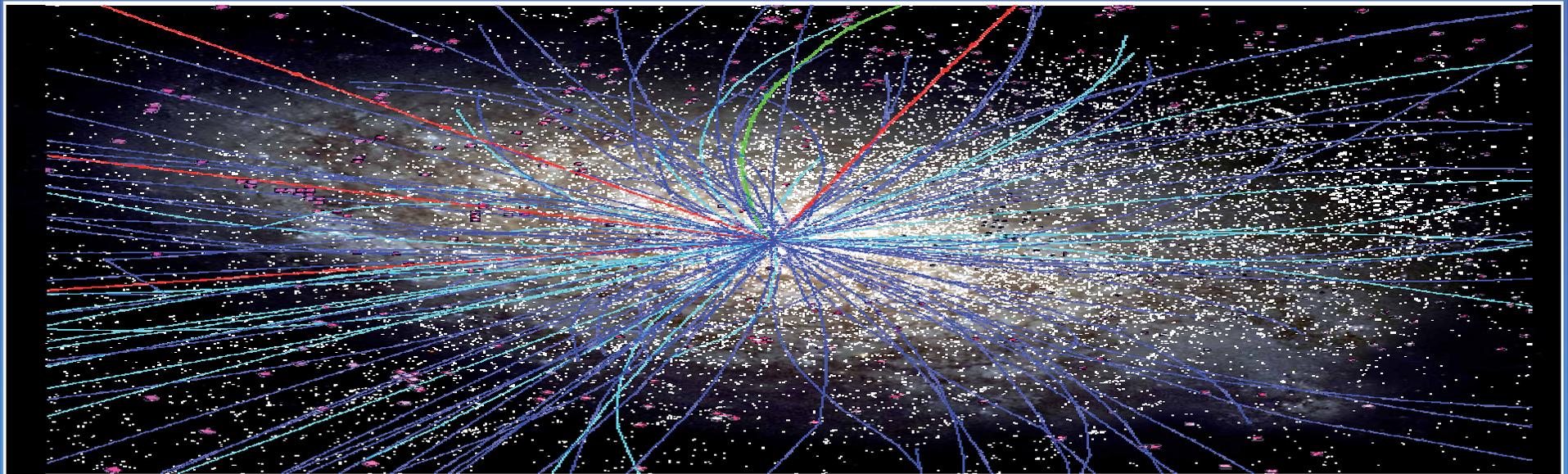


# Von den höchsten Energien zu den kleinsten Teilchen: dem Urknall auf der Spur



Prof. Dr. Thomas Müller, KIT



**ZWEI FUNDAMENTALE FRAGEN :**

**WIE IST DAS UNIVERSUM ENTSTANDEN ?**

**WAS SIND SEINE FUNDAMENTALEN BAUSTEINE UND GESETZE?**

**BEIDE FRAGEN SIND MITEINANDER VERKNÜPFT :**

**VERSTÄNDNIS VON DER STRUKTUR DER MATERIE UND IHRER KRÄFTE**

**↔ BESSERES WISSEN ÜBER IHREN URSPRUNG**

**FÜR DIE SUCHE NACH DEN GESETZMÄßIGKEITEN :**

**SCHAFFE IM LABOR ZUSTÄNDE WIE IN DEN ERSTEN ANFÄNGEN DES  
UNIVERSUMS**

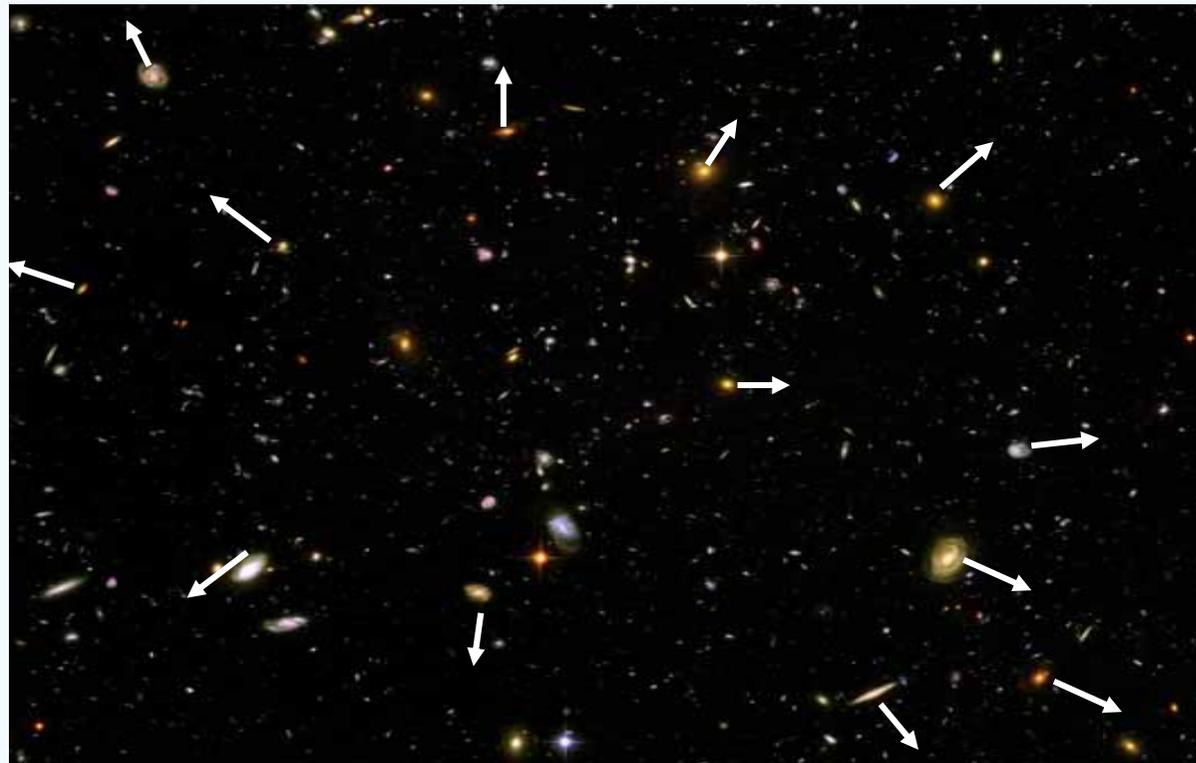
**1. BEOBACHTUNG:**

**IM UNIVERSUM GIBT ES 75% Wasserstoff, 24% Helium, <1% übrige Elemente  
→ ELEMENTSYNTHESE IN DEN ERSTEN DREI MINUTEN**

**2. BEOBACHTUNG:**

**DIE GALAXIEN FLIEGEN  
VON EINANDER WEG  
(Hubble 1930):**

**JE WEITER WEG,  
DESTO SCHNELLER**

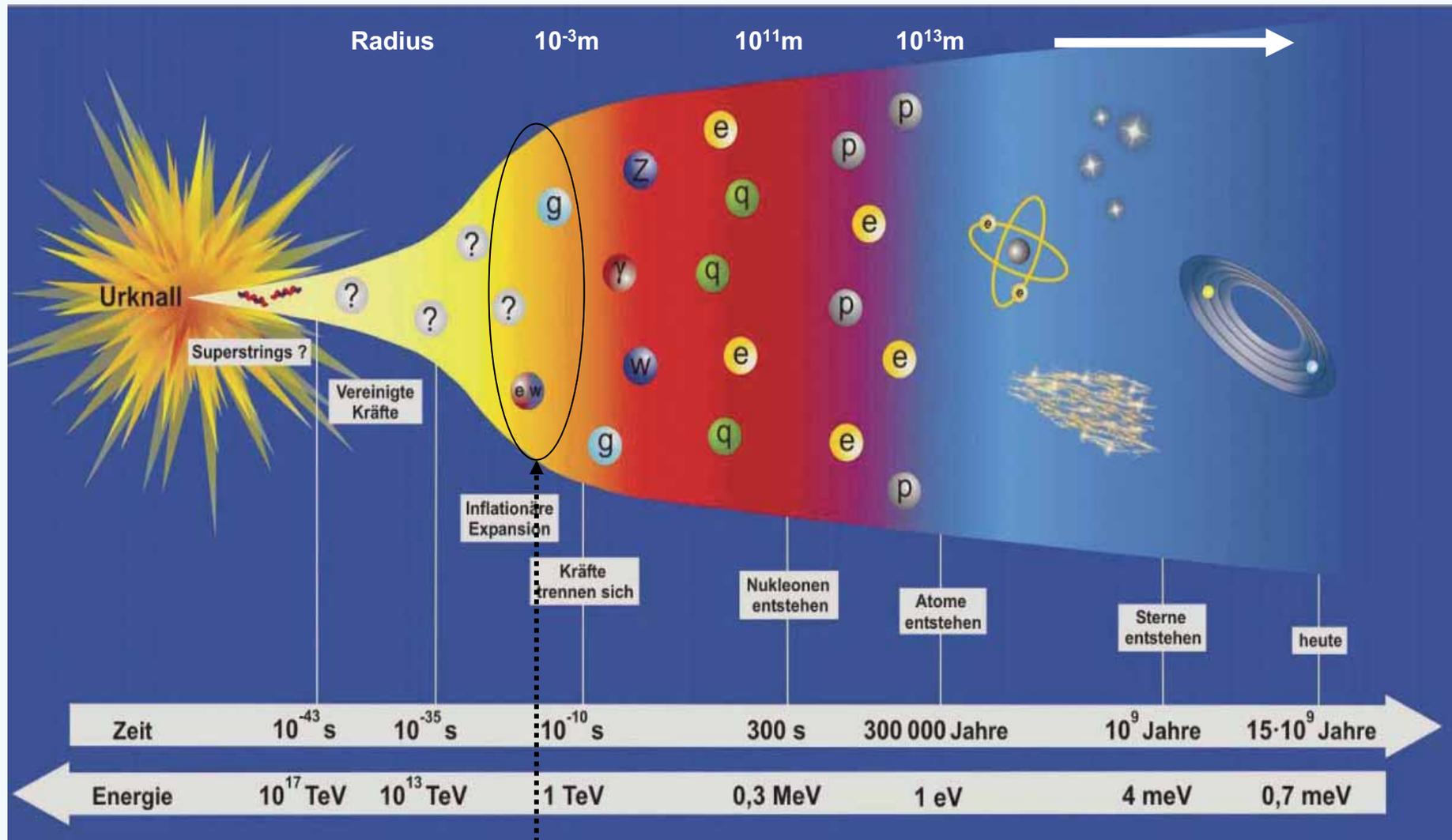


**3. BEOBACHTUNG:**

**KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG (Penzias, Wilson 1965):**

**→ 2.7 K TEMPERATURSTRAHLUNG: „LICHTBLITZ“ DES URKNALLS**



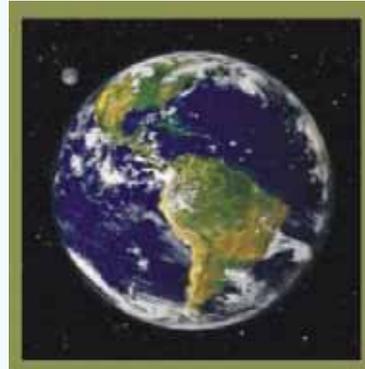


**Large Hadron Collider**

$10^{26} \text{ m} = 100.000.000.000.000.000.000.000.000 \text{ m}$



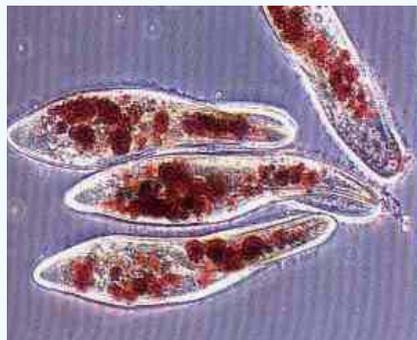
$10^{26} \text{ m}$   
Teleskop



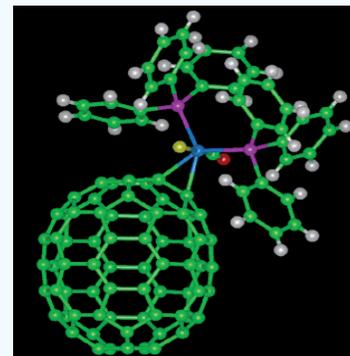
$10^7 \text{ m}$   
Fernrohr



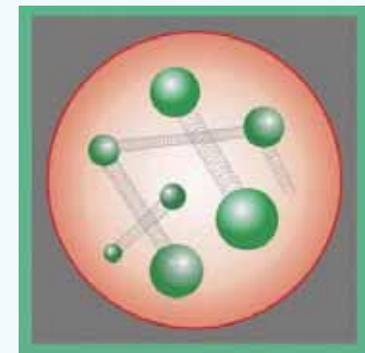
$10^1 \text{ m}$   
Auge



$10^{-4} \text{ m}$   
Mikroskop



$10^{-8} \text{ m}$   
Elektronenmikroskop



$10^{-15} \text{ m}$   
Teilchenbeschleuniger

$10^{-15} \text{ m} = 0.000.000.000.000.001 \text{ m}$

**Was sind die kleinsten Teilchen (woraus besteht die Materie) ?**  
**Brauche stärkstes Mikroskop der Welt !**

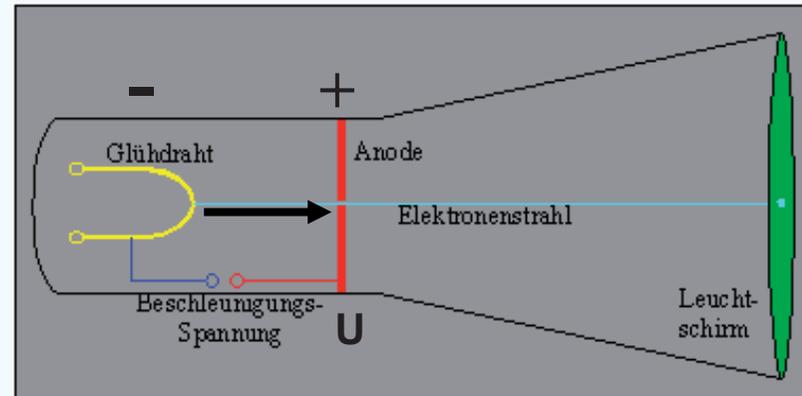
**Welche Teilchen und Kräfte gibt es bzw. gab es im frühen Universum  
(was sind die schwersten Bausteine der Natur) ?**  
**Brauche die höchsten Energien und Kollisionsraten, um sie zu erzeugen !**

→ **Moderne Teilchenbeschleuniger**

Wie kann man die Teilchen beobachten ?

→ **Moderne Detektoren**

## PRINZIP EINES TEILCHENBESCHLEUNIGERS: DIE BRAUNSCHE RÖHRE



Beschleunigungsspannung  $U = 1\text{Volt}$

$\Rightarrow$  kinetische Energie =  $1\text{eV}$

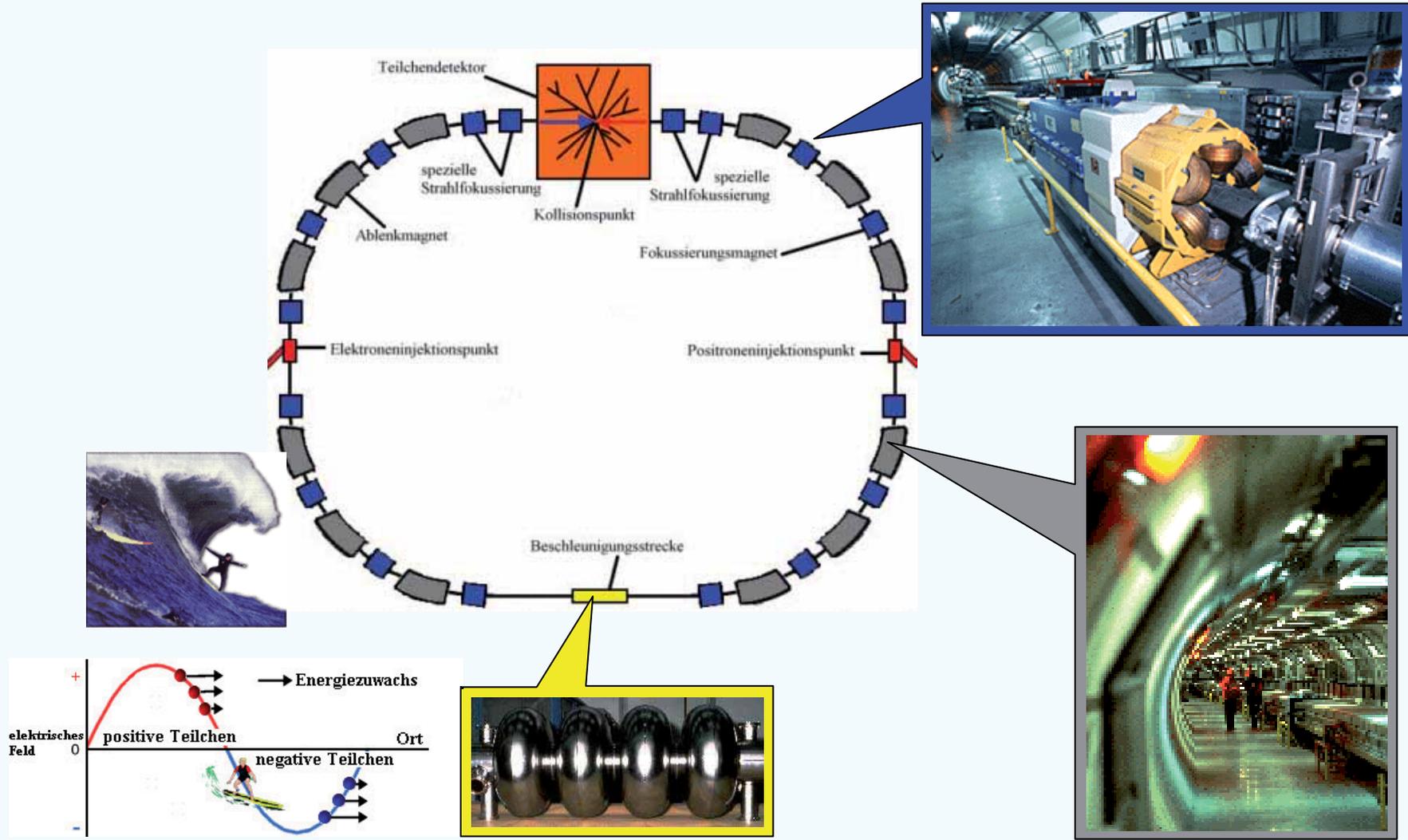
Beschleunigungsspannung  $U = 10000\text{Volt}$

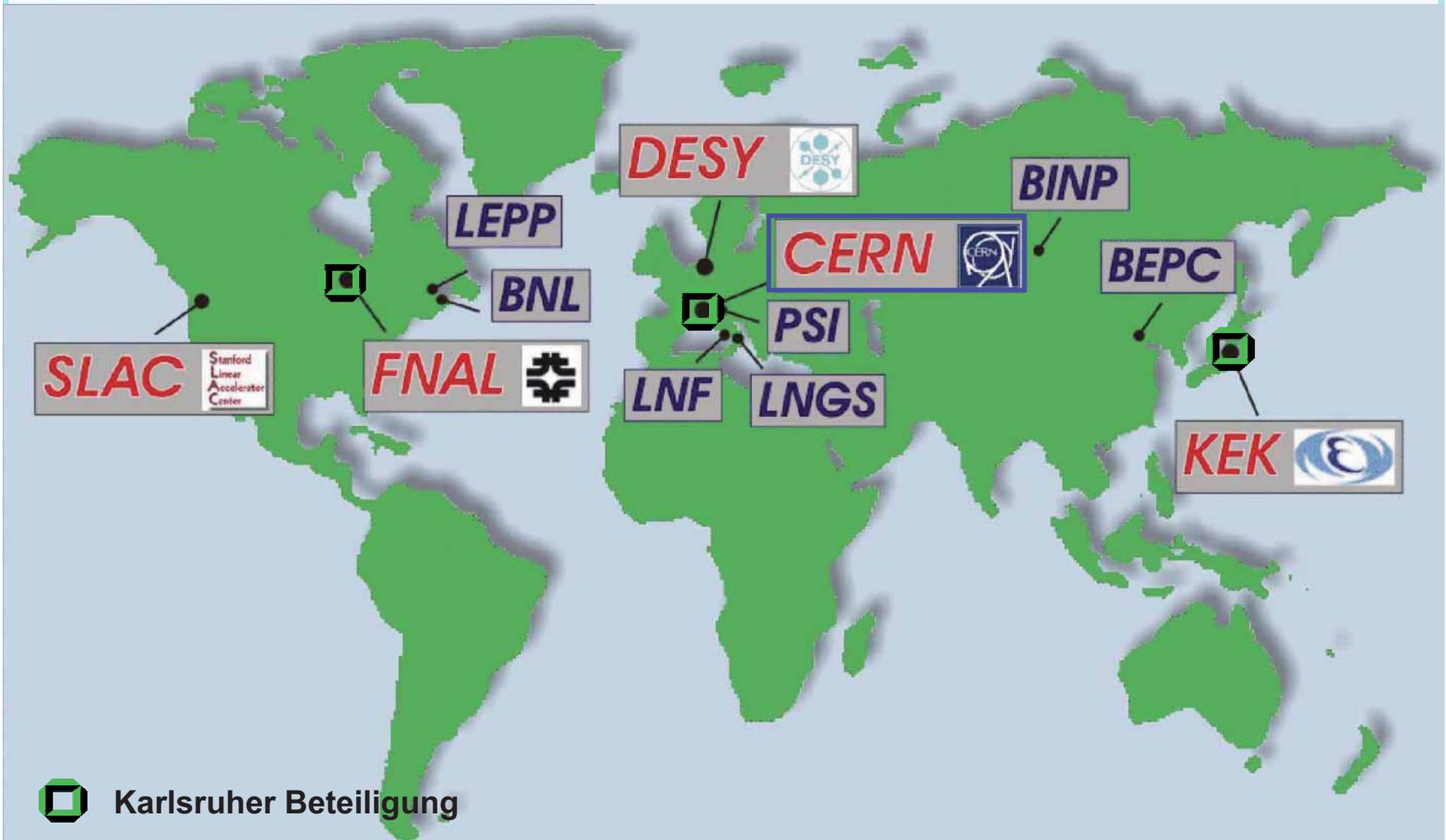
$\Rightarrow$  kinetische Energie =  $10\text{keV}$

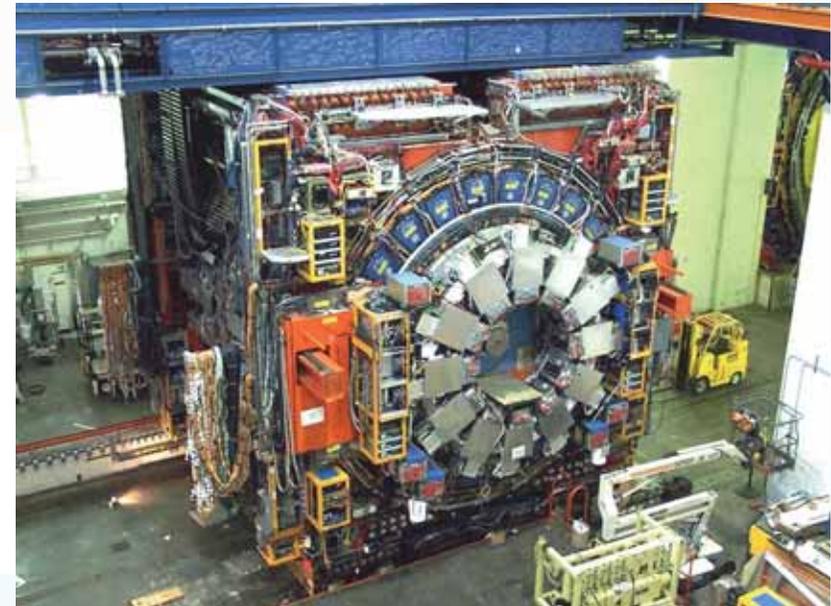
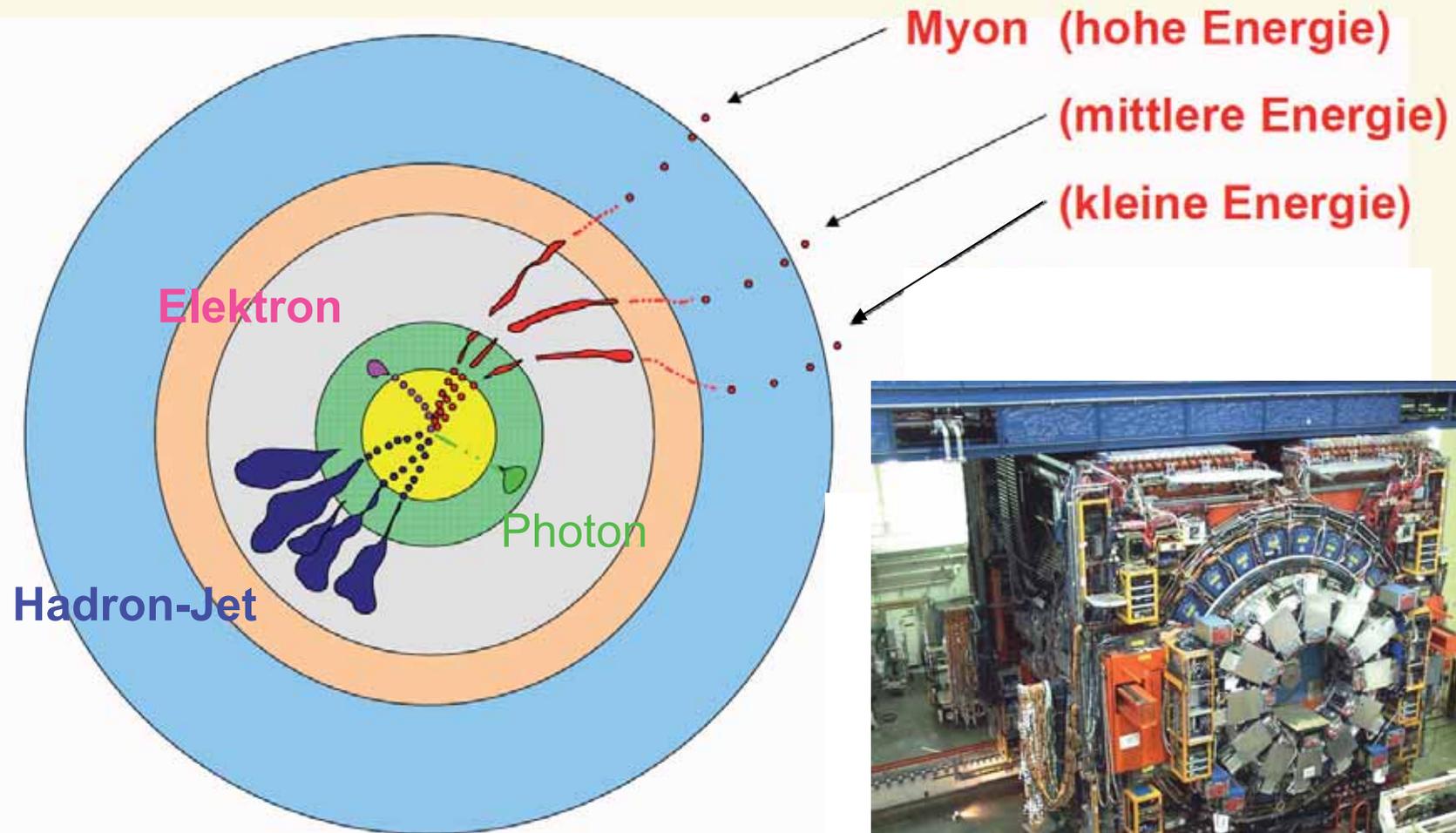
**MODERNE ANFORDERUNGEN:**

$10^{12}\text{eV} = 1\text{TeV}$

# PRINZIP EINES KREISFÖRMIGEN TEILCHENBESCHLEUNIGERS:







Das CDF-Experiment am Fermilab

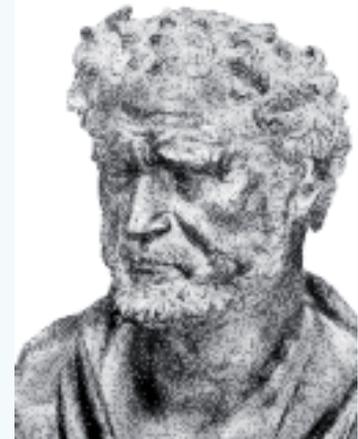
### UNSER HEUTIGES VERSTÄNDNIS VON DER NATUR IST VON GRIECHISCHEN PHILOSOPHEN GEPRÄGT:

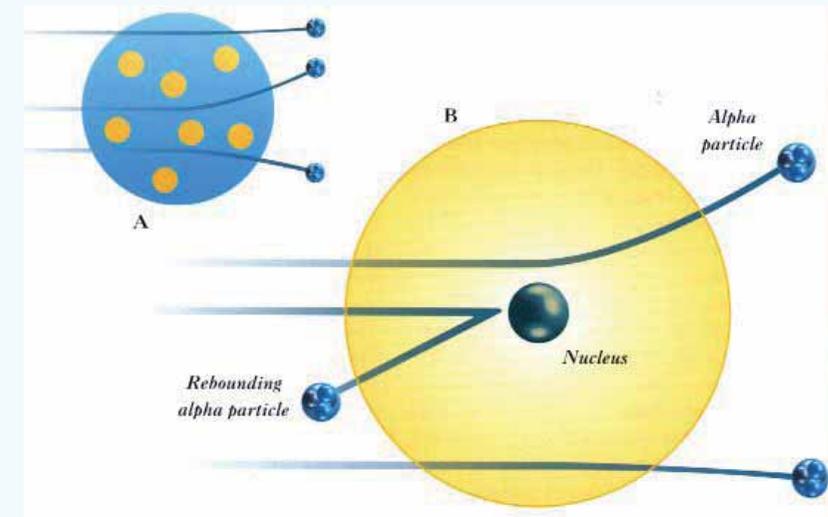
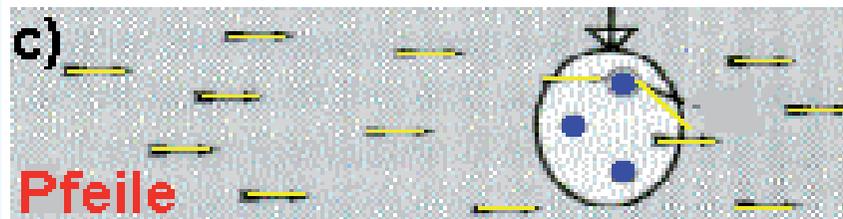
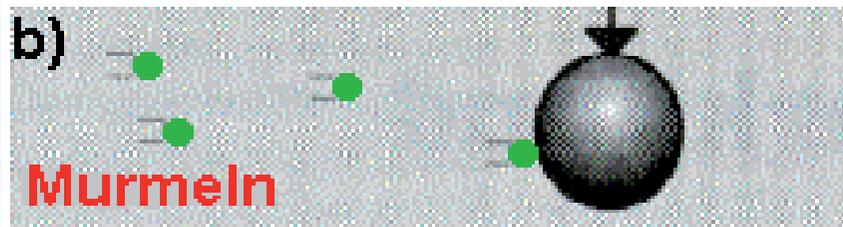
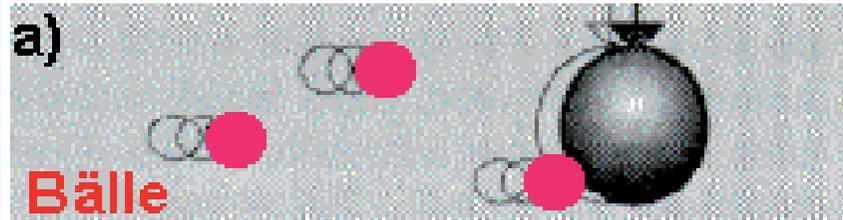
**"Denn weder gibt es beim Kleinen ja ein Kleinstes, sondern stets ein noch Kleineres (denn es ist unmöglich, daß das Seiende zu sein aufhöre) - aber auch beim Großen gibt es immer ein Größeres."**

Anaxagoras, 500-425 v. Chr.

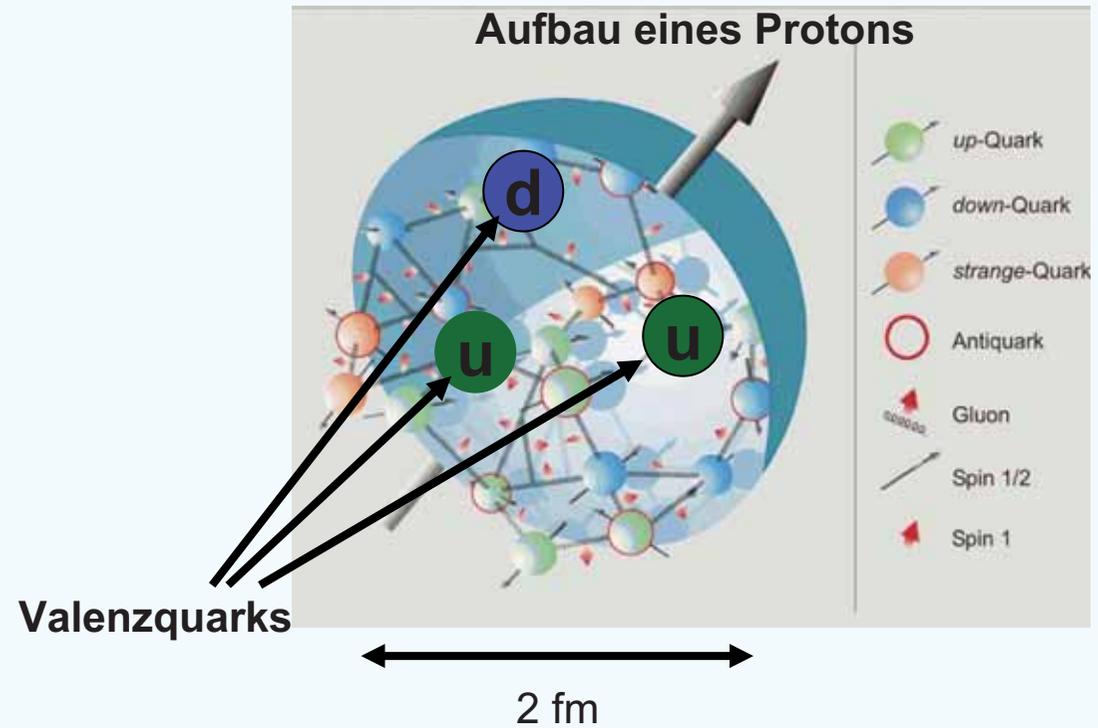
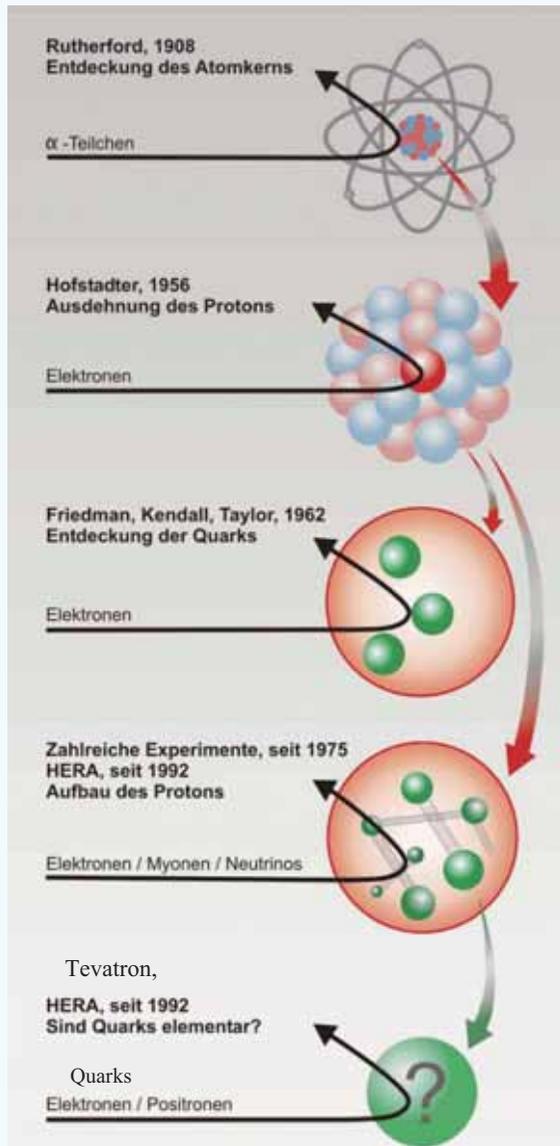
**"Der gebräuchlichen Redeweise nach gibt es Farbe, Süßes, Bitteres, in Wahrheit aber nur die Atome und das Leere."  
(ατομος = unteilbar)**

Démokrit, 460-370 v. Chr.





**Winkelverteilung der Projektile  
nach der Streuung:  
HINWEIS AUF INNERE STRUKTUREN**



**AUFBAU DES PROTONS;  
LEPTONEN, QUARKS PUNKTFÖRMIG:  $R < 10^{-19}$  m**

**PROTONEN SIND 100000x KLEINER  
ALS ATOME (1911)**

**Atomkern : Atomhülle**

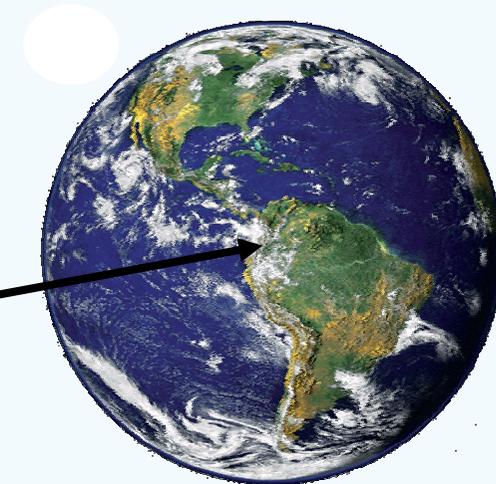
= Knopf : Innenstadt  
Karlsruhe



**QUARKS, LEPTONEN SIND MIND. 10000x KLEINER  
ALS PROTONEN (1998)**

**Quark : Atomhülle**

< Knopf : Erde



(Quark : Stecknadelkopf < Stecknadelkopf : Sonnensystem, usw)

## GRAVITATION:

**NEWTON (1642-1727):**

**GRAVITATIONSGESETZ**



## ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS:

**MAXWELL (1831-1879):**

**VEREINIGUNG ELEKTROSTATIK  
UND MAGNETISMUS**



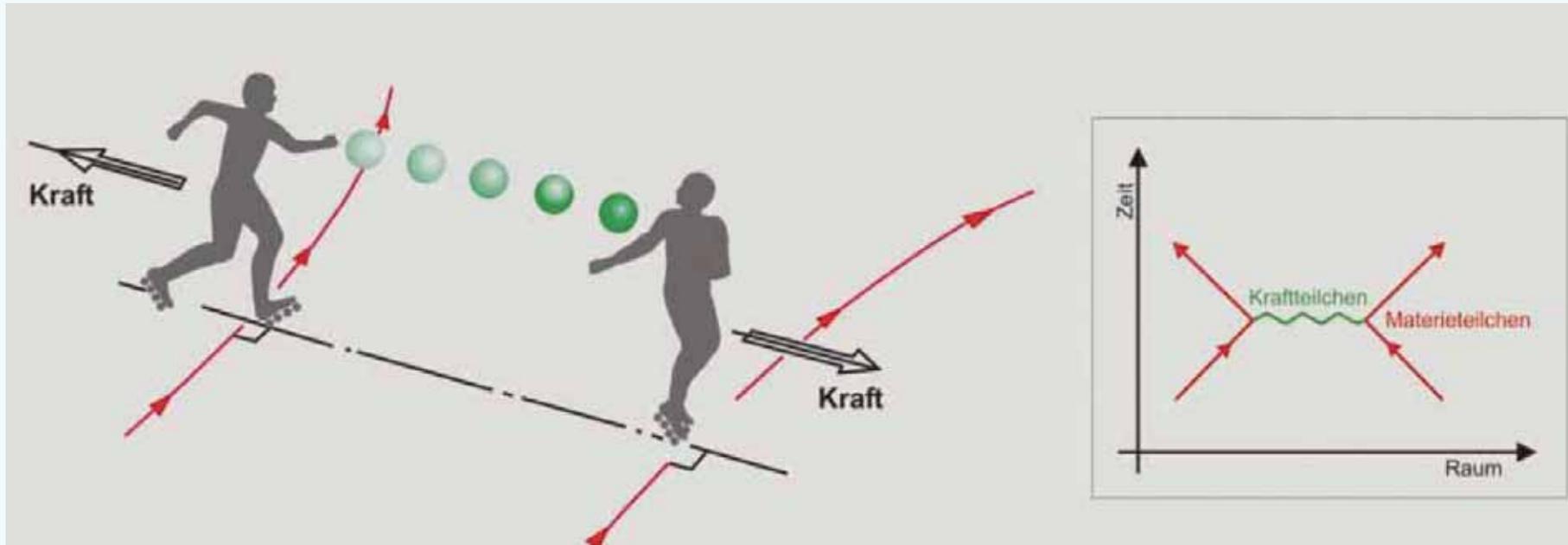
**HEINRICH HERTZ (1857-94): ENTDECKUNG DER ELEKTRO-  
MAGNETISCHEN WELLEN IN KARLSRUHE**



## STARKE WECHSELWIRKUNG:

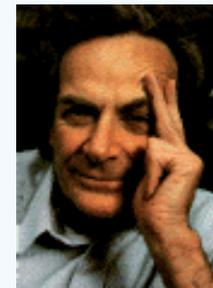
**POLITZER, GROSS, WILCEK (1970): QUANTENCHROMODYNAMIK**

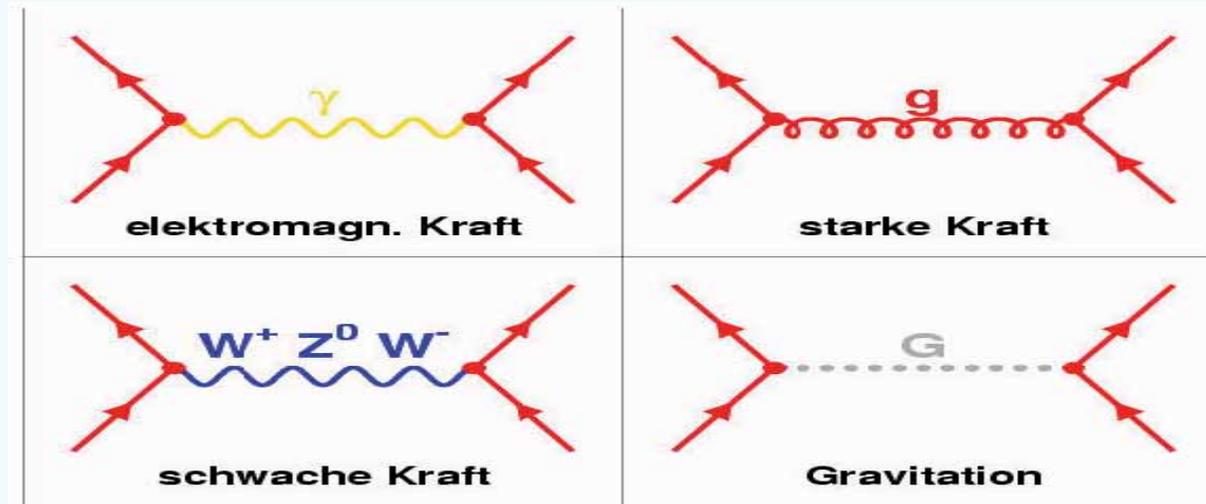




## ALLGEMEIN:

- KÖRPER KÖNNEN KRÄFTE AUF EINANDER AUSÜBEN
- IM MIKROKOSMOS:  
KRÄFTE ENTSTEHEN DURCH AUSTAUSCH VON BOSONEN





- ◆ **Gravitation**  
Anziehung von Massen

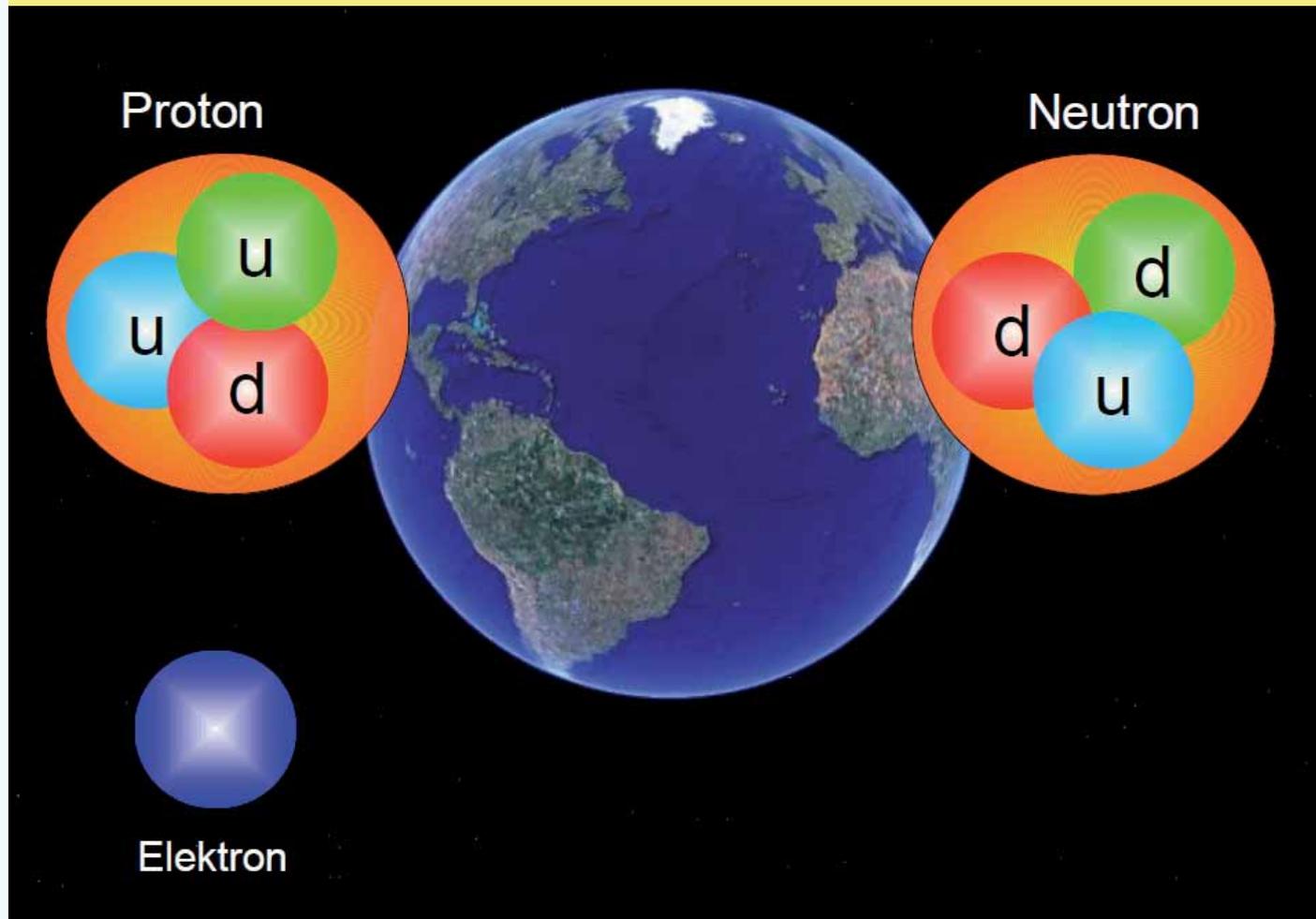
Stärke :  $10^{-38}$   
Reichweite: unendlich
- ◆ **Schwache Wechselwirkung**  
Bewirkt den radioaktiven Zerfall

Stärke :  $1/100000$   
Reichweite: sehr klein!
- ◆ **Elektromagnetische Wechselwirkung**  
Gleiche Ladungen stoßen sich ab,  
ungleiche ziehen sich an

Stärke :  $1/100$   
Reichweite: unendlich
- ◆ **Starke Wechselwirkung**  
Anziehende Kraft zwischen den Quarks

Stärke :  $1$   
Reichweite:  $\sim 10^{-15}m$

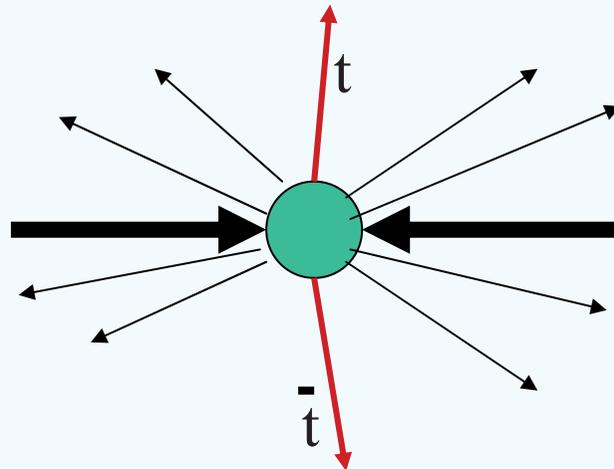
DIE SICHTBARE WELT BESTEHT AUS QUARKS UND LEPTONEN  
DER ERSTEN GENERATION:  $u$ ,  $d$ ,  $e^-$



IN DEN ERSTEN MILLIARDSTEL SEKUNDEN DES UNIVERSUMS GAB ES OBJEKTE, DIE HEUTE LÄNGST ZERFALLEN SIND

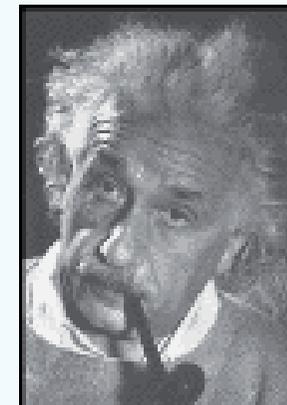
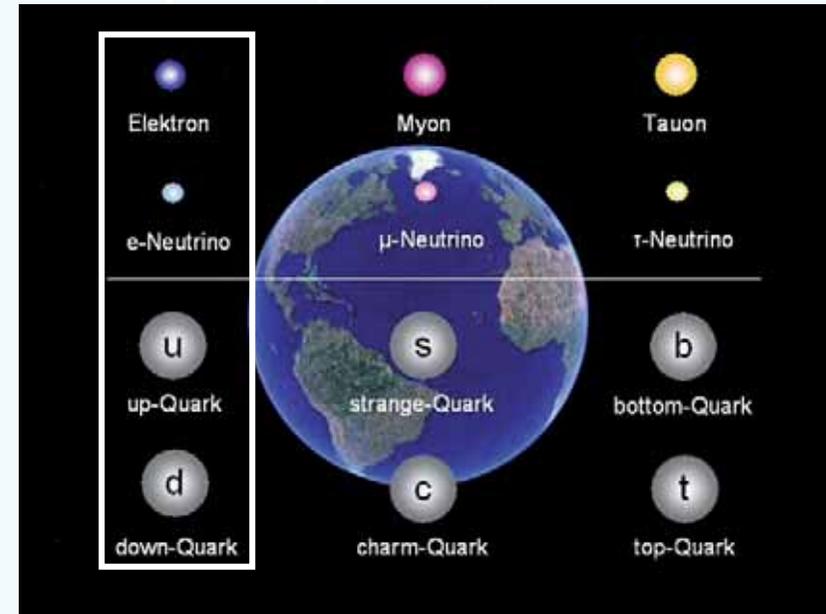
DIESE KÖNNEN AN TEILCHENBESCHLEUNIGERN IN KLEINEN "URKNALLEN" AUS ENERGIE ERZEUGT WERDEN, z.B.:

Top-Quarks (Entdeckung 1995):



ANWENDUNG:  $E = mc^2$  (Albert Einstein)

Dabei entstehen paarweise Materie- und Antimaterieteilchen



## UNSER HEUTIGES WELTBILD KENNT

**12 FUNDAMENTALE MATERIETEILCHEN:  
QUARKS UND LEPTONEN**



**4 FUNDAMENTALE KRÄFTE**

## OFFENE FRAGEN:

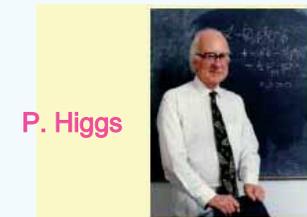
**WIE ERKLÄRT SICH DIE VIELFALT DER TEILCHEN UND KRÄFTE ?**

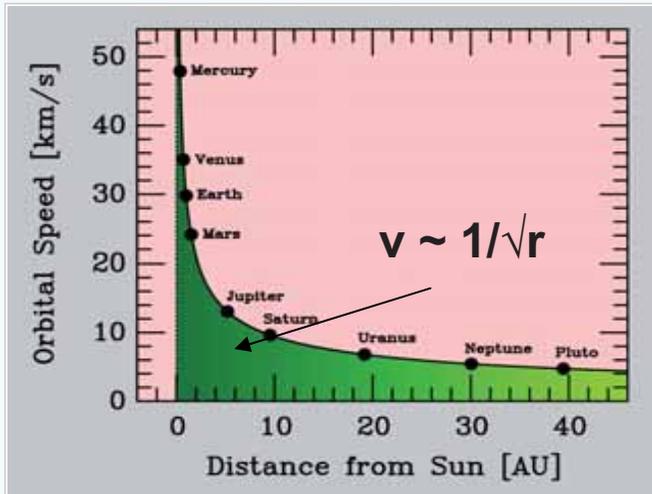
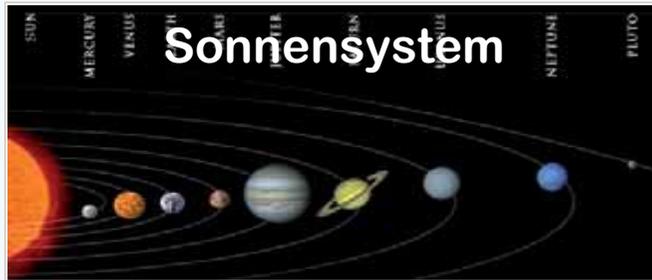
**WARUM SIND SIE SO UNTERSCHIEDLICH?**

**WIE BEKOMMEN TEILCHEN IHRE MASSE ? (HIGGS-BOSON)**

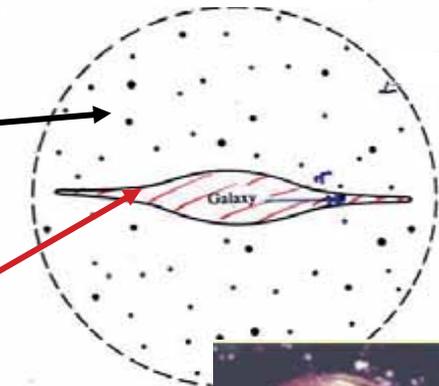
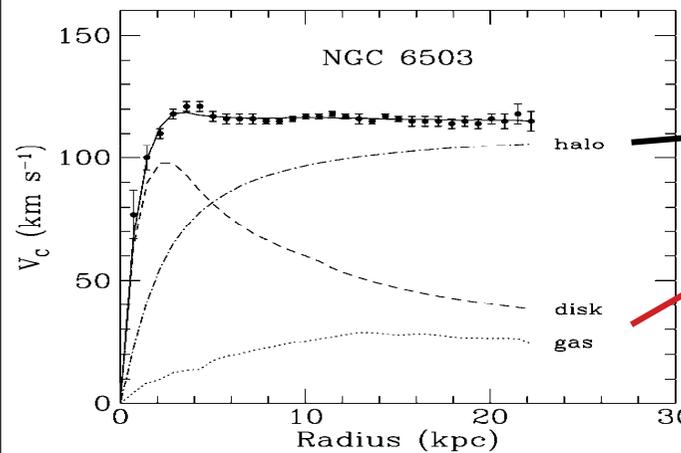
**WIESO GIBT ES NUR MATERIE IM HEUTIGEN UNIVERSUM ?**

**GIBT ES NOCH MEHR IM UNIVERSUM ?**

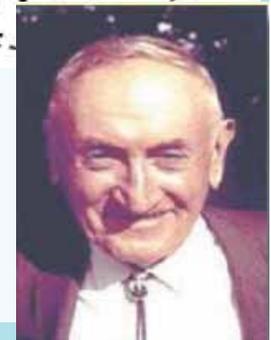




**Im Sonnensystem:  
Gültigkeit von Keplers  
Gesetzen !**

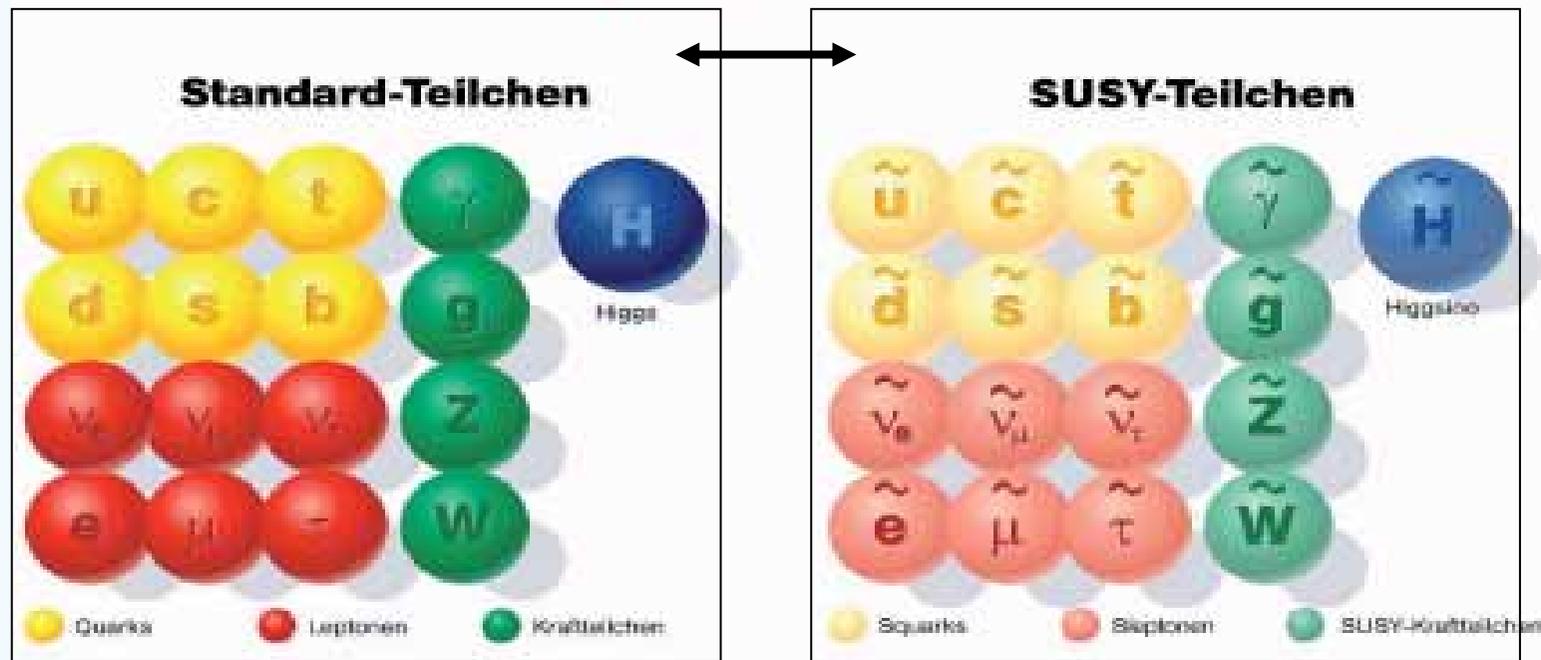


**In Galaxien und Galaxienhaufen:  
Neue Form nicht-sichtbarer Masse !**



F. Zwicky 1898-1974

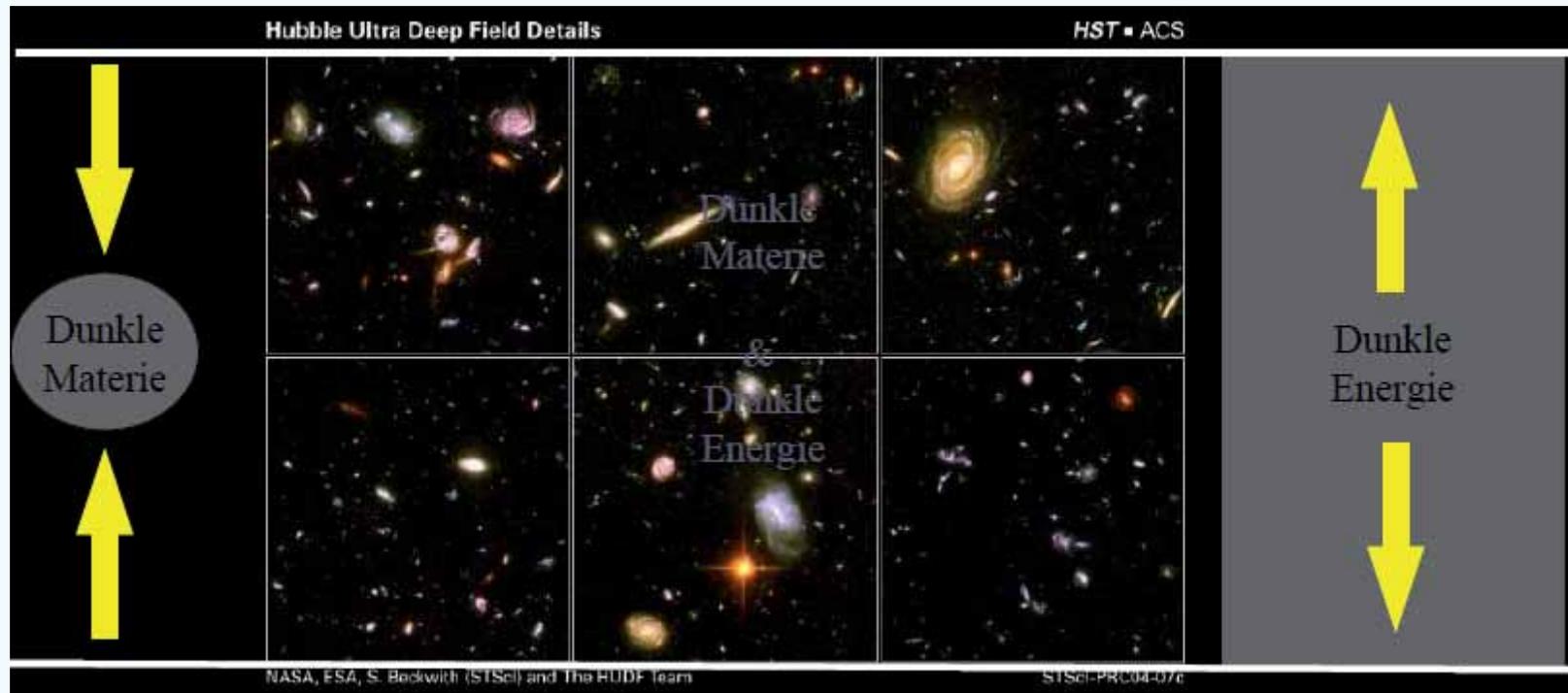
## Supersymmetrie



„Unsere Welt“

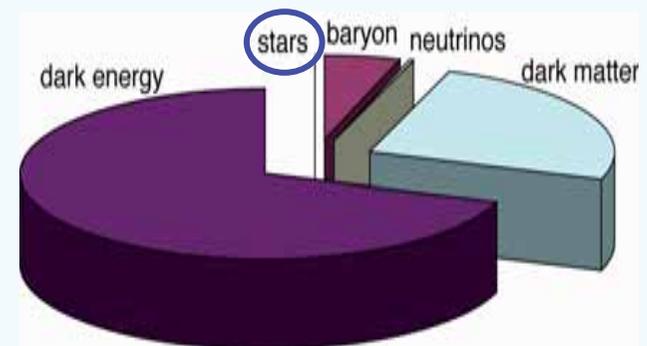
Supersymmetrische „Schattenwelt“

Wenn es diese Teilchen gibt, müssen sie sehr schwer sein!  
 Deren leichtestes würde die Dunkle Materie bilden.  
 Die derzeitigen Beschleuniger sind zu „schwach“, es zu erzeugen

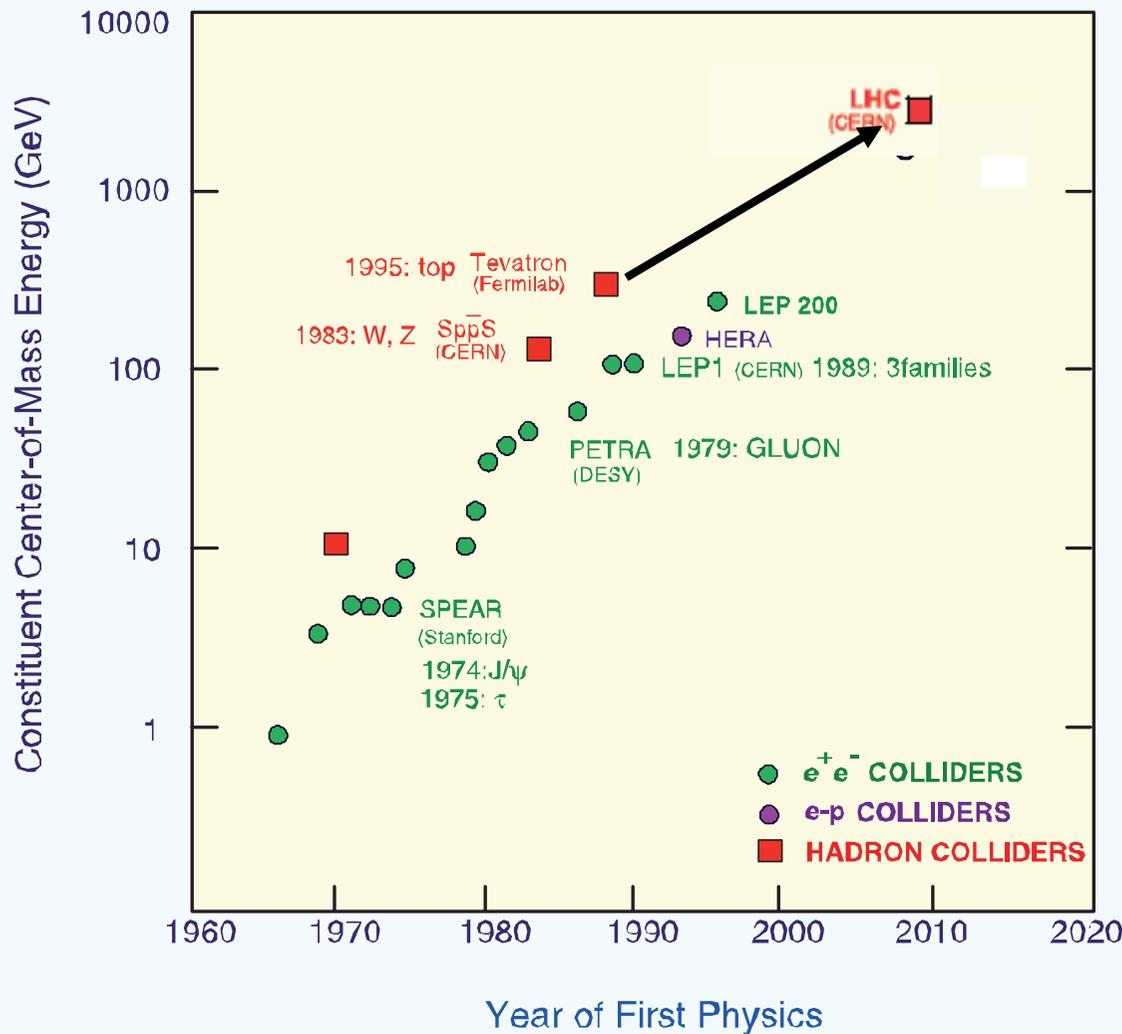


Das Universum dehnt sich immer schneller aus !

Die uns vertraute Materie macht nur 4,5 %  
der Gesamtmasse des Universums aus!  
Der Rest ist dunkel!



Zur Klärung dieser Fragen: deutlicher Leistungssprung der Beschleuniger nötig !



**LHC: Energie 7 X  
Rate 100 X  
mehr als Tevatron !**

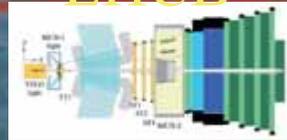


## IV. DER LARGE HADRON COLLIDER

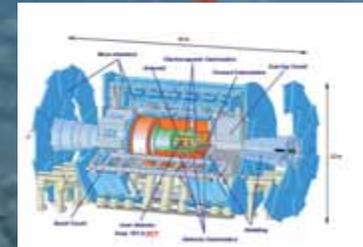
- 1984 Erste Ideen für den LHC
- 1988 Beginn mit konkreten Plänen für Detektoren
- 1995 Beginn der Teilnahme der Universität Karlsruhe
- 2000 Beginn der Konstruktion der Detektorelemente
- 2005 Beginn Zusammenbau des CMS-Detektors am CERN
- 2009 Seit Proton-Proton-Kollisionen

Ca. 10.000 Mitarbeiter beteiligt an Entwicklung und Bau !

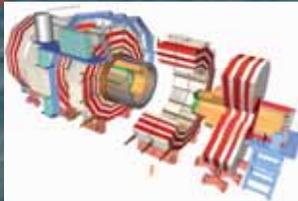
LHCb



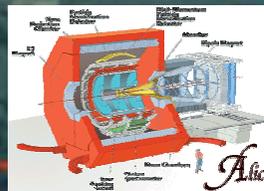
Atlas



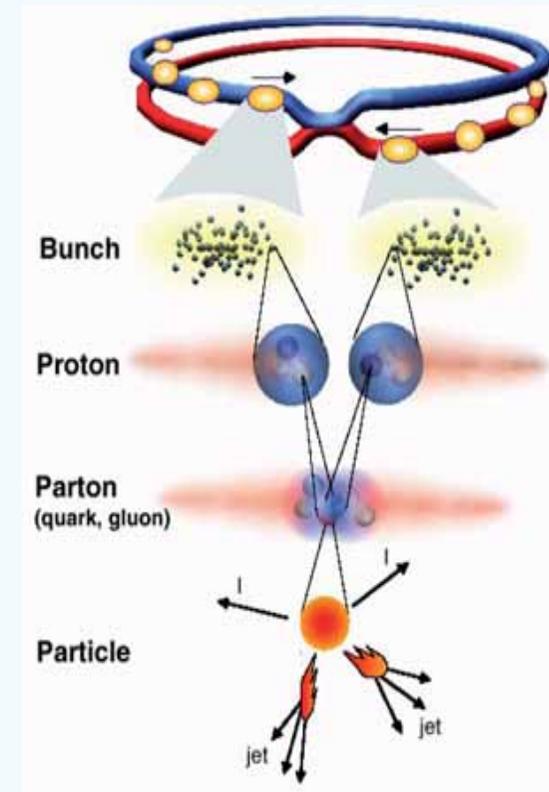
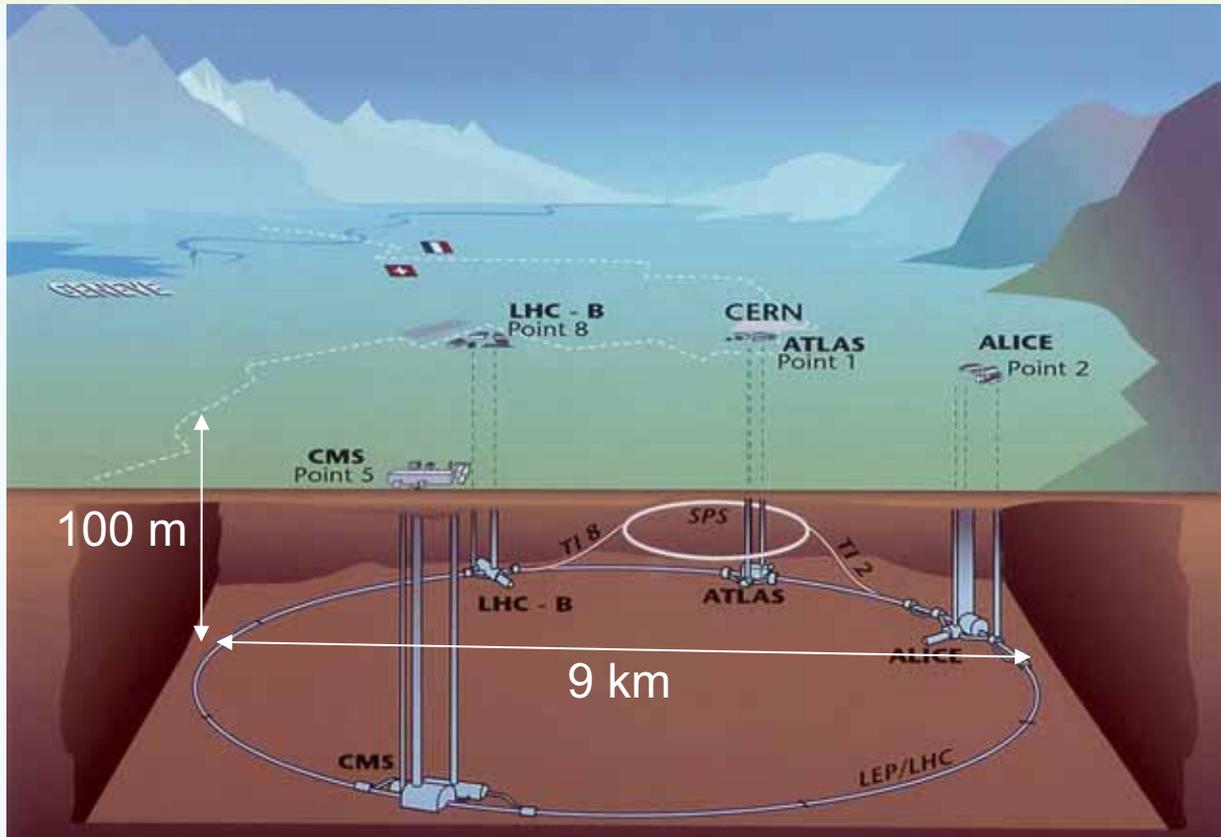
CMS



Alice



Proton-Proton-Kollisionen bei max. 14 TeV Schwerpunktsenergie  
 Kollisionsraten bis  $10^9 / s$   
 Umfang 27 km



Die Strahlen haben die Energie eines ICE in voller Fahrt !



- Magnetfeld von 8,3 Tesla
- insgesamt 1232 Stück, 15 m lang
- 270'000 km Kabelstränge mit 6400  
7 $\mu$ m dicken supraleitenden Filamenten
- Strom von 11'700 A
- Betriebstemperatur von 1.9 K

Abkühlung durch 120 Tonnen suprafluides Helium



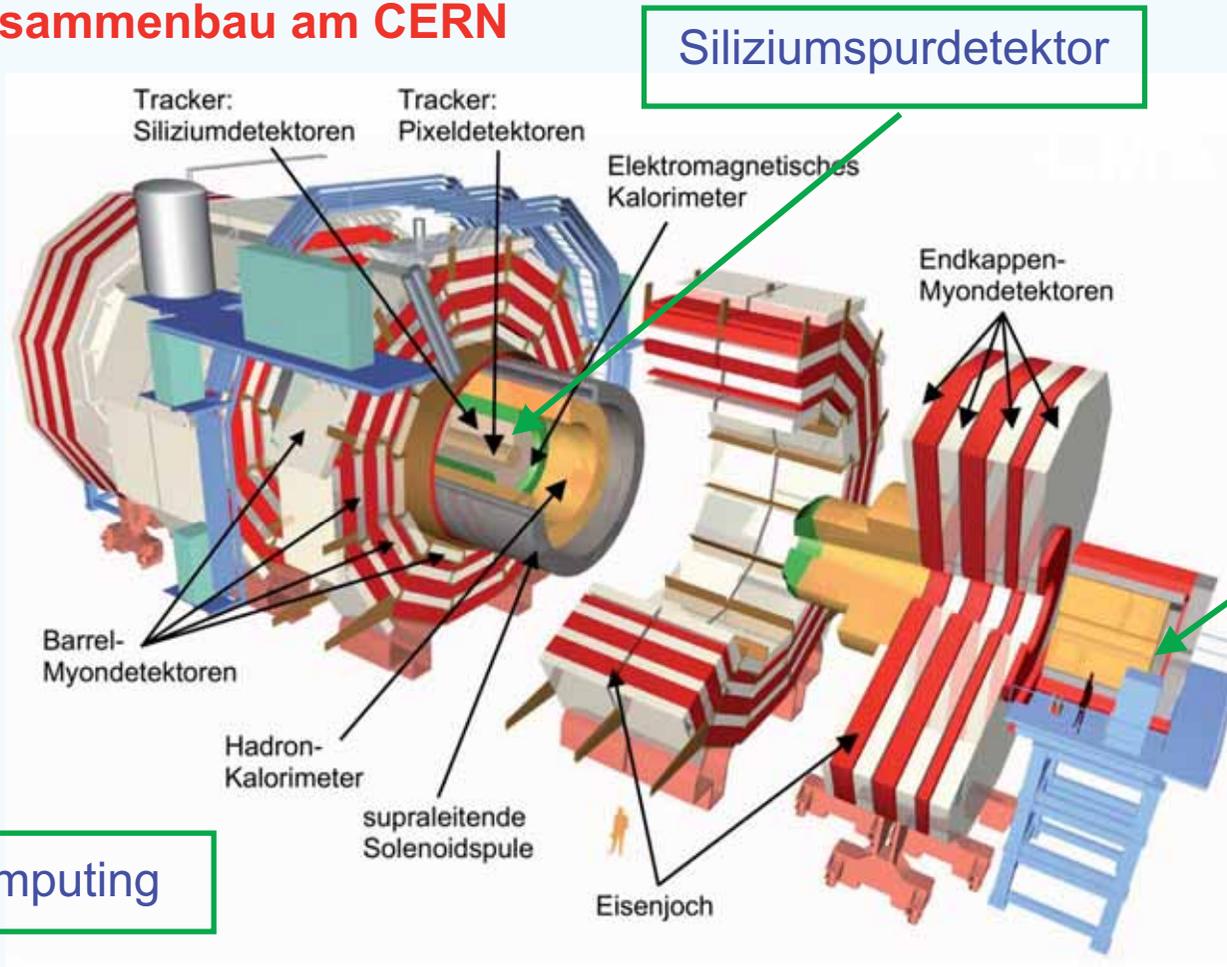


Insgesamt  
30.000 km  
Transportweg

**Bau der Einzelteile an teilnehmenden Instituten, Zusammenbau am CERN**

**CMS-Detektor:**

**25m lang, 16m Höhe  
12500 Tonnen  
Nettokosten 550 MSFr**



Siliziumspurdetektor

Strahlmonitor

Computing

Software / Datenanalyse

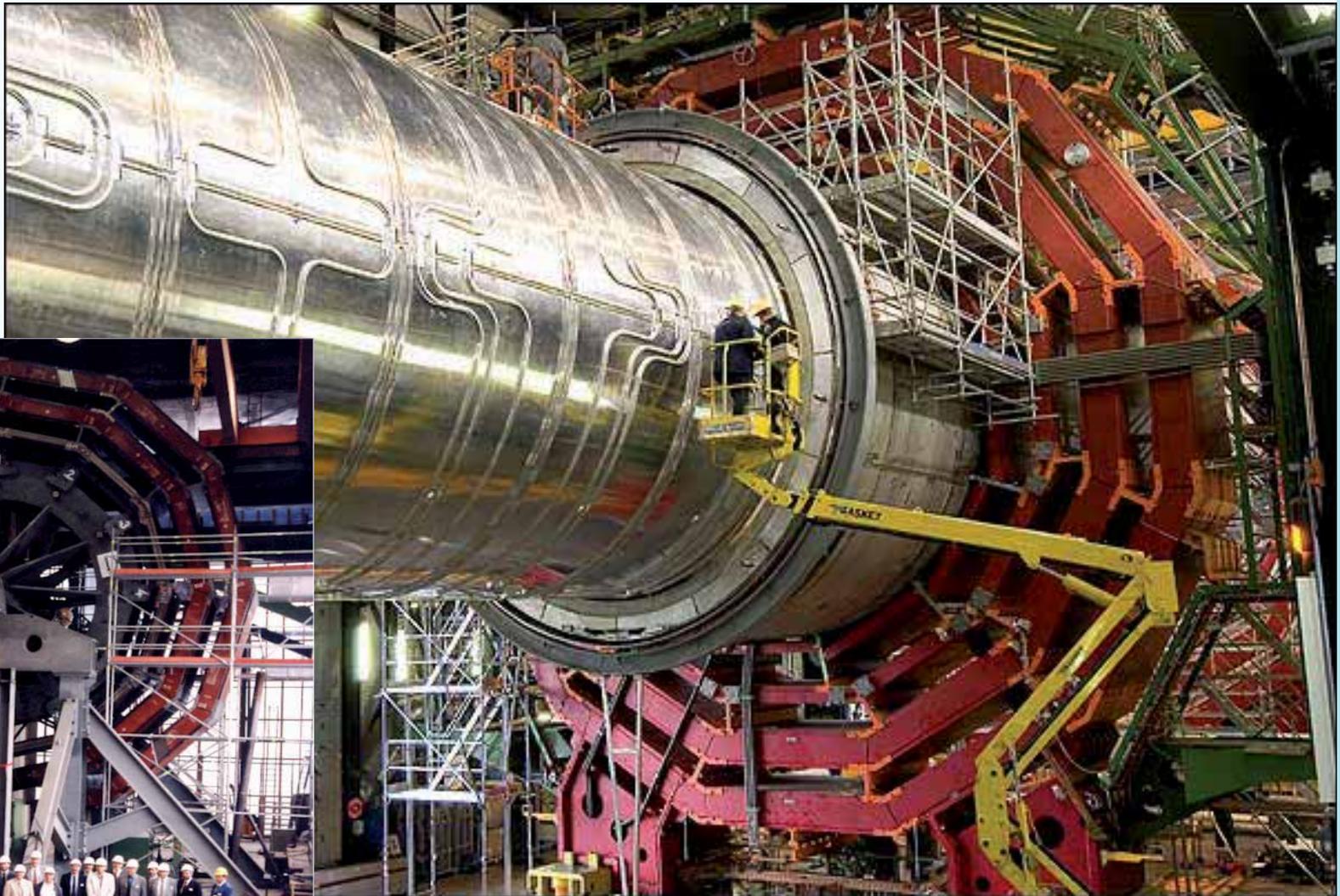
**CMS-Kollaboration:**

**2310 Wissenschaftler  
38 Staaten  
175 Institute**



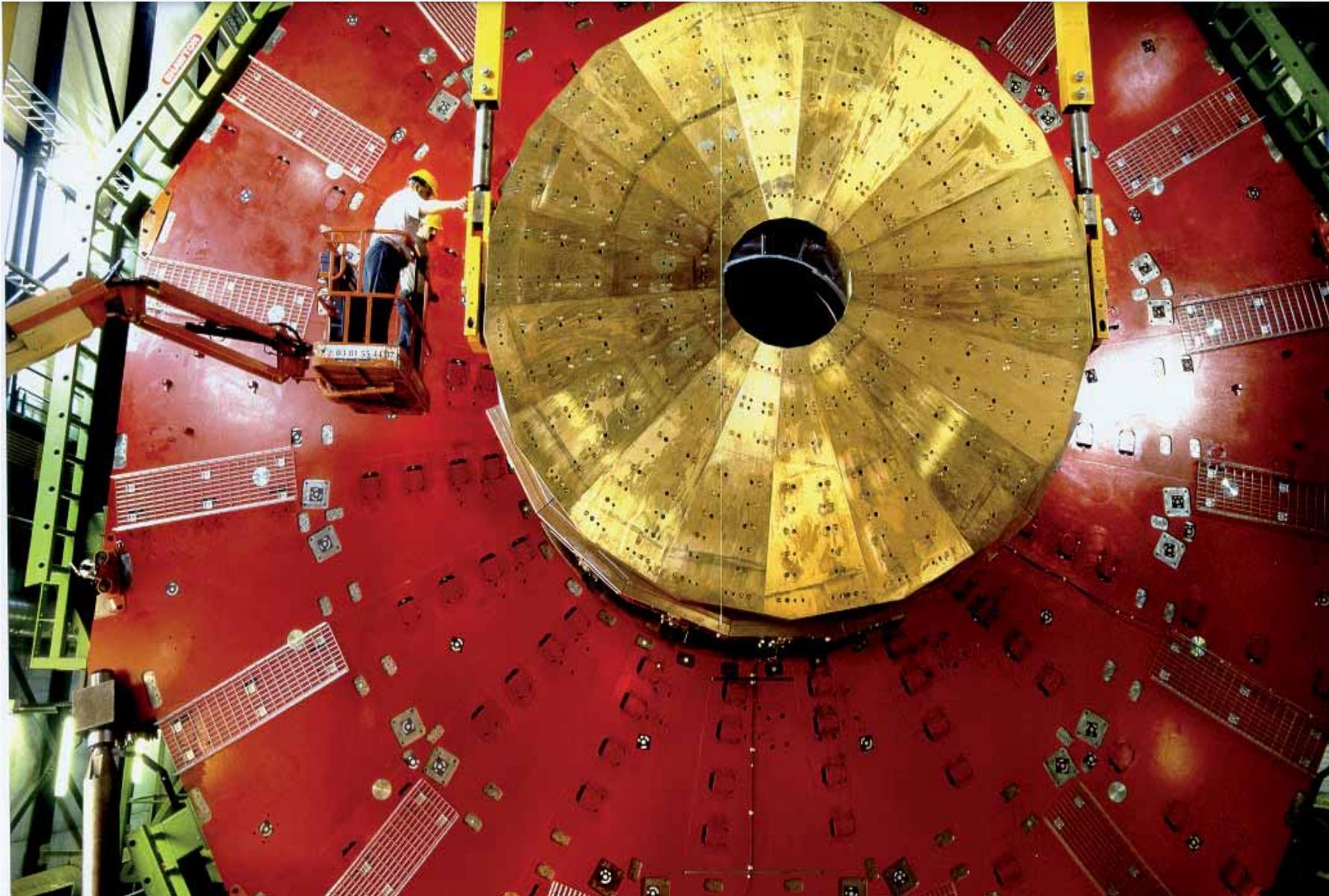
**IEKP Karlsruhe: 55**

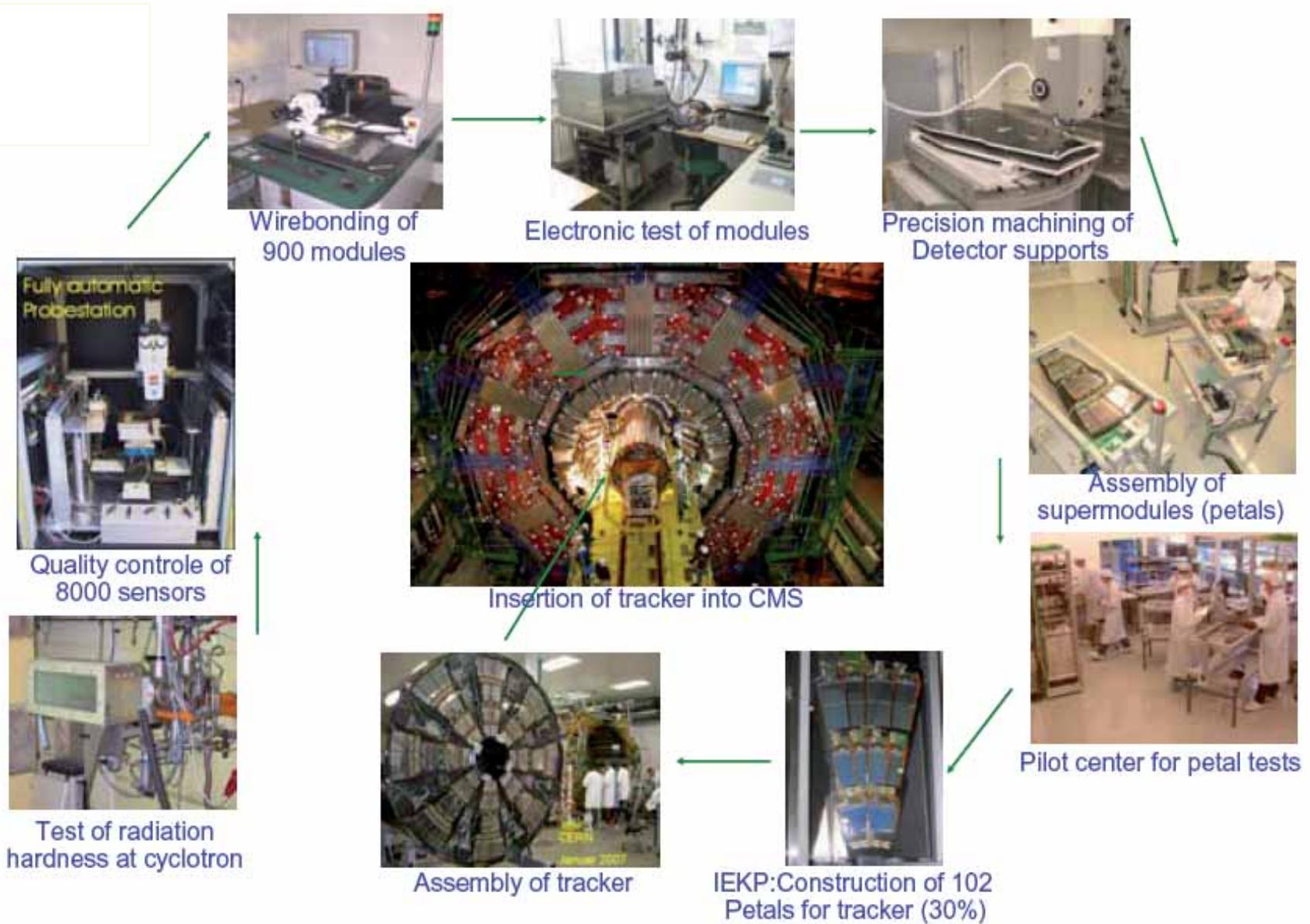
Einschub der inneren Kryostatwand

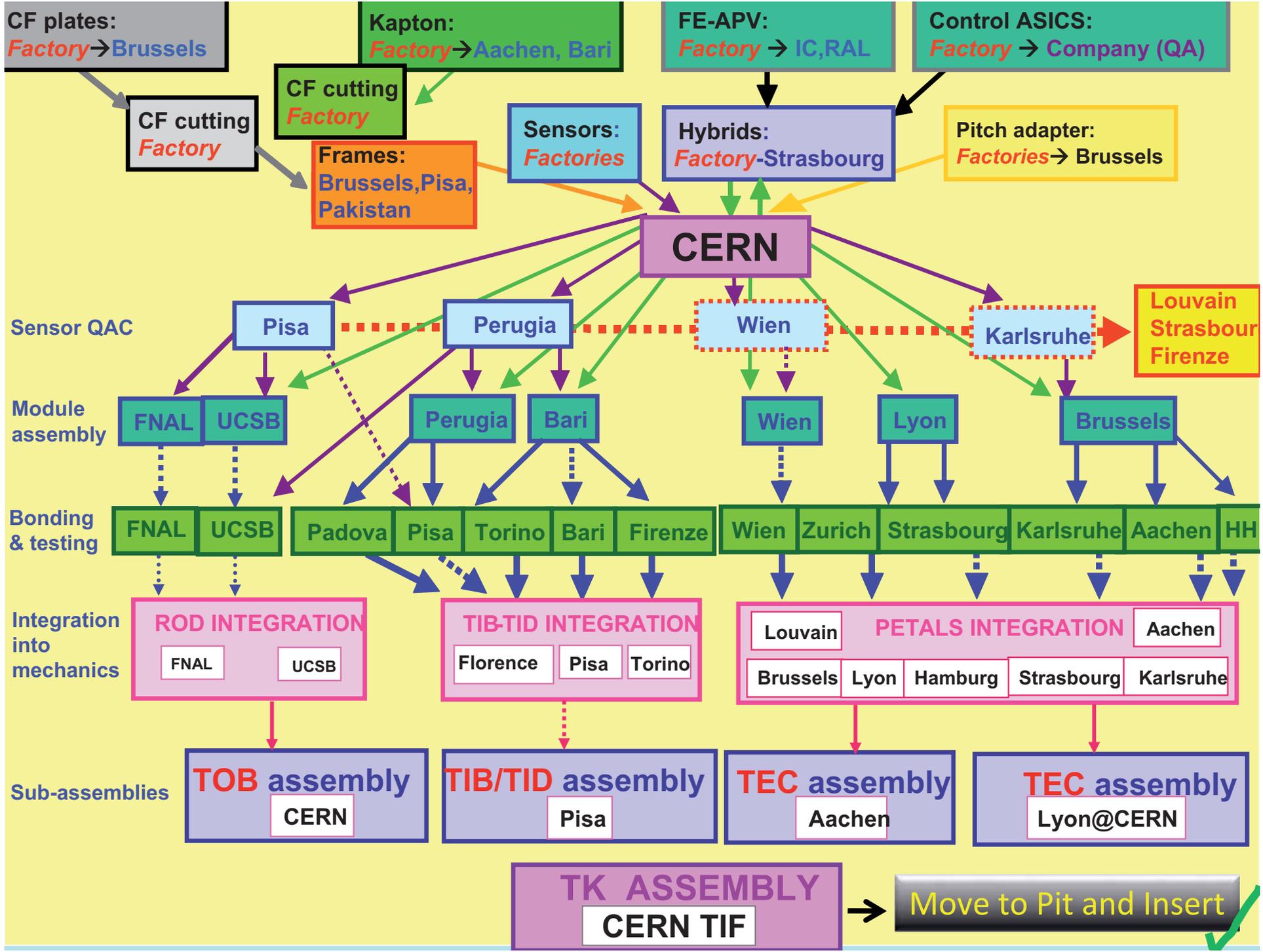


Bau des Eisenjochs in der DWE-Werft

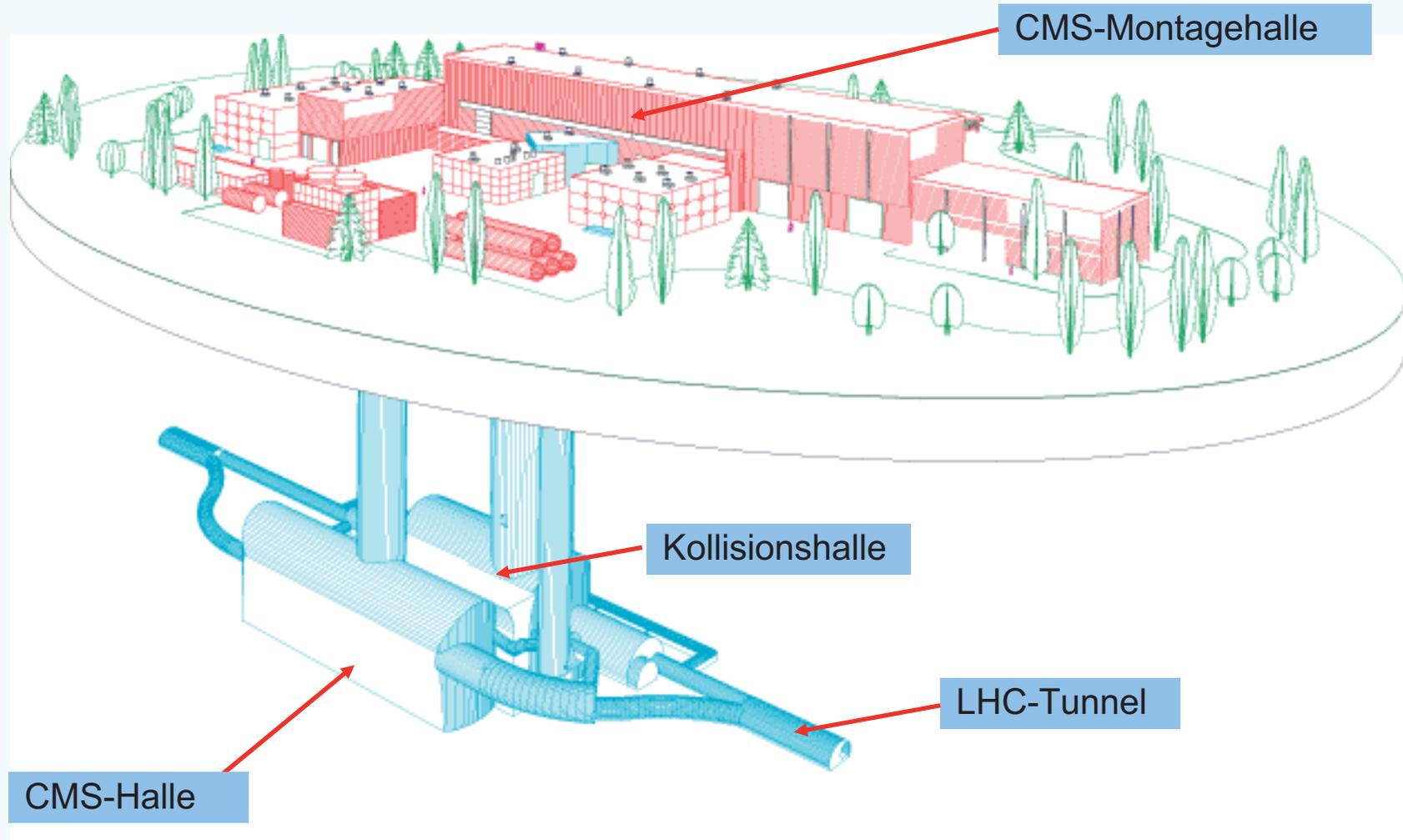
**GRÖßTER SUPRALEITENDER MAGNET DER WELT:**  
4T (100000 mal Erdmagnetfeld)  
13m lang, 6m Durchmesser







**Auf dem Papier...**



...im Bau



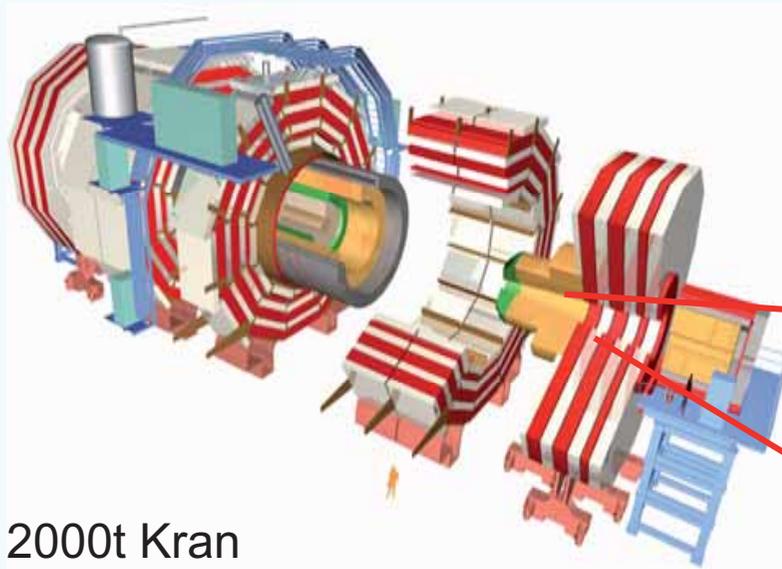
2001

Jan 1999

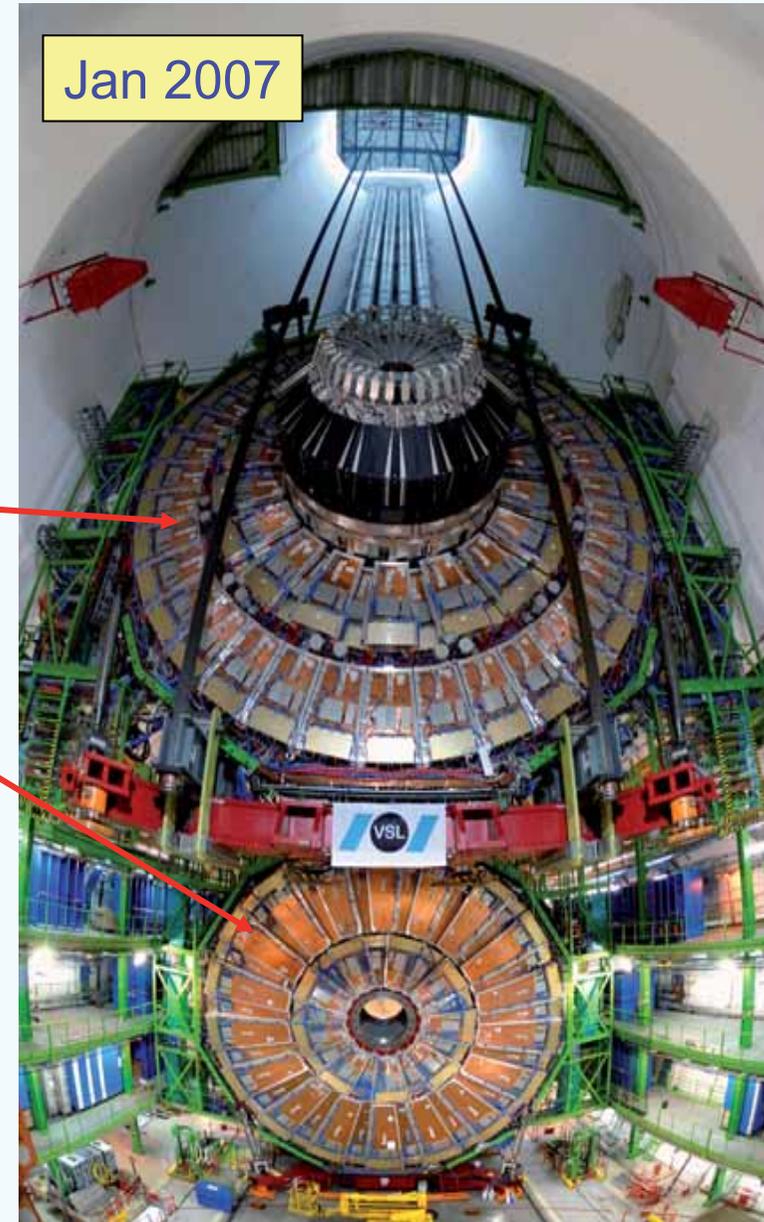


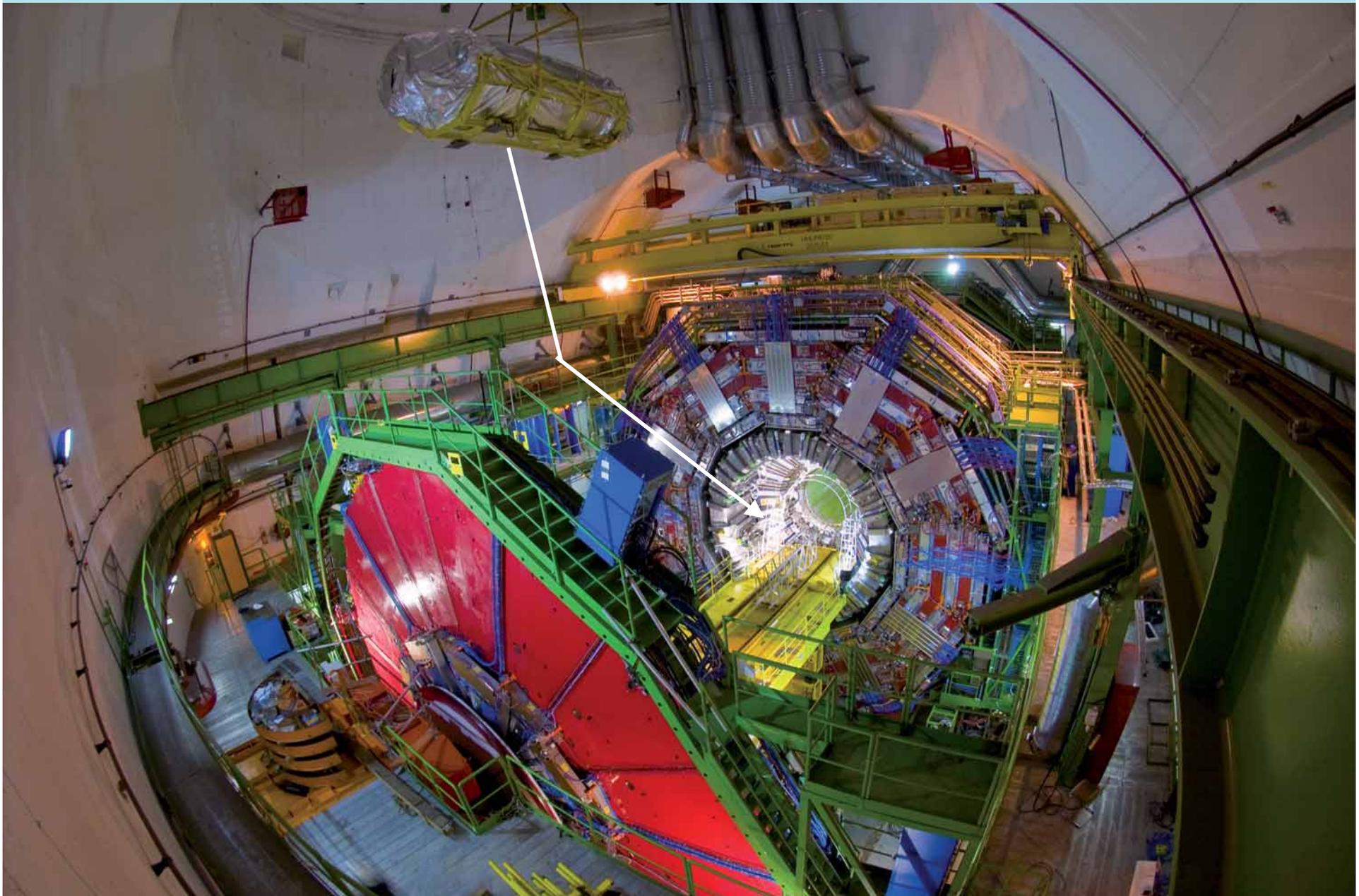


## Absenken einer Endkappe

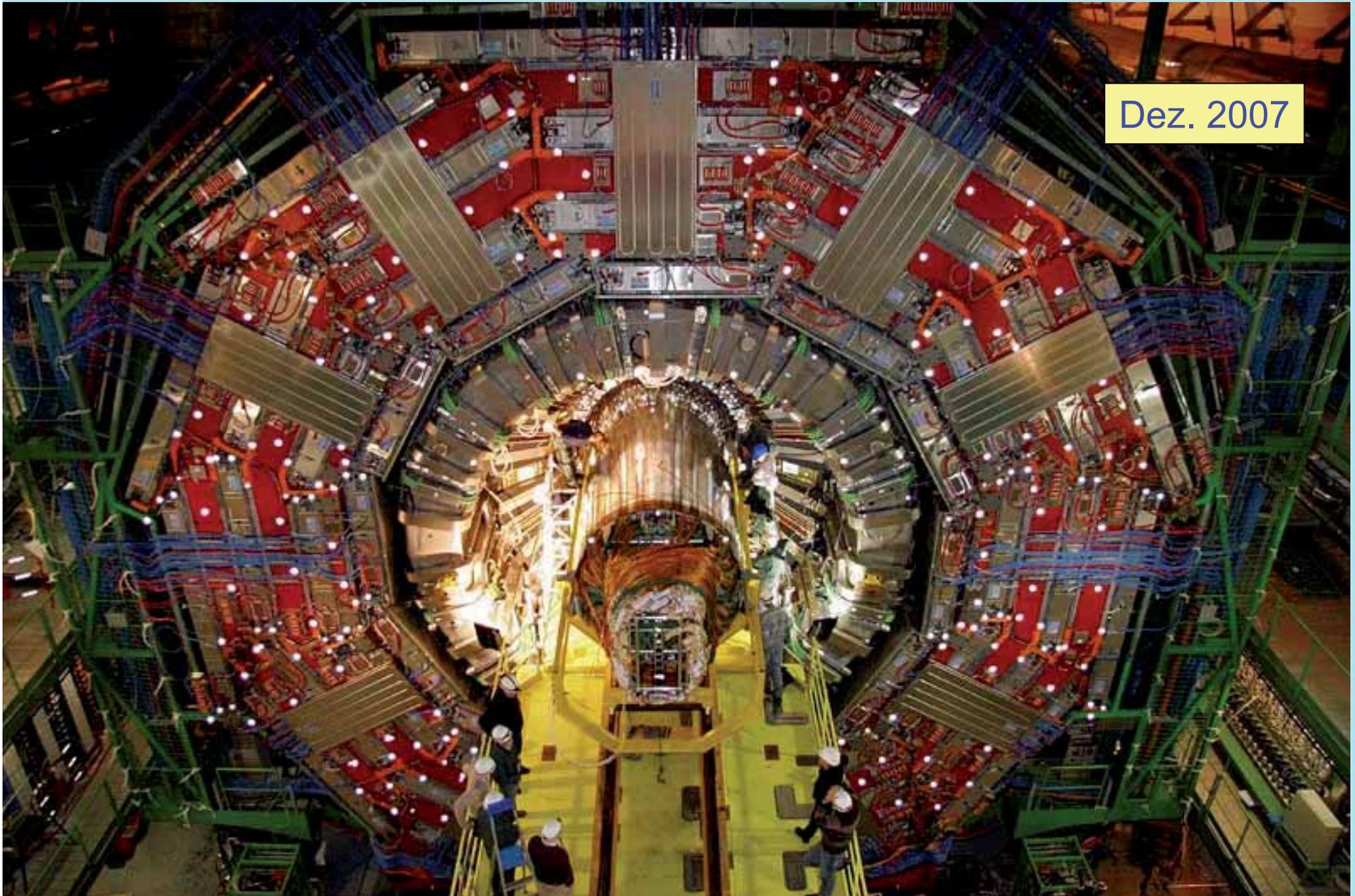


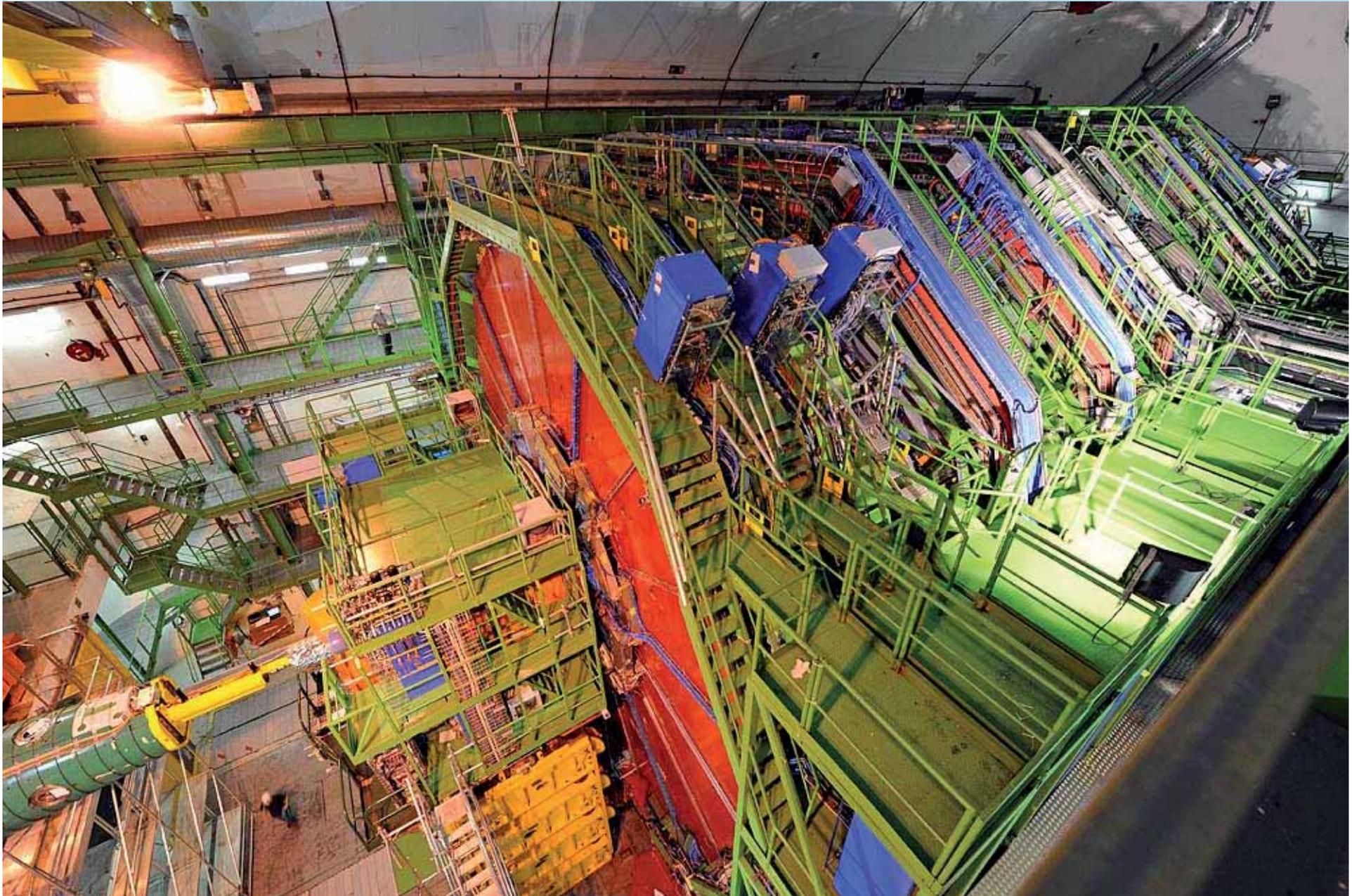
2000t Kran





Dez. 2007

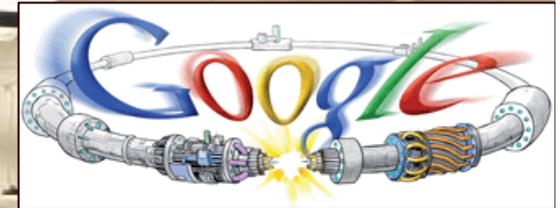




# Besuch am CERN



Erster Strahl zirkuliert im LHC



Fünf CERN DG waren zuständig und präsent:  
Schopper, Rubbia, Llewellyn Smith, Maiani, Aymar

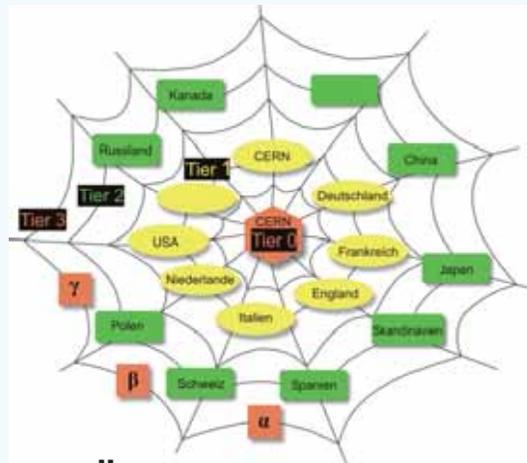




Am CERN wurde das World-Wide Web erfunden.  
Das Grid ist eine Weiterentwicklung



40 MHz ;  $10^9$  Ereignisse/s ; 10 Mio Kanäle => 1 PetaByte/s  
 Online-Datenreduktion  
 Datenspeicherung  
 100 Hz  
 ~1PetaByte/Jahr  
 (1,4 Millionen CD)



→ KIT: GridKa (Tier 1)  
 CampusGrid (Tier 2-3)

**LÖSUNG: DAS GRID**

cmsShow: rfio:///castor/cern.ch/cms/store/temp/express/BeamCommissioning09/ExpressPhysics/FEVT/v2/000/122/314/7AAB2A4D-5ED8-DE1

File Edit View Window Help

Delay 3.0s Run 122314 Event 15145452 Mon Nov 23 19:20:55 2009 CEST Lumi block id: 25

Event Filtering is OFF

**FIREWORKS**

Summary View

Add Collection

- ECal
- HCal
- Jets
- Tracks

	pt	eta	phi
Track 0	4.9	-0.2	0.3
Track 1	5.0	-0.1	0.2
Track 2	3.7	-0.8	0.3
Track 3	4.0	-0.7	0.3
Track 4	4.6	-0.4	0.6
Track 5	4.6	-0.3	0.6
Track 6	4.9	-0.2	1.0
Track 7	5.0	-0.1	1.1
Track 8	4.4	-0.5	1.1
Track 9	3.0	-1.1	1.1
Track 10	3.0	-1.1	1.0
Track 11	5.0	-0.1	1.2
Track 12	4.1	-0.7	1.5
Track 13	3.6	-0.9	2.6
Track 14	4.9	-0.2	-2.3
Track 15	3.5	0.9	0.4
Track 16	3.7	0.8	0.7
Track 17	5.0	0.1	0.8
Track 18	3.6	0.8	0.9
Track 19	4.3	0.6	1.4
Track 20	4.6	0.4	1.6
Track 21	3.0	1.1	1.9
Track 22	4.6	0.4	2.3
Track 23	3.6	0.9	-2.0
Track 24	2.8	1.2	-0.1

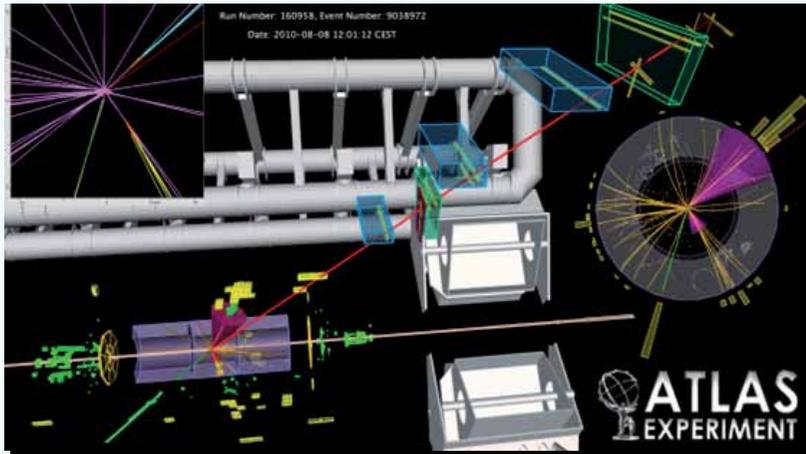
- Muons
- Electrons
- Vertices
- DT-segments
- CSC-segments
- Photons
- MET
- siStripClusters

Views

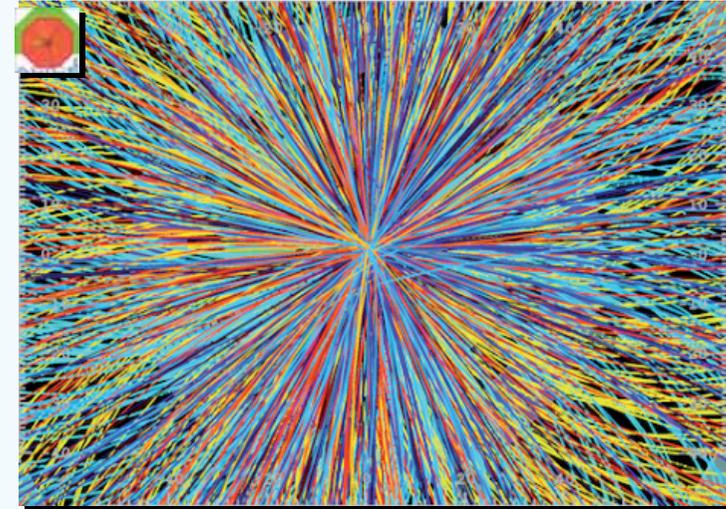
Rho Phi

Rho Z

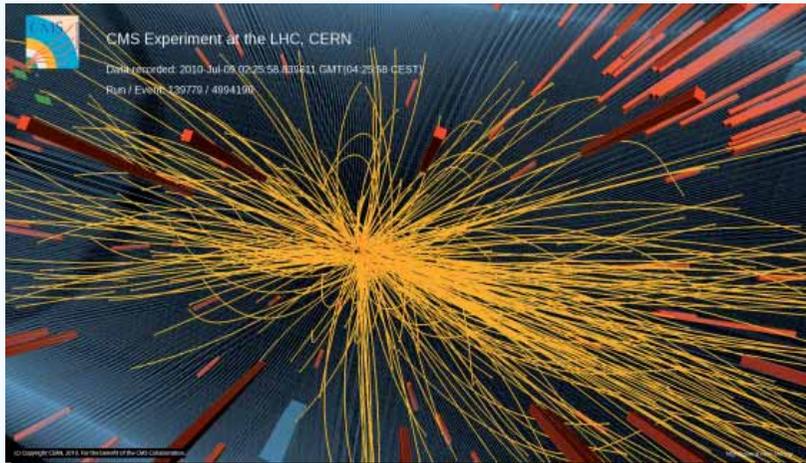
3D



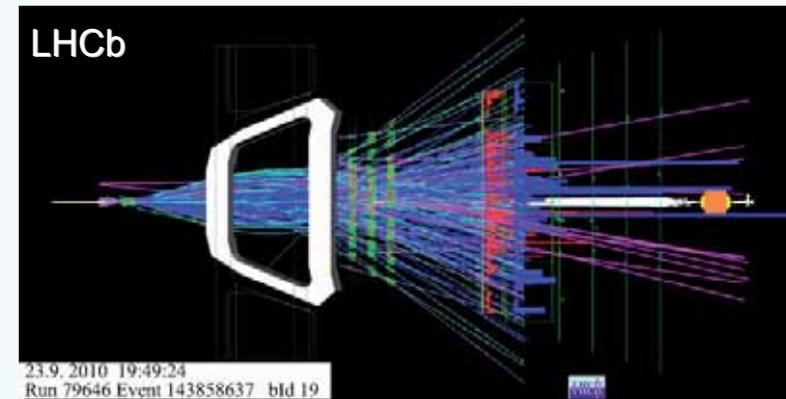
Proton-Proton-Kollision



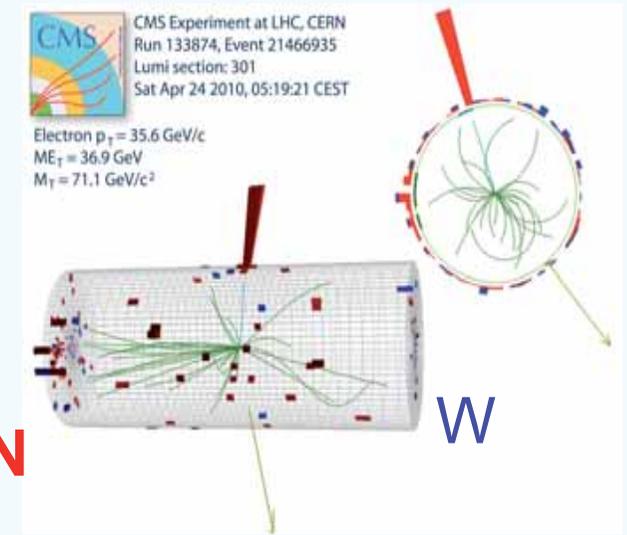
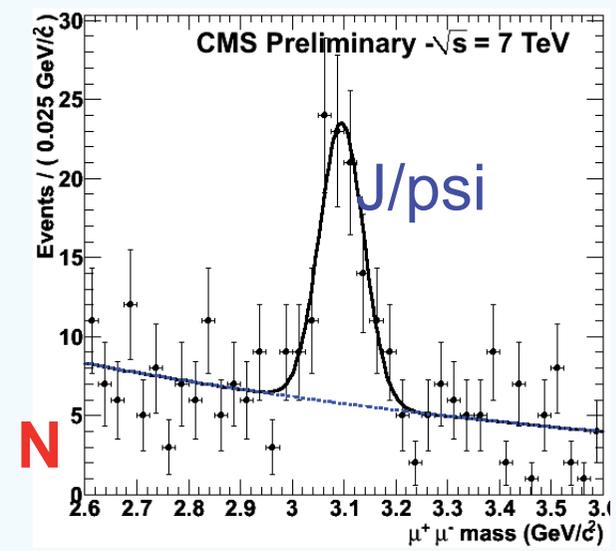
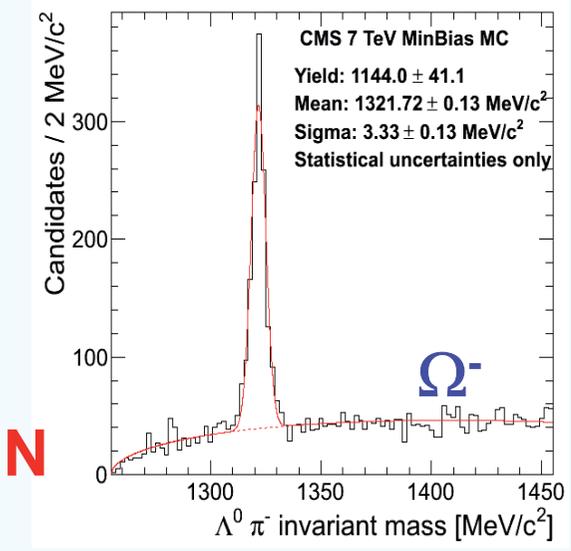
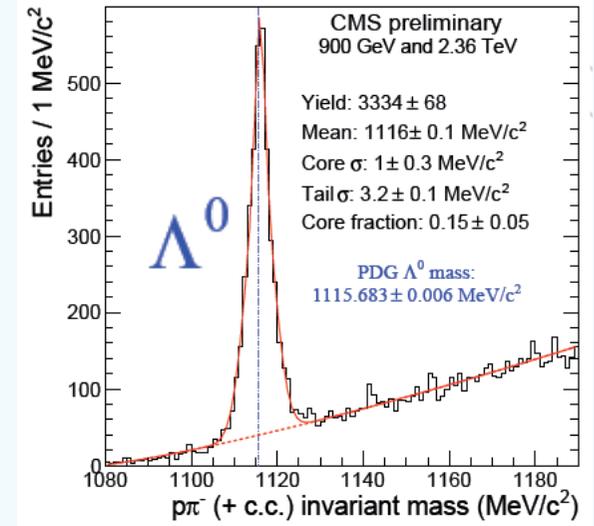
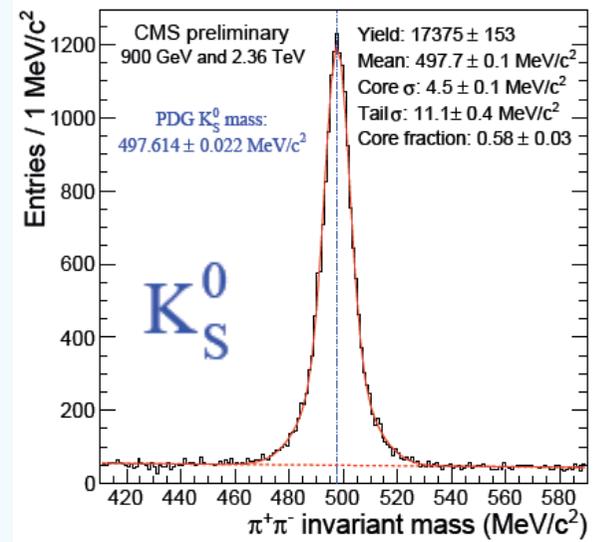
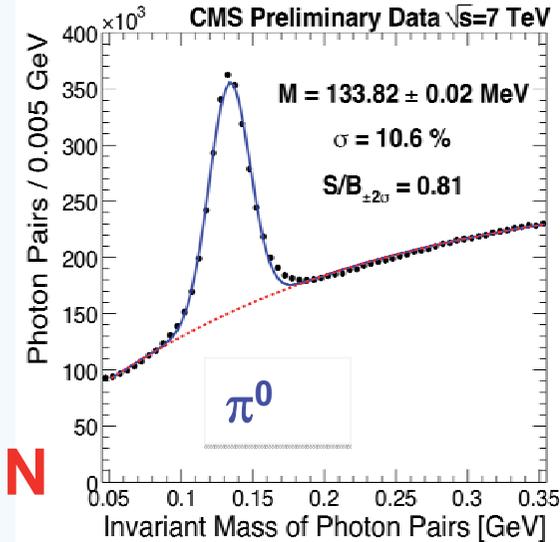
Blei-Blei-Kollision

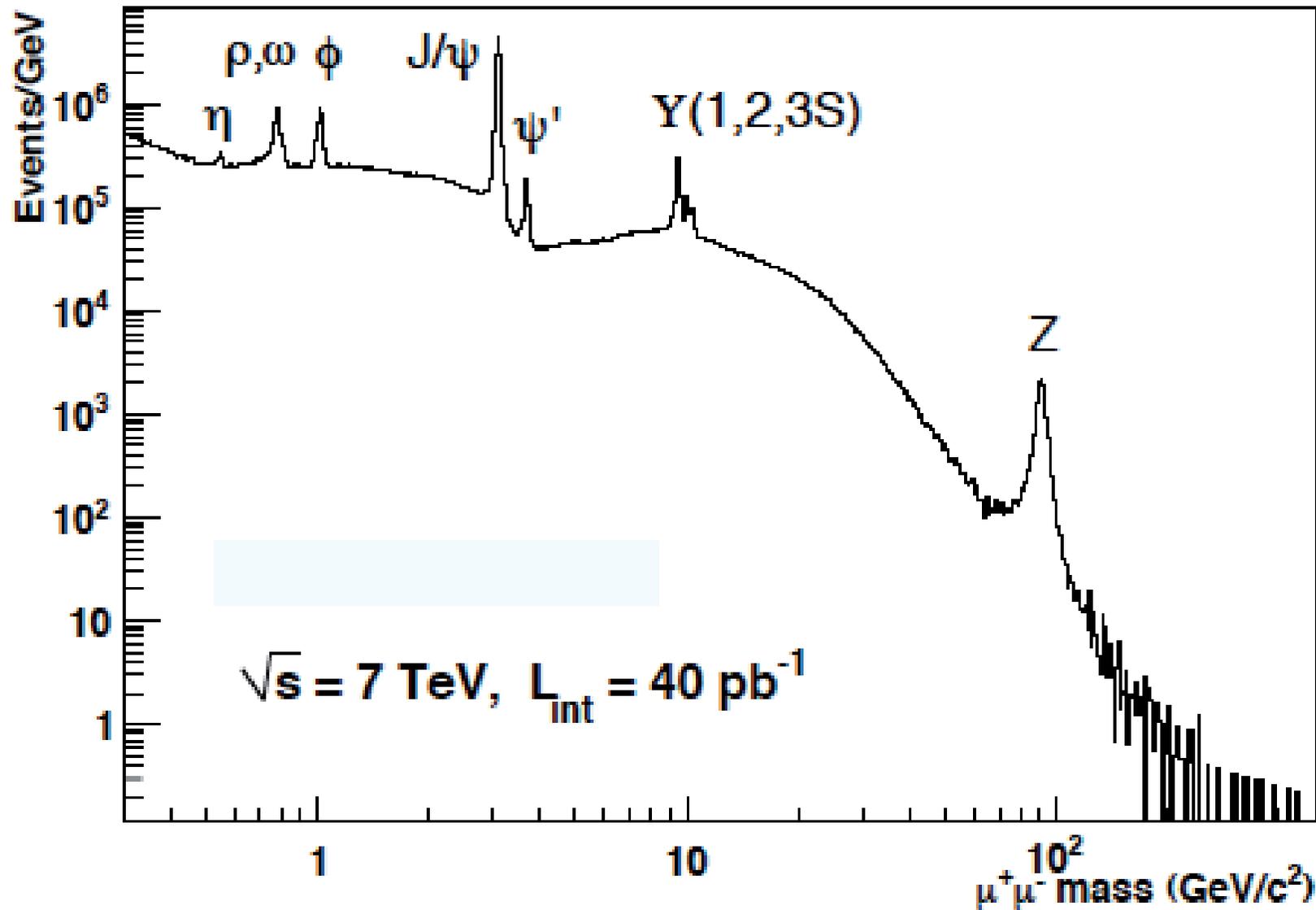


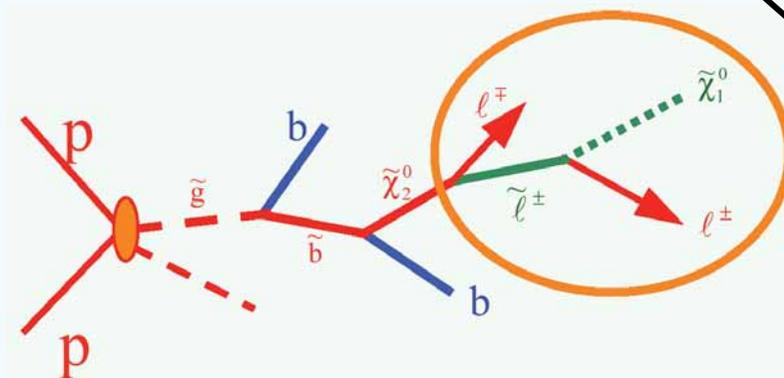
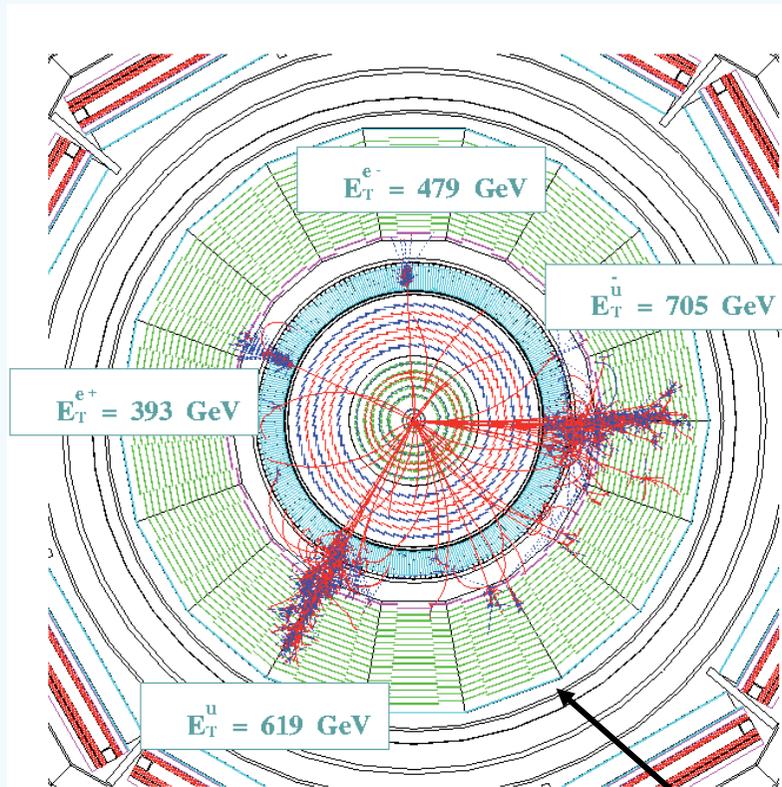
Blei-Blei-Kollision



Proton-Proton-Kollision







## Zerfallskette

$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{b} + b$$

$$\tilde{b} \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 + b$$

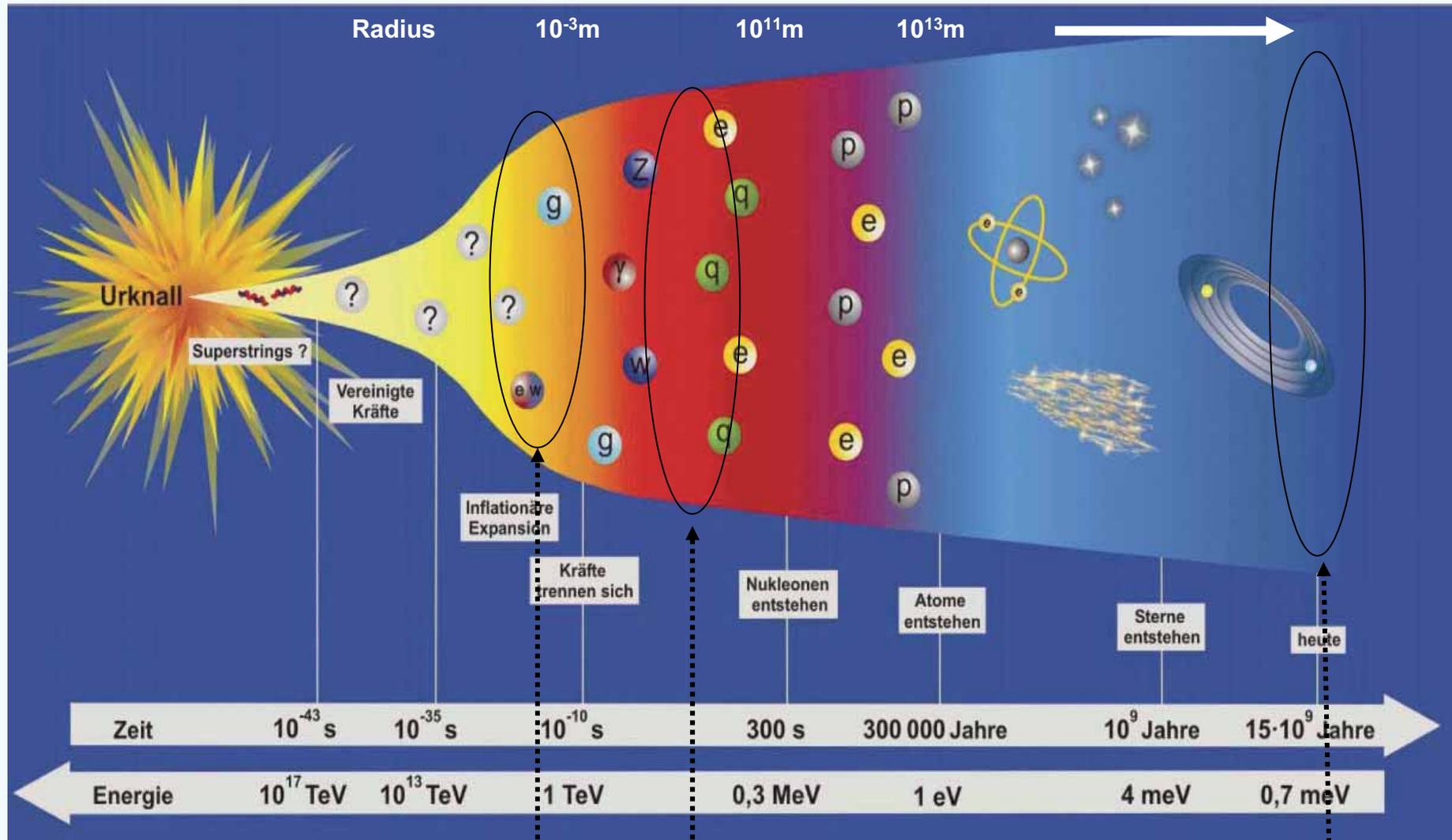
$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{l}^+ + l^-$$

$$\tilde{l}^{\pm} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^{\mp}$$

## Endzustand

$$b + b + l^- + l^+ + \tilde{\chi}_1^0$$

Dunkle Materie ?



Large Hadron Collider

Dunkle Materie,  
Energie

Thomas Müller

Institut für Experimentelle Kernphysik, KIT

30. 04. 2011

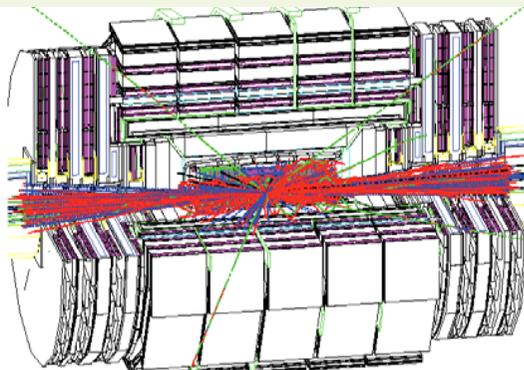
**Wir erleben eine Blütezeit in der Suche nach den fundamentalen Fragen der Natur.**

**Mehr als 10.000 Menschen aus 40 Nationen haben die Weltmaschine gebaut, die jetzt in Betrieb ist.**

**Mit diesem Projekt erhoffen wir, die Gesetzmäßigkeiten der Natur weiter zu entschlüsseln und die Vorgänge nach der Geburt des Universums besser zu verstehen**

- **Gegenwert unserer Forschung:**
  1. Erkenntnis
  2. Anschlag und Erfindungen
  3. Ausbildung

Das Karlsruher Team



Simulation eines Higgsbosonereignisses



