

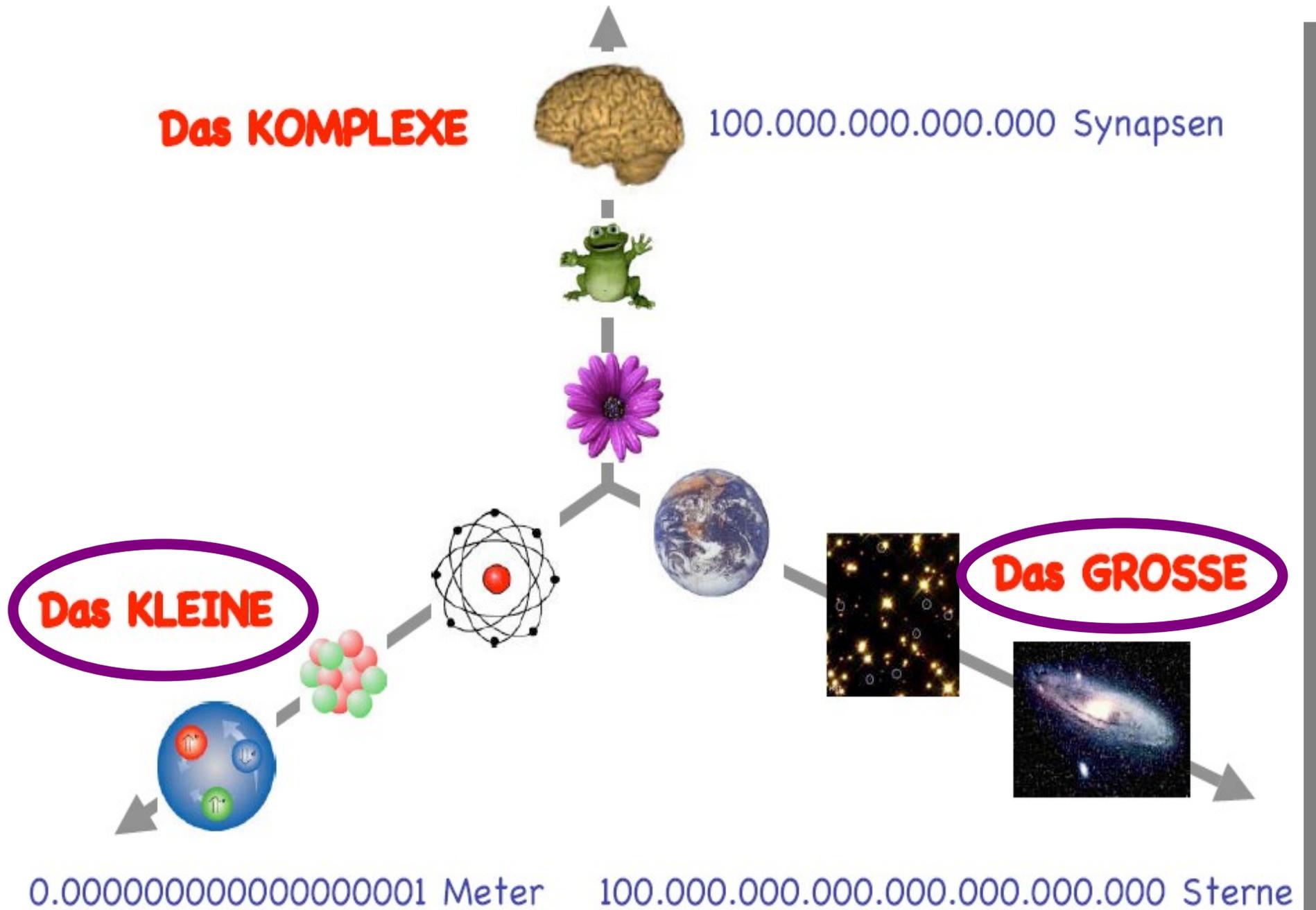
# Experimente mit dem Large Hadron Collider am CERN ...

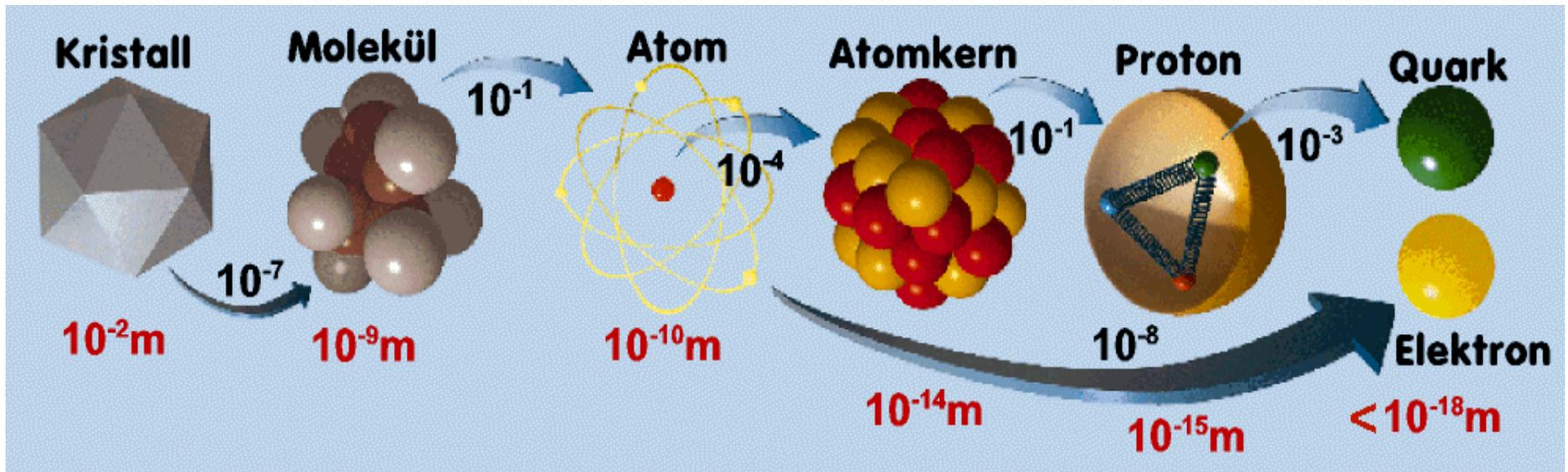
Ein Ausflug in die Welt  
der kleinsten Teilchen

Prof. Dr. G. Quast  
Institut für experimentelle Kernphysik  
Universität Karlsruhe (TH)



# Die drei großen Fronten der Physik heute 3





↓  
**Auge**  
**Mikroskop**

↓ ↓  
↓  
**Elektronenmikroskop**

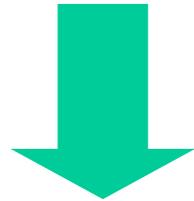
↓ ↓ ↓  
↓  
**Hochenergetische**  
**Teilchenstrahlen**

Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie:

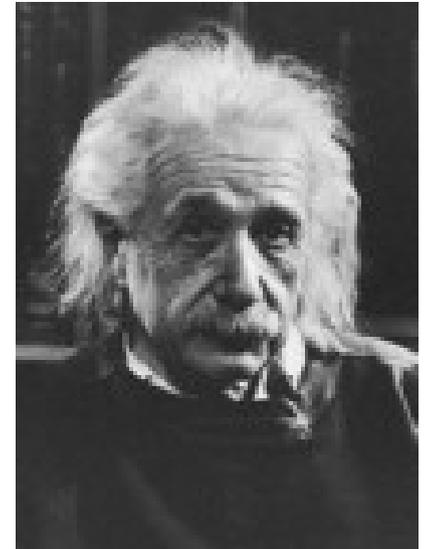


$$E = m \cdot c^2$$

**Masse und Energie sind ineinander wandelbar**



aus Energie können Teilchen entstehen  
und  
Teilchen können zerstrahlen

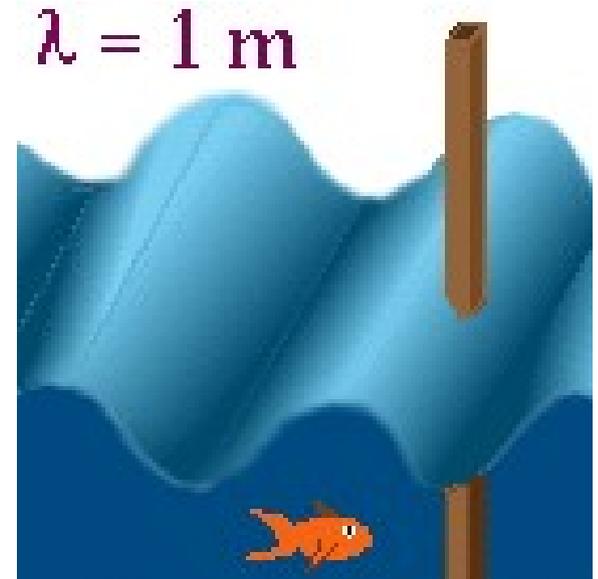


**Grundlage der Teilchenphysik !**

Quantenphysik:



$$\lambda = h / p$$



Teilchen haben Impuls-abhängige Wellenlänge



Kleine Strukturen werden nur mit hohem Impuls  
bzw. hoher Energie sichtbar

**Grundlage der Teilchenphysik !**

- ◆ Zu jedem Teilchen gibt es ein Anti-Teilchen
  - Erzeugung von Teilchen-Antiteilchen-Paaren aus Energie
  - Teilchen-Antiteilchen zerstrahlen z.B. in Photon-Paare

Eigenschaften der Anti-Teilchen:

- Gleiche Eigenschaften wie Teilchen (z.B. Masse)
- Entgegengesetzt geladen

Beispiel:

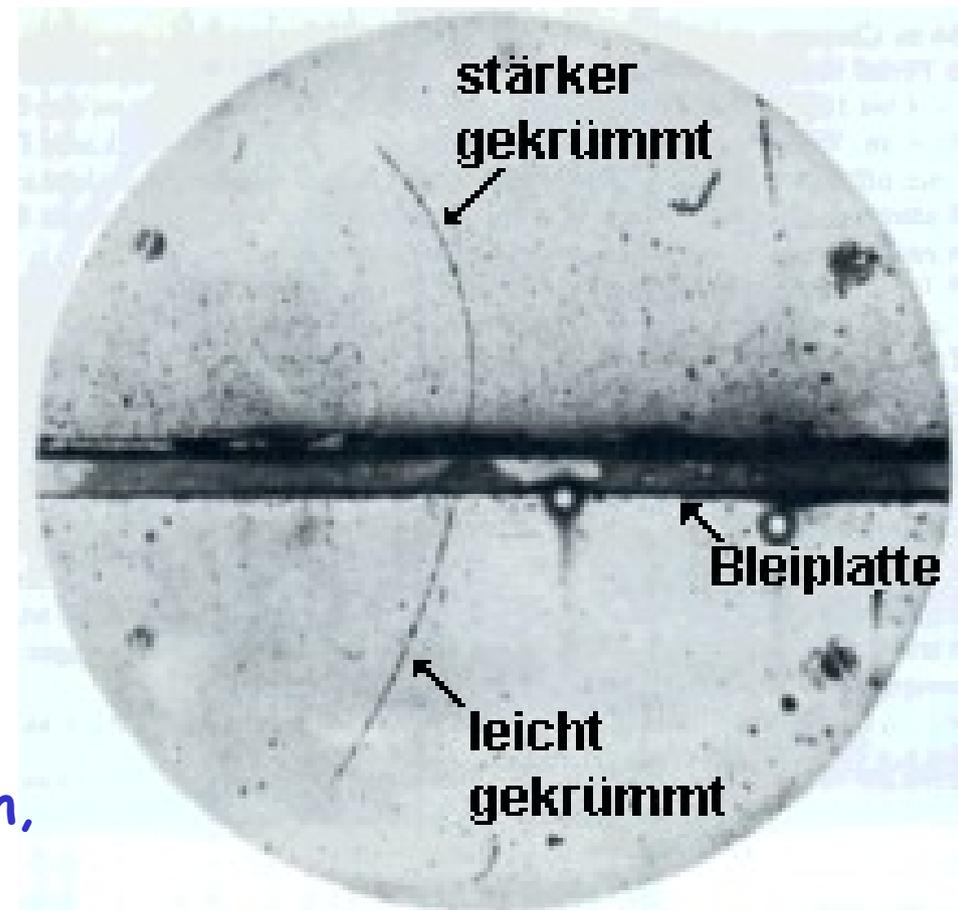
Elektron Ladung:  $-1e$

Positron Ladung:  $+1e$

Masse:  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 511 \text{ 000 eV}/c^2$

- ◆ ebenso: Anti-Proton, Anti-Neutron, Anti-Atom usw.

Entdeckung des Positrons



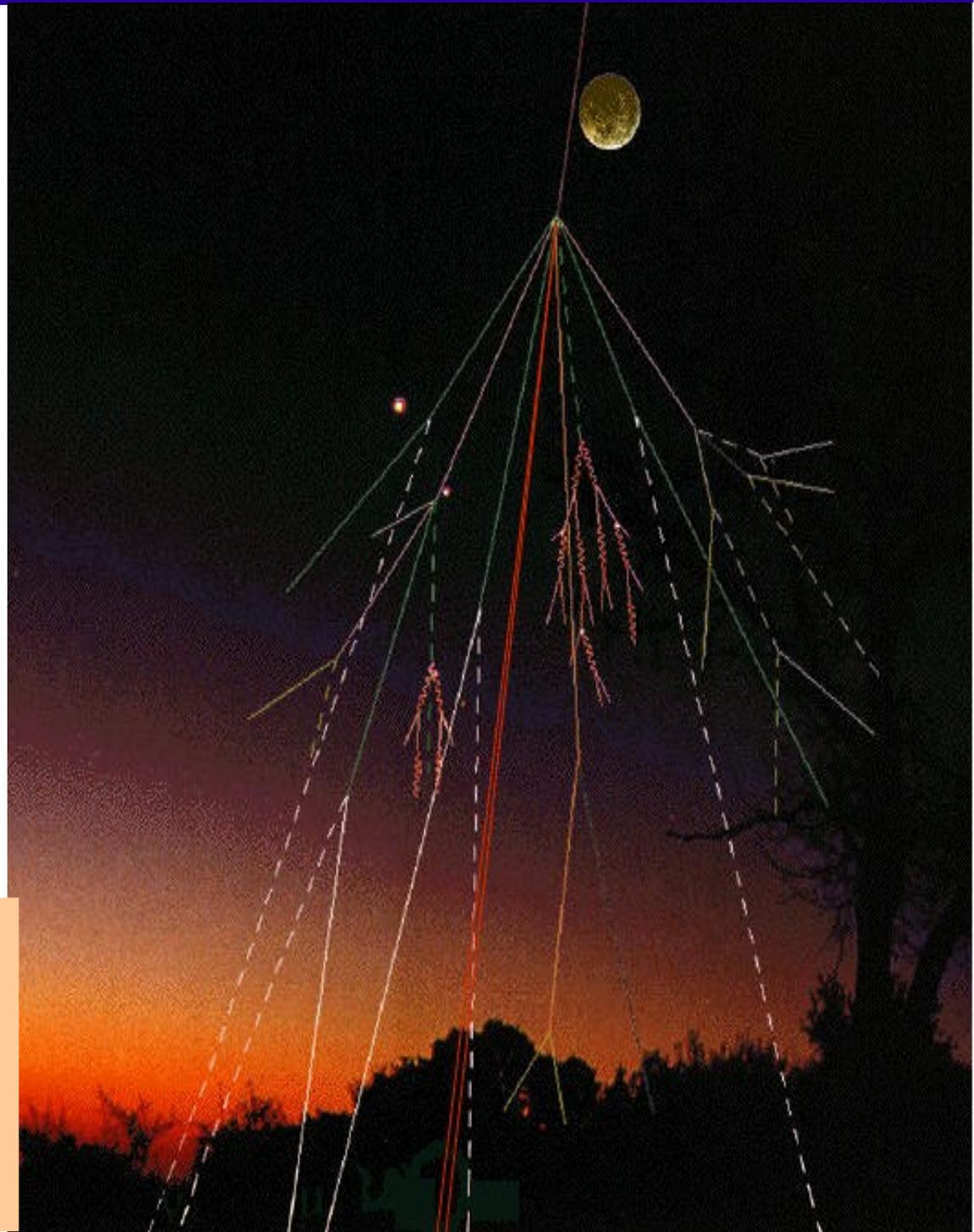
P.Anderson 1932

Weitere Teilchen finden sich in  
der kosmischen Strahlung  
z.B.

Myon ( $\mu$ ), Pion ( $\pi$ ) und Kaon (K)

Diese Teilchen sind nicht stabil !

Der Himmel, wenn wir  
Teilchen „sehen“ könnten

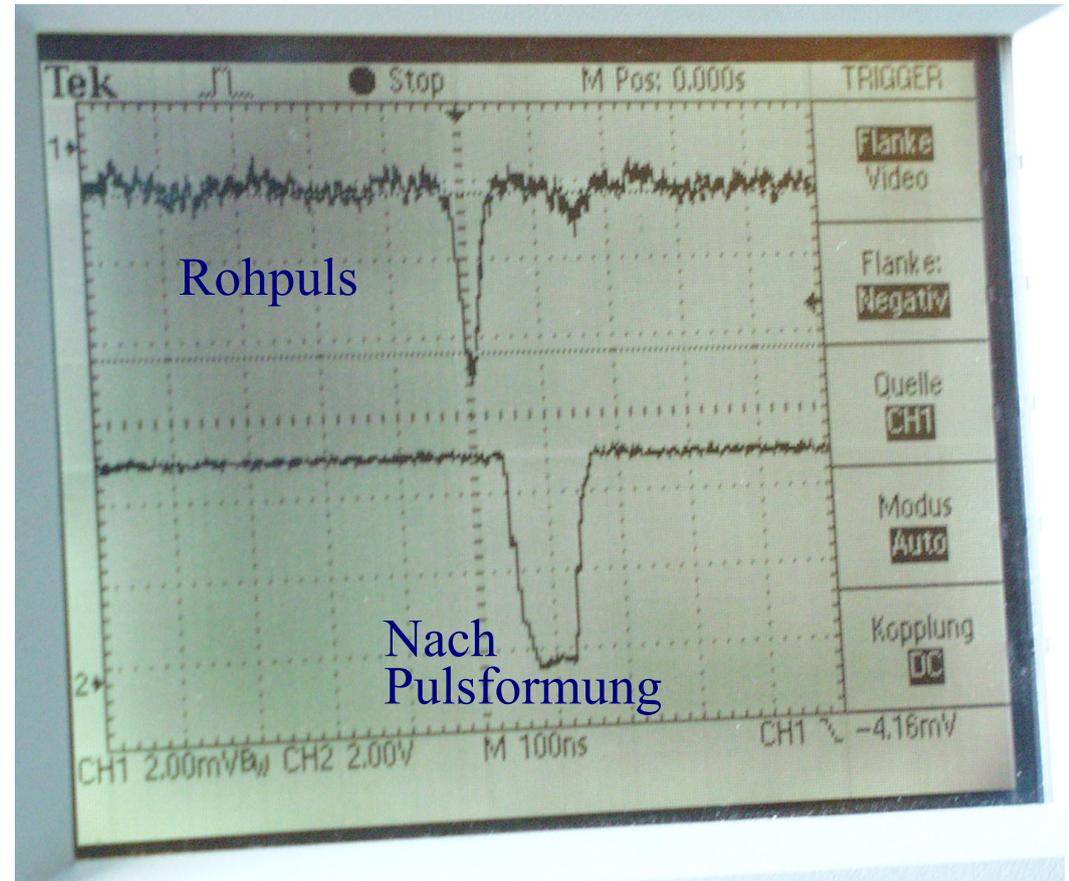


# Ein einfacher Myondetektor für die Schule

## Realaufbau



- mit Wasser gefüllte Kaffekanne
- Sekundärelektronenvervielfacher liefert Pulse von ca. 10 ns Dauer und einigen mv Pulshöhe

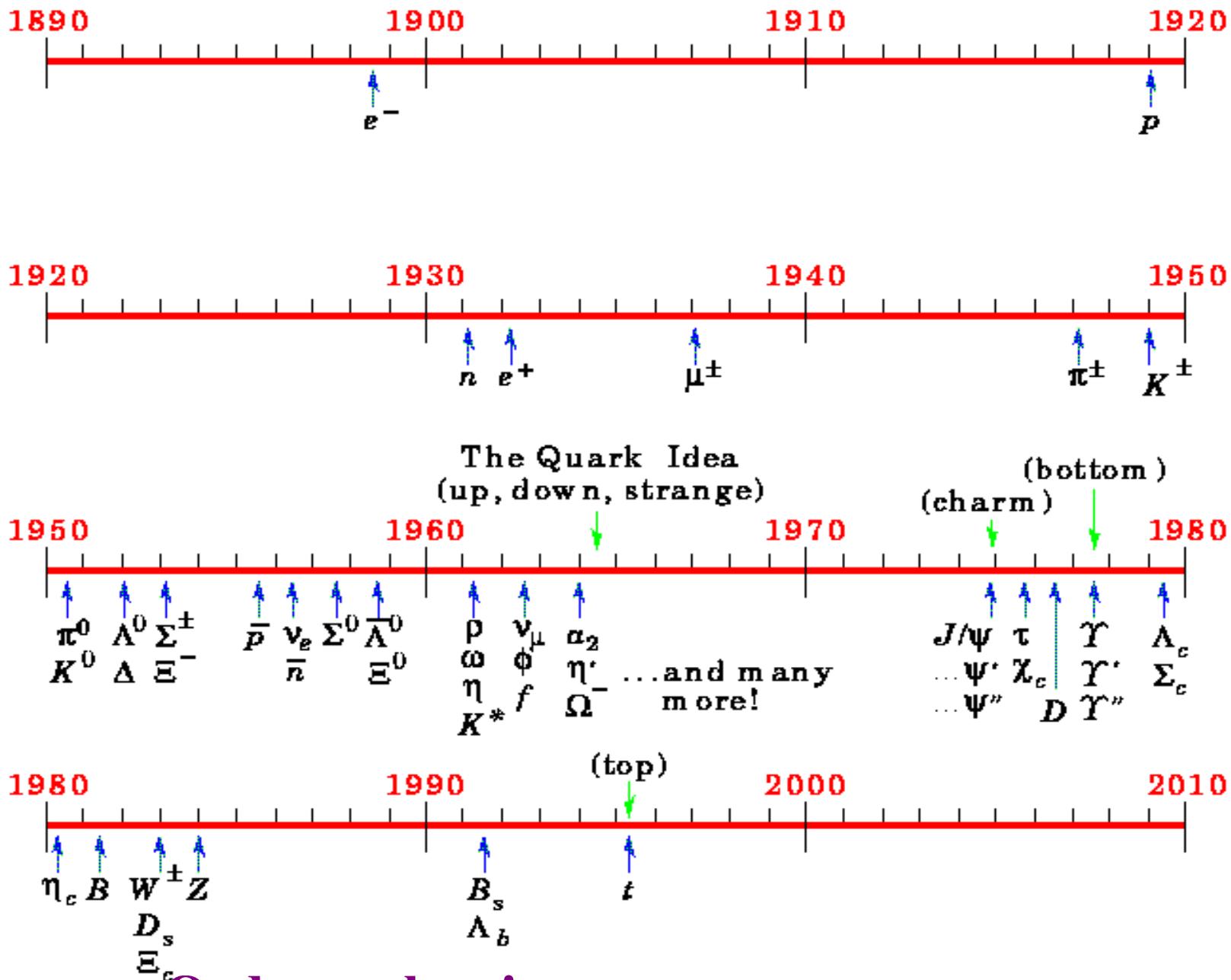


Kein Problem für moderne Oszillografen !

s. z.B. [www.physik.uni-mainz.de/lehramt](http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt)

- ◆ Das geladene Pion  $\pi^-$  hat eine Lebenserwartung von  $2,6 \cdot 10^{-8}$  Sekunden und zerfällt dann in ein Müon
- ◆ Das Müon zerfällt nach weiteren  $2,2 \cdot 10^{-6}$  Sekunden in ein Elektron
- ◆ Das Elektron ist stabil !
- ◆ Das freie Neutron (nicht im Atomkern gebunden) zerfällt nach  $\sim 15$  Minuten in ein Proton und ein Elektron
- ◆ Das Proton ist stabil !  
Das Licht legt in  $10^{-9}$  Sekunden gerade einmal 30cm zurück !

# Ganz viele Teilchen - ein Zoo ?



Da muss Ordnung her ! →

Das Standardmodell der Teilchenphysik

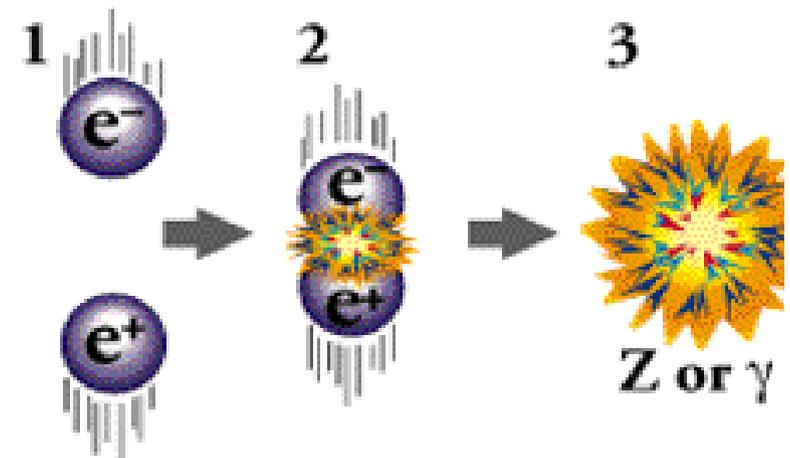
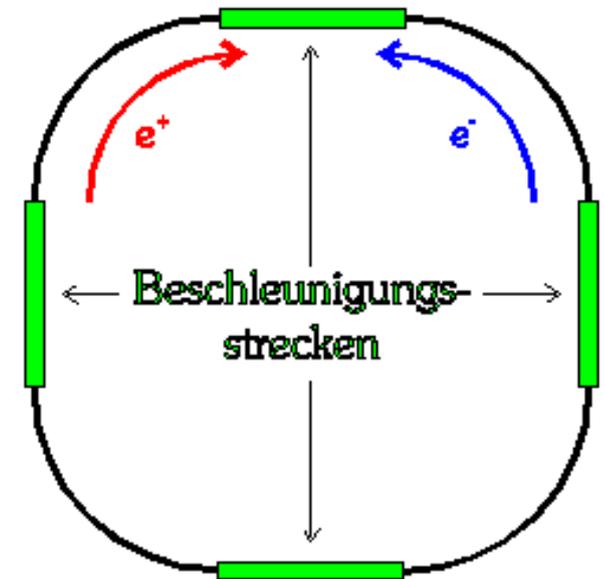
- ◆ Erzeugung von neuen Teilchen im Labor

Teilchen und (Anti-)Teilchen werden beschleunigt und zur Kollision gebracht

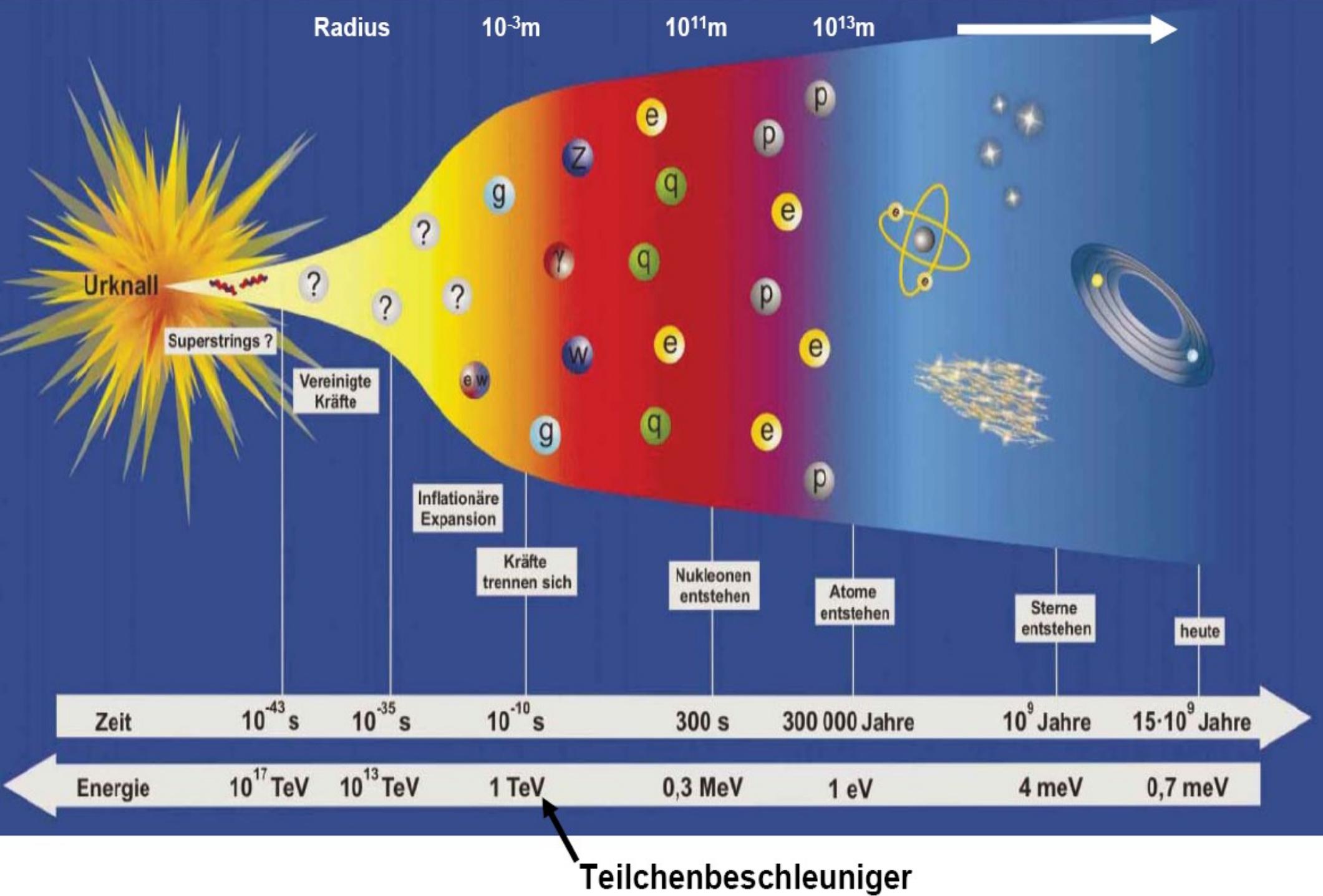
- ◆ Teilchen und Anti-Teilchen vernichten sich und es entsteht Energie (Licht oder Photonen)

aus der Energie können neue Teilchen entstehen

- ◆ Neu erzeugte Teilchen werden in Detektoren nachgewiesen



# Teilchenphysik bestimmt Geschichte des Universums 13

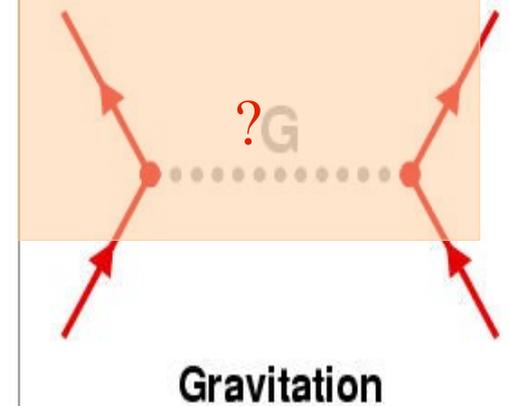
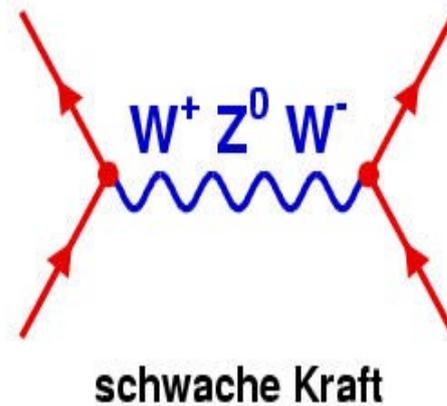
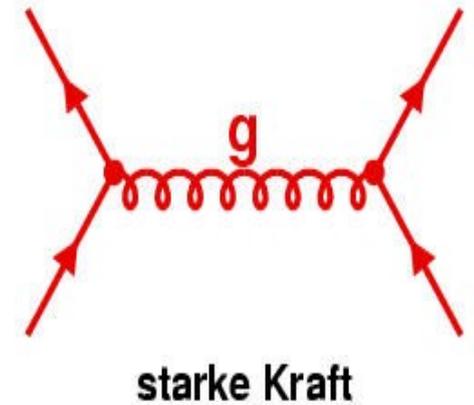
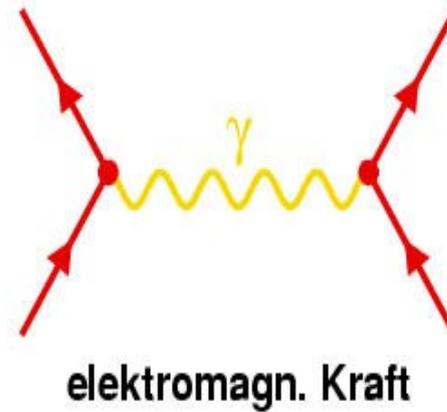
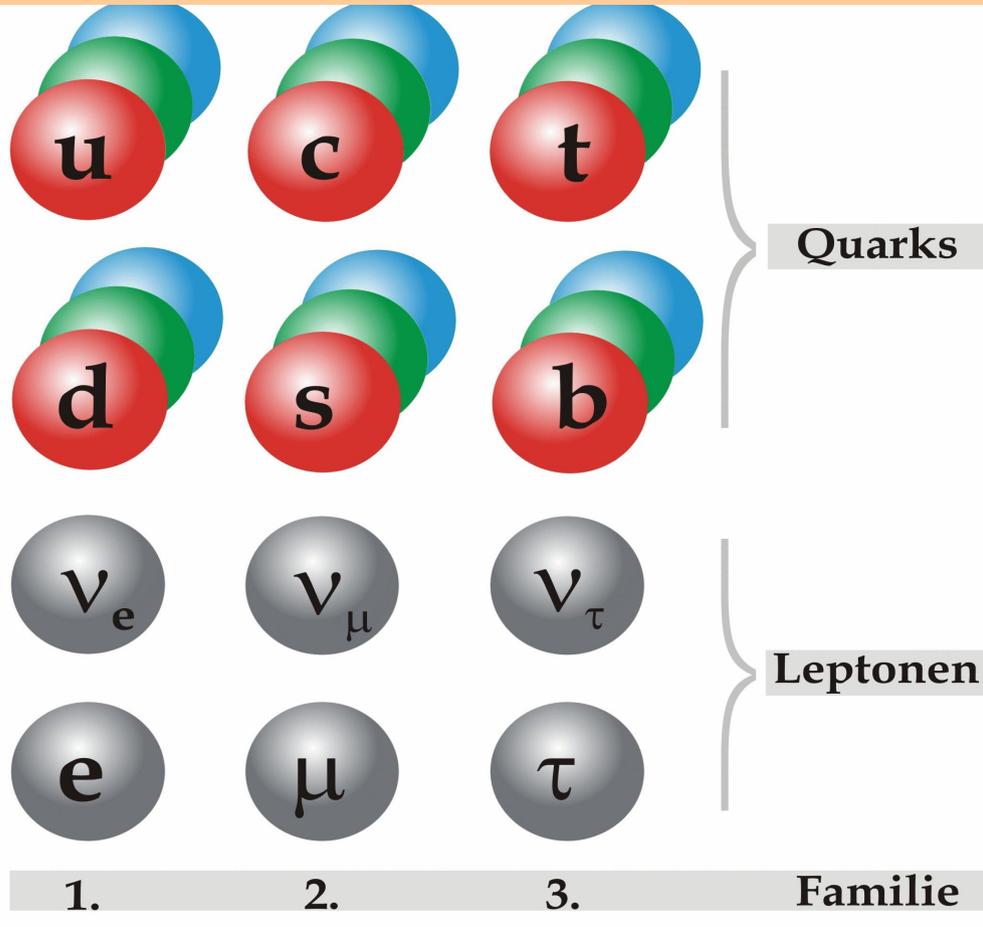


## Standardmodell der Teilchenphysik:

12 fundamentale Teilchen

&

4 Wechselwirkungen



**\*)** Zu jedem Teilchen existiert auch ein Anti-Teilchen !

**Gravitation noch nicht als Quantentheorie verstanden !**

**Dass bisher nicht gefundene Higgs-Teilchen erklärt die (träge) Masse !**

Rutherford, 1908  
Entdeckung des Atomkerns

$\alpha$ -Teilchen

Hofstadter, 1956  
Ausdehnung des Protons

Elektronen

Friedman, Kendall, Taylor, 1962  
Entdeckung der Quarks

Elektronen

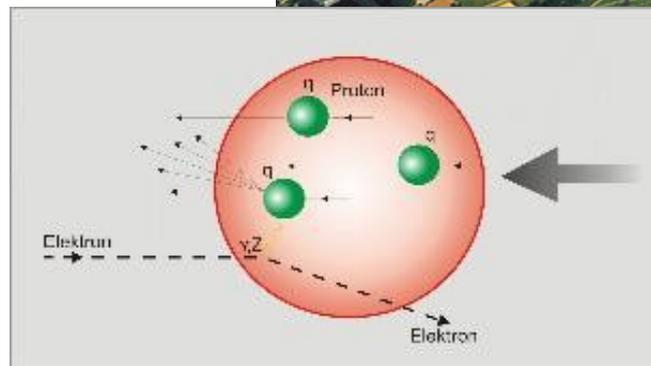
Zahlreiche Experimente, seit 1975  
HERA, seit 1992  
Aufbau des Protons

Elektronen / Myonen / Neutrinos

HERA, seit 1992  
Sind Quarks elementar?

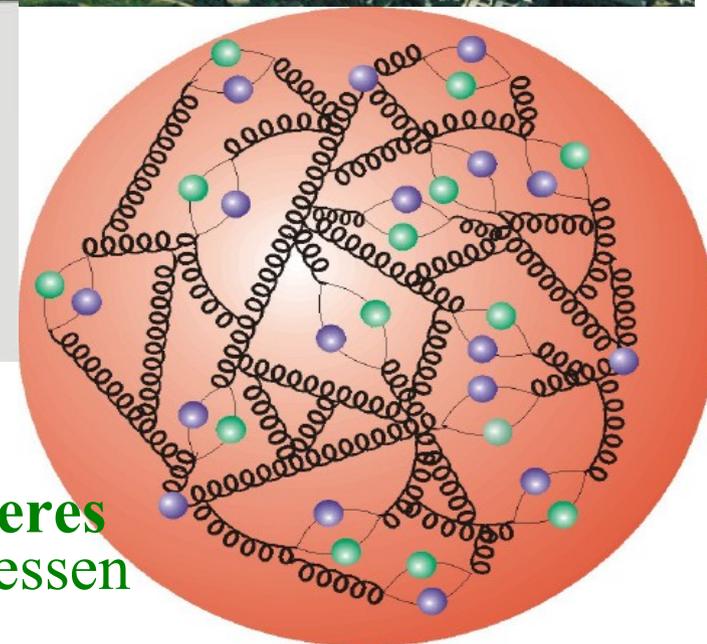
Elektronen / Positronen

## Hera-Beschleuniger Hamburg in Betrieb bis Sommer 2007



Elektron-Proton-Streuung

**Proton-Inneres  
genau vermessen**



**Wichtig für den LHC !**

- konsistente theoretische Beschreibung der fundamentalen Teilchen und der Kräfte zwischen ihnen **AUSNAHME: Gravitation !**
- beruht auf grundlegenden Symmetrien – **elegant und schön !**
- Grundlagen in den frühen 70er Jahren – und bis heute alle Präzisionstests bestanden !
- **es fehlt nur noch das Higgs-Teilchen !**

**dennoch:**

- viele offene Fragen und nicht enthaltene Phänomene erfordern  
**„neue Physik“ jenseits des Standardmodells**

---

Film:

Teilchenphysik

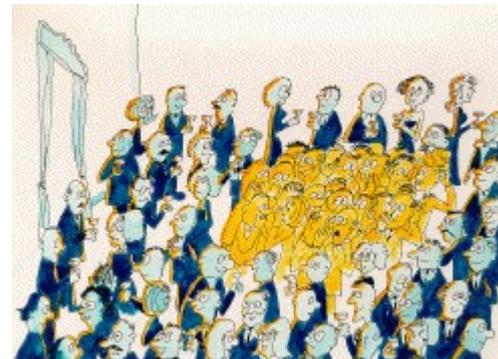
- Ursprung der Massen der Elementarteilchen ?
- Vereinigung aller fundamentalen Kräfte ?
- Wo ist die Antimaterie im Universum geblieben ?
- Unbekannte Formen von Materie ?  
z.B. supersymmetrische Materie  
„dunkle Materie“
- Was ist „dunkle Energie“ ?
- Verborgene räumliche Dimensionen ?

# Ursprung der Masse ?

19

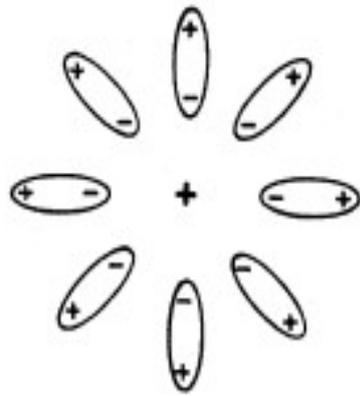


Gibt es den Higgs-Mechanismus, und wie funktioniert er ?



## Kopplungsstärke zwischen Teilchen ändert sich mit dem Abstand:

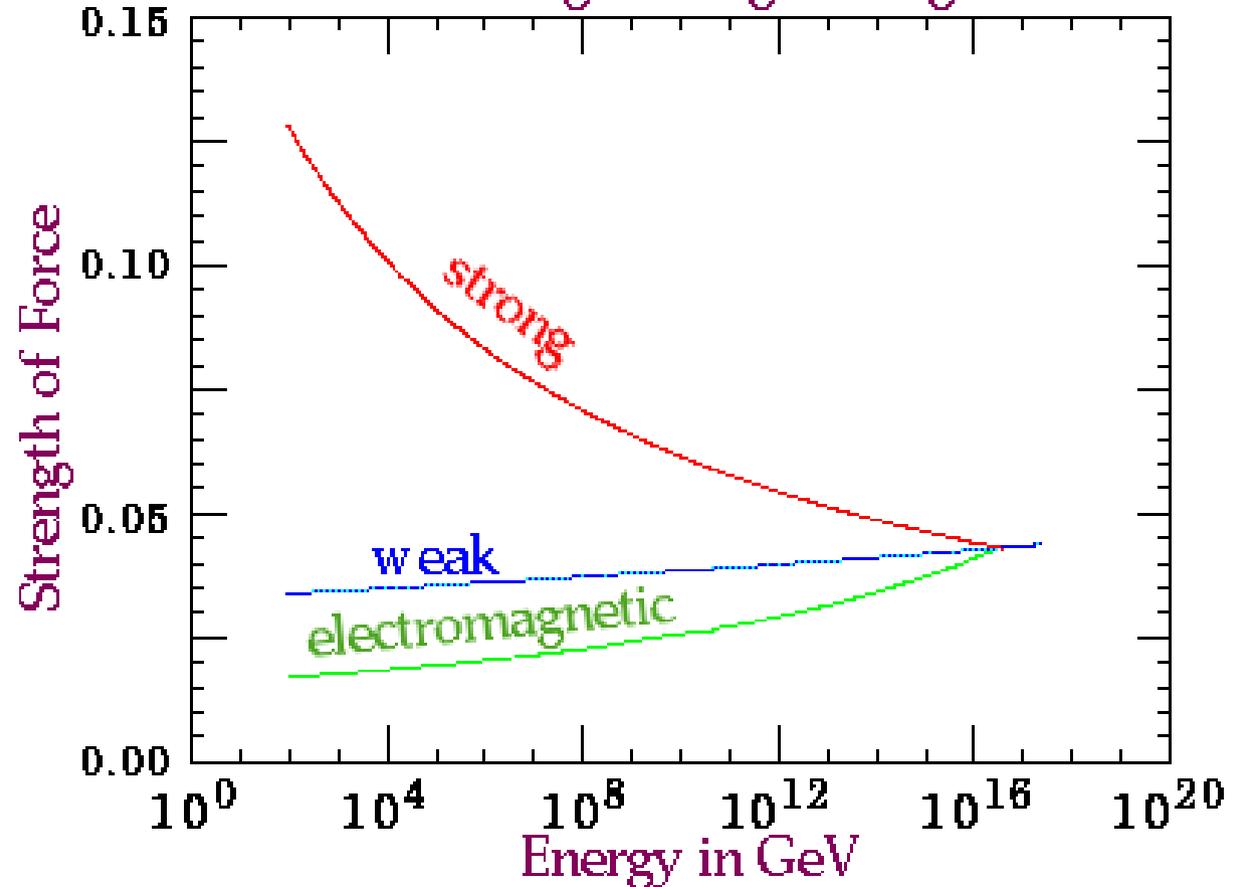
„Virtuelle Teilchen“ schirmen „nackte Ladung“ ab (sog. „Vakuumpolarisation“)



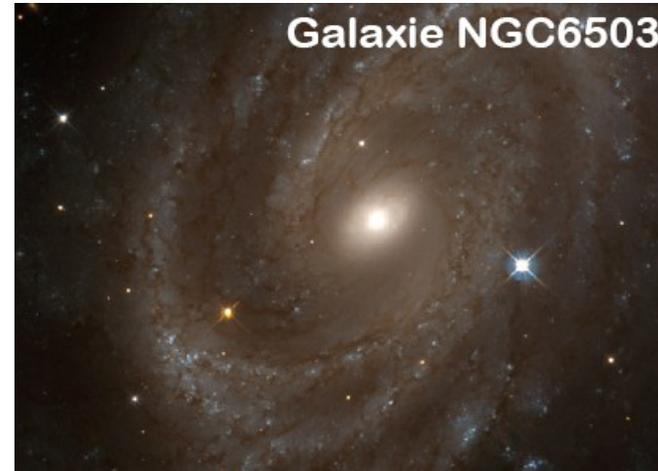
elektrische Ladung wird bei kleinen Abständen stärker!  
Effekt der „Quantenelektrodynamik“, modifiziert Coulomb-Gesetz, z.B. Lamb-Verschiebung beim Wasserstoff

bei kleinen Abständen wird die **schwache Kraft** stärker, die **starke Kraft** schwächer

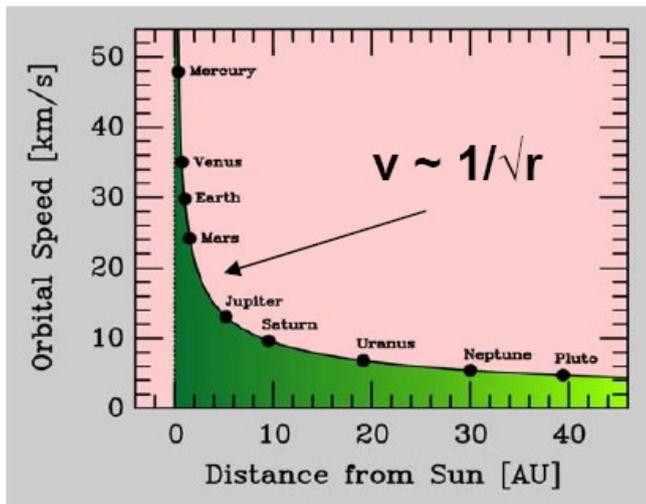
## Forces Merge at High Energies



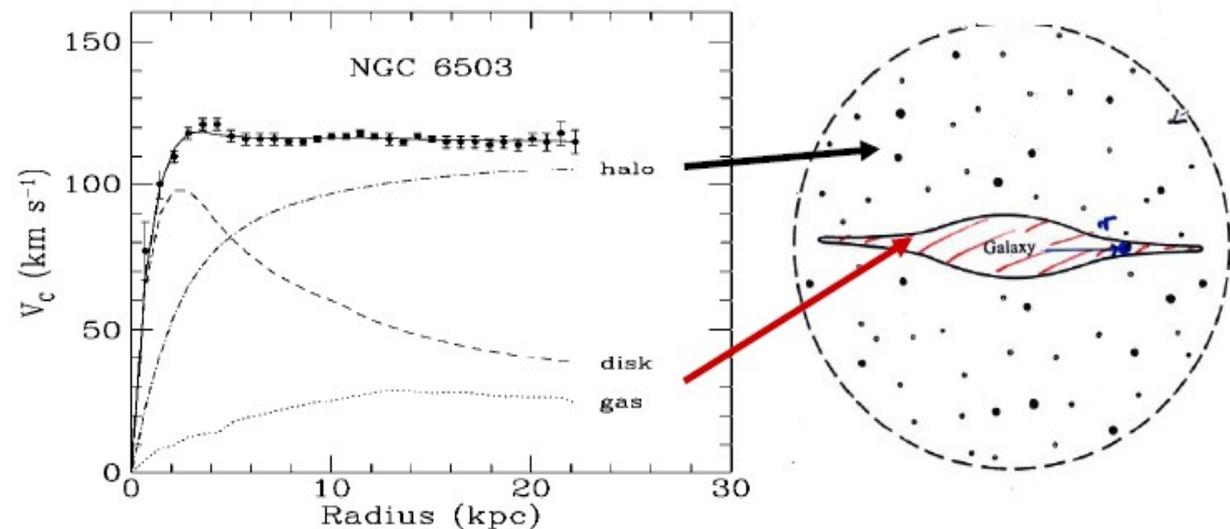
Vereinigen sich alle Kräfte bei hohen Energien (=kleinen Abständen) zu einer „Urkraft“ ?



Im Sonnensystem gilt  
Keplers Gesetz



Rotationsgeschwindigkeit von Sternen in  
Galaxien nicht durch „sichtbare“ Materie  
erklärbar → **dunkle Materie !**



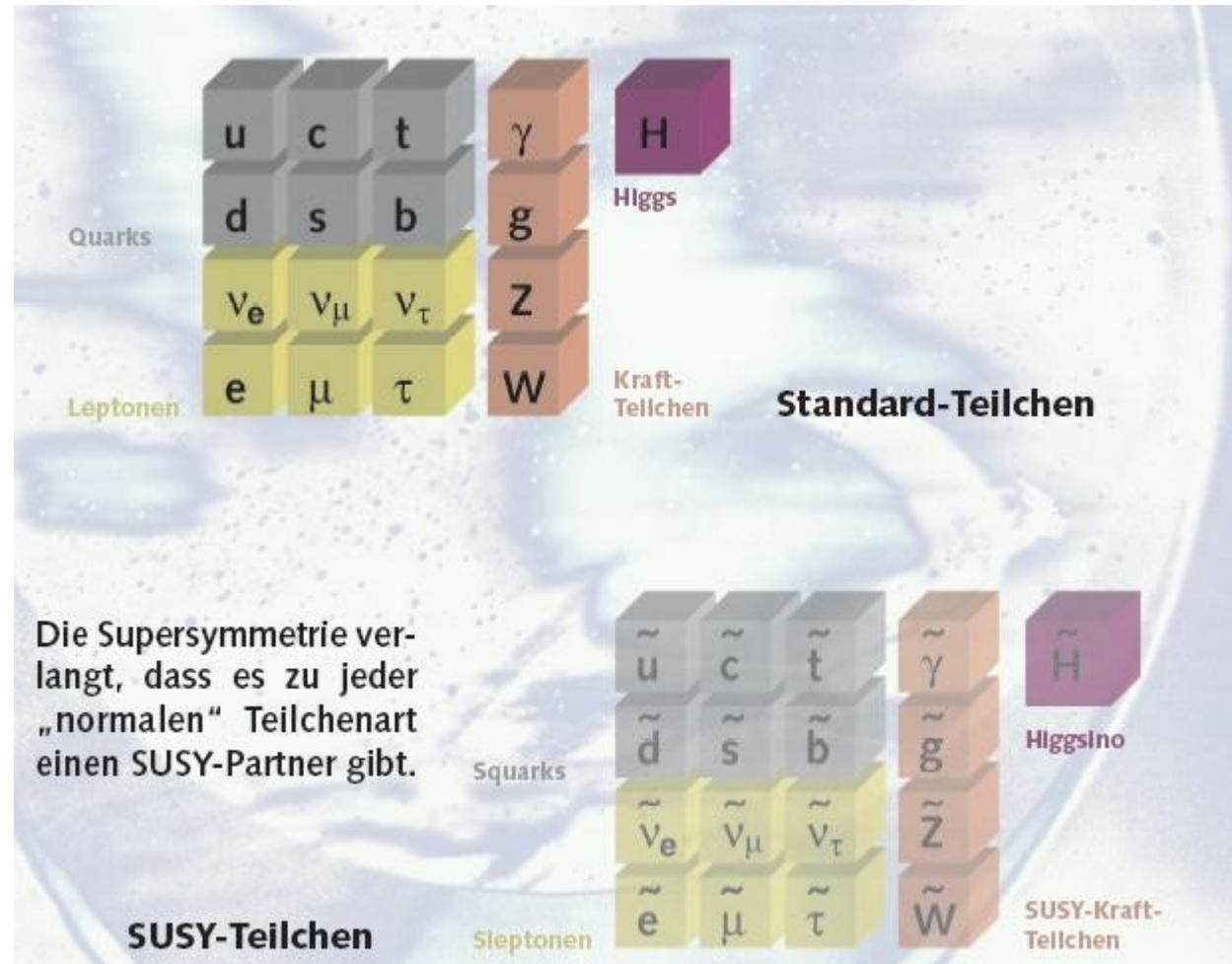
dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

Supersymmetrie ordnet jedem Teilchen einen Partner zu:  
Boson  $\leftrightarrow$  Fermion

Leichtestes supersymmetrisches Teilchen ist

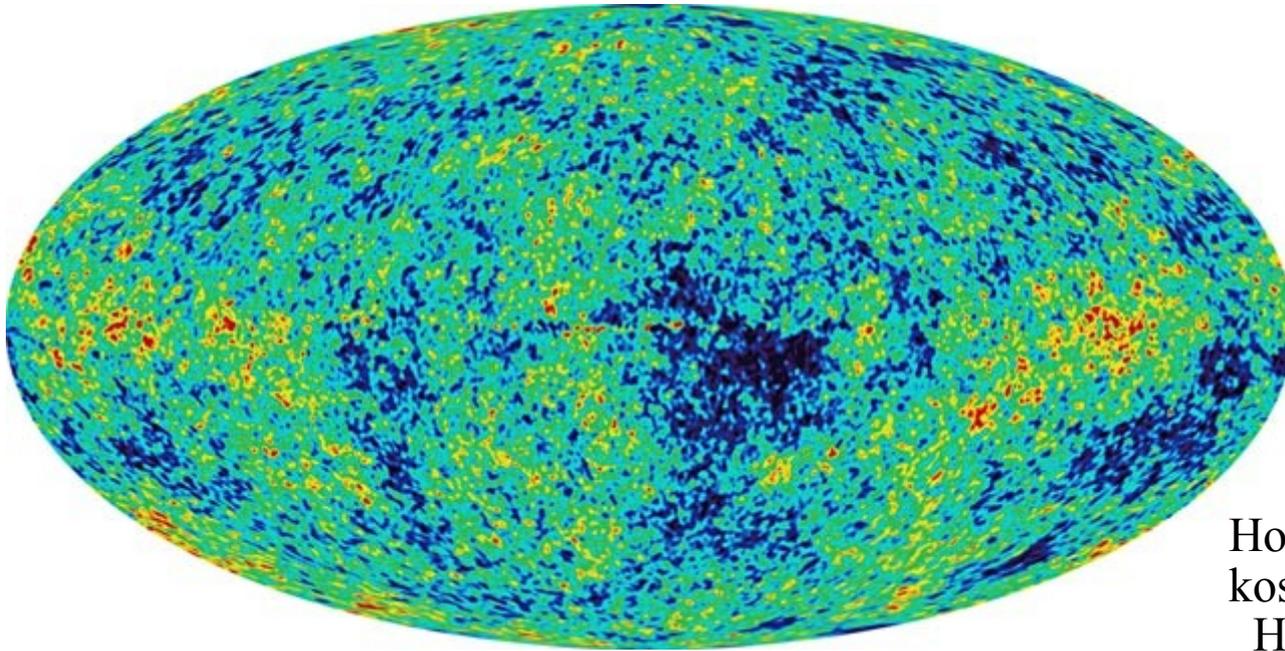
- stabil
- elektrisch neutral
- nicht stark-wechselwirkend?

**Ist das die dunkle Materie !?**



SuSy kann weitere Probleme des Standardmodells lösen:

- Verbindung zur Gravitation
- Brücke zur „Urkraft“

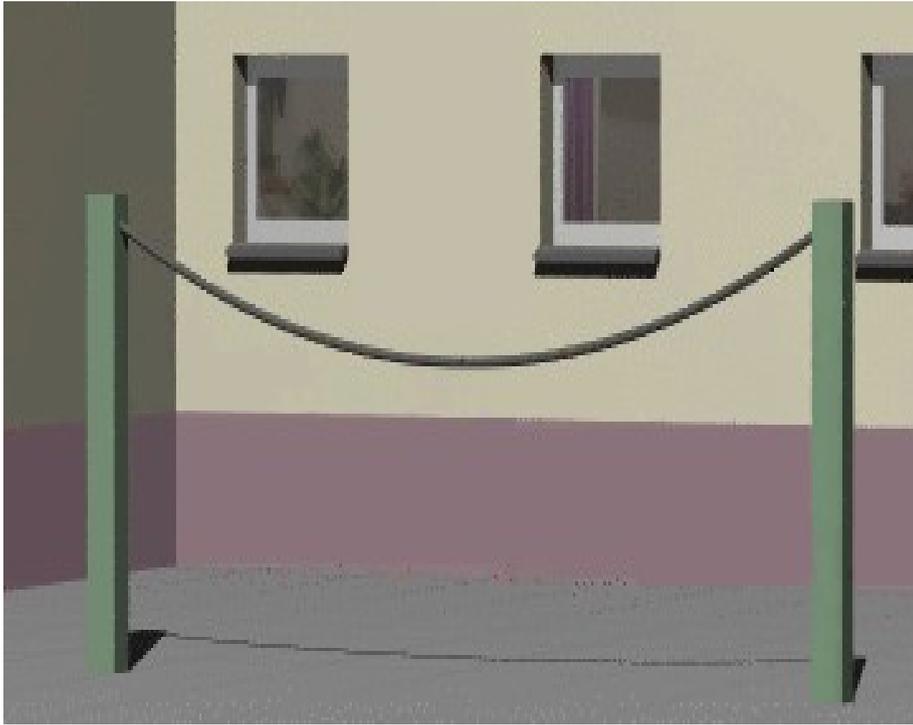


Hochauflösende Messung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung mit dem WMAP-Satelliten

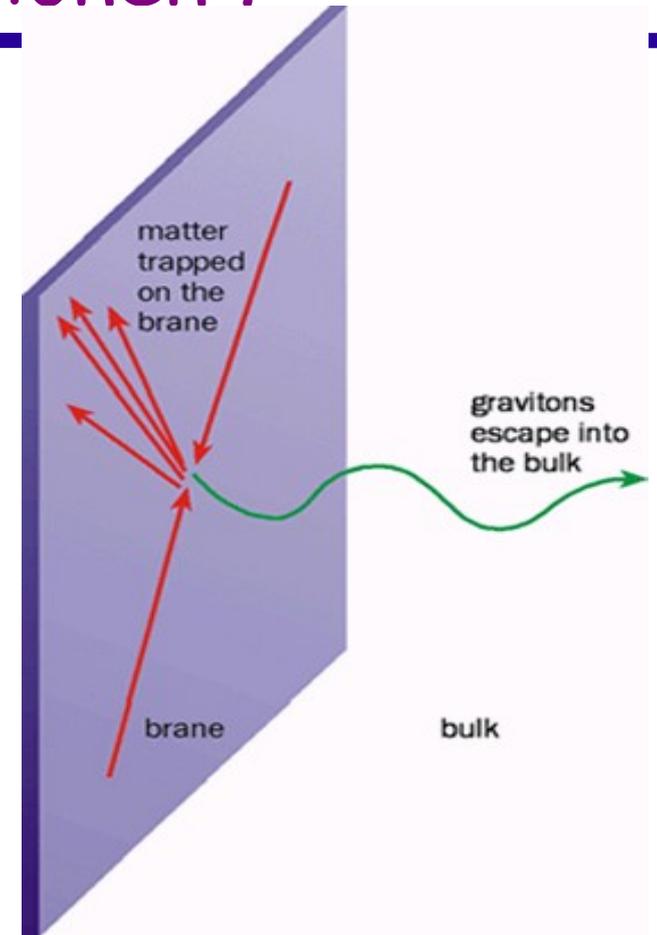
Kleinste Temperaturschwankungen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung von 2,7 K geben Hinweis auf Inhomogenität des frühen Universums →  
**Existenz von ~25% dunkler Materie und 70% „dunkler Energie“**

dunkle Energie = die Konstante  $\lambda$  in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie

**Was steckt teilchenphysikalisch dahinter ?**



- Aus der Ferne: Seil ist 1-dim Objekt
- Ameise nimmt es als Oberfläche wahr – 2. Dimension ist „aufgerollt“
- Struktur bei hoher Vergrößerung deutet auf dritte Dimension hin

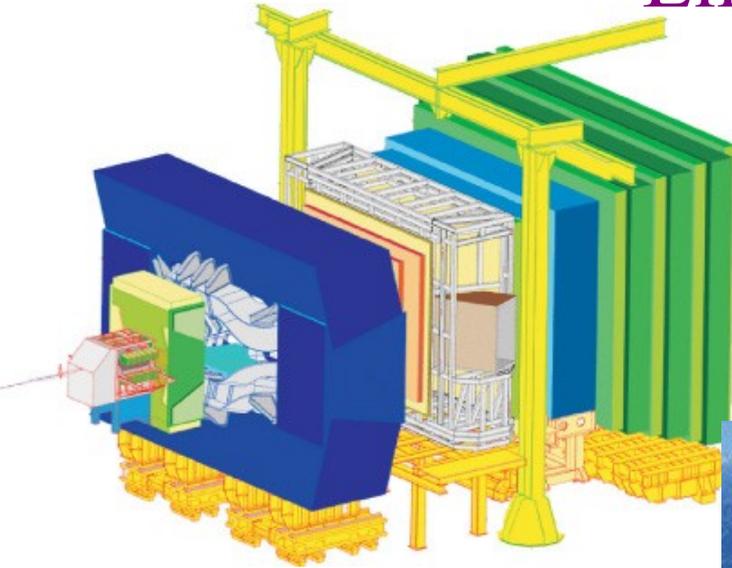


Unser dreidimensionaler Raum eingebettet in höherdimensionalen Raum ? Brane-Modell: Gravitation breitet sich in allen Dimensionen aus - wir bei kleinen Abständen schnell stärker ( $\sim r^{1-n}$ )

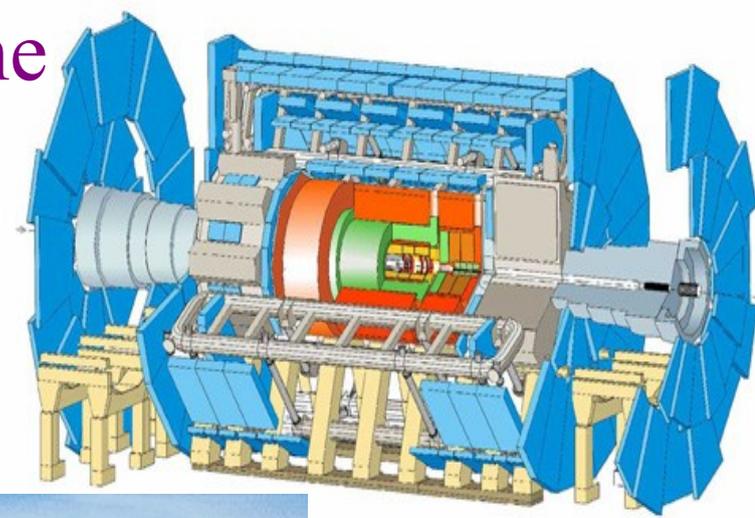
**Ist unser Raum auch bei Abständen von  $10^{-19}$  m noch dreidimensional?  
Werden wir „starke“ Gravitation (=Graviton-Produktion) sehen ?**

# Entdeckungsmaschine

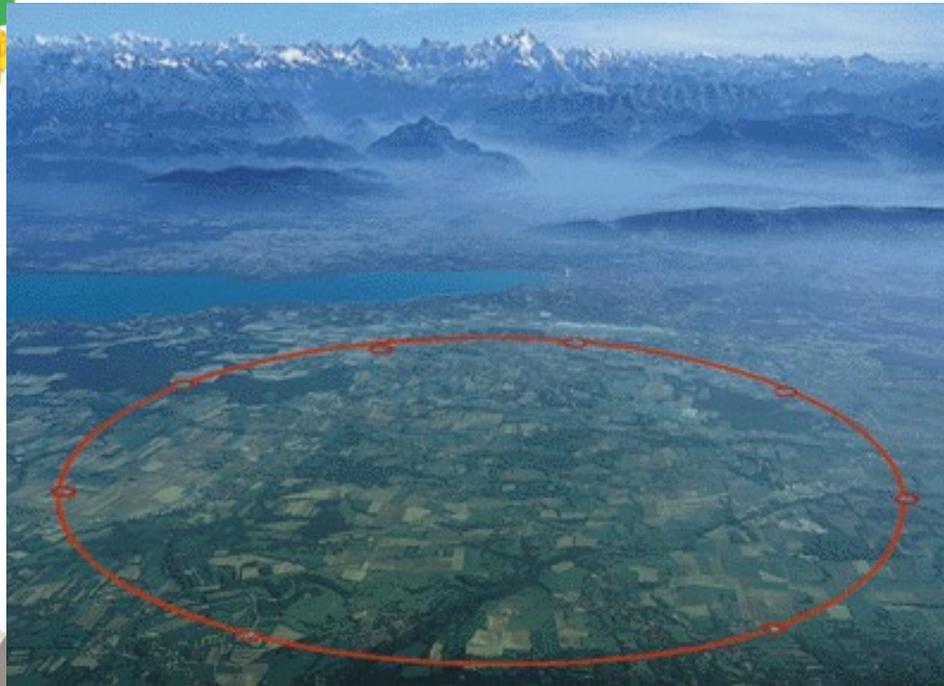
LHC & Experimente



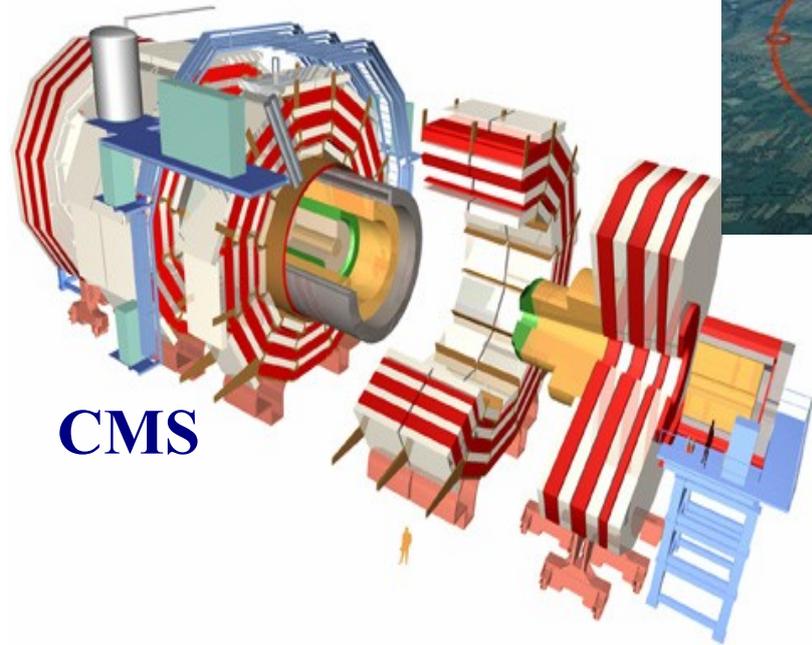
LHCb



ATLAS

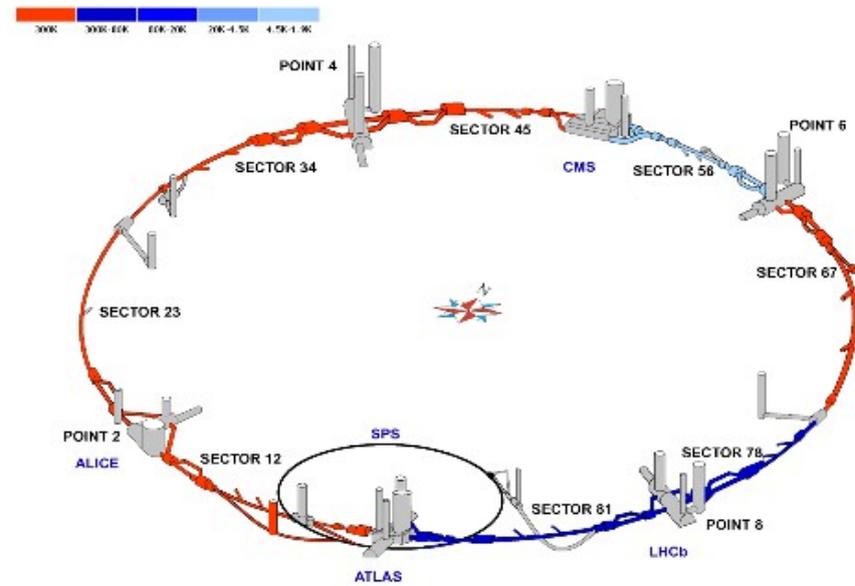


Alice

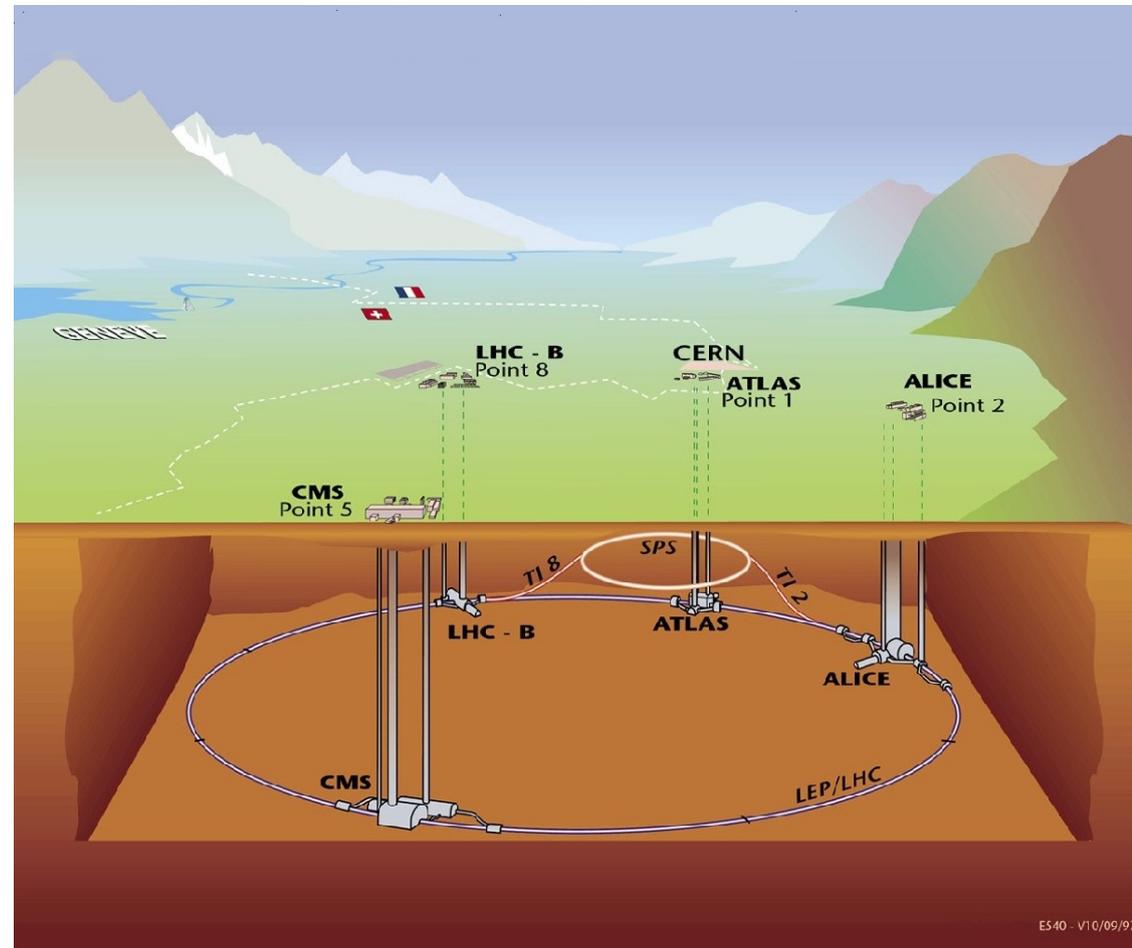


CMS





- **Proton-Proton-Beschleuniger** in Tunnel am CERN mit 27 km Umfang
- 14 TeV pro Kollision, d.h. Bedingungen wie zu Zeiten  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  s nach dem Urknall, Abstände bis  $10^{-19}$  m



## Vier geplante Experimente:

- **ATLAS** pp-Physik  
Higgs, Supersymmetrie, ...
- **ALICE** Pb-Pb-Kollisionen,  
Quark-Gluon-Plasma
- **CMS** pp-Physik  
Higgs, Supersymmetrie, ...
- **LHC-B** Physik der b-Quarks  
Materie-Antimaterie-Asymmetrie

... wird viele Antworten liefern !

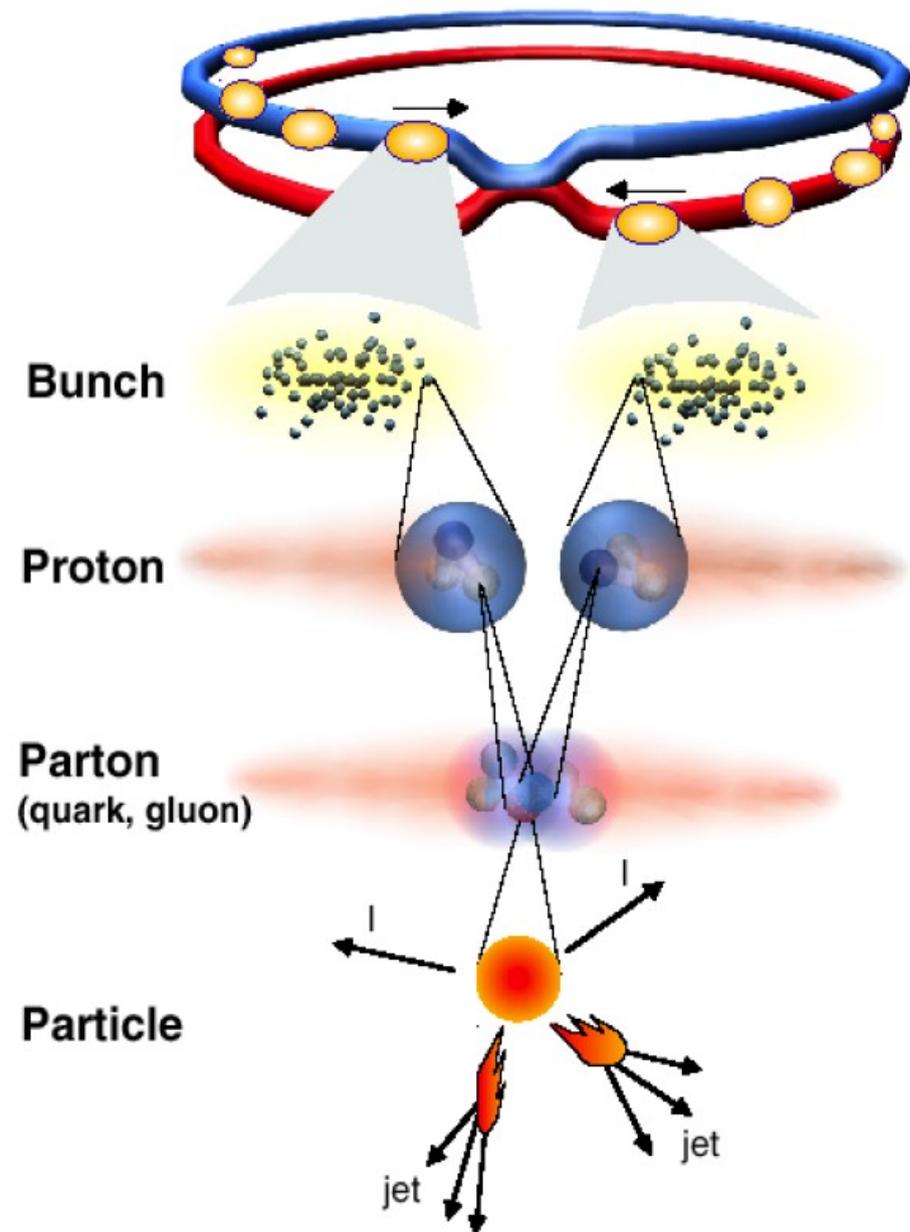
**Supraleitende Magnete** halten die Protonen auf der Kreisbahn



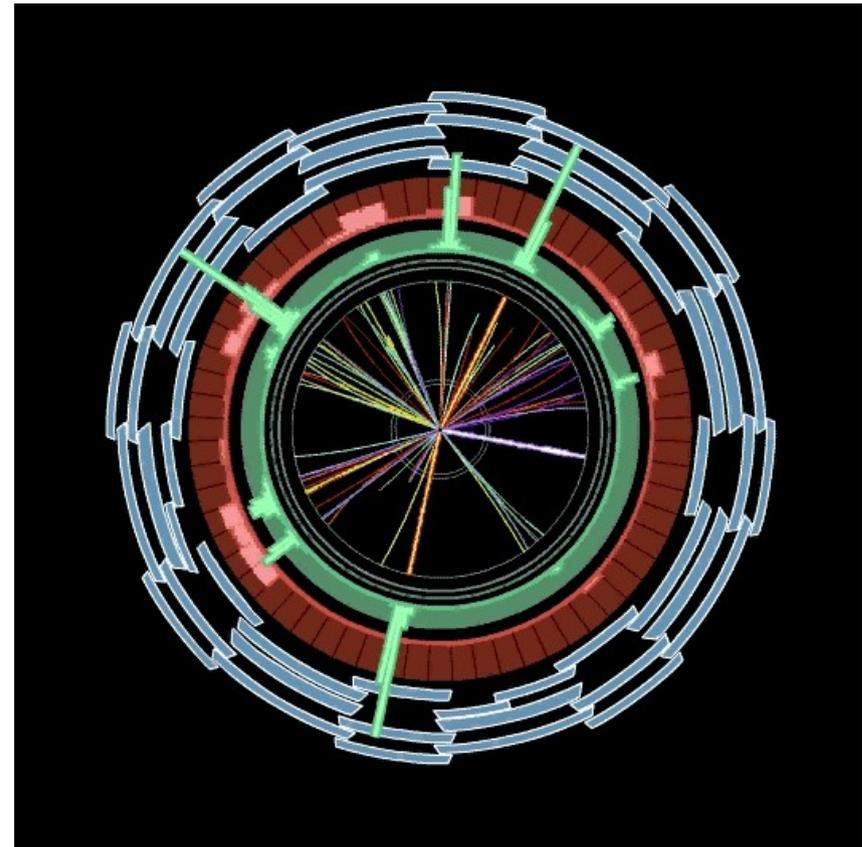
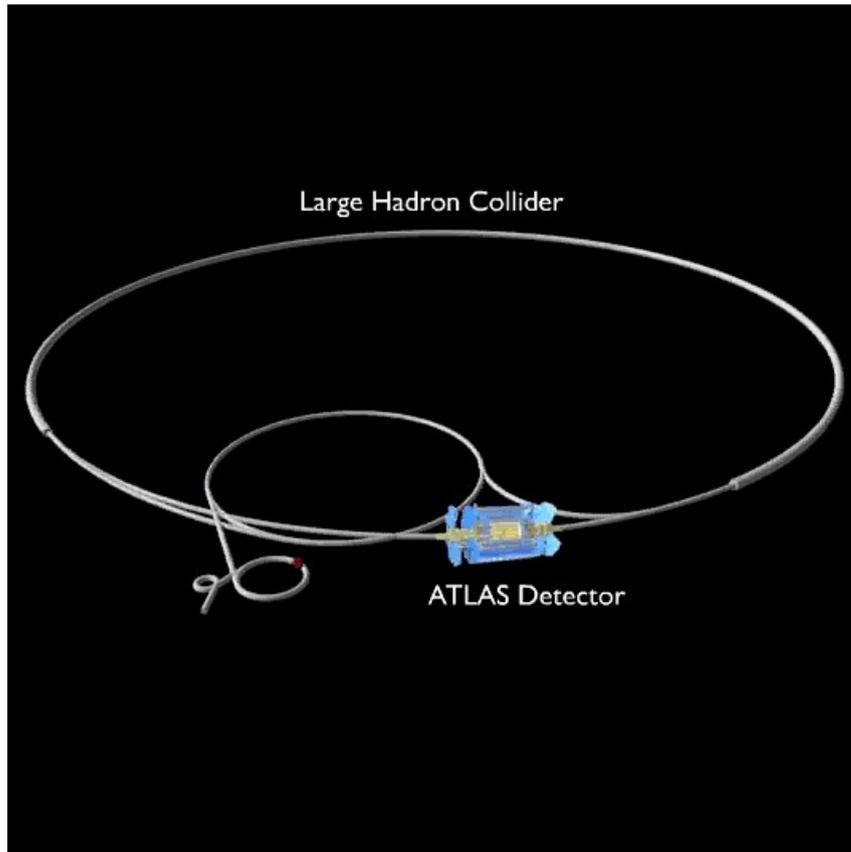
größte Herausforderung:

Magnetfeld von 9 Tesla  
insgesamt 1300 Stück, 15 m lang  
Betrieb bei einer Temperatur von 1.9 K

**Alle Magnete sind im Tunnel und  
an das Kryo-System angeschlossen**



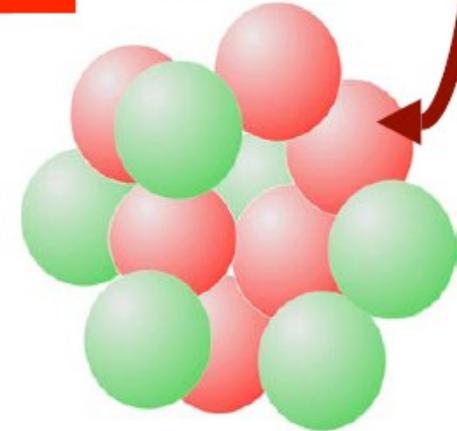
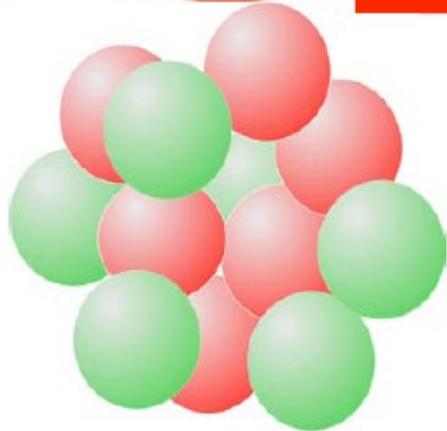
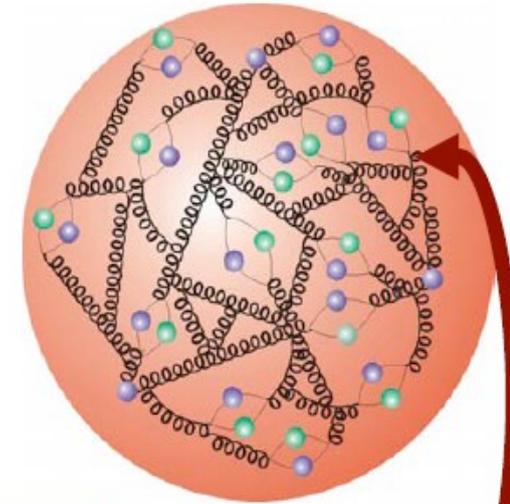
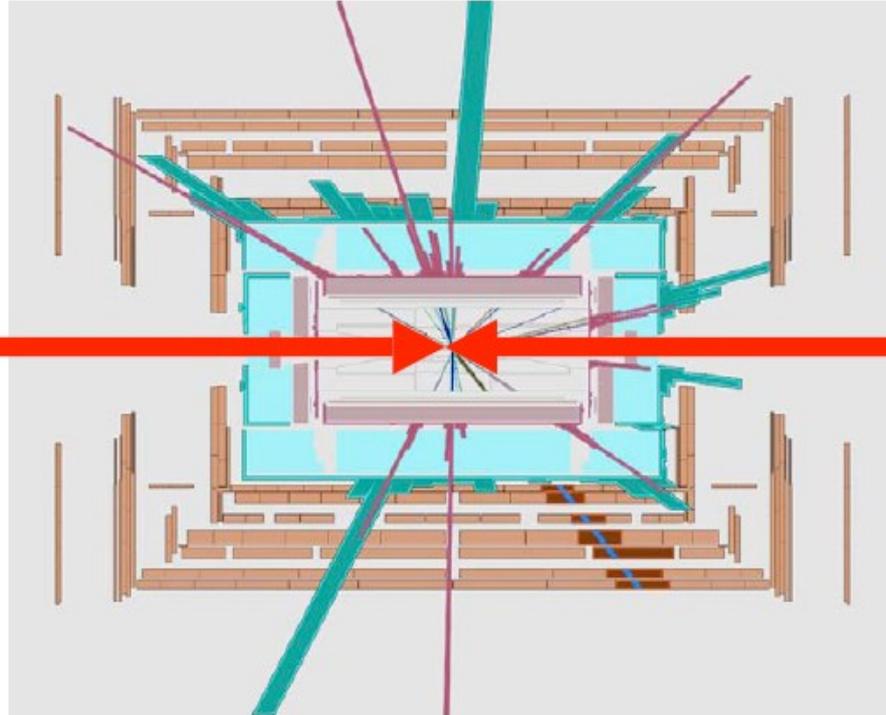
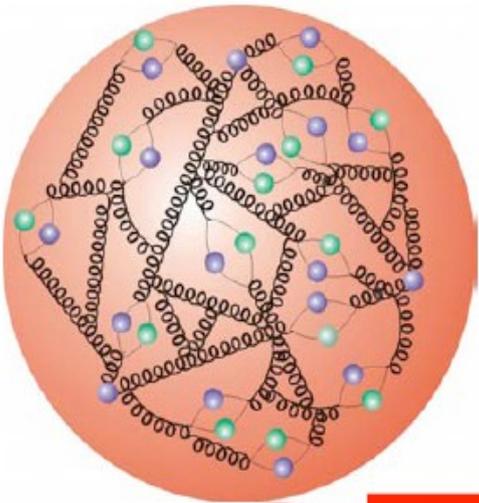
- $2835 \times 2835$  Proton-Proton-Pakete („bunches“)
- $10^{11}$  Protonen/Paket  
Proton-Energie: 7 TeV
- Kreuzungsrate der p-Pakete: 40 MHz
- bis zu  $10^9$  pp-Stöße/sec
- Luminosität:  
 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  Design,  
 $0.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  anfänglich
- 23 Ereignisse im Detektor überlagert



Video: Kollisionen in ATLAS

**Bei LHC:** ~1000 geladene Teilchen pro pp-Wechselwirkung im Detektor  
Hohe **Teilchendichten** Herausforderung für Detektoren

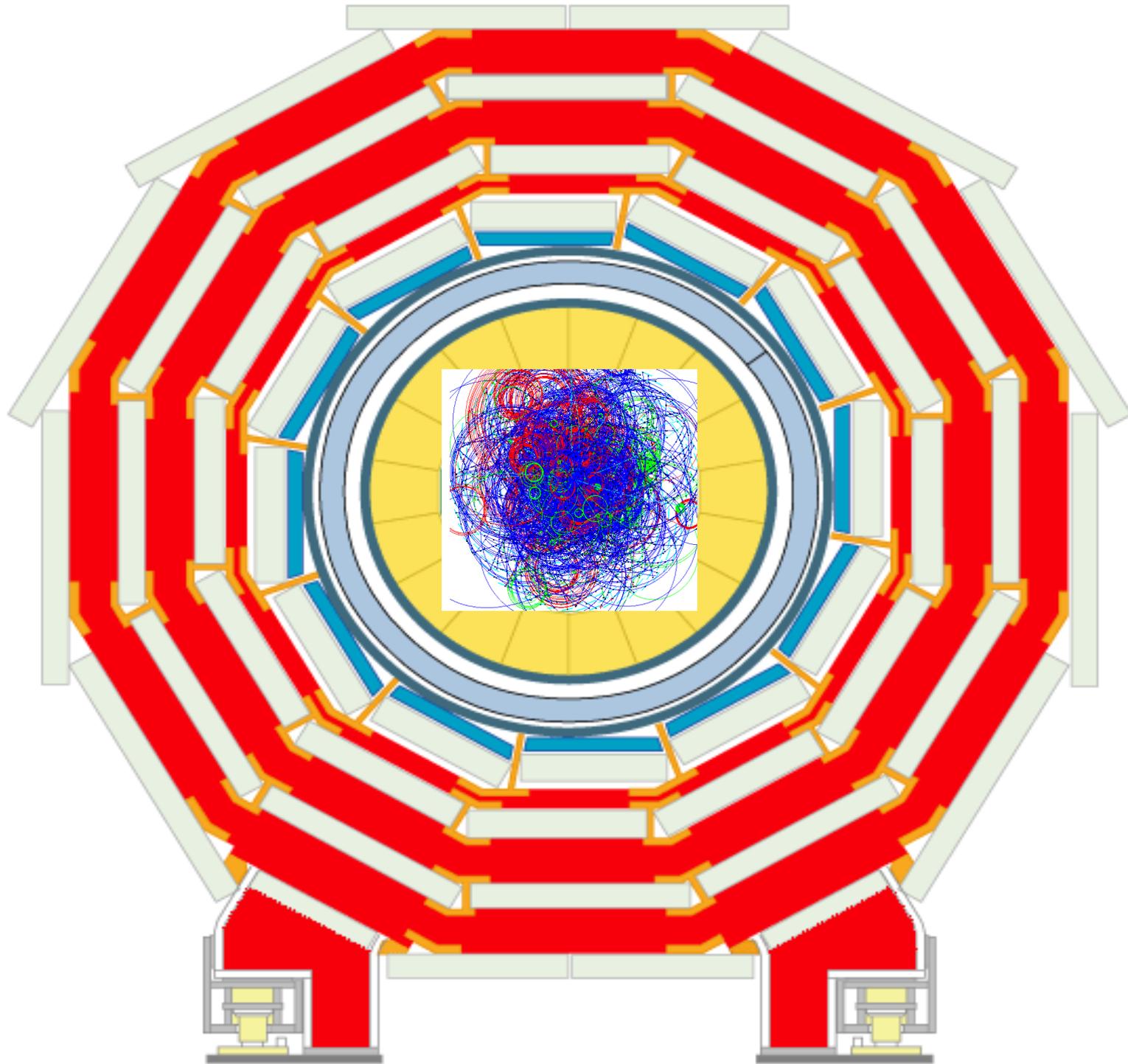
2 mal 7 = 14 ?



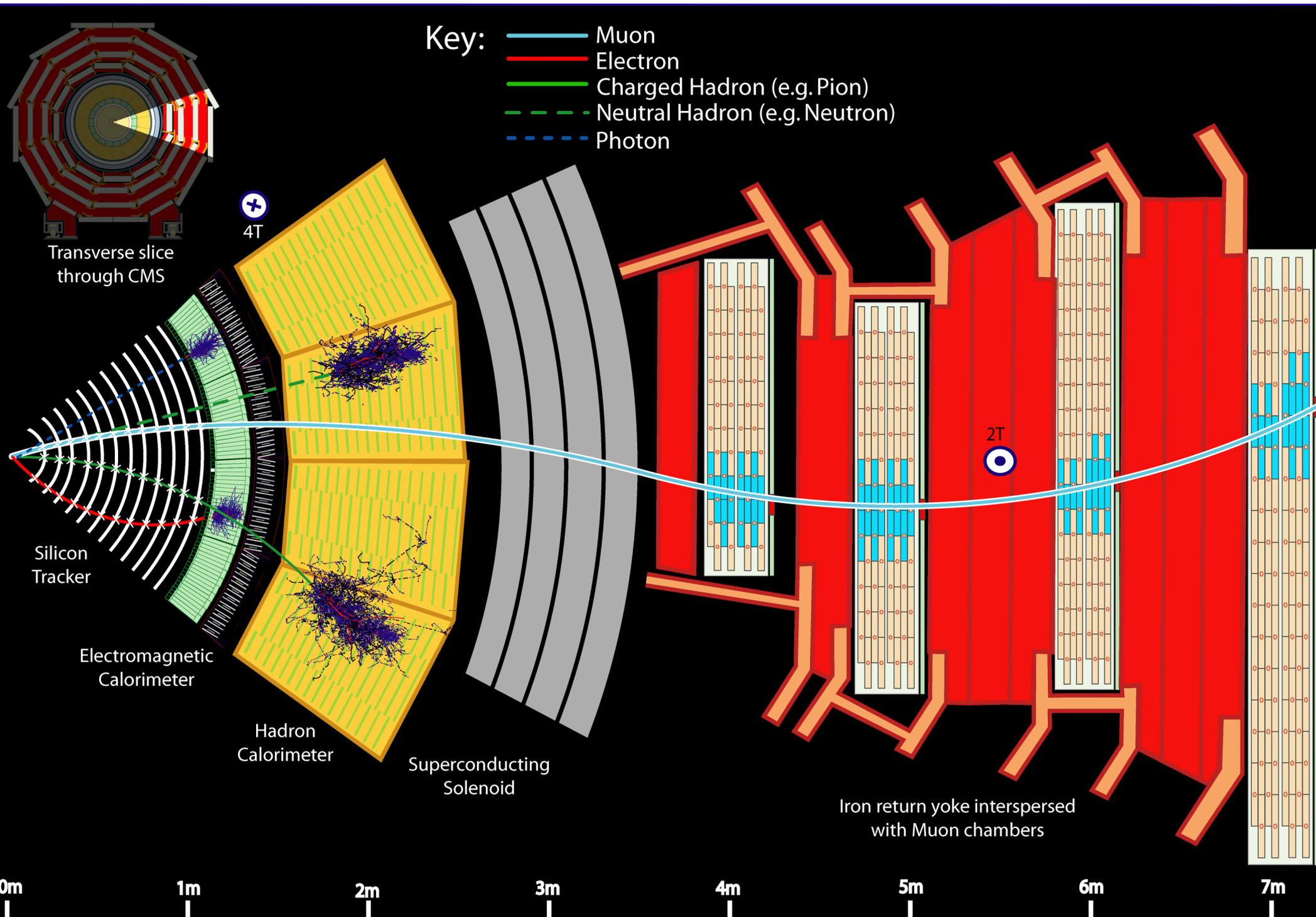
## Zwei Wege zur neuen Physik am LHC :

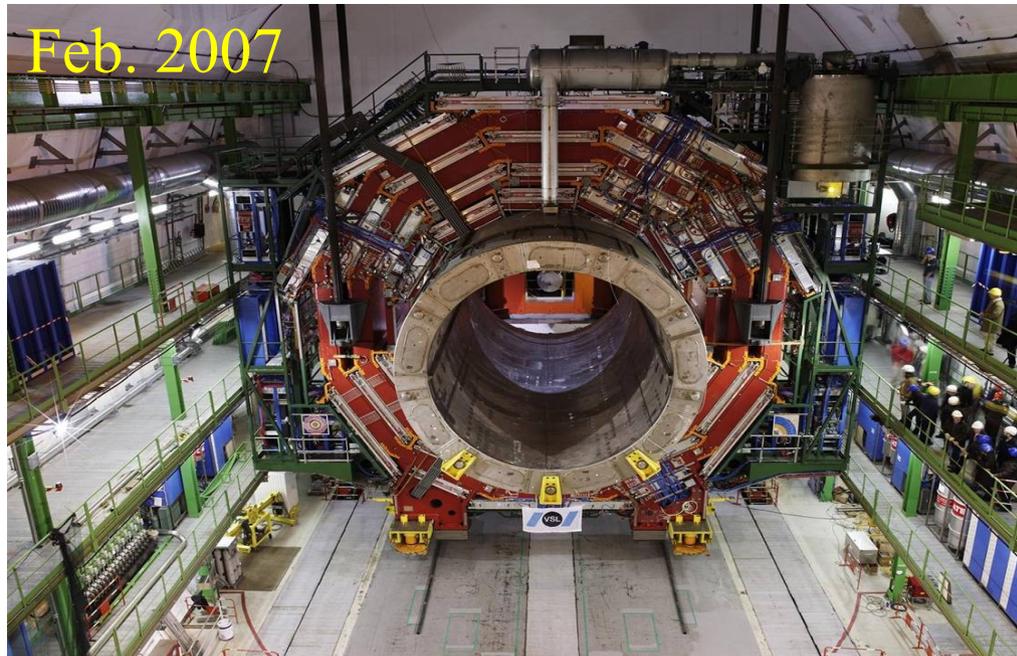
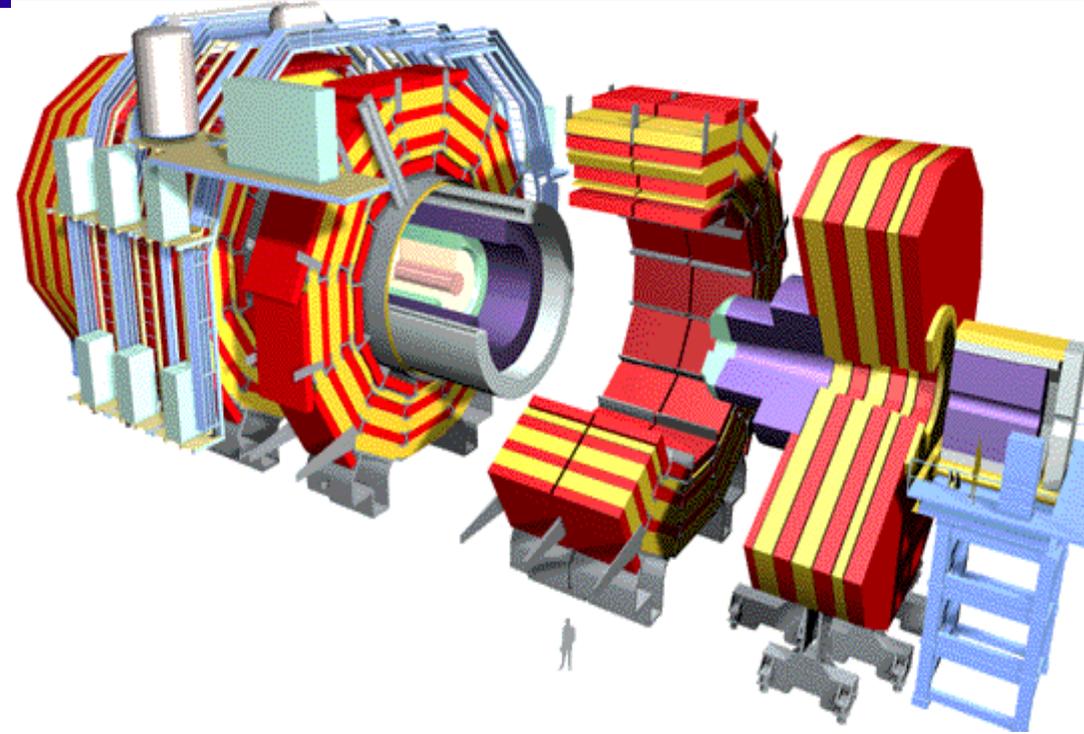
- 1 TeV Energie beider Kollisionen im entarteter „Partonen“ in Protonen (ATLAS, CMS & LHCb)
- 5.5 TeV beider Kollisionen von „Nucleonen“ in Kernmaterie (z.B. Bleikern) (Spezialität von ALICE)

# Zwiebelschalenstruktur eines Detektors<sup>31</sup>



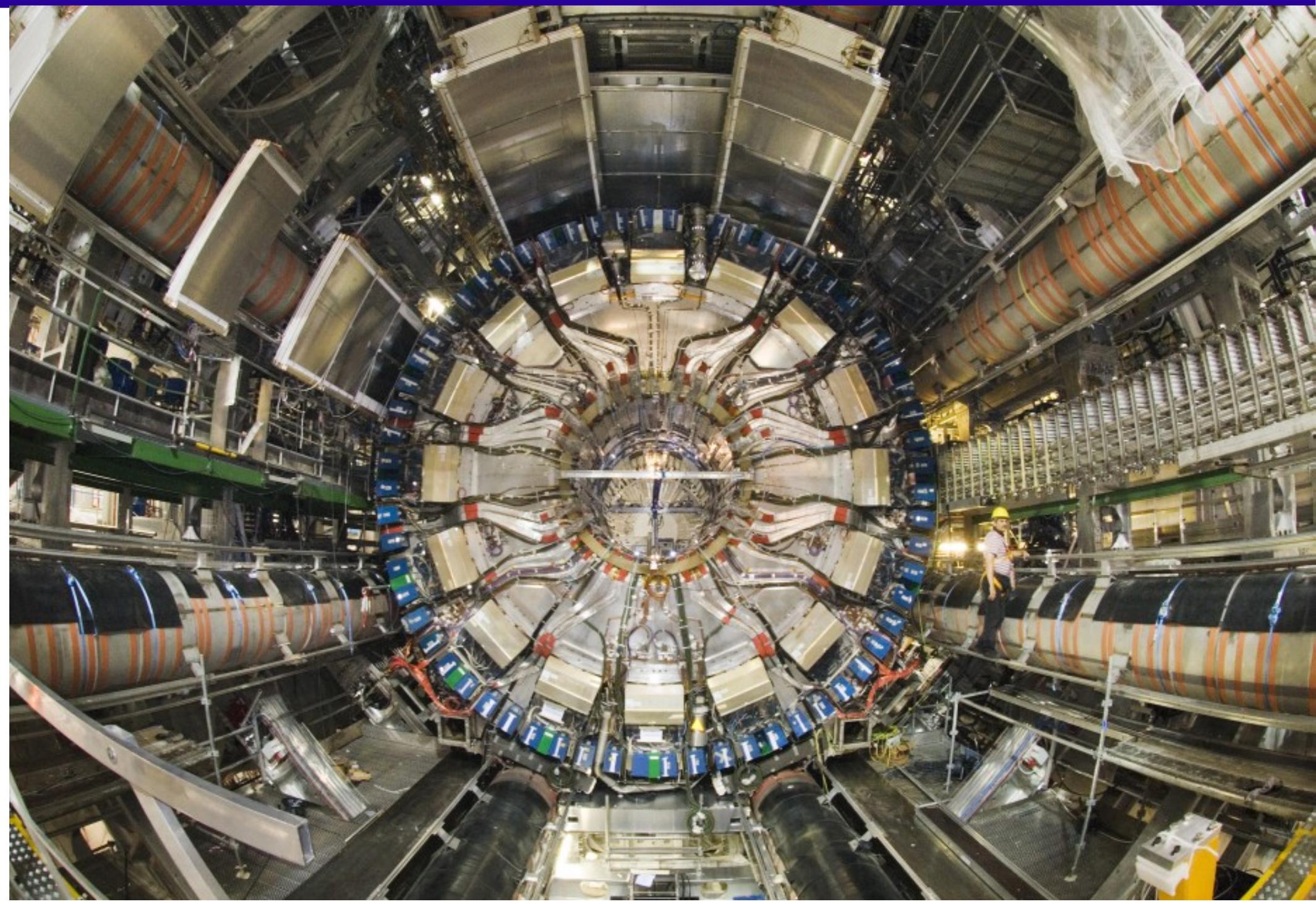
# Ein Ausschnitt aus CMS

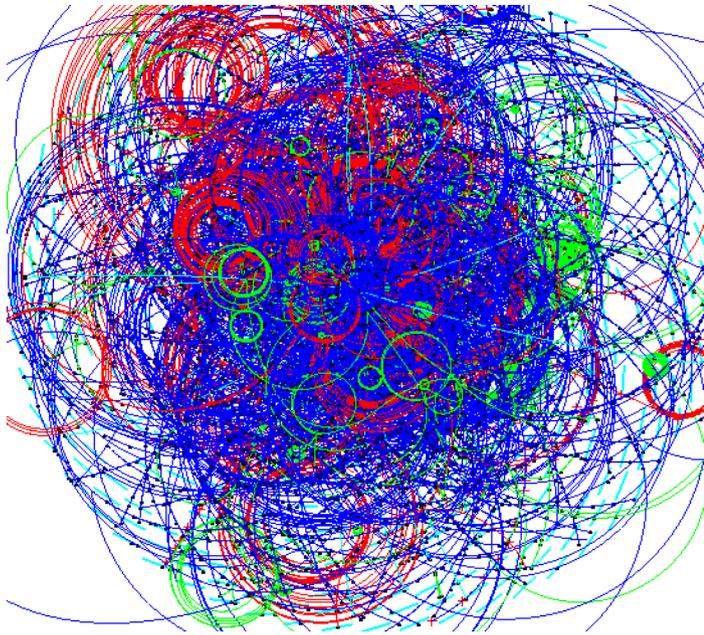




*CMS wird gerade am CERN zusammengebaut*

# Ein Blick auf ATLAS

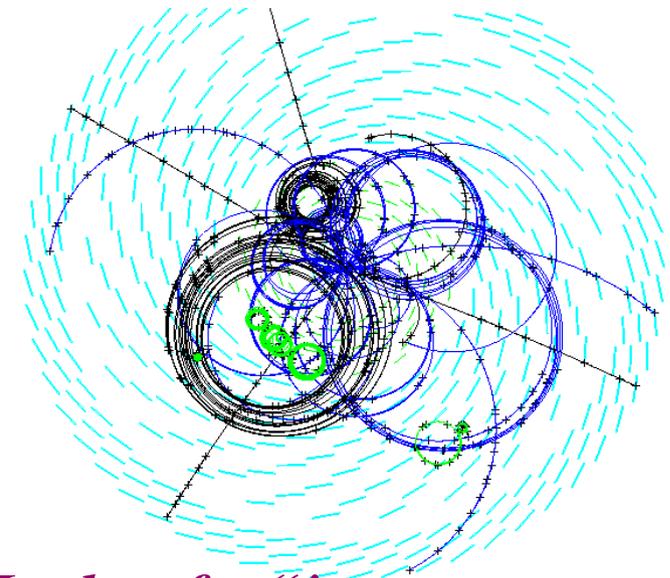




Tausende von  
Teilchenspuren  
in jedem Ereignis

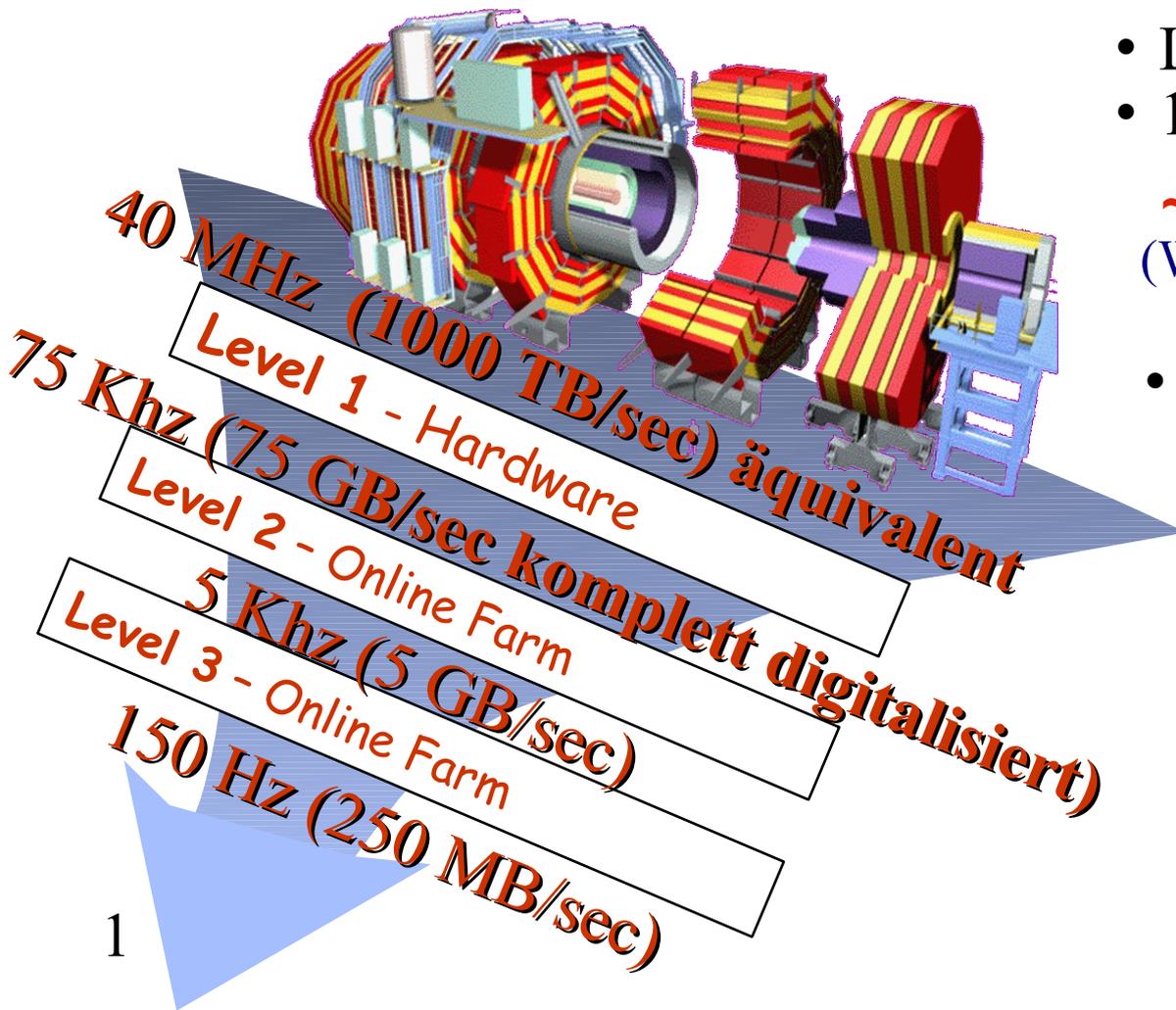
Selektive Rekonstruktion

Manchmal gibt es ein  
paar interessante ...  
z.B. Higgs: eines in  
 $10^{11}$  Kollisionen



*„Interessante Physik“ passiert sehr selten,  
Analyse bedeutet „Suche nach der Nadel im Heuhaufen“!*

*Herausforderung für Detektorbau, Experimentiertechnik und Datenanalyse !*



- ~ 100 Millionen Nachweis-Zellen
- LHC Kollisionsrate: 40 MHz
- 10-12 bit/Zelle

**~1000 Tbyte/s Rohdatenrate !**

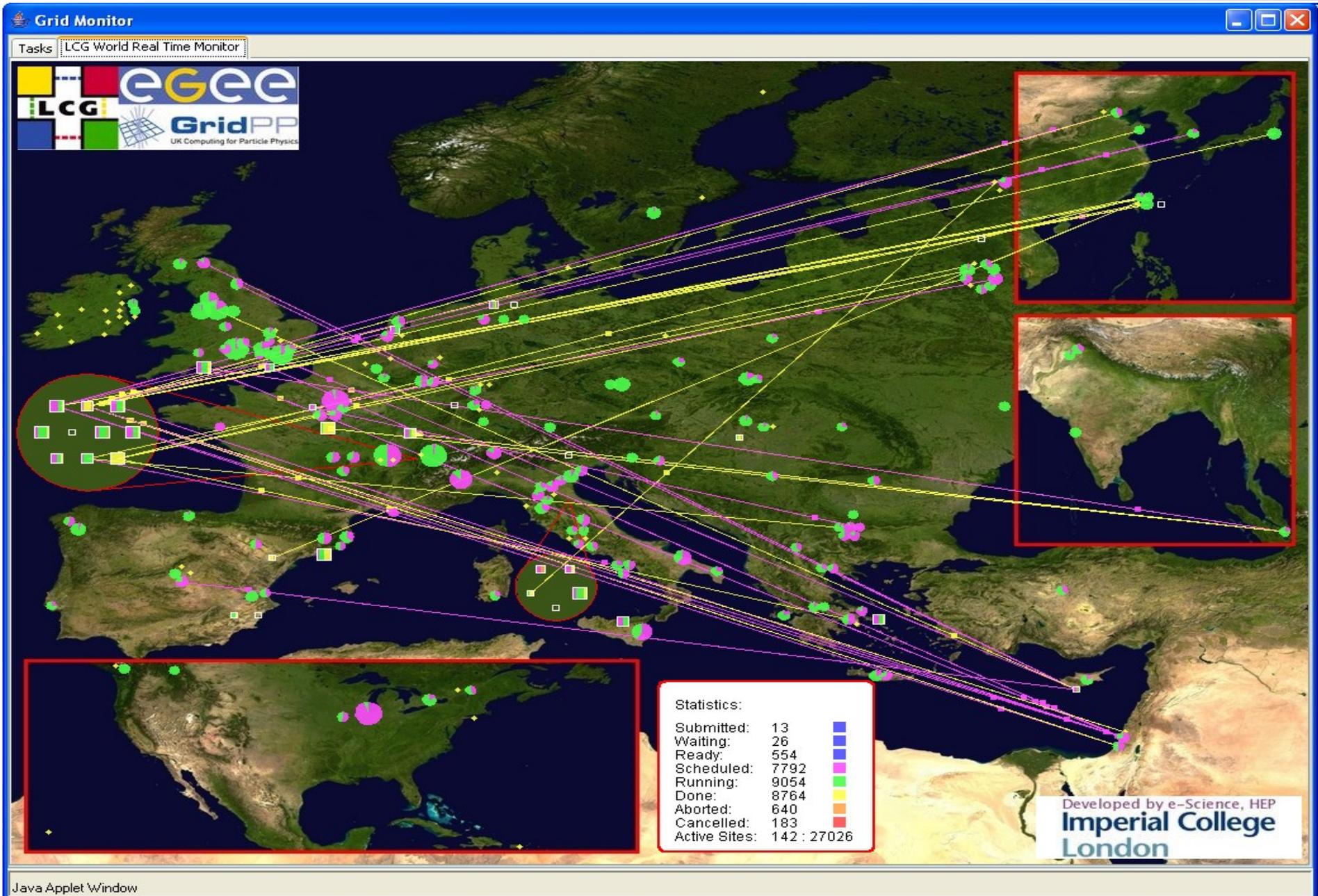
(Wenn 6 Milliarden Menschen gleichzeitig telefonieren, sind das (nur) 50 TB/sec )

- Nullunterdrückung und „Trigger“ reduzieren Datenrate auf „nur“ einige 100 Mbyte/s

d.h. 1  /sec



**Weltweiter Datenstrom !**



**EGEE Grid (Europa) u. Open Science Grid (USA)**

**EGEE z. Zt. 250 Zentren mit insg.  
~50 000 CPUs Rechenleistung  
~20 000 TB Speicher**



**Teilchenphysik ist internationale Teamwork !**

**Am Cern beteiligt: 292 Institute aus Europa, ~ 5800 Nutzer  
270 Institute von anderswo, ~ 3200 Nutzer**

---

Film:

LHC Start

bald fertig ...

## Was werden wir finden?

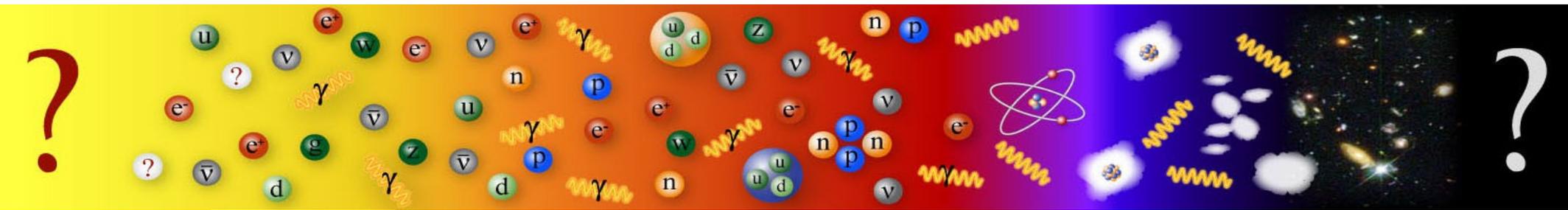
- Das Higgs-Boson ? *wahrscheinlich*
- SuperSymmetrie, ein Erklärung für die dunkle Materie ? *möglich*
- Quantengravitation, schwarze Löcher ? *spekulativ*
- „krumme“ Raumzeit bei kleinen Abständen von  $10^{-19}$  m ???
- „Exotica“

Es wird also spannend,  
bleiben Sie online !

Simulation der Produktion  
eines schwarzen Lochs in ATLAS



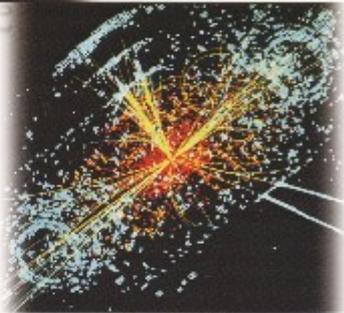
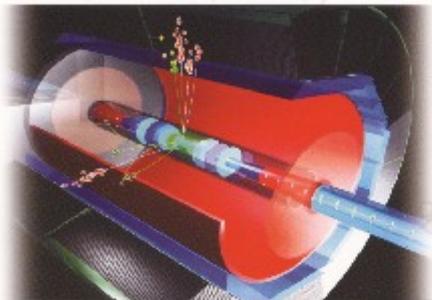
... im Sommer 2008 geht es los !!!



Komitee für  
Elementarteilchenphysik  
KET

## Teilchenphysik in Deutschland

Status und Perspektiven



- [www.teilchenphysik.de](http://www.teilchenphysik.de)
- [www.cern.ch](http://www.cern.ch) (englisch)
- [teachers.cern.ch](http://teachers.cern.ch) (englisch)
- „Physik am Samstag“ an verschiedenen Universitäten
- **Lehrerfortbildungen**
  - an einigen Universitäten
  - 3\*3 Tage pro Jahr
  - „CERN teachers lab“  
in deutscher Sprache<http://education.web.cern.ch/education>