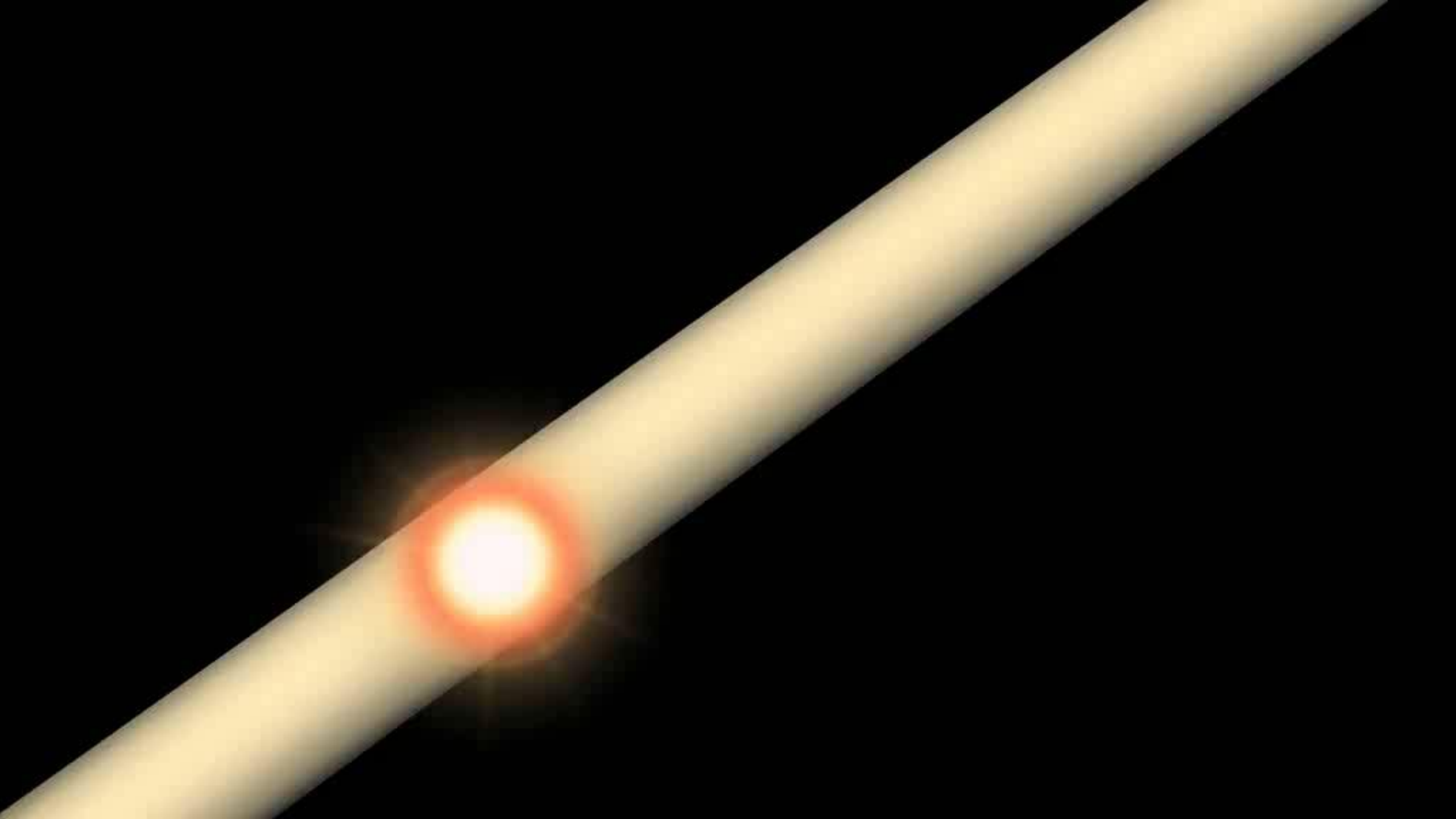


Introduktion til accelerators og detectorer

09-04-2024

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

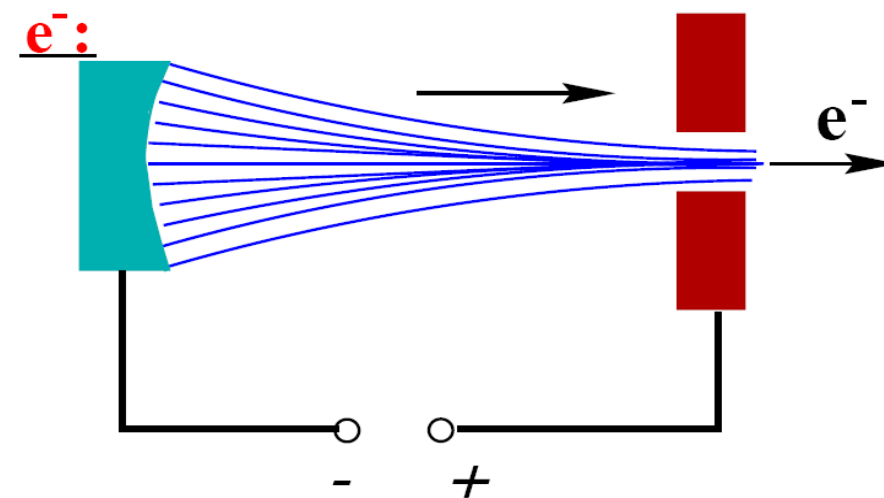
I praksis kan man ikke accelerere med et simpelt spændingsfelt da man så skulle bruge fx 10^{12} V .

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



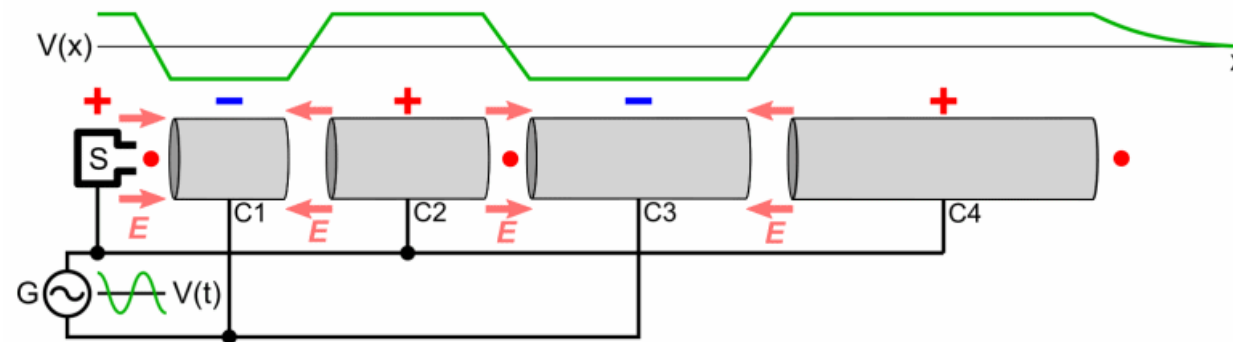
Lineære accelerators – accelerations principper

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.



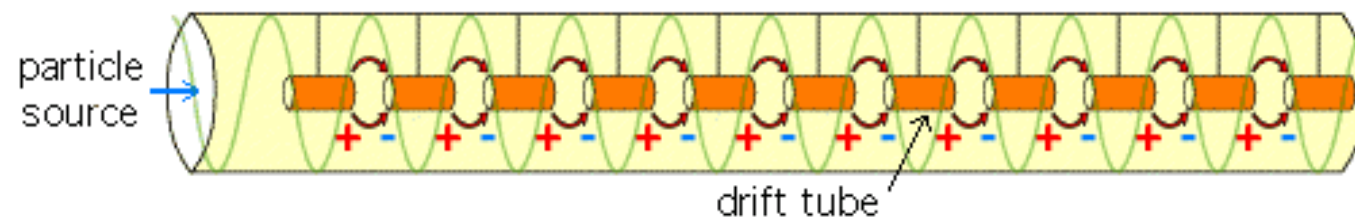
Moderne lineær accelerators:

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

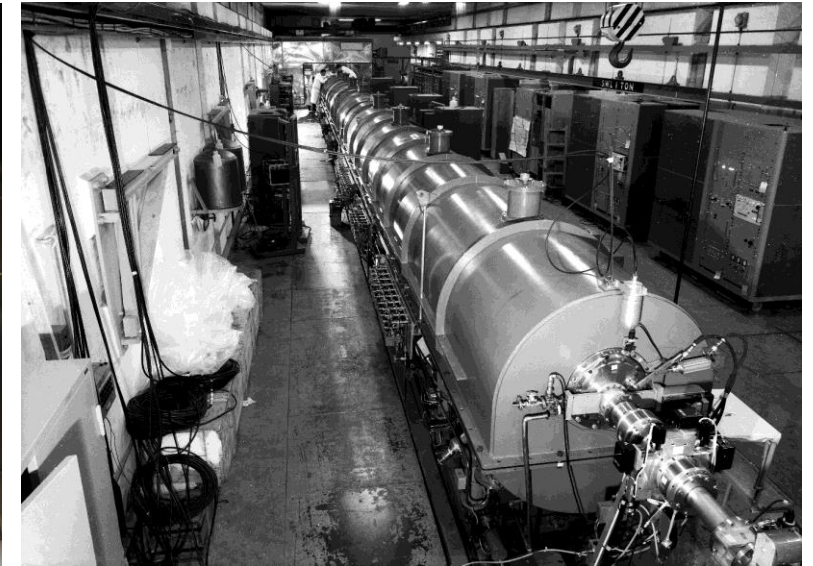
LINAC1

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





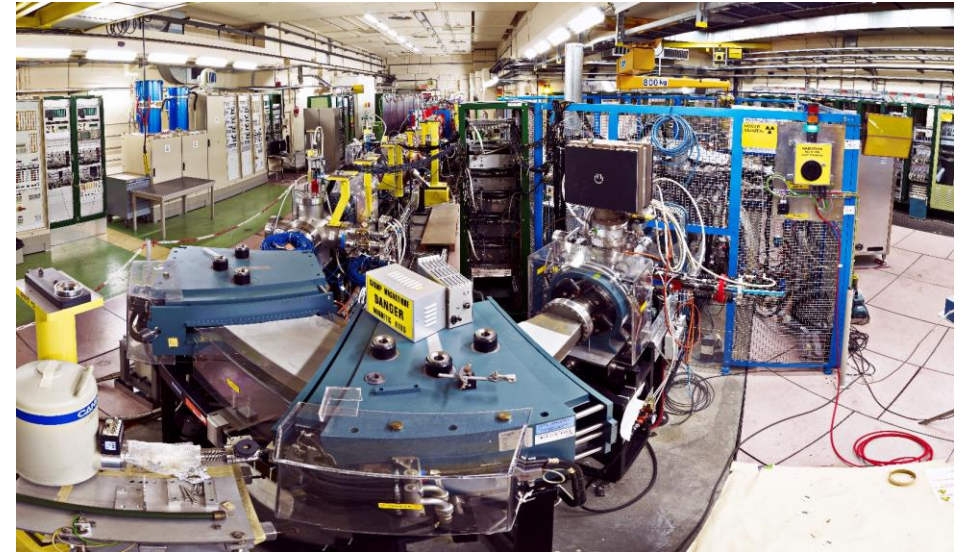
Lineær acceleratorer på CERN - Nuværende

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

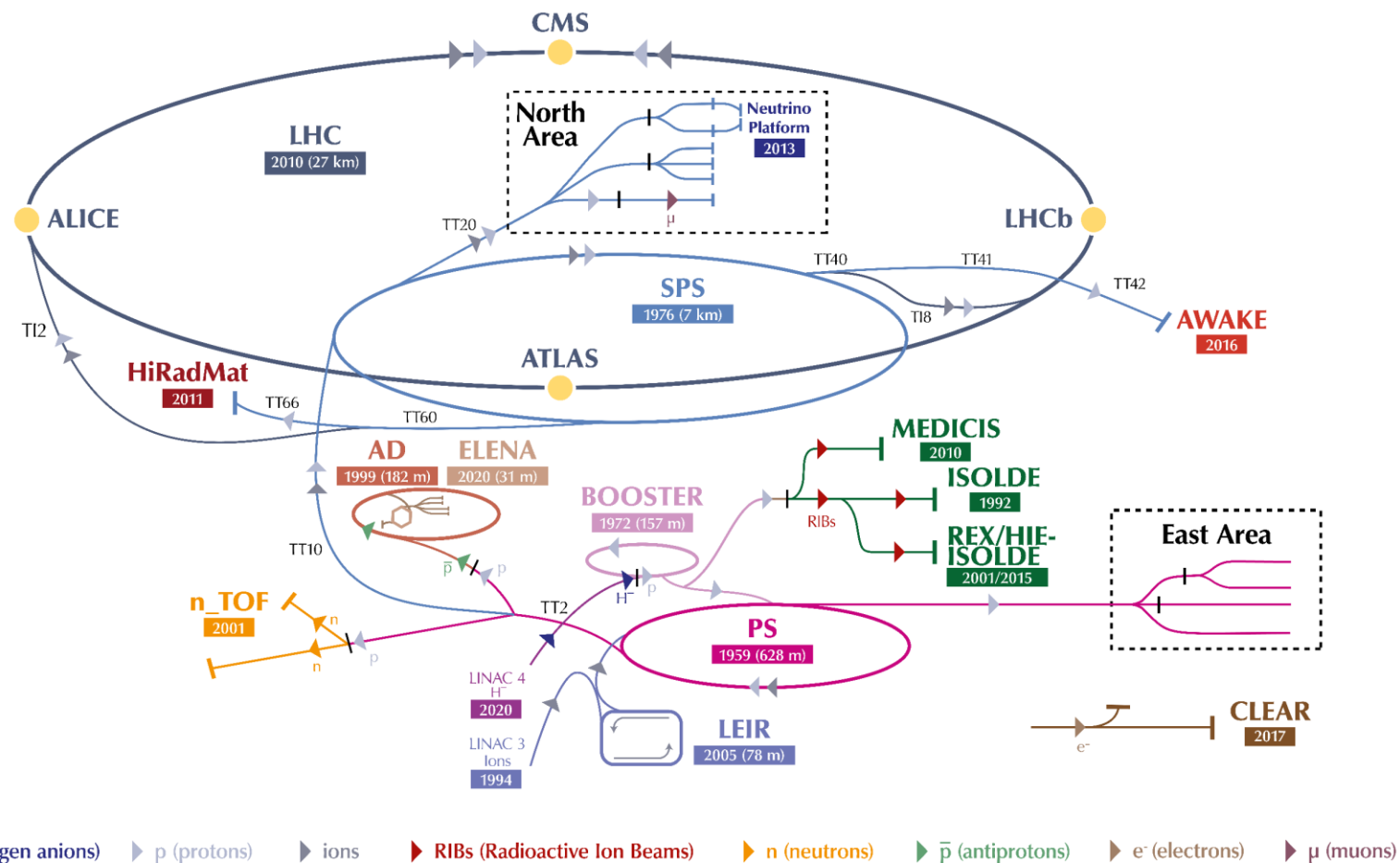




Lineær accelerators som en del af CERN accelerator kompleks

Oversigt over CERN nuværende accelerators

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:

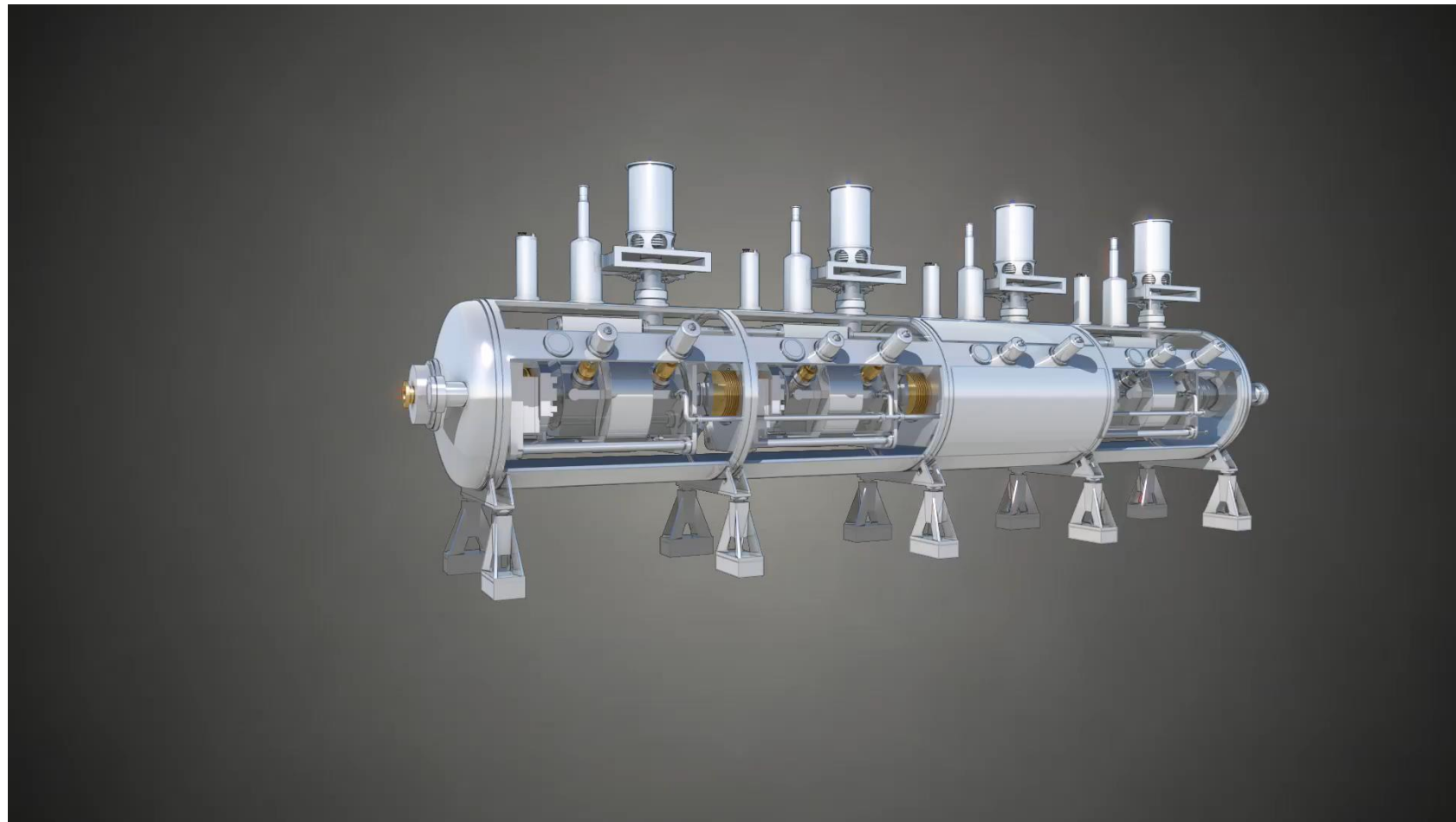
Acceleration foregår i "hulrum" (engelsk cavities).

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.



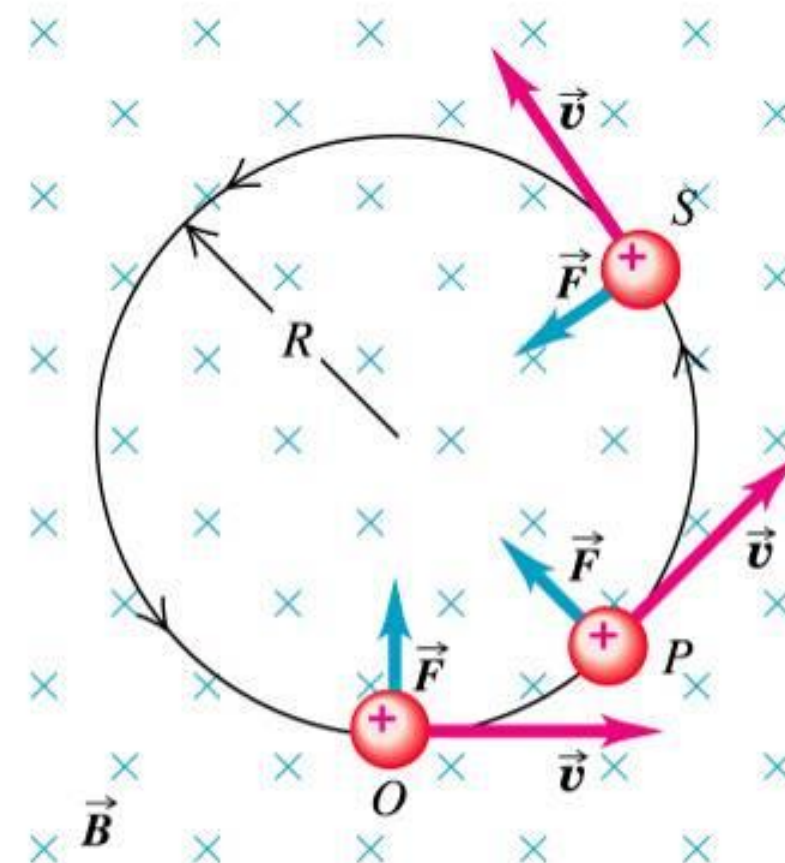
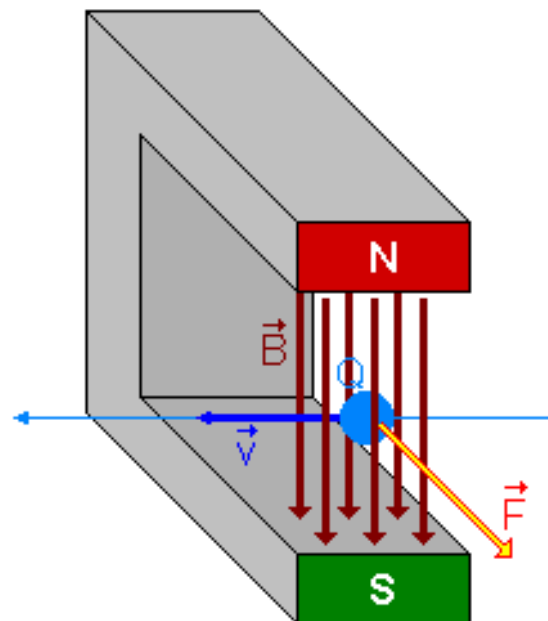
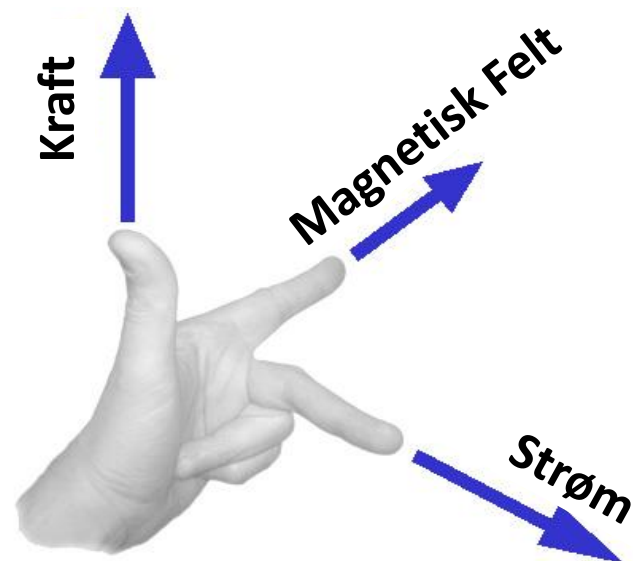


Cirkulære accelerators – Afbøjnings princip

Afbøjning af ladede partikler:

En ladet partikel i et magnetfelt bliver afbøjet.

Venstrehåndsregel:



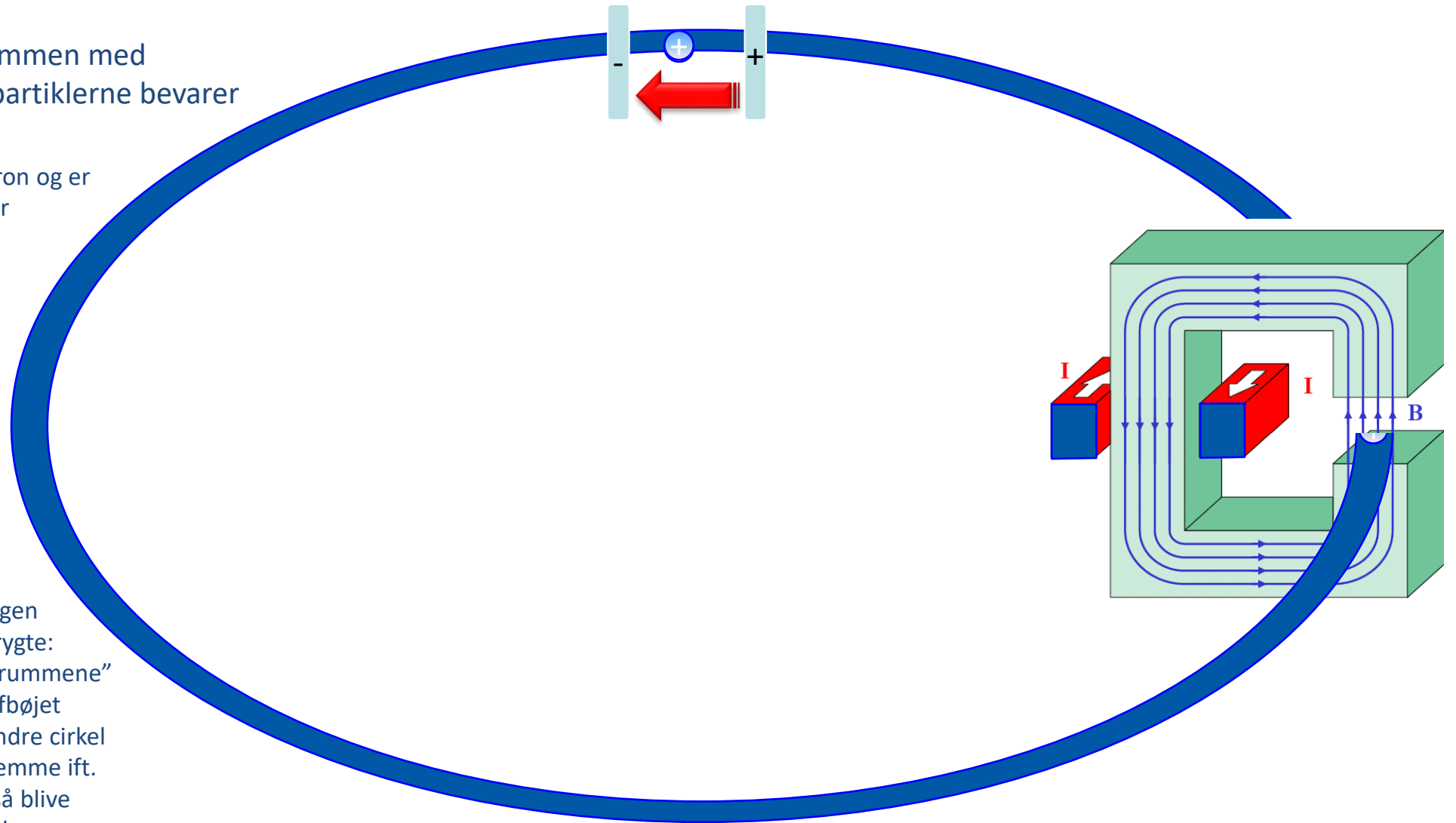


Cirkulære accelerators – Princip

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

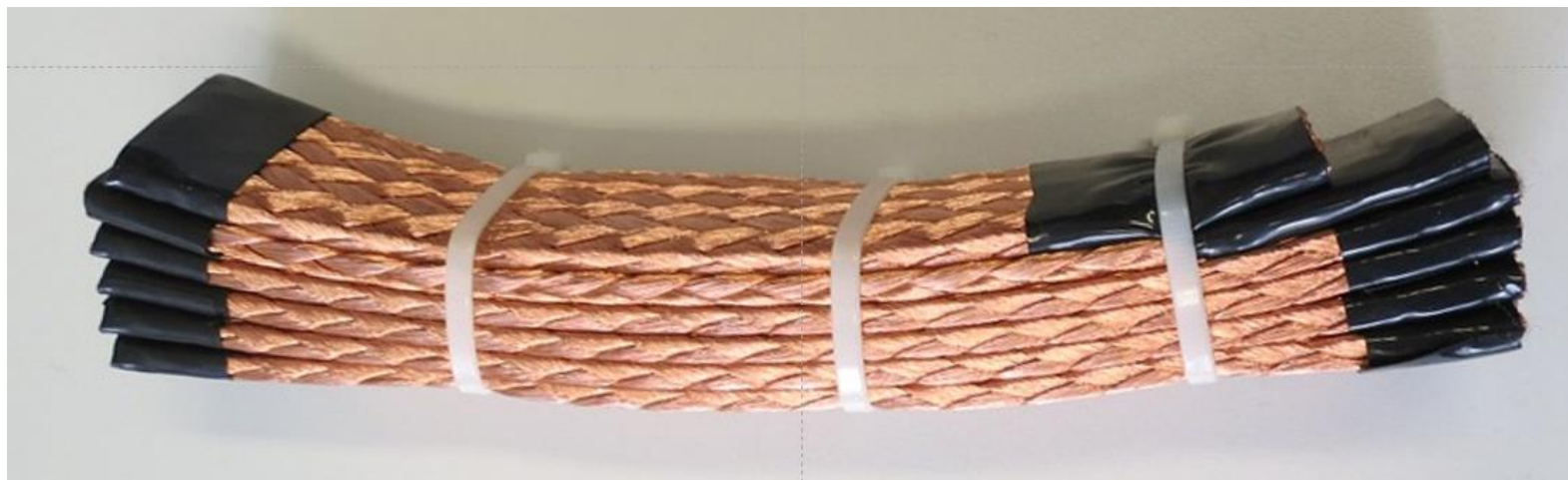
For klassiske elektromagneter er der en **øvre grænse på ca. 2 T.**

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 – Vakuu

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

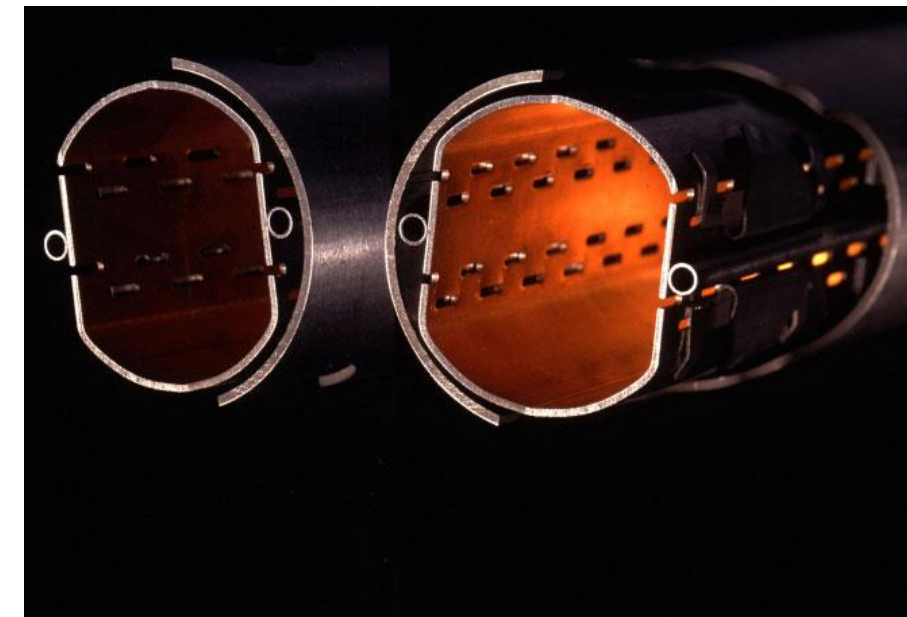
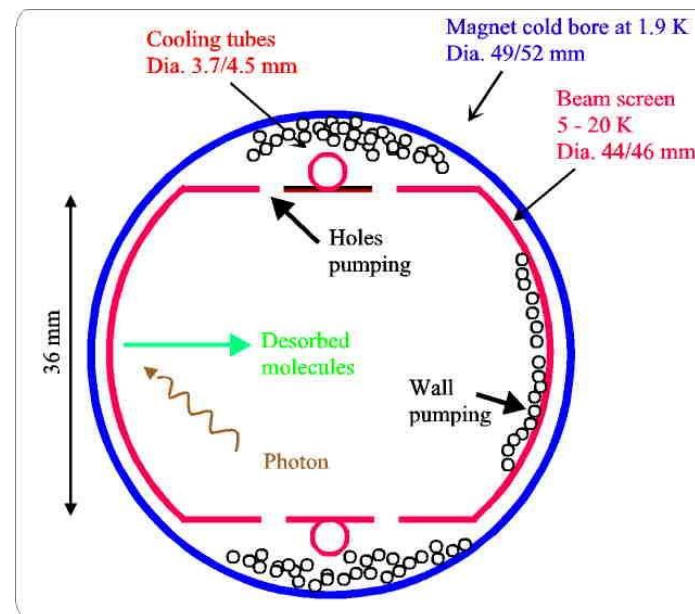
Specielt i cirkulære accelerators hvor partiklerne kan opholde sig længe er et godt vakuu derfor helt essentiel.

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

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

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

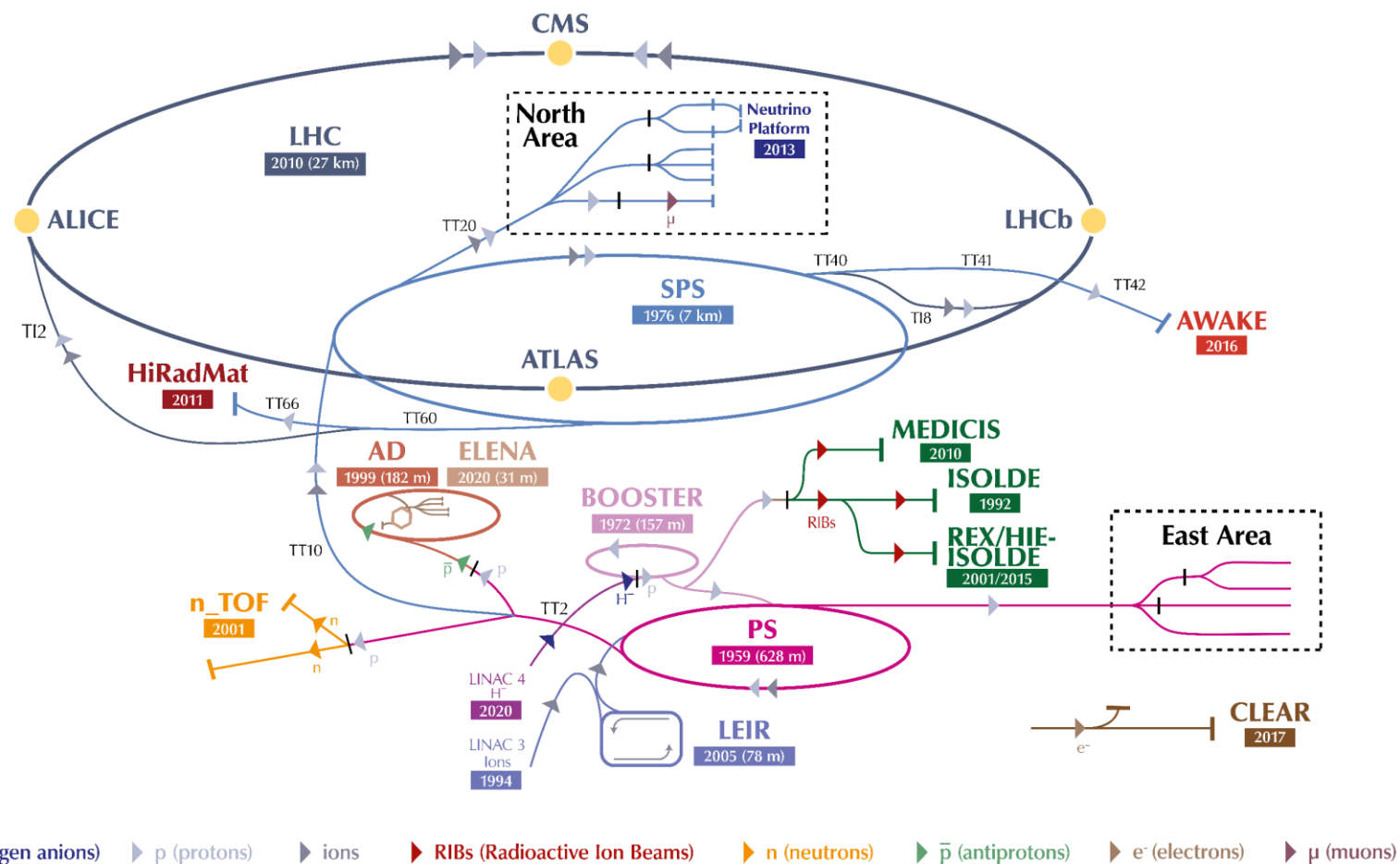
De varme sektioner bliver vakuu opnået ved at molekylerne fanges på specielle NEG (Non-evaporable getter) overflader som virker som fluepapir.





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-

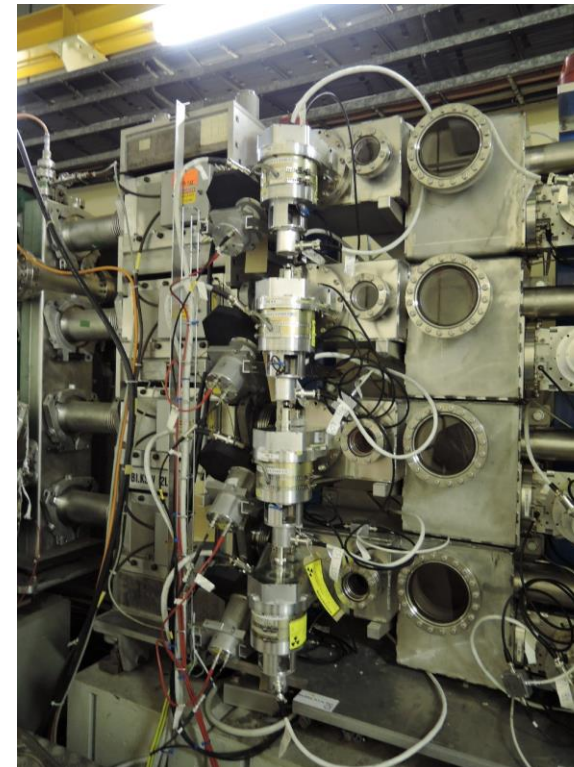
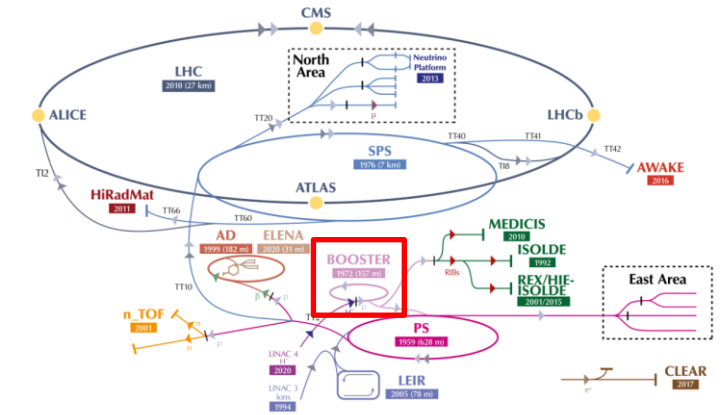
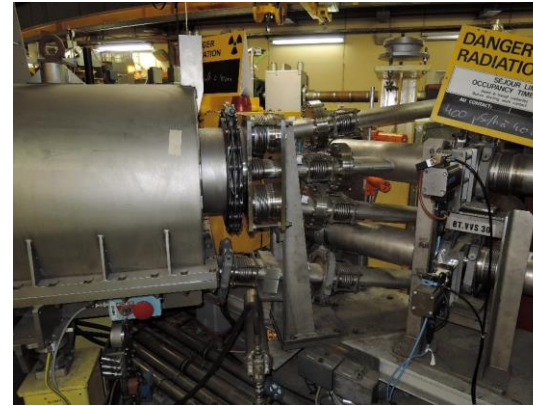
Top energi: 2 GeV (opgraderet fra oprindelig 1.4 GeV)

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

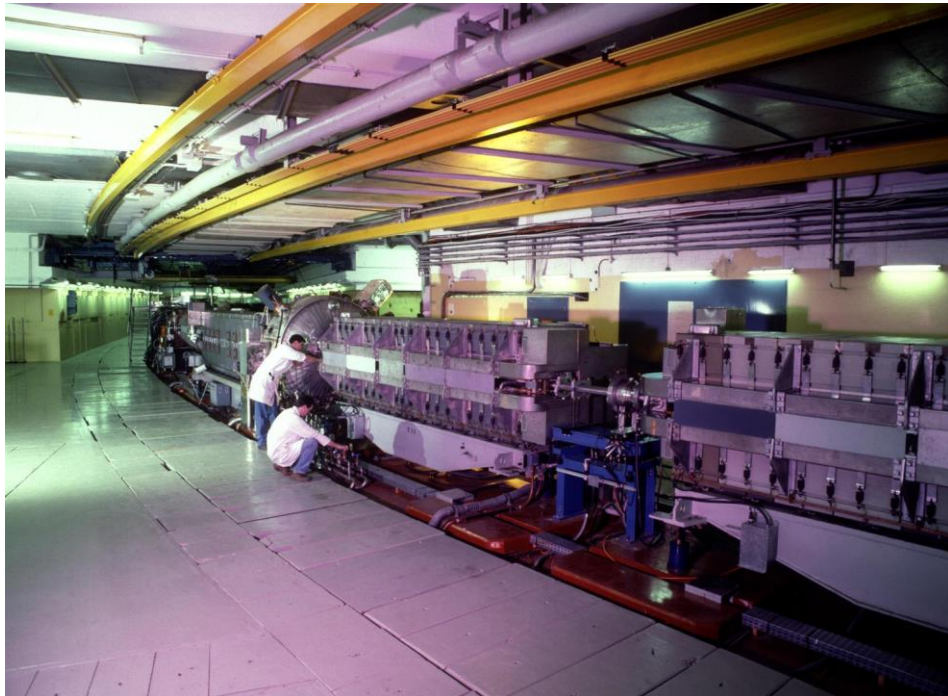
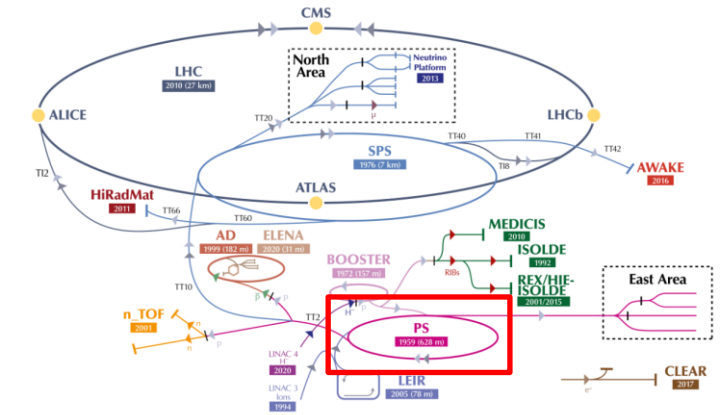
Top energi: 26 GeV

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

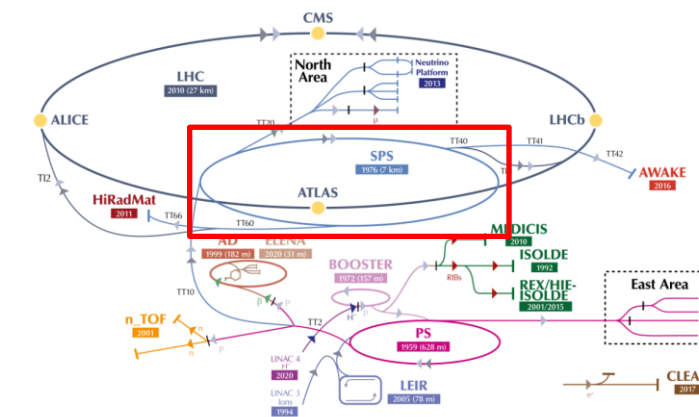
Top energi: 450 GeV

Dybde: ~40 m

Omkreds: 7 km

Beam rør: 1

Dipolmagnetar: 2.0 T normalt ledende





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





Cirkulære accelerators – Large Hadron Collider (LHC)

Operation fra: 2008

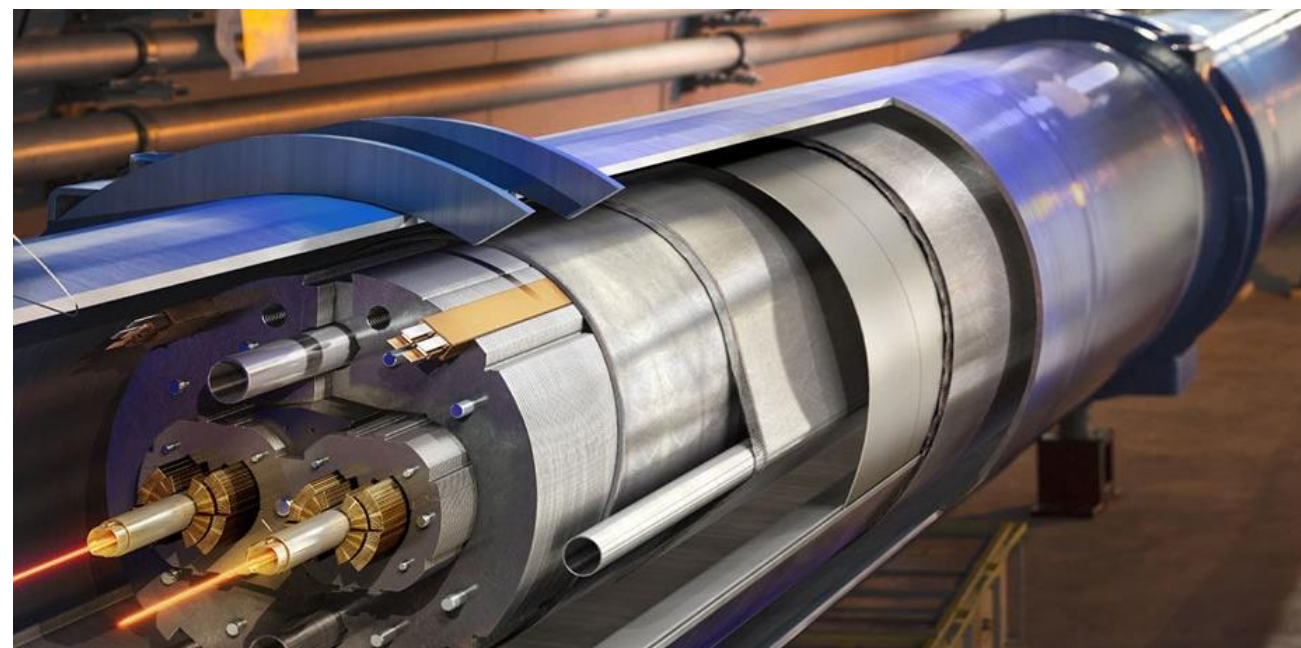
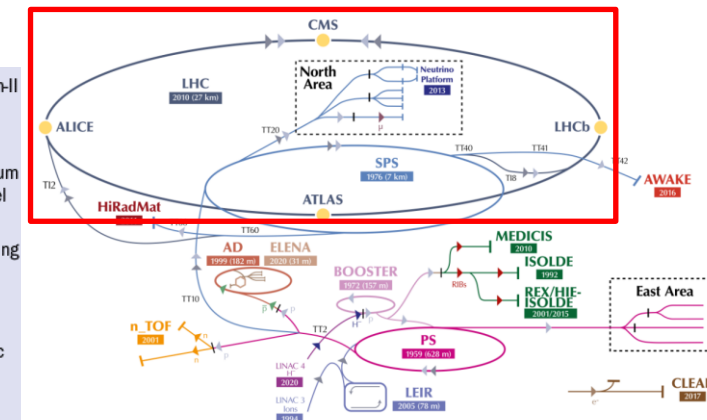
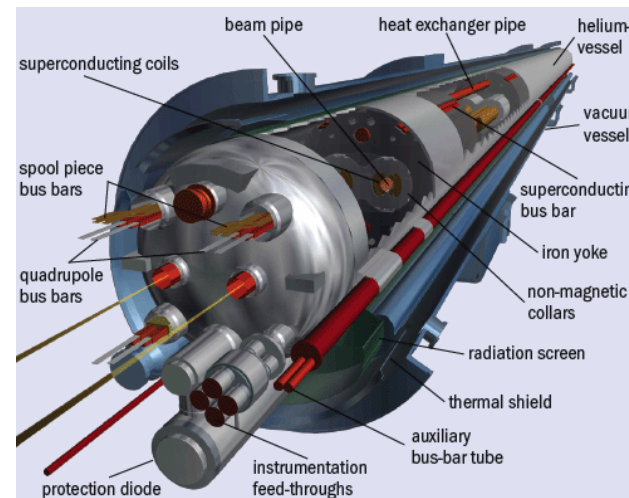
Top energi: 6.8 TeV (design 7 TeV)

Dybde: ~100 m

Omkreds: 27 km

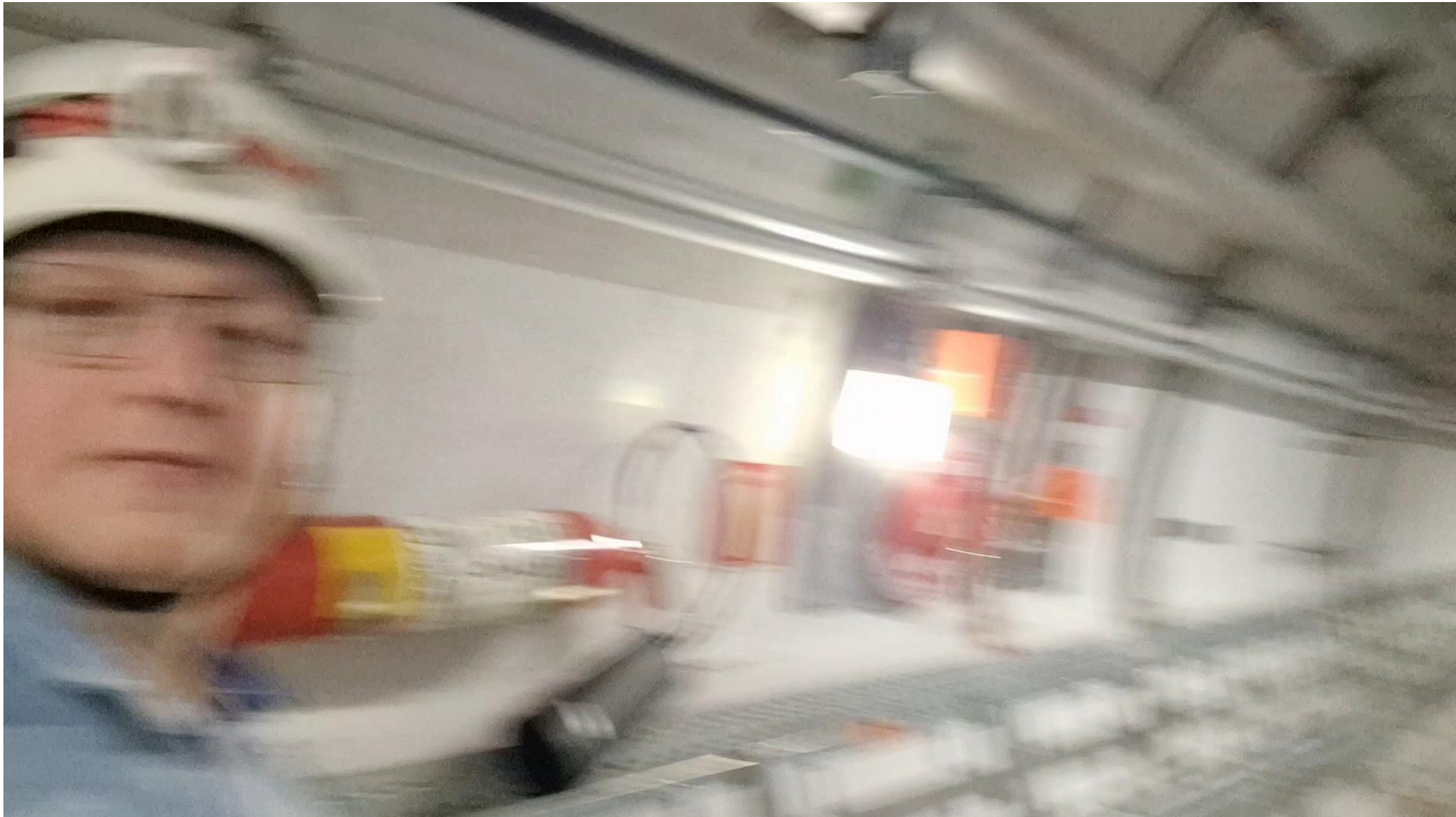
Beam rør: 2 (modsat partikel retning)

Dipolmagnetar: 8.3 T superledende





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





Partikel interaktion



Partikel interaktion

Alle typer partikler vil generelt blive påvirket af de forskellige krafter vi kender (hvis partiklen har den egenskab som kraften kobler til).

Men størrelsen af påvirkningen er MEGET forskellig og ofte er en kræft derfor totalt dominerende.

Når vi skal kende partiklerne fra hinanden udnytter vi derfor disse forskelligheder.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS					
Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons



Spor-detektorer

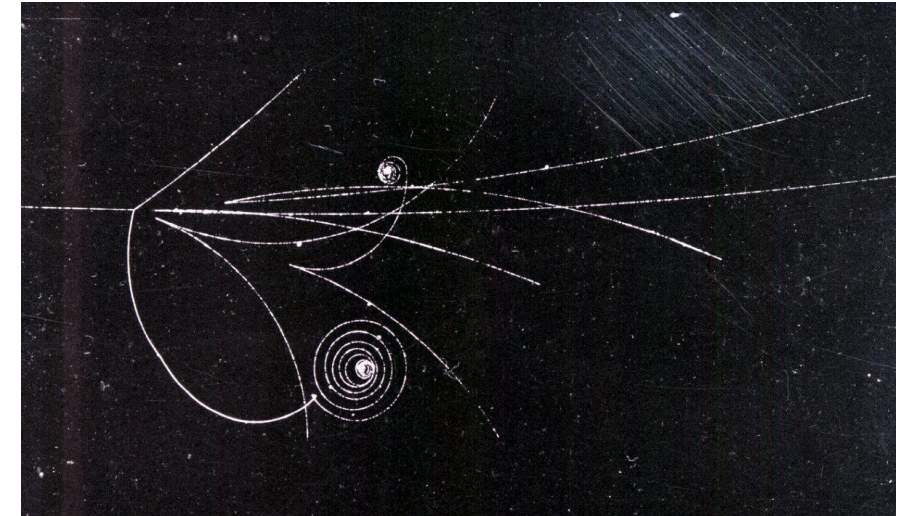


Spor-detektorer

Oprindeligt blev spor af partikler optaget på fotos:

Man udnyttede fx at en vaske i overkritisk tilstand skifter til gasform netop der hvor en partikel afsætter en smule energi.

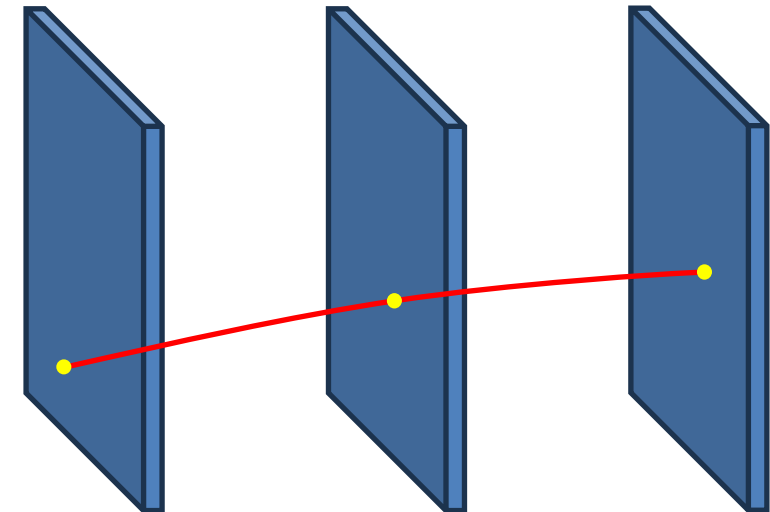
Derved kunne man se hele partiklens spor i fx boblekammer billeder.



For moderne spor-detektorer er målet præcis det samme:

Genskabe partiklens bane (med minimal påvirkning af banen).

(Næsten) alle spor-detektorer i dag gør det ved at bestemme positionen i nogle plan og så genskabe sporet ud fra positionerne i disse plan.





Spor-detektorer – Silicium pixel detektorer

En af de mest udbredte spor-detektorer er silicium pixel.

Den virker næsten som en kamera chip:

Energi fra ladede partikler bliver afsat i den pixel som bliver ramt.

Silicium kan laves meget tyndt, så partiklens bane kun påvirkes minimalt

Fordele:

Kan laves meget præcis

Kan håndtere mange partikler ad gangen (mange pixel ramt samtidig)

Meget strålings hård så kan holde længe selv i højt partikel fluks

Ulemper

Meget kostbare per areal

Mange kanaler at udlæse

Kræver køler og meget strøm, som introducerer materiale som påvirker partiklernes bane

Eksempel: LHCb VELO pixel detektor

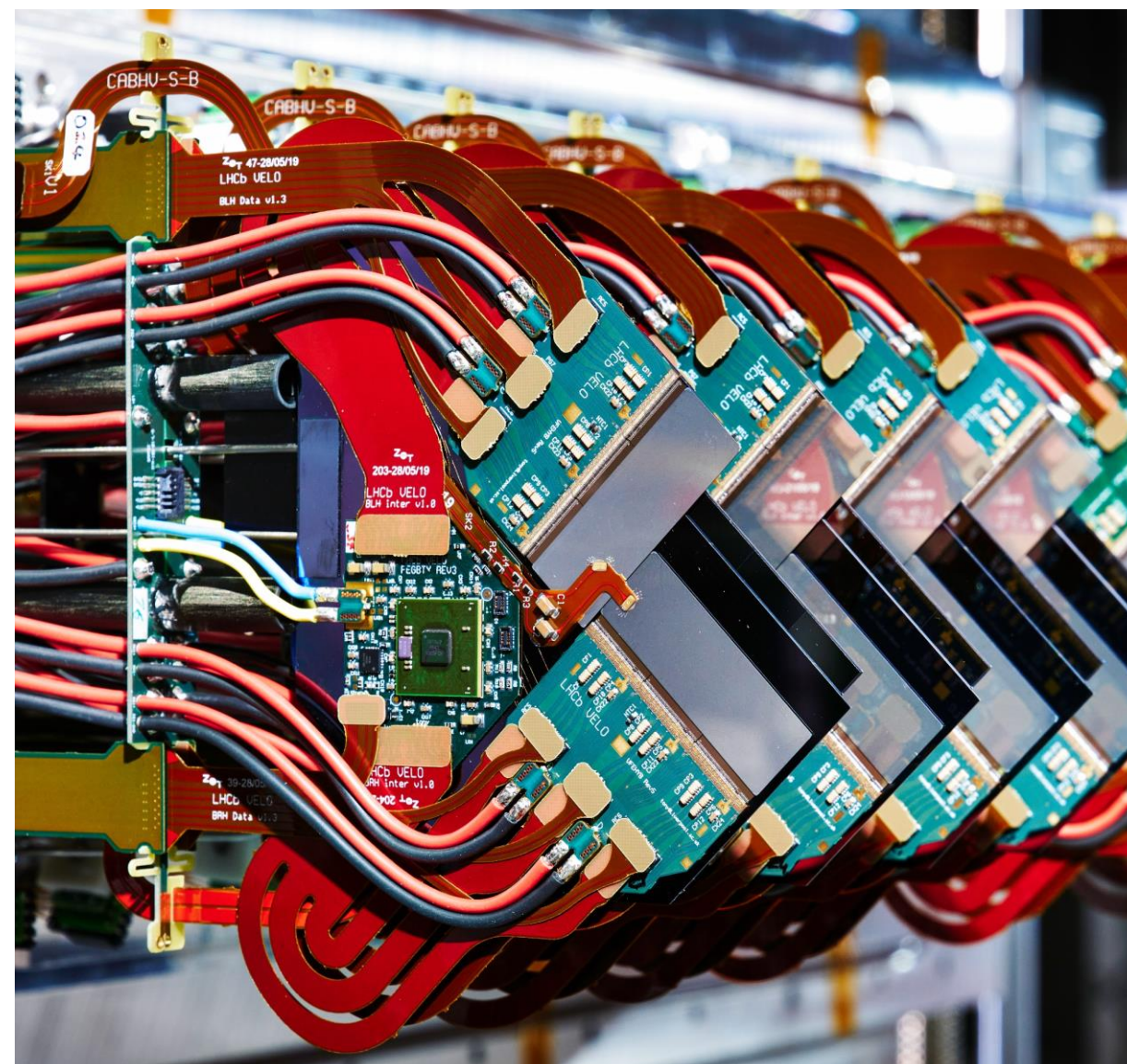
Active areal per chip: 14 mm x 14 mm, tykkelse: 200 μm

Pixel størrelse: 55 μm x 55 μm

Kanaler per chip: 256 x 256 = 65536

Kanaler per cm^2 : ~ 34000

Operational temperatur: - 30 ° C



Spor-detektorer – Strips/fiber for færre kanaler

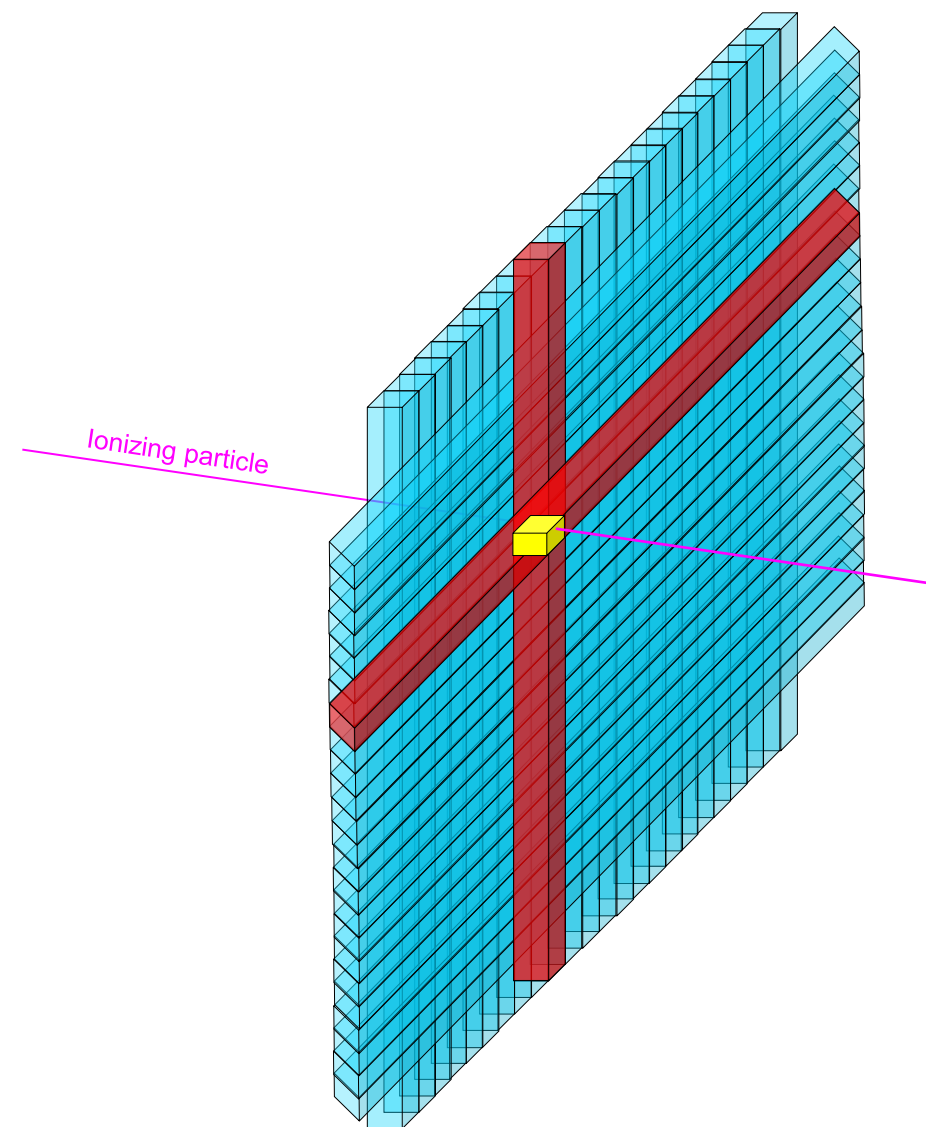
Motivation: Minimering af antallet af kanaler som skal udlæses

I stedet for pixel kan materialet være langt i en retning

Ved at kombinere information fra to lag kan samme præcision opnås

På figuren skal $24 + 24 = 48$ kanaler udlæses.

Som pixel ville det have været $24 \times 24 = 576$ kanaler



Spor-detektorer – Silicium strip detektorer

Silicium strip detektors:

En pixels gøres meget lang i én retning og kaldes derfor en strip

Dette minimerer signifikant antallet af kanaler der skal udlæses, men begrænser også hvor mange partikler ad gangen som kan håndteres

Ofte bruges strip silicium detekter længere fra interaktionen hvor tætheden af partikler er mindre.

Fordele:

Kan laves meget præcis

Færre kanaler at udlæse end pixel detektorer

Meget strålings hård så kan holde længe selv i højt partikel fluks

Ulemper:

Meget kostbare per areal

Kan ikke håndtere mange partikler ad gangen

Kræver køler og meget strøm, som introducerer materiale som påvirker partiklernes bane

Eksempel: ATLAS SemiConductor Tracker (SCT) detektor

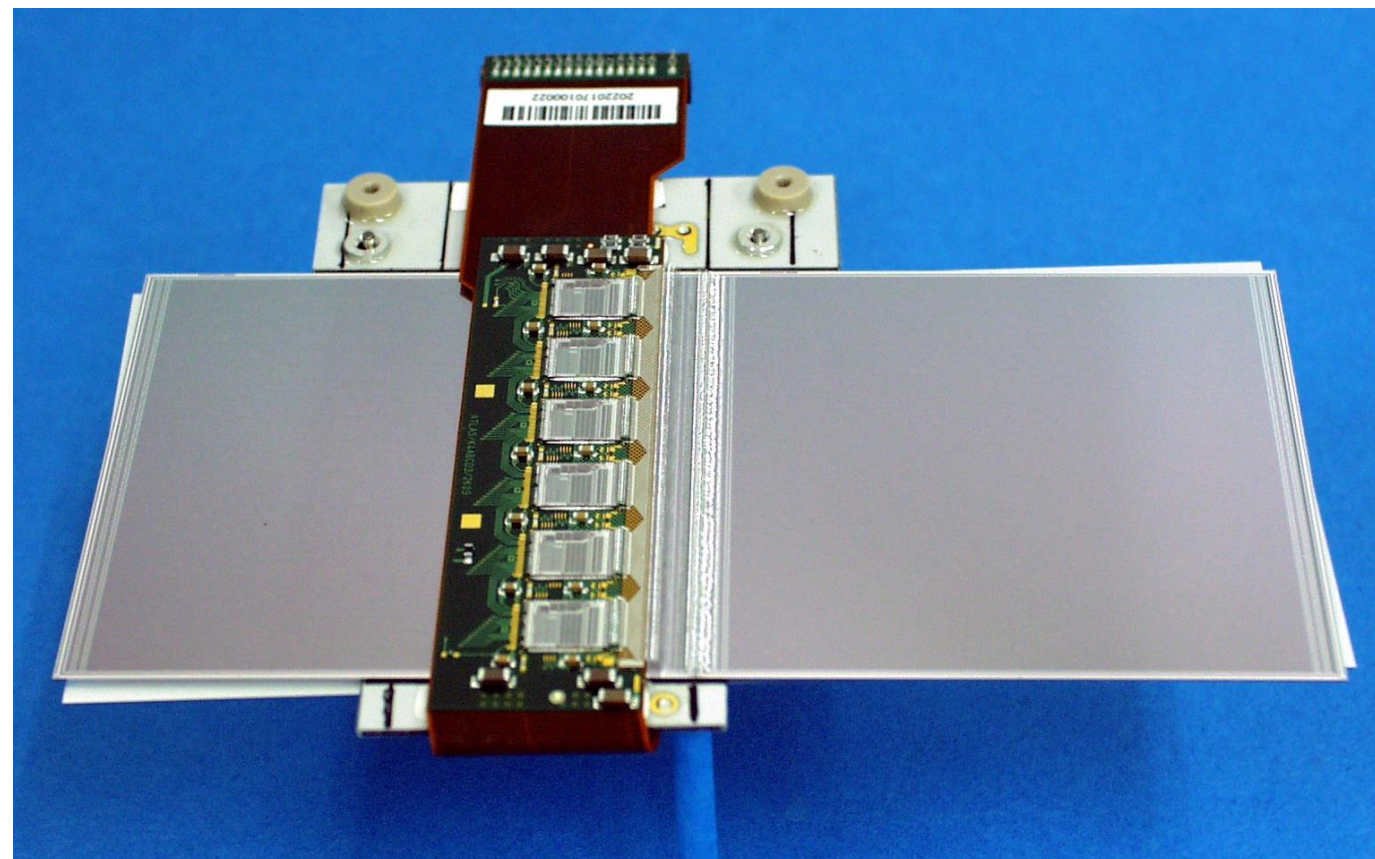
Activt areal per chip: 64 mm x 64 mm, tykkelse: 285 μm

Strip tykkelse: 80 μm

Kanaler per chip: 768

Kanaler per cm^2 : ~ 19

Operational temperatur: -7°C





Spor-detektorer – Fiber detektorer

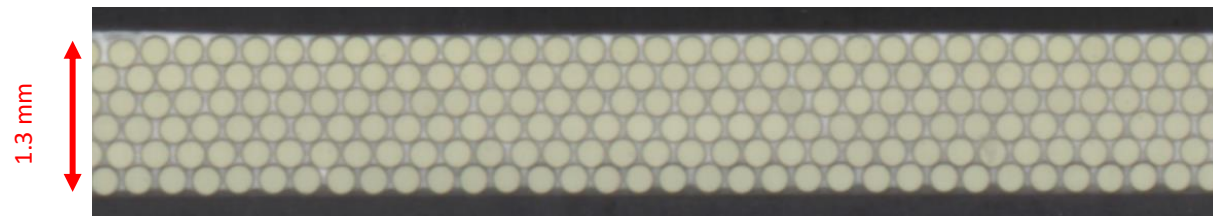
Scintillerende fiber detektorer

En scintillator er et materiale som udsender lys når en ladet partikel passerer

Scintillatorer kan formes til fiber.

Fibrene lægges side om side for at lave en sporing detector.

Lysdetektorer omformer lyset til elektriske signaler.



Fordele:

Billig per areal

Meget få kanaler at udlæse

Meget lidt materiale ud over det aktive

Ulemper:

Ikke særlig stråling hård

Kan ikke håndtere mange partikler ad gangen

Lysdetektorerne kan kræve køling

Eksempel: LHCb Scintillating Fiber Tracker

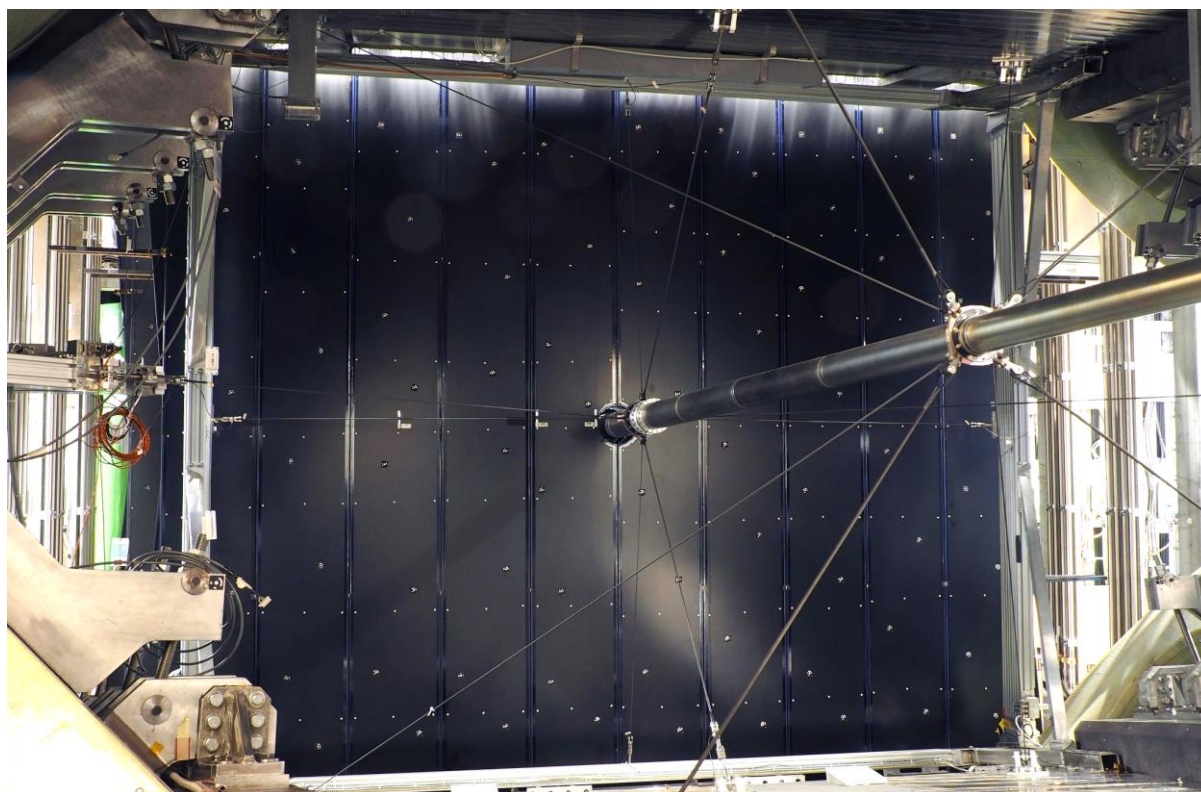
Aktivt areal per modul: 52 cm x 255 cm

Fiber diameter: 250 μm

Kanaler per modul: 2048

Kanaler per cm^2 : ~ 0.15

Operational temperatur (for lysdetektorerne): $-40\text{ }^\circ\text{C}$





Spor-detektorer – Gas detektorer

Gas detektorer

Når en ladet partikel passerer en gas kan den ioniserer gassen

Gassen kan være indeholdt i rør

Gasrørene lægges side om side for at lave en spring detector.

Meget følsomt elektronik kan måle hvilke rør har ioniseret gas

Fordele

Billig per areal

Meget få kanaler at udlæse

Meget lidt materiale ud over det aktive

Det aktive medie (gassen) udskiftes løbende (ingen stråling skade)

Ulemper

Kan ikke håndtere mange partikler ad gangen

Gas udlæsnings elektronik er kostbart per kanal

Mange af de gasser som benyttes er MEGET skadelige for miljøet

Eksempel: ATLAS Monitored Drift Tubes

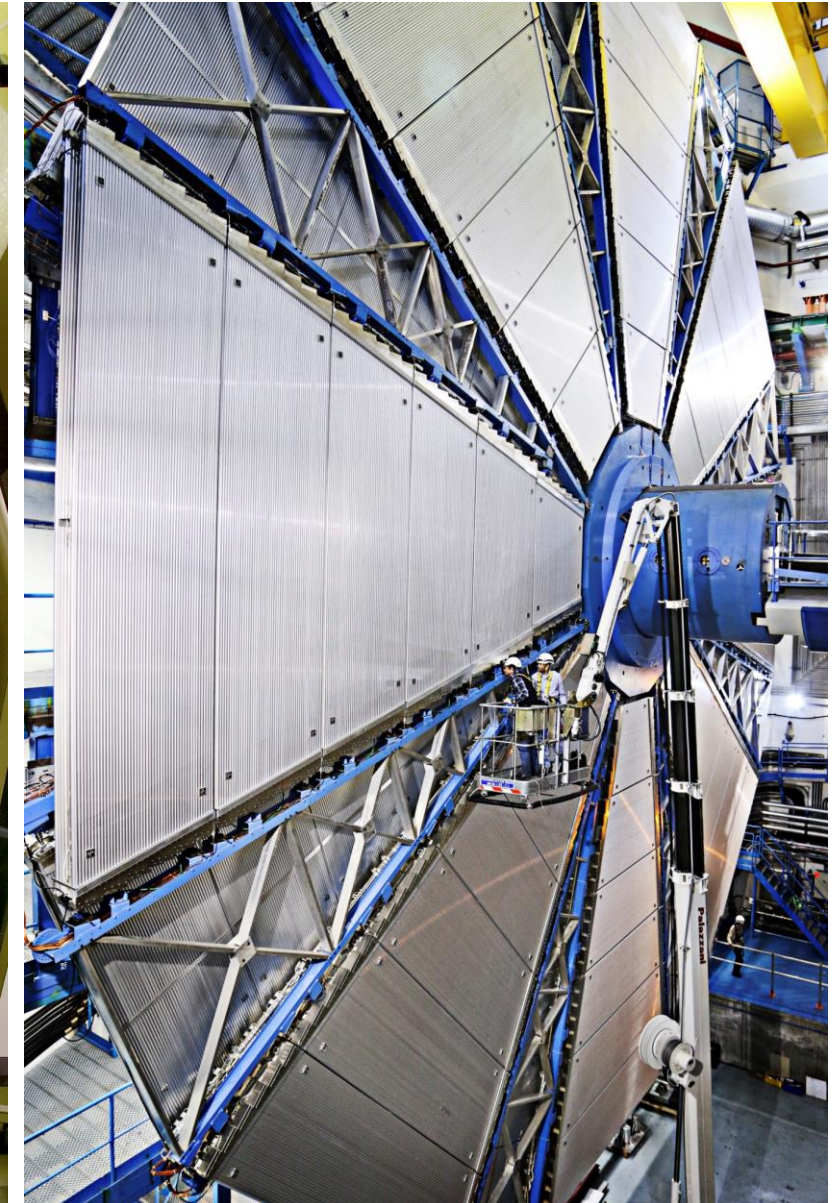
Rør (op til): $\varnothing 3$ cm x 650 cm. Væg tykkelse: 0.4 mm

Kanaler per rør: 1

Kanaler per cm^2 : ~ 0.0005

Gas: Argon (93 %) - CO_2 (7 %) miks ved 3 bar

Spænding: 3000 V





Magneter



Magneter i detektorer

Ladete partikler bliver afbøjet i magnetfelter

Positivt og negativt ladete partikler bliver afbøjet i modsat retning.

Hvor meget partiklen bliver afbøjet skalerer med partiklens impuls, som er en af de egenskaber man har brug for at måle.

Der er derfor magneter integreret i partikel detektorer

Ofte bruges superledende magneter for at opnå et kraftigere felt på mindre plads.

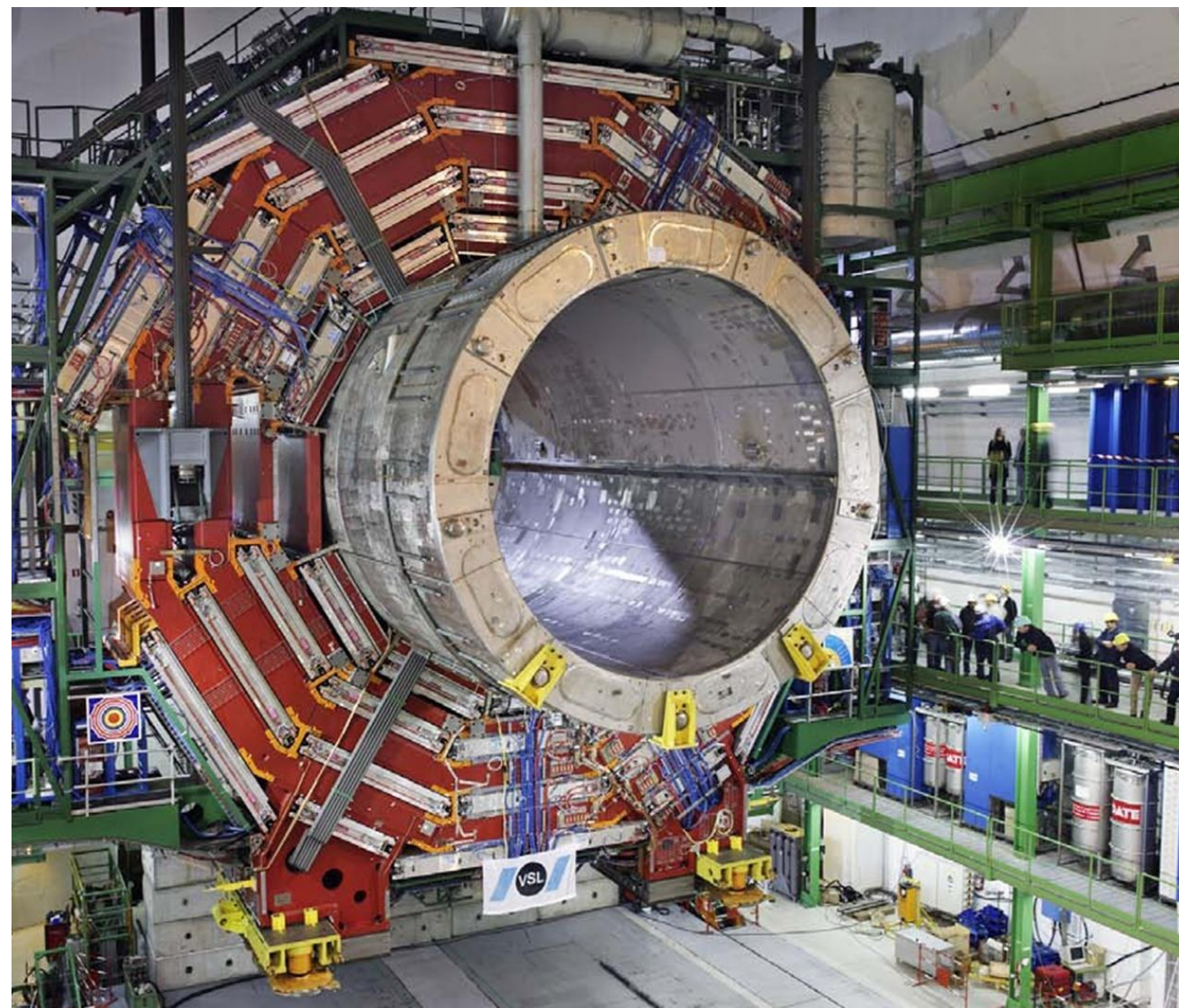
Eksempel: CMS solenoide magnet

Størrelse indvendigt: $\varnothing 6 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$

Magnet felt: $\sim 4 \text{ T}$

Nominal strøm: $\sim 20000 \text{ A}$

Operational temperature: $\sim 4 \text{ K} (-269 \text{ }^\circ\text{C})$





Kalorimetre



Basalt princip af kalorimetre – de fysiske processer

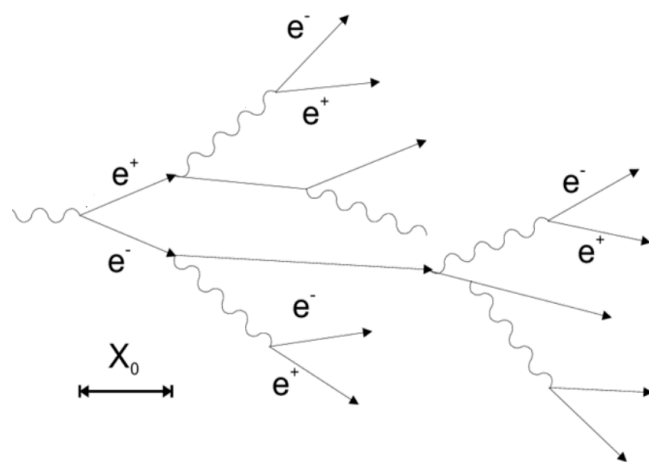
Basalt princip: Stop partiklen og mål hvor meget energi den afsatte når den blev stoppet.

Måden partikler med høj energi stoppes med afhænger af partikel-typen, men i de fleste tilfælde gøres det ved at lave nye partikler. Det forsætter så længe der er energi nok til at lave nye partikler og ses som en kaskade (eller byge) af partikler.

Elektromagnetisk kaskade (byger)

Kaskader kan sættes i gang af fotoner eller elektroner/positroner

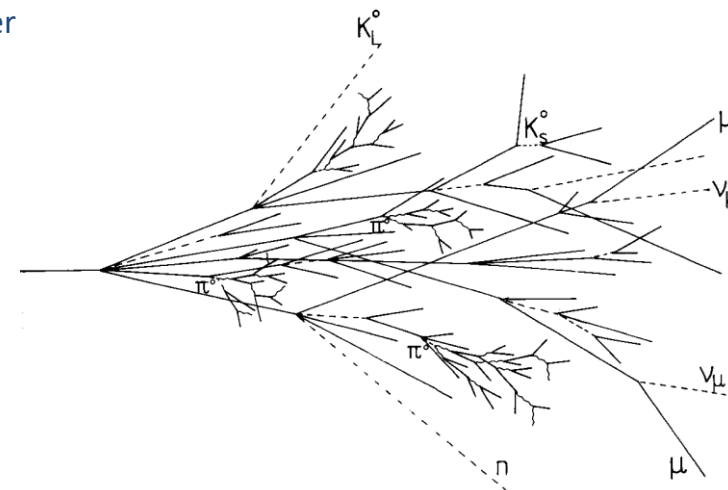
Kaskaderne fortsætter så længe der er energi nok til par produktion



Hadronisk kaskade (byger/jets)

To komponenter: Hadronisk and elektromagnetisk (og er langt mere komplekst)

Kaskaderne forsætter så længe der er energi nok de de forskellige processer



Så det basale princip er mere præcist: En destruktiv proces hvor der laves kaskader af partikler og energien de afsætter måles.



Kalorimetre – Homogene kalorimetre

Ét materiale bliver brugt til at lave kaskaderne og måle energiafsætningen

Dette kan være krystaller med høj densitet som scintillierer (afgiver lys)

Mængden af genereret lys i krystallen vil skalere med den afsatte energi

Hvis krystallen kobles med en lysdetektor vil signalet i lysdetektoren skalere med lyset og dermed med den afsatte energi

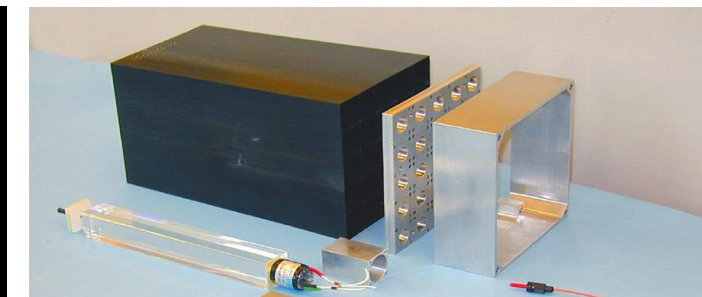
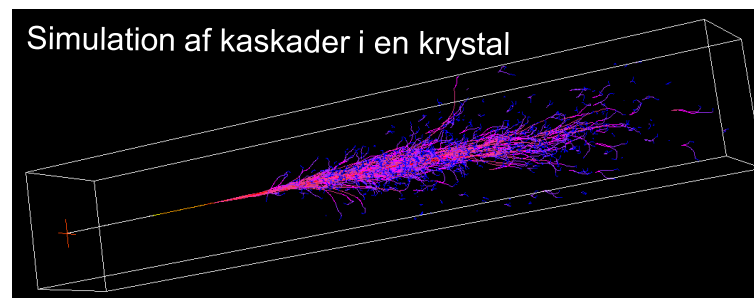
Dette er en ligefrem, men dyr måde at lave et kalorimeter

Eksempel: CMS elektromagnetisk kalorimeter (ende stykke)

Materiale: Bly-wolfram krystaller (PbWO_4)

Densitet: 8.3 g/cm^3

Størrelse: $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$



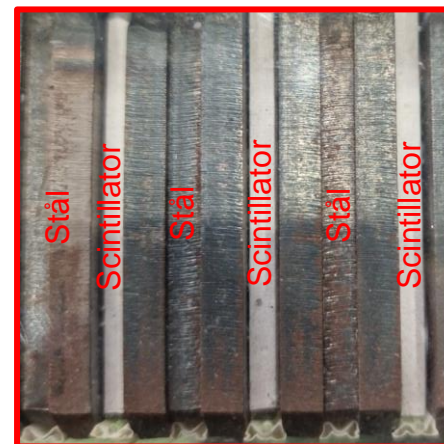
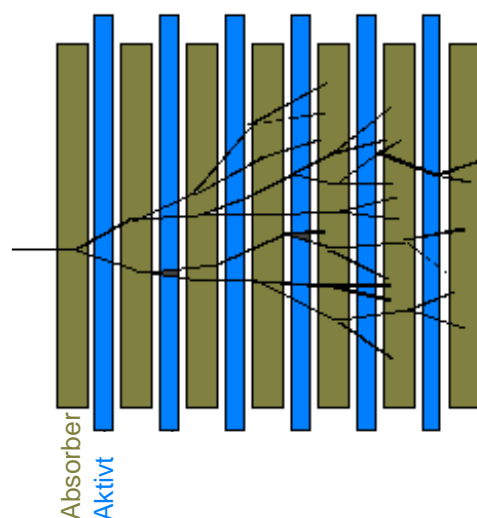


Kalorimetre – Sampling kalorimetre

To materialer skiftevis efter hinanden: **Absorberende** og **aktive** lag.

Det absorberende er typisk metaller med høj densitet som bly, kobber, jern eller wolfram.

Det aktive materiale er typisk plastik scintillator.



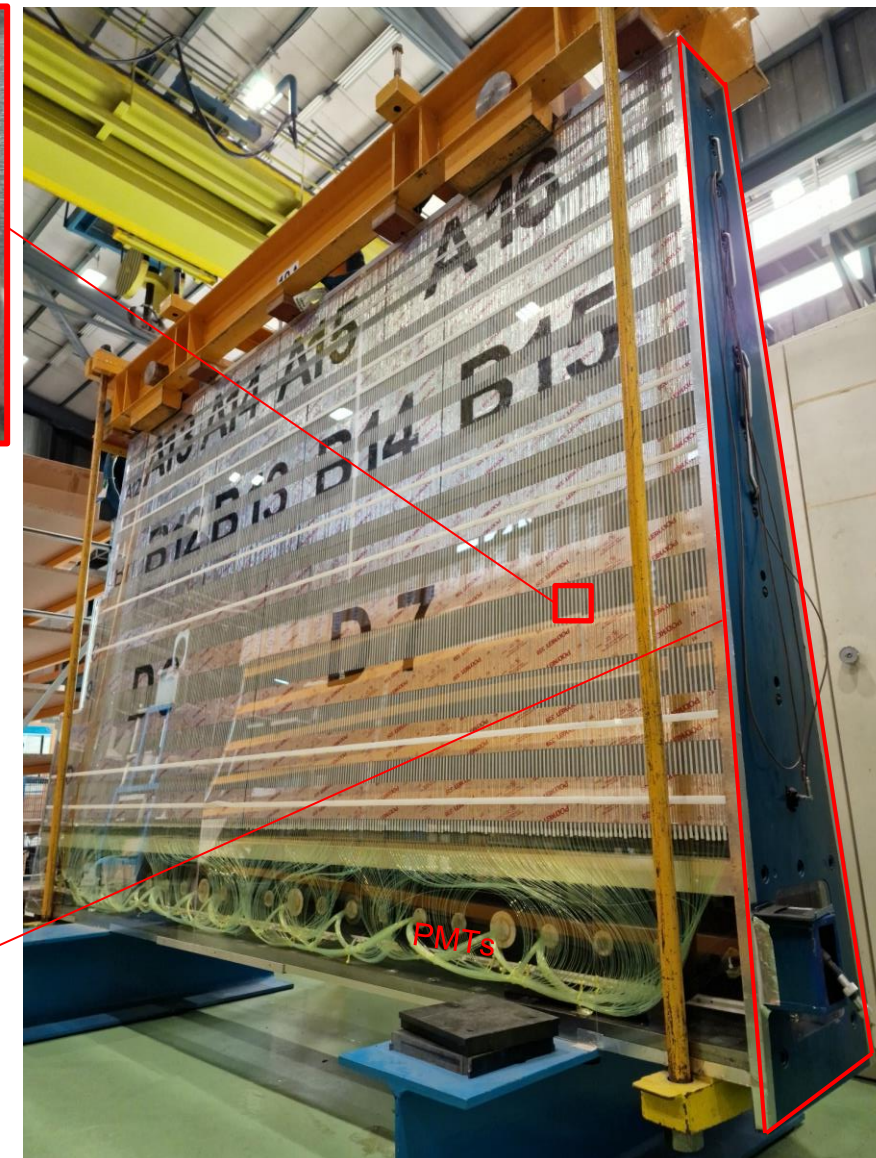
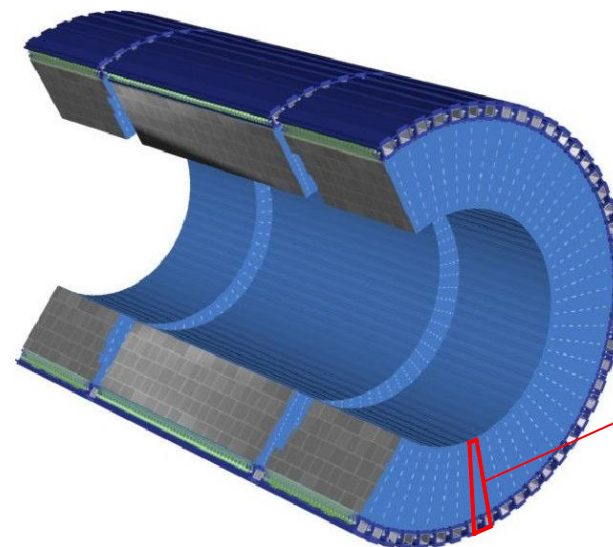
Mængden af genereret lys i krystallen vil skalere med den afsatte energi.

Hvis sampling kalorimeteret kobles med en lysdetektor vil signalet i lysdetektoren skalere med lyset og derved med den afsatte energi.

Eksempel: ATLAS hadronisk kalorimeter (tøndedel)

Absorber: Stål

Aktivt materiale: Plastik scintillator





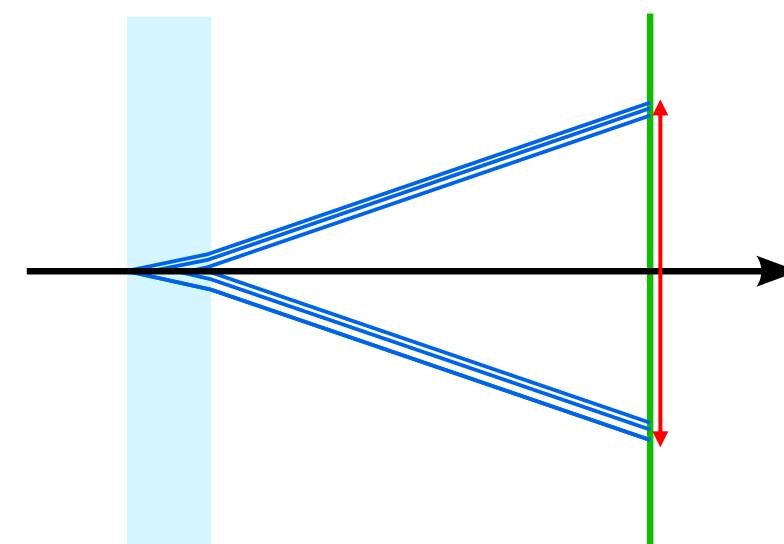
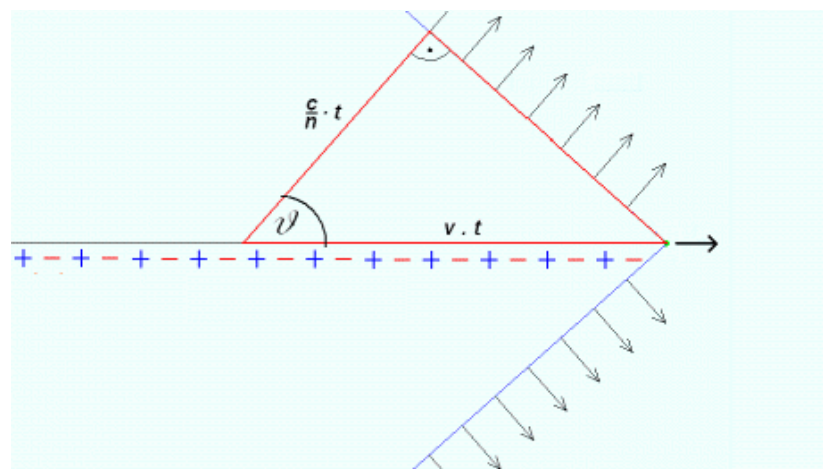
Partikel identifikations detektorer



Partikel identifikations detektor - Cherenkov

Cherenkov stråling er elektromagnetisk stråling som bliver udsendt når en ladet partikel bevæger sig gennem et medium hurtigere end lys i det medium:

$$\cos \vartheta = \frac{c}{nv}$$



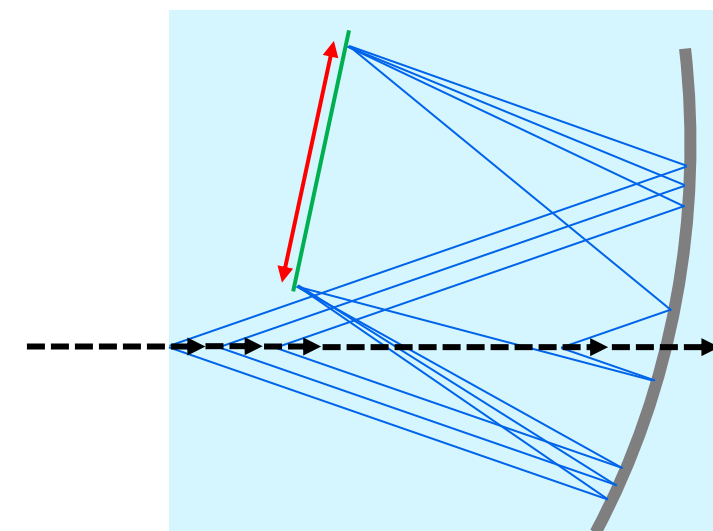
Så da refleksion indekset, n , er kendt, giver dette en relation mellem Cherenkov vinklen, ϑ , og hastigheden af partiklen, v . (c er lysets hastighed i vakuum).

Så hvis Cherenkov vinklen kan måles, så kan hastigheden af partiklen bestemmes. Sammen med impulsmåling fra sporing detektorerne (+magnet) kan dette bruges til at kende forskel på partikler.

I 3 dimensioner bliver Cherenkov lyset til en kegle når partiklen passerer mediet

Hvis mediet er kort, så bliver keglen til en ring når den bliver projekteret på et plan og Chrenkov vinklen kan bestemmes ved at måle diameteren på ringen.

En mere avanceret type bruger specielle sfæriske spejl til at fokusere lyset til plan, hvor lyset vil være en ring (fokuseringen betyder at lysets position kun er afhængig af Chrenkov vinklen, ikke hvor emissionen skete).





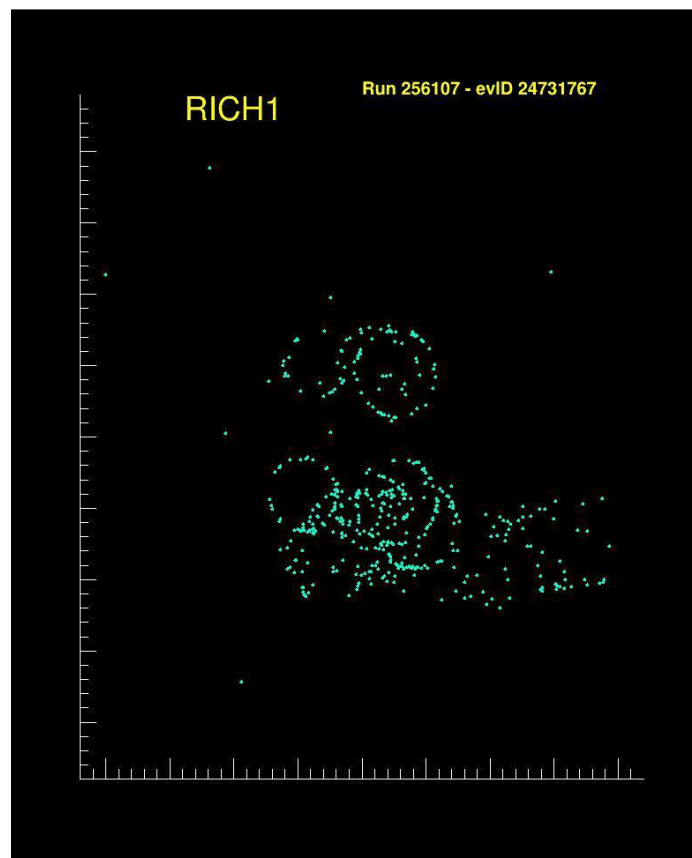
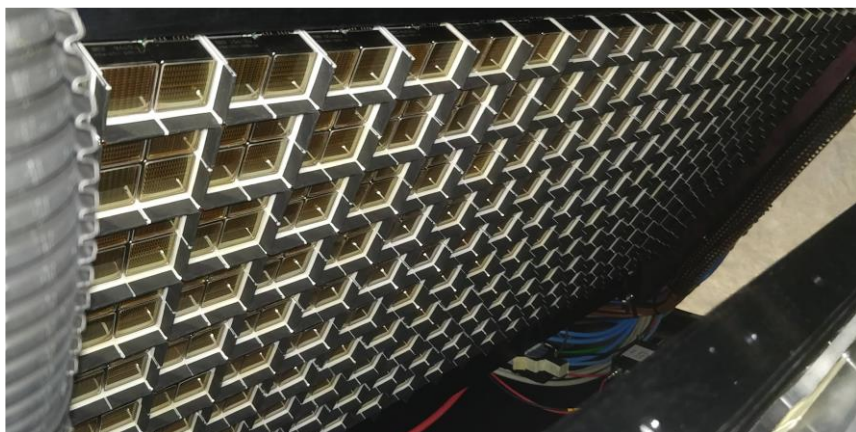
Partikel identifikations detektor – Cherenkov - RICH

Eksempel: LHCb Ring-Imaging Cherenkov (RICH) 1

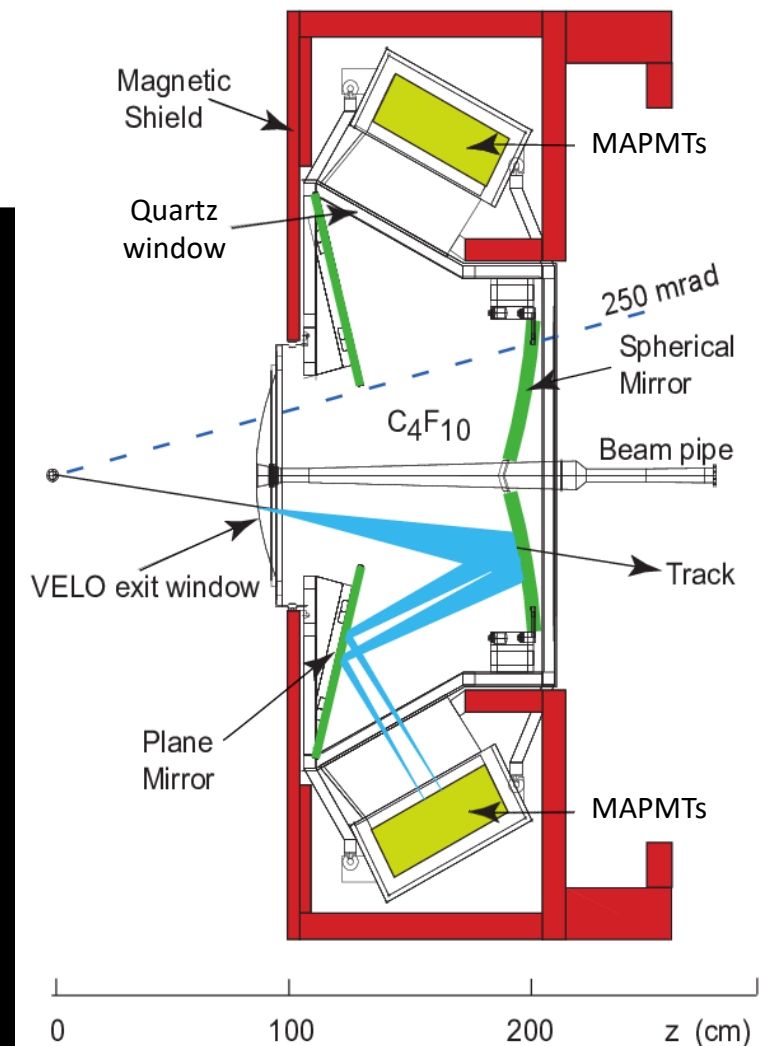
Cherenkov medium: C_4F_{10} gas

Impuls interval: 2 GeV/c - 60 GeV/c

Lys detektor: Segmenteret PhotoMultiPlier (MAPMT)



RICH1 set fra siden





Detektorsystemer



Detektor systemer

Byggeblokke:

Spor-detektorer

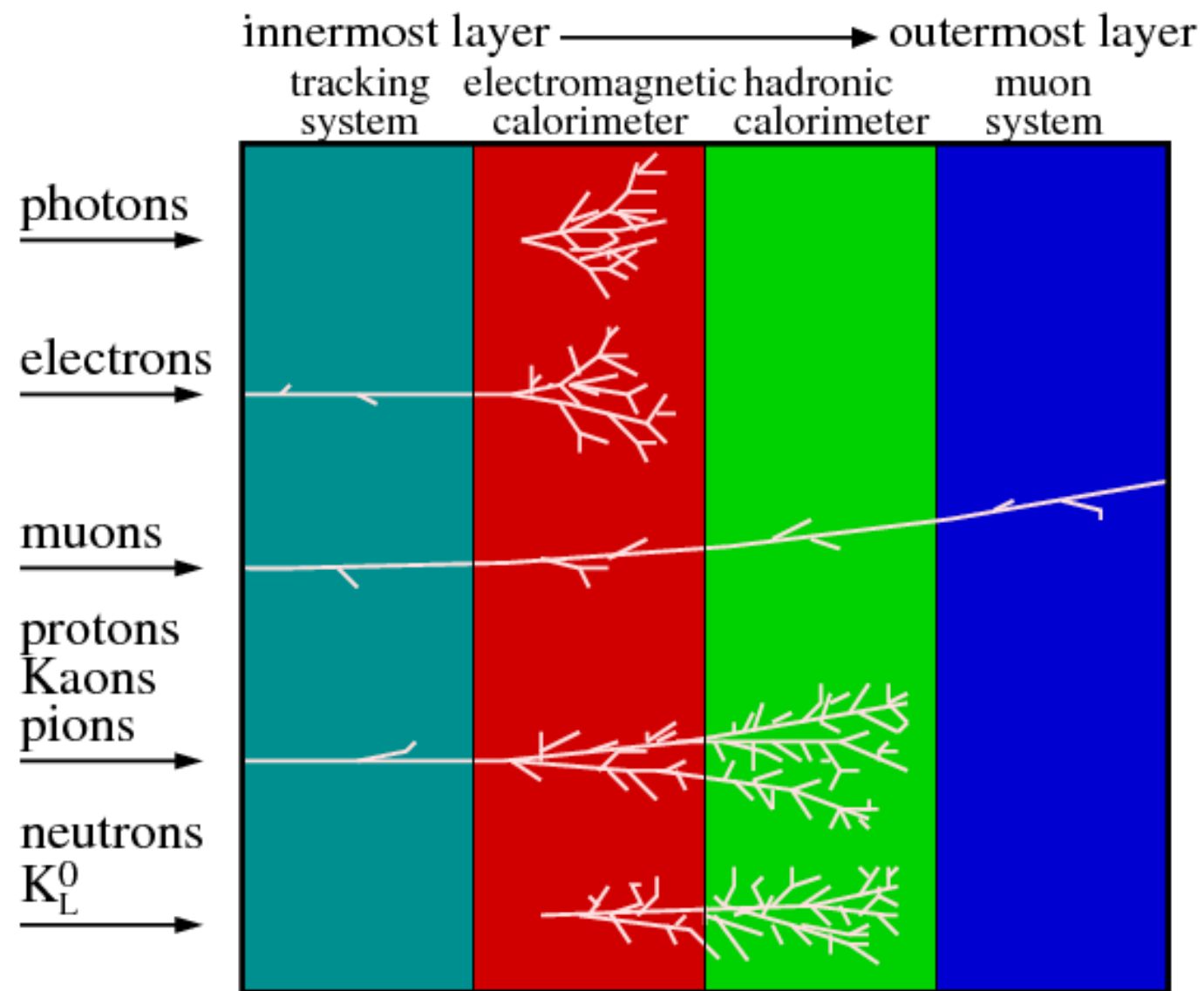
Magneter

Kalorimetre

Partikel identifikations detektorer

Ved at sammensætte byggeblokken på en smart måde kan man lave et system til at kende partikler fra hinanden.

Bemærk at de partikler som bliver detekteret alle er kendte. Partikler som fx Higgs henfalder til kendte partikler så hurtigt at den ikke detekteres direkte, men via dens henfald.



C. Lippmann – 2003



Compact Muon Solenoid - CMS

En af de 2 store detektorer til "generelle formål" = mange slags fysik

Opbygget i lag som et løg og dækker (næsten) alle retninger

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) $\sim 16\text{m}^2$ $\sim 66\text{M}$ channels
Microstrips (80x180 μm) $\sim 200\text{m}^2$ $\sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

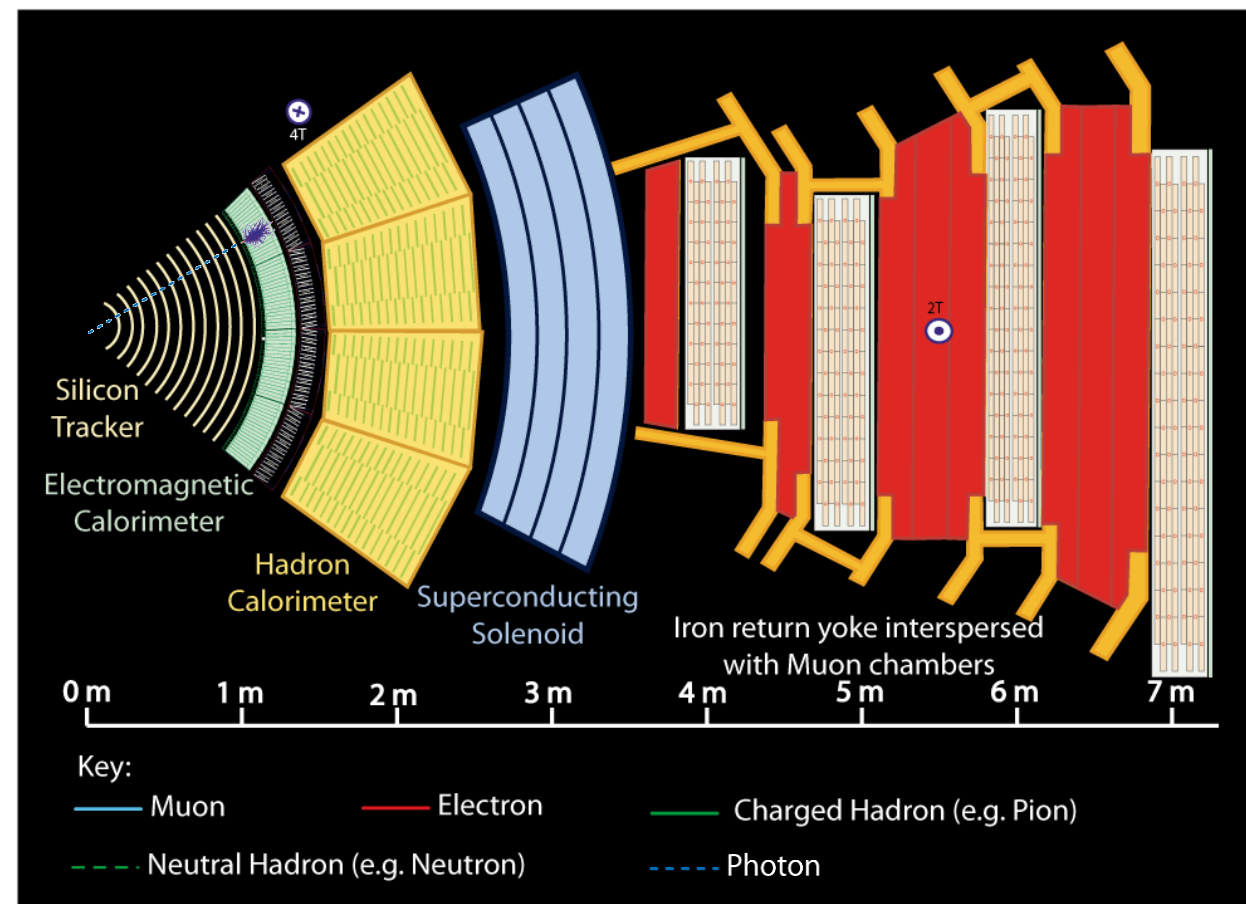
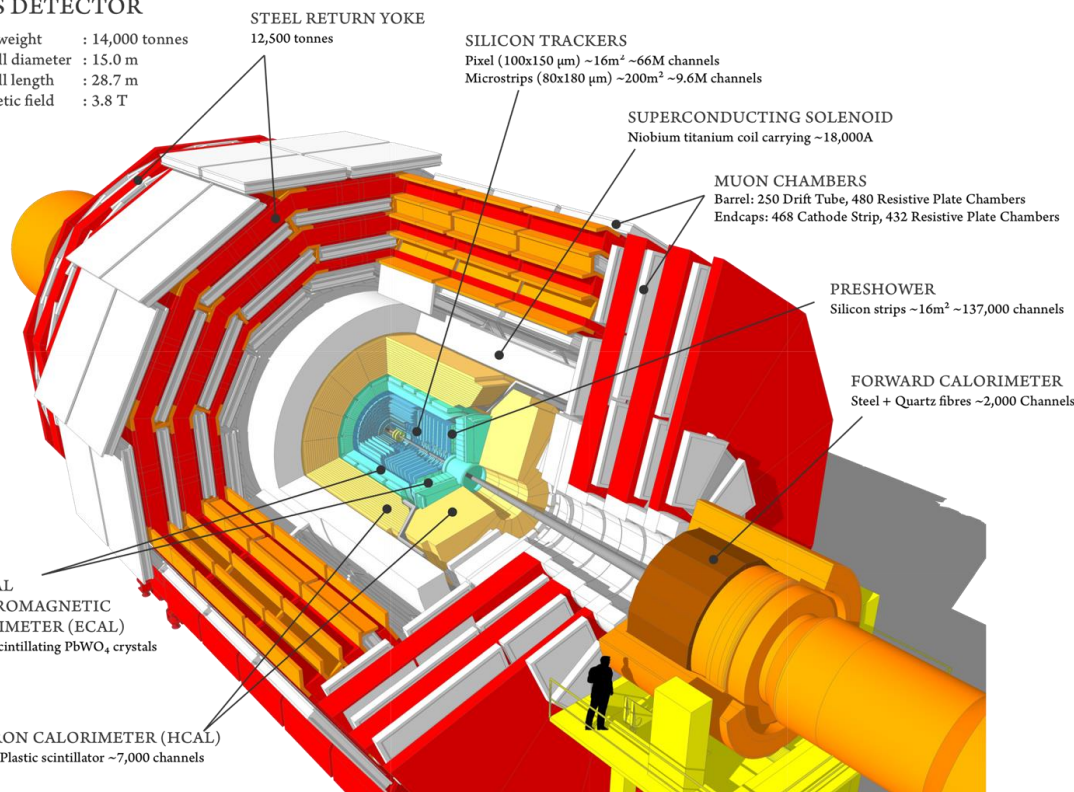
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16\text{m}^2$ $\sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

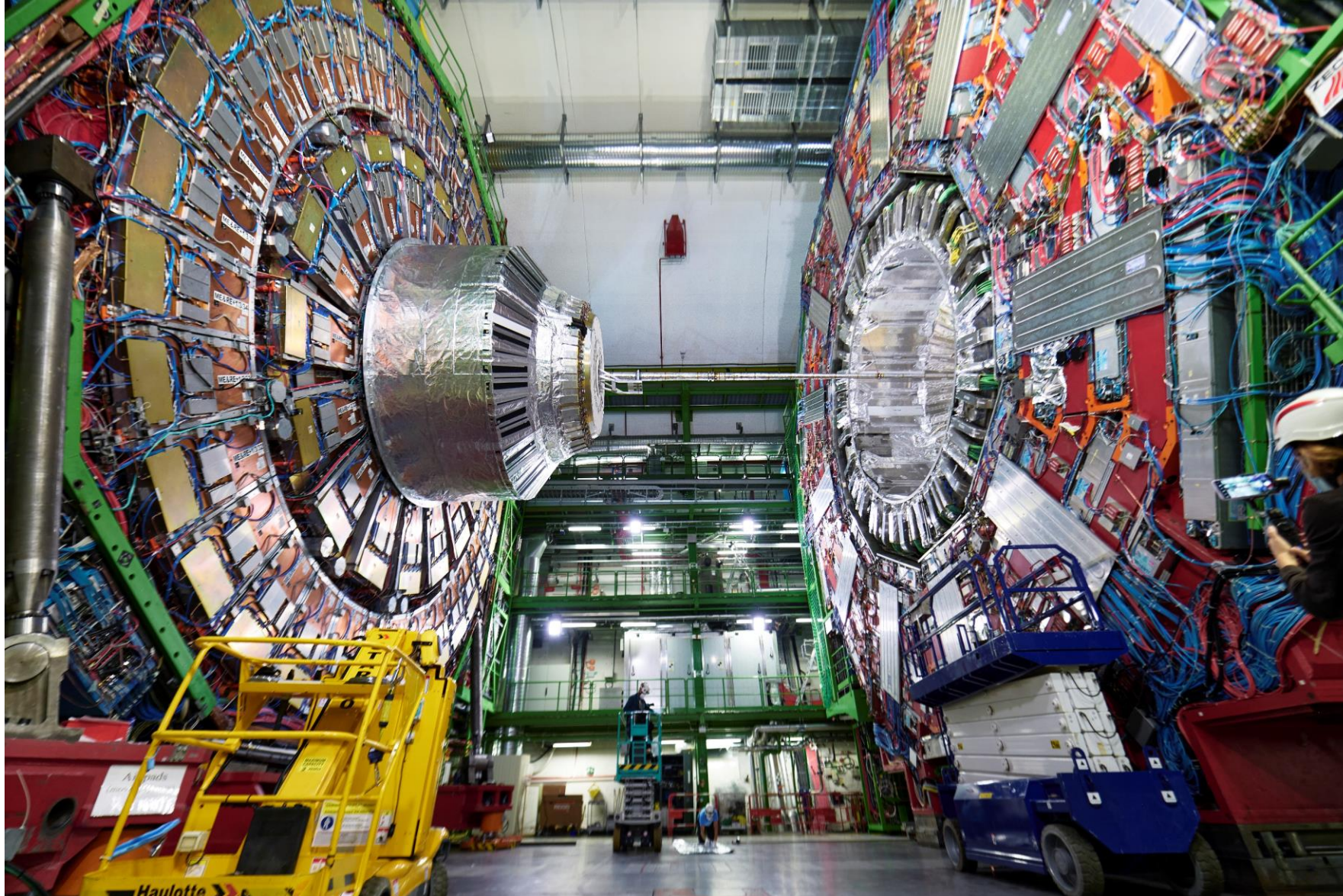
CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels





Compact Muon Solenoid - CMS

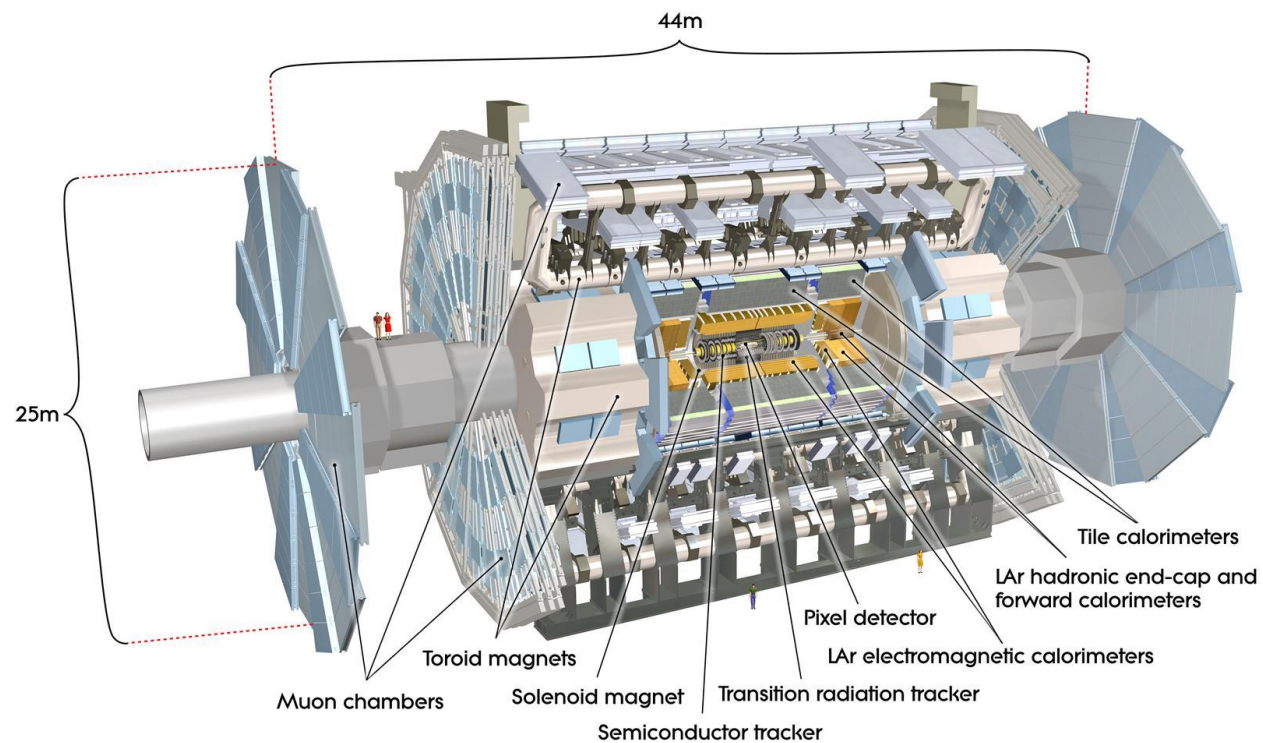




A Toroidal LHC Apparatus - ATLAS

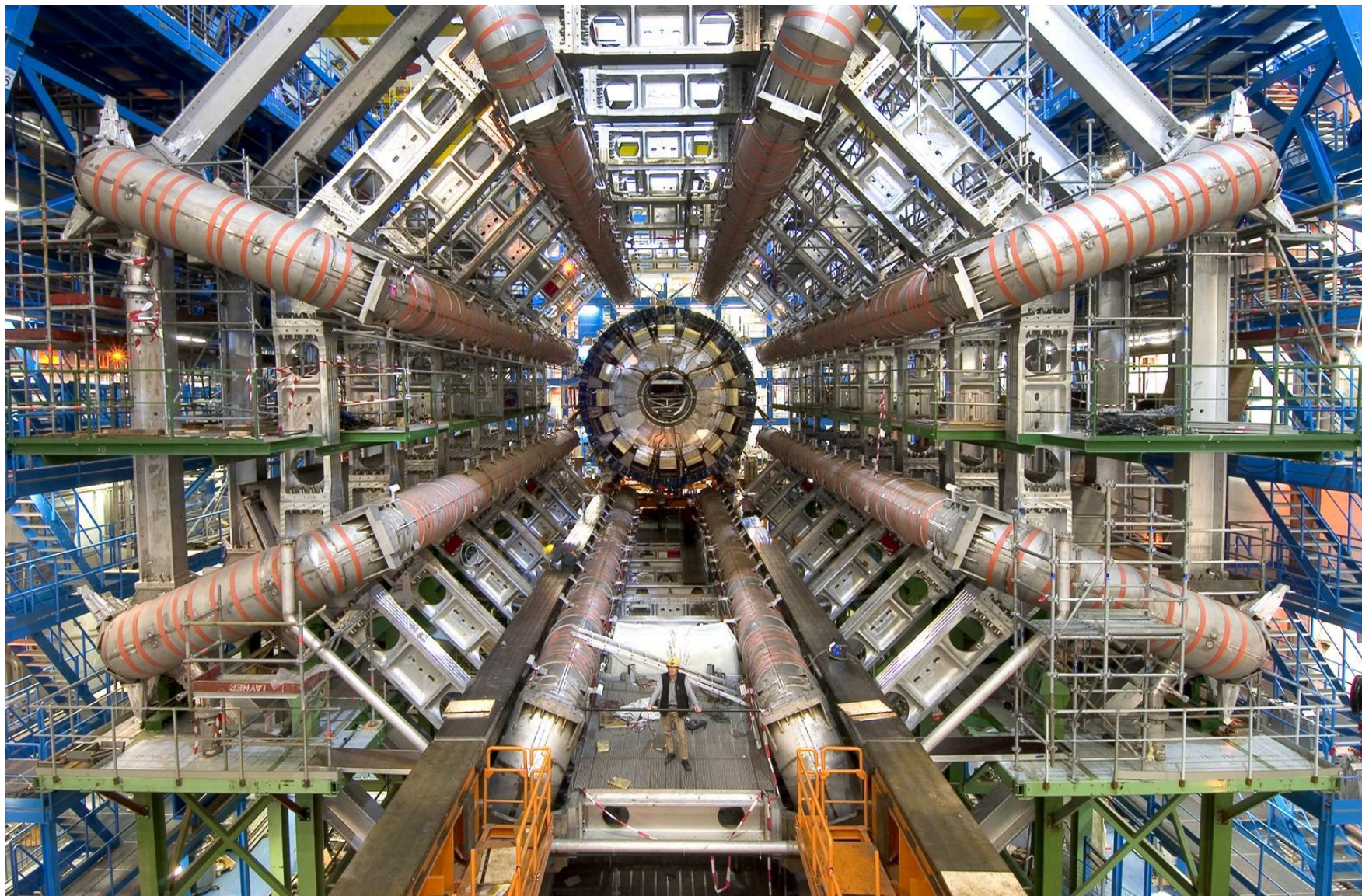
En af de 2 store detektorer til "generelle formål" = mange slags fysik

Opbygget i lag som et løg og dækker (næsten) alle retninger





A Toroidal LHC Apparatus - ATLAS



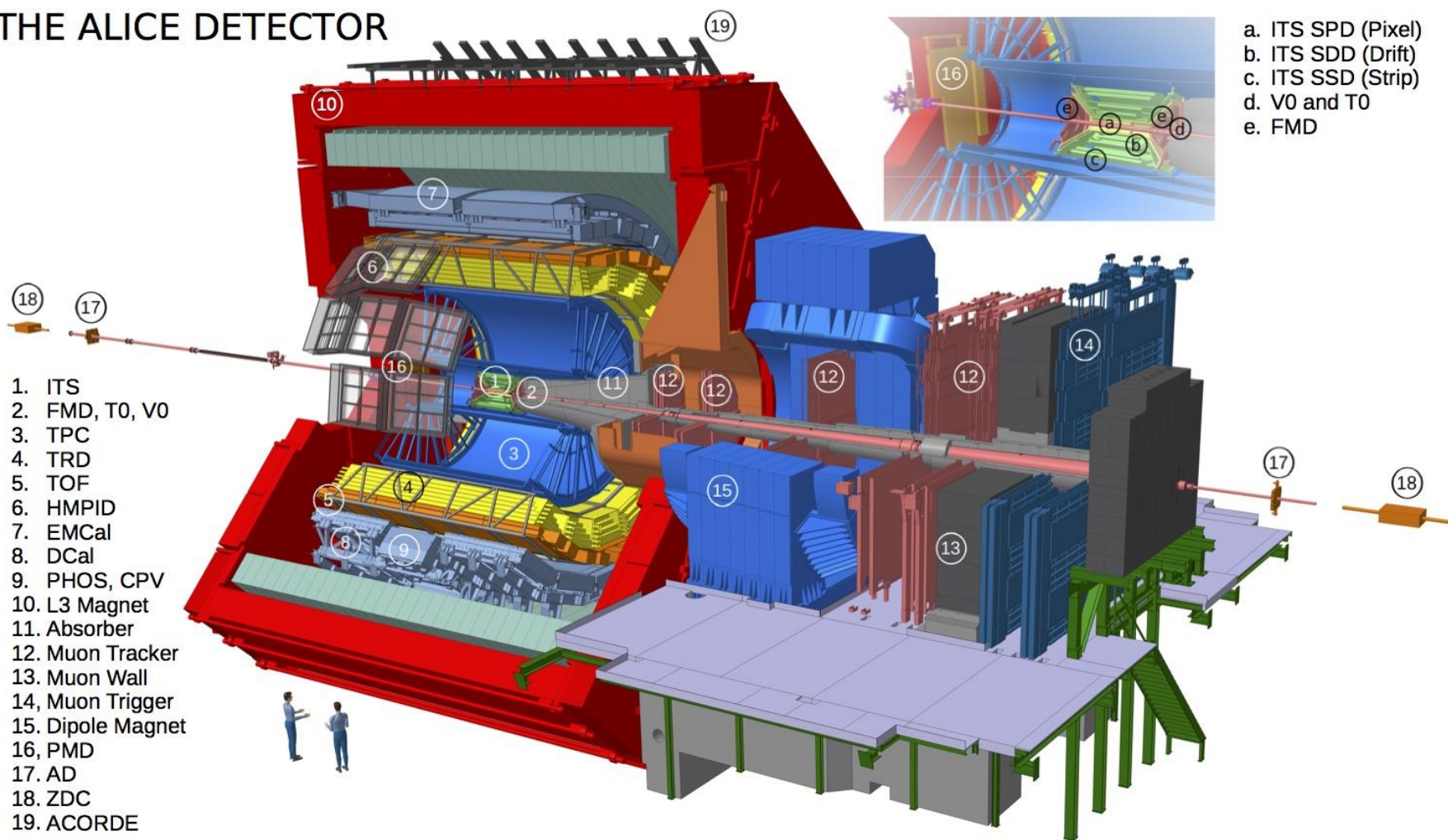


A Large Ion Collider Experiment - ALICE

Stor detektor optimeret til kollisioner af tunge ioner

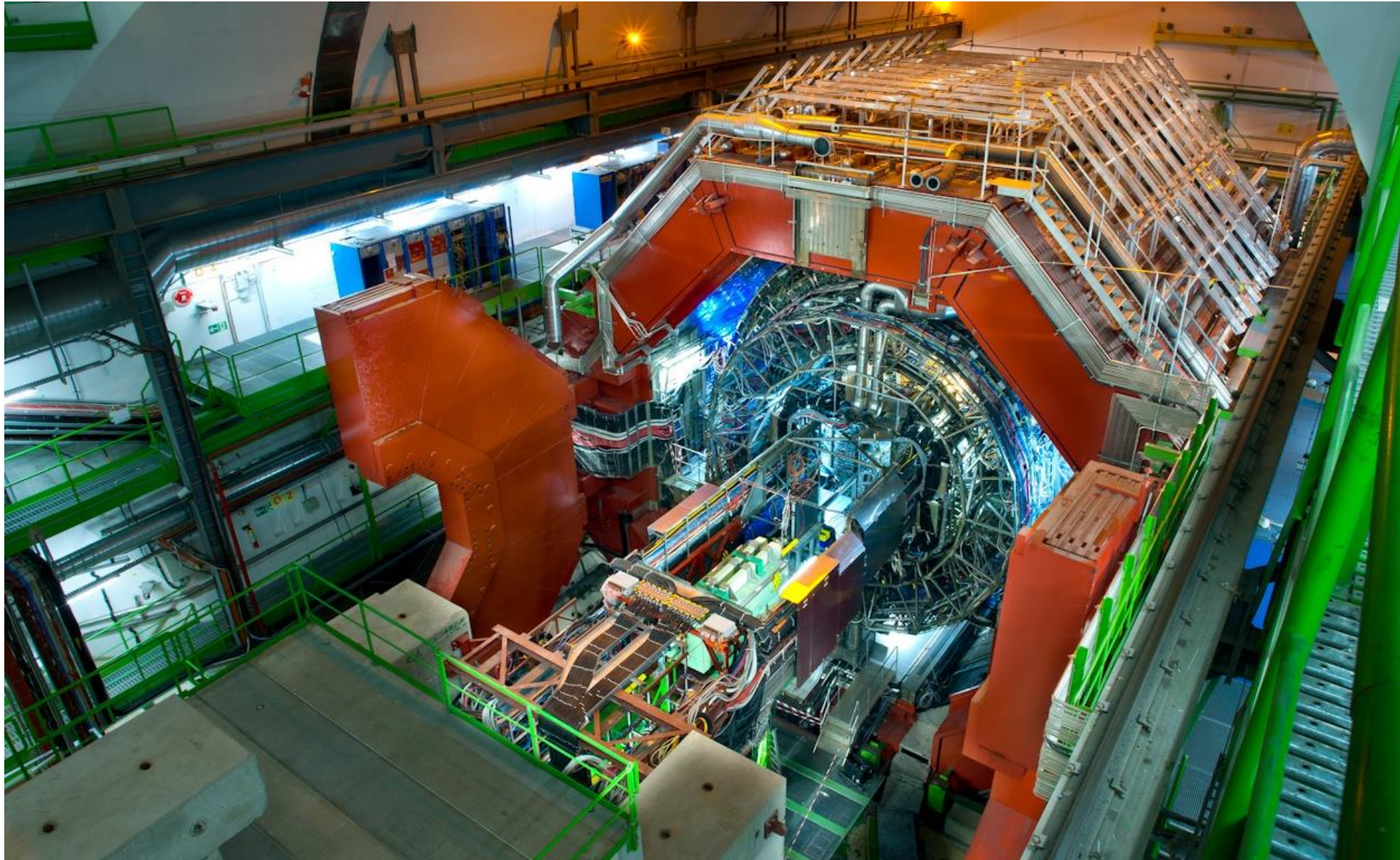
Opbygget i lag som et løg og dækker (næsten) alle retninger

THE ALICE DETECTOR





A Large Ion Collider Experiment - ALICE

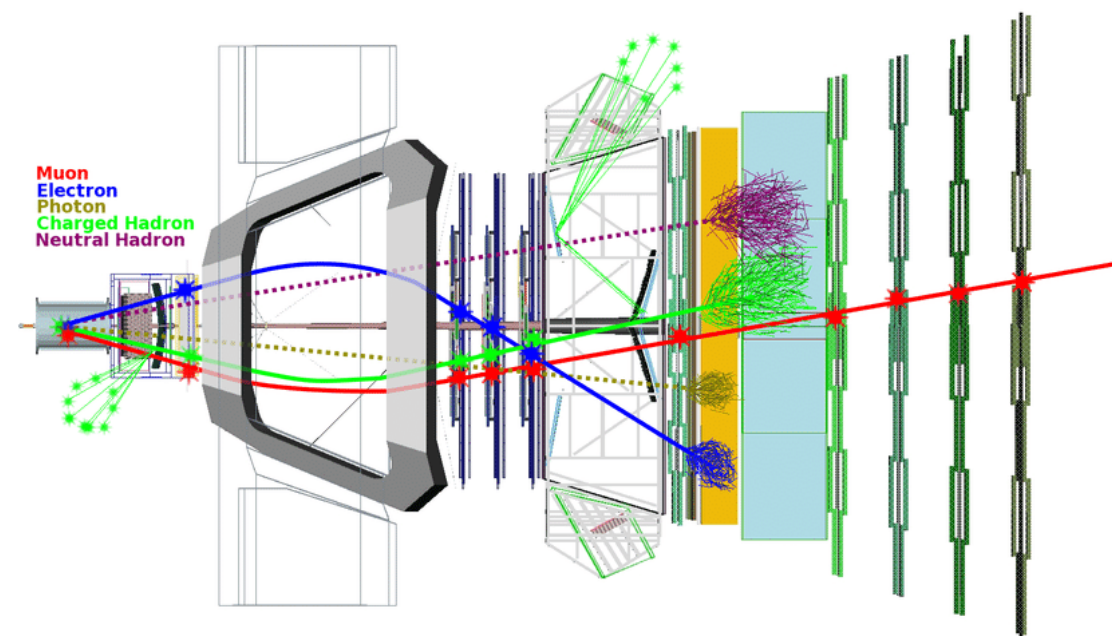
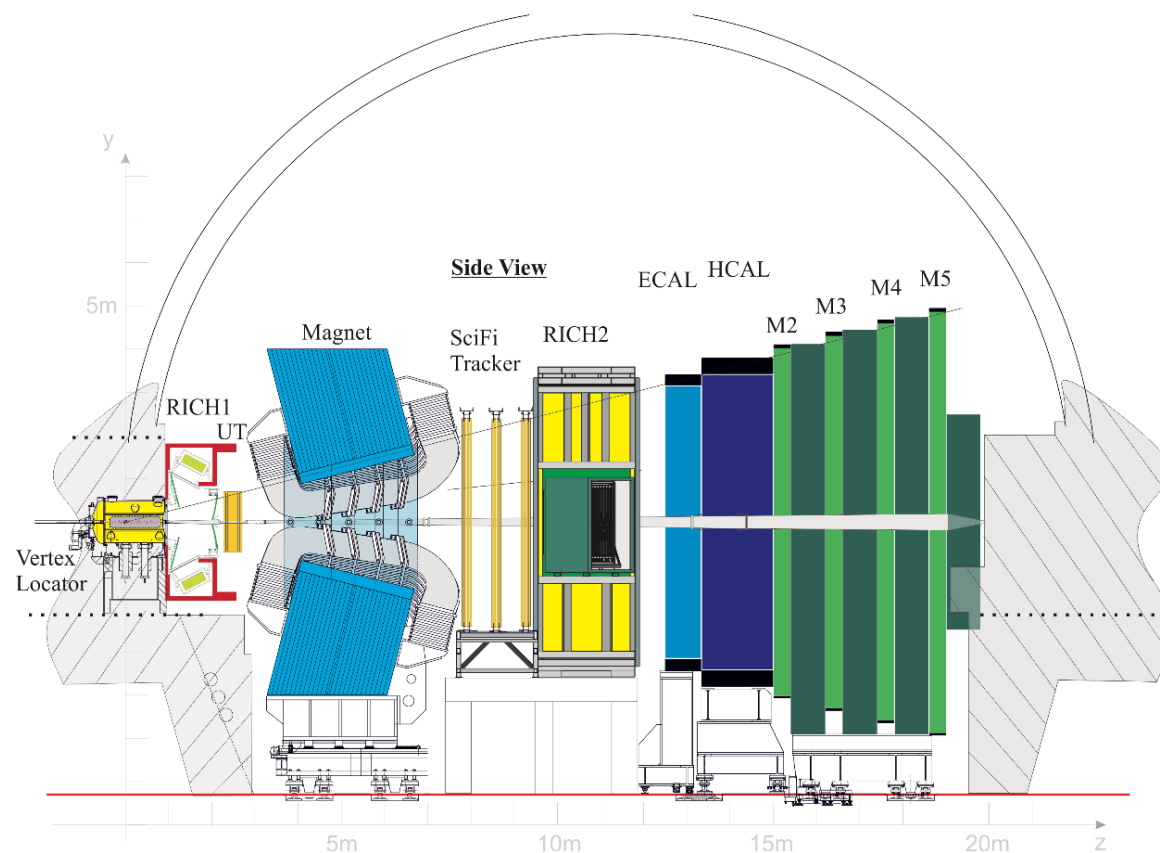




LHC-beauty - LHCb

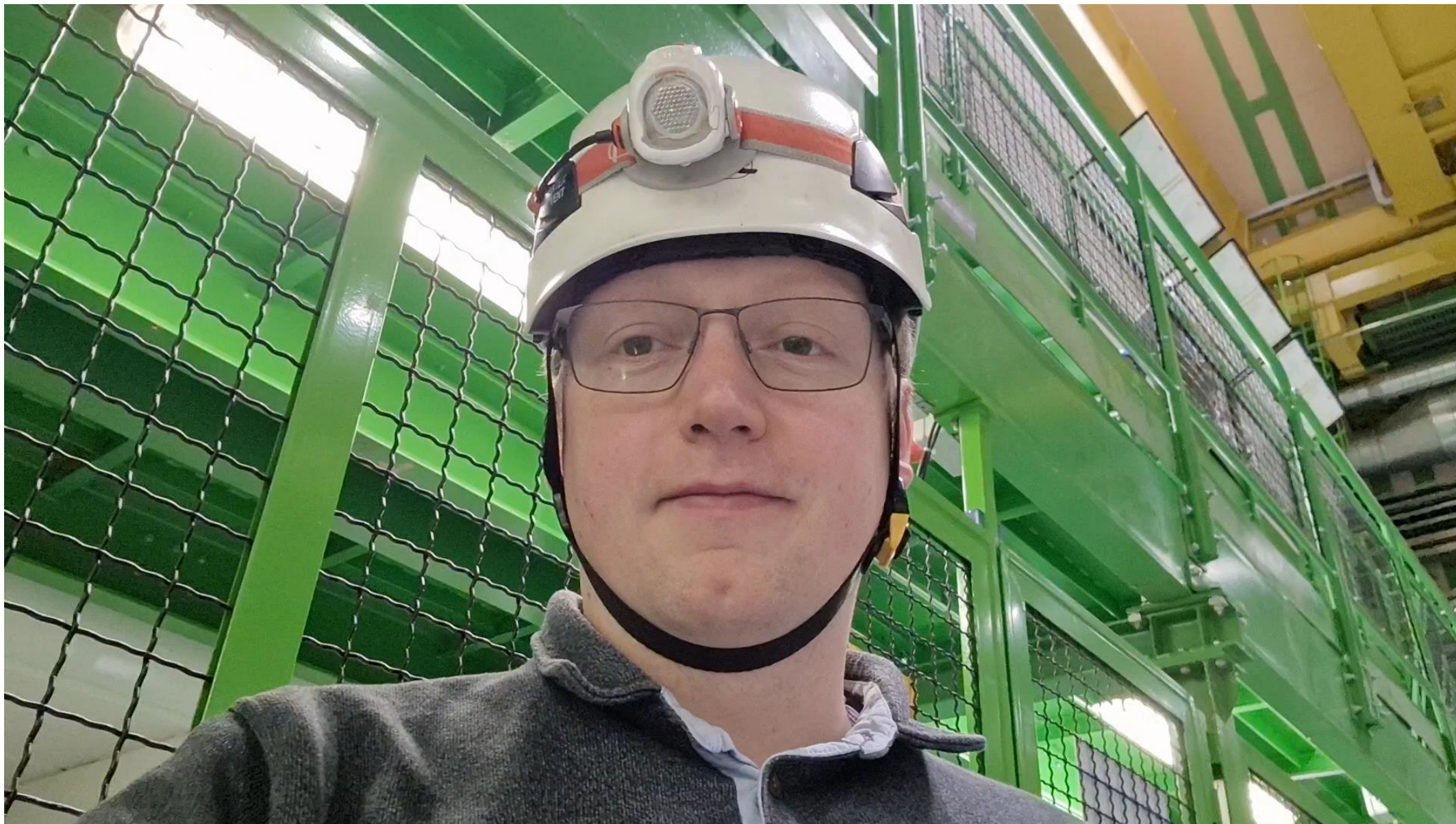
Stor detektor optimeret for b-fysik (symmetri brud)

Dækker kun fremadvendt retning, men dækker den til gengæld til meget tæt på beamet (små vinkler)





LHC-beauty – LHCb (personlige optagelser)





Triggering – Udvælgelse af interessante begivenheder

Der er sammenstød ved eksperimenterne op til 40000000 gange per sekund

At udlæse ATLAS kræver ca. 1 MB plads

Hvis man gemmer alle begivenheder ville det derfor kræve $1 \text{ MB} * 40000000 \text{ s}^{-1} = 40000000 \text{ MB/s} = 40 \text{ TB/s}$

Kun en lille del af begivenhederne som er interessante (de øvrige er kendt fysik)

Trigger systemet skal beholde alle de interessante begivenheder og reducerer udlæsnings raten

I ATLAS gør man det i 2 trin:

Trin 1:

Leder efter kombinationer af signaler som er interessante

Alt foregår i hardware (FPGAere)

Raten reduceres til 100000 per sekund

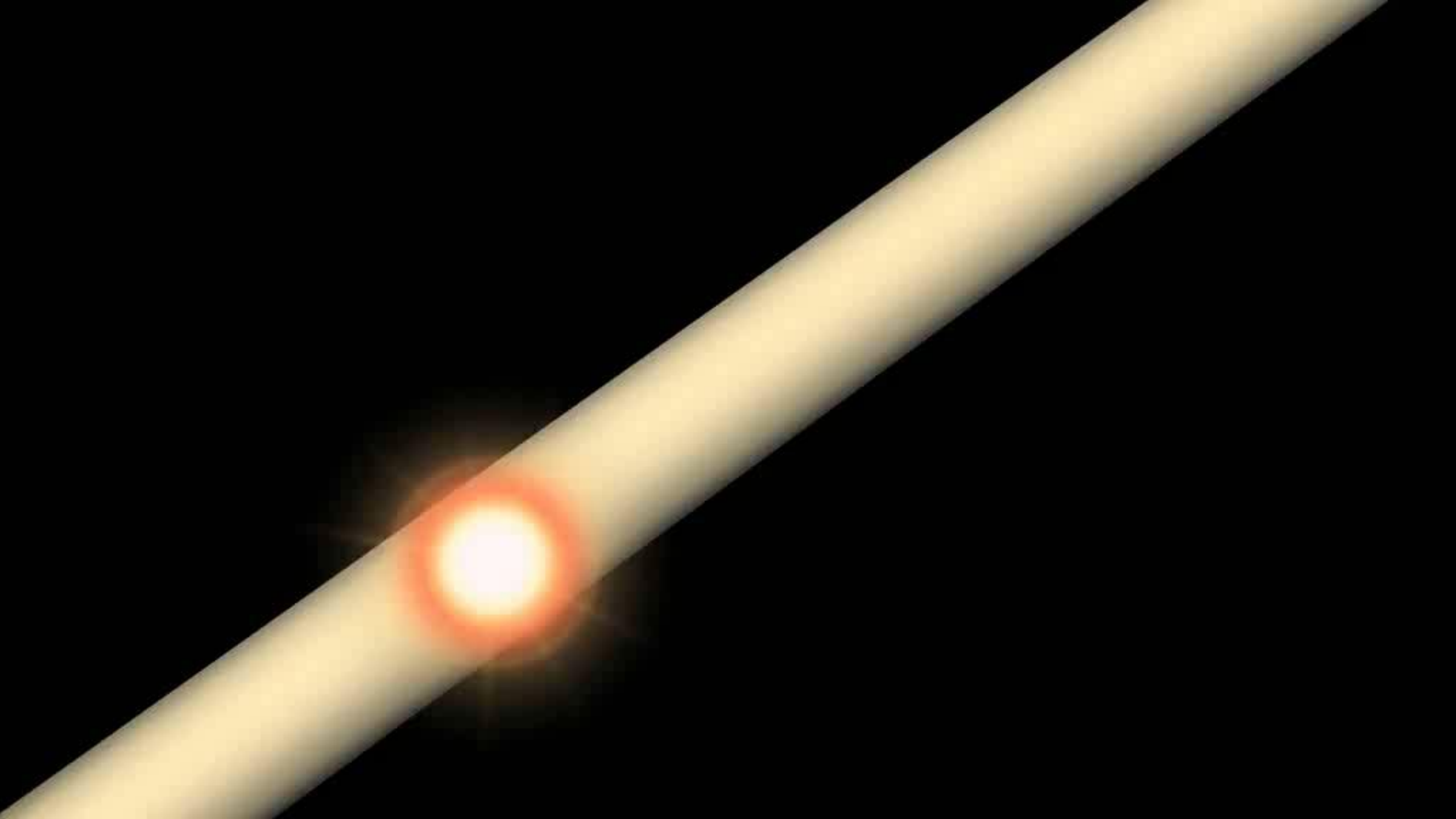
Trin 2:

Mini data analyse

40000 CPU kerner bliver brugt

Raten reduceres til 1000 per sekund

De 1000 begivenheder gemmes til senere analyse (1 GB/s)





Referencer

Particle Detectors, High School Teacher Programme 2016, Mar Capeans (CERN)

Mater class materiale, Jørgen Beck Hansen (NBI)

LHCb SciFi: From performance requirements to operational detector, CERN seminar, Sune Jakobsen (CERN)

Introduction to photodetectors and there applications in HEP, AIDAInnova 2nd Annual meeting, Sune Jakobsen (CERN)

An Introduction to Particle Accelerators, UK Teacher Programme 2024, Rhodri Jones (CERN)



Bonus materiale



Scintillators



Figure from [2]



Scintillators

A scintillator is a material emitting light when a charged particle passes the material

For detector applications, PMTs are often used together with organic scintillators

Organic scintillators are based on molecules containing benzene rings

The molecular pi-electrons in the ring is ionized

There are several possibilities for the for decay

The one of main interest:

Ionizing energy to state S_2 (or higher)

Internal degradation to state S_1

Florescence decay to one of the vibration state of S_0

In this case the photon will not be energetics enough of excite the molecule and will therefore not be self-absorbed

Many others transitions are possible (and some of them may contribute to the overall light yield)

Molecular states (pi orbitals)

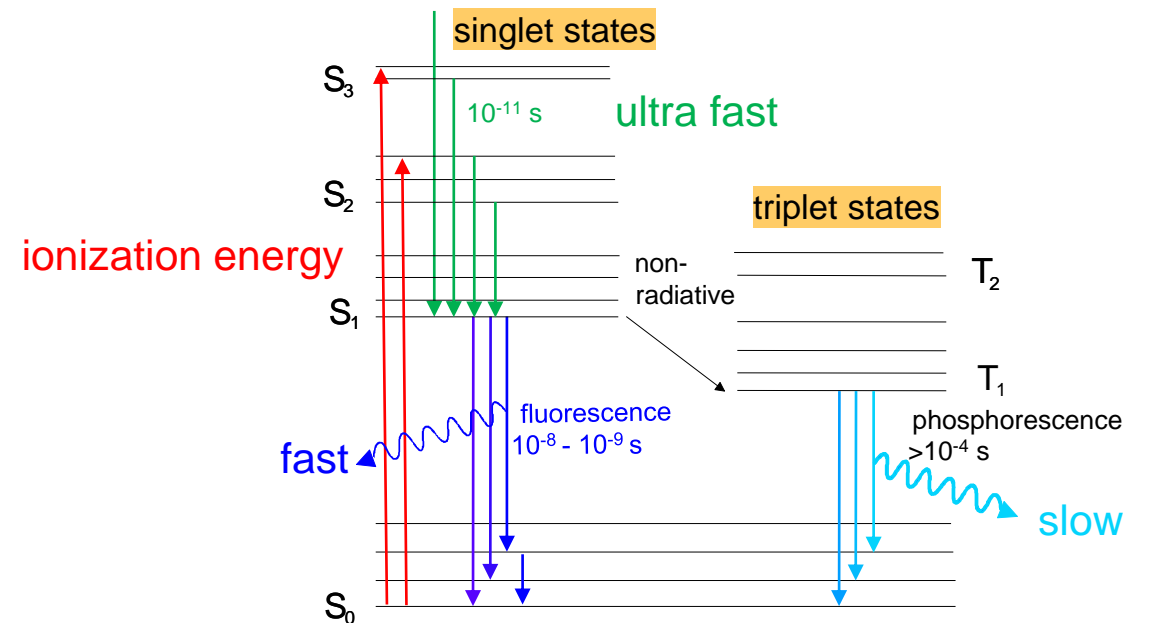


Figure modified from [1]



Plastic scintillators

A often used variant of organic scintillators is the plastic scintillator:

The main material (**solvent**) is a plastic e.g. polystyrene

The solvent is dopped with a “scintillator” (also called **activator**) in a concentration of ~ppm

The activator can be e.g. butyl PBD, p-Terphenyl, PBO or PPO

The energy from the ionizing particle is mainly absorbed in the solvent

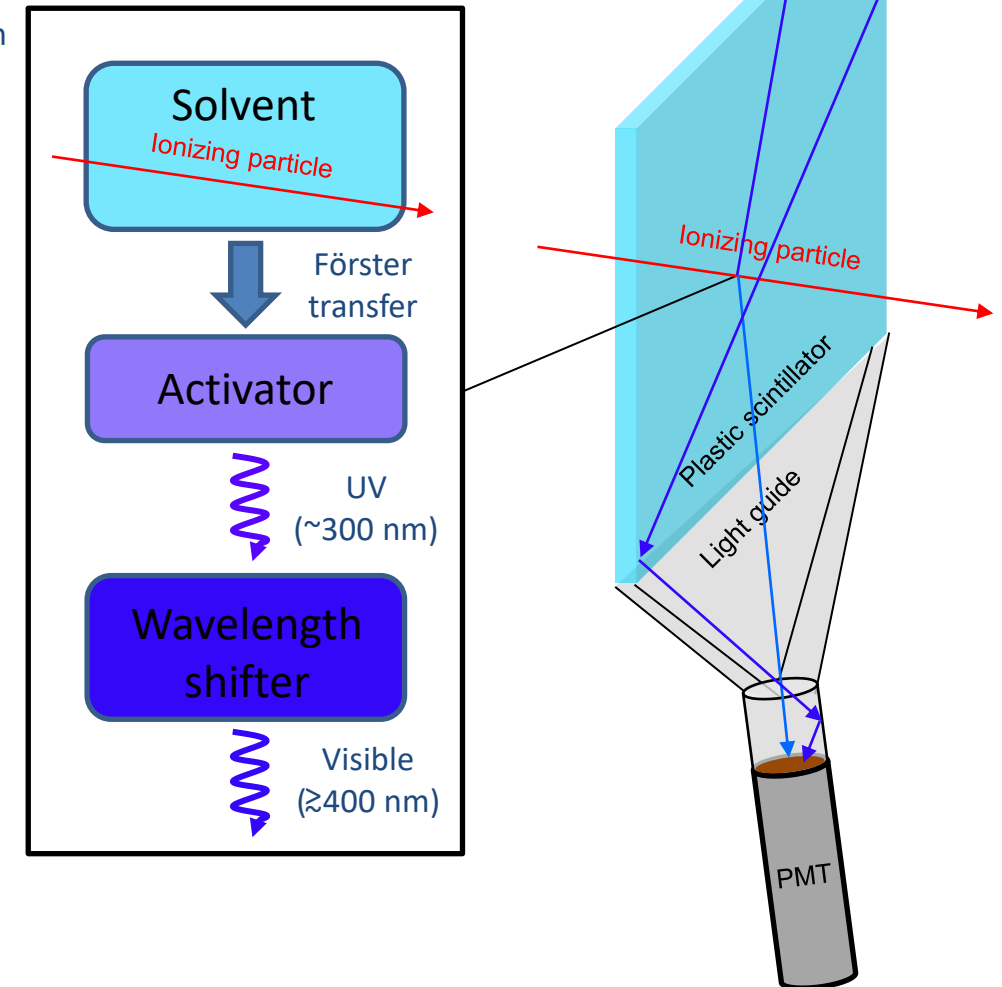
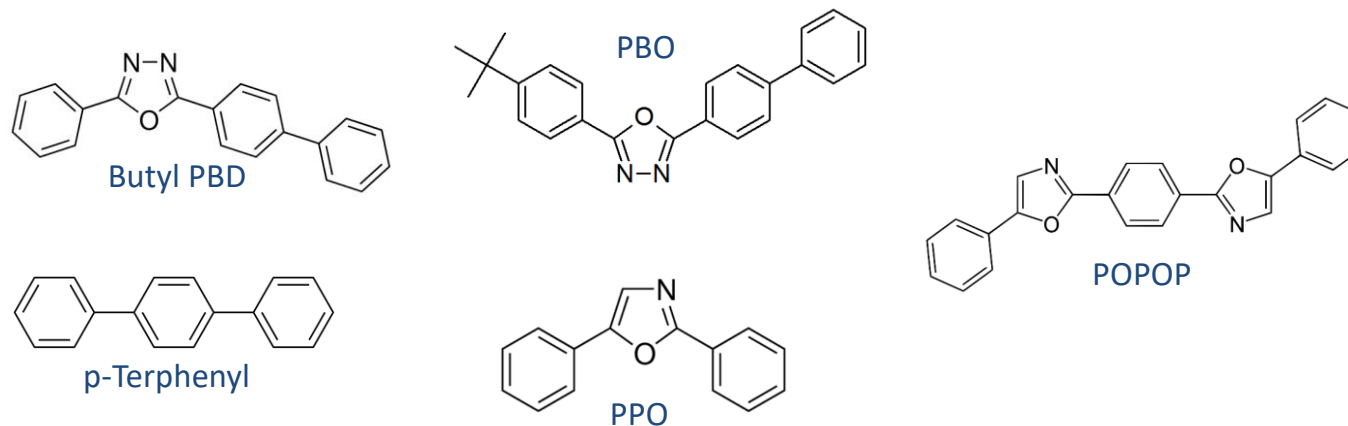
The energy is then transferred to the activator fast and locally via non-radiative dipole-dipole interactions (Förster transfer).

The activator typically emits light in the UV range

Unfortunately the solvent is not transparent to UV light

A second dopant (also ~ppm) is used to absorb the UV light and reemit it as e.g. blue light and is therefor called a **wavelength shifter** and can be e.g. POPOP

The light can then be collected by e.g. a classical PMT to convert it into an electrical signal



Chemistry figures from [6]



Plastic scintillators – Coupling and matching to classical PMTs

The light from the scintillator needs to reach the PMT photocathode to be useful

Light guides can be made in many shapes and sizes depended on the application.

In general the light can not be compacted (Liouville's theorem), so to avoid losses, the cross section of the light guide needs to be preserved in all cross section of the light guide

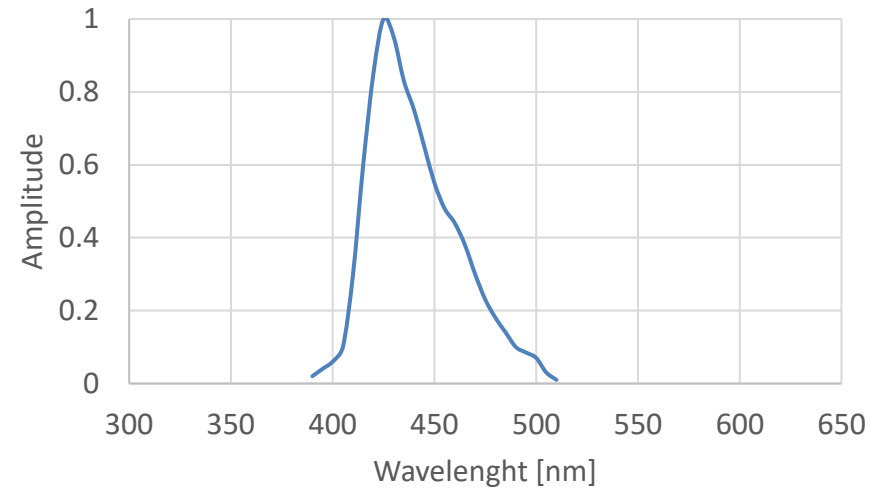
This is rarely the case due to space constraints and the fact that the PMT price scale with the active area.

The emission spectrum of the scintillator needs to be matched with the quantum efficiency of the PMT.

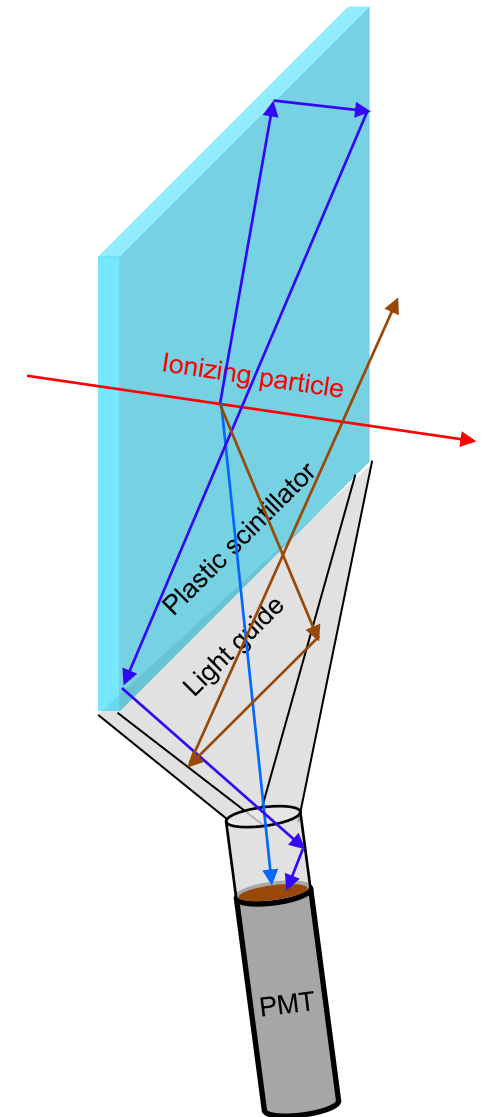
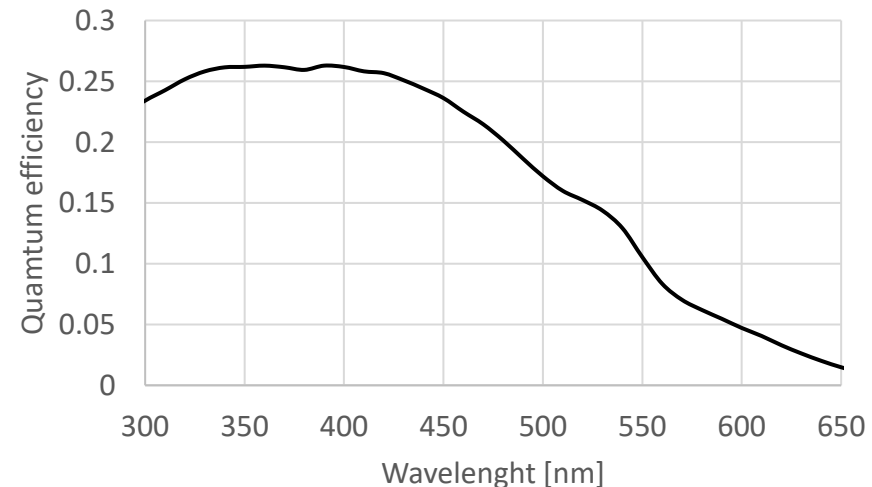
In the couplings between scintillator, light guide and PMT sometimes optical grease or optical glue can be applied to avoid losses due to Fresnel reflections

However it is important to know the aging properties of the grease/glue as some become opaque over time or with radiation

Scintillator Emission



QE PMT



Spectra adapted from [8] (EJ-200)



Plastic scintillators – Coupling and matching to classical PMTs

An alternative to a classic light guide, is a wavelength shifting bar

The bar is typically made of the same base material (plastic) as the scintillator and doped with ppm of a wavelength shifter

The wavelength shifter absorbs low wavelength shift and emits at a higher wavelength

The difference between the absorption and the emission is called the Stoke shift

If the absorption and emission is overlapping, the light is self absorbed and light transmission is extremely inefficient

The emission spectrum of the scintillator needs to be matched with the absorption spectrum of the wavelength shifter

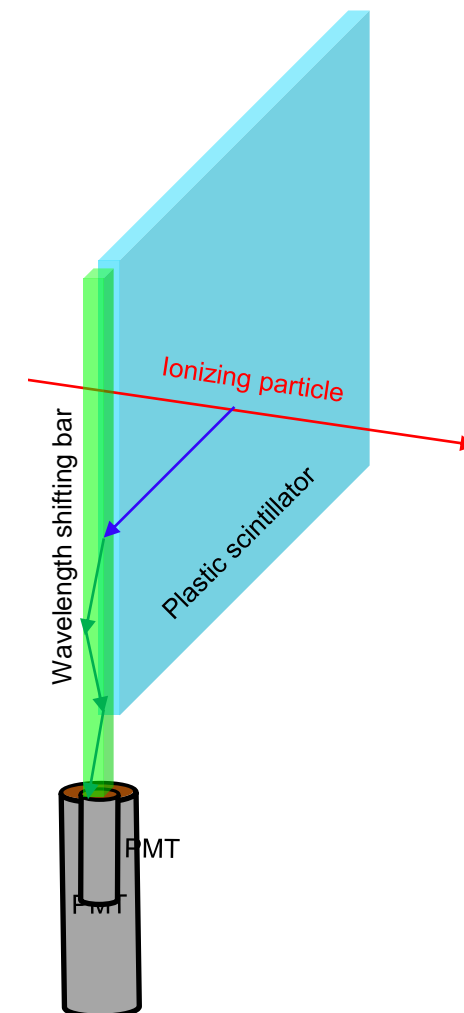
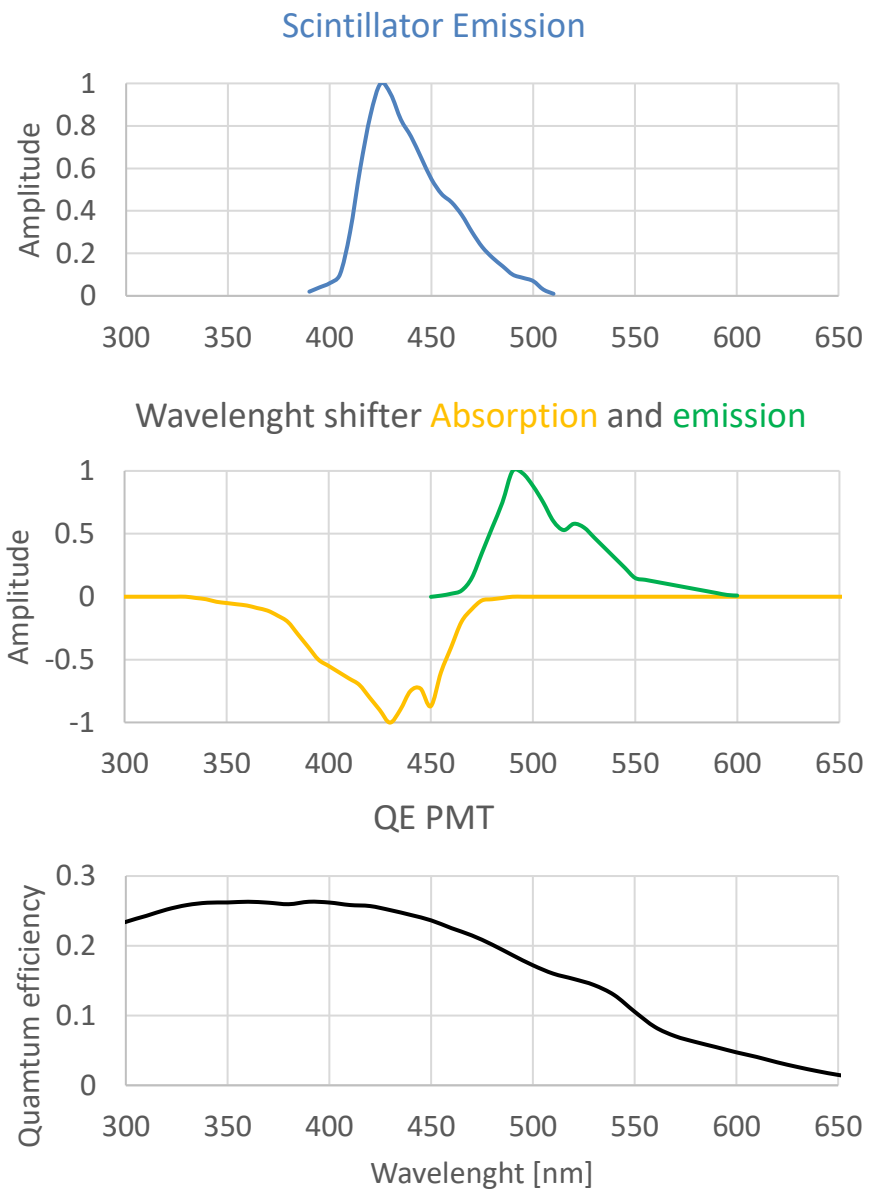
The emission spectrum of the wavelength shifter needs to be matched with the quantum efficiency of the PMT

Since the end of the bar is much smaller than the side of the scintillator plate, a much smaller (and therefore cheaper) PMT can be used

Due to the extra absorption/emission, the timing is typically not as good as with just a light guide

Notice: The base needs to NOT have a good contact to the scintillator (air grab needed)

Else the wavelength shifter light will propagate into the scintillator and be lost



Spectra adapted from [8] (EJ-200 and EJ-280)



Classical photomultiplier Tubes



Figure from [4]



Classical photomultiplier Tubes - PMTs

Basic principle:

Photo-emission from photocathode

Secondary emission from N (often 8-14) dynodes

The gain per dynode, g_i , is typically 4, but can vary from ~ 3 -50 (depends on the incoming electron energy)

Total gain M :

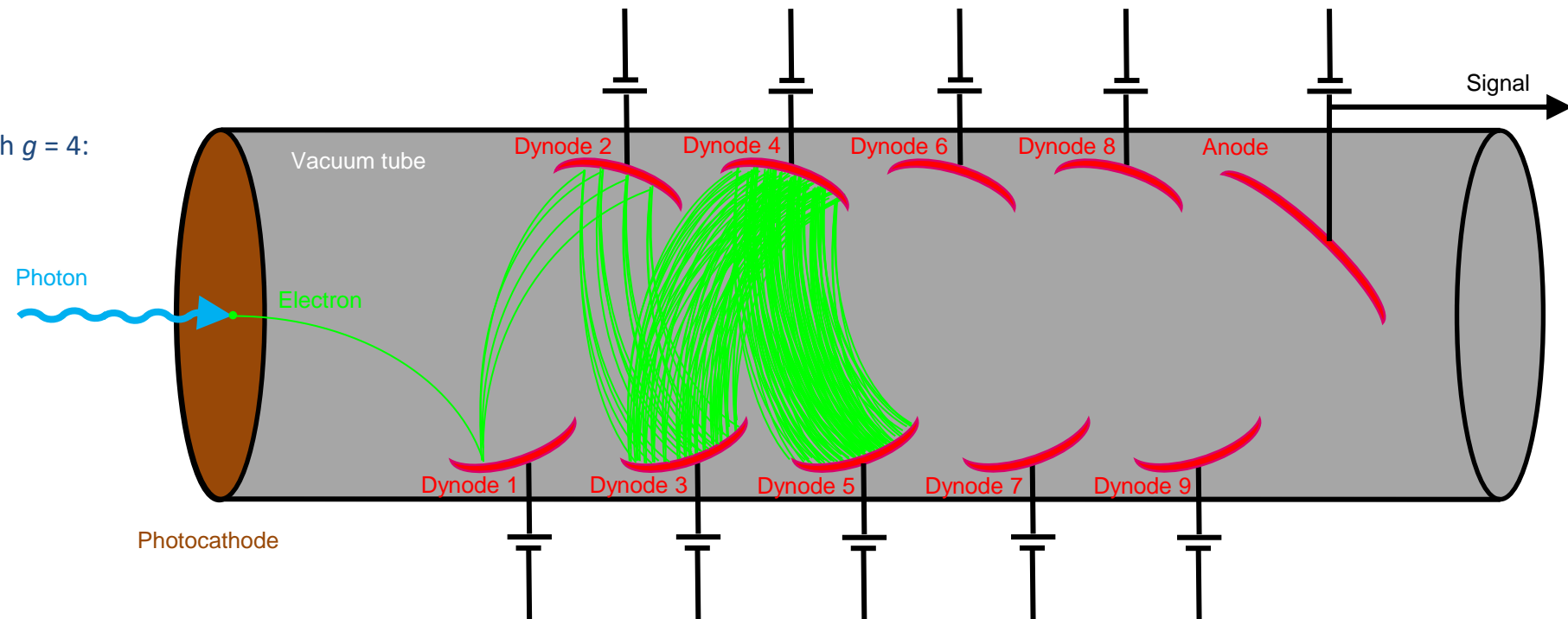
$$M = \prod_{i=1}^N g_i$$

Example of a 10 dynode PMT with $g = 4$:

$$M = 4^{10} \approx 10^6$$

Each dynode need higher potential to accelerate the electrons

Often this is applied by a single voltage source and a **voltage divider** that can be a simple resistor chain.



The low energy electrons are easily bend in even a weak magnetic field (even the earth field), so the PMT needs to be protected by magnetic shields (mu-metal)



Classical photomultiplier Tubes - PMTs

Basic principle:

Photo-emission from photocathode

Secondary emission from N (often 8-14) dynodes

The gain per dynode, g_i , is typically 4, but can vary from $\sim 3-50$ (depends on the incoming electron energy)

Total gain M :

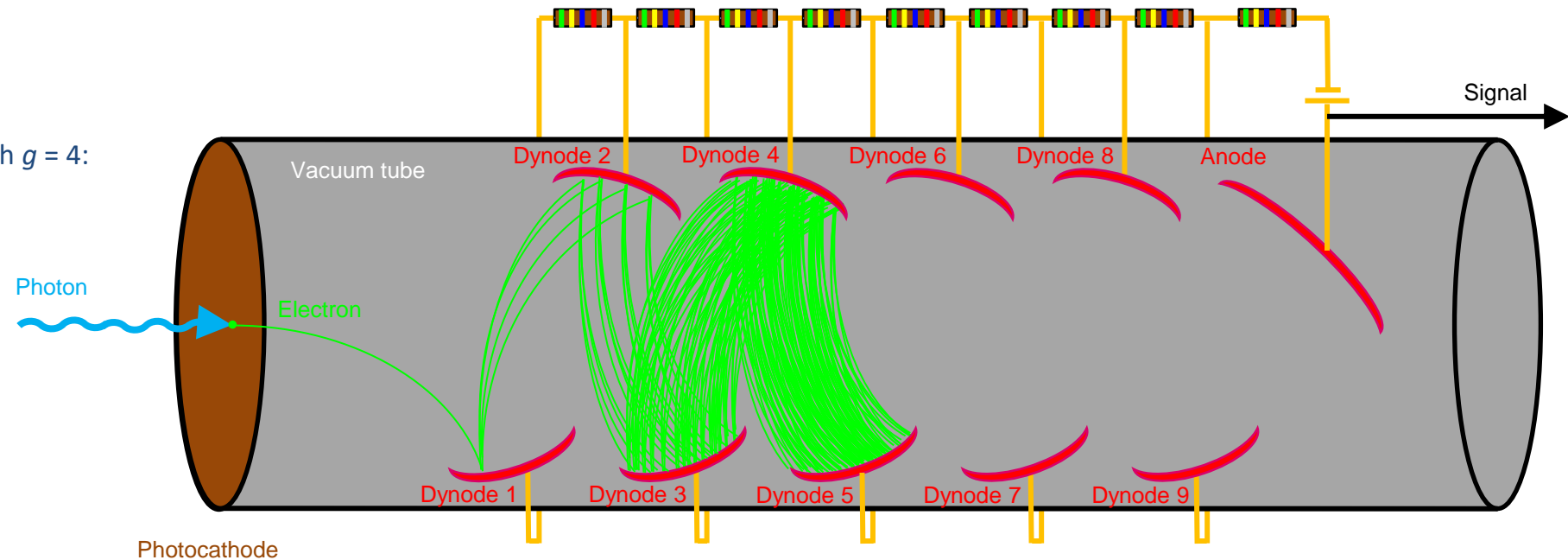
$$M = \prod_{i=1}^N g_i$$

Example of a 10 dynode PMT with $g = 4$:

$$M = 4^{10} \approx 10^6$$

Each dynode need higher potential to accelerate the electrons

Often this is applied by a single voltage source and a **voltage divider** that can be a simple resistor chain.



The low energy electrons are easily bend in even a weak magnetic field (even the earth field), so the PMT needs to be protected by magnetic shields (mu-metal)