

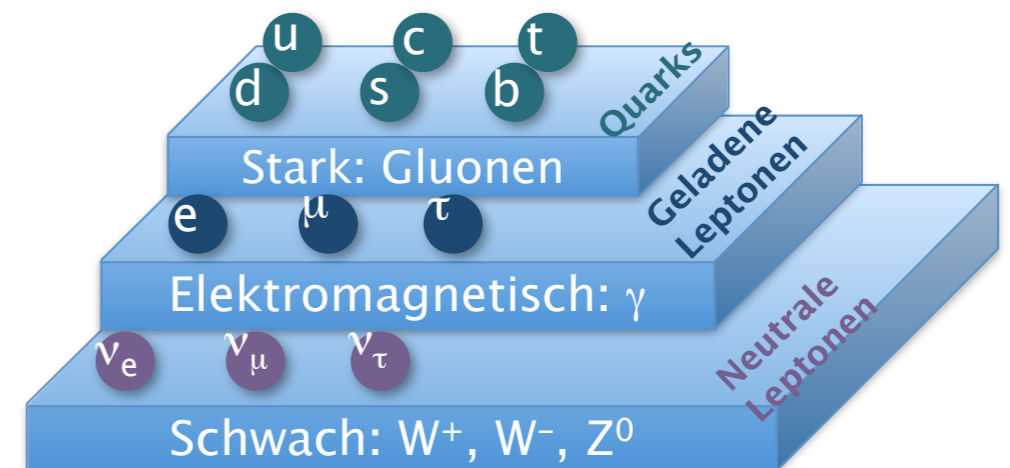
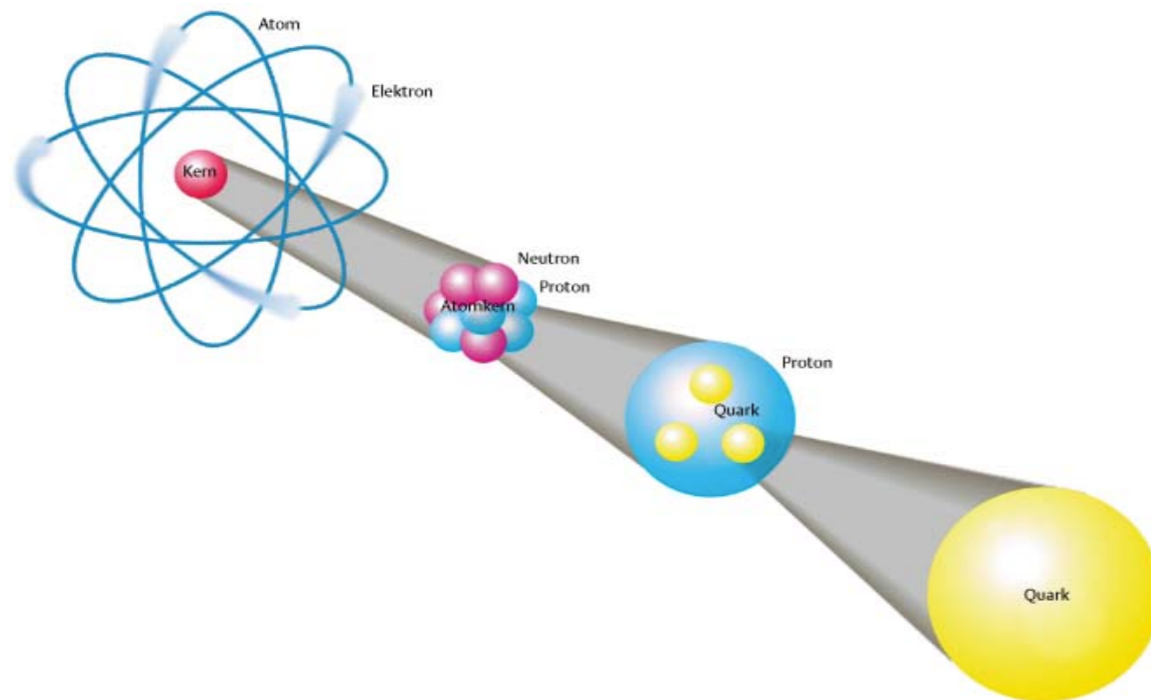
# Beschleuniger und Detektoren

european masterclasses 2014

Danke an Marc Dünser!

# Wozu Teilchenbeschleuniger?

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



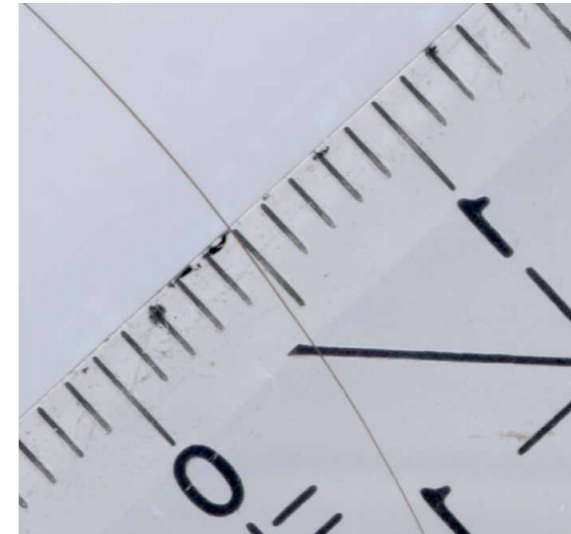
... nur wie?

# Beobachtung kleiner Objekte

**Auge:**

Auflösung  $\sim 0.1 \text{ mm}$

$10^{-4} \text{ m}$



**Lichtmikroskop:**

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

$10^{-7} \text{ m}$



**Elektronenmikroskop:**

$\sim 1 \text{ nm}$

$10^{-9} \text{ m}$

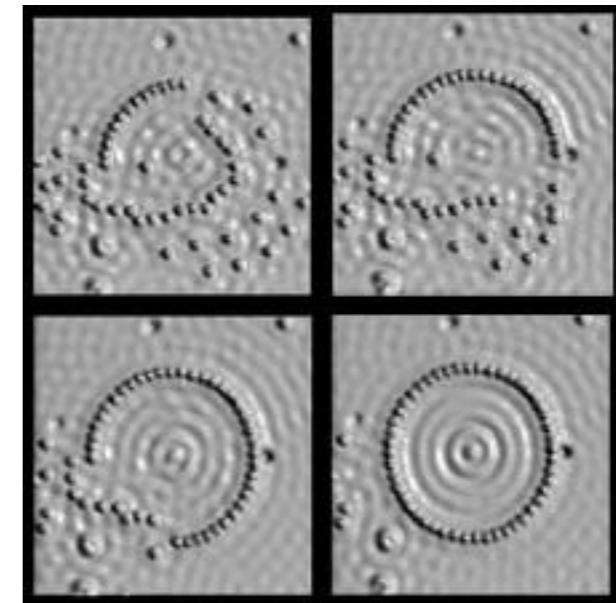


# Beobachtung noch kleinerer

**Rastertunnelmikroskop:**

~ 0.01 nm (atomare Auflösung!)

**$10^{-11}$  m**

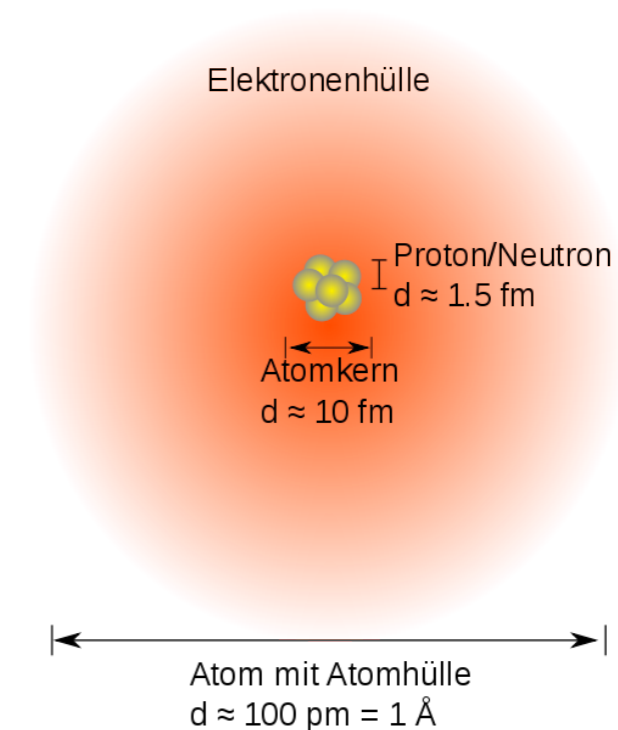


**ABER:**

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:

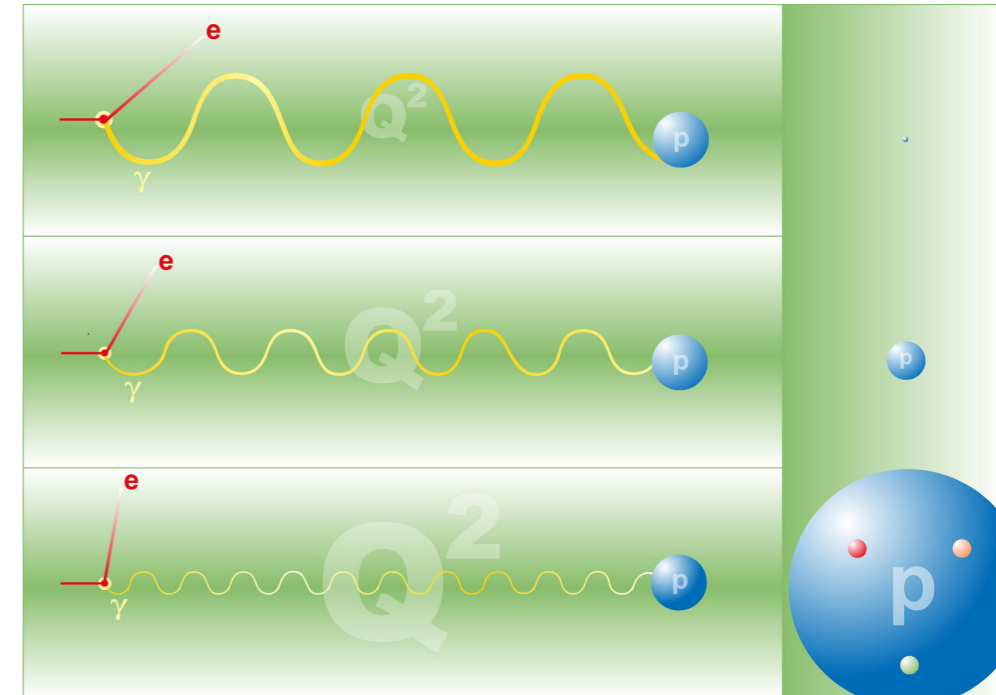
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

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  $1.602 \times 10^{-19}$  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
<b><math>m_{\text{Proton}}</math>:</b>	<b>~ 1 000 000 000 eV</b>
$m_{\text{Z-Boson}}$ :	~ 100 000 000 000 eV
<b>LHC:</b>	<b>~ 10 000 000 000 000 eV</b>
10 g Schokolade:	~ 1 000 000 000 000 000 000 000 000 eV <b>kein Scherz, aber wie kann das sein?</b>

# 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:

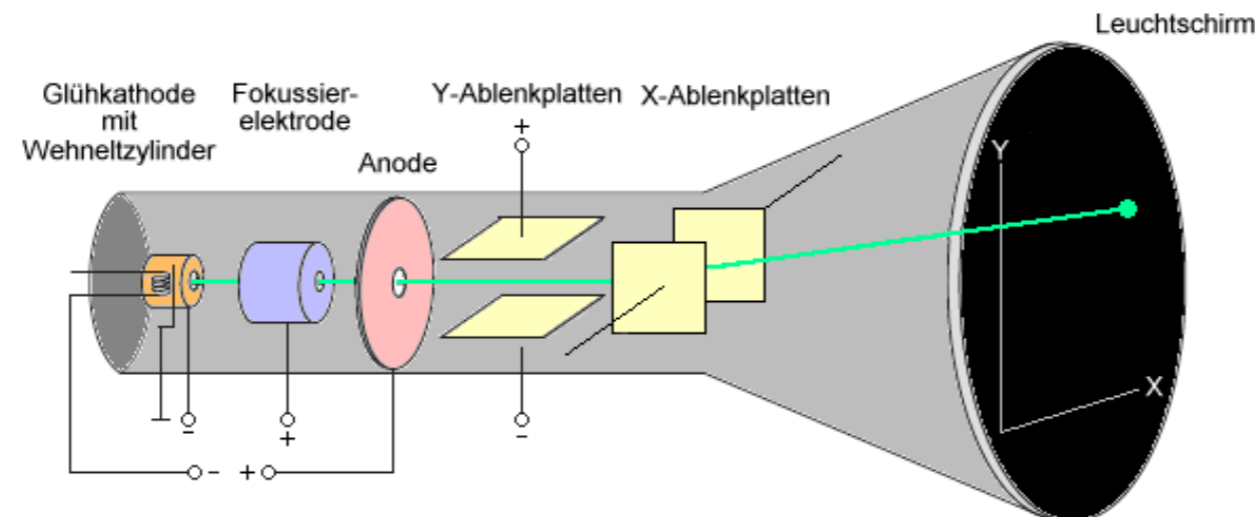
$$E = mc^2$$

# Einfacher Teilchenbeschleuniger

Gewöhnlichster Teilchenbeschleuniger:

alte **Fernsehröhre**

- Erzeugung von **freien Elektronen** in Glühkathode
- Beschleunigung durch **elektrisches Feld**
- Ablenkung durch **magnetisches und/oder elektrisches Feld**

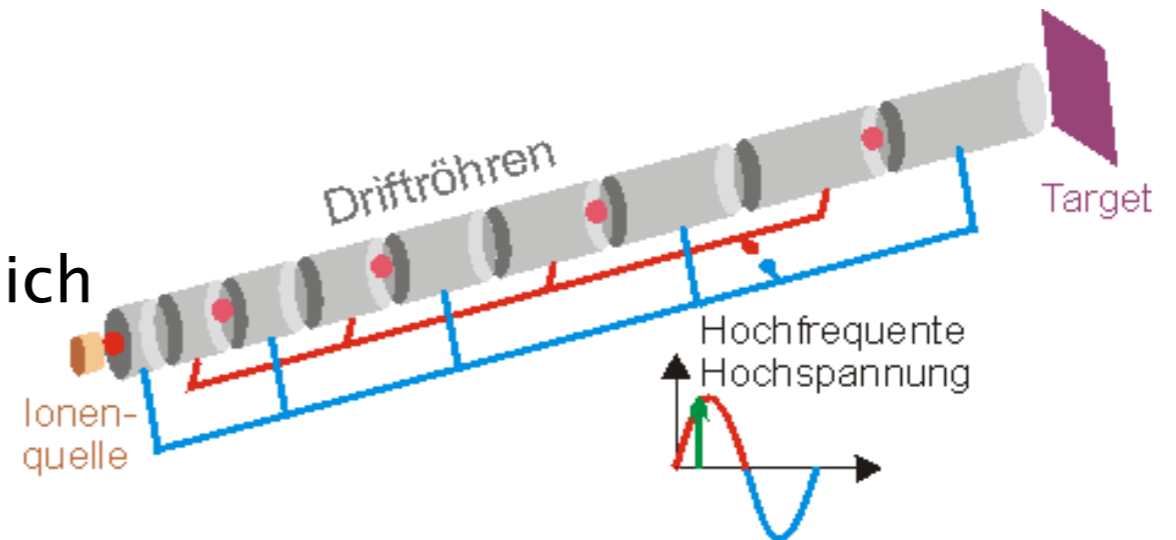




# Arten von Beschleunigern

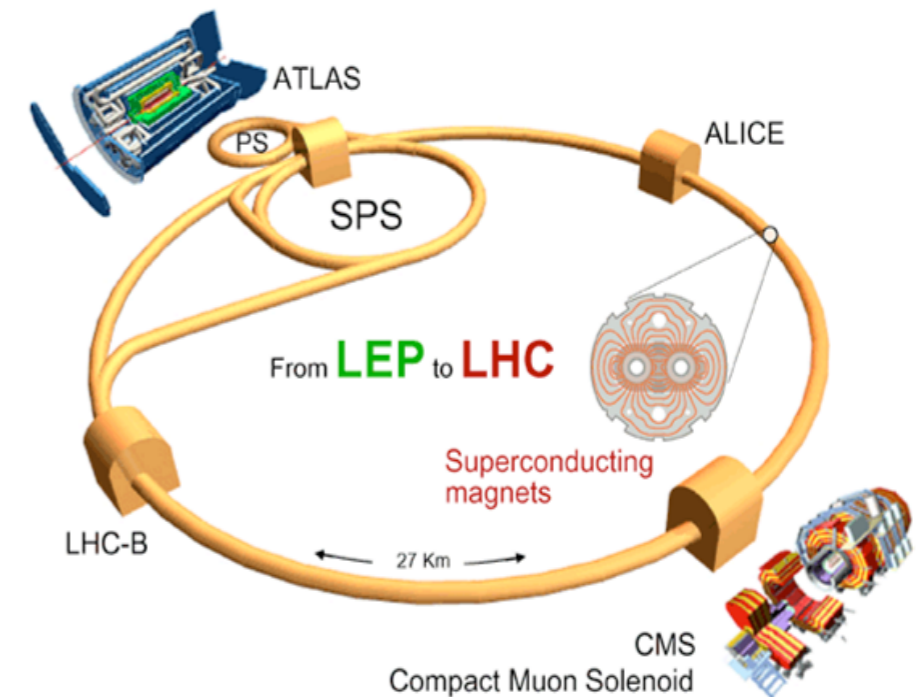
## Linearbeschleuniger

- + keine Verluste durch Abstrahlung
  - >  **$e^+e^-$  Beschleuniger** gut möglich
- kurze Beschleunigungsstrecken
- "relativ" **kleine Energien**
- Teilchen stehen nur 1x zur Kollision zur Verfügung



## Kreisbeschleuniger

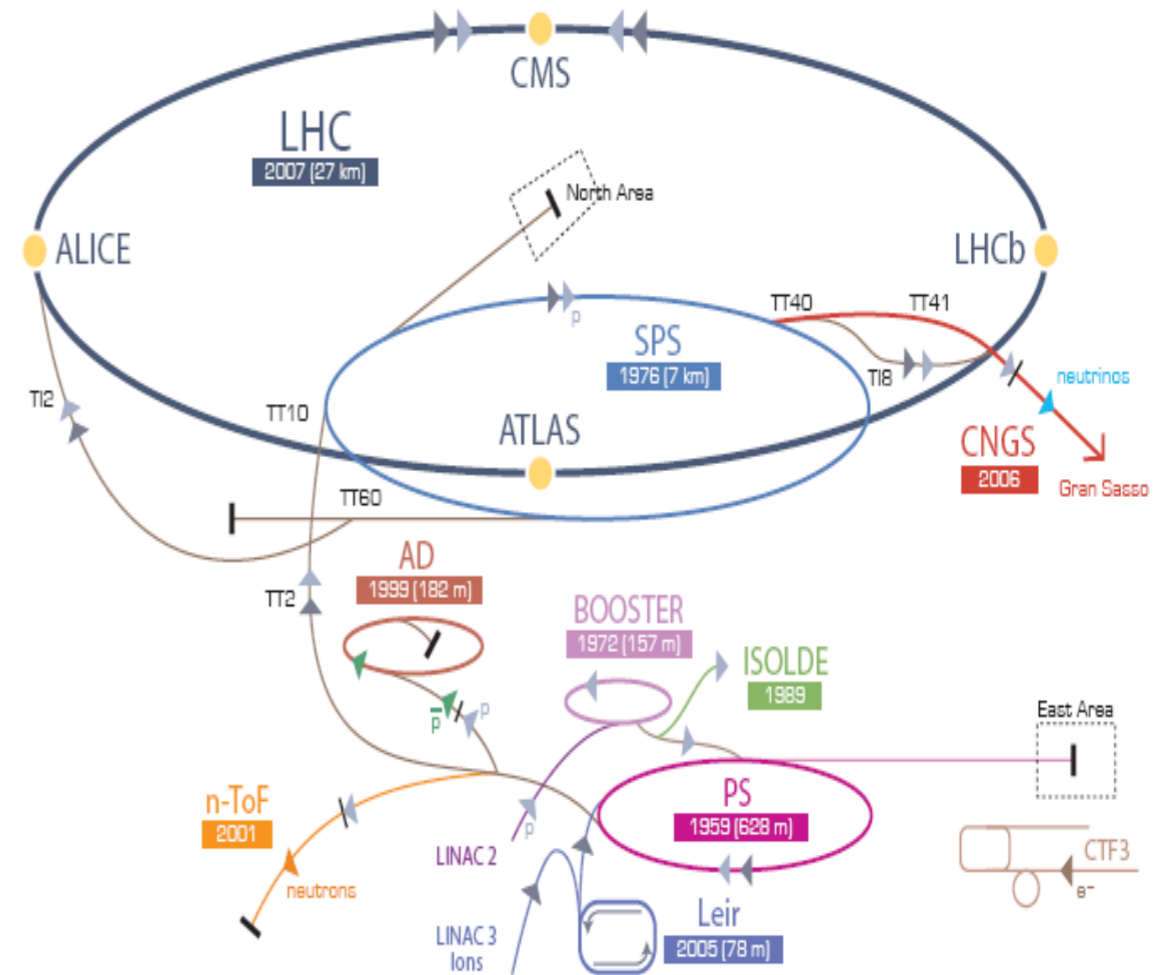
- + Teilchen drehen sich im Kreis
  - > man kann sie **bei jeder Umdrehung** neu **beschleunigen + kollidieren**
- Abstrahlung bei Umlenkung auf Kreisbahn
  - > **Synchrotronstrahlung**
- viele Komponenten nötig (Magneten)



# LHC – Die grösste Maschine der

## 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

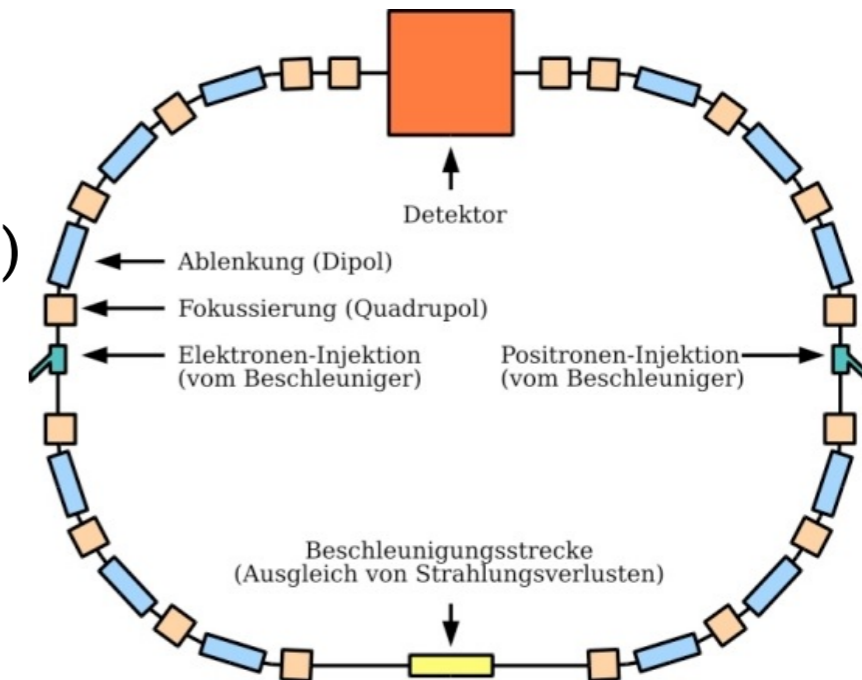
--> z.B. **Protonen** (LHC) oder **Elektronen** (LEP)

## 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**

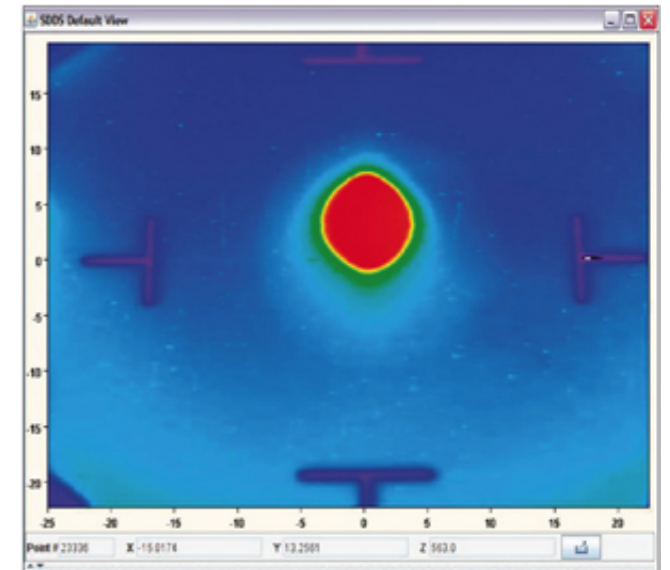
--> aus einem Metall herausheizen oder  
herausreissen

## **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. **1000 MJ!**

≈ **kinetische Energie eines TGV (385 t) mit 180 km/h**

≈ **starker Blitzeinschlag**

# Beschleunigungsstrecken

Geladene Teilchen werden **in elektrischen Feldern beschleunigt**

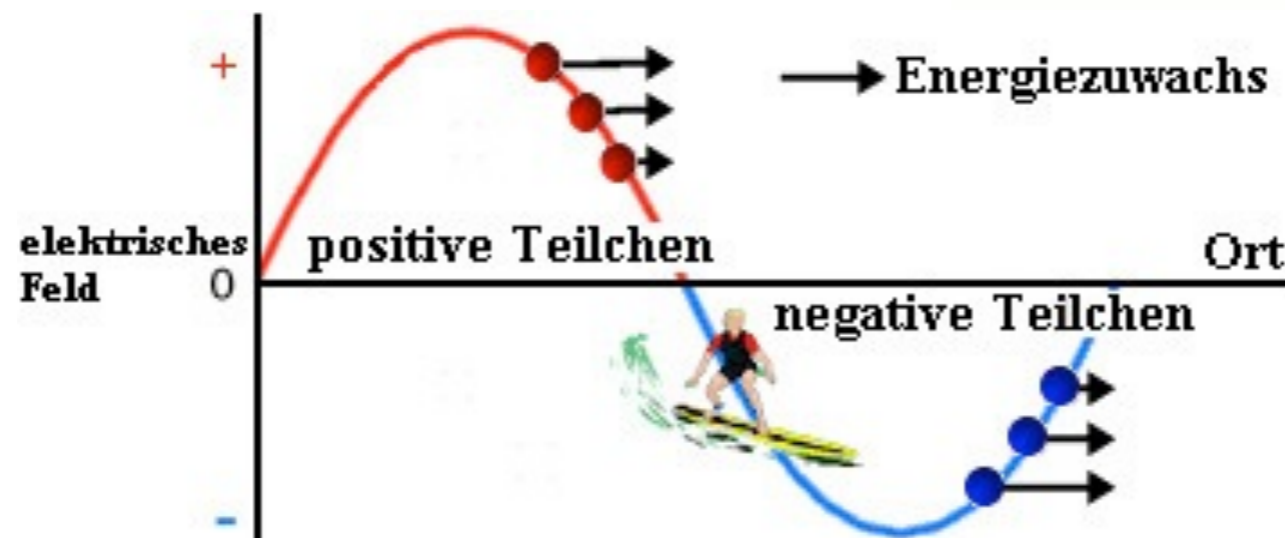
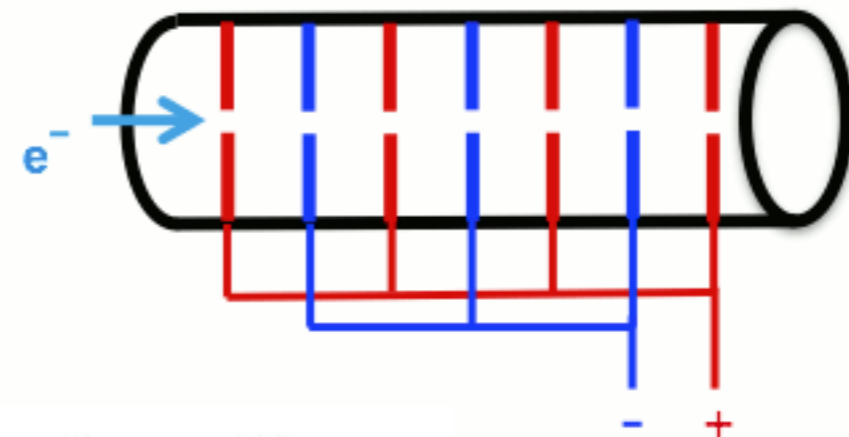
--> **Gleichspannung:**

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

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

- bis zu **35 MV pro Meter**

- mehrere Platten, sodass die Teilche immer in eine Richtung beschleunigt werden



# Synchrotronstrahlung

Wenn geladene Teilchen auf eine Kreisbahn “gezwungen” werden, strahlen sie **Synchrotronstrahlung** ab

--> diese Verluste sind **proportional zu  $m^{-4}$**  !

--> **je kleiner die Masse, um so grösser die Abstrahlung**

Der Verlust durch Synchrotronstrahlung is  **$10^{13}$  (!) mal geringer für Protonen als für Elektronen** – bei selber Energie der Teilchen

--> deshalb **Protonen** und nicht Elektronen **im LHC**

**Dieses Problem gibt es bei linearen Beschleuniger nicht!**

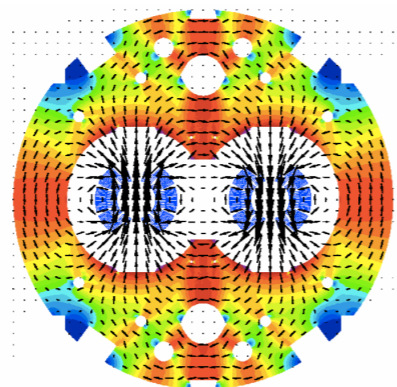
# Ablenkmagneten

Ablenkmagneten: klingt einfach, ist es aber nicht!

Die Magneten des LHC:

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

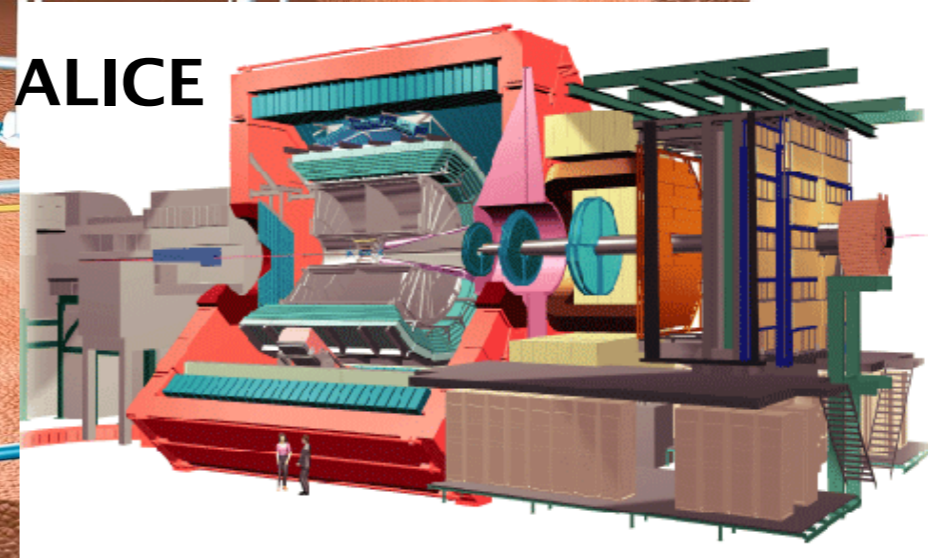
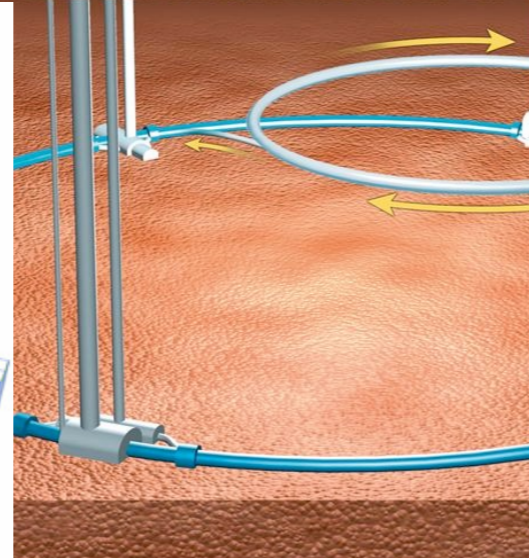
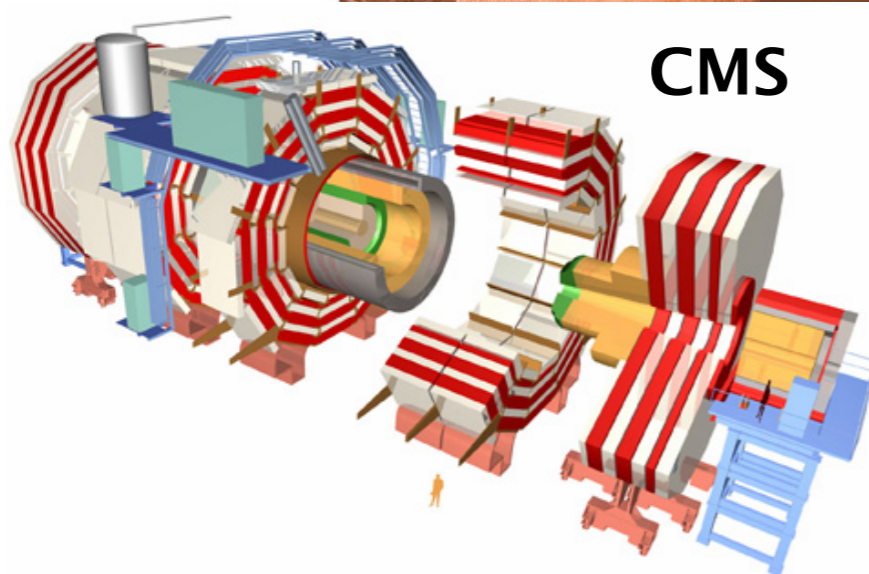
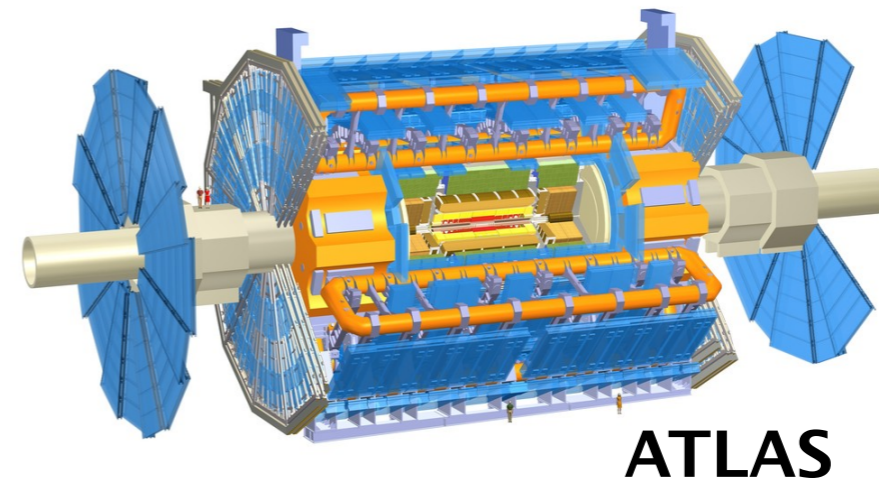
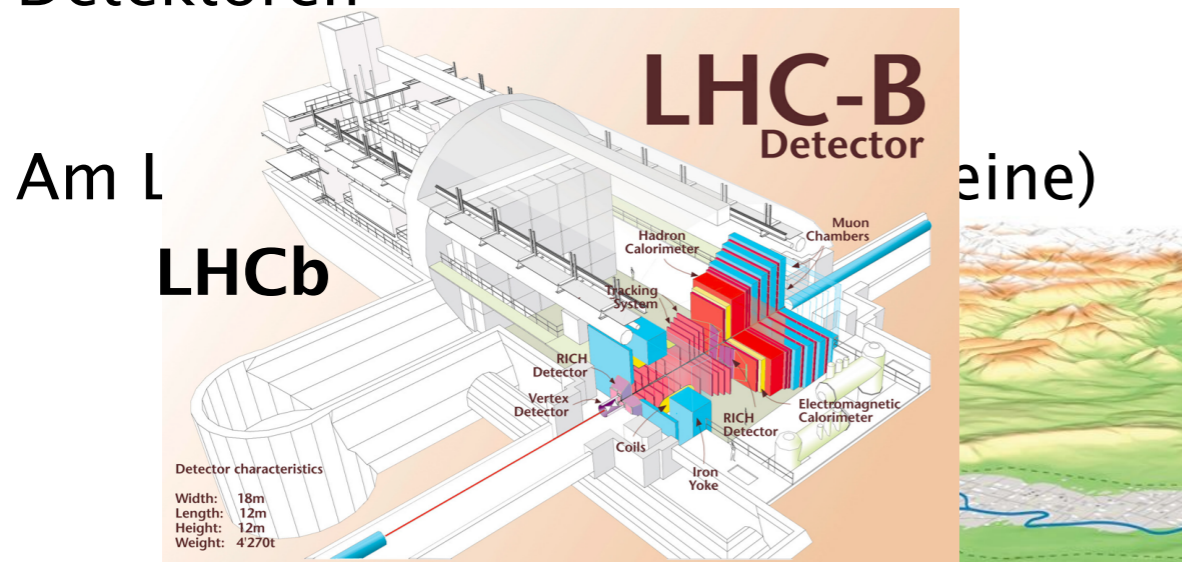
**und es gibt 1232 Stück davon!!**





# 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**

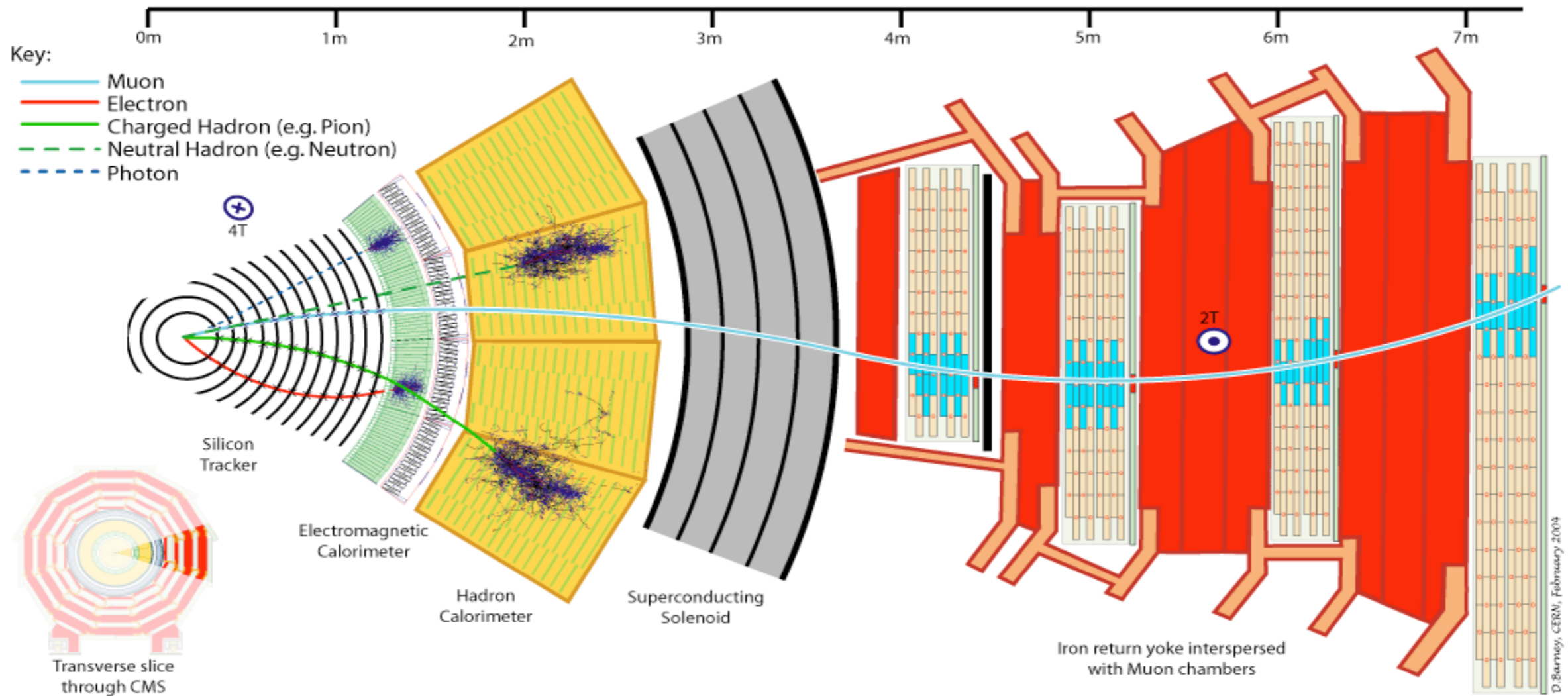
Daraus kann man auf die **Masse**, den **Typ**, die **Ladung** und die **Geschwindigkeit** schliessen!

# Aufbau eines Teilchendetektors

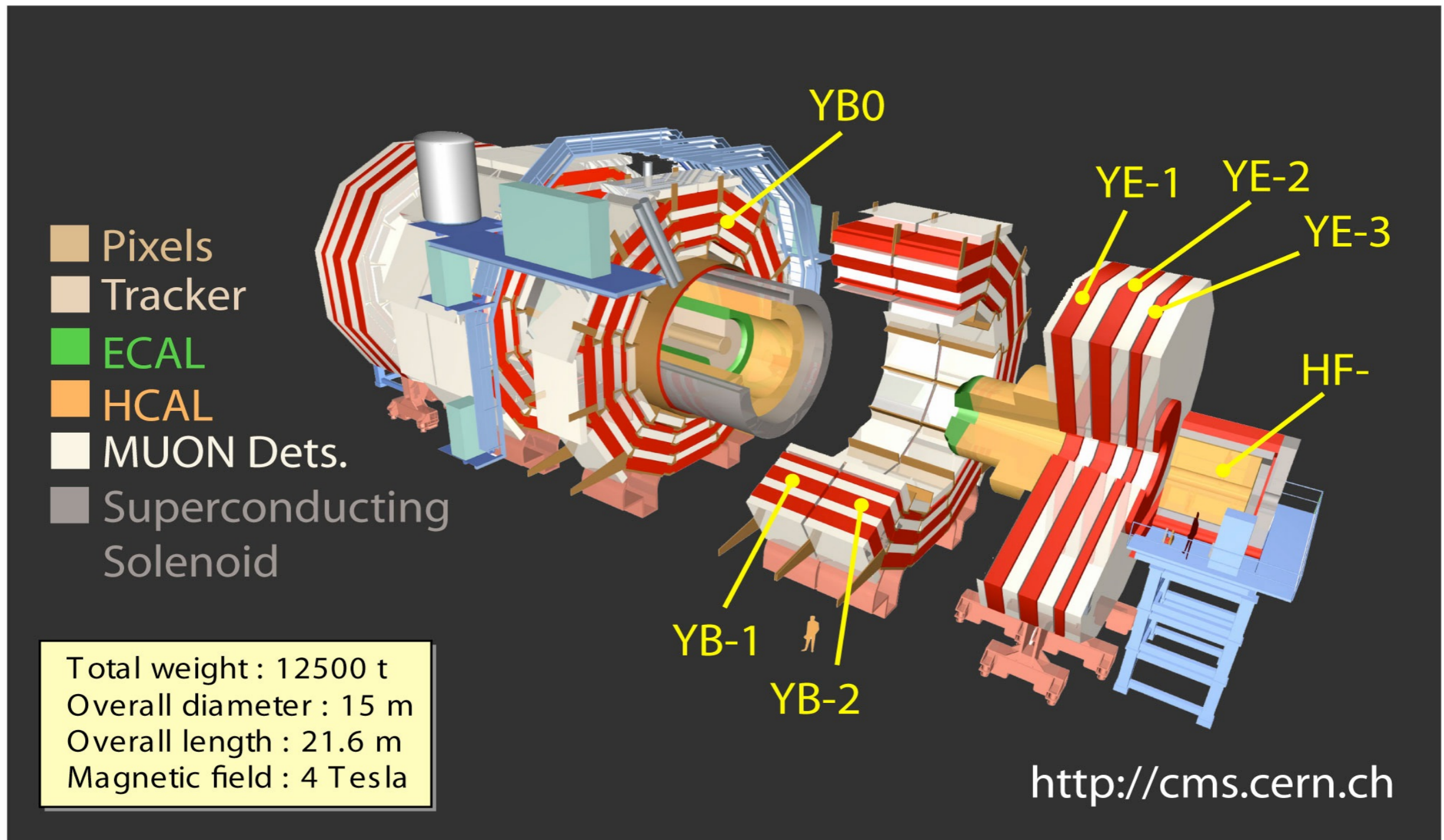
Mit sehr wenigen Ausnahmen, haben grosse Teilchenexperimente immer denselben zwiebel förmigen Aufbau (von innen nach aussen):

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

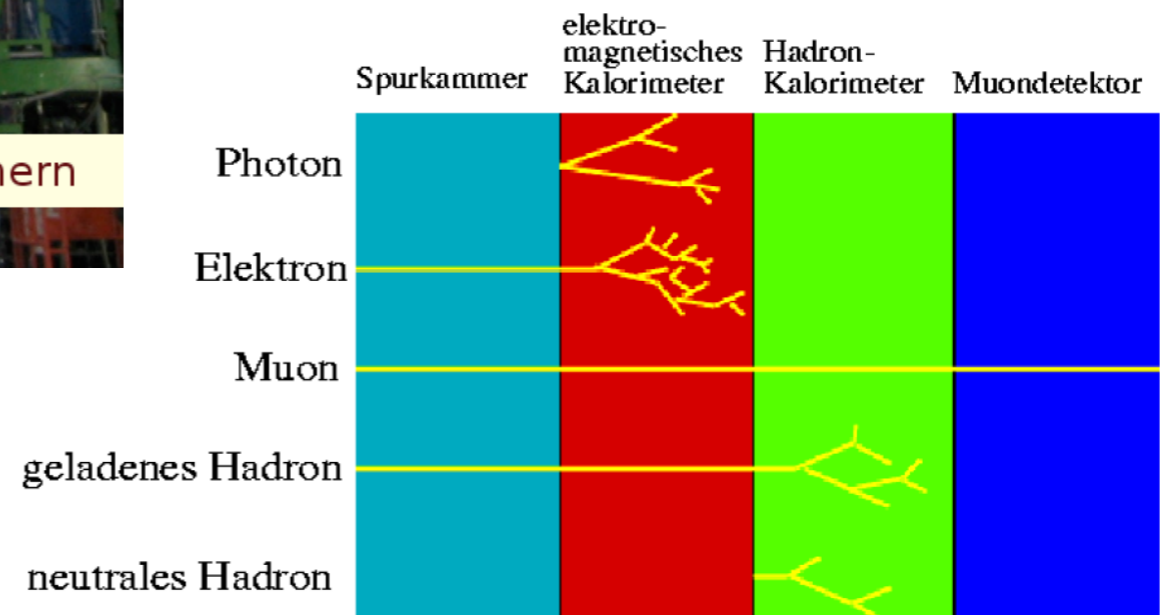
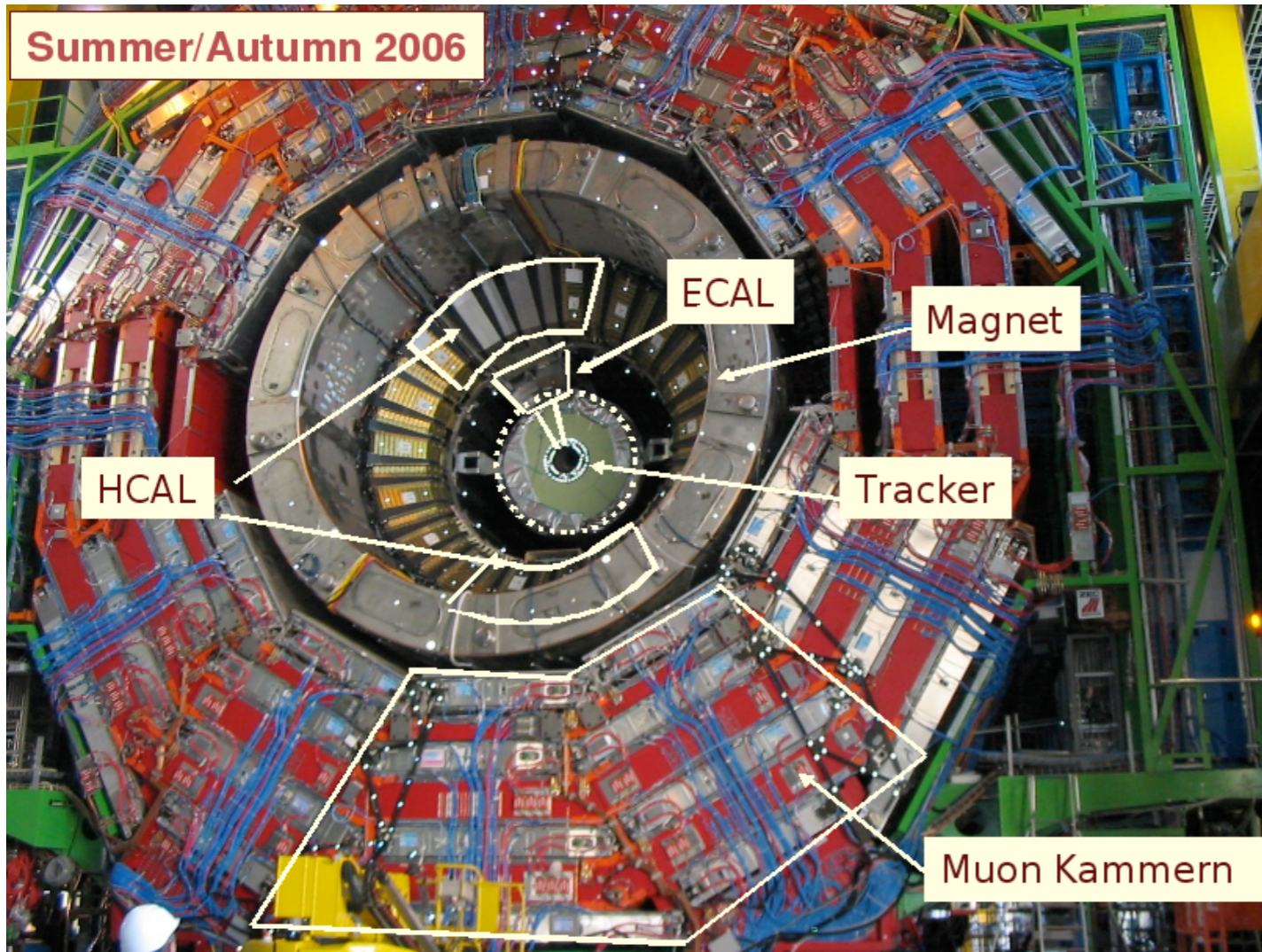
# Schematischer Aufbau – CMS



# Schematischer Aufbau – CMS



# Schematischer Aufbau – CMS



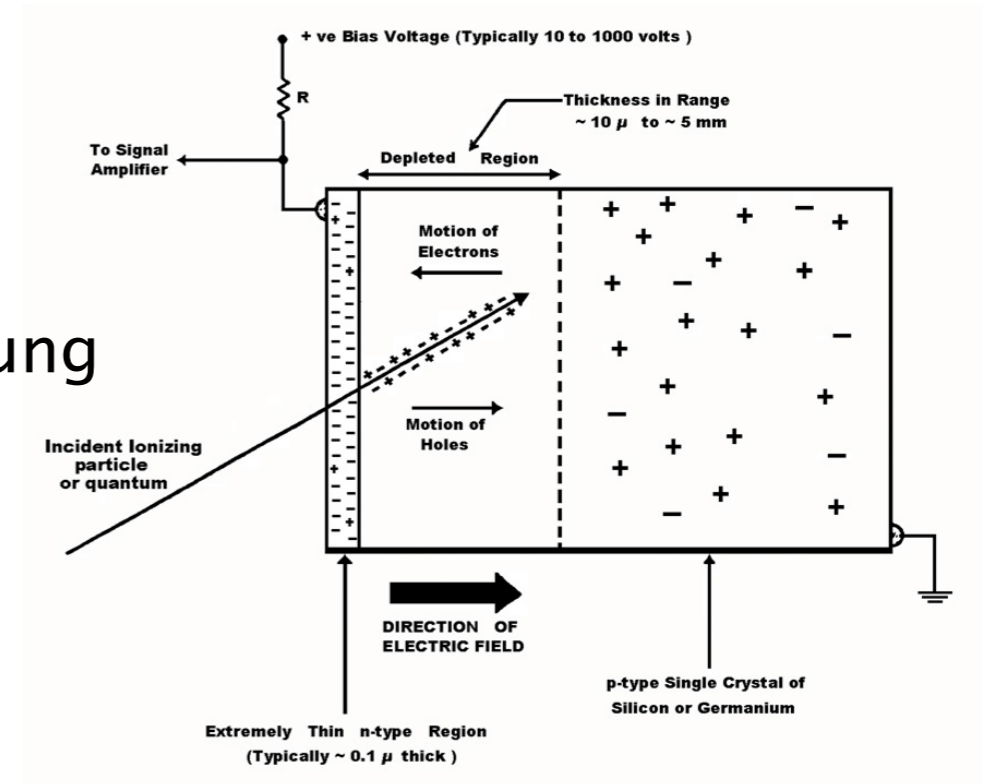
# Spurendetektor – Prinzip

geladene Teilchen ionisieren Materie beim Durchfliegen

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

Halbleiter (Silizium) eignen sich hervorragend zur Messung dieser Ladungen

--> p-n dotierte Siliziumschicht in Sperrichtung

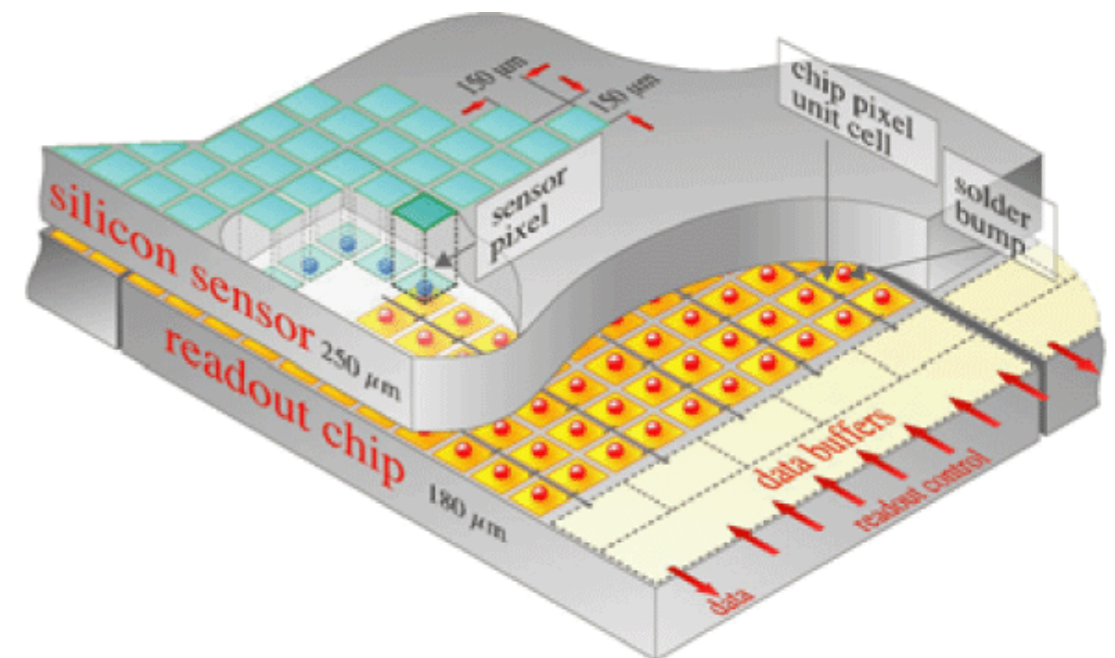


Funktionsprinzip sehr **ähnlich** dem **einer Digitalkamera**, aber...

# Spurendetektor – Pixel

CMS Pixel Detektor hat:

- > **3 Lagen** bei 4.3, 7.2, 11 cm Abstand vom Strahl
- > **~1 m<sup>2</sup> aktive Fläche**
- > Pixelgrösse von **100 x 150  $\mu\text{m}^2$**
- > 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

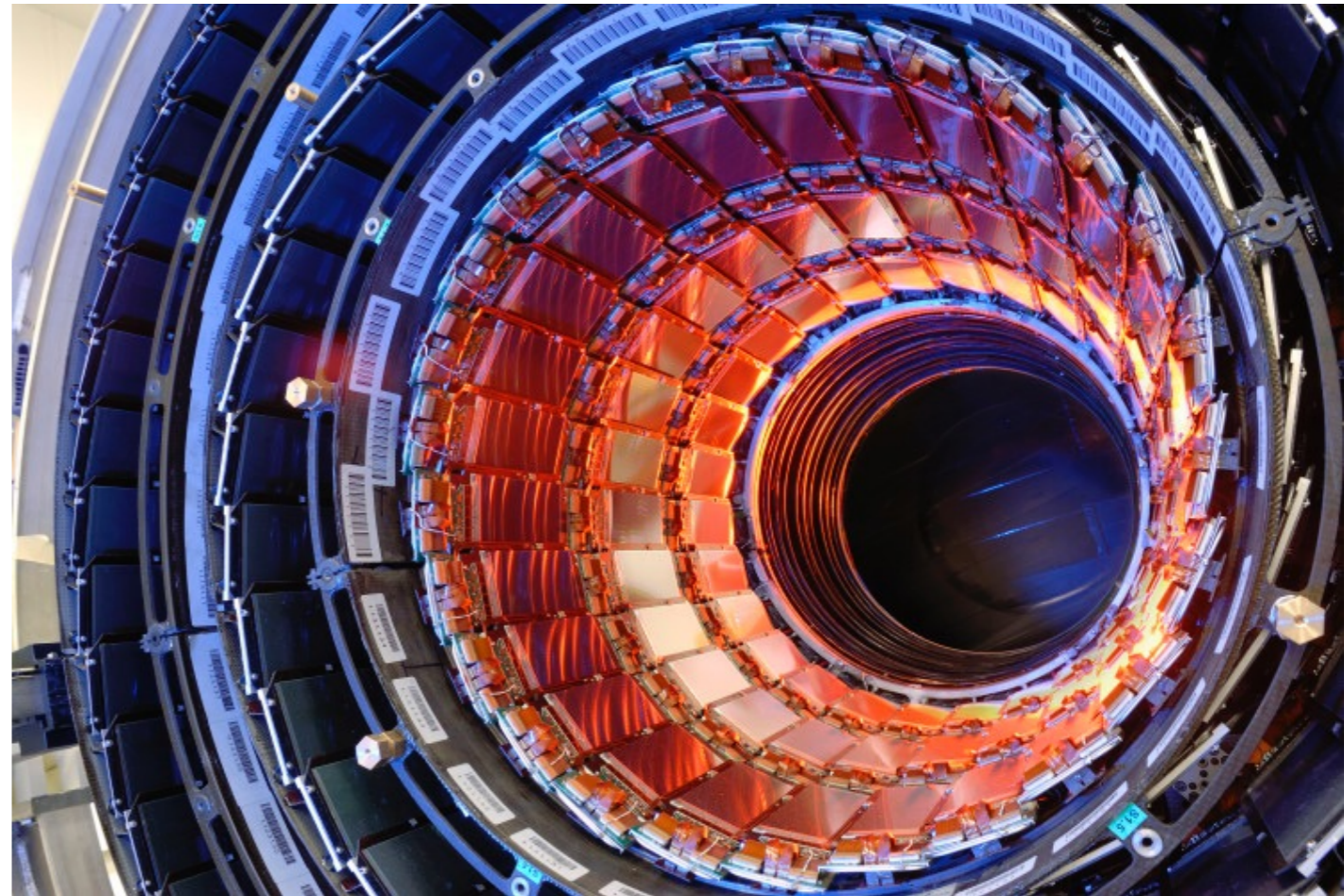
Um Auslesekanäle zu sparen, sind die nächsten  $\sim 10$  Lagen keine Pixel, sondern sogenannte Siliziumstreifendetektoren

--> **selbes physikalisches Prinzip**

--> lange, schmale Streifen

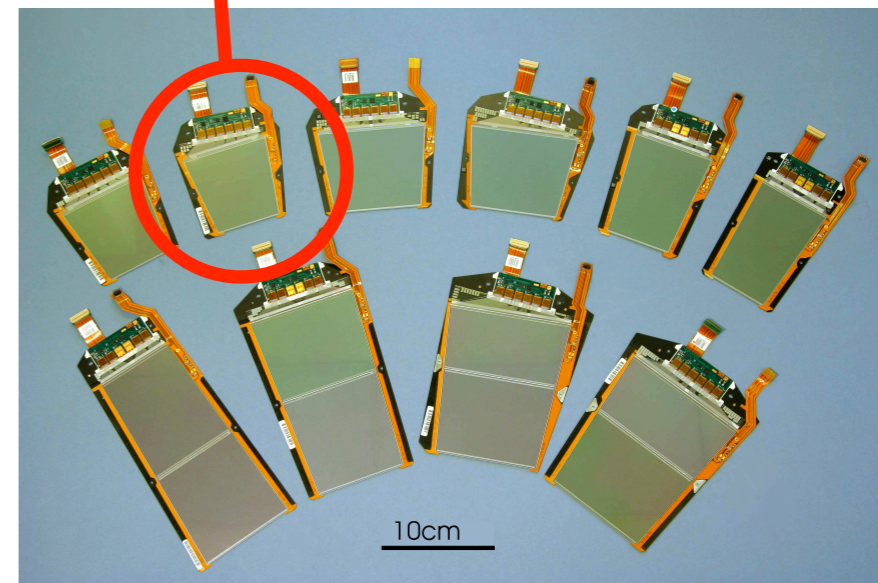
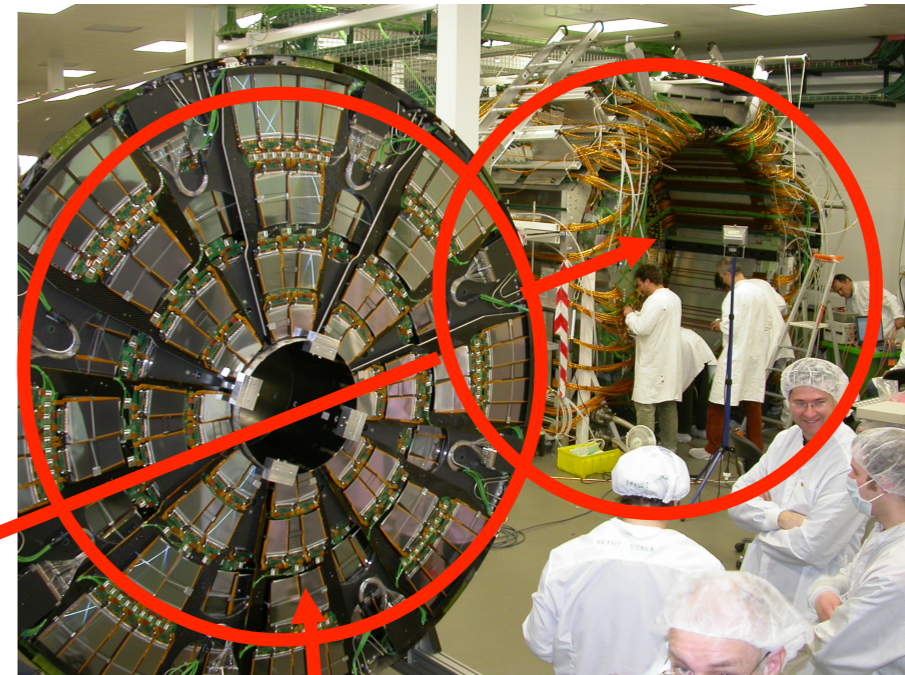
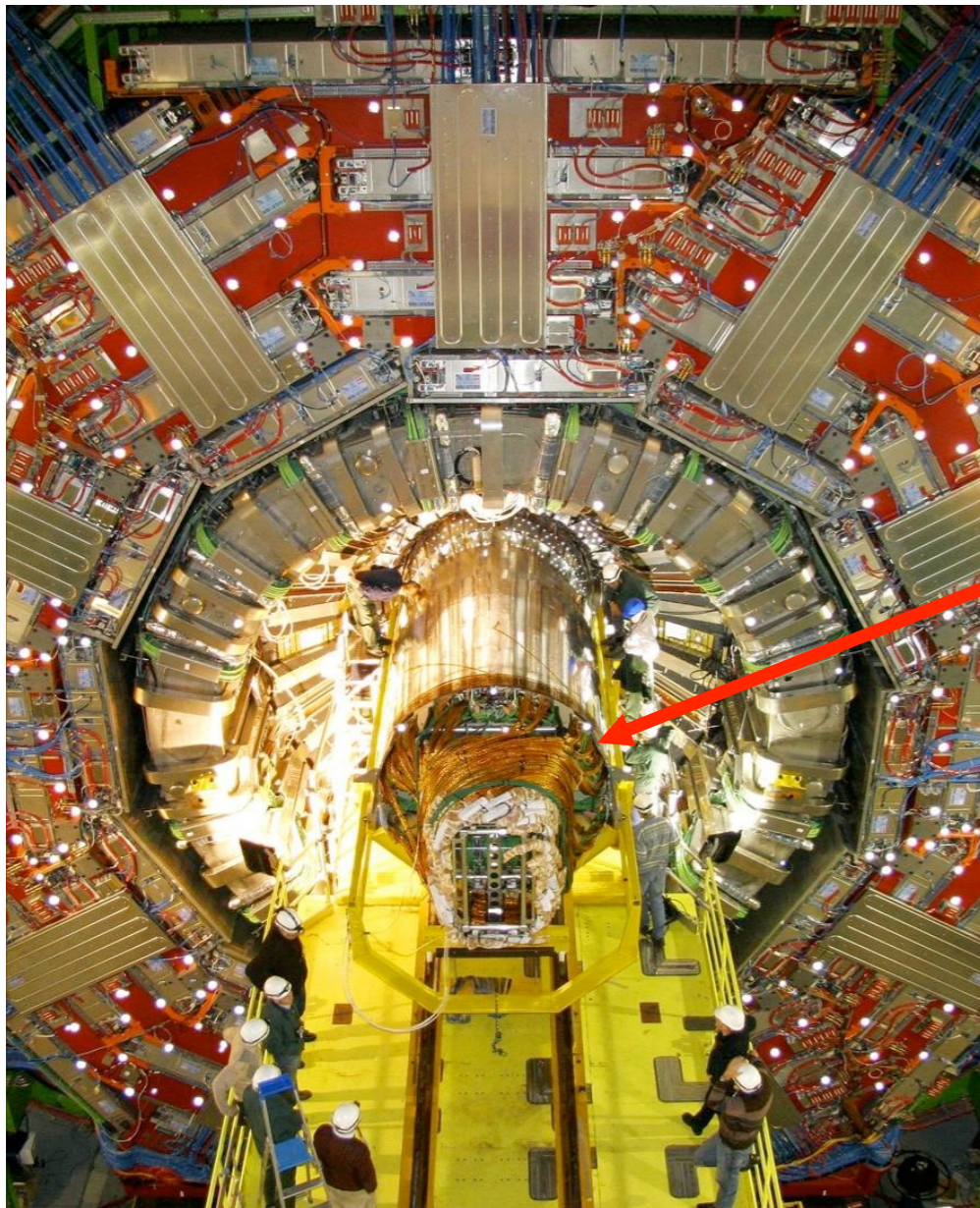
--> **80  $\mu\text{m}$  breit**

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



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

# Spurendetektor – Streifen



# Kalorimeter – Elektromagnetisch

Kalorimeter messen die Energie der Teilchen.

2 verschiedene Typen:

- > **elektromagnetisch**
- > **hadronisch**

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

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

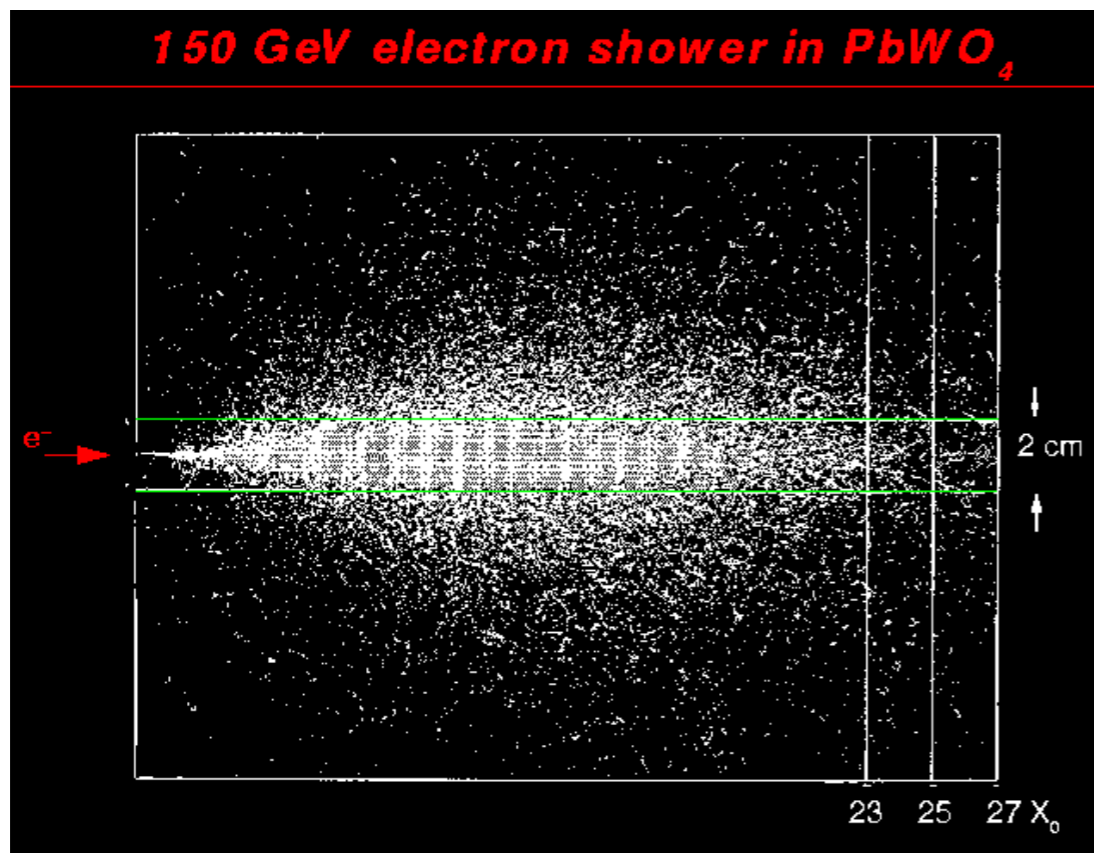
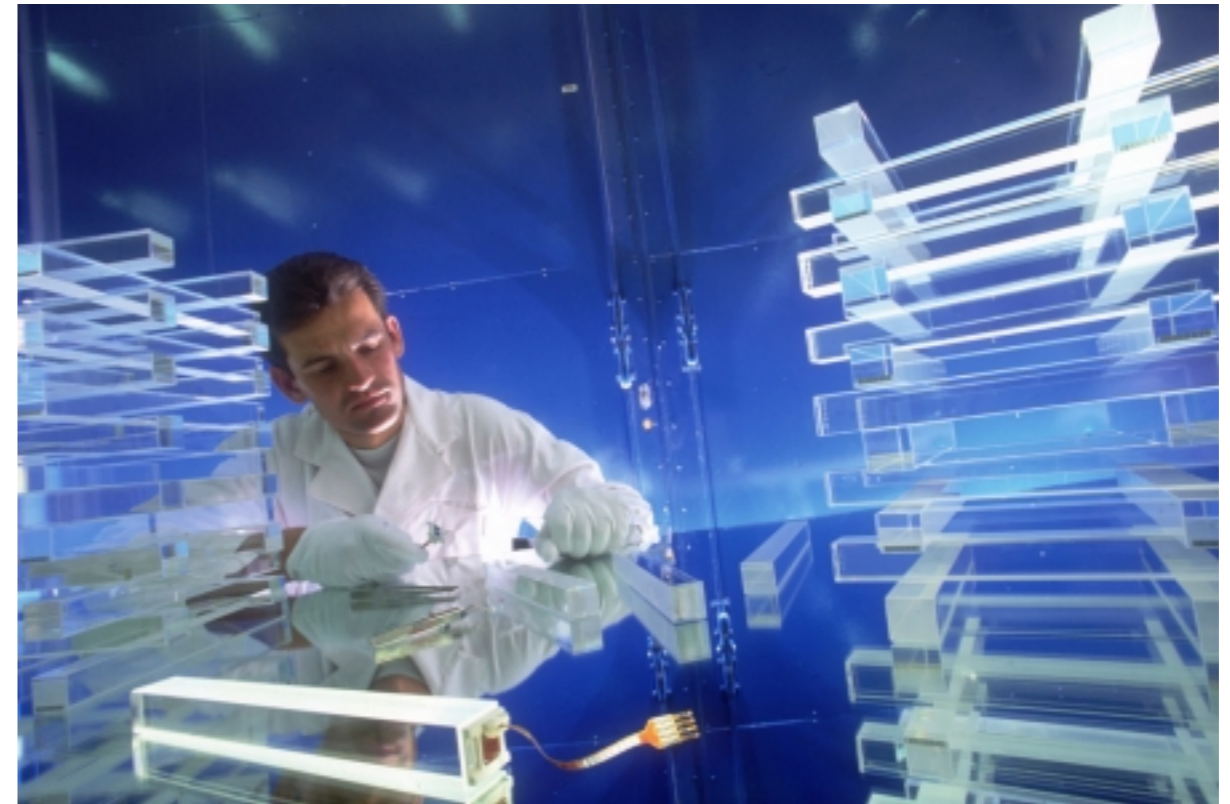
- > der Kristall **emittiert Licht** wenn Teilchen hindurchfliegen
- > die Menge des **Lichts** is **proportional** zur deponierten **Energie**
- > wenn man die Teilchen **vollständig abbremst**, kann man auf die gesamte Energie rückschliessen

# Kalorimeter – Elektromagnetisch

Kristall:

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

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



# 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”



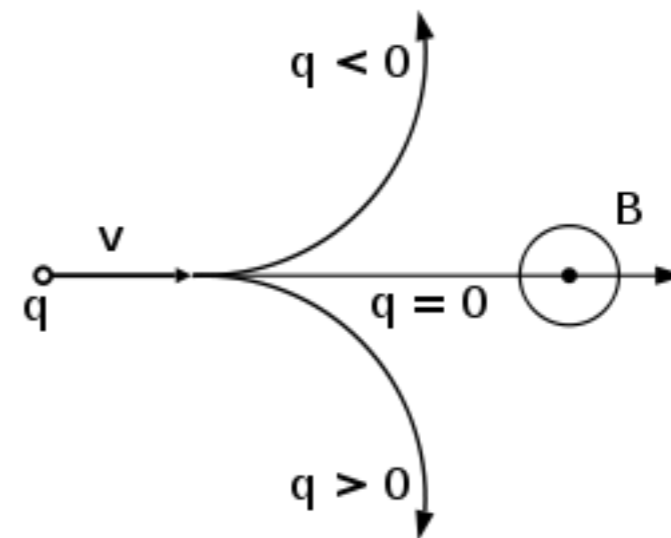
In CMS: ca. 10 5 cm **Messing** – 3 cm **Szintillator Schichten**

# 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:

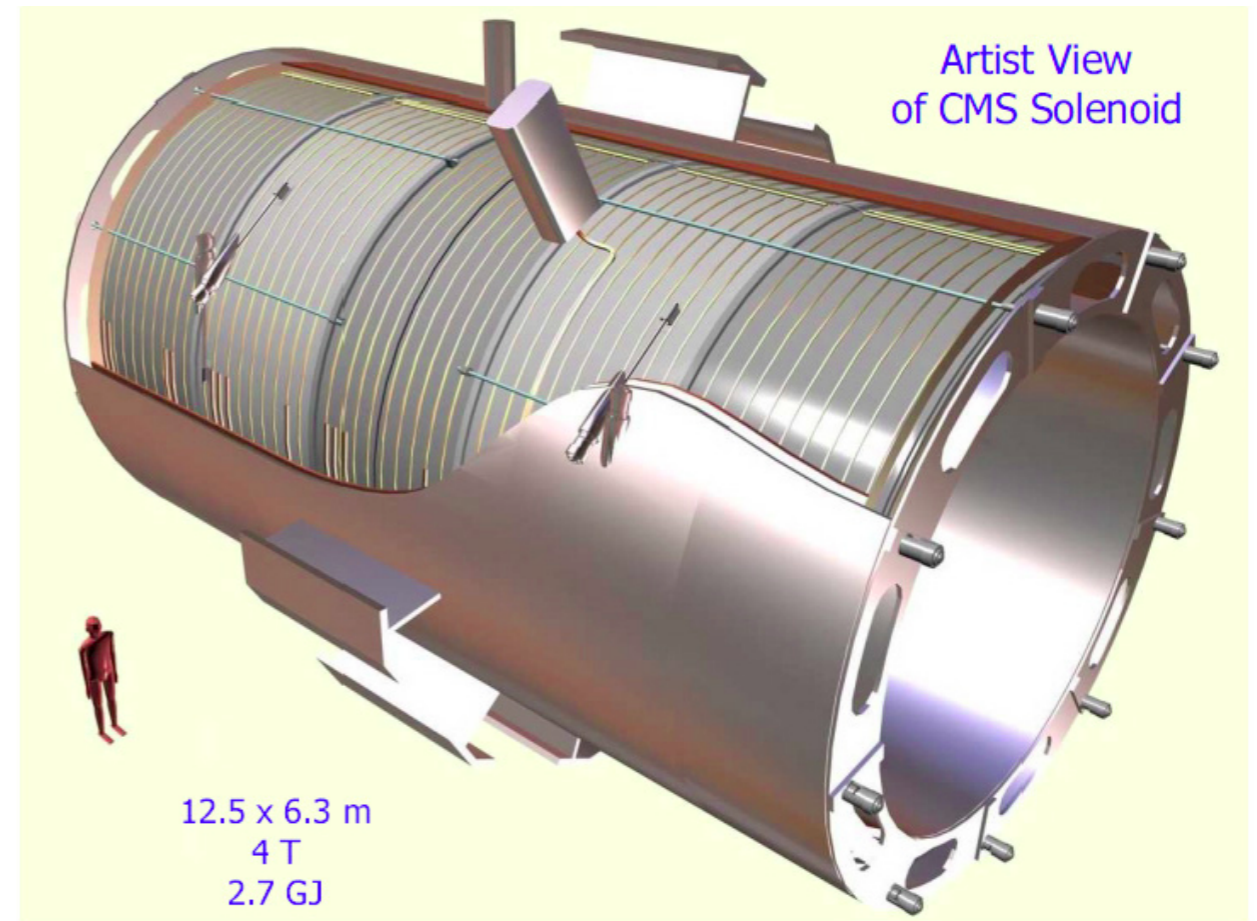
$$\mathbf{r} \propto \mathbf{p}/q\mathbf{B}$$

# 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 ( $\sim 10^5 B_E$ )**
- > **19 000 Ampere**
- > **2500 MJ** gespeicherte Energie



**Der CMS Magnet ist somit der energiereichste Magnet der Welt!**

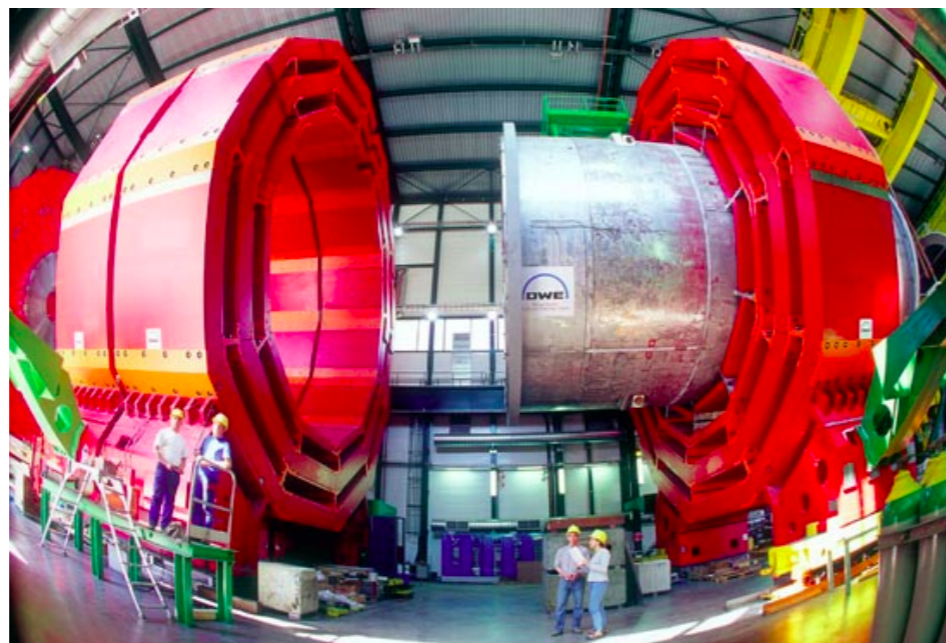
# Rückführjoch

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

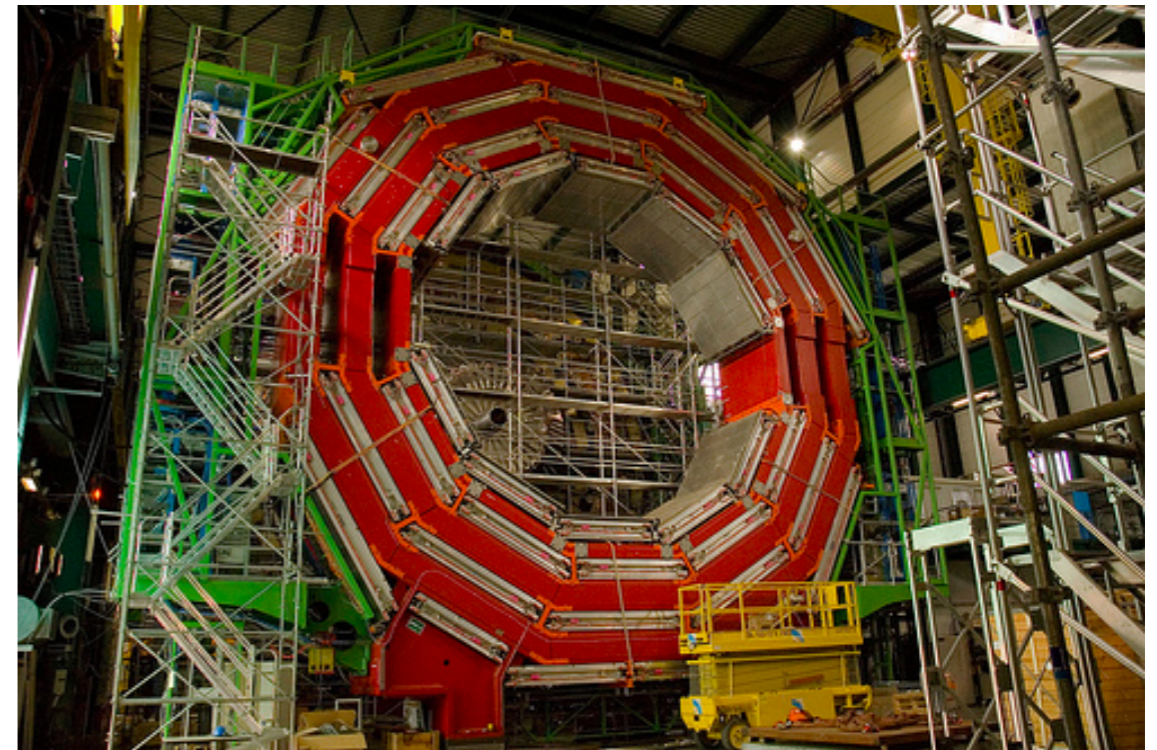
**Muonen sind die schweren Brüder der Elektronen und interagieren nur sehr schwach mit Materie!**

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

--> werden präzise in Muonkammern gemessen

--> innerhalb des Rückführjochs

--> 3 verschiedene Arten von Kammern



# Neutrinos

Neutrinos interagieren noch sehr viel weniger mit Materie

--> im Detektor nicht nachweisbar!

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

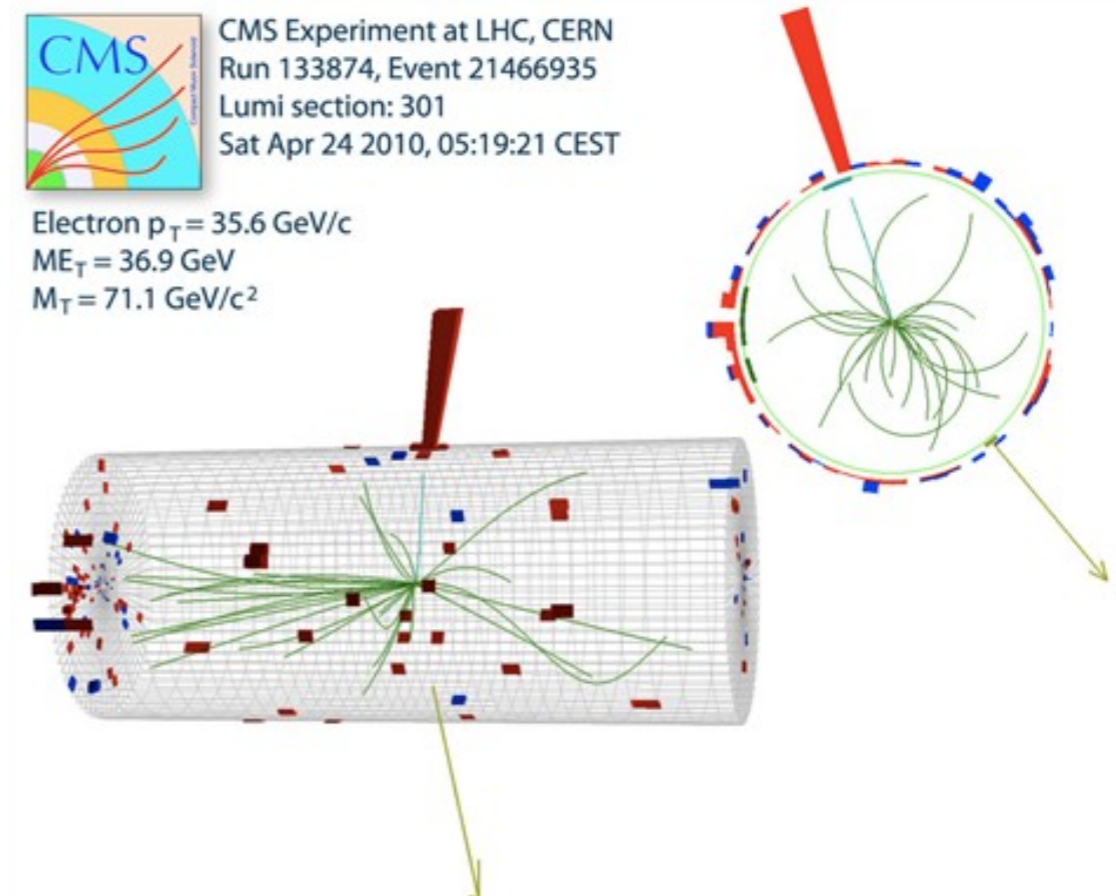
In der Ebene normal zur Strahlrichtung  
ist der Anfangsimpuls gleich null!

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**

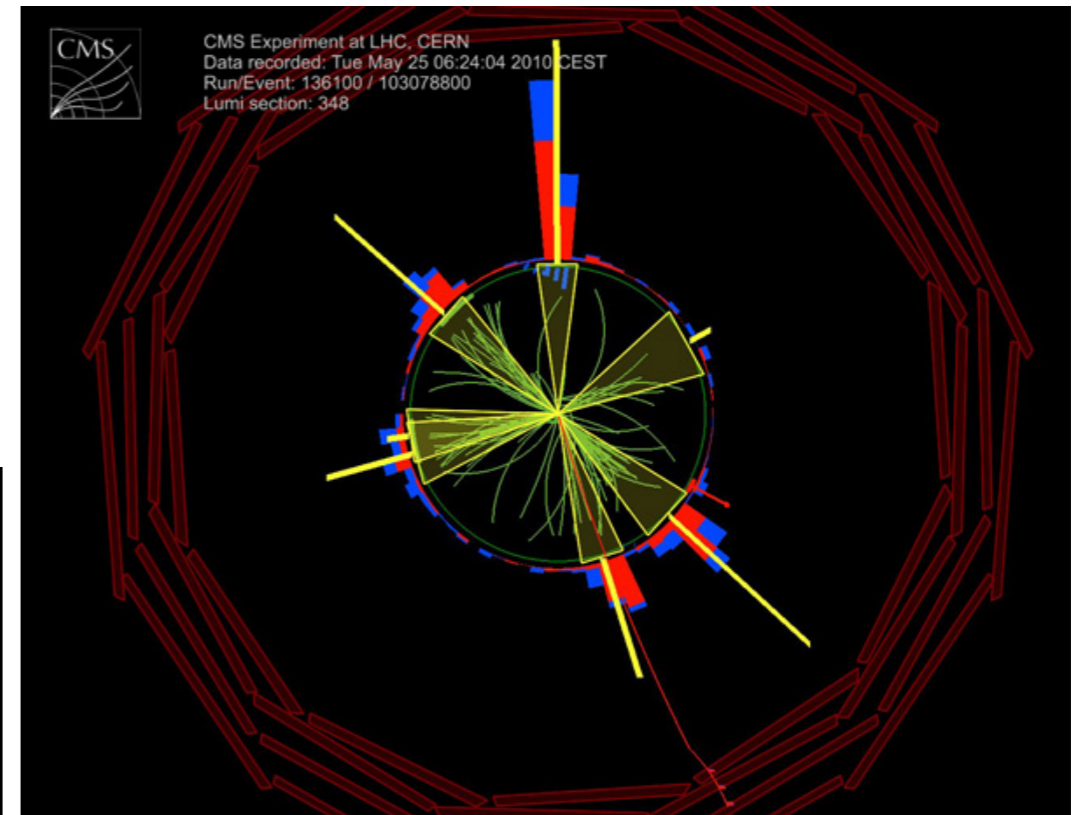
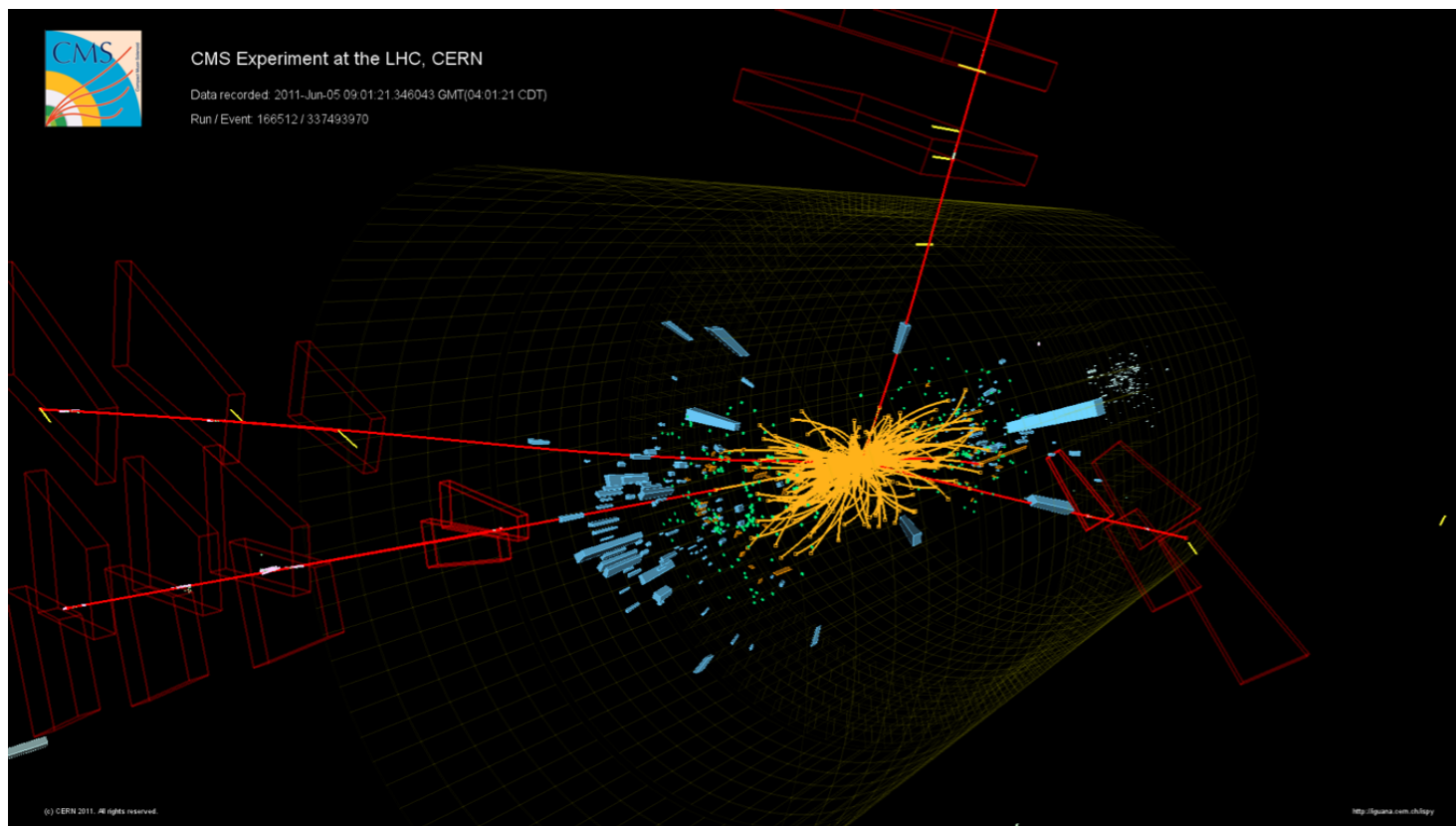
--> am Ende werden **“nur” ca. 500 – 1000 Kollisionen pro Sekunde gespeichert**

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

# Auslese – Rekonstruktion

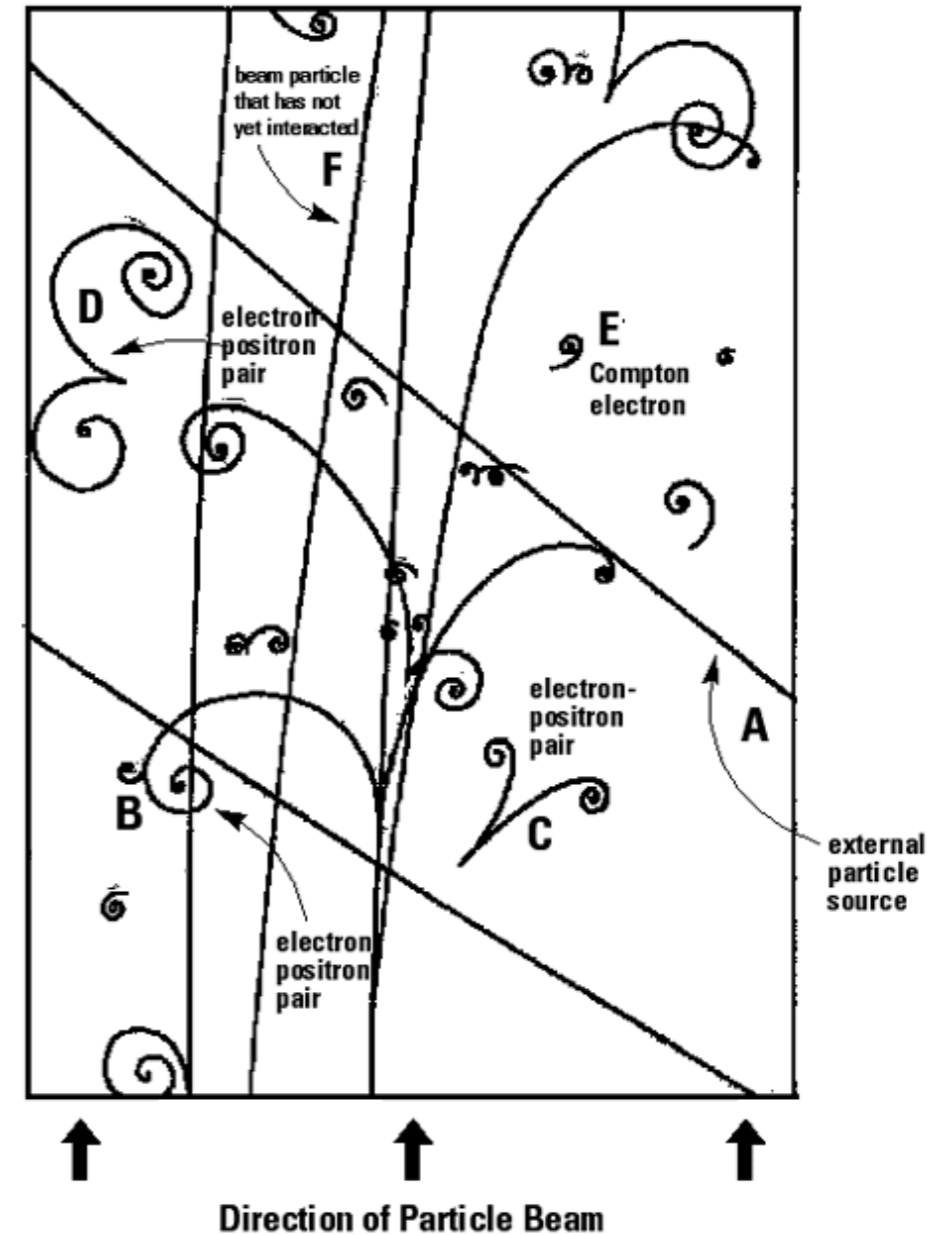
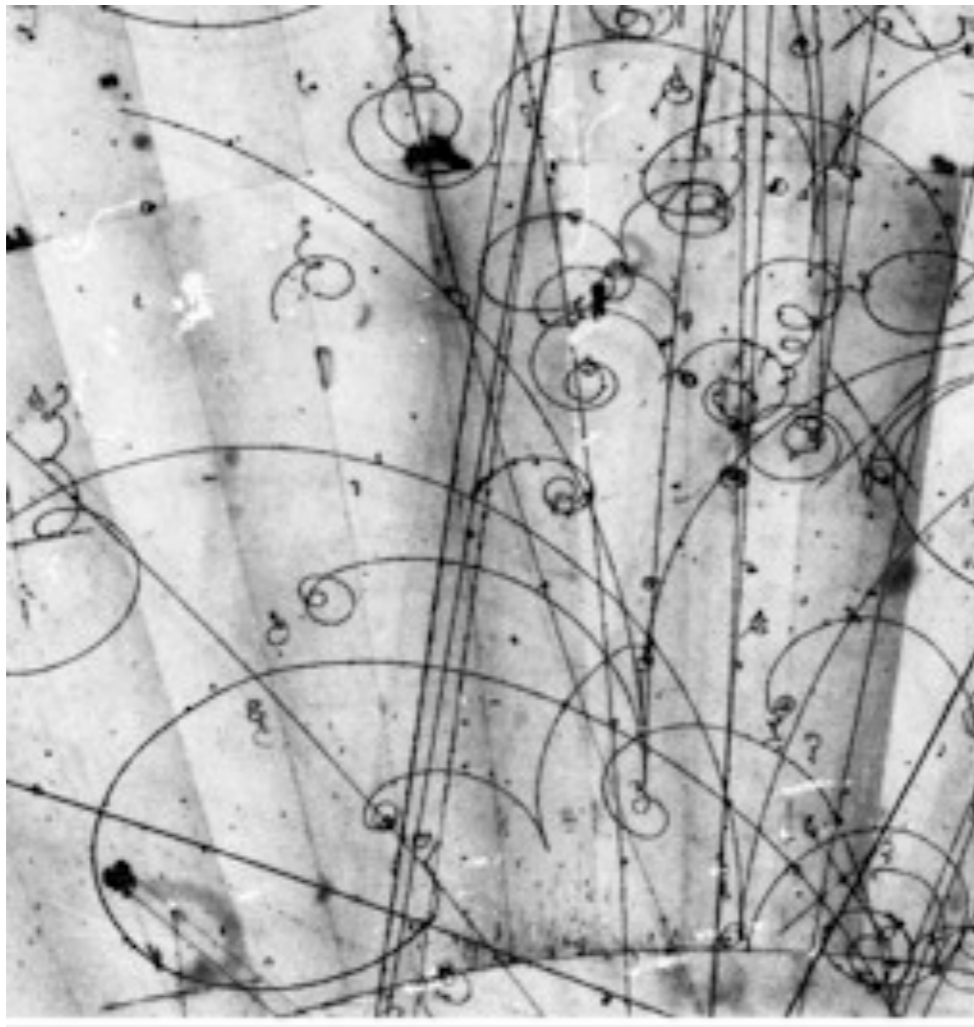
Wenn ein Event den Trigger passiert hat, wird es in einer grossen Computerfarm komplett rekonstruiert

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



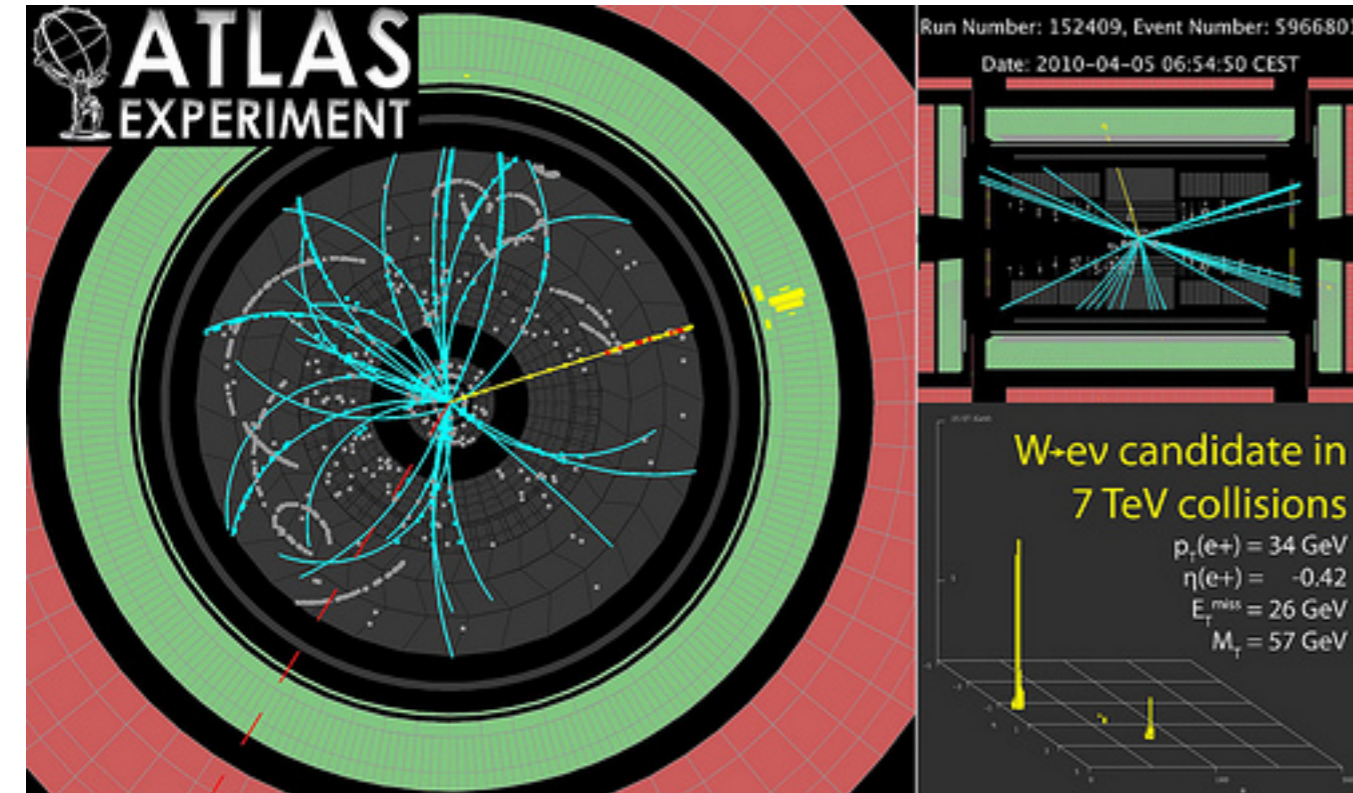
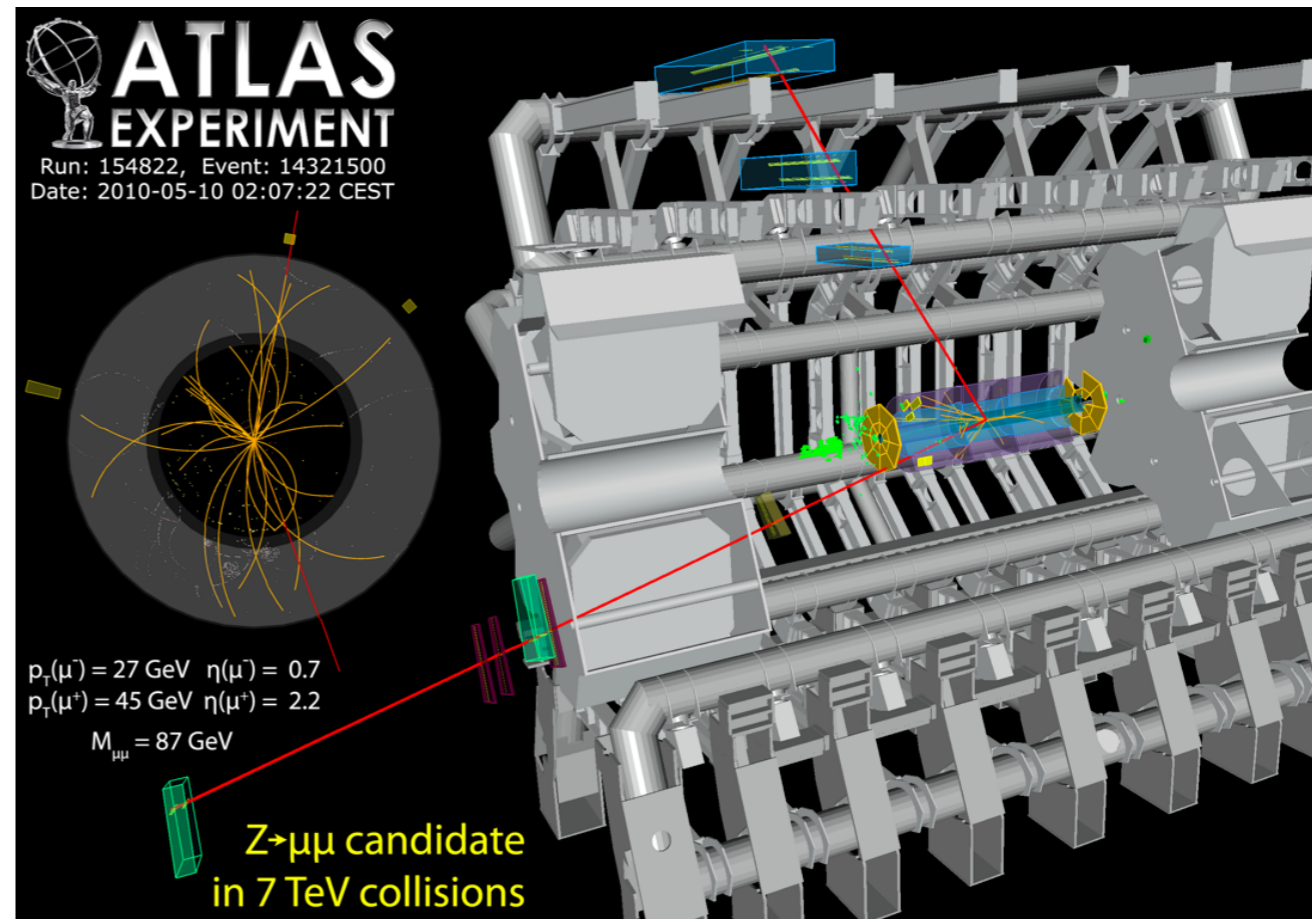
# Auslese – Rekonstruktion

Früher: Photos von Nebelkammern:



# ATLAS

ATLAS hat auch schöne 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!**

– die 4 grossen Experimente am LHC haben bisher ca. **75 PB (!)** an **Daten** generiert!

– unmöglich alle “bei Hand” anzuschauen!

– stattdessen verwenden wir massgeschneiderte **Analyseprogramme**

```
282 void SSDLAnalysis::FillAnalysisTree(){
283   fCounter.fill(fCutnames[0]);
284   bool TChiSlepSnu(false);
285   if (!fIsData){
286     fMsugraCount->Fill(fTR->M0, fTR->M12);
287     if (fTR->process > 0 && fTR->process < 11) fProcessCount[(fTR->process)-1]->Fill(fTR->M0, fTR->M12);
288     for (int i = 0; i < fTR->NGenLeptons; i++) {
289       if ( abs(fTR->GenLeptonID[i]) == 12 || abs(fTR->GenLeptonID[i]) == 14 || abs(fTR->GenLeptonID[i]) == 16) continue;
290       if ( abs(fTR->GenLeptonMID[i]) == 1000024 ) TChiSlepSnu = true;
291     }
292     TChiSlepSnu ? fTChiSlepSnuCount->Fill(fTR->MassGlu, fTR->MassLSP) : fTChiSlepSlepCount->Fill(fTR->MassGlu, fTR->MassLSP);
293   }
294   // initial event selection: good event trigger, good primary vertex...
295   if( !IsGoodEvent() ) return;
296   fCounter.fill(fCutnames[1]);
297   ResetTree();
298
299   // Trigger selection
300   // if(fIsData && FillTriggers(fHLTPaths) == false) return;
301   FillTriggers();
302   fCounter.fill(fCutnames[2]);
303
304   // Do object selections
305   vector<int> selectedMuInd = MuonSelection(           &UserAnalysisBase::IsLooseMu);
306   vector<int> selectedElInd = ElectronSelection(     &UserAnalysisBase::IsLooseEl);
307   vector<int> selectedJetInd = PFJetSelection(20., 2.5, &UserAnalysisBase::IsGoodBasicPFJet);
308   fTnqmus = std::min( (int)selectedMuInd.size(), fMaxNmus );
309   fTnqels = std::min( (int)selectedElInd.size(), fMaxNeles);
310   fTnqjets = std::min( (int)selectedJetInd.size(), fMaxNjets);
311
312   // Require at least one loose lepton
313   if( (fTnqmus + fTnqels) < 1 ) return;
314   fCounter.fill(fCutnames[3]);
315
316   // Event and run info
317   fTRunNumber = fTR->Run;
318   fTEventNumber = fTR->Event;
319   fTLumiSection = fTR->LumiSection;
320
321   if(!fIsData) {
322     fTm0 = fTR->M0;
323     fTm12 = fTR->M12;
324     fTprocess = fTR->process;
325     fTmGlu = fTR->MassGlu;
326     fTmLSP = fTR->MassLSP;
327     TChiSlepSnu ? fTisTChiSlepSnu = 1 : fTisTChiSlepSnu = 0;
328   }
329   else {
330     fTm0 = -1;
331     fTm12 = -1;
332     fTprocess = -1;
333     fTmGlu = -1;
334     fTmLSP = -1;
335     fTisTChiSlepSnu = -1;
336   }
```

# Analyse – das GRID

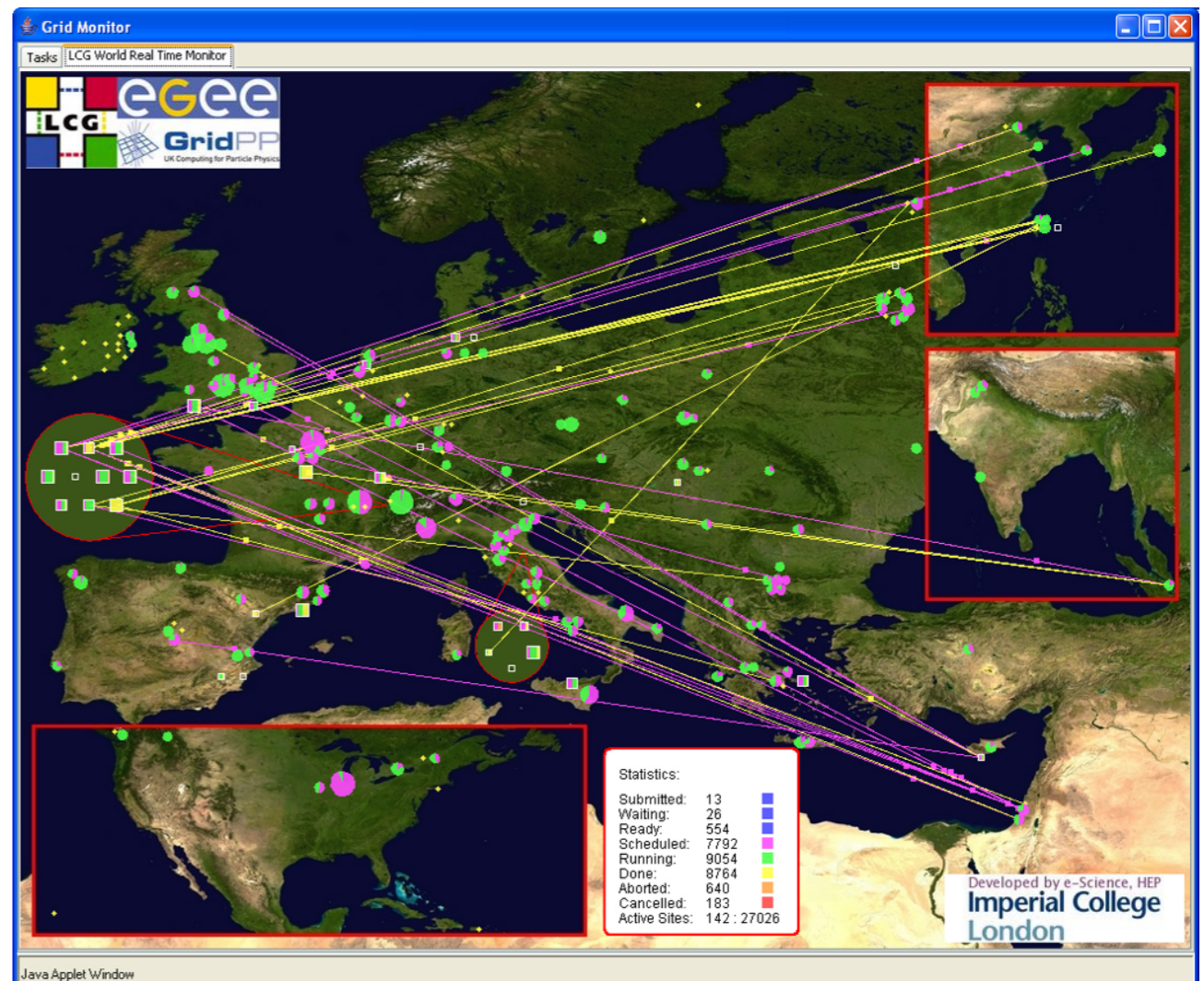
Statt alle Daten zu jedem Physiker zu bringen der sie braucht, bringen wir den Physiker zu “zentral” gespeicherten Datensätzen

– dafür wurde das **LCG – LHC Computing Grid** entwickelt

– Datensätze weltweit gespeichert

– wenn ein Physiker einen Datensatz analysieren will, sendet das System seinen “Job” an die richtige Stelle

– nur das Ergebnis wird zurück-  
gesendet





# Spin-offs

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

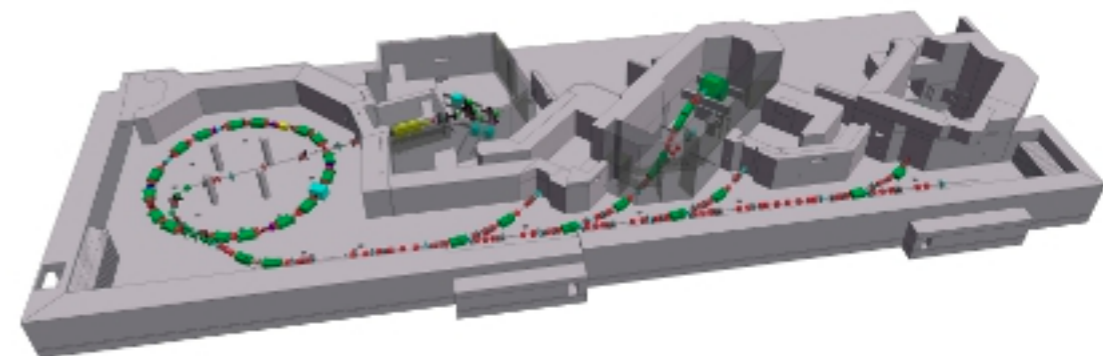
– das **WWW** wurde von Tim Berners-Lee & co. 1990 am CERN erfunden

– 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



**FRAGEN?**