

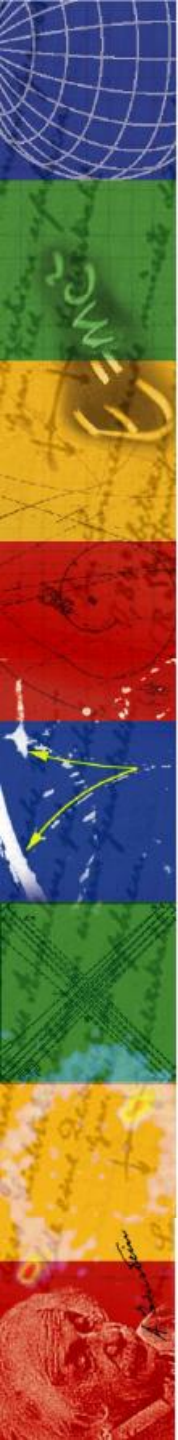
"Hands on Particle Physics"

International Masterclasses

Detektoren – die Augen der Teilchenphysiker



Xavier Prudent



Wie Sieht man die Teilchen ?

Die Teilchenbeschleuniger

Teilchenbeschleuniger als Mikroskope

Sehen = Abbilden

Wurfgeschloß (Projektil)

→ Zielobjekt

→ Nachweis (Detektor)



„Auflösungsvermögen“:

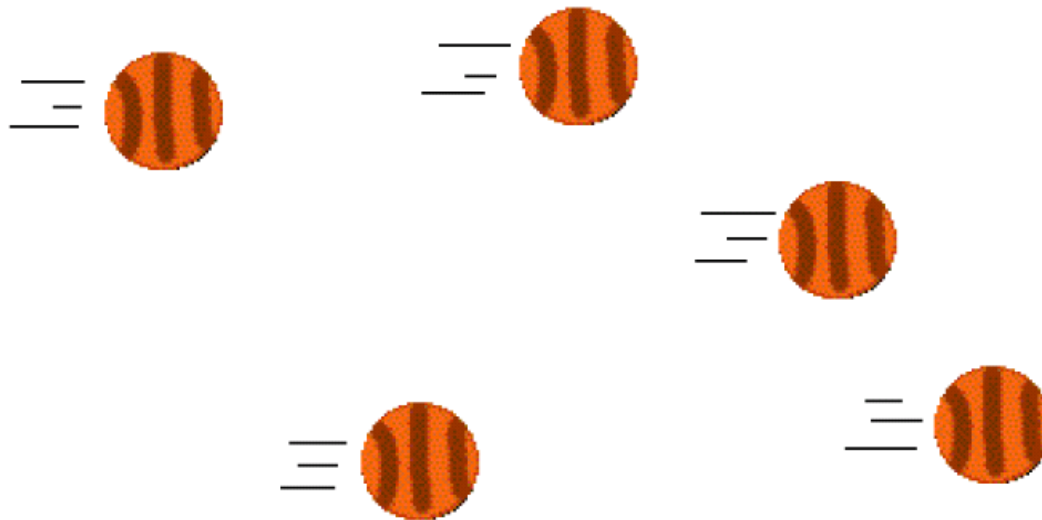
Treffgenauigkeit $\ll$ Größe der Strukturen

Projektilgröße $\ll$ Größe der Strukturen

Unbekanntes Objekt in einer Höhle

- Projektil: Basketbälle

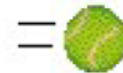
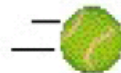
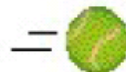
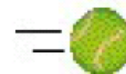
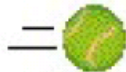
Grosse der
Auflösung:



Unbekanntes Objekt in einer Höhle

- Projektil: Tennisbälle

Grosse der
Auflösung:



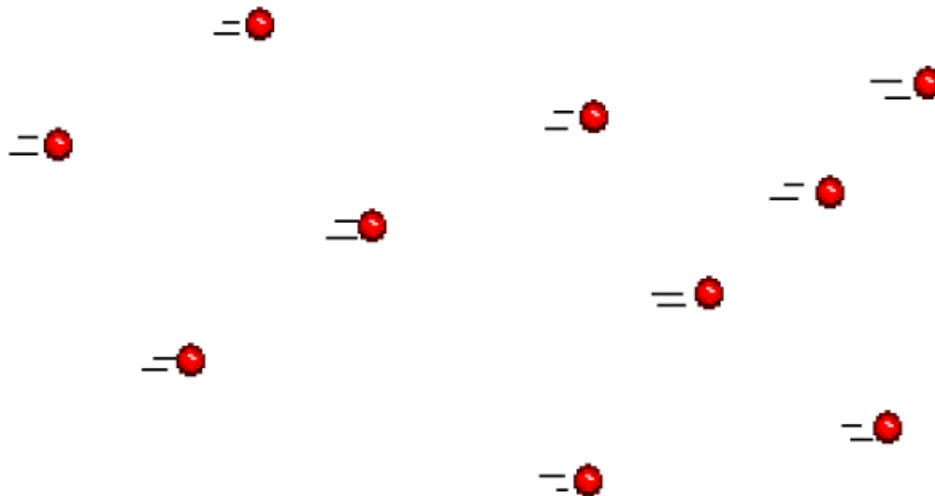
Unbekanntes Objekt in einer Höhle

- Projektil: Murmeln



Winzige Details werden erkennbar

Grosse der
Auflösung: $\updownarrow$



Teilchenbeschleuniger als Mikroskope

„Auflösungsvermögen“:

Treffgenauigkeit $\ll$ Größe der Strukturen

Projektilgröße $\ll$ Größe der Strukturen

$$\text{Treffgenauigkeit} = \frac{200 \text{ fm}}{\text{Energie}_{\text{MeV}}}$$

Kleine Genauigkeit $\rightarrow$ hohe Energie notwendig

0,2 fm bei $E = 1 \text{ GeV} = 1000 \text{ MeV}$

200 fm bei $E = 1 \text{ MeV} = 1000 \text{ keV}$

0,2 μm bei $E = 1 \text{ eV}$

?

Nützliche Einheiten für Teilchen

$$\text{Treffgenauigkeit} = \frac{200 \text{ fm}}{\text{Energie (MeV)}}$$

- Größe:

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) = 10^{-15} m (1 μm = 1.000.000.000 fm)

- Energie:

1 ElektronVolt = 1eV (1eV = $1,602176487 \cdot 10^{-19}$ J)

1 keV = 10^3 eV Kiloelektronenvolt

1 MeV = 10^6 eV Megaelektronenvolt

1 GeV = 10^9 eV Gigaelektronenvolt

1 TeV = 10^{12} eV Teraelektronenvolt

1 KiloElektronVolt = 1 keV = 1.000 eV

1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1.000.000 eV

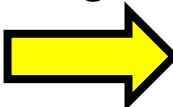
1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1.000.000.000 eV

1 GeV: „viel“ für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig:
könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze 0,000.000.0001 Sekunden
zum Leuchten bringen

Teilchenphysik = Hochenergiephysik

Forscher nutzen Teilchenstrahlen höchster Energie denn mit steigender Energie ($\sim$ Geschwindigkeit, Impuls p) der Projektile steigt

Die Fähigkeit, kleine Strukturen Δx zu erkennen:

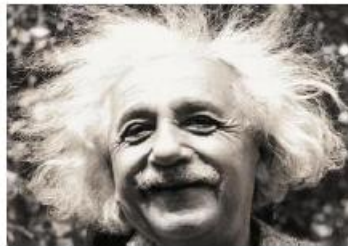
 $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$ (W. Heisenberg)

$$\text{Treffgenauigkeit} = \frac{200 \text{ fm}}{\text{Energie (MeV)}}$$

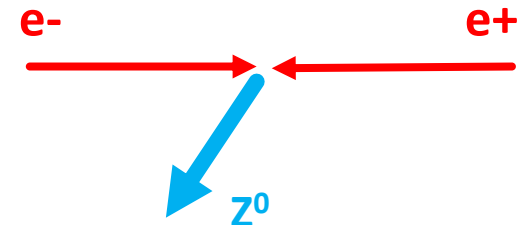


Die Fähigkeit, neue Teilchen zu erzeugen:

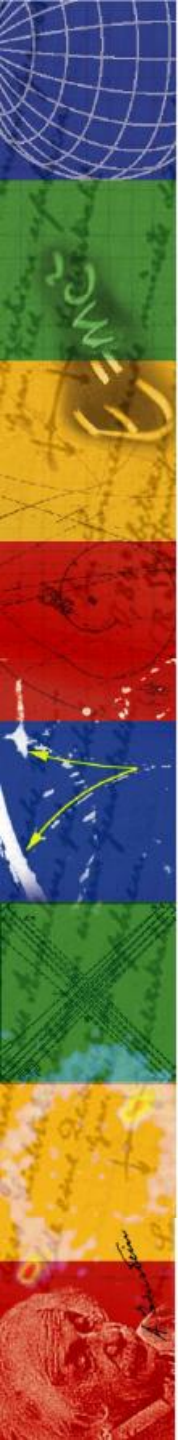
$$E = \gamma mc^2 \text{ (A. Einstein)}$$



Beispiel: $e^- e^+ \rightarrow Z^0$



180000 x schwerer als
ein Elektron

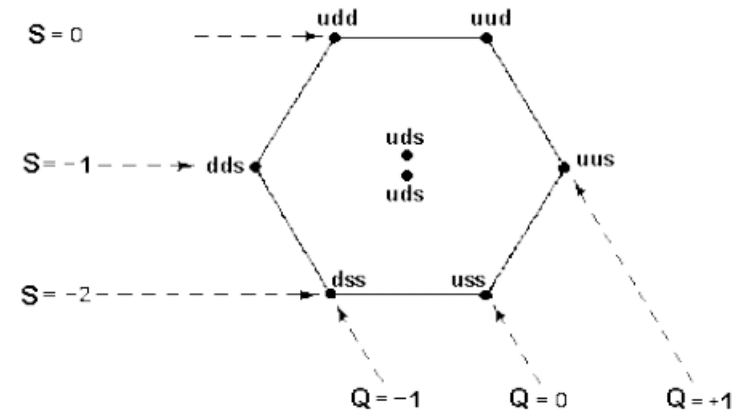
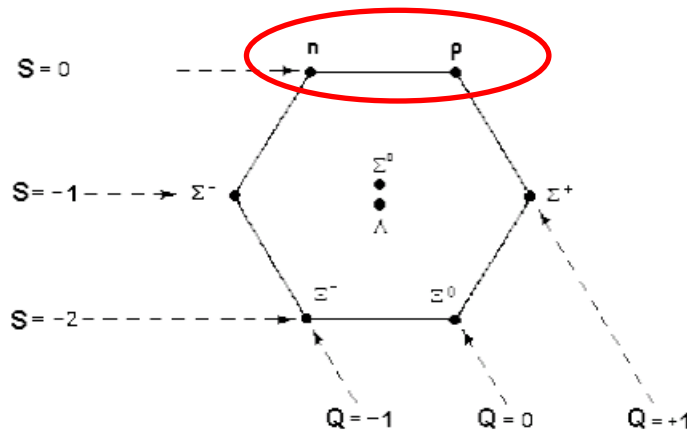


Wir können nun Teilchen „sehen“

Was haben wir dann gesehen... ?

Protonen und Neutronen sind nicht elementar!

Indirekte Hinweise: Ordnungsschema (60er Jahre)



↔ Untersuchung von Mendeleiev (Tabelle von Elementen)

Direkter Beweis:

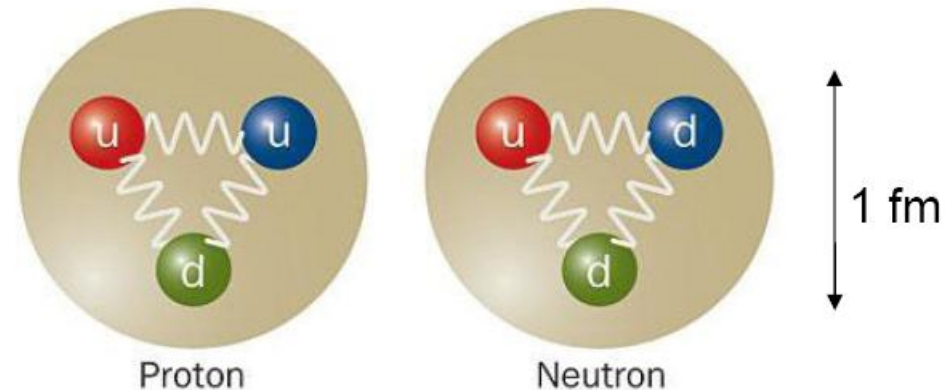
Beschuss mit Elektronen aus Protonen → „Quarks“

1970: Stanford (Kalifornien) ; 1989: DESY (Hamburg)

Energie $\gg 0.2$ GeV

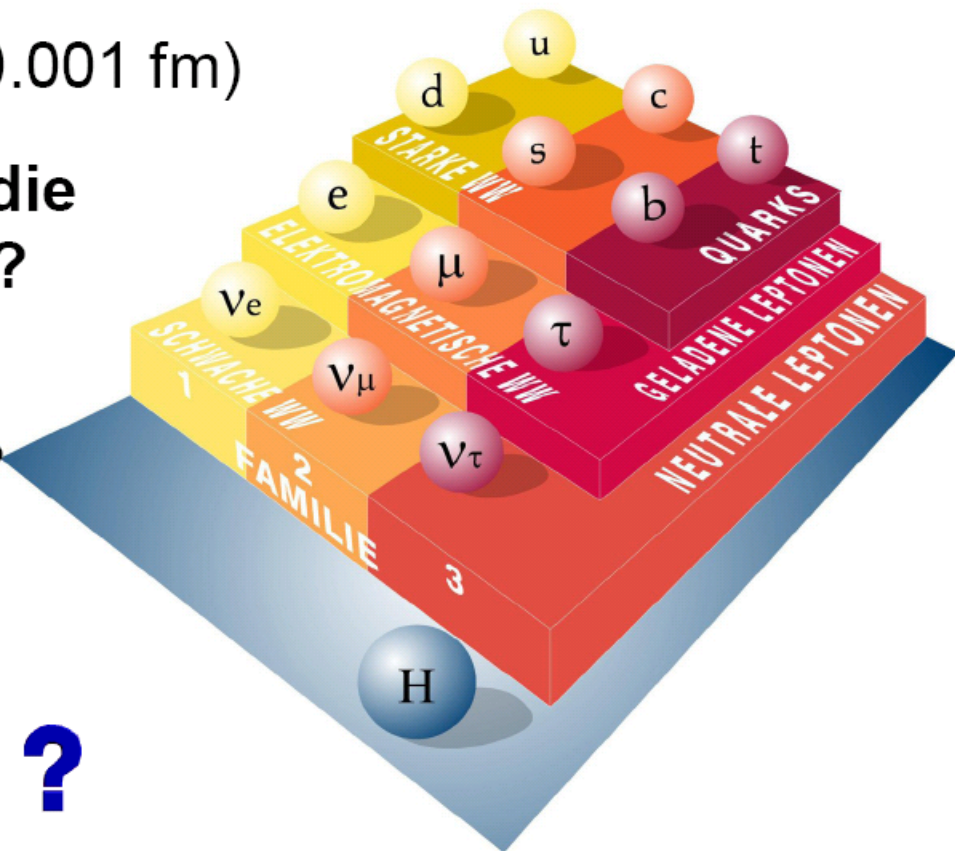
→ Treffgenauigkeit:

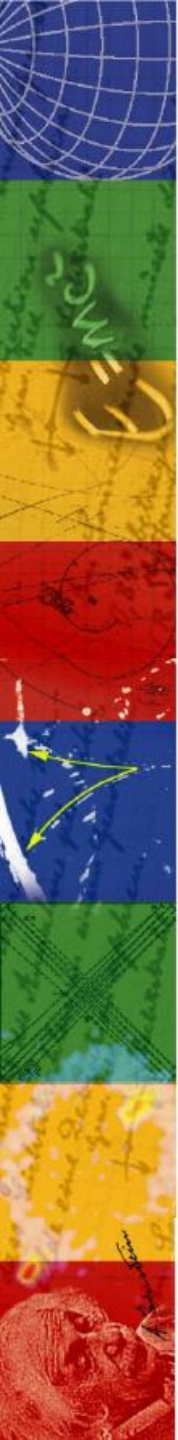
$\ll 1$ fm (10^{-15} m)



Das vollständige Set der Bausteinteilchen

- **Fundamentale Bausteine der Materie:**
 - Elektron e , Up-Quark u , Down-Quark d zu Kernen oder Atomen gebunden
 - Neutrino ν , ungebunden
 - Alle punktförmig (< 0.001 fm)
- **Welche Kräfte halten die Bausteine zusammen?**
- **Wieso gibt es genau drei Teilchenfamilien?**
- **Was ist der Ursprung der Teilchenmasse?**





Teilchen sind **klein**, für hohe **Auflösung**,
sind **hochenergetische** Strahlen notwendig

$$\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$$

Wie schafft man Hochenergie Teilchenstrahlen ?

Die Mikroskope der Teilchenphysik: Beschleuniger

Haben Sie auch daheim!

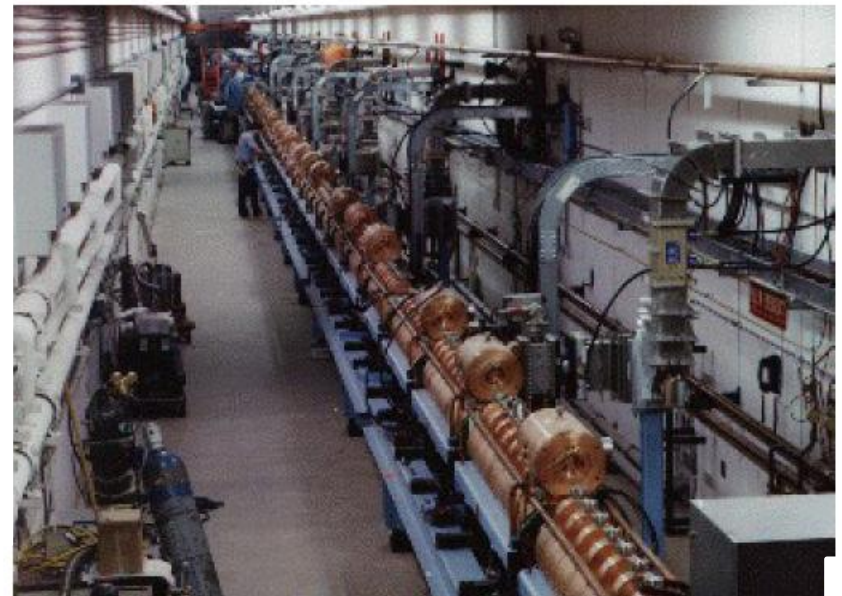
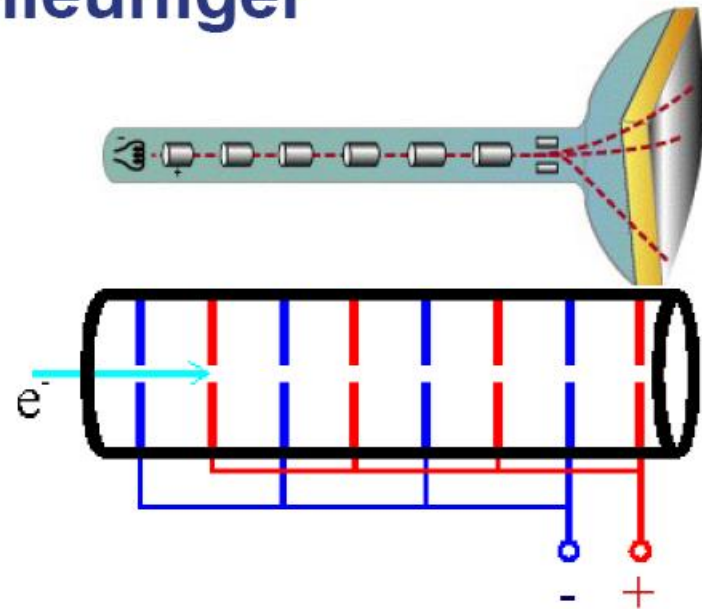
Funktionsprinzip:

- **Abstoß**
- **Anziehung**

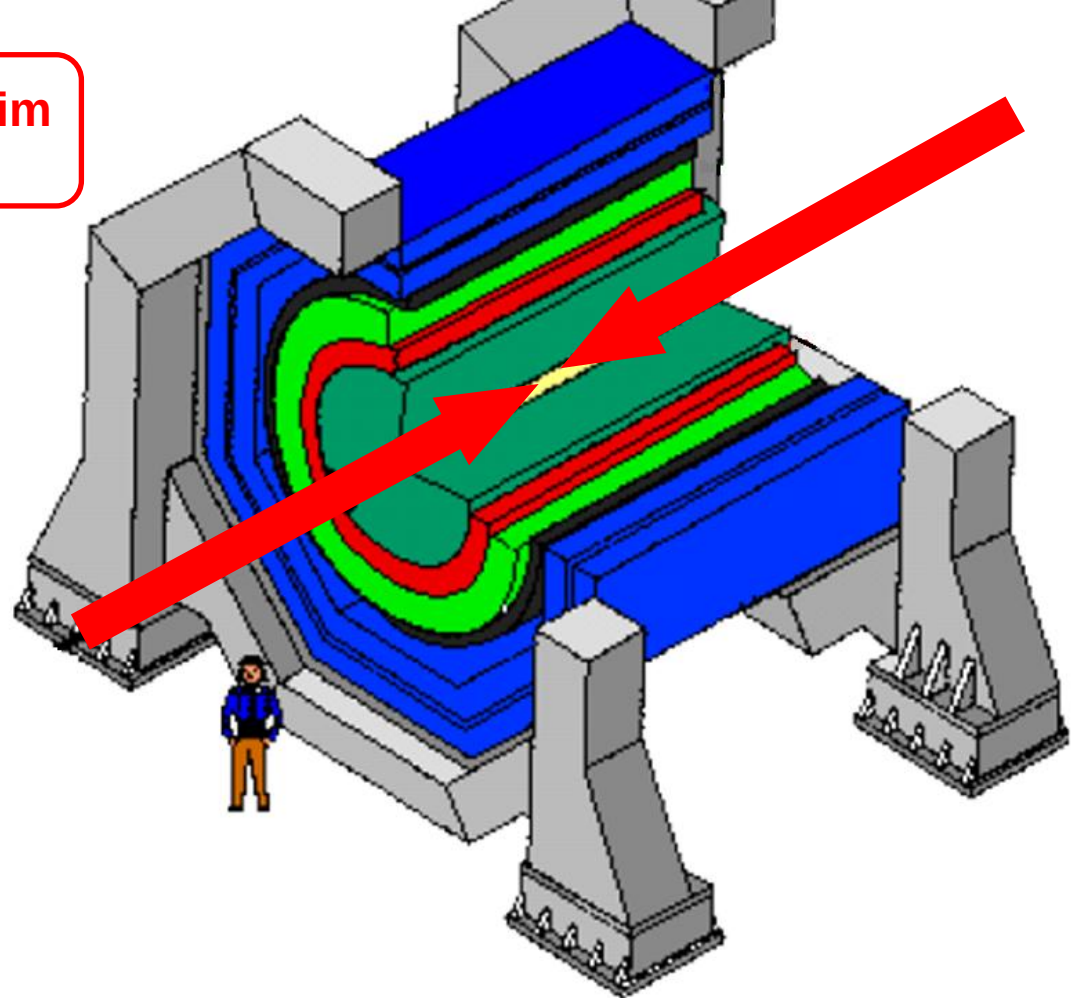
Linearbeschleuniger:

Fermilab, Chicago (in Betrieb)

DESY, Hamburg (in Planung)

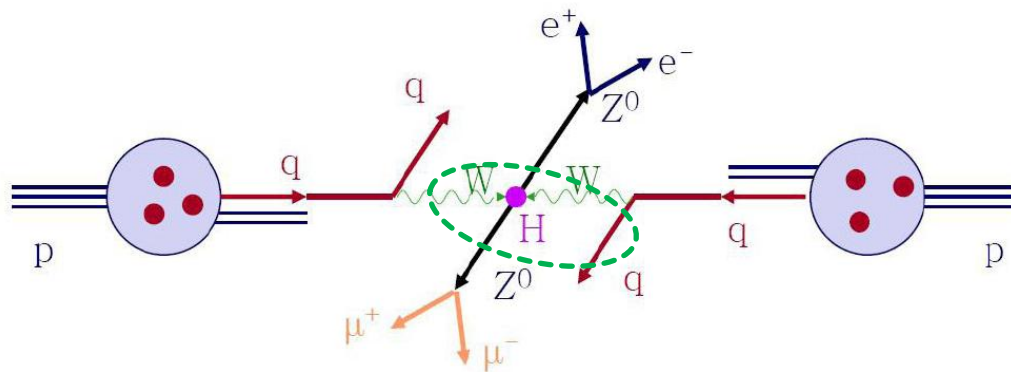
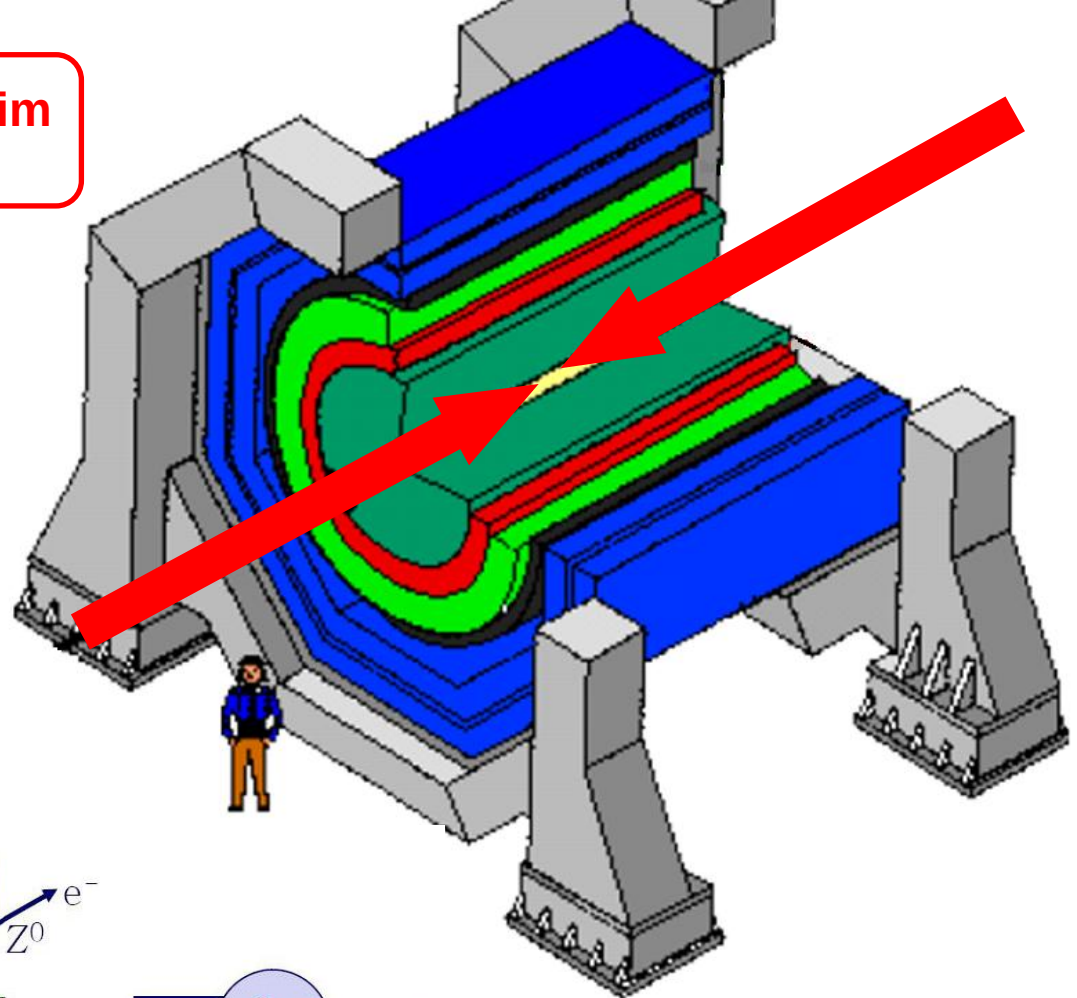


**Kollision von Strahlen im
Mitte des Detektors**



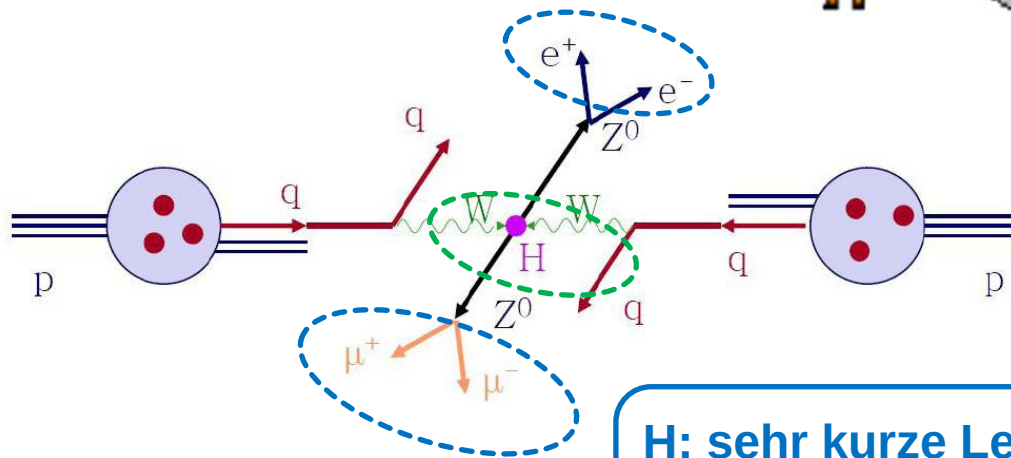
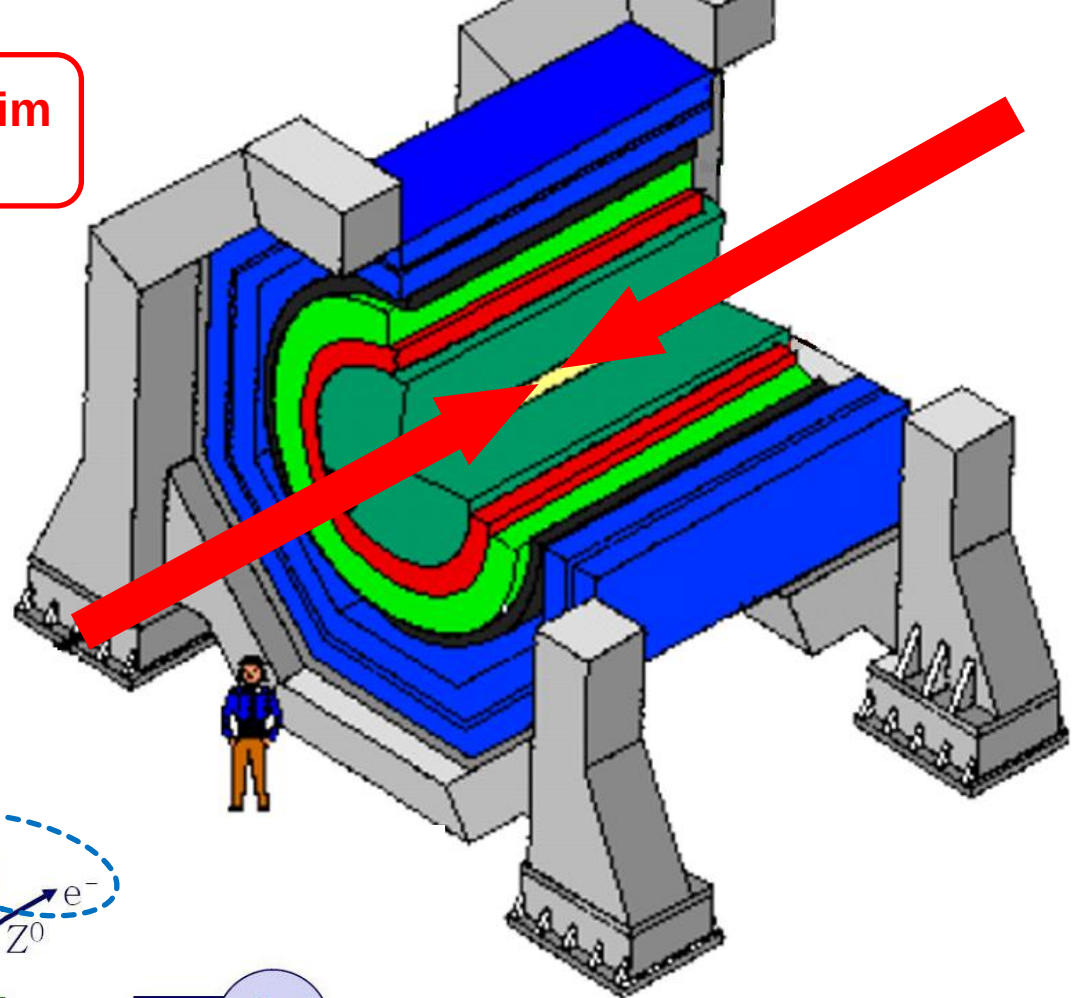
Kollision von Strahlen im Mitte des Detektors

Erzeugung von
schweren
interessanten Teilchen
möglich (zb: Higgs(s))



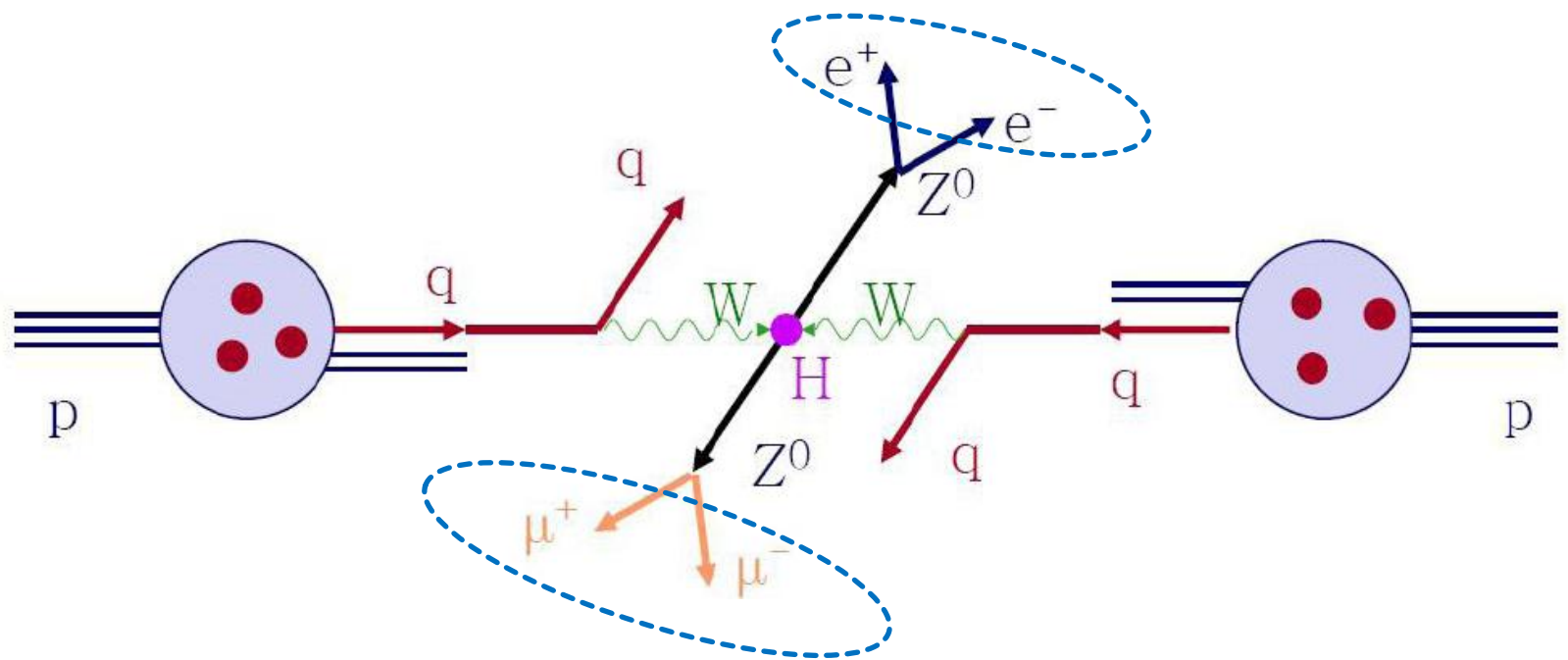
**Kollision von Strahlen im
Mitte des Detektors**

Erzeugung von
schweren
interessanten Teilchen
möglich (zb: Higgs(s))

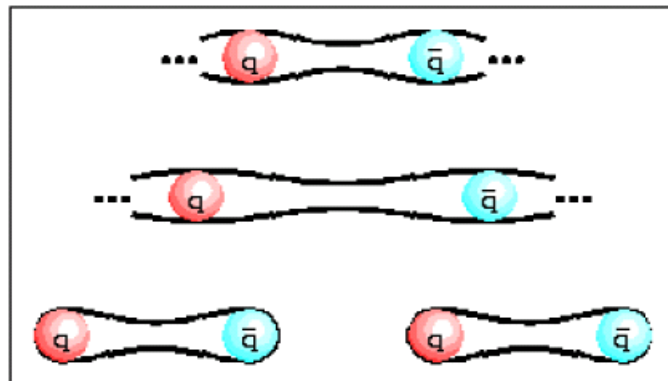
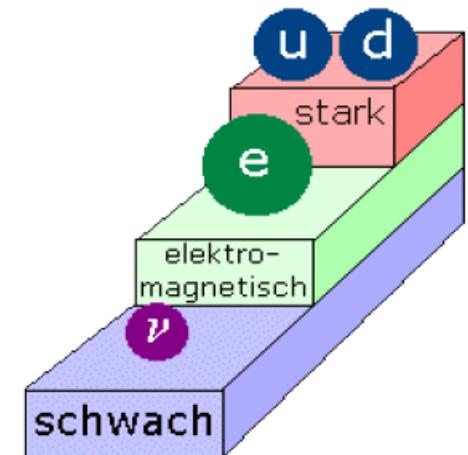


**H: sehr kurze Lebensdauer !
Nur Zerfallsprodukt von Detektor gesehen
→ Signatur der Erzeugung von H**

Wie Erkennt man Elektronen, Myonen, u.s.w im Detektor ?

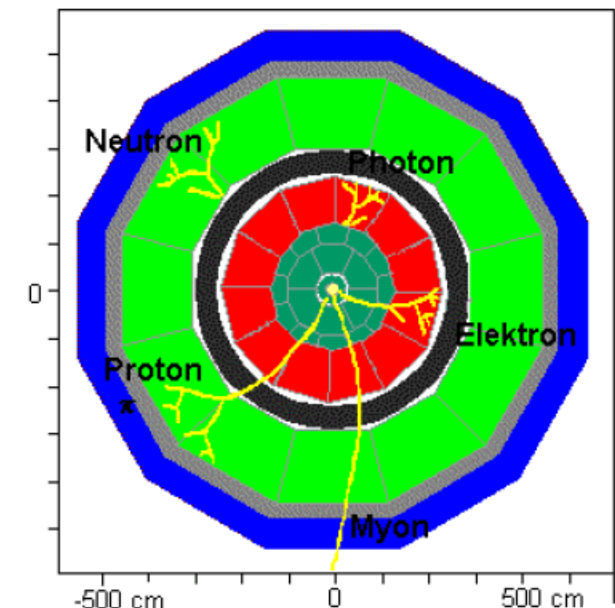


- Die unterschiedlichen Ladungen bewirken unterschiedliche Kräfte zwischen Teilchen
- Sie erklären
 - das unterschiedliche Verhalten in den Detektoren
 - die Bildung von Hadronjets aus Quarks

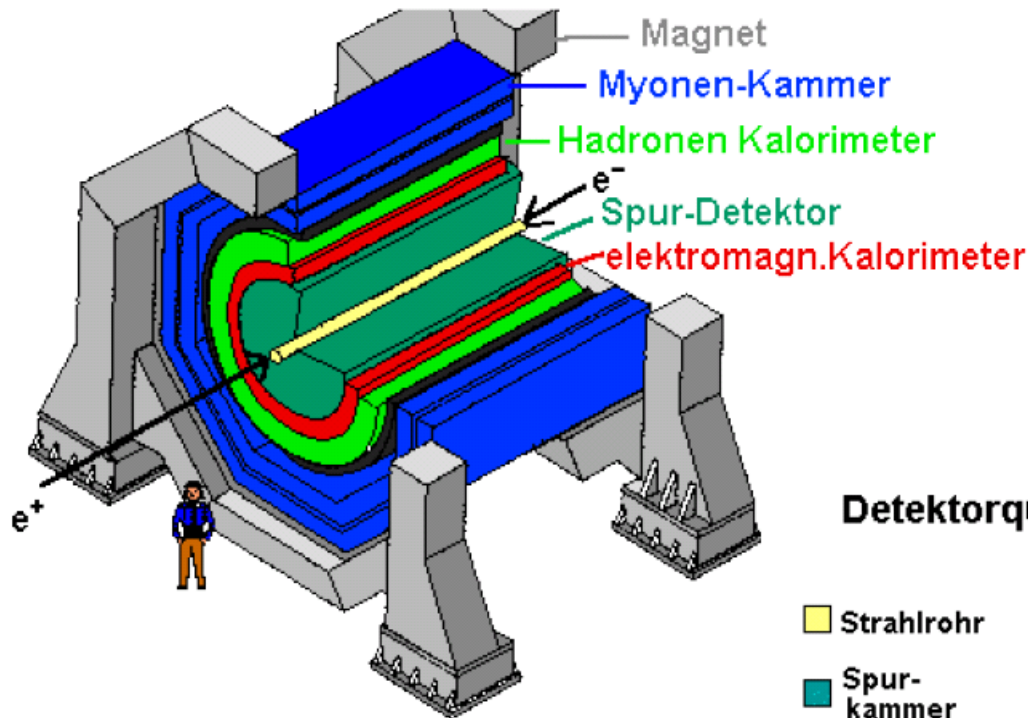


Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

- Strahlrohr
- Spur-kammer
- mag. Spule
- elektr.mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer



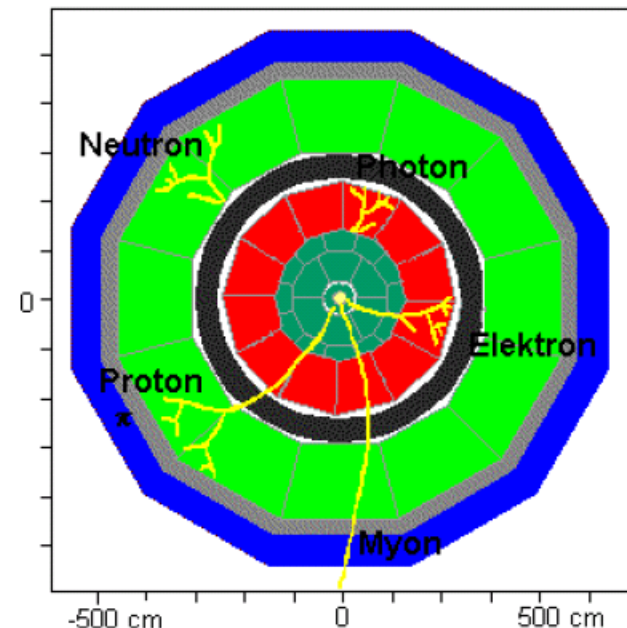
Teilchenidentifikation = Detektivarbeit



- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten
- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

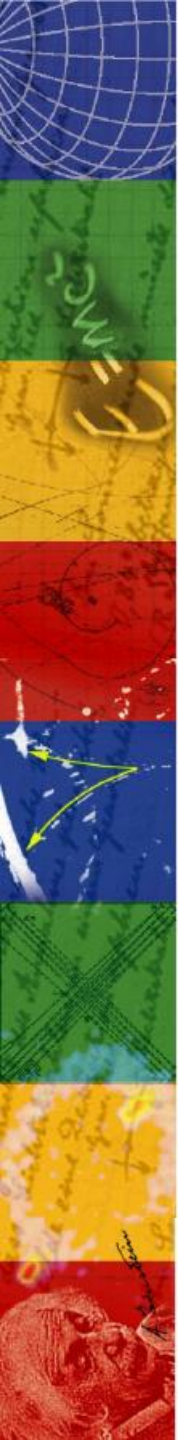
Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

- Strahlrohr
- Spur-kammer
- mag. Spule
- elektr.mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer



Feststellbare
Teilcheneigenschaften:

- aus Quarks („Hadronen“)
- elektr. geladen / ungeladen
- leicht / schwer



Ein Beispiel von Beschleuniger..?

Collider am CERN

LEP (e+e-):

1989-1995: 45+45 GeV

1995-2000:

bis 104+104 GeV

LHC (pp):

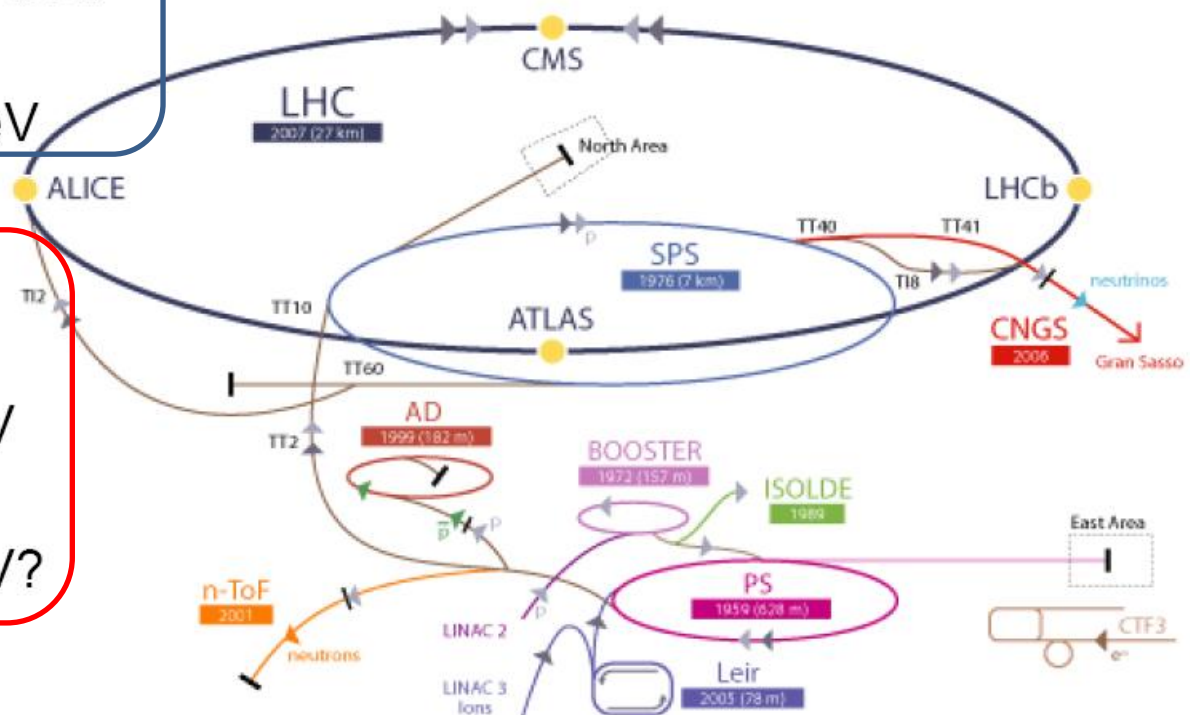
Seit 2010:

3500+3500 GeV

> 2013:

7000+7000 GeV?

CERN Accelerator Complex



▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ $\bar{p}$ (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron

↔ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility

CNGS CERN Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

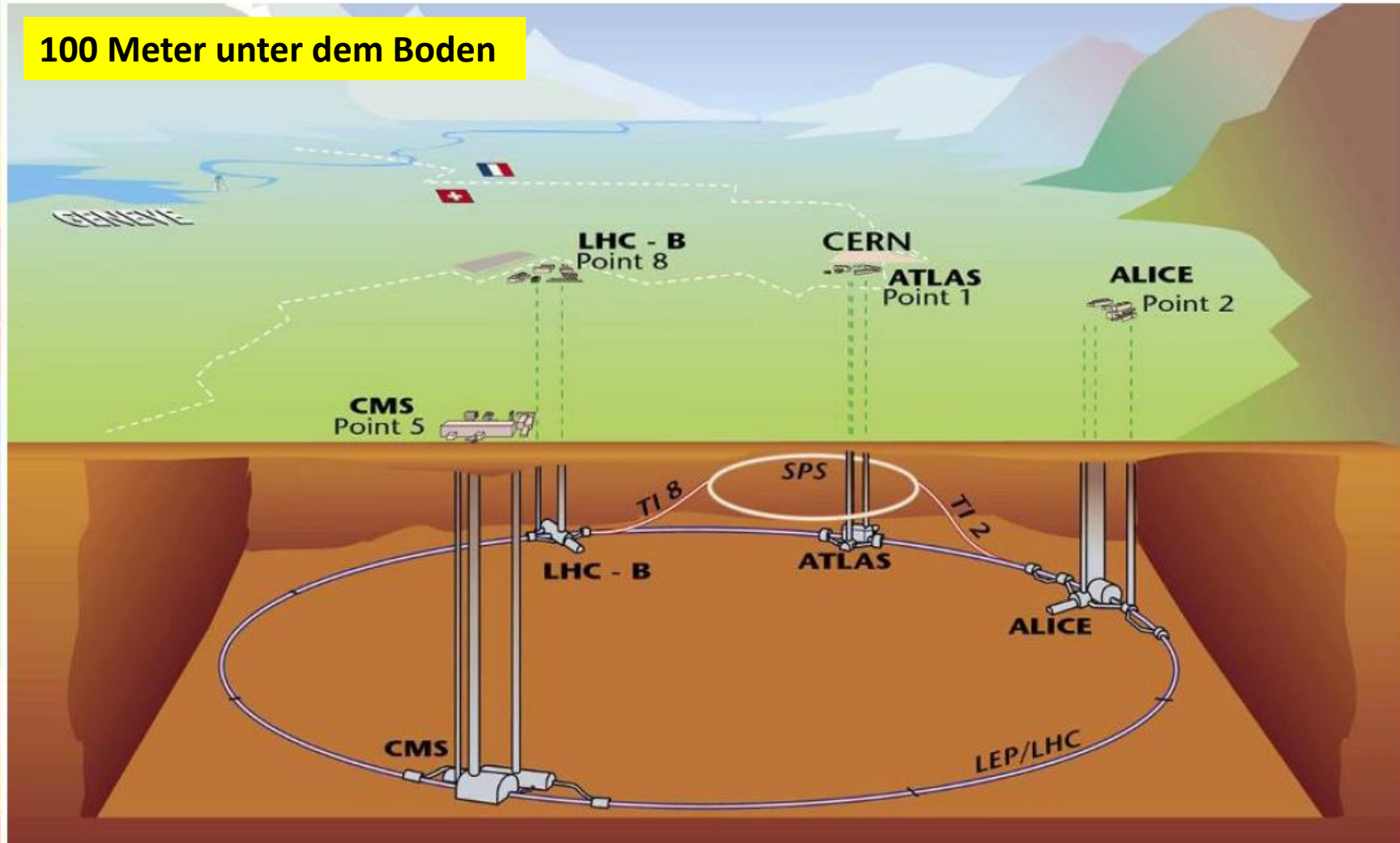
LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

**Mehrere (nicht lineare)
Beschleuniger...**

Der Large Hadron Collider LHC

Kollision von 7 TeV Protonen mit 7 TeV Protonen

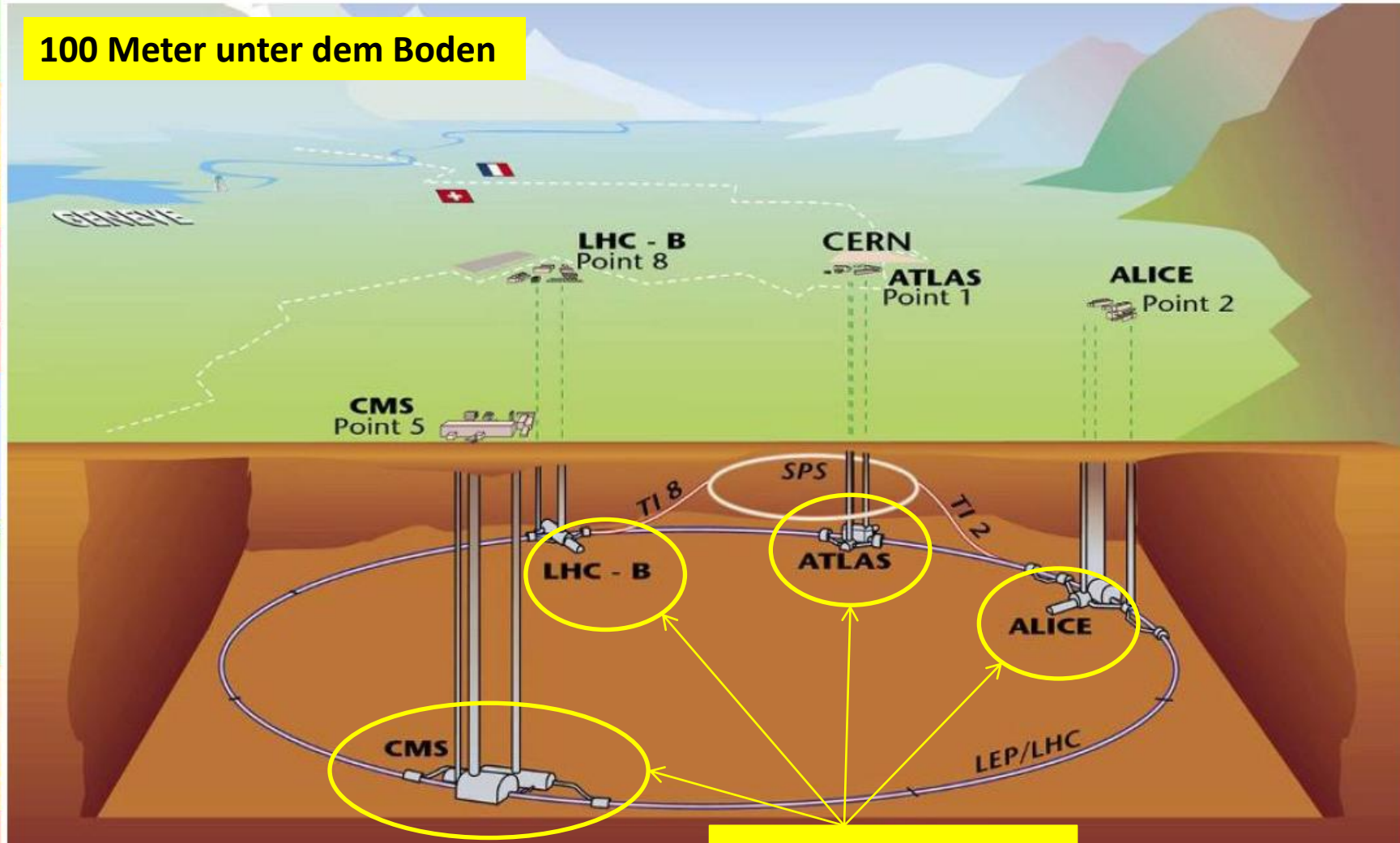
100 Meter unter dem Boden



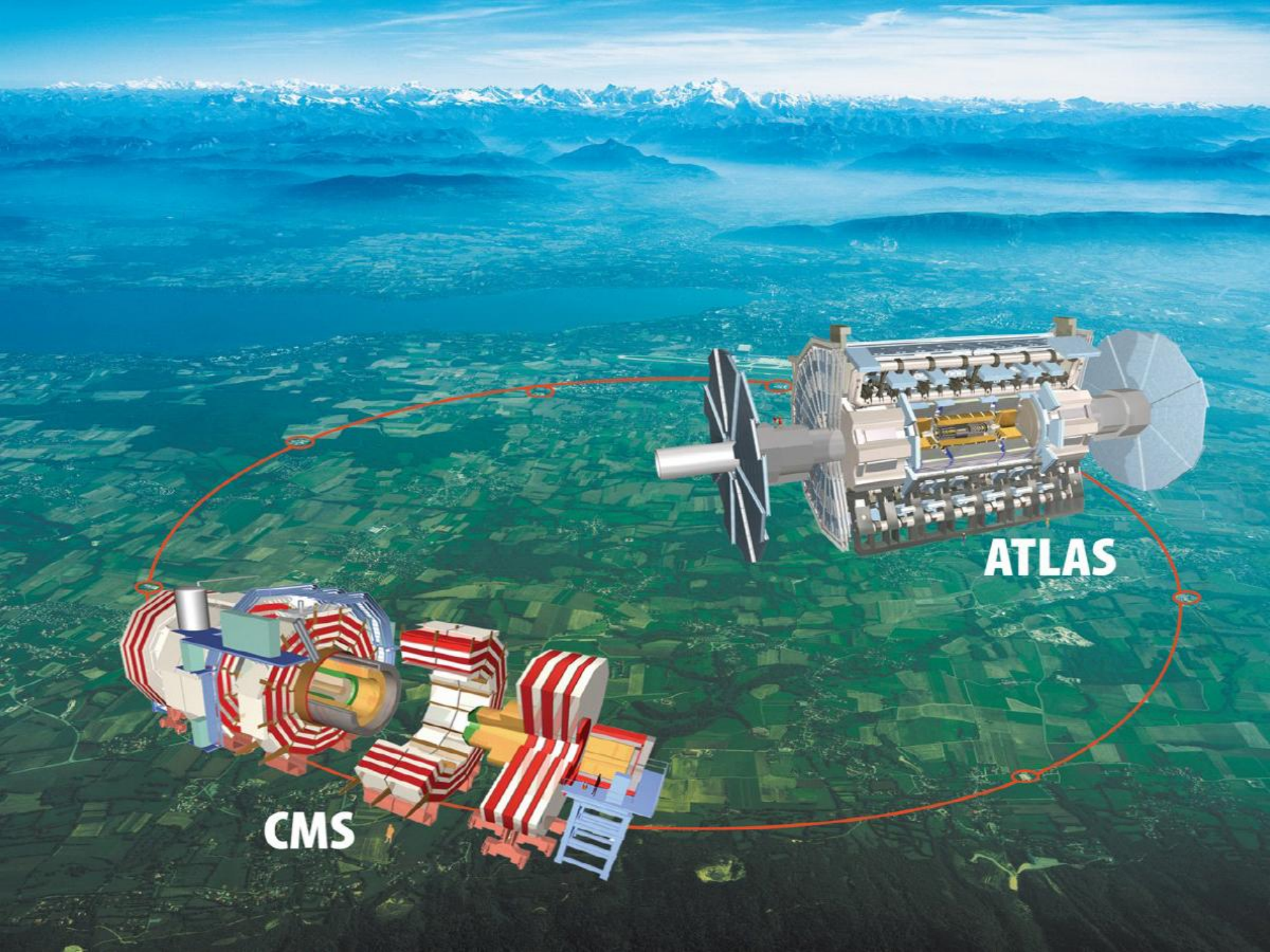
Der Large Hadron Collider LHC

Kollision von 7 TeV Protonen mit 7 TeV Protonen

100 Meter unter dem Boden

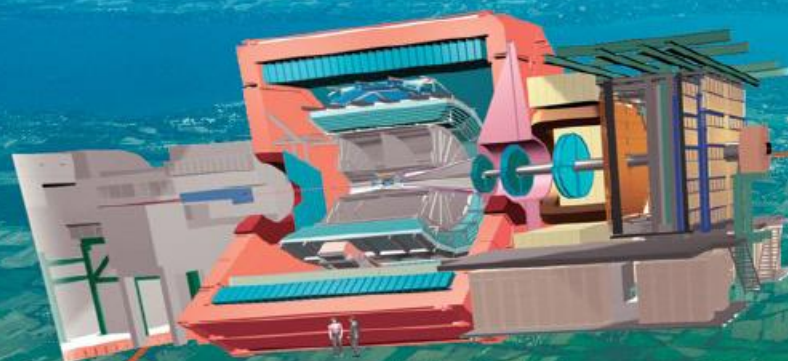


4 Experiments



ATLAS

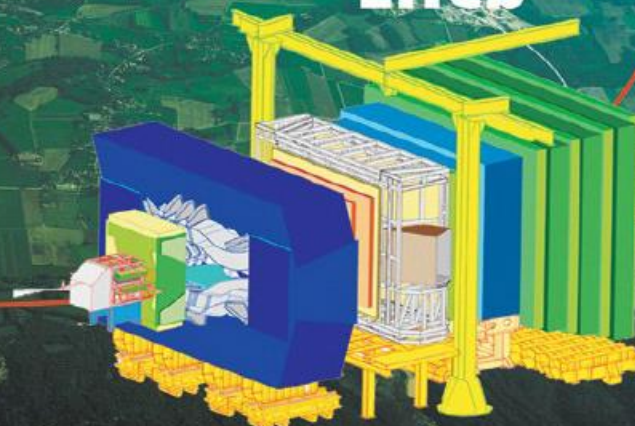
CMS



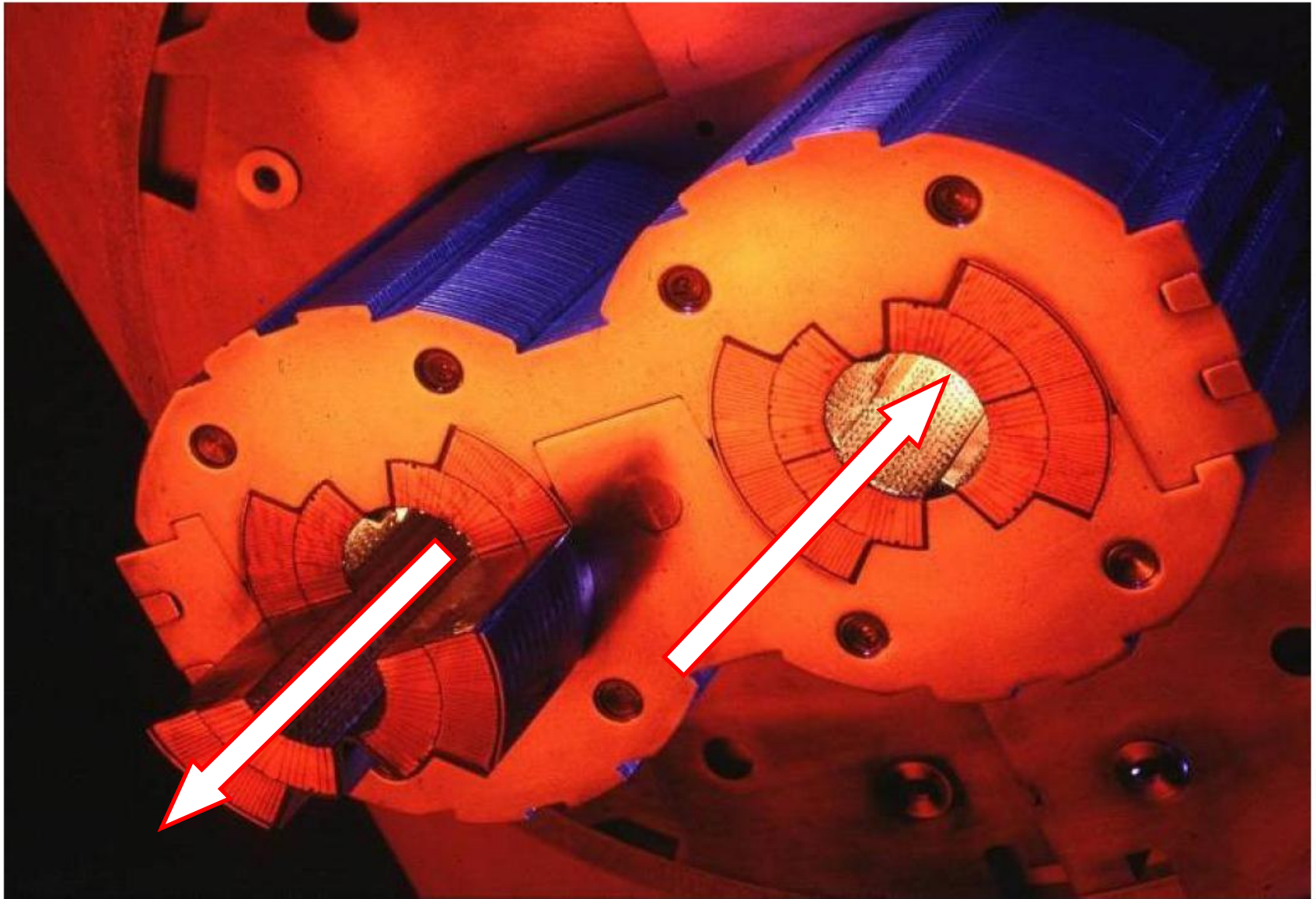
ALICE



LHCb



Das LHC „Rohr“



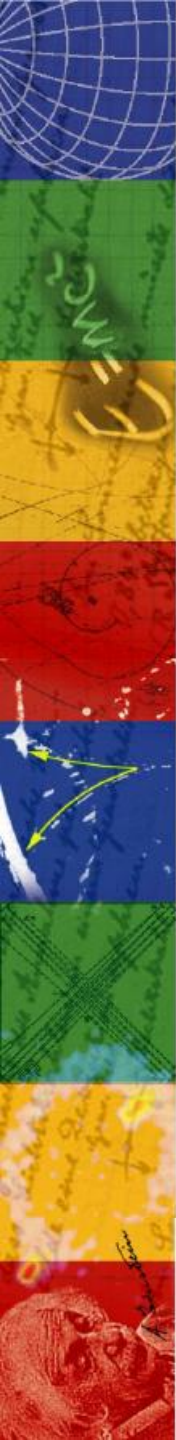
Ein Blick in den Tunnel

Der LHC verschafft uns erstmals Zugang zu

- Strukturen und Abständen von 10^{-19} Metern
- Massen auf der Teraskala ($E = mc^2 = 1\text{TeV}$)

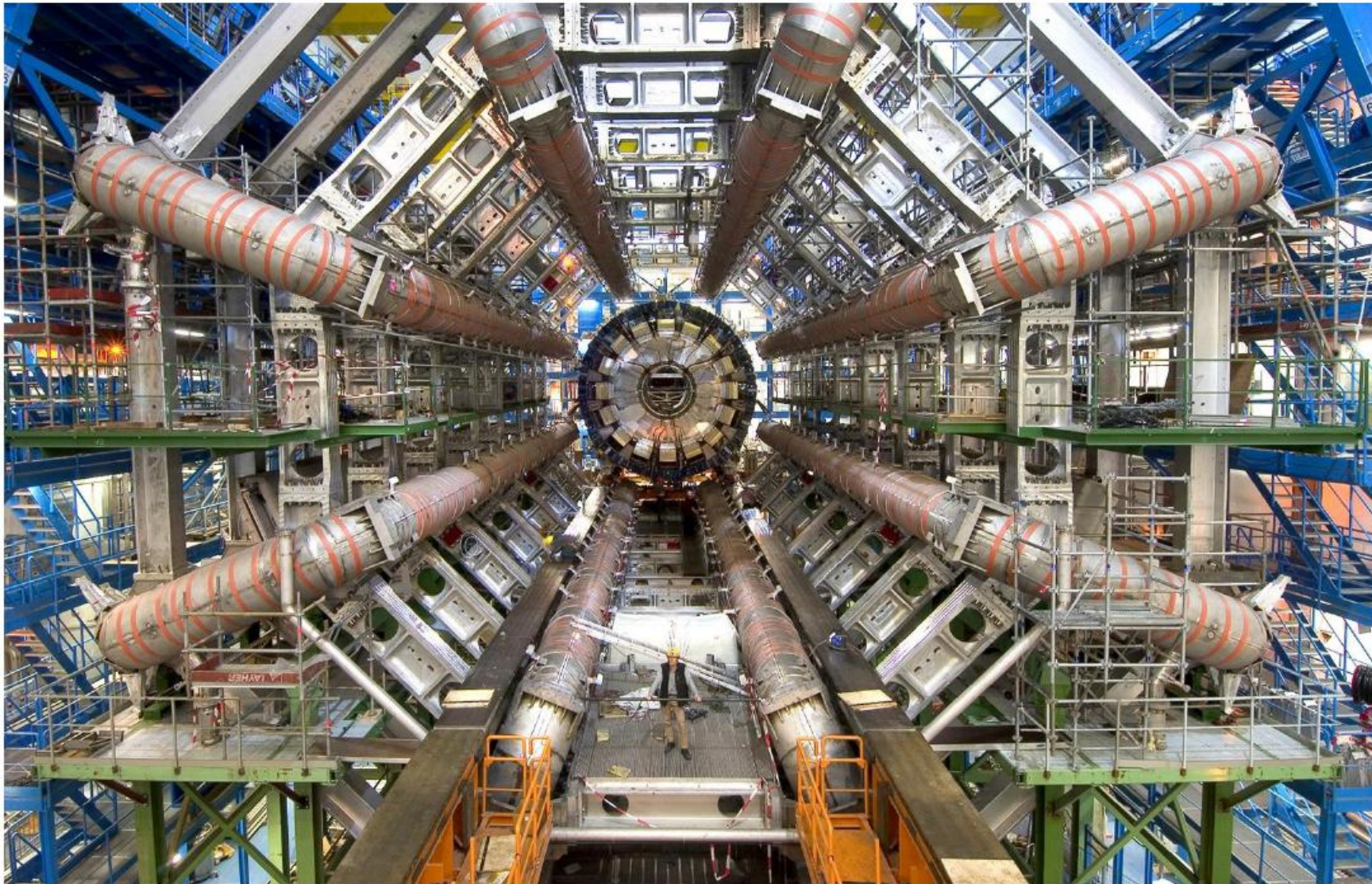
→ Entwicklung des Universums nach dem Urknall ?
von 0,000.000.000.001 s
bis 0,000.01 s

Erste Kollisionen bei 0,9 TeV am 23.11.09



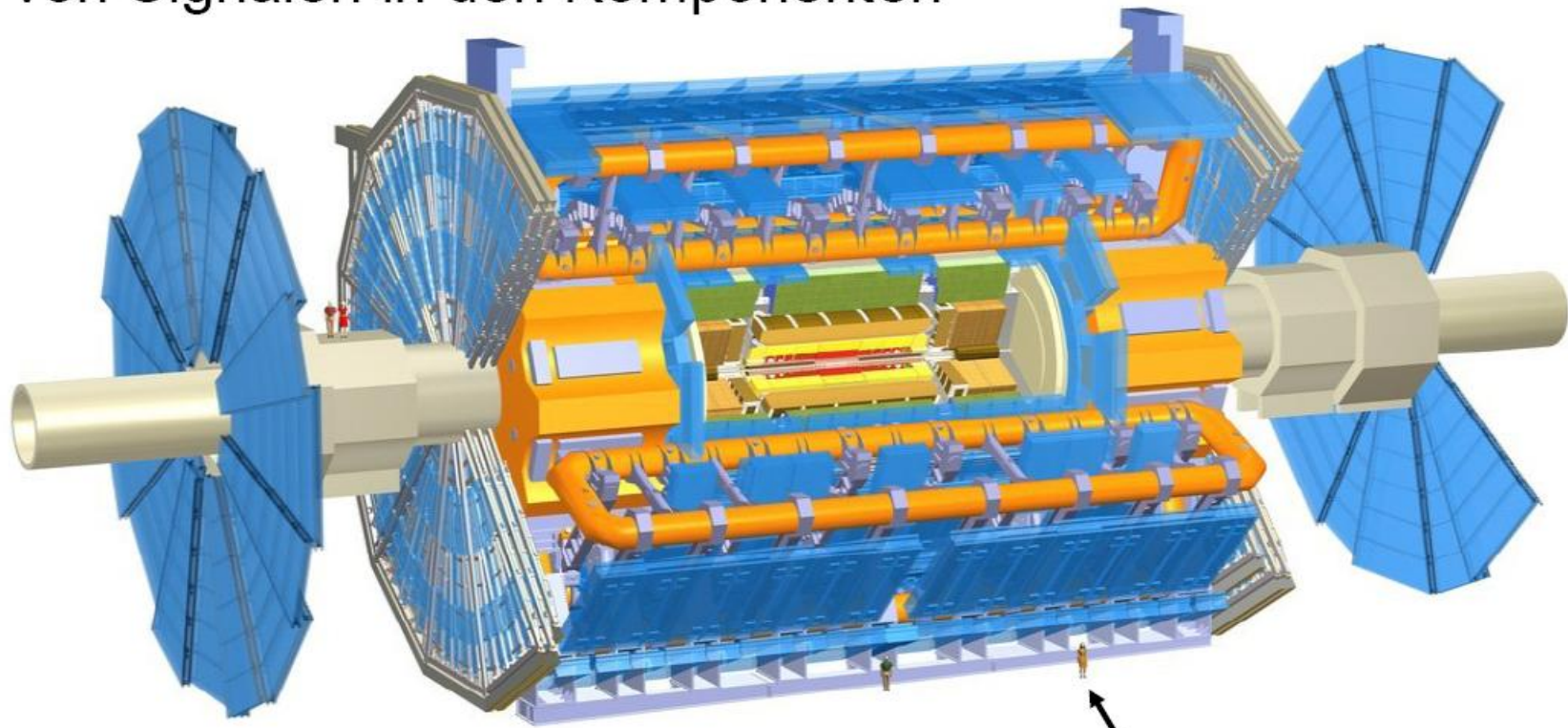
Ein Beispiel von Detektor..?

Der ATLAS Detektor



Hier in Dresden: ATLAS Experiment

Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten



Zwiebelschalenartiger Aufbau
verschiedener Komponenten

Größenvergleich

Die internationale ATLAS Kollaboration

ATLAS Kollaboration

(Status April 2008)

37 Länder
167 Institute (14 aus Deutschland)
2200 Wissenschaftliche Autoren insgesamt
(1750 mit PhD)

170 Universitäten
und Institute
aus 40 Ländern

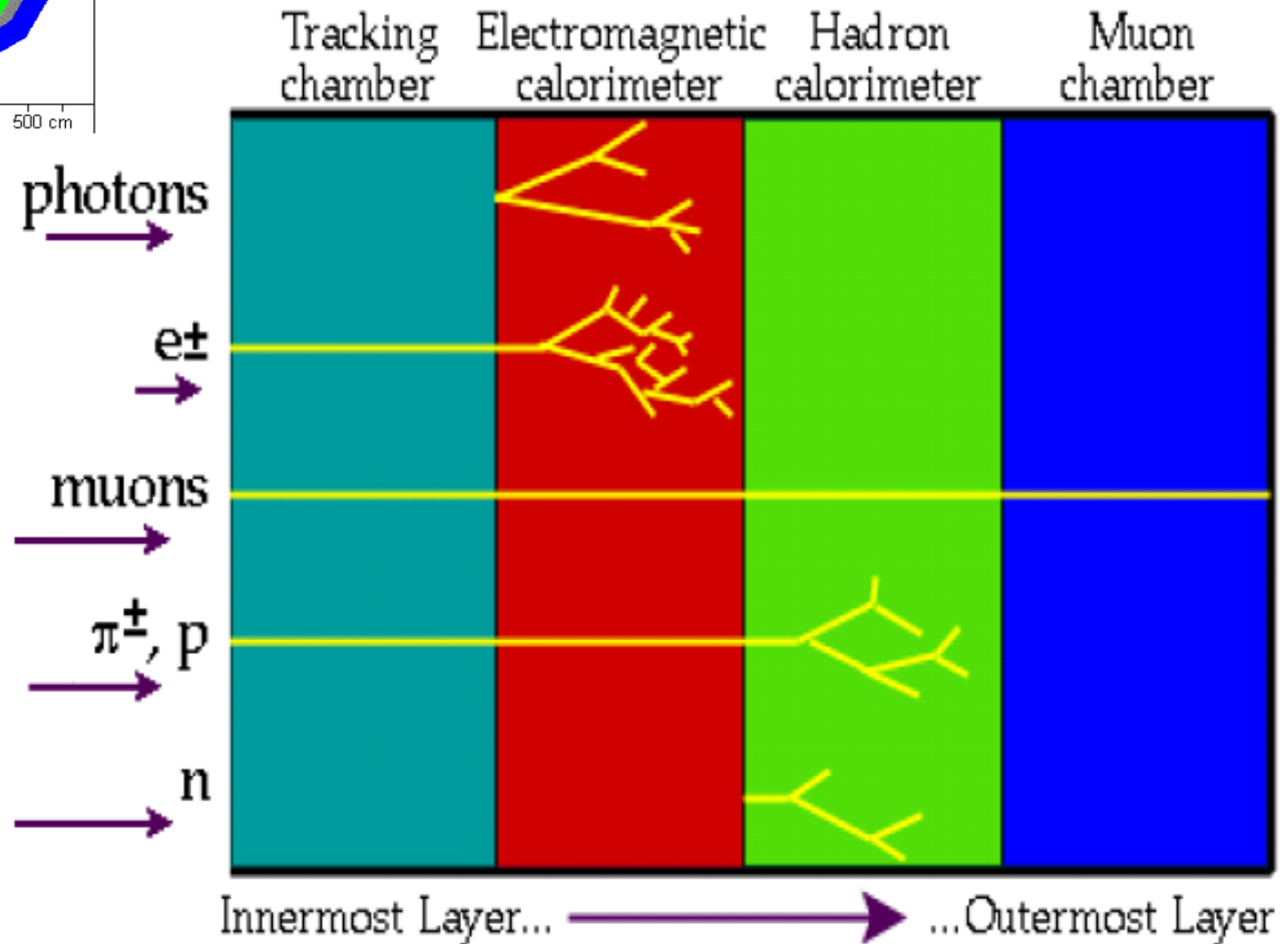
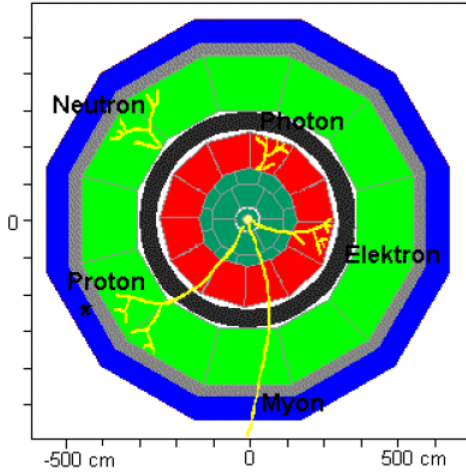


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



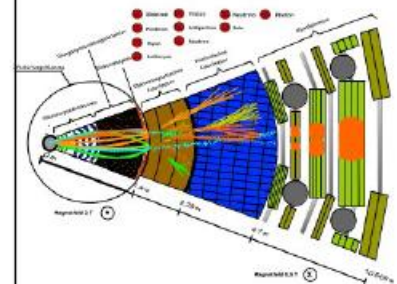
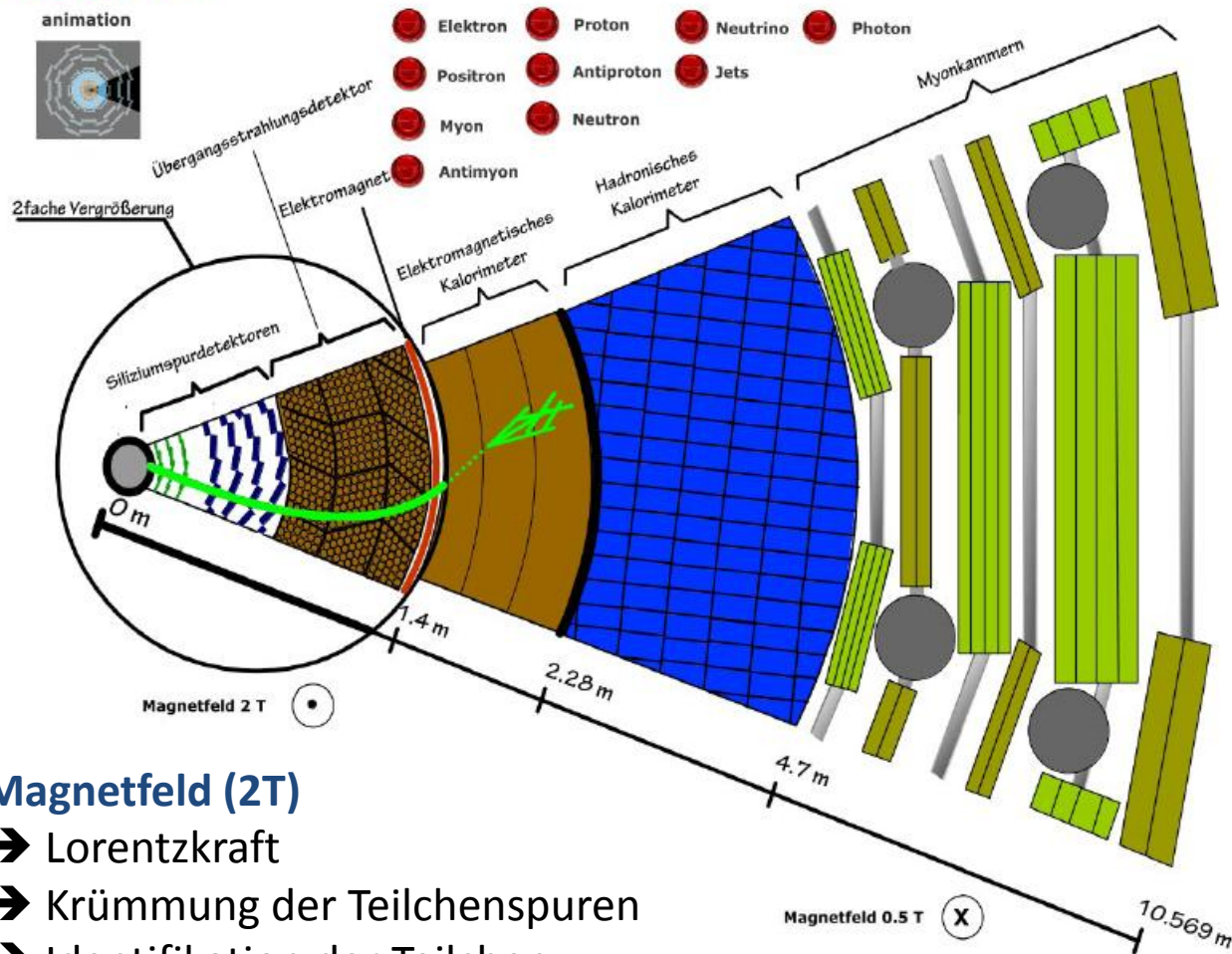
Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, **HU Berlin**, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, **Bonn**, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, **DESY**, **Dortmund**, **TU Dresden**, JINR Dubna, Duke, Frascati, **Freiburg**, Geneva, Genoa, **Giessen**, Glasgow, **Göttingen**, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, **Heidelberg**, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, **Mainz**, Manchester, **Mannheim**, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, **Munich LMU**, **MPI Munich**, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, **Siegen**, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, **Wuppertal**, Yale, Yerevan

ATLAS Detektor: Zwiebelschalenartiger Aufbau

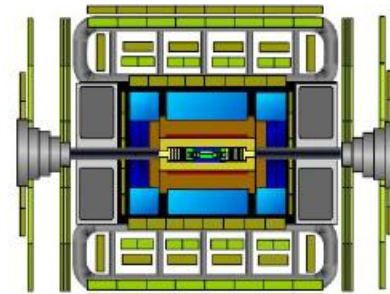


Schnitt durch einen Sektor des ATLAS Detektors

ATLAS



Seitenansicht



Querschnittsansicht

Magnetfeld (2T)

- Lorentzkraft
- Krümmung der Teilchenspuren
- Identifikation der Teilchen

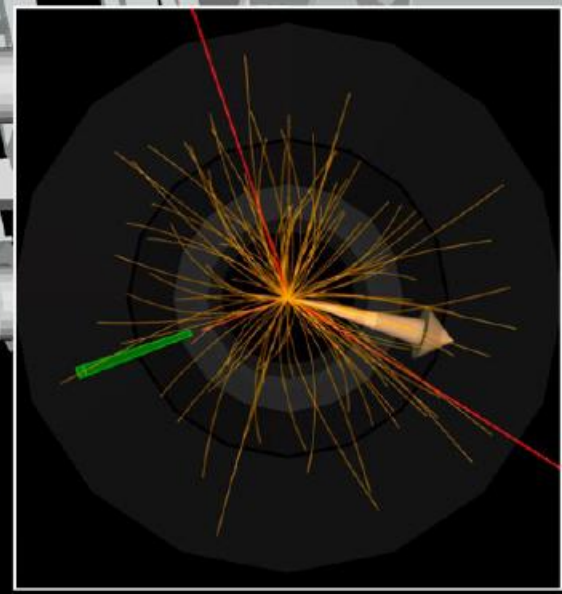
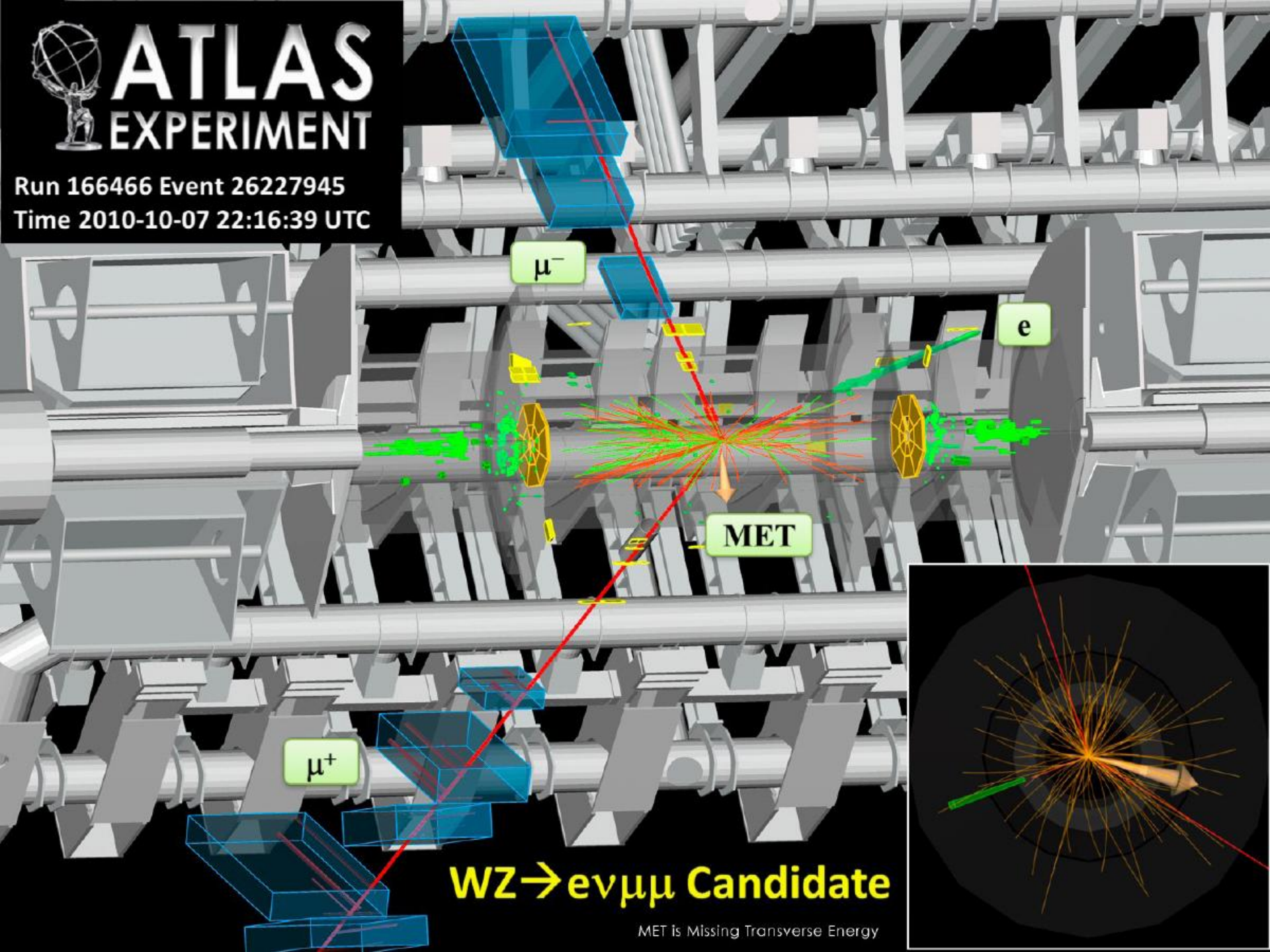
Created by Jeřábek, Jende 2010



ATLAS EXPERIMENT

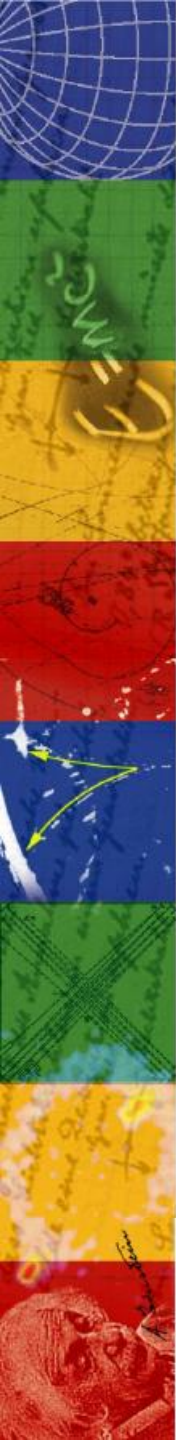
Run 166466 Event 26227945

Time 2010-10-07 22:16:39 UTC



$WZ \rightarrow e\nu\mu$ Candidate

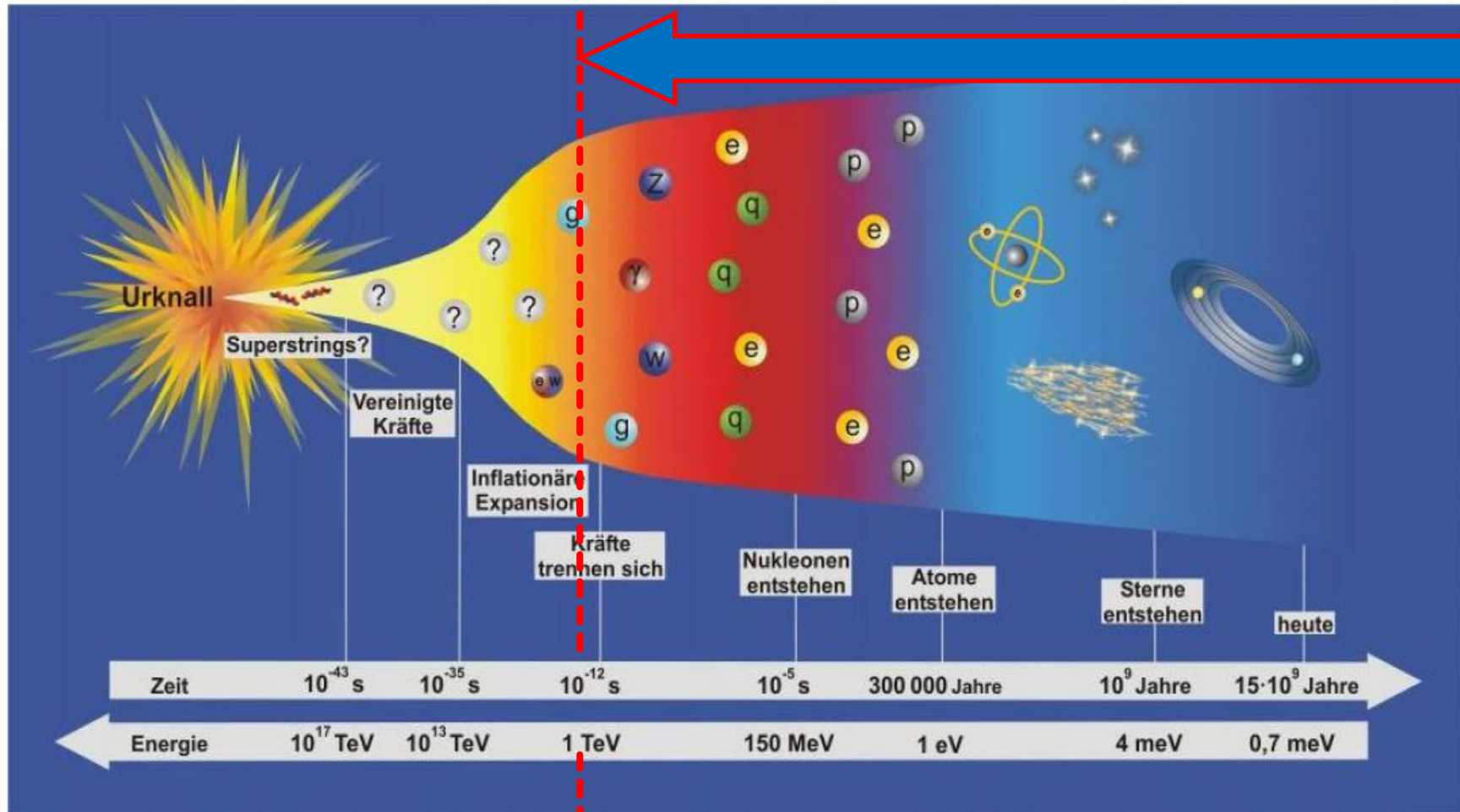
MET Is Missing Transverse Energy



→ Entwicklung
des Universums 
nach dem Urknall
von 0,000.000.000.001 s
bis 0,000.01 s

Zusammenhang Kosmologie - Teilchenphysik

Zusammenhang Kosmologie - Teilchenphysik

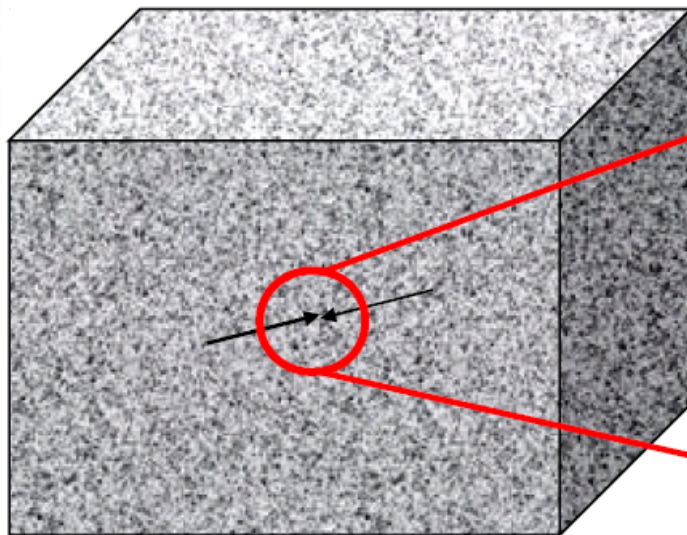


LHC:

heutige experimentelle Grenze mit Kollidern

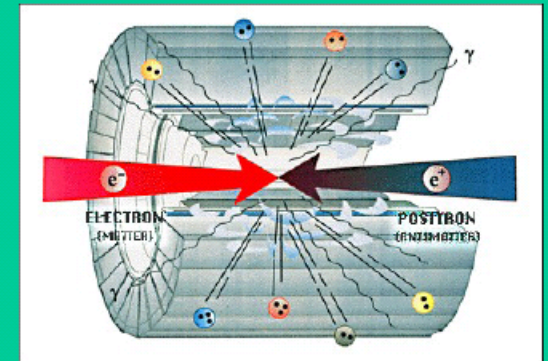
Zusammenhang Kosmologie - Teilchenphysik

Frühes Universum:
Temperatur 10^{15} K
→ Bewegungsenergie
der Teilchen: 100 GeV

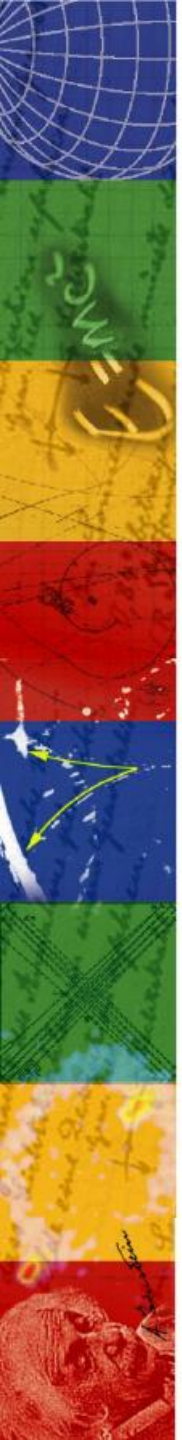


alle Teilchen
kollidieren unkontrolliert

Teilchenbeschleuniger:
→ Bewegungsenergie
der Teilchen: 100 GeV

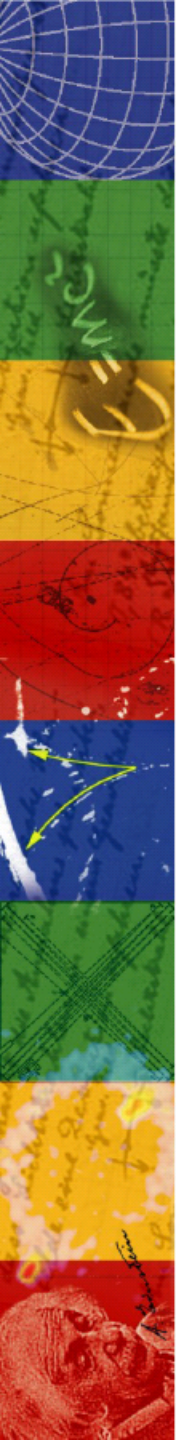


gezielte, kontrollierte
einzelne Kollisionen
und deren Aufzeichnung



Ist das alles... ?

Spin-offs der Teilchenphysik



“Spin-offs” der Teilchenphysik

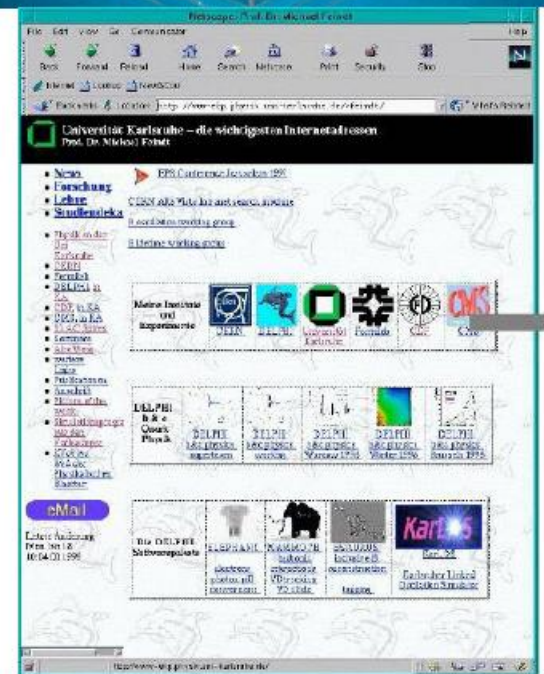
- “Spin-off” = “Ableger”:

Nutzung einer bekannten Technologie in einem Bereich, für den sie ursprünglich nicht entwickelt worden ist.

- Beispiele:
 - Das World-Wide Web
 - Tera-Heilen mit Hadronen
 - Digitales Röntgen

Das World Wide Web

- Entwickelt 1989 am CERN (http-Protokoll)
- Ursprüngliches Ziel: Forschungsergebnisse auf einfache Art und Weise mit Kollegen auszutauschen
- Methode: „Verflechten“ von wissenschaftlichen Artikeln → Erstellen eines Webs
- 1991 weltweit zur allgemeinen Benutzung freigegeben → heute fast in jedem Haushalt

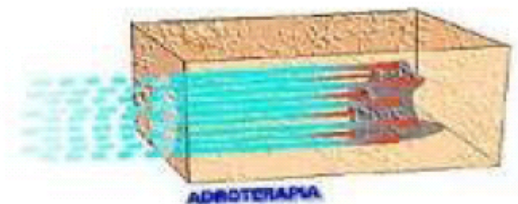


Tera-Heilen mit Hadronen

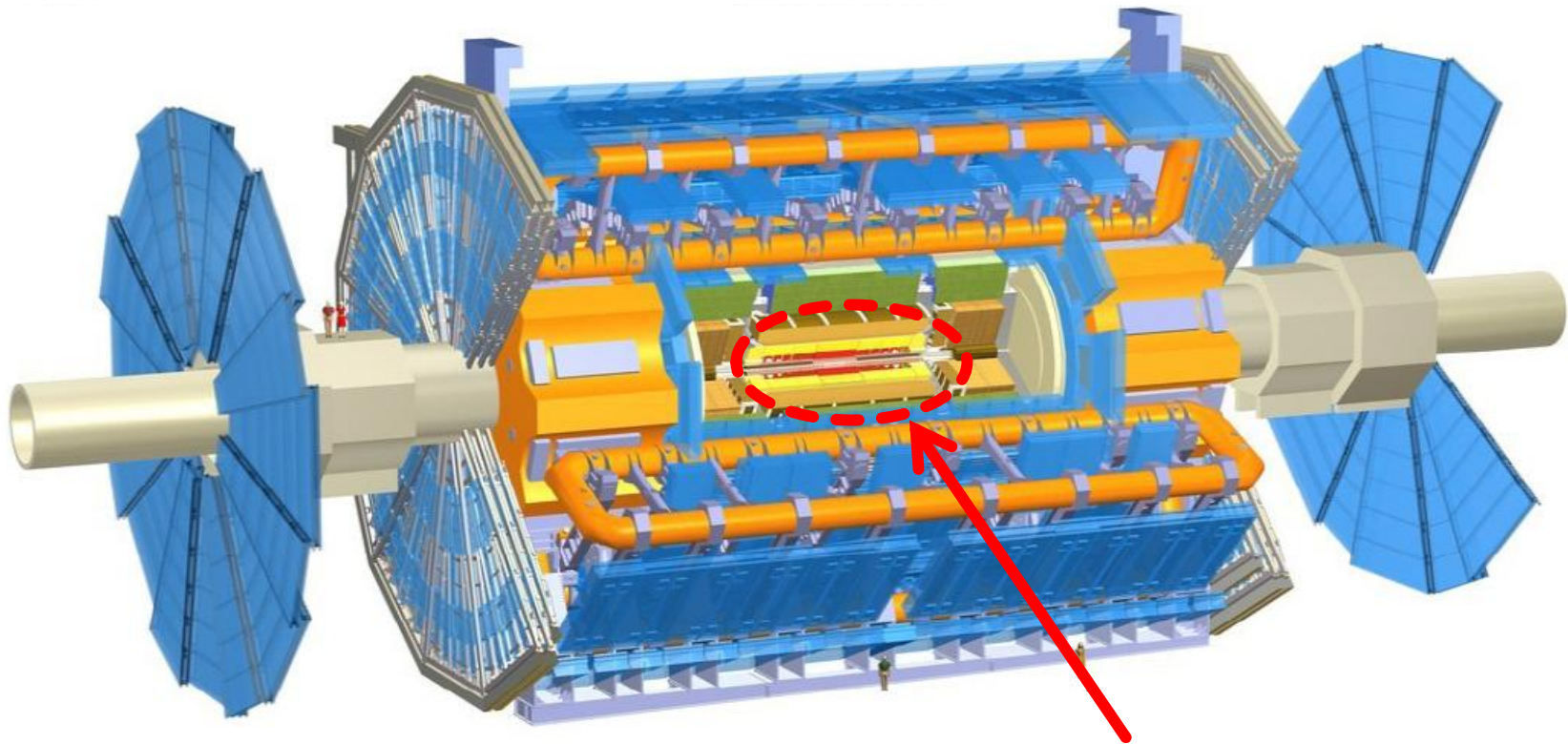
- Entwicklung initiiert vom CERN
- Übliche Strahlentherapie schädigt nicht nur den Tumor, sondern auch das Gewebe davor und dahinter
- Hadron-Strahlung:
hohe Zielgenauigkeit
 - das Maximum an Energie wird direkt im Tumorherd entladen
 - Das darüberliegende Gewebe wird viel weniger geschädigt
 - Behandlung von Tumoren auch in sensiblen Körperregionen möglich



massimo rilascio di energia

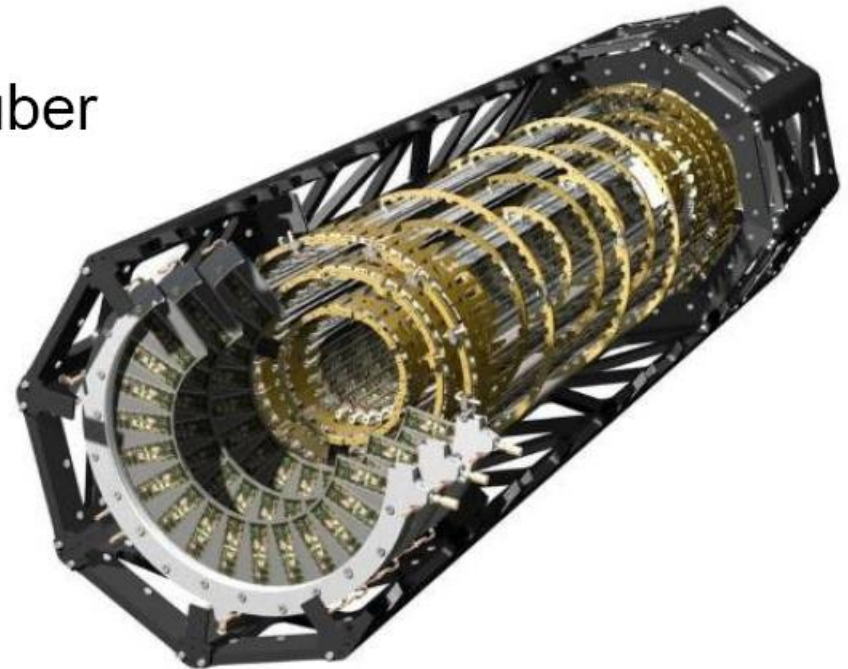
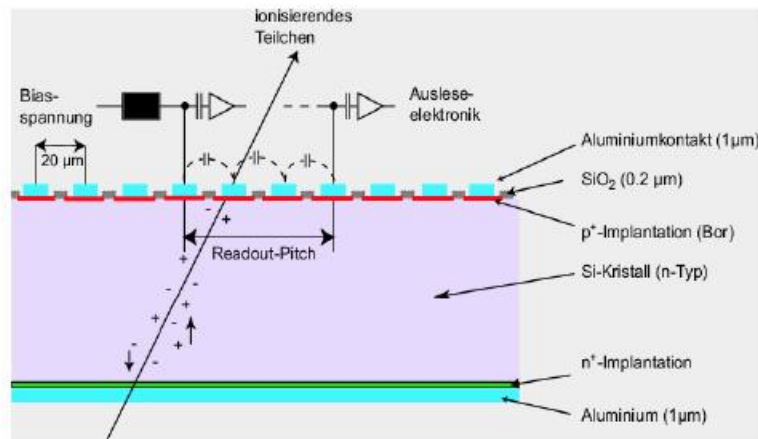


Digitales Röntgen



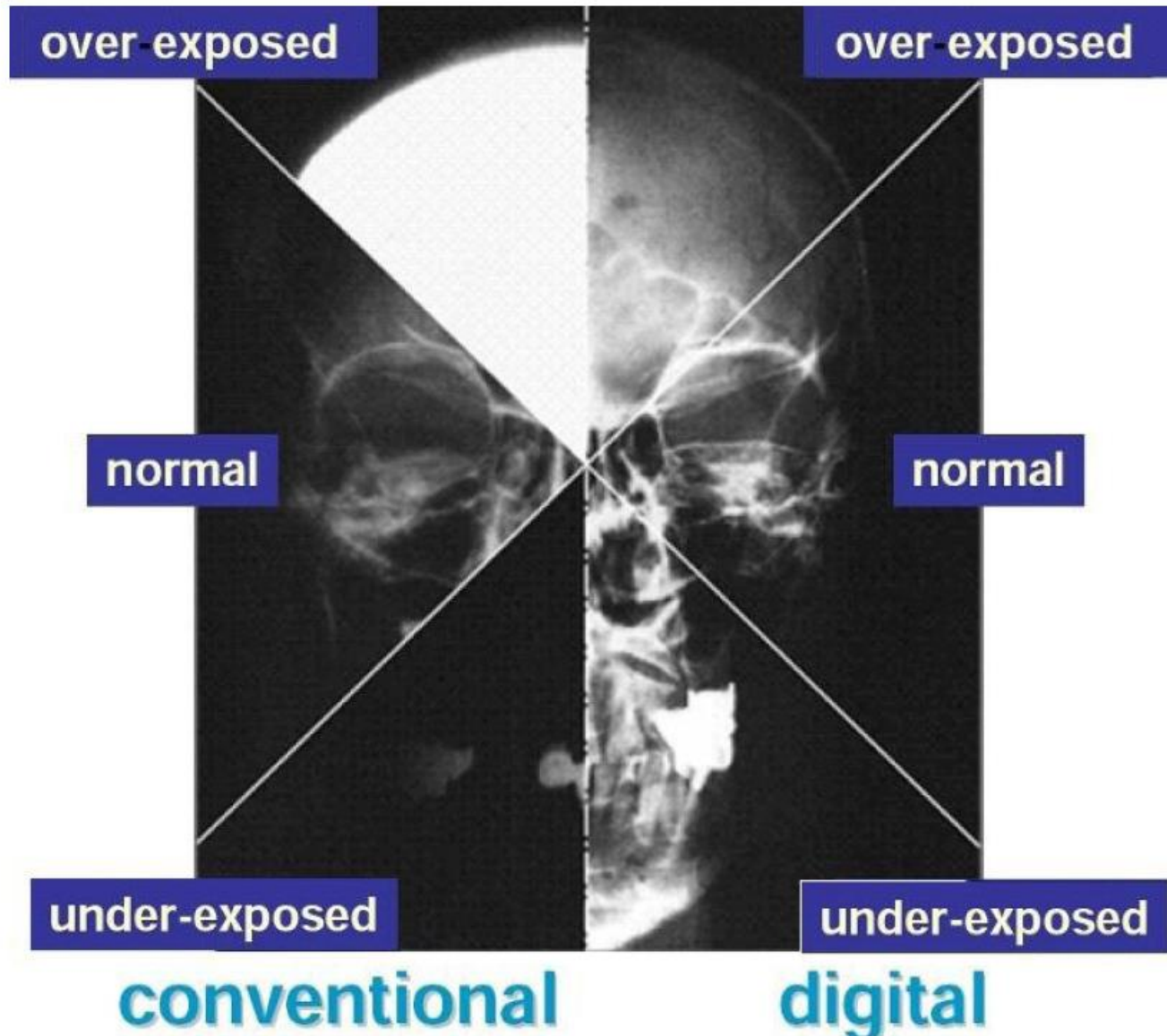
Digitales Röntgen

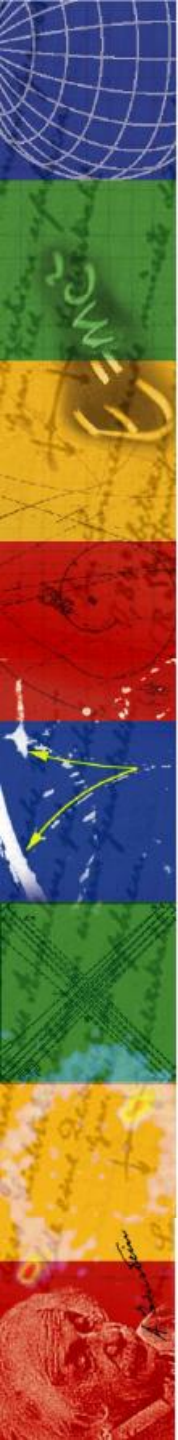
- Pixel Detektor für ATLAS (Halbleiterdetektor)
- Funktionsweise:
Nachweis der Teilchen über Ionisation des Siliziums



- Vorteil: Jedes einzelne Röntgenquant wird gezählt
 - Geringe Strahlenbelastung
 - Über-/Unterbelichtung kann korrigiert werden

Digitales Röntgen – Vergleich





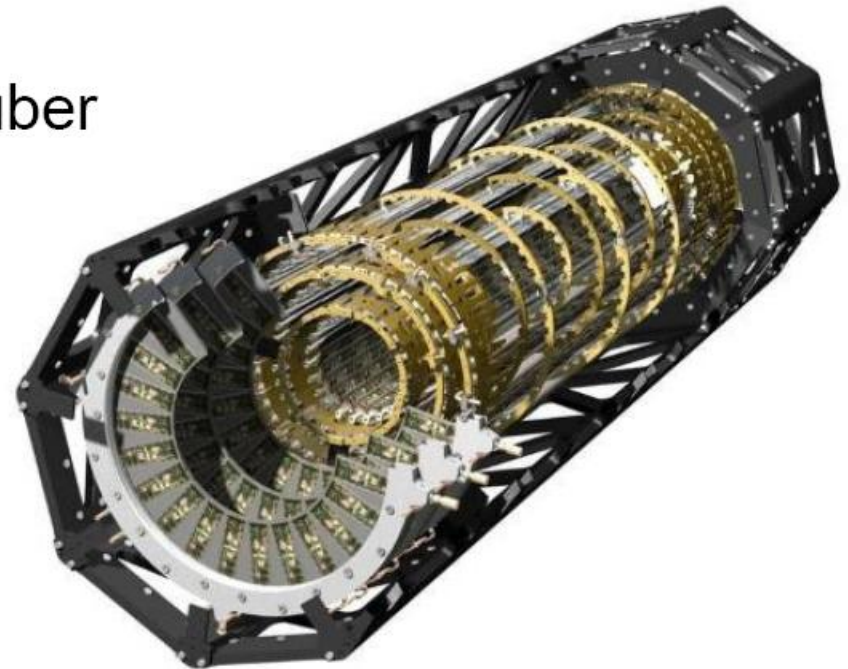
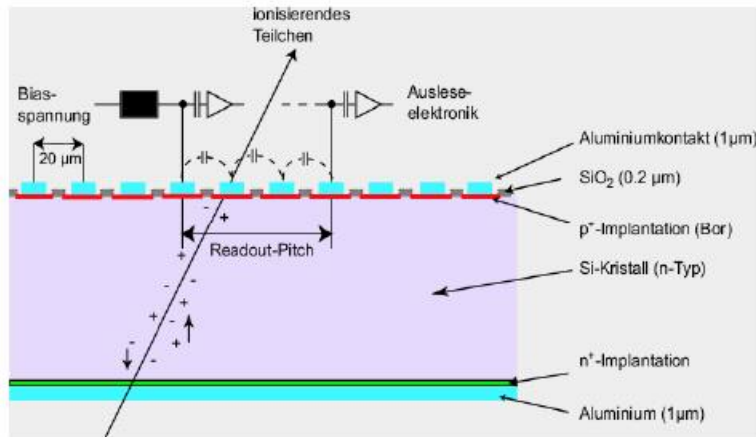
Danke,

Fragen ?

Backup

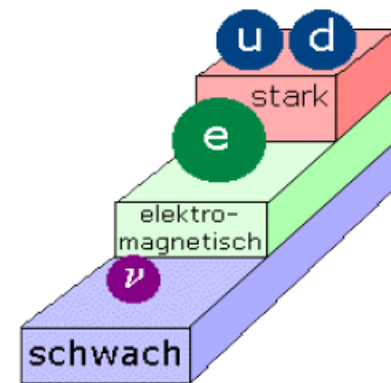
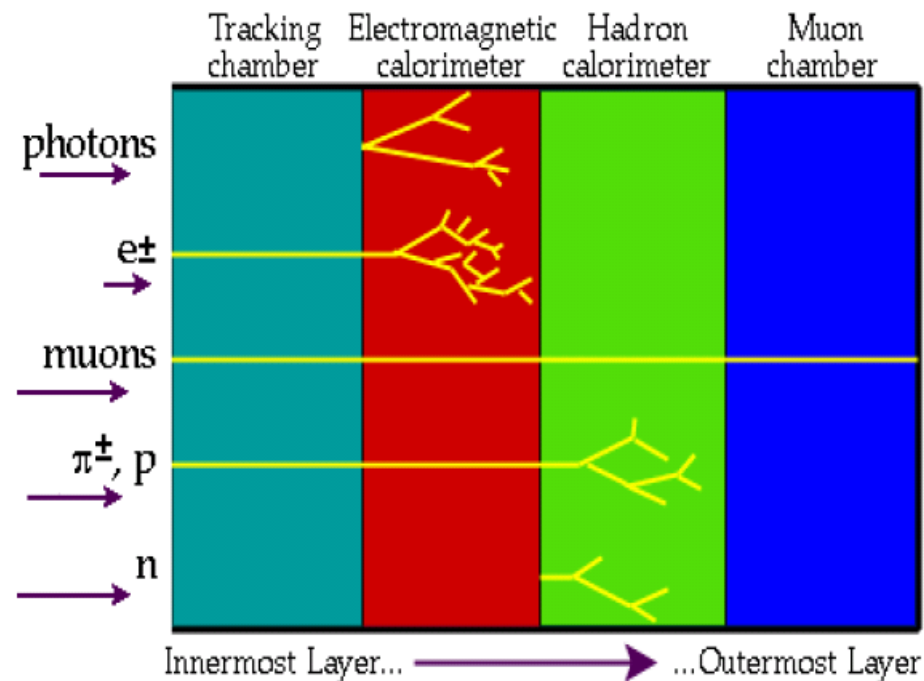
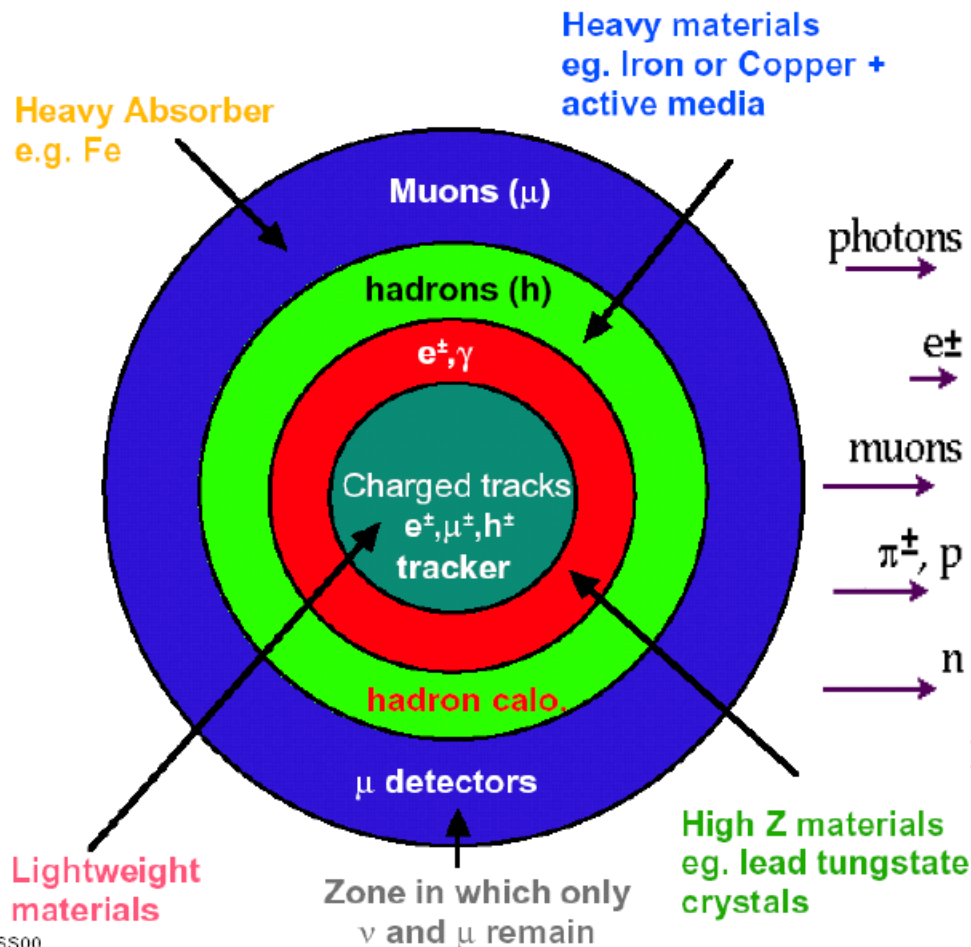
ATLAS Silizium-Spurdetektor

- Pixel Detektor (Halbleiterdetektor)
- Funktionsweise:
Nachweis der Teilchen über
Ionisation des Siliziums



- Magnetfeld (2T)
→ Lorentzkraft → Krümmung der Teilchenspuren

Detektorverhalten



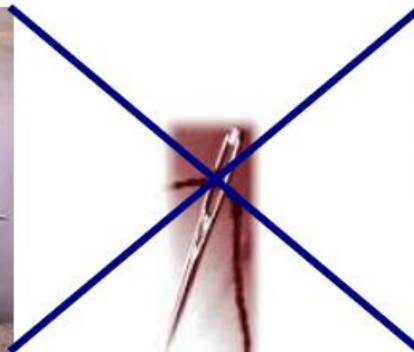
LHC Energie

Gespeicherte Energie der beiden Protonenstrahlen: $2 \times 350 \text{ MJ}$

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

Protonenstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

Bilder vom LHC



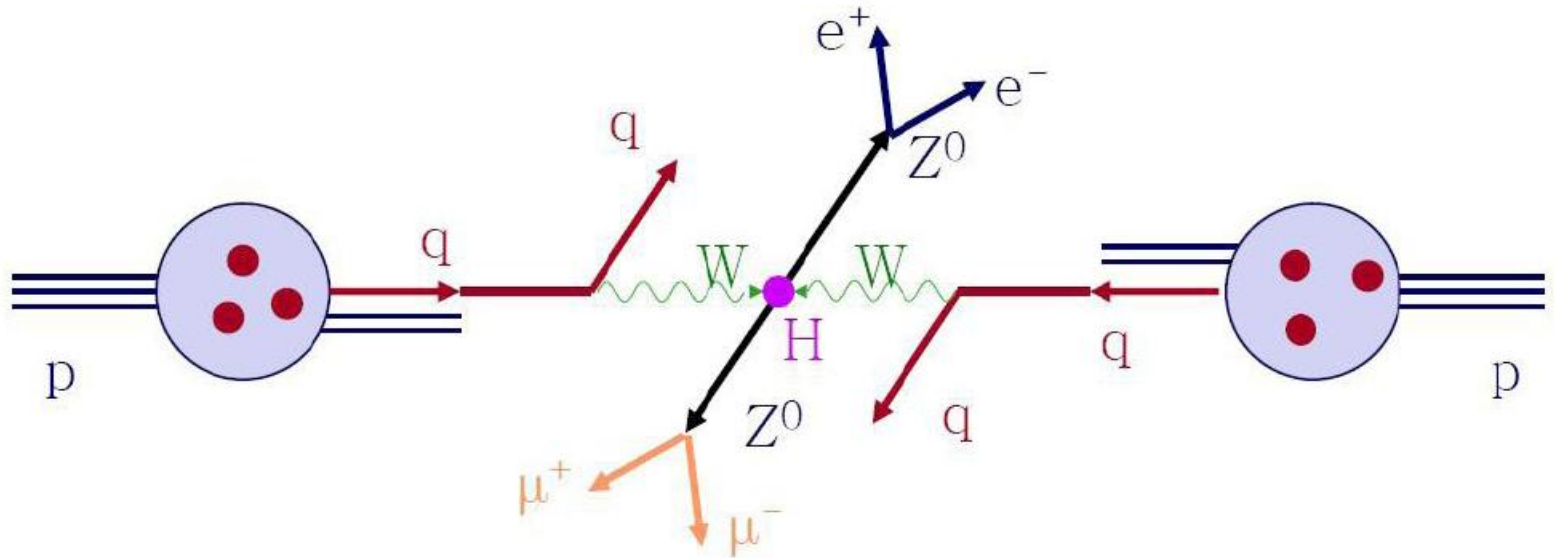
Erste Kollisionen bei 0,9 TeV am 23.11.09



Der CMS Detektor



Ein Ziel des LHC: Die Suche nach dem Higgs-Boson



Auf der Suche nach der „Weltformel“

