

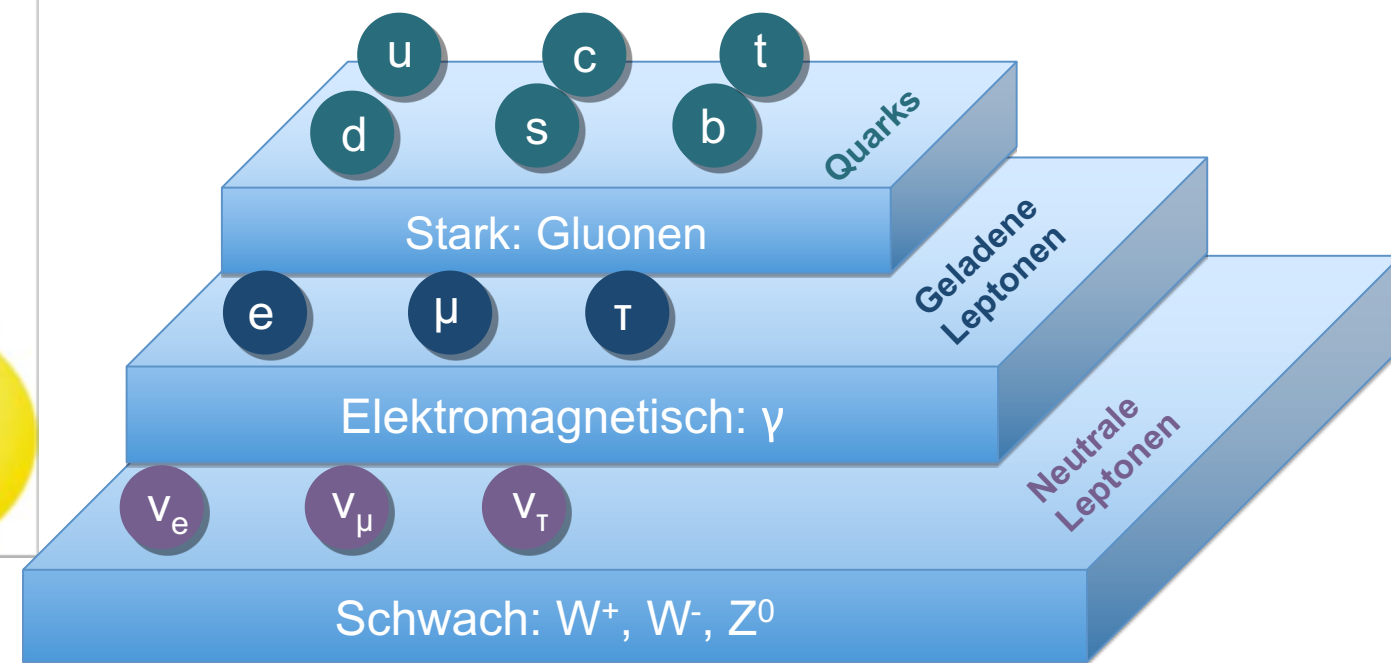
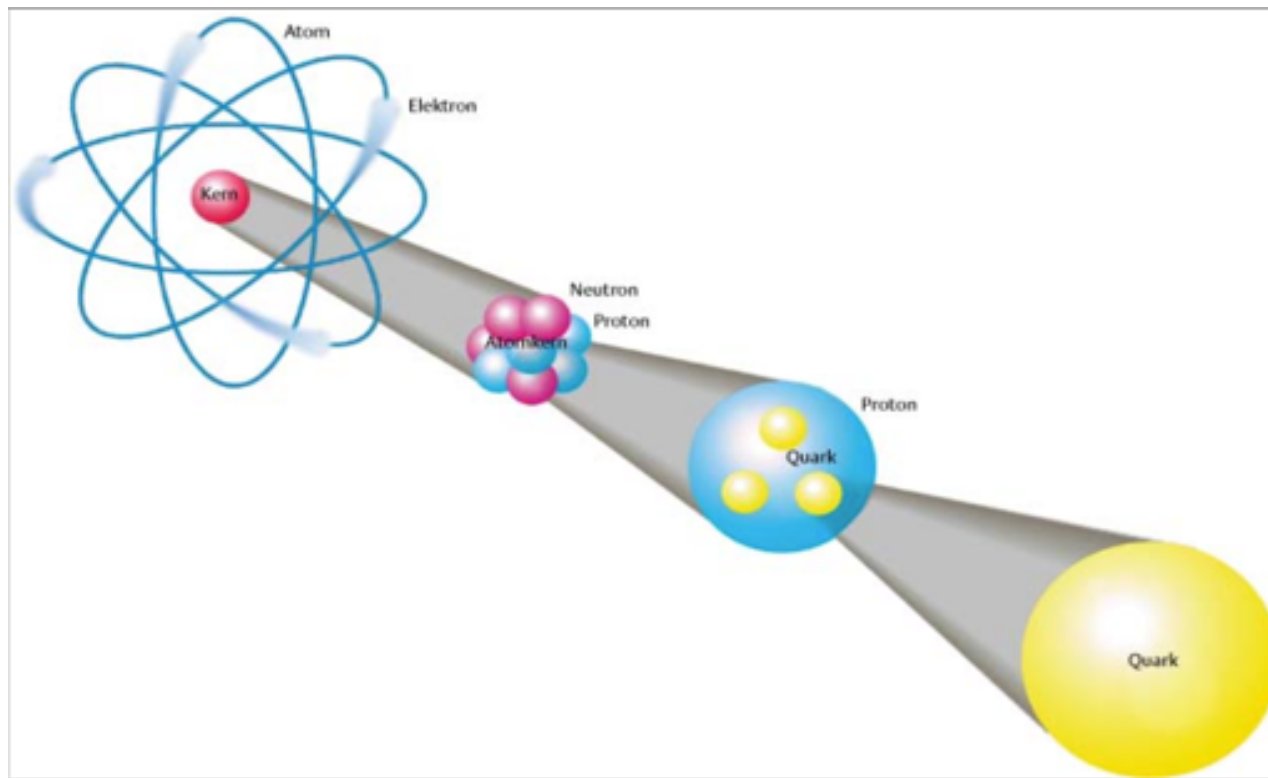
Beschleuniger und Detektoren

International Master Classes 2019

Lukas Gerritzen

Wozu Teilchenbeschleuniger?

unser Ziel ist die Untersuchung der **Bausteine der Materie**
und der **elementaren Wechselwirkungen (Kräfte)**



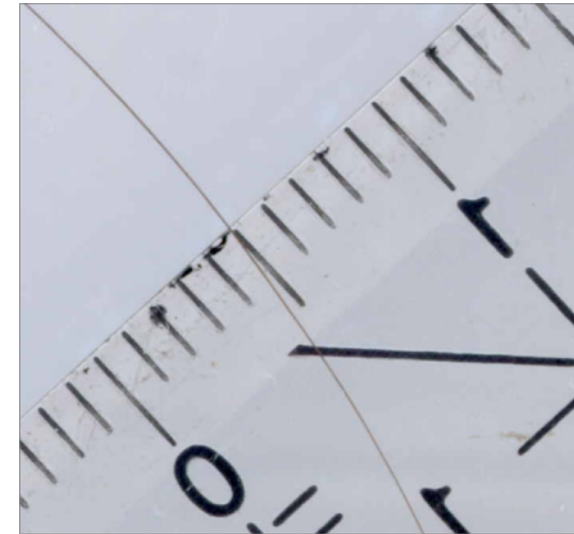
... nur wie?

Beobachtung kleiner Objekte

Auge:

Auflösung $\sim 0.1 \text{ mm}$

10^{-4} m



Lichtmikroskop:

$\sim 0.2 \mu\text{m}$

10^{-7} m



Elektronenmikroskop:

$\sim 1 \text{ nm}$

10^{-9} m

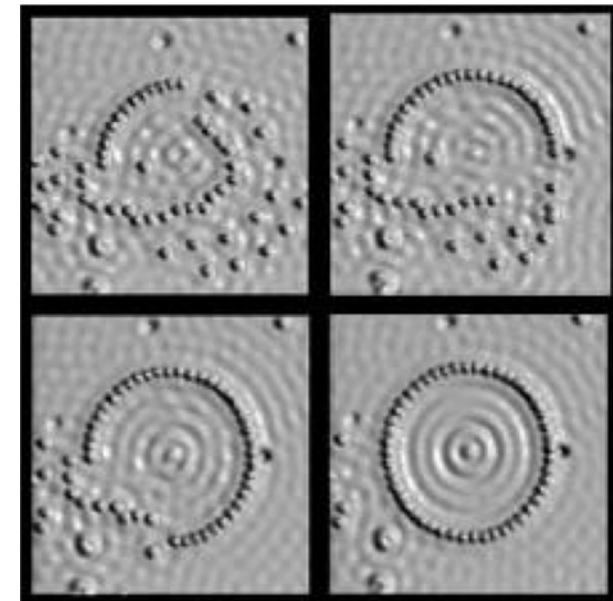


Beobachtung noch kleinerer Objekte

Rastertunnelmikroskop:

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

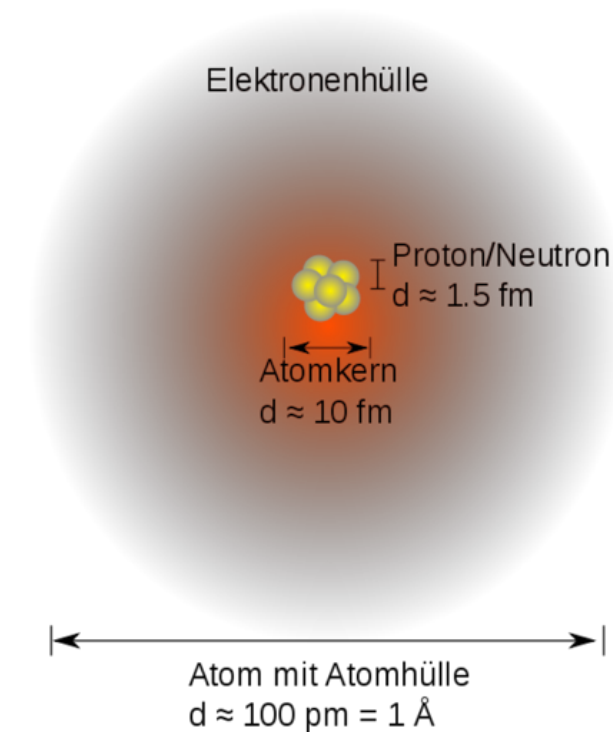
10^{-11} m



ABER:

Durchmesser eines Atomkerns

~ 10^{-15} m



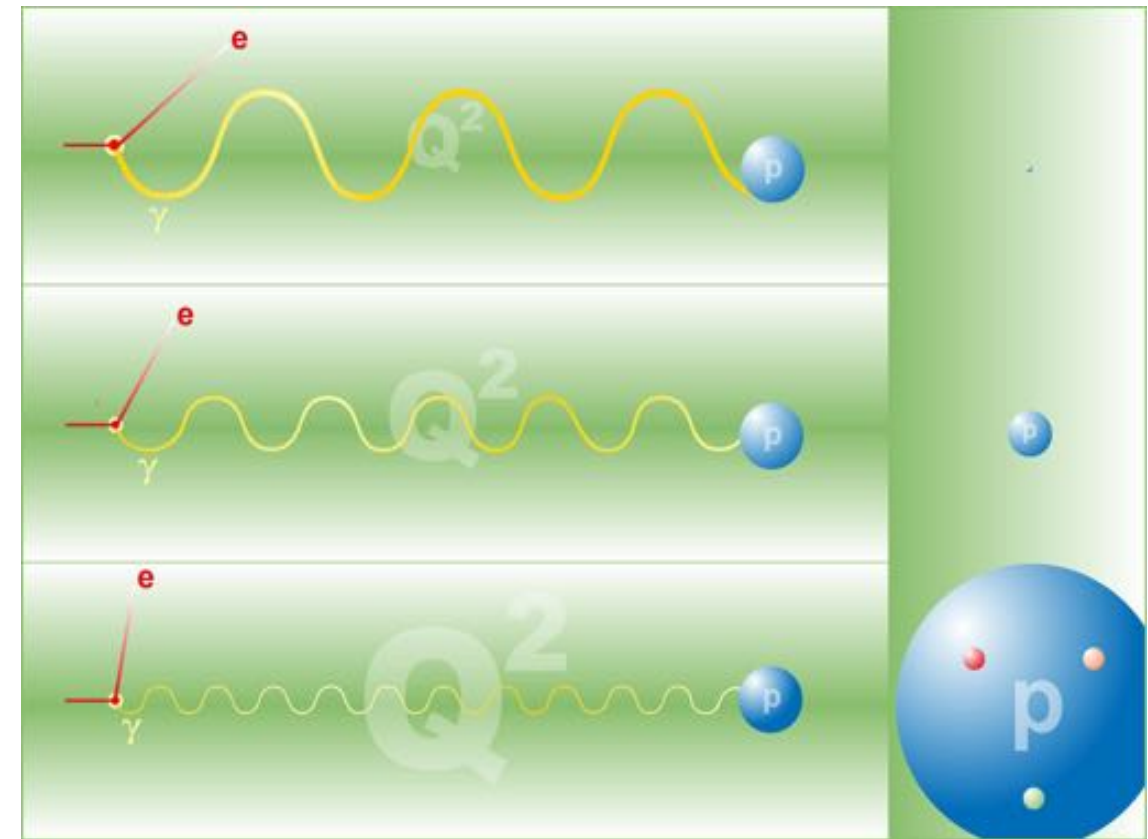
... was kann man tun?

Beobachtung kleinster Objekte

Das **Auflösungsvermögen** hängt von der **Wellenlänge** der verwendeten Strahlung ab (vgl. Wasserwellen)

de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



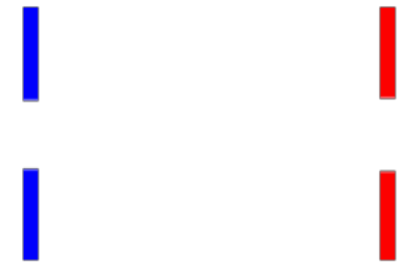
je höher die Energie, desto höher der Impuls
→ **kleinere Wellenlängen bei hohen Energien!**

7 TeV Protonen haben eine Wellenlänge von $\sim 10^{-18} \text{ m}$

um solche hohen Energien zu erreichen brauchen wir Beschleuniger!

Energien

Teilchenphysiker rechnen in “seltsamen” **Energieeinheiten**



Basiseinheit: 1 eV (Elektronvolt)

1 eV ist die Energie die eine Ladung von 1.602×10^{-19} C (Elektron oder Proton) beim Durchgang einer Potentialdifferenz von 1 Volt erhält

sichtbares Licht:	~ 1 eV
UV- Licht:	~ 10 eV
Röntgenstrahlung:	~ 10 000 eV
γ -Strahlung:	~ 1 000 000 eV
m_{Proton}:	~ 1 000 000 000 eV (~ 1 GeV)
$m_{\text{Z-Boson}}$:	~ 100 000 000 000 eV
LHC:	~ 10 000 000 000 000 eV (~10 TeV)
10 g Schokolade:	~ 1 000 000 000 000 000 000 000 000 eV

**kein Scherz,
aber wie kann das sein?**

Prinzip von Teilchenbeschleunigern

In Beschleunigern werden nun **sehr hochenergetische Teilchen aufeinandergeschossen!**

→ es ist möglich, immer kleinere Strukturen & Objekte aufzulösen

Wenn die Energien gross genug sind, geschehen wundersame Dinge



→ es **können neue, schwerere Teilchen erzeugt** werden!

Einsteins berühmte Formel: **$E = mc^2$**

LHC - Die grösste Maschine der Welt

Kreisbeschleuniger

- riesiger Beschleuniger
am CERN nahe Genf
- **Proton-Proton**
Kollisionen
- **27 km langer Tunnel**
- **~100 m** unter der
Erdoberfläche
- **4 sehr grosse**
Experimente



sehen wir uns anhand des LHC (Large Hadron Collider) einige Dinge genauer an

LHC - Die grösste Maschine der Welt

Kreisbeschleuniger

- riesiger Beschleuniger
am CERN nahe Genf
- **Proton-Proton**
Kollisionen
- **27 km langer Tunnel**
- **~100 m** unter der
Erdoberfläche
- **4 sehr grosse**
Experimente



sehen wir uns anhand des LHC (Large Hadron Collider) einige Dinge genauer an

Aufbau von Beschleunigern

Was benötigt man zur Beschleunigung von Teilchen?

1) Teilchen

→ z.B. **Protonen** (LHC) oder **Elektronen** (LEP)

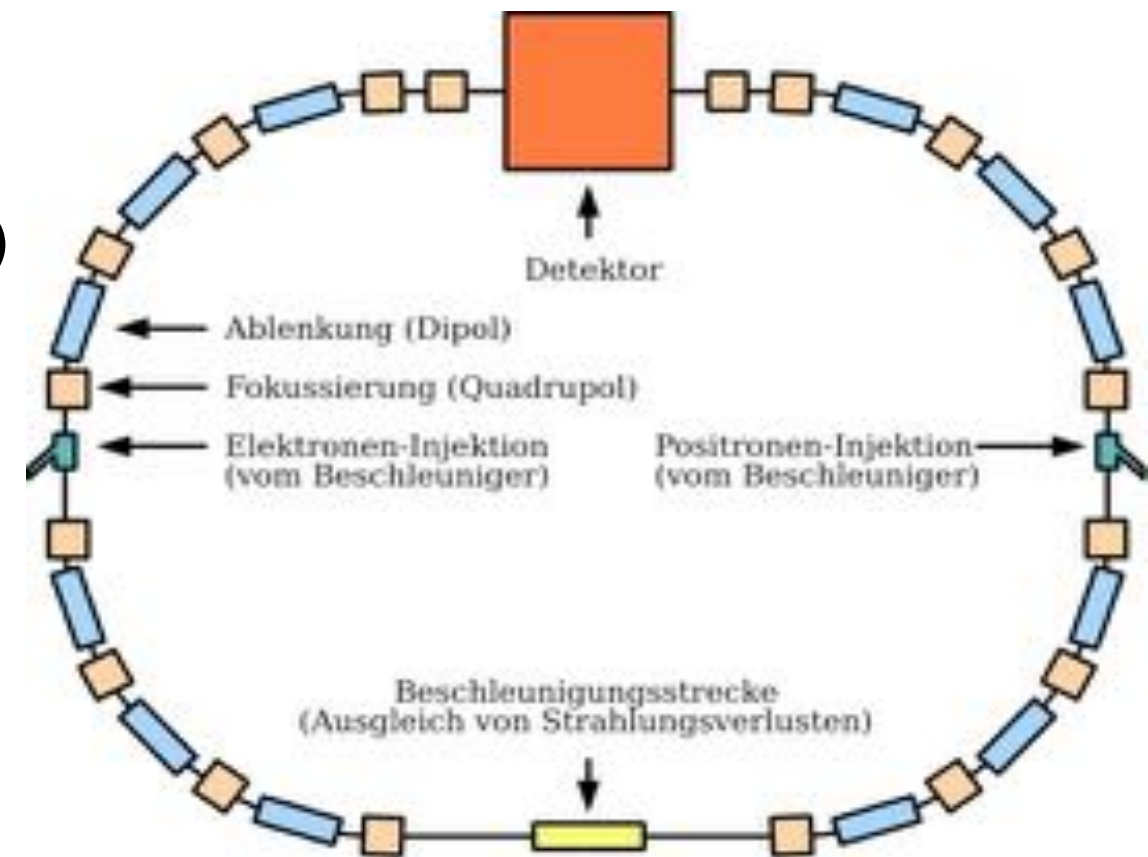
2) Beschleunigungsstrecken

→ geladene Teilchen werden in **elektrischen Feldern** beschleunigt

3) Magnete

→ Magnete zum Fokussieren der Strahlen

→ Teilchen müssen abgelenkt werden, um auf einer Kreisbahn zu bleiben



So einfach?

Teilchenquellen

Vor allem 2 Quellen wichtig:

Elektronen

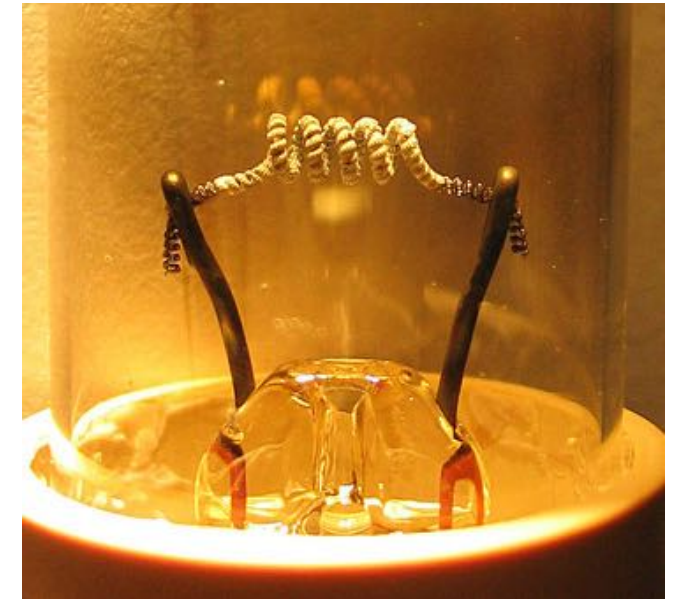
→ aus einem Metall herausheizen oder herausreißen

Protonen

→ Wasserstoffkerne

am CERN gibt es eine Flasche mit Wasserstoff aus der die Beschleuniger “gefüttert” werden!

Komplizierter wird es mit Positronen und Antiprotonen, diese werden durch z.B. Kollisionen erzeugt



Thermion Emission 1853/73
(1887 als Elektron identifiziert)

Teilchenstrahlen

Der **LHC** wird mit **zwei gegenläufigen Strahlen** gefüllt

Jeder Strahl besteht aus bis zu **2808 Teilchenpaketen!**

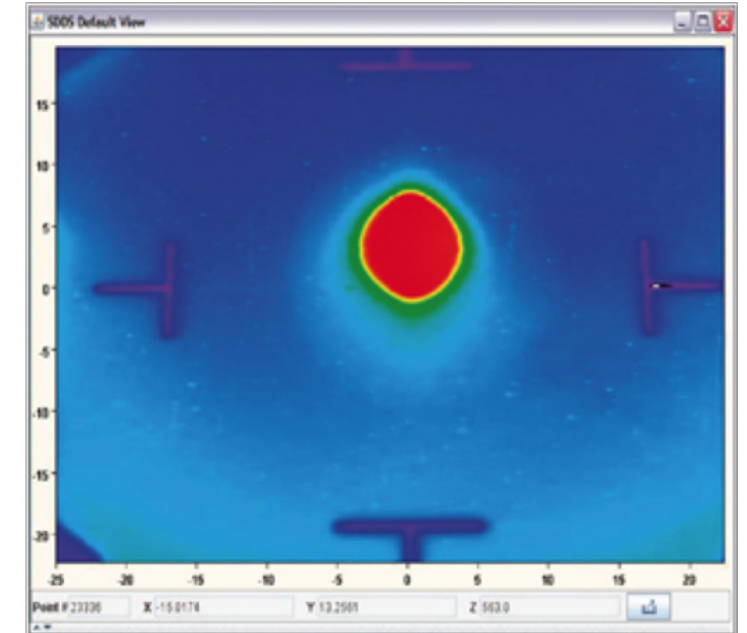
Jedes dieser Pakete ist mit ca. **10^{11}** (100 Milliarden) **Protonen** gefüllt!

Jedes Paket zirkuliert den Ring ca. **11 000 mal pro Sekunde!**

Alle 25 ns (!) treffen sich 2 Pakete bei den Experimenten!

→ pro “Bunch-crossing” ca. 15-20 einzelne p-p Kollisionen

Die gesamte gespeicherte Energie in den Strahlen ist ca. **700 MJ!**



Was sind 700 MJ ?

Wie 240 Elefanten auf Kollisionskurs



120 Elefanten mit 40 km/h

120 Elefanten mit 40 km/h



Die Energie eines einzelnen Protons entspricht der einer **Mücke** im Anflug

Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser

Protonstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

Beschleunigungsstrecken

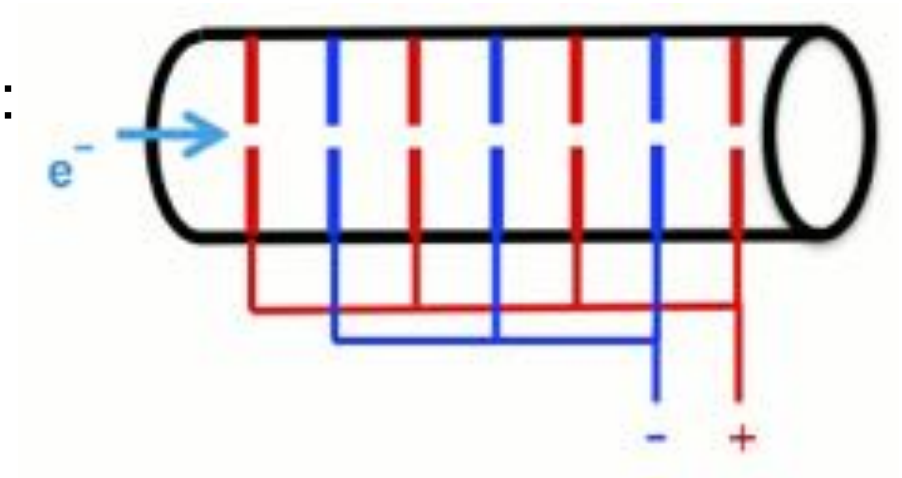
Geladene Teilchen werden **in elektrischen Feldern beschleunigt**

→ **Gleichspannung:**

Generatoren können bis zu einige **100 kV** erreichen!

→ grössere Energiegewinne durch **Wechselspannung:**

- bis zu **35 MV pro Meter**
- mehrere Platten, sodass die Teilchen immer in eine Richtung beschleunigt werden



Ablenkmagnete

Ablenkmagnete:

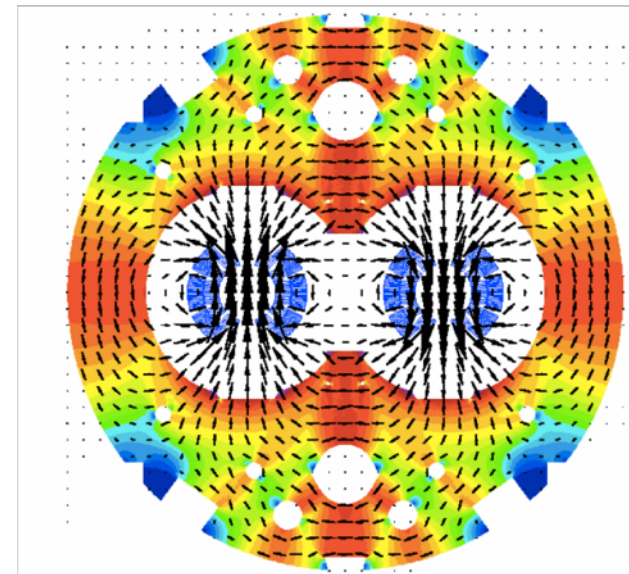
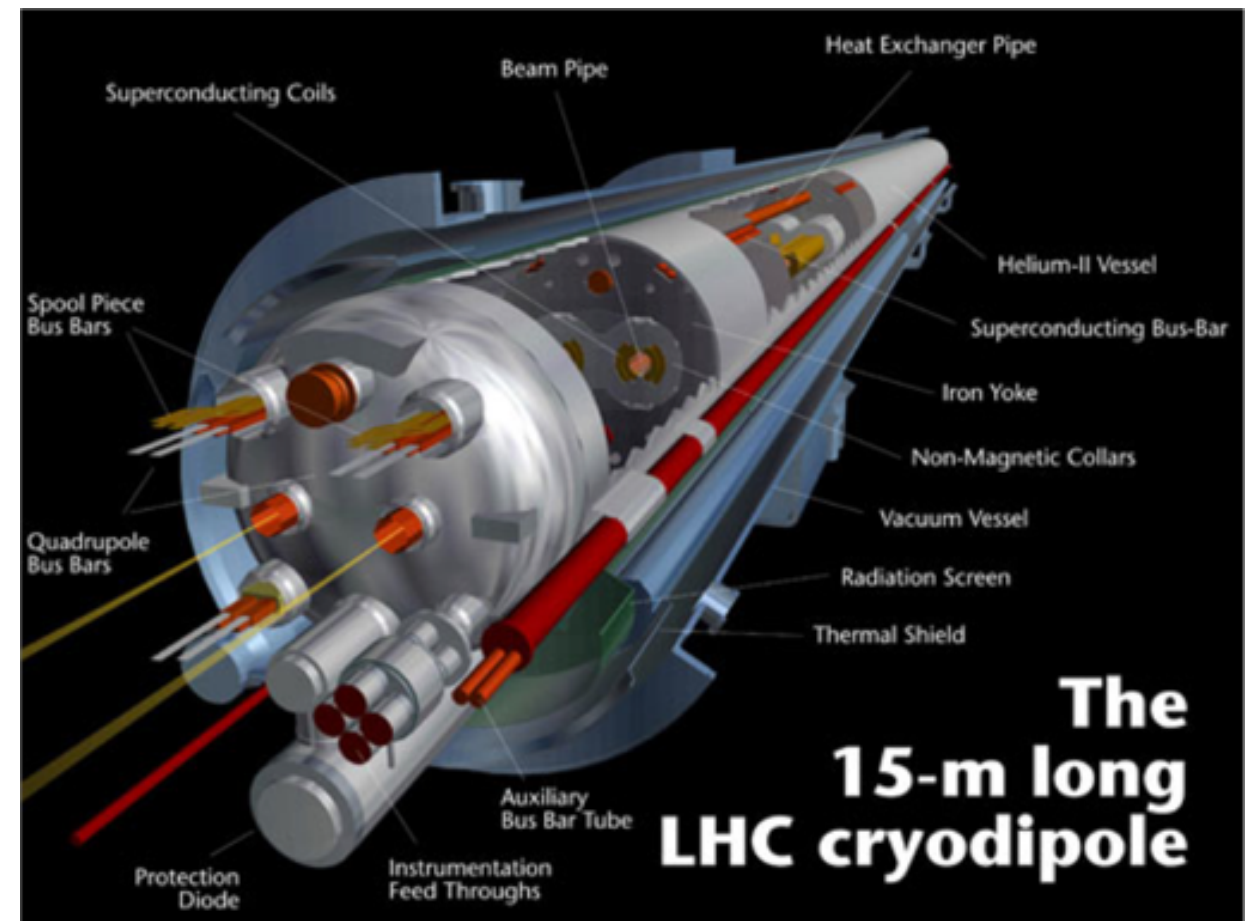
klingt einfach, ist es aber nicht!

Die Magnete des LHC:

- **15 m** lang
- **30 t** schwer
- **supraleitend** ~100 t flüssiges Helium
bei $T = 1.9 \text{ K} = -271.25 \text{ °C}$!
- Magnetfeld bis zu **8.33 T**

und es gibt 1232 Stück davon!

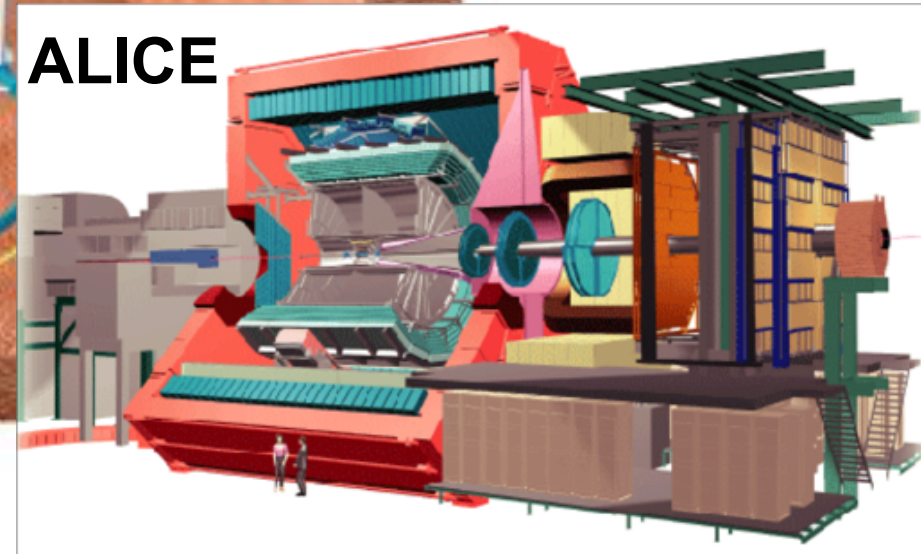
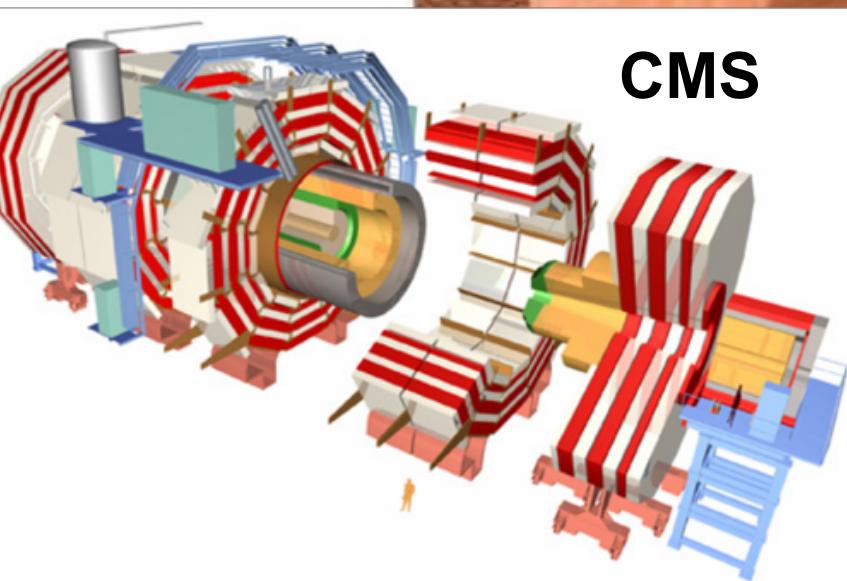
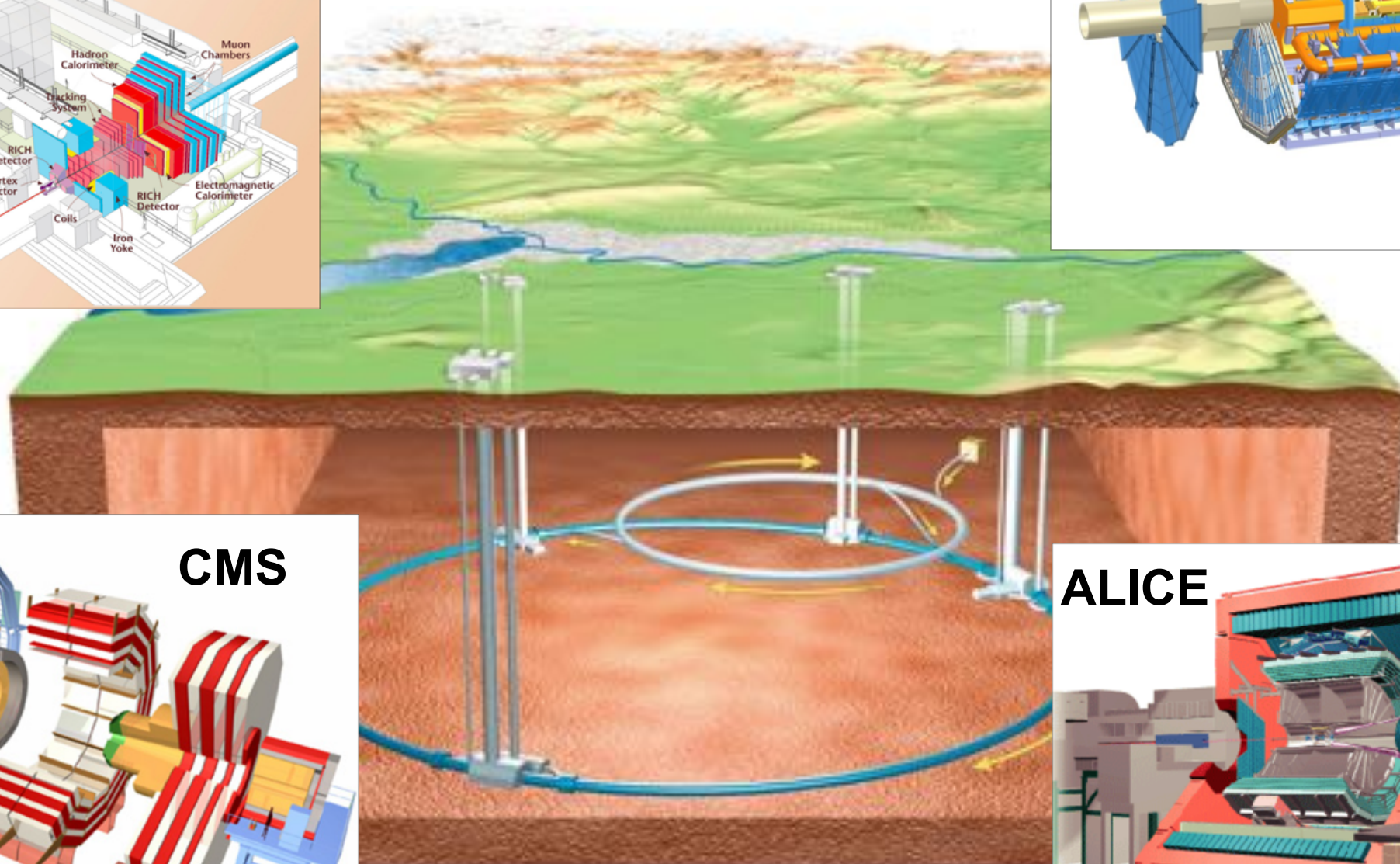
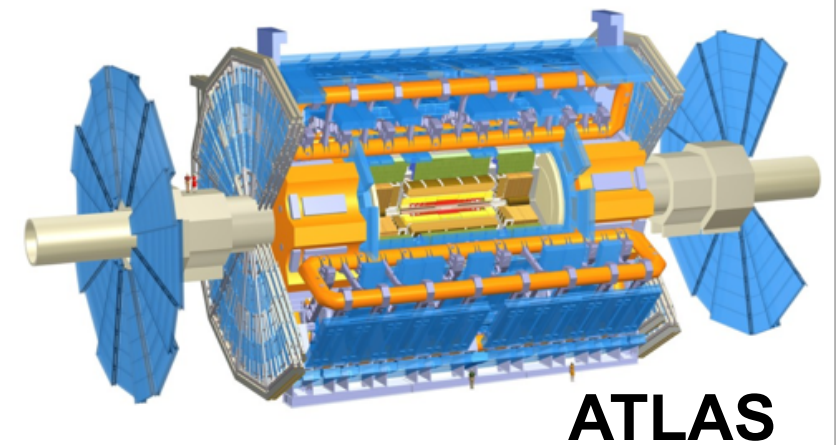
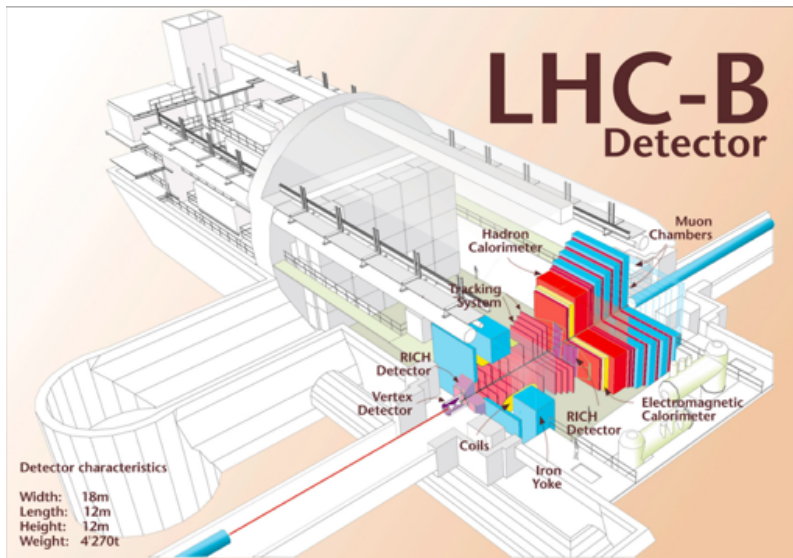
Insgesamt 11 GJ (!) gespeicherte Energie



Detektoren

Um die vielen Teilchenkollisionen aufzuzeichnen brauchen wir riesige Detektoren

Am LHC gibt es derer 4 (+2 kleine)



Messungen

Um auf alle Eigenschaften eines Teilchens rückschliessen zu können, muss man folgende Grössen kennen:

Impuls (Vektorielle Grösse)

Energie

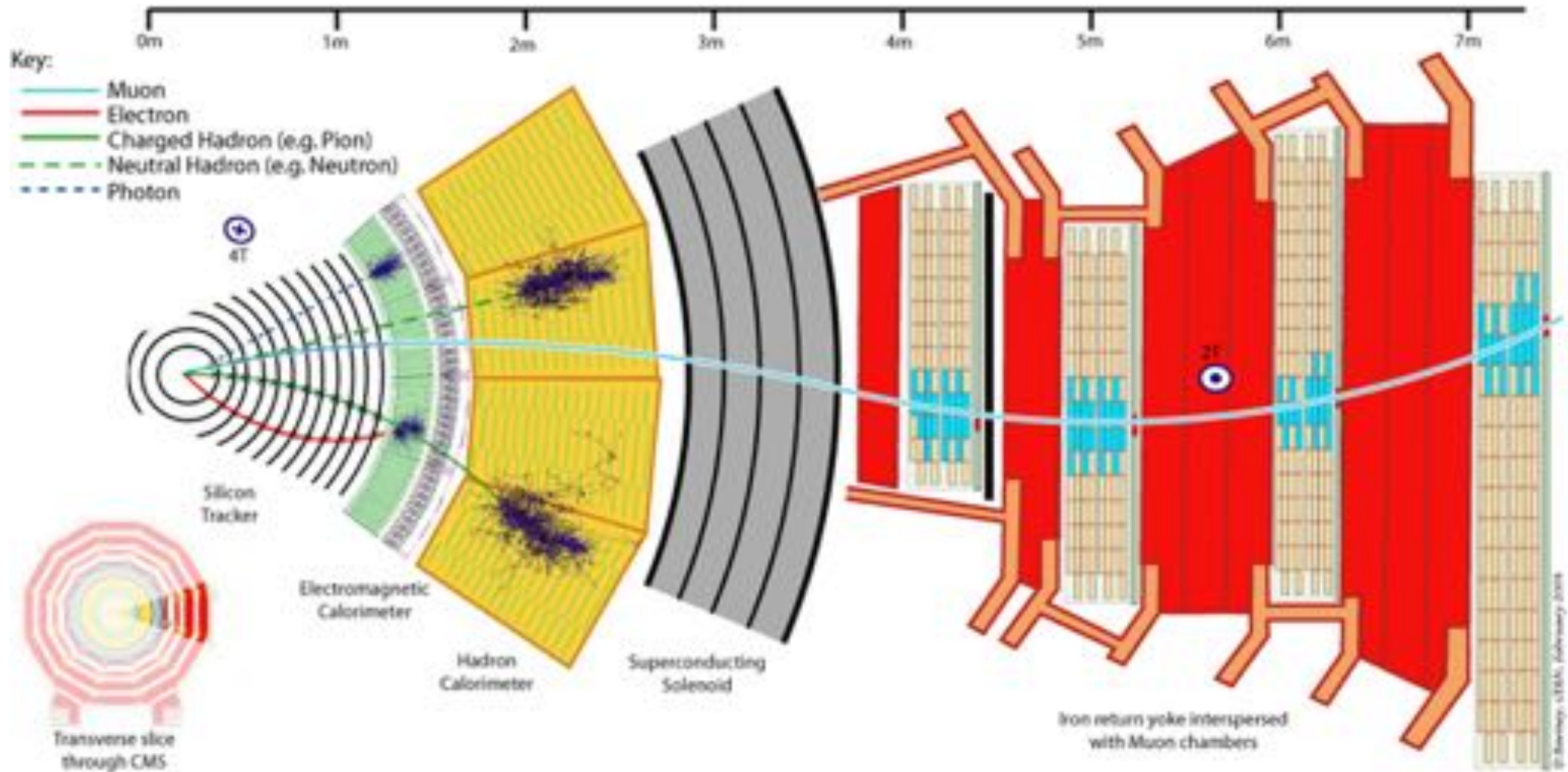
Daraus kann man auf die **Masse**, den **Typ**, die **Ladung** und die **Geschwindigkeit** schliessen!

Aufbau eines Teilchendetektors

Mit sehr wenigen Ausnahmen, haben grosse Teilchenexperimente immer denselben zwiebel förmigen Aufbau (von innen nach aussen):

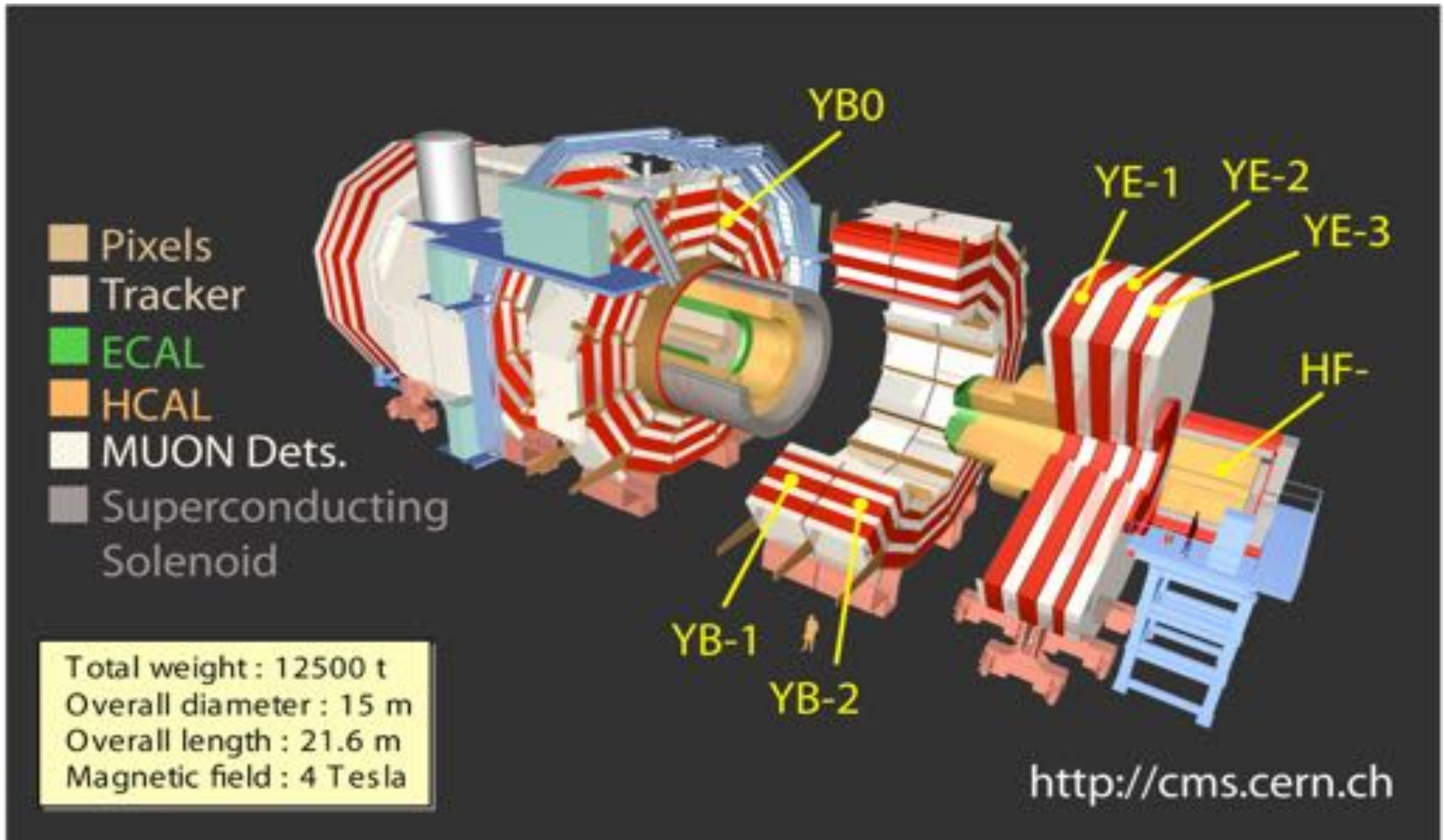
- **Pixel- & Streifendetektor** zur Spurenvermessung ← *Ort & Impulsinformation*
- verschiedene **Kalorimeter** zur Energiemessung ← *Energie*
- **Myonenkammern** zur präzisen Vermessung von Myonen ← *Ort & Impulsinformation*
- irgendwo dazwischen oder aussen: **starke Magnete** zur Ablenkung geladener Teilchen

Schematischer Aufbau - CMS

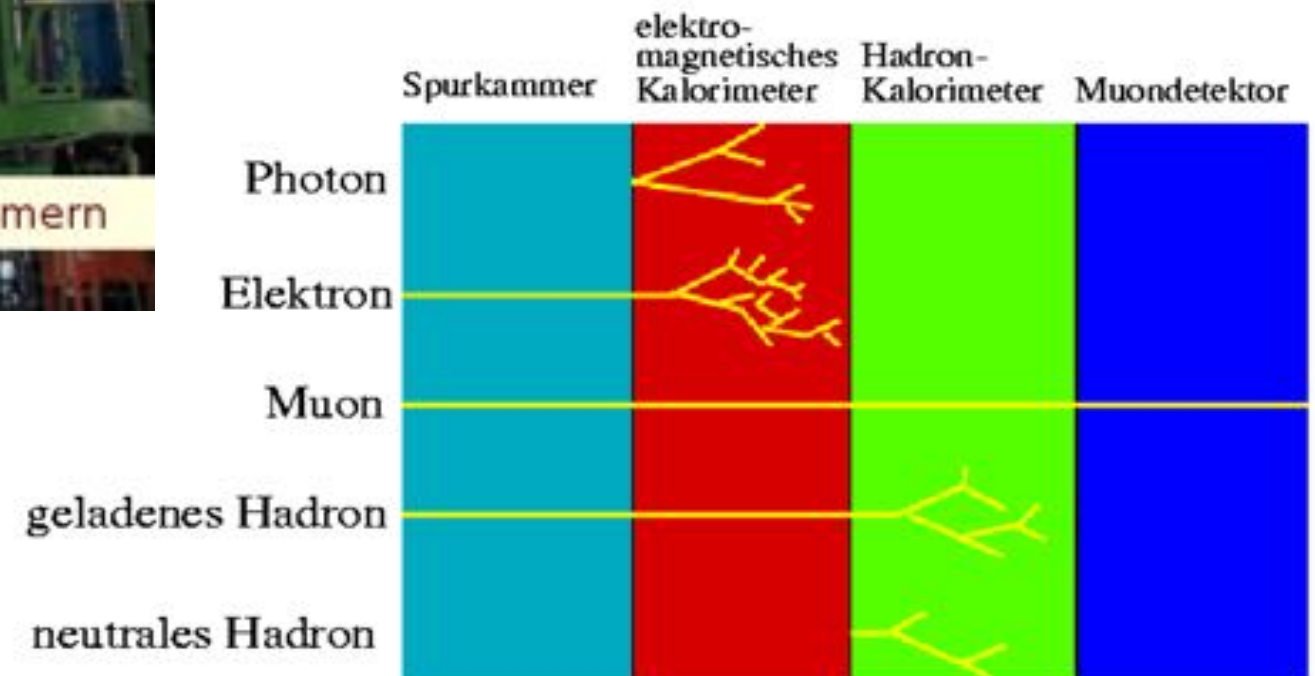
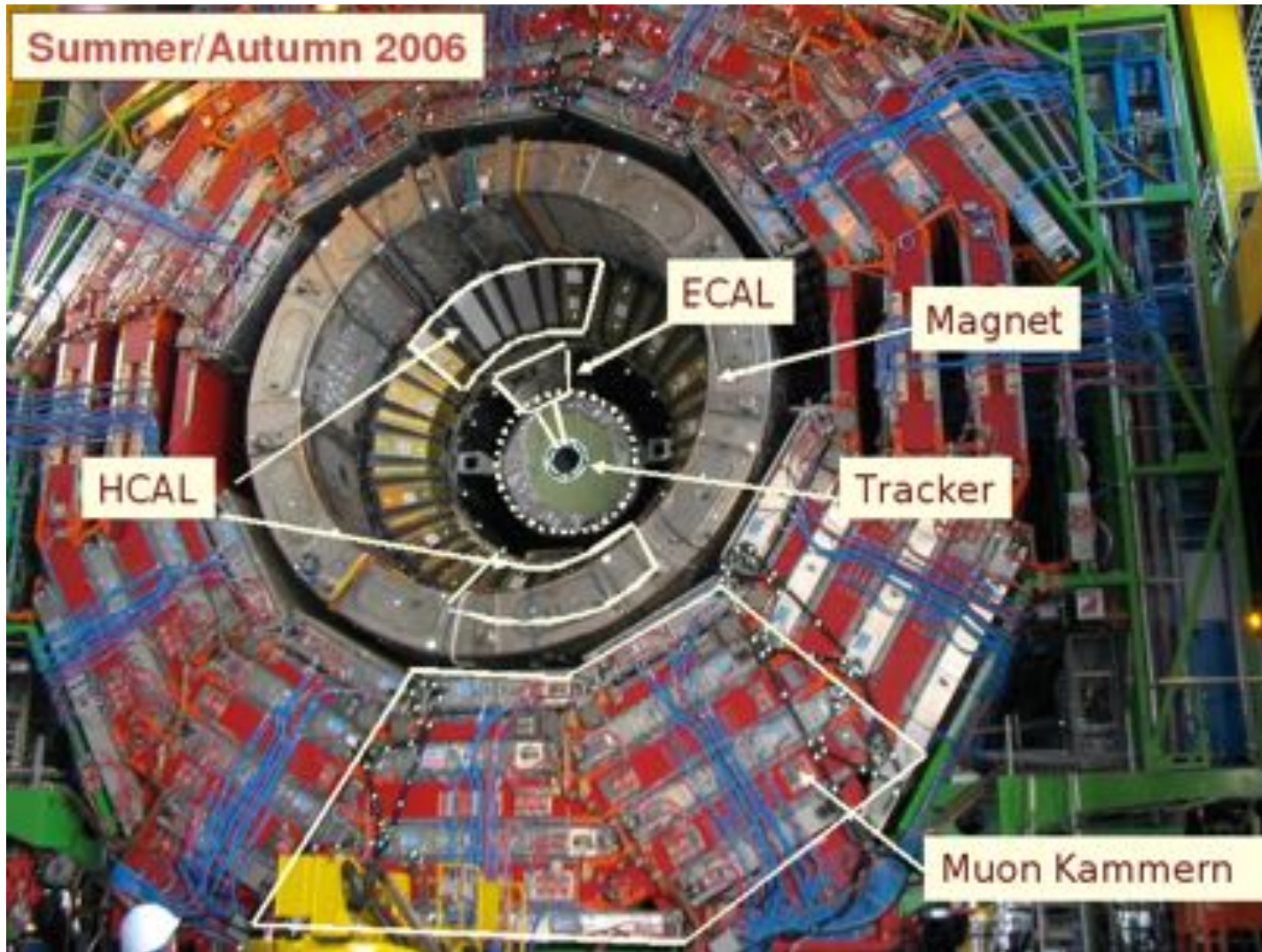


https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS_Slice_elab.swf

Schematischer Aufbau CMS (Compact Muon Solenoid)



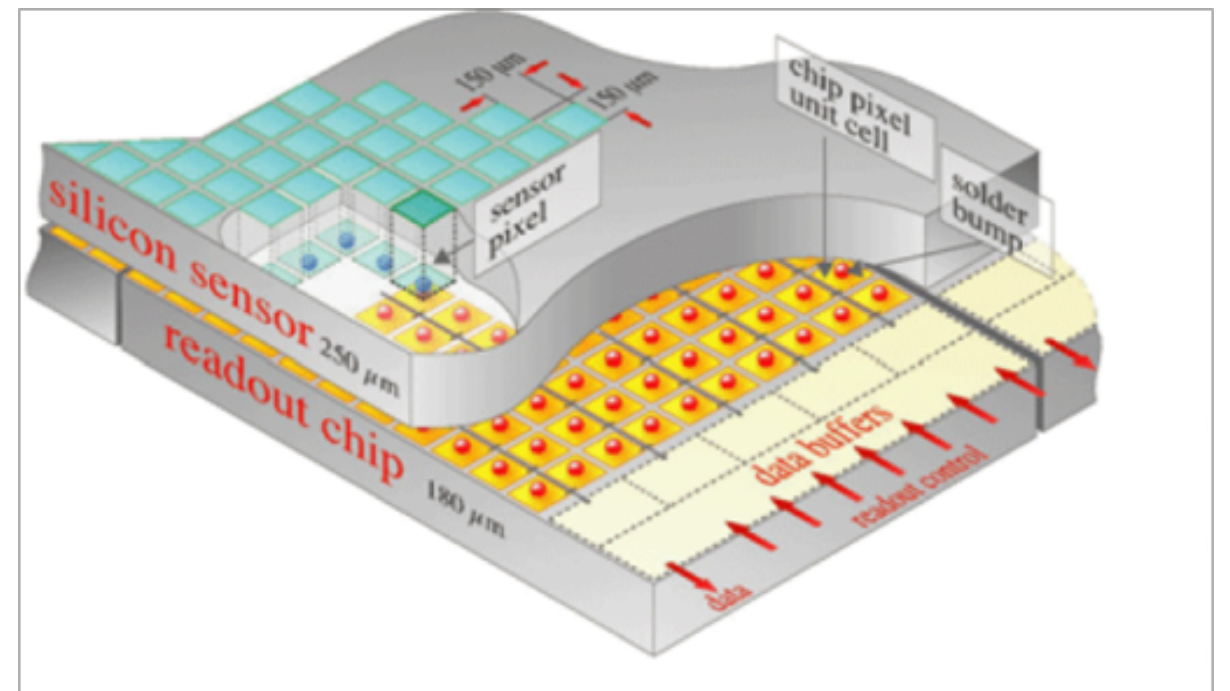
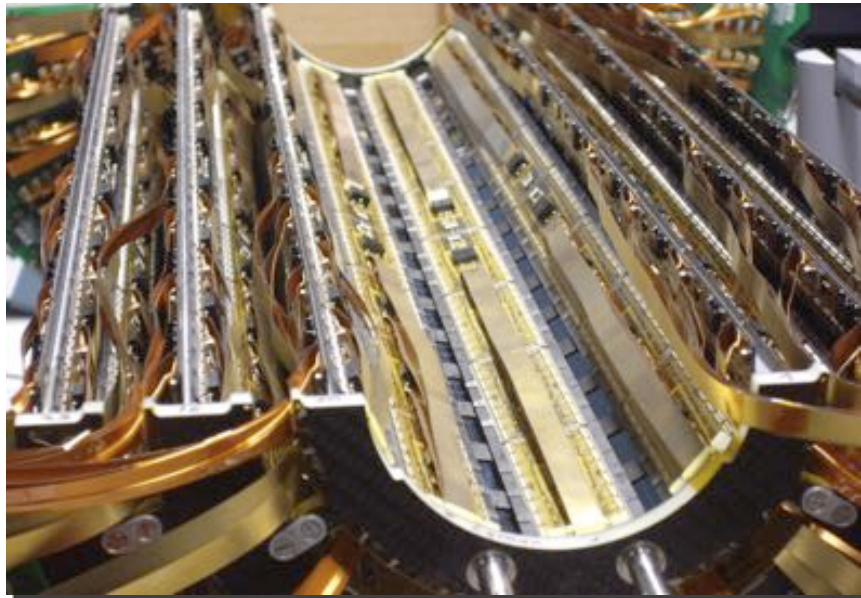
Schematischer Aufbau - CMS



Spurendetektor - Pixel

CMS Pixel Detektor hat:

- 3 Lagen bei 4.3, 7.2, 11 cm Abstand vom Strahl
- Teilchen erzeugen durch Ionisation Elektron-Loch Paare im Silizium Sensor
- Pixelgrösse von **100 x 150 μm^2**
- ca. **66 Millionen einzelne Pixel**
- kann **alle 25 ns ausgelesen** werden!



- **entspricht einer 66 Megapixel Kamera mit der man 40 Millionen Bilder pro Sekunde machen kann!!**

Spurendetektor - Pixel



Spurendetektor - Streifen

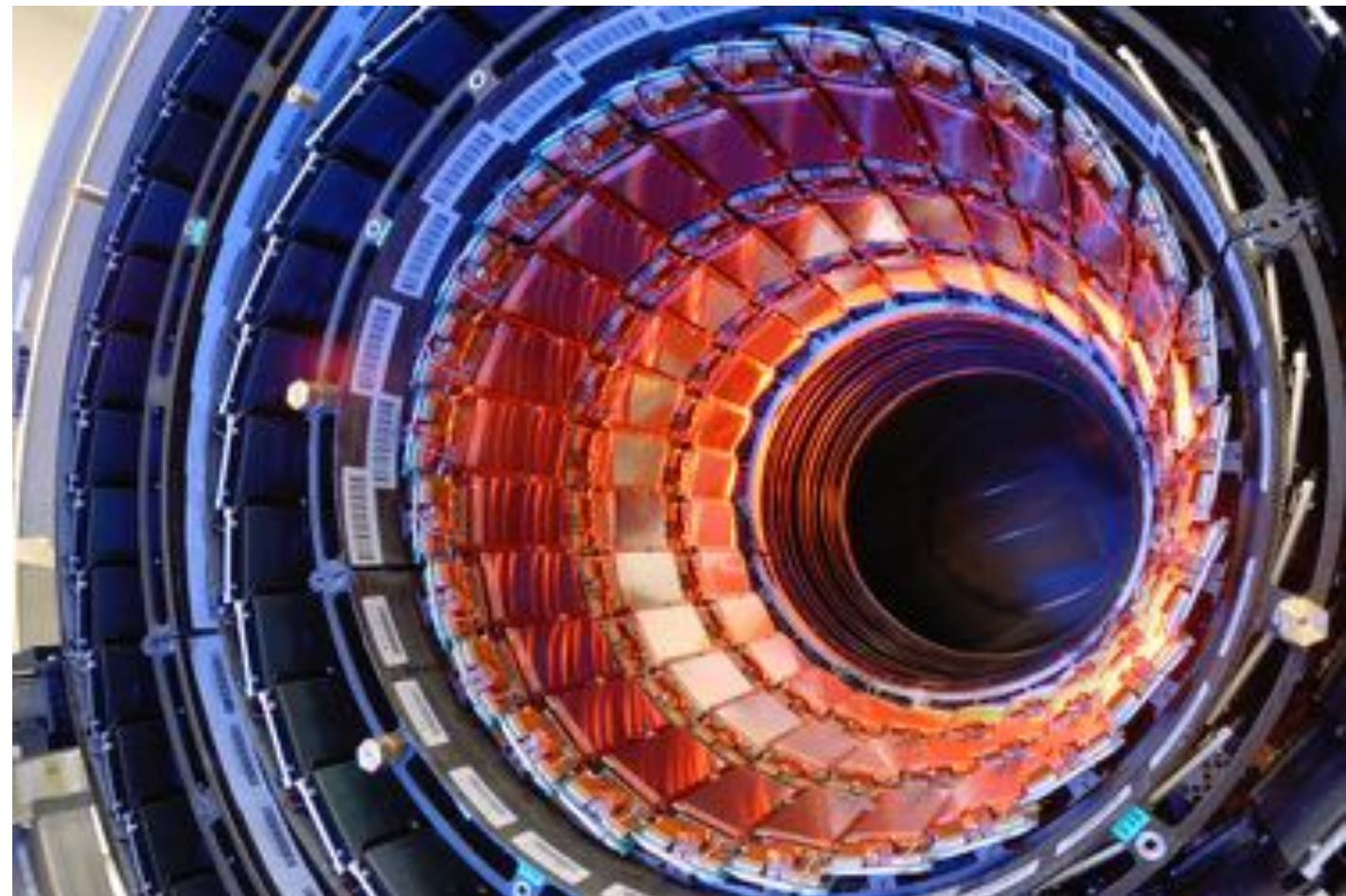
Um Auslesekanäle zu sparen, sind die nächsten ~10 Lagen keine Pixel, sondern sogenannte Siliziumstreifendetektoren

→ **selbes physikalisches Prinzip**

→ lange, schmale Streifen

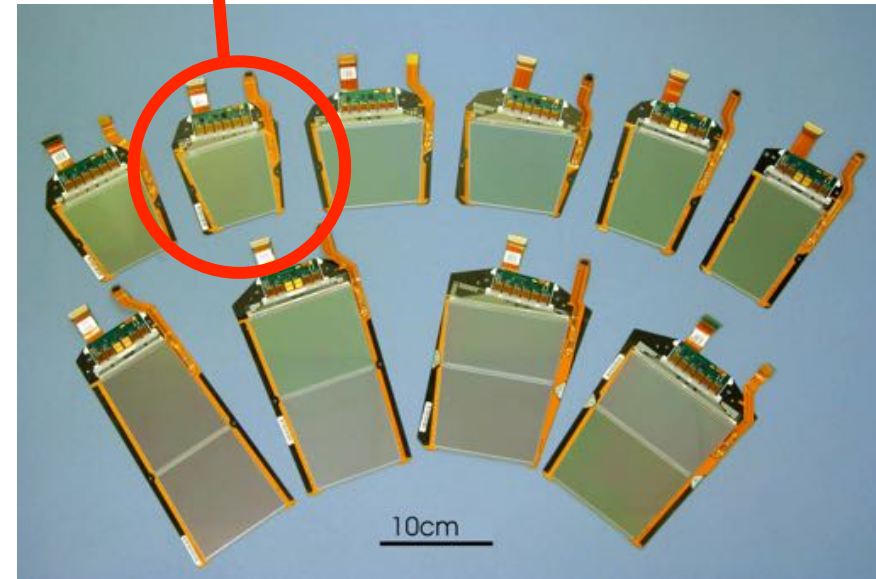
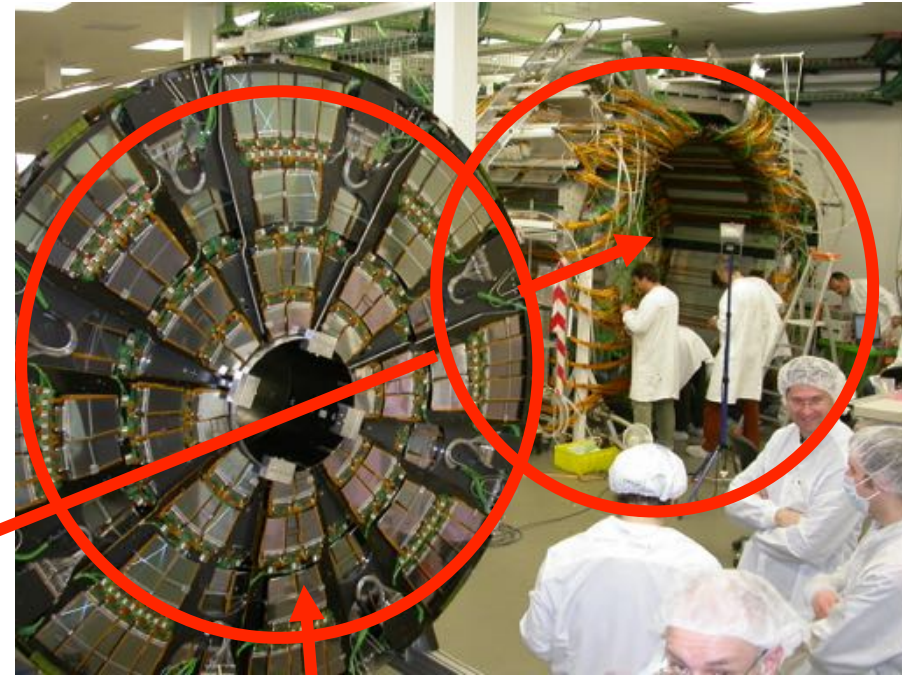
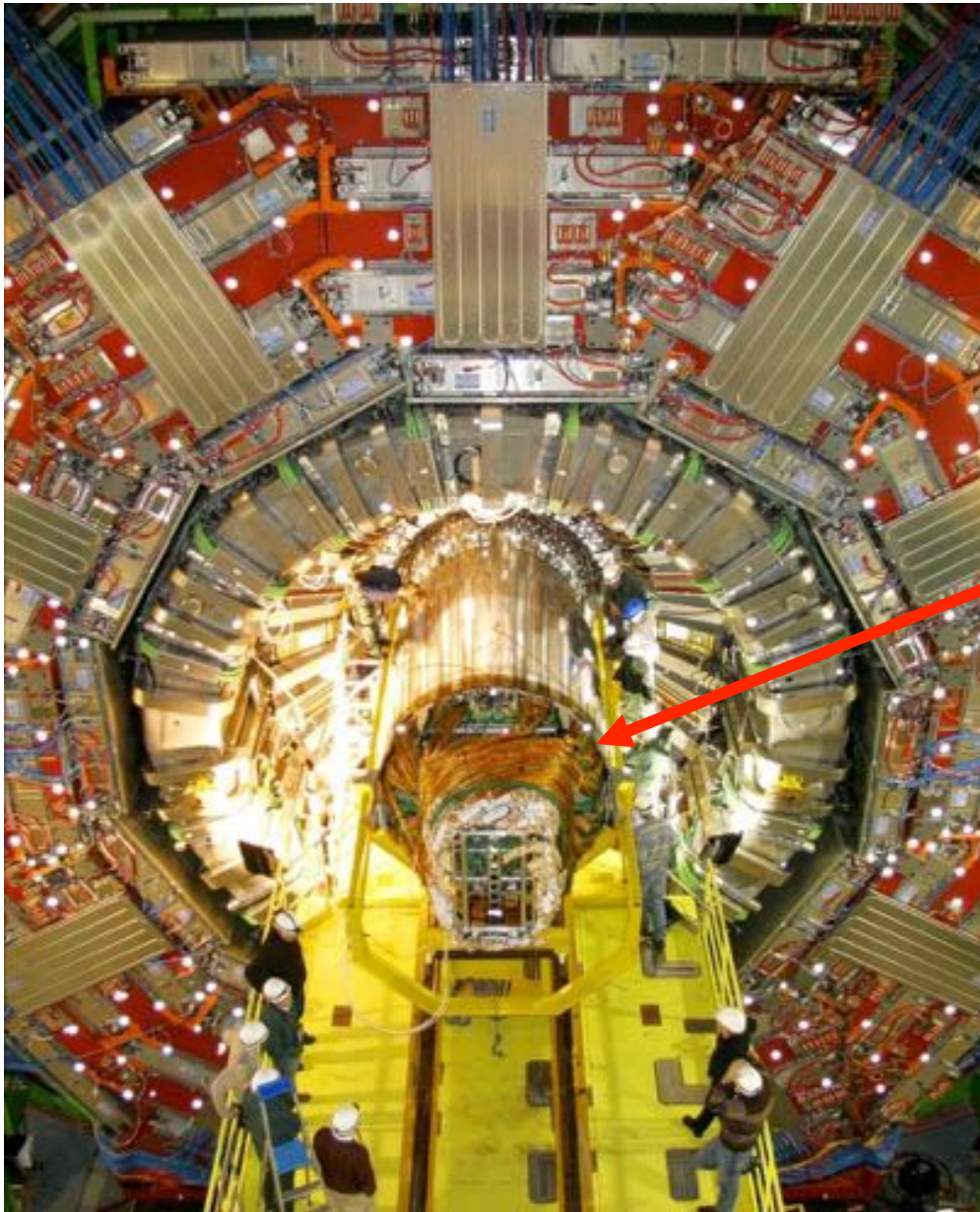
→ **80 μm breit**

→ **~200 m² aktive Fläche**
ca. 1 Tennisfeld



Nachteil dieser Detektoren: neutrale Teilchen können nicht gemessen werden!

Spurendetektor - Streifen



Kalorimeter - Elektromagnetisch

Kalorimeter messen die Energie der Teilchen auf eine destruktive Art und Weise

2 verschiedene Typen:

→ **elektromagnetisch**

→ **hadronisch**

Das **elektromagnetische Kalorimeter** misst grossteils nur die Energie von **Photonen & Elektronen (Positronen)**

In CMS macht das ein sogenannter **Szintillatorkristall**:

→ der Kristall **emittiert Licht** wenn Teilchen hindurchfliegen

→ die Menge des **Lichts** is **proportional** zur deponierten **Energie**

→ wenn man die Teilchen **vollständig abbremst**, kann man auf die gesamte Energie rückschliessen

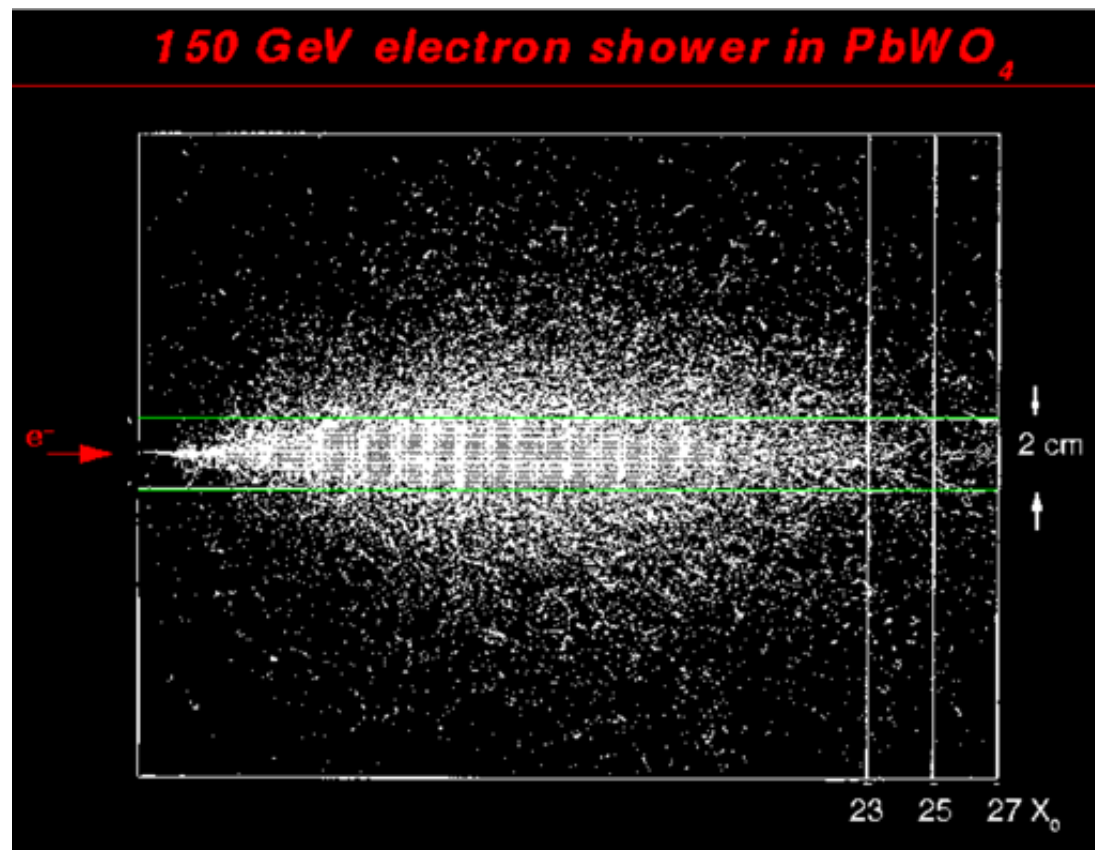
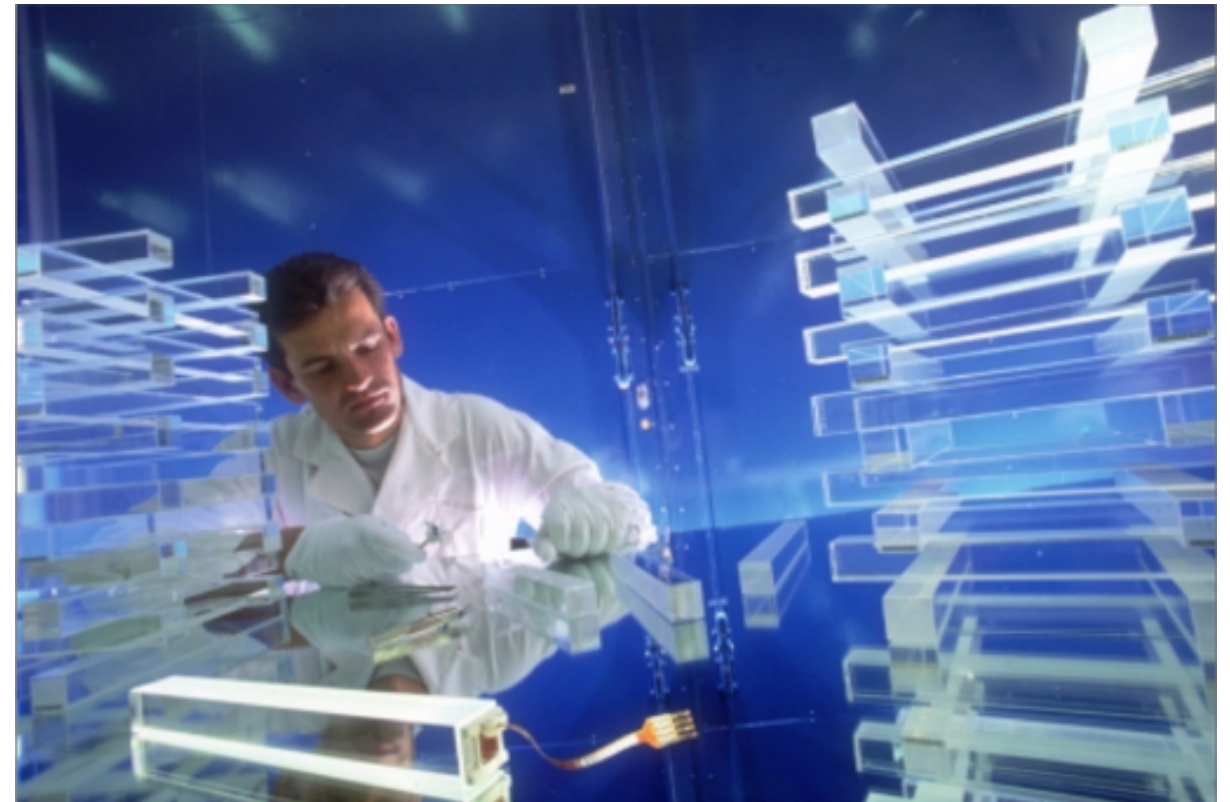
Kalorimeter - Elektromagnetisch

Kristall:

Bleiwolframat (PbWO_4)

Dichte: $\sim 9000 \text{ kg m}^{-3}$

$\sim 80\%$ Metall - transparent!



Gewicht ~ 25 Elefanten
(125 t)

Kalorimeter - Hadronisch

Hadronen (Teilchen aus Quarks) interagieren auch durch die starke Wechselwirkung **werden im EM Kalorimeter nicht gestoppt**

→ es muss etwas **schwereres** her!

In CMS: 10 Schichten von
5 cm Messing & 3 cm Szintillator

→ im **HCAL** werden u. a. **Protonen, Neutronen, Pionen, Kaonen** “absorbiert”

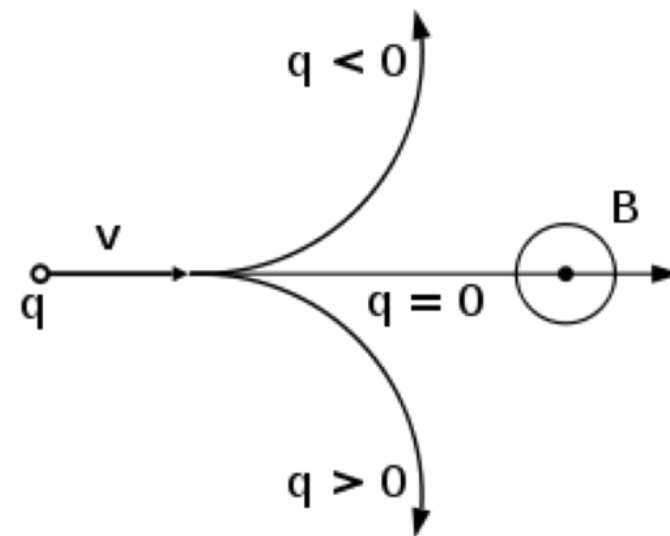


Supraleitender Magnet

Zur Bestimmung von Impuls und Ladung von geladenen Teilchen, sind alle bisher genannten Detektoren innerhalb eines supraleitenden Magneten untergebracht

Physikalische Grundlage ist die **Lorenzkraft**:

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



Aus der Krümmung einer Teilchenspur lässt sich der Impuls bestimmen:

$$\mathbf{r} \propto \mathbf{p}/q\mathbf{B}$$

Supraleitender Magnet

Zur Bestimmung von Impuls und Ladung von geladenen Teilchen, sind alle bisher genannten Detektoren innerhalb eines supraleitenden Magneten untergebracht

Das CMS Solenoid hat:

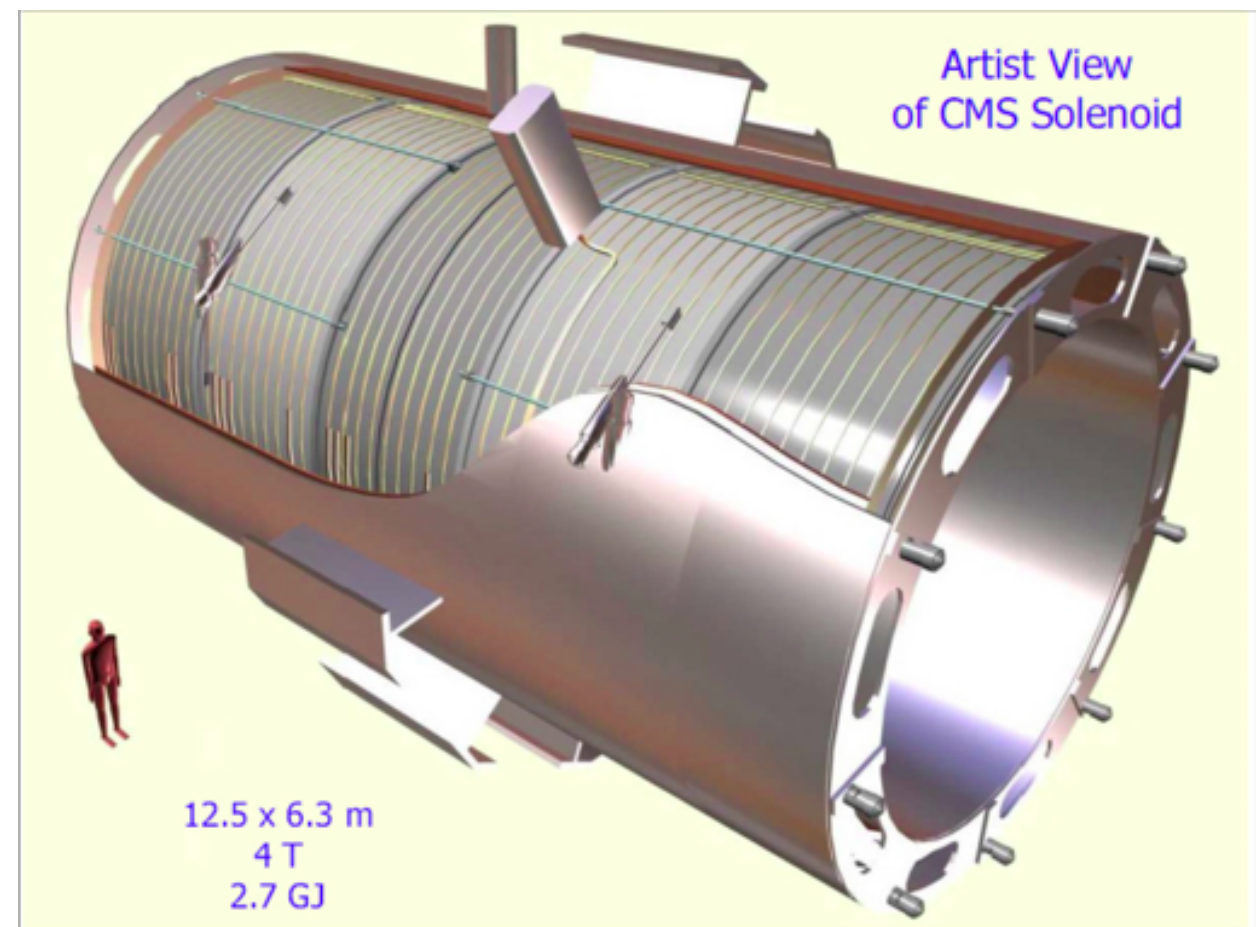
→ **~6 m Durchmesser!**

→ **3.8 T Magnetfeld**

100 000 x stärker als Erdmagnetfeld

→ **19 000 Ampere**

→ **2500 MJ** gespeicherte Energie



Der CMS Magnet ist somit der energiereichste Magnet der Welt!

Supraleitender Magnet



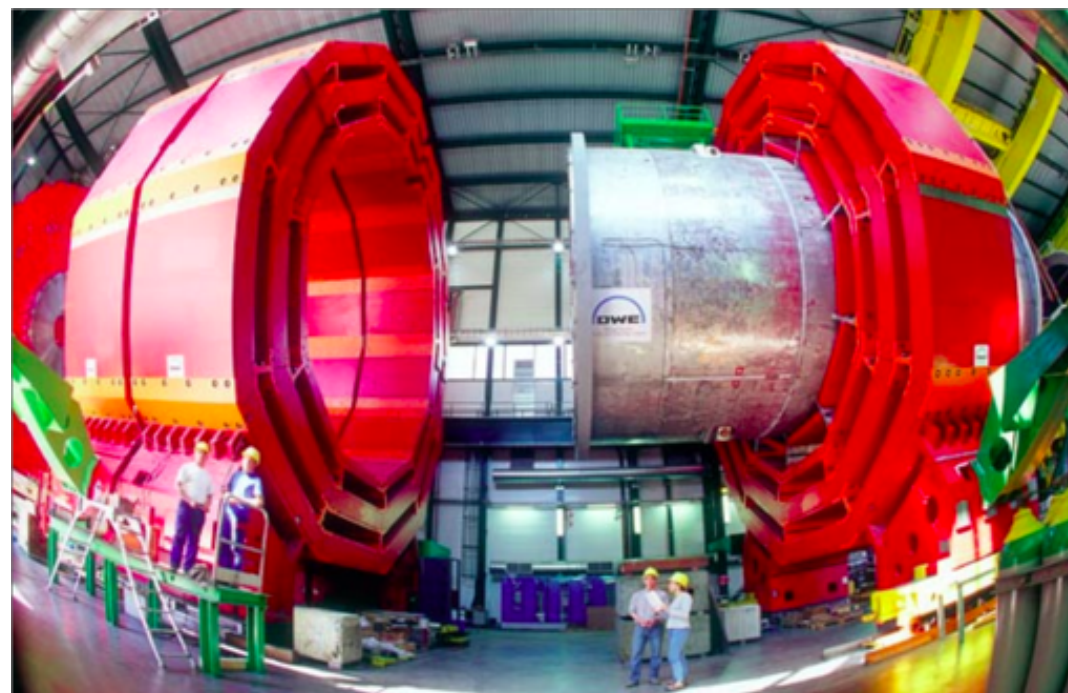
Rückführjoch

Um das Magnetfeld in Form zu halten, gibt es in CMS ein riesiges **Rückführjoch aus massivem Stahl!**

→ schwerster Teil des Detektors

→ ca. **10 000 t**

→ alleine etwa so schwer wie der **Eiffelturm!**



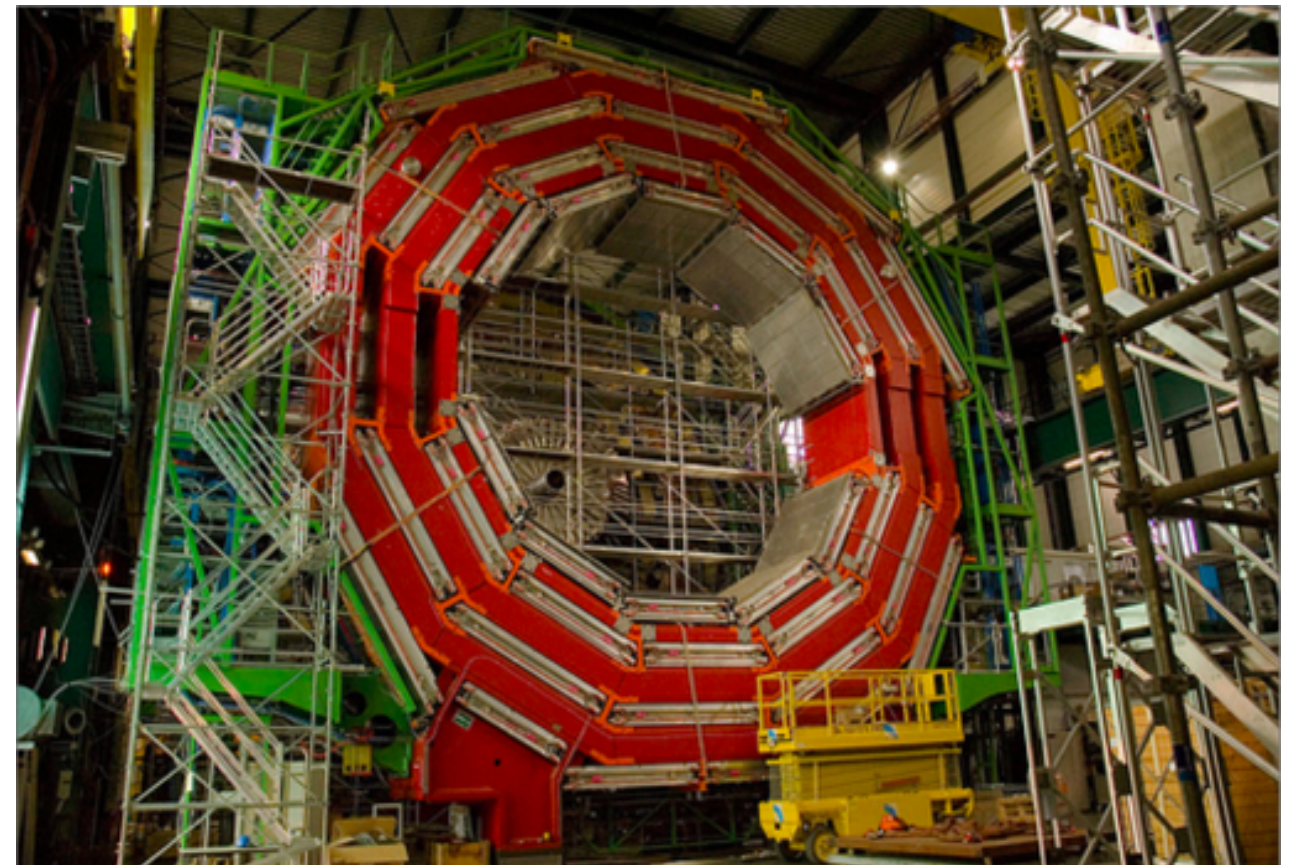
Myonkammern

Myonen sind die schweren Schwestern der Elektronen und interagieren nur sehr schwach mit Materie!

→ nach dem Magneten die letzten messbaren Teilchen (idealerweise)

→ werden präzise in Myonkammern gemessen

→ innerhalb des Rückführjochs



Neutrinos

Neutrinos interagieren noch sehr viel weniger mit Materie

→ im Detektor nicht direkt messbar!

→ was tun? Man macht sich die **Impulserhaltung** zu Nutze!

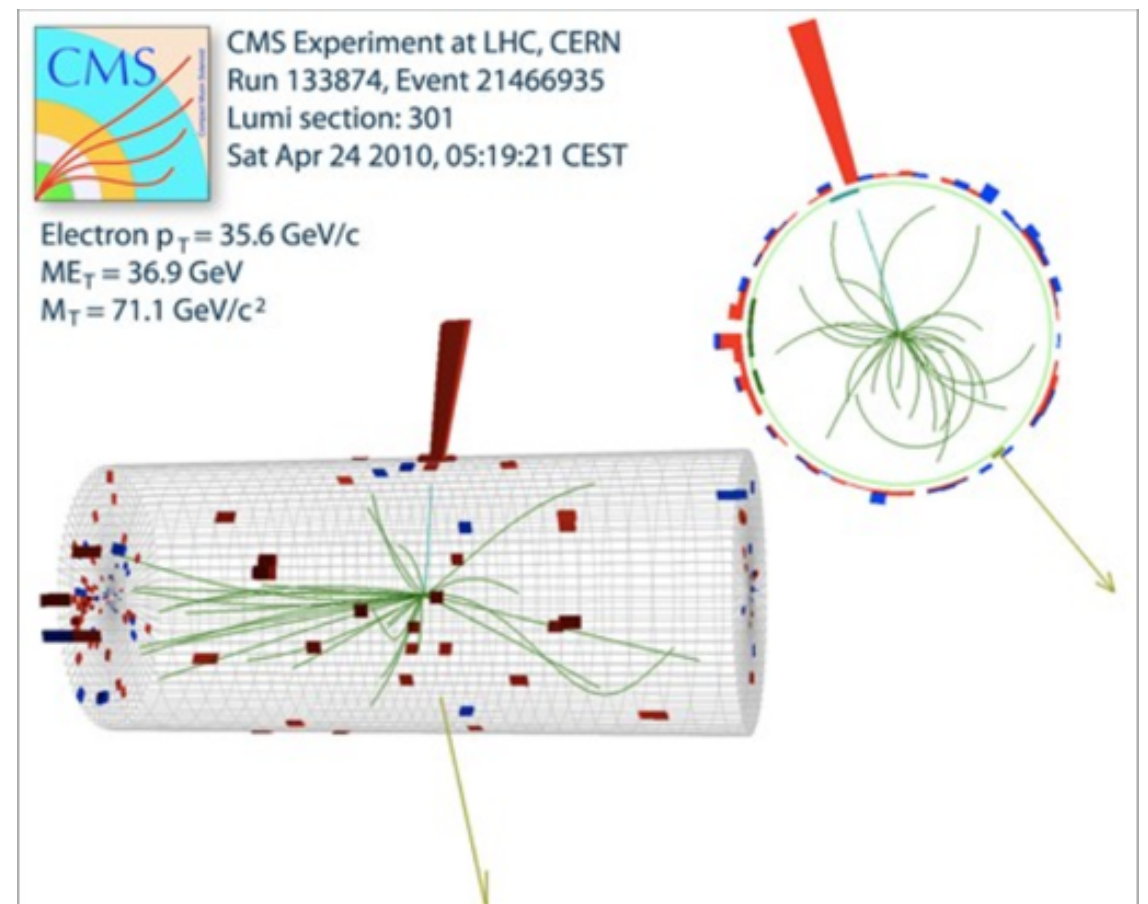
In der Ebene normal zur Strahlrichtung
ist der Anfangsimpuls gleich null!

Das bedeutet, dass der Impuls nach der
Kollision auch gleich null sein muss!!

→ durch dieses Prinzip kann man

1) Neutrinos indirekt nachweisen

2) neuartige Teilchen entdecken, die den Detektor verlassen!!



Auslese - Trigger

40 Millionen Kollisionen pro Sekunde sind auch für die besten & grössten Computer zu viel!

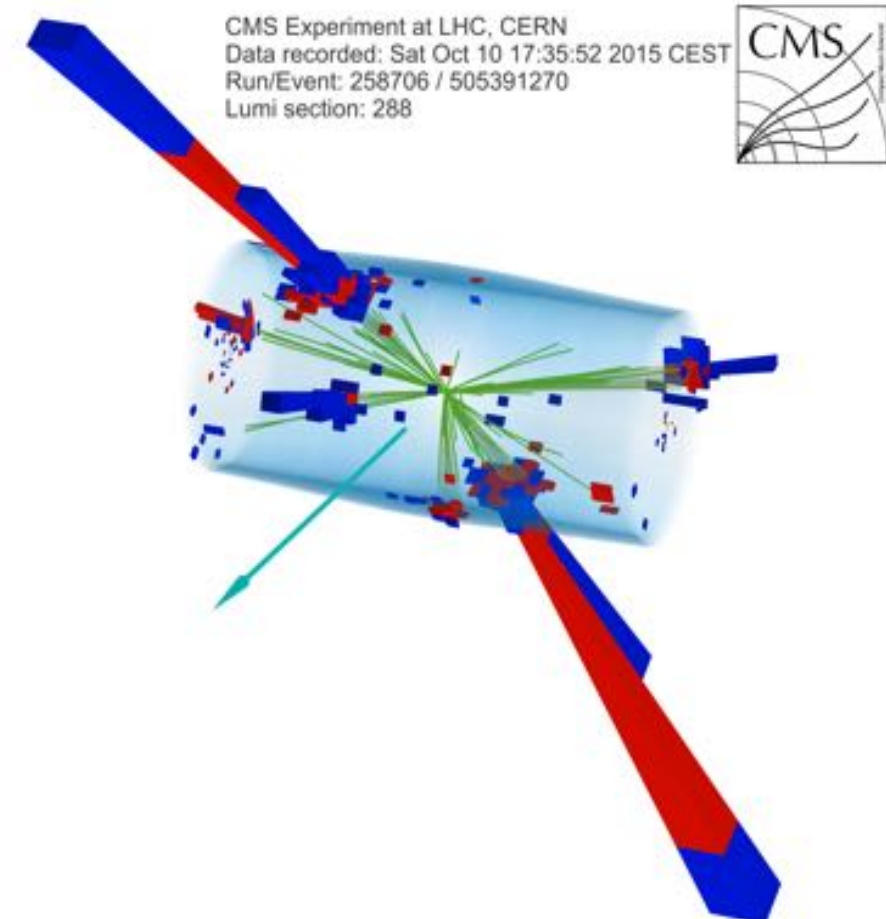
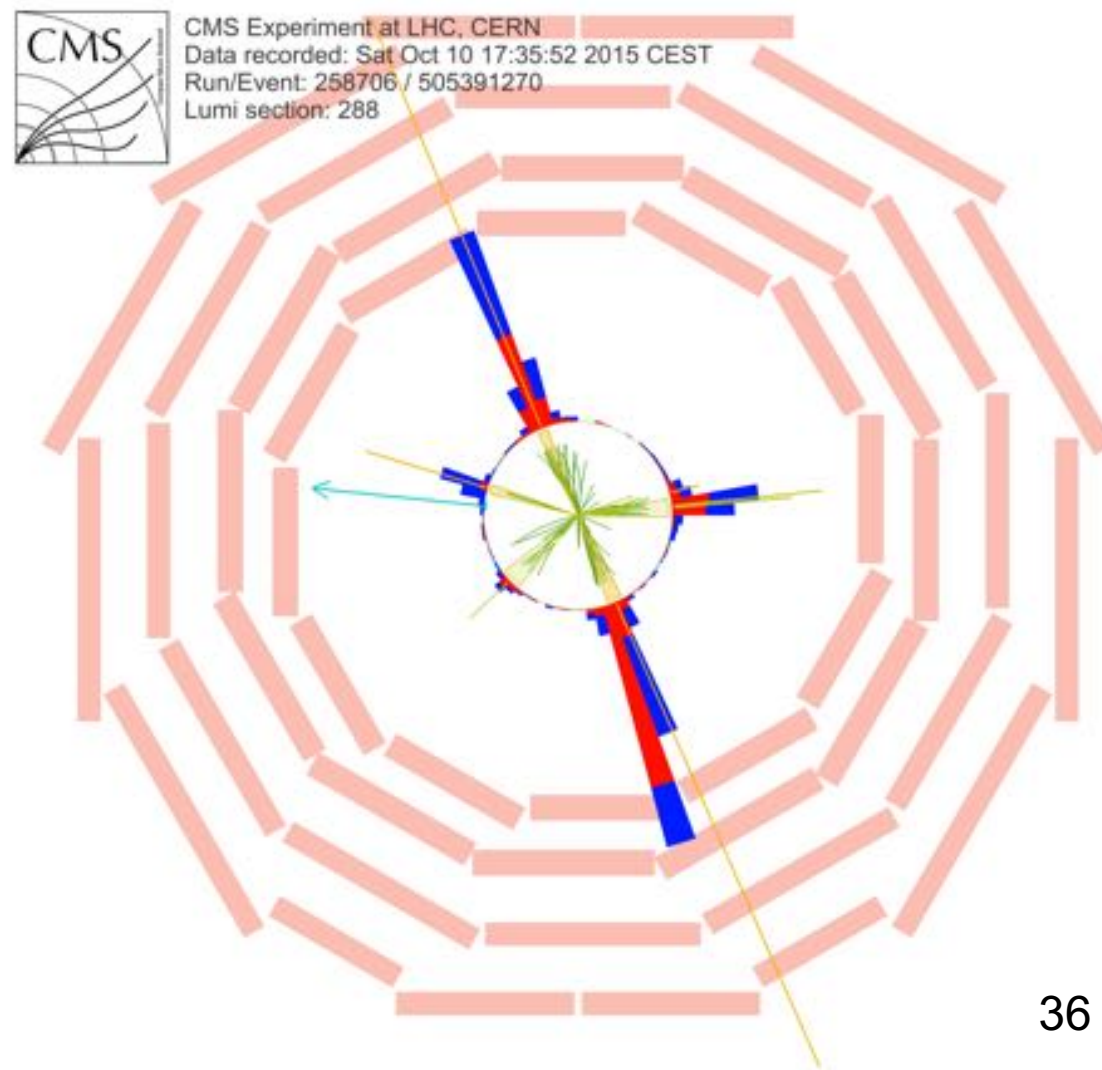
- man muss sich die **interessanten Kollisionen** herauspicken
- ausgefeilte **Hardware und Software Algorithmen**
- am Ende werden “nur” ca. 500 - 1000 Kollisionen pro Sekunde gespeichert
- bei ca. 1-2 MB pro “Event” macht das trotzdem ca. 1 GB pro Sekunde!

Auslese - Rekonstruktion

Wenn ein Event den Trigger passiert hat, wird es in einer grossen Computerfarm komplett rekonstruiert

→ ausgeklügelte Software

→ “übersetzt” elektronisches Signal in für Menschen lesbare Objekte & schöne Bilder



Spannende Zeiten

- **Suche nach neuer Physik**
- **Genauere Vermessung des Higgs Bosons**



ENDE

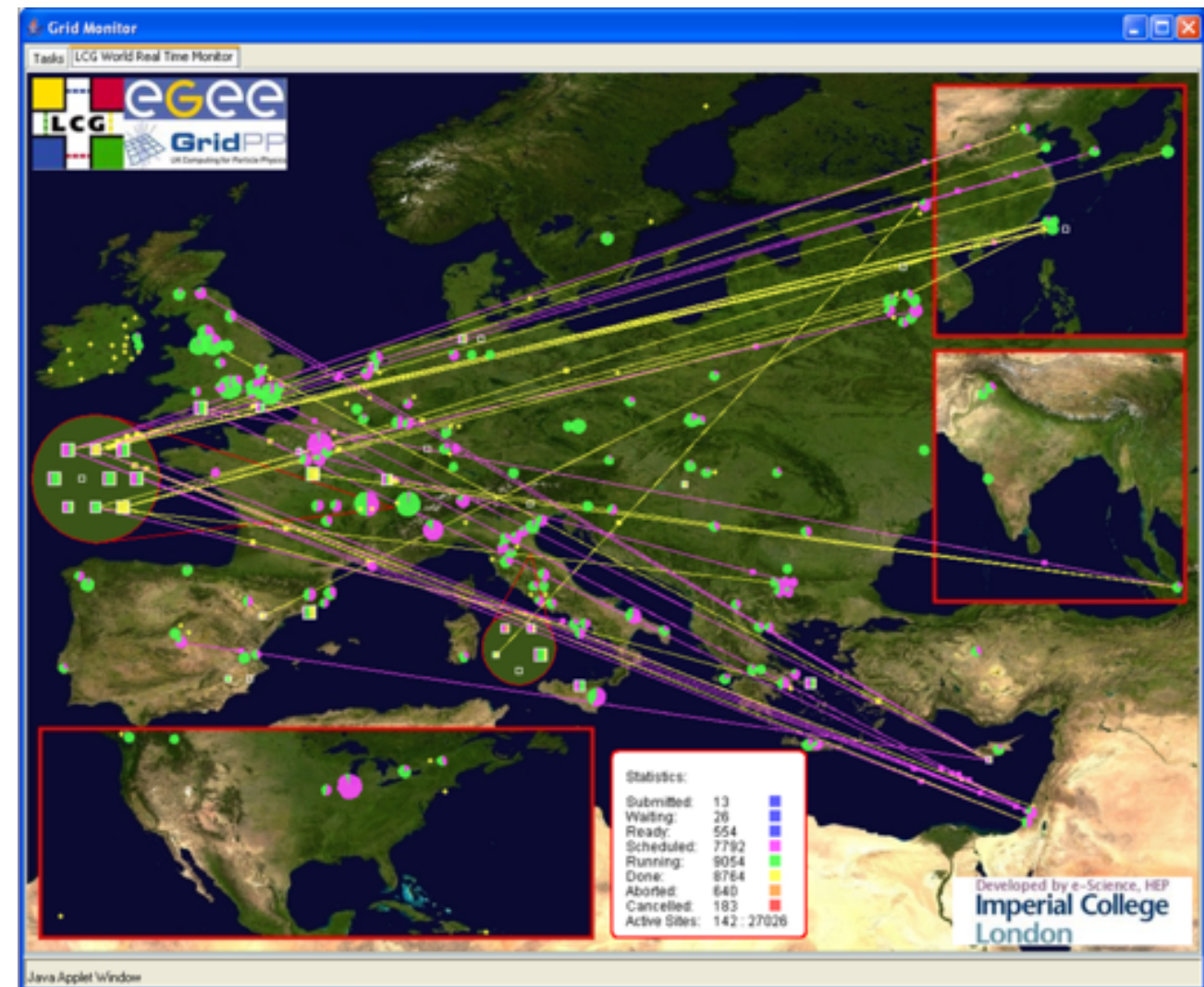


Fragen?

Analyse - das GRID

Mit **500** aufgezeichneten Kollisionen pro Sekunde und ca. **100** Tage pro Jahr und ca. **10** Stunden Operation pro Tag sind das ca. **2 Mrd Kollisionen pro Jahr!**

- unmöglich alle “von Hand” anzuschauen
- stattdessen verwenden wir massgeschneiderte Analyseprogramme
- Datensätze weltweit gespeichert
- Analyse über LCG - LHC Computing Grid



Spin-offs

Am CERN werden immer wieder **neue Dinge entwickelt** - auch für die Allgemeinheit

→ das **WWW** wurde von Tim Berners-Lee & co. 1990 am CERN erfunden

→ einer der ersten **Touchscreens** wurde am CERN in den 1970er erfunden

→ viel Forschung für die **Krebsbehandlung mit Teilchenstrahlen** und Detektoren (PET, Magneten)



→ distributed computing - **GRID**

→ immenser **Wissensgewinn** für die Menschheit

