propto -x \text{ og } F_y \propto y$$

Horizontal fokusering og vertikal defokusering for elektroner der bevæger sig ind i billedet.

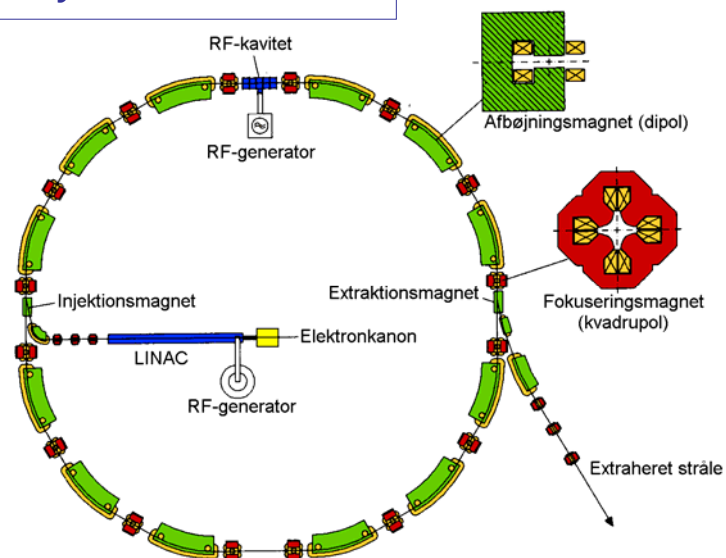
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Fokusering: Kvadrupolmagneter



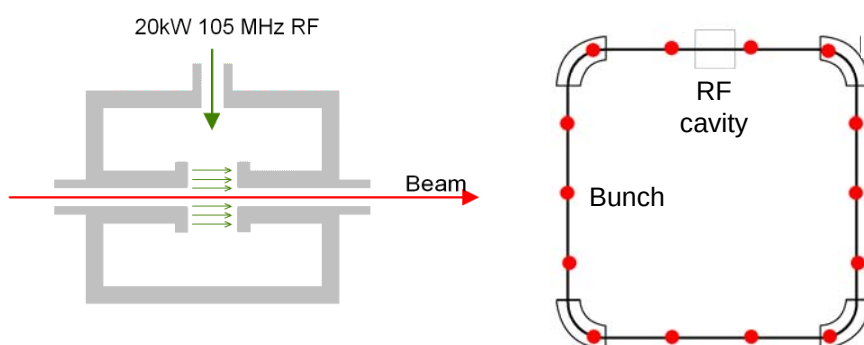
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Synkrotron



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

RF kaviteten: Frekvens og bundter



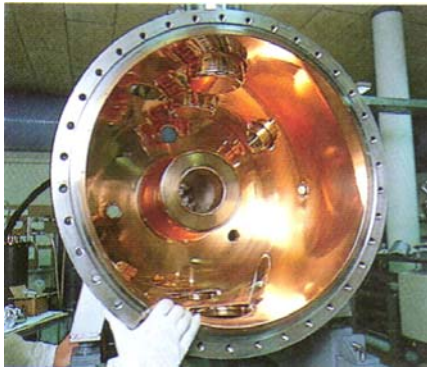
ASTRID har en omkreds på 40m, og med $v \sim c$ fører dette til en omløbsfrekvens f_{rev} på 7.5MHz. RF frekvensen f_{RF} skal være et helt tal gange f_{rev} .

Dette hele tal kaldes det harmoniske tal, h .

I ASTRID er $h=14$, dvs vi har en f_{RF} på 105 MHz.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

RF kaviteten: ASTRID

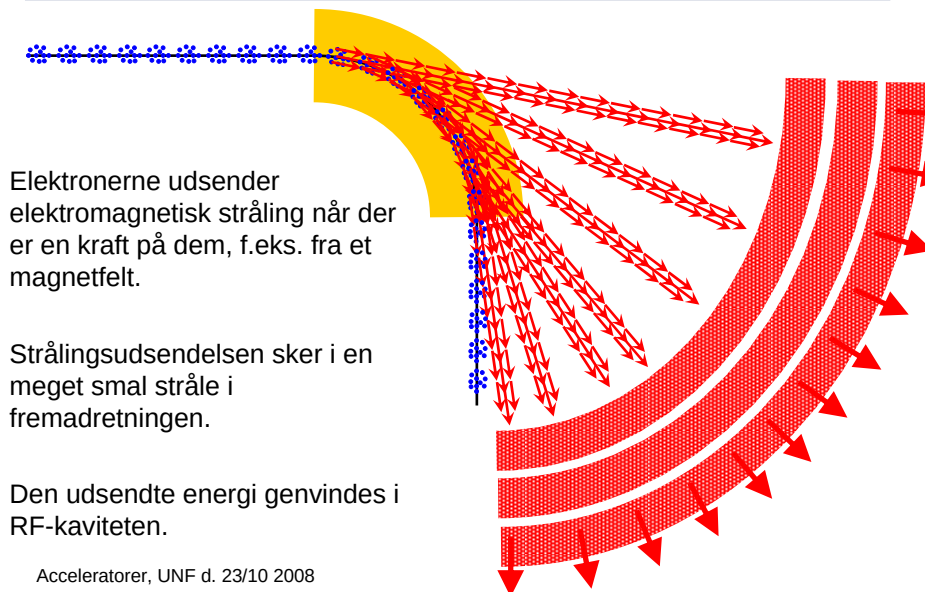


ASTRID 105 MHz kaviteten



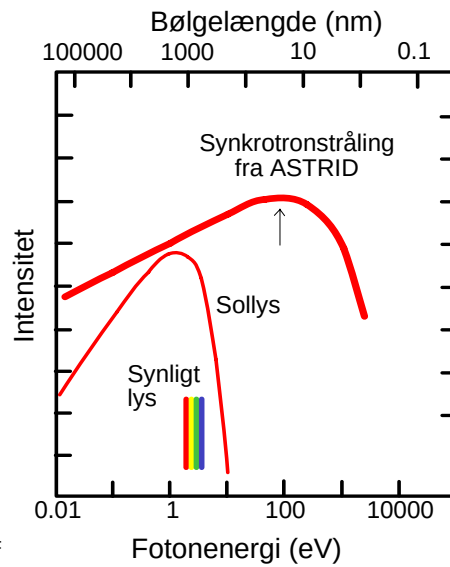
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Udsendelse af synkrotronstråling



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

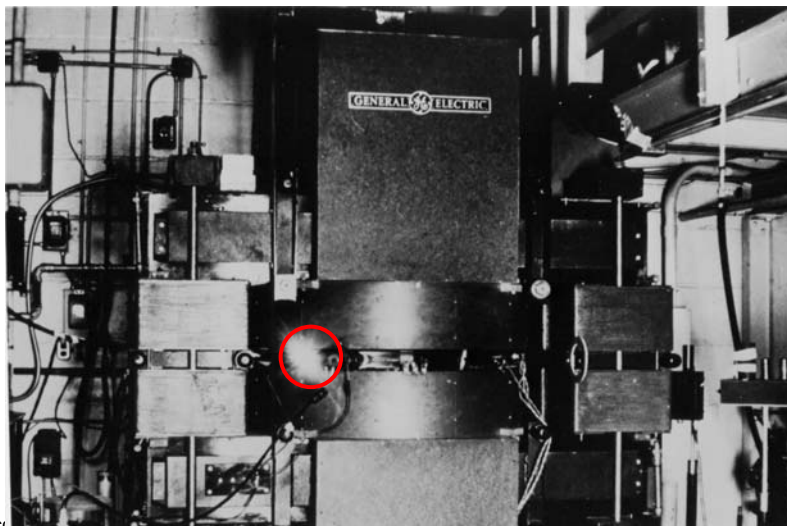
Synkrotronstråling fra ASTRID



Bemærk:
Logaritmisk skala
på begge akser

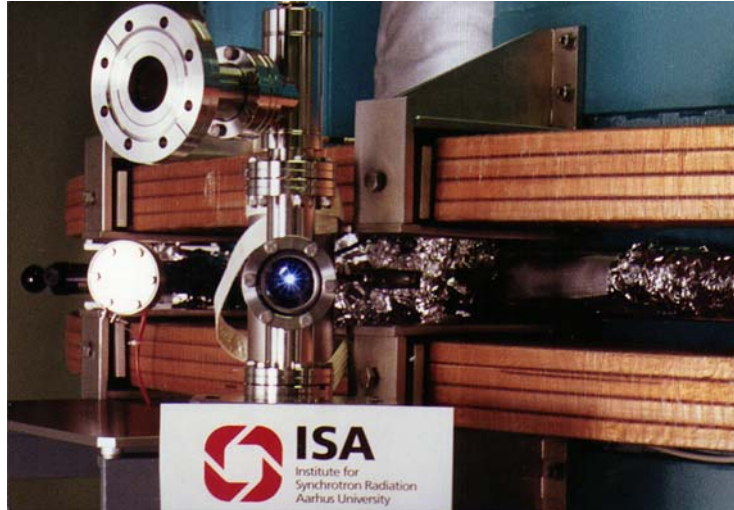
Acceleratorer, UNF

Første observation af SR i 1947



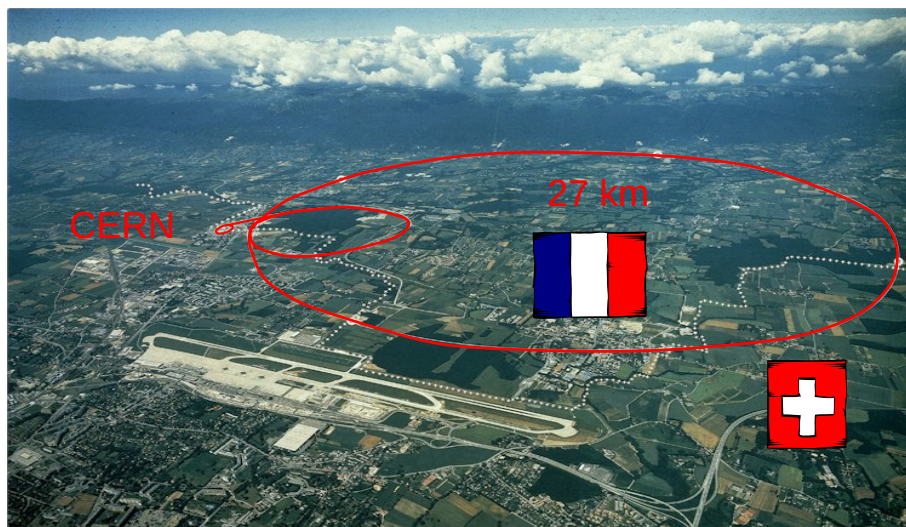
Acceleratorer, UNF

SR fra ASTRID



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

De største acceleratorer



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Synkrotron stråling : Effekt

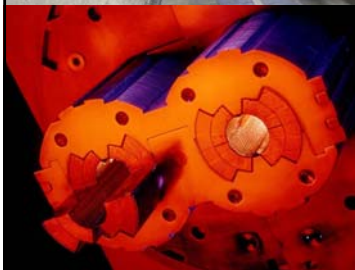
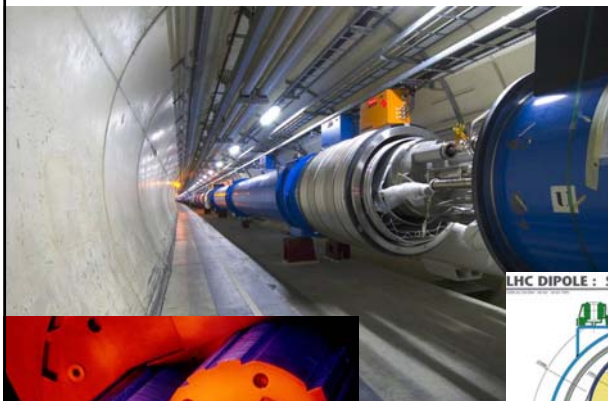
Energitaab/omgang : $U[\text{keV}] = 88.5 \cdot E^4[\text{GeV}^4]/r[\text{m}]$

Udstrålet effekt: $P[\text{kW}] = U[\text{keV}] \cdot I[\text{A}]$

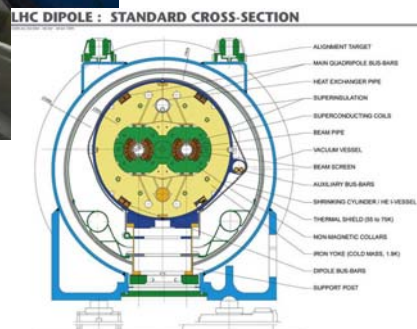
	E [GeV]	B [T]	ε_c [keV]	U [keV]	P [kW]
ASTRID	0.100	0.276	0.002	0.007	0.001
ASTRID	0.580	1.6	0.36	8.3	1.7
ESRF	6	0.86	20.7	4922	1000
LEP	100	0.1	665	2950000	29000

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Large Hadron Collider på CERN



2×7 TeV
27 km omkreds
Magnetfelt: 8.3T
Lagret energi: 700 MJ
Antal magneter: 1232
Magnet længde 14.8 m



SLAC 100 GeV

4 km e^+ source

IP

collider arcs

final focus

existing linac

e^+ return line

damping rings

polarized e^- source

NLC 0.5 - 1.5 TeV

Pre-Linac 8 GeV (S)

Compressor

136 MeV (L)

Damping Ring (UHF)

2 GeV (S)

3.85 GeV (S)

Electron Main Linac 240-490 GeV (X)

Compressor

9.5 km

10 km

Second Detector

Final Focus

Dump

Detector

Final Focus

Dump

9.5 km

Pre-Damping Ring (UHF)

3.6 GeV (S)

2 GeV (L)

136 MeV (L)

Compressor

Pre-Linac 8 GeV (S)

3.85 GeV (S)

Positron Main Linac 240-490 GeV (X)

Compressor

3.85 GeV (S)

9.5 km

Target

Damping Ring (UHF)

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Acceleratorer i verden

Tallene er fra år 2000.

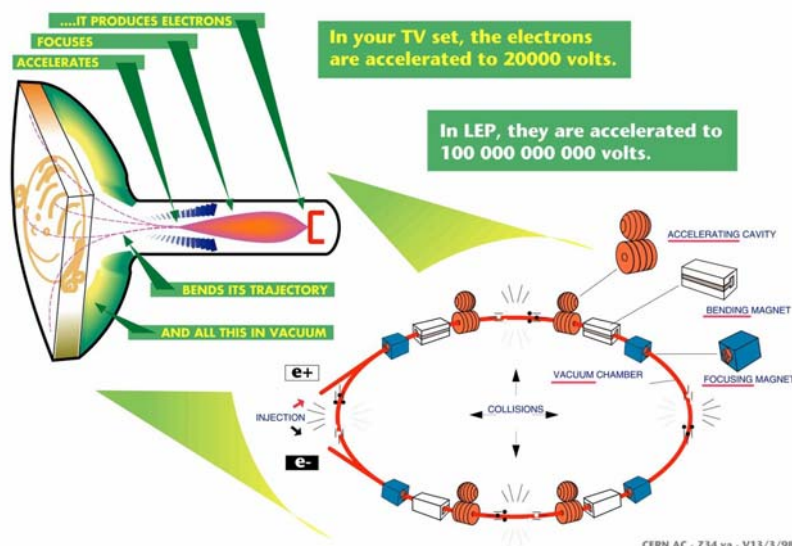
Ca 55% benyttes i industrien, 35% i medicin og 10% til forskning

Anvendelse	Ca antal
Ionimplantation og overfladebehandling	7000
Andre acceleratorer i industrien	1500
Forskning (undtagen kerne- og partikelfysik)	1000
Strålingsterapi (gammastråling)	5000
Isotopproduktion til medicinsk brug	200
Partikelterapi	20
Synkrotronstrålingskilder	70
Forskning i kerne- og partikelfysik	110
TOTAL	15000

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

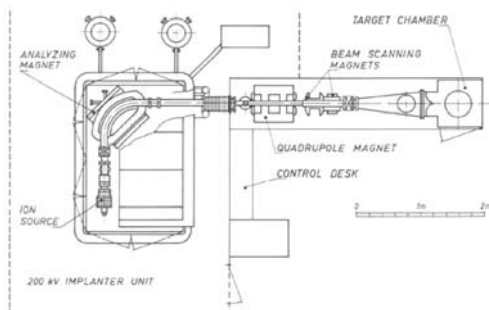
Små og store acceleratorer

DID YOU KNOW YOUR TELEVISION SET IS AN ACCELERATOR ?



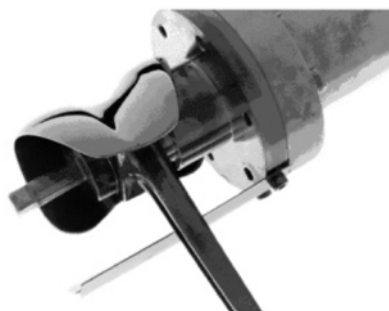
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Ionhærdning



Layout of Series 1090 High Current Implanter in the standard configuration

Til venstre ses en kommerciel ionaccelerator til ionhærdning. Det er en Danfysik model 1090, der kan levere 1-10mA med en energi på 20-200keV, dvs op til ca $5 \cdot 10^{16}$ ioner per sekund. Beamet kan scannes så et areal på op til 40*40 cm² kan dækkes.

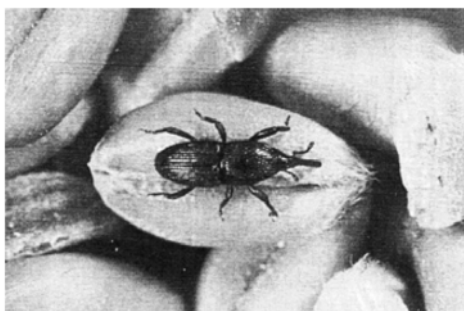


Typisk benyttes kvælstofioner med en energi på ca 100keV. Ionerne 'udfylder' mikrorevner og 'cracks' samt fylder tomme pladser i metalgitteret. Effekten kan også i nogle tilfælde være kemisk som f.eks. ved dannelse af kromnitrid på overfladen af stål med højt kromindhold.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Sterilisering af fødevarer

Sterilisering med stråling er meget mere effektivt end med varme (pasteurisering). En dosis på 10kGy svarer til en temperaturstigning på 2.5 grader (for vand), og er meget mere skånsom overfor næringsindhold og struktur. Bestråling af fødevarer er imidlertid er følsomt emne.



Bestråling af fødevarer er p.t. tilladt i mere end 40 lande, og det anslås, at over 500000 tons bestråles årligt på verdensplan. Omkostningerne er i størrelsesordenen 1kr/kg.

Mange steder forlanges bestråling for at forhindre spredning af skadedyr.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Sterilisering af andre emner

Stråling benyttes meget til sterilisering af engangsudstyr til medicinsk brug (sprøjter, kanyler etc.). Her benyttes enten en elektronaccelerator til at frembringe gammastråling, eller en gammakilde, som f.eks. Kobolt-60. Med gamma/røntgen bliver de bestrålede emner ikke aktiveret, i modsætning til når man anvender partikelstråling til formålet.



I de sidste år har US Postal Service benyttet elektronacceleratorer (10MeV, op til 50mA) til at sterilisere post i bl.a. Washington DC området.

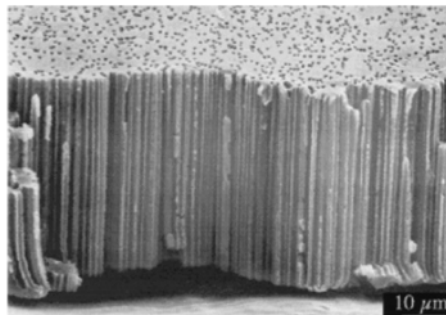
Formålet er at uskadeliggøre f.eks. miltbrandbakterier. Man sigter efter en dosis på 50kGy, og kan således behandle 3.6 ton post i timen med ét anlæg.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Fremstilling af track-etched filters

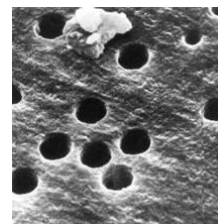
Disse filtre produceres typisk ved at beskyde f.eks. et polycarbonat folie med alfapartikler, for derefter at ætse med f.eks. NaOH. Ætsning foregår fortrinsvis langs sporet partiklerne har efterladt.

Man kan købe filtre med porediameter ned til 10 nanometer, og med varierende poreantal/areal.



Foroven til højre ses et filter lavet med tunge ioner på GSI Darmstadt.

Til højre et nærbillede af et kommercielt filter (NanoPore)



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Litografi

For at kunne lave små strukturer med litografi kræves lille bølglængde af den stråling der benyttes. De to typer der er relateret til acceleratorer er elektron – og UV litografi.

Som lyskilde til litografi er synkrotronstråling særligt egnet, på grund af sin brillians. P.t. arbejdes der på udvikling af Extreme Ultraviolet (EUV) litografi, der anvender bølglængder ned til 13nm.

Endnu mindre strukturer kan laves med elektronlitografi. Her kan elektronstrålen have en diameter på få nm, men det er en seriel og derfor langsom proces.

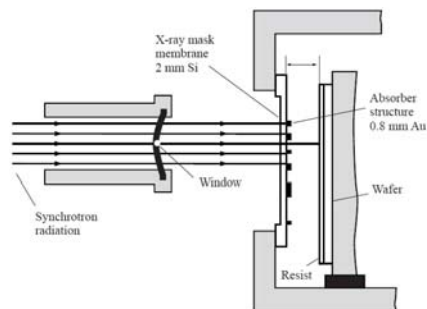
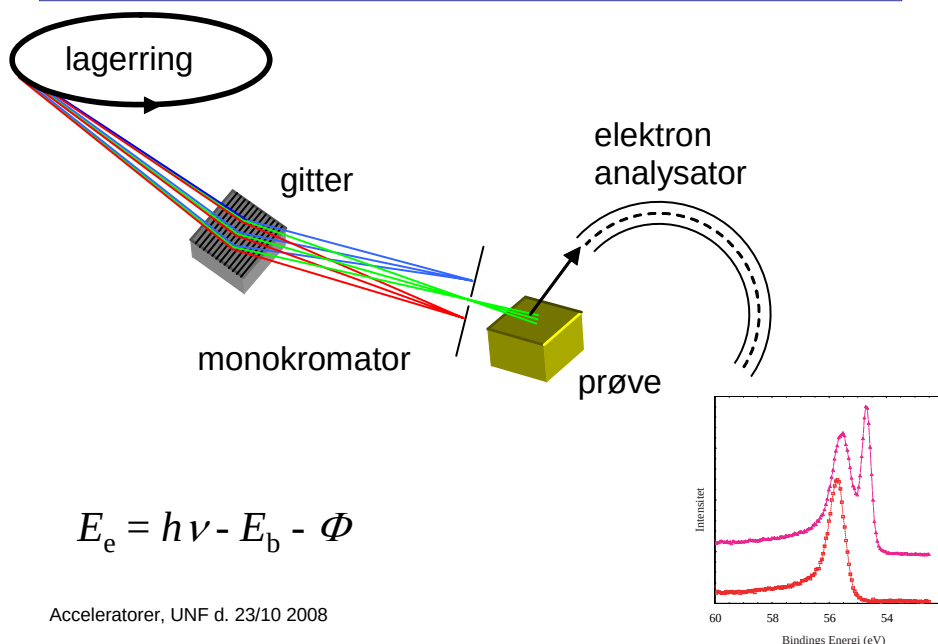


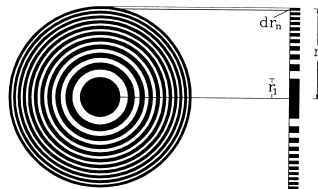
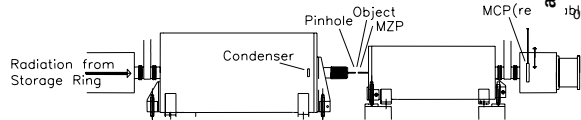
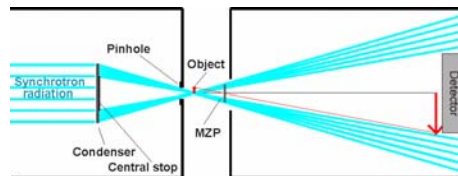
Fig. 13.12 Principle of lithography.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

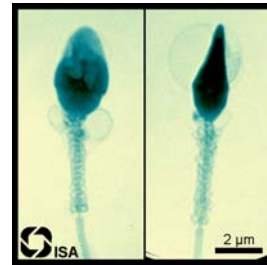
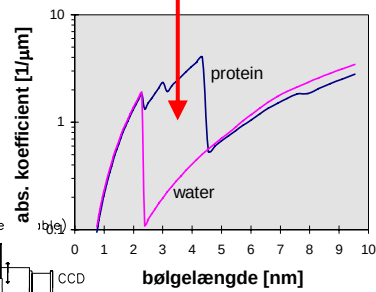
Typisk eksperiment med synkrotronstråling



Røntgenmikroskop



'Vand'vindue



Datering med kulstof-14 (^{14}C) metoden

Kulstof i naturen findes i tre isotoper:

^{12}C er stabil og udgør ca. 98.6%

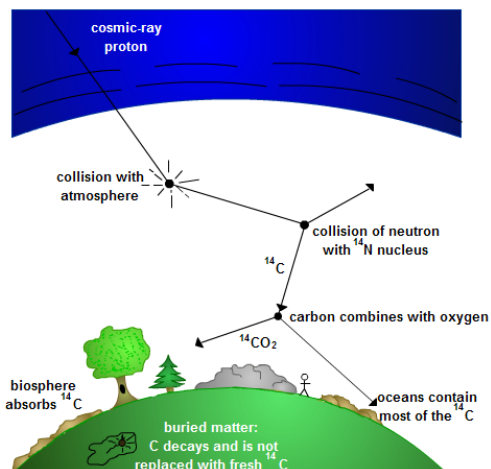
^{13}C er stabil og udgør ca. 1.4%

^{14}C udgør ca. 10^{-10} %

^{14}C er radioaktiv (β -henfald).

^{14}C har en halveringstid på ca. 5730 år.

Den dannes hele tiden i en reaktion i ^{14}N forårsaget af kosmisk stråling.



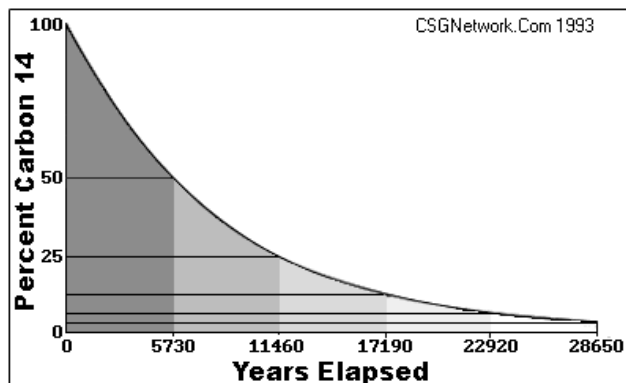
Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Datering med kulstof-14 (^{14}C) metoden

Biologiske organismer udveksler hele tiden kulstof med atmosfæren, og vore legemer indeholder derfor samme isotopfordeling som den der er i atmosfæren.

Når en organisme dør, ophører udvekslingen, og ^{14}C henfalder nu uden at blive erstattet.

Efter 5730 år er der således halvdelen tilbage, efter 11460 år en fjerdedel etc.



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Datering med kulstof-14 (^{14}C) metoden

Oprindelig metode: Tæl de radioaktive henfald i en stor mængde af materialet. Der er ca 14 henfald/gram/minut.

Ulemper: Meget materiale, langsom metode og stor usikkerhed.

Moderne metode:

Accelerator baseret spektroskopi (AMS).

Baseret på optælling af enkeltatomer sorteret efter deres masse.

Der er ca $5 \cdot 10^9$ ^{14}C /g



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Tandemacceleratoren på Fysisk Institut

Datering med kulstof-14 (^{14}C) metoden

Grauballemanden er blevet dateret på AMS anlægget i Århus til at stamme fra ca 290 f.Kr. Usikkerheden er i størrelsesordenen ± 50 år.

Indtil da var der stor usikkerhed om hans alder.

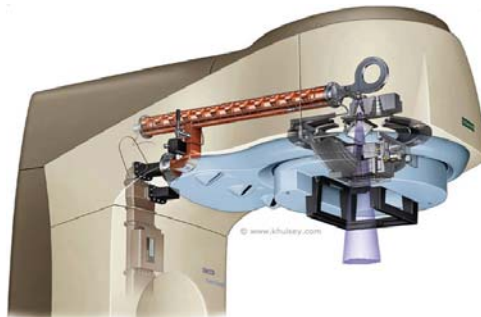


Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Medicinsk anvendelse af acceleratorer

Til strålingsterapi med fotoner (gammastråling) anvendes elektronacceleratorer der producerer strålingen via kollision i et target.

Maskinen kan rotere om patienten for at afsætte så megen energi som muligt i det ønskede område.



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

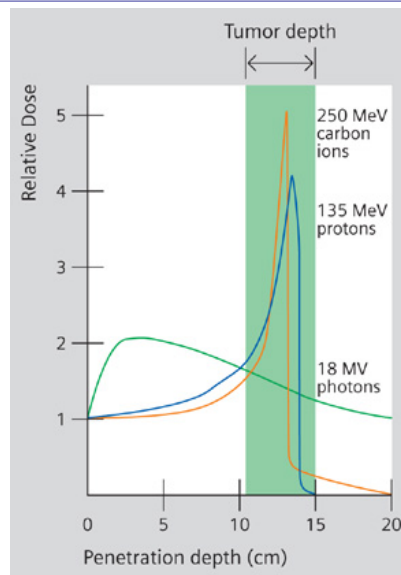
Partikler og fotoner: Energiafsætning

Som det ses af figuren til højre, afsættes energien fundamentalt forskelligt for partikler og fotoner.

Partikler afsætter hovedparten af energien til sidst, i den såkaldte *Bragg peak*.

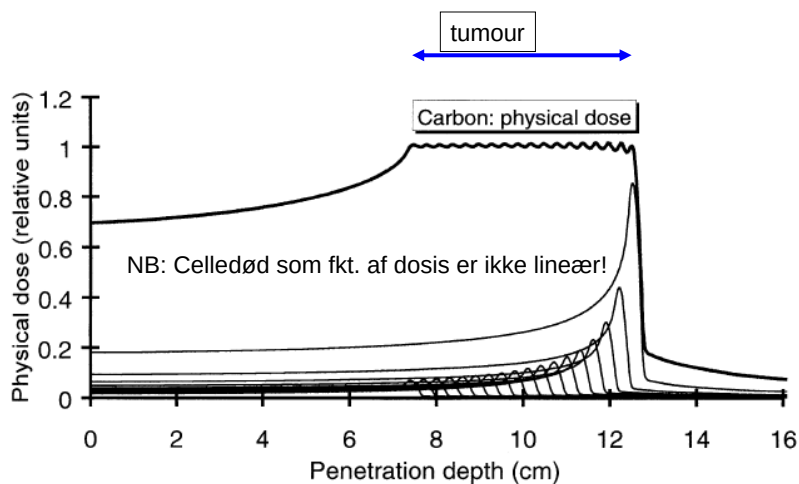
Det betyder, at man kan koncentrere stråledosen til et meget begrænset område, og derved i meget højere grad end med fotoner undgå bestråling af omkringliggende væv.

Effekten er endnu mere udtalt for tungere partikler, som f.eks. kul- eller iltioner.

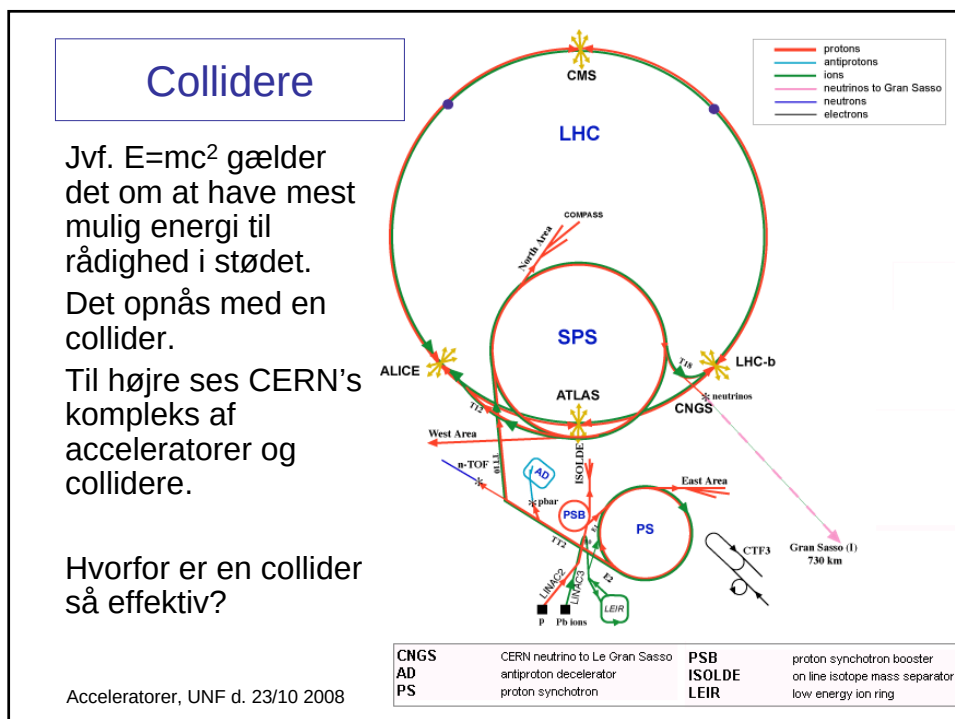
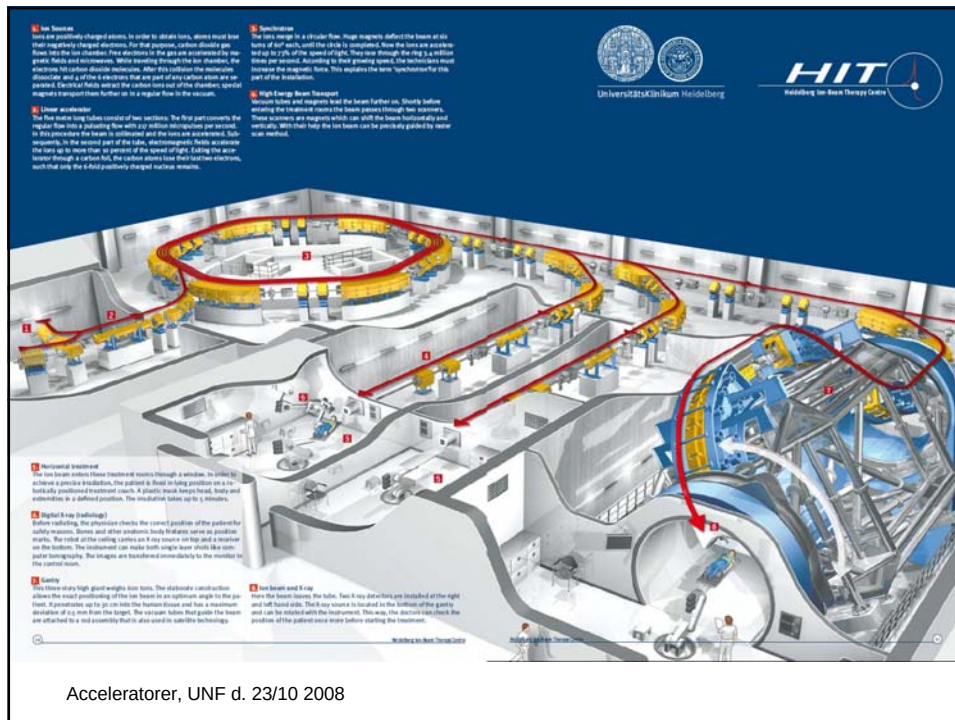


Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

SpreadOutBraggPeak



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008



Collidere : Princip (gælder kun ultrarelativistiske partikler)

Kollision med fast target

Før 

Efter 

Energi til rådighed i stødet er

$$E_s = \sqrt{2mc^2 E_m}$$

Eksempel:

$E_m = 14 \text{ TeV}$, $m = 938 \text{ MeV}$

$E_s = 162 \text{ GeV}$

Kollision med modsat rettet target

Før 

Efter 

Energi til rådighed i stødet er

$$E_s = 2E_m$$

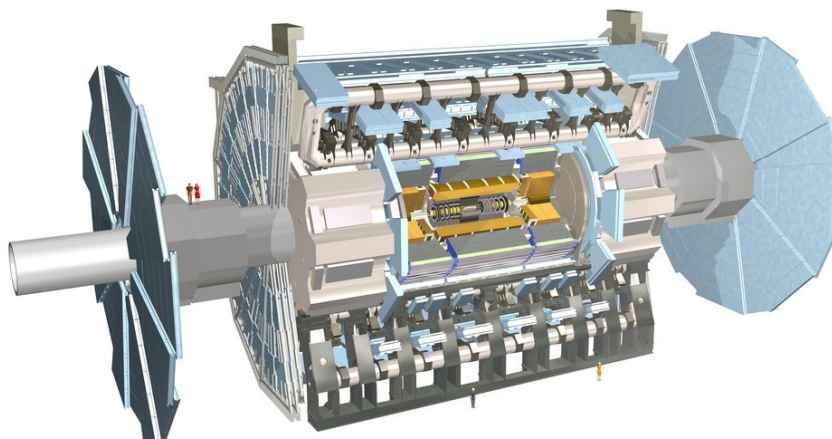
Eksempel:

$E_m = 2 \cdot 7 \text{ TeV}$, $m = 938 \text{ MeV}$

$E_s = 14 \text{ TeV}$

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

ATLAS detektoren



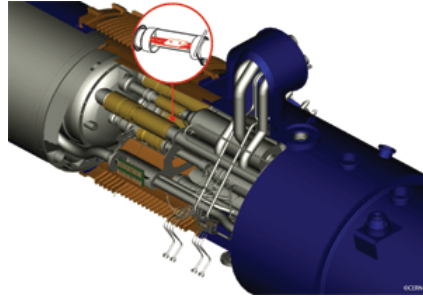
ATLAS: 46 meter lang, 25 meter høj, 25 meter bred.
Vægt: 7000 ton

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

LHC uheldet d. 19/9 2008

Geneva, 16 October 2008.

Investigations at CERN¹ following a large helium leak into sector 3-4 of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel have confirmed that cause of the incident was a faulty electrical connection between two of the accelerator's magnets. This resulted in mechanical damage and release of helium from the magnet cold mass into the tunnel.



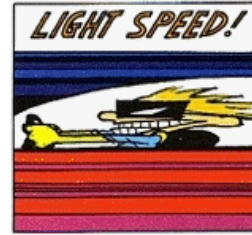
Investigations have shown that a faulty electrical connection between two magnets (shown in red) was the cause of the incident in sector 3-4 of the LHC on 19 September.

Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008

Higgs partikel i 2009?



Acceleratorer, UNF d. 23/10 2008



Læs selv mere:

www.isa.au.dk indeholder mange oplysninger om 'vores' synkrotron på Århus Universitet. Billeder, beskrivelser, eksperimenter m.m. Under '*Information på dansk*' kan du finde et link til denne præsentation i pdf format.

www.cern.ch indeholder en kolossal mængde materiale om CERNs acceleratorer og eksperimenter. Meget af det er rigtig godt lavet, og nemt at gå til for enhver. Der er meget om LHC og masser af gode billeder.

Spørgsmål?