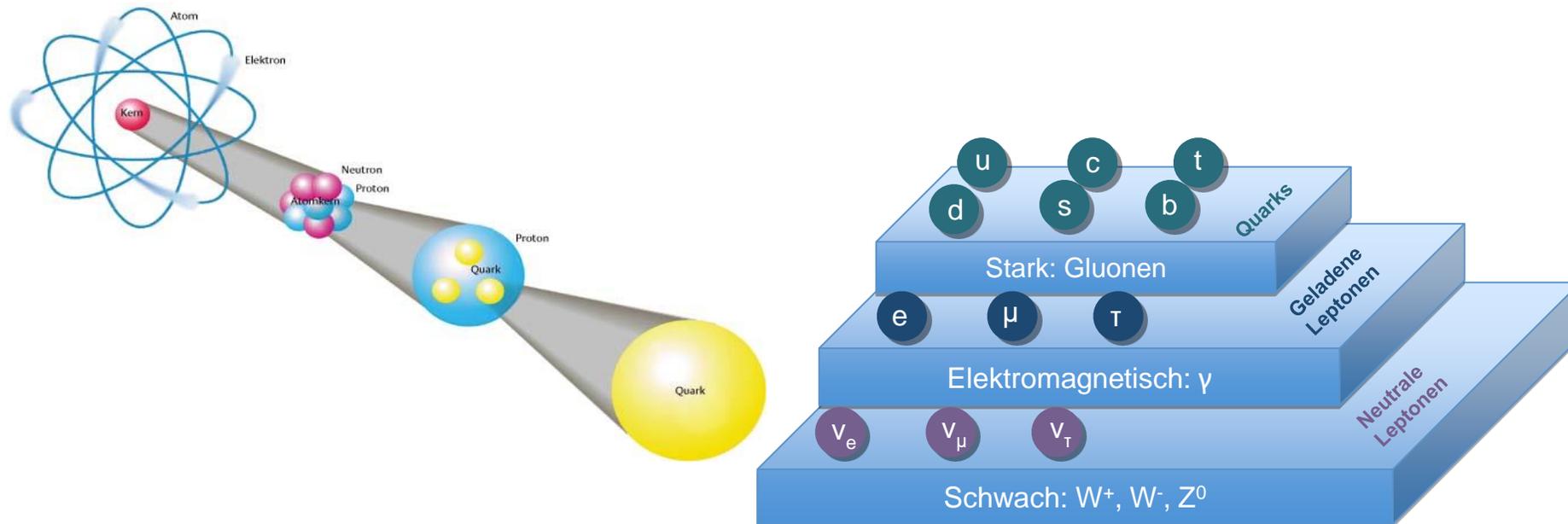


# Beschleuniger und Detektoren

Particle Physics Masterclass 2022  
Pascal Bärtschi

# Wozu Teilchenbeschleuniger?

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



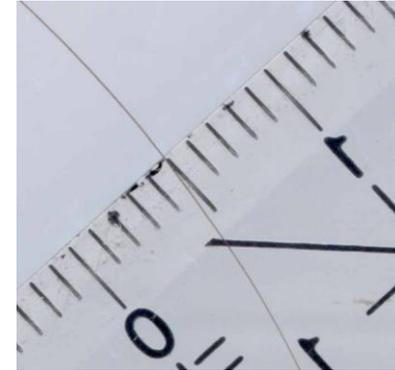
... nur wie?

# Beobachtung kleiner Objekte

**Auge:**

Auflösung ~ 0.1 mm

$10^{-4}$  m



**Lichtmikroskop:**

~ 0.2  $\mu$ m



$10^{-7}$  m

**Elektronenmikroskop:**

~ 1 nm

$10^{-9}$  m

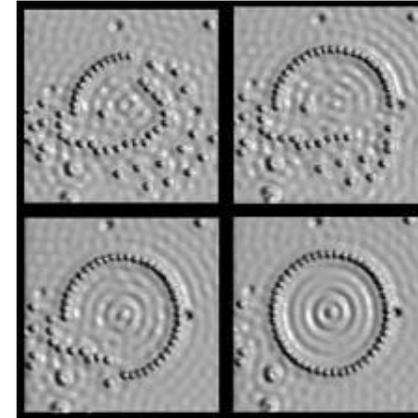


# Beobachtung noch kleinerer Objekte

**Rastertunnelmikroskop:**

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

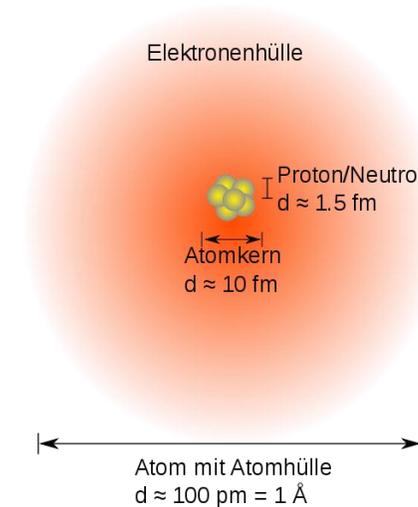
$10^{-11}$  m



**ABER:**

Durchmesser eines Atomkerns

$\sim 10^{-15}$  m



... was kann man tun?

# Beobachtung kleinster Objekte

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

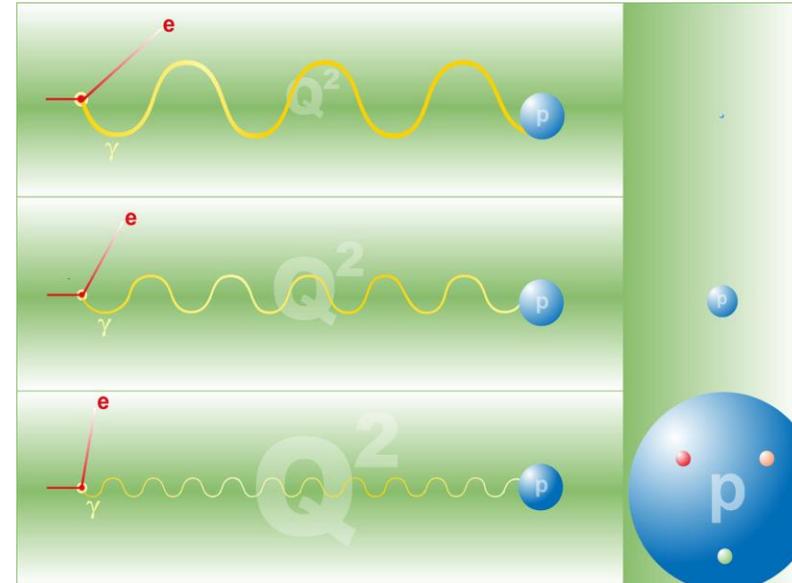
de Broglie:

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

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

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

**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  $1.602 \times 10^{-19}$  C (Elektron oder Proton) beim Durchgang einer Potentialdifferenz von 1 Volt erhält**

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

# 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**

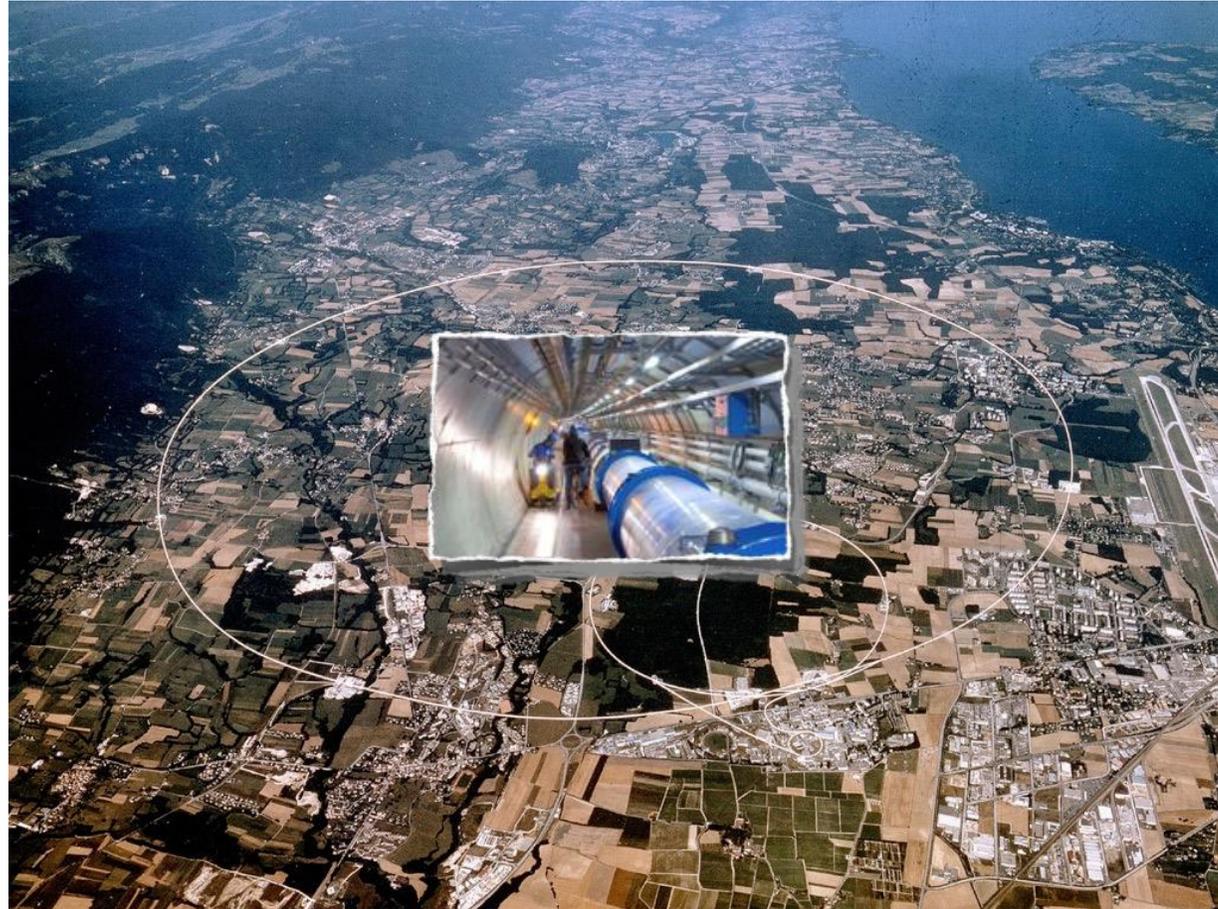
→ riesiger Beschleuniger  
am CERN nahe Genf

→ **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

# Aufbau von Beschleunigern

Was benötigt man zur Beschleunigung von Teilchen?

## 1) Teilchen

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

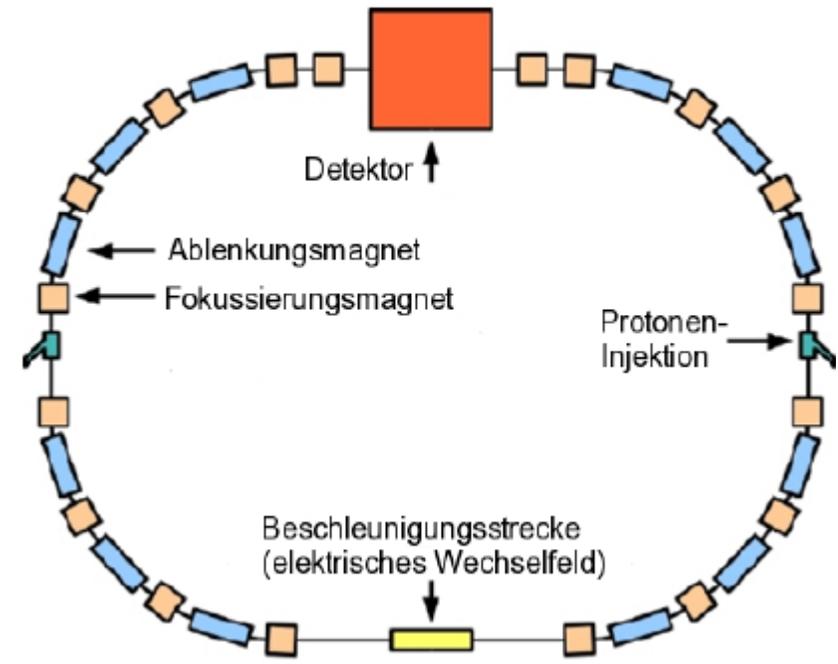
## 2) Beschleunigungsstrecken

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

## 3) Magnete

→ Magnete zum Fokussieren der Strahlen

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



# 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!



# 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!**

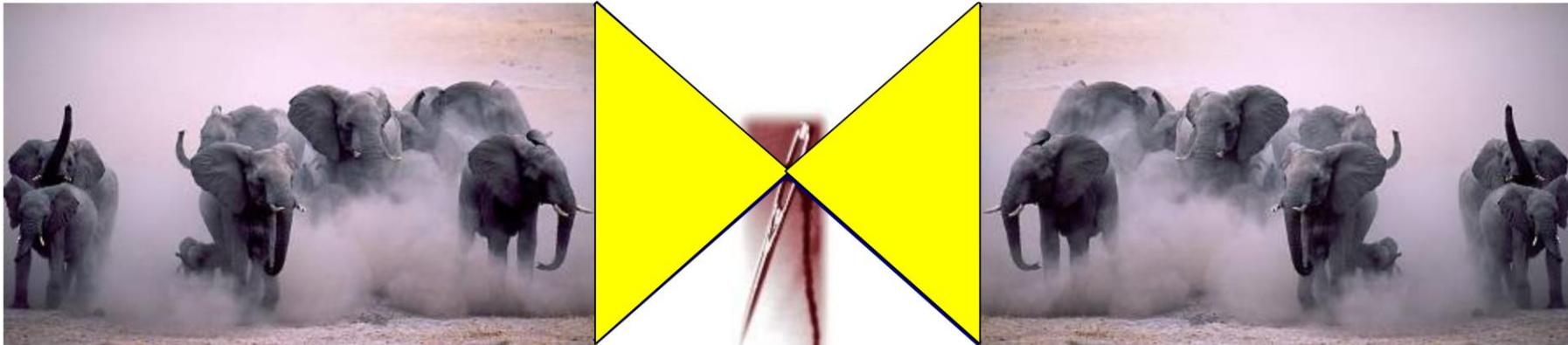
**Alle 25 ns (!)** treffen sich 2 Pakete bei den Experimenten!

→ 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**

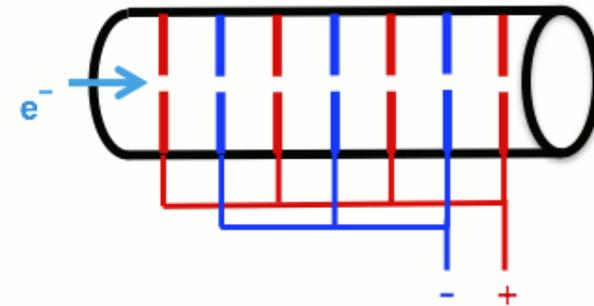
→ **Gleichspannung:**

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:

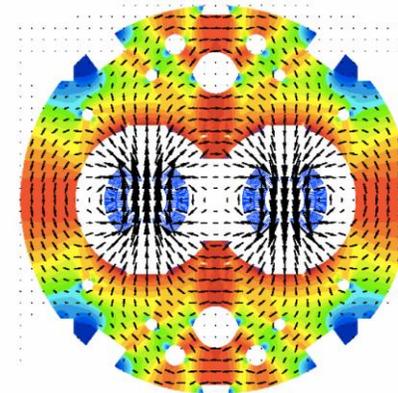
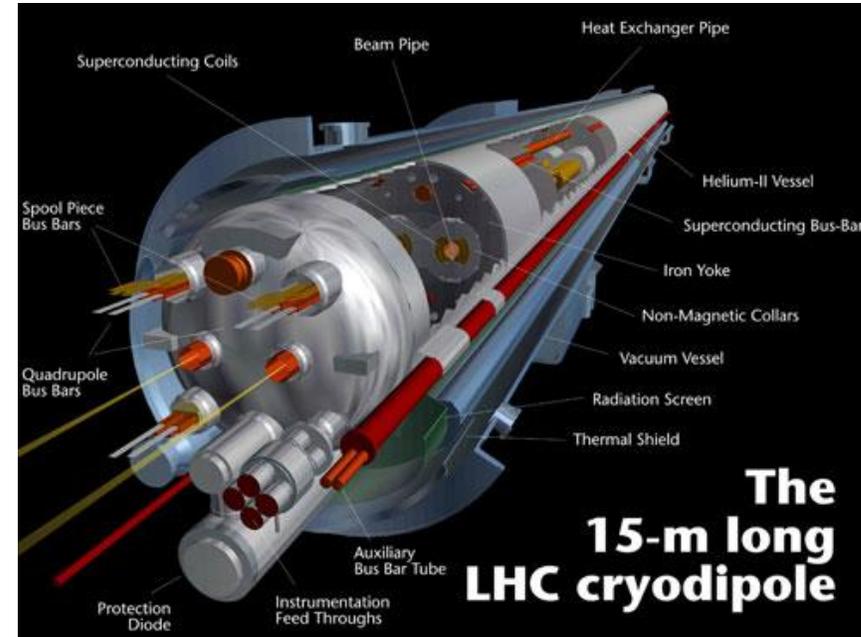
klingt einfach, ist es aber nicht!

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**

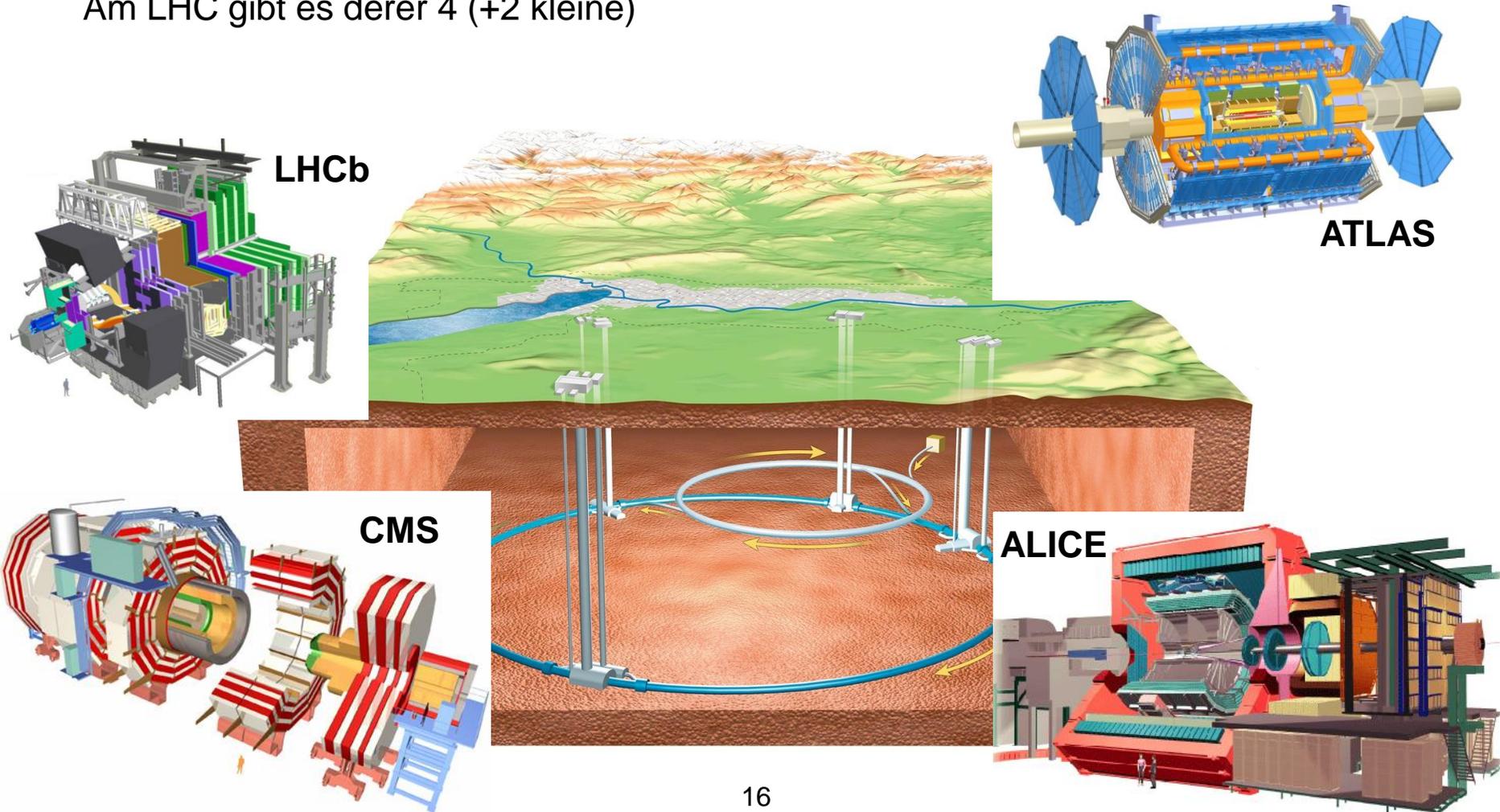


CERN



# 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**

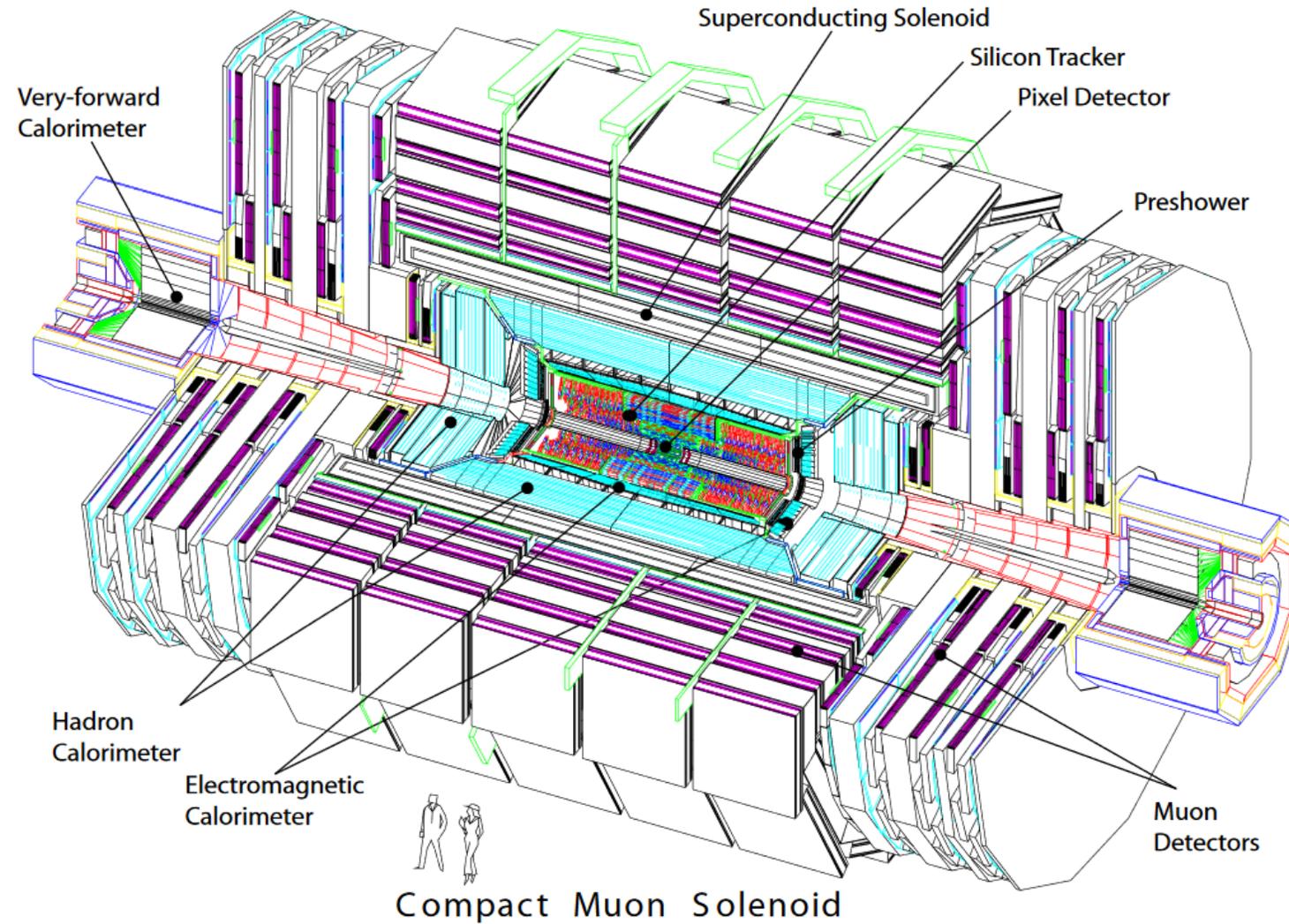
Daraus kann man auf die **Masse**, den **Typ**, die **Ladung** und die **Geschwindigkeit** schliessen!

# Aufbau eines Teilchendetektors

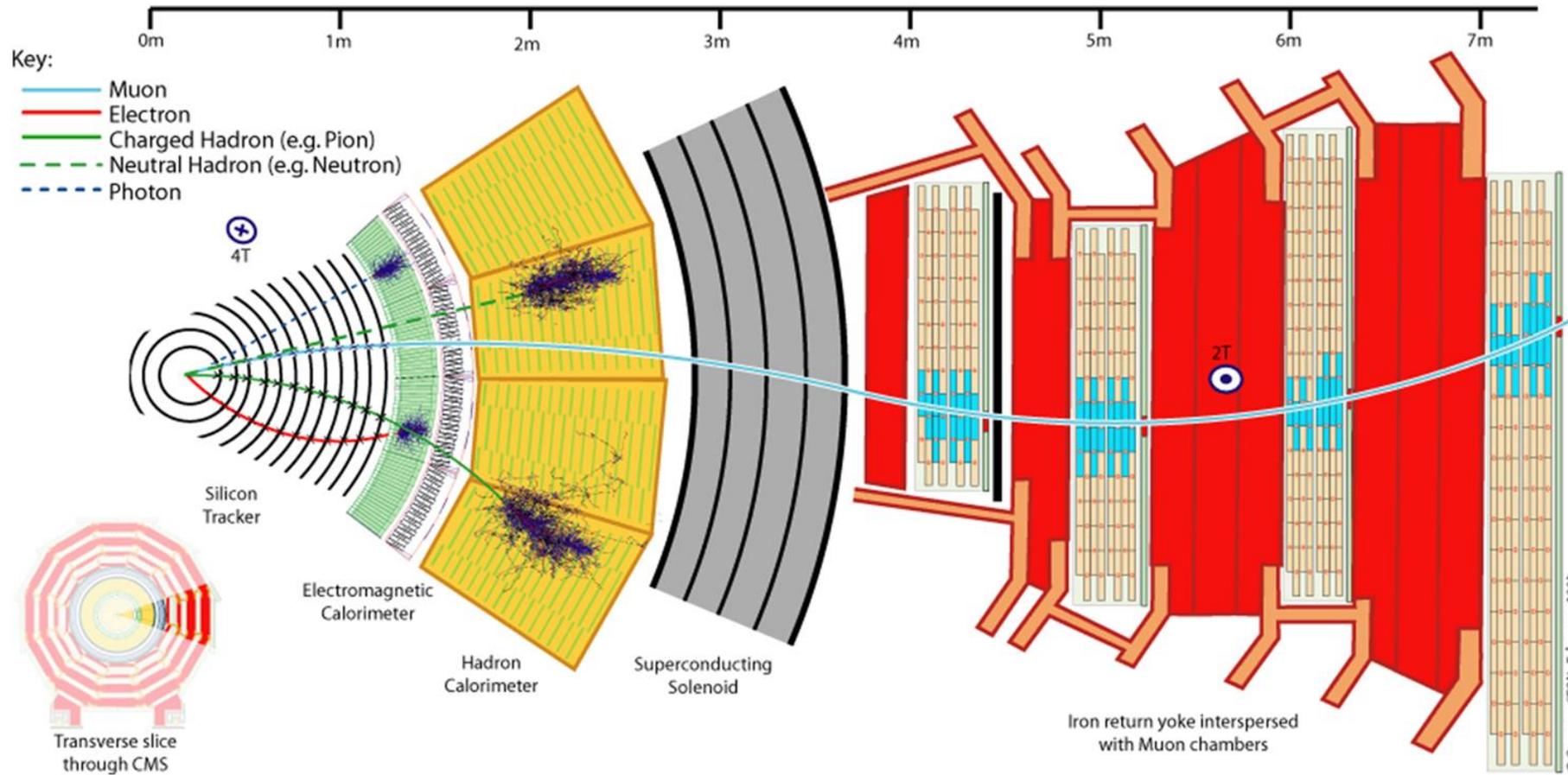
Mit sehr wenigen Ausnahmen, haben grosse Teilchenexperimente immer denselben zwiebelförmigen Aufbau (von innen nach aussen):

- **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 (Compact Muon Solenoid)



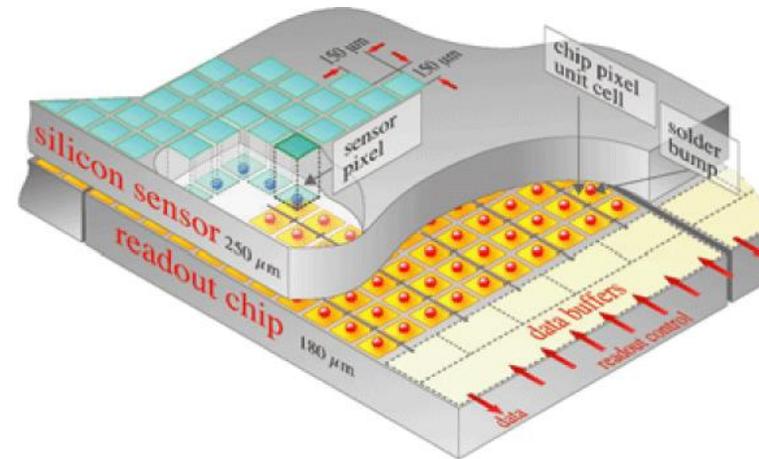
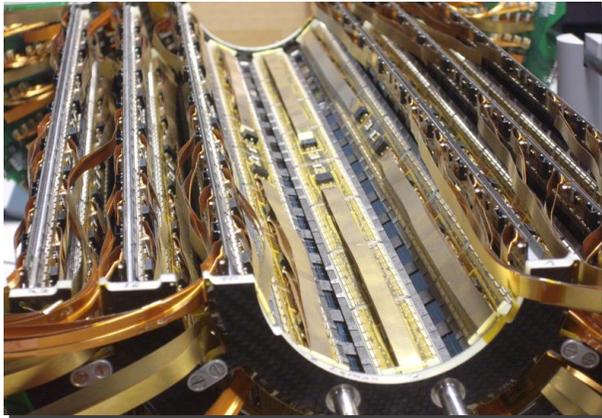
# Schematischer Aufbau - CMS



# Spurendetektor - Pixel

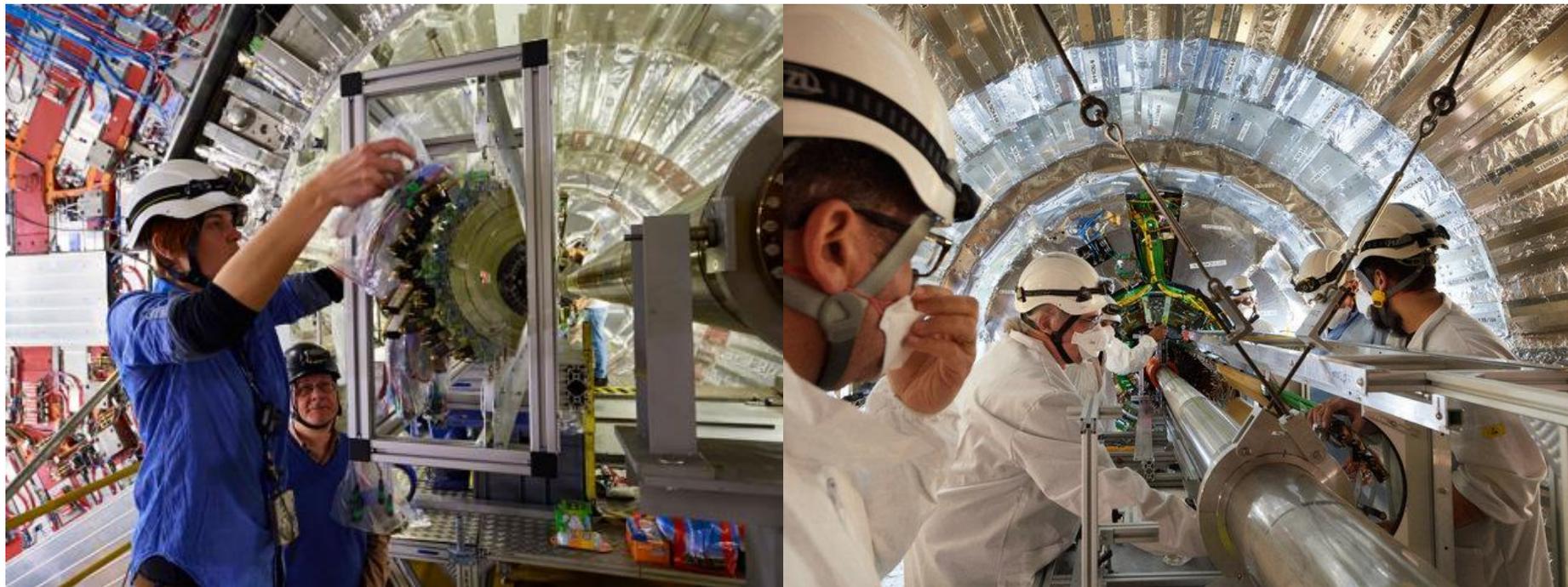
CMS Pixel Detektor hat:

- 4 Lagen bei 2.9, 6.8, 10.9, 16 cm Abstand vom Strahl
- Teilchen erzeugen durch Ionisation Elektron-Loch Paare im Silizium Sensor
- Pixelgrösse von **100 x 150  $\mu\text{m}^2$**
- 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

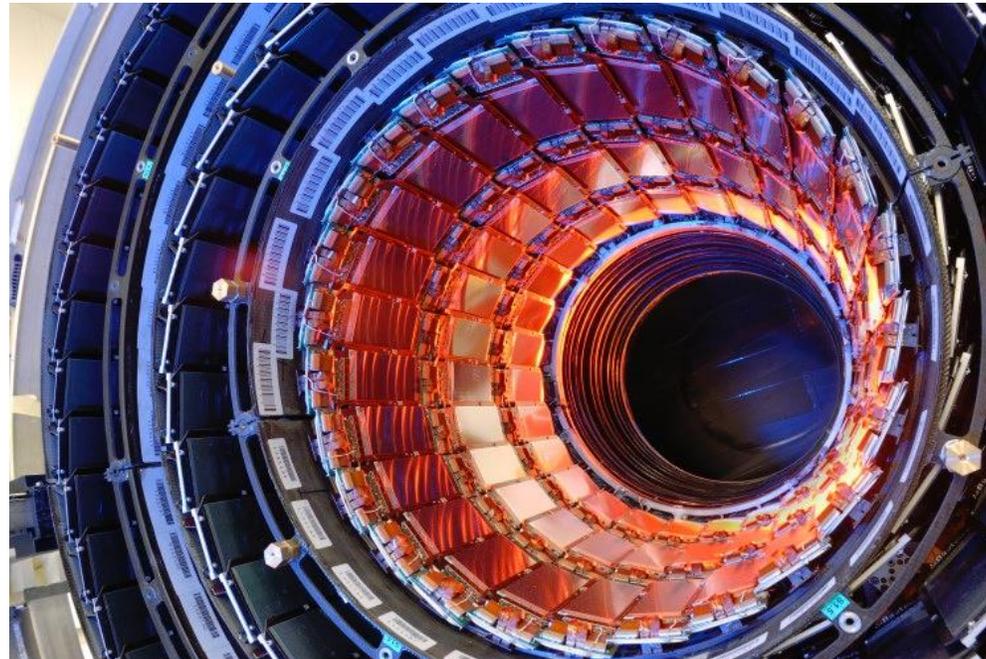
Um Auslesekanäle zu sparen, sind die nächsten ~10 Lagen keine Pixel, sondern sogenannte Siliziumstreifendetektoren

→ **selbes physikalisches Prinzip**

→ lange, schmale Streifen

→ **80  $\mu\text{m}$  breit**

→ **~200 m<sup>2</sup> aktive Fläche**  
**ca. 1 Tennisfeld**



**Nachteil dieser Detektoren: neutrale Teilchen können nicht gemessen werden!**

# 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** ist **proportional** zur deponierten **Energie**

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

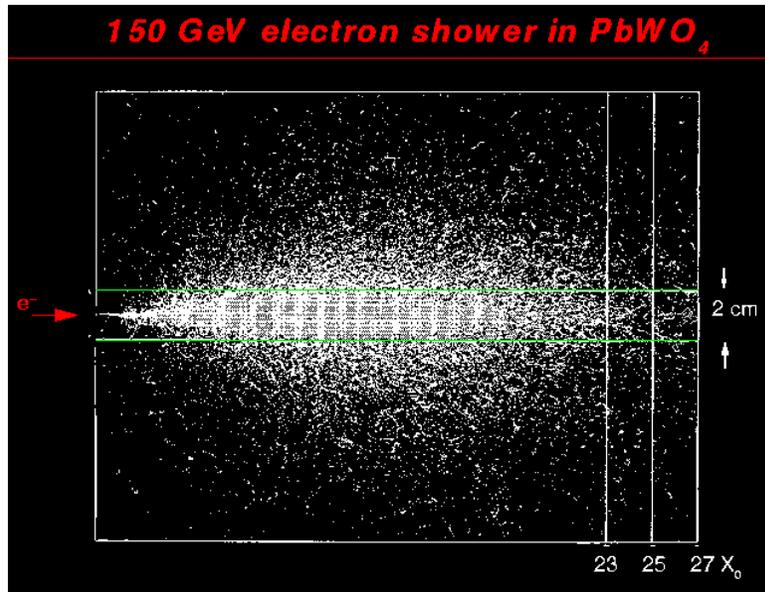
# Kalorimeter - Elektromagnetisch

Kristall:

**Bleiwolframat ( $\text{PbWO}_4$ )**

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

$\sim 80\%$  Metall - transparent!



Gewicht  $\sim 25$  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”

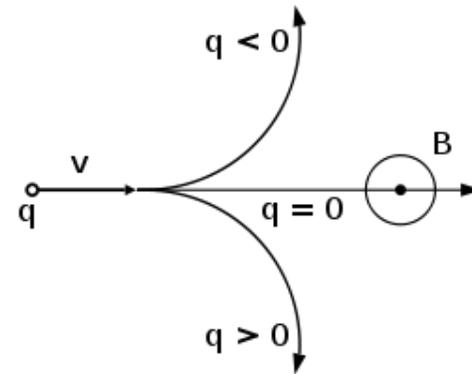


# Supraleitender Magnet

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:

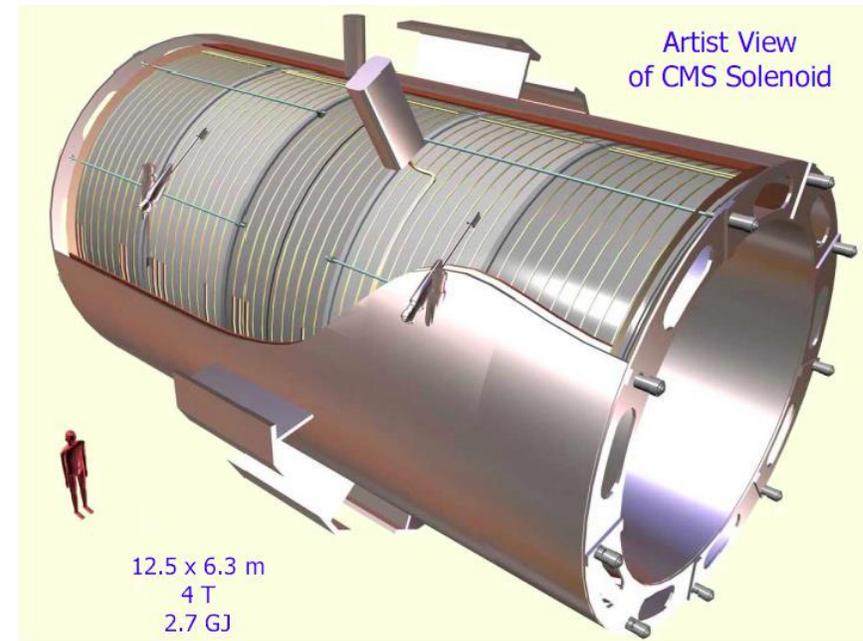
→ **~6 m Durchmesser!**

→ **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!**

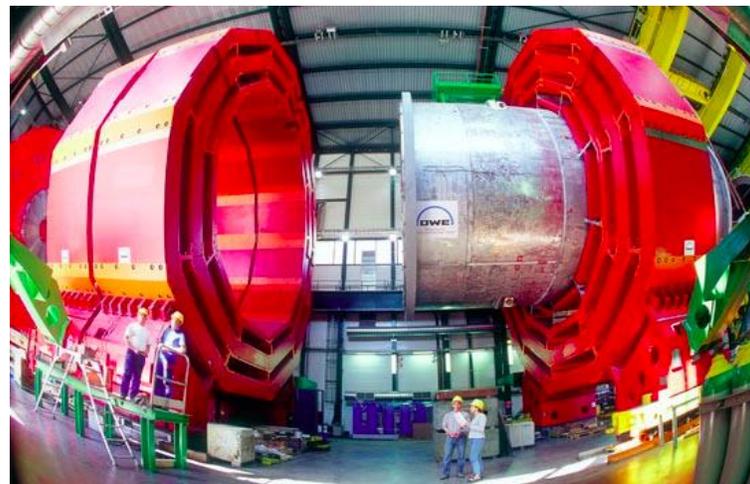
# Rückführjoch

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!**



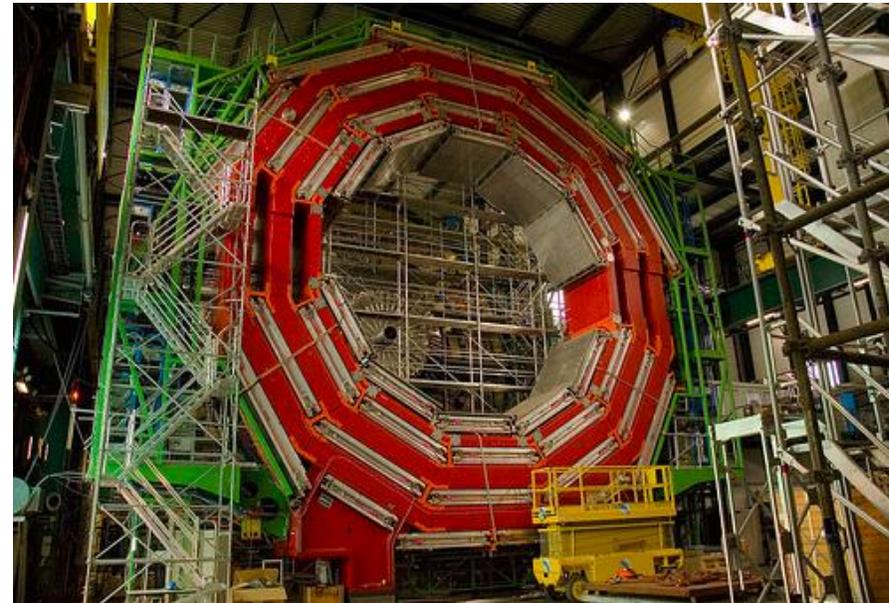
# Myonkammern

**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!

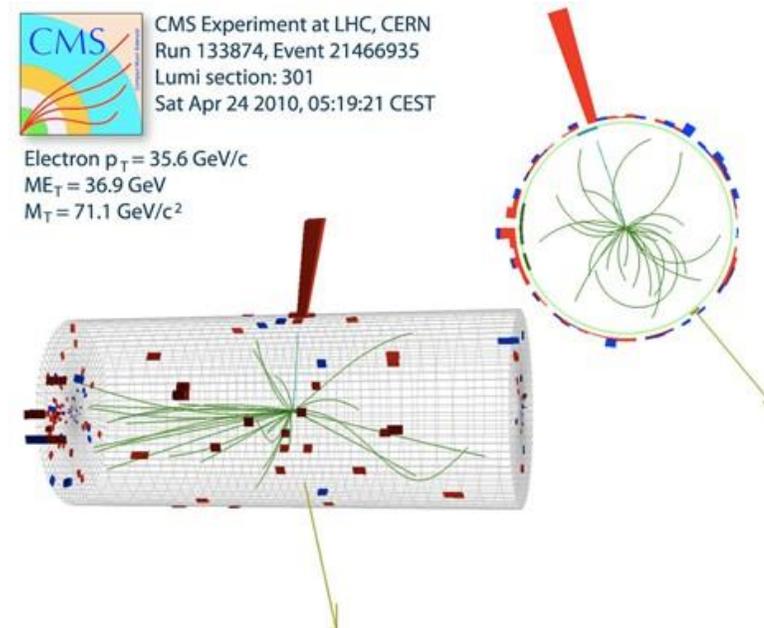
In der Ebene normal zur Strahlrichtung  
ist der Anfangsimpuls gleich null!

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

→ durch dieses Prinzip kann man

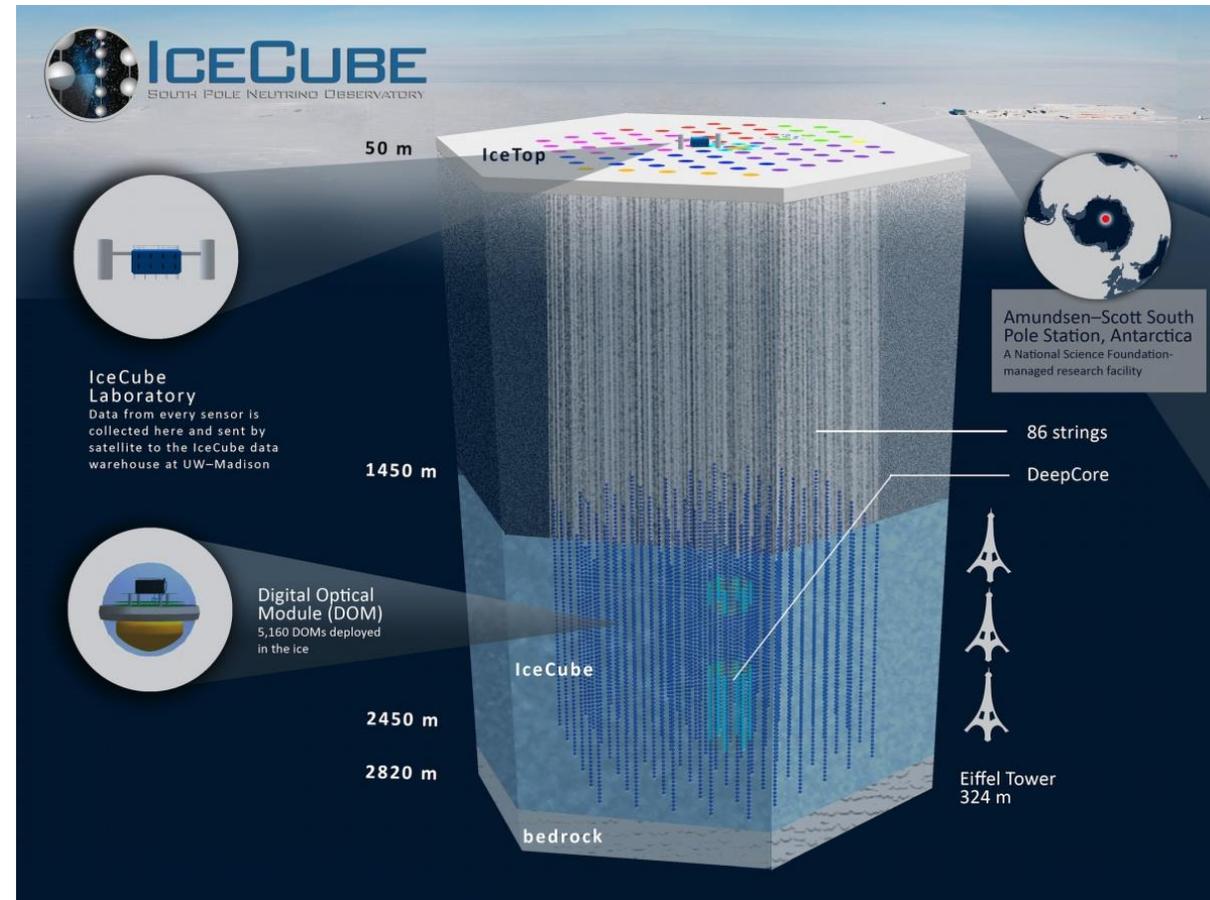
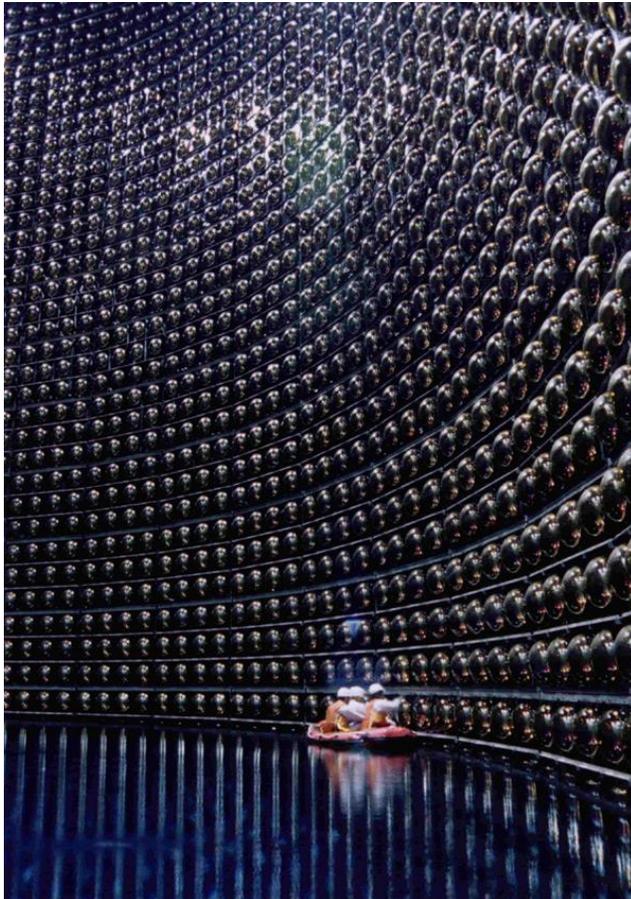
**1) Neutrinos indirekt nachweisen**

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



# Neutrino Detektoren

- sehr gross
- gut abgeschirmt: Bergwerk, Meer, Eis
- Rate: ein paar tausend Ereignisse pro Jahr



# 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

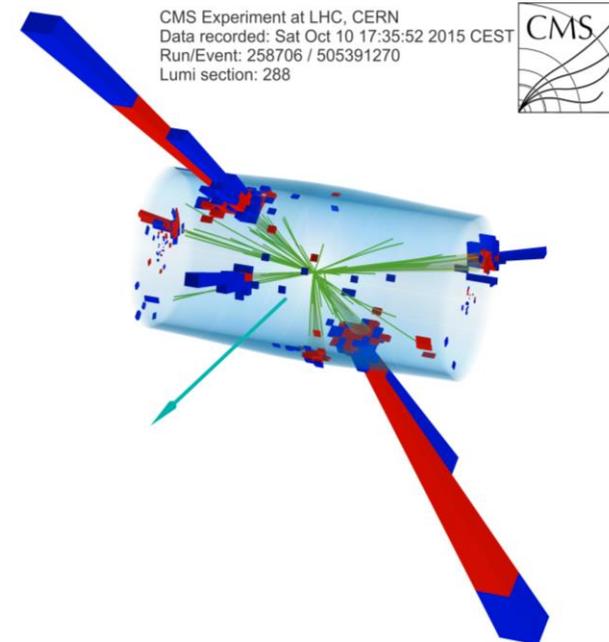
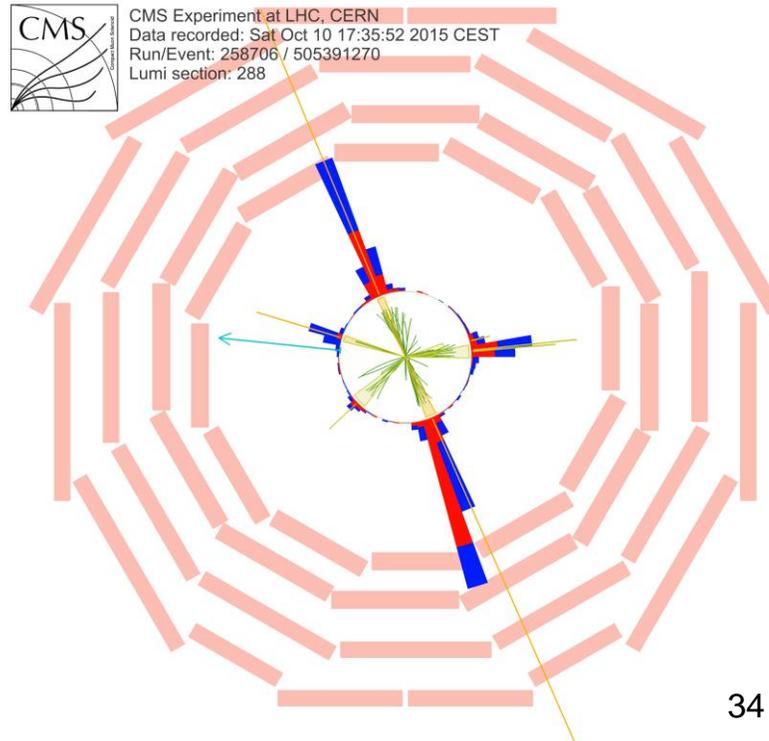
→ bei ca. 1-2 MB pro “Event” macht das trotzdem ca. 1 GB pro Sekunde!

# 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



*ENDE*

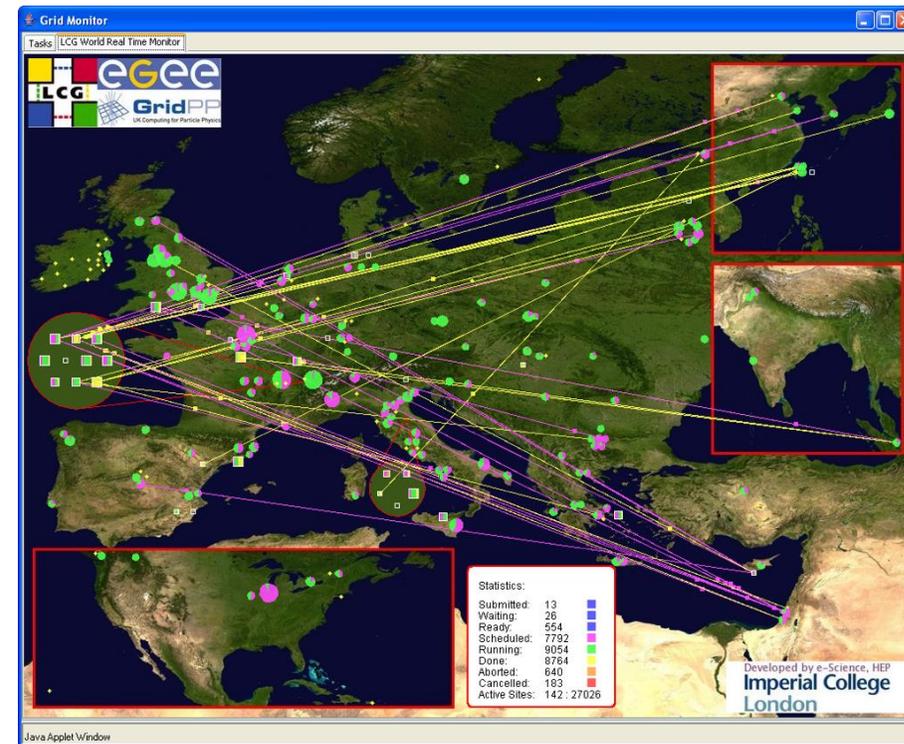


*Fragen?*

# 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

