

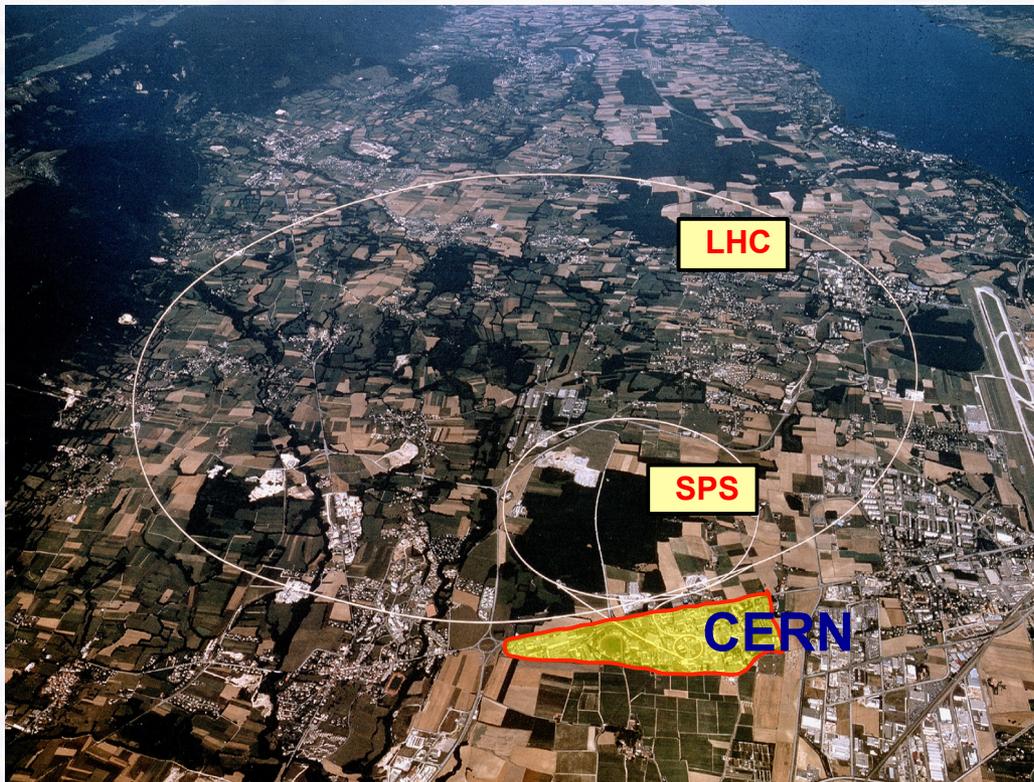
Wenn Energie zu Materie wird



CERN

❖ Europäisches Zentrum für Elementarteilchenphysik bei höchsten Energien

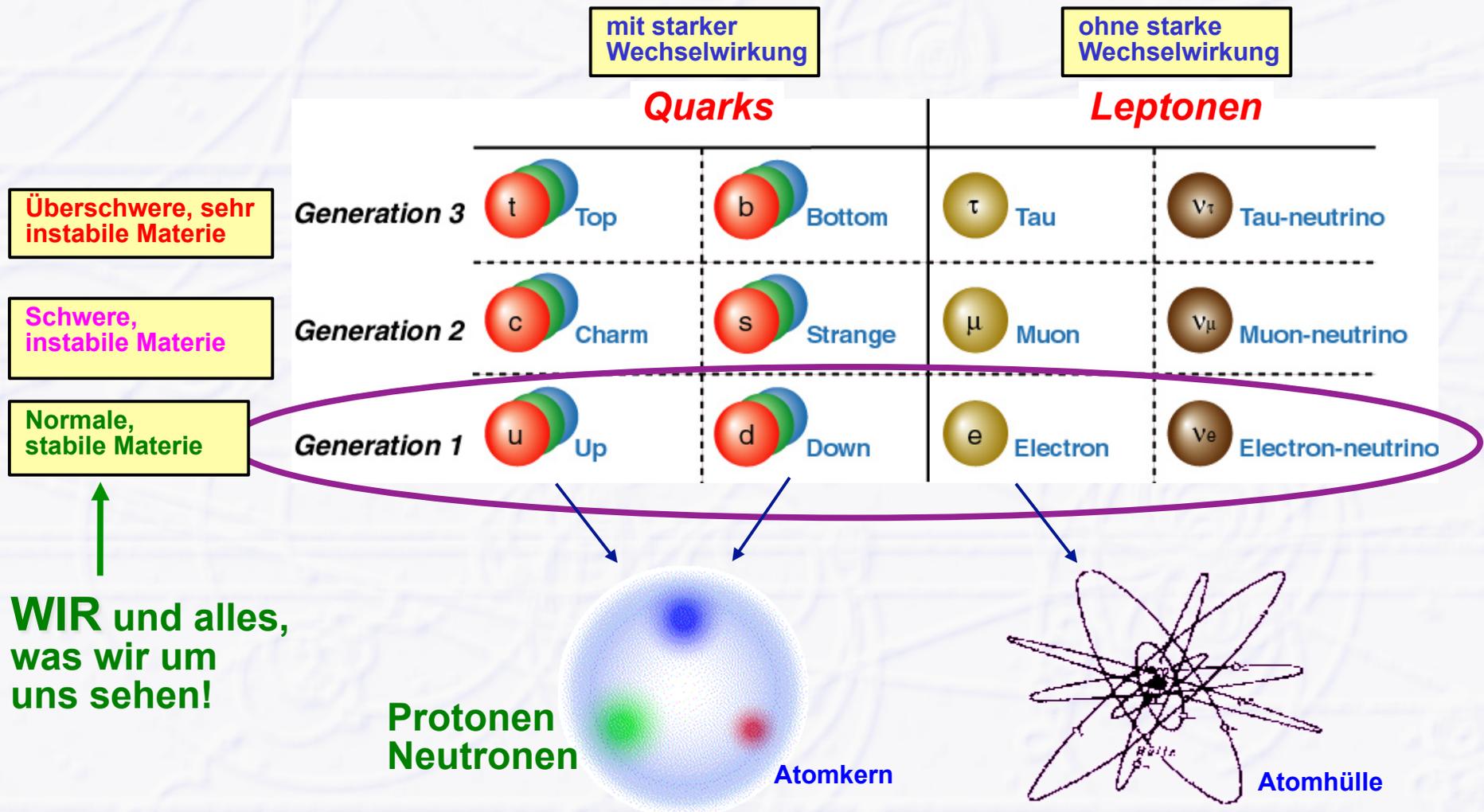
- Seit 2009 Betrieb des weltgrößten Teilchenbeschleunigers **LHC** (Large Hadron Collider) mit **27 km Umfang**
- Weitere Forschungsschwerpunkte: Hadronen und Kerne, **Antimaterie**



Das Standardmodell der Materie

Alle bekannte Materie besteht aus nur wenigen elementaren Teilchen

...aber in 3 verschiedenen Versionen ("Generationen")

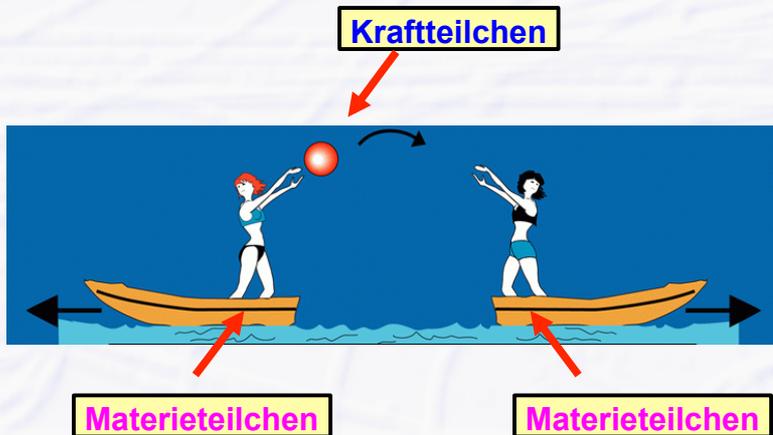


Kraftteilchen

...und dann gibt es noch Kräfte zwischen den Materieteilchen

...auf 4 verschiedene Arten (“Wechselwirkungen”)
übertragen durch **Kraftteilchen**

Kräfteübertragung durch Teilchen???
Wie geht das???



Elektro-Magnetische Kraft

Photonen (Lichtteilchen)

Elektrizität, Magnetismus, Licht,
Atome, Reibung

“Schwache” Kraft

W und Z – Teilchen

Zerfälle von instabilen Materieteilchen

“Starke” Kraft

Gluonen (Klebetilchen)

Kernkräfte, Zusammenhalten der
Quarks im Proton

...und Gravitation
(aber die passt noch nicht so ganz ins Bild...)

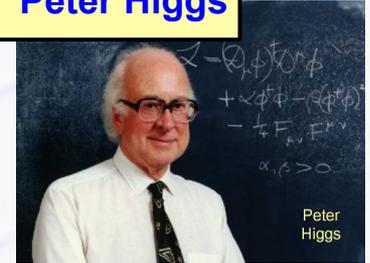
Standardmodell

❖ Wesentliche Botschaften

- Alle Materie ist aus nur **wenigen elementaren** (= nicht weiter teilbaren) **Marieteilchen** aufgebaut
- Kräfte zwischen den Marieteilchen werden durch **Kraftteilchen** übertragen (Analogie: Austausch eines Balls zwischen 2 Booten)
 - ✧ Es gibt **4 verschiedene Kräfte** mit verschiedenen Kraftteilchen
 - ✧ bekannteste Kraft: elektro-magnetische Kraft mit Photon als Kraftteilchen
- Die Marieteilchen bestehen aus **2 Gruppen**
 - ✧ **Quarks** (Teilchen mit starker Wechselwirkung)
 - ✧ **Leptonen** (Teilchen ohne starke Wechselwirkung)
- Die Marieteilchen treten in **3 Generationen** auf
 - ✧ 1. Generation: leicht, 2. Generation: schwer, 3. Generation: überschwer
 - ✧ wir wissen nicht, warum es 3 Generationen gibt
 - ✧ nur die Marieteilchen der ersten Generation sind stabil
- **Alle sichtbare Materie besteht aus Quarks und Leptonen der ersten Generation**
 - ✧ Quarks: Protonen, Neutronen (Atomkerne), Leptonen: Atomhülle

Higgs-Feld, Higgs-Teilchen

Peter Higgs



❖ Das Standardmodell ist fast komplett

- alle Materie- und Kraftteilchen wurden gefunden
 - ✧ zuletzt: top-quark (1995), tau-neutrino (2000)

- **aber: alle Teilchen haben in Standardmodell keine Masse**

❖ Idee von Peter Higgs (1964) und anderen

- **masselose Teilchen wechselwirken ständig mit einem Higgs-Field**
 - ✧ Higgs-Feld = allumfassendes Feld ähnlich elektrischem Feld oder Magnetfeld
- **Wechselwirkung verursacht “Trägheit” = Teilchen erhält träge Masse**

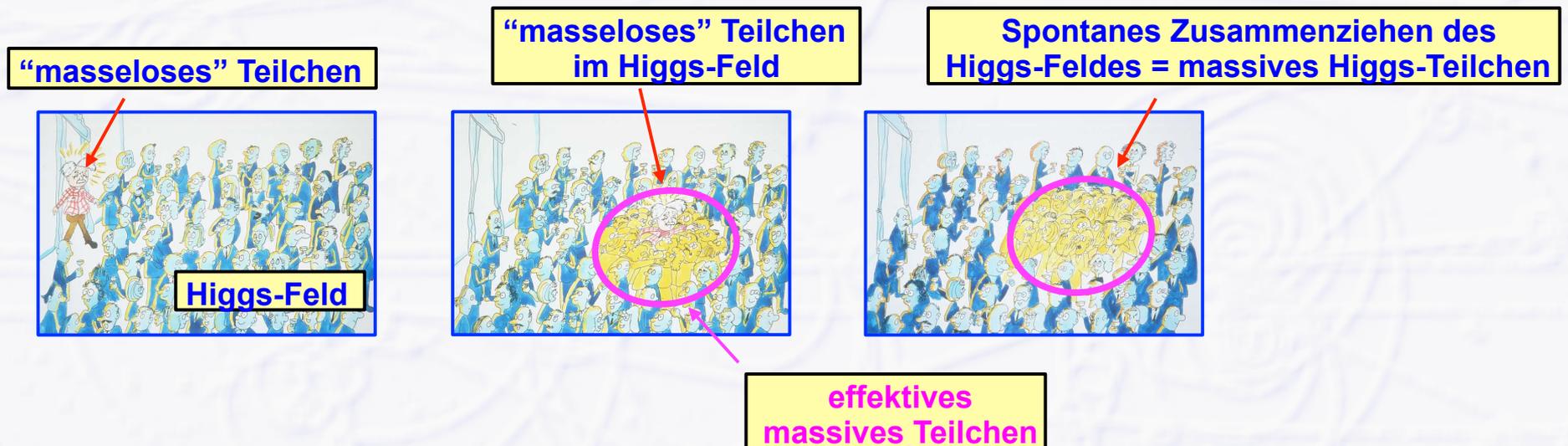
❖ Veranschaulichung des Wirkung des Higgs-Feldes (Higgs-Mechanismus)

- **Zwei wesentliche Bilder**
 - ✧ **“Klassisches Bild”** (Higgs-Feld als zufällig verteilte Partygäste)
 - ✧ **Alternatives Bild** (Higgs-Feld als zähe Flüssigkeit)

Higgs-Mechanismus: Analogien I

❖ “Klassisches Bild”

- **Dave Miller** (UC London) 1995 zum damaligen britischen Wissenschaftsminister auf dessen Frage zur Bedeutung des Higgs-Teilchens
 - ❖ ...und warum er dafür Steuergelder ausgeben sollte
- Vergleich mit politischer Partei (**Parteimitglieder = Higgs-Feld**) und dem plötzlichen Auftreten der **Parteivorsitzenden (masseloses Teilchen)**



Higgs-Mechanismus: Analogien II

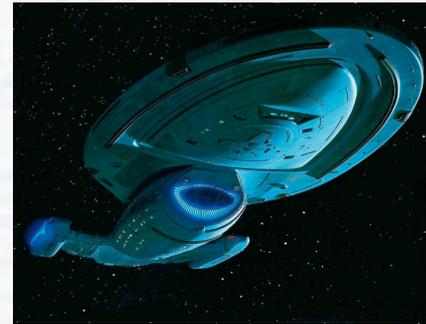
❖ Alternatives Bild

- **Higgs-Feld als zähe Flüssigkeit**
 - ✧ masselose Teilchen durchqueren die Flüssigkeit
 - ✧ zunächst lichtschnelle Teilchen (masselos) werden durch die zähe Flüssigkeit verlangsamt (Verleihung von Masse)
- **Verschiedene Teilchen erfahren unterschiedliche Viskositäten (unterschiedlich starke Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld)**
 - ✧ wenig Viskosität (Luft) = wenig Verlangsamung = leichtes Teilchen
 - ✧ mittlere Viskosität (Wasser) = stärkere Verlangsamung = mittelschweres Teilchen
 - ✧ hohe Viskosität (Sirup) = starke Verlangsamung = schweres Teilchen
- **Higgs-Teilchen als kurzzeitiger Anregungszustand der zähen Flüssigkeit (Higgs-Feld)**



Antimaterie

- ❖ Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
- ❖ Antiteilchen verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung



Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV]	Elektrische Ladung [e]	(Anti-) Name
Elektron	- 1	0.0005	+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938	- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

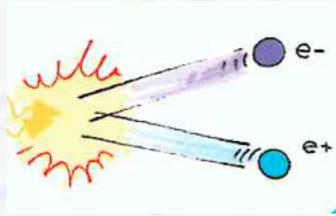
Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Wasserstoff

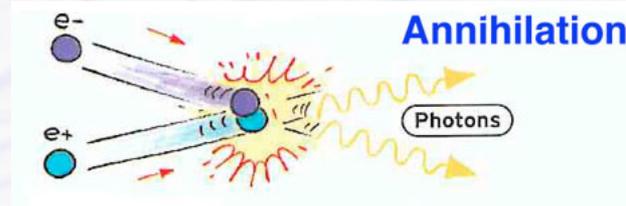
Anti-Wasserstoff

Antimaterie

- ❖ Erzeugung von Antiteilchen zusammen mit normalen Materieteilchen aus Umwandlung von Energie in Masse



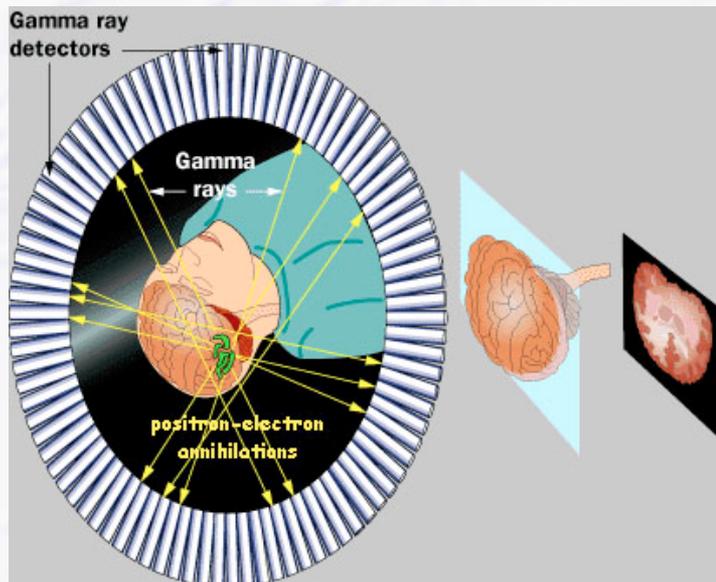
$$E \rightarrow mc^2$$



$$mc^2 \rightarrow E$$

- ❖ Antiteilchen sind Alltag

- Beispiel: Positronen Emissions Tomographie (PET)



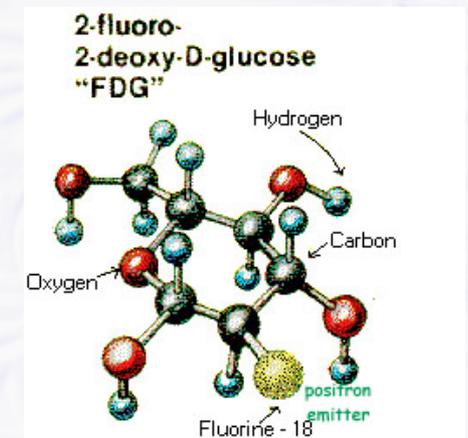
Verwendung von **radioaktiv markiertem Zucker**

Zucker ist bevorzugt an Stellen hohen Energiebedarfs vorhanden

F₁₈ zerfällt unter Aussendung eines Positrons

Annihilation mit Elektron unter Aussendung zweier Photonen

Nachweis der Photonen durch Detektor, damit **Rekonstruktion der Orte hohen Energiebedarfs im Körper**



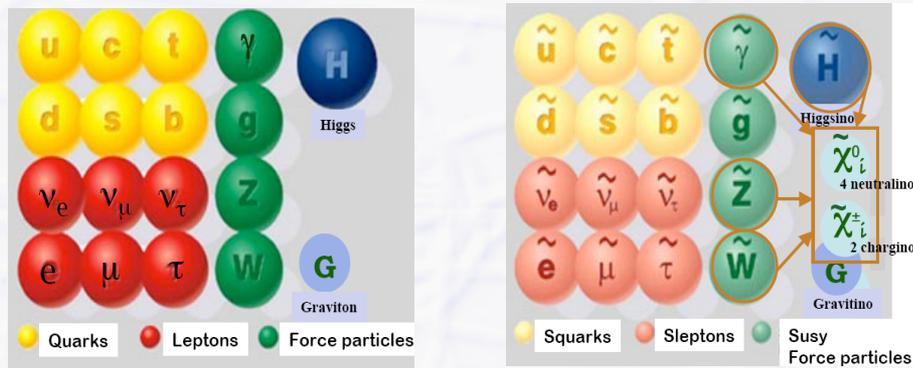
Antimaterie

❖ Wesentliche Botschaften

- Antiteilchen verhalten sich **wie normale Teilchen mit umgekehrter Ladung**
 - ✧ auch neutrale Teilchen mit innerer (geladener) Struktur haben Antiteilchen
- Bei der Umwandlung von Energie in Materie entstehen **immer Teilchen und Antiteilchen zusammen**
- Teilchen und Antiteilchen können **annihilieren** und sich zu reiner Energie (Photonen) zurück wandeln
- Antiteilchen sind bereits seit langem **Teil unseres Alltags**
 - ✧ Beispiel: Positronen Emissions Tomographie (PET) zur medizinischen Diagnostik

Jenseits des Standardmodells

- ❖ Im Standardmodell
 - Materieteilchen = Fermionen (halbzahliger Spin = Drehimpuls),
 - Kraftteilchen = Bosonen (ganzzahliger Spin = Drehimpuls)
 - Warum diese Asymmetrie?
- ❖ Erweiterung des Standard Modells durch neue Symmetrie: Supersymmetrie (SUSY)
 - SUSY Materieteilchen = Bosonen, SUSY Kraftteilchen = Fermionen
 - Verdopplung aller bisherigen Elementarteilchen



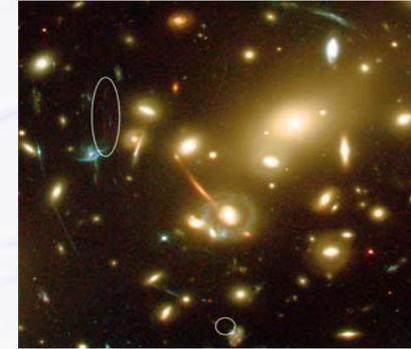
Neue Quantenzahl R-parity: $R_p = (-1)^{B+L+2s} = +1$ SM Teilchen
 -1 SUSY Teilchen

Wenn R-parity erhalten: Leichtestes SUSY Teilchen (LSP) STABIL(!!!)

Bestandteile des Universums

Woraus besteht eigentlich unser Universum???

Galaxien(-haufen), Sterne aller Art, Planeten jeder Größe, Asteroiden, Kometen, Staub, Gas, Schwarze Löcher...



Aber das ist nicht alles:

Der sichtbare Teil des Universums (die normale Materie) macht nur einen kleinen Teils der gesamten Masse und Energie aus



❖ Normale Materie (4%)

❖ Das, was wir kennen (Galaxien & Co.)



❖ Dunkle Materie (26%)

❖ Erkennbar z.B. an der Gravitationswirkung auf Sterne, dies könnten SUSY-Teilchen sein!!!



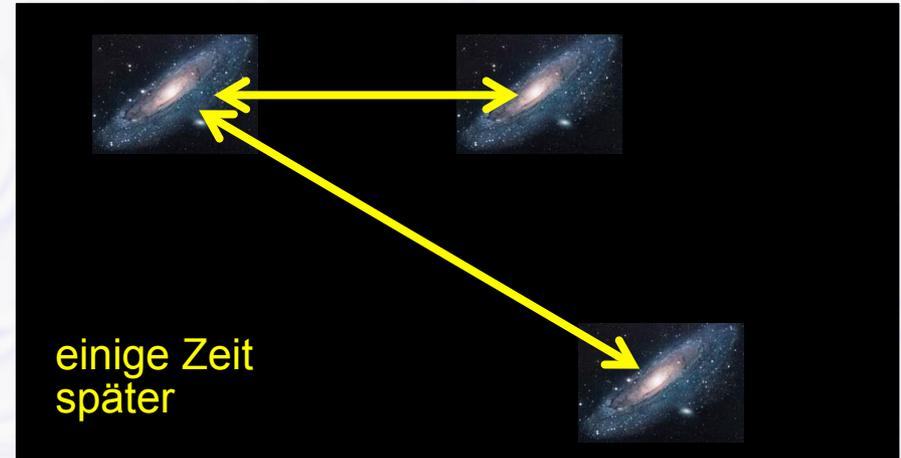
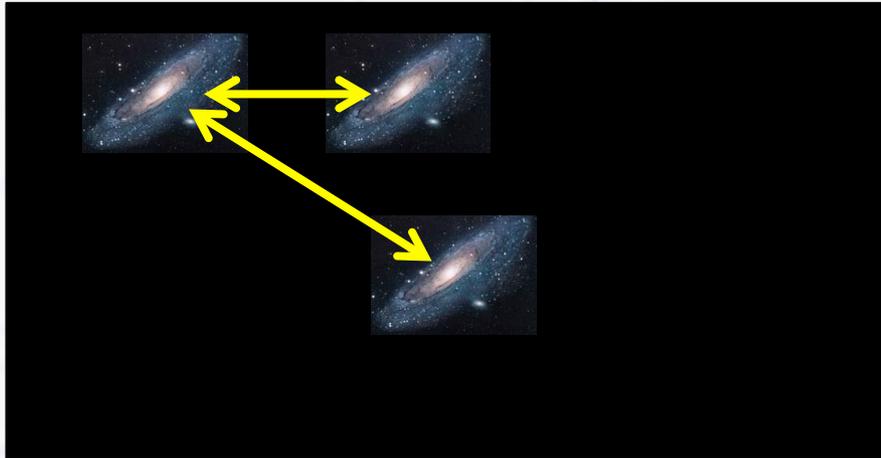
LHC?

❖ Dunkle Energie (70%)

❖ Treibt das Universum auseinander (schneller als gedacht)
Ganz neu, ganz mysteriös, ganz und gar unverstanden...



Urknall – Entstehung des Universums



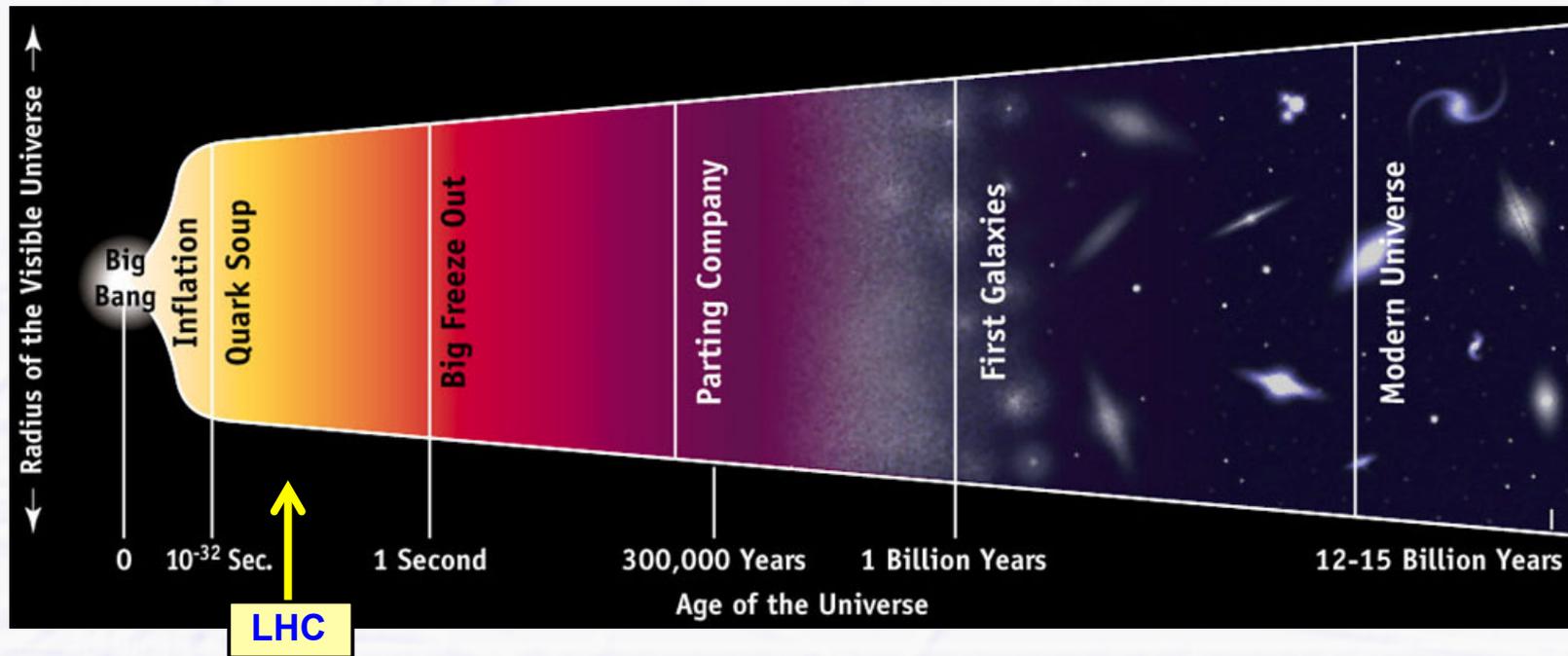
❖ Beobachtung: Der Raum dehnt sich aus

- Doppelt so weit entfernte Galaxien entfernen sich doppelt so schnell
 - ❖ durch Messung der Rotverschiebung von entfernten Galaxien
- **Es muss einen Anfang der Expansion gegeben haben**

❖ Urknall: vor 13.7 Milliarden Jahren

- Beginn von Raum und Zeit, so wie wir sie kennen
- Neuere Erkenntnisse: Die Ausdehnung verläuft nicht konstant, sondern hat schnellere und langsamere Phasen
 - ❖ seit einigen Milliarden Jahren: beschleunigte Expansion (dunkle Energie?)

Entwicklung des Universums



❖ 10^{-42} s

- Beginn unserer Physik

❖ 10^{-36} s, 10^{27} K

- Auftrennung von starker und elektro-schwacher Kraft

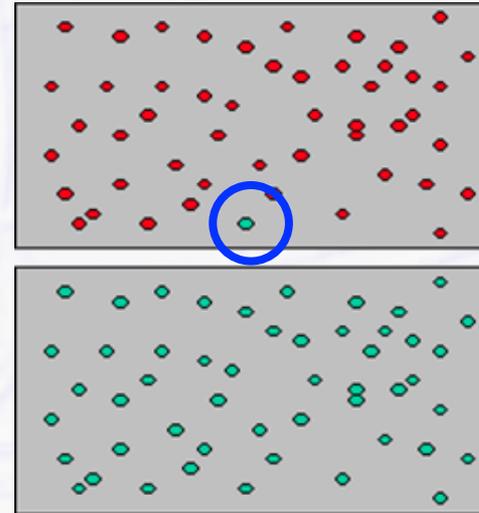
❖ 10^{-32} s, 10^{21} K

- "Inflation" = plötzliche Expansion um einen Faktor $10^{20} - 10^{30}$

Entwicklung des Universums

❖ 10^{-6} s, 10^{12} K

- **Materie und Antimaterie vernichten sich**
 - ✧ die **Vernichtung ist jedoch nicht vollständig**
- **Verhältnis Materie : Antimaterie**
100'000'001 : 100'000'000
- **danach: das Universum besteht aus sehr viel mehr Photonen als Materie**

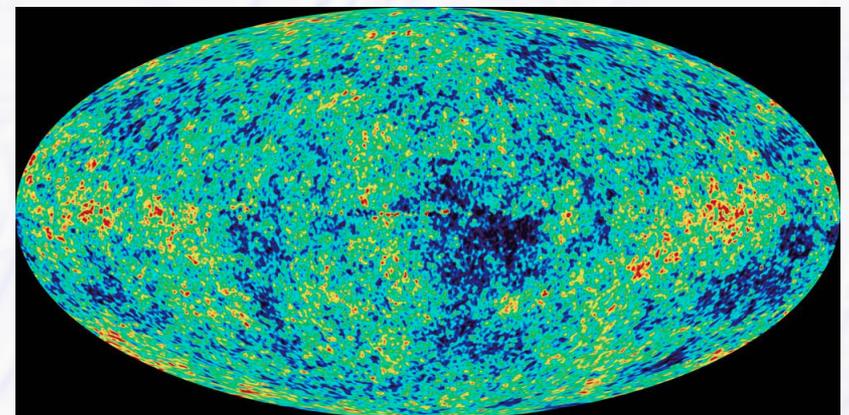


❖ 1 min, 10^9 K

- **Nukleosynthese**, Erzeugung leichter Elemente (H, He, Li, ...)

❖ 370'000 Jahre, 3000 K

- **Bildung erster Atome, das Universum wird transparent**
- wir sehen das Echo des Universums und seine **Struktur in der kosmischen Hintergrundstrahlung**



Offene Fragen...

Wichtigste Aufgaben und offene Fragen für die Zukunft

Erzeugung, Nachweis und Vermessung des Higgs-Teilchens

Aber es gibt noch viele offene Fragen:

- ❖ **Warum gibt es 3 Generationen von Materieteilchen?**
 - Würde nicht eine einzige genügen (unsere normale Materie)?
- ❖ **Sind Materie- und Antimaterieteilchen wirklich gleich (bis auf ihre unterschiedliche Ladung?)**
 - Warum sehen wir dann nur normale Materie im Universum? **Wo ist die Antimaterie?**
- ❖ **Gibt es außer den bekannten Materieteilchen noch weitere, andersartige?**
 - z.B. **supersymmetrische Teilchen (SUSY)**
 - wenn es sie gibt, müssen sehr schwer sein (sonst hätten wir sie schon erzeugen können)
 - vielleicht besteht aus ihnen die **dunkle Materie** im Universum

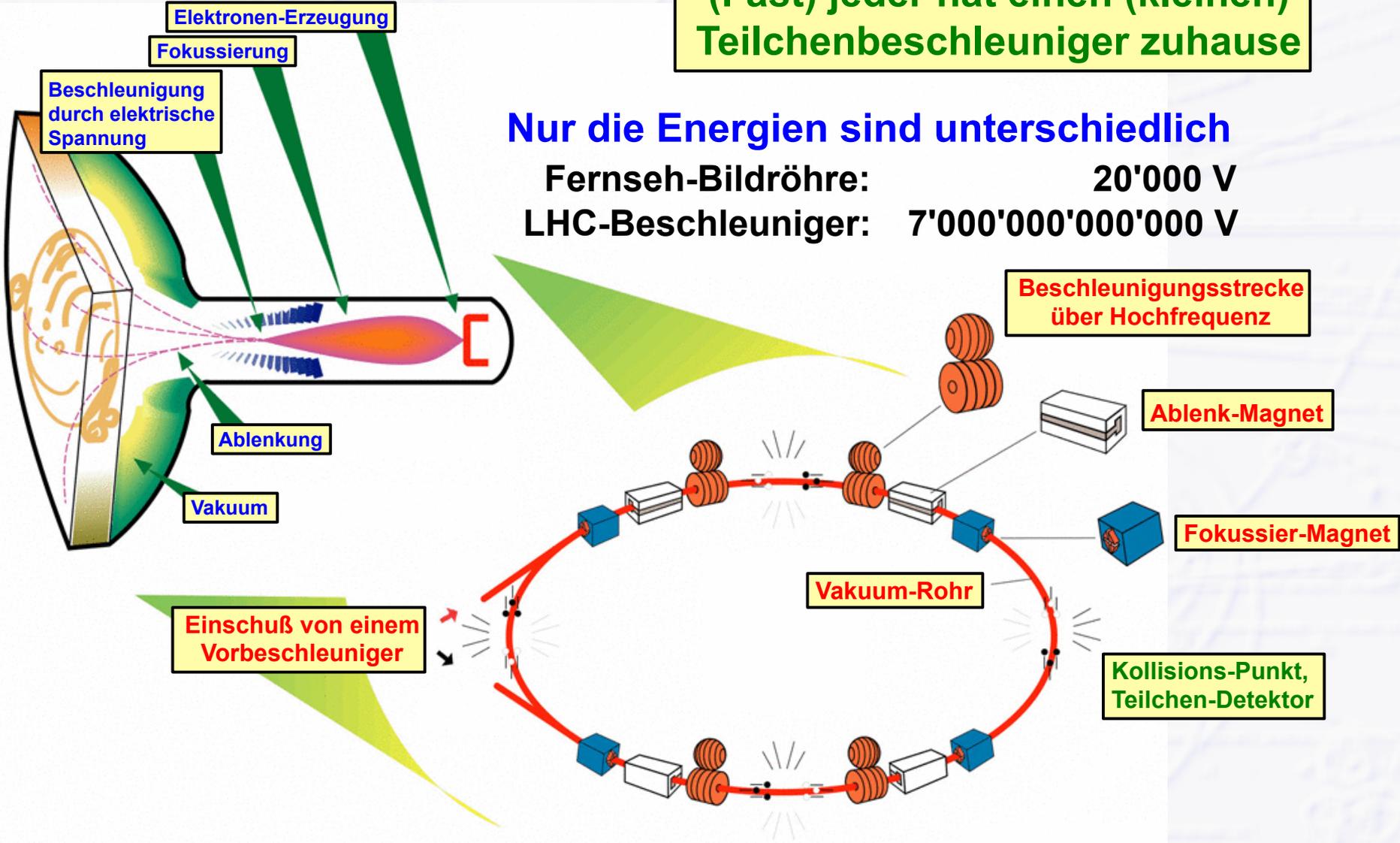
Wie funktioniert ein Beschleuniger?

(Fast) jeder hat einen (kleinen) Teilchenbeschleuniger zuhause

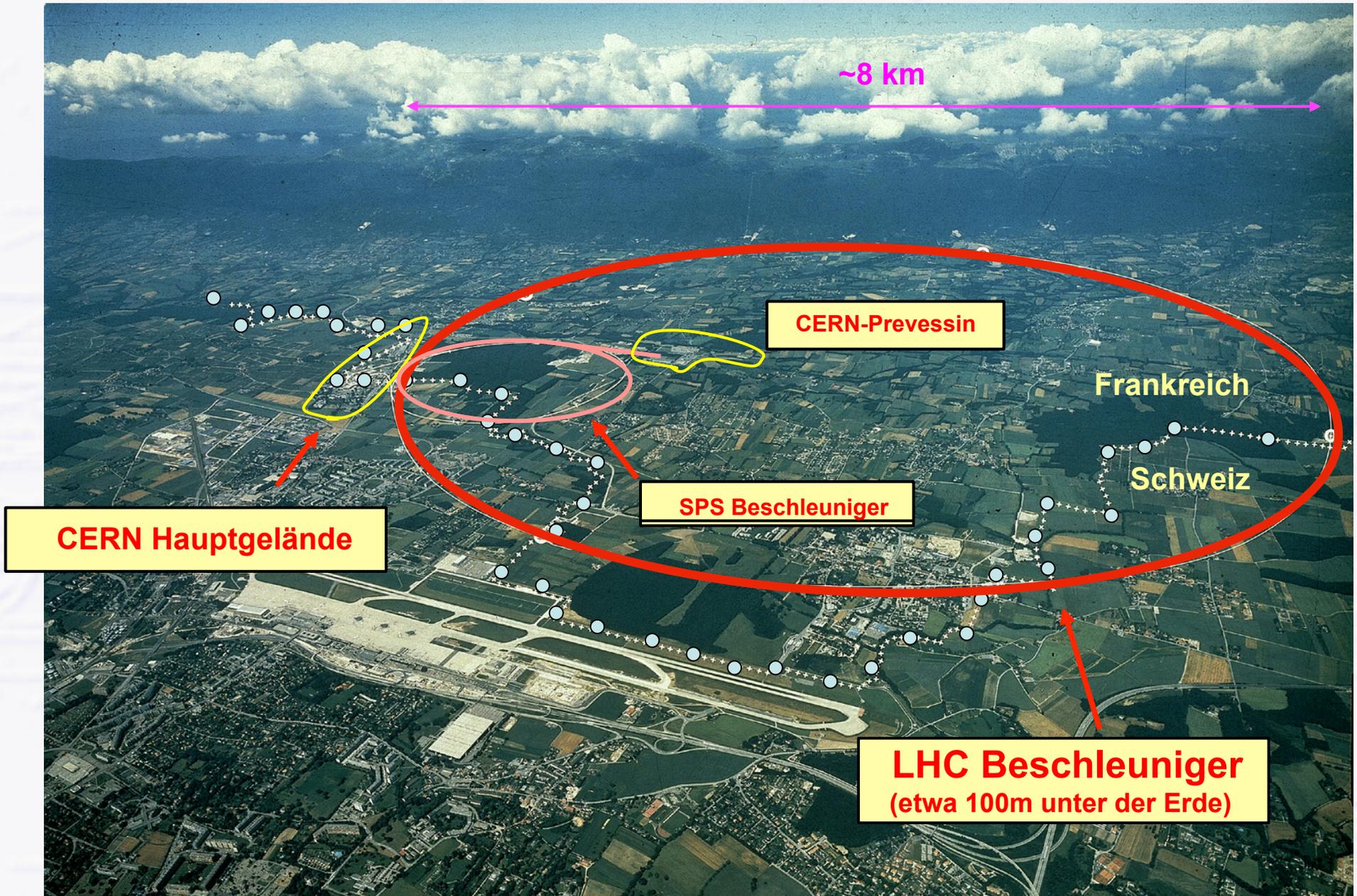
Nur die Energien sind unterschiedlich

Fernseh-Bildröhre: 20'000 V

LHC-Beschleuniger: 7'000'000'000'000 V

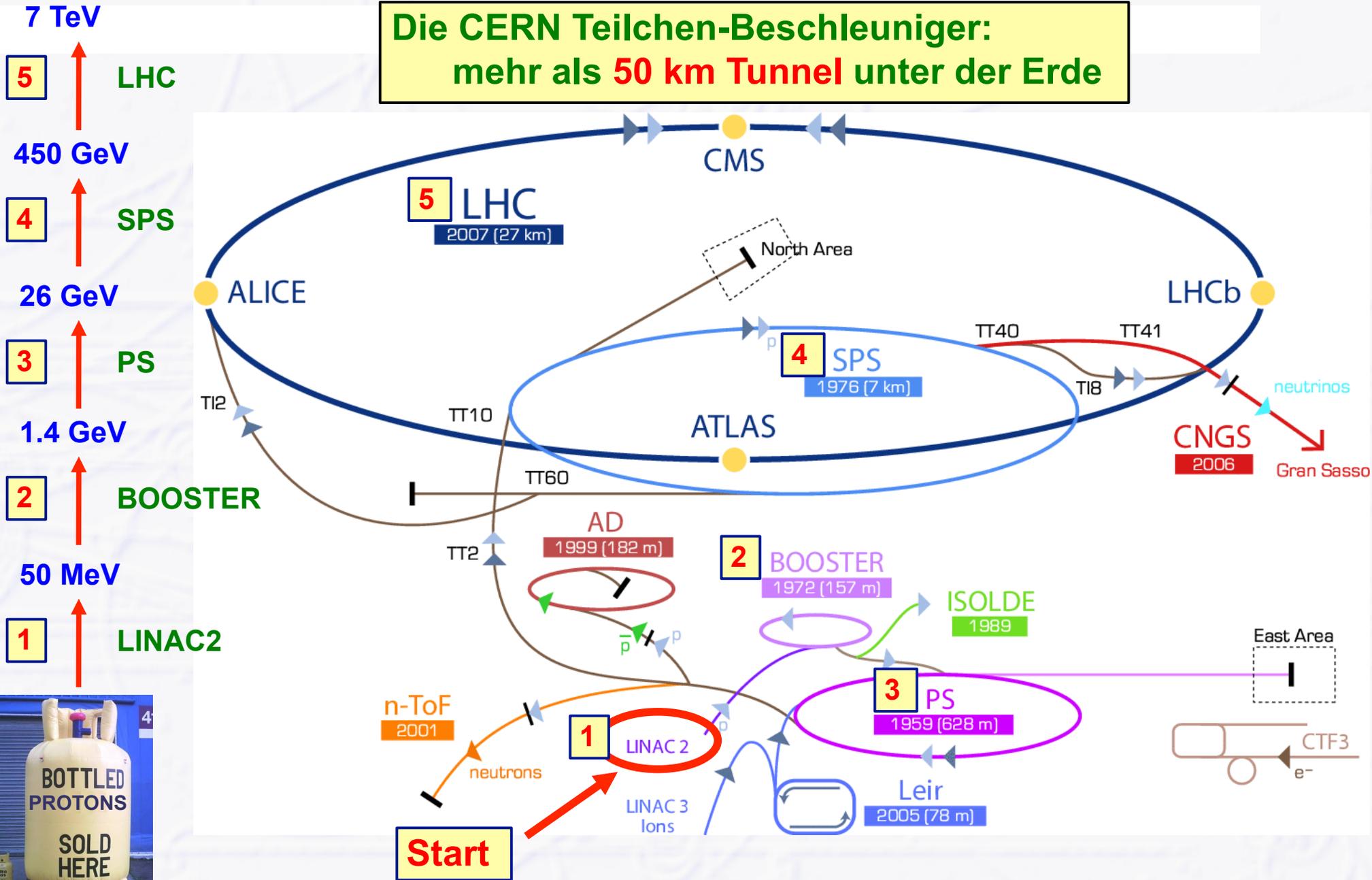


CERN Beschleuniger

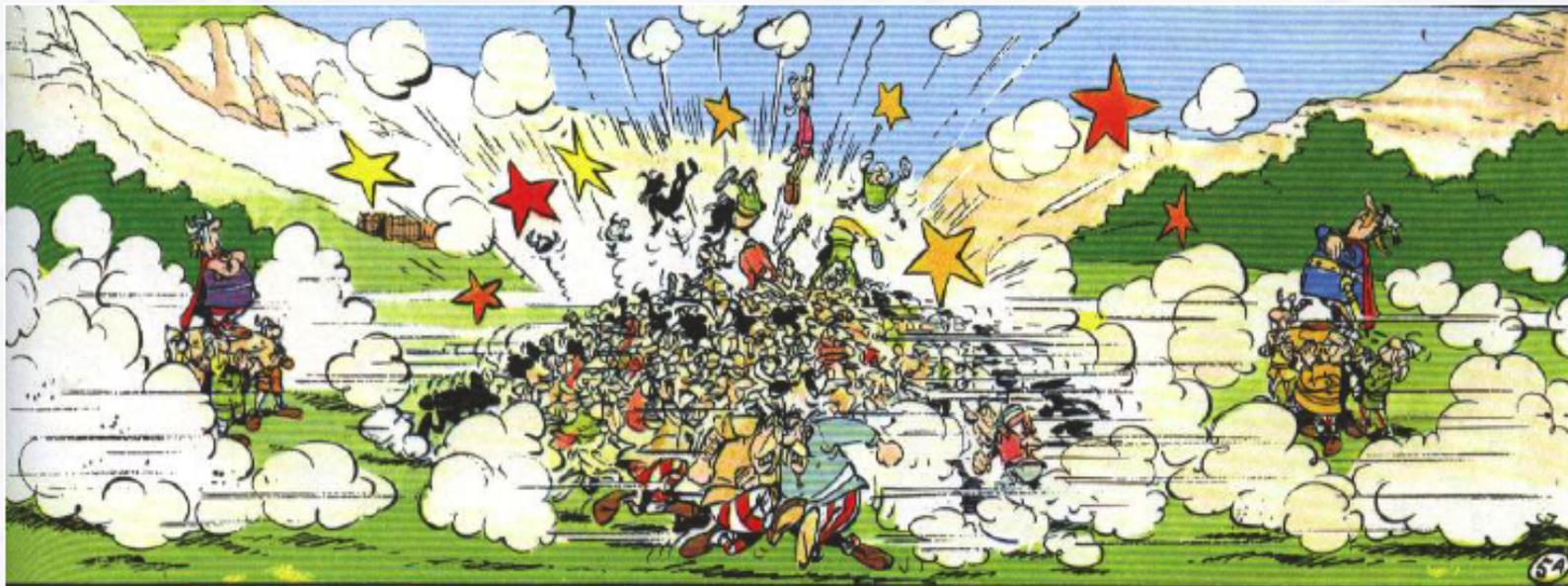
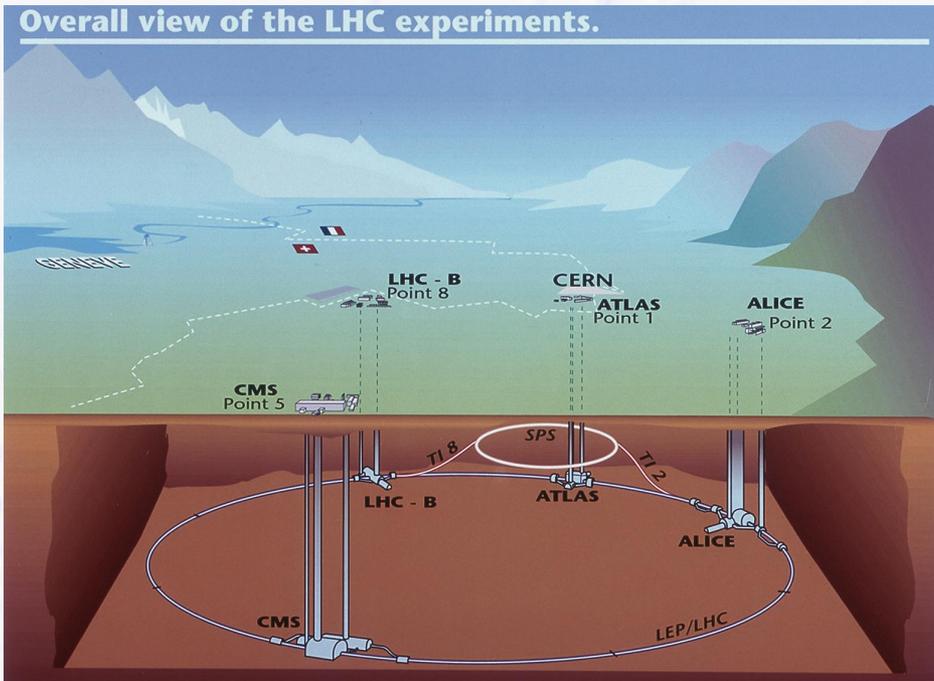


Karte der CERN Beschleuniger

Die CERN Teilchen-Beschleuniger:
mehr als **50 km Tunnel** unter der Erde



Der *L*arge *H*adron *C*ollider



LHC Energie

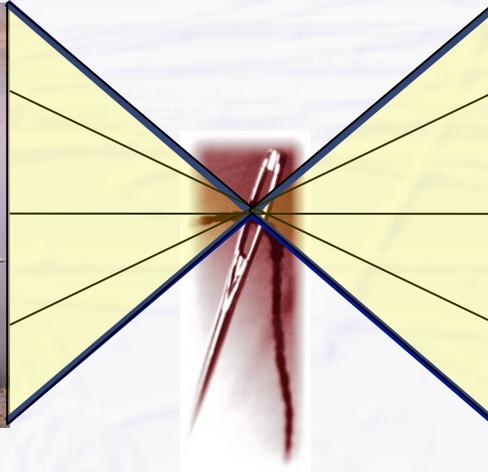
Gespeicherte Energie der beiden Protonenstrahlen: 2 x 350 MJ

(bei voller Strahlenergie und Intensität)

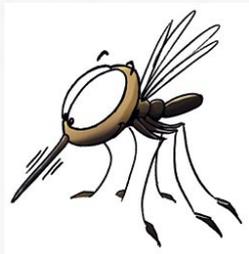
Wie 240 Elefanten auf Kollisionskurs



120 Elefanten mit 40 km/h



120 Elefanten mit 40 km/h



Die Energie eines einzelnen Protons entspricht der einer Mücke im Anflug (1 μ J)

Nadelöhr:
0.3 mm Durchmesser

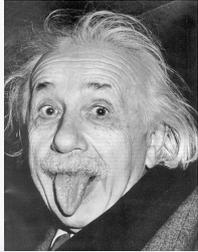
Protonenstrahlen am Kollisionspunkt:
0.03 mm Durchmesser

Wie funktioniert ein Beschleuniger?

❖ Wichtige Botschaften

- **Beschleunigung** von Teilchen erfolgt **über elektrische Felder**
 - ✧ = nur elektrisch geladene Teilchen können beschleunigt werden
 - ✧ Elektro-magnetische Wellen (hochfrequente Radiowellen) werden in eine Beschleunigerstrecke eingespeist. Das elektrische Feld der Radiowellen erzeugt die Beschleunigung.
- Hohe Geschwindigkeit bzw. hohe Energie wird erreicht durch **vielfaches, wiederholtes Beschleunigen** in der Beschleunigungsstrecke
- Magnetfelder lenken die Teilchen um den Ring herum und führen sie zurück zur Beschleunigerstrecke
 - ✧ **Magnetfelder beschleunigen nicht** und erhöhen nicht die Energie der Teilchen
- Bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit nimmt die Geschwindigkeit nur noch wenig zu, nur **die Energie der Teilchen erhöht sich**
 - ✧ Teilchen werden relativistisch und erfahren eine Massenzunahme (= höhere Energie), aber keine wesentliche Geschwindigkeitserhöhung
 - ✧ Die Frage: “Wie nah sind die Teilchen an der Lichtgeschwindigkeit?” stellt sich Teilchenphysikern nicht wirklich, es zählt die Energie der Teilchen

Methoden der Teilchenphysik

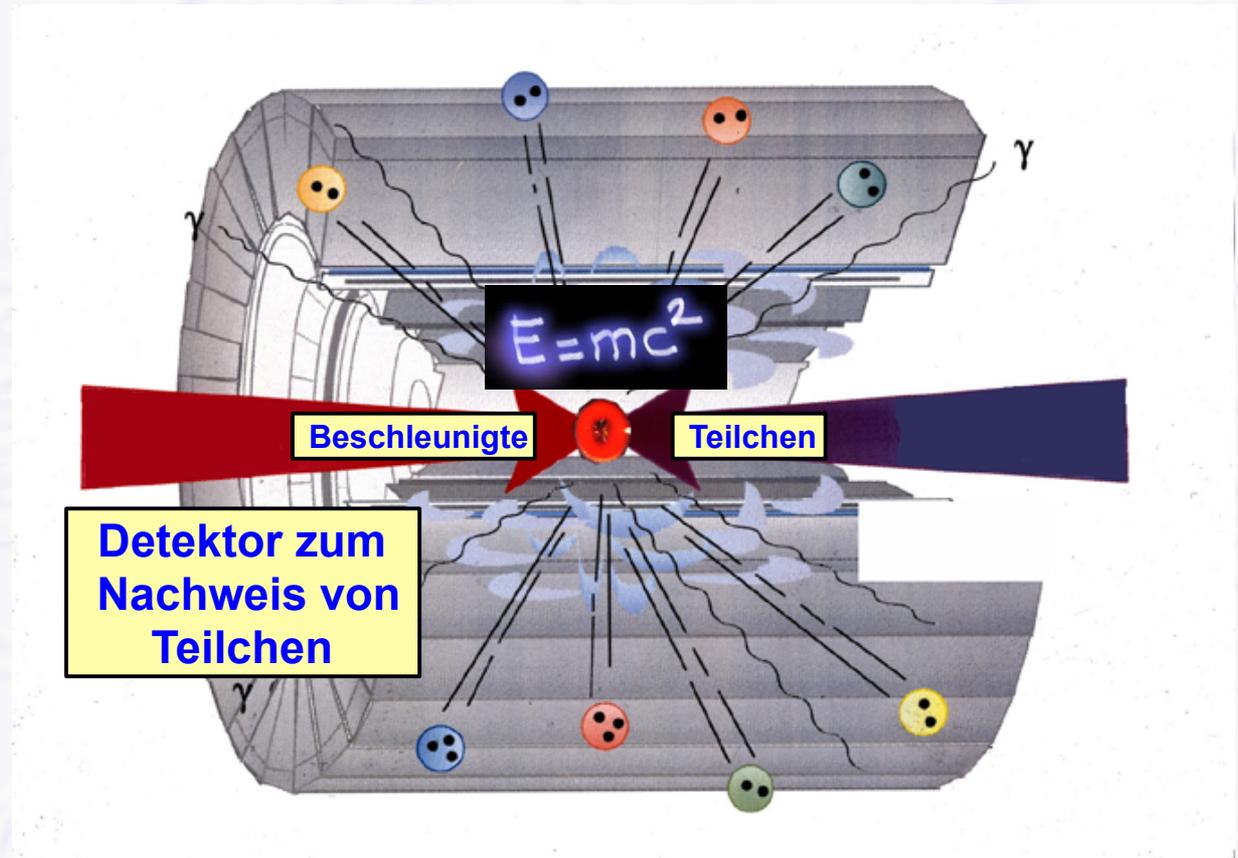


**Einstein
(1905):**

**Materie ist
konzentrierte Energie!**

**Materie lässt sich in
Energie umwandeln
und umgekehrt!**

$$E = m c^2$$



❖ Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger

- Protonen werden beschleunigt \Rightarrow Energie
- Umwandlung der Energie bei der Kollision in Materie
- Neue Teilchen entstehen (neue Materie)

Methoden der Teilchenphysik

❖ Wichtige Botschaften

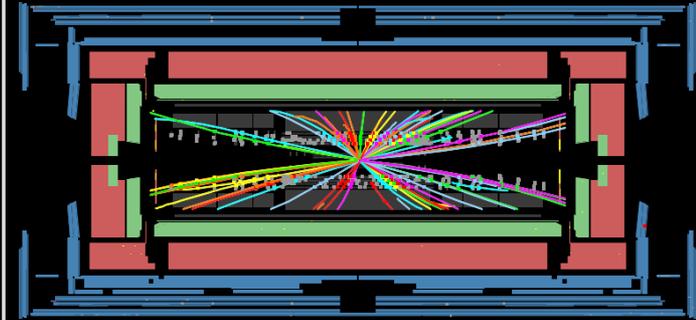
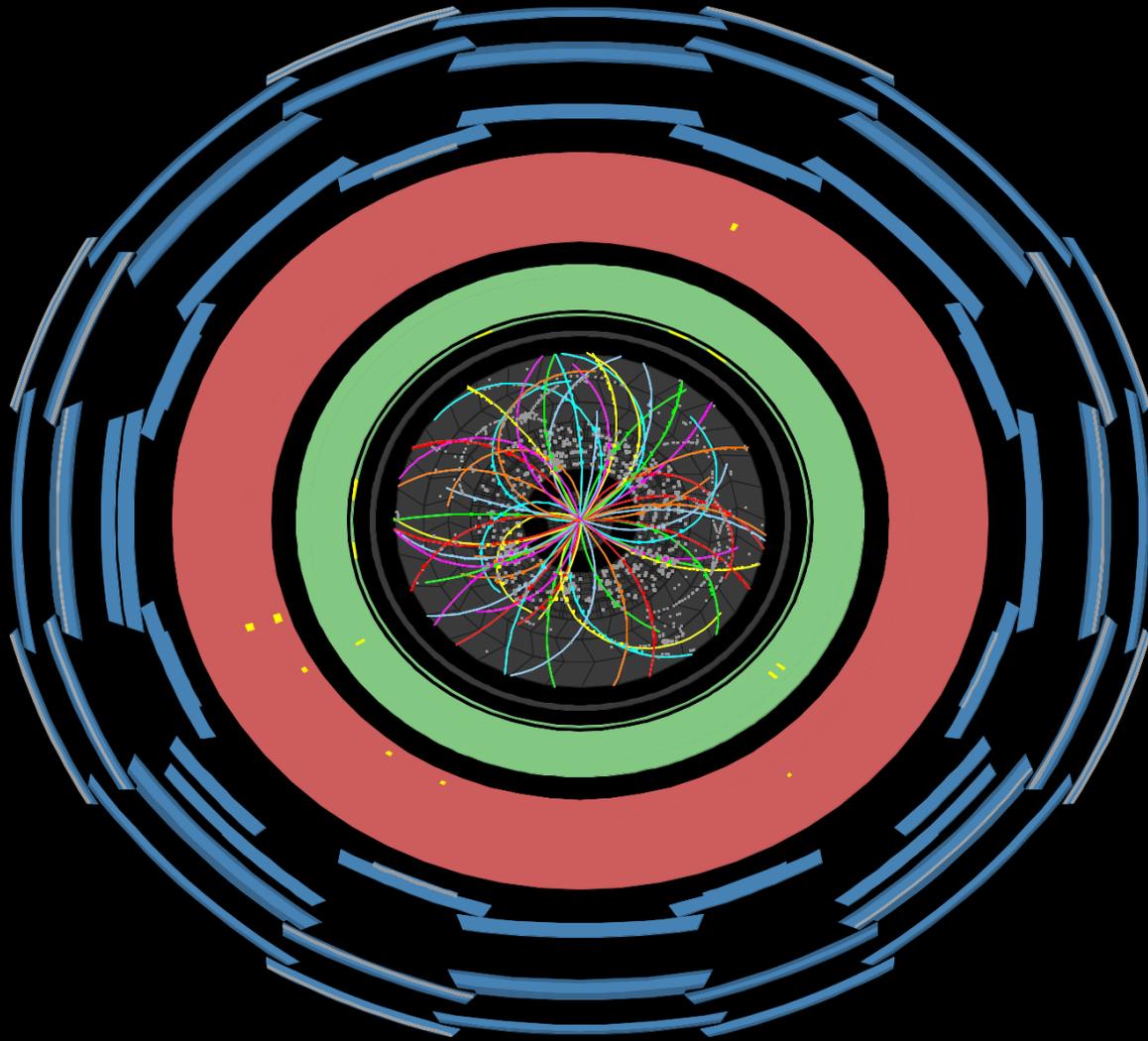
- Bei Teilchenkollisionen entstehen neue Teilchen aus der **direkten Umwandlung von Energie** (hier: kinetische Energie der Teilchen) in Masse (Materie)
 - ✧ unmittelbare Anwendung von $E = mc^2$
 - ✧ Umkehrung: Umwandlung von Masse in Energie z.B. in Kernkraftwerken
- **Falsches Bild: “Atomzertrümmerung”**
 - ✧ oft verwendetes (falsches) Bild: 2 Rosinenkuchen treffen aufeinander, werden zerschmettert, Rosinen tief im Innern werden freigesetzt
 - ✧ impliziert, daß unbekannte Rosinen (unbekannte Teilchen) schon im Kuchen vorher existierten
- **Unbekannte Teilchen werden in den Kollisionen erst neu erzeugt** und müssen dann durch Detektoren nachgewiesen werden
 - ✧ die unbekanntes Teilchen sind nicht vorher bereits vorhanden
- **Unbekannte Teilchen haben i.A. hohe Masse** und erfordern Kollisionen mit hoher Energie, aus der die Teilchen dann erzeugt werden
 - ✧ frühere Beschleuniger hatten nicht genügend Energie zur Erzeugung von unbekanntes, schweren Teilchen

LHC: Es geht los



Die allererste Kollision bei $2 \times 3.5 \text{ TeV}$

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>



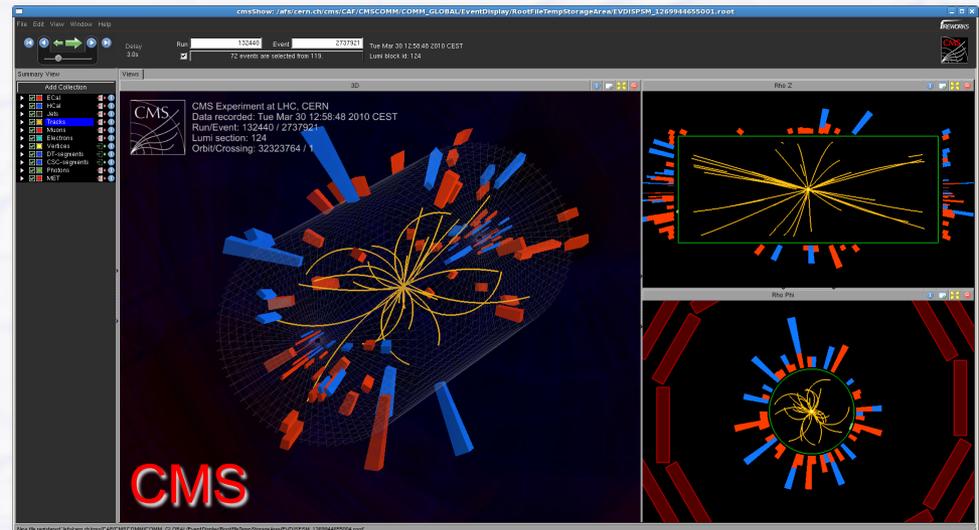
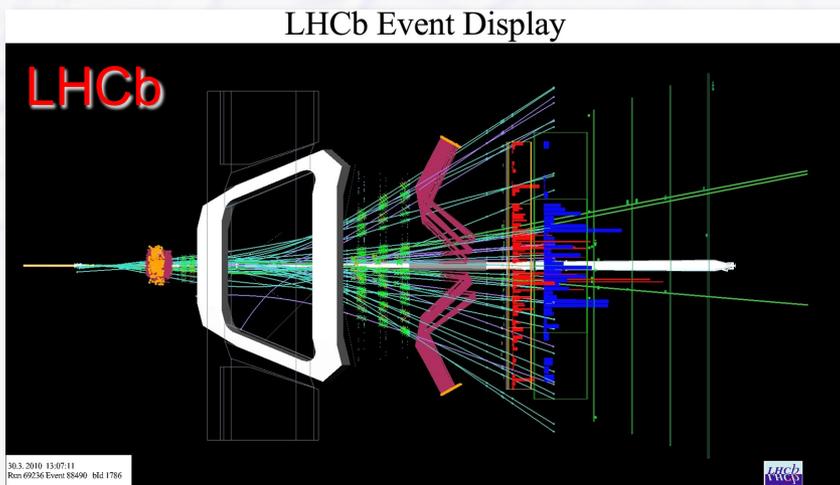
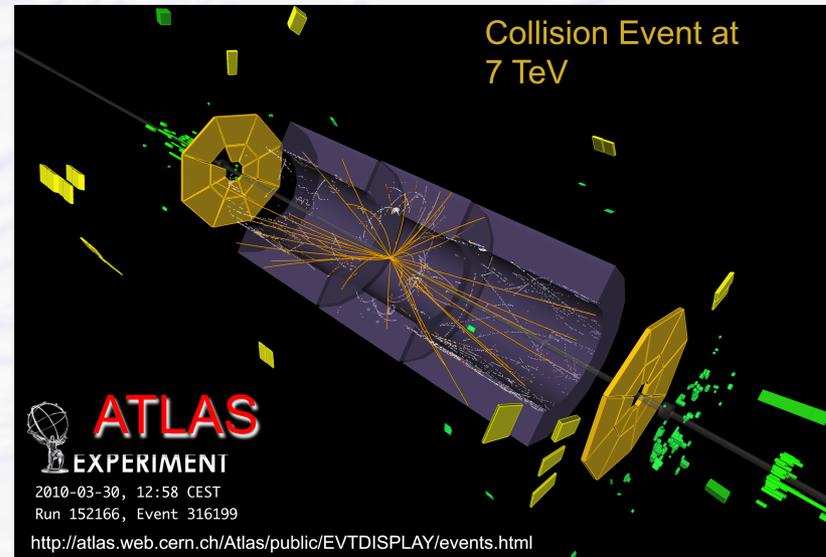
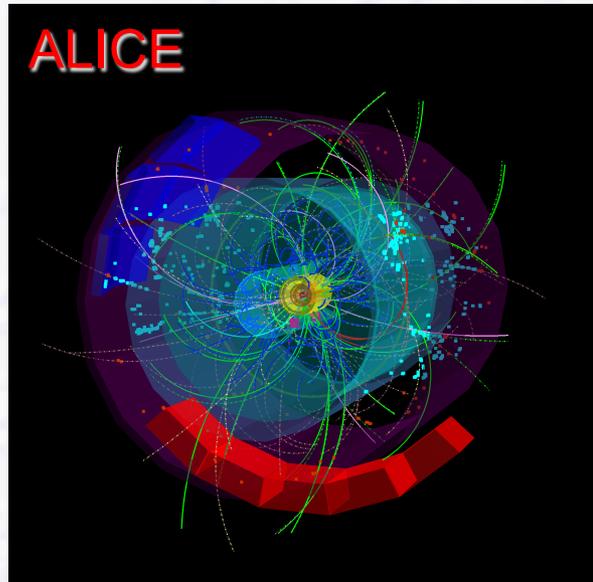
 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run Number: 152166, Event Number: 316199

Date: 2010-03-30 12:58:23 CEST

30.3.2010

Bilder der ersten Kollisionen am 30.3.2010



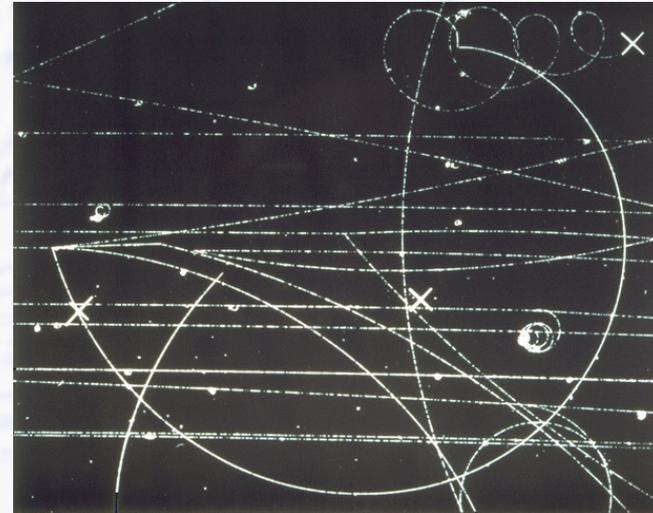
Teilchen-Detektoren

Wie funktioniert eigentlich ein Teilchen-Detektor?

Früher (1950...1970):

Teilchen hinterlassen Spuren aus kleinen Bläschen in einer Flüssigkeit (Blasenkammer)

Die Spuren werden **fotografiert** und **anschliessend (optisch) vermessen**:
Richtung, Zerfälle instabiler Teilchen,
Impuls (über Krümmung in einem Magnetfeld)

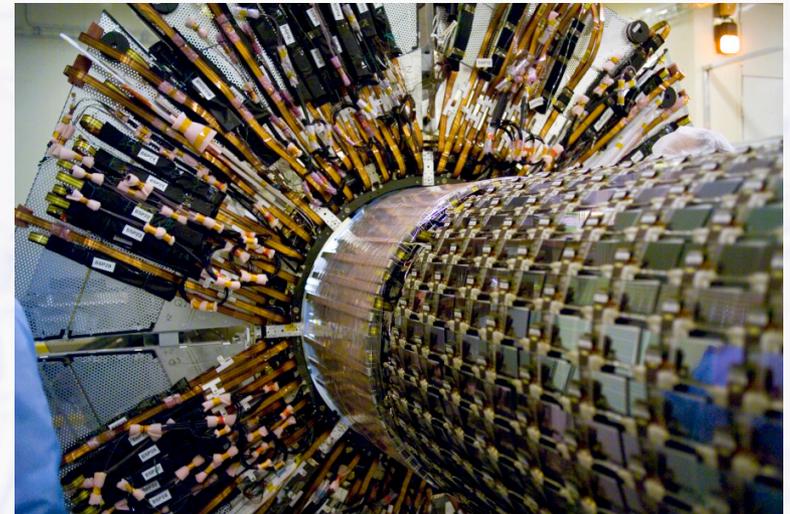


Heute:

Alles geht elektronisch! Und viel schneller!!!

Die Teilchen hinterlassen Signale in **Siliziumchips**, **gasgefüllten Röhren mit Drähten**, die **digitalisiert** und **mittels Computern** verarbeitet werden.

Es entstehen enorme Datenmengen:
Die vier LHC Experimente speichern
ca. **1.6 GByte** an Daten, **IN DER SEKUNDE!**



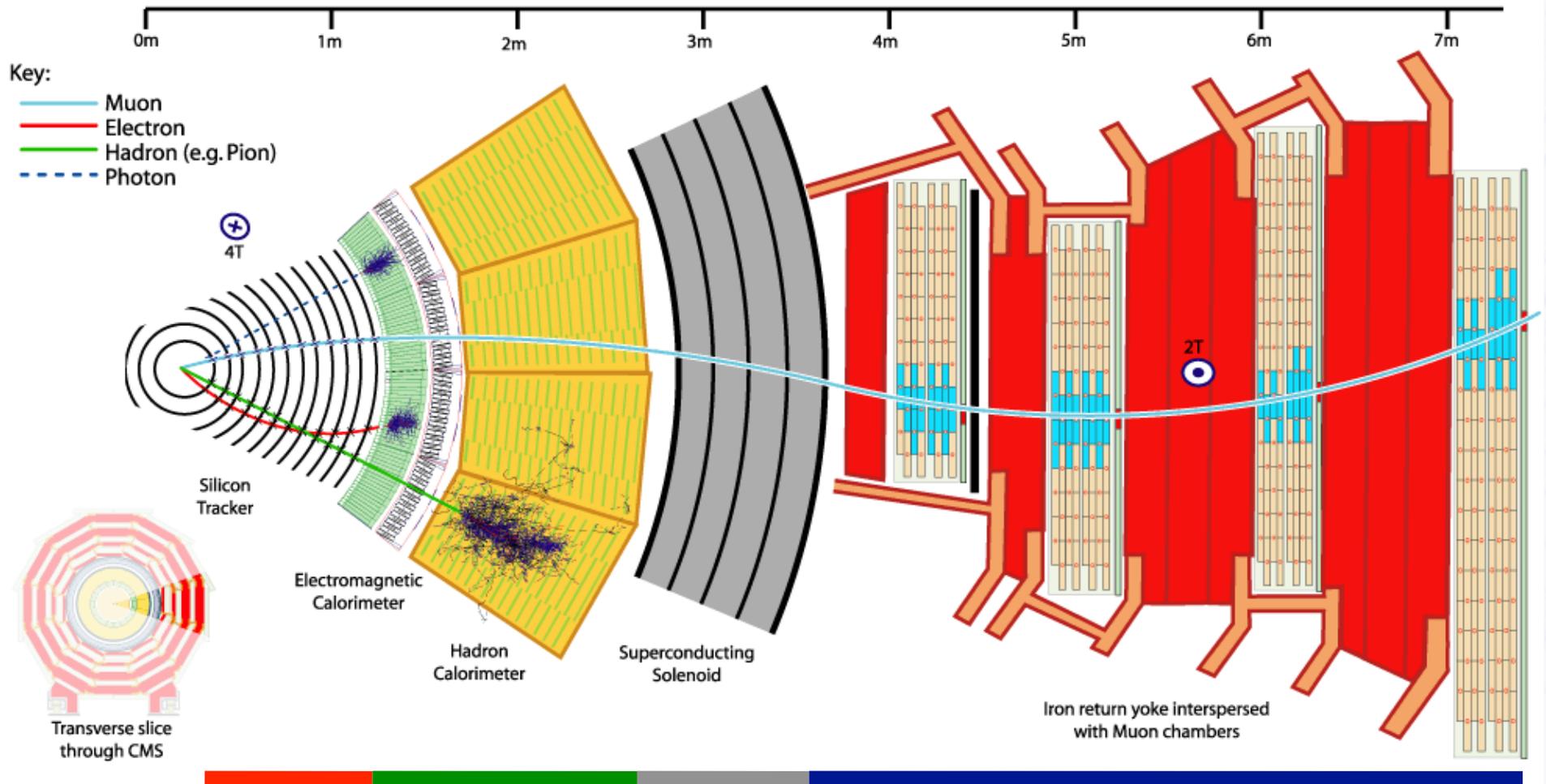
LHC-Detektoren: CMS

Ein etwas größerer Teilchen-Detektor: **CMS**



Ein typischer LHC-Detektor

Schnitt durch den CMS Detektor: Was machen die Teilchen im Detektor?



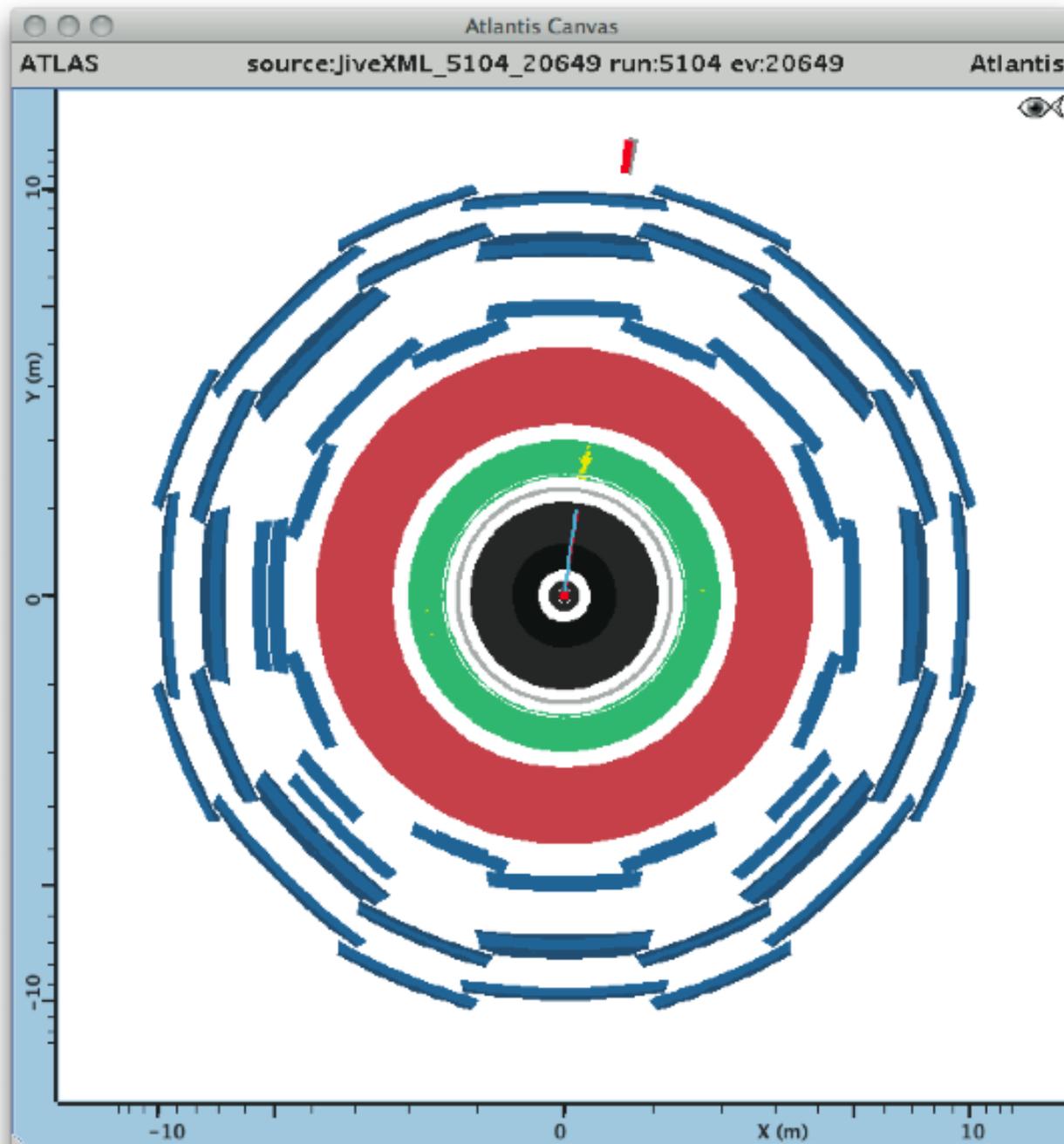
Spurdet. **Kalorimeter** **Spule** **Myon Spurdetektor + Eisenjoch**
(Impulsmessung) (Energimessung) (Magnetfeld) (Myon Impulsmessung + magnetischer Rückfluss)

Teilchendetektoren

❖ Wesentliche Botschaften

- Aufgabe der Teilchendetektoren ist es, alle bei einer Kollision entstehenden Teilchen zu vermessen
 - ❖ **Impuls** über Bestimmung der Krümmung der Teilchenspur im Magnetfeld
 - nur möglich für elektrisch geladene Teilchen
 - ❖ **Energie** über vollständige Absorption im Detektor und Umwandlung der Energie in elektrische Ladung oder in Licht
 - ❖ **Myonen** können nicht absorbiert werden, Messung des Impulses erfolgt in der äusseren Detektorlage
 - Annahme: Alle Teilchen, die bis zur äusseren Lage vordringen, sind Myonen
- **Neue Teilchen zerfallen oft sehr schnell**
 - ❖ **Nachweis im Detektor nur über die Zerfallsteilchen und Rekonstruktion der Masse des Ursprungsteilchens (invariante Masse)**
- Ergebnis einer **individuellen Kollision ist zufällig** und nicht vorhersagbar
 - ❖ Nur die mittlere Anzahl eines bestimmten Prozesses ist berechenbar
 - ❖ **Kollisionen sind quantenmechanische Ereignisse**

Teilchen im Detektor: Elektron



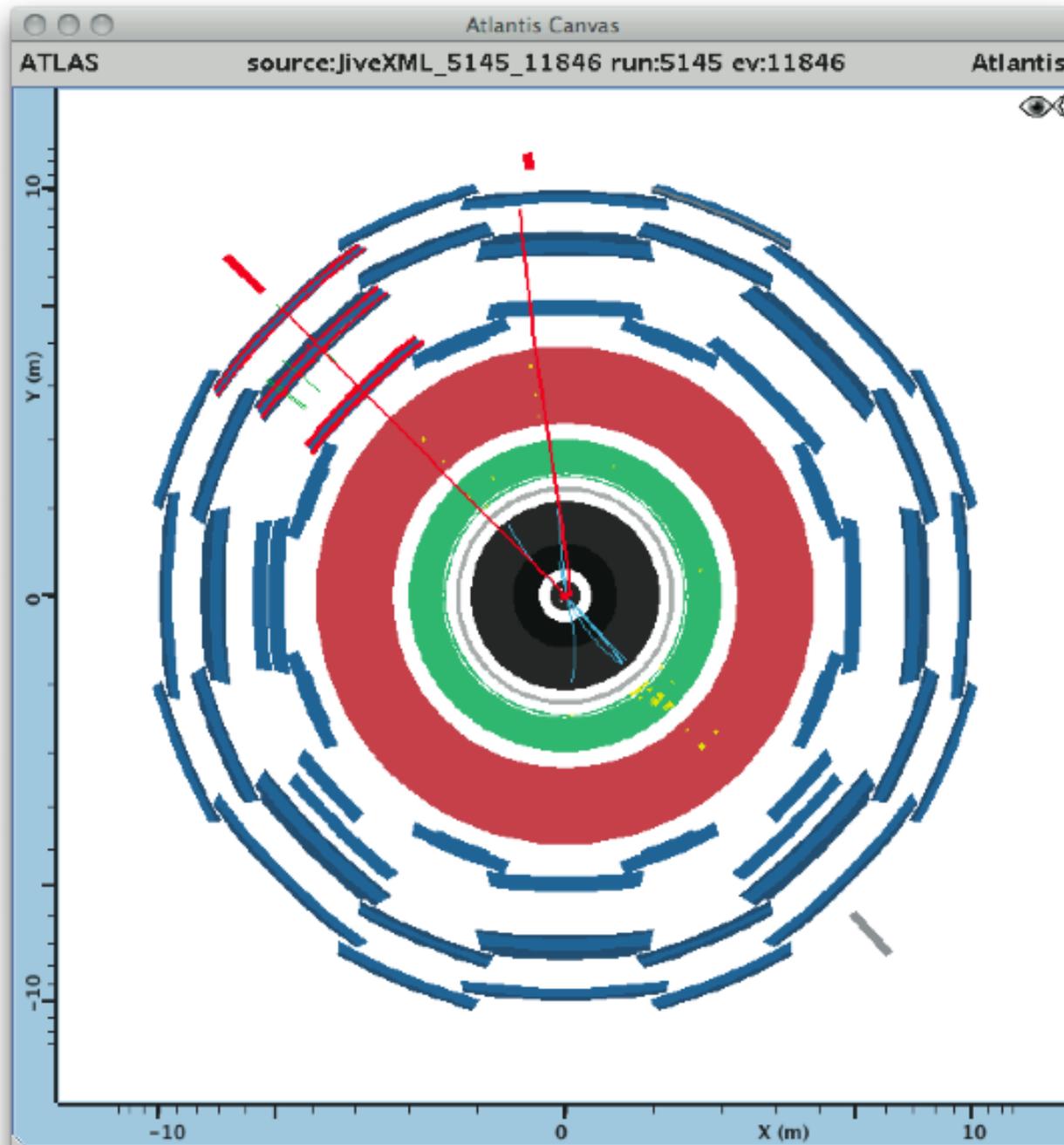
Elektron

Spur

**Energiefleck (gelb)
im grünen Kalorimeter**

Energiebalken aussen

Teilchen im Detektor: Myon



Myon

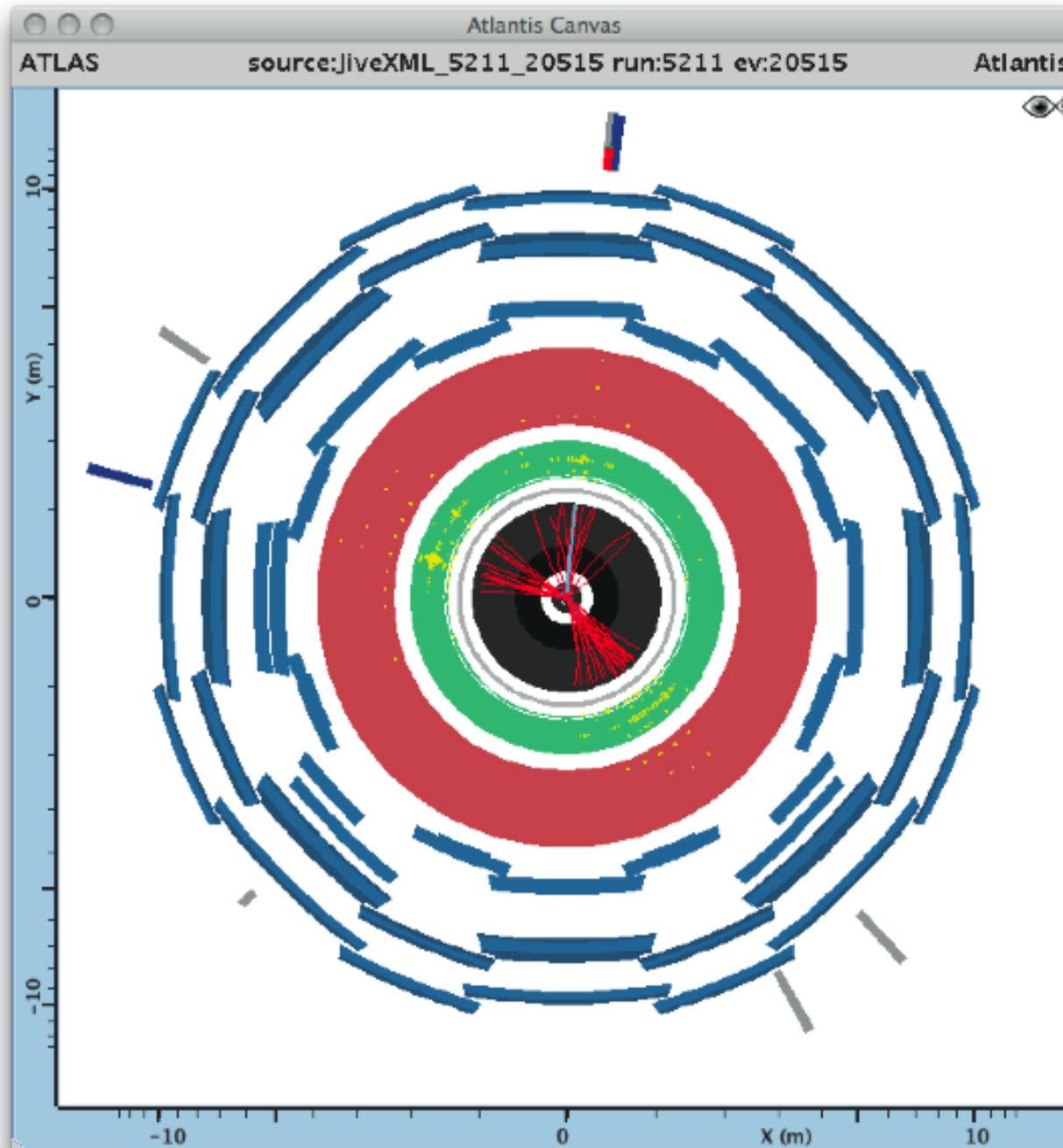
Spur (rot)

**[Treffer in
Myonkammern (rot)]**

**Energiepunktchen
im Kalorimeter (gelb)**

**Energiebalken
aussen (rot)**

Teilchen im Detektor: Quarks (Jets)



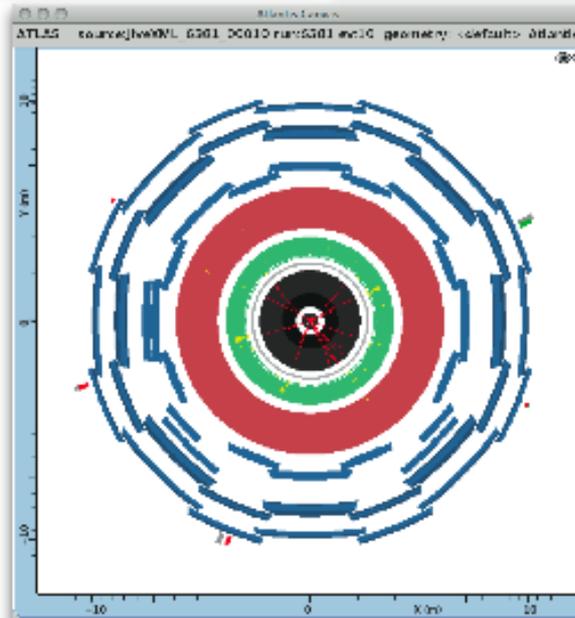
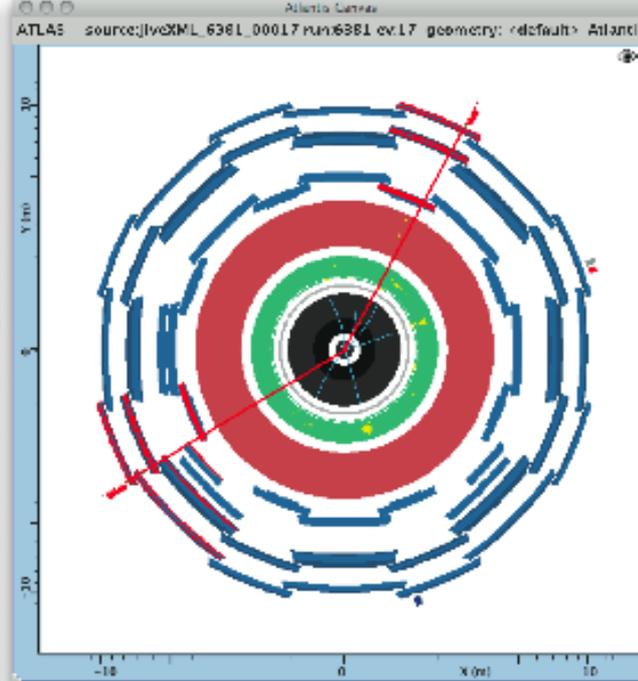
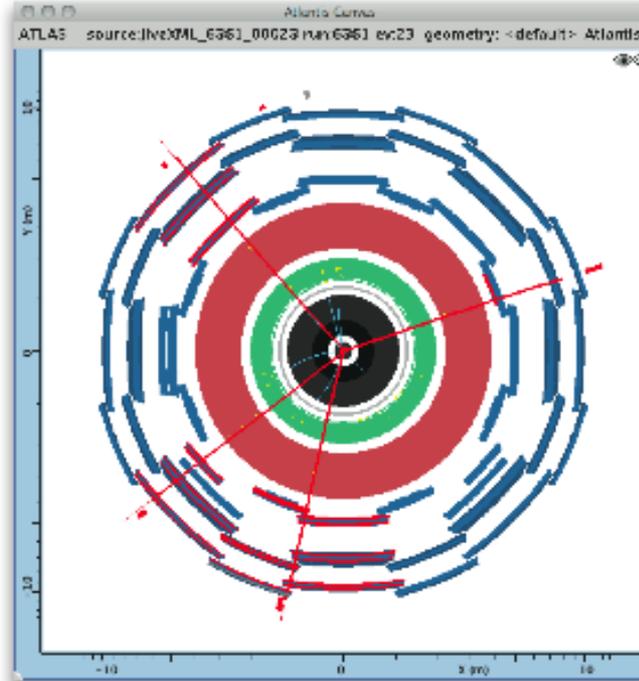
Jet

viele Spuren

**viel Energie im ganzen
Kalorimeter (gelb)**

**Energiebalken
aussen**

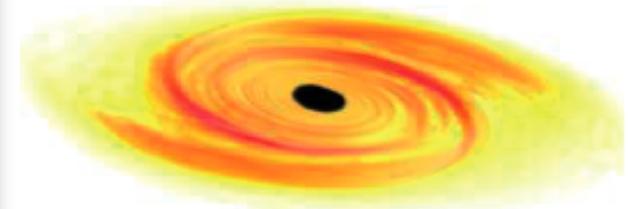
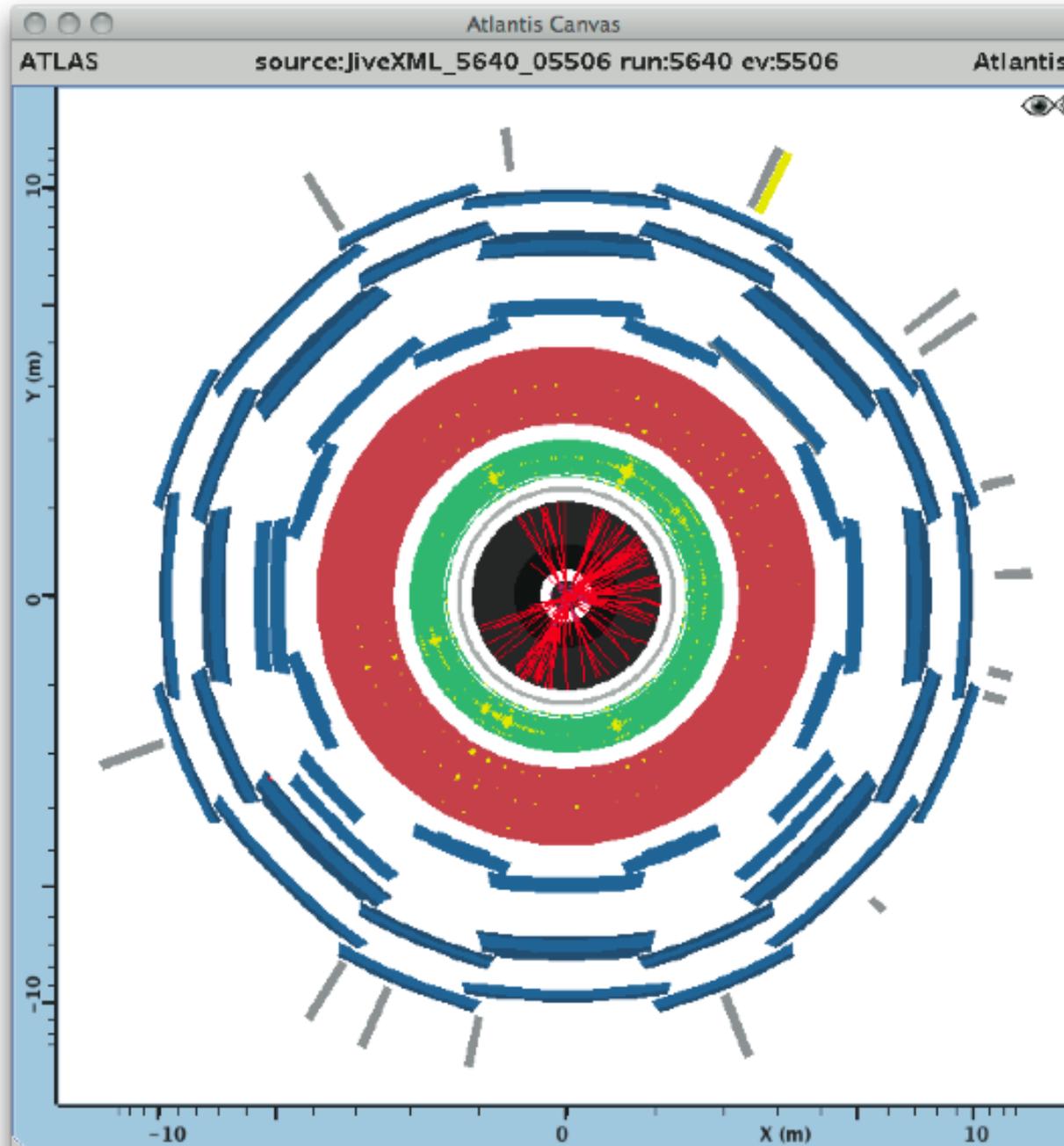
Teilchen im Detektor: Higgs



Higgs

**4 Myonen
oder
4 Elektronen
oder
2 Myonen
+ 2 Elektronen**

Teilchen im Detektor: Schwarzes Loch



Schwarzes Loch

viele Spuren im
ganzen Detektor

Energie in beiden
Kalorimetern überall

Energiebalken
aussen rundherum

Was sollte man wissen?

❖ Standardmodell

- **Materieteilchen: Quarks und Leptonen in 3 Generationen**
- **Kraftteilchen: Vermitteln die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Materieteilchen**

❖ Antiteilchen

- **wie normale Teilchen mit gleicher Masse, aber umgekehrter Ladung**

❖ Higgs-Mechanismus

- **Analogien zur Veranschaulichung: Partymodell, zähe Flüssigkeit**

❖ Kosmologie

- **Urknall vor 13.7 Mrd Jahren, Expansion des Universums**
- **Bestandteile des Universums: normale Materie, dunkle Materie, dunkle Energie**

❖ Beschleuniger

- **Beschleunigung über elektrische Felder, Ablenkung durch Magnetfelder**

❖ Teilchendetektoren und Methoden

- **Messung von Impuls und Energie**

LHC-Detektoren: ATLAS

Ein noch etwas größerer Teilchen-Detektor: **ATLAS**



Kunst und Wissenschaft

Bühnenbild der Oper "Les Troyens" in Valencia, Oktober 2009

