

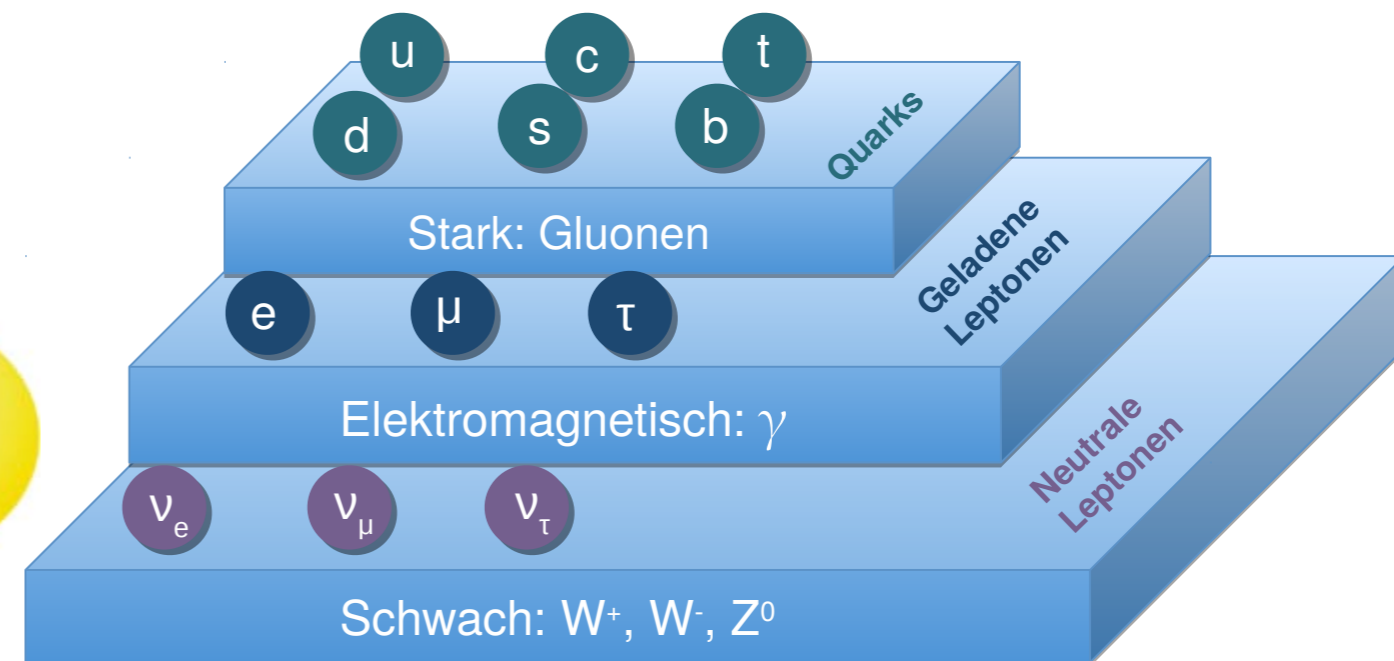
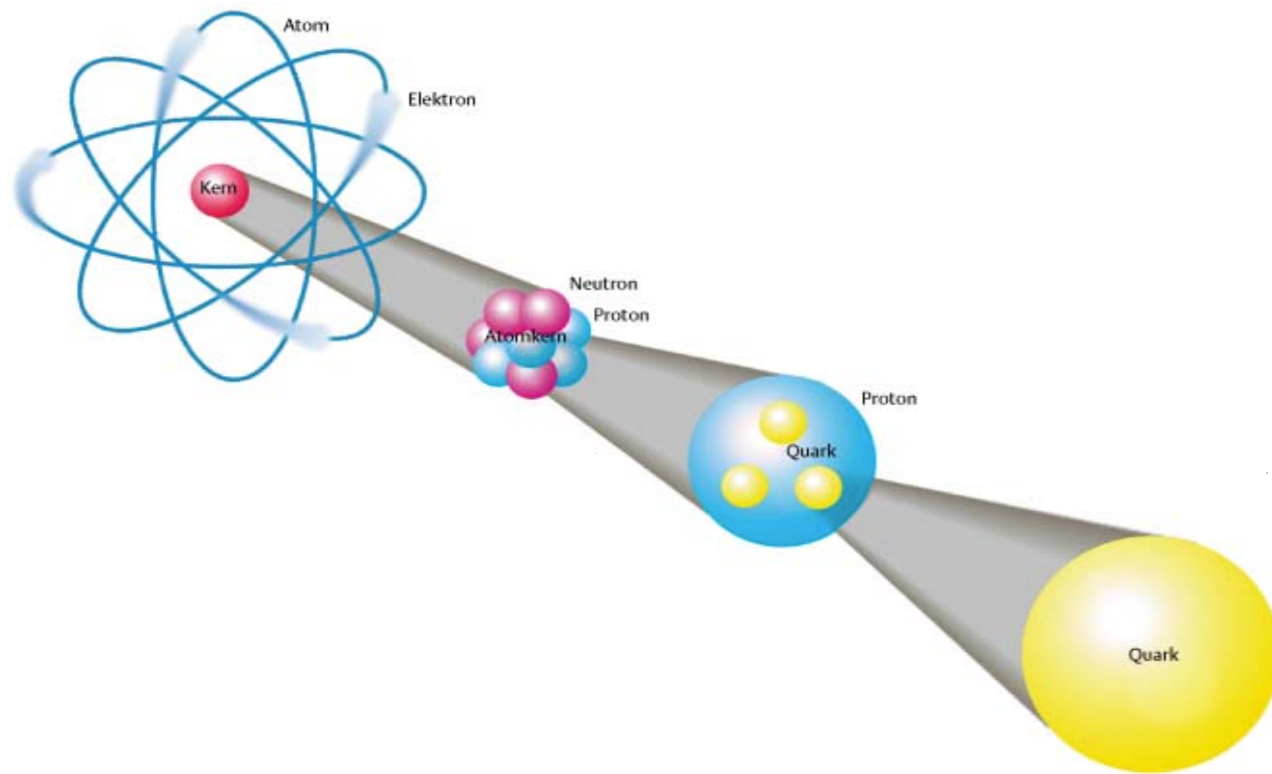
Beschleuniger und Detektoren

International master classes 2018

Myriam Schönenberger

Wozu Teilchenbeschleuniger?

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



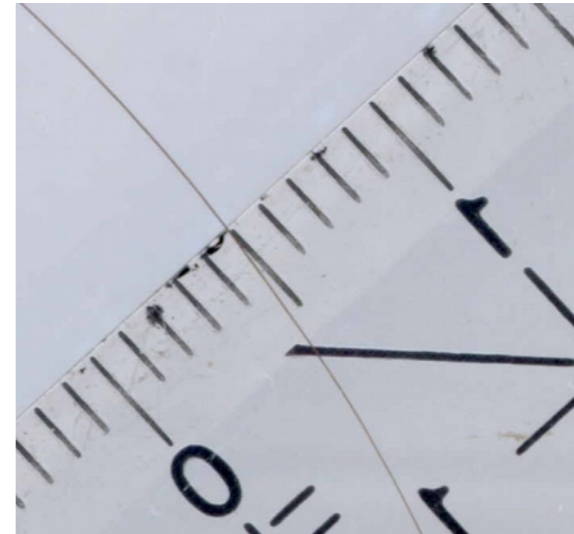
... nur wie?

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

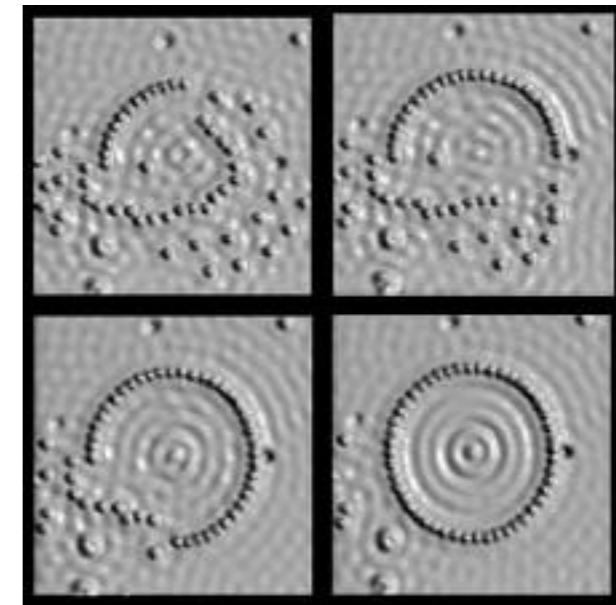


Beobachtung noch kleinerer Objekte

Rastertunnelmikroskop:

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

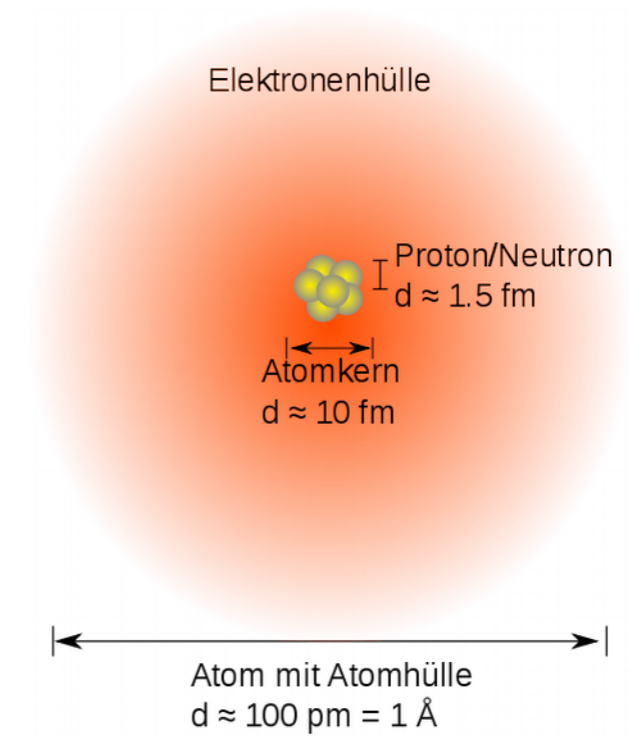
10^{-11} m



ABER:

Durchmesser eines Atomkerns

~ 10^{-15} m



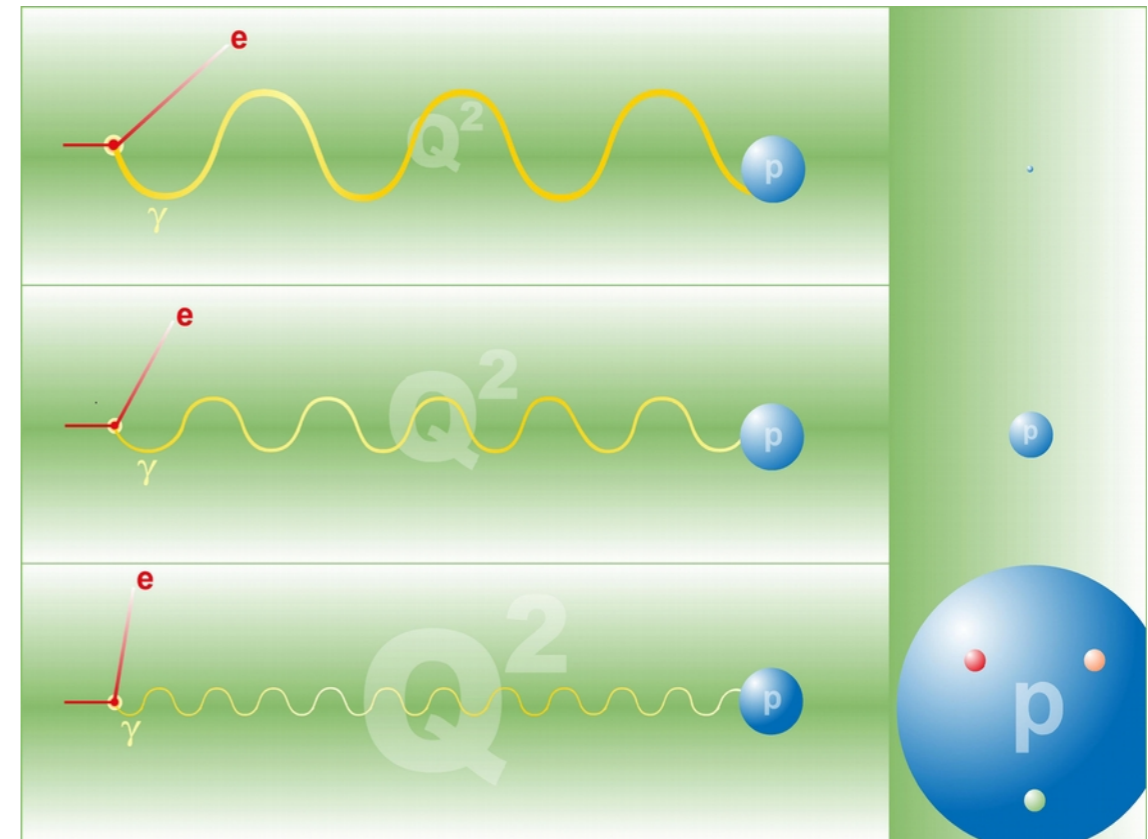
... was kann man tun?

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

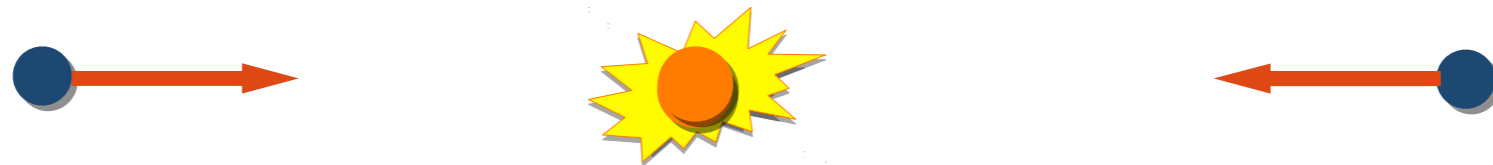
**kein Scherz,
aber wie kann das sein?**

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



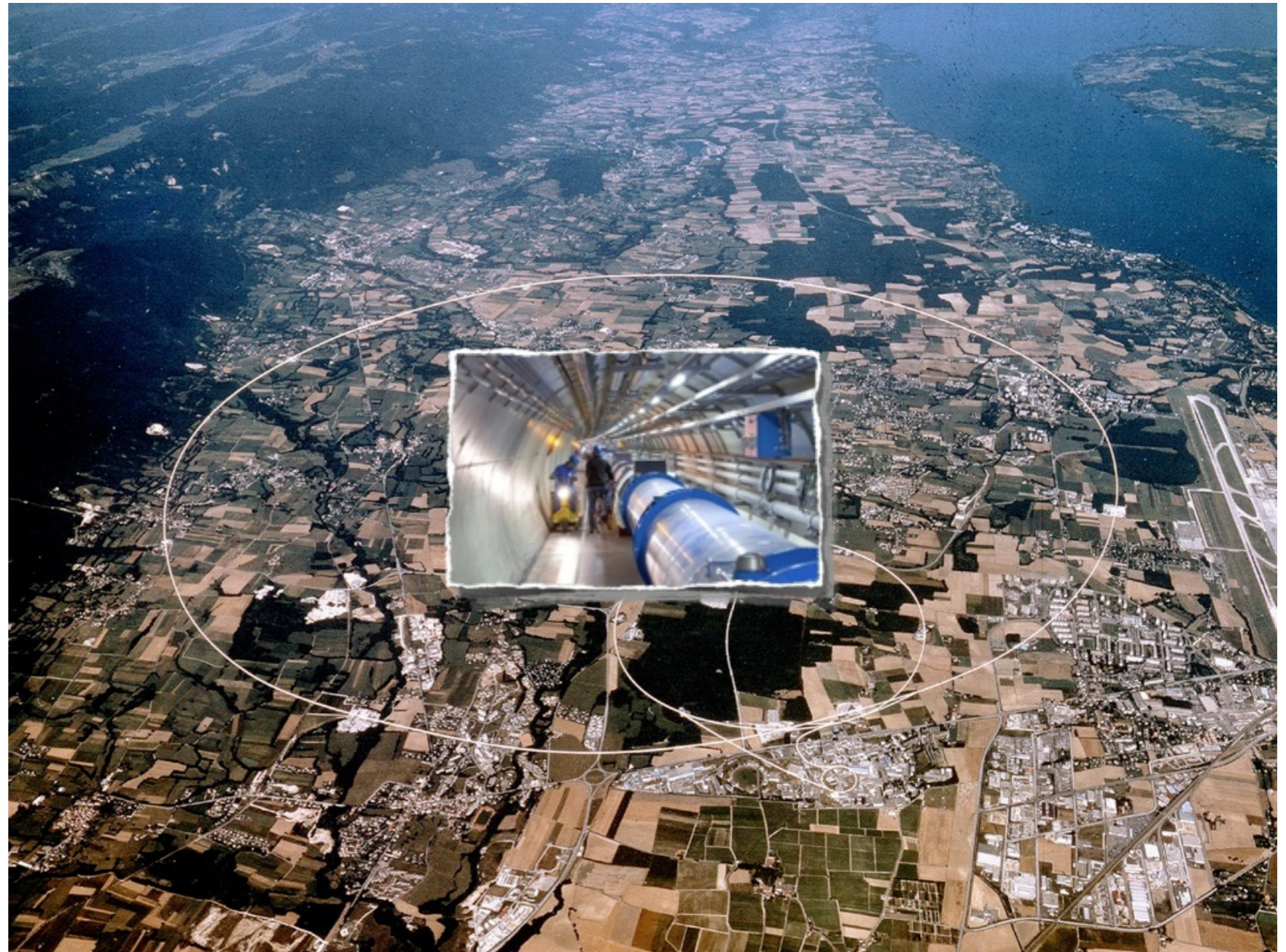
→ es **können neue, schwerere Teilchen erzeugt** werden!

Einstein's 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**

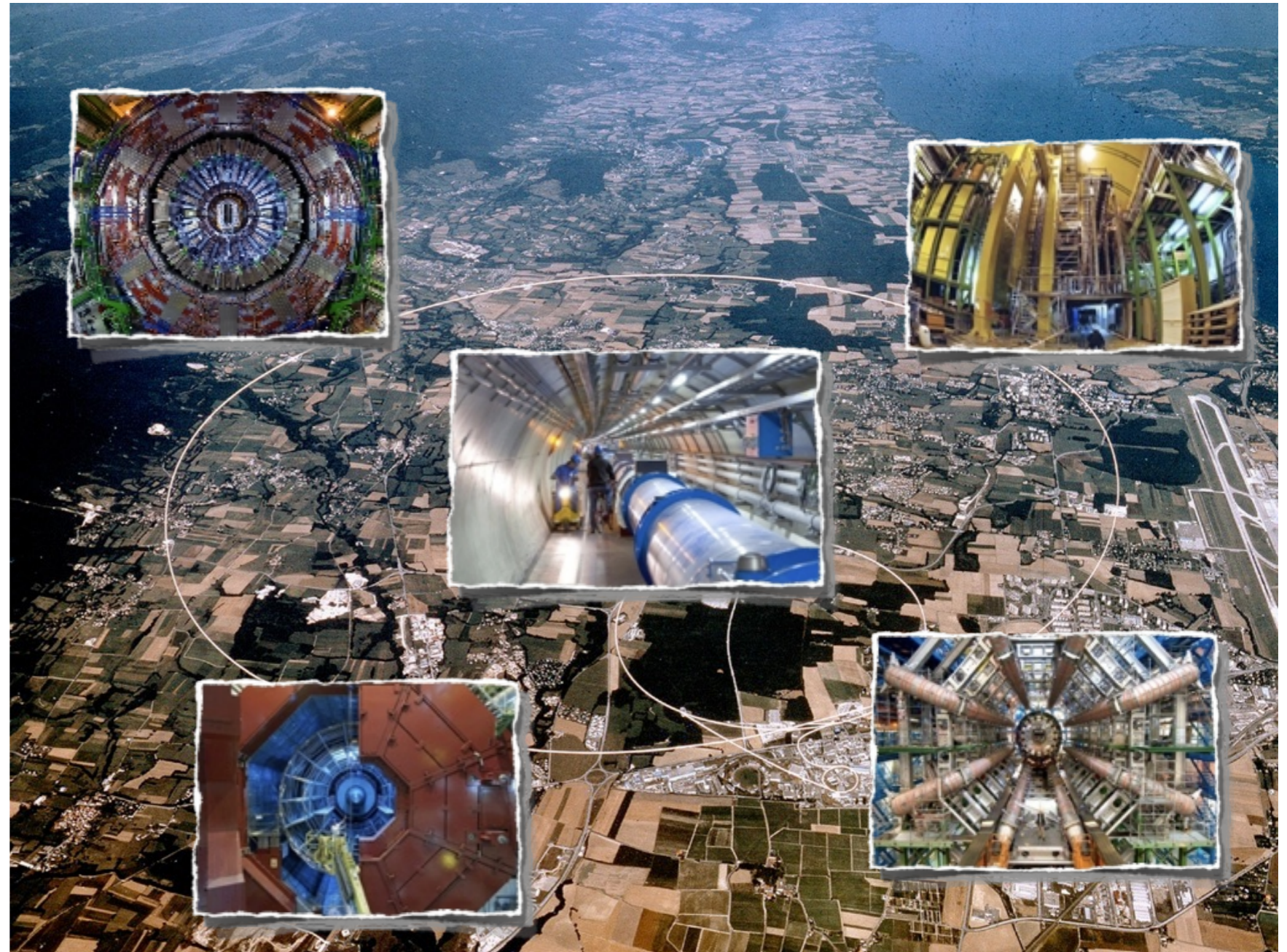


sehen wir uns anhand des LHC (Large Hadron Collider) einige Dinge genauer an

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)

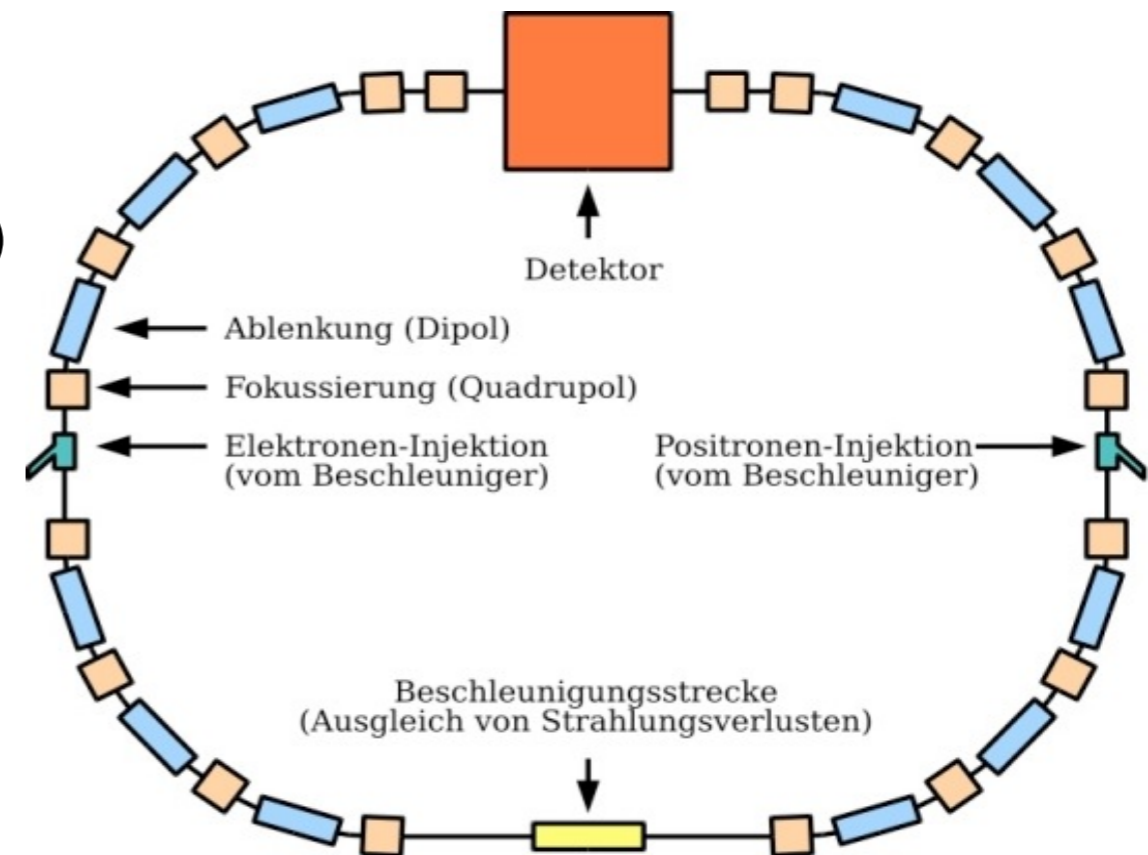
2) Beschleunigungsstrecken

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

3) Magneten

→ 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!

Teilchenstrahlen

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

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

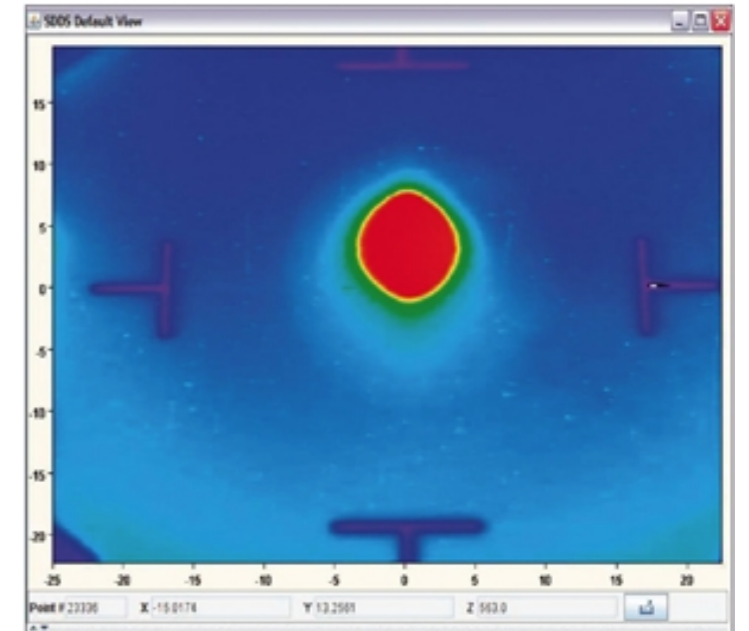
Jedes dieser Pakete ist mit ca. **10^{11}** (100 Milliarden) **Protonen** gefüllt!

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

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

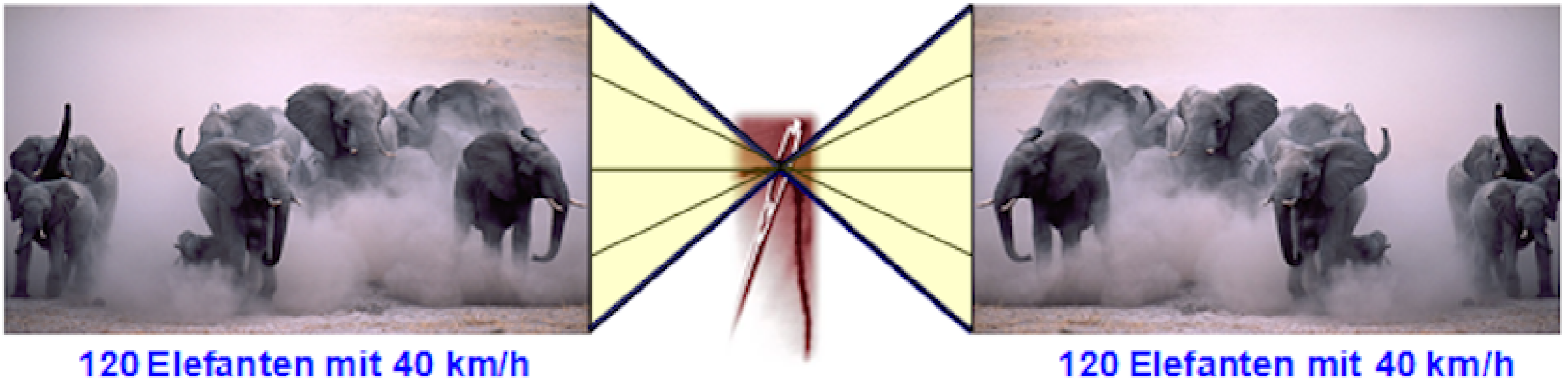
→ pro “Bunch-crossing” ca. 15-20 einzelne p-p Kollisionen

Die gesamte gespeicherte Energie in den Strahlen ist ca. **750 MJ!**



Was sind 750 MJ ?

Wie 240 Elefanten auf Kollisionskurs



Die Energie eines einzelnen Protons entspricht der einer **Mücke** im Anflug ($1 \mu\text{J}$)

Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser

Protonstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

Beschleunigungsstrecken

Geladene Teilchen werden **in elektrischen Feldern beschleunigt**

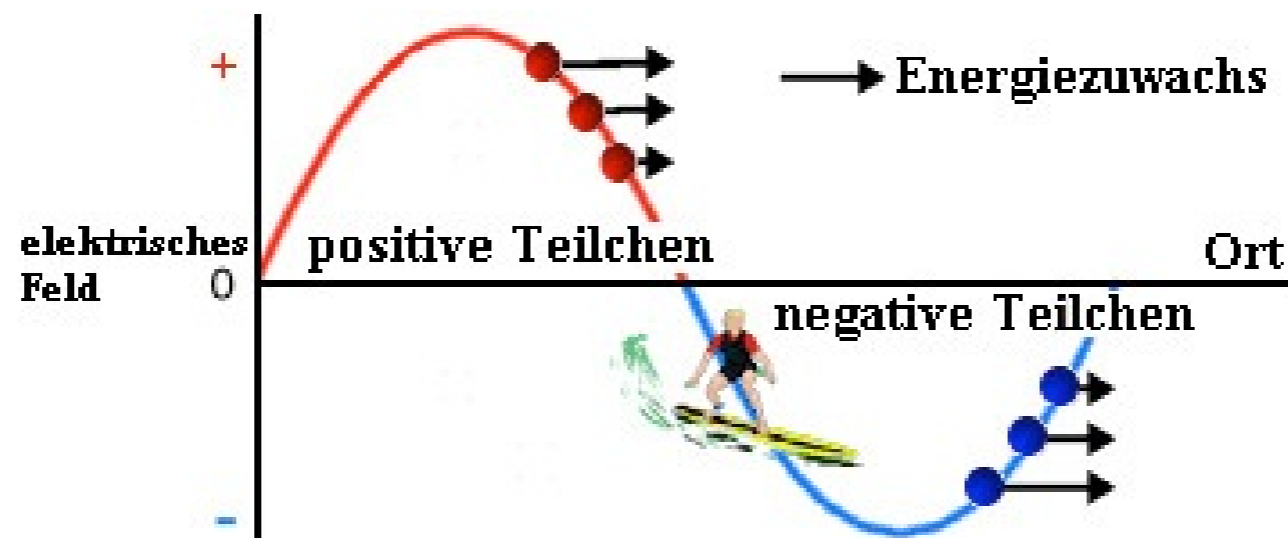
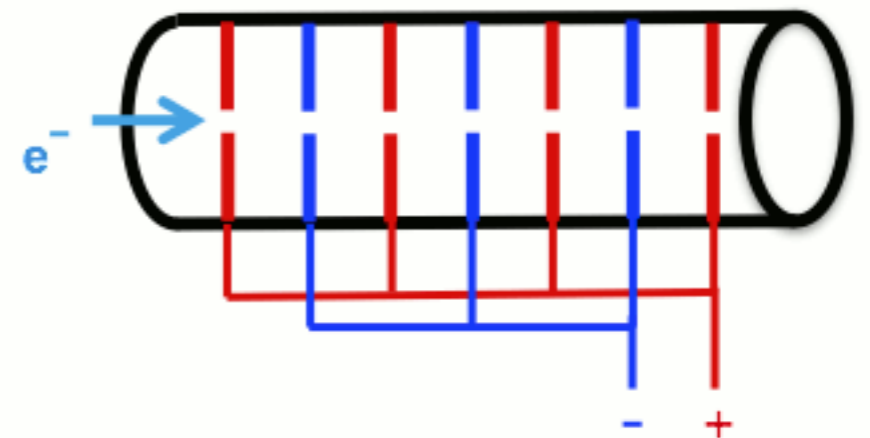
→ **Gleichspannung:**

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

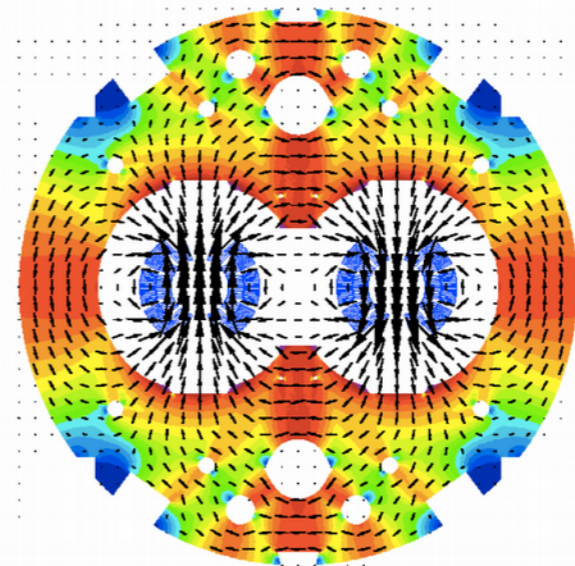
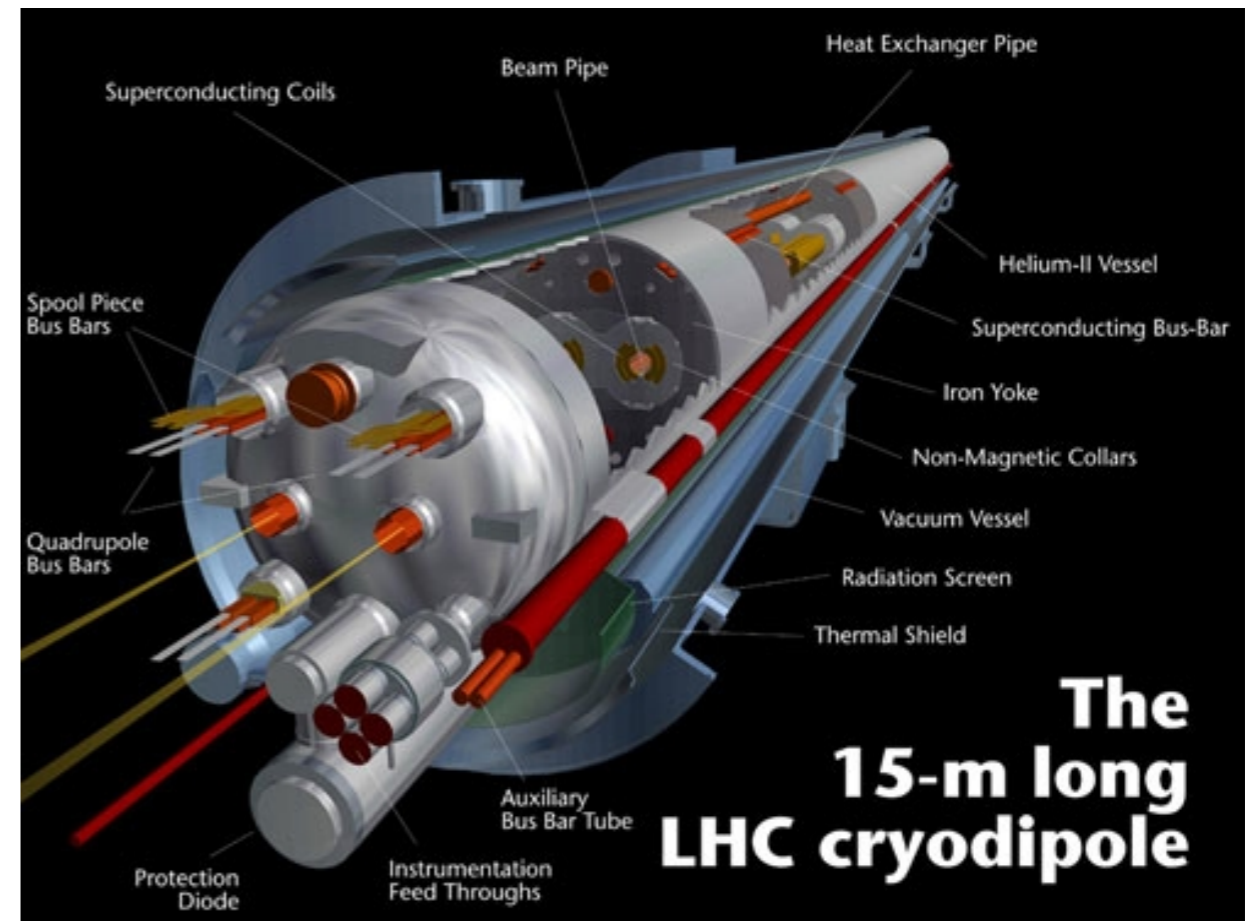
Ablenkmagnete:

klingt einfach, ist es aber nicht!

Die Magnete des LHC:

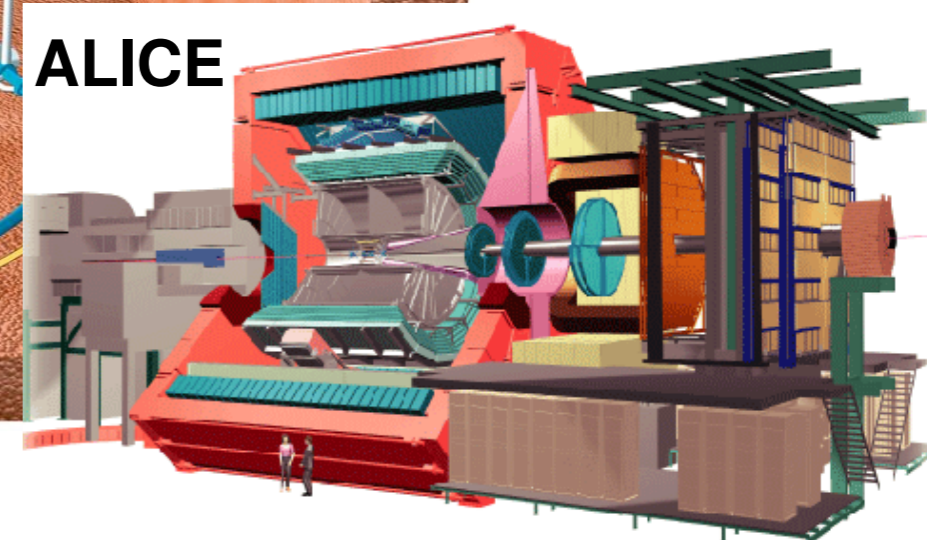
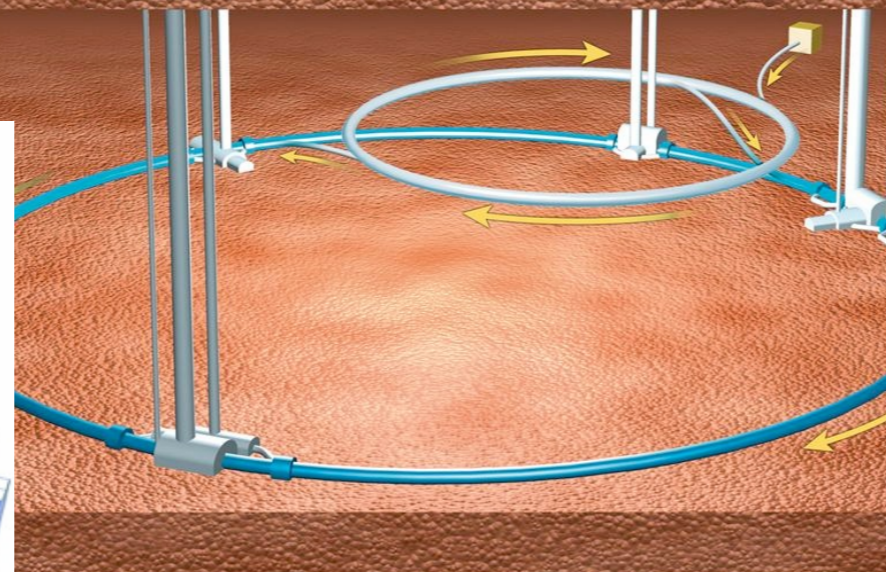
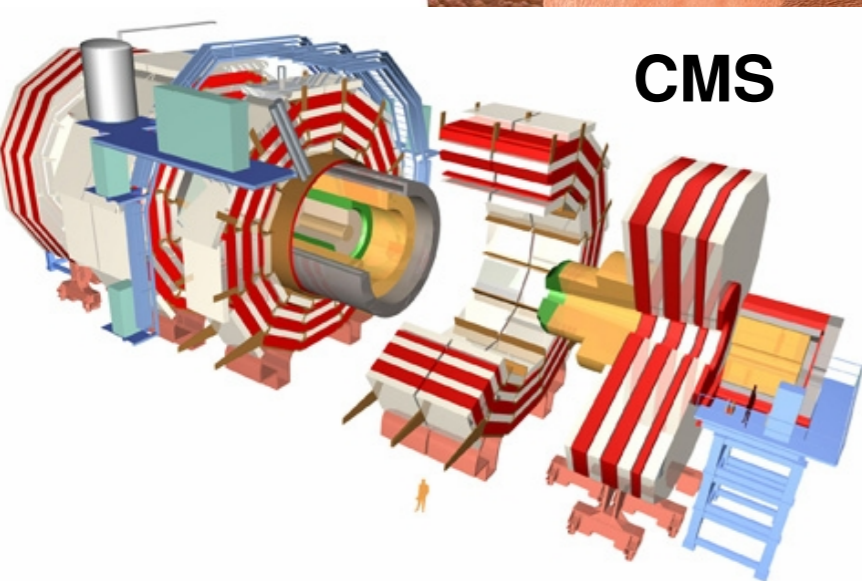
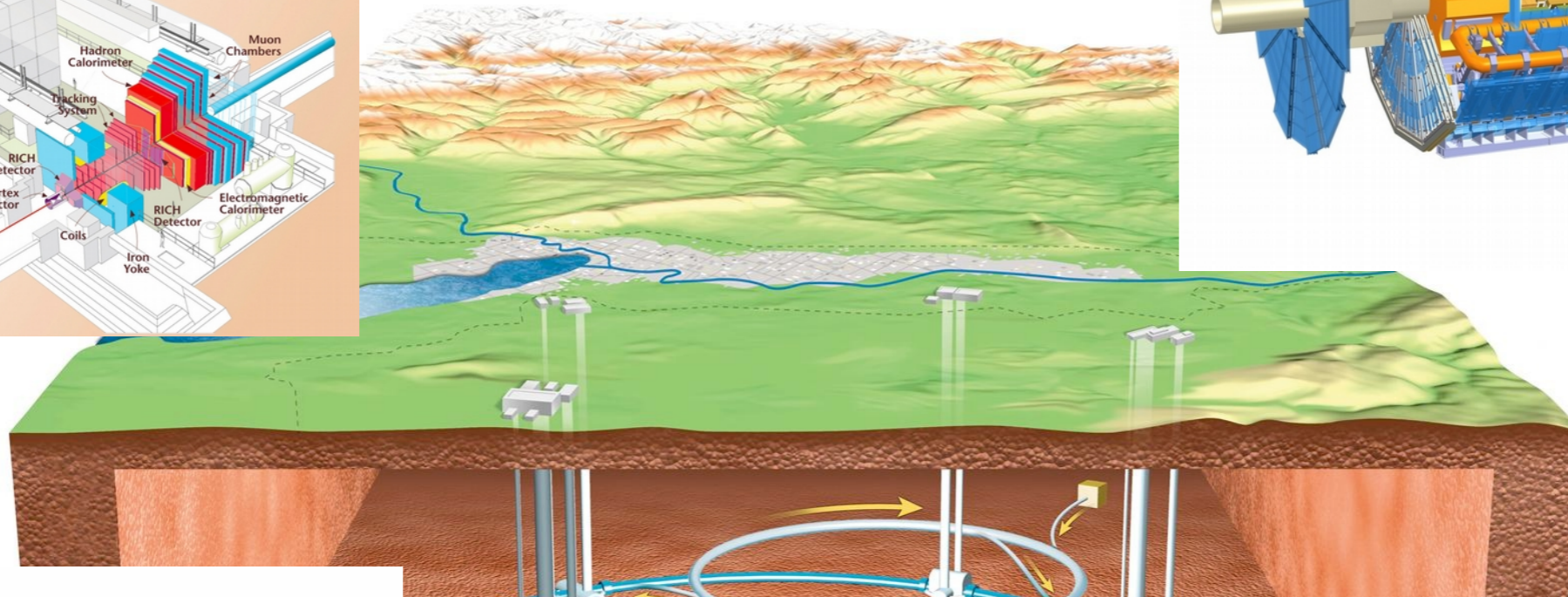
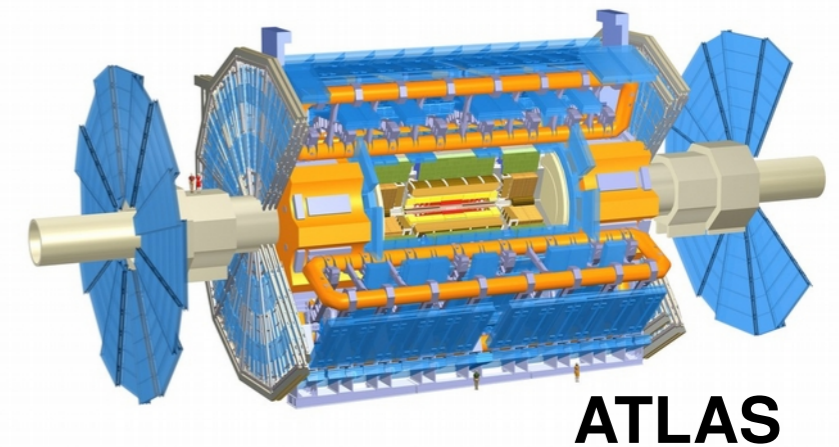
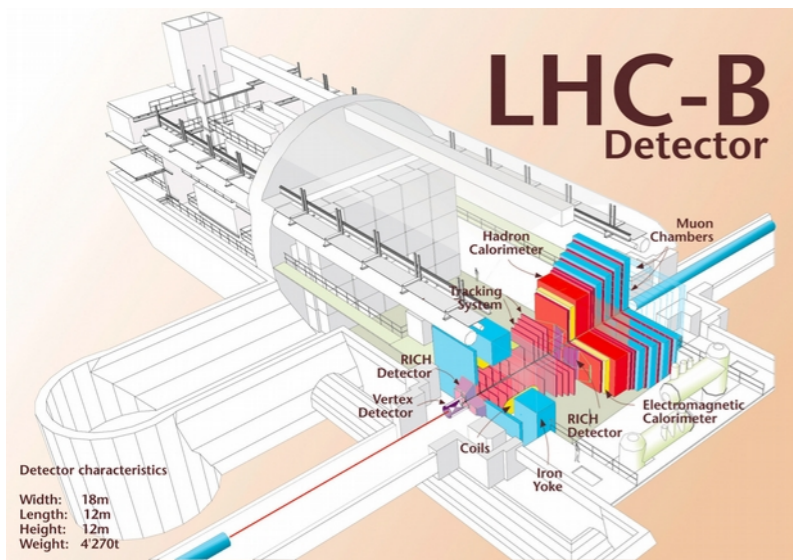
- **15 m** lang
- **30 t** schwer
- **supraleitend** ~100 t flüssiges Helium bei $T = 1.9 \text{ K} = -271.25 \text{ °C}$!
- Magnetfeld bis zu **8.33 T**
- **11 GJ (!!)** gespeicherte Energie

und es gibt 1232 Stück davon!!



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

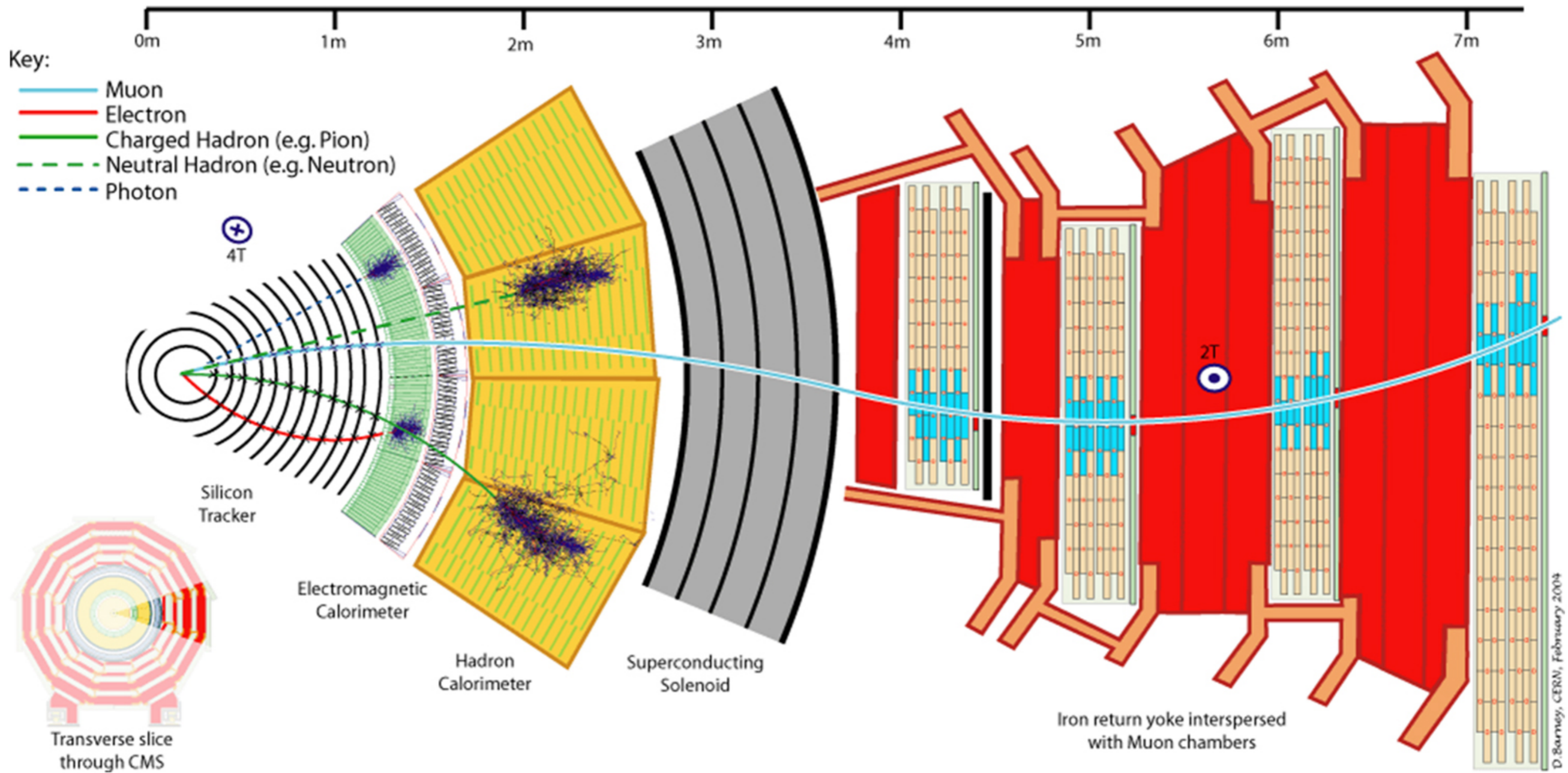
Daraus kann man auf die **Masse**, den **Typ**, die **Ladung** und die **Geschwindigkeit** schliessen!

Aufbau eines Teilchendetektors

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

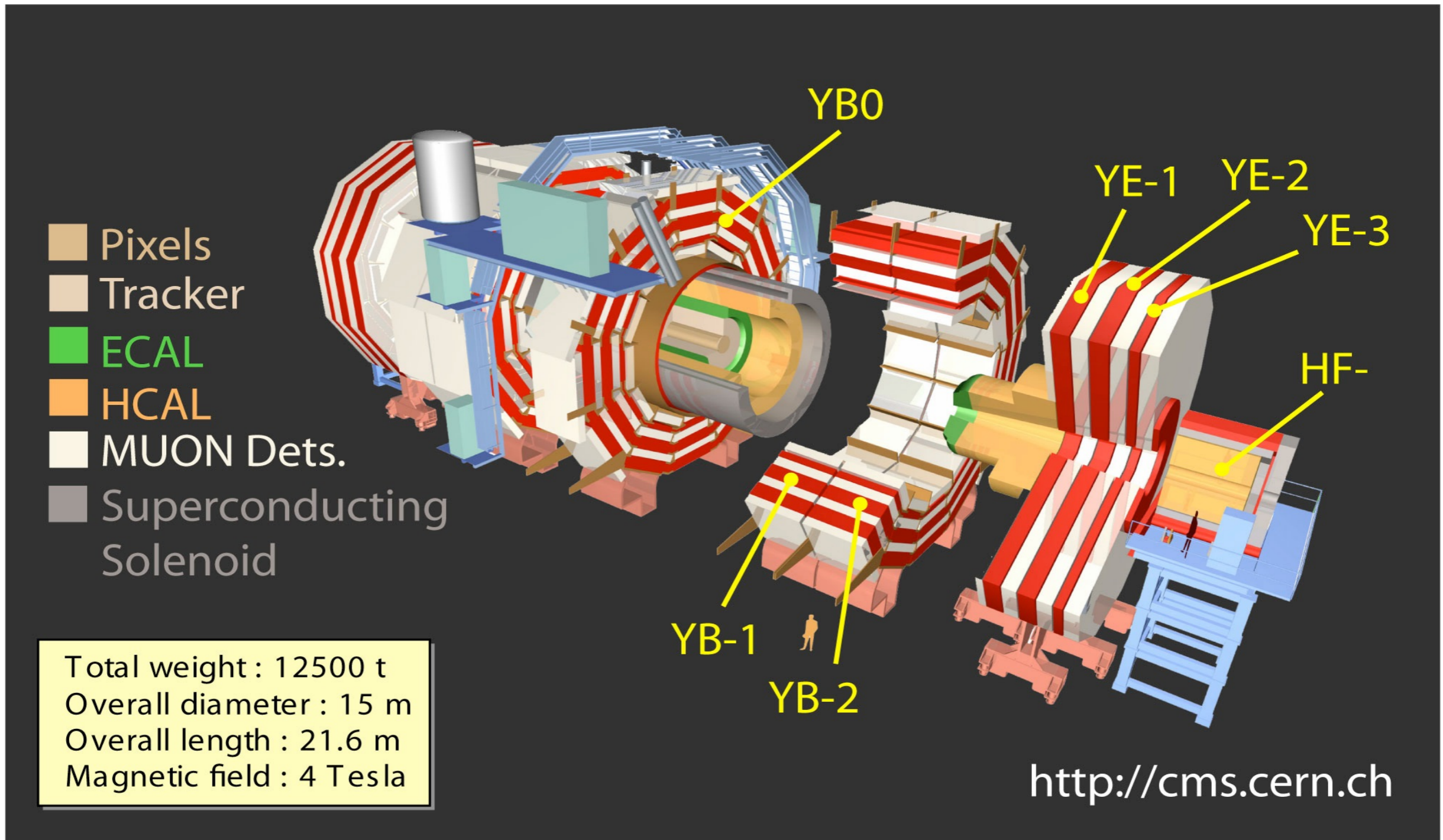
- **Pixel- & Streifendetektor** zur Spurenvermessung ← *Ort & Impulsinformation*
- verschiedene **Kalorimeter** zur Energiemessung ← *Energie*
- **Myonenkammern** zur präzisen Vermessung von Myonen ← *Ort & Impulsinformation*
- irgendwo dazwischen oder aussen: **starke Magnete(n)** zur Ablenkung geladener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

Schematischer Aufbau - CMS

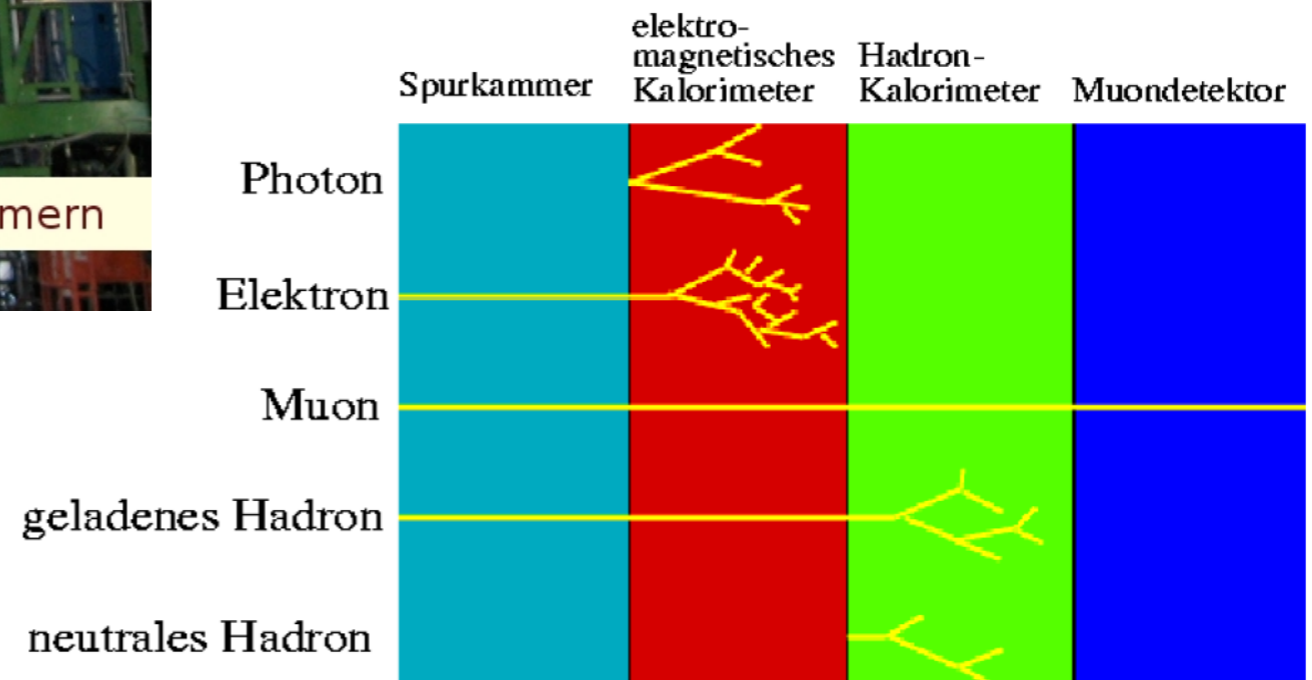
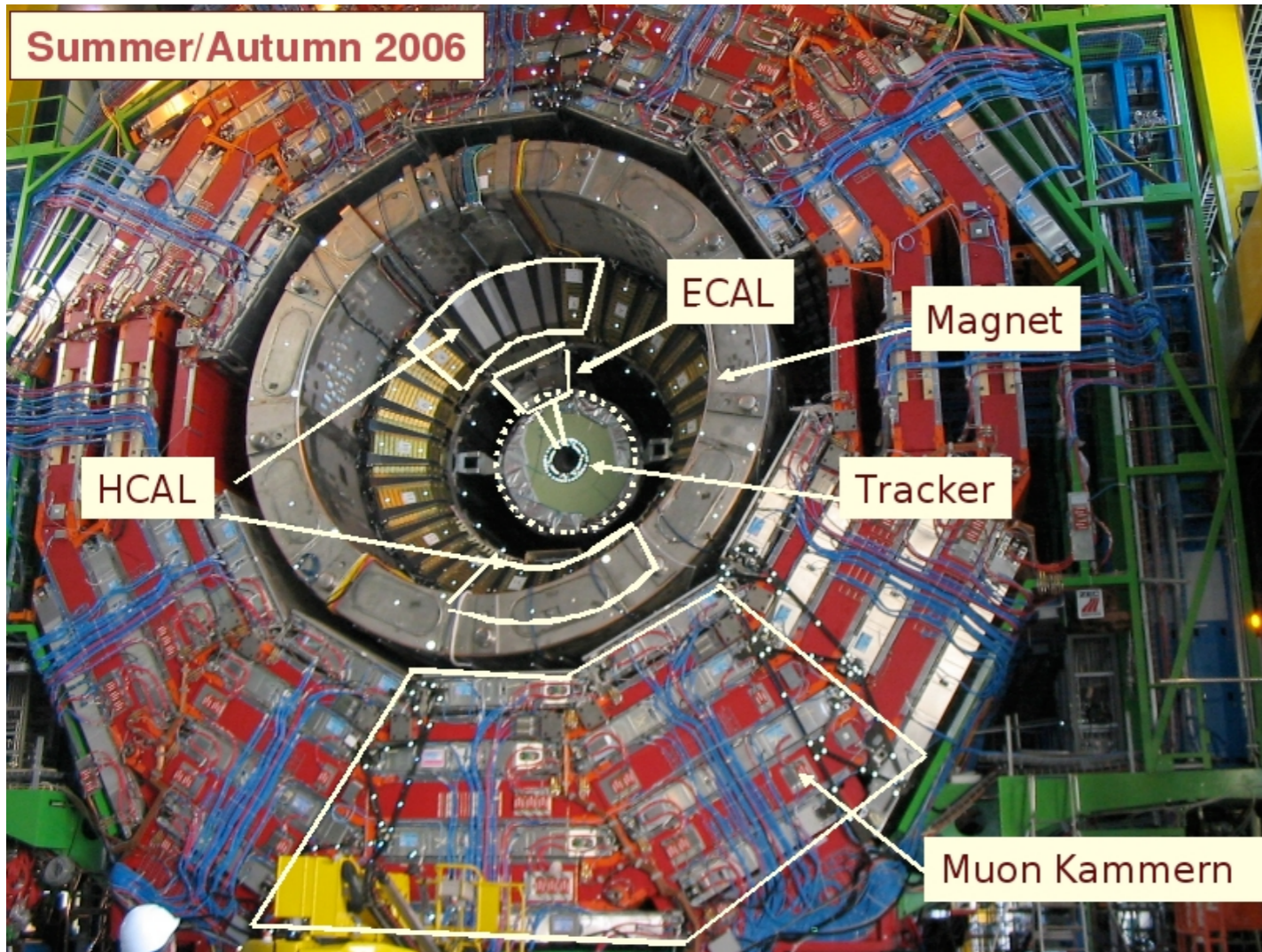


https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS_Slice_elab.swf

Schematischer Aufbau - CMS



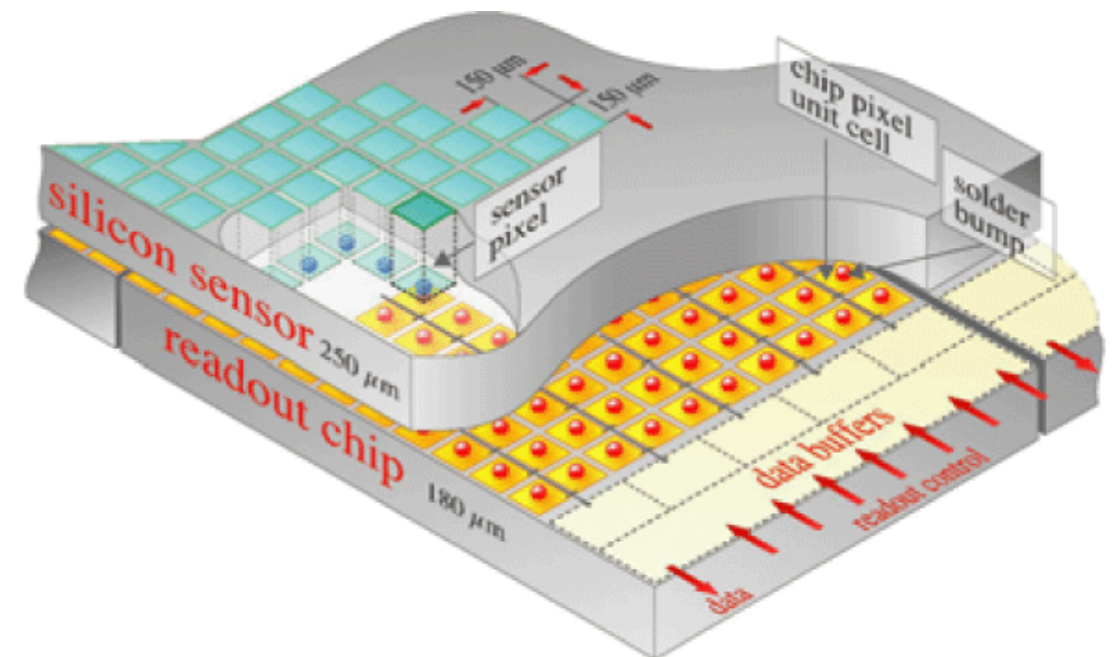
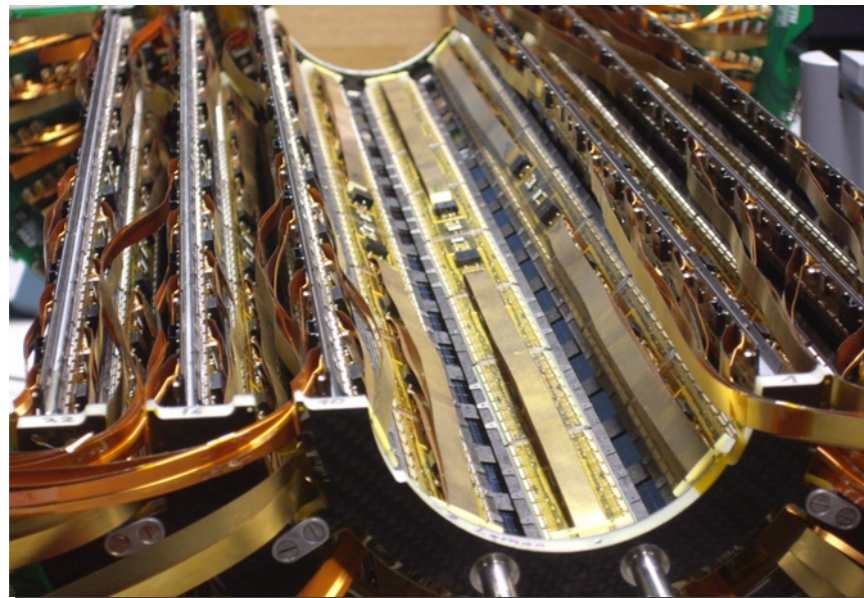
Schematischer Aufbau - CMS



Spurendetektor - Pixel

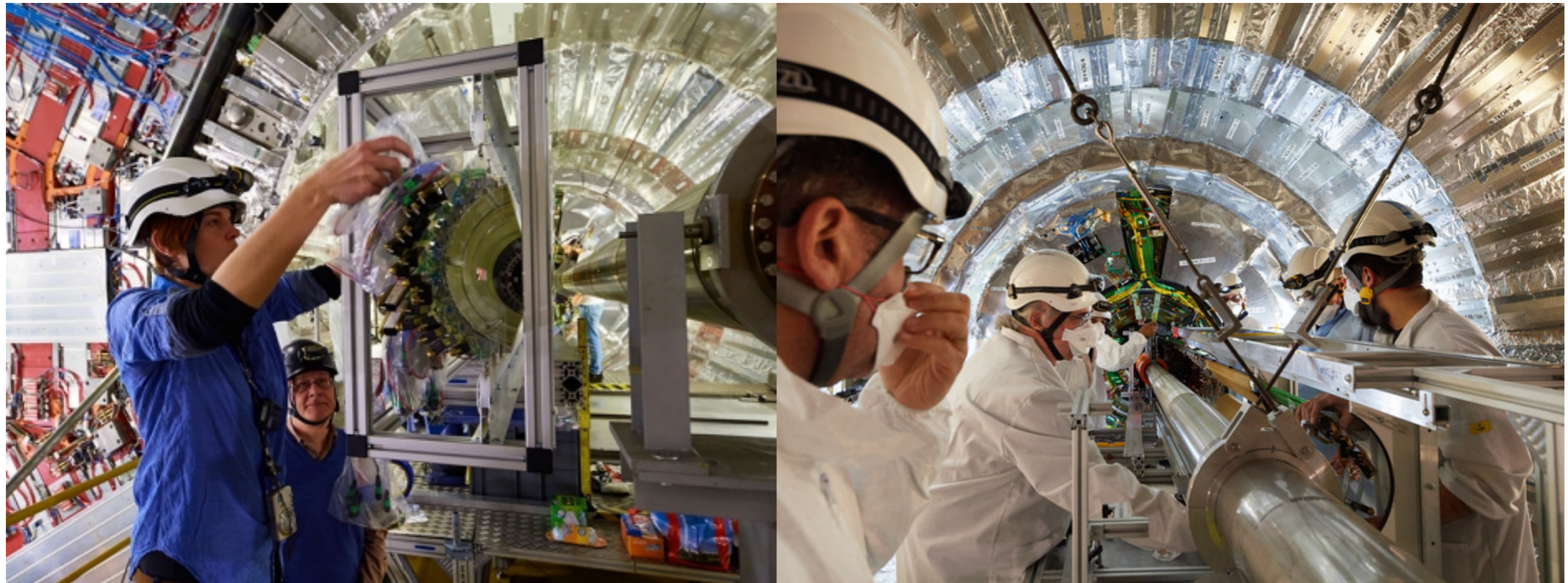
CMS Pixel Detektor hat:

- 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!!

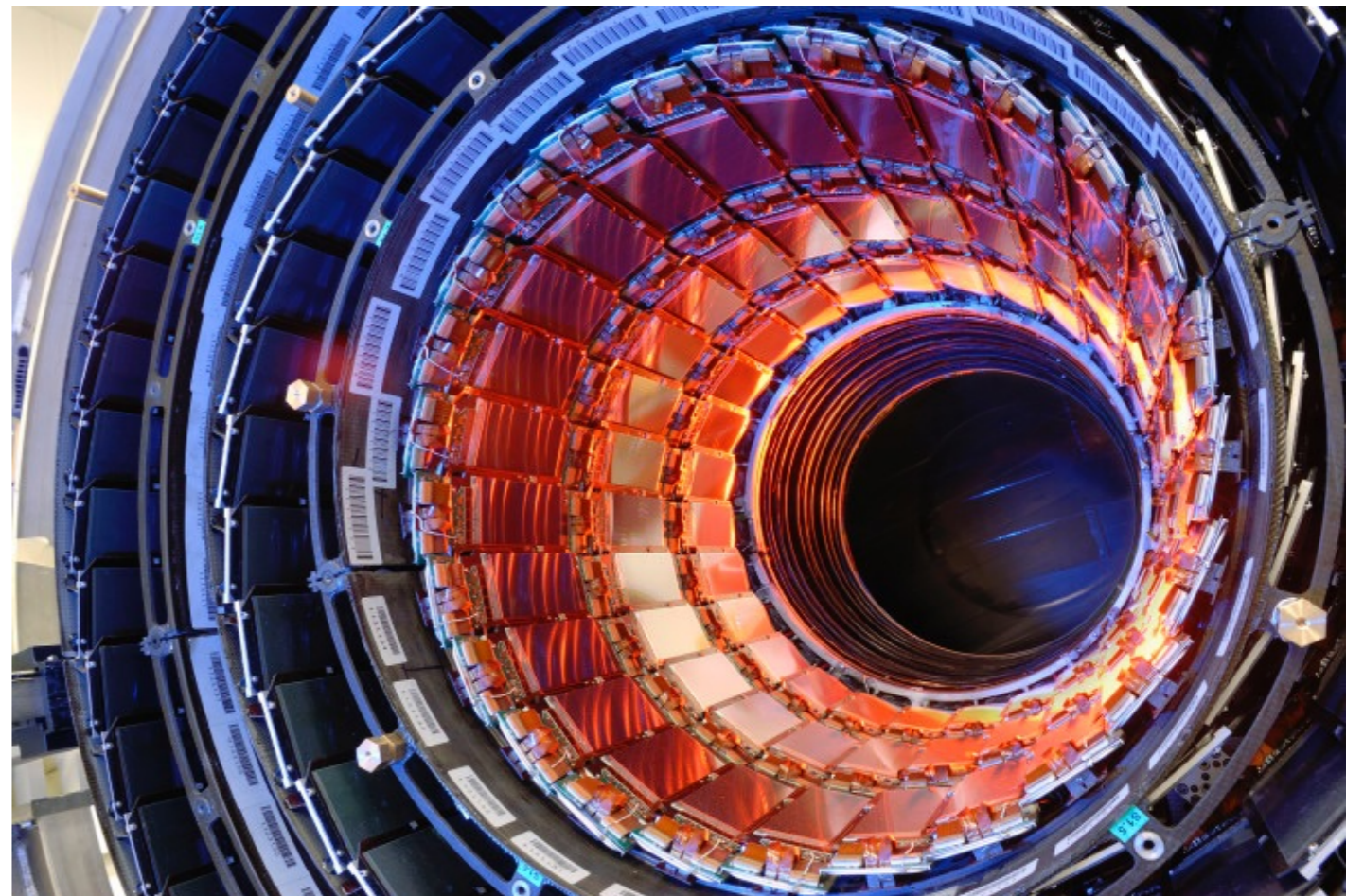
Spurendetektor - Pixel



Spurendetektor - Streifen

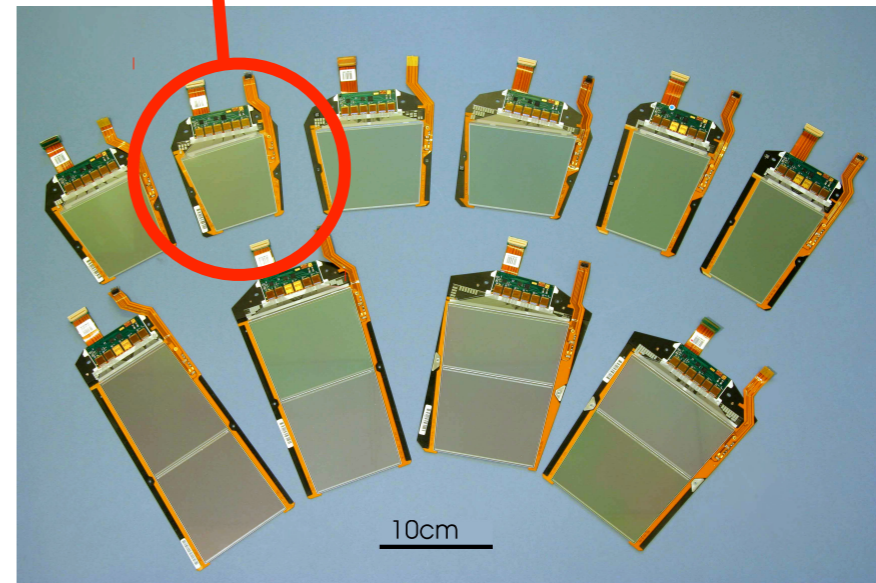
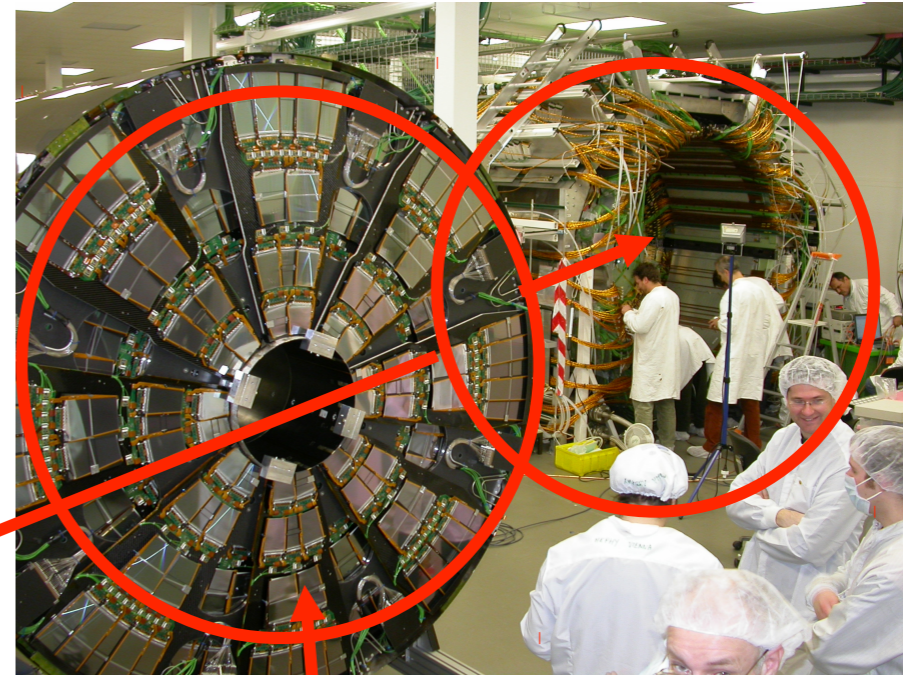
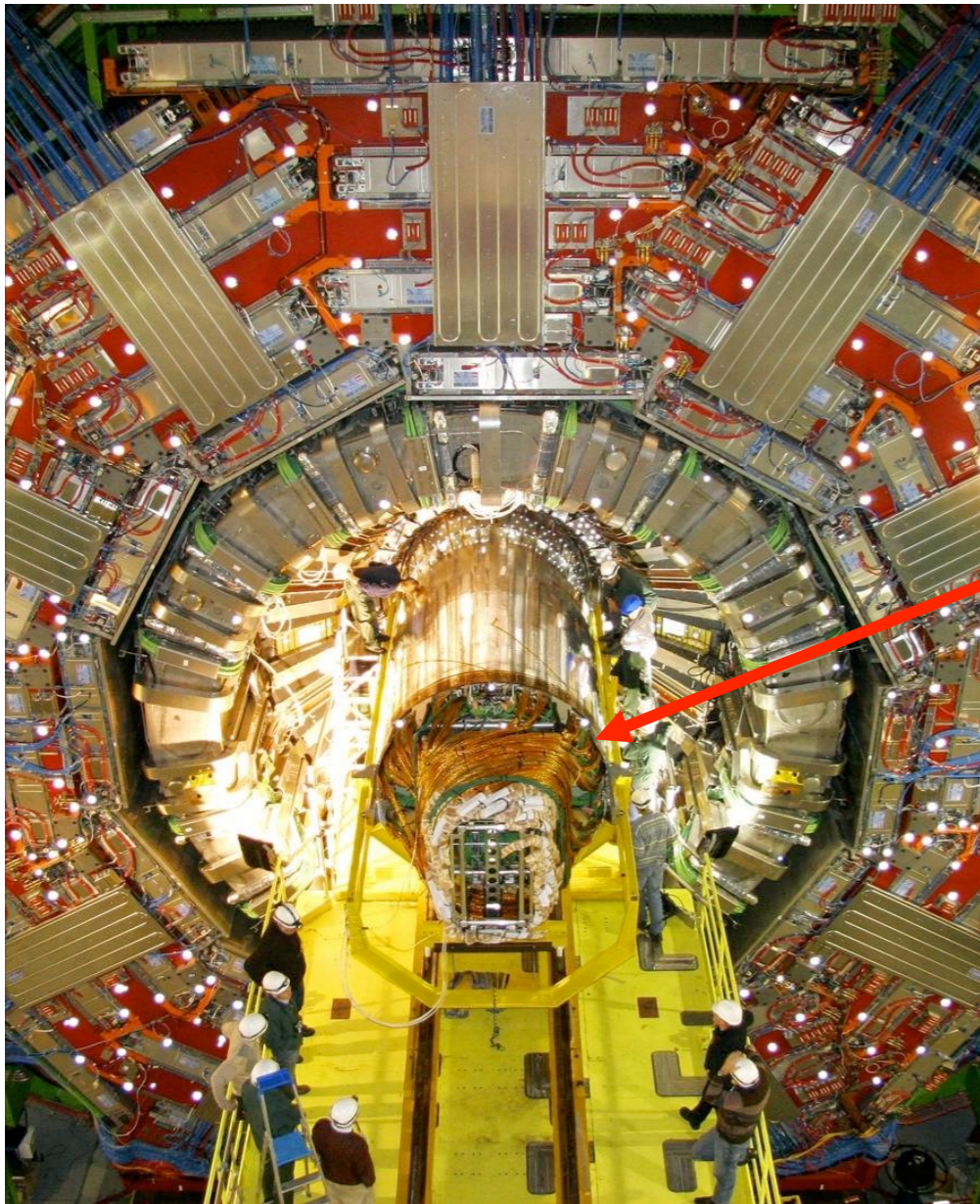
Um Auslesekanäle zu sparen, sind die nächsten ~ 10 Lagen keine Pixel, sondern sogenannte Siliziumstreifendetektoren

- **selbes physikalisches Prinzip**
- lange, schmale Streifen
- **$80 \mu\text{m}$ breit**
- **$\sim 200 \text{ m}^2$ 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

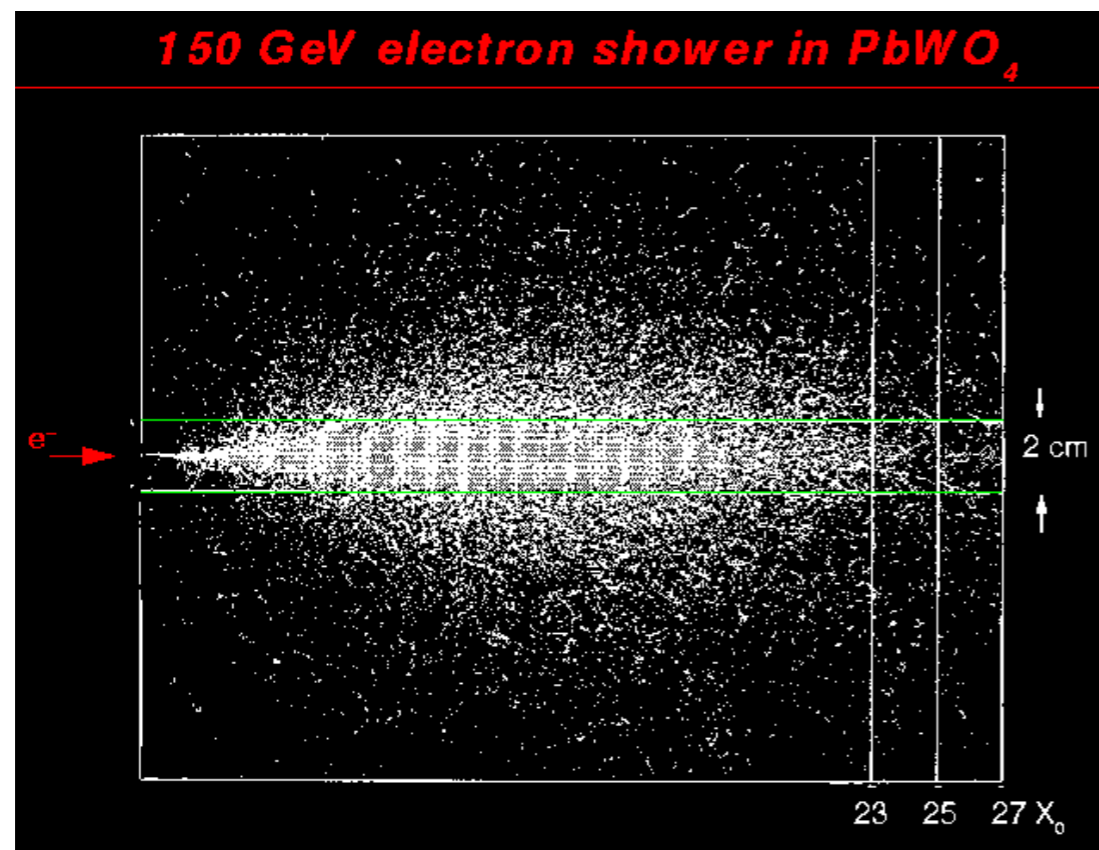
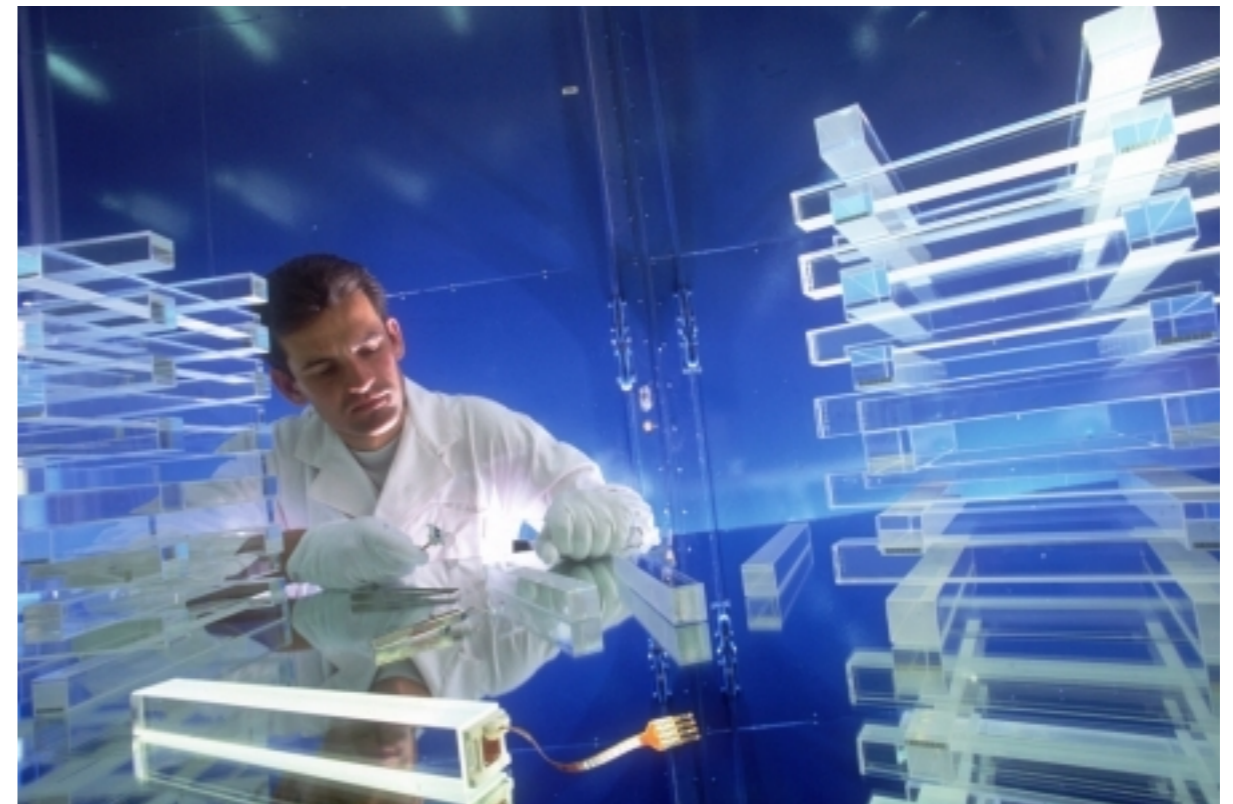
Kalorimeter - Elektromagnetisch

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”

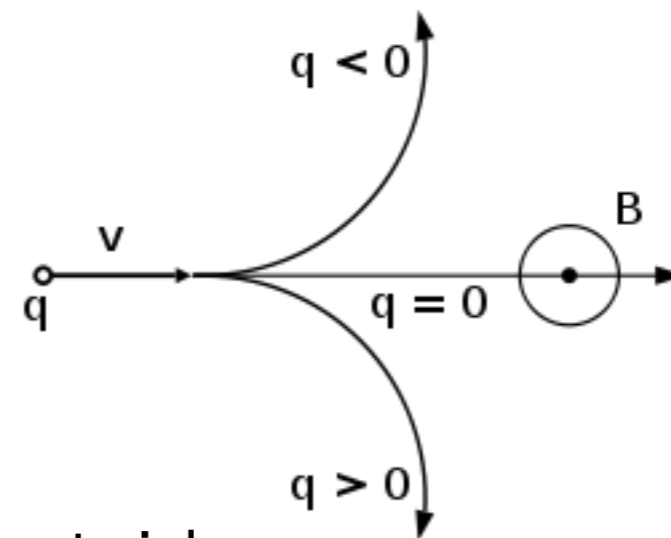


Supraleitender Magnet

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:

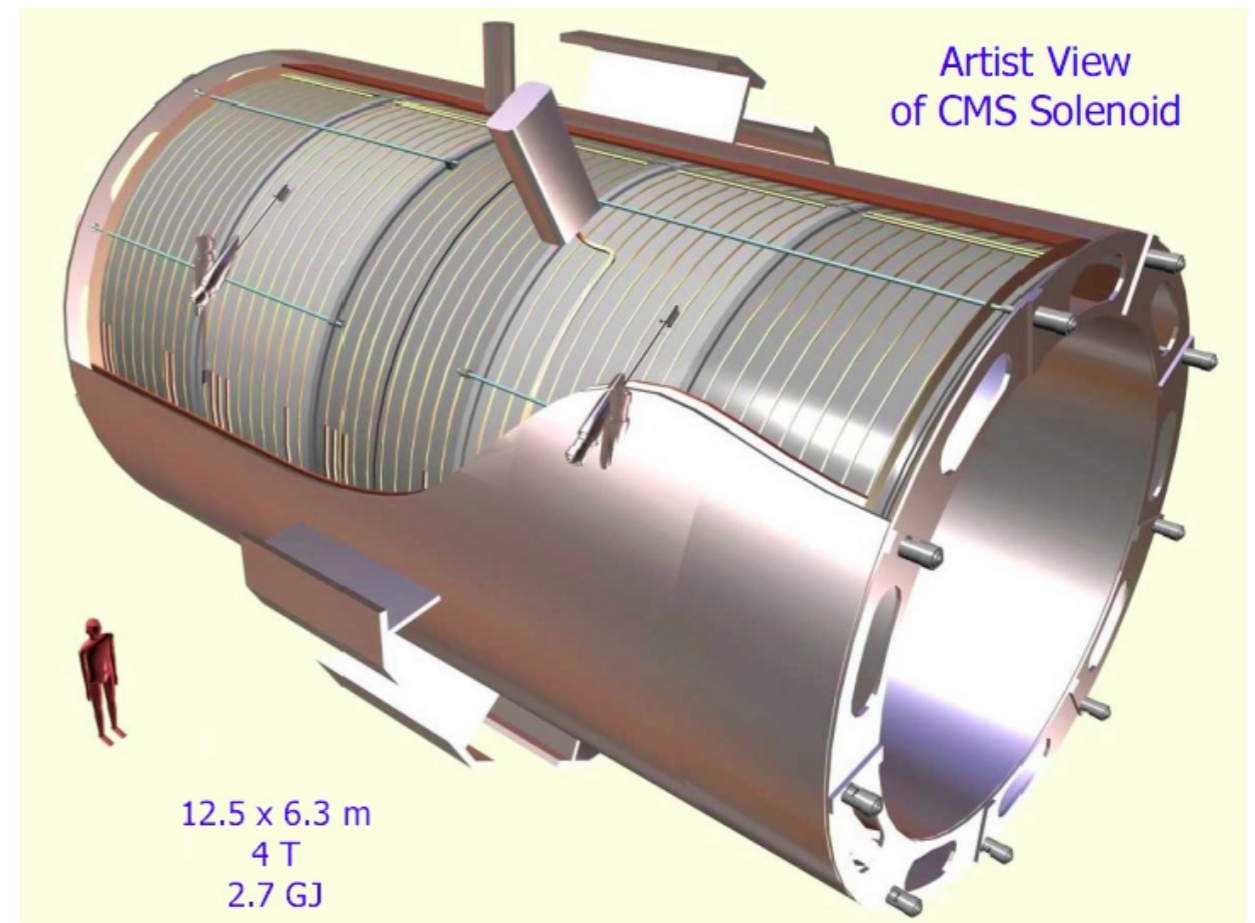
→ **~6 m Durchmesser!**

→ **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



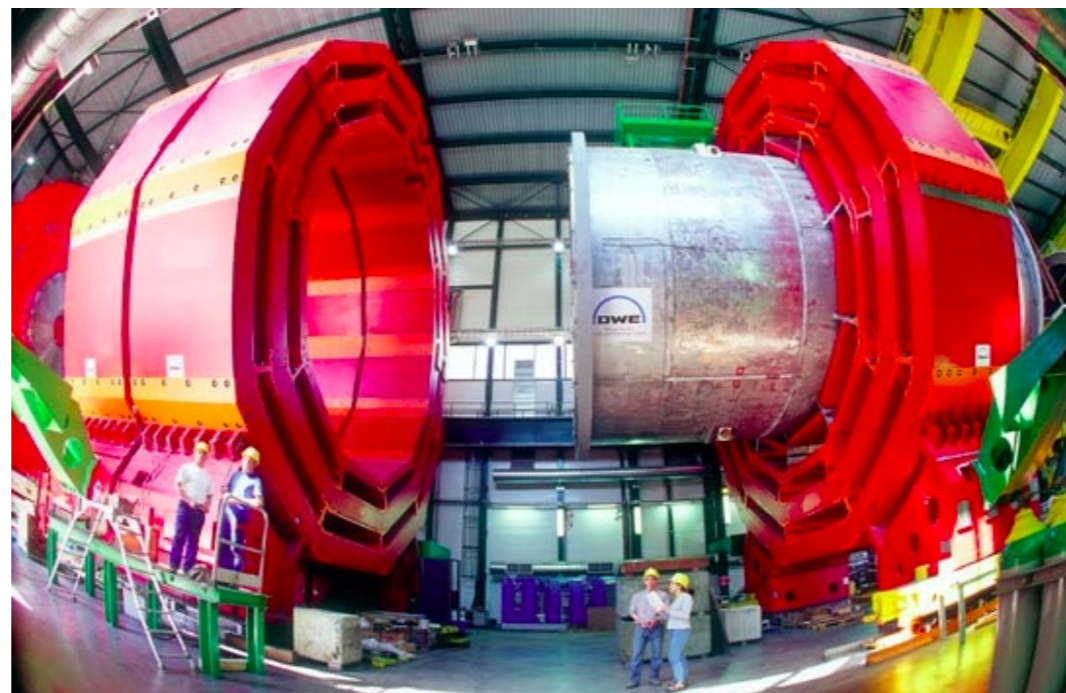
Rückführjoch

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!**



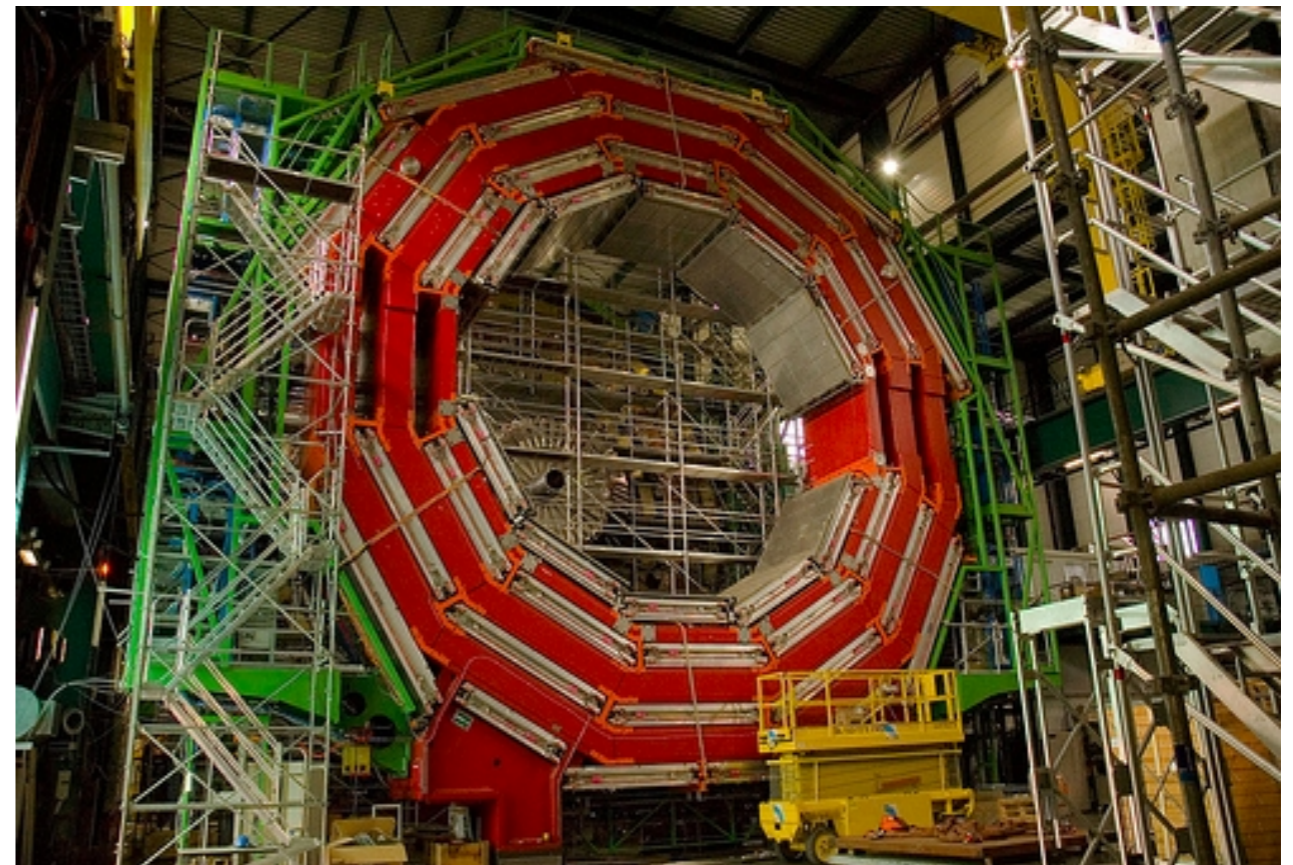
Myonkammern

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!

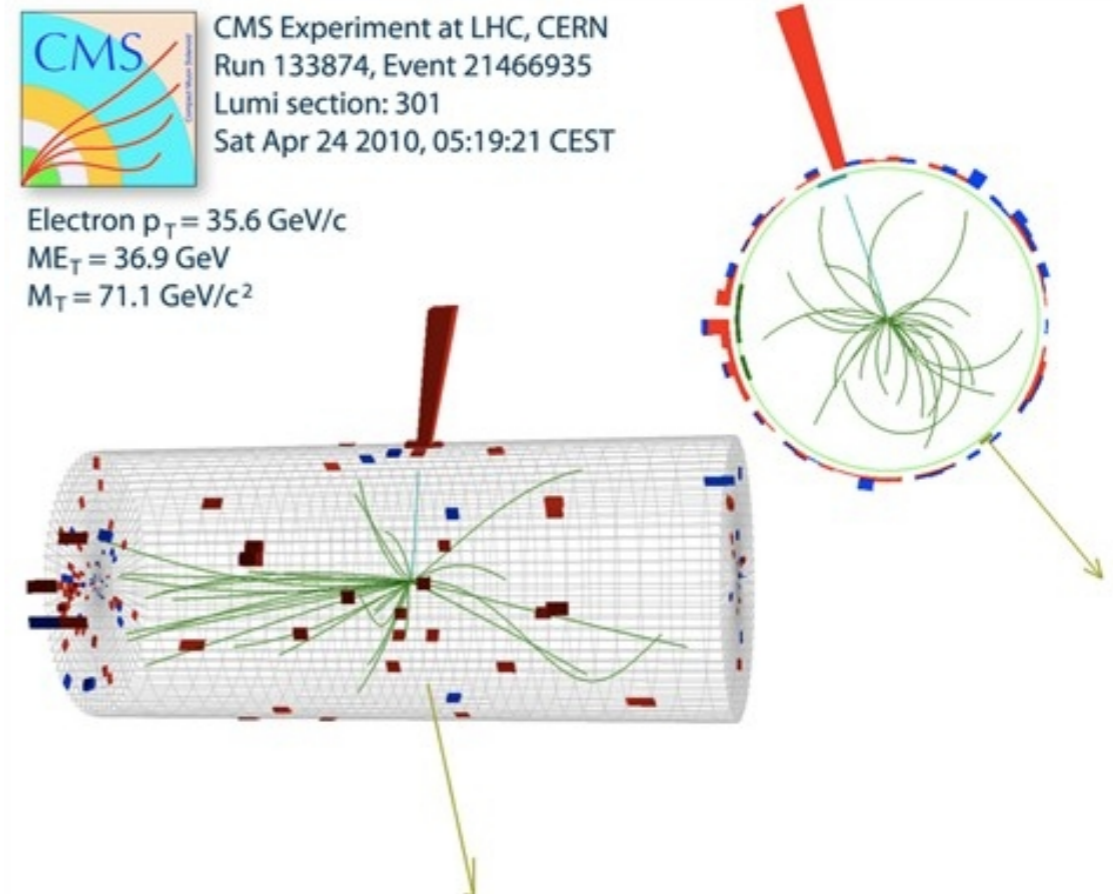
In der Ebene normal zur Strahlrichtung
ist der Anfangsimpuls gleich null!

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!

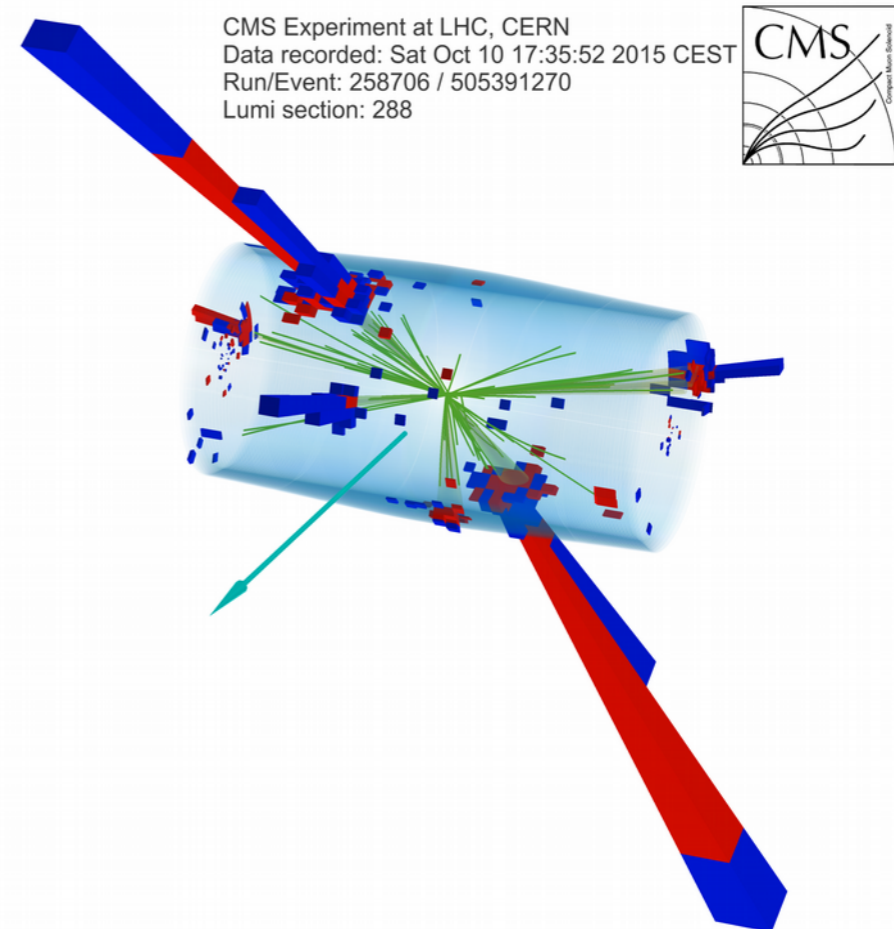
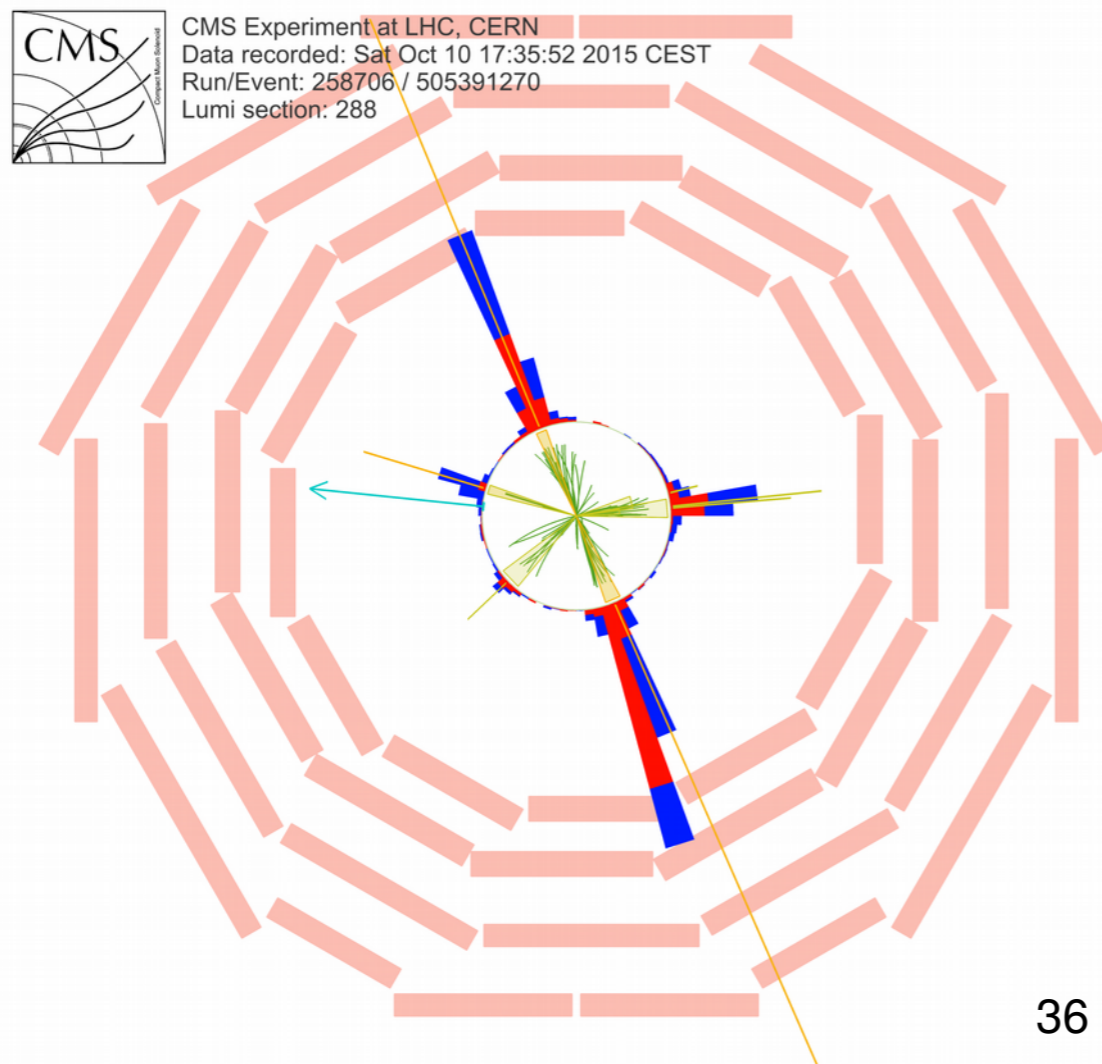
- man muss sich die **interessanten Kollisionen** herauspicken
- ausgefeilte **Hardware und Software Algorithmen**
- am Ende werden “nur” ca. 500 - 1000 Kollisionen pro Sekunde gespeichert
- bei ca. 1-2 MB pro “Event” macht das trotzdem ca. 1 GB pro Sekunde!

Auslese - Rekonstruktion

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

→ ausgeklügelte Software

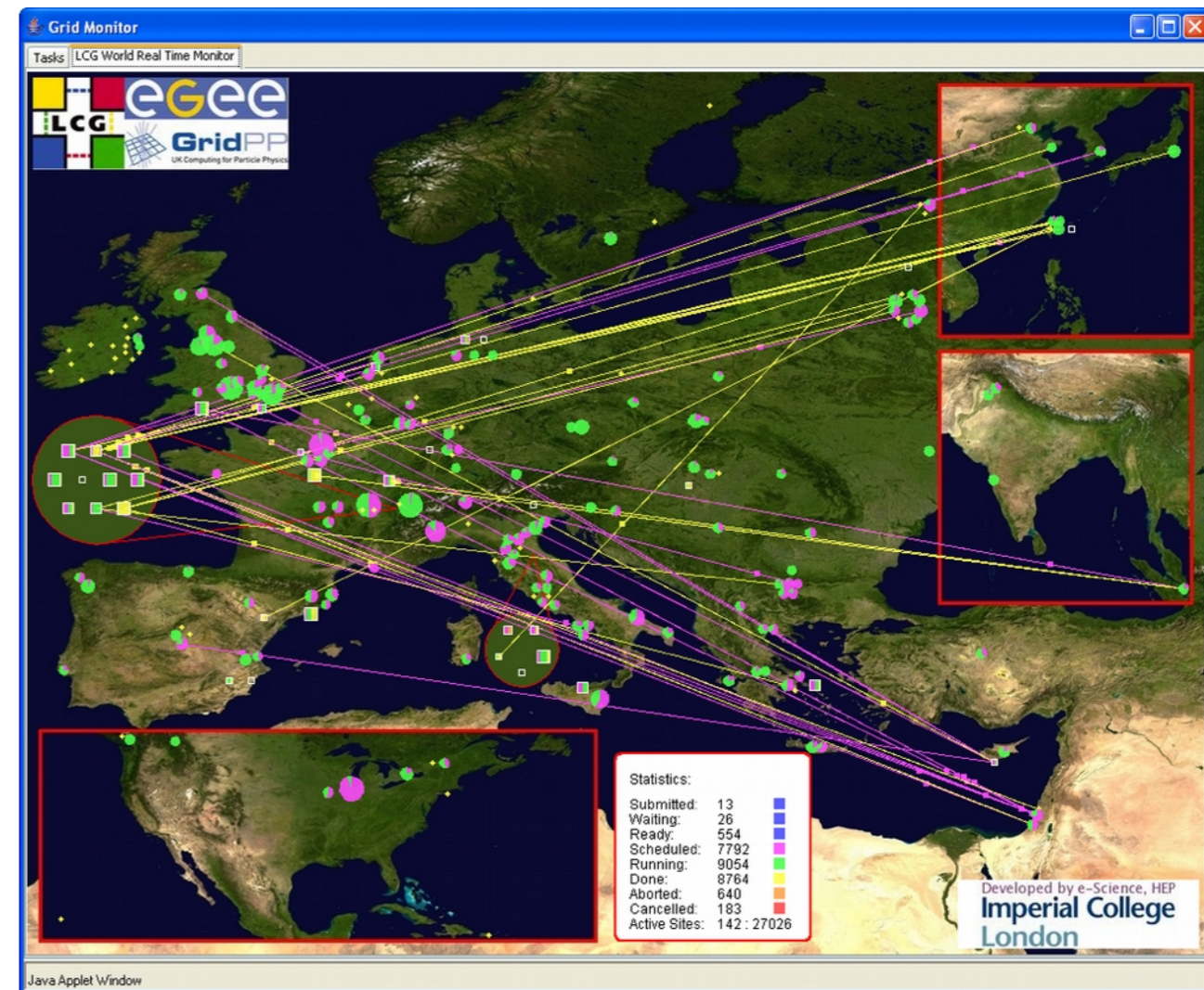
→ “übersetzt” elektronische Signal in für Menschen lesbare Objekte
& schöne Bilder



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

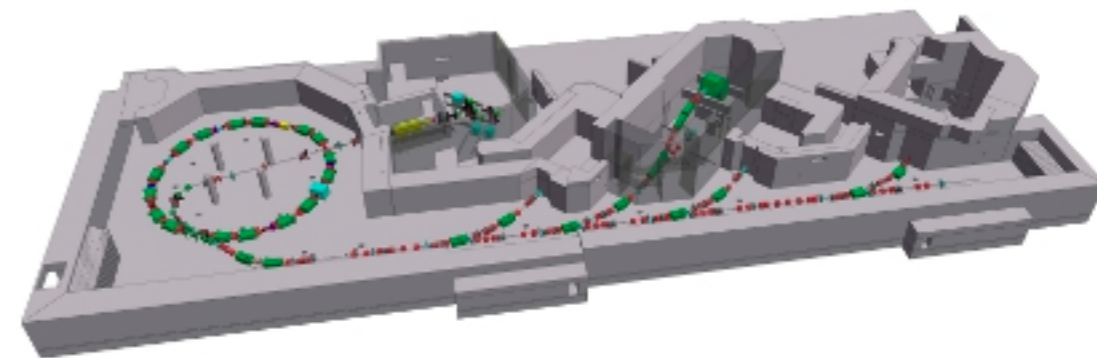
→ das **WWW** wurde von Tim Berners-Lee & co. 1990 am CERN erfunden

→ 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



Spannende Zeiten

- Suche nach neuer Physik
- Genauere Vermessung des Higgs Bosons



ENDE



Fragen?