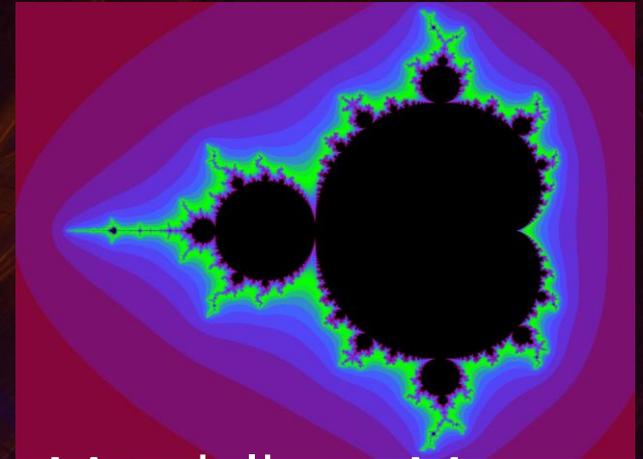


Ist das Kunst?



Flame Fractal



Mandelbrot-Menge
(„Apfelmännchen“)

Beschleuniger und Detektoren in der Teilchenphysik

20. OKTOBER 2020

DI DR MARKUS FRIEDL
(HEPHY)

- Institut für Hochenergiephysik (HEPHY)
 - Sitz in Wien, 5. Bezirk
 - Wurde 1966 als Beitrag Österreichs zum CERN gegründet
 - ca. 70 MitarbeiterInnen in Wien
 - 6 MitarbeiterInnen permanent am CERN

- Österreichische Akademie der Wissenschaften
 - Größte außeruniversitäre Einrichtung für Grundlagenforschung in Österreich
 - 27 Forschungsinstitute mit ca. 1800 MitarbeiterInnen

Institut für Hochenergiephysik

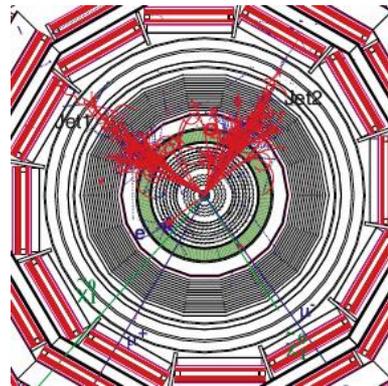
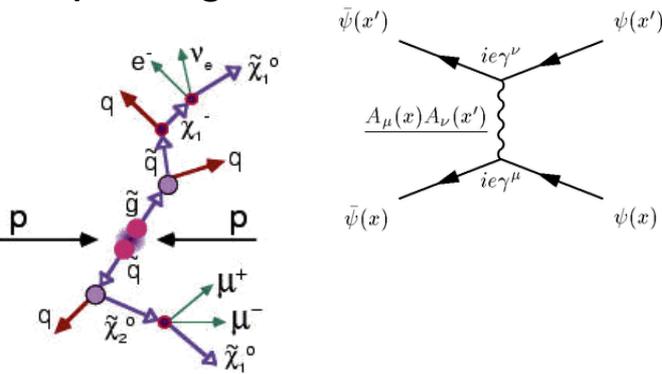


Österreichische Akademie der Wissenschaften
Hauptgebäude, Ignaz-Seipel-Platz



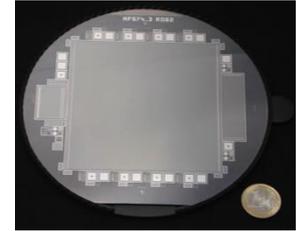
HEPHY-Forschungsgebiete

Theorie der Elementarteilchen
Spezialgebiet: SUSY, QCD, Dark Matter



Datenanalyse für
CMS und Belle

Entwicklung von
Siliziumdetektoren



Elektronik

Algorithmen und
Softwareentwicklung



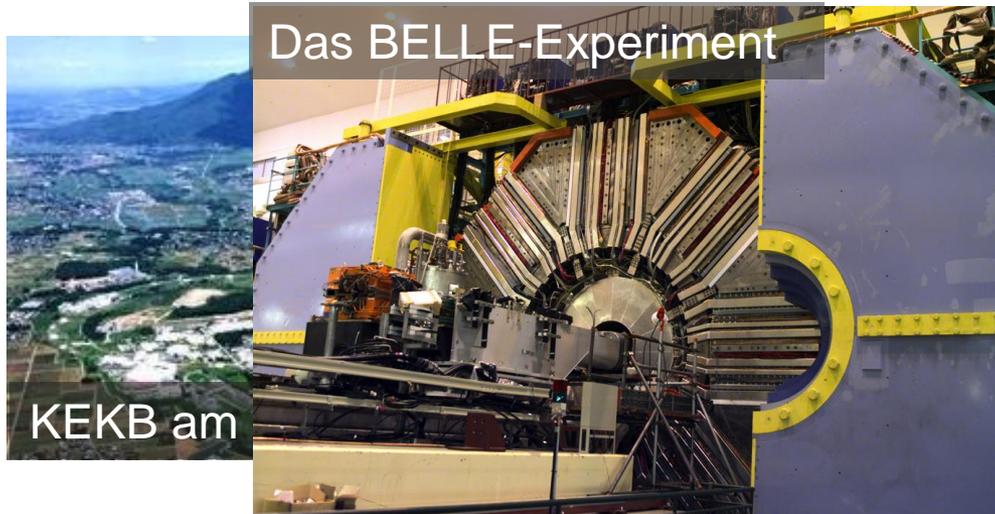
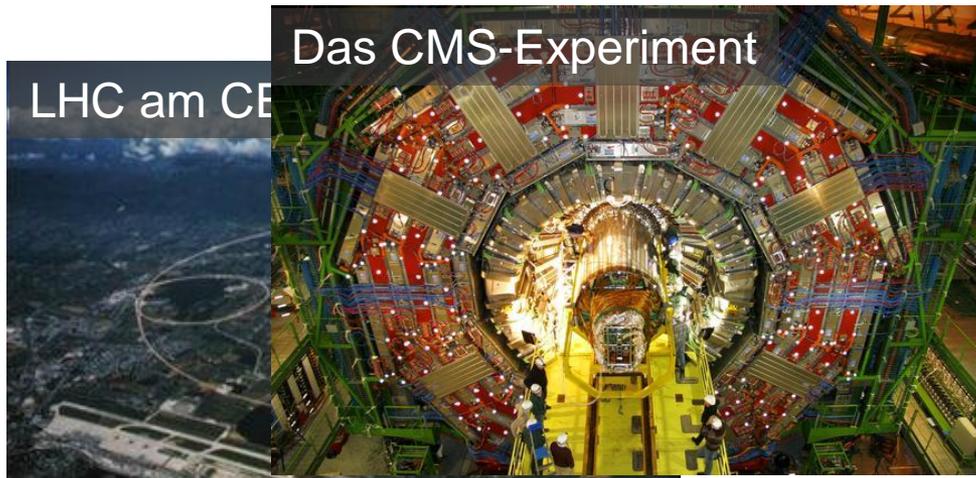
```
public void addMenus() {
    createFileMenu();
    mainMenuBar.add(fileMenu);
    createEditMenu();
    mainMenuBar.add(editMenu);
    setMenuBar(mainMenuBar);
}

private void createEditMenu() {}
private void createFileMenu() {}

public void paint(Graphics g) {
    super.paint(g);
    g.setColor(Color.blue);
    g.setFont(font);
    g.drawString(resbundle.getString("message"), 40, 80);
}

public class newActionClass extends AbstractAction {}
```

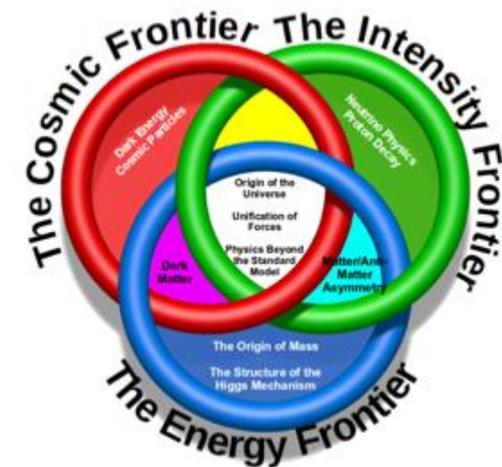
Experimente mit HEPHY-Beteiligung



“Dreifaltigkeit” der Teilchenphysik

Ein schlüssiges Bild der Physik jenseits des Standardmodells erfordert eine kohärente Interpretation mit unterschiedlichen Ansätzen:

- **LHC: Energielimit: $E=mc^2$**
 (“Entdeckung des Higgs”)
- **Belle I/II: Intensitätslimit**
 Vergleich von Präzisionsmessungen mit theoretischen Vorhersagen
- **CRESST: Kosmische Grenze**
 Bestätigung des Teilchencharakters als Ausgangspunkt der astrophysikalischen Beobachtungen



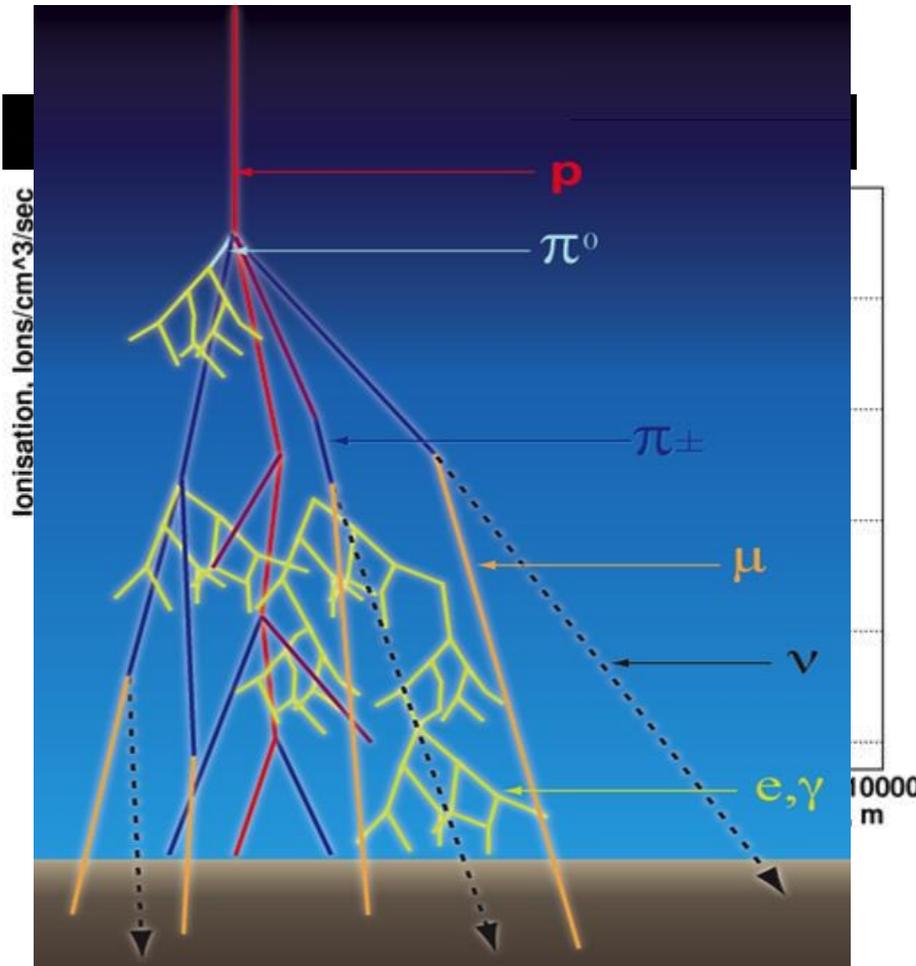
Inhalt dieses Vortrages:

1. **Wozu benötigt man einen Teilchenbeschleuniger**
2. **Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?**
3. **Was ist das CERN?**
4. **Teilchendetektoren: Die „Experimente“ der Teilchenphysiker**
5. **Was bringt *mir* das?**

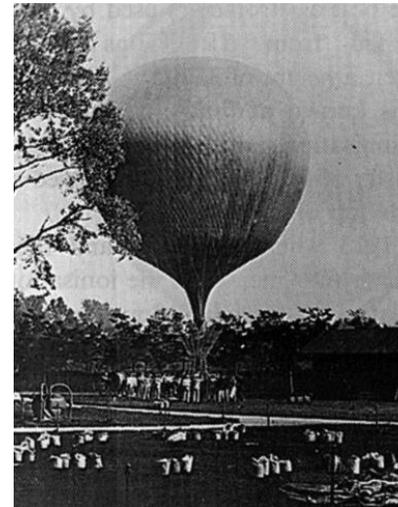
Wozu benötigt man einen Teilchenbeschleuniger überhaupt?



1. Kosmische Strahlung im Labor sichtbar machen

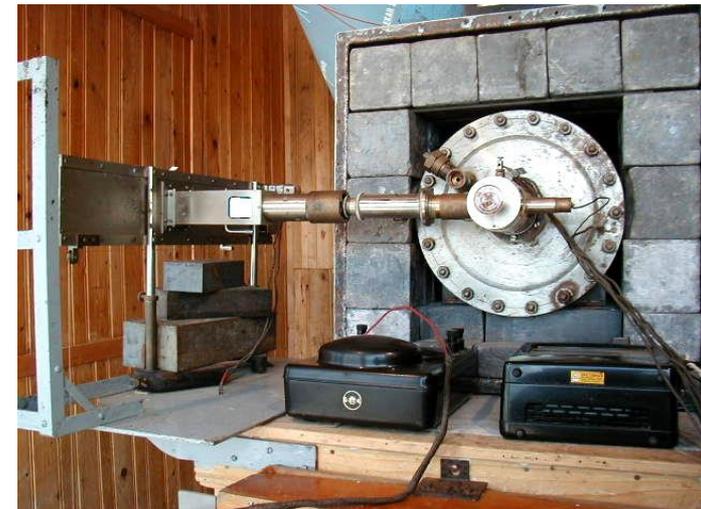
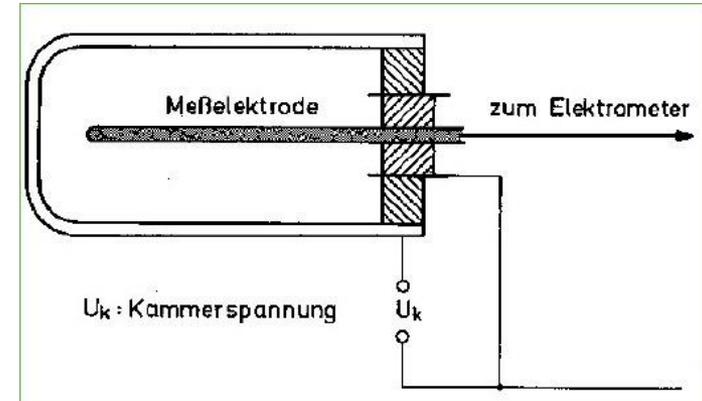


- Die **Kosmische Strahlung bombardiert die Erde** ständig mit **Teilchen**
- Entdeckung der sogenannten „Höhenstrahlung“ durch Viktor Hess 1912 (Physik-Nobelpreis 1936)



Ionisationskammer

- Historisch **ältestes Instrument** (z.B. von Victor Hess benutzt)
- **Gasgefülltes Volumen mit elektrischem Feld**
- Durchtretendes Teilchen **ionisiert** über elektrische Wechselwirkung das Gas
- Elektrisches Feld saugt Ladungen ab → **Strom**
- Spezielle Bauformen, z.B. **Geiger-Zähler**

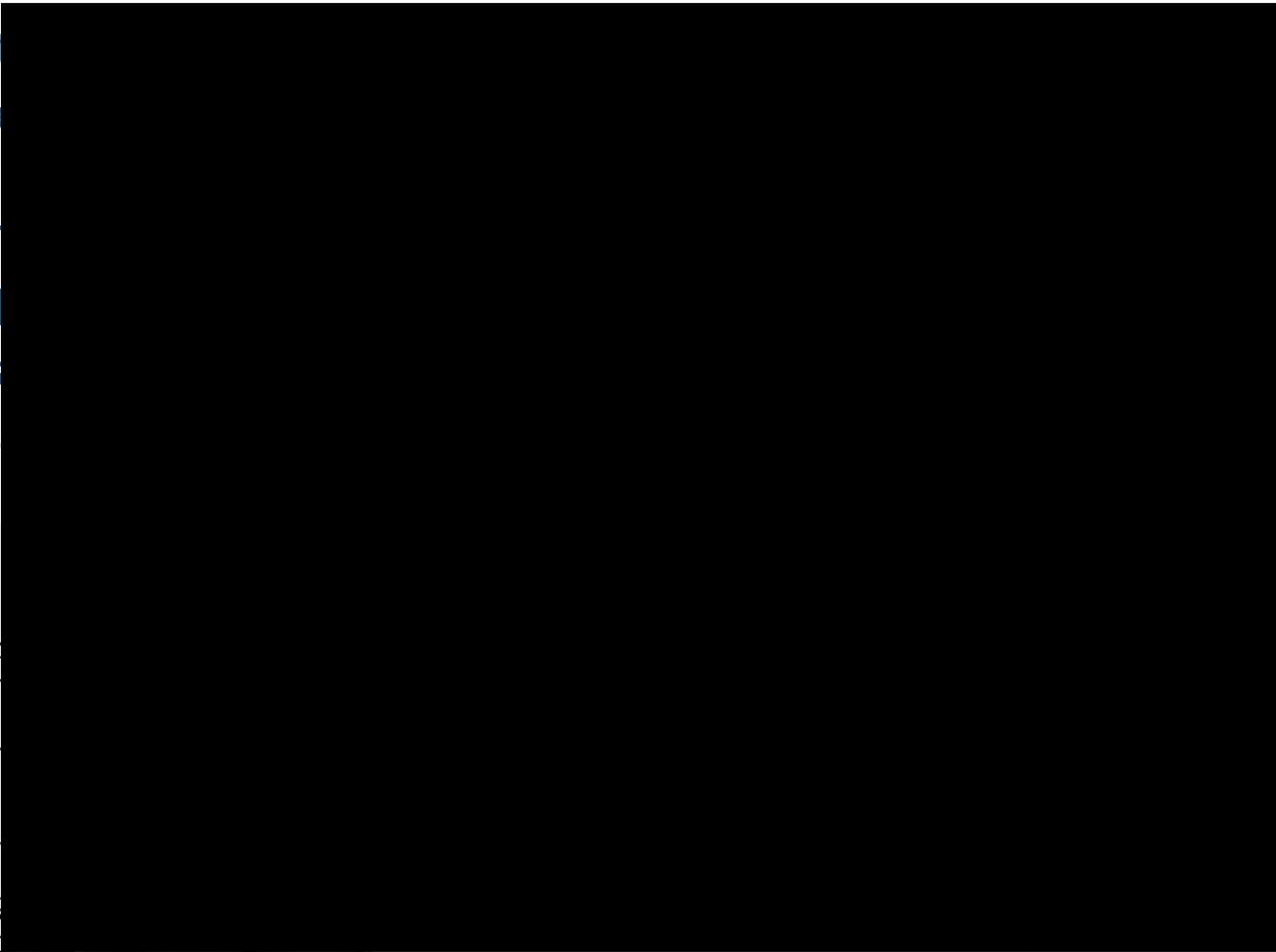
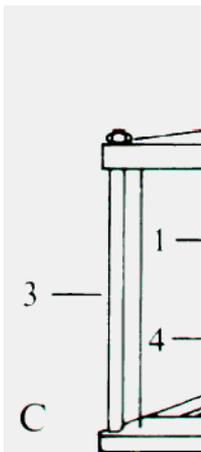


Funkenkammer

- Mach
- Ha

Funktion

- Hoc
- zwis
- Myo



2. Beobachtung kleiner Objekte

Mikroskop:

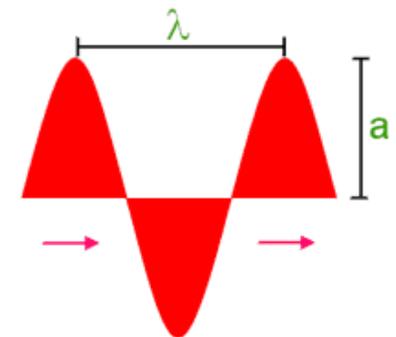
- Licht scheint auf Objekt
- Linsen zur Vergrößerung

Wo liegt die Grenze der Vergrößerung?

- Die **Auflösung** ist abhängig von der Wellenlänge des benutzten Lichts (400-700nm)
 - Beugungseffekte begrenzen Auflösung
 - Bei blauem Licht liegt sie bei etwa $0.4 \mu\text{m}$.
- Kleinere Objekte benötigen andere Methoden



Wasserfloh



λ : Wellenlänge des Lichts
 a : Amplitude der Lichtwelle

Beobachtung noch kleinerer Objekte

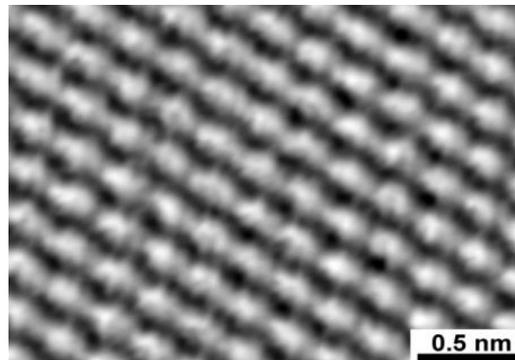


Elektronenmikroskop: 0.1 nm (Millionstel Millimeter)



$$0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

Rastertunnelmikroskop: 0.01 nm



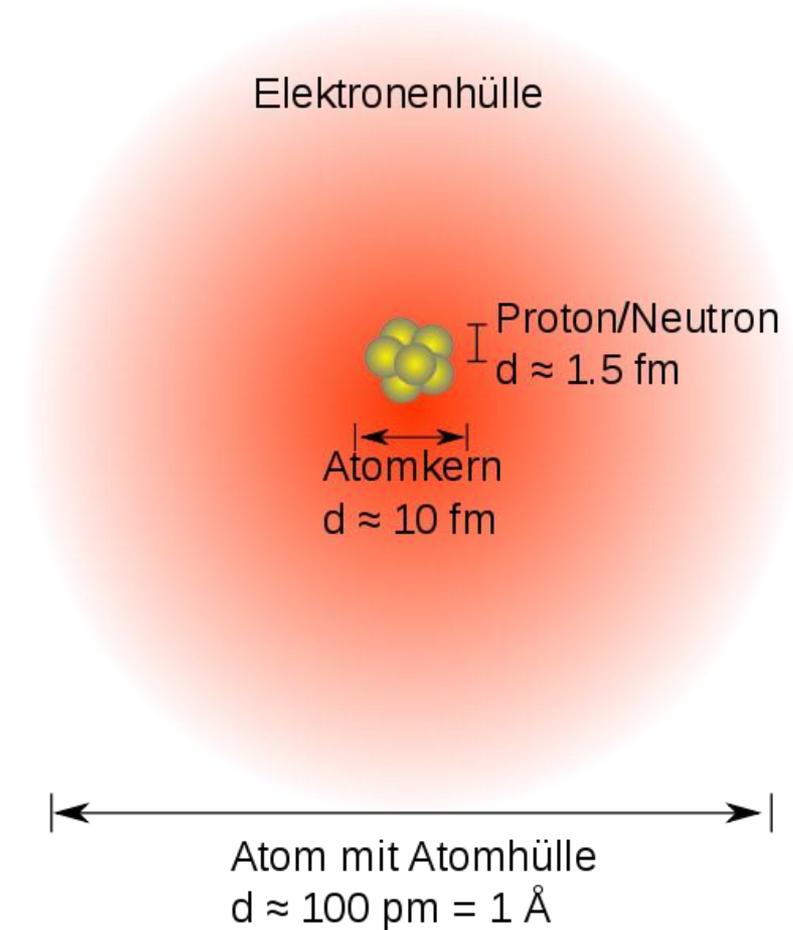
Beobachtung eines Atoms

Atomhülle

- Durchmesser $0.1 \text{ nm} = 100 \text{ pm}$
 $= 10^{-10} \text{ m} = 0.0000000001 \text{ m}$
- *Teilchen*: Elektronen

Atomkern

- Durchmesser $10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$
 $= 0.00000000000001 \text{ m}$
- *Teilchen*: Protonen,
Neutronen



Bestandteile eines Atoms

Einfachstes Beispiel:

Wasserstoff

Bestandteile des
 Protons:
 1 Elektron
 1 Proton

Drei Quarks

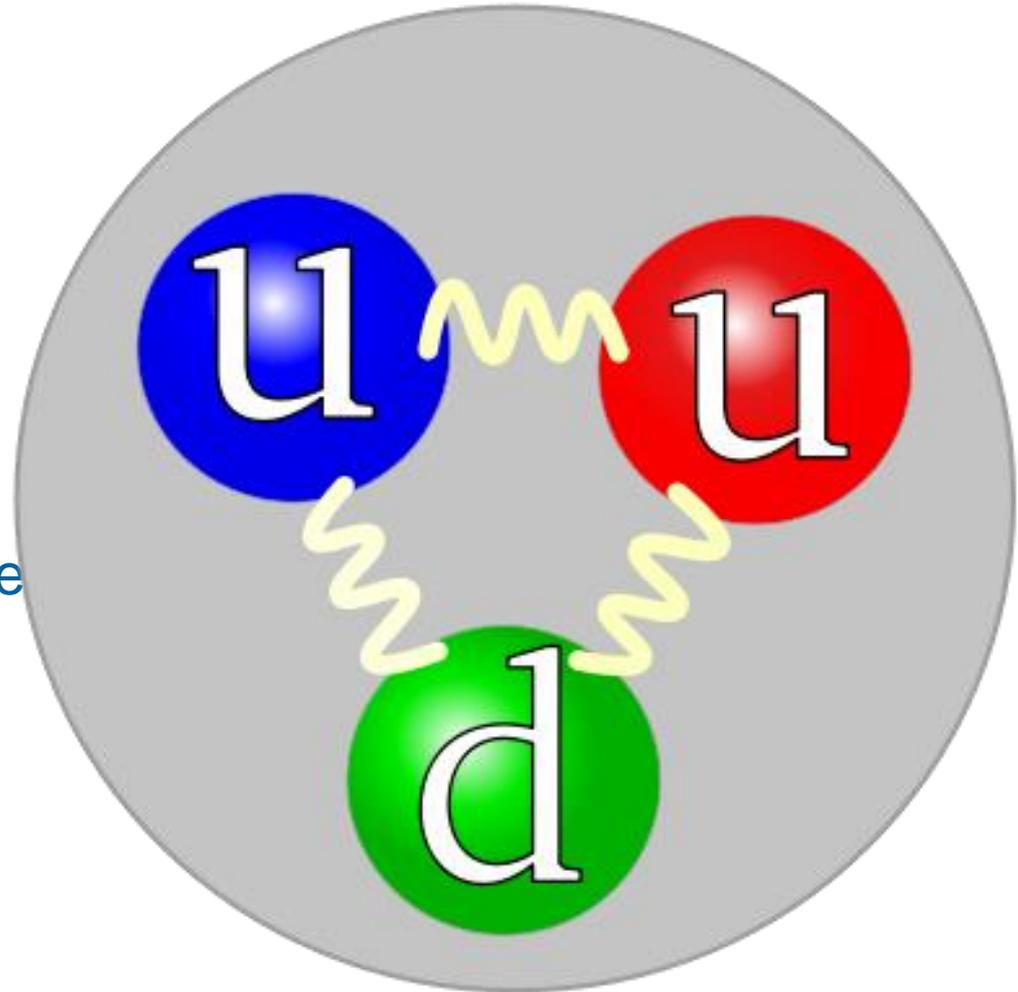
Atomhülle

• **2** „up“ geladene Elektrone

1 „down“

Atomkern

- Positiv geladene Protonen
- (Neutrale) Neutronen

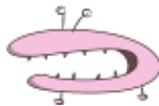


Der “Teilchen-Zoo”

Quarks



Up



Charm



Top



Down



Strange



Bottom

Leptonen



Elektron



Myon



Tau



Elektron-
Neutrino



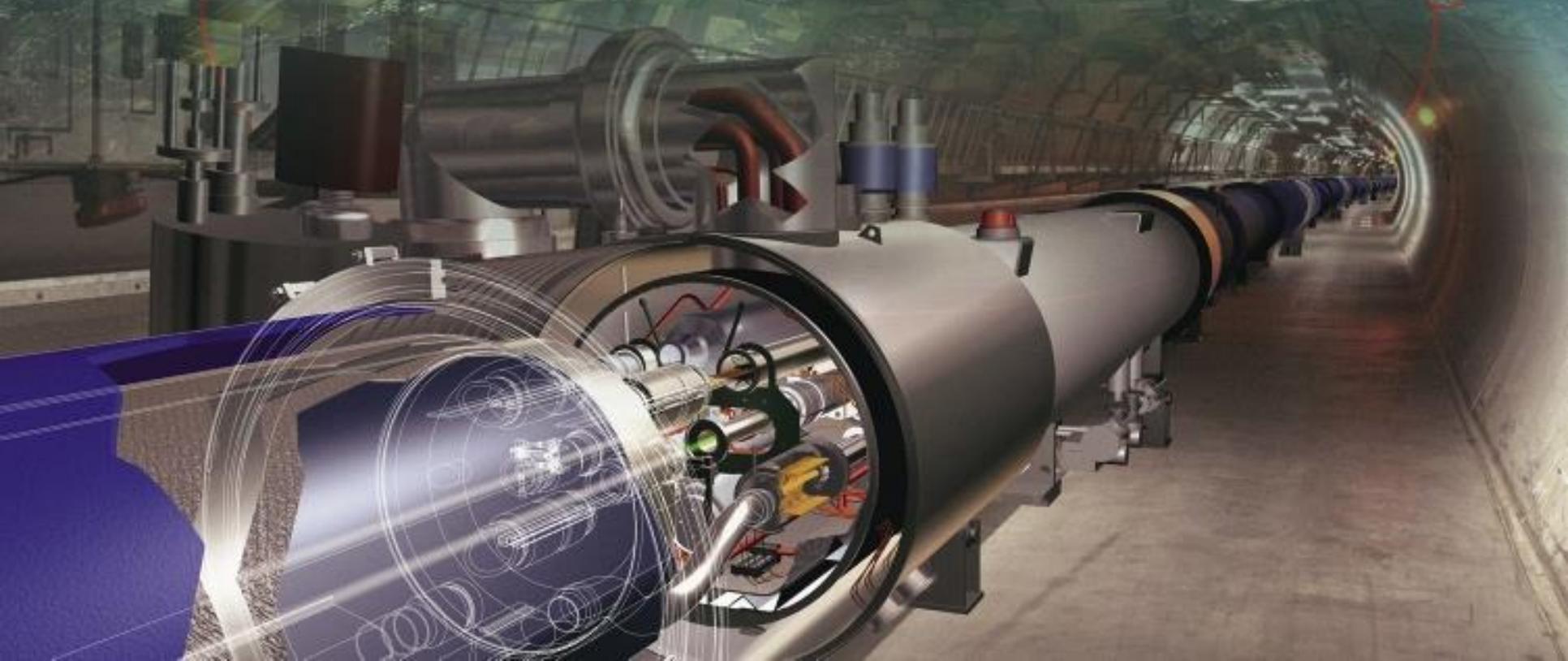
Myon-
Neutrino



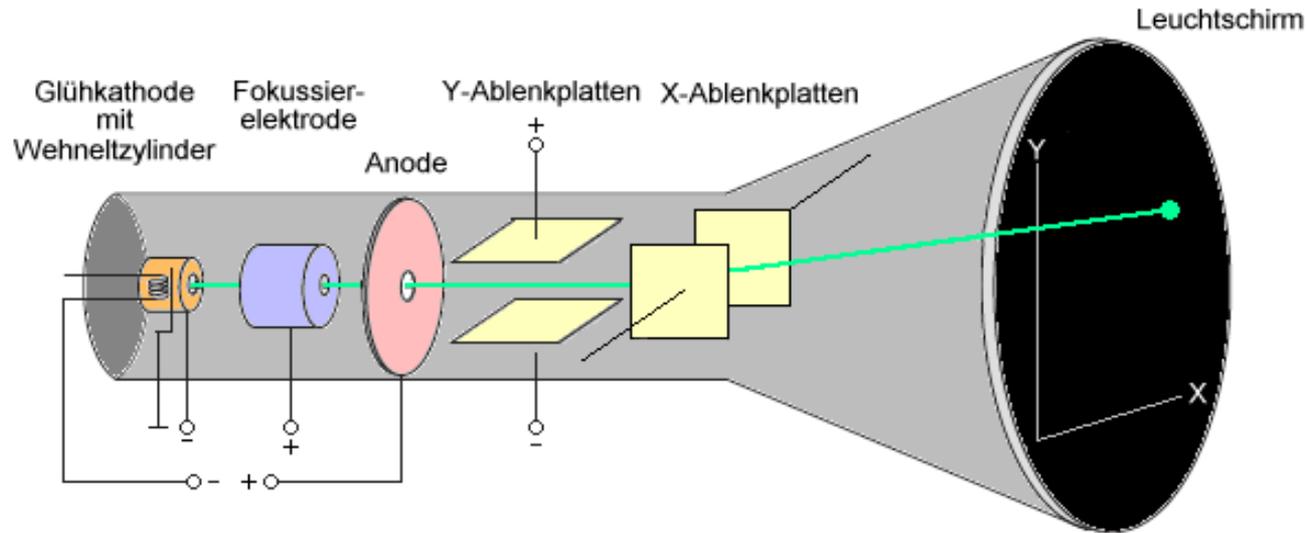
Tau-
Neutrino

- Alle “normale” Materie besteht nur aus diesen 3 Bausteinen!
- **Quarks bilden Protonen, Neutronen**
- Alle Teilchen mit Quarks heissen **Hadronen**

Wie funktioniert ein Teilchenbeschleuniger?



Der einfachste Beschleuniger

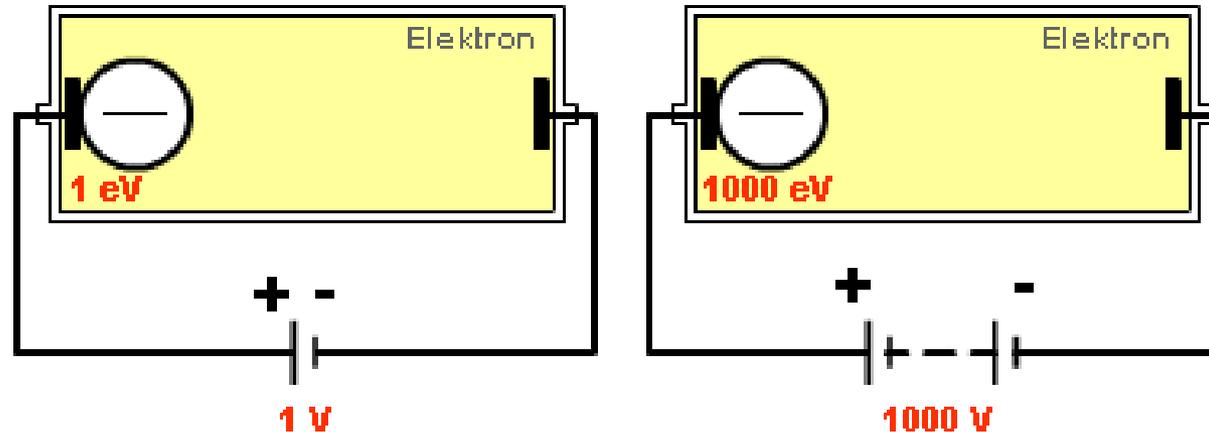


Ein Röhrenfernseher ist der einfachste **elektrostatische Beschleuniger**:

- Erzeugung von freien Elektronen mittels Glühkathode
- Beschleunigung mittels Hochspannung
- Ablenkung mittels magnetischer Felder



Energieeinheit der Teilchenphysiker



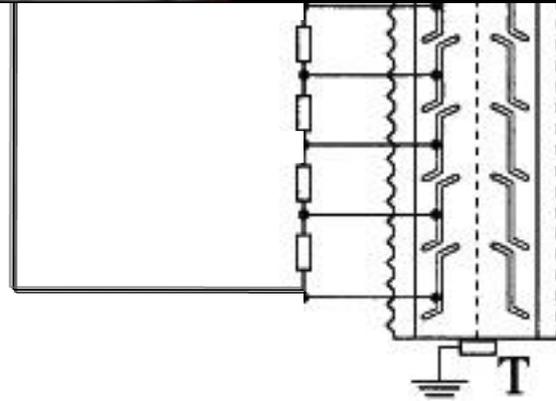
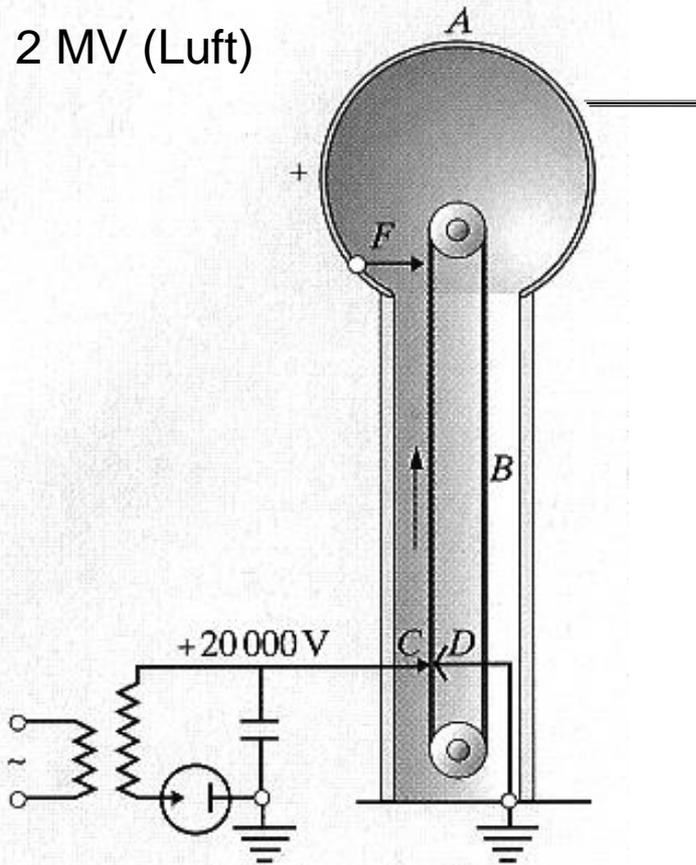
1 Elektronenvolt (1 eV) ist die kinetische Energie, die ein Teilchen mit der Ladung e_0 erhält, wenn es durch eine Spannung von 1 Volt beschleunigt wird.

- Tausend eV = 1 keV
- 1 Million eV = 1 MeV
(4% der Lichtgeschwindigkeit)
- 1 Milliarde eV = 1 GeV
(87,6% des Lichts)
- 1 Billion eV = 1 TeV
(99.999957% des Lichts)

Elektrostatische Beschleuniger

Van-de-Graaff-Beschleuniger (Bandgenerator)

max. 2 MV (Luft)



Van-de-Graaf-Beschleuniger (bis 20 MeV)

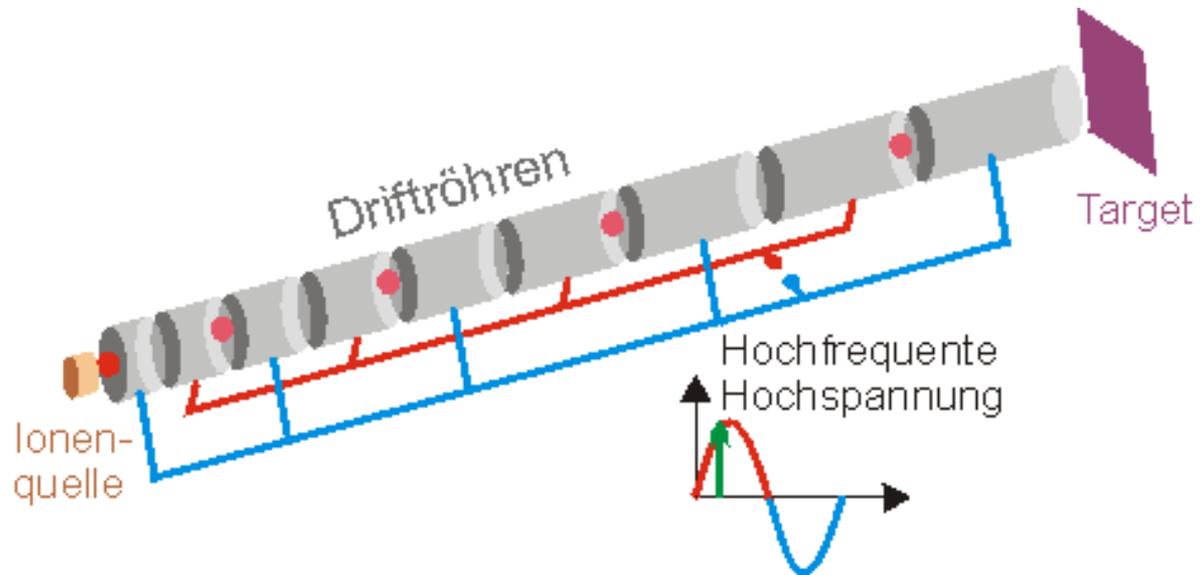
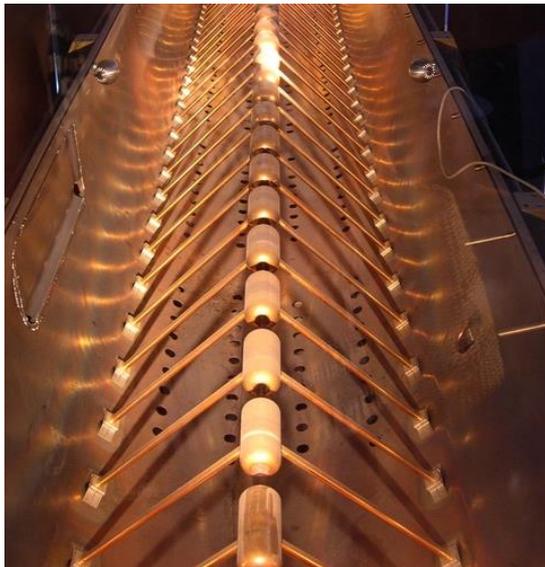
VERA:

Vienna Environmental Research Accelerator

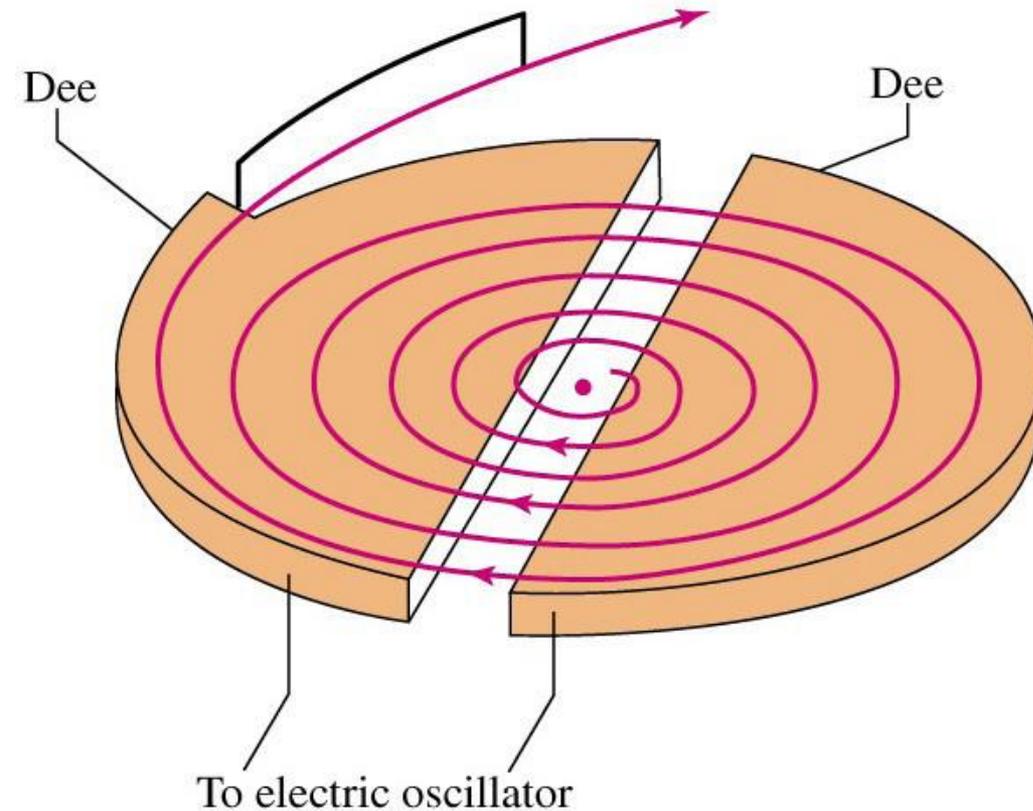


Linearbeschleuniger

- Weiterentwicklung eines elektrostatischen Beschleunigers
- Vorteil: keine hohen Spannungen im Vergleich zu elektrostatischen Beschleunigern
- Nachteil: Teilchen stehen nur einmal zur Beschleunigung zur Verfügung



Kreisbeschleuniger: Das Zyklotron

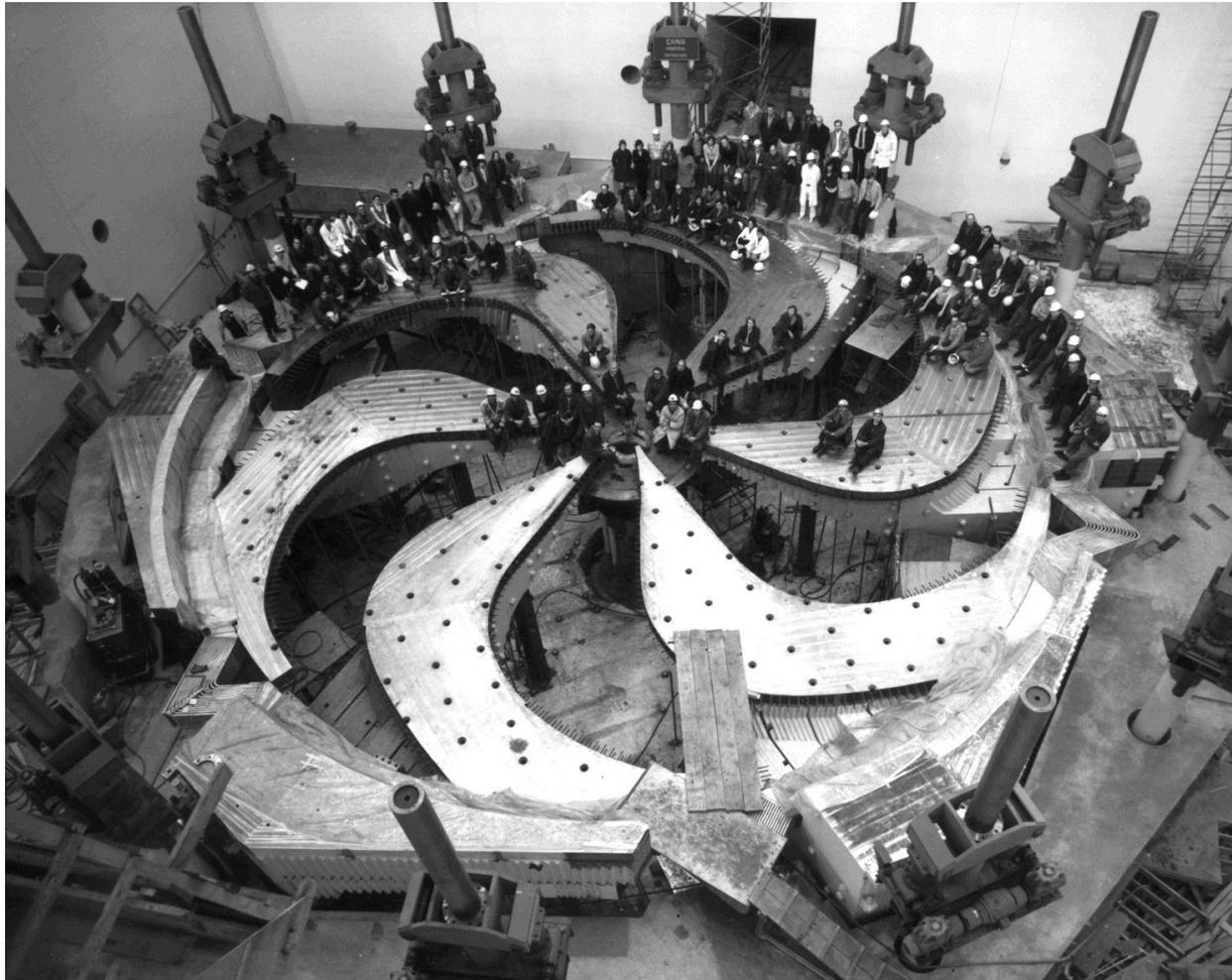


$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$\frac{v}{r} = \omega_c = \frac{q}{m} B$$

Zyklotron-Frequenz

TRIUMF K500 Cyclotron

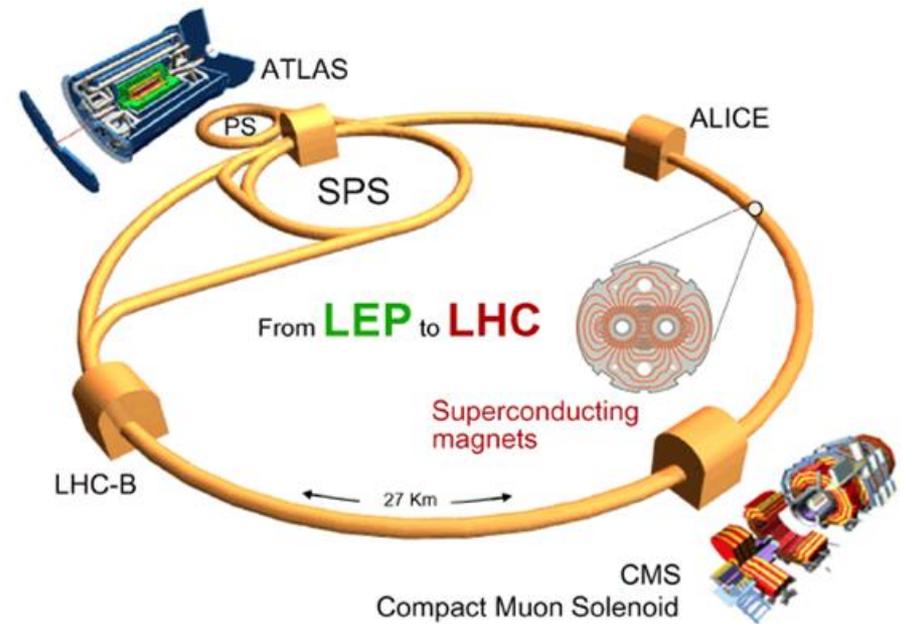


Größtes
Zyklotron
der Welt:
TRIUMF,
Vancouver
(1972)

Ringbeschleuniger

Andere Namen: Collider, Synchrotron, Speicherring

- Beispiel LHC:
- Vorteil:
 - Teilchen fliegen immer und immer im Kreis
- Nachteil:
 - Synchrotronstrahlung
- Man benötigt mehr Komponenten, um Teilchen auf Kreisbahn zu halten
 - Dipolmagnete



Komponenten eines Synchrotrons

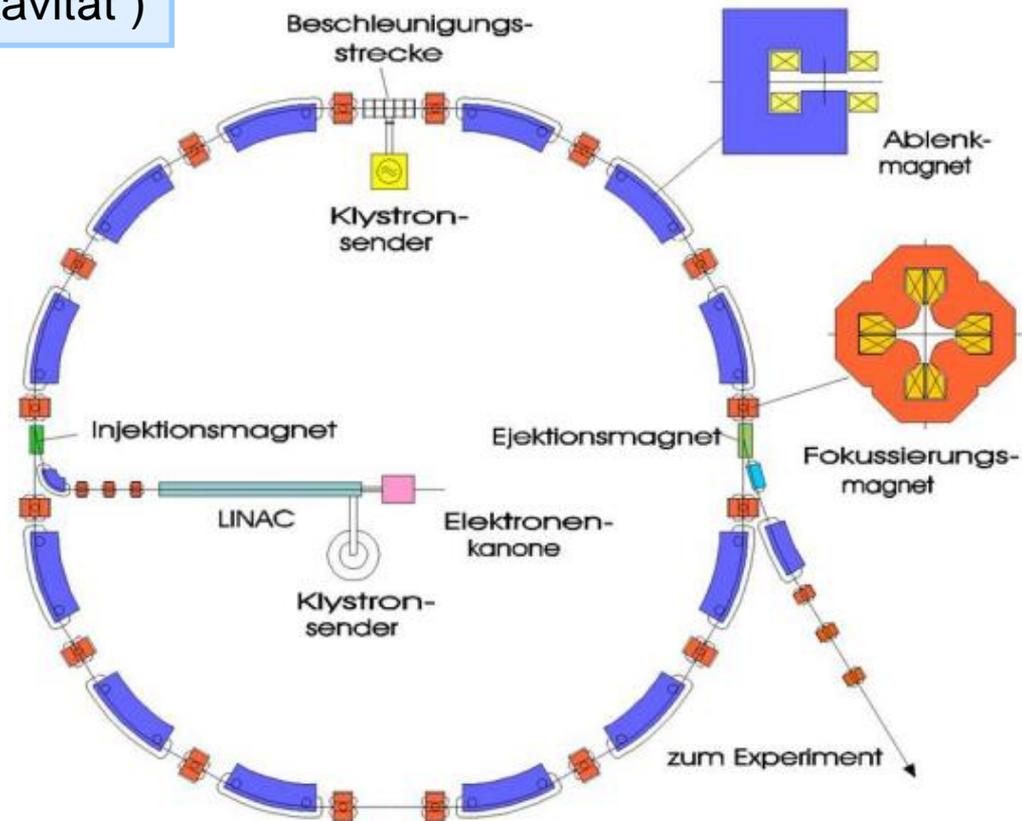
• **Teilchen** (aus LINAC)

• **Beschleunigung** (Hochfrequenz-Kavität)

Magnete zum

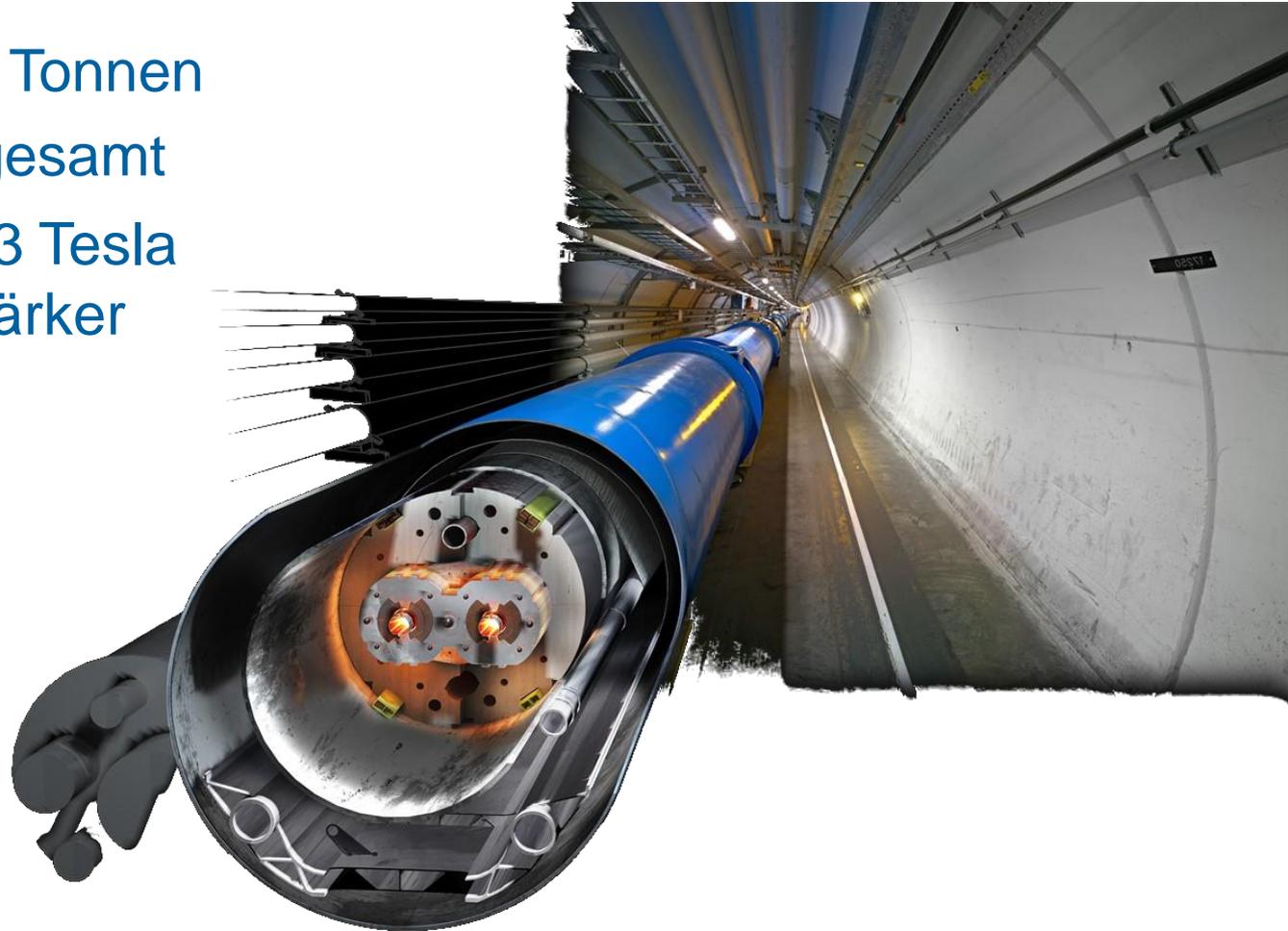
- **Ablenken (Dipol)**
- **Fokussieren (Quadrupol)**

**Extraktion oder
Kollision** an
Kollisionspunkten



LHC Ablenkmagnete (Dipole)

- 15 m Länge, 35 Tonnen
- 1232 Stück insgesamt
- Magnetfeld: 8.33 Tesla
(200.000 mal stärker
als das
Erdmagnetfeld)
- Betrieb mit
flüssigem
Helium (130t)
bei 1.9K

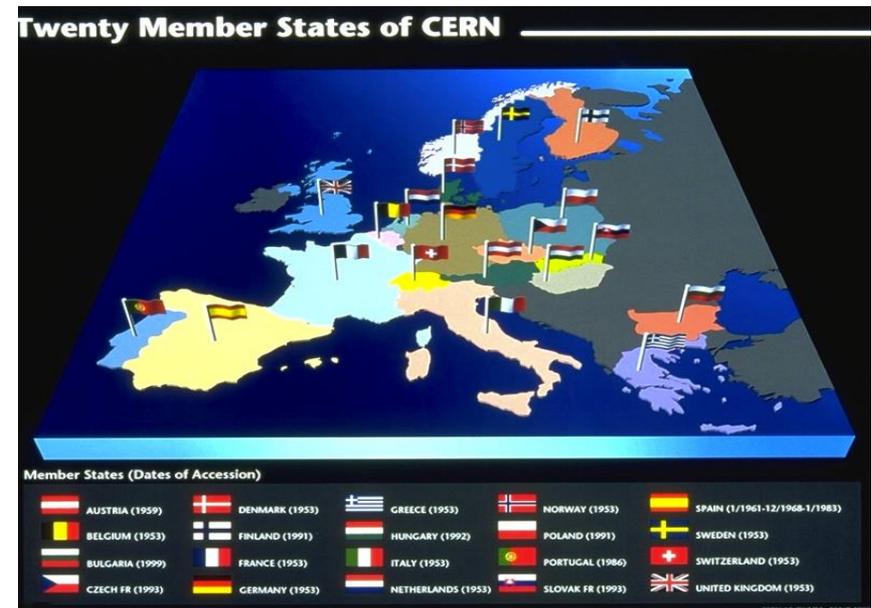


Was/Wo ist das CERN?



Was ist eigentlich der/die/das CERN ?

- CERN ist **internationale Organisation**
 - ähnlich wie UNO
- Der Name heißt "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire"
- Gegründet 1954
- 23 Mitgliedsländer
- Österreich
 - Beitritt 1959
 - Austritt 2009 (fast!)



Was es kostet – und wer zahlt

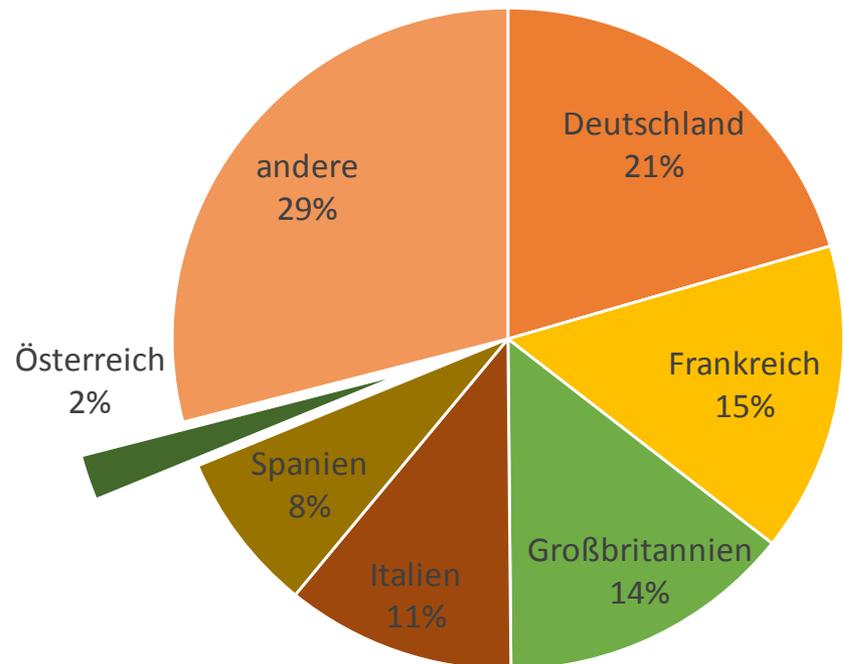
CERN Gesamtbudget 2020:

1.077 Milliarden Euro

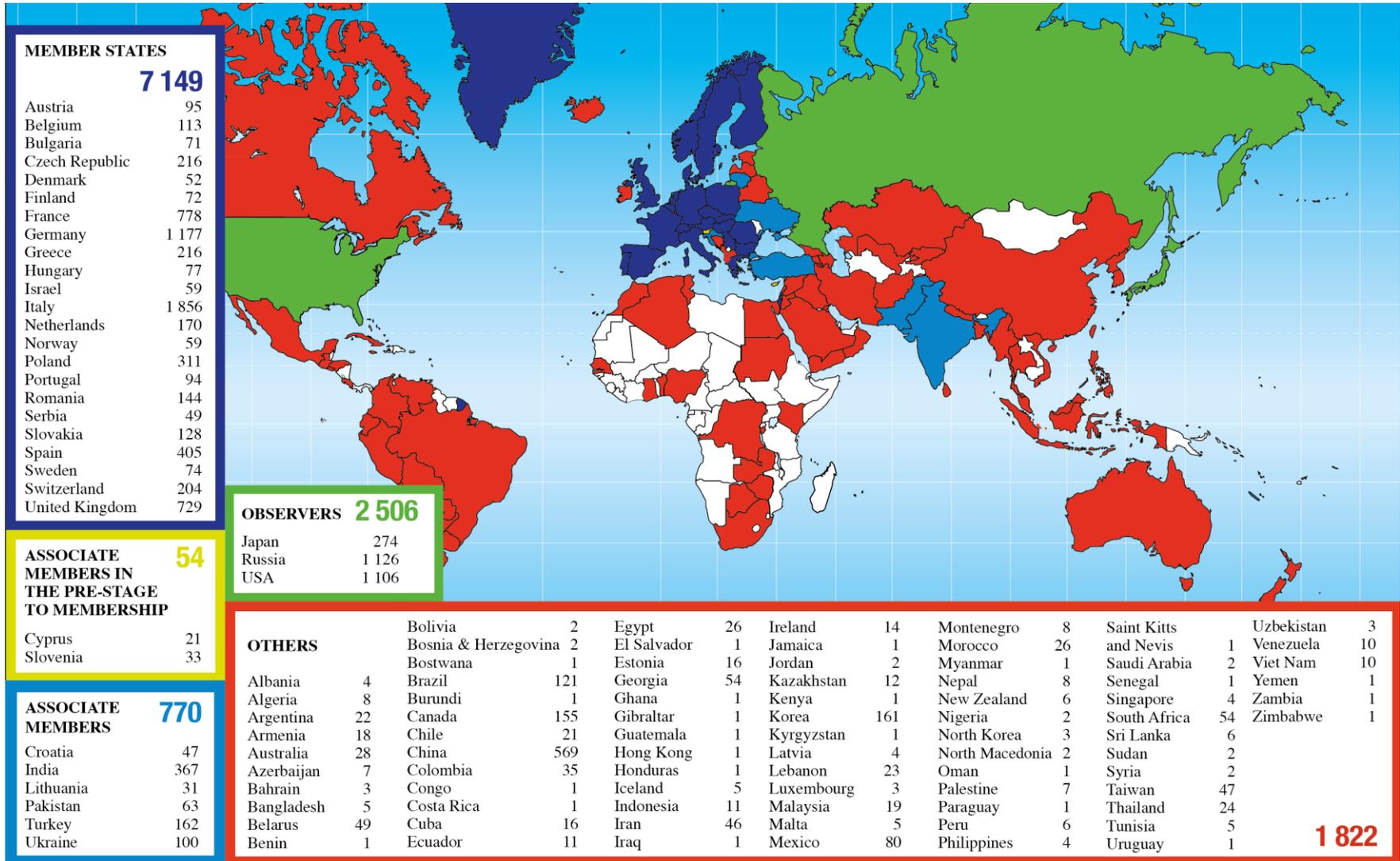
- Jedes Mitgliedsland zahlt entsprechend dem Bruttoinlandsprodukt
 - 2.16% für Österreich
 - 23 Millionen Euro

Bau des LHC:

- 3 Milliarden Euro
- Aufgeteilt auf 15 Jahre



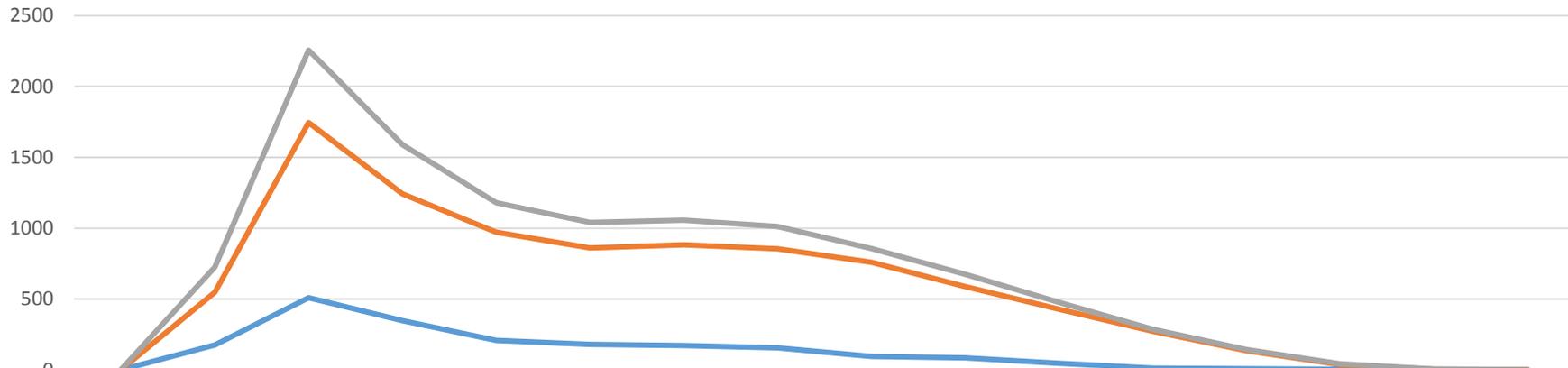
Nationalitäten der Wissenschaftler am CERN



27. Jänner 2020

Altersverteilung der CERN-User

Number of Users at CERN in age groups - March 2016



	15 - 19 years	20 - 24 years	25 - 29 years	30 - 34 years	35 - 39 years	40 - 44 years	45 - 49 years	50 - 54 years	55 - 59 years	60 - 64 years	65 - 69 years	70 - 74 years	75 - 79 years	80 - 84 years	85 - 89 years	90 - 94 years
F	1	177	510	348	209	180	172	157	97	87	47	14	9	6	1	
M	3	548	1745	1242	972	861	884	856	761	589	430	274	136	38	6	3
Grand Total:	4	725	2255	1590	1181	1041	1056	1013	858	676	477	288	145	44	7	3

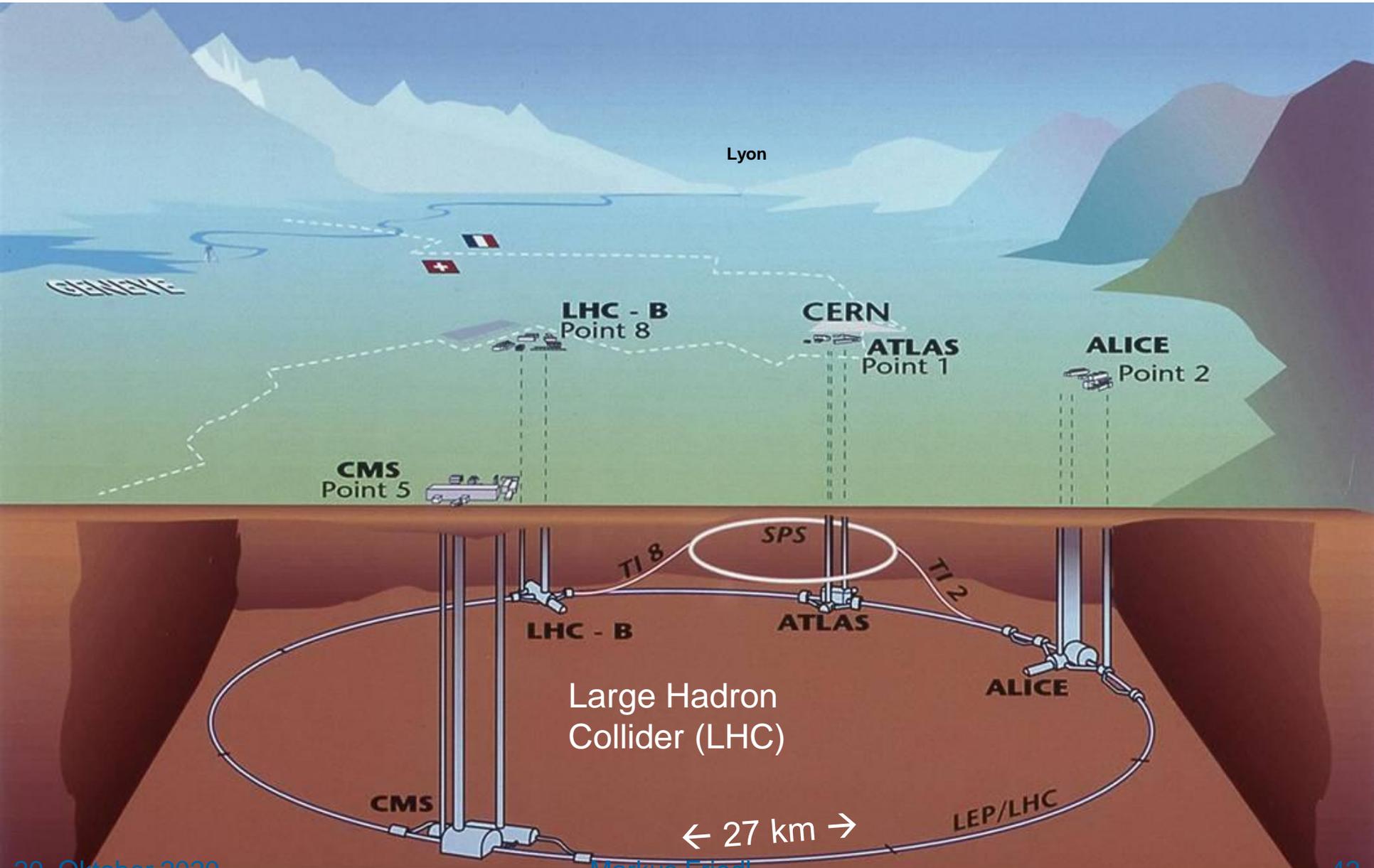
— F — M — Grand Total:

CERN – Das Laboratorium

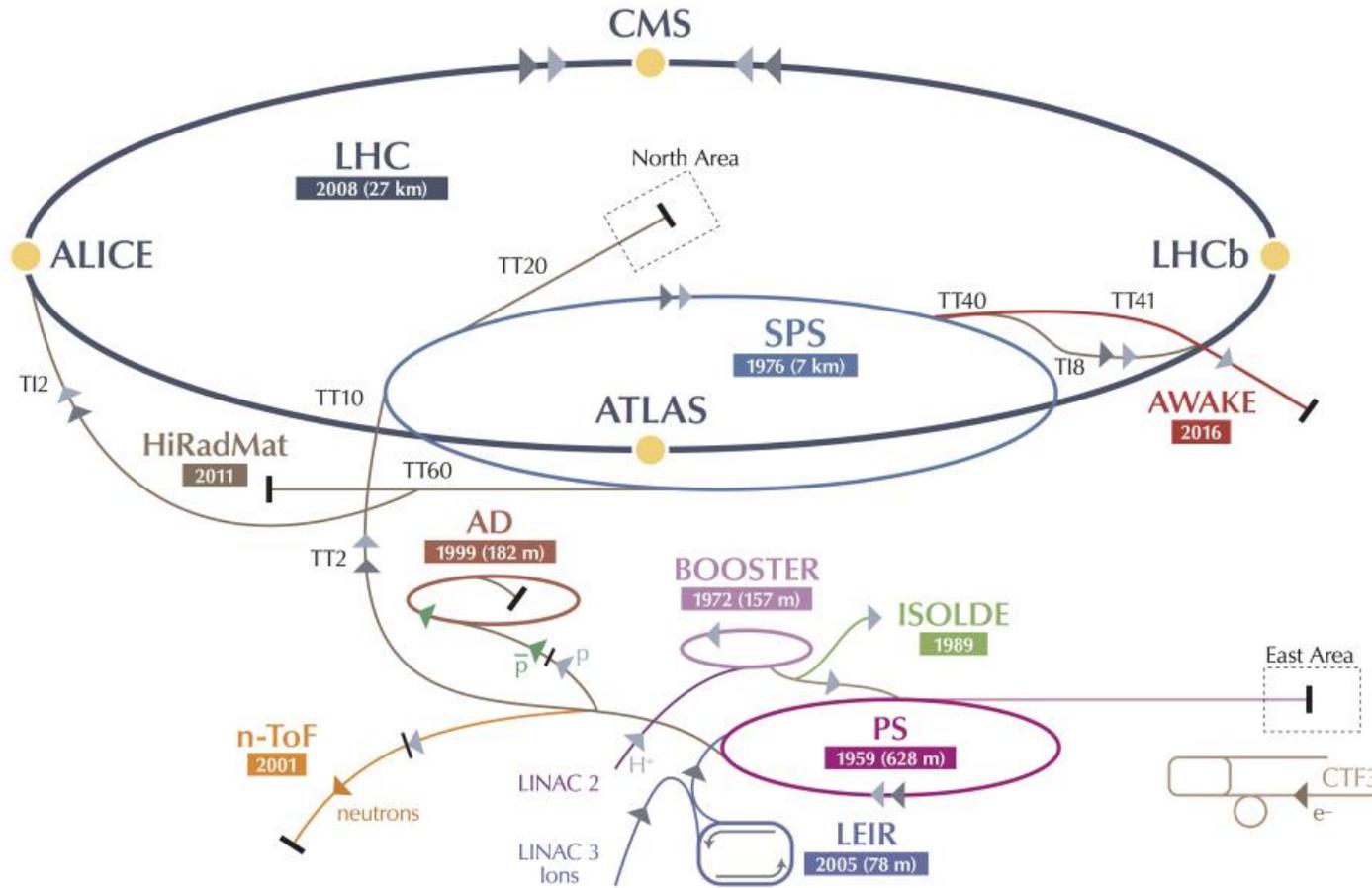


CERN – Das Laboratorium von oben





Beschleunigerkomplex des CERN

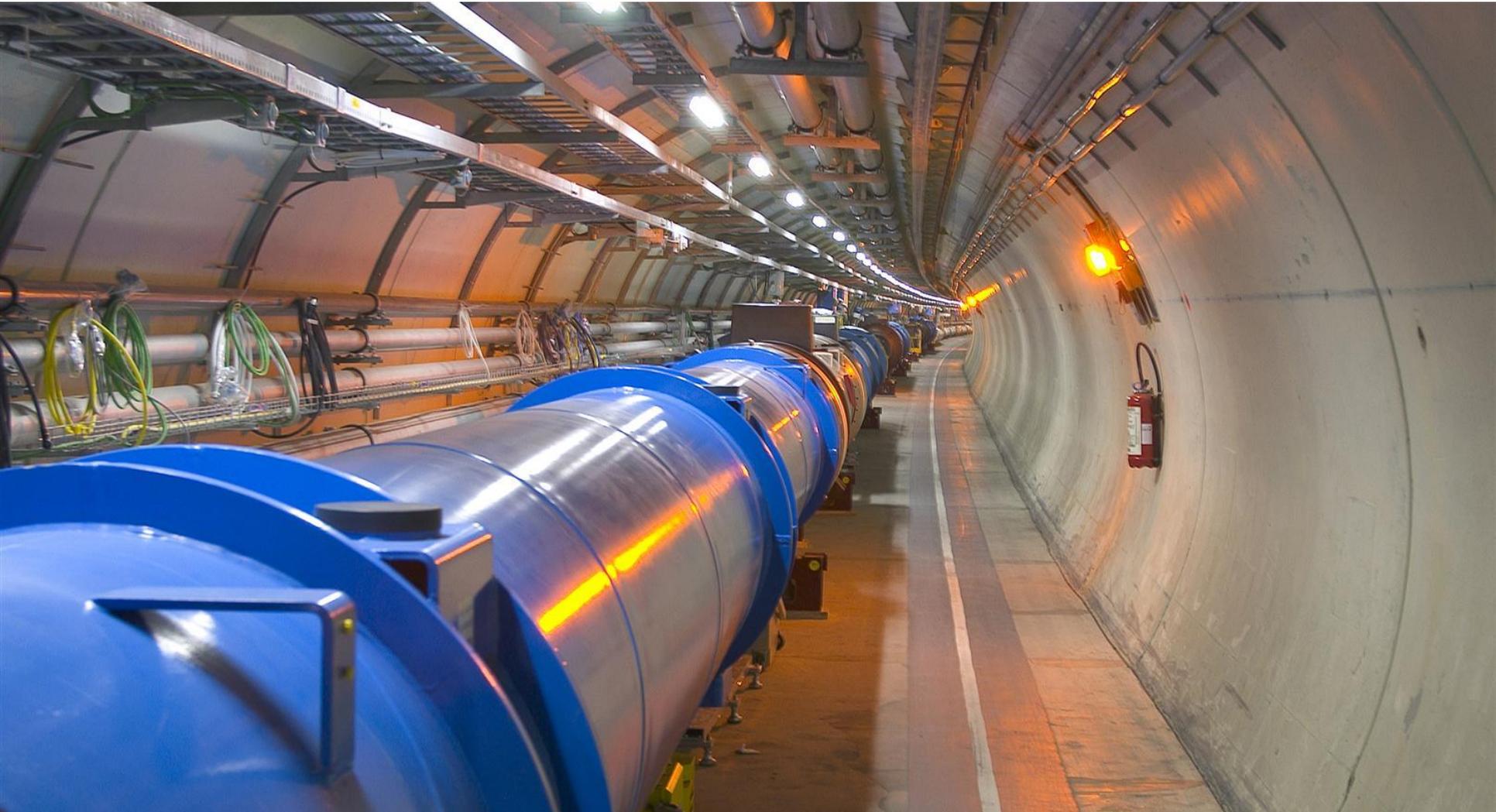


▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) ▶ electron ▶ \leftrightarrow proton/antiproton conversion

Ablauf der Beschleunigung



Zurück zum LHC.....



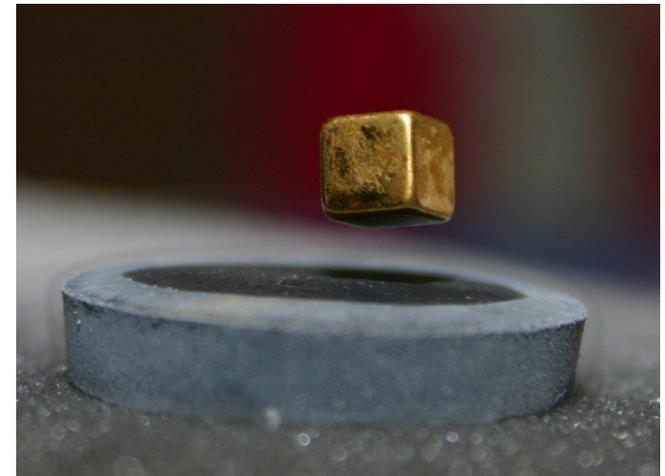
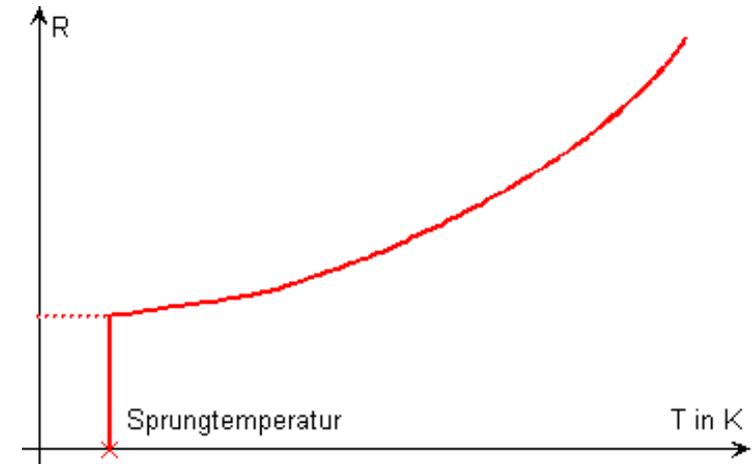
LHC Ablenkmagnete (Dipole)

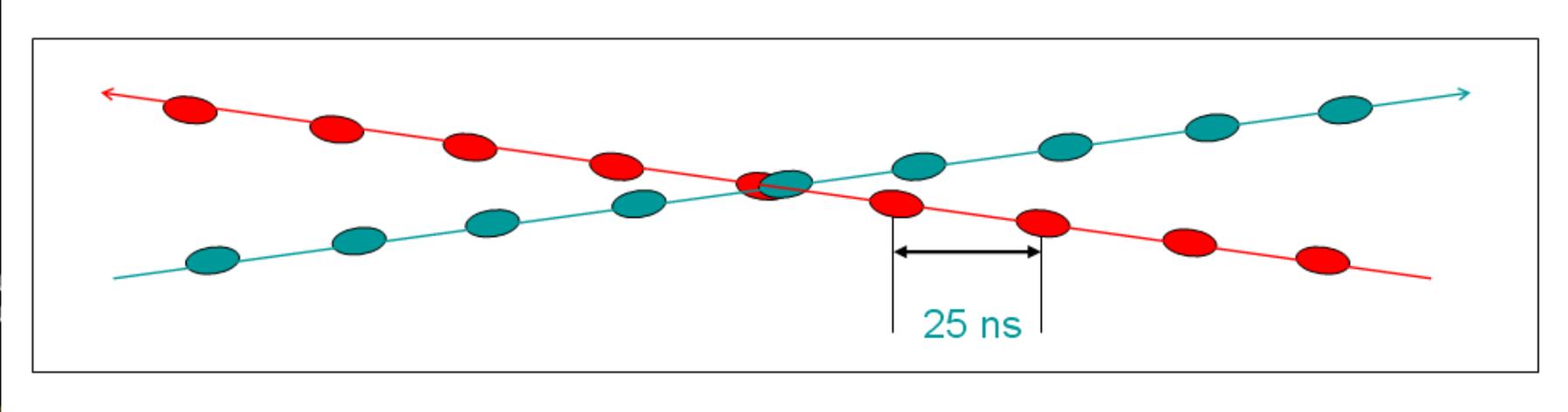
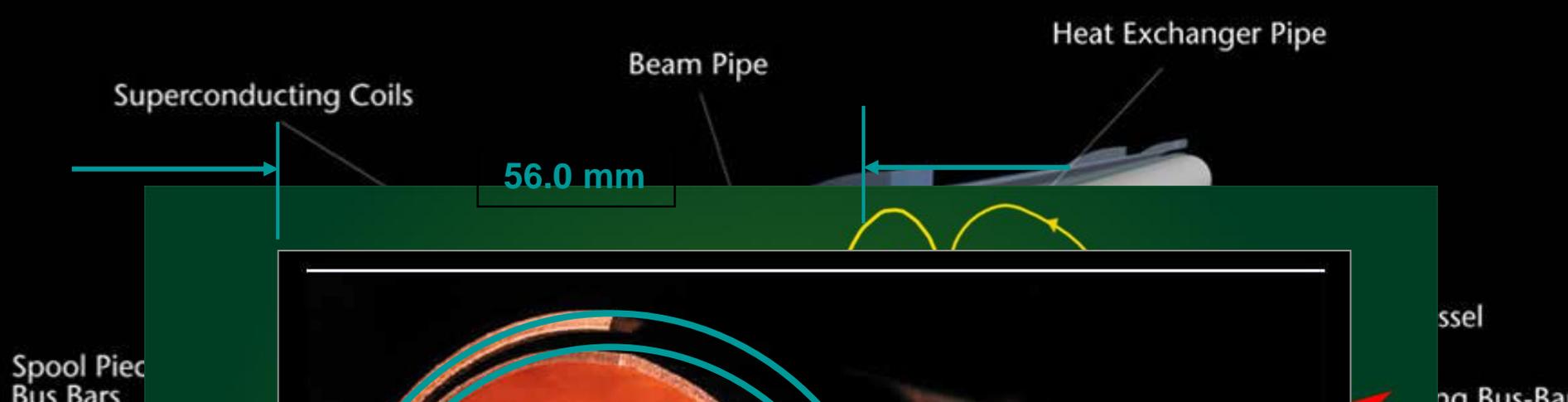


- 15m Länge, 35t Masse
- 1232 Stück insgesamt
- Betrieb mit flüssigem Helium (insgesamt 130t) bei 1.9K
- Magnetfeld: 8.33 Tesla

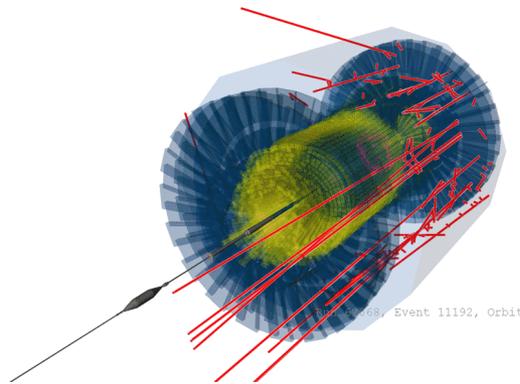
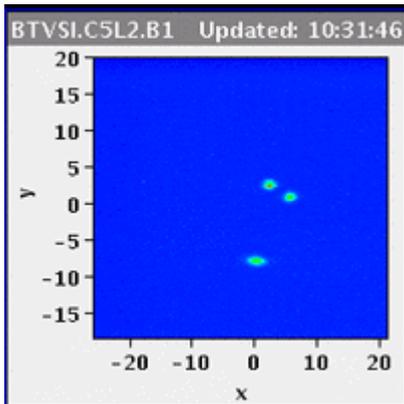
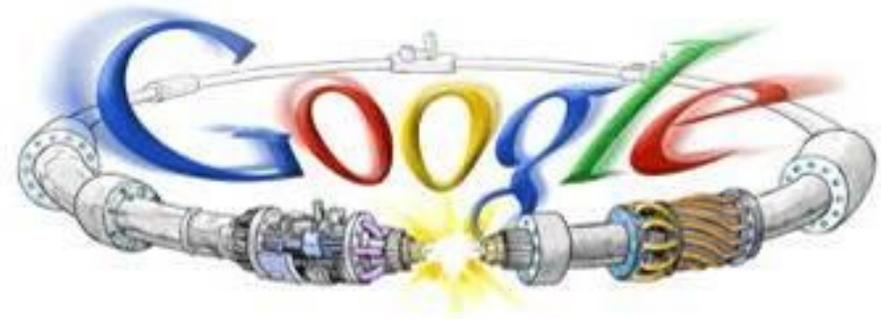
Warum kühlt man Magnete?

- Manche Materialien verlieren beim Unterschreiten einer bestimmten Temperatur komplett ihren elektrischen Widerstand: **Supraleitung**
 - Entdeckt 1911 von Kamerlingh Onnes
 - Quantenmechanischer Effekt (BCS-Theorie)
- Dadurch fließt Strom endlos
- Zusammenbruch der Supraleitung: **Quenchen**
 - Magnet wird normalleitend und hat elektrischen Widerstand
 - Aufheizung



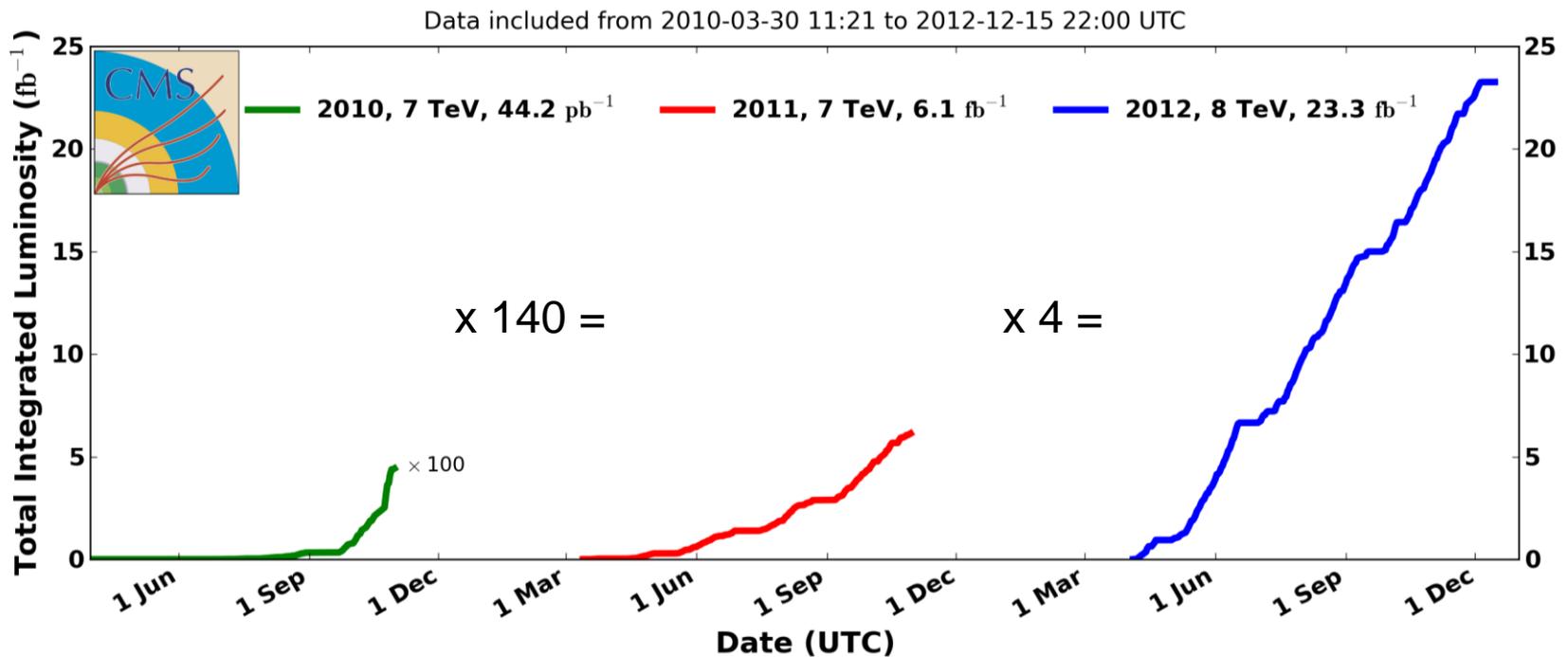


LHC Inbetriebnahme: 2008/2009

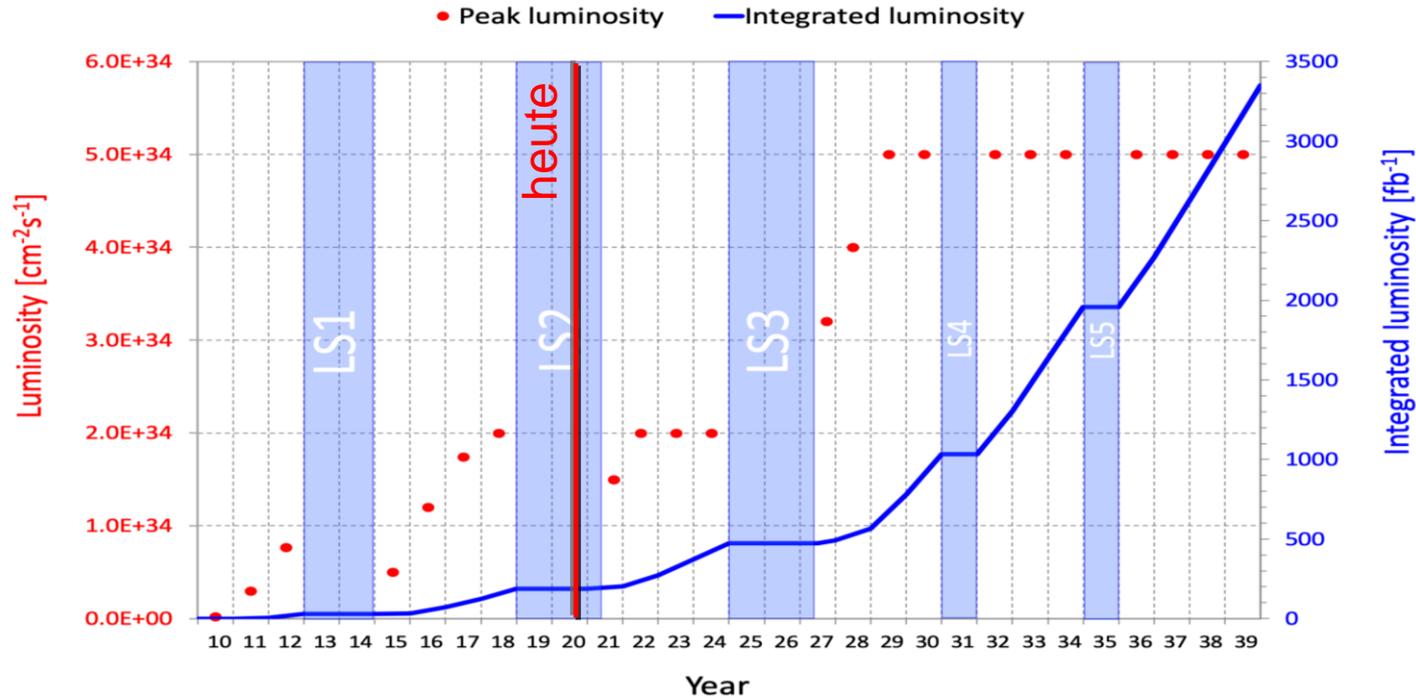


LHC Run 1: Betrieb 2009-2011

- Üblicherweise 8 Monate Betrieb/Jahr
 - Ca. 4 Monate Winterpause
- Anzahl Kollisionen:



LHC-Betrieb 2009 bis 2037

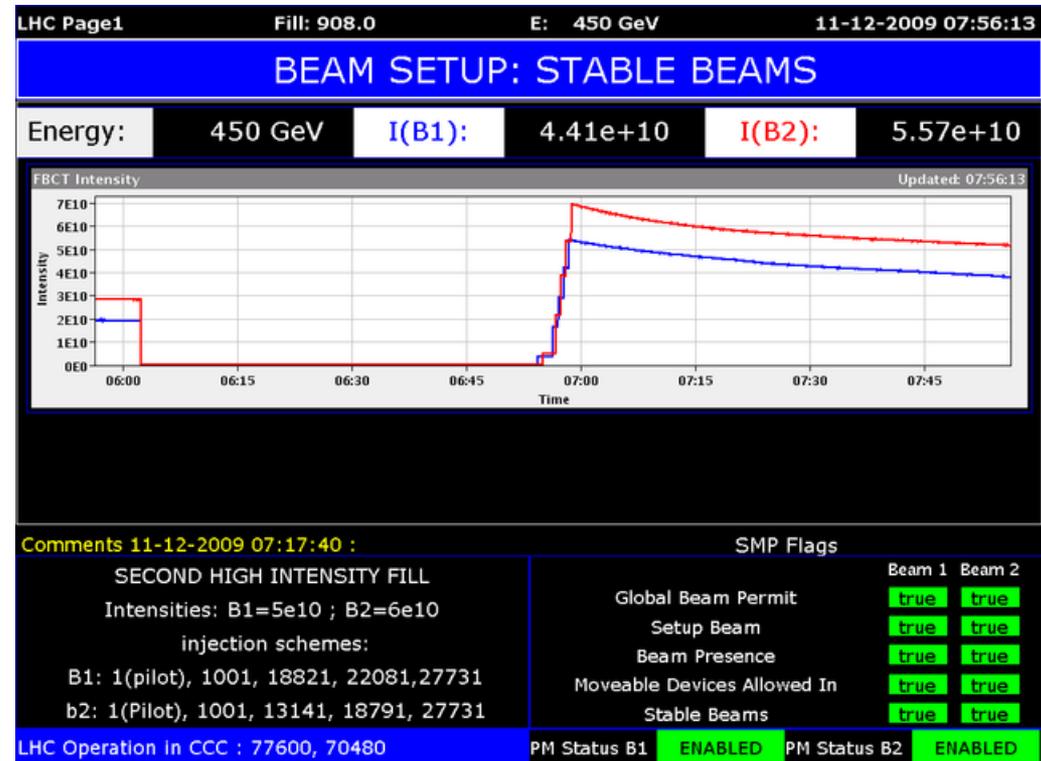


LS....long shutdown

- Wiederinbetriebnahme Anfang 2015 mit (fast) voller Kollisionsenergie (13 TeV)
- 3 Jahre Betrieb, jetzt Wartungs- und Erweiterungsarbeiten

LHC Live Status

- LHC Status kann live im Internet betrachtet werden
 - Nicht geheim
 - So wie alles am CERN
- Öffentliche Gelder – öffentliche Ergebnisse



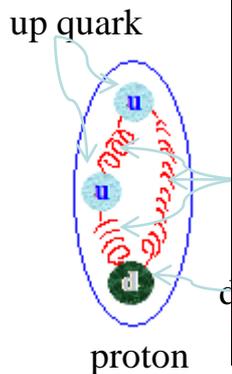
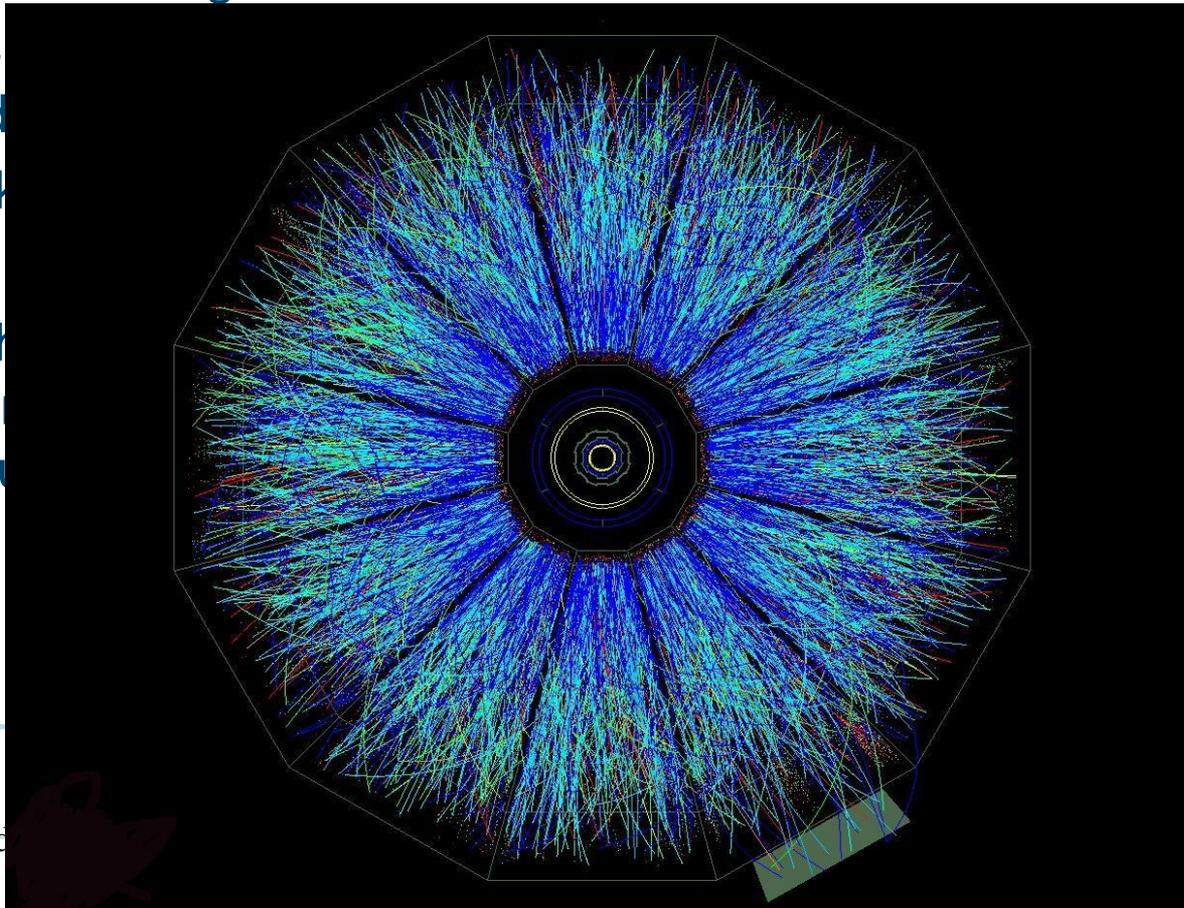
<http://op-webtools.web.cern.ch/op-webtools/vistar/vistars.php?usr=LHC1>

Teilchendetektoren Was fehlt ^{oder} jetzt noch? “Die Experimente”



Kollisionen

- Die Protonen haben 99.999999% der Lichtgeschwindigkeit und eine kinetische Energie von 7 TeV.
- Alle 25 Milliarden Protonen sind in einem Protonenstrahl gebündelt.
- Dabei kollidieren die Protonen mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-16} .
- Die hochenergetischen Kollisionen führen zur Erzeugung neuer Teilchen und zur Abstoßung der Quarks und Gluonen.



10^{-16} (100)

Abstoßung
der Quarks



Damit müssen wir leben:

Ereignis mit 78 einzelnen Kollisionen

Zum detektieren der so entstandenen Teilchen brauchen wir:

eine **Apparatur**, die von möglichst **allen Teilchen**

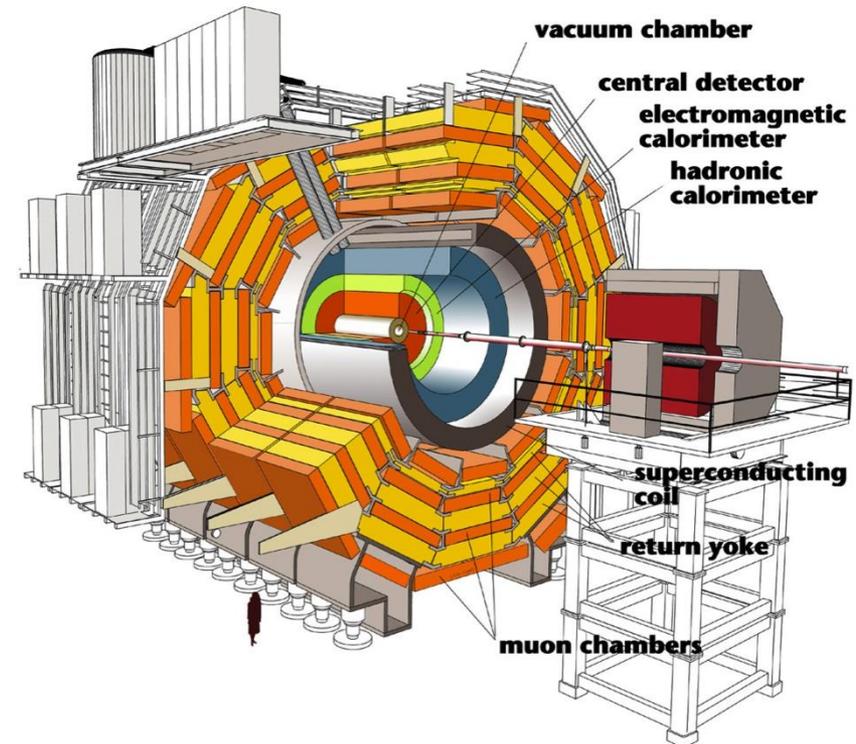
- ihre **Impulse** $p=m \cdot v$
- und ihre **Energie** misst
um daraus

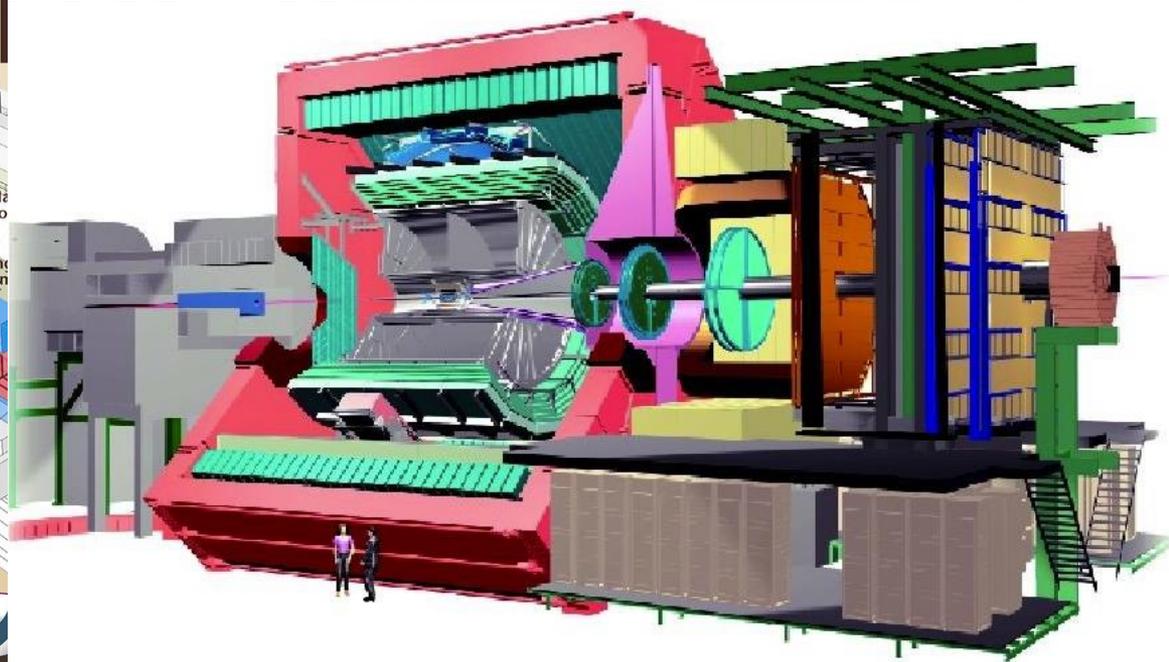
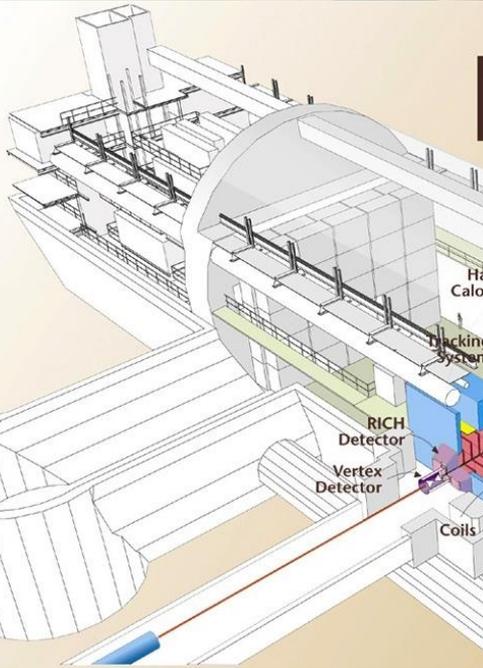
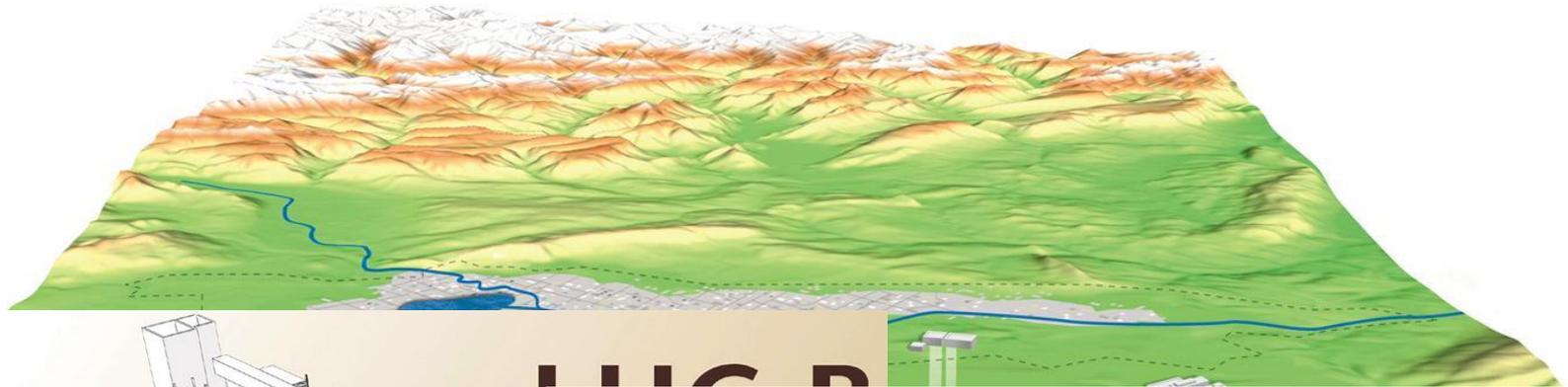
- ihre **Ladung** und
- die **Art der Teilchen**
(**Elektronen, Myonen,**
Photonen,...)

zu bestimmen.

....also einen

Teilchendetektor

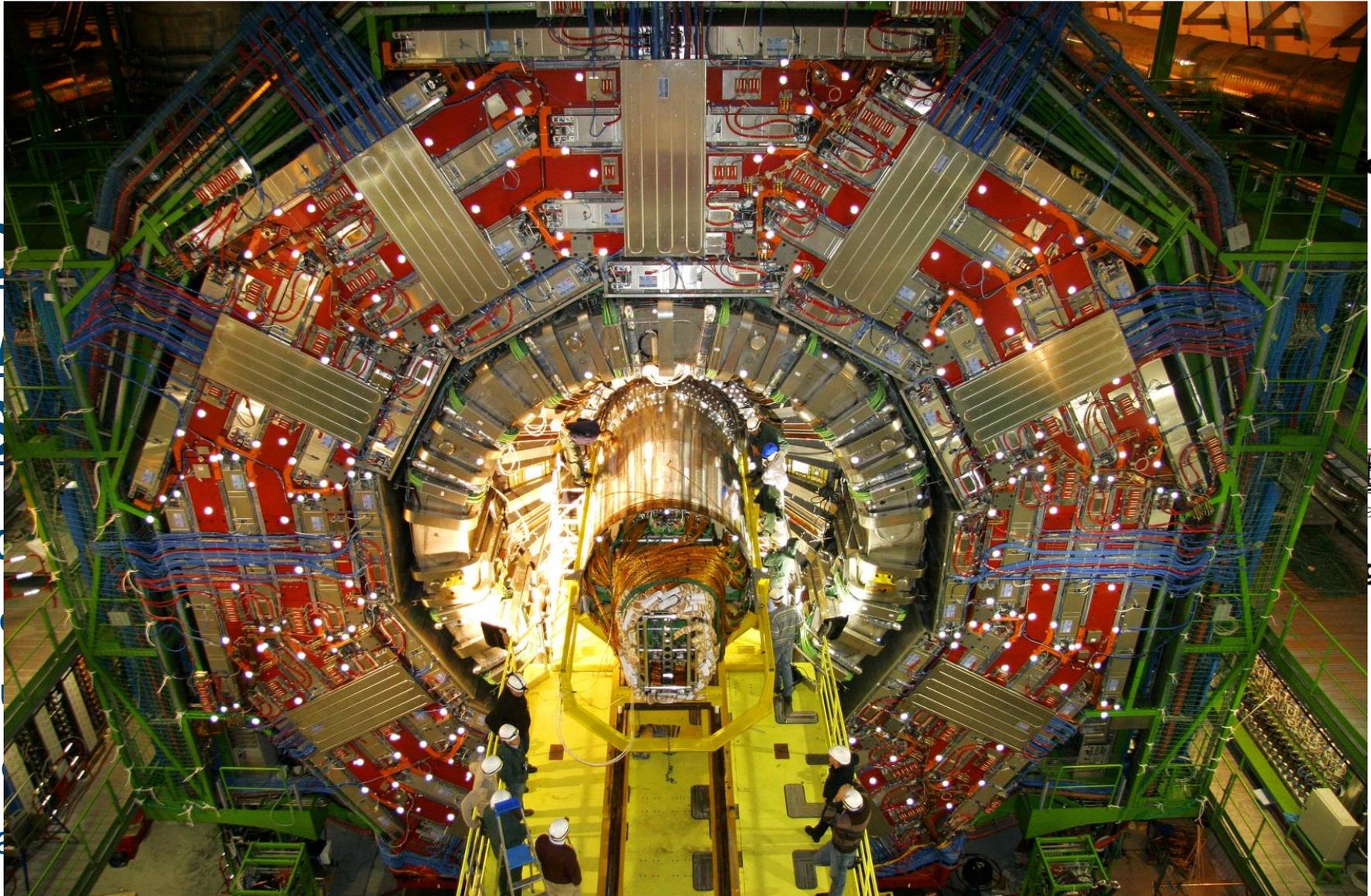




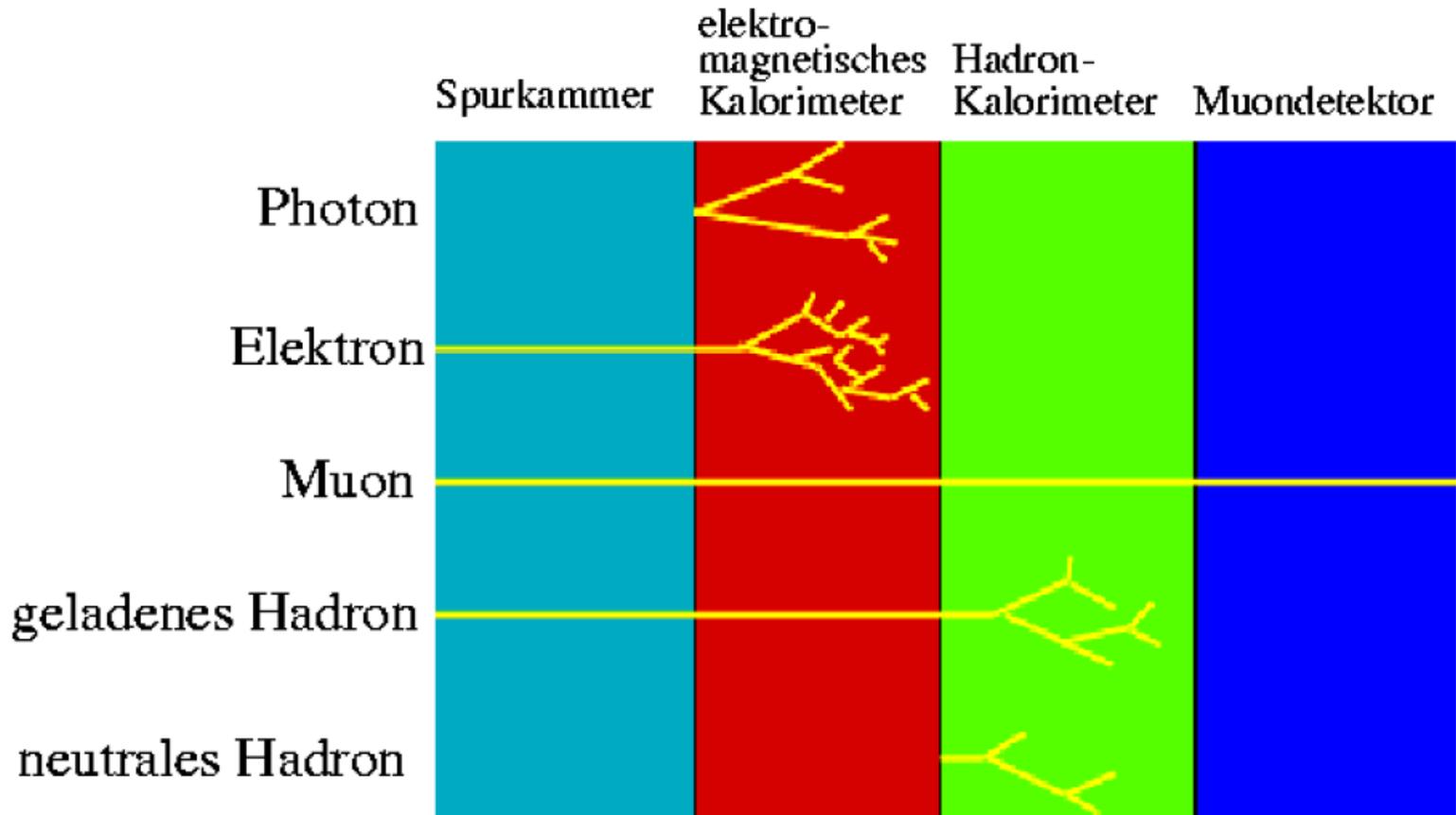
Detector characteristics

Width: 22m
 Diameter: 15m
 Weight: 14'500t

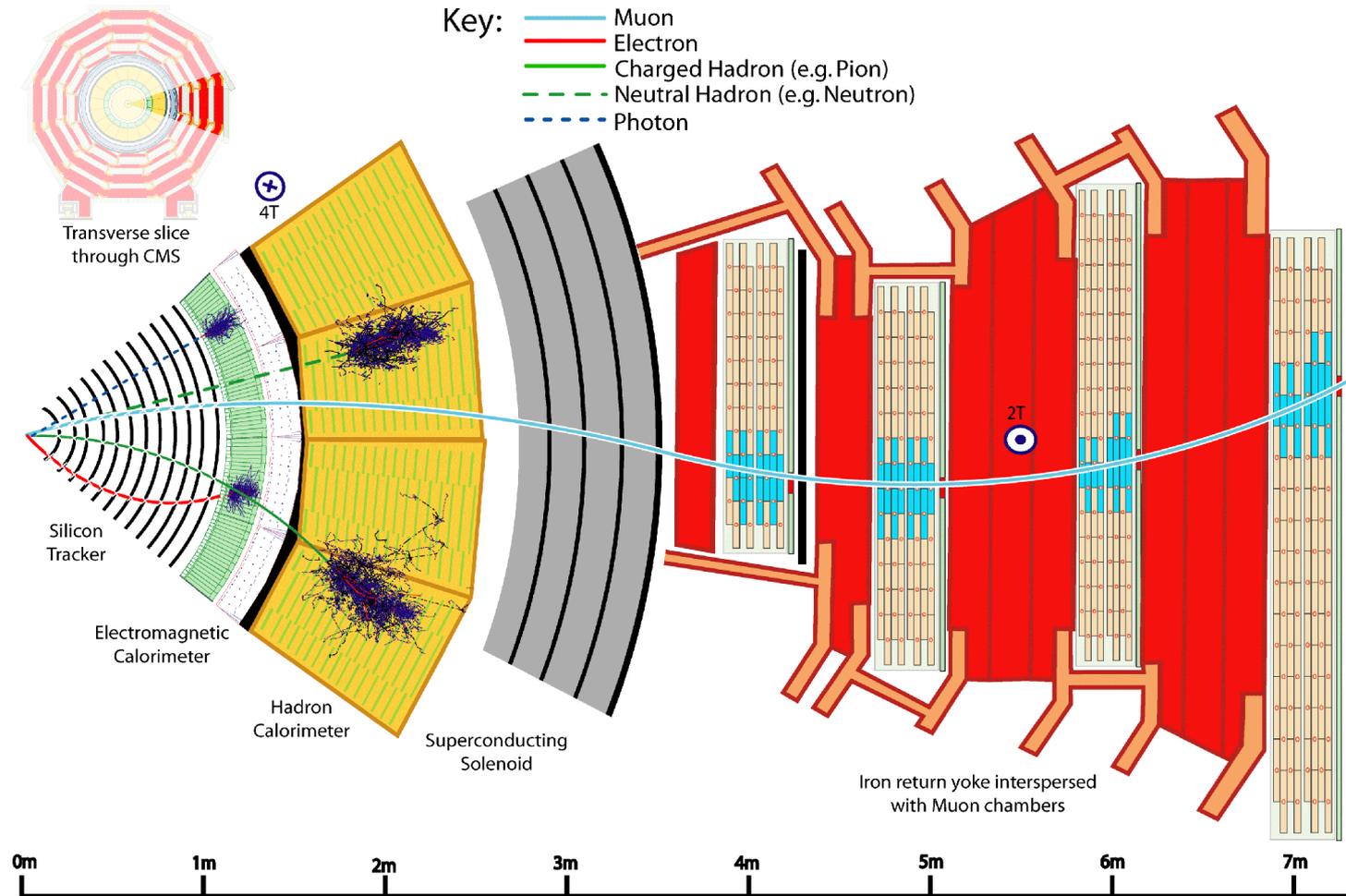
ON
S
10
H
D
G
(fa



Prinzipieller Aufbau eines Experiments

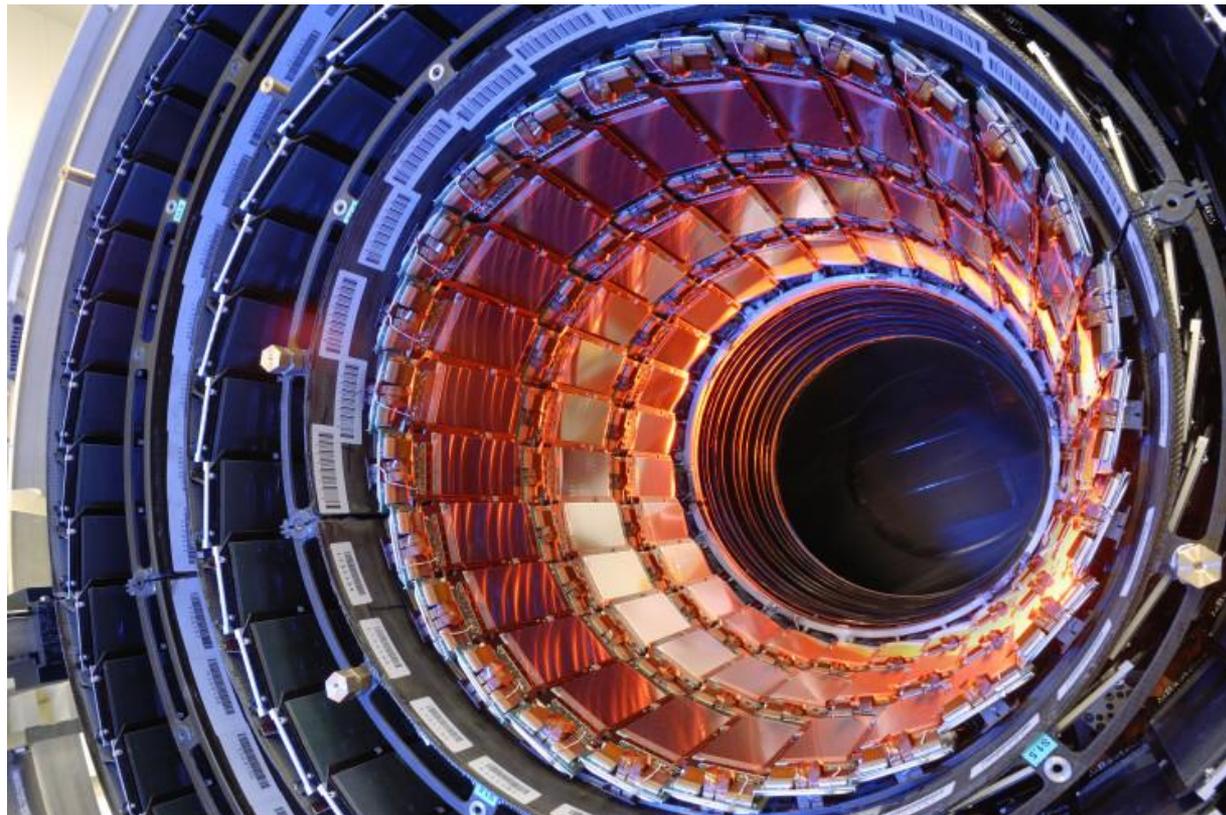


Querschnitt durch das CMS Experiment



Spurkammer – Der “Tracker”

Im innersten Teil eines solchen Detektors verwendet man meist eine Art “Digitalkamera”:



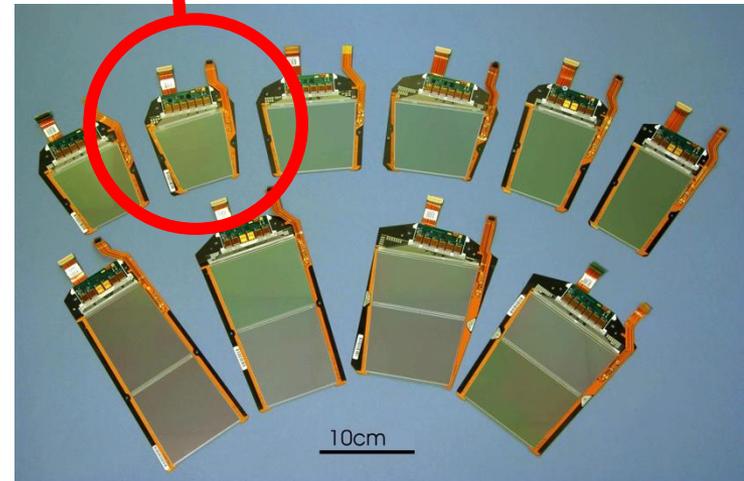
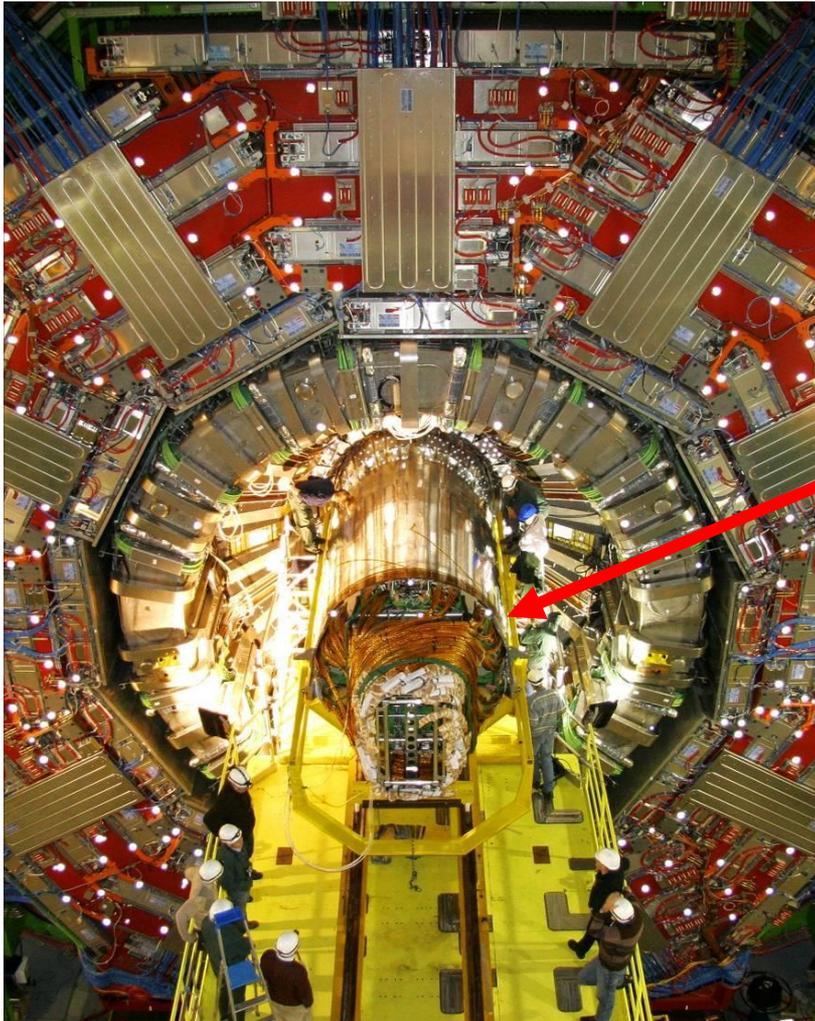
Digitalkamera:

- Typisch $2 \times 3 \text{ cm}^2$ in Spiegelreflexkamera
- 3-5 Fotos pro Sekunde

CMS Tracker:

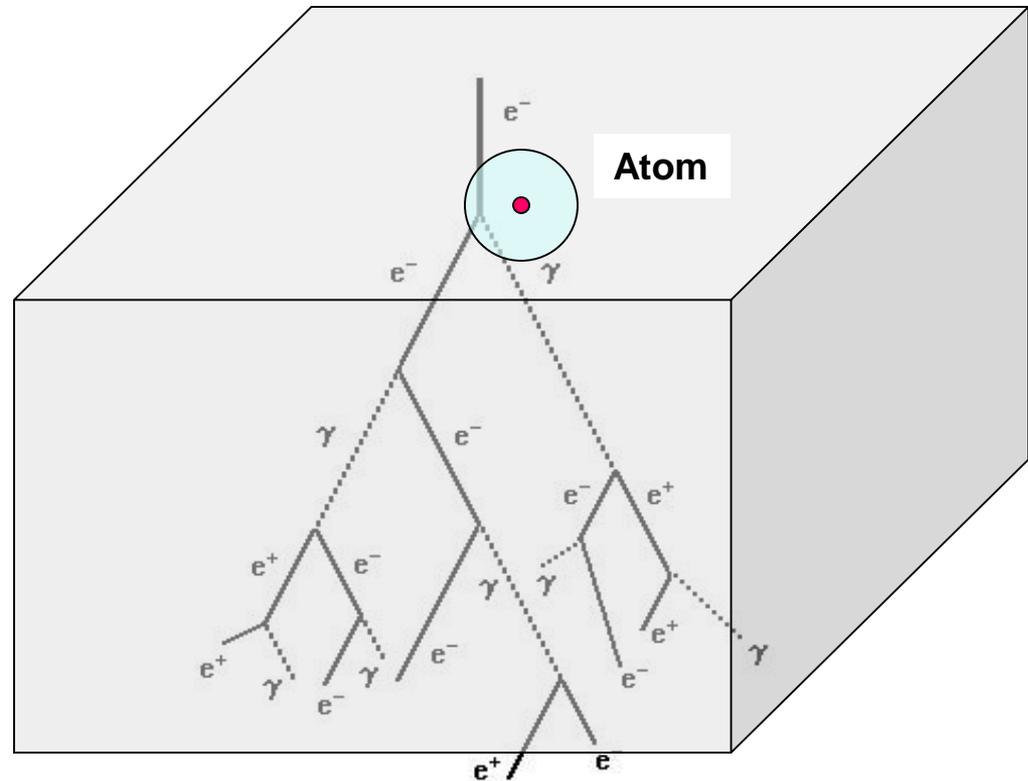
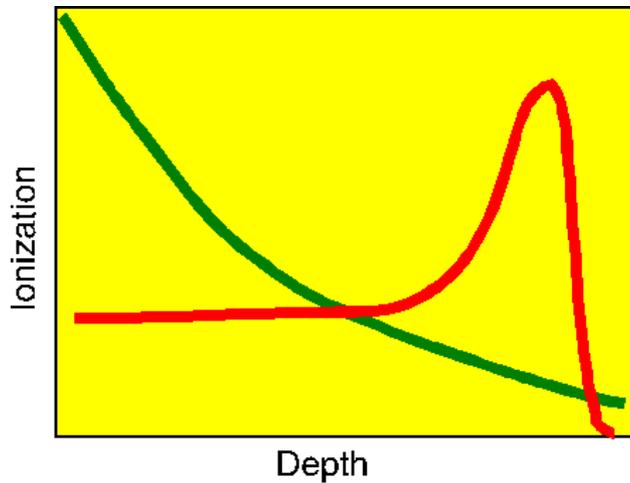
- 200 m^2 Detektorfläche
- 40 Millionen 3D-„Fotos“ pro Sekunde

Bau des CMS Trackers



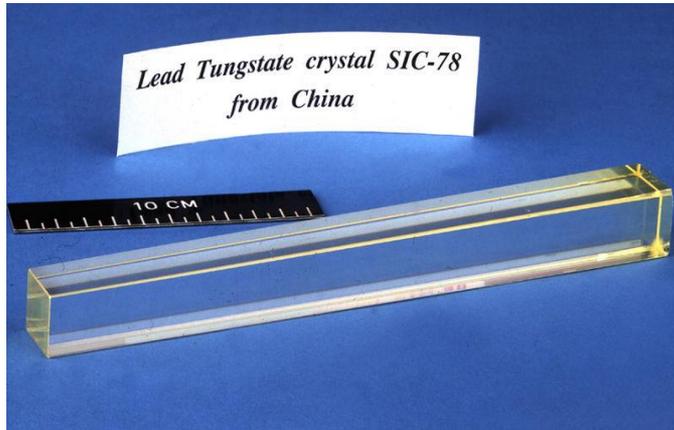
Kalorimeter

Messung der Energie durch totale Absorption (destruktiv)



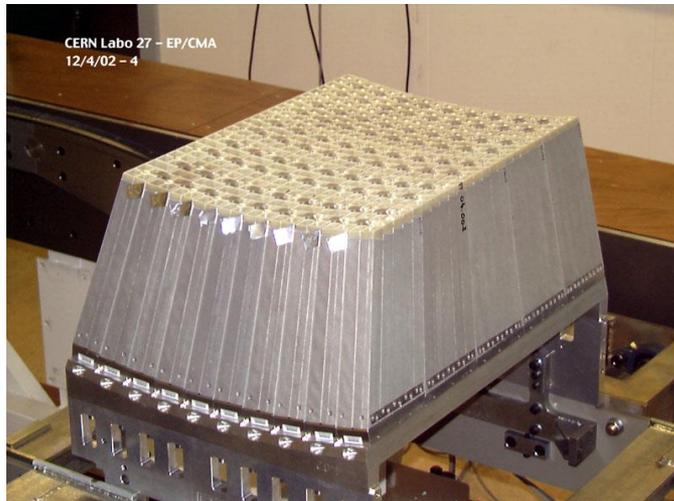
Bremsstrahlung und Paarbildung bis die Energie aufgebraucht ist ;-)

Elektromagnetisches Kalorimeter



Blei-Wolfram-Oxid (PbWO_4) $23 \times 2.2 \times 2.2$ cm als
Absorber und Szintillator

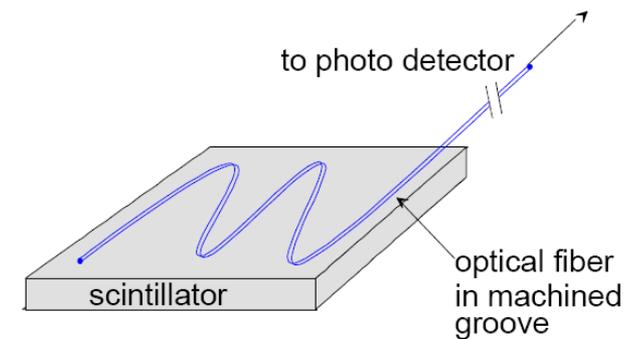
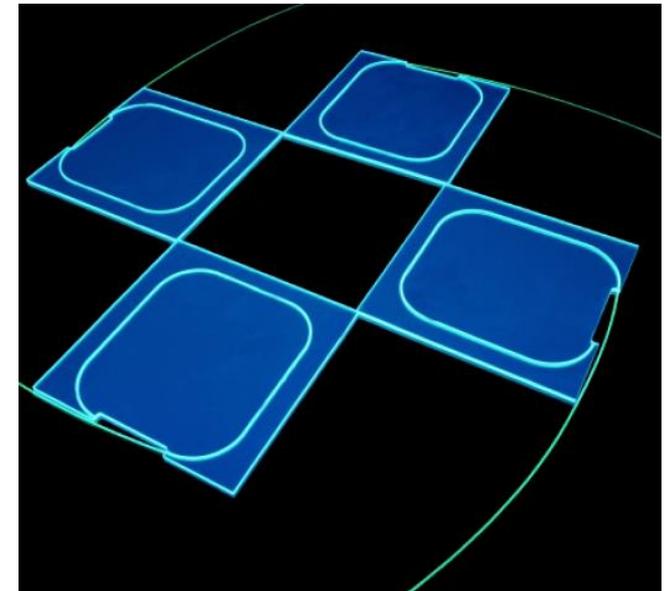
Messung des entstehenden Lichtes mittels
Photomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher)



Hadronisches Kalorimeter

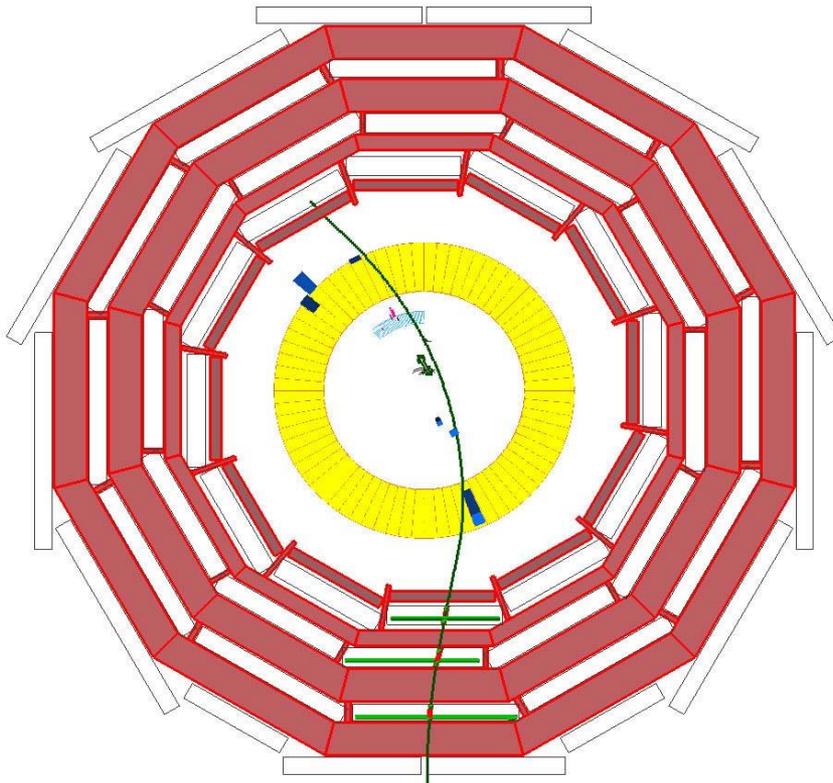
... so wie für Hadronen und hadronische Jets (“Quarks”)

Mehrere Schichten dichten Materials (Kupfer oder Stahl) zwischen Plastik Szintillatoren.



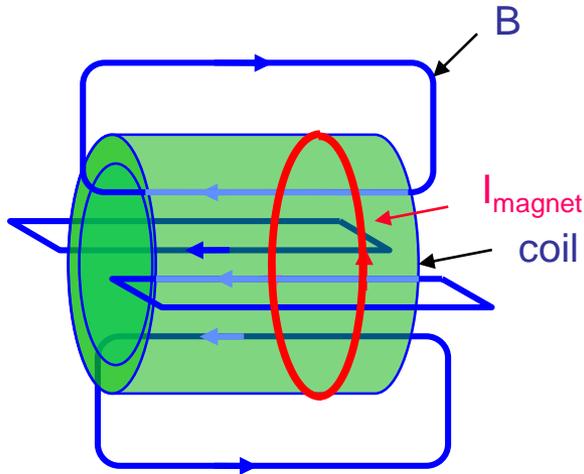
Myonendetektoren

Schlussendlich noch einen “Tracker”,
der Muonspuren aufzeichnet!



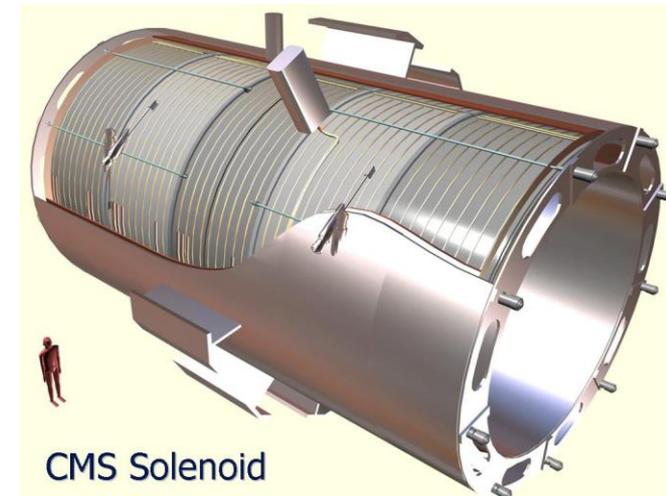
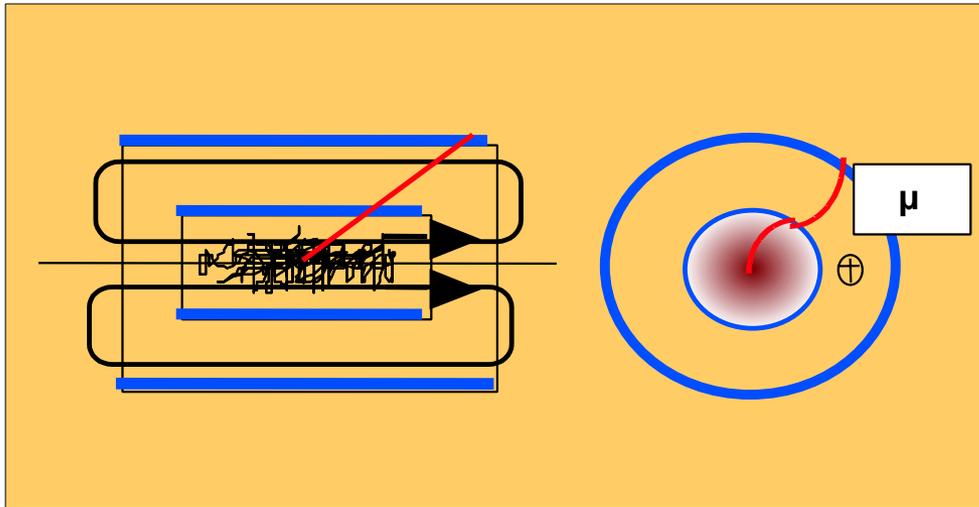
Magnetfeld

... in dem sich die Teilchenbahnen krümmen, und dadurch ihr Impuls messbar wird!



13m lang, 6m Durchmesser

Niob-Titan Drähte bei -271°C führen 20000 Ampere um ein 4 Tesla starkes Magnetfeld zu erzeugen – ca. 100000 fach stärker als das Erdmagnetfeld

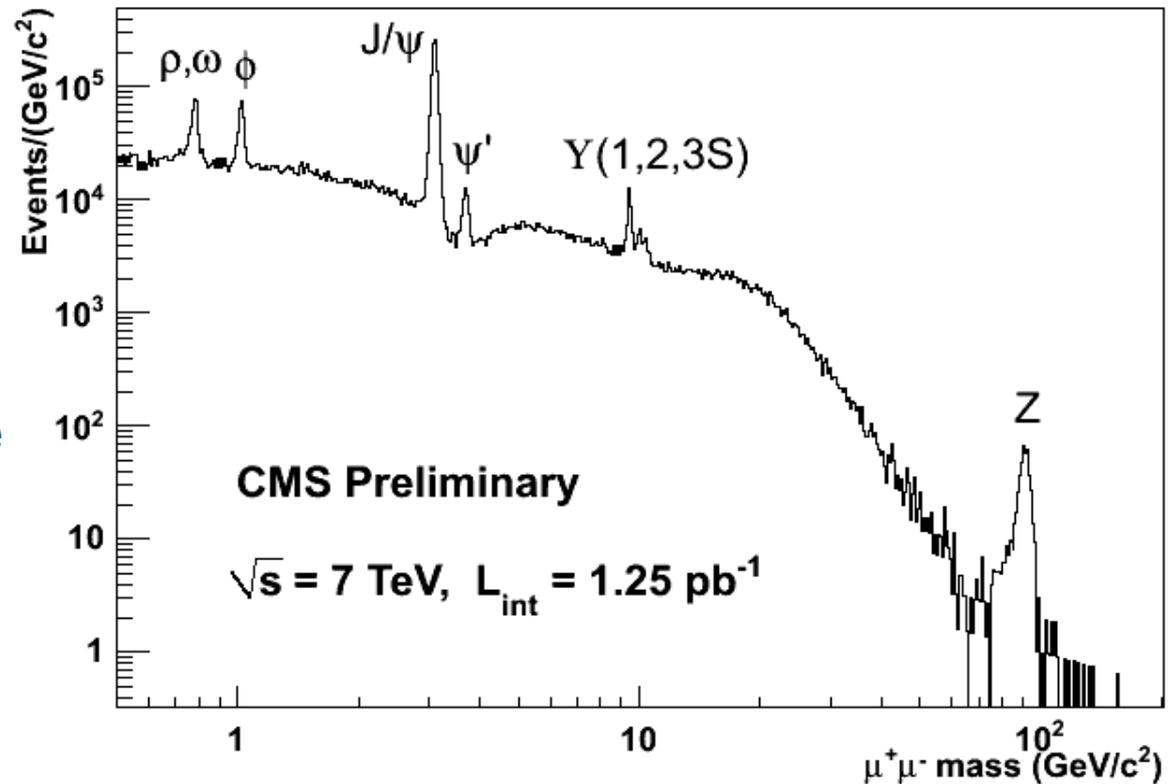


Was passiert, wenn Teilchen kollidieren?

...ein "Ereignis":

1. Aufnahme
2. Datenreduktion
3. Verteilung
4. Analyse-Software
5. Auswertung
6. Ergebnis

```
std::vector<Sample*> samples;
std::vector<std::vector<float>> countABCD;
samples.clear();
cout<<prefix<<"creating samples and fwLite::ChainEvents:"<<endl;
std::vector<float> zerovec;
```

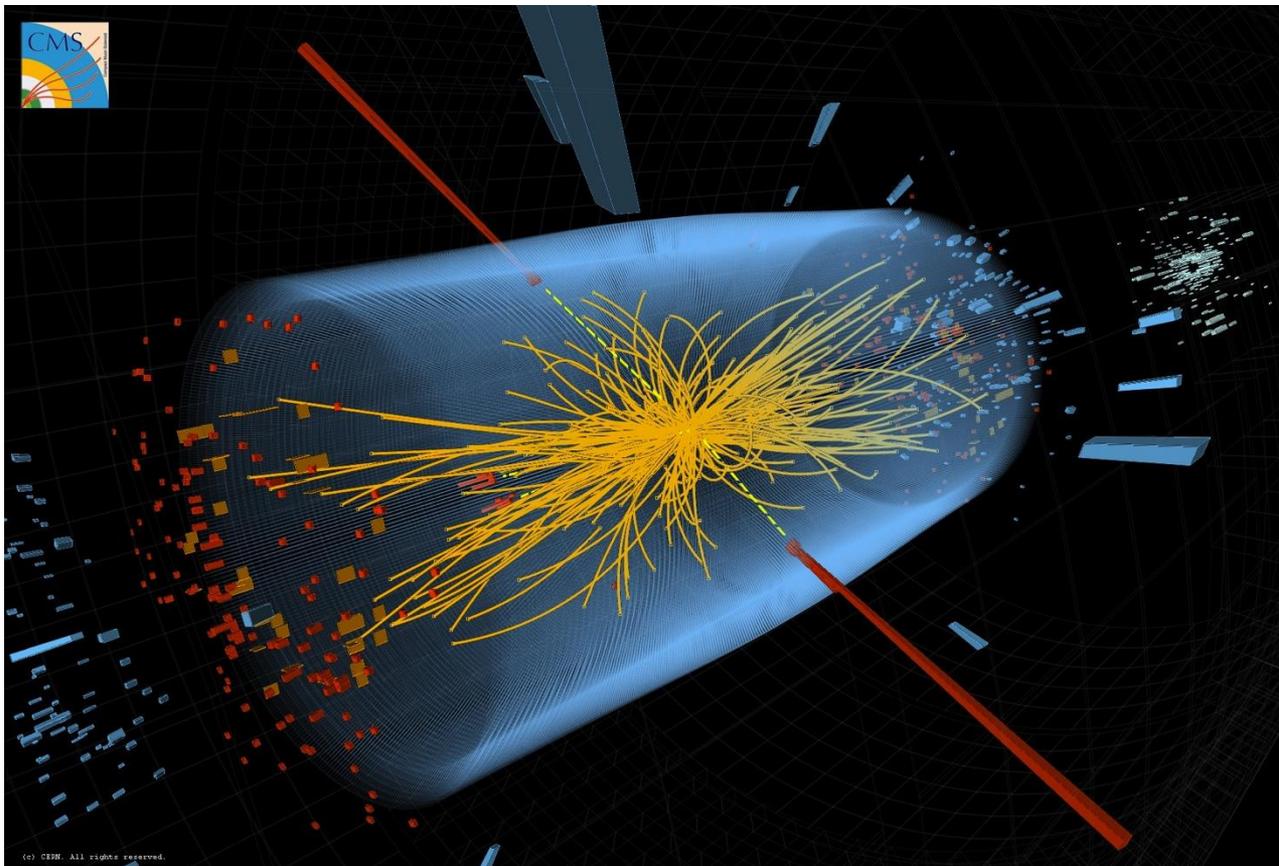


```
if (!hasNoElectron) continue;
cout<<prefix<<"Electron vetoed."<<endl;
```

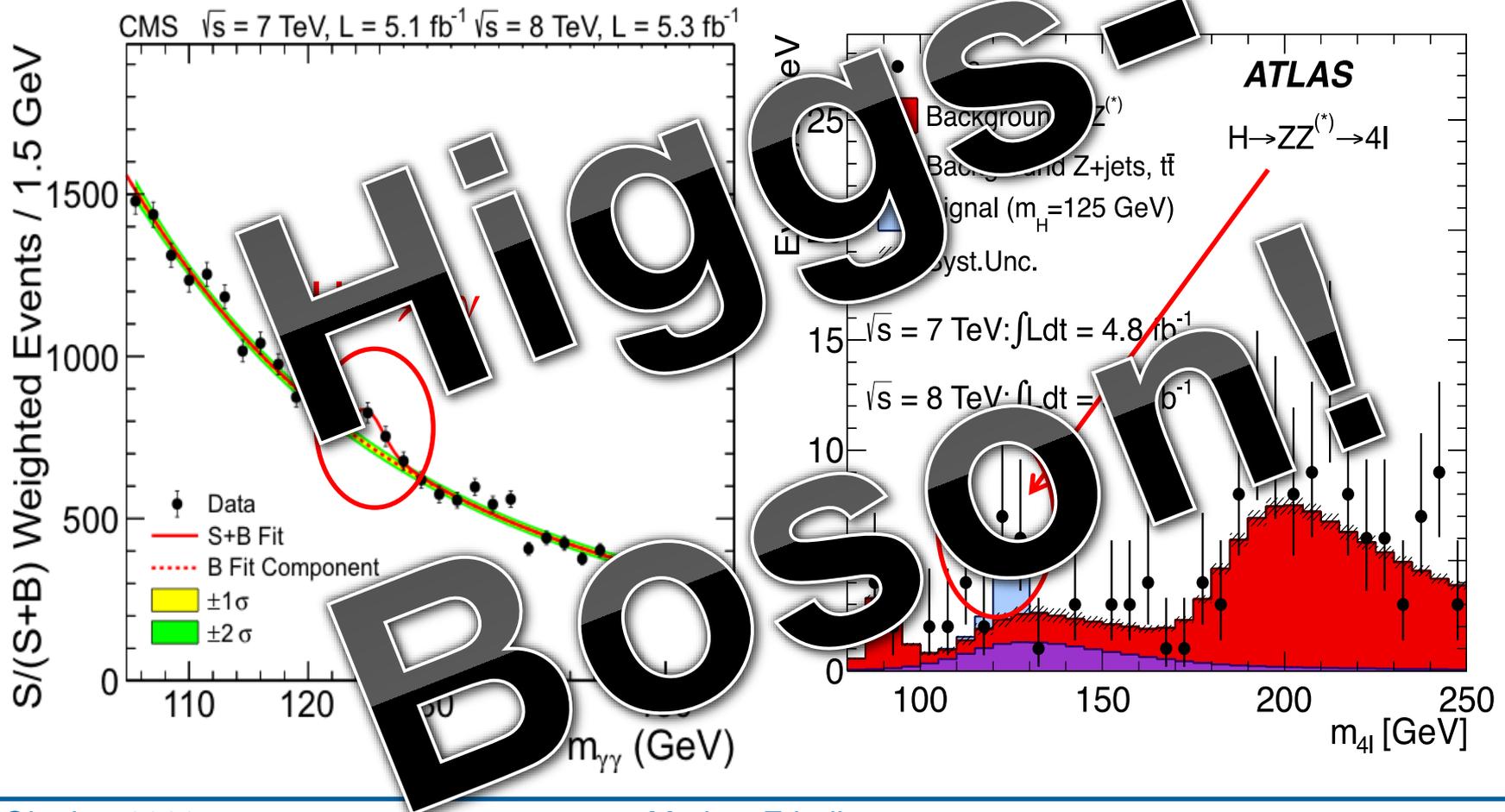
Ein "realistisches" Bild von 100 Milliarden pp Kollisionen

Teilchenkollisionen in CMS

- Ende 2011: Erste Anzeichen für Higgs-Teilchen



Bekanntgabe der Entdeckung eines neuen Teilchens (4. Juli 2012)



4. Juli 2012: Seminar zur Entdeckung des Higgs Bosons

- Main analysis is a Multi-Variable (MVA)
- Works for photon $\gamma\gamma$ and γZ channels and $Z\gamma$ channel
- Improvement in signal to background ratio
- Cross checked with an alternative background estimation
- Also cross-checked with a cut based analysis
- Simple and robust
- Cut based photon γ and event classification
- The same analysis is applied to 2 channel shape vs categories with different signal over background (S/B) & μ -jet categories
- Published for ATLAS data
- Present: arxiv.org/abs/1207.3254



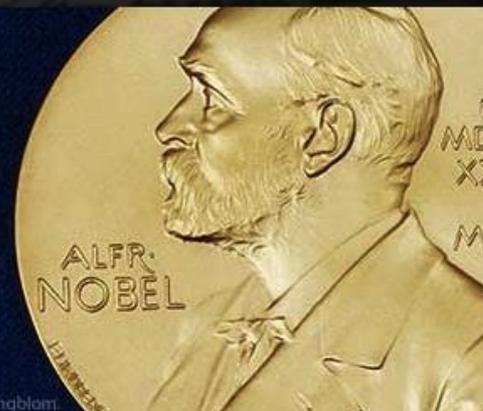
 **Nobelprize.org**
The Official Web Site of the Nobel Prize

8. Oktober 2013

[Home](#) | [Nobel Prizes and Laureates](#) | [Nomination](#) | [Ceremonies](#) | [Alfred Nobel](#) | [Events](#)

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

**François Englert
Peter W. Higgs**



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom



The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

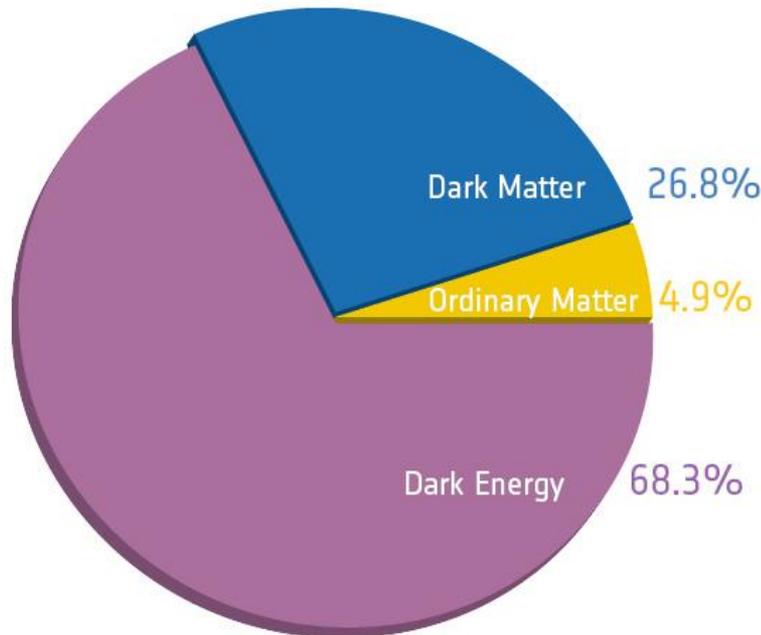
Was habe ICH davon?

5 Beispiele

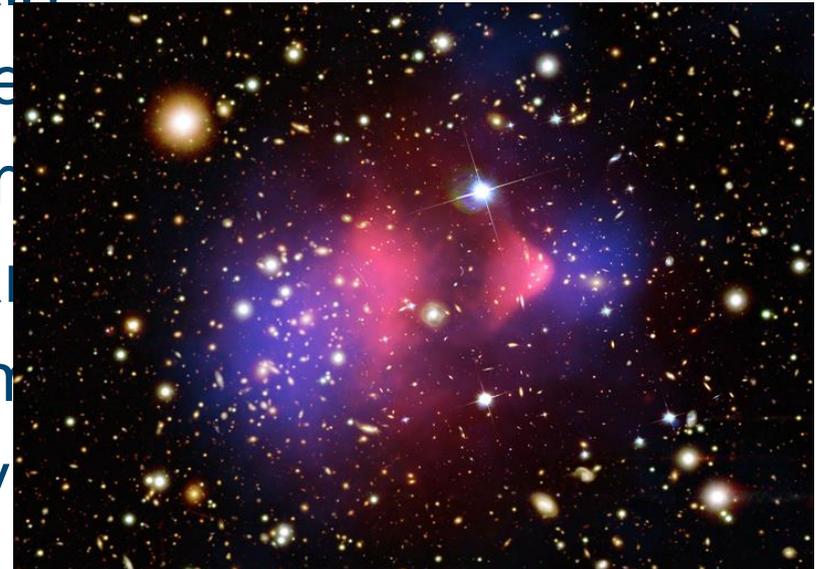


1. Erkenntnisgewinn

Im Grunde sind wir neugierig



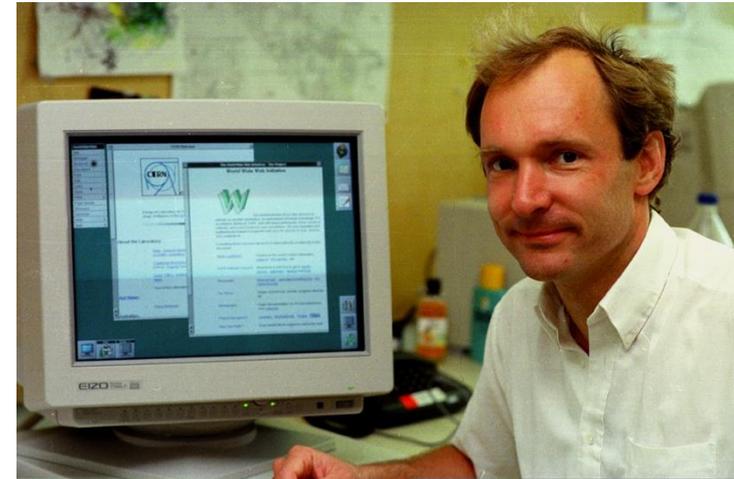
all?
de
um
ta
tin
riv



Zusammengesetzte Aufnahme aus normaler Materie (rot) und Dunkler Materie (blau)

2. Das World Wide Web

- Erfunden am CERN von Tim Berners-Lee
- Text mit Hyperlinks
 - Einfache und schnelle Methode um wissenschaftliche Ergebnisse auszutauschen
- Erster Webserver lief am CERN

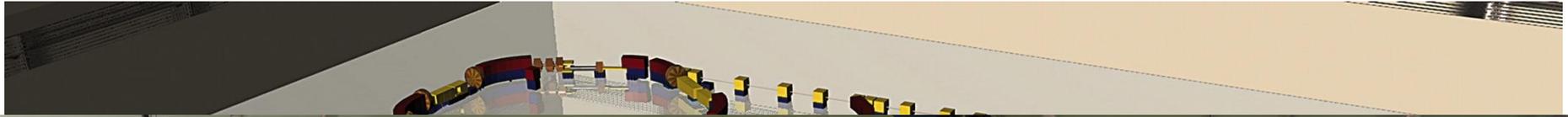


3. Krebstherapiezentrum MedAustron

- Therapiezentrum für
Krebstumore bei Wiener
Neustadt
 - Baubeginn 2011
 - Erste Patientenbehandlung
2016
 - Verwendet
Beschleunigertechnik vom
CERN
- 15 Forscher „lernten“ am
CERN Beschleuniger-
technik

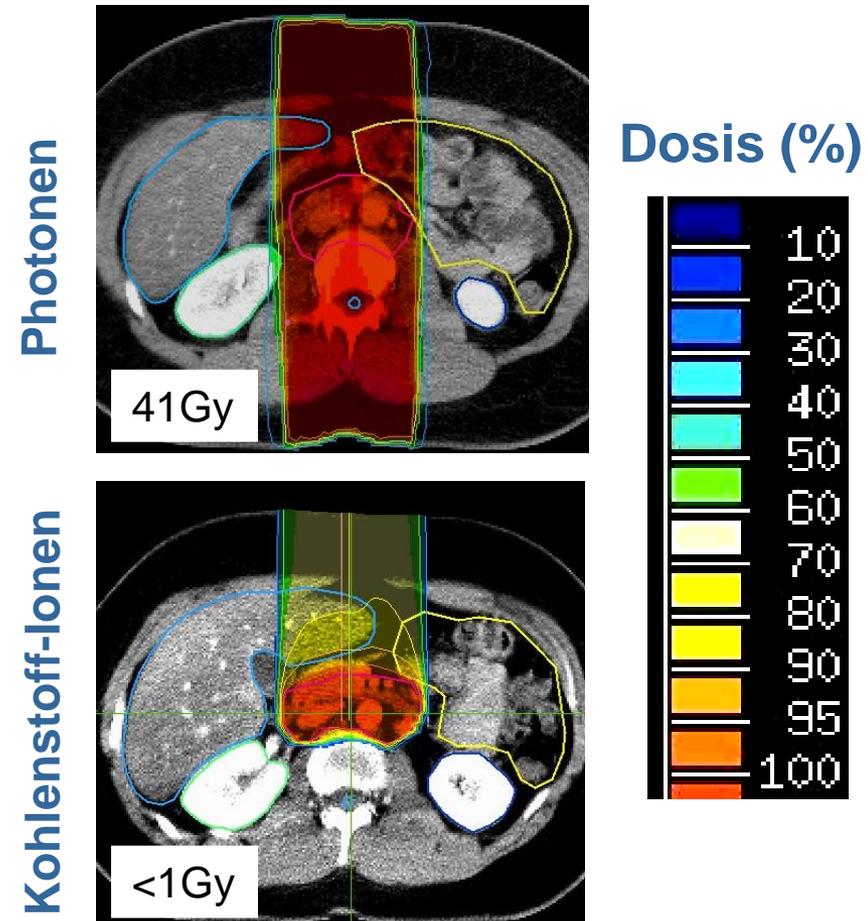


3. Krebstherapiezentrum MedAustron



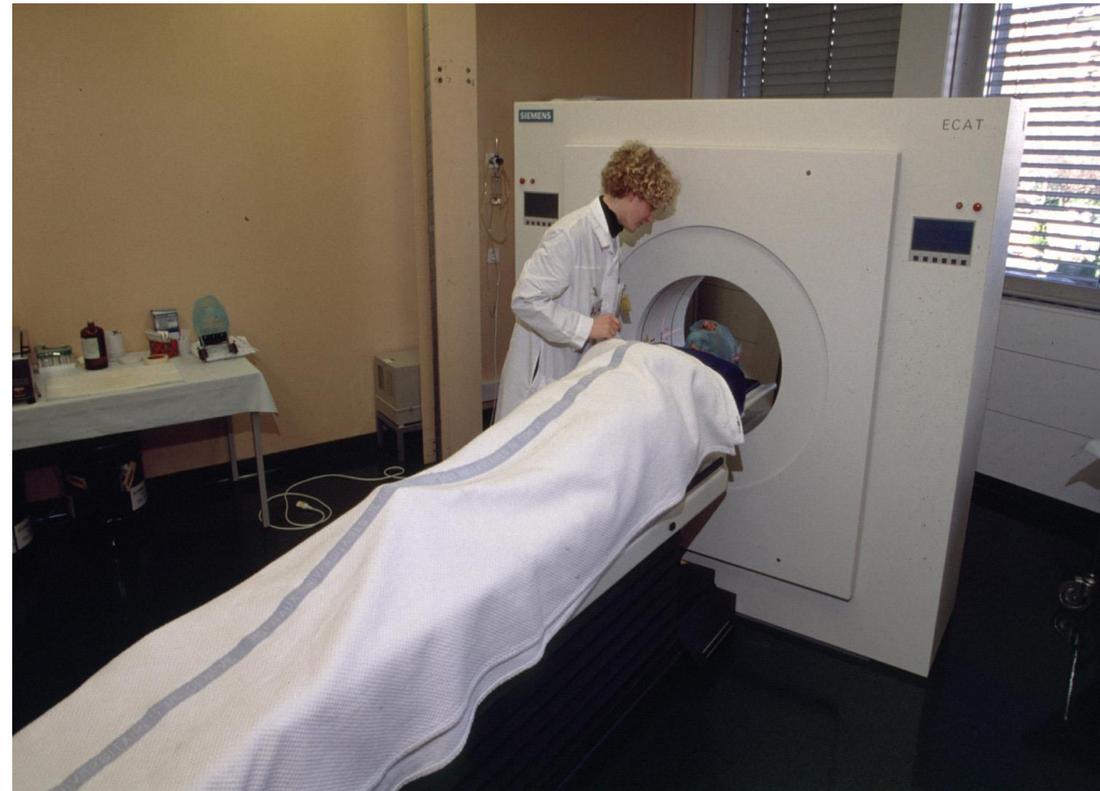
Tumorbestrahlung mit Hadronen

- Vorteile gegenüber Bestrahlung mit Elektronen oder Photonen
- Hadronen schädigen gezielt Tumorgewebe und verschonen „gutes“ Gewebe vor dem Tumor (Bsp: Rückenmark)
- Physik: „Bragg-Peak“
- Nachteile
 - Technik komplizierter als Elektronen oder Gamma-Bestrahlungseinrichtungen
 - Großer Beschleuniger benötigt



4. Positron-Emissions-Tomographie

- Bildgebenes Verfahren in der Nuklearmedizin
- Verwendet Antimaterie, um Signal in Detektoren zu erzeugen.
- Patienten wird ein Radiopharmaka verabreicht, dass Positronen beinhaltet
- Positronen reagieren mit Elektronen und erzeugen zwei Lichtblitze in genau entgegengesetzte Richtungen
- Detektierung der Lichtblitze mittels Szintillatoren und Photomultiplier
- Bildentstehung im Computer

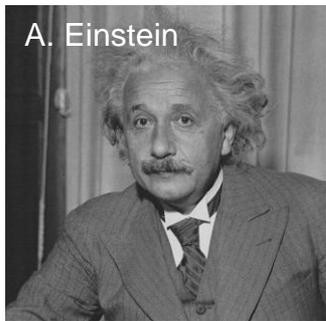


5. Ausbildungsmöglichkeiten

- CERN bietet ein exzellentes Arbeitsumfeld
- Jeder österreichische Student kann am CERN seine Diplomarbeit oder Dissertation machen
 - Physik
 - Elektrotechnik
 - Maschinenbau
 - Informatik
- Interessantes Arbeitsumfeld
- Wissen wird nach Abschluss wieder nach Österreich zurückgebracht



Grundlagenforschung als Motor für Innovation



Relativitätstheorie
100%
Wissenschaft



J.C. Maxwell



Elektromagnetismus
100%
Wissenschaft



ENDE

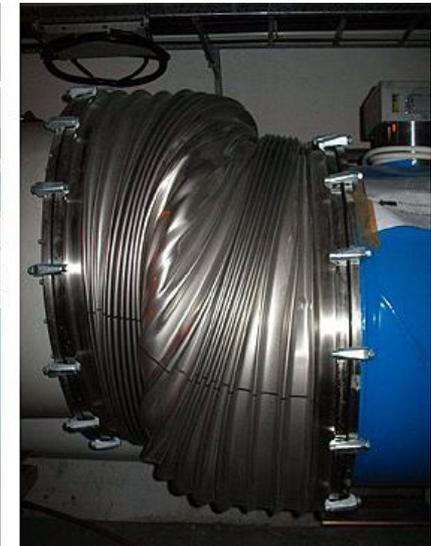
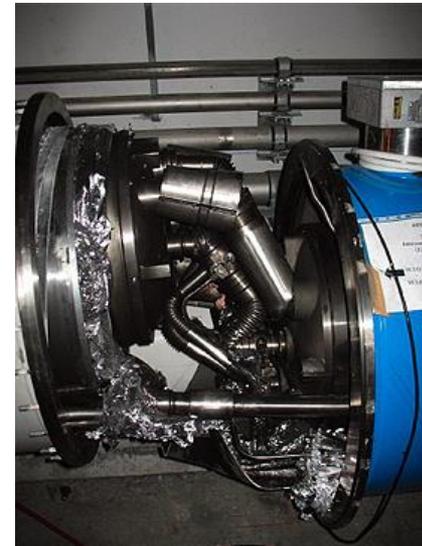
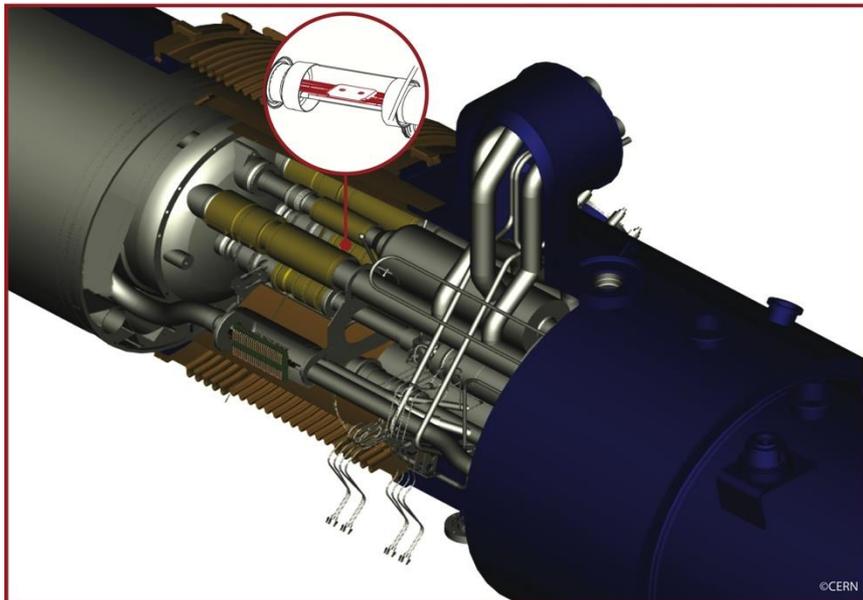
Mehr Informationen im Internet unter

- <http://www.cern.ch>
- <http://www.hephy.at>

Zwischenfall am 19. September 2008

Ursache: Schlechte Verbindung zwischen zwei Dipole ($200\text{n}\Omega$)

Auswirkung: Temperaturerhöhung → Quench der Supraleiter → Verdampfen des flüssigen Heliums → Expansion → mechanische Schäden



Neuer Starttermin: 20. November 2009

