

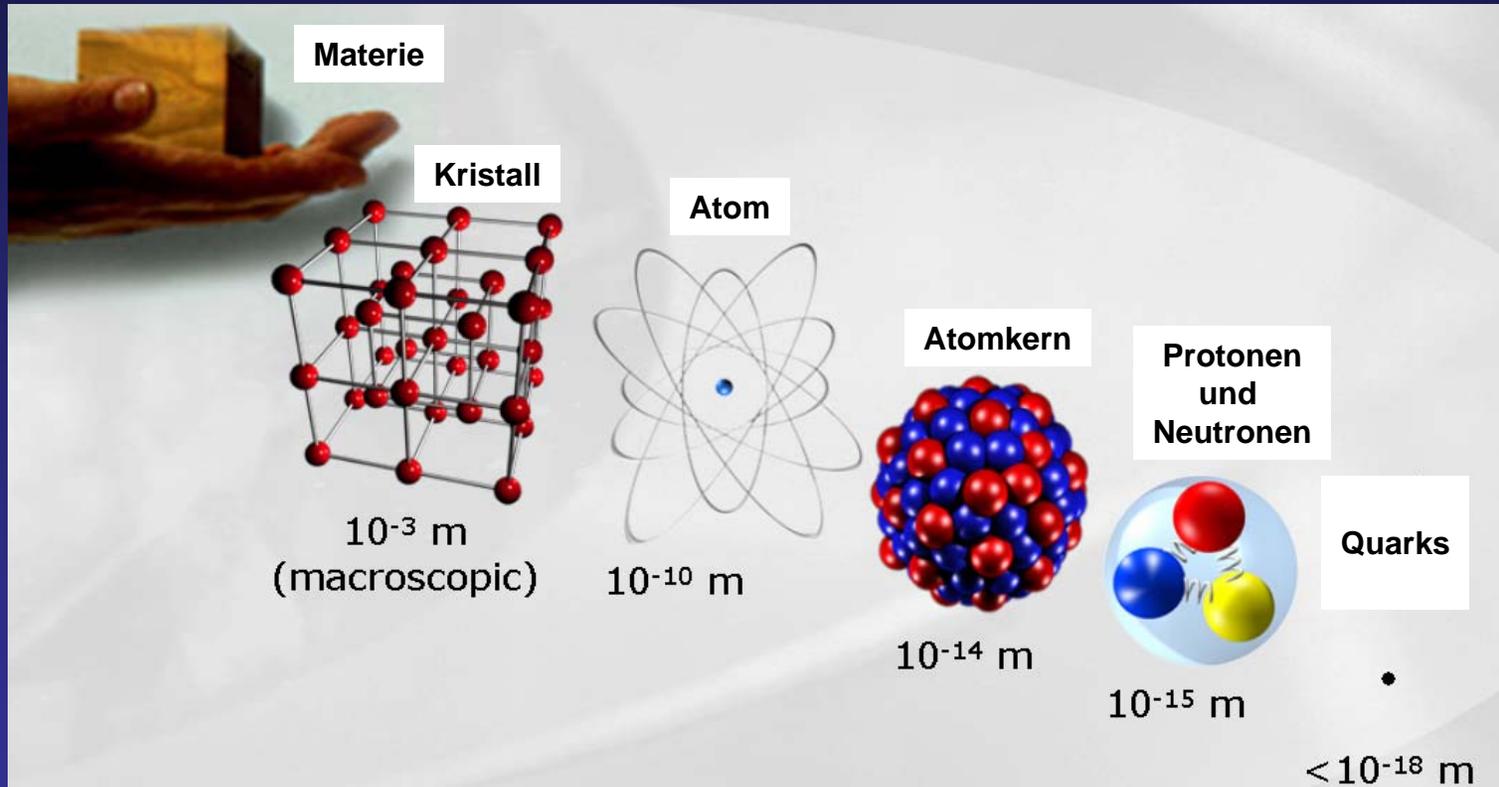


Der Urknall im Labor –

Experimente mit schweren Atomkernen bei hohen  
Energien

**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

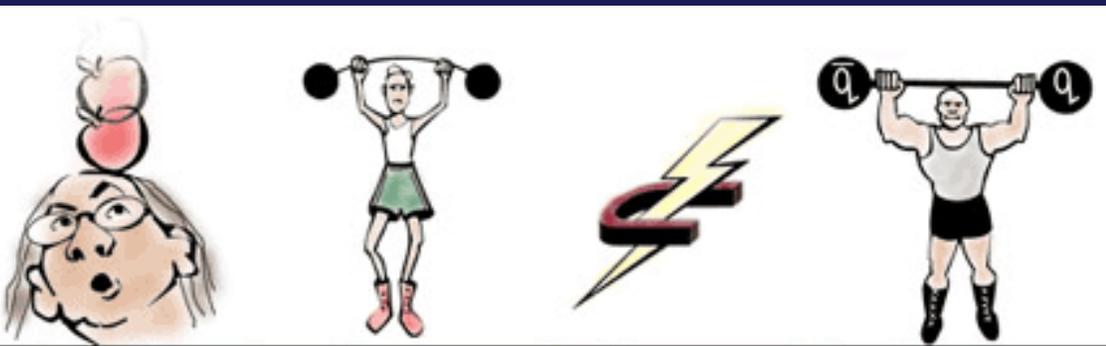
|                              |                        |                               |                                 |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Quarks                       | $u$<br>up              | $c$<br>charm                  | $t$<br>top                      |
|                              | $d$<br>down            | $s$<br>strange                | $b$<br>bottom                   |
| Leptons                      | $\nu_e$<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).

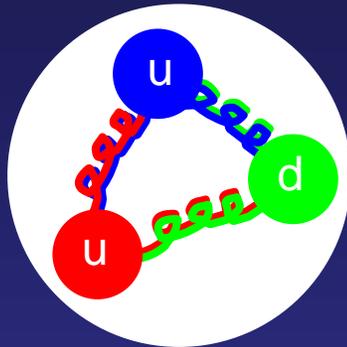
# Standardmodell der Teilchenphysik



|                     | 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

# Quarks und Hadronen



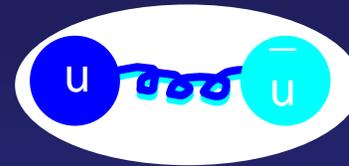
## Baryonen (qqq)

z.B.

Proton (uud)

Neutron (udd)

...



→ Hadronen

## Mesonen (qq̄)

z.B.

Pion (uū, dđ, dū, uđ)

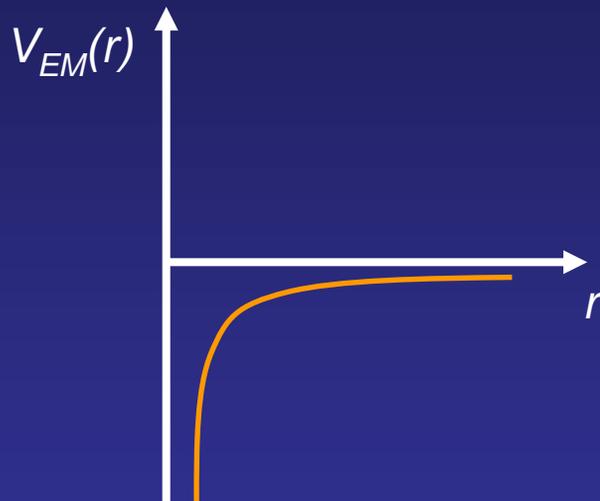
...

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



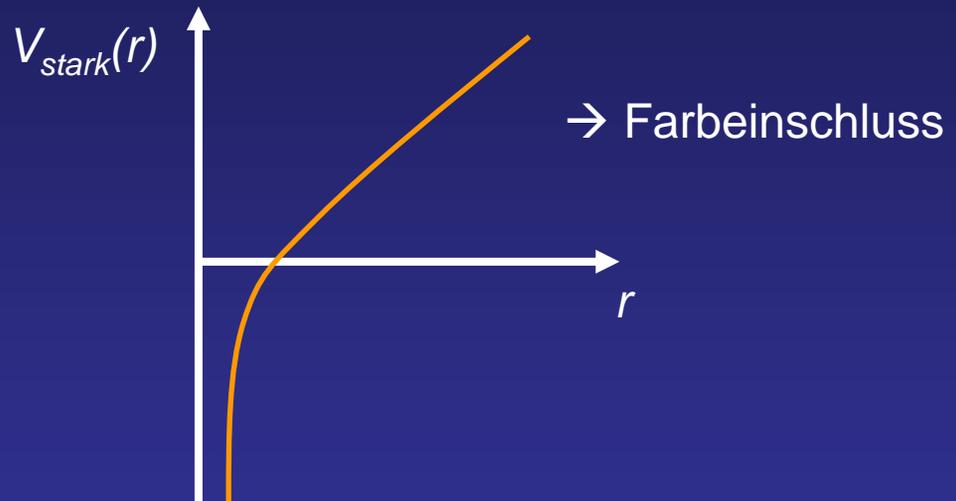
# Elektromagnetische und starke Kraft

Elektron - Proton



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

Quark - Quark

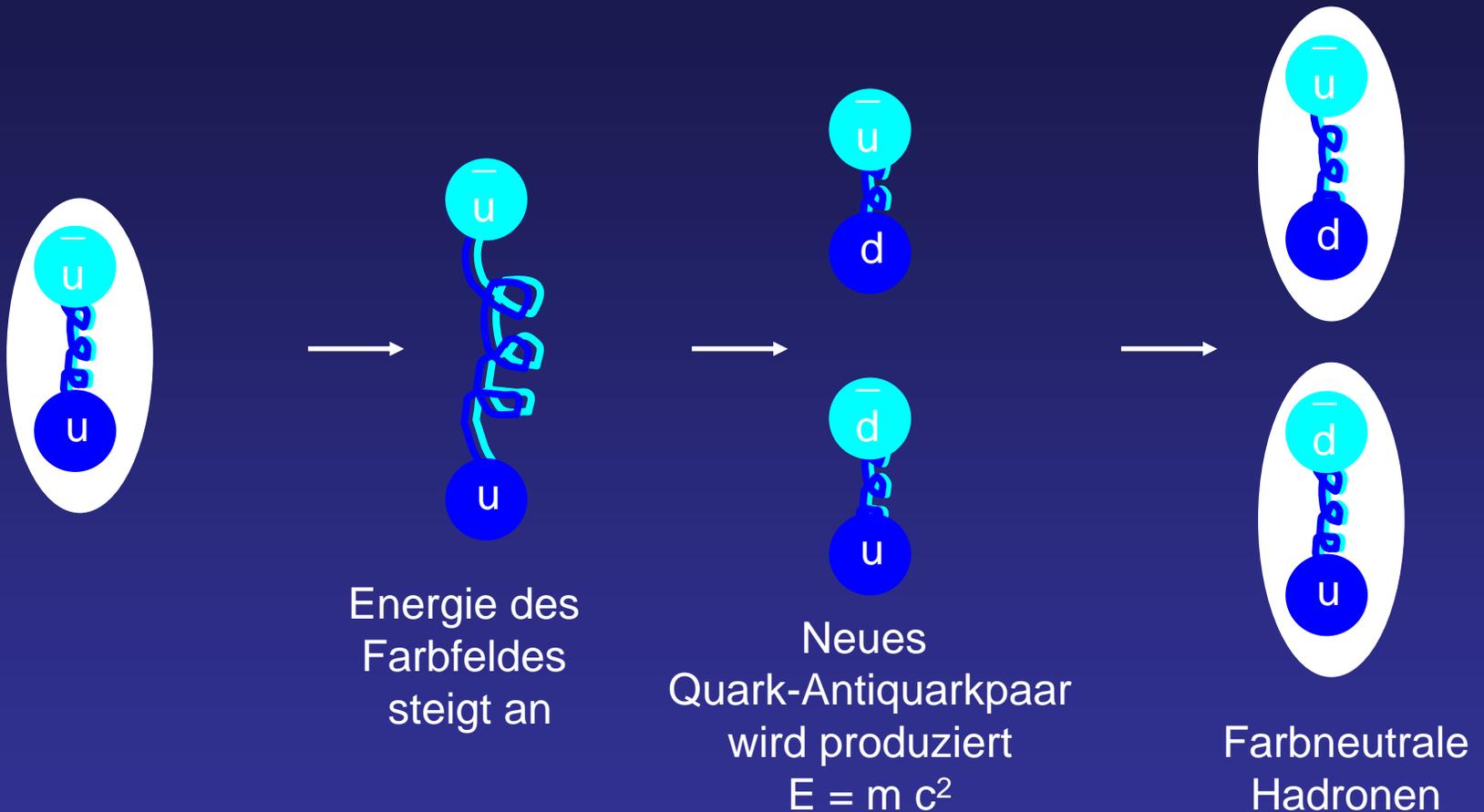


$$V_{stark}(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr$$

$\alpha$ : elektromagnetische Kopplungs-"konstante"

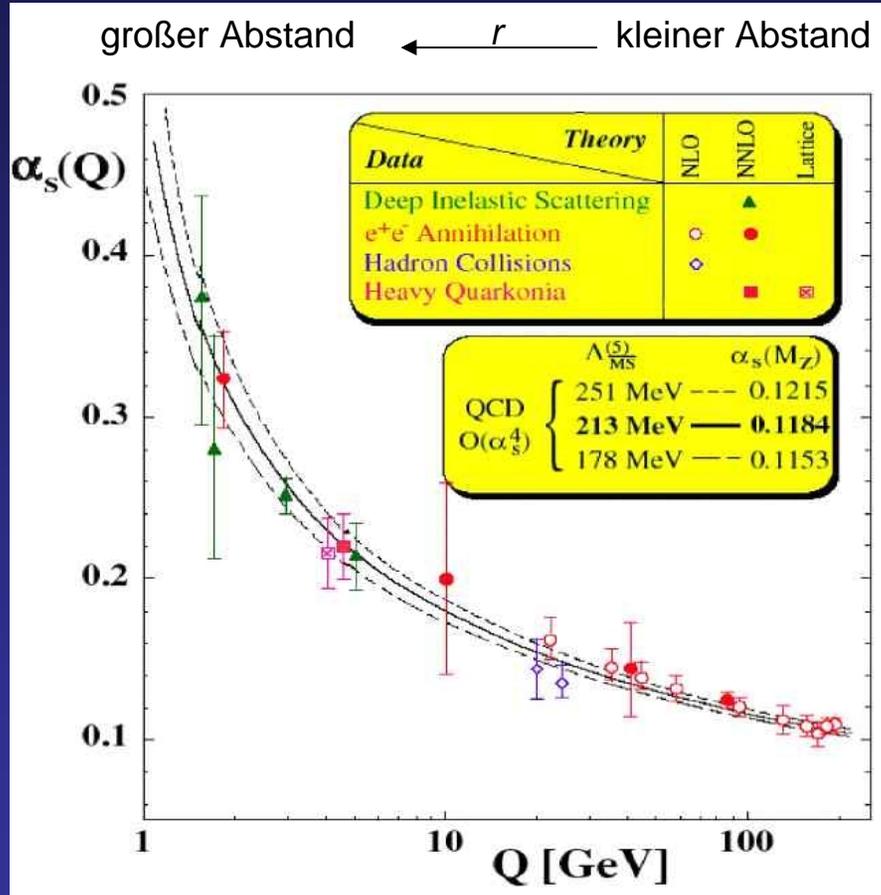
$\alpha_s$ : starke Kopplungs-"konstante"

# Farbeinschluss



→ Freie Quarks sind nicht beobachtbar!

# Laufende Kopplung und asymptotische Freiheit



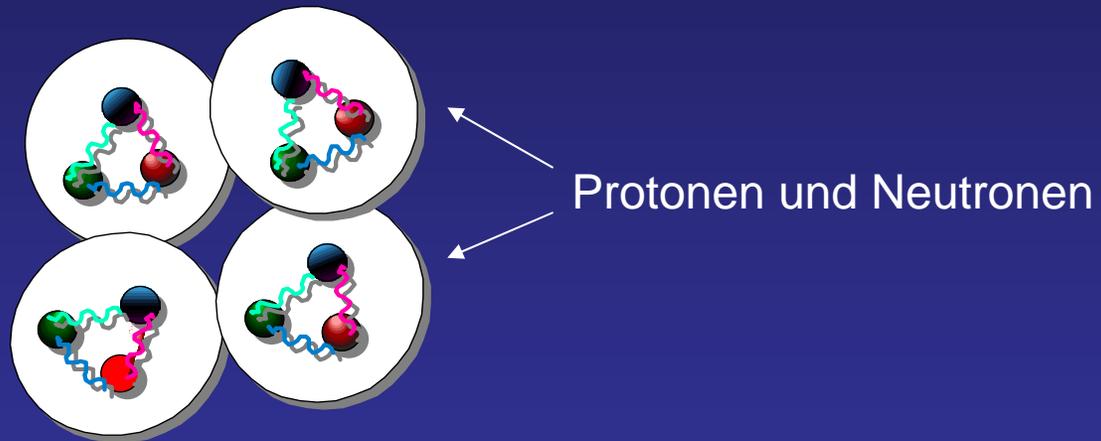
Die starke Kopplungskonstante ist *nicht* konstant, sondern hängt vom Abstand ab (*running coupling constant*).

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

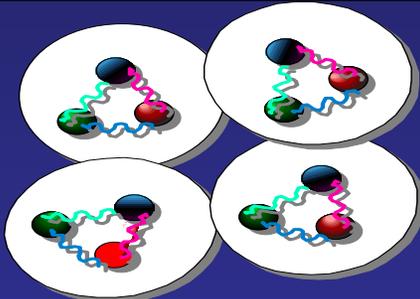
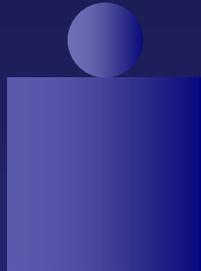
Gross, Politzer, Wilczek (1974)  
Nobelpreis 2004

# Confinement

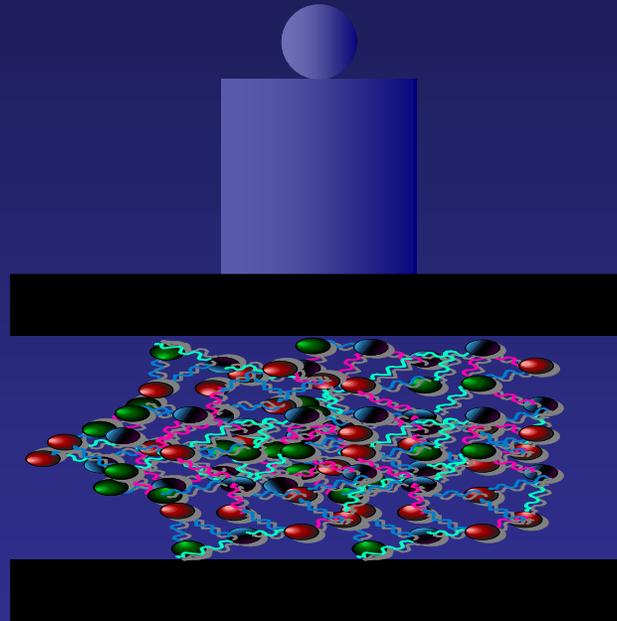
Atomkern



ABER: Bei kleinen Abständen ( $\rightarrow$  hohen **Dichten**) oder hohen Energien ( $\rightarrow$  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

$10^{-6}$  sec

$10^{-4}$  sec

3 min

14 Milliarden Jahre

Quark-Gluon  
Plasma

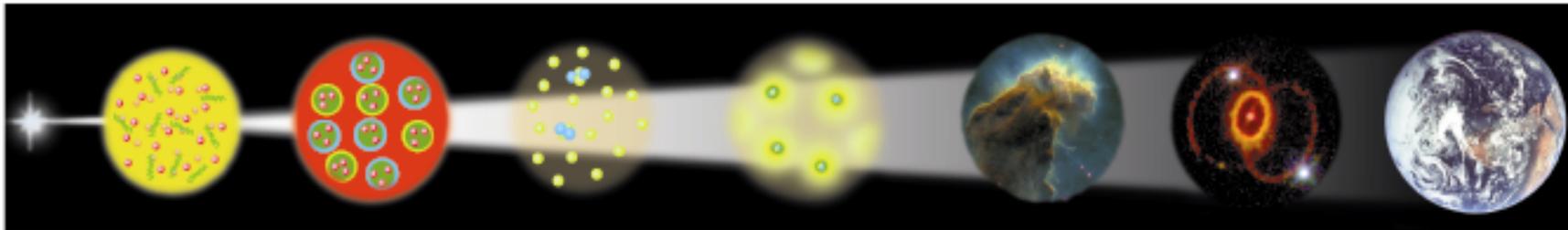
Nucleons

Nuclei

Atoms

Today

Big  
Bang



$10^{12}$  K

$10^{10}$  K

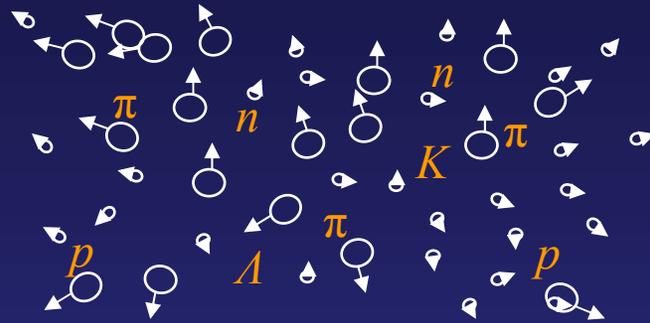
$10^9$  K

3 K

# Kern-Kern Kollisionen bei hohen Energien

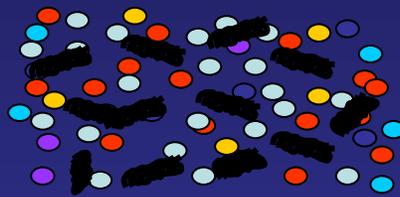
**Zeit**

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



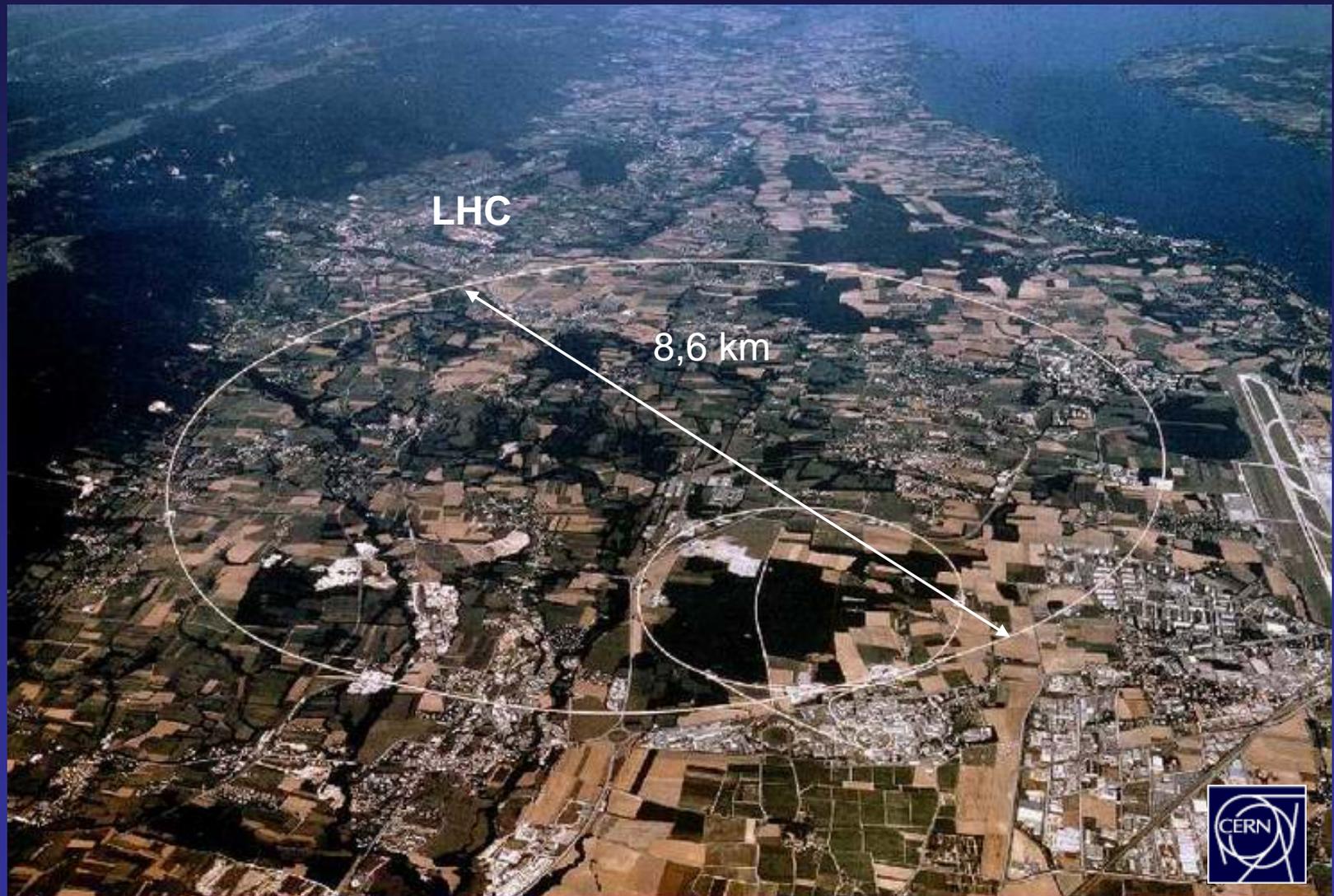
normale Kernmaterie

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

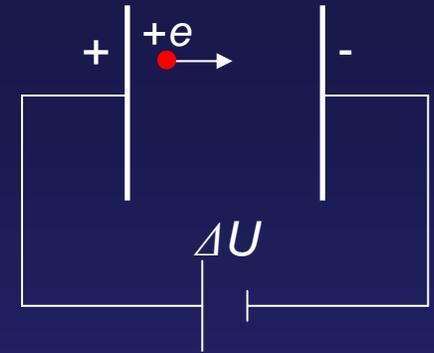
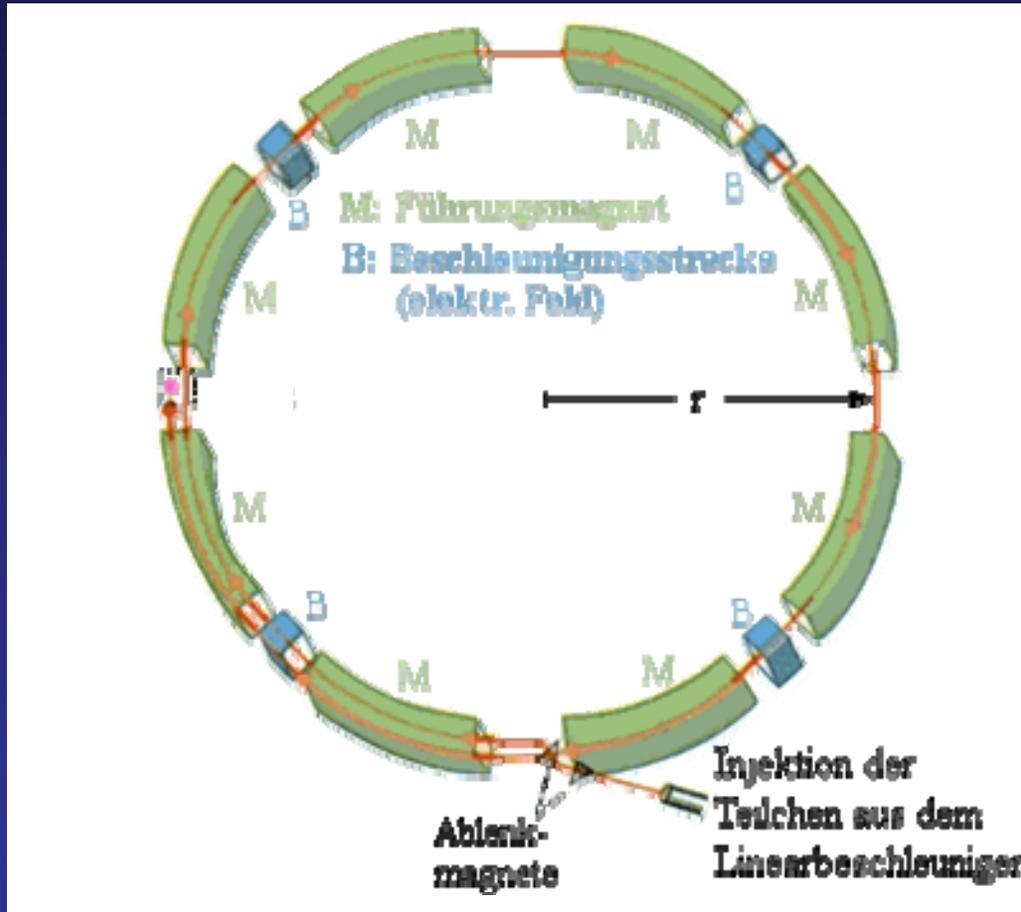
# Mirkoskope der Teilchenphysiker



# Large Hadron Collider (LHC)



# Synchrotron



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

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

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

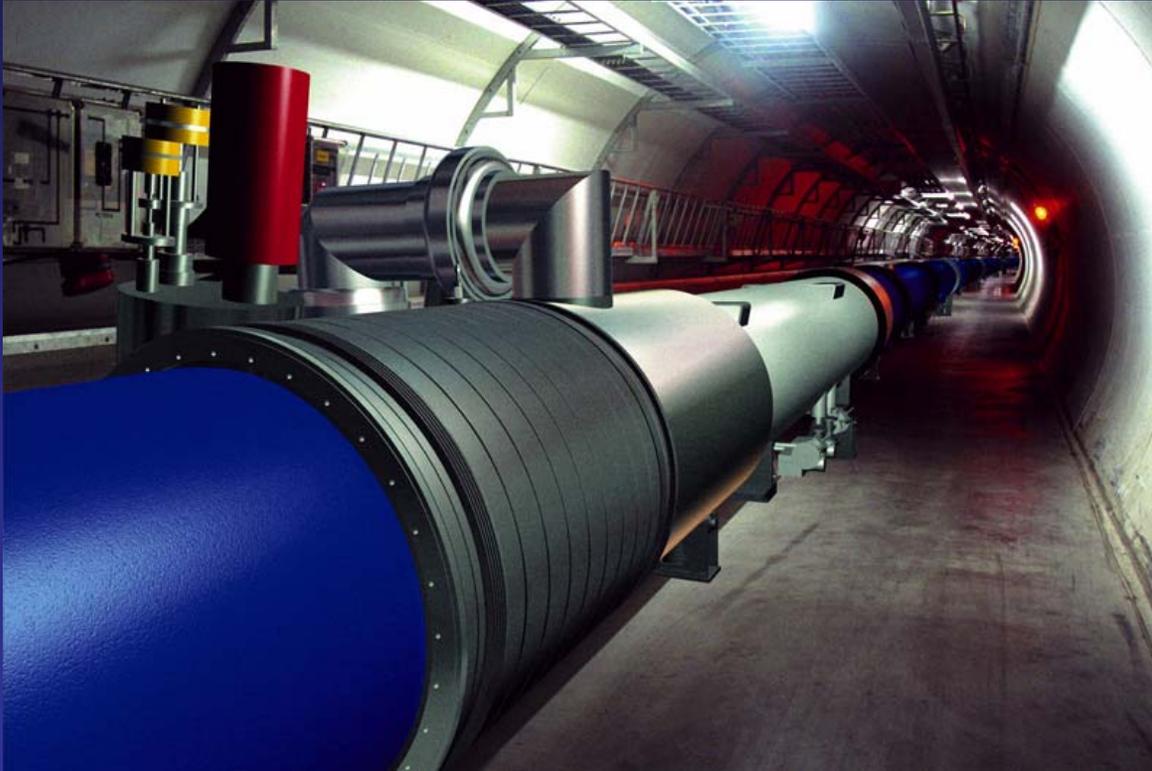
Technische Limitierung für Protonen- und Ionen-Synchrotrons:

Ablenkstärke der Magnete

→ sehr starke Magnete  
→ großer Radius

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

# Large Hadron Collider (LHC)



1232 Dipolmagnete

je 15 m lang

Magnetfeld 9 T

je ca 1MCHF

werden derzeit aufgebaut

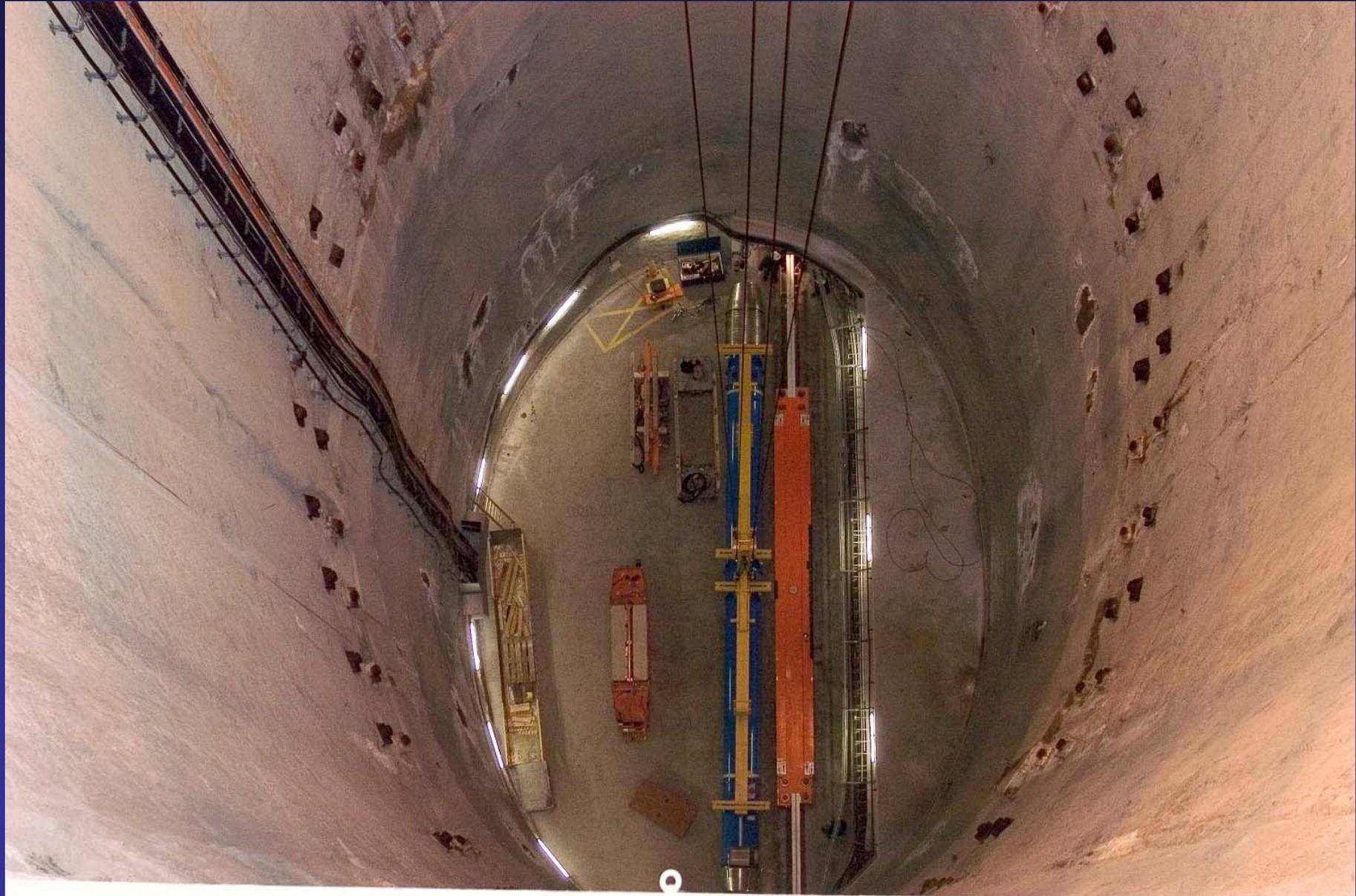
# Large Hadron Collider (LHC)



# Large Hadron Collider (LHC)



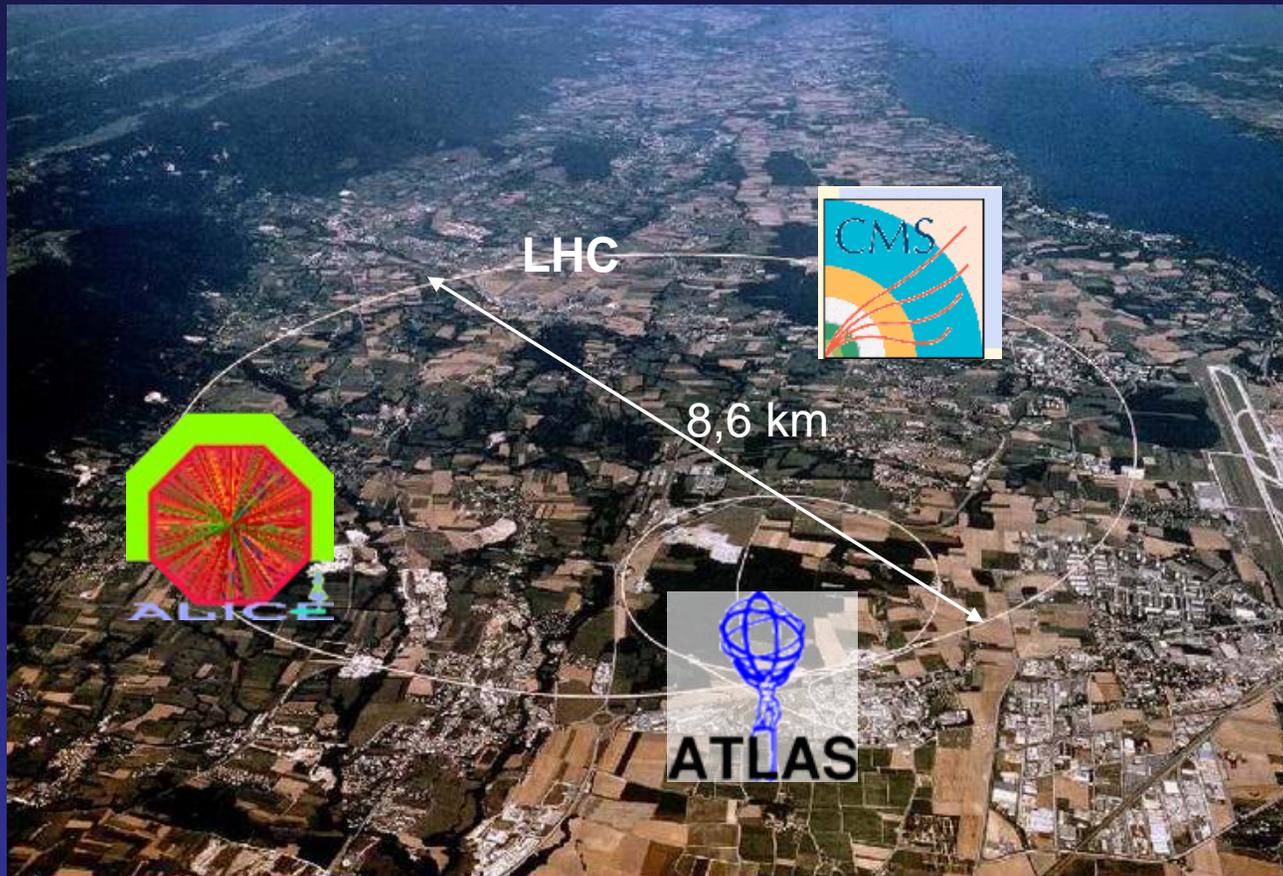
# Large Hadron Collider (LHC)



# Large Hadron Collider (LHC)



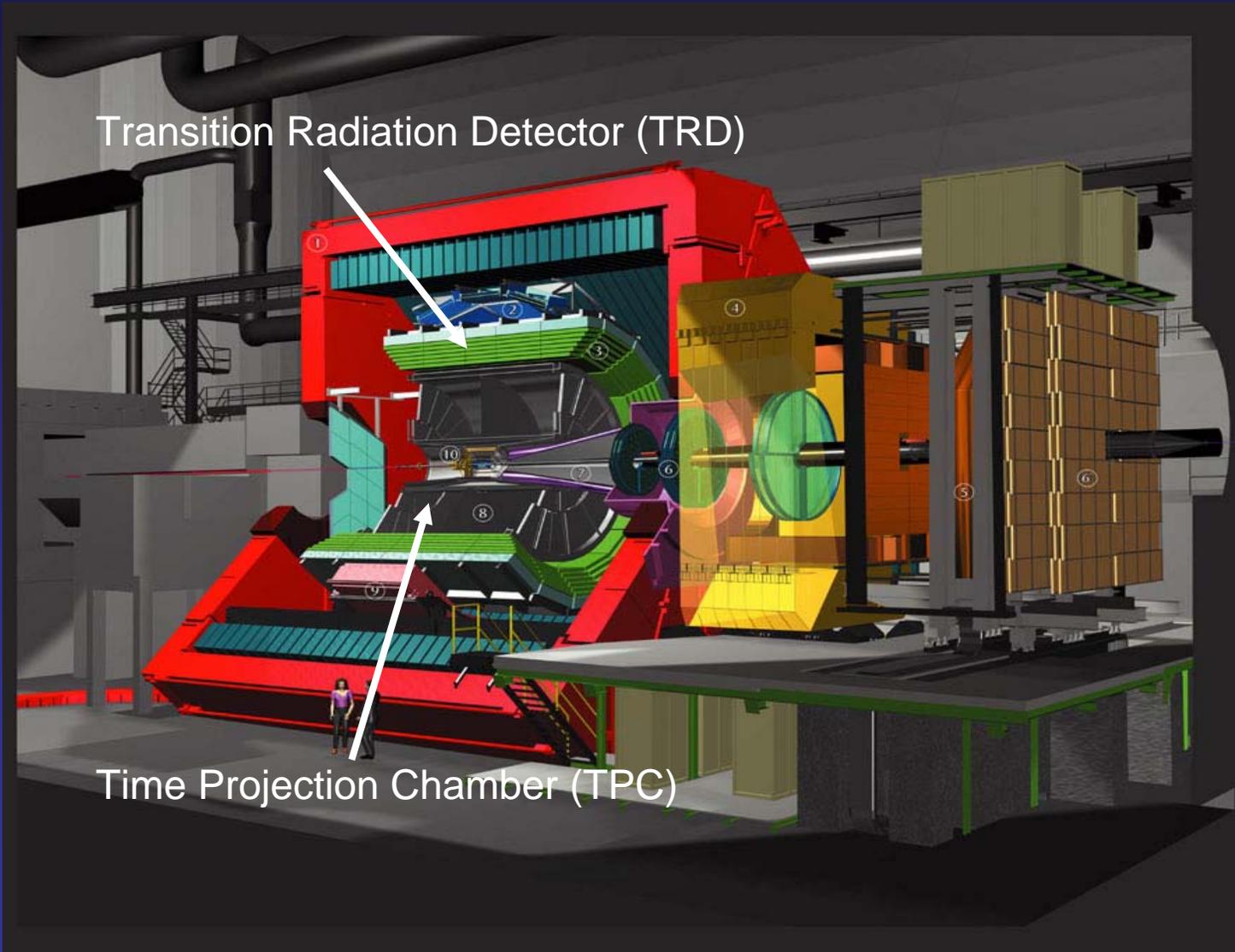
# Large Hadron Collider (LHC)



ab 2007 **ATLAS, CMS:** p-p Kollisionen bei 14 TeV

ab 2008 **ALICE:** Pb-Pb Kollisionen bei 5.5 TeV ( x 208 = 0.18 mJ)

# ALICE Experiment

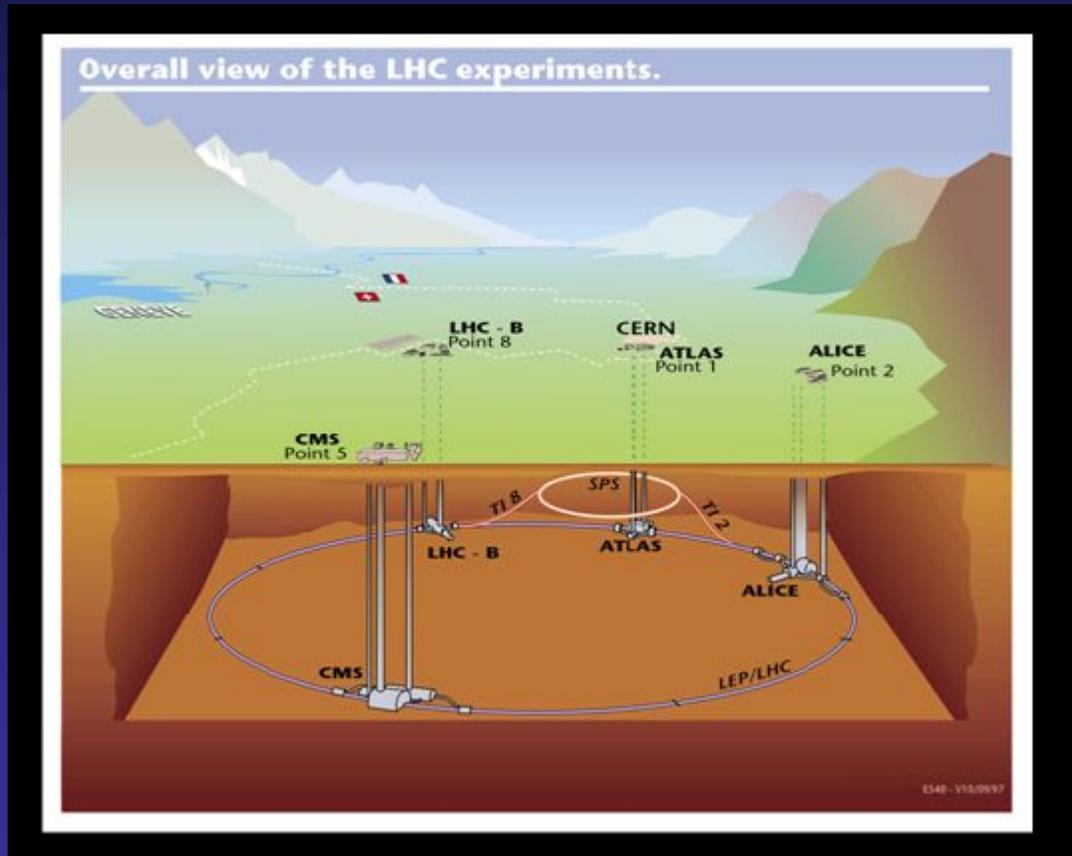


1000 Physiker  
aus  
94 Instituten  
in  
29 Ländern

im Aufbau



# Pb-Pb Kollision im LHC



Bis zu 50000 geladene Teilchen pro Ereignis!



# ALICE Magnet



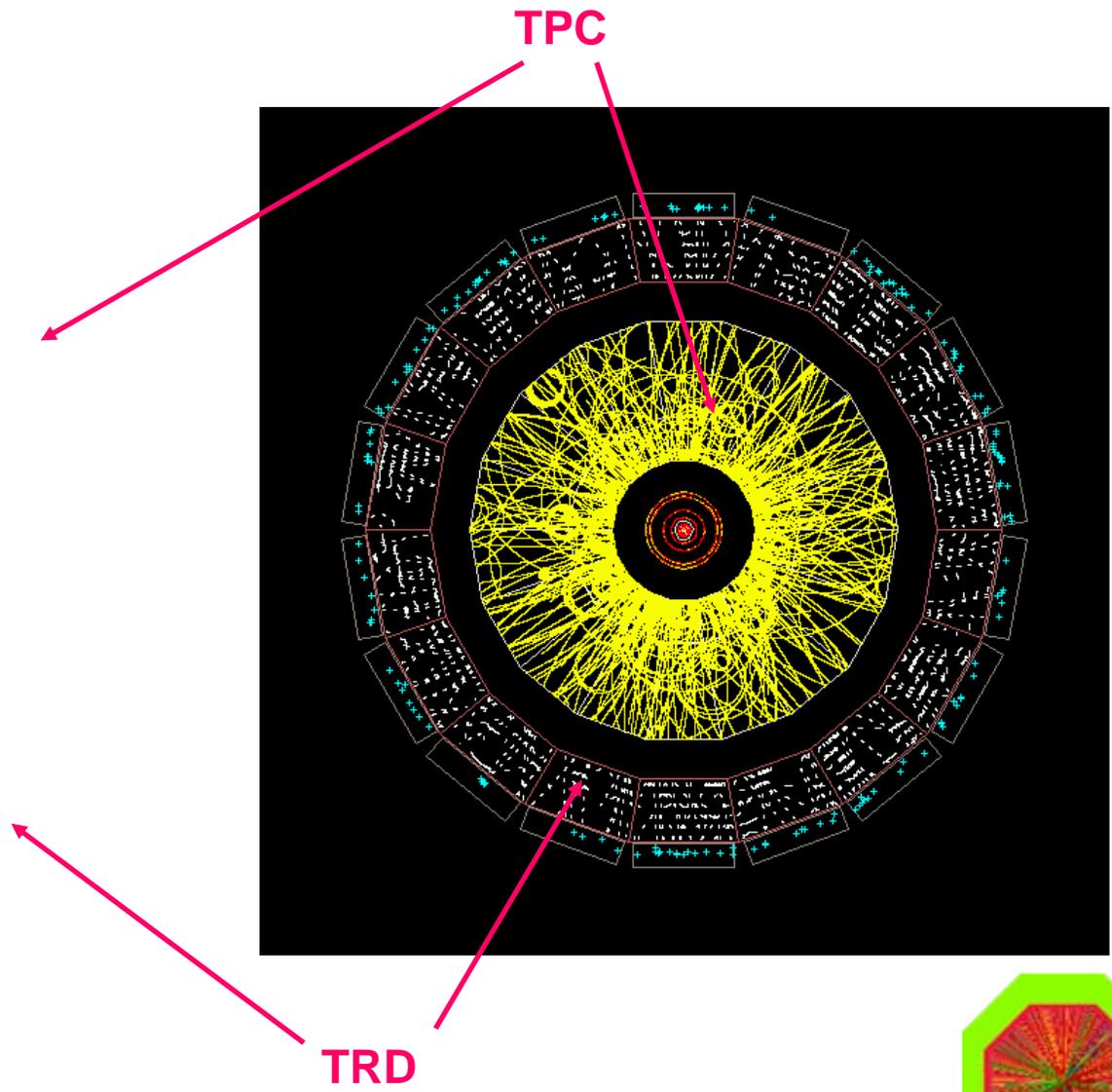
Gewicht: 7800 t  
Magnetfeld: 0.5 T

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

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

→ Impulsbestimmung





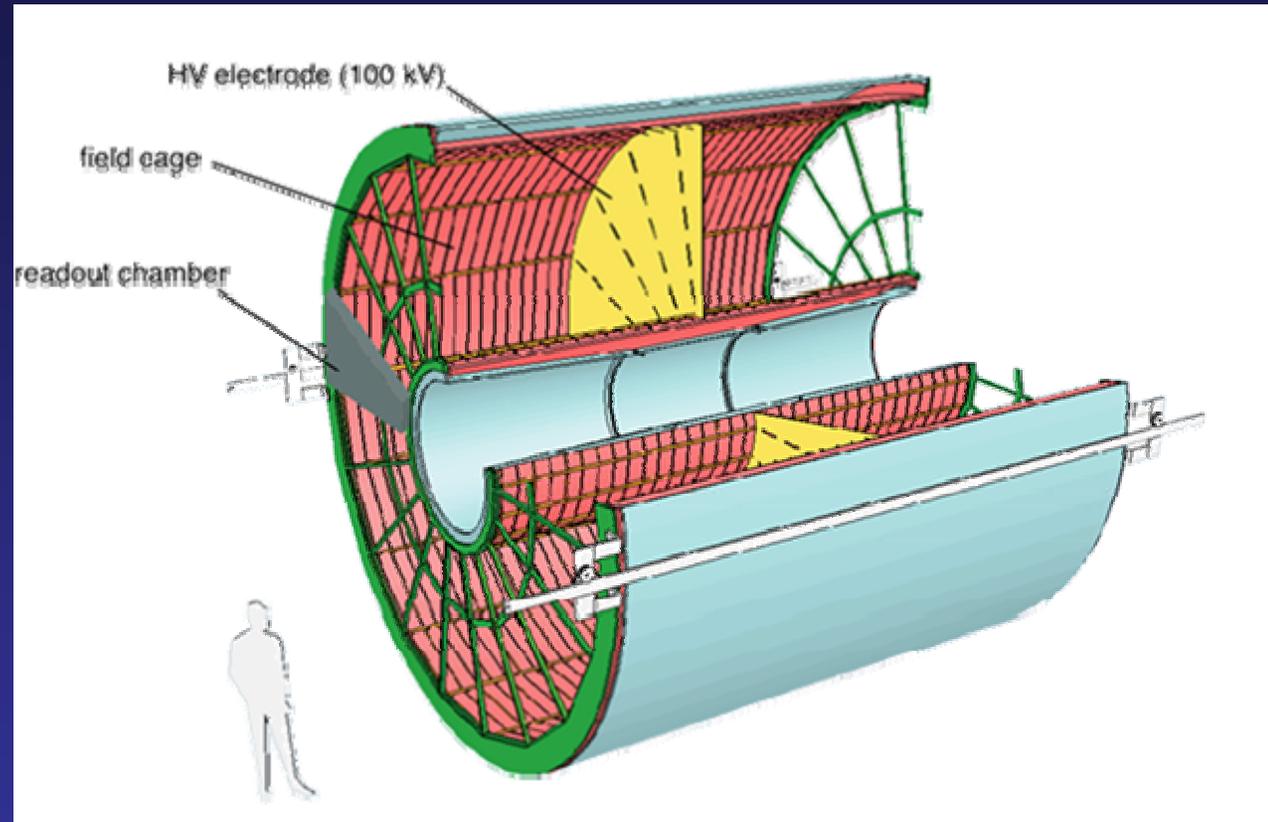
TPC

TRD



# ALICE Time Projection Chamber

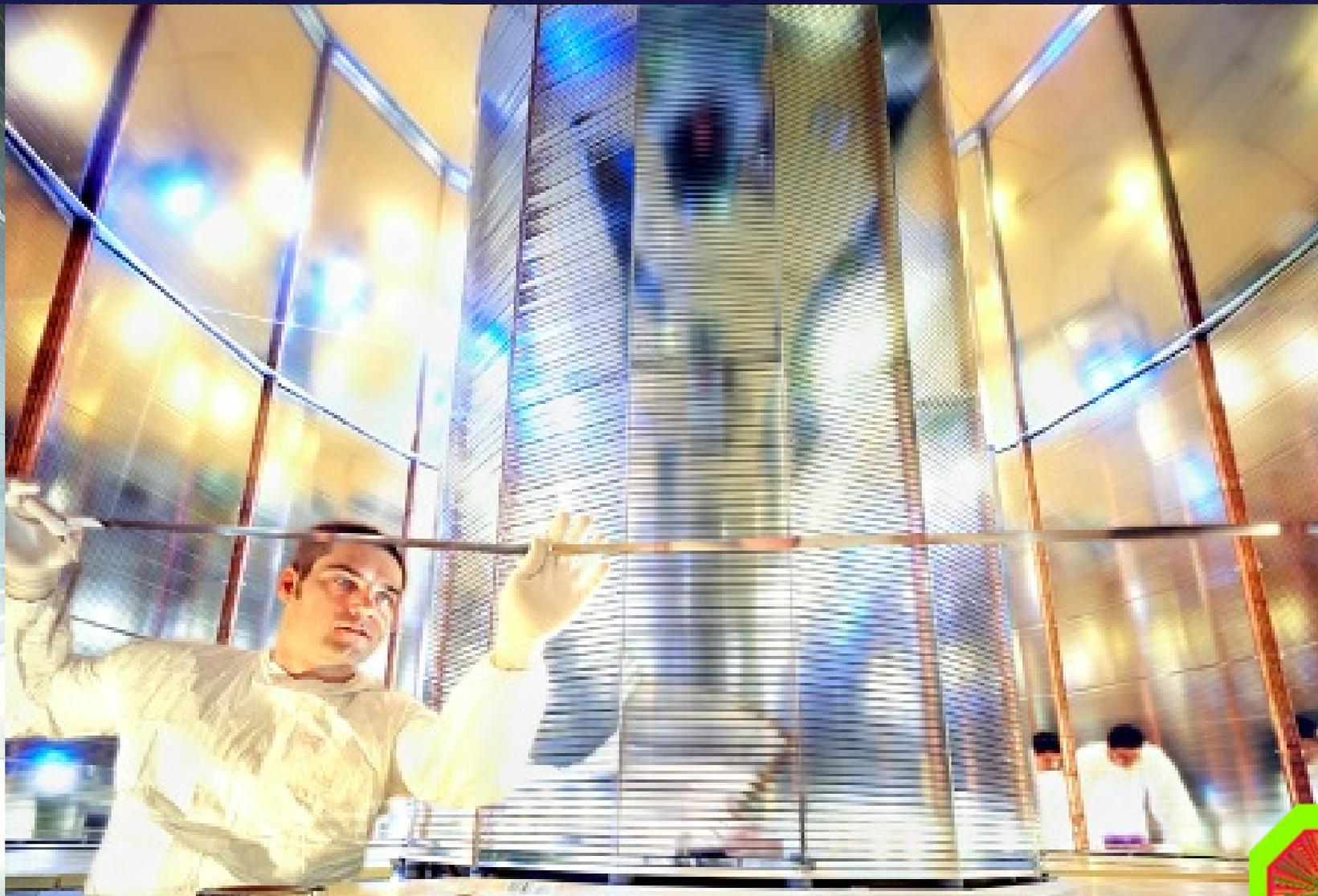
- Spurvermessung,  
Impulsbestimmung



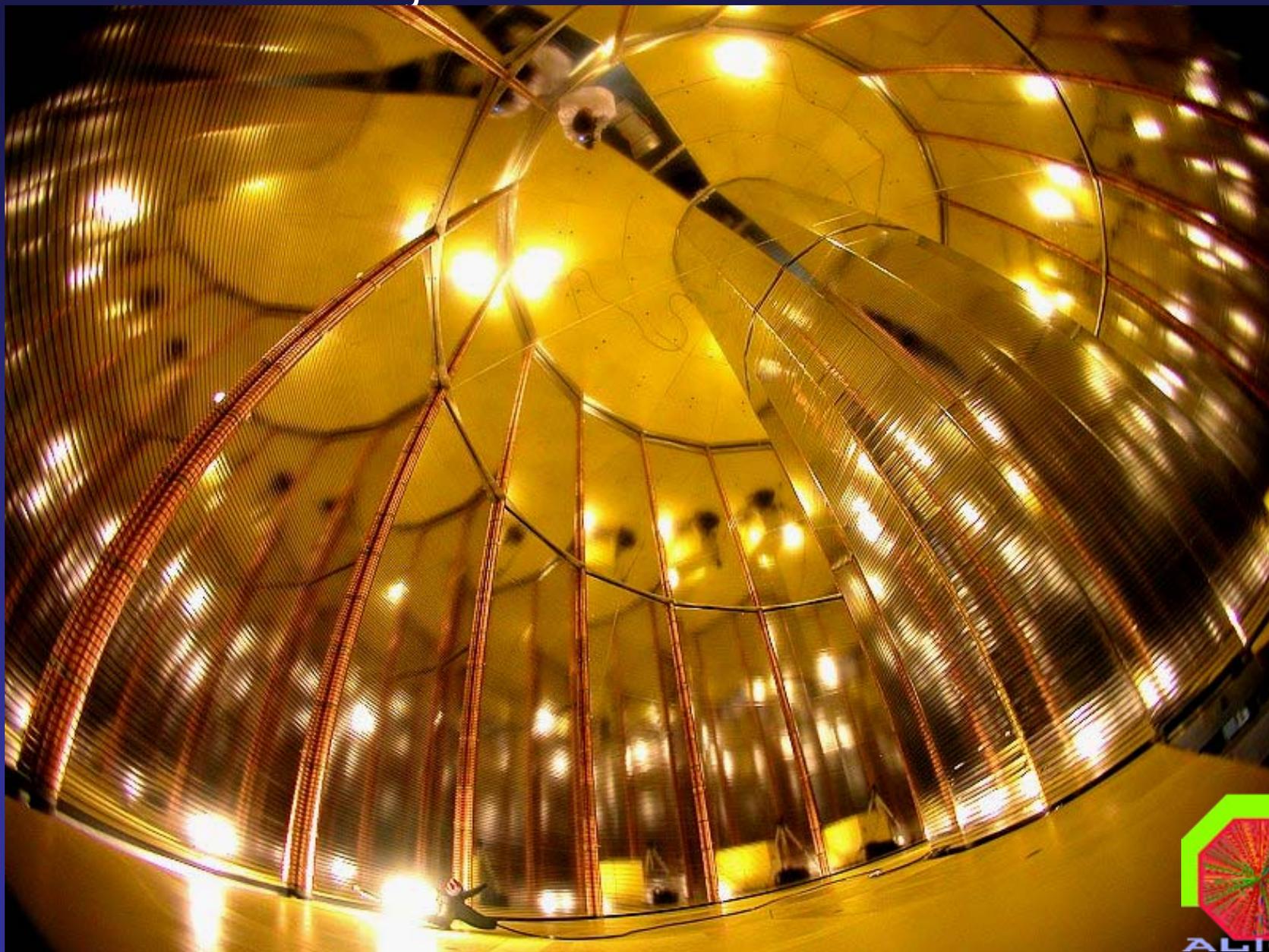
- Detektorvolumen: 88 m<sup>3</sup>
- Datenvolumen: 570.000 pads x 500 Zeit samples x 10 Bit ADC  
→ ~1 GB / s



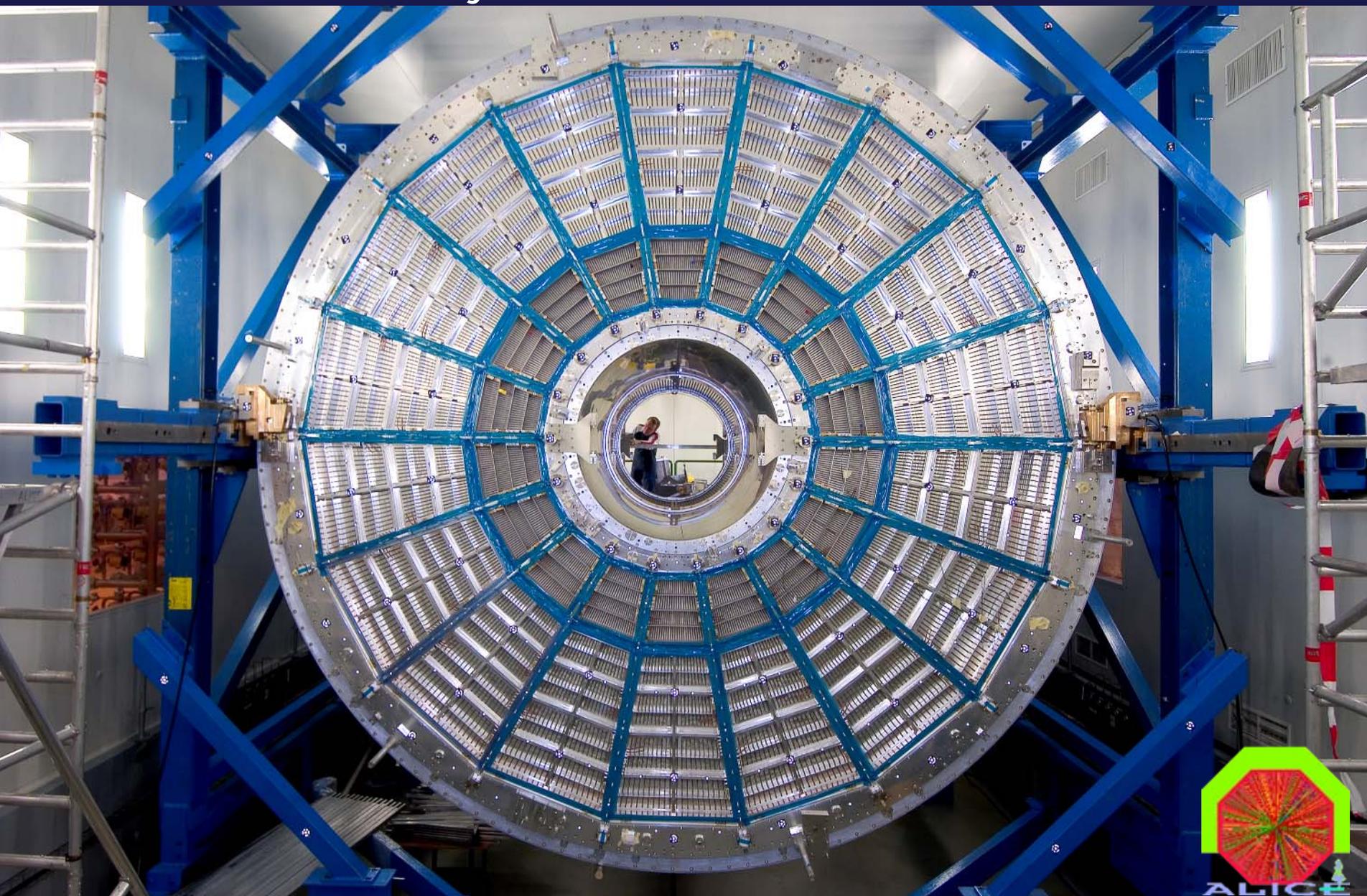
# ALICE Time Projection Chamber



# ALICE Time Projection Chamber



# ALICE Time Projection Chamber



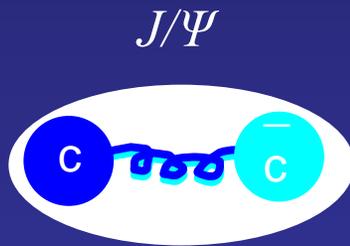
# Quarkonia

**Quarkonia:** Mesonen aus einem schweren Quark-Antiquark-Paar

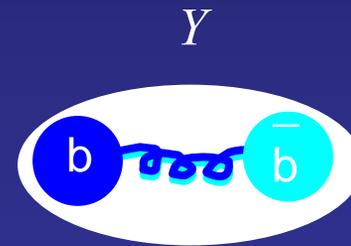
z.B.

$J/\Psi, \Psi', \dots$  (charm-anticharm)  $m_{J/\Psi} \approx 3 m_{proton}$

$Y, Y', \dots$  (beauty-antibeauty)  $m_Y \approx 10 m_{proton}$



ca. 1  $J/\Psi$  pro Pb-Pb Kollision

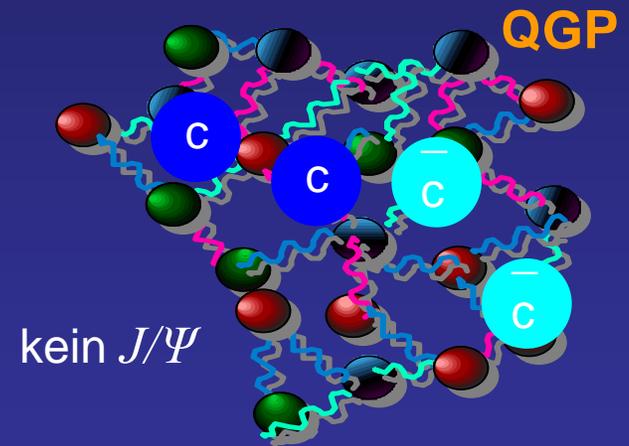
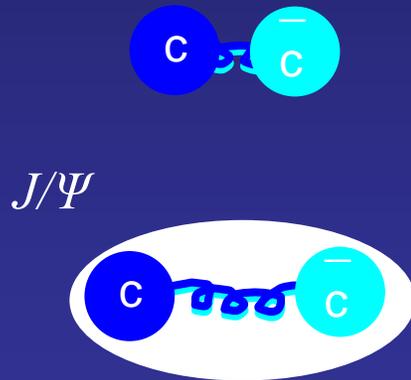


ca. 1  $Y$  pro 100 Pb-Pb Kollisionen

# Quarkonium-Unterdrückung

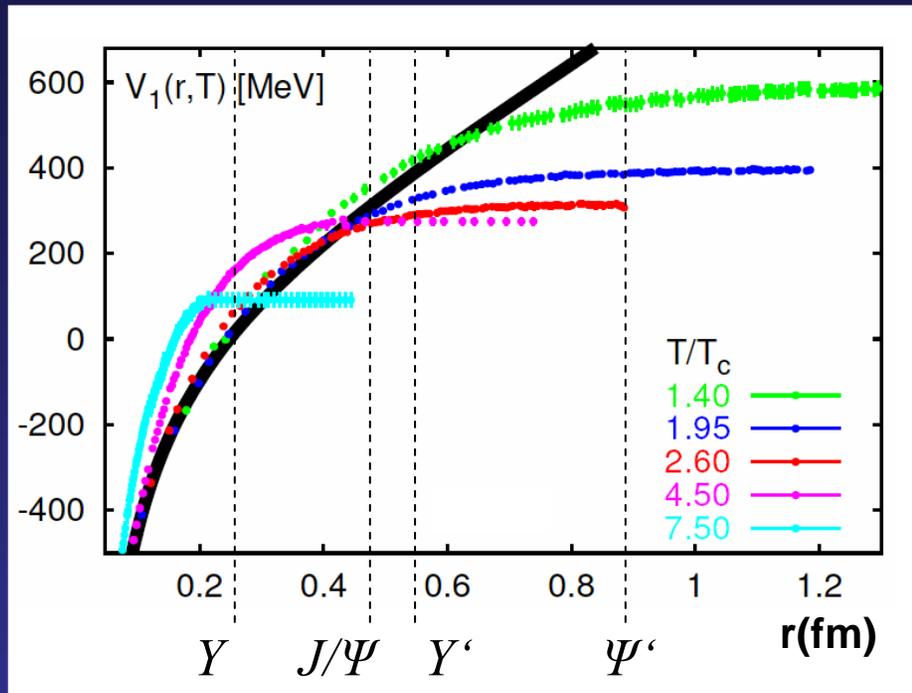


$$E = m c^2$$

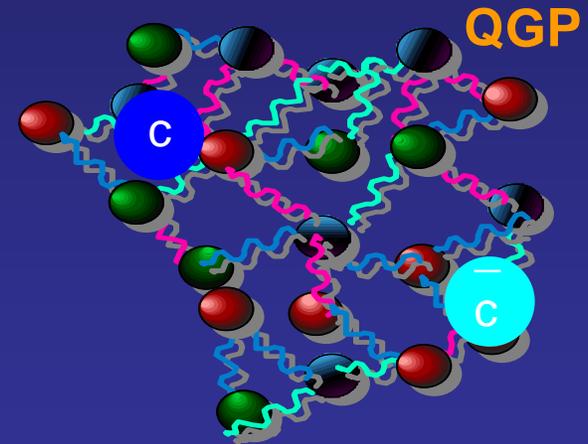


→ unterdrückte Quarkonia Produktion im QGP

# Quarkonium-Unterdrückung

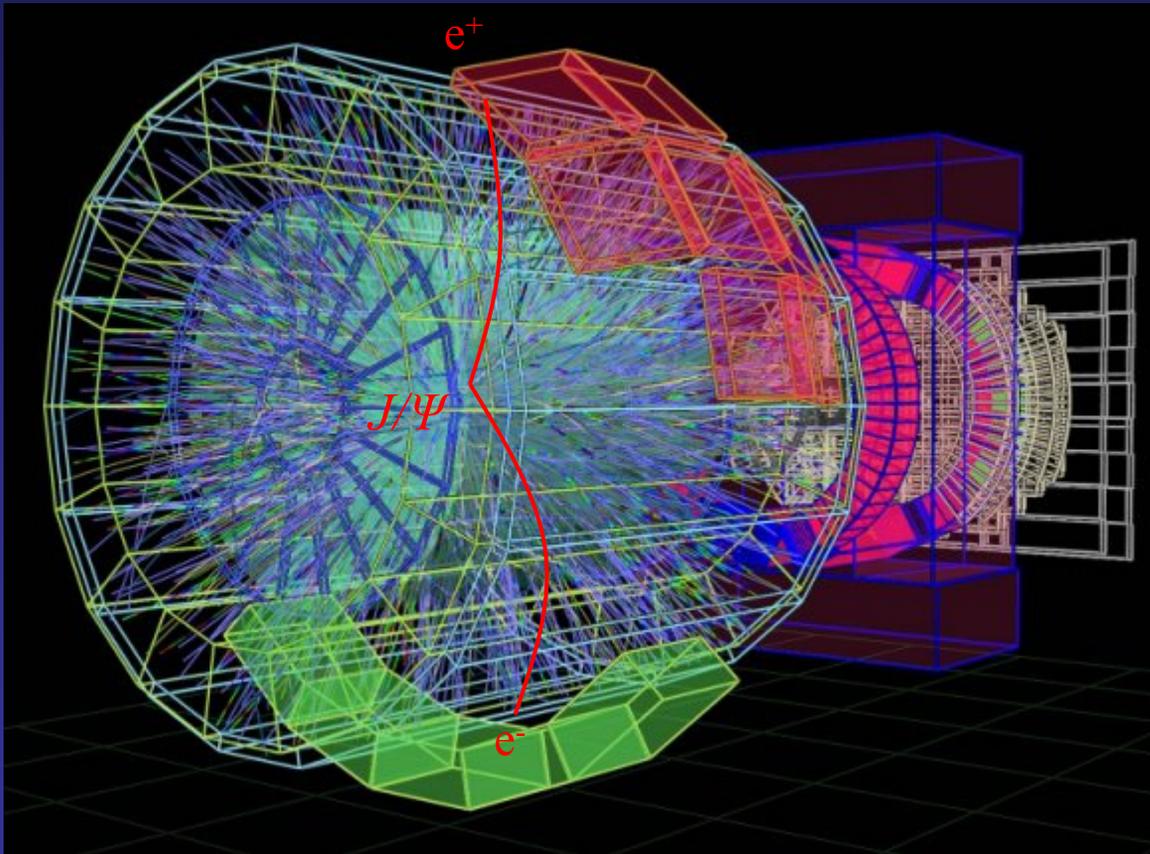


$$T = 0: \quad V_{stark}(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr$$



Quarkonia-Unterdrückung → QGP-Thermometer

# Quarkonia-Nachweis



Zerfallskanäle des  $J/\psi$ :

hauptsächlich:

$J/\psi \rightarrow$  viele Hadronen

etwa 6%:

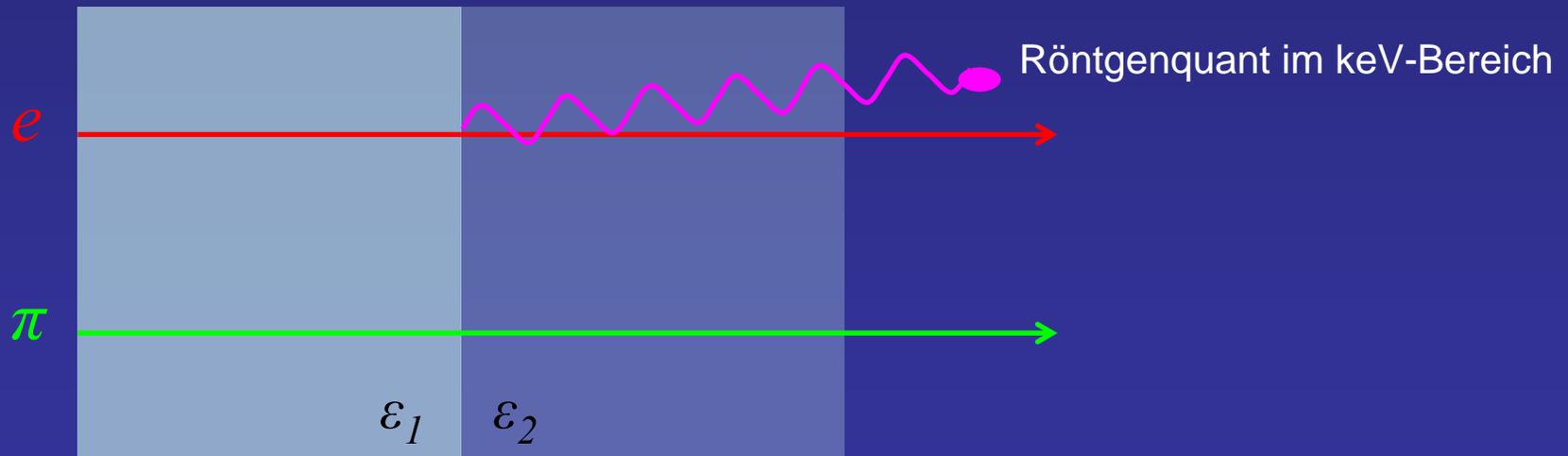
$J/\psi \rightarrow e^+e^-$

# Identifikation von Elektronen und Positronen

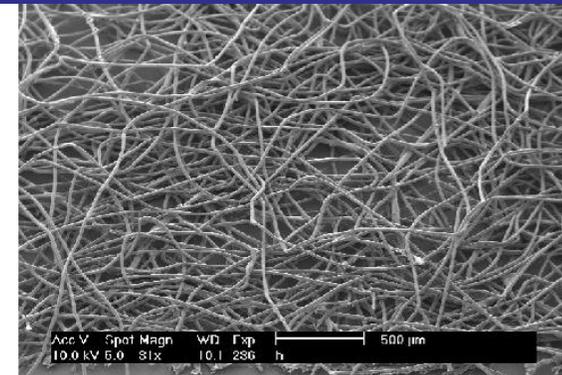
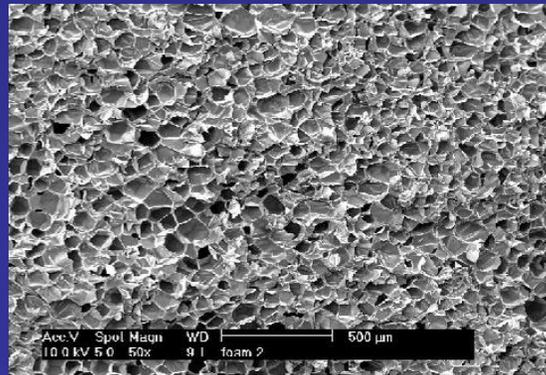
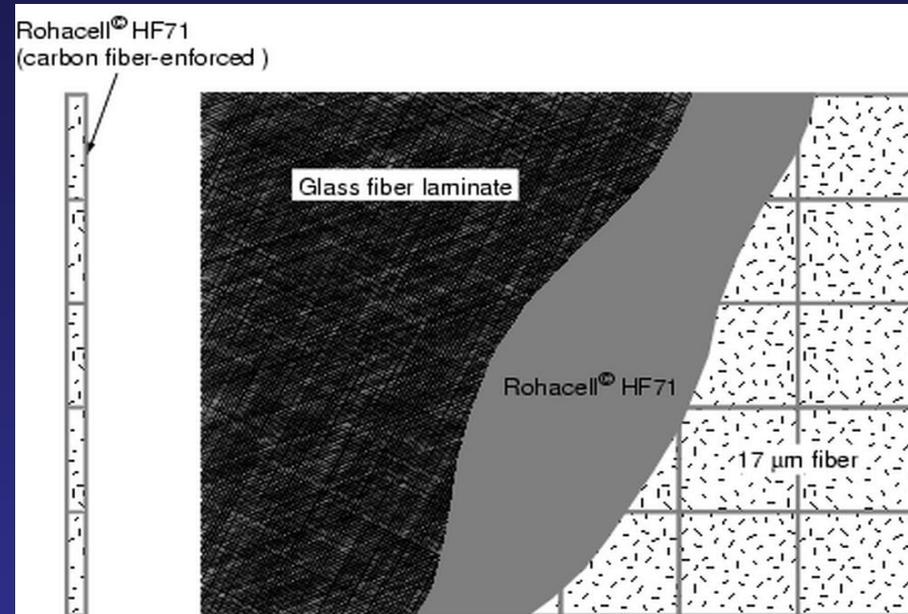
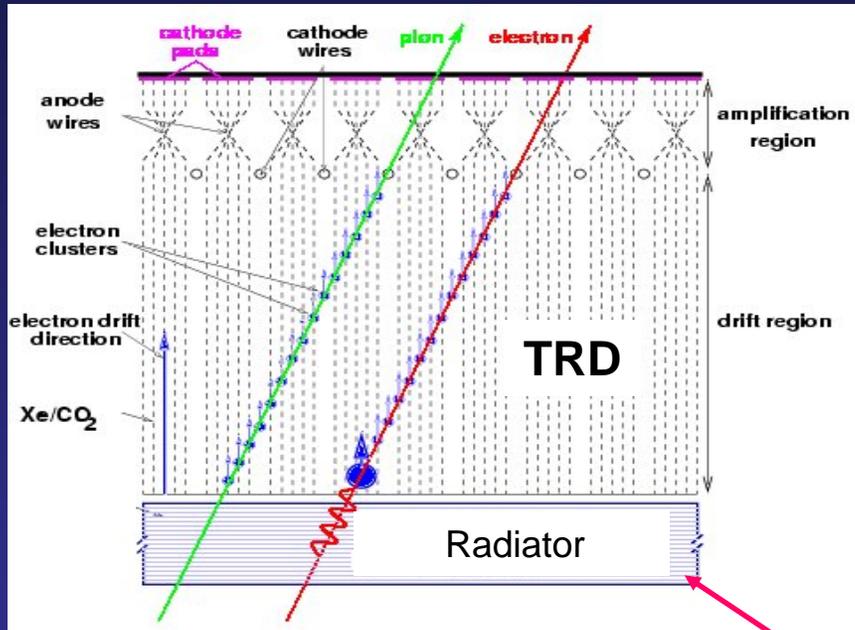
Wie können Elektronen und Positronen identifiziert werden?

- Impulsmessung im Magnetfeld
- Elektronen sind bei gleichem Impuls viel schneller als andere Teilchen, weil sie viel leichter sind → suche **geschwindigkeitsabhängigen** Effekt:

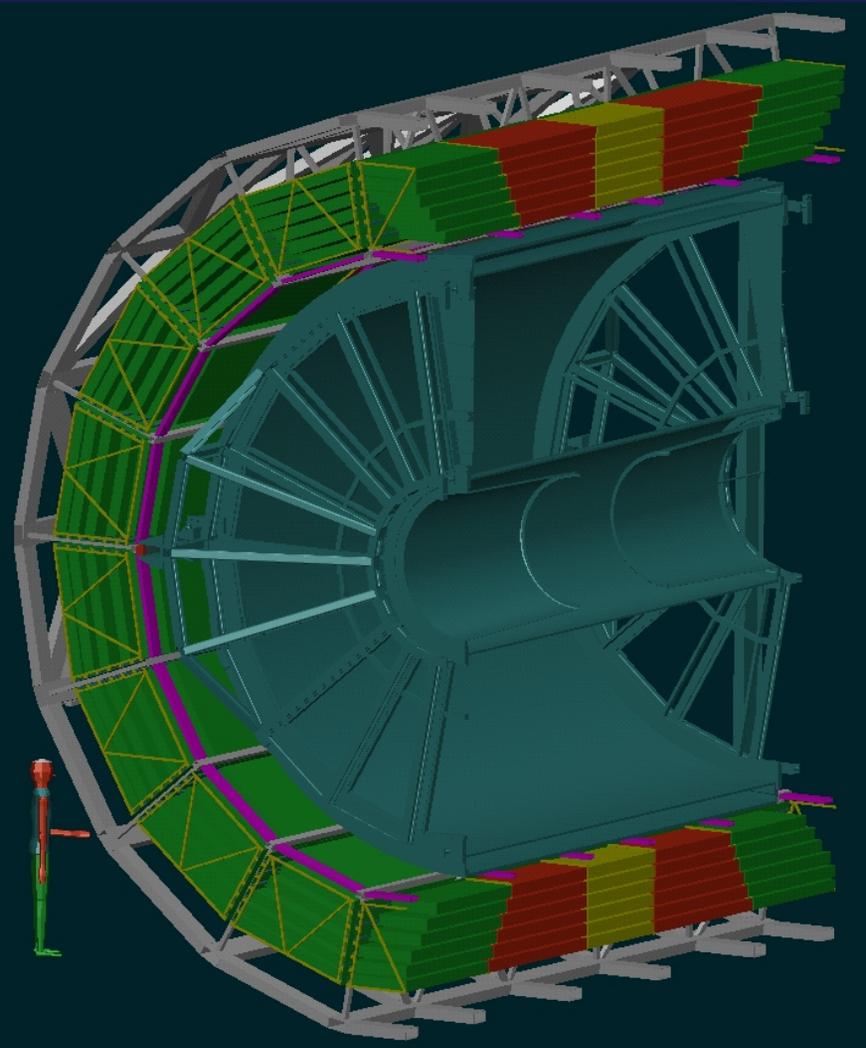
## Übergangsstrahlung an Grenzflächen



# ALICE Transition Radiation Detector



# ALICE Transition Radiation Detector



Elektronen- und Positronen-Identifikation

→  $J/\Psi$ ,  $\Upsilon$ , semi-leptonischer Zerfall von D, B

Parameter:

540 Module →  $\sim 760\text{m}^2$

$28\text{ m}^3$  Xe/CO<sub>2</sub> (85:15)

1.2 Million Auslesekanäle

Institute:

Athen, Bukarest, Darmstadt, JINR,  
Frankfurt, GSI, PI Heidelberg, KIP  
Heidelberg, Köln, Karlsruhe,  
Kaiserslautern, Münster, Worms



# Physik in Frankfurt

**2005:**

**Bezug des Neubaus Physik am naturwissenschaftlichen Campus Riedberg**

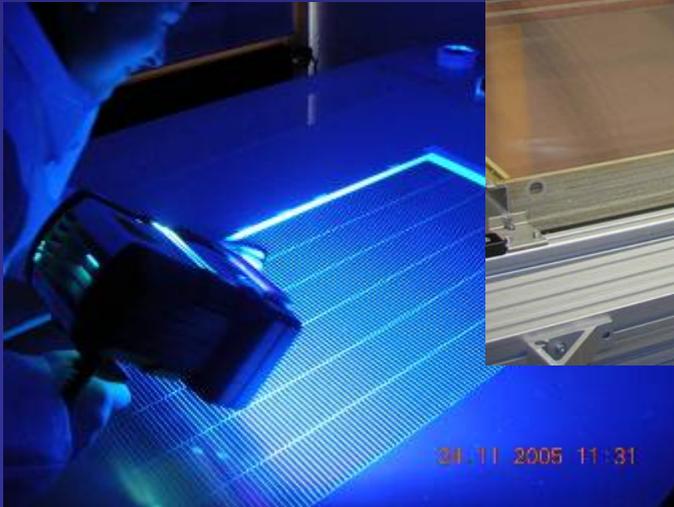
**Baukosten 60 M€**

**+ Geräte 10 M€**

**→ großzügige Labor-, Computer- und Werkstattausstattung**



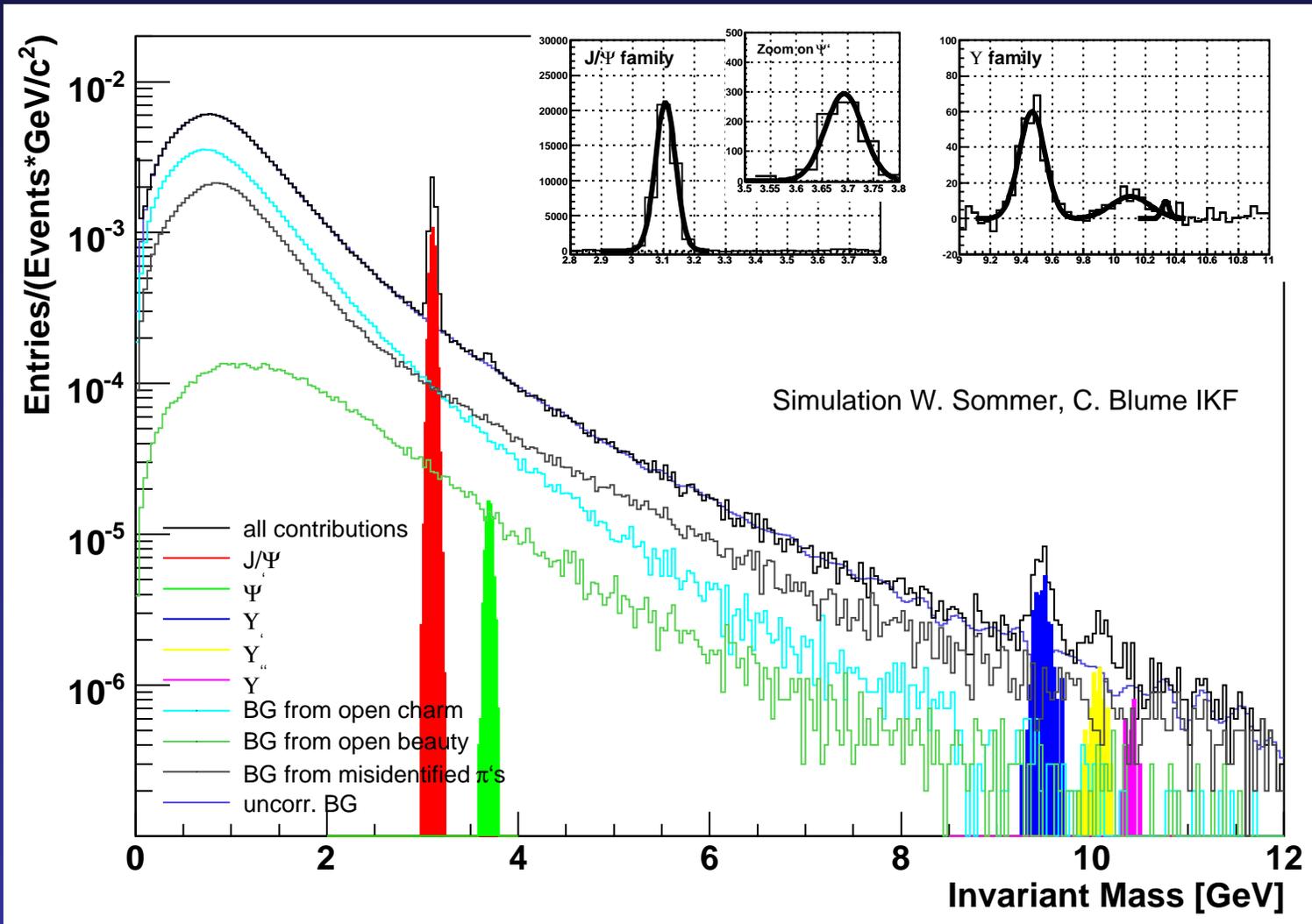
# TRD – Labor in Frankfurt



100 TRD-Module bis 2008



# Quarkonia



„1 Jahr“ ALICE Pb-Pb



ALICE

# Little Bang in ALICE

