

A 3D wireframe model of the ALICE detector at CERN. The detector is a large, complex structure with a central cylindrical core and a surrounding octagonal barrel. It is composed of many smaller, colored rectangular blocks (red, blue, green, yellow) arranged in a grid-like pattern. The central core is a dense network of colored lines (red, blue, green, yellow) representing the detector's internal structure. The text "Im Wunderland der Teilchenphysik:" is written in white, serif font across the top of the detector, and "ALICE am CERN" is written in white, sans-serif font across the middle of the detector.

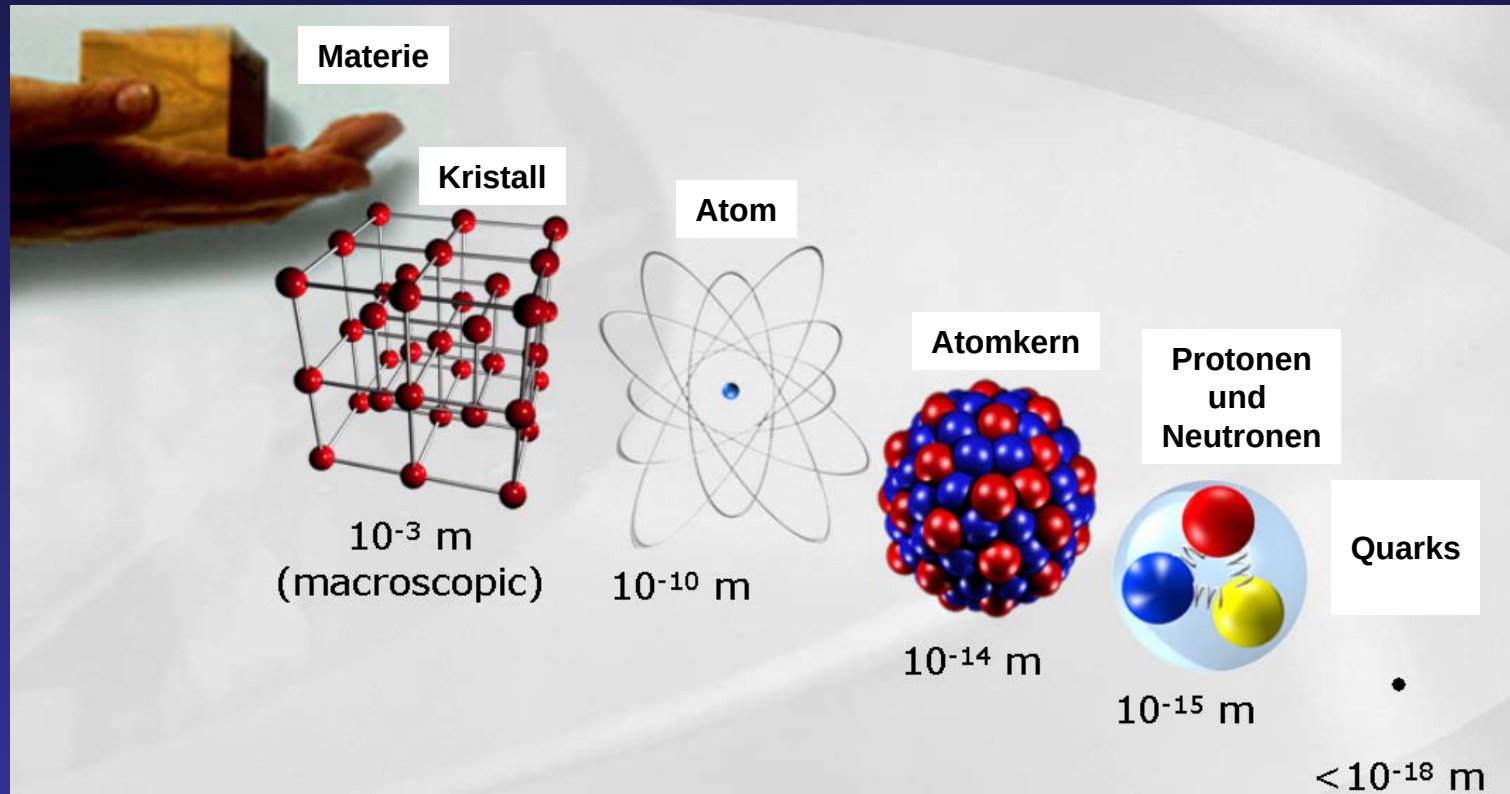
Im Wunderland der Teilchenphysik:  
ALICE am CERN



Harald Appelshäuser  
Institut für Kernphysik  
JWG Universität Frankfurt



# Aufbau der Materie



- Die Masse der Materie steckt überwiegend in den **Atomkernen**
- Die kleinsten bekannten Bauteile der Materie sind **Quarks**

# Standardmodell der Teilchenphysik

|                              |                        |                               |                                 |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Leptons<br>Quarks            |                        |                               |                                 |
|                              | $u$<br>up              | $c$<br>charm                  | $t$<br>top                      |
|                              | $d$<br>down            | $s$<br>strange                | $b$<br>bottom                   |
|                              | $\nu_e$<br>e- Neutrino | $\nu_\mu$<br>$\mu$ - Neutrino | $\nu_\tau$<br>$\tau$ - Neutrino |
|                              | $e$<br>electron        | $\mu$<br>muon                 | $\tau$<br>tau                   |
|                              | I                      | II                            | III                             |
| Die Generationen der Materie |                        |                               |                                 |

Es gibt **12 elementare Bausteine** der Materie (und ihre Anti-Teilchen)

Die Bausteine lassen sich nach **drei Generationen** sortieren (Massenunterschied jeweils etwa Faktor 10-100)

Zum Aufbau der uns bekannten Materie werden **nur drei benötigt** (u, d, e).

# Standardmodell der Teilchenphysik



|                     | Gravitation                       | Schwach<br>(Elektroschwach) | Elektromagnetisch                                  | Stark                 |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|
| Träger-<br>teilchen | Gravitation<br>(nicht beobachtet) | $W^+$ $W^-$ $Z^0$           | Photon                                             | Gluon                 |
| wirkt<br>auf        | Alle                              | Quarks und<br>Leptonen      | Quarks und<br>geladene Leptonen<br>und $W^+$ $W^-$ | Quarks<br>und Gluonen |

- Es gibt vier fundamentale Kräfte in der Natur
- Die starke Kraft wirkt zwischen Quarks und wird durch Gluonen vermittelt

# Massen der Elementarteilchen

[illegible]

## Materieteilchen

| 1. Familie                                                                         |                                              | 2. Familie                                                                         |                                           | 3. Familie                                                                           |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|   | Up-Quark<br>~0.004 GeV/c <sup>2</sup>        |   | Charm-Quark<br>~1.5 GeV/c <sup>2</sup>    |   | Top-Quark<br>~174 GeV/c <sup>2</sup>    |
|   | Down-Quark<br>~0.008 GeV/c <sup>2</sup>      |   | Strange-Quark<br>~0.15 GeV/c <sup>2</sup> |   | Bottom-Quark<br>~4.5 GeV/c <sup>2</sup> |
|   | Elektron<br>0.00051 GeV/c <sup>2</sup>       |   | Myon<br>0.105 GeV/c <sup>2</sup>          |   | Tauon<br>1.777 GeV/c <sup>2</sup>       |
|  | Elektron-Neutrino<br>>~ 0 GeV/c <sup>2</sup> |  | Myon-Neutrino<br>>~ 0 GeV/c <sup>2</sup>  |  | Tau-Neutrino<br>>~ 0 GeV/c <sup>2</sup> |

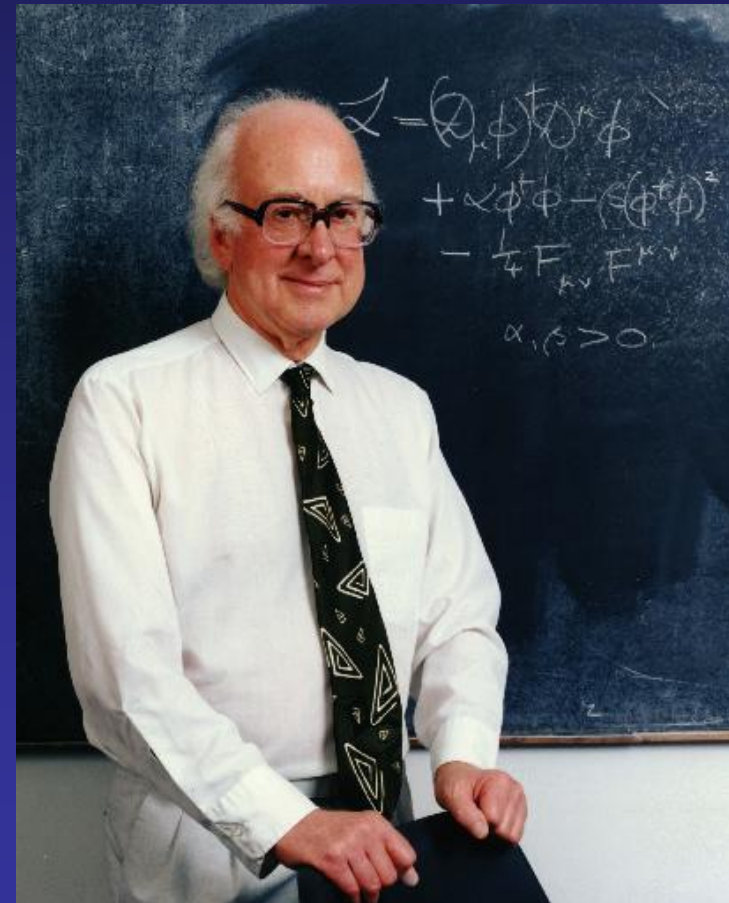
# Woher kommen die Massen der Elementarteilchen?

# Der Higgs-Mechanismus

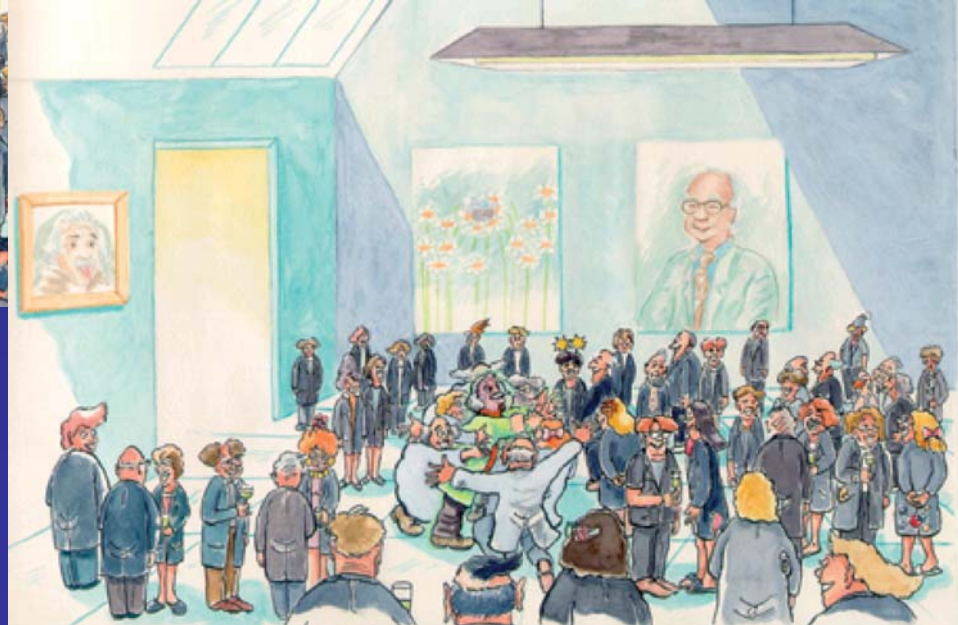
Die Lösung (Peter Higgs 1964):

Es existiert ein weiteres Teilchen, das mit den bekannten Elementarteilchen in Wechselwirkung tritt und ihnen Masse verleiht:

**das Higgs-Teilchen!**



# Der Higgs-Mechanismus





# Der Higgs-Mechanismus

## Das Problem (Stand 2007):

Das Higgs-Teilchen konnte bisher nicht gefunden werden!

## Die Ausrede:

Das Higgs-Teilchen ist so schwer, dass es bisher nicht in Experimenten erzeugt werden konnte ( $E = mc^2$ ).

## Die Hoffnung:

Der neue **Large-Hadron-Collider (LHC)** am CERN, der 2008 in Betrieb geht.



# Der Higgs-Mechanismus

Wenn man das Higgs-Teilchen findet, wäre dann die Masse der Materie vollständig erklärt?

Nein, denn:

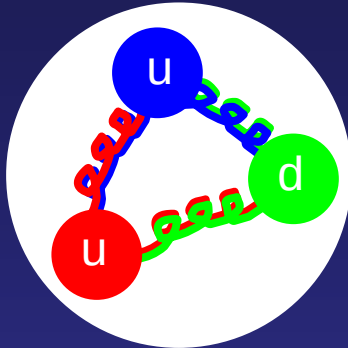
z.B. ein Proton besteht aus 3 Quarks: up, up, down

- die Massen der Quarks betragen  $0.004 + 0.004 + 0.008 \text{ GeV}/c^2 = 0.016 \text{ GeV}/c^2$
- die Masse des Protons beträgt aber  $0.938 \text{ GeV}/c^2$  !!

→ >98% der Masse der Materie stammt *nicht* aus der Masse der Konstituenten, sondern wird *dynamisch* erzeugt!

Verantwortlich dafür ist die **starke Wechselwirkung**, die die Quarks in den Protonen zusammenhält.

# Quarks und Hadronen



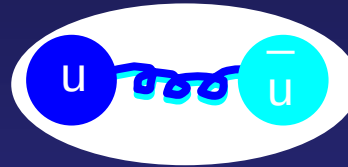
## Baryonen (qqq)

z.B.

Proton (uud)

Neutron (udd)

...



## Mesonen (q $\bar{q}$ )

z.B.

Pion (u $\bar{u}$ , d $\bar{d}$ , d $\bar{u}$ , u $\bar{d}$ )

...

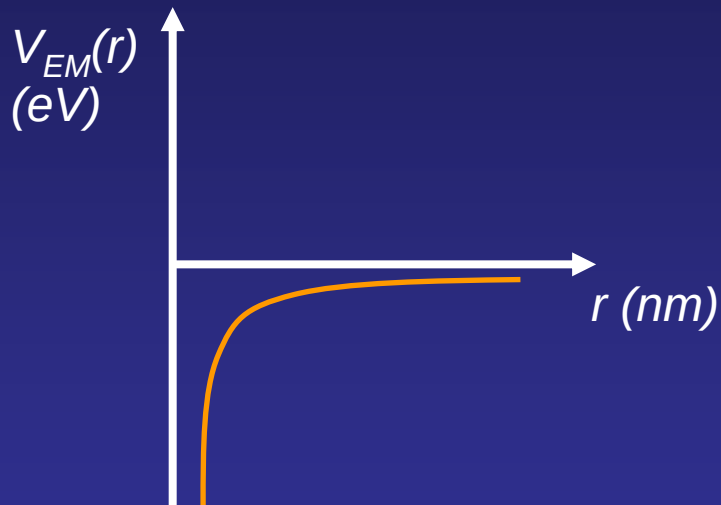
→ Hadronen

- Quarks tragen *Farbe*
- Gluonen sind die *Austauschteilchen* der starken WW (Quantenchromodynamik, QCD)
- In der Natur sind nur *farbneutrale* Hadronen erlaubt (*confinement*)



# Elektromagnetische und starke Kraft

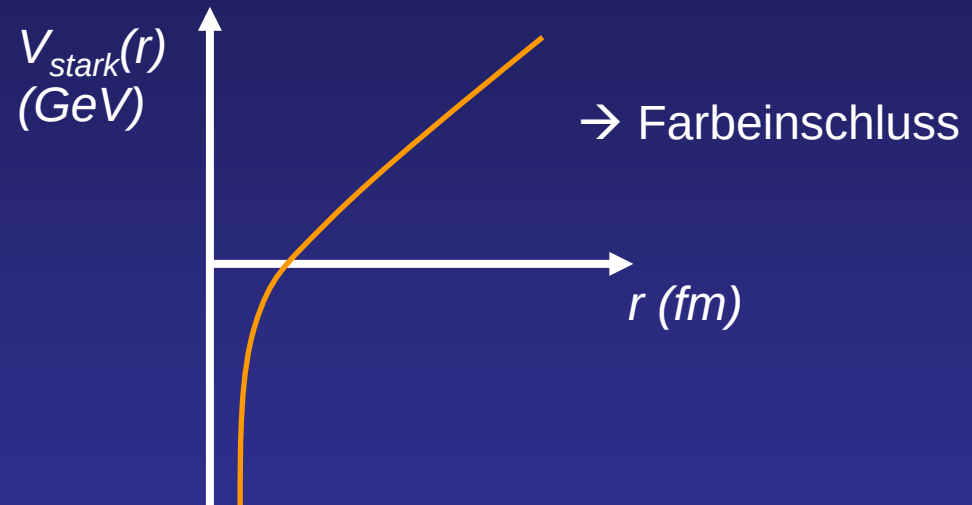
*Elektron - Proton*



$$V_{EM}(r) = -\frac{\alpha \hbar c}{r}$$

$\alpha$ : elektromagnetische Kopplungs-“konstante“

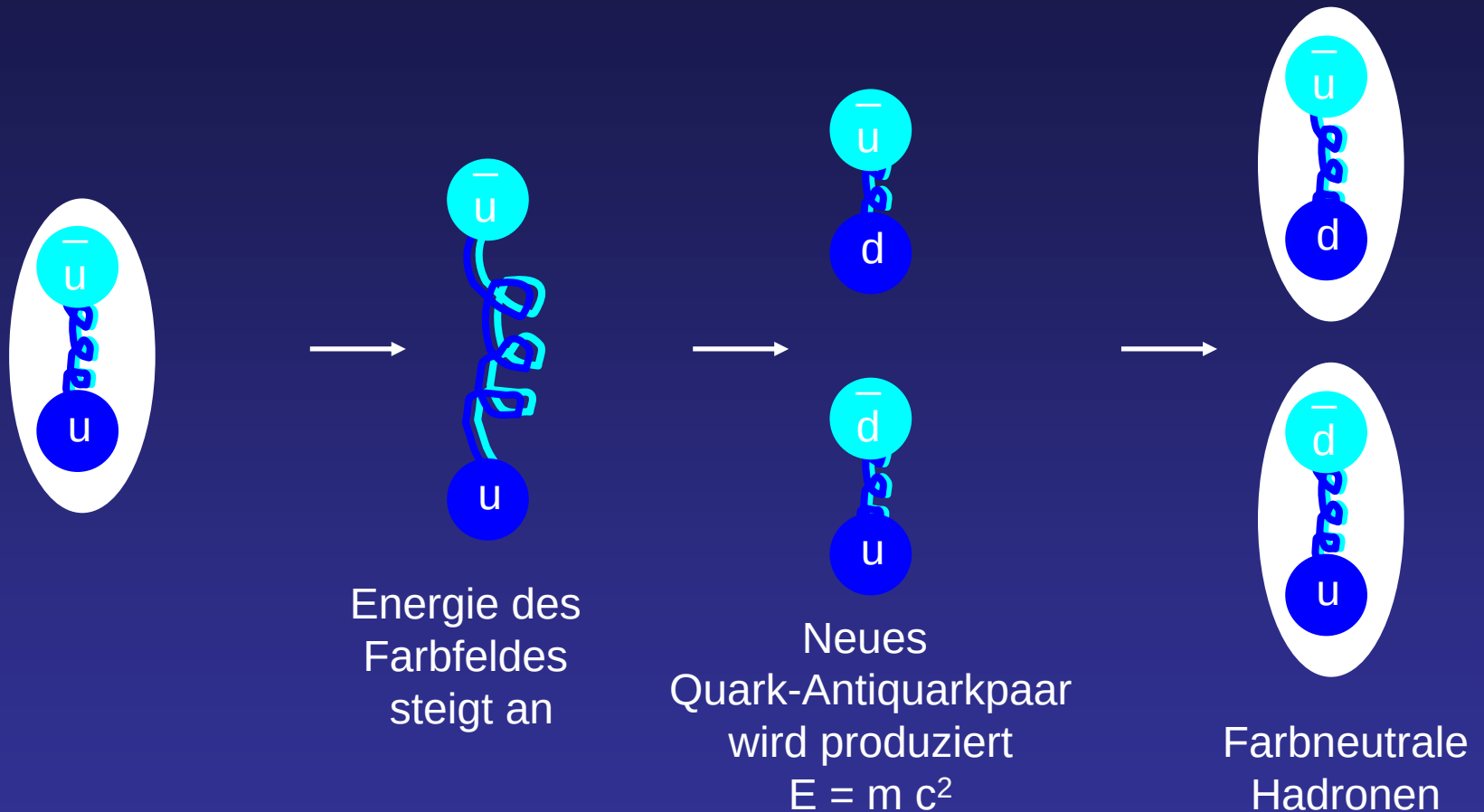
*Quark - Quark*



$$V_{stark}(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr$$

$\alpha_s$ : starke Kopplungs-“konstante“

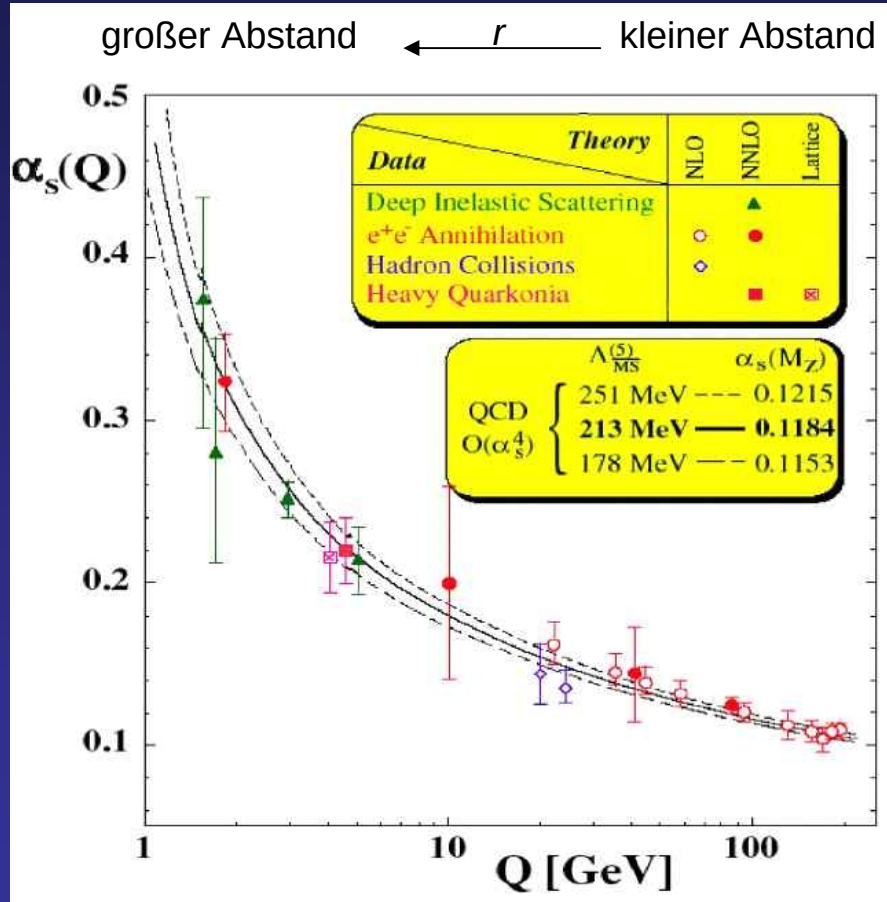
# Farbeinschluss



→ Freie Quarks sind nicht beobachtbar!



# Laufende Kopplung und asymptotische Freiheit



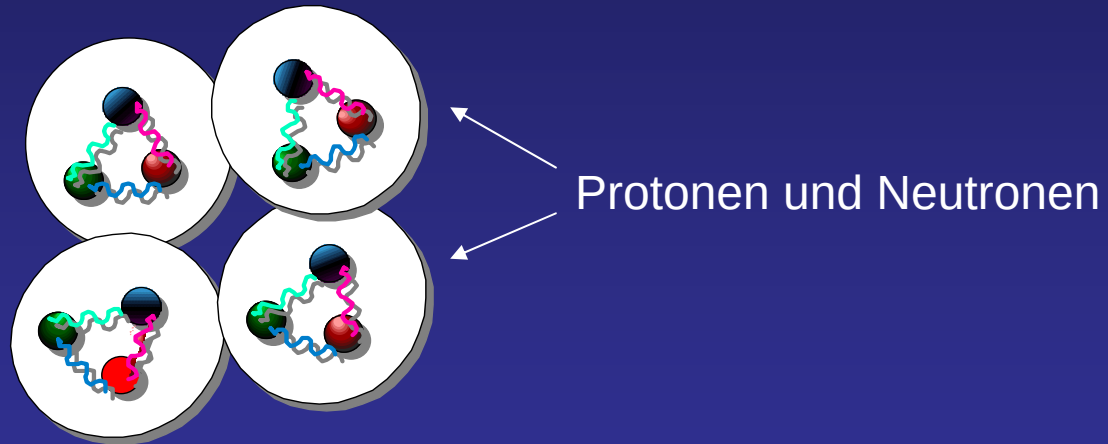
Die starke Kopplungskonstante ist *nicht* konstant, sondern hängt vom Abstand ab (*running coupling constant*).

Bei sehr kleinen Abständen bzw. hohen Energien wird die Kopplung schwach (*asymptotische Freiheit*).

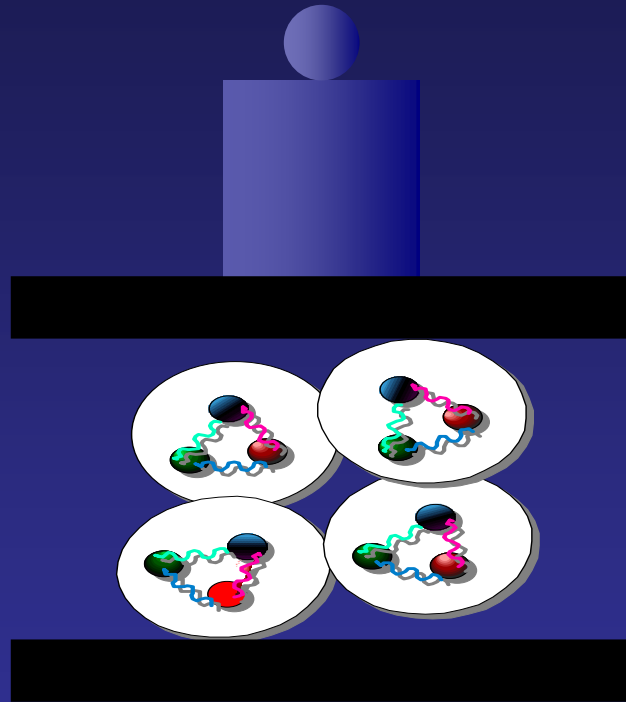
Gross, Politzer, Wilczek (1974)  
Nobelpreis 2004

# Confinement

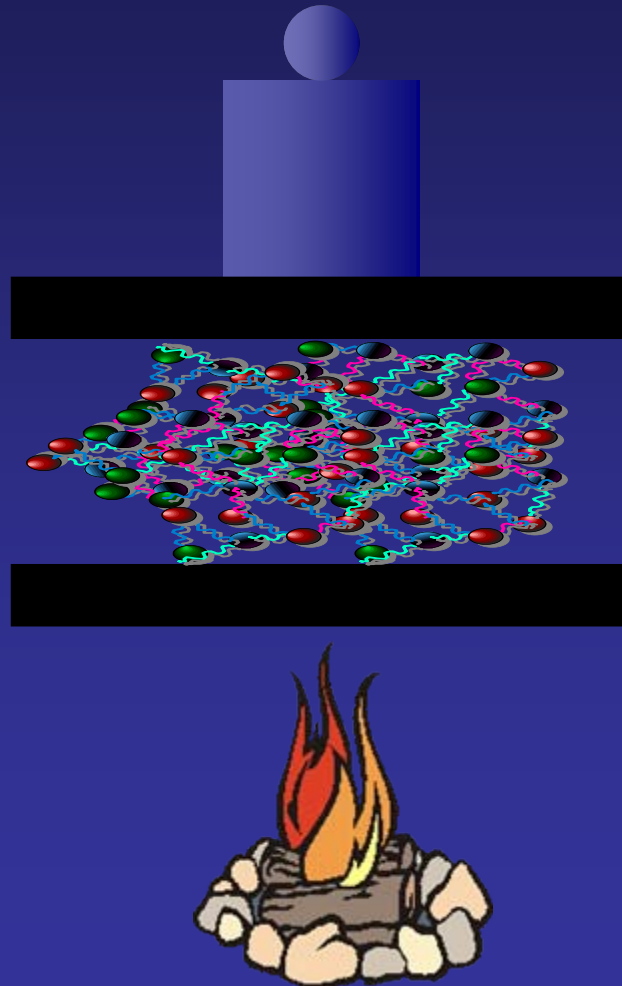
Atomkern



ABER: Bei kleinen Abständen (→ hohen **Dichten**) oder hohen Energien (→ hohen **Temperaturen**) verschwindet die starke Kraft zwischen den Quarks und Gluonen....



# Deconfinement

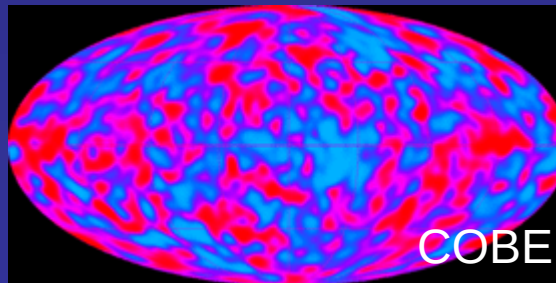
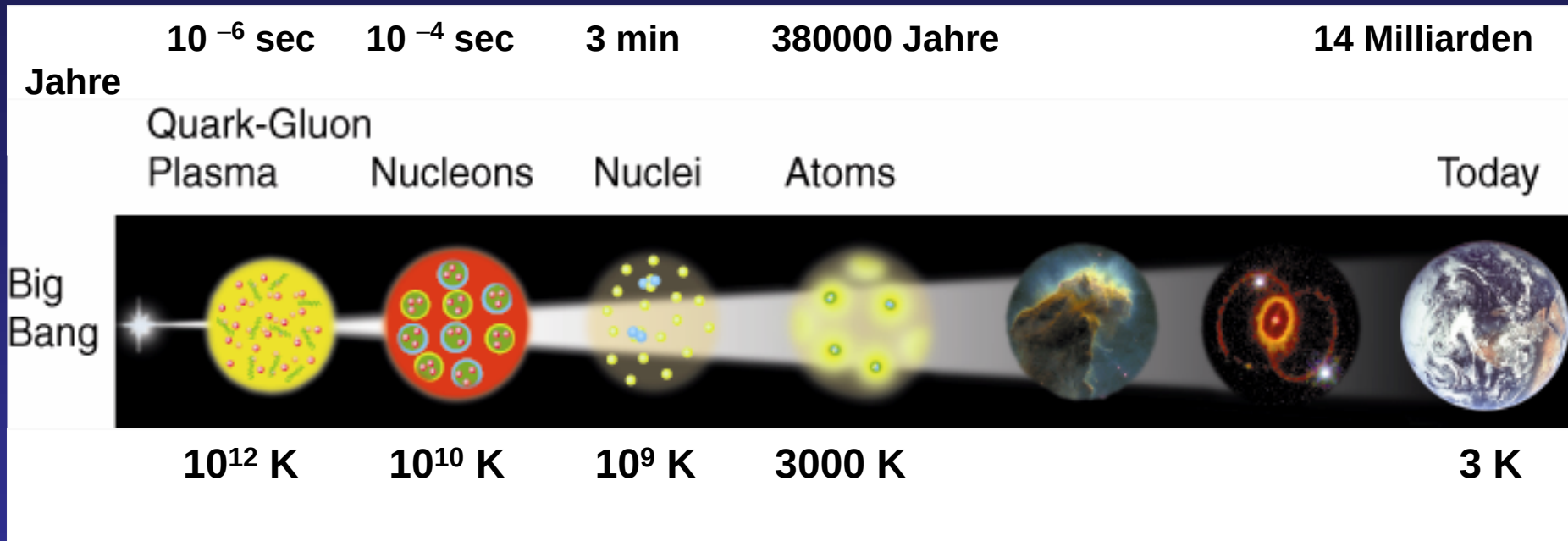


**Neuer Zustand von Materie!**

**(Quasi-)freie Quarks und Gluonen  
→ *deconfinement***

**Quark-Gluon-Plasma (QGP)**

# Frühes Universum



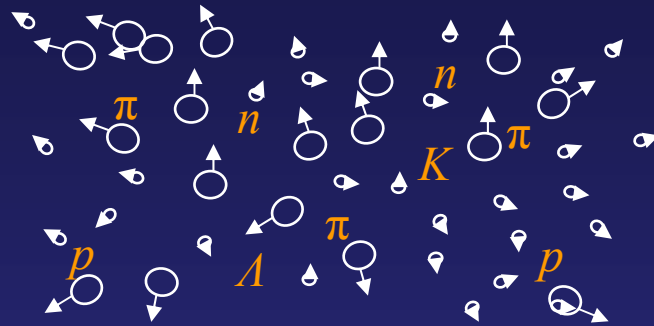
Nobelpreis Physik 2006:  
J.C. Mather  
G.F. Smoot



# Kern-Kern Kollisionen bei hohen Energien

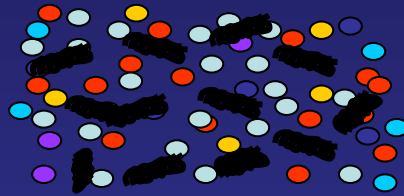
**Zeit**

Expansion und  
Entkopplung



farbneutrale Hadronen  
*Little Bang*

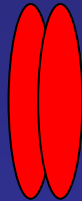
Feuerball



Quark-Gluon Plasma

Erzeugung erwartet bei  
 $\varepsilon = 3 \text{ GeV/fm}^3$   
Lebensdauer *ca*  $10^{-22} \text{ s}$

Kompression und Heizen



vor dem Stoß



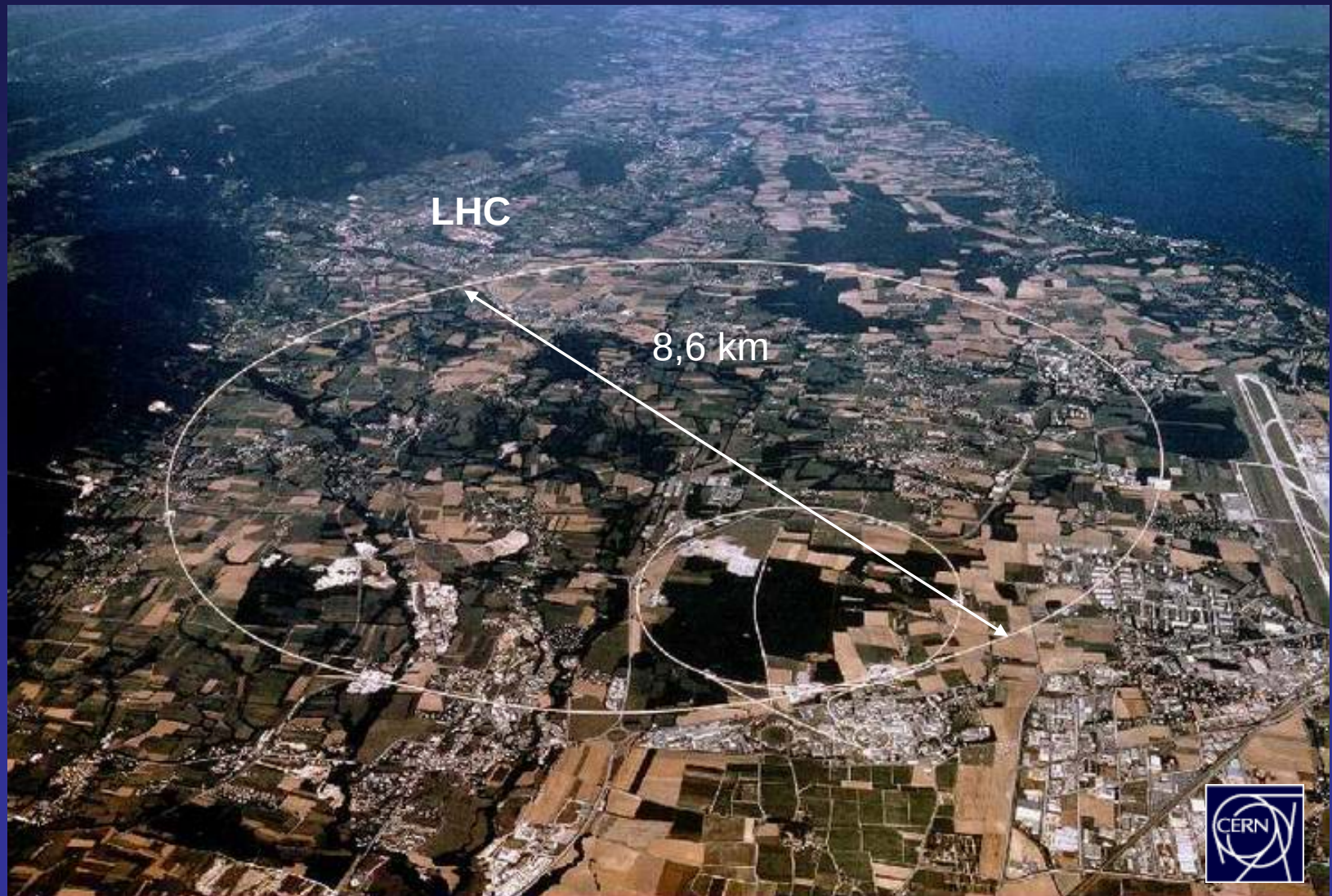
normale Kernmaterie

$\rho_0 = 0.17 \text{ /fm}^3$   
 $\varepsilon_0 = 0.16 \text{ GeV/fm}^3$

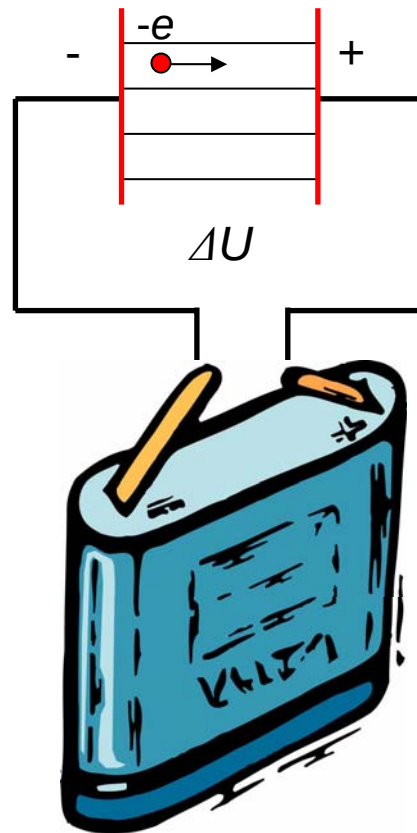
# Mirkoskope der Teilchenphysiker



# Large Hadron Collider (LHC)



# Beschleuniger



Prinzip:

Elektrisch geladene Teilchen können in einem elektrischen Feld beschleunigt werden.

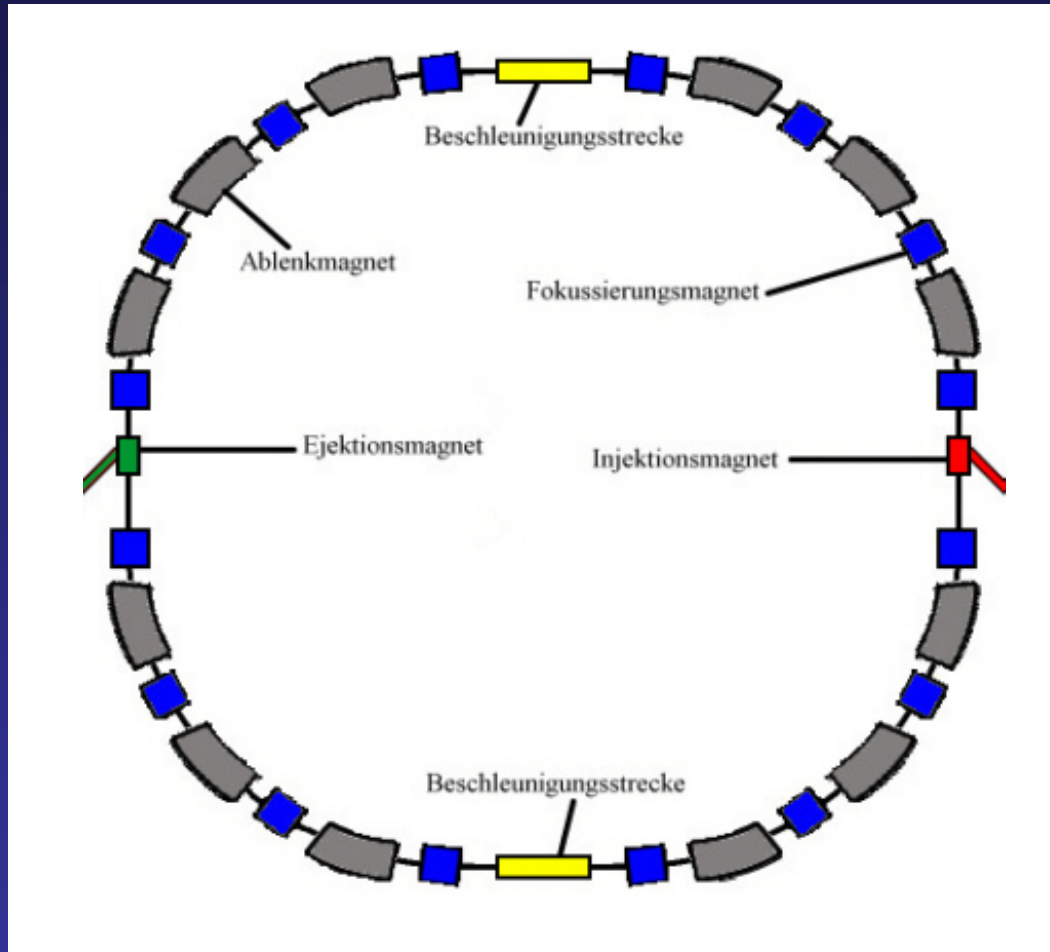
→ Kinetische Energie

$$\Delta W = q \Delta U$$

Für  $q = e$  und  $\Delta U = 1 \text{ V}$ :

$$\Delta W = 1 \text{ eV}$$

# Synchrotron



Technische Limitierung  
für Protonen- und Ionen-  
Synchrotrons:

**Ablenkstärke der Magnete**

→ sehr starke Magnete

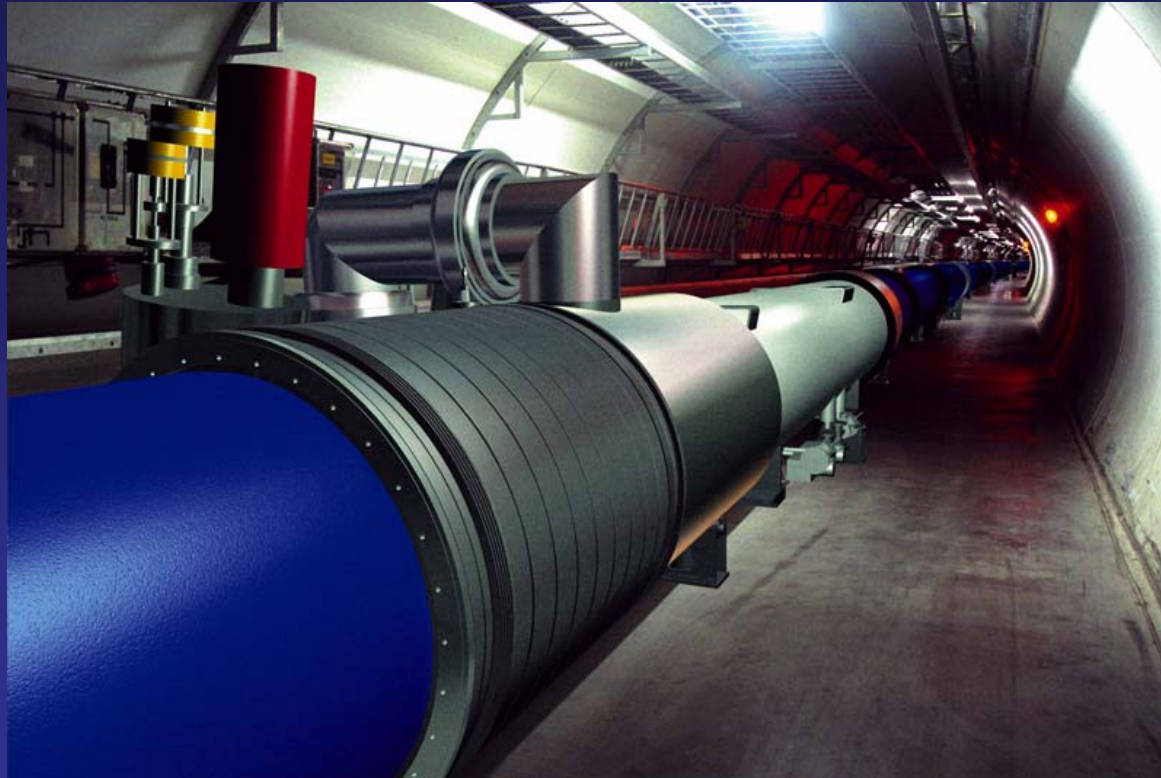
→ großer Radius

LHC: **Collider**, d.h. zwei gegenläufige Strahlen  
in pp: 7 TeV + 7 TeV = 14 TeV  
1 TeV =  $10^{12}$  eV





# Large Hadron Collider (LHC)



1232 Dipolmagnete:

- je 15 m lang
- Magnetfeld 9 T
- je ca 1MCHF
- supraleitend  $\rightarrow (-271.3^{\circ}\text{C})$

p – Luminosität:  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

2808 „Pakete“ mit je  $10^{11}$  Protonen  $\rightarrow I = 0.5 \text{ A}$

$E_{\text{tot}} = 3 \times 10^{14} \times 7 \text{ TeV} \approx 300 \text{ MJ}$  , entspricht 60 -Tonner mit 300 km/h!



# Large Hadron Collider (LHC)



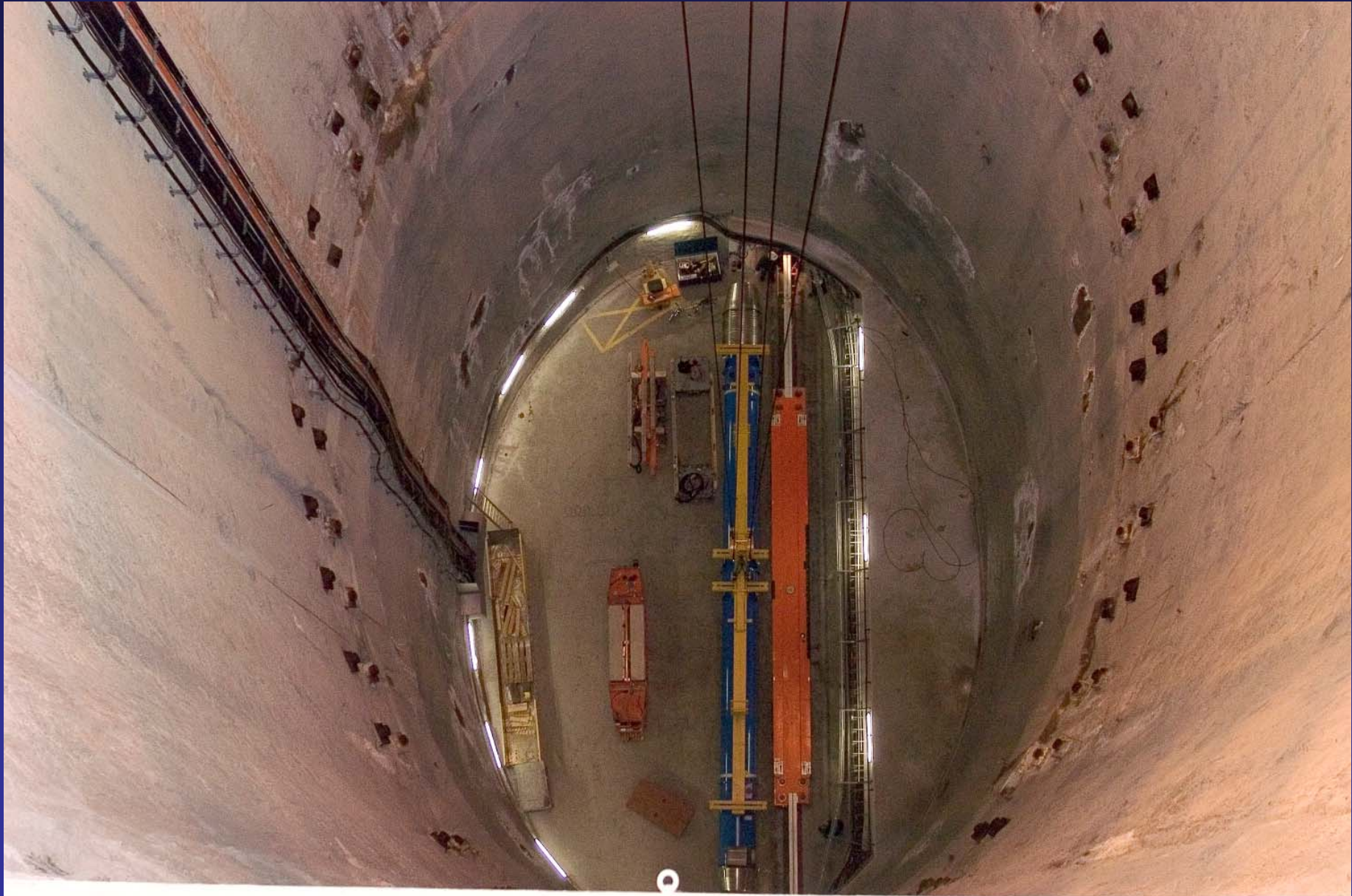


# Large Hadron Collider (LHC)





# Large Hadron Collider (LHC)





# Large Hadron Collider (LHC)



Geplanter Start: Ende 2007



**European Organization for Nuclear Research  
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire**

PR06.07  
22.06.2007

## **CERN announces new start-up schedule for world's most powerful particle accelerator**



Interconnections on the last sector of the LHC

Geneva, 22 June 2007. Speaking at the 142nd session of the CERN<sup>1</sup> Council today, the Organization's Director General Robert Aymar announced that the Large Hadron Collider (LHC) **will start up in May 2008**, taking the first steps towards studying physics at a new high-energy frontier. A low-energy run originally scheduled for this year has been dropped as the result of a number of minor delays accumulated over the final months of LHC installation and commissioning, coupled with the failure in March of a pressure test in one of the machine's components.

The LHC is a scientific instrument of unprecedented complexity, and at 27 kilometres in circumference, the world's largest superconducting installation. Cooling the first sector of the machine to a temperature of 1.9 K (-271.3°C), colder than outer space, began earlier this year and has provided an important learning process. The first sector cool down has taken longer than scheduled, but has allowed the LHC's operations team to iron out teething troubles and gain experience that will be applied to the machine's seven remaining sectors. Now cold, tests on powering up the sector have begun and the cool down of a second sector will soon be underway.

**In March, a magnet assembly known as the inner triplet, provided to CERN as part of the contribution of the US to the LHC project, failed a pressure test.** A repair has been identified and is currently being implemented.

*"The low-energy run at the end of this year was extremely tight due to a number of small delays, but the inner triplet problem now*

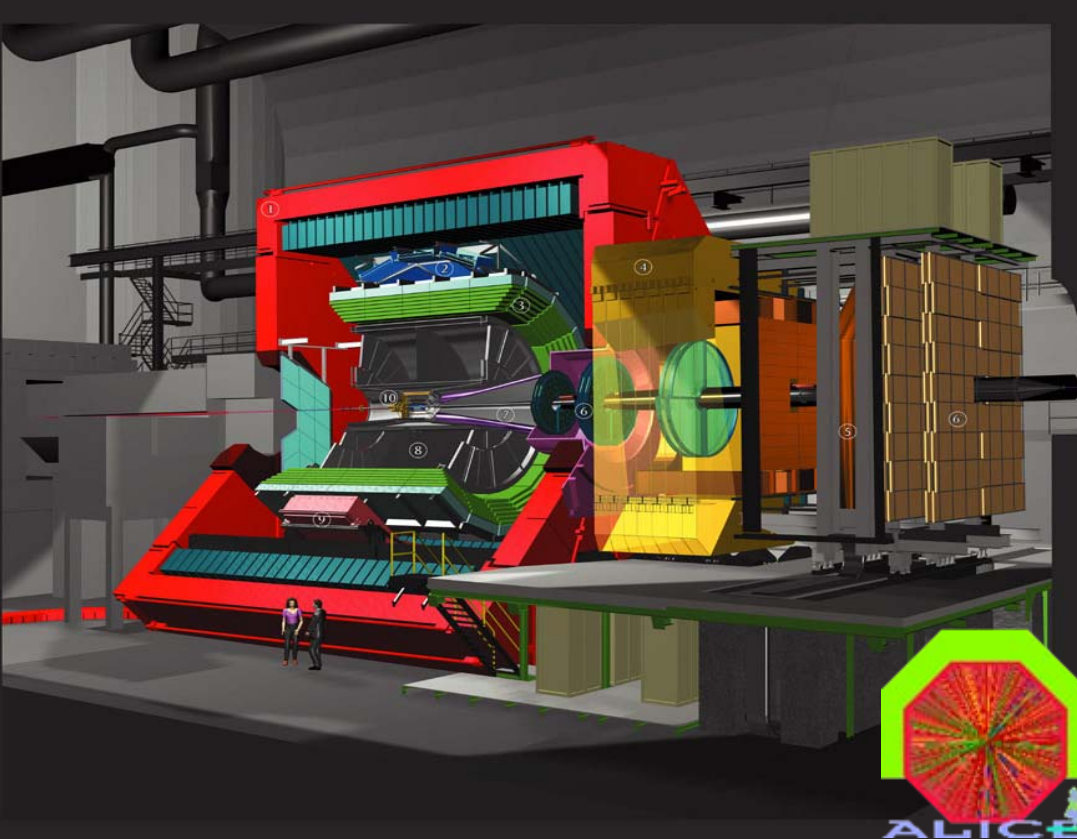




8,6 km

LHC





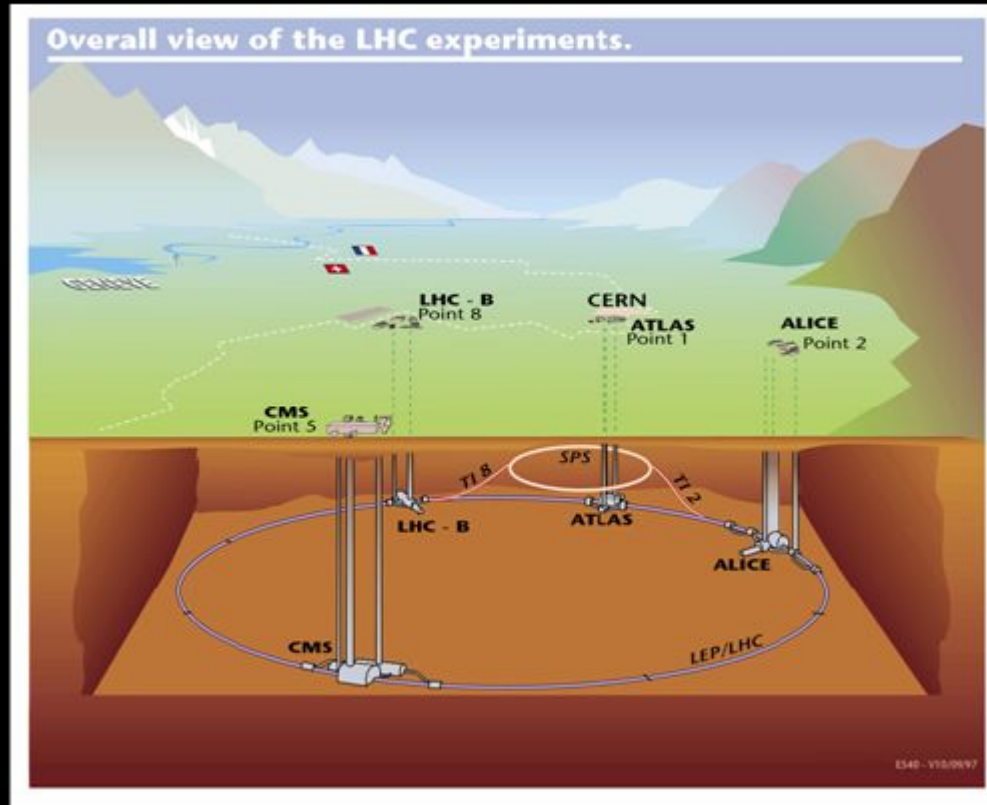
ALICE collaboration

- 1000 Wissenschaftler
- 94 Institutionen
- 29 Länder

main focus: Pb-Pb at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  TeV



# Pb-Pb Kollision im LHC

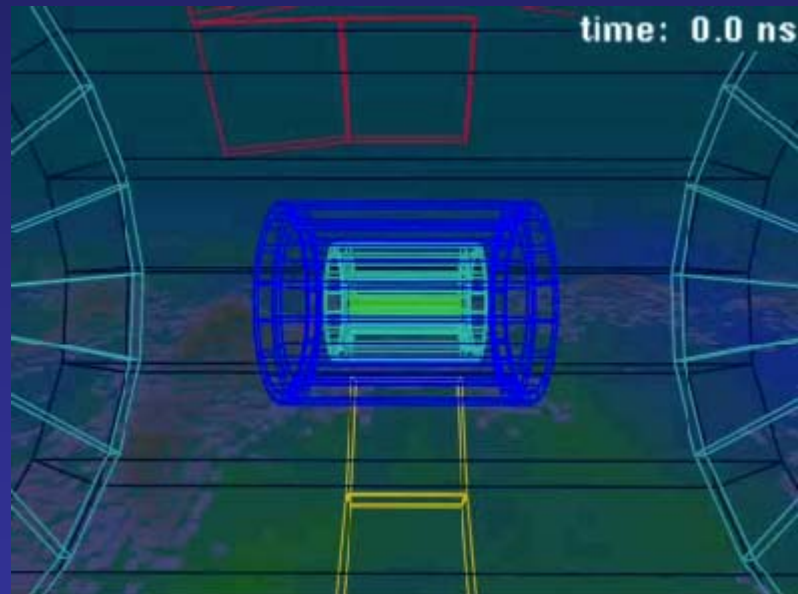


Bis zu 50000 geladene Teilchen pro Ereignis!





# Little Bang in ALICE





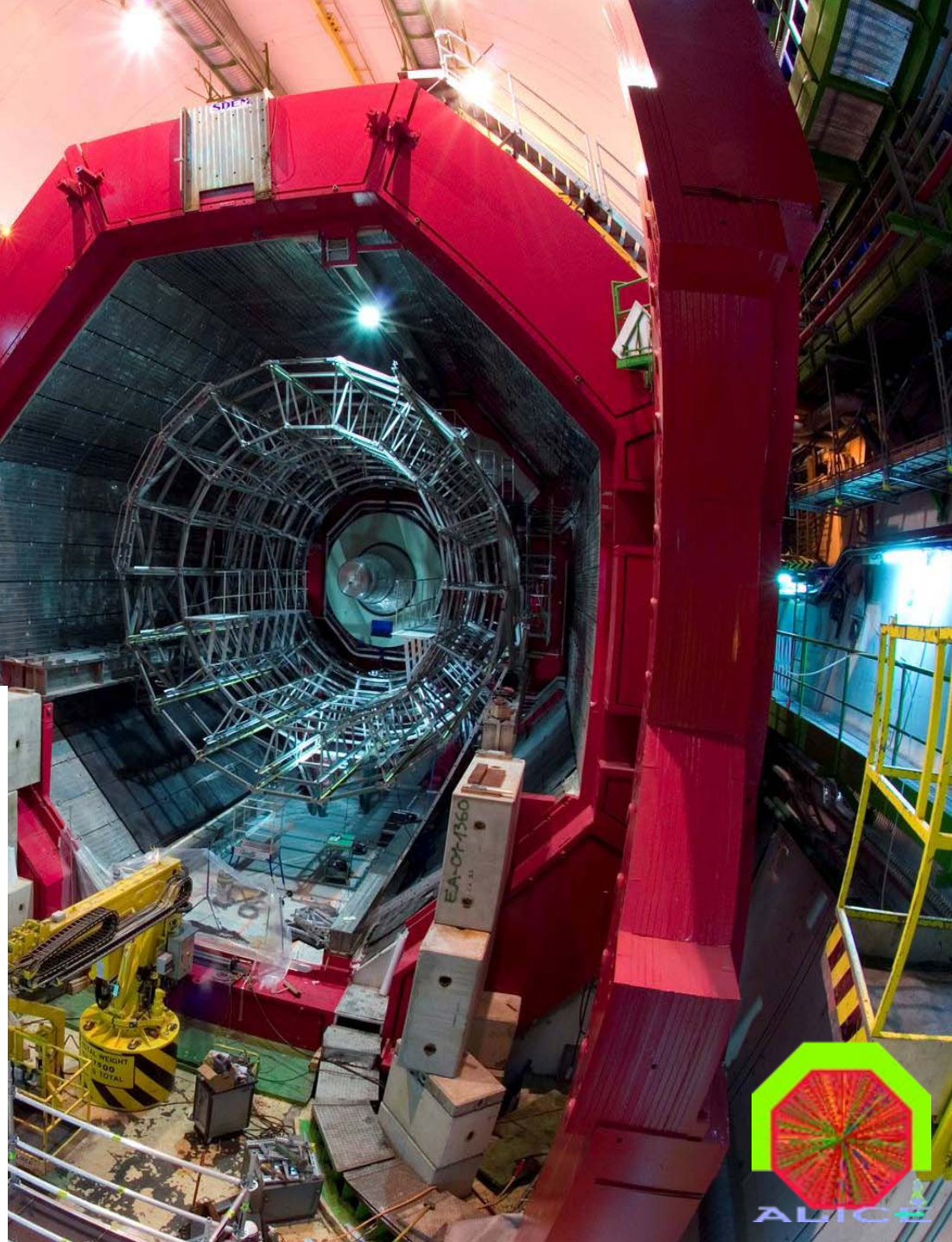
# ALICE Magnet

Gewicht: 7800 t  
Magnetfeld: 0.5 T

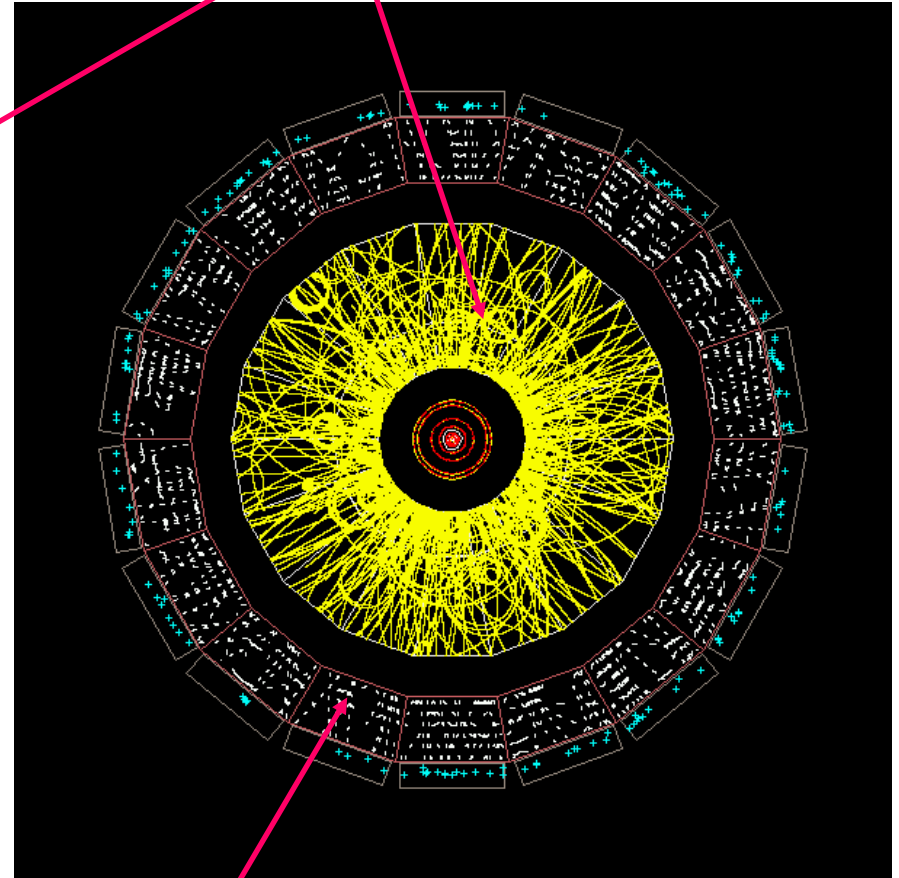
Ablenkung geladener Teilchen im  
Magnetfeld aufgrund der **Lorentzkraft**

$$F = qvB = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow mv = qBr$$

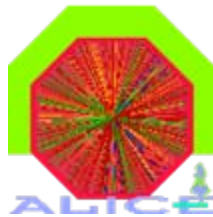
→ Impulsbestimmung



**TPC (Impulsbestimmung)**



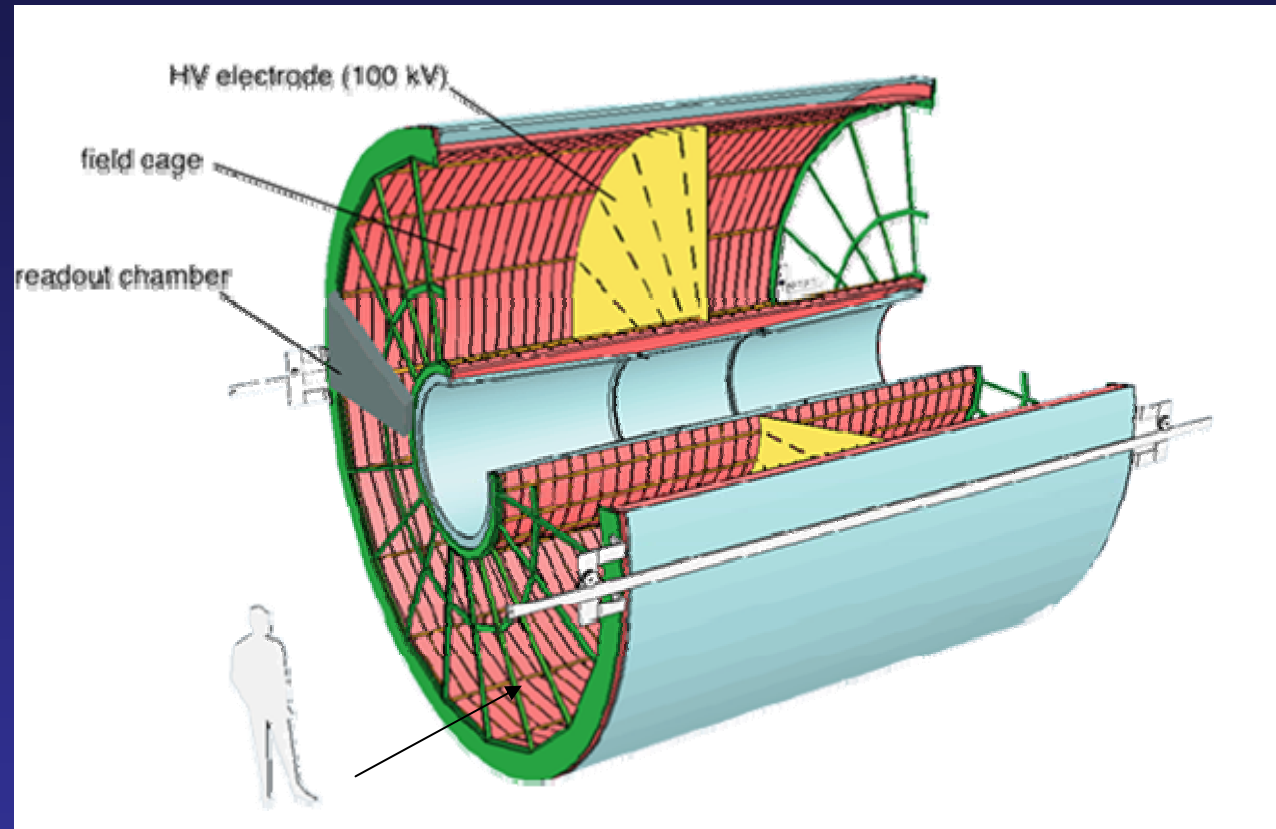
**TRD (Identifikation von  $e^+e^-$ )**





# ALICE Time Projection Chamber

- Spurvermessung,  
Impulsbestimmung

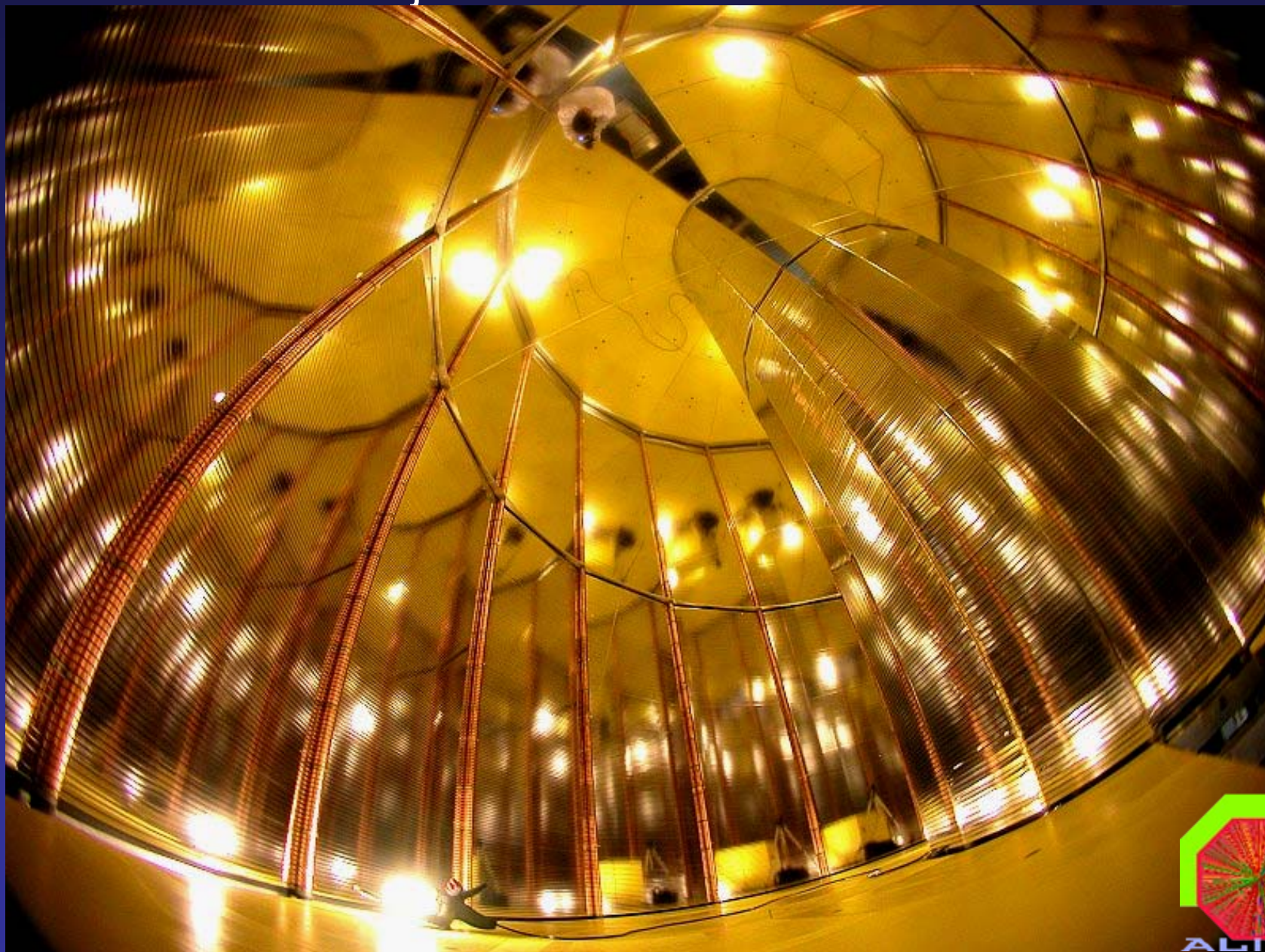


- Detektorvolumen: 88 m<sup>3</sup>
- Datenvolumen: 570.000 pads x 500 Zeit samples x 10 Bit ADC  
→ ~1 GB / s



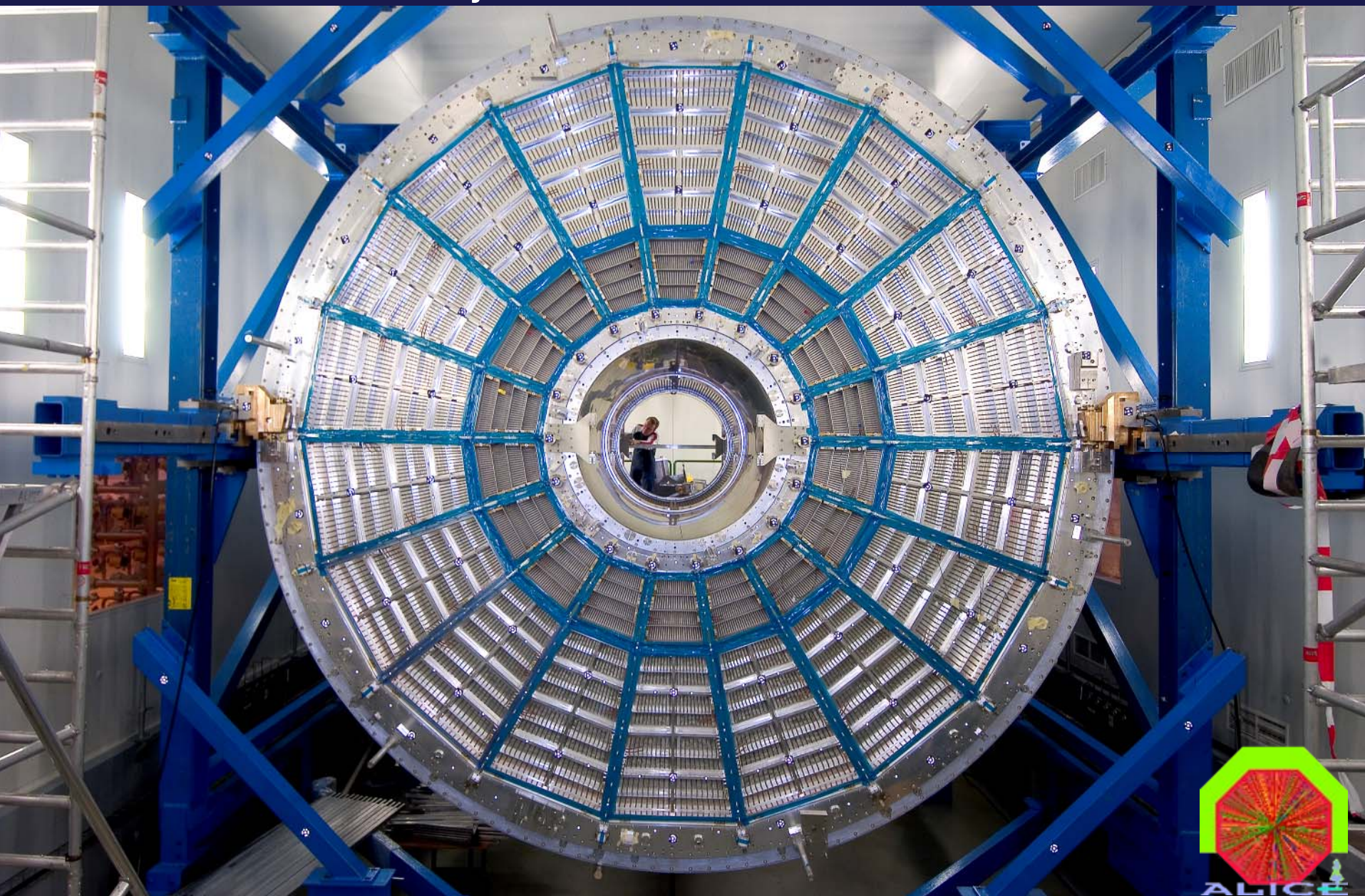


# ALICE Time Projection Chamber





# ALICE Time Projection Chamber



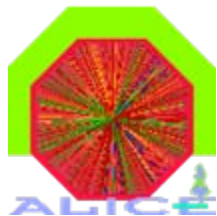
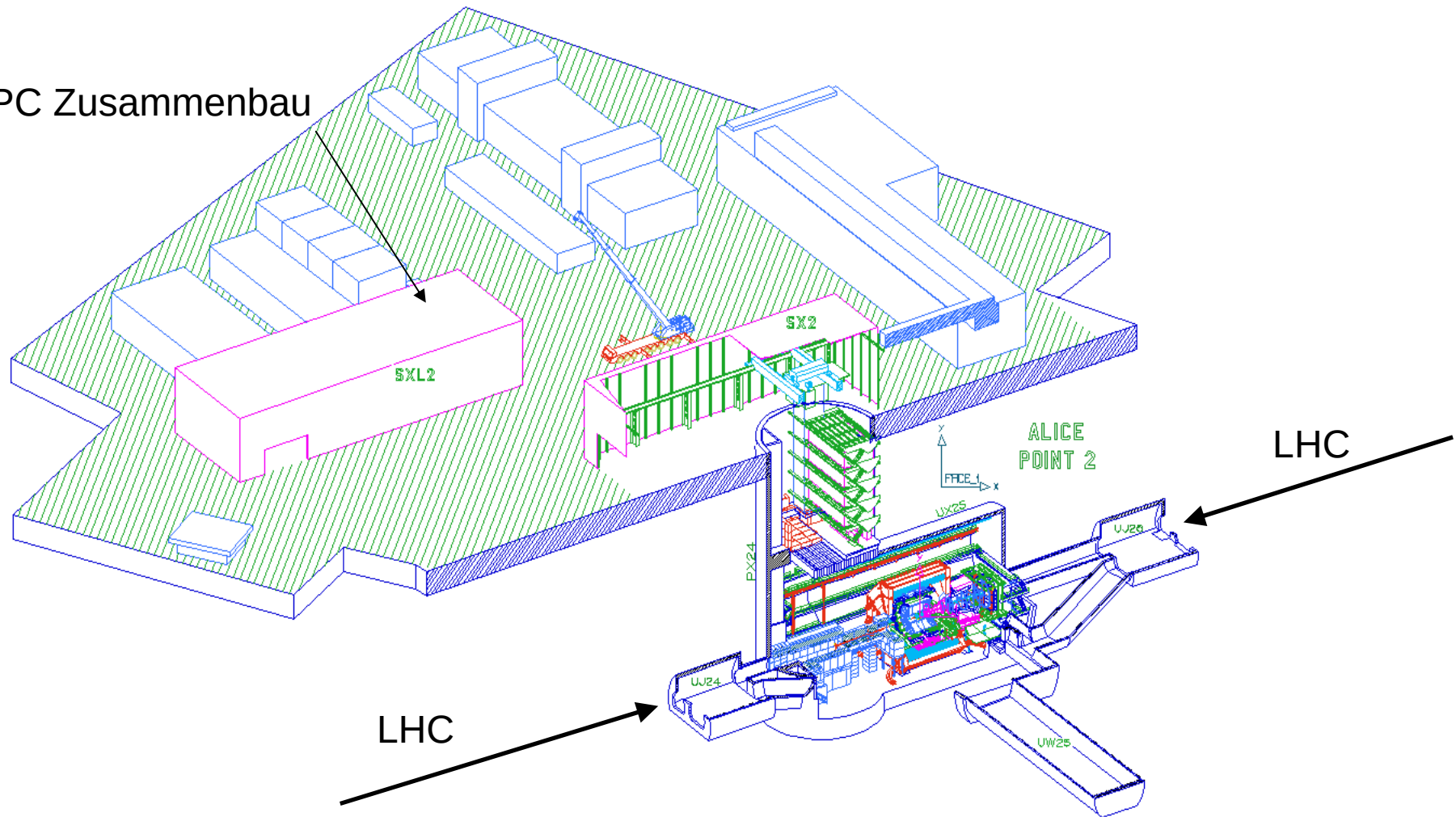


# TPC commissioning





## TPC Zusammenbau



# „Masse“ des Universums

