

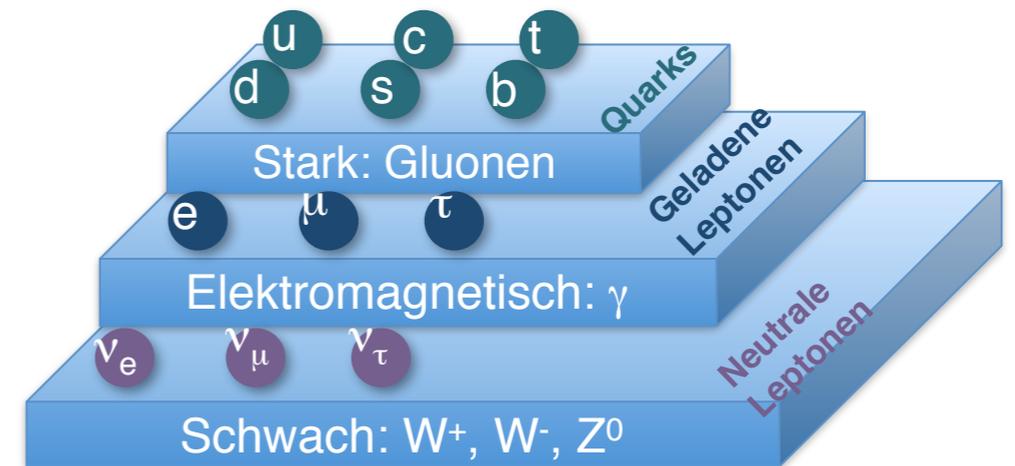
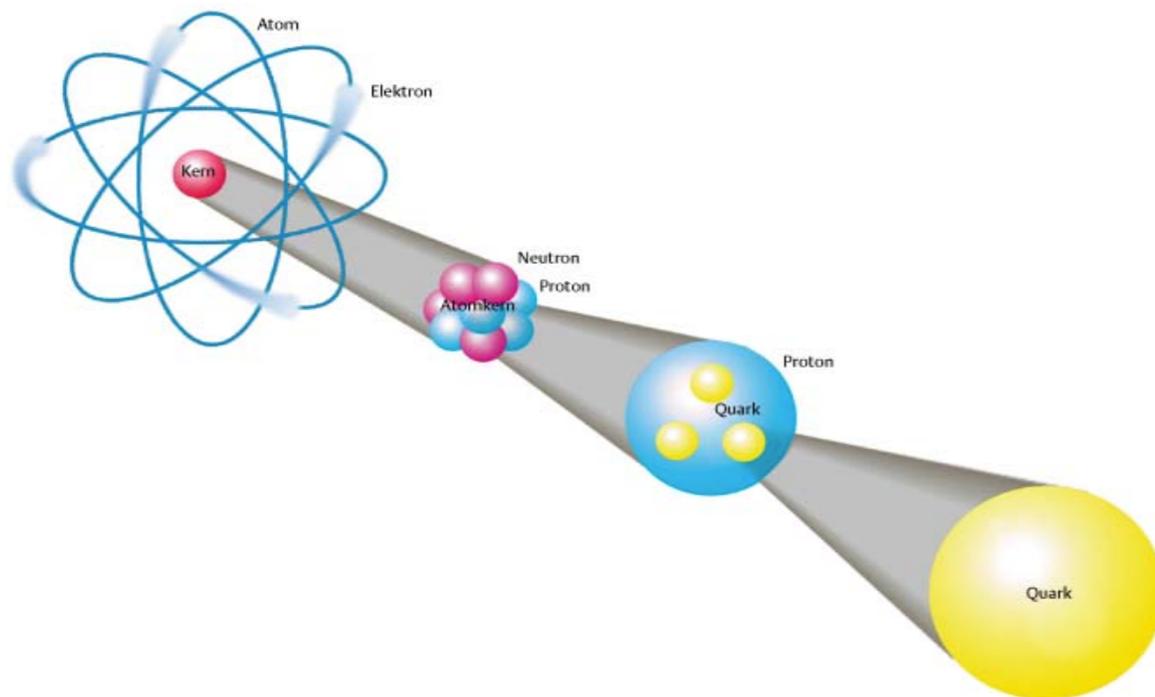
Beschleuniger und Detektoren

international masterclasses 2016

Danke an Marc Dünser!

Wozu Teilchenbeschleuniger?

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



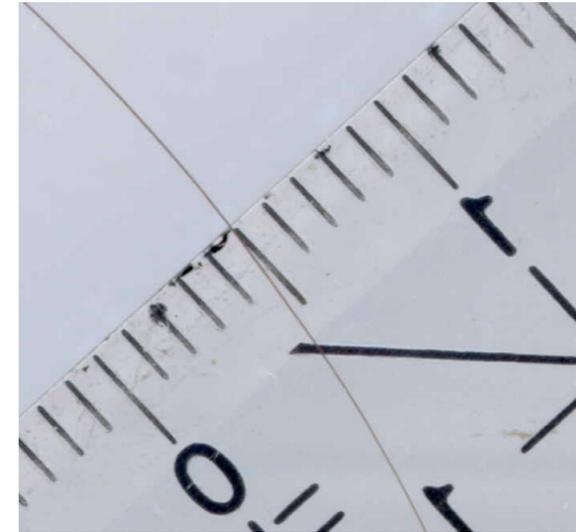
... nur wie?

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

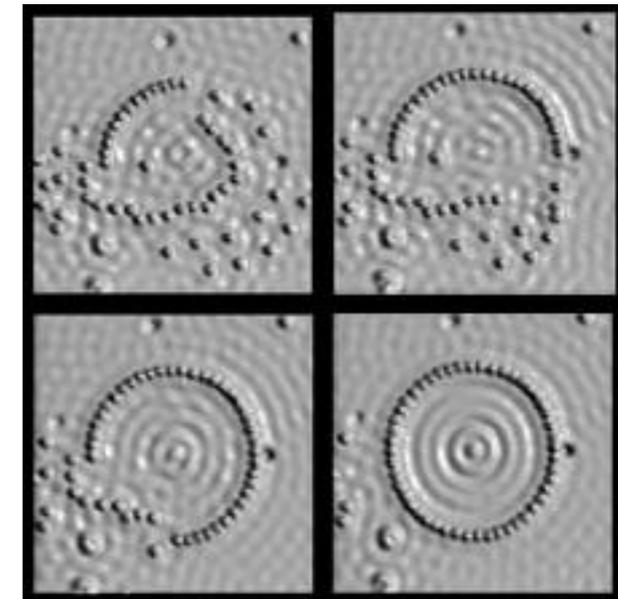


Beobachtung noch kleinerer Objekte

Rastertunnelmikroskop:

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

10^{-11} m

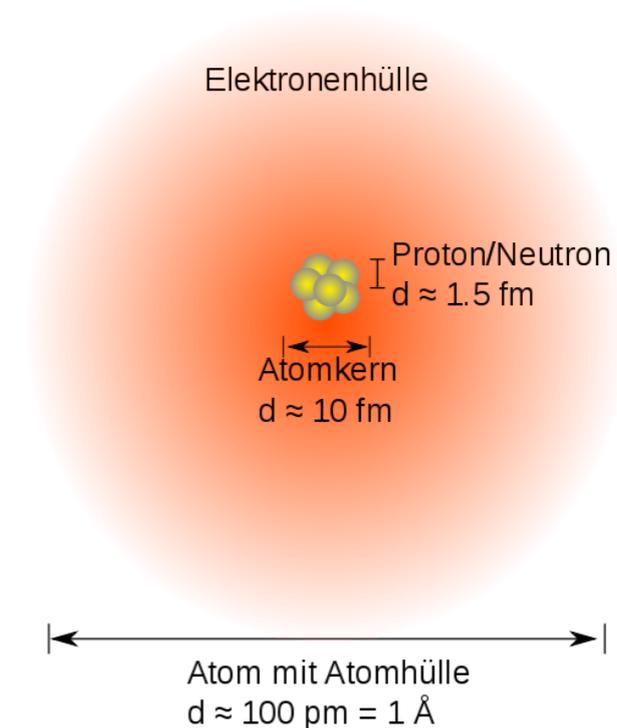


ABER:

der Durchmesser eines Atomkerns

ist $\sim 10^{-15}$ m

... was kann man tun?



Beobachtung kleinster Objekte

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

de Broglie:

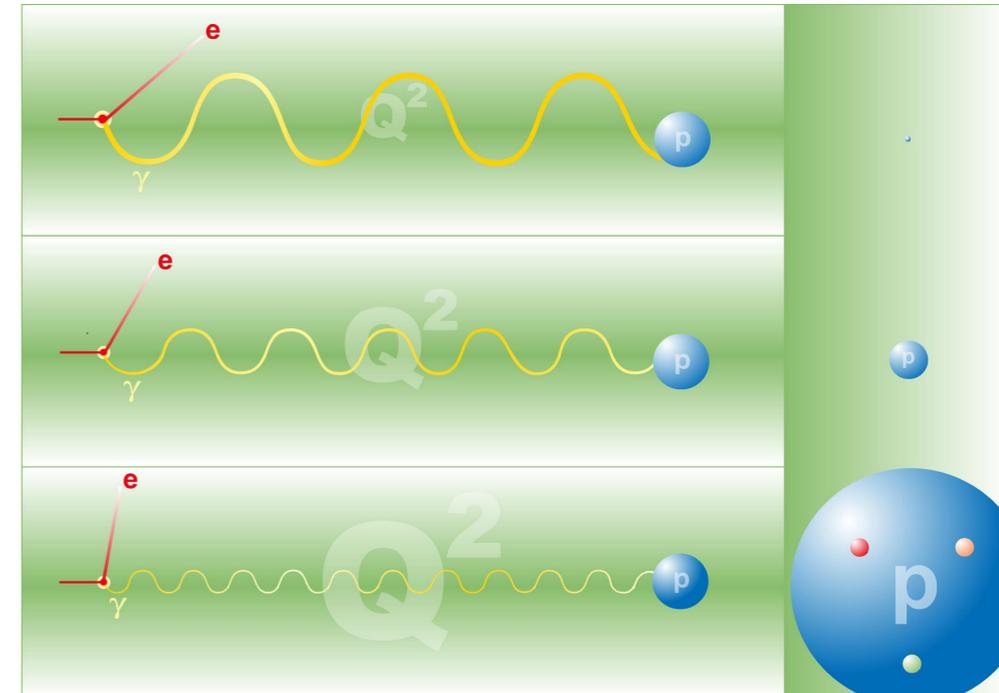
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

je höher die Energie, desto höher der Impuls

--> **kleinere Wellenlängen bei hohen Energien!**

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

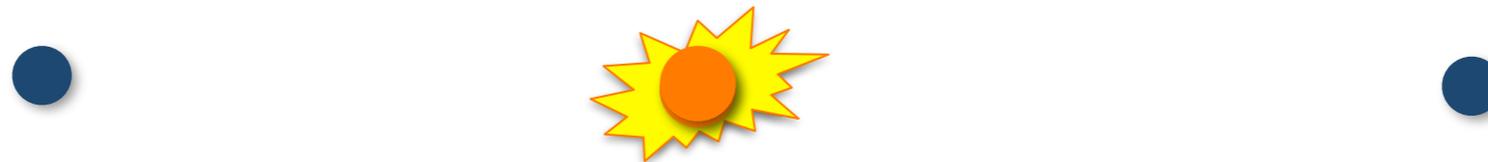
**kein Scherz,
aber wie kann das sein?**

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!

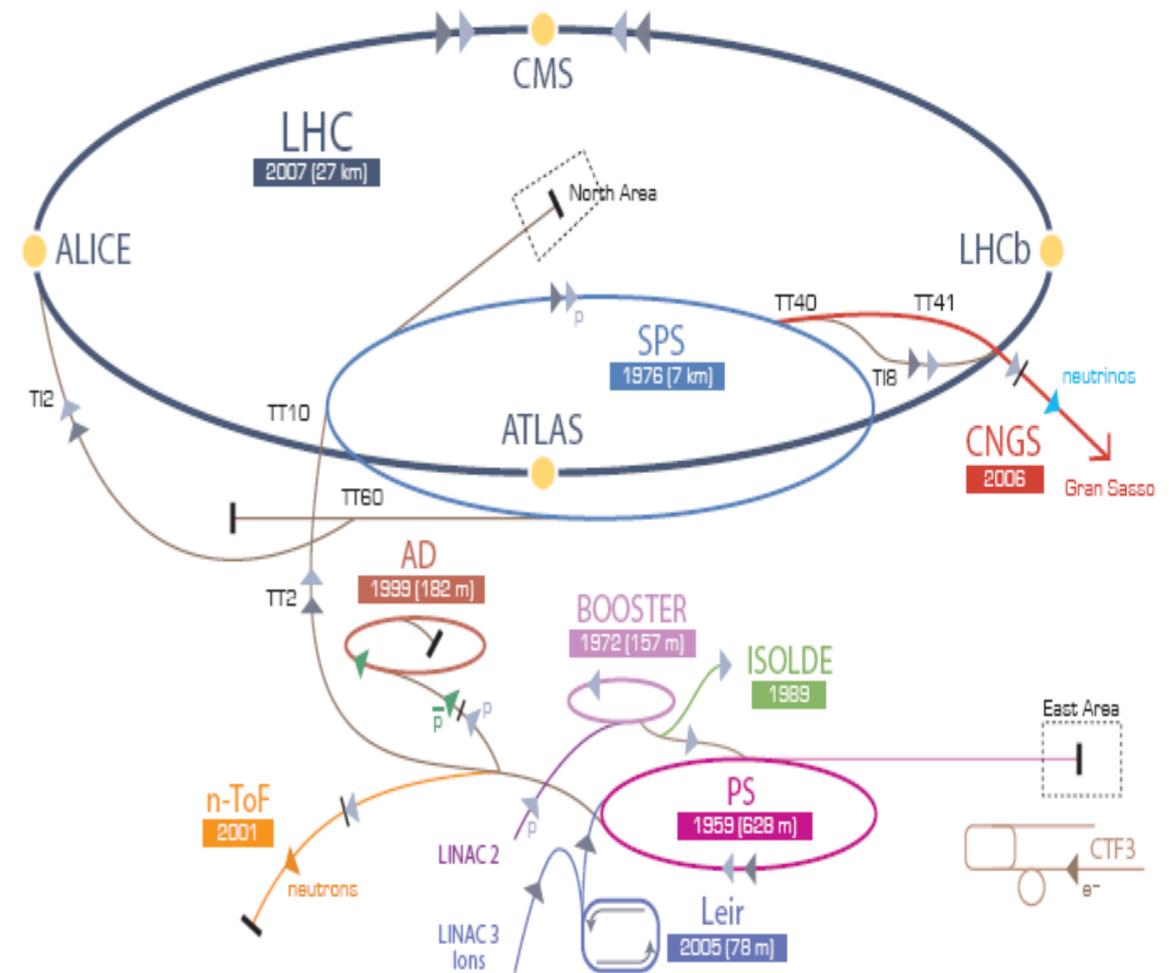
Einstein's berühmte Formel:

$$E = mc^2$$

LHC - Die grösste Maschine der Welt

Kreisbeschleuniger

- > riesiger Beschleunigerring am CERN nahe Genf
- > **Proton-Proton** Kollisionen
- > ca. **27 km langer** Tunnel
- > **~100 m** unter der Erdoberfläche
- > **4 (sehr) grosse Experimente**
mehr dazu später



sehen wir uns anhand des LHC einige Dinge genauer an

Aufbau von Beschleunigern

Was benötigt man zur Beschleunigung von Teilchen?

1) Teilchen

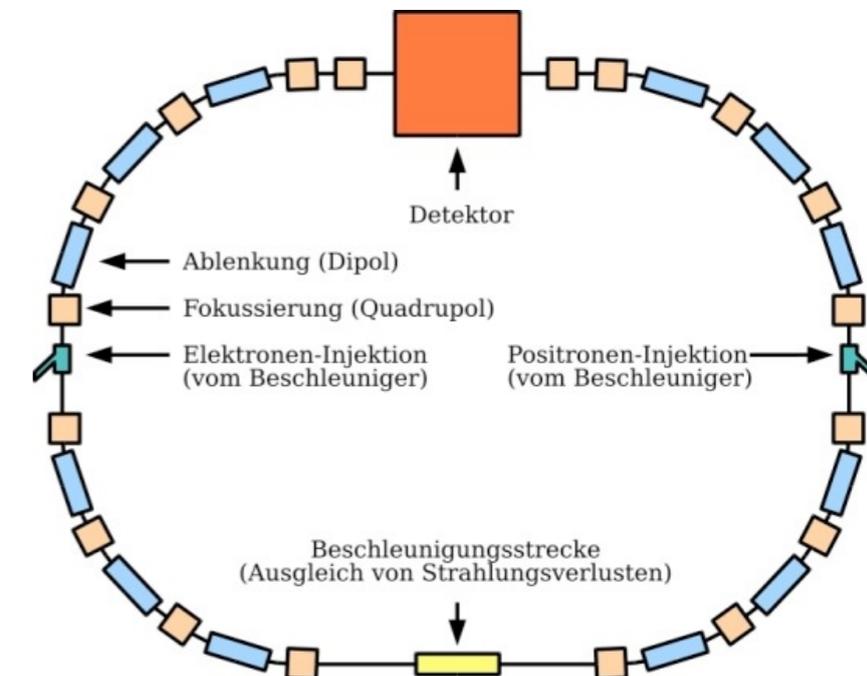
--> z.B. **Protonen** (LHC) oder **Elektronen** (LEP)

2) Beschleunigungsstrecken

--> geladene Teilchen werden in **elektrischen Feldern** beschleunigt

3) Magneten zum Ablenken bei Kreisbeschleunigern

--> 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

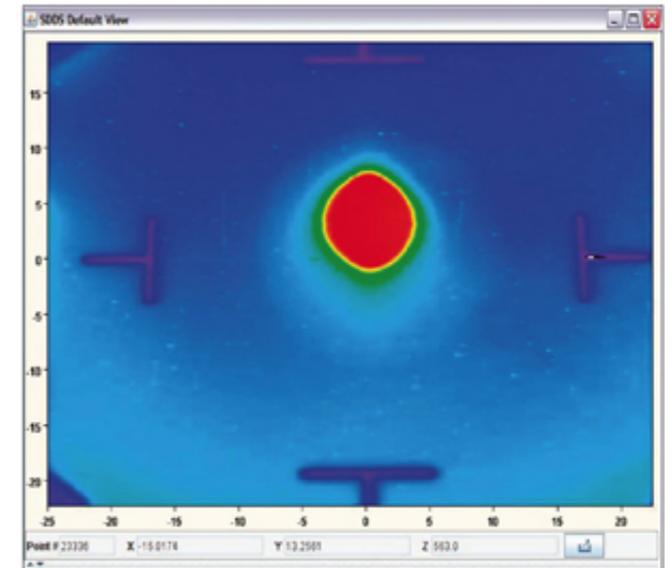
Protonen

--> 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!

Teilchen-”strahlen”

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



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

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

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

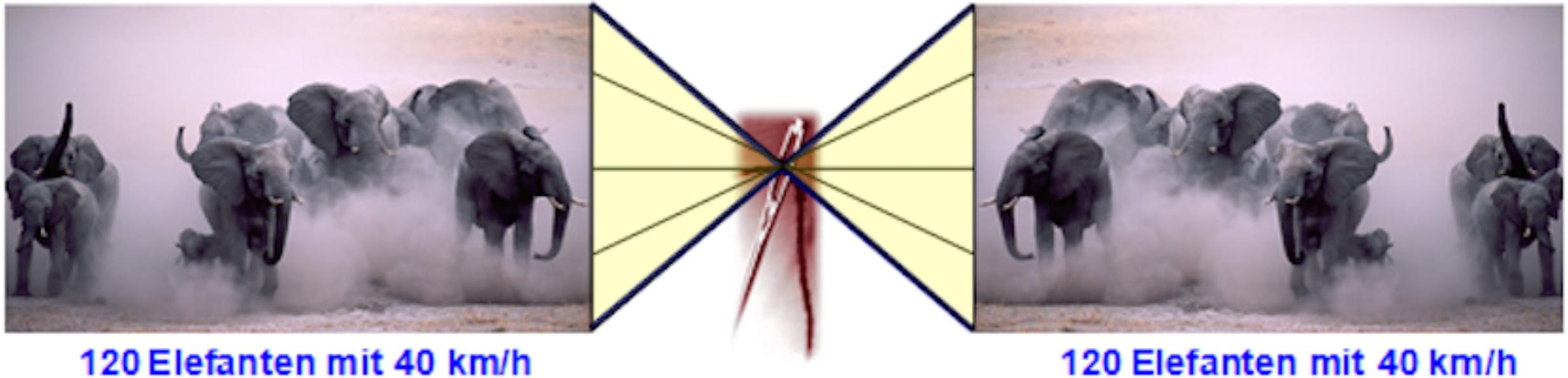
Alle 25 ns (!) treffen sich 2 Pakete bei den Experimenten!

--> 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 μ J)

Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser

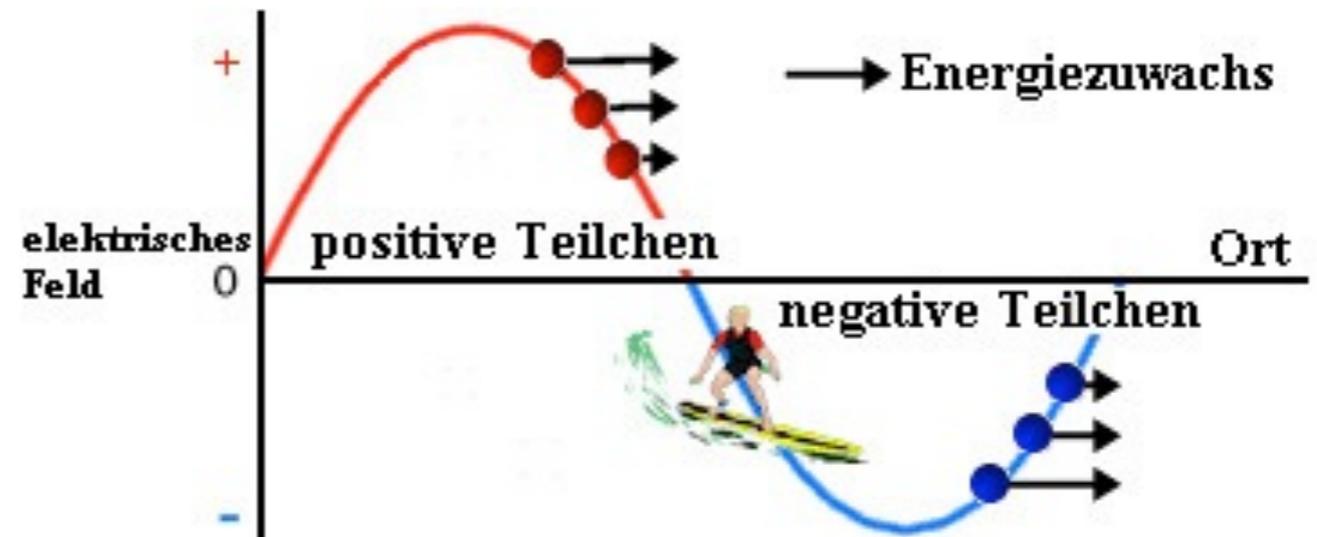
Protonstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

Beschleunigungsstrecken

Geladene Teilchen werden **in elektrischen Feldern beschleunigt**

--> grössere Energiegewinne durch **Wechselspannung**:

- bis zu **35 MV pro Meter**



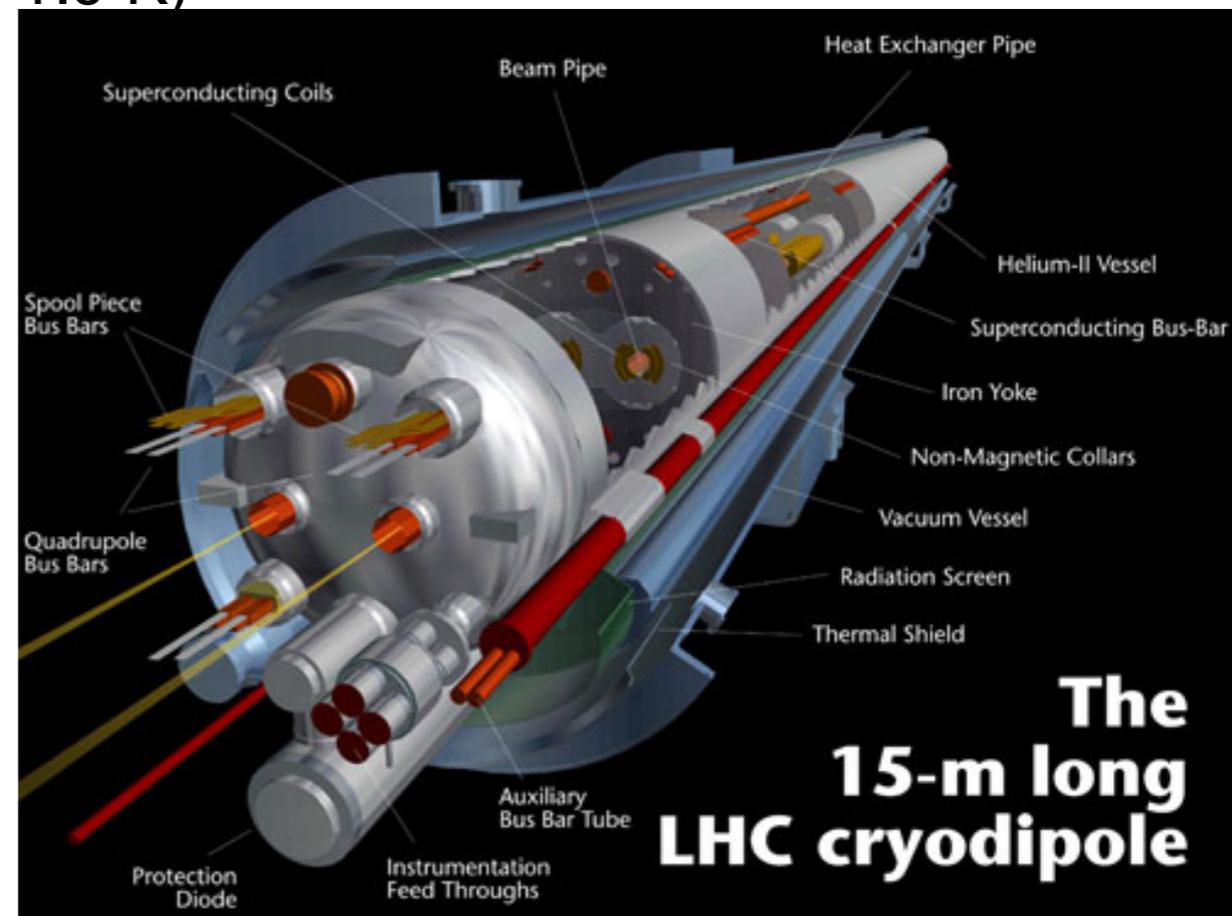
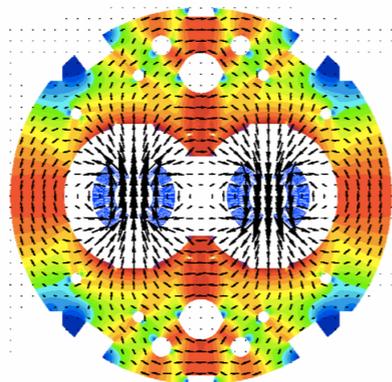
Ablenkmagneten

Ablenkmagneten: klingt einfach, ist es aber nicht!
(Später mehr zur Physik)

Die Magneten des LHC:

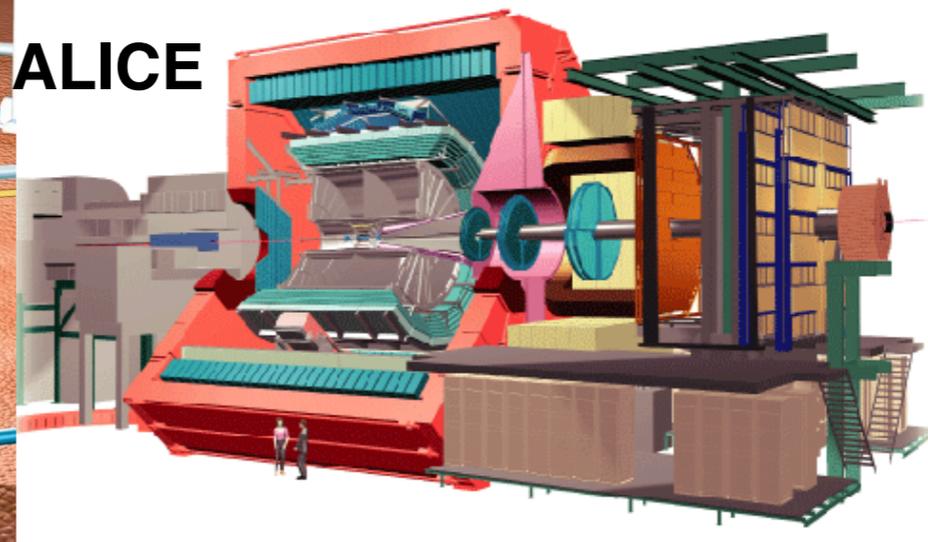
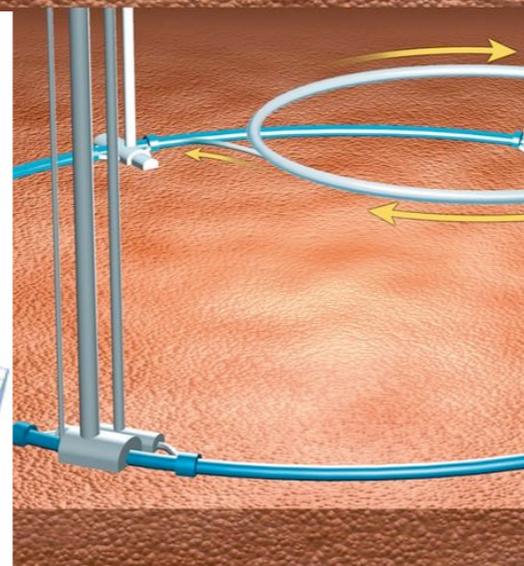
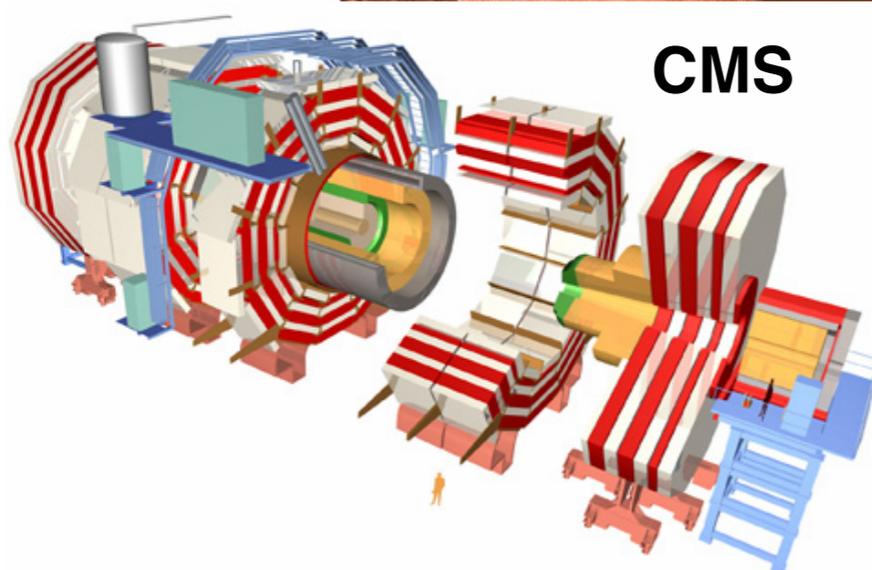
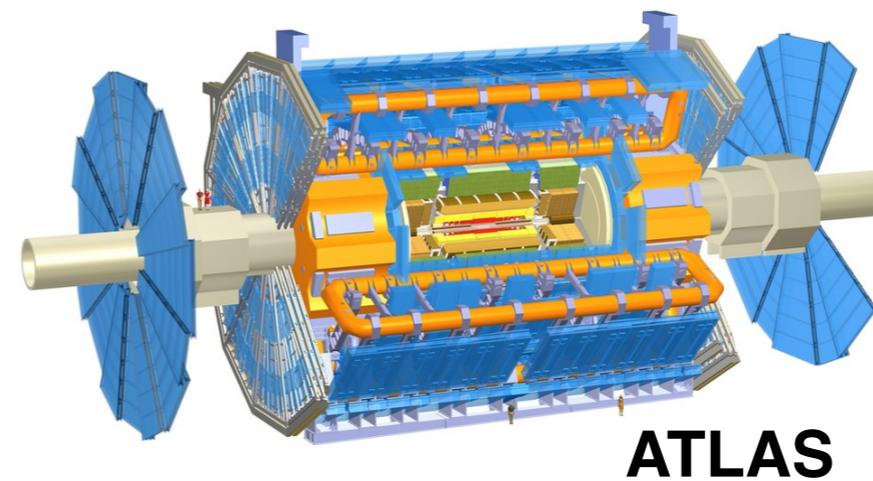
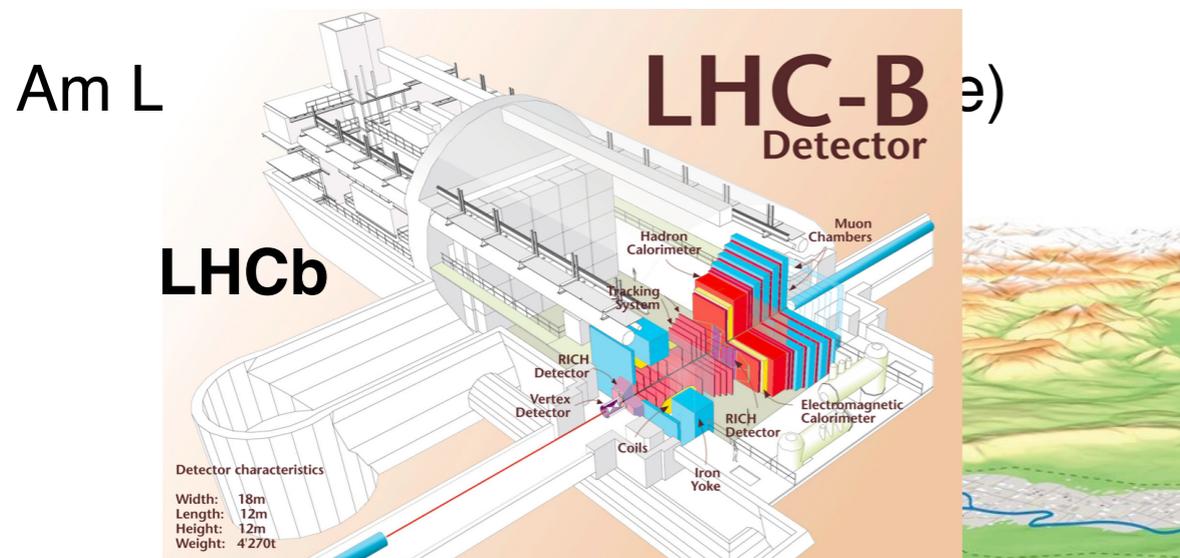
- **15 m** lang
- **30 t** schwer
- **supraleitend** (~100 t flüssiges Helium bei $T = 1.9 \text{ K}$)
--> **-271.25 °C** !
- Magnetfeld bis zu **8.33 T**
- **11 GJ (!!)** gespeicherte Energie

und es gibt **1232 Stück** davon!!



Detektoren

Um die vielen Teilchenkollisionen aufzuzeichnen brauchen wir riesige Detektoren





Messungen

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

Impuls (Vektorielle Grösse)

Energie

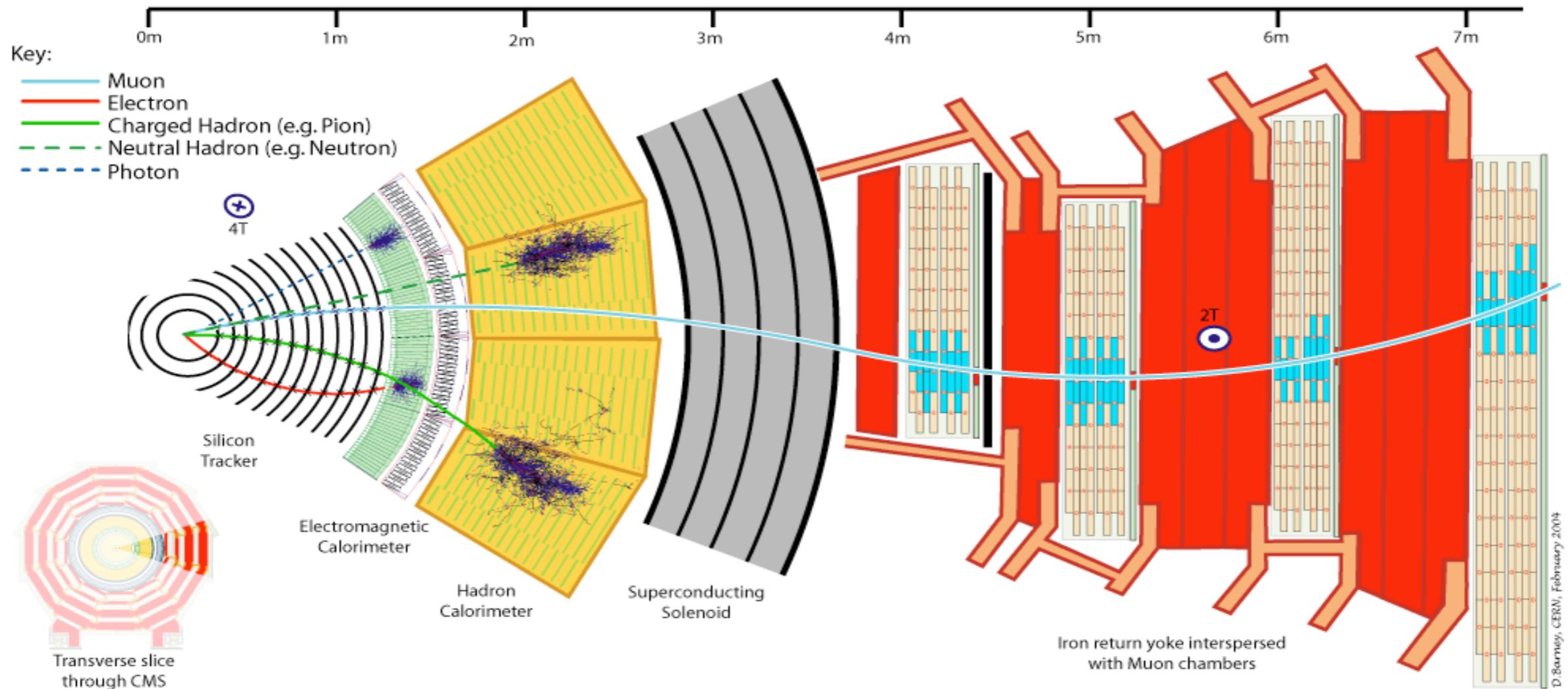
Daraus kann man auf die **Masse**, den **Typ**, die **Ladung** und die **Geschwindigkeit** schliessen!

Aufbau eines Teilchendetektors

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

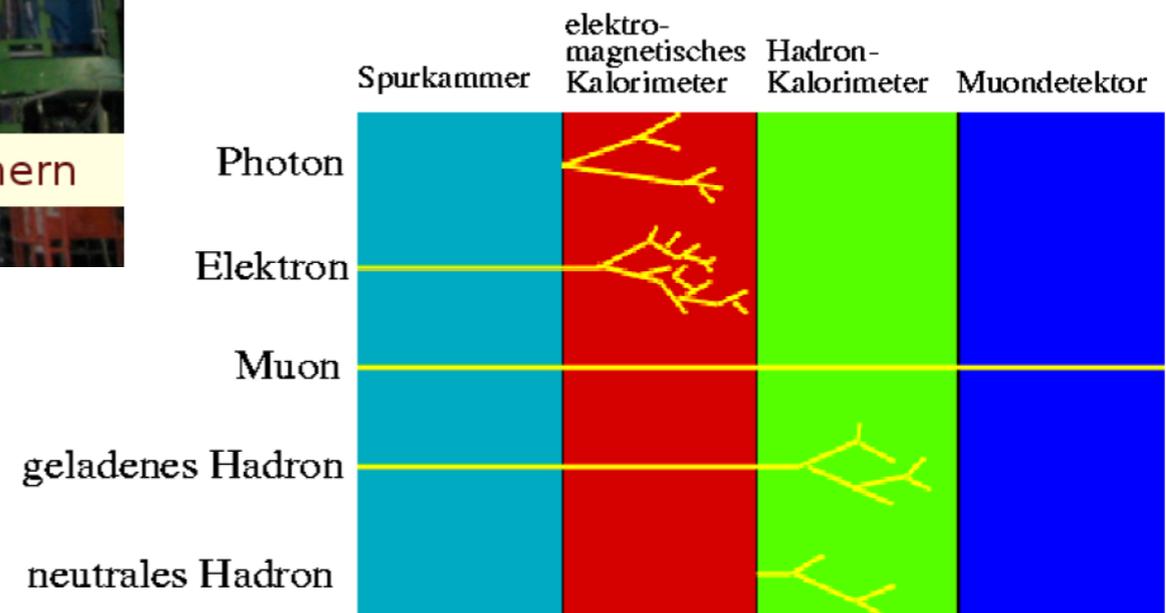
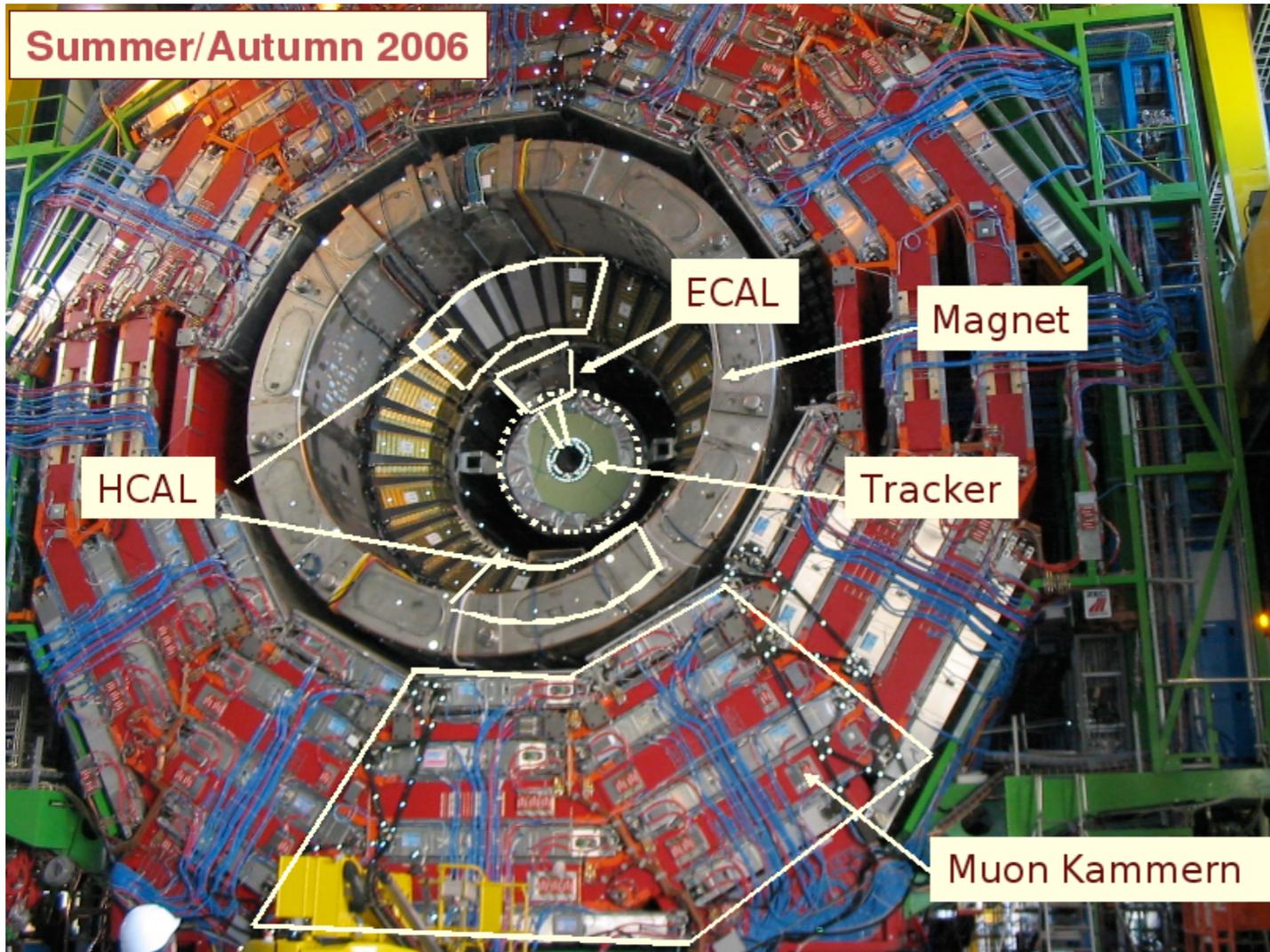
- **Pixel- & Streifendetektor** zur Spurenvermessung ← *Ort & Impulsinformation*
- verschiedene **Kalorimeter** zur Energiemessung ← *Energie*
- **Muonenkammern** zur präzisen Vermessung von Muonen ← *Ort & Impulsinformation*
- irgendwo dazwischen oder aussen: **starke Magnete(n)** zur Ablenkung geladener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

Schematischer Aufbau - CMS

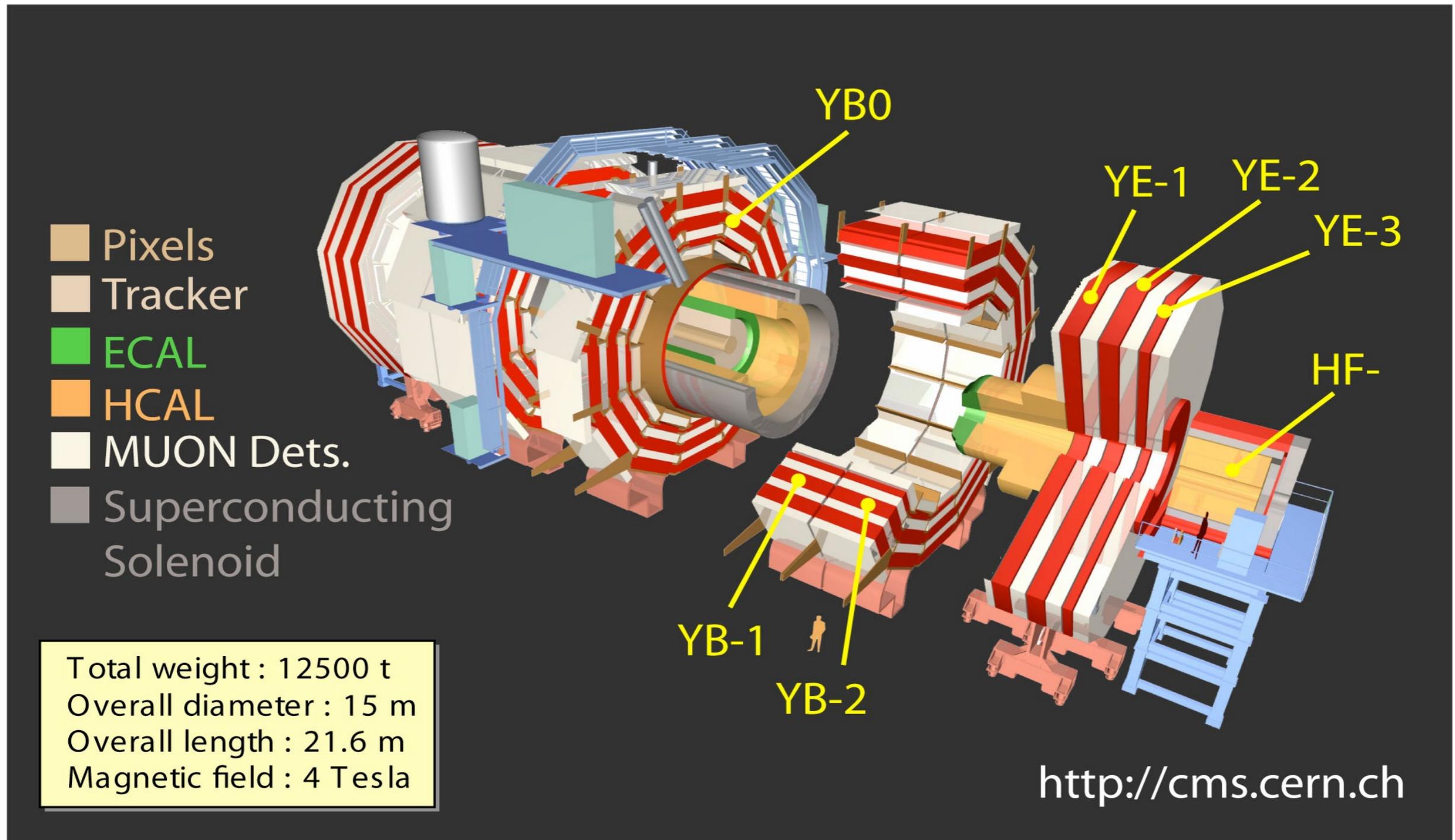


https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS_Slice_elab.swf

Schematischer Aufbau - CMS



Schematischer Aufbau - CMS

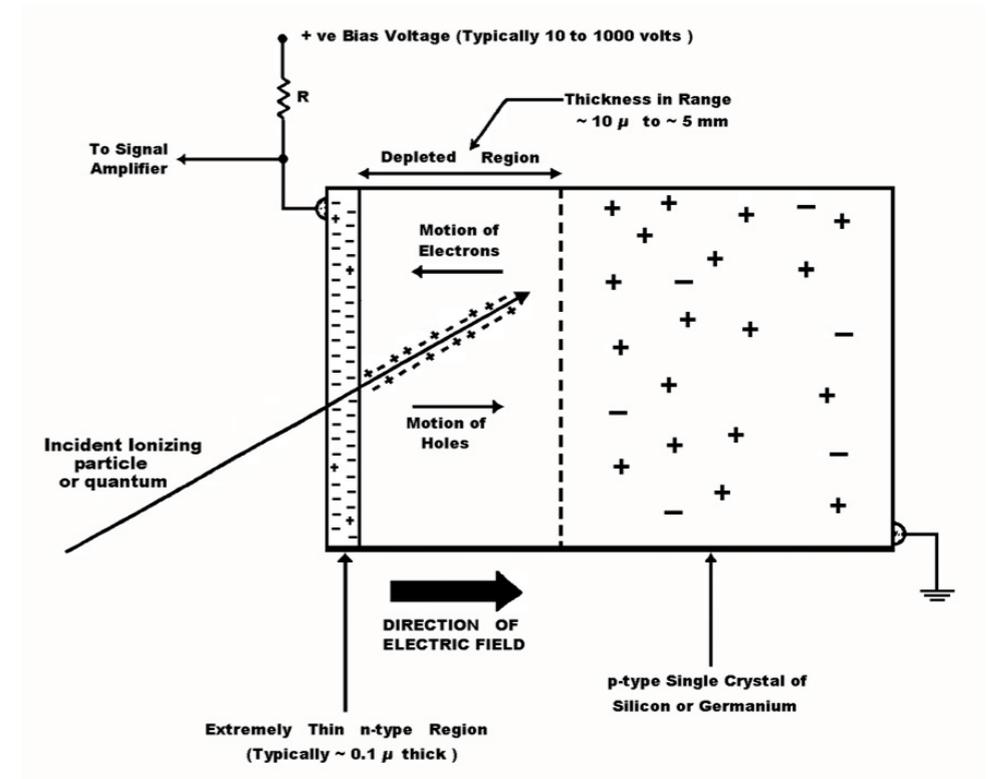


Spurendetektor - Prinzip

geladene Teilchen ionisieren Materie beim Durchfliegen

--> Ionisation: “trennen” von Elektronen und Atomkernen

Halbleiter (Silizium) eignen sich hervorragend zur Messung dieser Ladungen

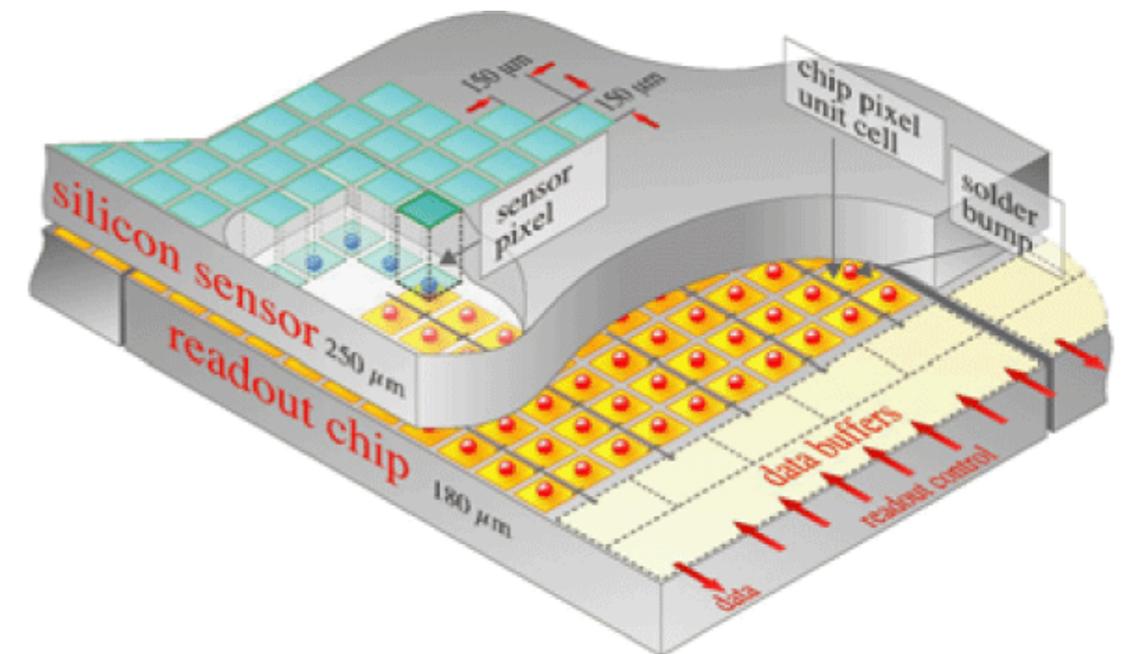


Funktionsprinzip sehr **ähnlich** dem **einer Digitalkamera**, aber...

Spurendetektor - Pixel

CMS Pixel Detektor hat:

- > **3 Lagen** bei 4.3, 7.2, 11 cm Abstand vom Strahl
- > **~1 m² aktive Fläche**
- > 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!!

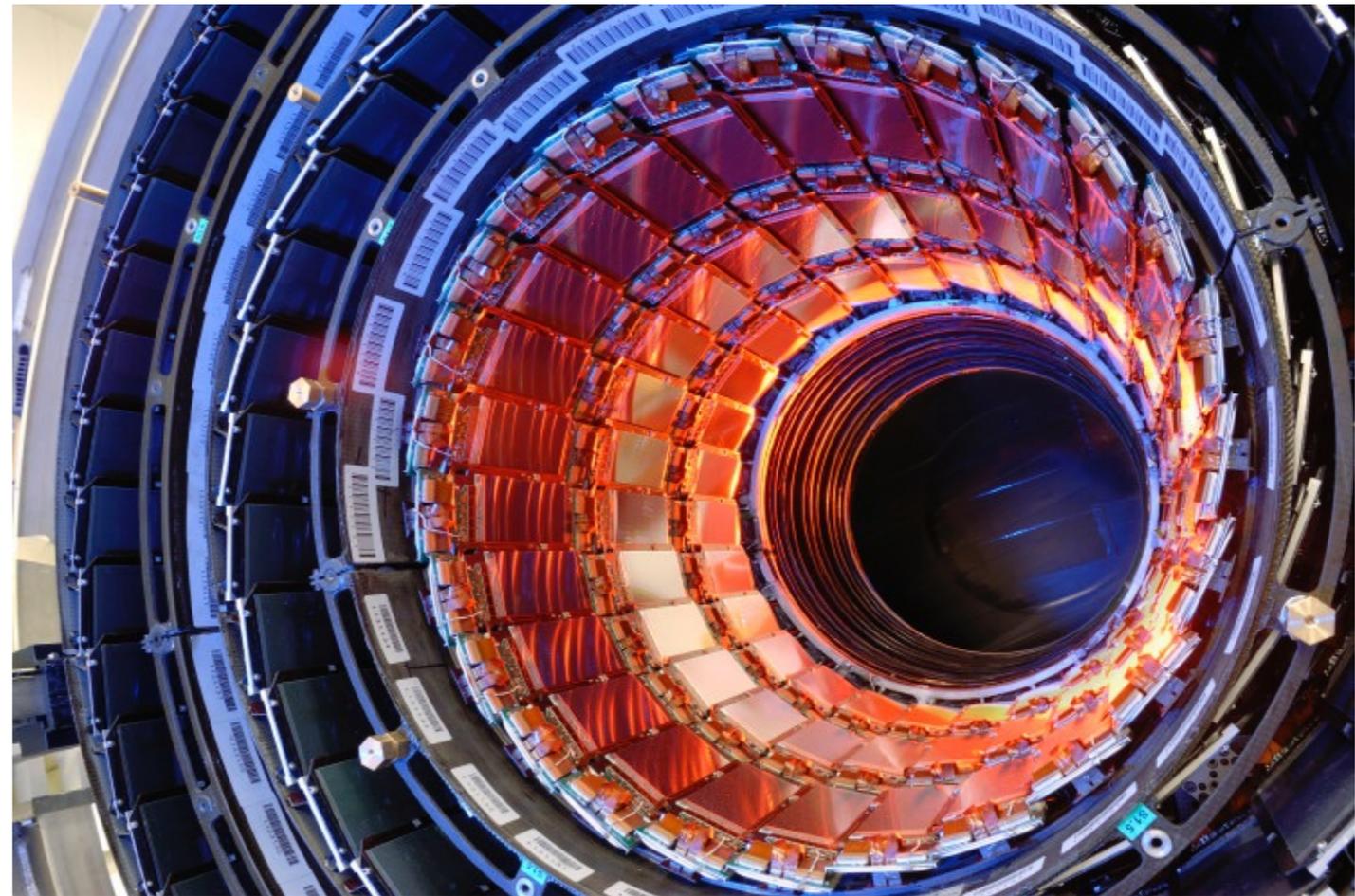
Spurendetektor - Streifen

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

--> **selbes physikalisches Prinzip**

--> lange, schmale Streifen

--> **$\sim 200 \text{ m}^2$ aktive Fläche**
ca. 1 Tennisfeld



Nachteil dieser Detektoren: neutrale Teilchen können nicht gemessen werden!

Kalorimeter

Kalorimeter messen die Energie der Teilchen.

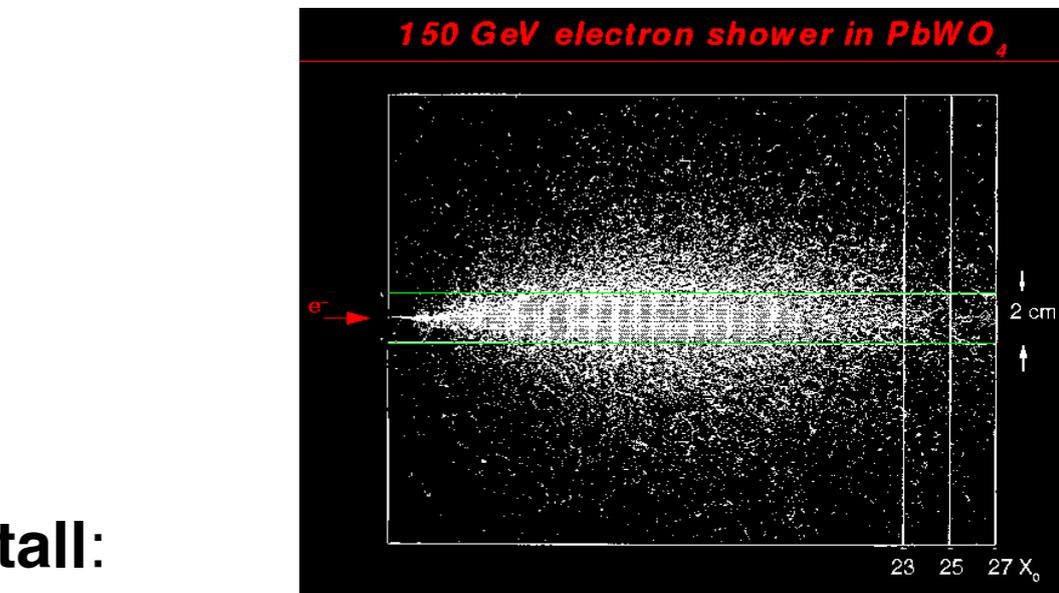
2 verschiedene Typen:

--> **elektromagnetisch**

--> **hadronisch**

Kalorimeter - Elektromagnetisch

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

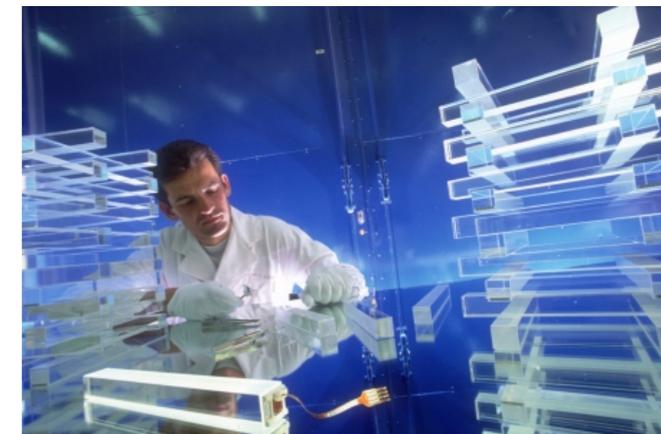


In CMS macht das ein sogenannter **Szintillatorkristall**:

--> 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 - Hadronisch

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

--> es muss etwas **Schwereres** her!

--> im HCAL werden u. a. **Protonen, Neutronen, Pionen, Kaonen** "absorbiert"



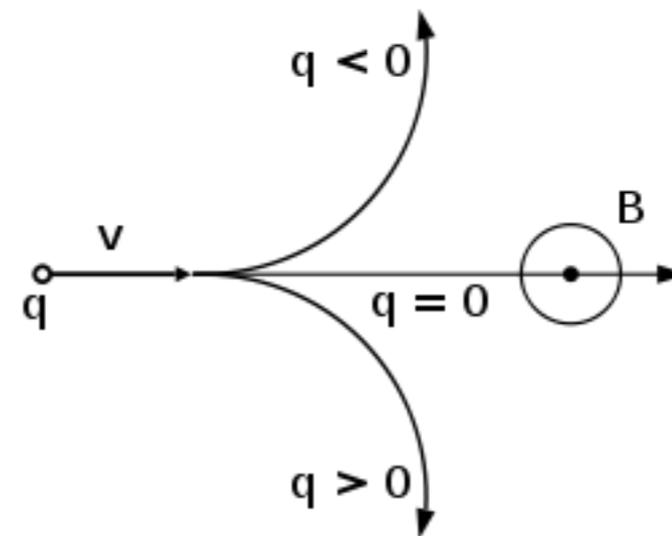
In CMS: ca. 10 x 5 cm **Messing** - 3 cm **Szintillator Schichten**

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 Lorentzkraft:

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



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:

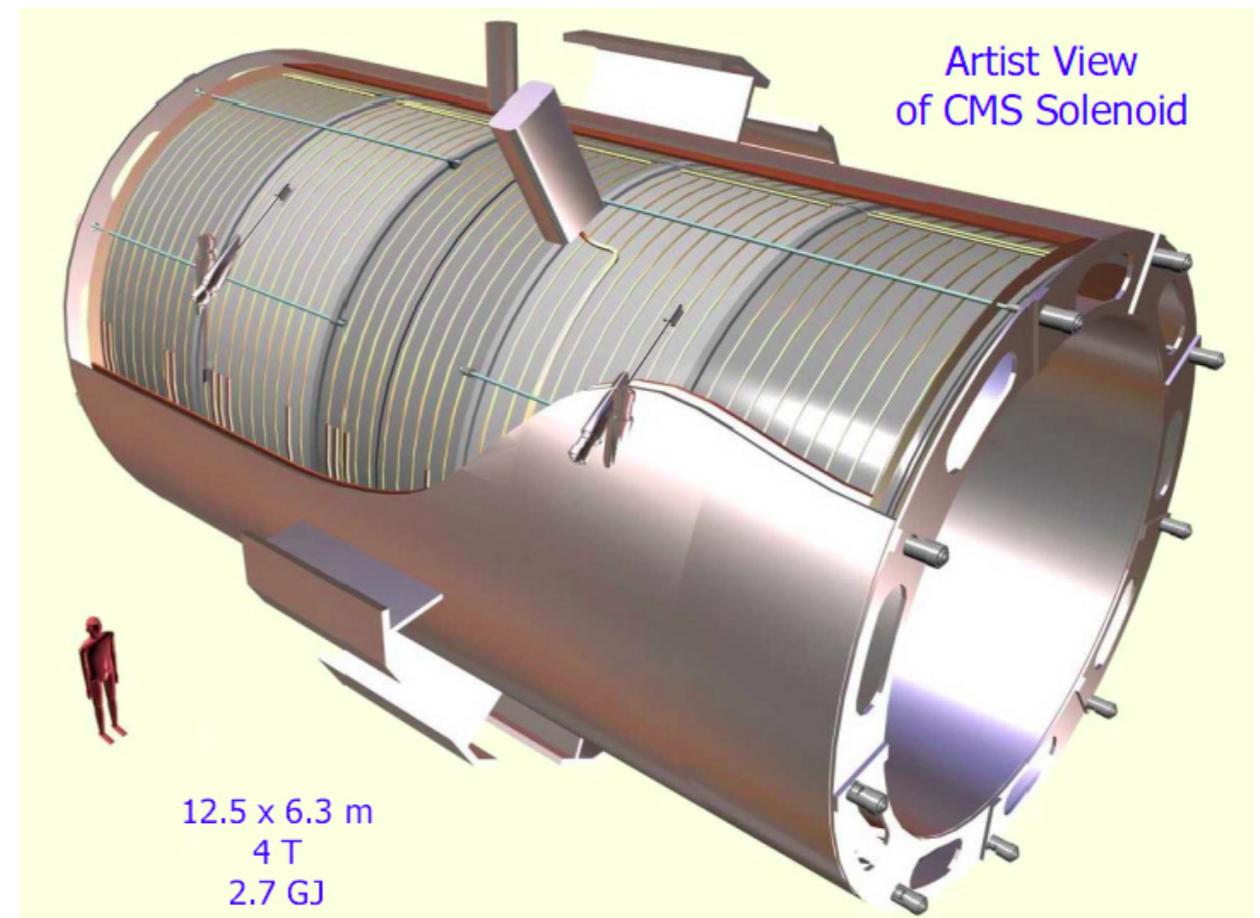
--> **~6 m Durchmesser!**

--> **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!

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!**



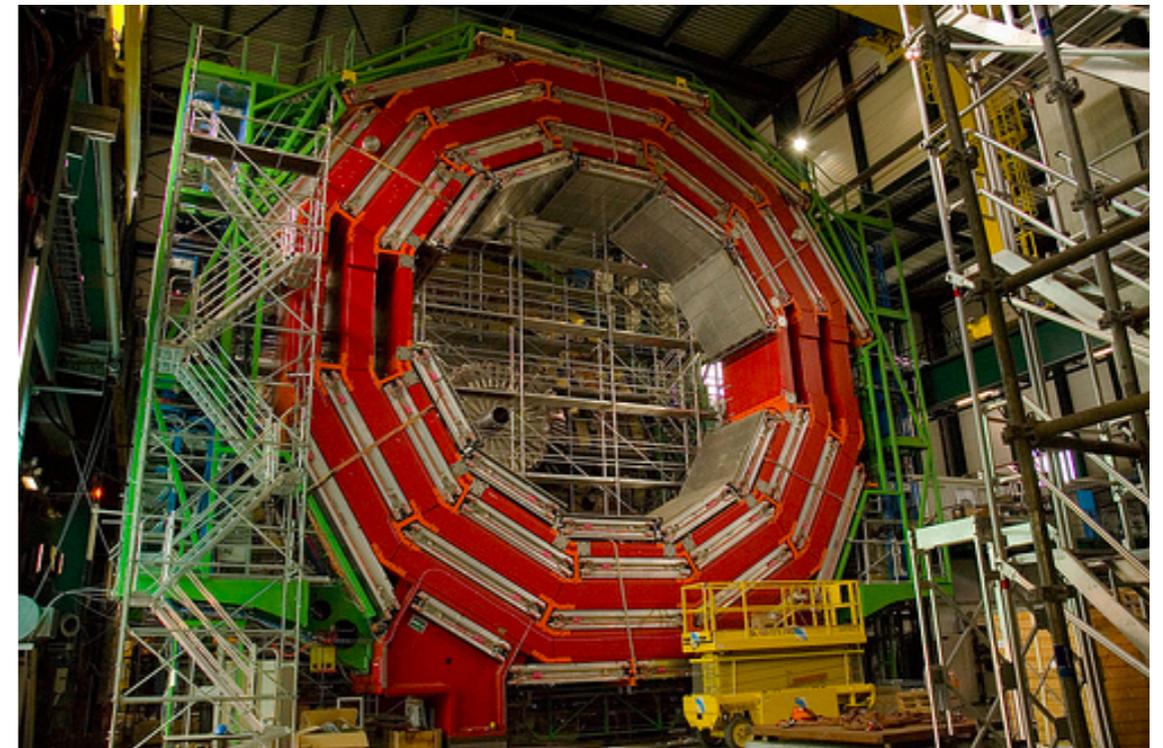
Muonkammern

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

--> nach dem Magneten die letzten messbaren Teilchen (idealerweise)

--> werden präzise in Muonkammern gemessen

--> innerhalb des Rückführjochs



Neutrinos

Neutrinos interagieren noch sehr viel weniger mit Materie

--> im Detektor nicht nachweisbar!

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

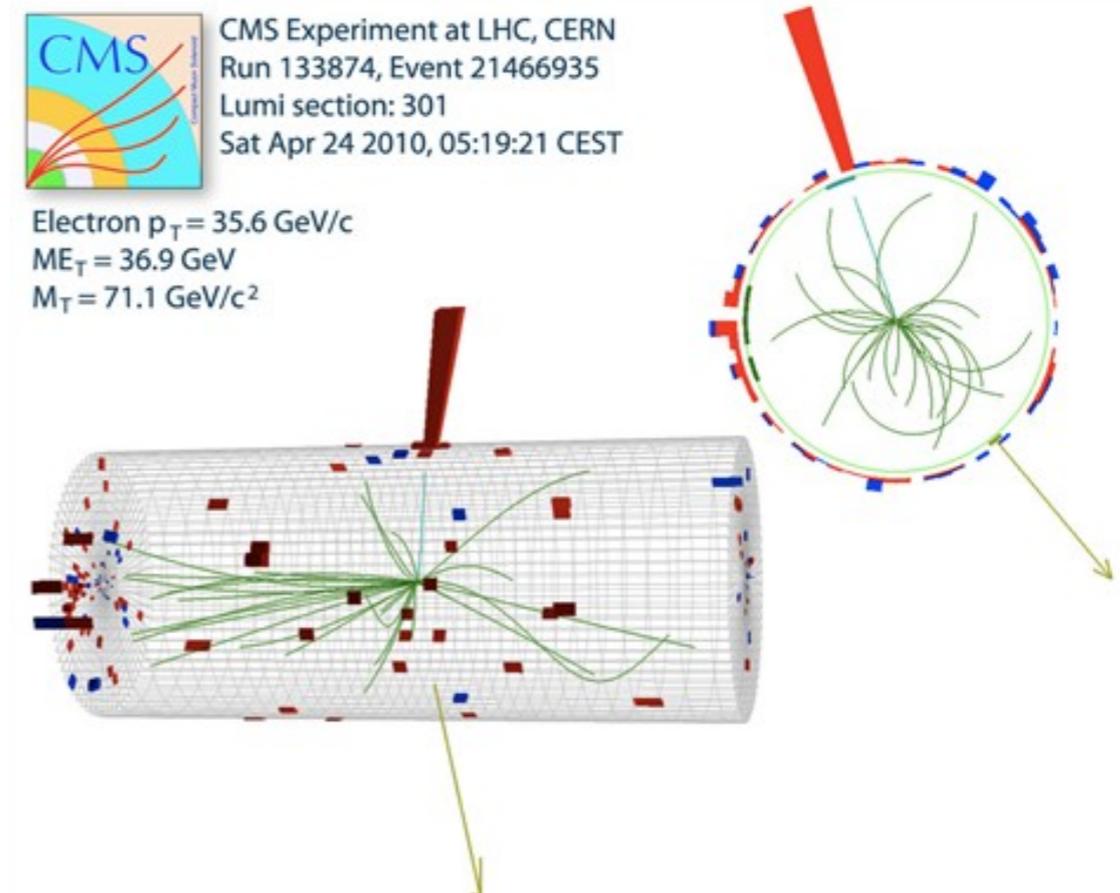
In der Ebene normal zur Strahlrichtung
ist der Anfangsimpuls gleich null!

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**

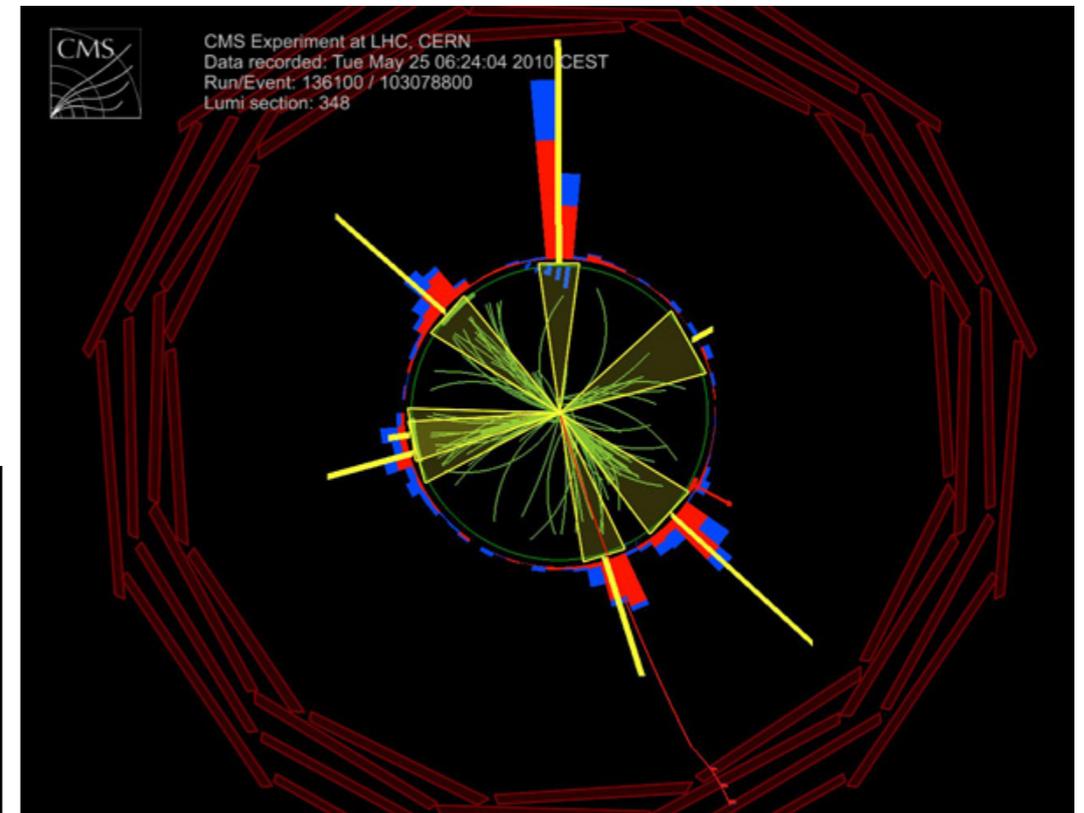
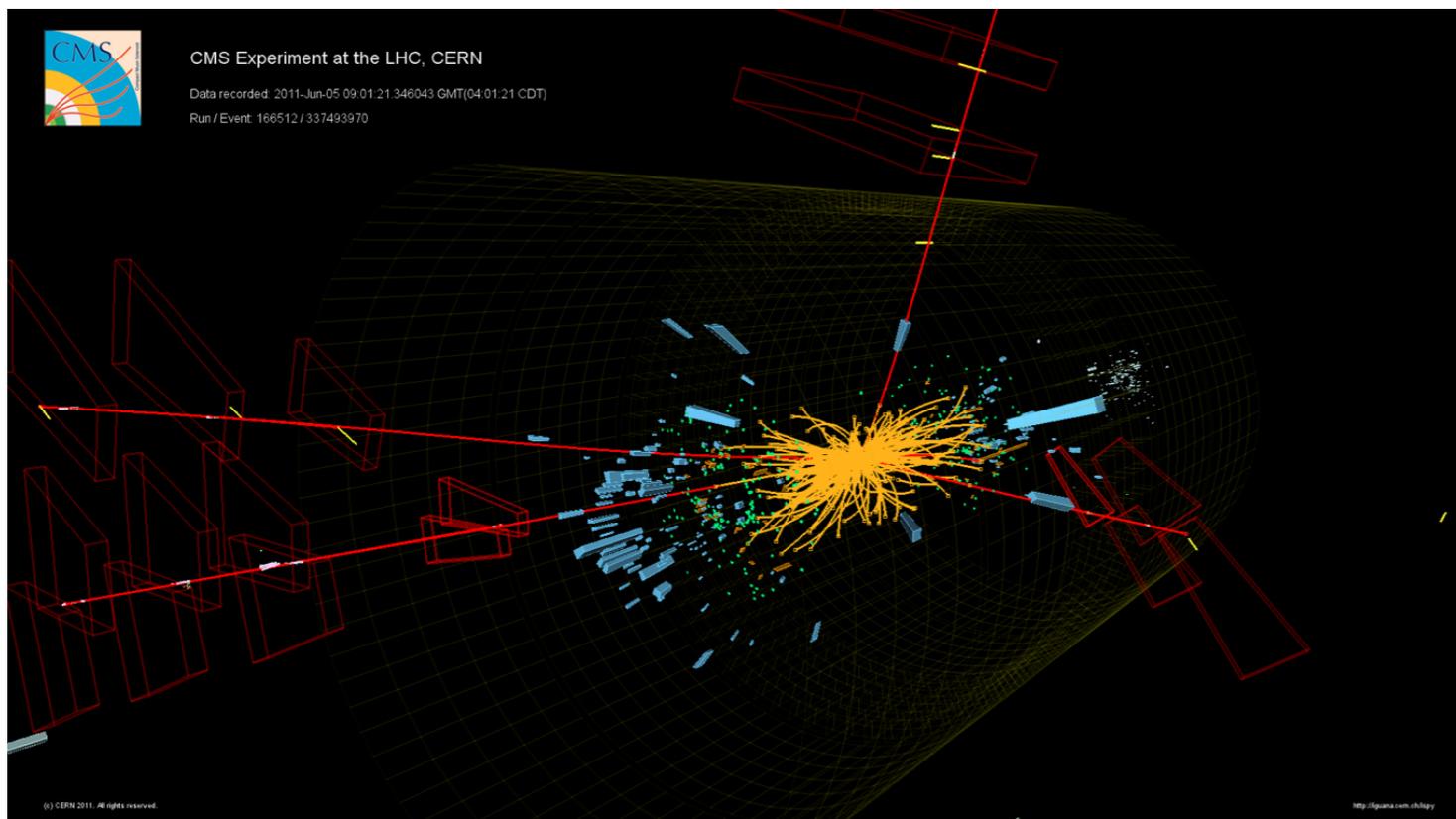
--> am Ende werden **“nur” ca. 500 - 1000 Kollisionen pro Sekunde gespeichert**

--> **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

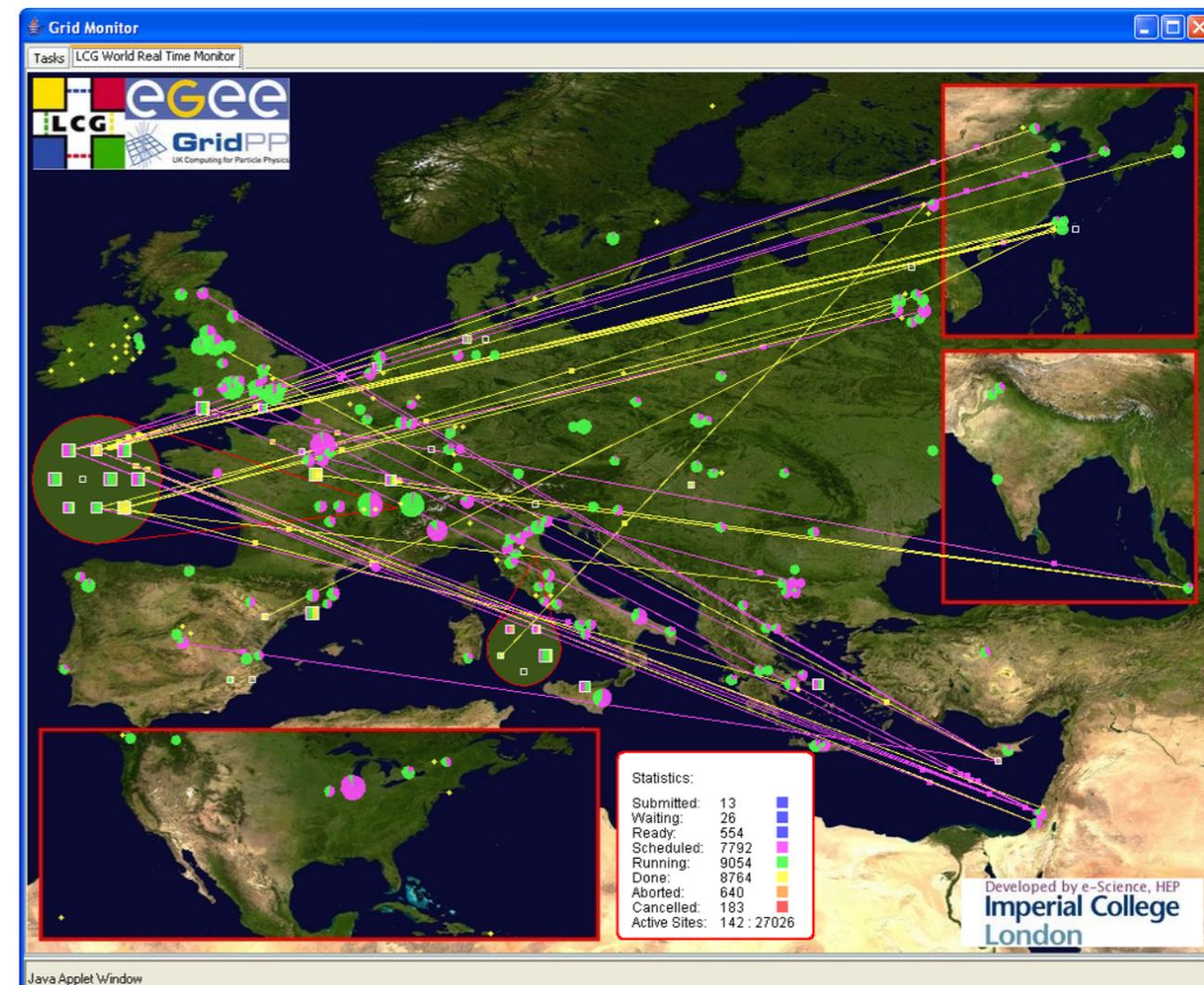
- > sehr komplizierte Software
- > aber hübsche Bilder ;)



Analyse

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

- unmöglich alle “bei 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

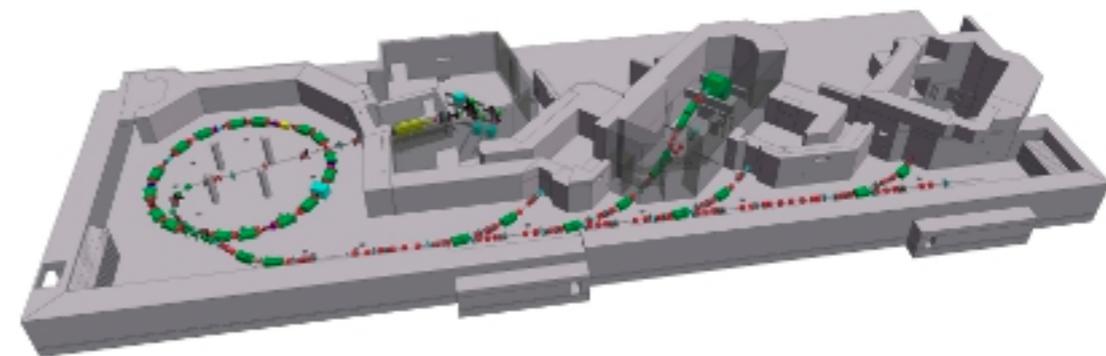
- das **WWW** wurde von Tim Berners-Lee & co. 1990 am CERN erfunden

- 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**

