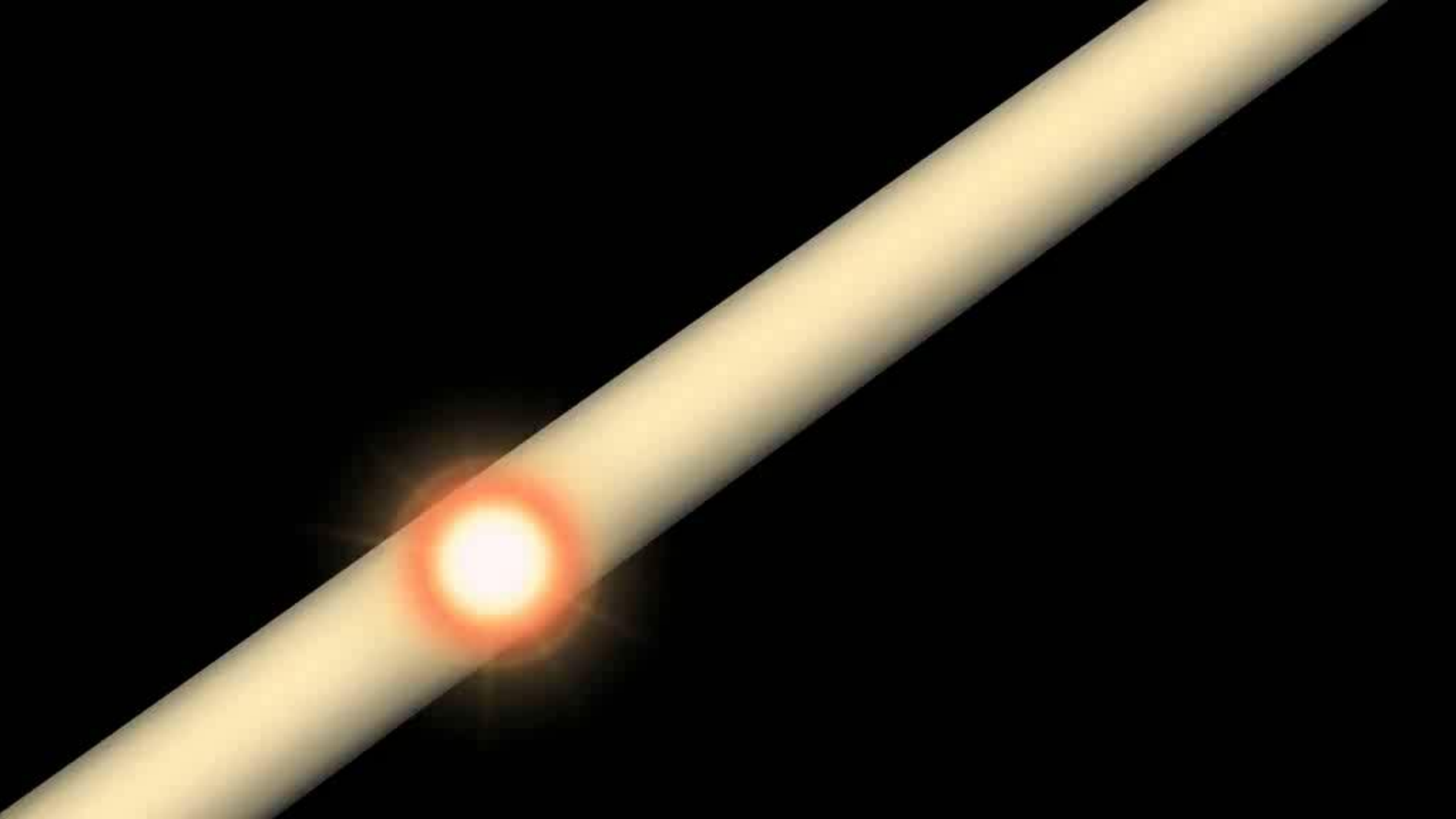


Introduktion til accelerators og detectorer

03-02-2025

Sune Jakobsen (CERN EP-DT-TP)







Acceleration og energiskala



Acceleration og energiskala

En ladet partikel kan accelereres ved hjælp af et elektrisk felt.

Fx elektroner har en negativ ladning, så de kan accelereres mod en positiv pol

I højenergi fysik bruger vi en energiskala vi kalder for "elektronvolt" og er forkortet eV.

1 eV er energien af en partikel med ladning 1 (fx en elektron) accelereret i et spændingsfelt på 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Energi i nogle CERN accelerators:

LINAC4: 160 MeV = $160 \cdot 10^6 \text{ eV}$

SPS: 450 GeV = $450 \cdot 10^9 \text{ eV}$

LHC: 6.8 TeV = $6.8 \cdot 10^{12} \text{ eV}$

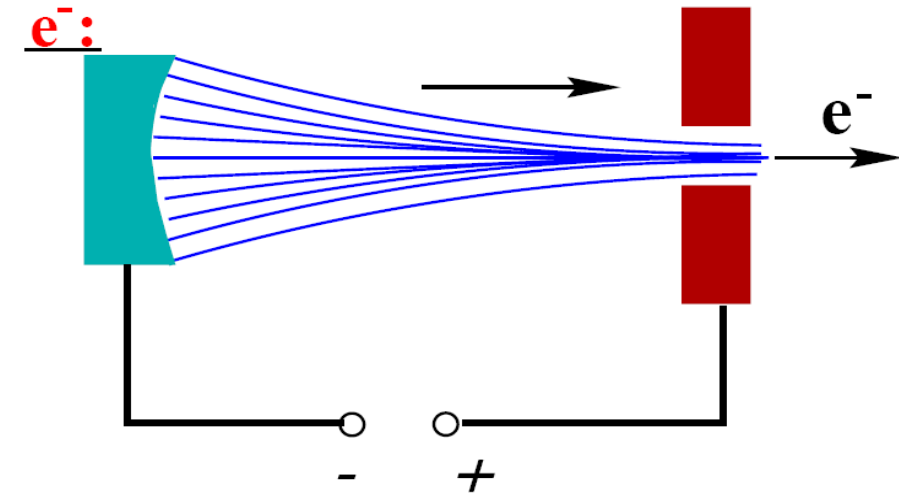
I praksis kan man ikke accelerere med et simpelt spændingsfelt da man så skulle bruge fx 10^{12} V .

Side note: Som slang på CERN kan man ofte høre elektrovolt også brug som enhed for impuls og masse:

Idet E (energi) = m (masse) c^2 (lysets hastighed i vakuum) =>

$$m = E/c^2$$

Så når folk på CERN siger at fx Higgs-boson-massen er ca 125 GeV, så mener de 125 GeV/c²





Lineær acceleratører



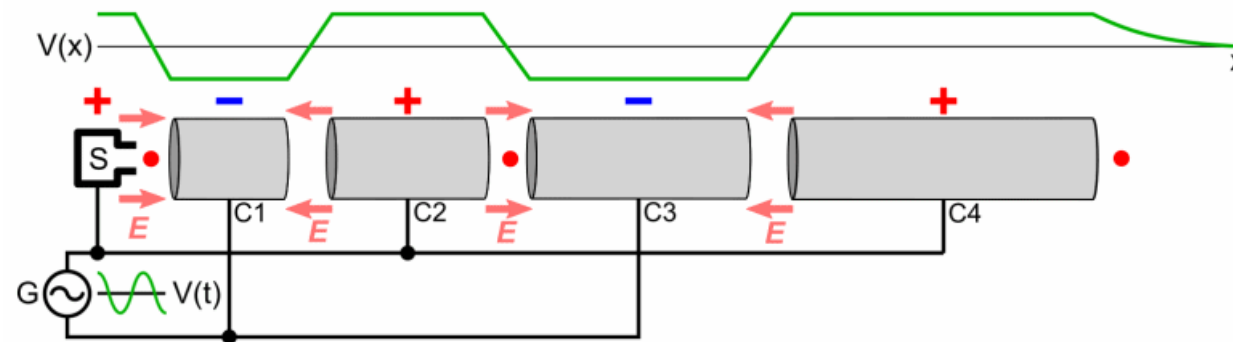
Lineære accelerators – accelerations principper

Oprindelig lineær accelerators:

Hver anden elektrode er skiftevis positive/negativ.

Hver elektrode ny elektrode skal være længere for at tilsvare den afstand partiklen bevæger sig.

Partikel strømmen er IKKE kontinuert, men kommer ud i partikelbunder.



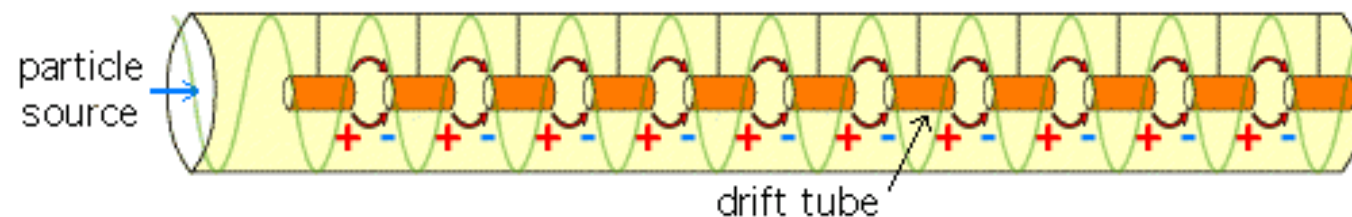
Moderne lineær accelerators:

Acceleration med elektrisk felt.

Feltet accelererer lige meget i fremad og bagud vendt retning, men partiklerne er skærmet for feltet af "drifts rør" når feltet vender bagud.

Hver nyt drift rør skal være længere for at tilsvare den afstand partiklen bevæger sig (figuren viser et eksempel fra ultra relativistiske energier, hvor længden af hvert drift rør er identisk).

Partikel strømmen er IKKE kontinuert, men kommer ud i partikelbunder.





Lineær acceleratorer på CERN - Forhenværende

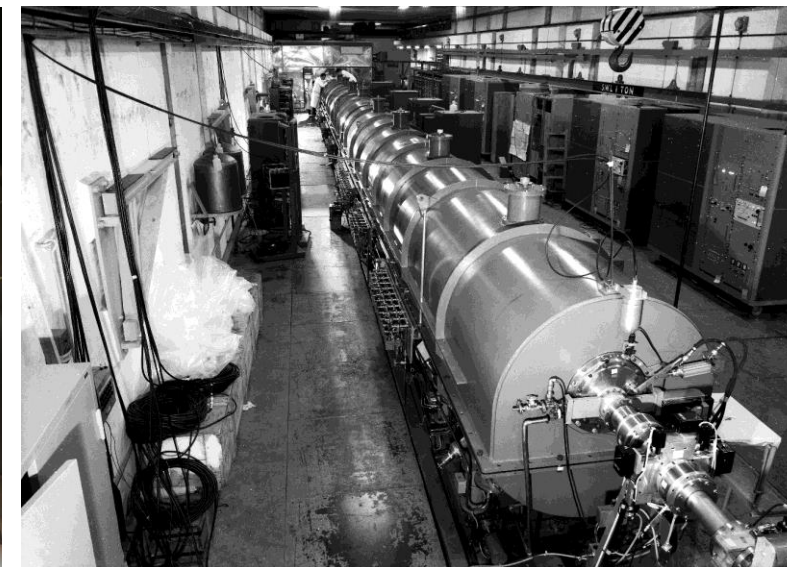
LINAC1

Operation: 1958-1978 (-1992 for ioner)

Partikler: Protoner, deuterium, alpha, oxygen ioner, svovl ioner mv.

Energi for protoner: 50 MeV

Maksimal strøm af protoner: 70 mA



LINAC2:

Operation: 1978-2018

Partikler: Protoner

Energi: 50 MeV

Maksimal strøm af protoner: 150 mA
senere opgraderet til 180 mA

Længde: 36 m





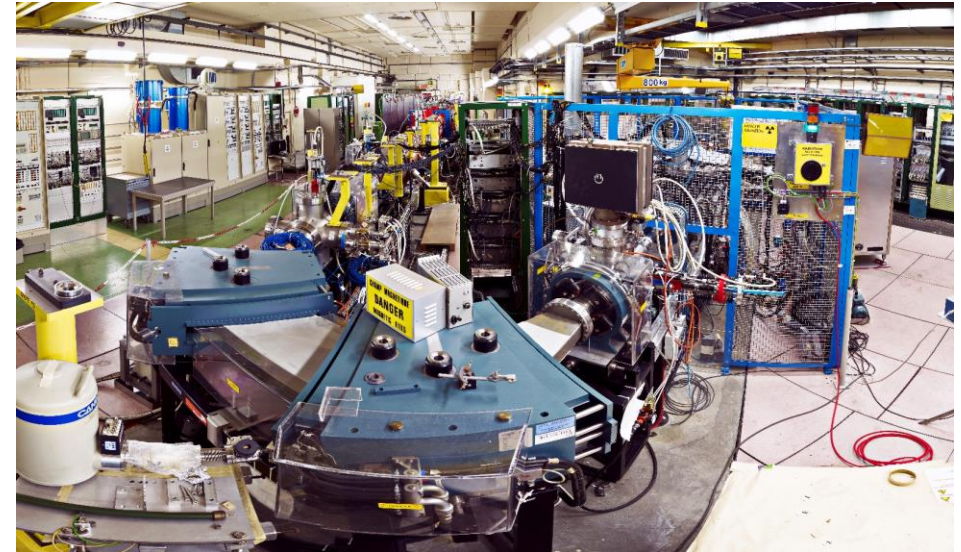
Lineær acceleratorer på CERN - Nuværende

LINAC3:

Operation: 1994-

Partikler: Ioner (primært bly)

Energi: Afhængigt af ion-typen



LINAC4:

Operation: 2020-

Partikler: Hydrogen-minus ioner (hvor elektroner så fjernes så der kun er protoner tilbage)

Energi: 160 MeV

Maksimal strøm af protoner: 40 mA

Længde: 86 m

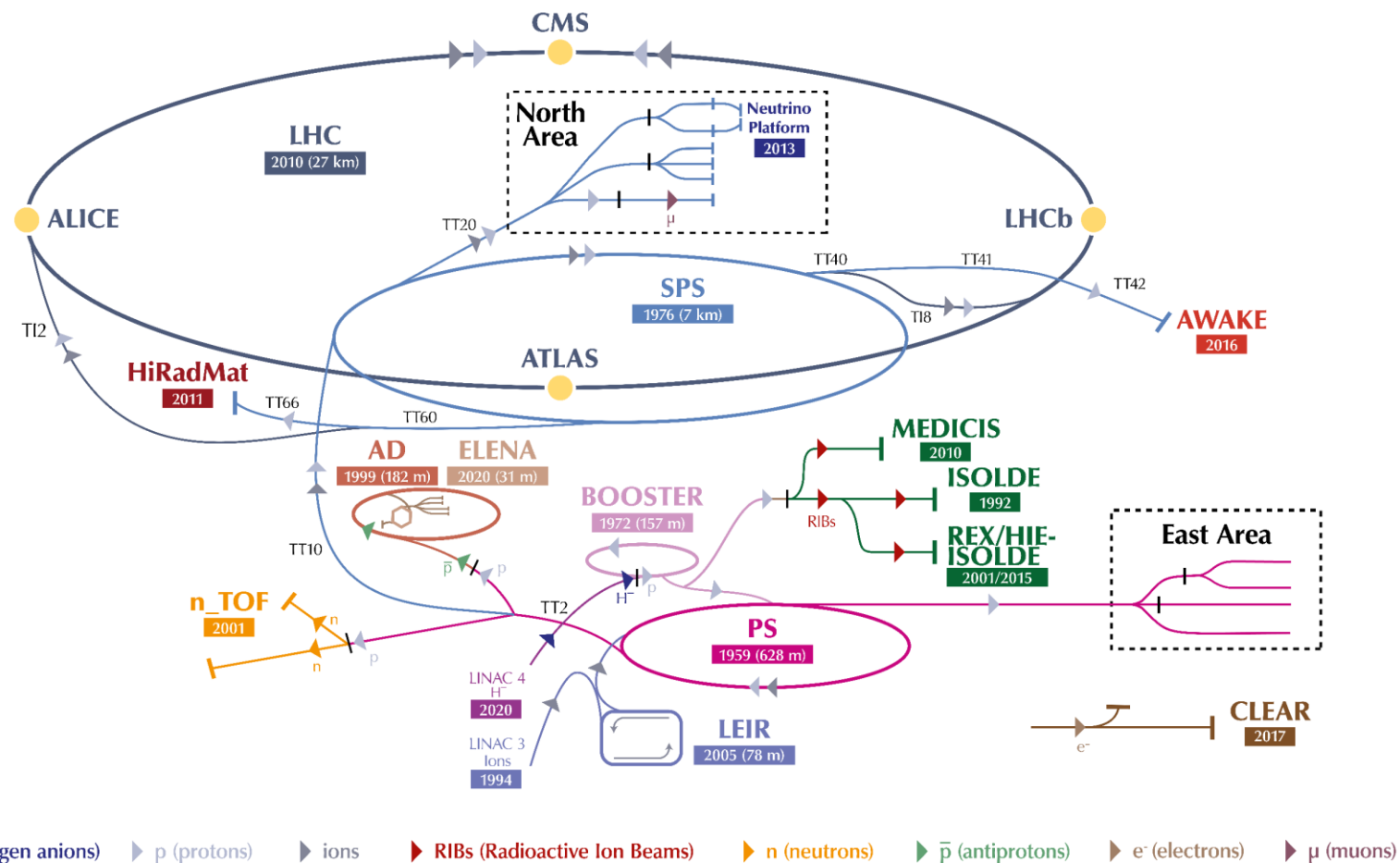




Lineær acceleratører som en del af CERN accelerator kompleks

Oversigt over CERN nuværende acceleratører

LINAC3 og LINAC4 er begyndelsen på det store accelerator kompleks



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



Linærer accelerators - Begrænsninger

Reminder: LINAC4:

Energi: 160 MeV

Længde: 86 m

Gennemsnitlig acceleration per længde: $160 \text{ MeV} / 86 \text{ m} \approx 2 \text{ MeV/m}$

En 7 TeV (LHC energi) linærer accelerator med tilsvarende teknologi skal så være: $7 \text{ TeV} / 2 \text{ MeV/m} \approx 3500000 \text{ m} = 3500 \text{ km}$ lang

Der er imidlertid andre teknologier (fx CLIC) som kan give acceleration up til $\sim 100 \text{ MeV/m}$, men det er MEGET energikrævende.



Cirkulære accelerators



Cirkulære accelerators – Accelerations princip

Acceleration i cirkulære accelerators:

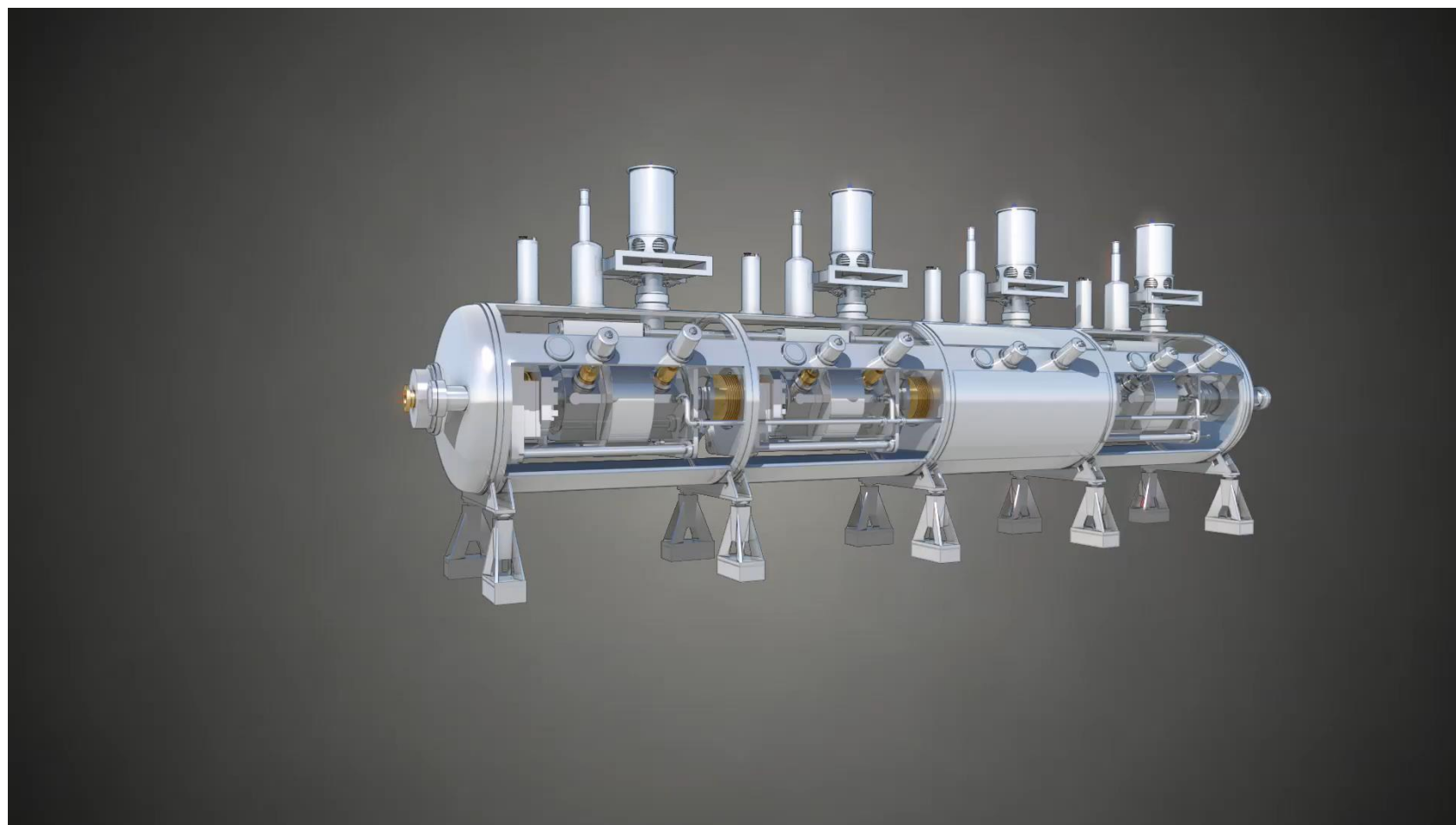
Acceleration foregår i "hulrum" (engelsk cavities).

Radio frekvens energi bliver pulset meget præcist ift. hvornår partiklerne passerer.

Korrekt synkroniseret partikler bliver derved accelereret fremad.

Partikel-bundt strukturen fra den lineære accelerator er nødvendig for at princippet virker.

For at maksimere den del af energien som bliver brugt til at accelere partiklerne (minimerer tab), så er moderne "hulrum" ofte superledende.



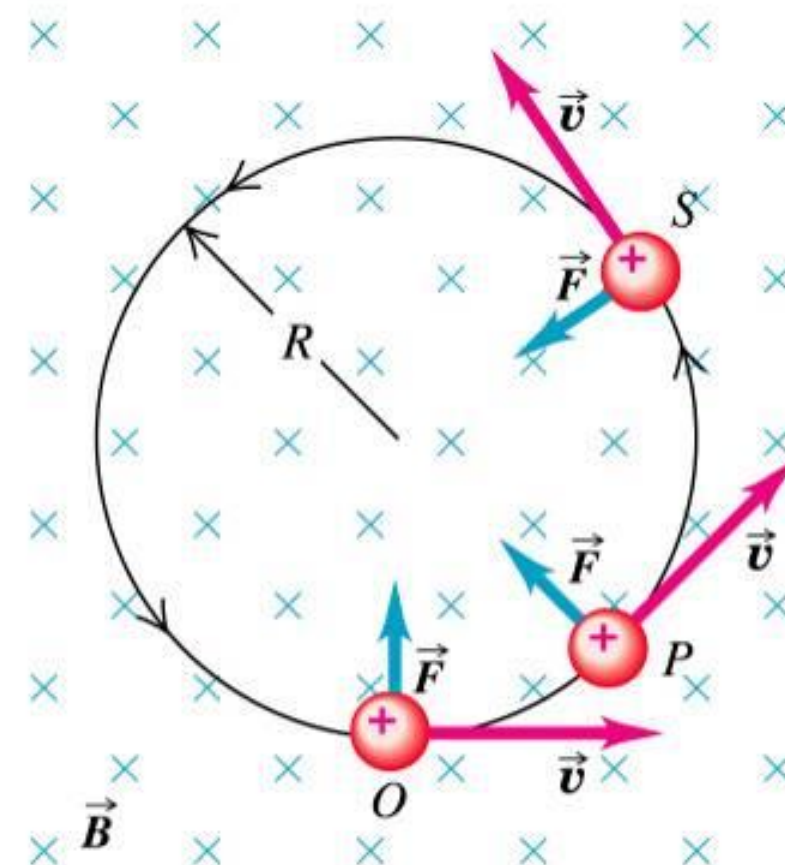
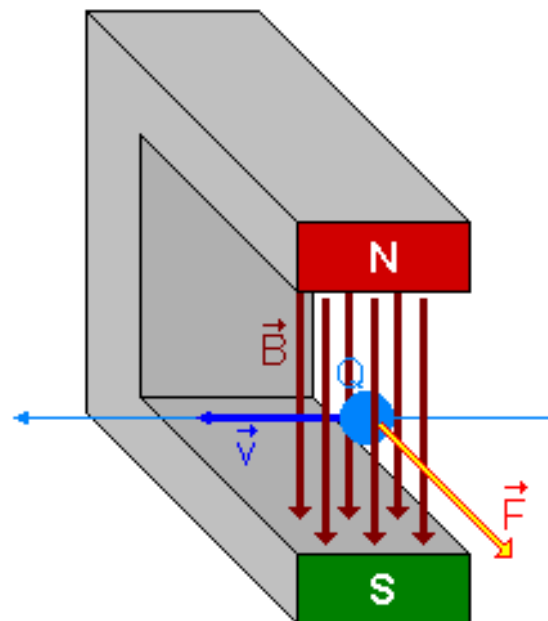
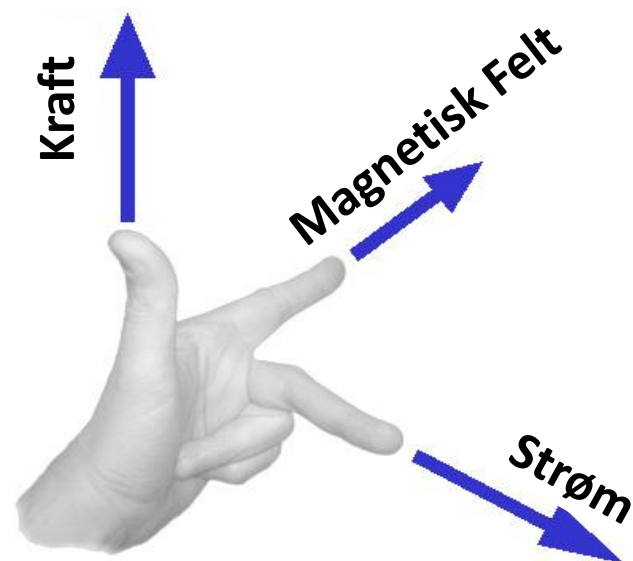


Cirkulære accelerators – Afbøjnings princip

Afbøjning af ladede partikler:

En ladet partikel i et magnetfelt bliver afbøjet.

Venstrehåndsregel:



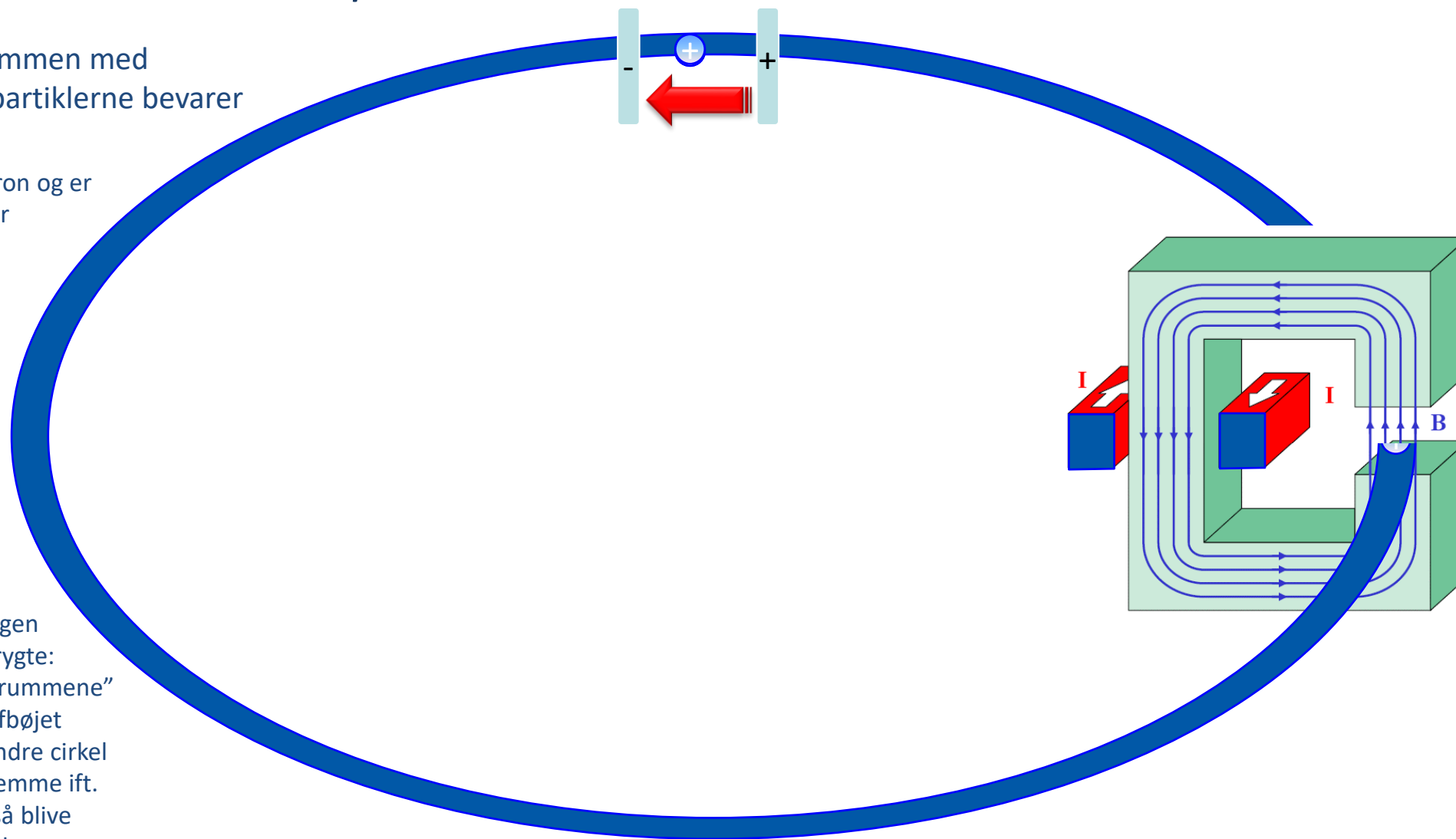


Cirkulære accelerators – Princip

Det magnetiske felt øges sammen med energien af partiklerne, så partiklerne bevarer samme bane.

Dette kaldes for en synkrotron og er princippet bag de cirkulære accelerators på CERN

I realiteten er synkroniseringen nærmere end man kunne frygte: Synkroniseringen med "Hulrummene" gør at fx en lidt for meget afbøjet partikel rejser på en lidt mindre cirkel og derfor er lidt for langt fremme ift. "hulrummet". Partiklen vil så blive accelereret lidt mindre. På den udjævner "hulrummene" mange effekter.





Cirkulære accelerators – Superledende magneter

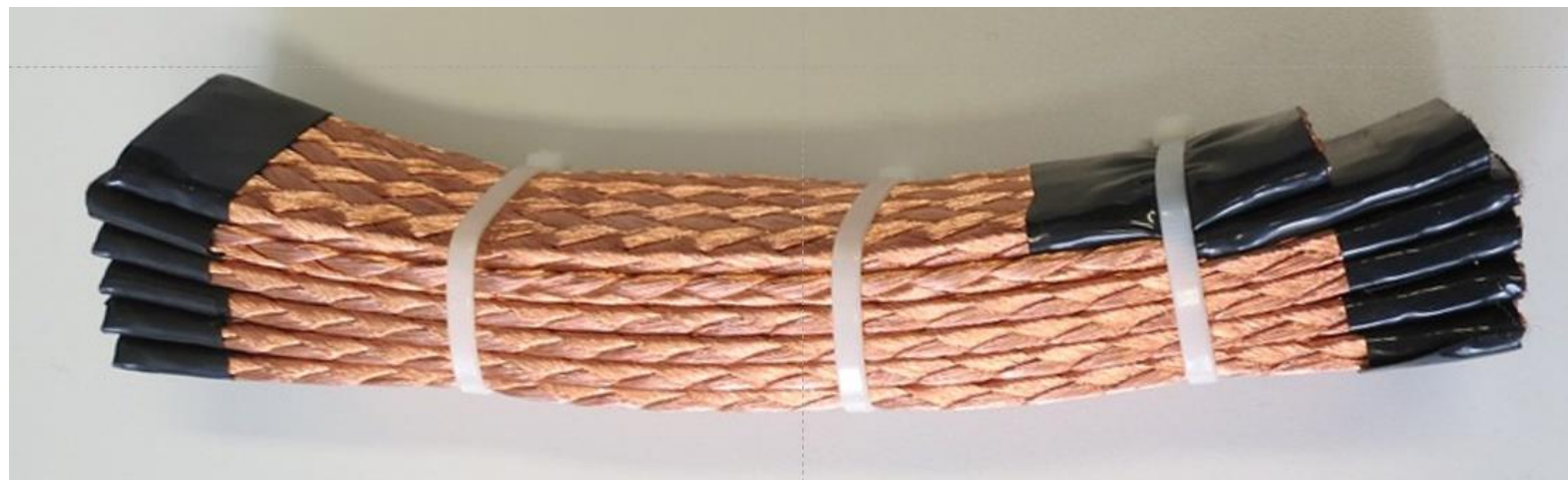
For klassiske elektromagneter er der en **øvre grænse på ca. 2 T.**

Det kræver meget højt strøm at lave et kraftigt elektromagnetisk felt

Derfor er meget leder (fx kobber) nødvendigt og det kræver plads.

Der er stadig store tab af energi til varme, som så skal ledes væk.

Kobber til 13000 A (som bruges i LHCs magneter): $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} = 1600 \text{ mm}^2$
(dertil kommer plads til køling)



Superledende materialer giver mulighed for at lave magneterne signifikant mere kompakte

Ingen tab (da ingen modstand).

Kan bære store strømstyrker i en lille mængde materiale.

Kræver nedkøling til nær det absolutte nulpunkt ($\sim -273 \text{ }^\circ\text{C}$)

Superleder (niobium–titanium) til 13000 A + support materiale: $\sim 1 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \approx 16 \text{ mm}^2$





Cirkulære accelerators – Vakuum

Det er kritisk at de accelererede partikler ikke støder ind i noget på deres vej.

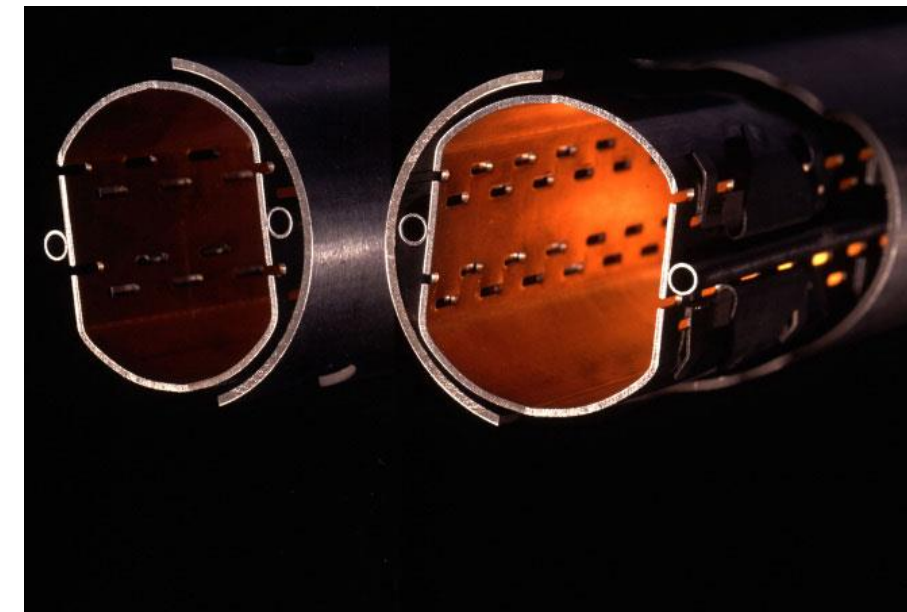
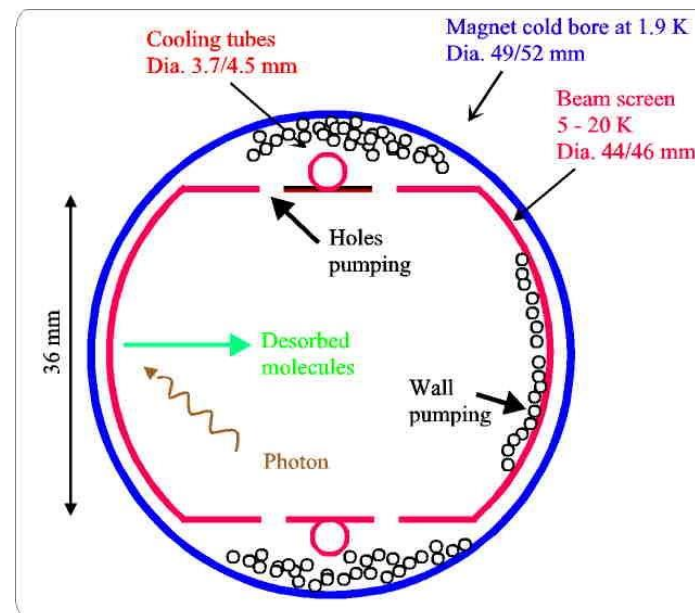
Specielt i cirkulære accelerators hvor partiklerne kan opholde sig længe er et godt vakuum derfor helt essentiel.

Et tryk på $\sim 10^{-10}$ mbar er normalt i fx LHC.

De kolde sektioner bliver vakuum opnået ved at molekylerne fanges på kolde overflader.

De få gasser som ikke fanges på de kolde overflader pumpes ud med specielle turbovakuum pumper

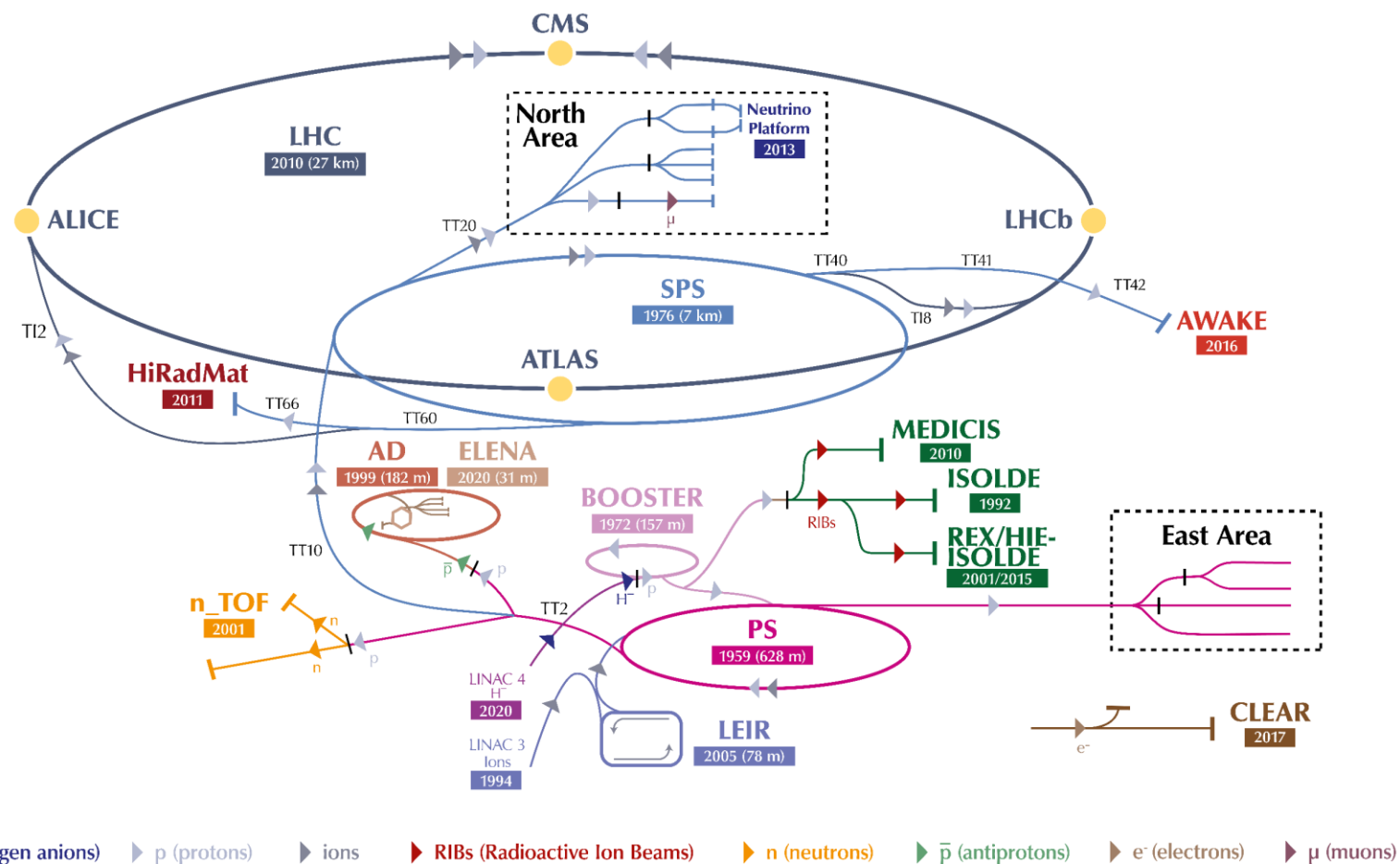
De varme sektioner bliver vakuum opnået ved at molekylerne fanges på specielle NEG (Non-evaporable getter) overflader som virker som fluepapir.





Cirkulære accelerators som en del af CERN accelerator kompleks

Oversigt over CERN nuværende accelerators



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



Cirkulære accelerators - Booster

Operation fra: 1972-

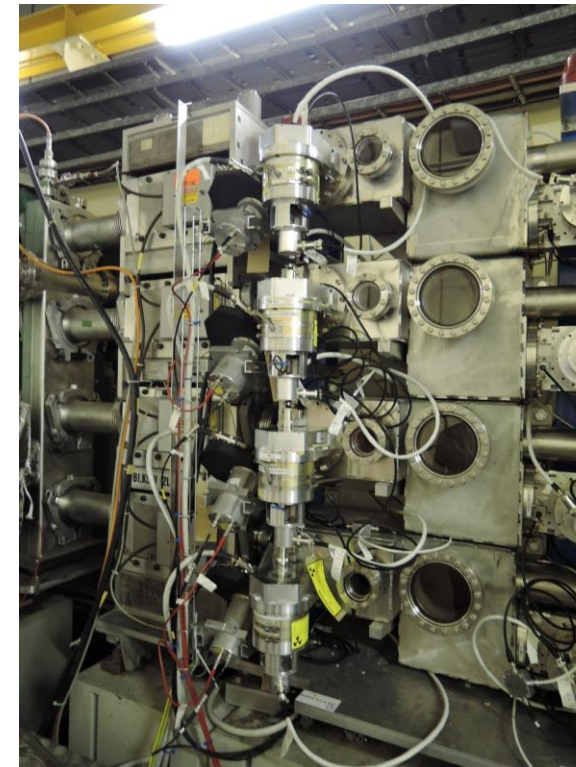
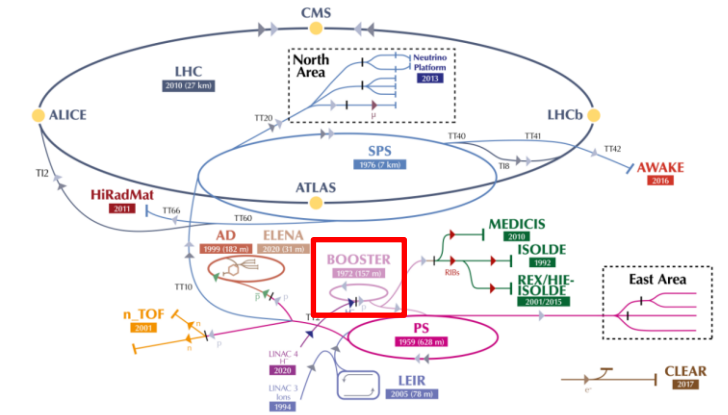
Top energi: 2 GeV (opgraderet fra oprindelig 1.4 GeV)

Dybde: Overflade

Omkreds: 157 m

Beam rør: 4 beam rør oven på hinanden og beam i én retning

Dipolmagnetar: 0.87 T normalt ledende





Cirkulære accelerators – Proton Synkrotron (PS)

Operation fra: 1959

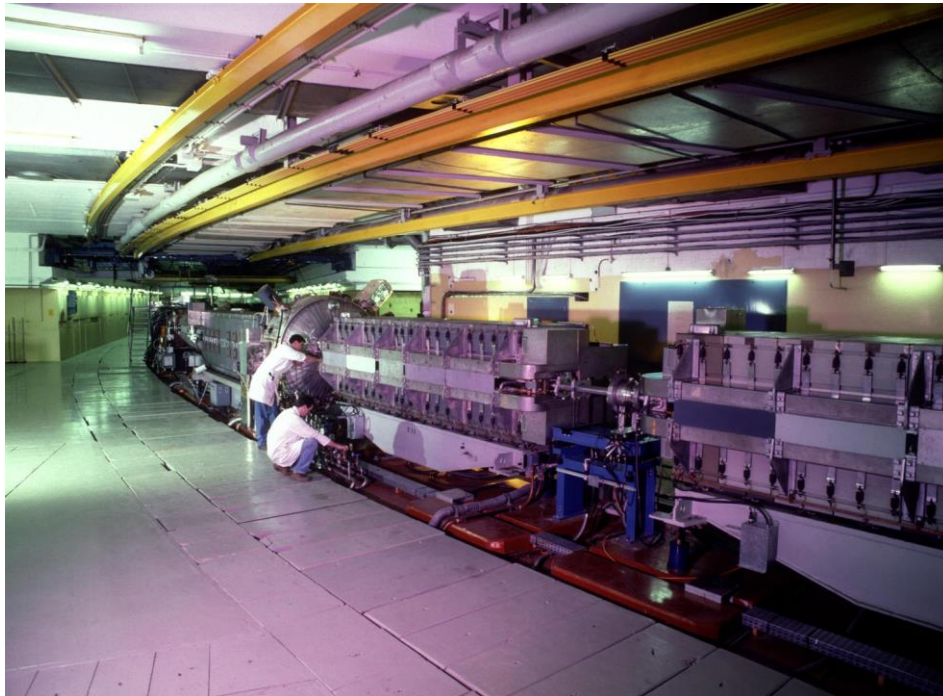
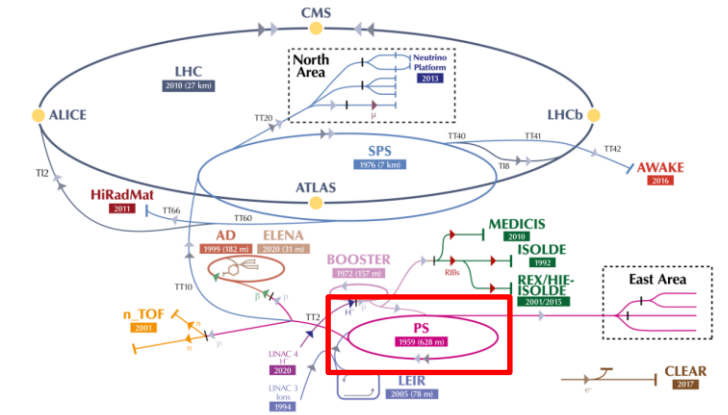
Top energi: 26 GeV

Dybde: Halvt nedgravet

Omkreds: 628 m

Beam rør: 1

Dipolmagnetar: 1.24 T
normalt ledende





Cirkulære accelerators – Proton Synkrotron (PS) (personlig optagelse)





Cirkulære acceleratoreer – Super Proton Synkrotron (SPS)

Operation fra: 1976

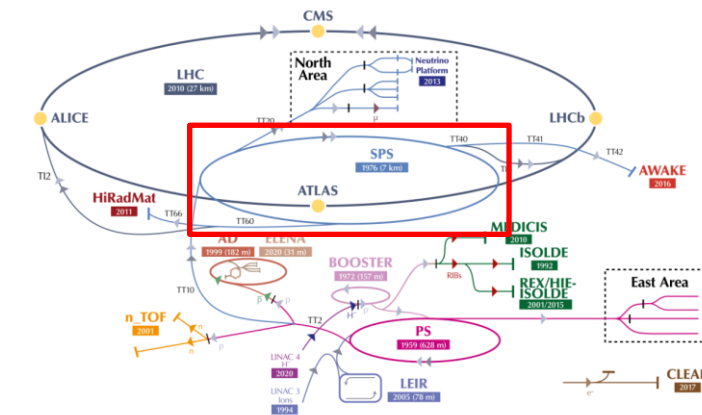
Top energi: 450 GeV

Dybde: ~40 m

Omkreds: 7 km

Beam rør: 1

Dipolmagnetner: 2.0 T normalt ledende





Cirkulære accelerators – Super Proton Synkrotron (SPS) (personlig optagelse)





Cirkulære accelerators – Large Hadron Collider (LHC)

Operation fra: 2008

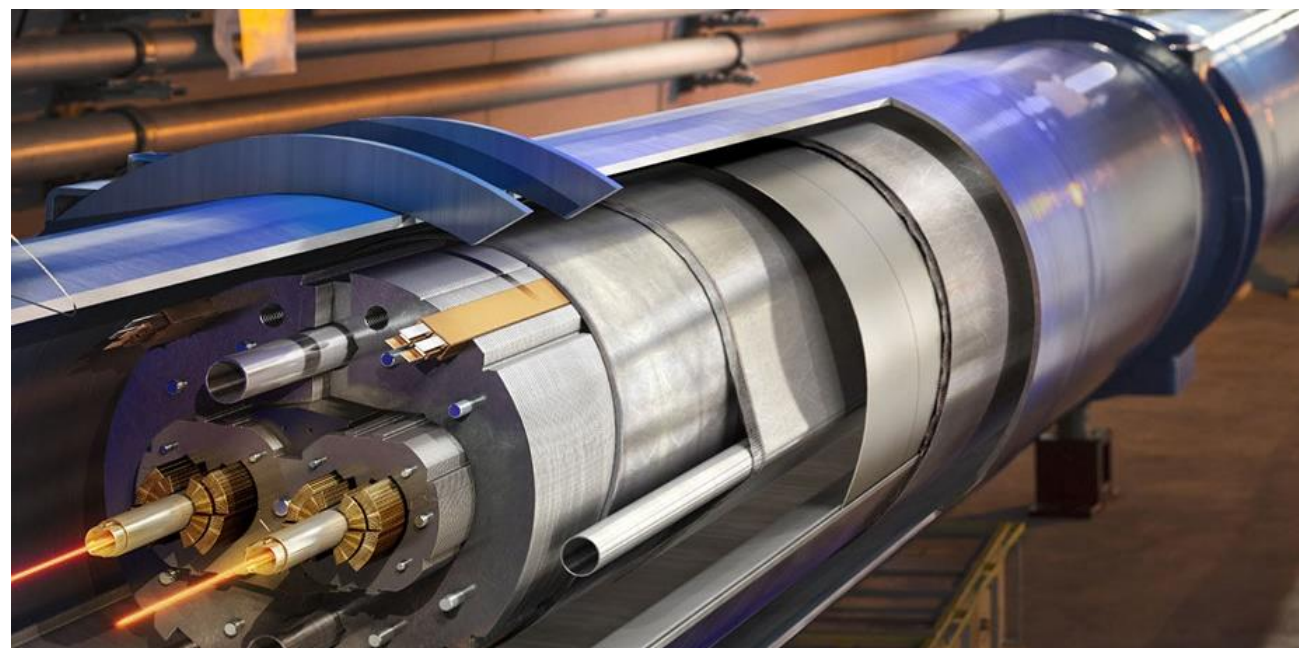
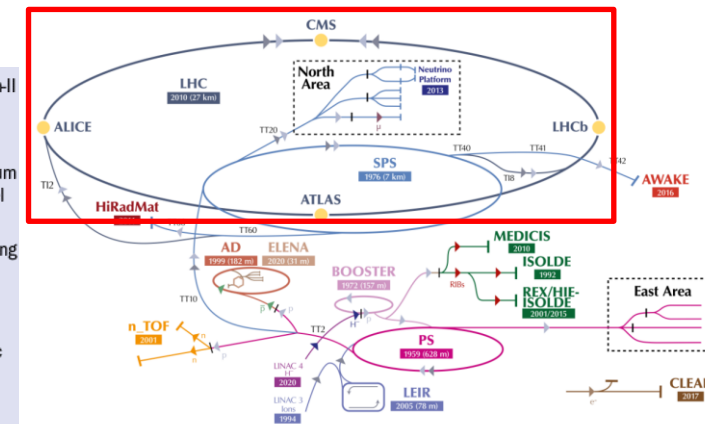
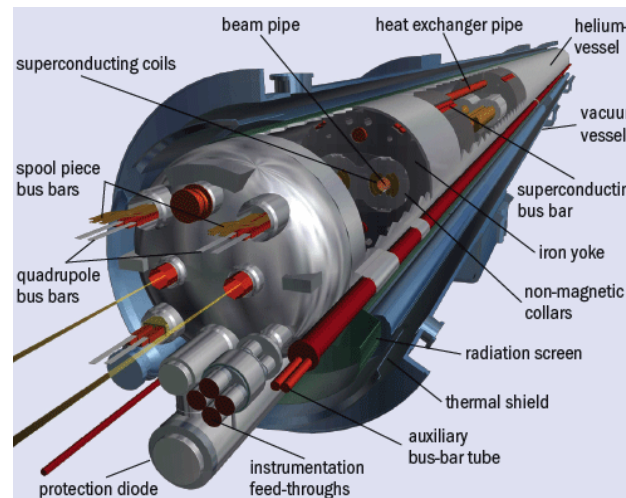
Top energi: 6.8 TeV (design 7 TeV)

Dybde: ~100 m

Omkreds: 27 km

Beam rør: 2 (modsat partikel retning)

Dipolmagnetar: 8.3 T superledende





Cirkulære accelerators – Large Hadron Collider (LHC) (personlig optagelse)

