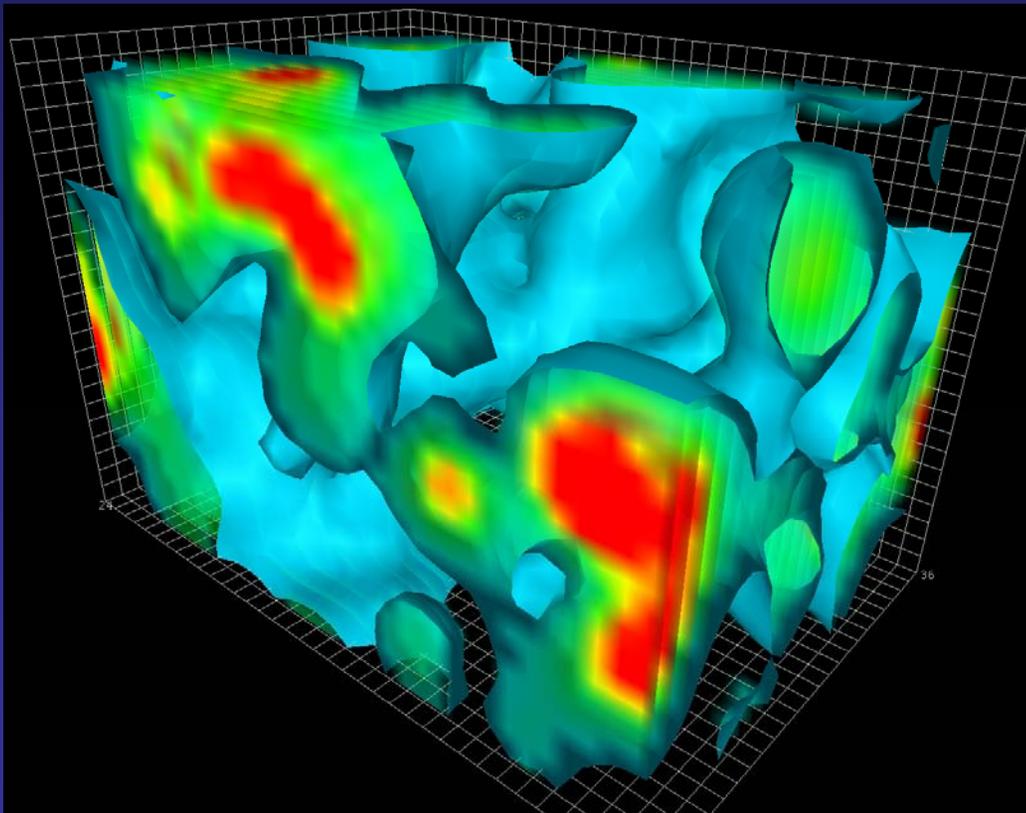


Von Farbladungen und Quarkteilchen: die Starke Wechselwirkung



Harald Appelshäuser
Institut für Kernphysik
JWG Universität Frankfurt

Die vier Kräfte



Gravitation



Starke Kraft



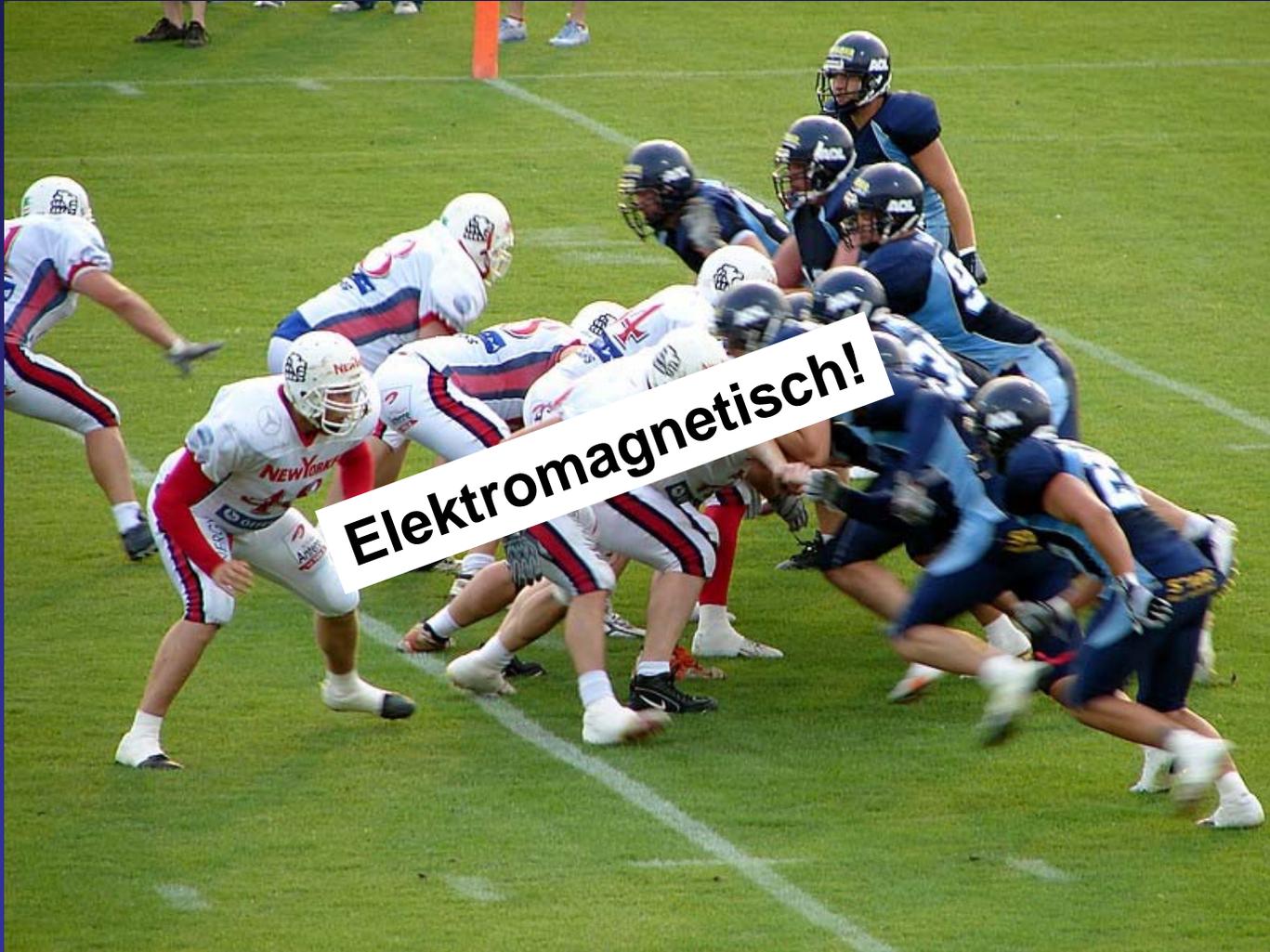
Schwache Kraft



Elektromagnetismus

...und das ist alles!

Die vier Kräfte



Die vier Kräfte



Gravitation

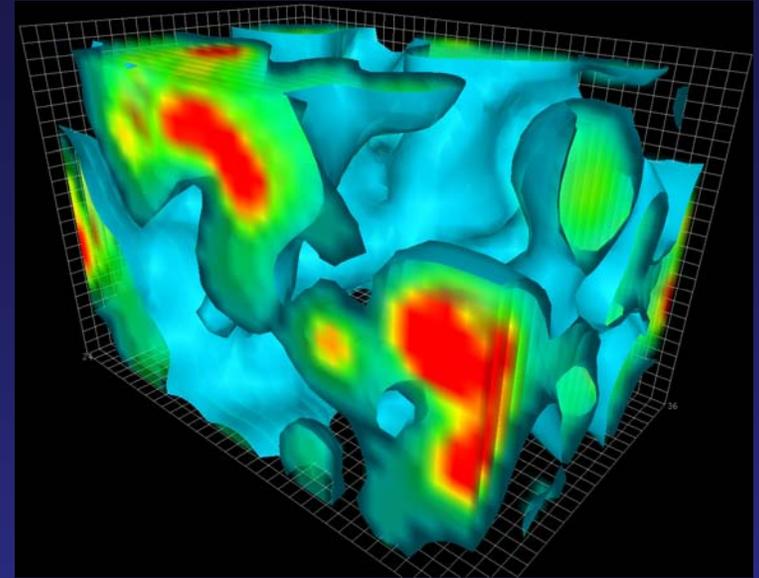
Elektromagnetismus



→ beide sind **langreichweitig**

Die vier Kräfte

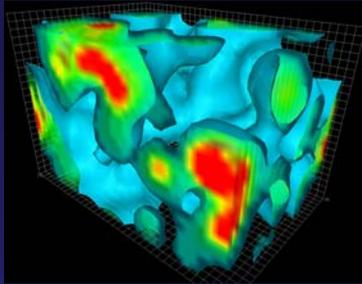
Starke Kraft



Schwache Kraft

sind **kurzreichweitig**
→ auf **subatomaren** Bereich beschränkt

Die vier Kräfte



Starke Kraft

relative Stärke:

~ 1



Elektromagnetismus

10^{-2}



Schwache Kraft

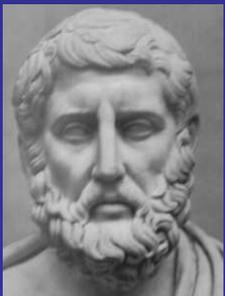
10^{-13}



Gravitation

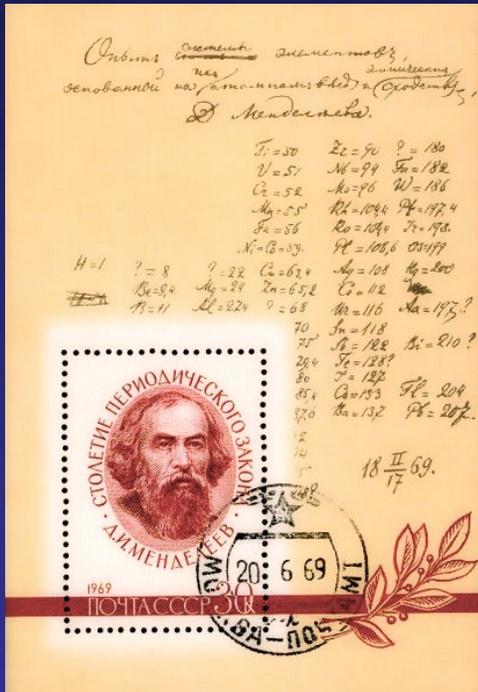
10^{-42}

Antike



Empedokles (5. Jhd.v.Chr.):
Vielfalt der Stoffe entsteht durch **Mischung** der vier Grundsubstanzen

Periodensystem der Elemente



Periodensystem der Elemente

										18									
1												13	14	15	16	17	18		
1	H												He						
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds									

Rel. Atommasse — 12.01 Fe — Feste Elemente
 Elementsymbol — C O — Gasförmige Elemente
 Elementname — Kohlenstoff Hg — Flüssige Elemente (20°C)
 — Te — Radioaktive Elemente

138.91	140.12	144.24	144.24	145	150.36	151.97	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.04	174.97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
227.03	232.04	231.04	238.03	237	244	243	247	247	251	252	257	258	259	260
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Actinium	Thorium	Protactinium	Uran	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium

©Peter Wich - Experimentalkemie.de - Chemie erleben!

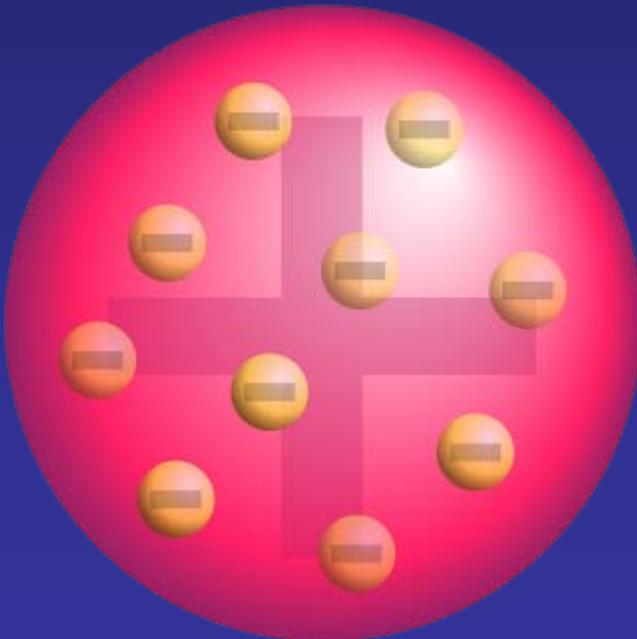
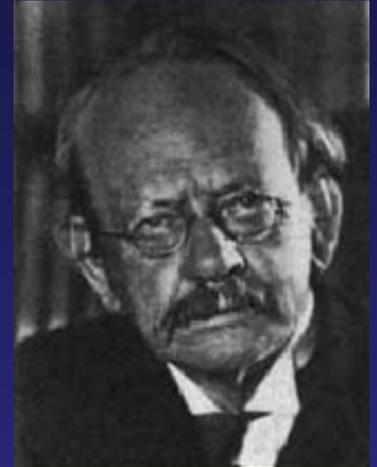
Können so viele „Elemente“ wirklich elementar sein?
 oder

Bestehen sie aus einer viel kleineren Zahl von elementaren Bausteinen?

Atommodelle

J.J. Thomson (1897):

- Atome enthalten elektrisch negative Teilchen → **Elektronen**
- Diese sind eingebettet in eine „Suppe“ **positiver Ladung**

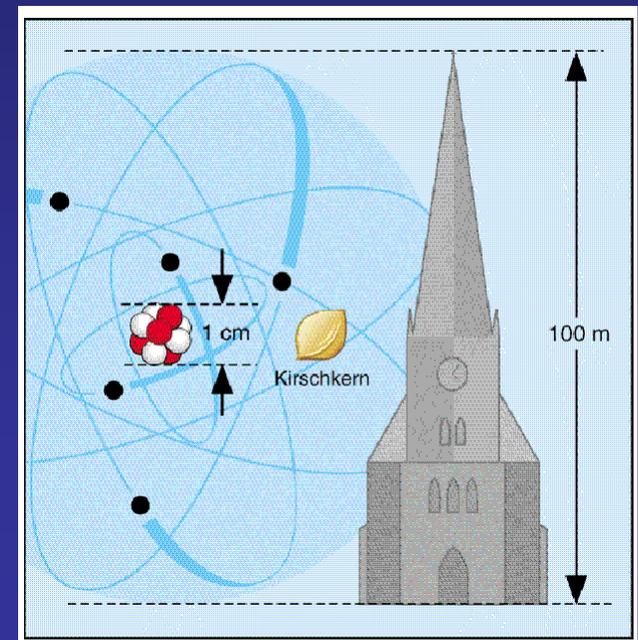
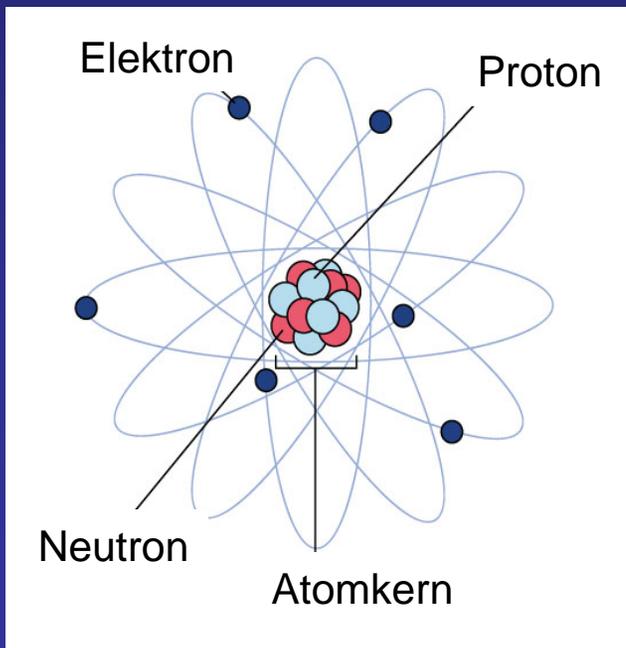
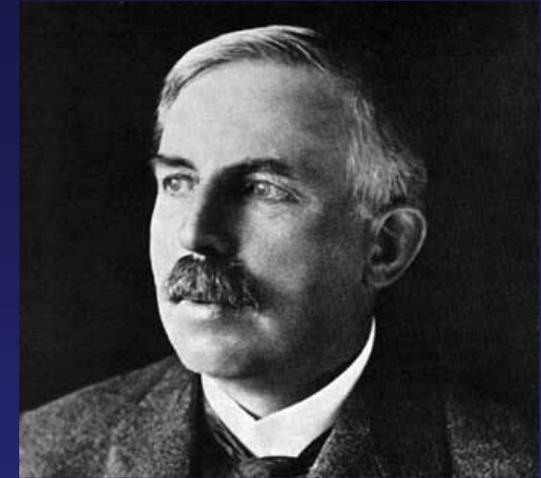


Plum pudding model

Atommodelle

E. Rutherford (1911):

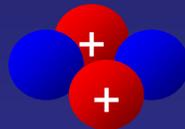
- die positive Ladung ist im Zentrum des Atoms lokalisiert
→ **der Atomkern**
- Elektronen umkreisen den positiven Kern



Starke Kernkraft

Atomkern: elektrisch positive Protonen und neutrale Neutronen (→ **Nukleonen**)

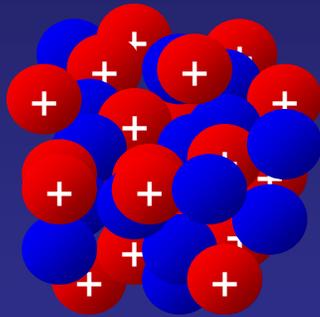
- warum werden Protonen nicht aus dem Kern geschleudert?
- was hält den Kern zusammen?



→ Es muss eine **weitere Kraft** geben, die **stärker** ist als die elektrische Abstoßung!
→ **starke Kernkraft**, die gleichermaßen zwischen Protonen und Neutronen wirkt

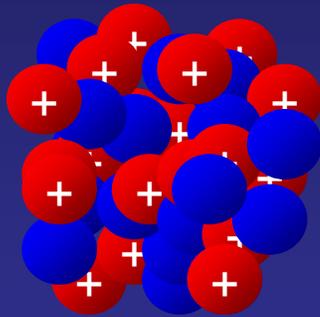
→ **Geburtsstunde der „starken“ Wechselwirkung!**

Können Atomkerne beliebig groß werden?



Starke Kraft ist **kurzreichweitig**
→ nur in der „Nachbarschaft“ spürbar

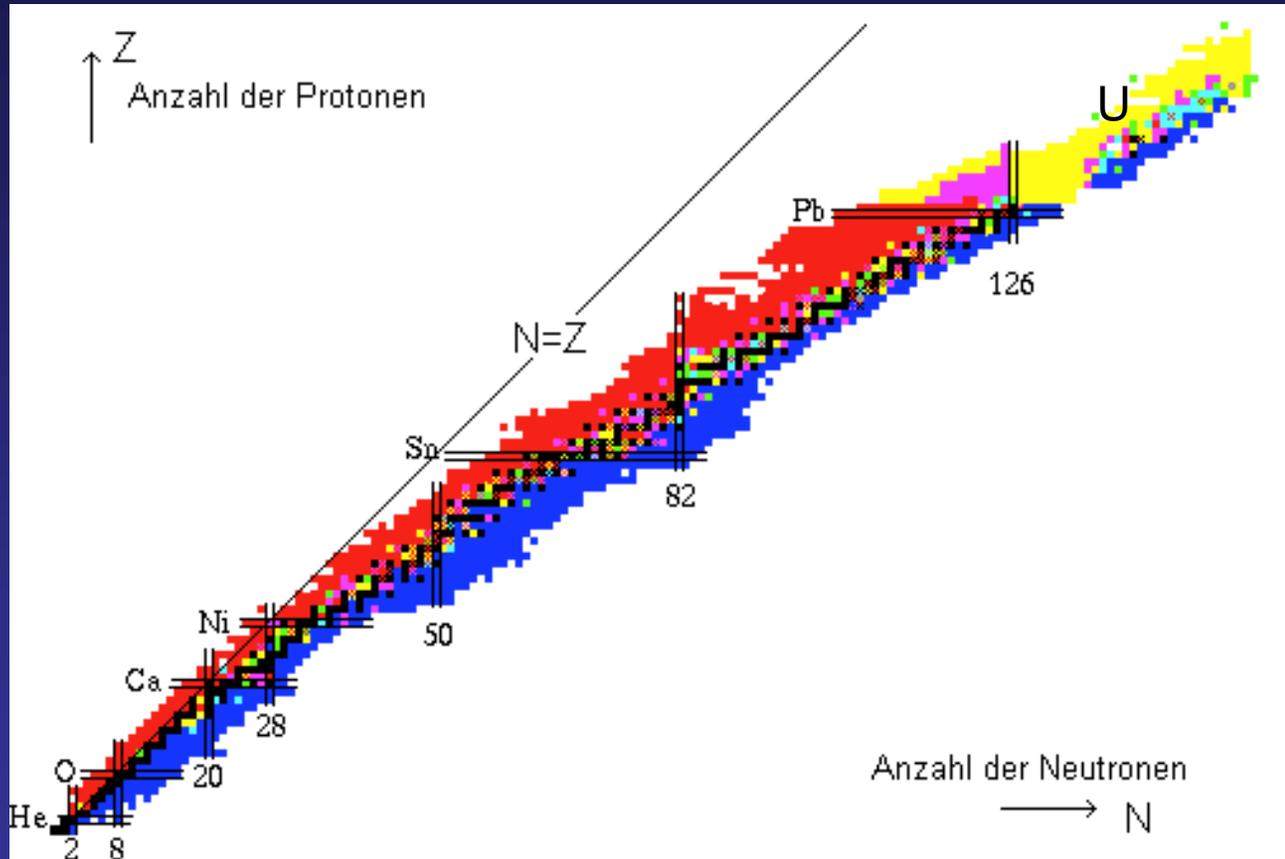
Elektromagnetische Abstoßung ist **langreichweitig**
→ addiert sich auf!!



Starke Kraft ist **kurzreichweitig**
→ nur in der „Nachbarschaft“ spürbar

Elektromagnetische Abstoßung ist **langreichweitig**
→ addiert sich auf!!

Nuklidtafel



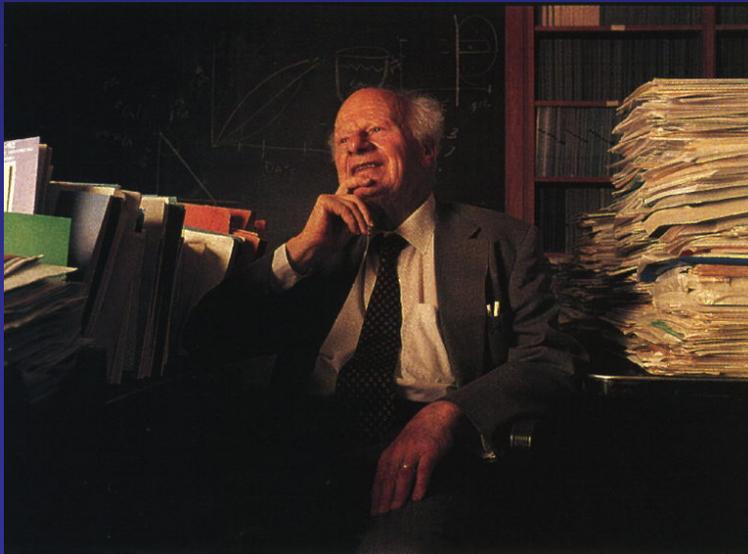
Nuklide mit mehr als
~240 Nukleonen sind
nicht stabil.

**Starke Kraft bestimmt die Zusammensetzung der materiellen Welt!
Ohne sie gäbe es keine Atomkerne und damit keine Materie!**

Theorie der starken Kernkräfte

„More man-hours have been given to this problem than any other scientific question in the history of mankind.“

Hans Bethe 1953



H.B.

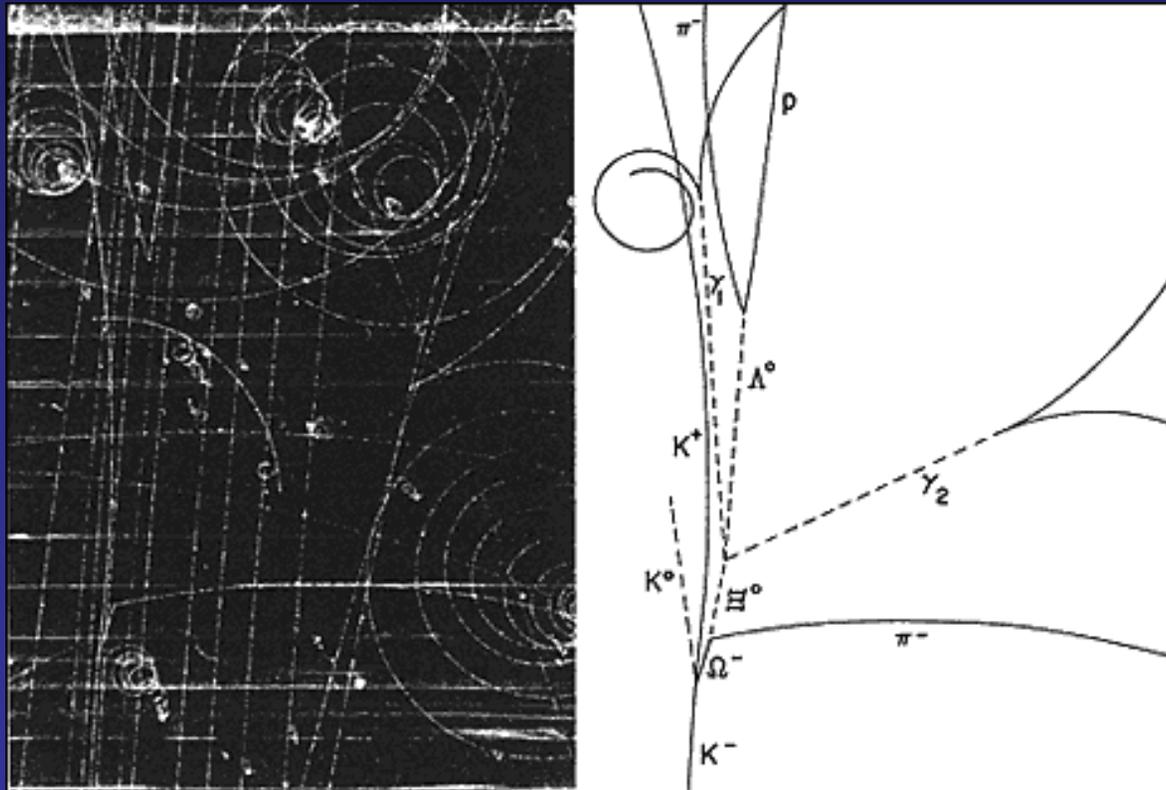
Nobelpreis 1967

Ehrendoktorwürde Uni Frankfurt 2004

Standardmodell der Teilchenphysik

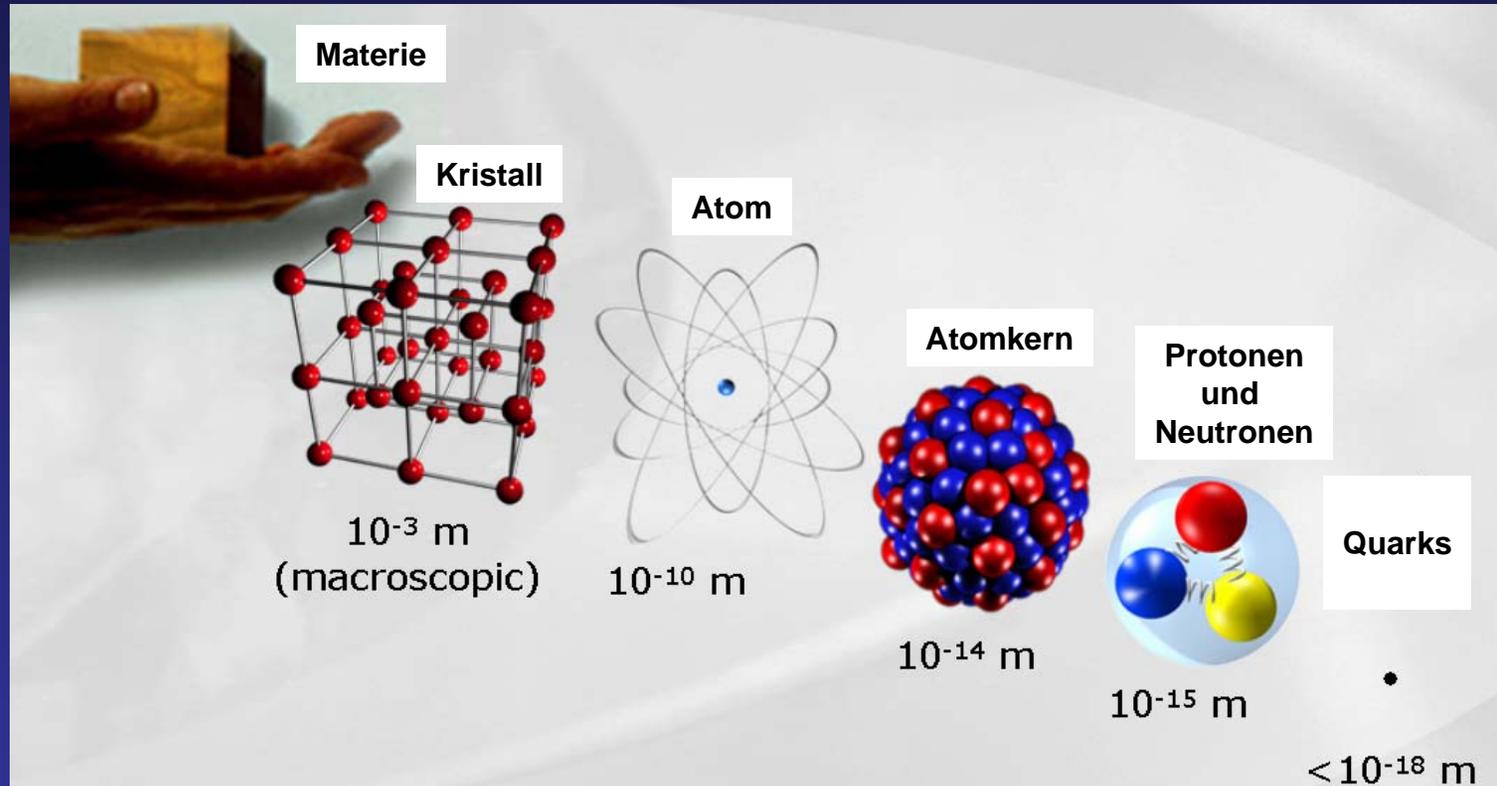
1930er Jahre: e, p, n

ab 1940er Jahre: π , μ , K, Λ , ρ , ω , Σ , Ξ , ...



- 1960er Jahre: Teilchenzoo mit über 100 „Elementarteilchen“
- So viele Teilchen können nicht „elementar“ sein!
- Gibt es noch kleinere Bausteine, aus denen p, n und die anderen Teilchen aufgebaut sind?
- Welches sind die wirklich **elementaren** Bausteine der Natur?

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 up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ 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).

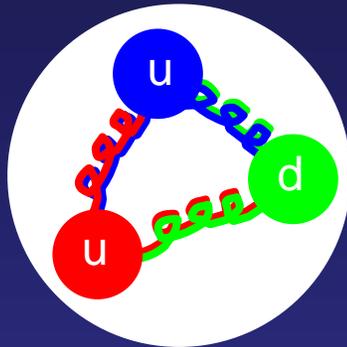
Standardmodell der Teilchenphysik



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

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

Quarks und Hadronen



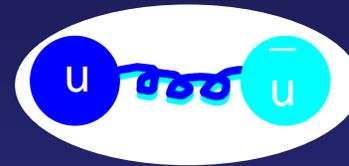
Baryonen (qqq)

z.B.

Proton (uud)

Neutron (udd)

...



→ Hadronen

Mesonen (qq̄)

z.B.

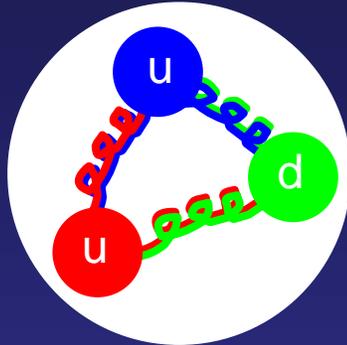
Pion ($u\bar{u}, d\bar{d}, d\bar{u}, u\bar{d}$)

...

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



Quarks und Hadronen



Baryonen (qqq)

z.B.

Proton (uud)

Neutron (udd)

...

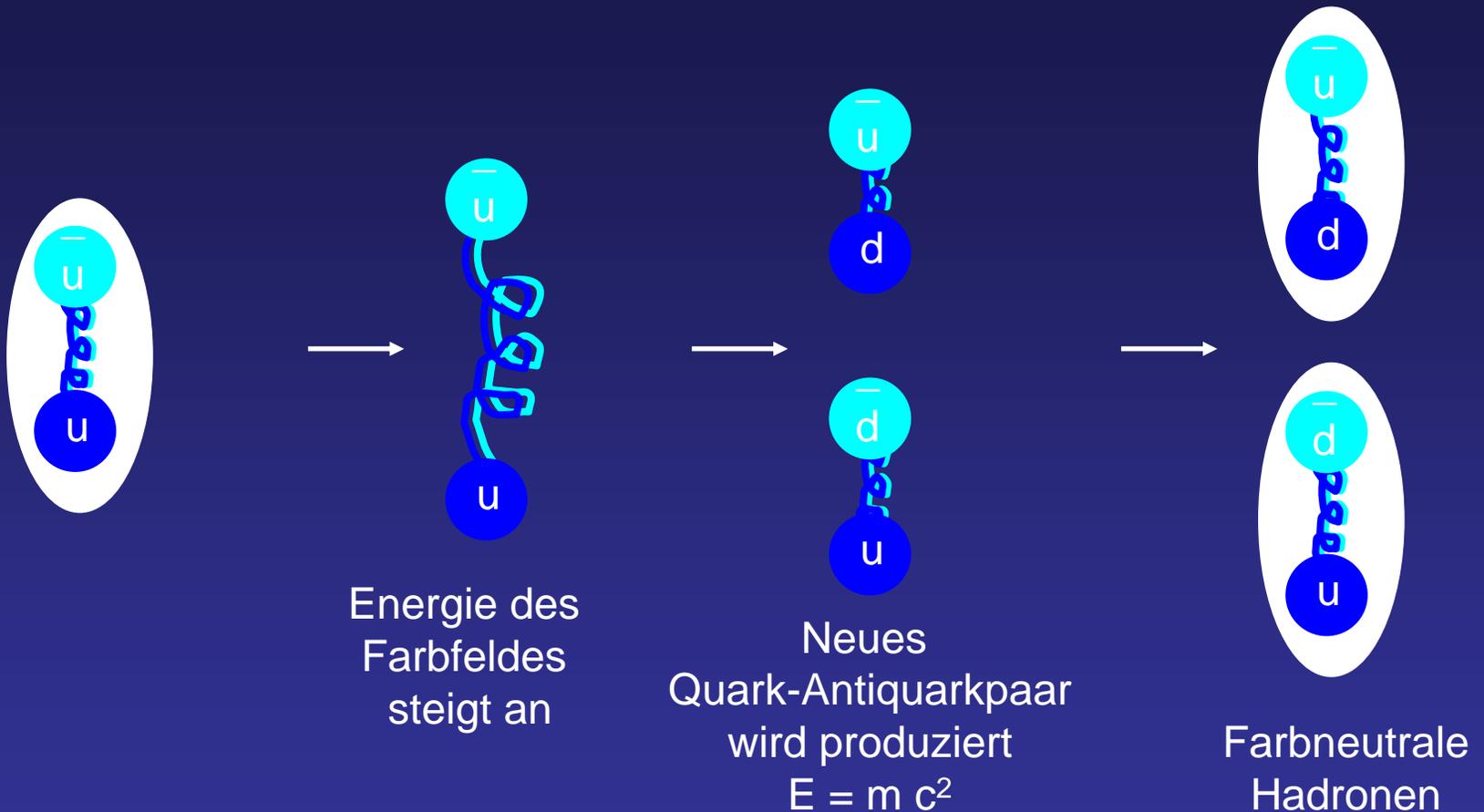
Starke Wechselwirkung:

Austausch von Gluonen zwischen Quarks

Kernkräfte zwischen Nukleonen:

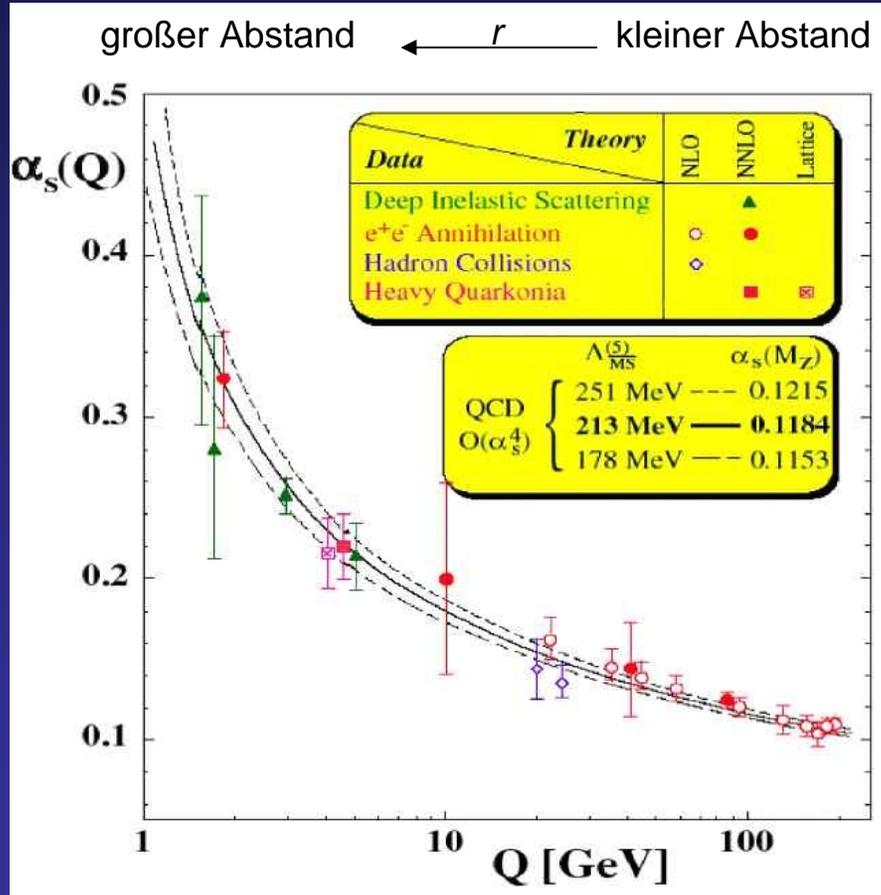
Restwechselwirkung, ähnlich den Bindungskräften
in Molekülen

Farbeinschluss



→ Freie Quarks sind nicht beobachtbar!

Laufende Kopplung und asymptotische Freiheit



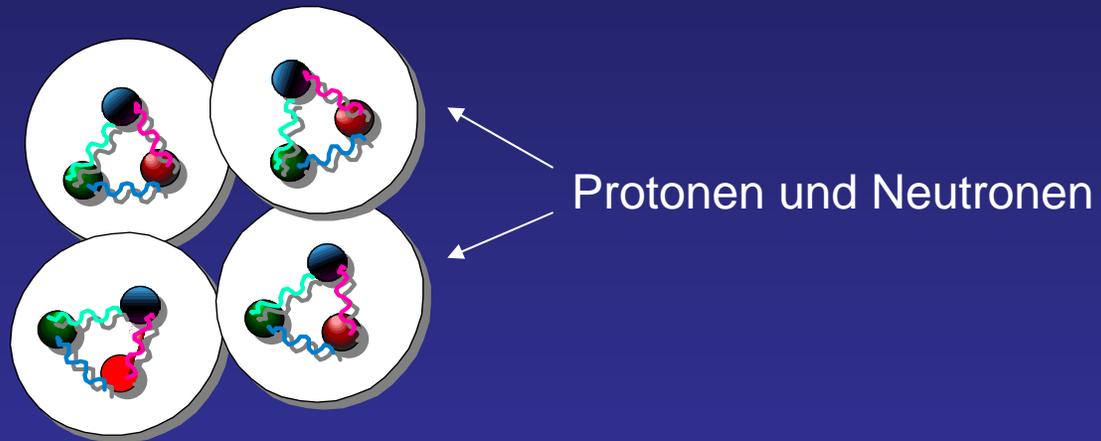
Die starke Kopplungskonstante ist *nicht* konstant, sondern hängt vom Abstand ab (*running coupling constant*).

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

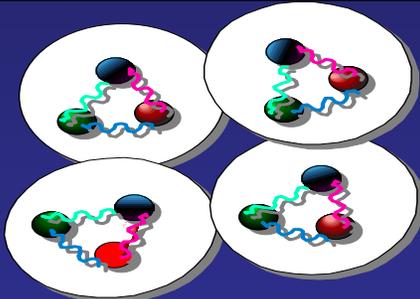
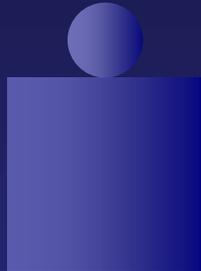
Gross, Politzer, Wilczek (1974)
Nobelpreis 2004

Confinement

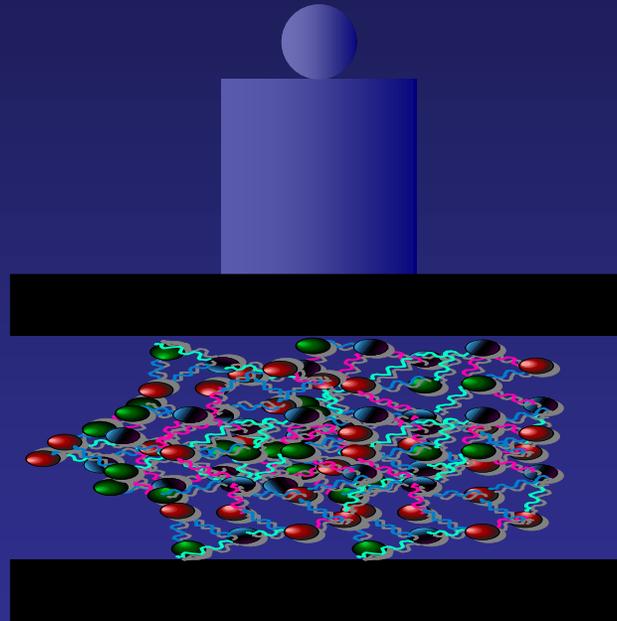
Atomkern



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



Deconfinement

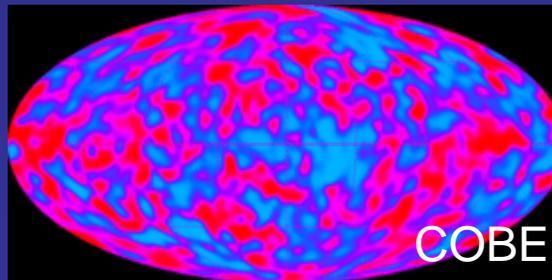
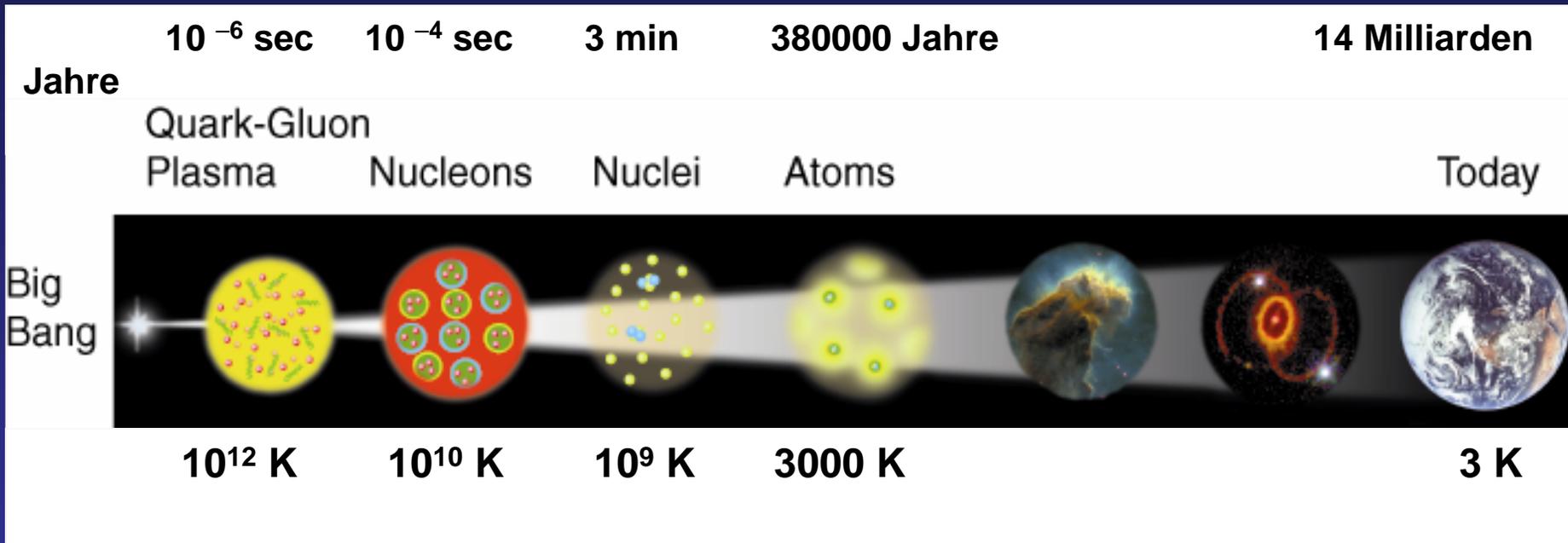


Neuer Zustand von Materie!

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

Quark-Gluon-Plasma (QGP)

Frühes Universum

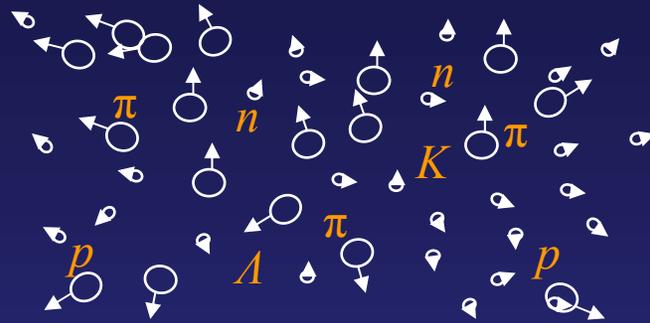


Nobelpreis Physik 2006:
J.C. Mather
G.F. Smoot

Kern-Kern Kollisionen bei hohen Energien

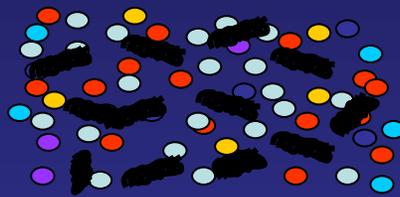
Zeit

Expansion und
Entkopplung



farbneutrale Hadronen
Little Bang

Feuerball



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

Kompression und Heizen



vor dem Stoß



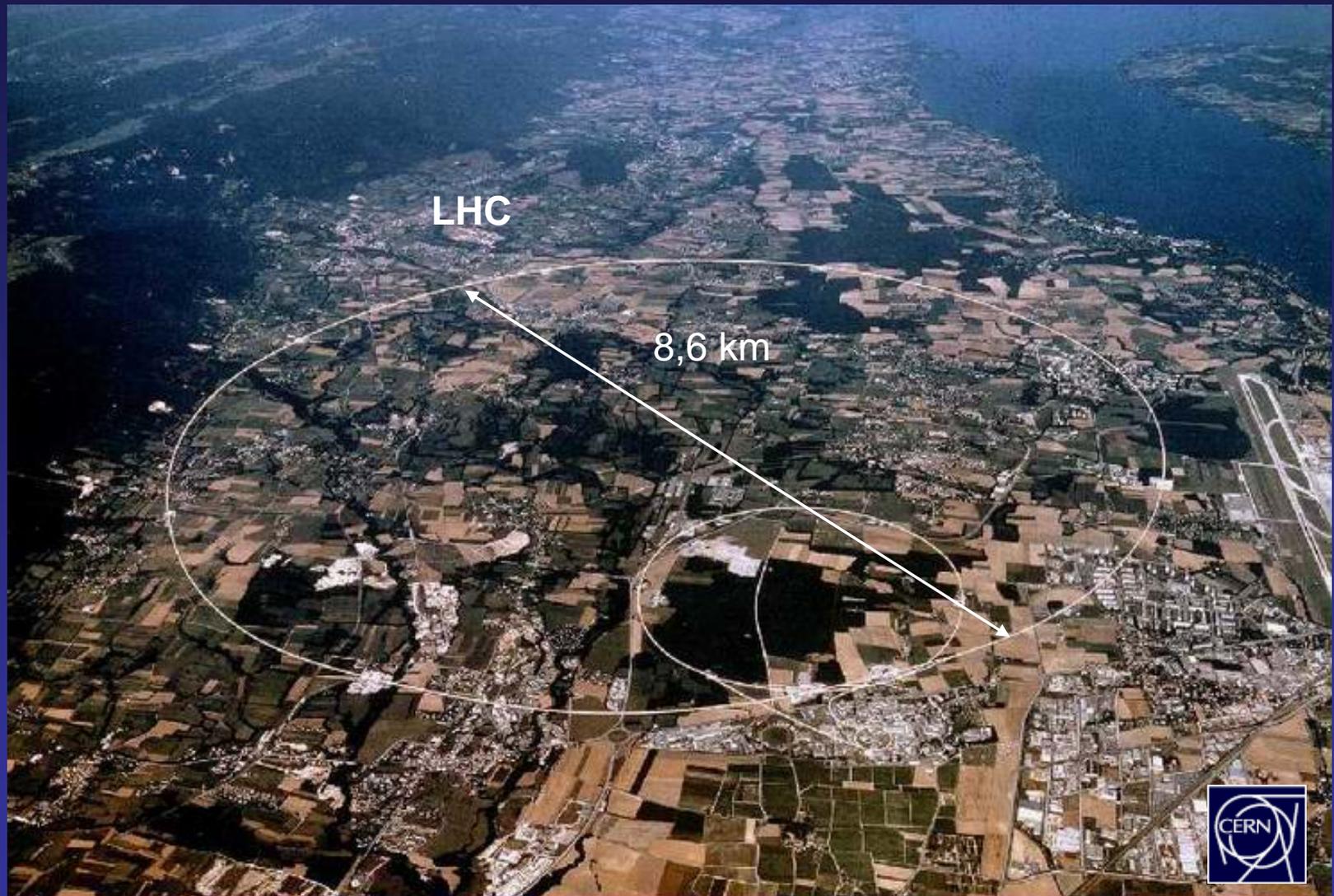
normale Kernmaterie

$\rho_0 = 0.17 \text{ /fm}^3$
 $\epsilon_0 = 0.16 \text{ GeV/fm}^3$

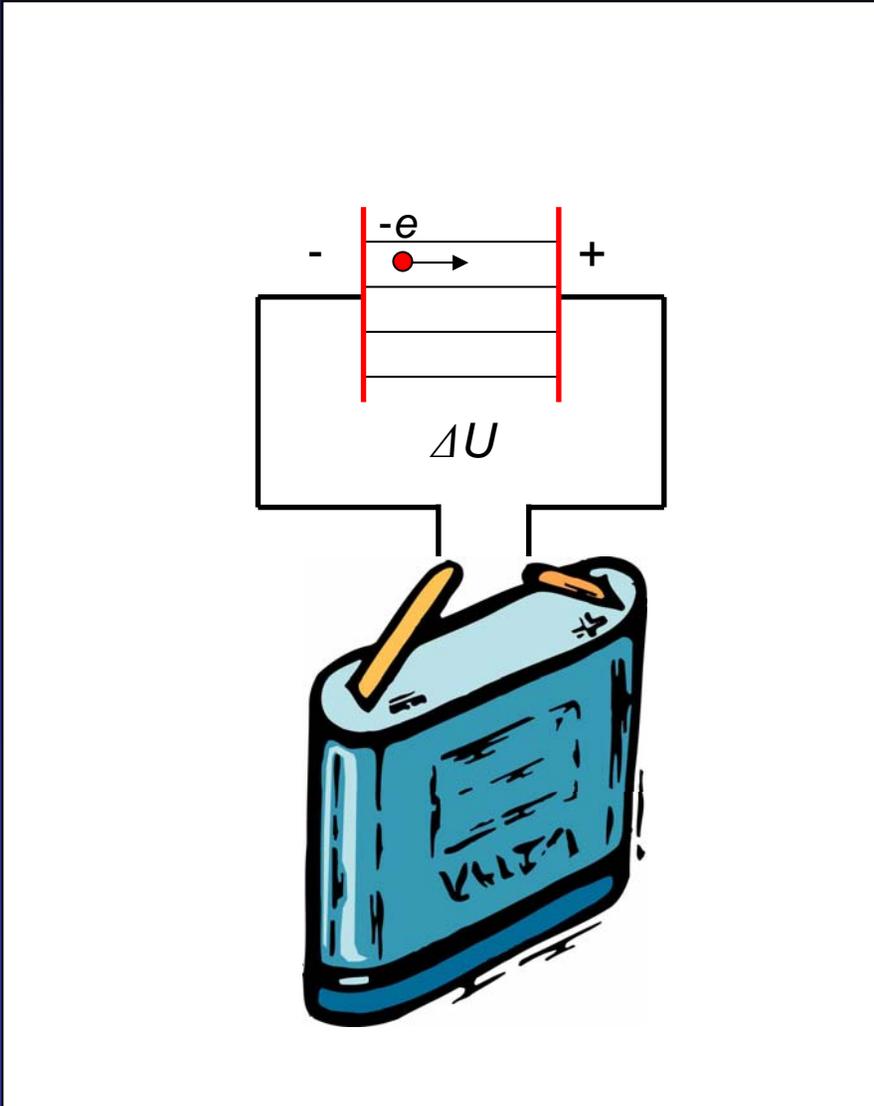
Mirkoskope der Teilchenphysiker



Large Hadron Collider (LHC)



Beschleuniger



Prinzip:

Elektrisch geladene Teilchen können in einem elektrischen Feld beschleunigt werden.

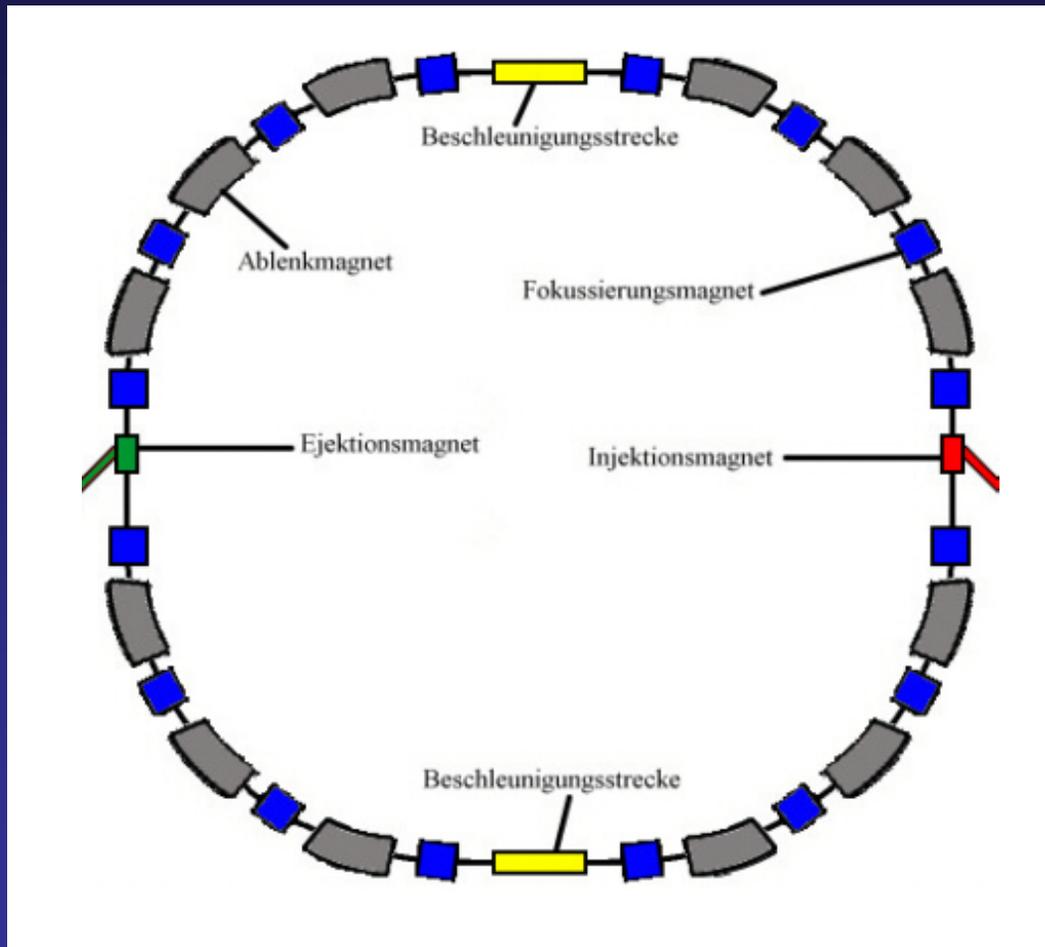
→ Kinetische Energie

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

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

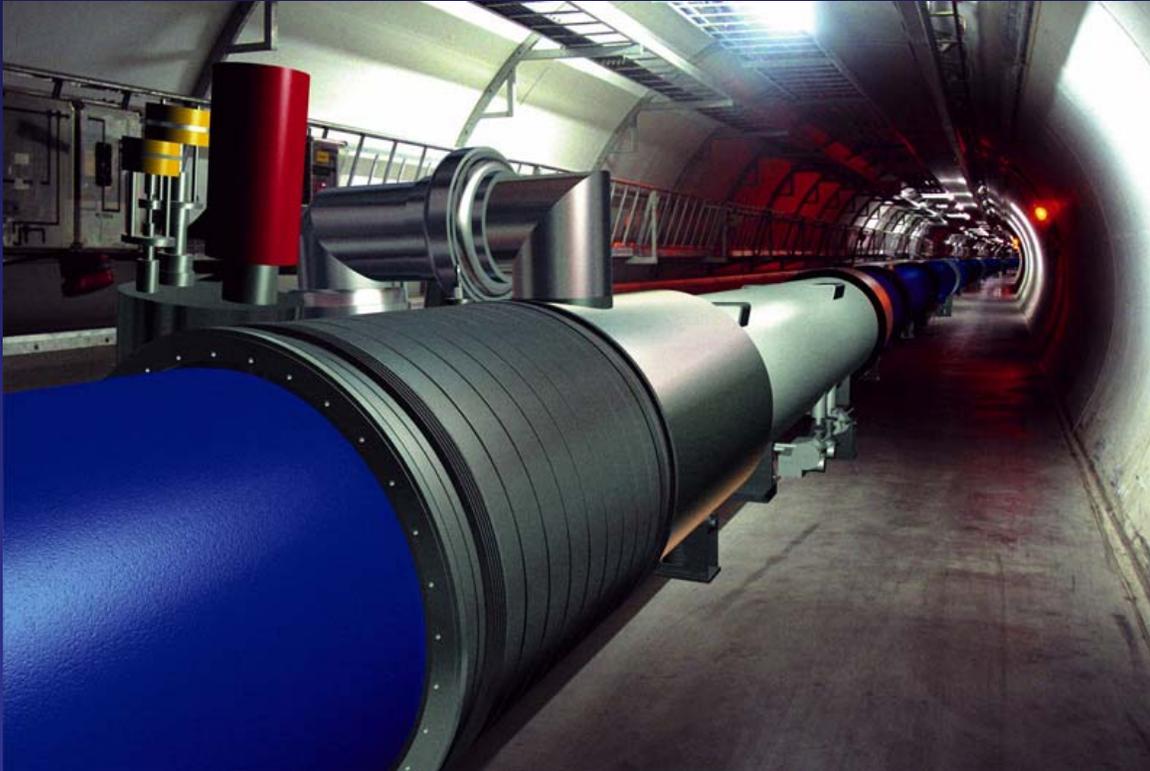
→ sehr starke Magnete

→ 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

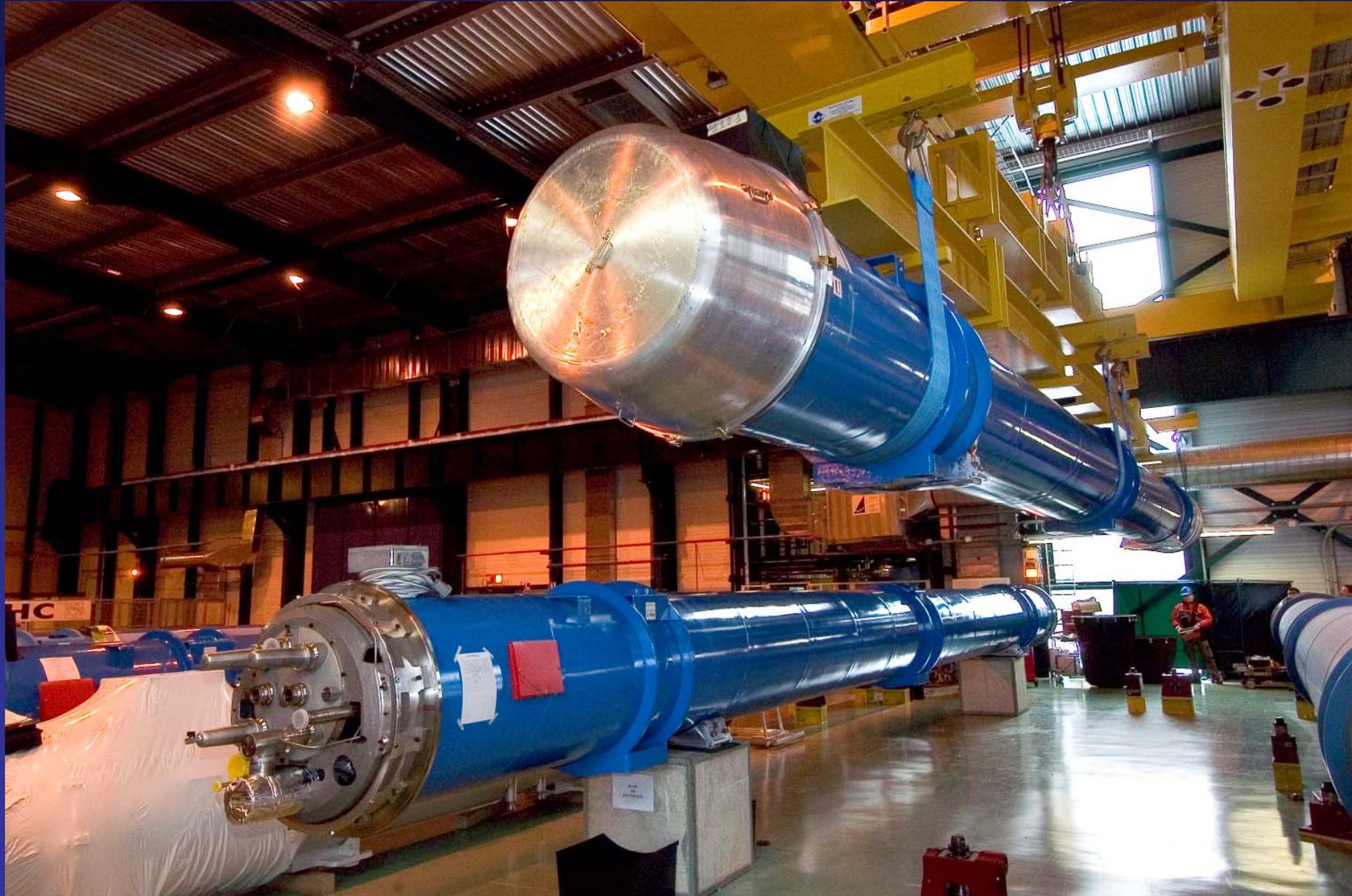
- supraleitend \rightarrow (-271.3°C)

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!

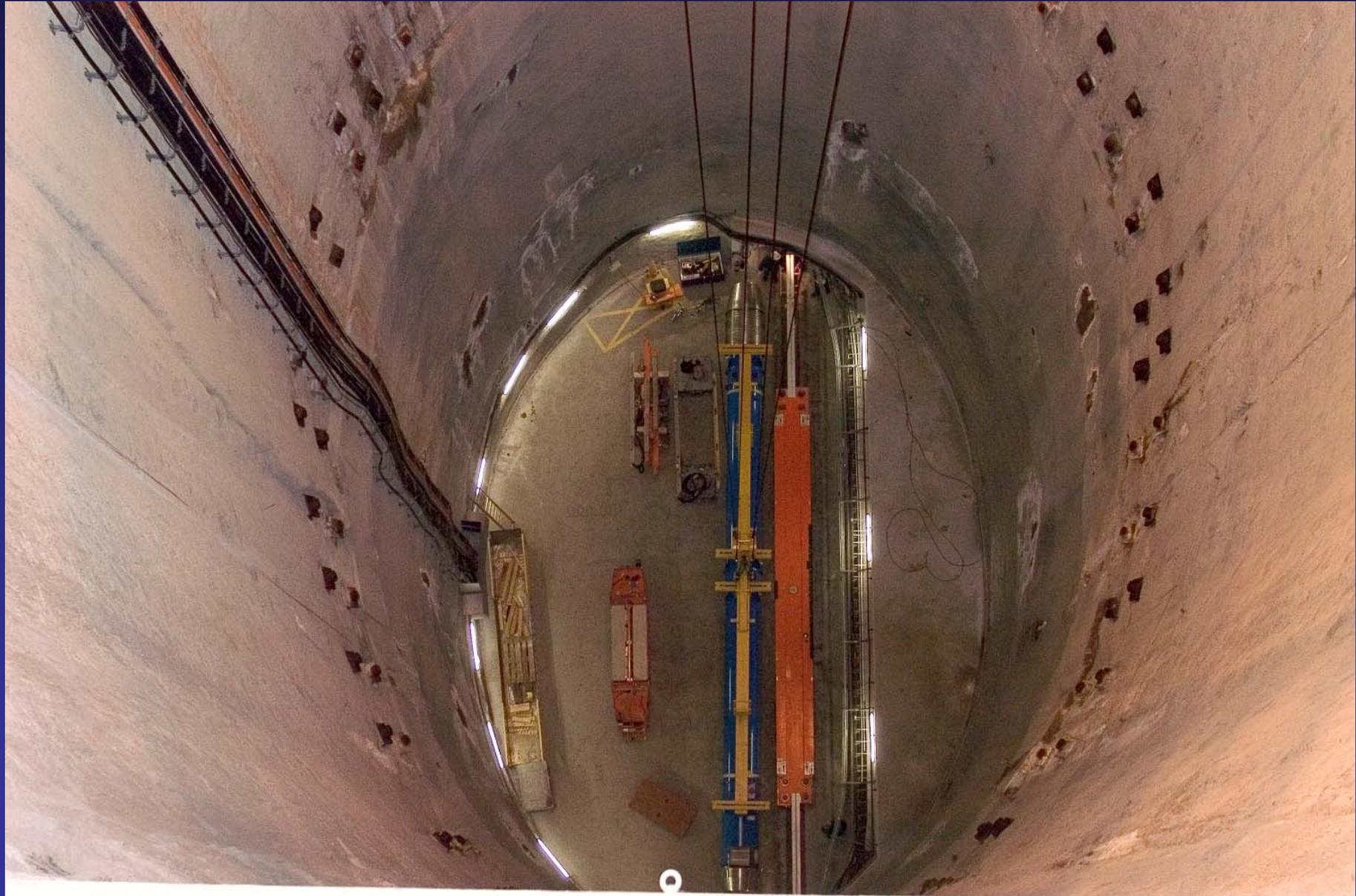
Large Hadron Collider (LHC)



Large Hadron Collider (LHC)



Large Hadron Collider (LHC)



Large Hadron Collider (LHC)

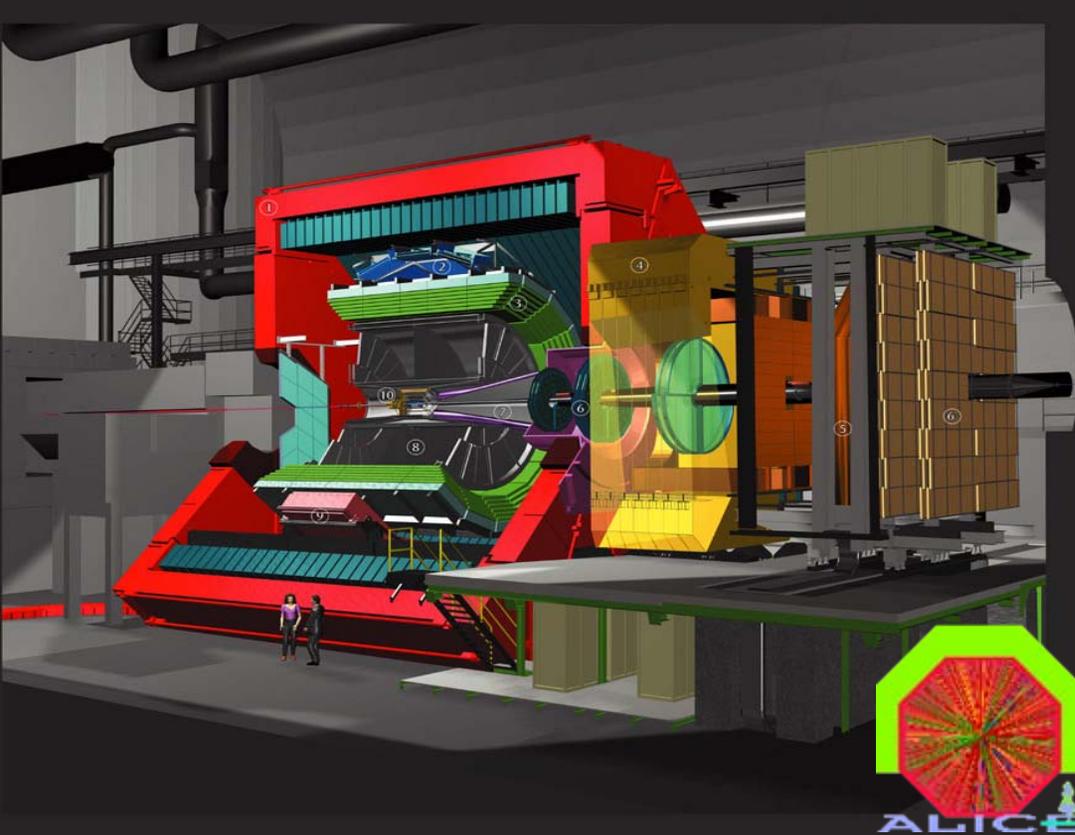


Geplanter Start: Sommer 2008



8,6 km

LHC



ALICE collaboration

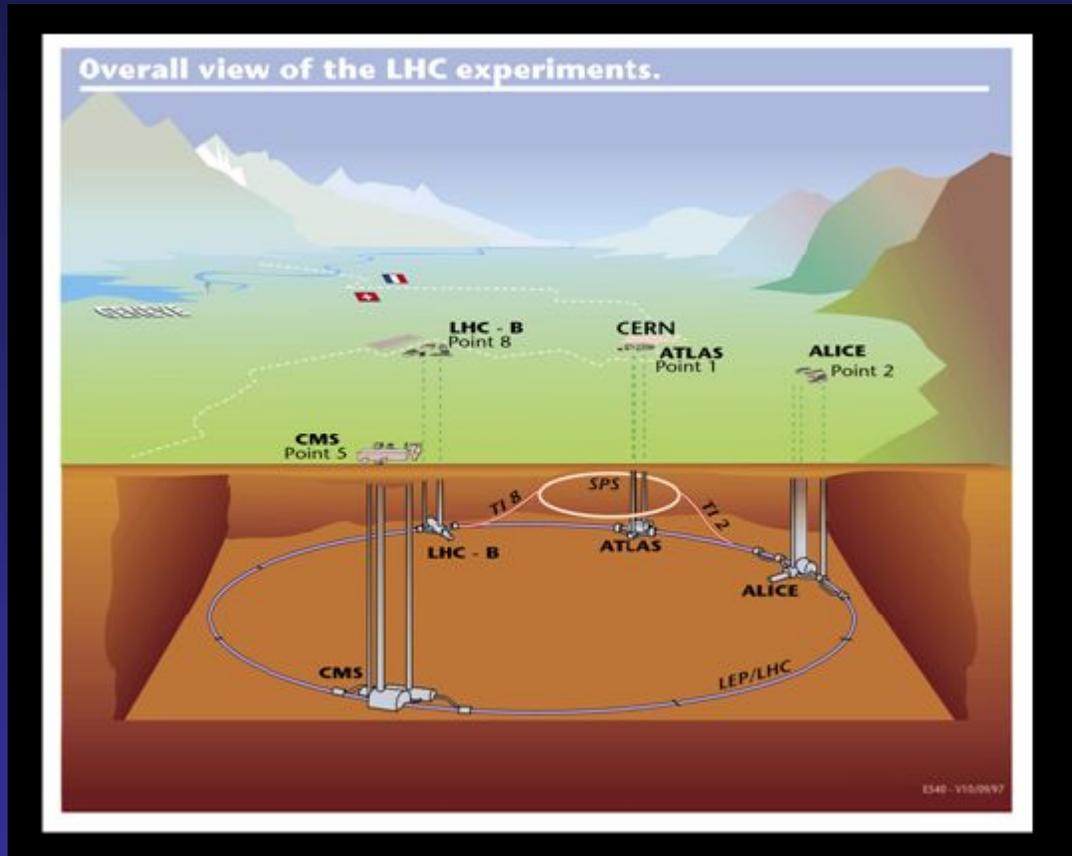
- 1000 Wissenschaftler
- 94 Institutionen
- 29 Länder

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



LHC

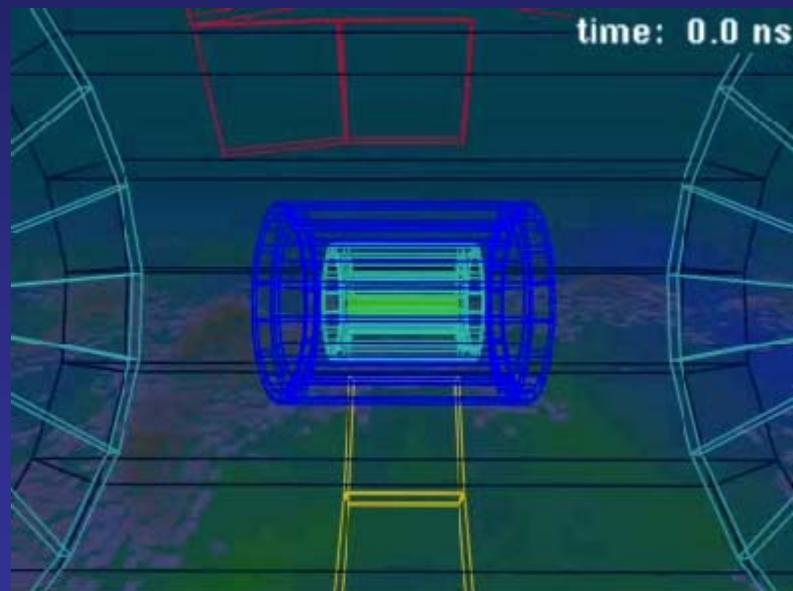
Pb-Pb Kollision im LHC



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**

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

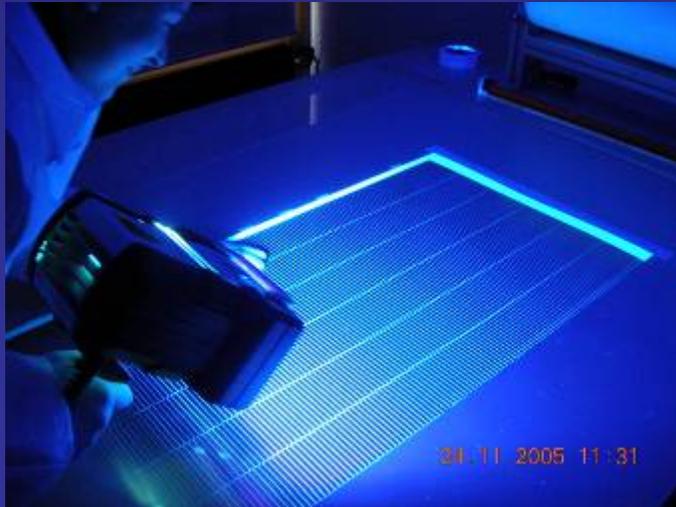
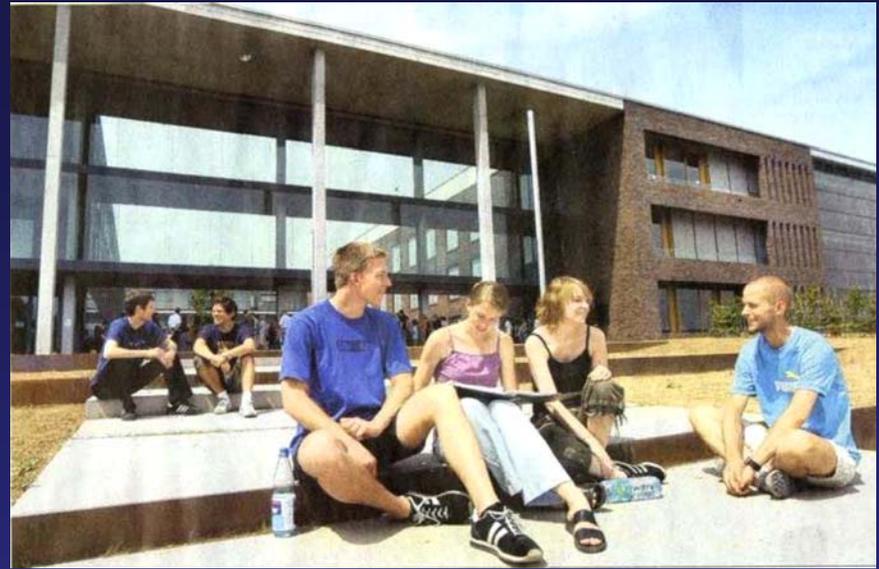
→ Impulsbestimmung

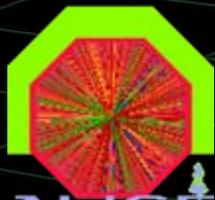
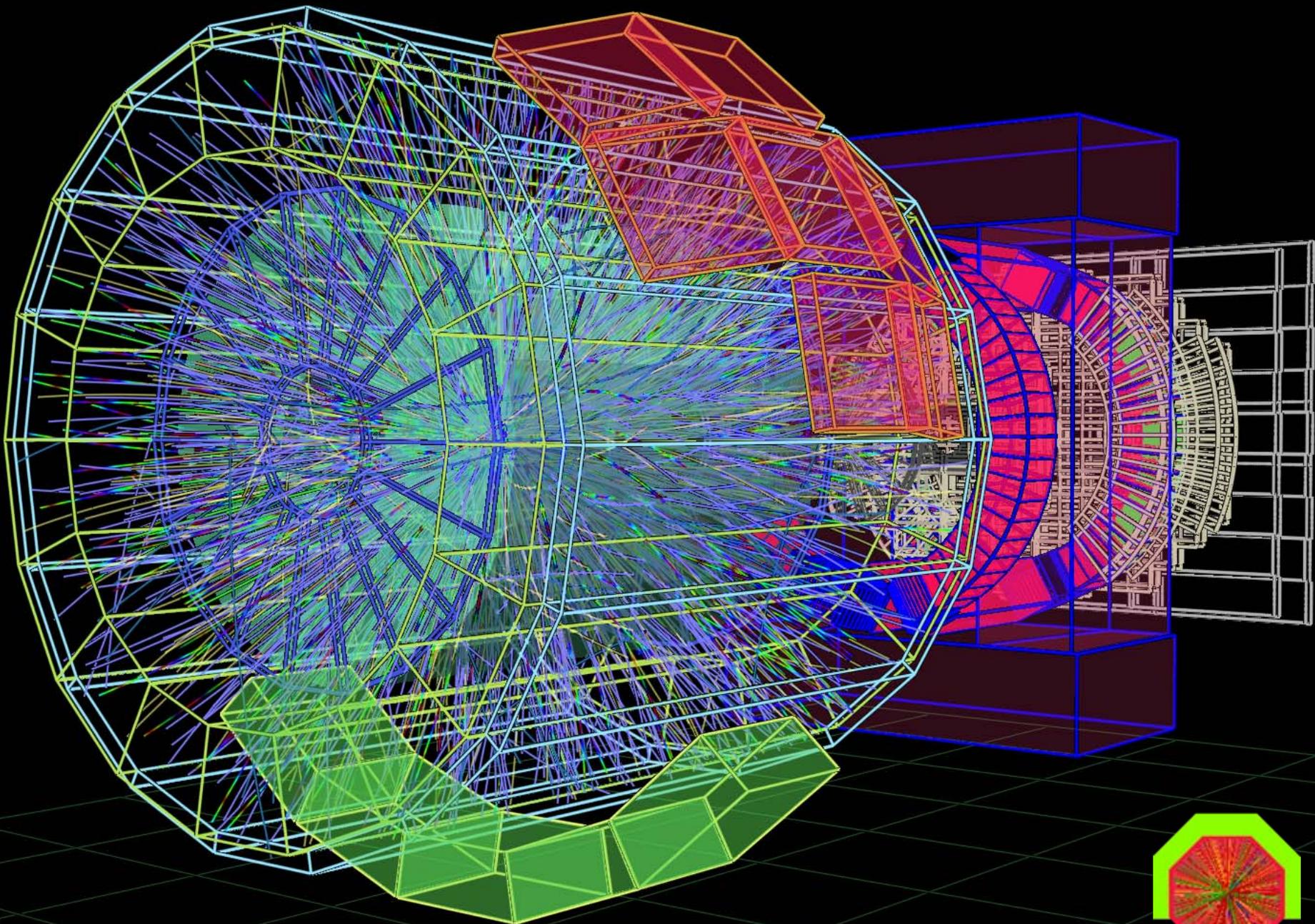




ALICE

TRD – Labor in Frankfurt





ALICE

