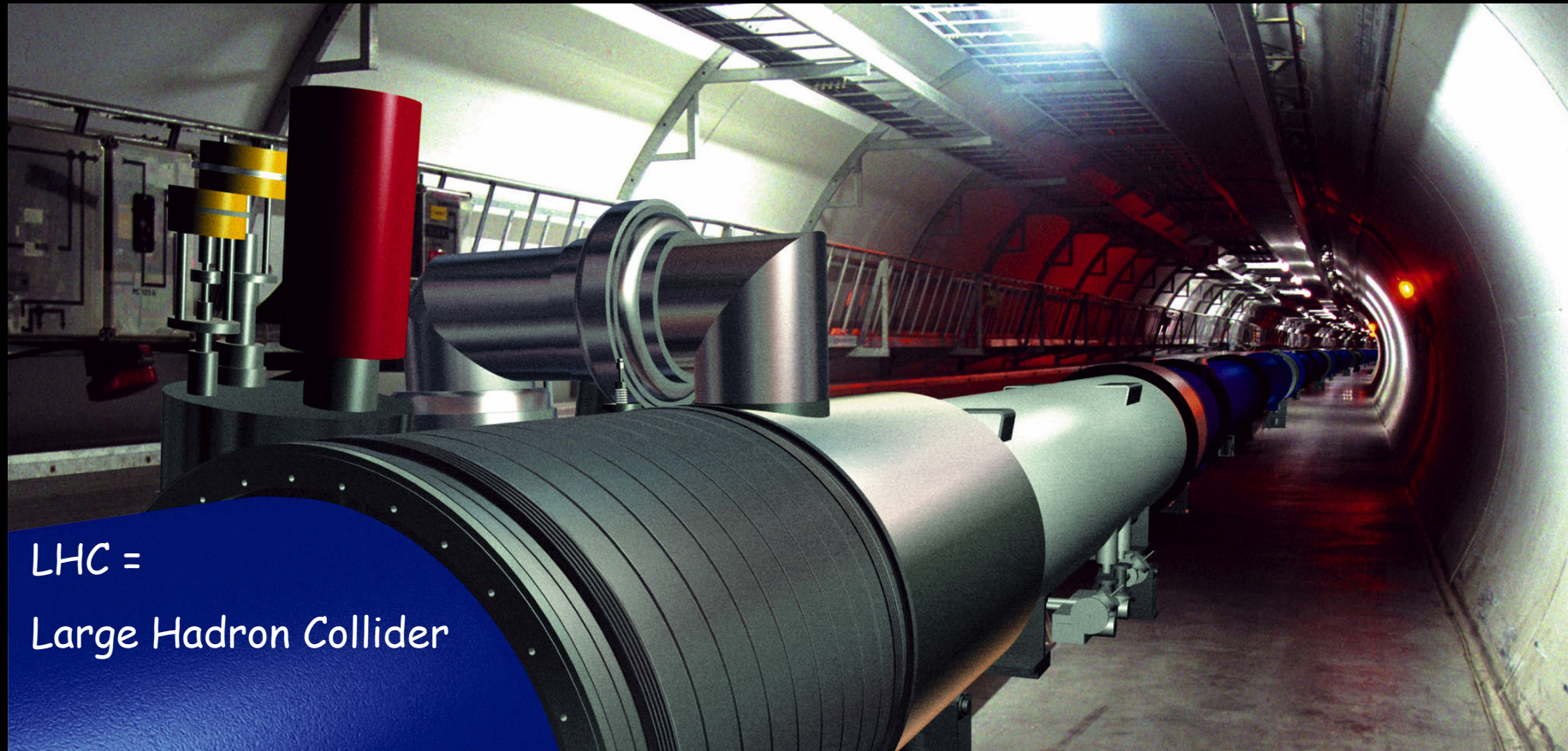


Der weltgrößte Teilchenbeschleuniger LHC

Eine „Zeitmaschine“ für die Reise zurück zum Urknall



LHC =
Large Hadron Collider

(2007)

Thomas Hebbeker
RWTH Aachen

20.11.2004

Genf

• CERN

CERN

• Elementarteilchen

• Urknall

• Beschleuniger LHC

• „Zeitmaschine“ ?



27 km

Frankreich

CERN 1954-2004



Conseil Européen pour la
Recherche Nucléaire

European Center for
Particle Physics



Sur le terrain du futur institut nucléaire



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)

(Photo Freddy Bertrand, Genève)

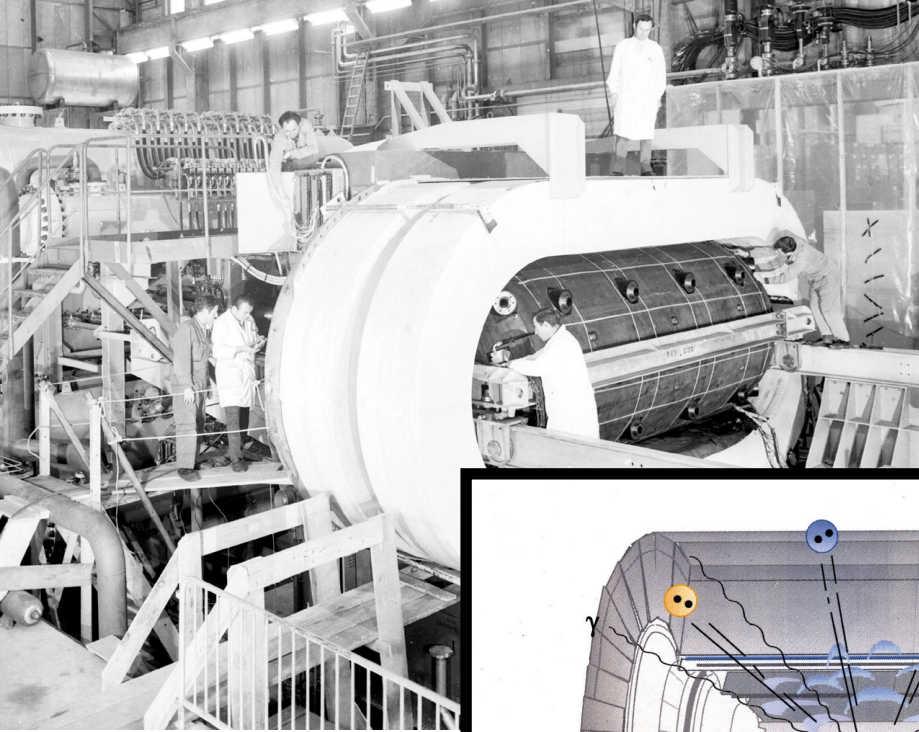
La Suisse du 30 octobre 1953



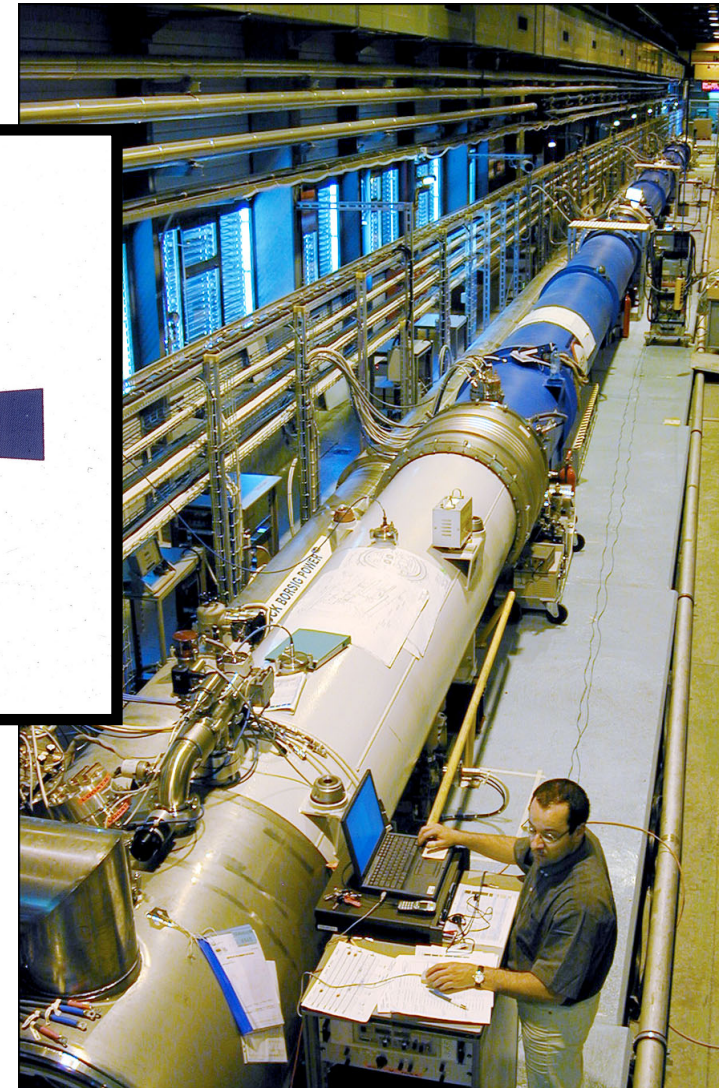
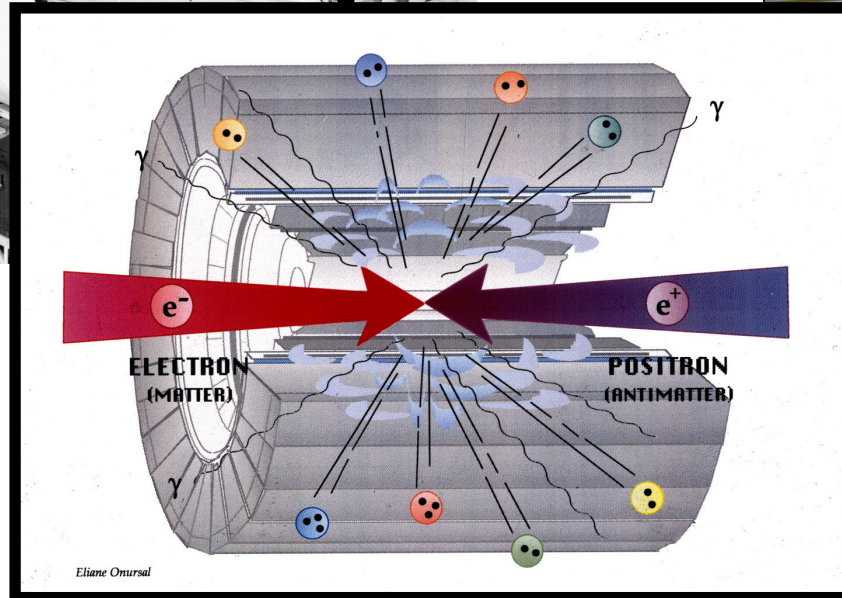


- Weltgrößtes Labor für Elementarteilchenphysik
7000 Wissenschaftler
800 Millionen Euro / Jahr

CERN 1954-2004 Experimentiergeräte



Teilchendetektor
1970



LHC -Magnet 2001

CERN 1954-2004

Prominenz



Inbetriebnahme

ISR-Beschleuniger

1971

Nobelpreisträger

C. Rubbia (1984),

S. Ting (1976),

G. Charpak (1992)

(Teilchendetektor)



Carlo Rubbia und Simon van der Meer
Nobelpreis 1984 (Entdeckung W und Z)

Langjährige Zusammenarbeit CERN - RWTH

22. November 2004 – Aula I im Hauptgebäude, Templergraben 55, RWTH Aachen

Verleihung der Ehrendoktorwürde der RWTH an

Prof. C. Rubbia und Prof. S.C.C. Ting

anlässlich des 50-jährigen Bestehens von CERN

Öffentlich



Carlo Rubbia
Nobelpreis 1984

16:15

**Prof. H. Schopper: 50 Jahre CERN –
Wissenschaftliche Erfolge und
Völkerverständigung**

17:00

Prof. G. Flüge: Laudatio

17:20

**Prof. B. Rauhut (Rektor der RWTH):
Honorary Doctorate to C. Rubbia and S.C.C. Ting**

17:30

Prof. C. Rubbia: The Future of Energy

18:00

Prof. S.C.C. Ting: The Anti Matter Universe

Kontakt: Prof. G. Flüge

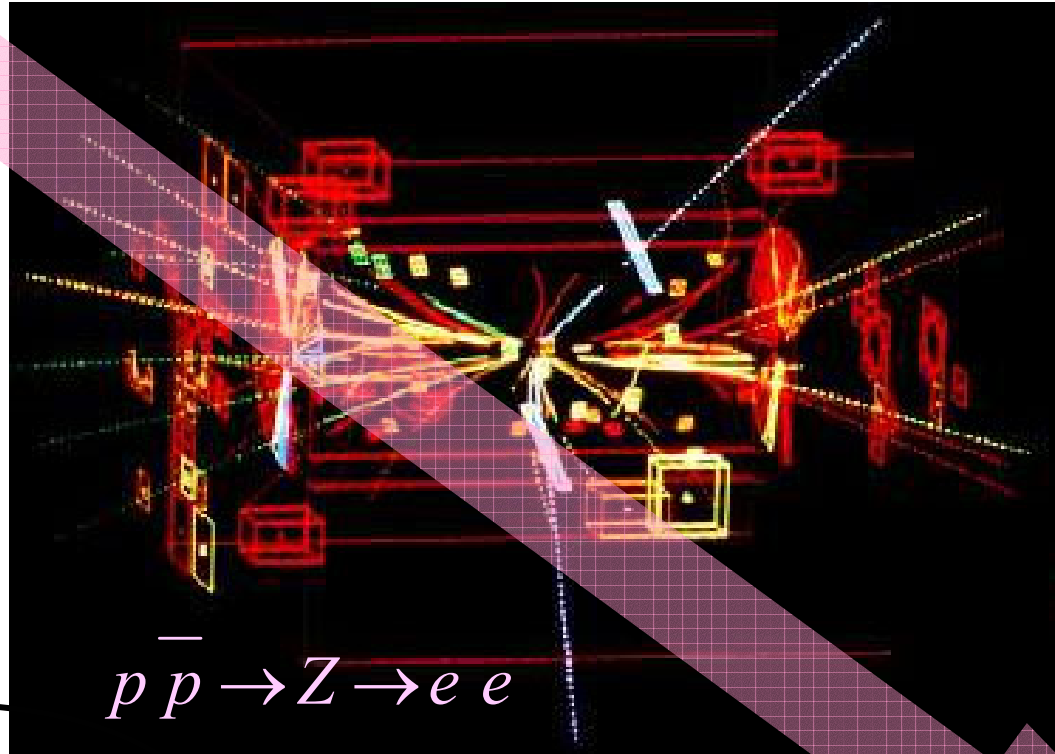


Samuel C.C. Ting
Nobelpreis 1976

CERN 1954-2004 Entdeckungen



Indirekte Hinweise
1973



$$p \bar{p} \rightarrow Z \rightarrow e e$$

Z-Boson
(schwache Kraft)

Entdeckung
1983

Präzisionsmessungen 1995

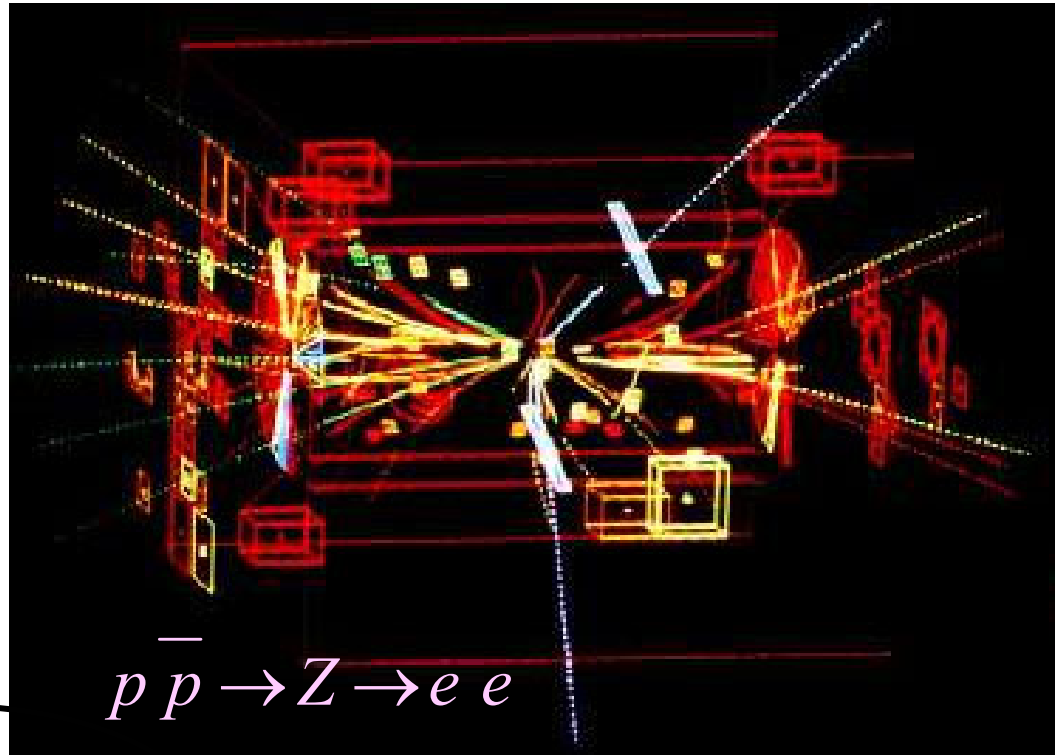
$$m_Z = (91.188 \pm 0.002) \text{ GeV}$$

CERN 1954-2004 Entdeckungen



Indirekte Hinweise

1973 Aachen!



$$p \bar{p} \rightarrow Z \rightarrow e e$$

Z-Boson
(schwache Kraft)

Entdeckung

1983 Aachen!

Präzisionsmessungen 1995

$$m_Z = (91.1871 \pm 0.0021) \text{ GeV}$$

Aachen!

CERN 1954-2004

Spin-Off



Tim Berners-Lee u.a.
WWW, 1991

Kältetechnik:

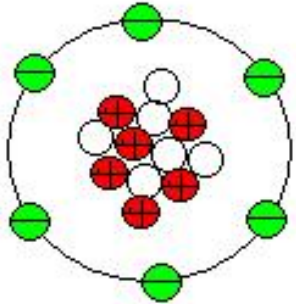
LHC: (supra-)flüssiges Helium

40 000 Tonnen $\rightarrow 2^0 K = -271^0 C$

weltgrößte Anlage dieser Art, 2007



- CERN



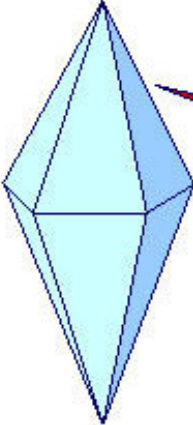
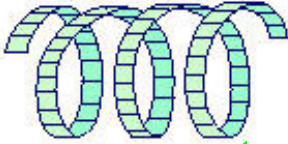
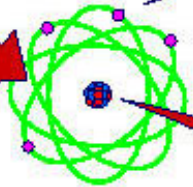
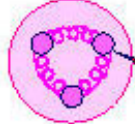
- **Elementarteilchen**

Teilchen und Kräfte

Beschleuniger und Detektoren

- Urknall
- Beschleuniger LHC
- „Zeitmaschine“ ?

Die Struktur der Materie

Kristall Molekuel	Atom	Atom- Kern	Elementar- teilchen	
 			Hadronen Mesonen  Baryonen  Proton Neutron	Leptonen $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ Quarks u, c, d, s, b, t 
1 cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm	?

elektromagnetische Kraft
(= elm. Wechselwirkung)

Kernkraft = starke Wechselwirkung

Elementarteilchenphysik

Die 4 Grundbausteine des Sonnensystems

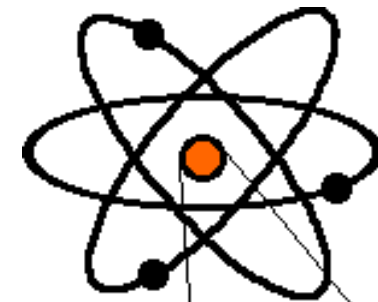
$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \text{Neutrino} \\ \text{Elektron} \end{array} \right\} \text{Leptonen}$$

$$\left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \text{up-Quark} \\ \text{down-Quark} \end{array} \right\}$$

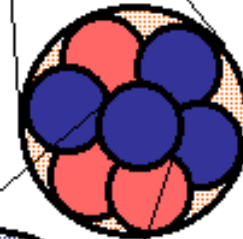
Kernbausteine = Nukleonen:

$$p = \text{Proton} = u + u + d$$

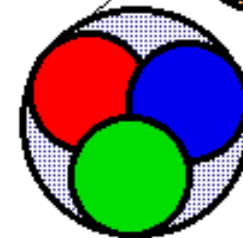
$$n = \text{Neutron} = u + d + d$$



Atom aus
Elektronen
und Kern



Kern aus
Nukleonen



Nukleon aus
Quarks

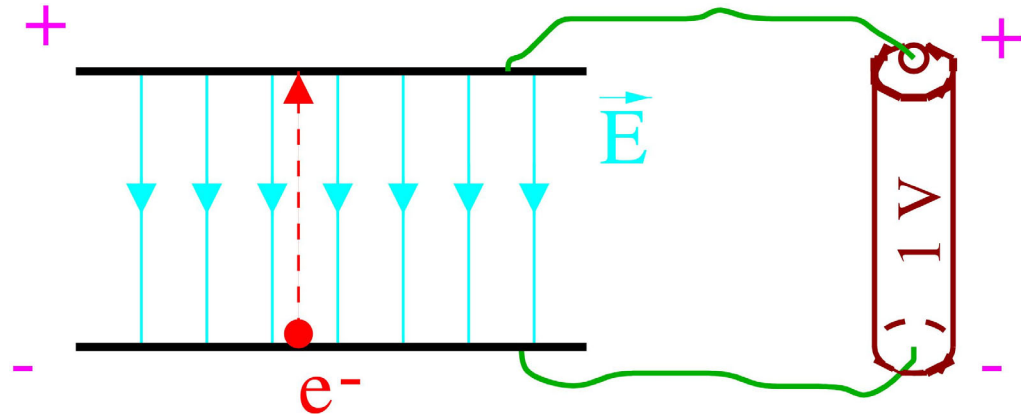
Grundbausteine sind punktförmig : “Elementarteilchen“

Energie und Masse

Energie-Einheit

eV = Elektronenvolt

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \approx 10^{-10} \text{ J}$$



Energie und Masse



$$E = mc^2$$

$c = 300000 \text{ km/s}$

Energie kann in Masse umgewandelt werden und umgekehrt !

$$\text{Protonmasse} \hat{=} 1 \text{ GeV}$$

Die 4 Kräfte/Wechselwirkungen

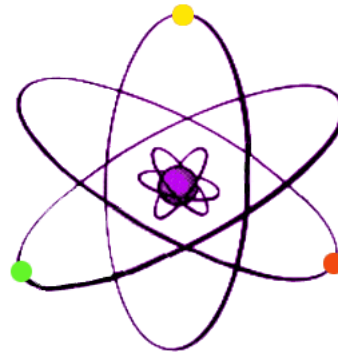
Gravitation:



vernachlässigbar im Mikrokosmos

Elektromagnetische WW:

Atom

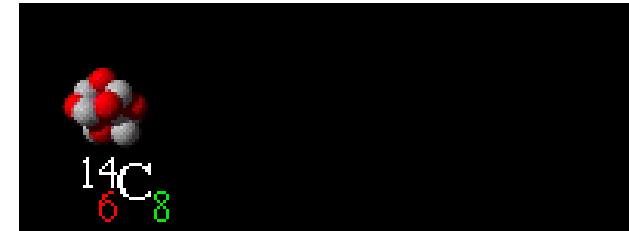


Schwache WW:

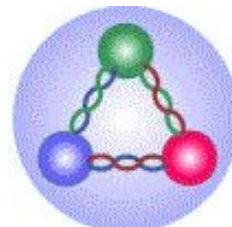
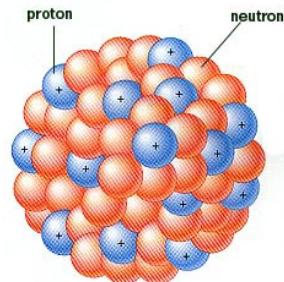
Radioaktiver Zerfall

Beta-Zerfall

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$$



Starke WW:



Nukleonen im Kern

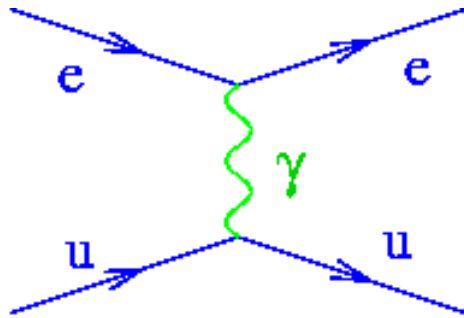
Quarks im Nukleon

Beschreibung der Wechselwirkungen

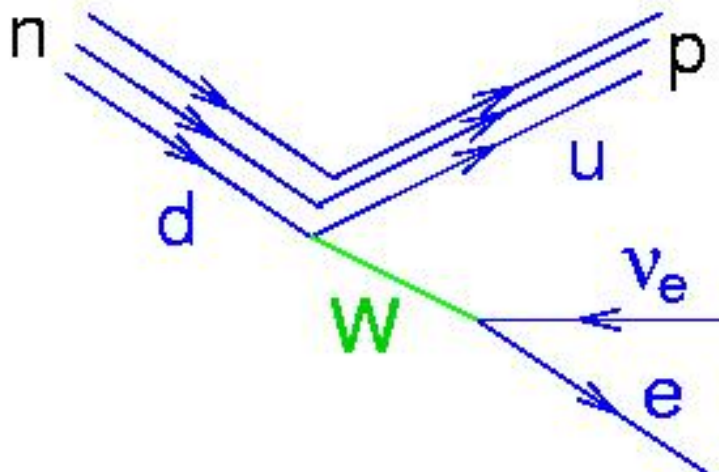
Feynman-Diagramme: Visualisierung und
Berechnung von Wahrscheinlichkeiten

Beispiele:

Elastische Elektron-Quark-Streuung (elektromagnetische WW):



Beta-Zerfall: (schwache Wechselwirkung):



Kräfte = Wechselwirkungen:

vermittelt durch

Austauschteilchen:

γ

W, Z

g

Teilchenphysik - Theorie

Materie:

viele Teilchen

instabil!

Leptonen:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

Quarks:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Wechselwirkungen: Austauschteilchen:

elektromagnetisch:

Photon	γ	masselos
Z-Boson	Z	91 GeV
W-Boson	$W^+ W^-$	80 GeV

schwach:

stark:

Gluon	g	masselos
-------	---	----------

Experimentellen Daten werden akkurat beschrieben!

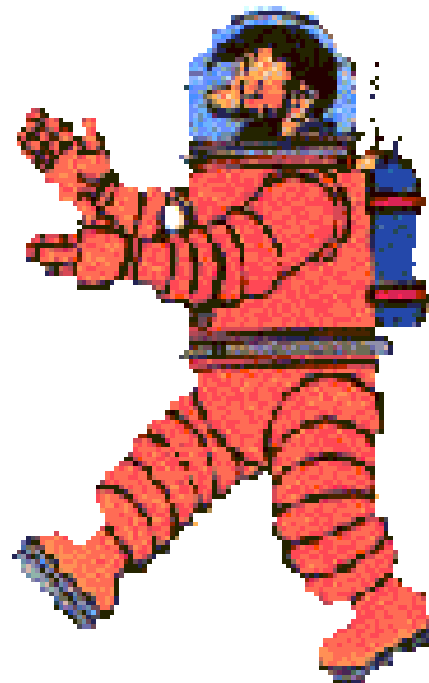
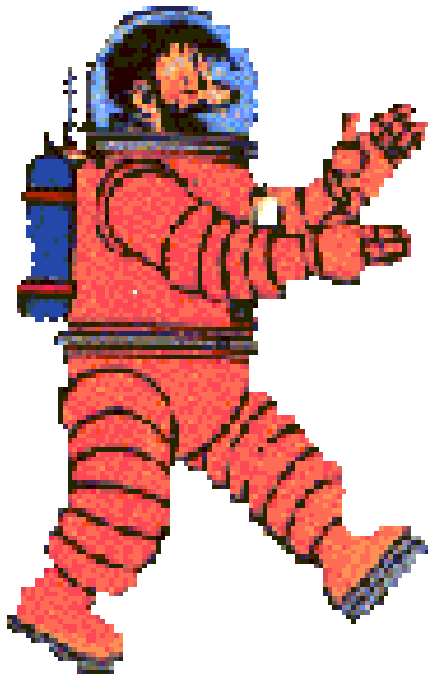
Materie und Antimaterie

 e^{-}

Elektron

 e^{+}

Positron

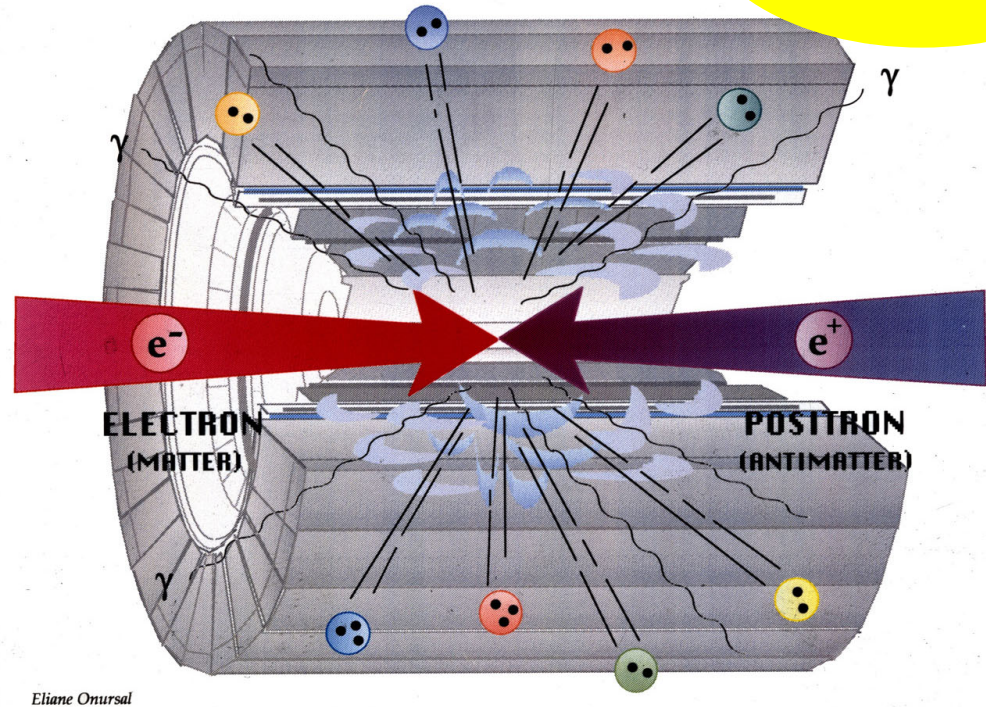


Methoden der experimentellen Teilchenphysik

Quantenphysik
! Zufall !

Werkzeuge:

- Teilchenbeschleuniger
- Teilchendetektoren



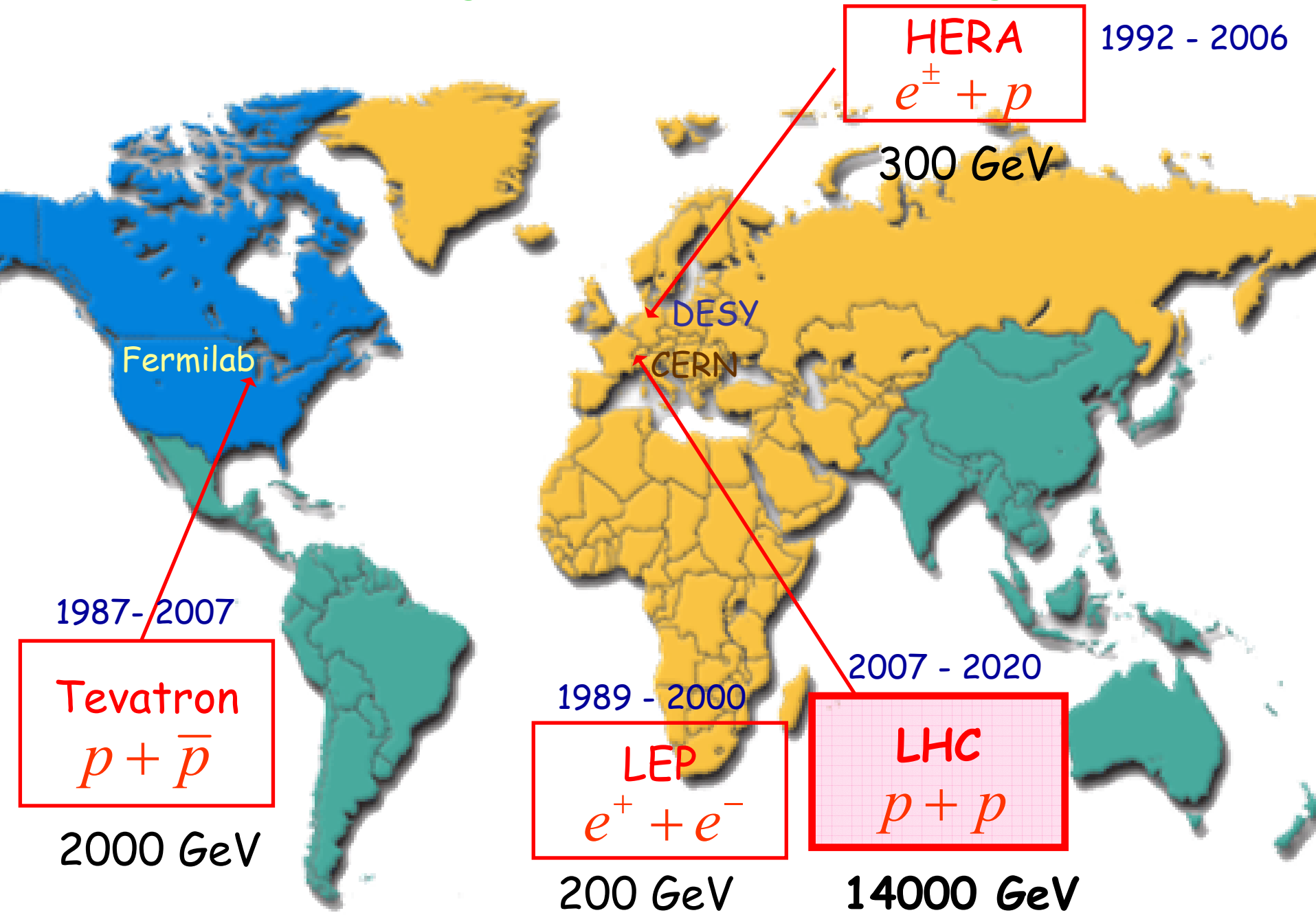
Unschärferelation: Ortsauflösung $\sim 1/E$

$100 \text{ GeV} \Leftrightarrow 1/1000 \text{ Protonradius}$

Neue schwere Teilchen (Masse m)

**HOHE
ENERGIE !**

Hochenergie-Teilchenbeschleuniger



Fundamentale Fragen

- ...
- Gibt es genau 3 „Familien“ ?

V_e	V_μ	V_τ
e	μ	τ
u	c	t
d	s	b

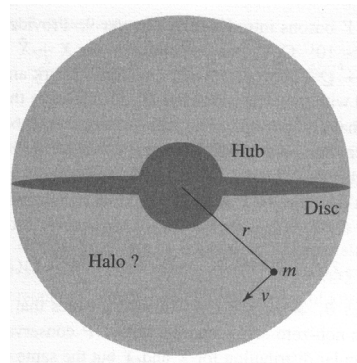
- ...
- ...

- Wie entsteht die Masse der Teilchen ?



- ...
- ...

- **Dunkle Materie ?**



- ...
- ...

- Gibt es Antimaterie im Universum ?

- ...
- ...



Die Massen der Elementarteilchen

Beispiele:

EXPERIMENT

$$m_e = 510.9989 \text{ keV}$$

$$\begin{aligned} \frac{m_W}{m_Z} &= \frac{80.451 \pm 0.033 \text{ GeV}}{91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}} \\ &= 0.8823 \pm 0.0004 \end{aligned}$$

Die Massen der Elementarteilchen

Beispiele:

EXPERIMENT

$$m_e = 510.9989 \text{ keV}$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033 \text{ GeV}}{91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}} \\ = 0.8823 \pm 0.0004$$

THEORIE

$$m_e = 0$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{0}{0}$$



Die Massen der Elementarteilchen

P.Higgs

Beispiele:

EXPERIMENT

$$m_e = 510.9989 \text{ keV}$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033 \text{ GeV}}{91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}} \\ = 0.8823 \pm 0.0004$$

Bisher nicht gefunden:

$$m_{\text{Higgs}} > 114 \text{ GeV}$$

ERWEITERTE THEORIE

$$m_e = \dots > 0$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \frac{\dots > 0}{\dots > 0}$$

$$= 0.8812 \pm 0.0014$$



⇒ Neues Teilchen: „Higgs“

LHC !



- CERN
- Elementarteilchen

- **Urknall**

Astrophysik

Big-Bang

Dunkle Materie

- Beschleuniger LHC
- „Zeitmaschine“ ?

Astrophysik: Sterne und Milchstraße



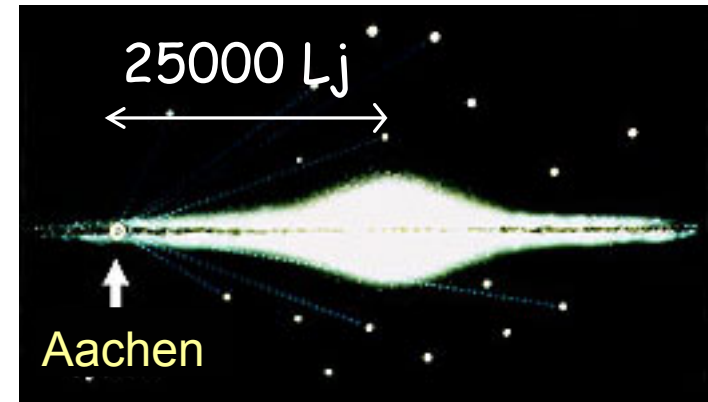
„Unsere“ Galaxie = Milchstrasse



Nachbarstern
„Proxima Centauri“
4 Lichtjahre

1 Lichtjahr

Strecke, die Licht
in 1 Jahr
zurücklegt



Das Sonnensystem in der
Milchstrasse

Astrophysik: Galaxien



Palomar Observatorium

E. Hubble (1949)



Nachbargalaxie

„Andromeda“

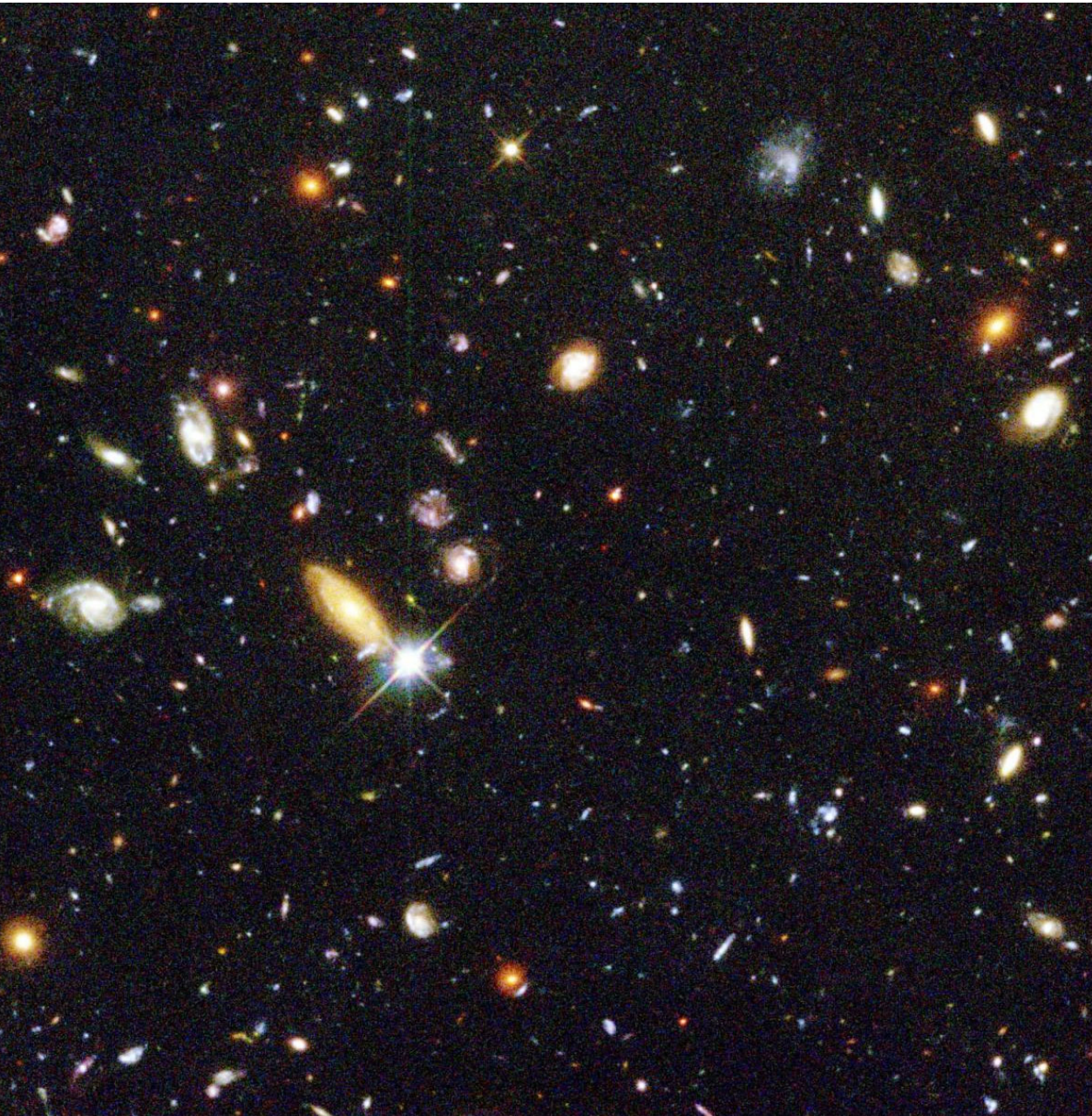
3 Millionen Lichtjahre



„Whirlpool“

37 Millionen Lj

Astrophysik: Ferne Galaxien



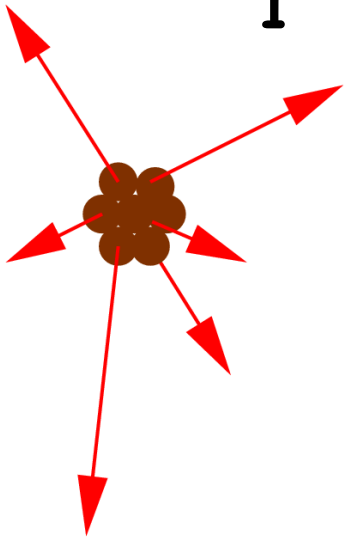
Hubble-Teleskop

bis zu einigen
Milliarden Lichtjahren

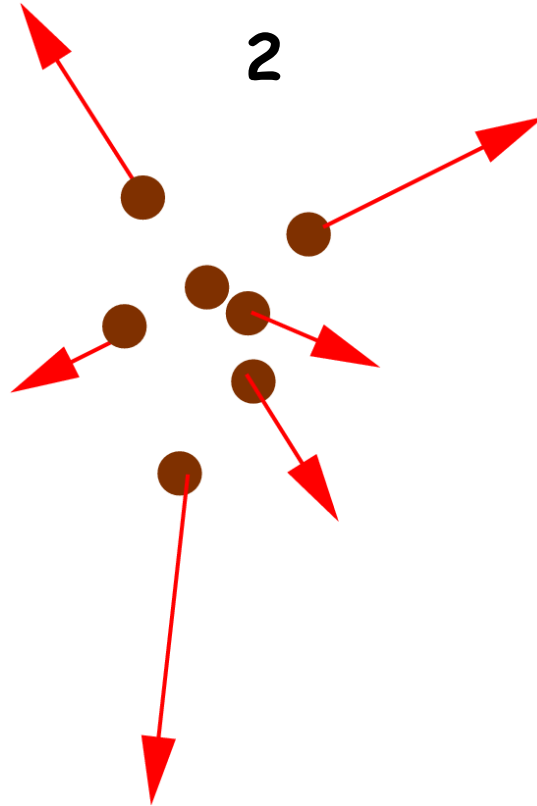
Blick in die
Vergangenheit!

Explosions-Modell

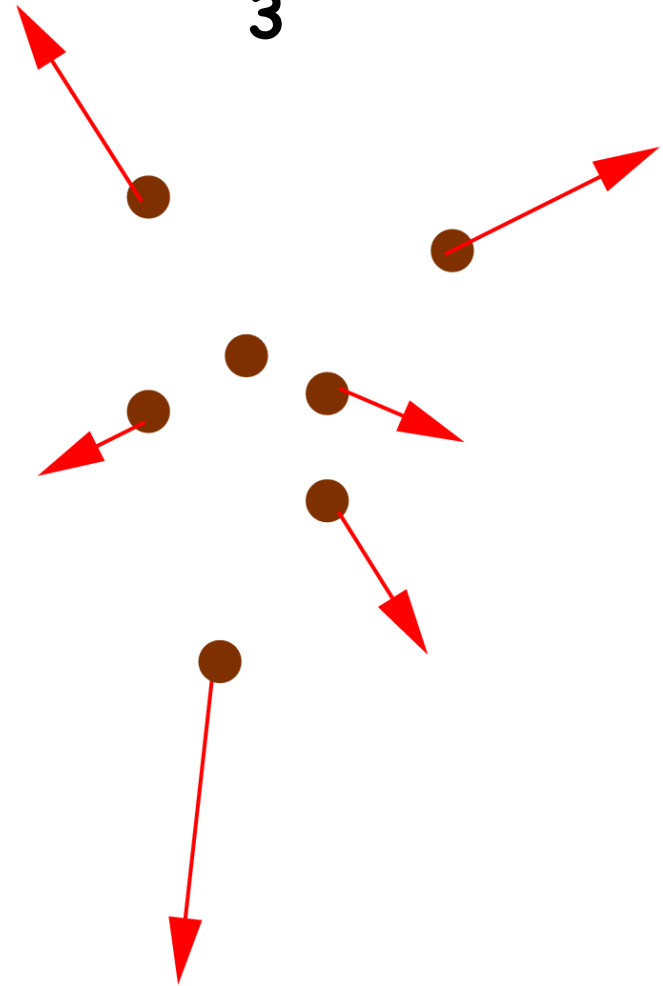
1



2

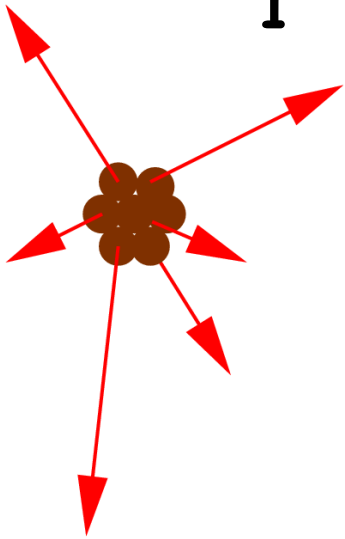


3

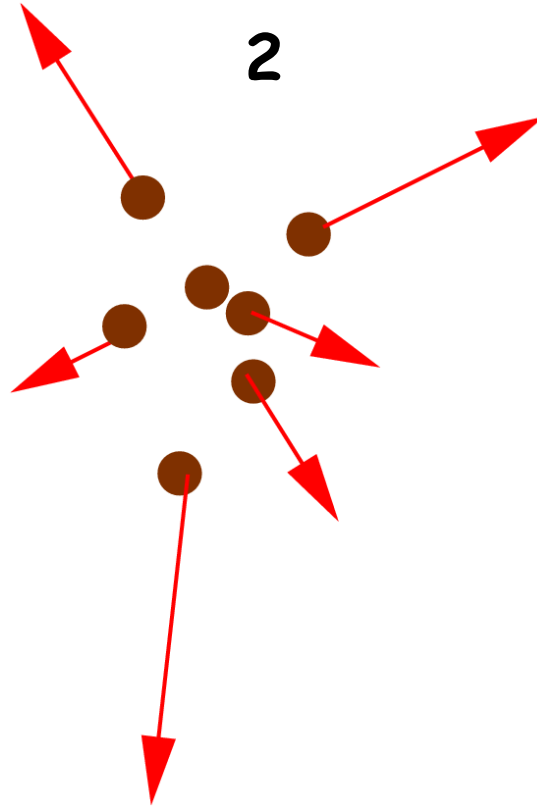


Explosions-Modell

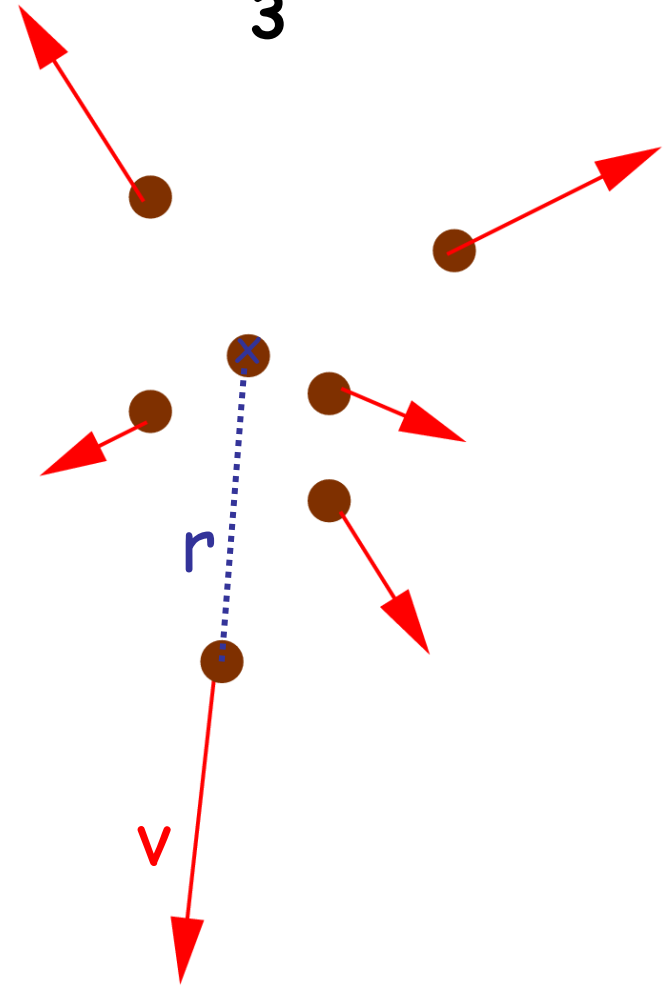
1



2

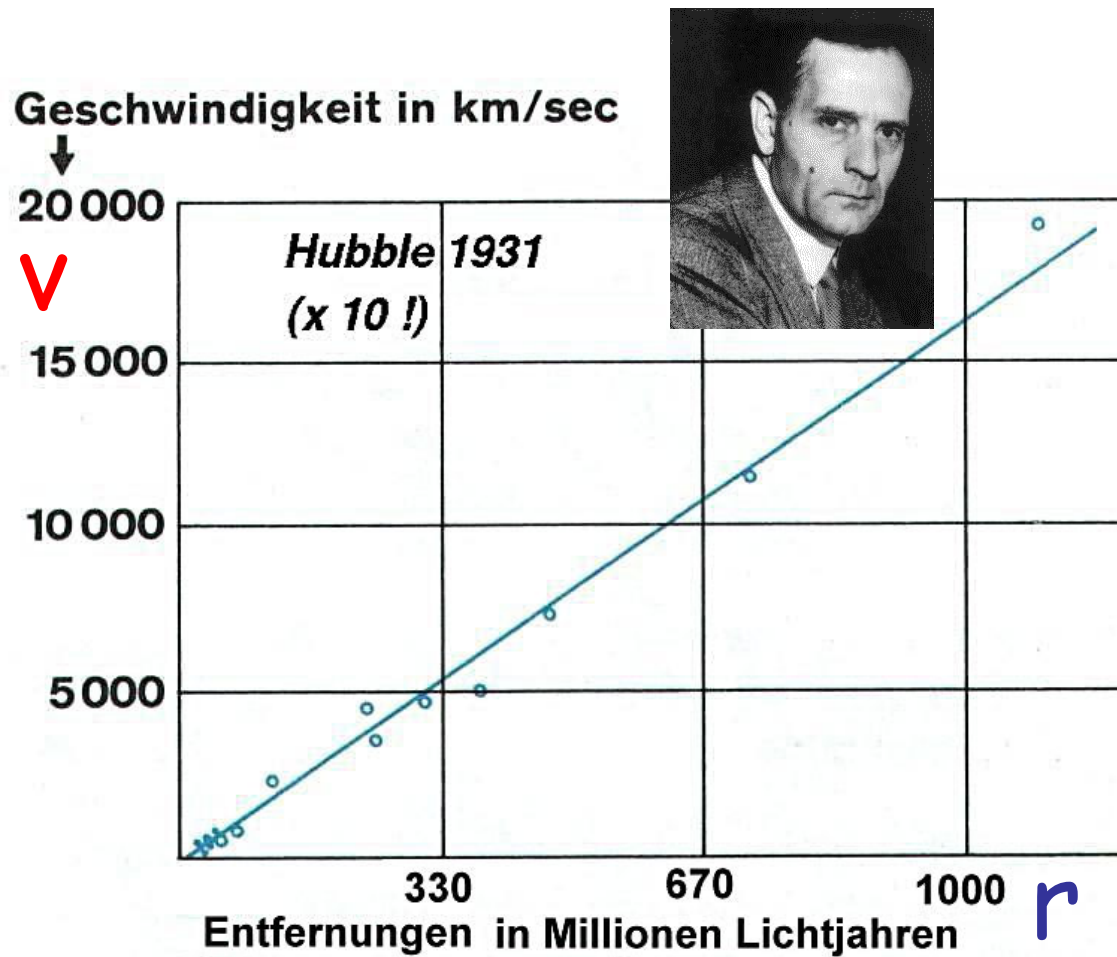


3



$$v = k \cdot r$$

Geschwindigkeiten von Galaxien



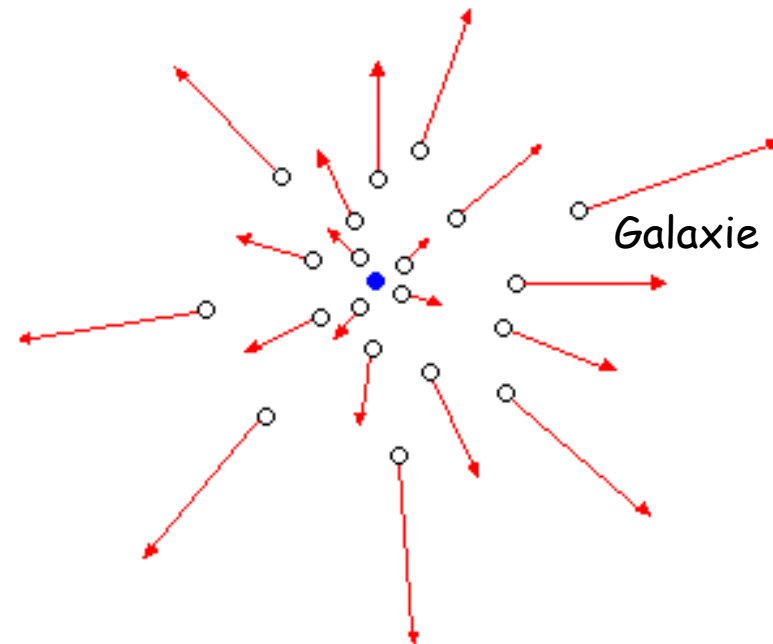
Hubble-Gesetz:

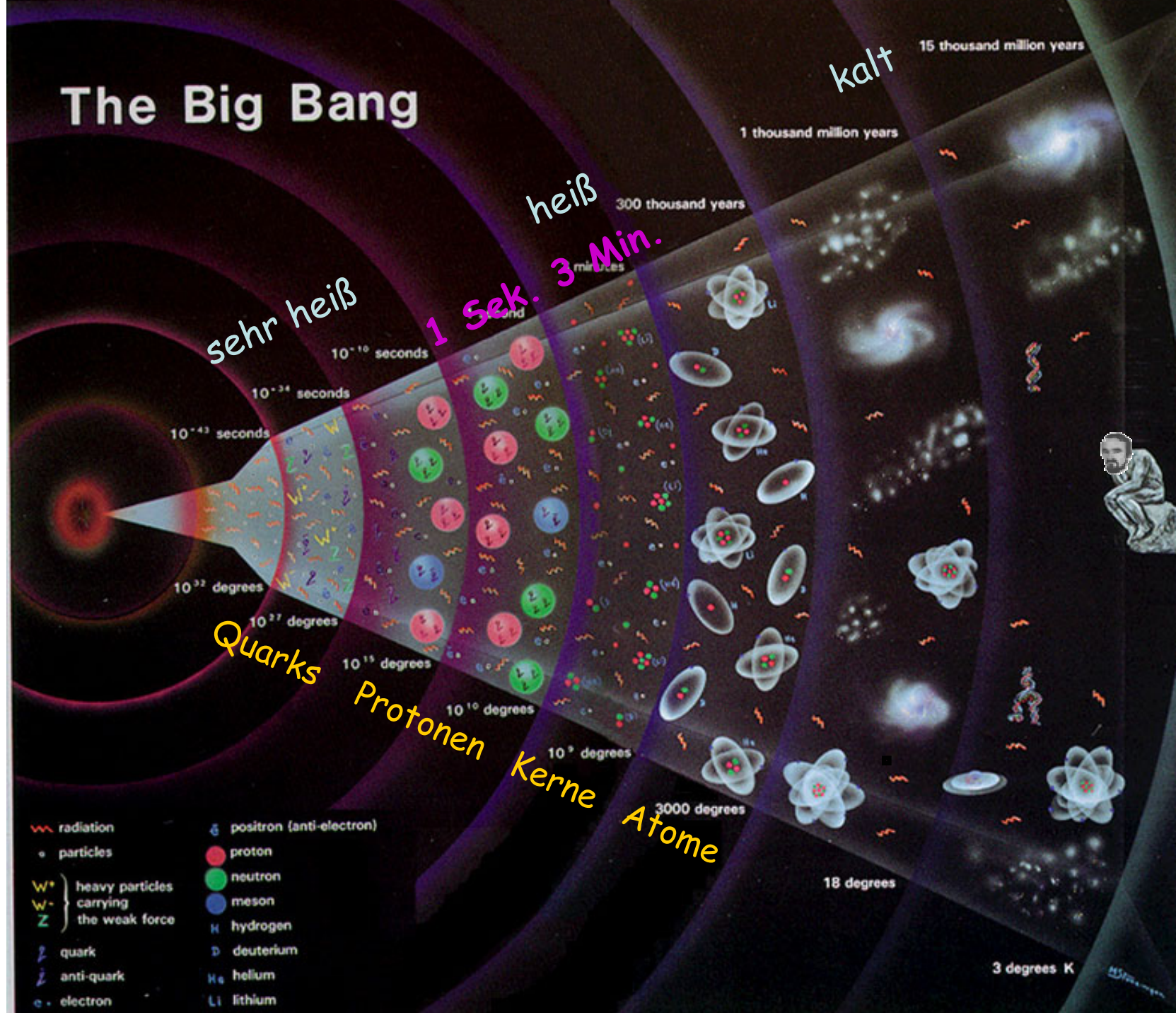
$$v = H \cdot r$$

$$1/H = 15 \text{ Milliarden Jahre}$$

Universum expandiert !

Urknall!



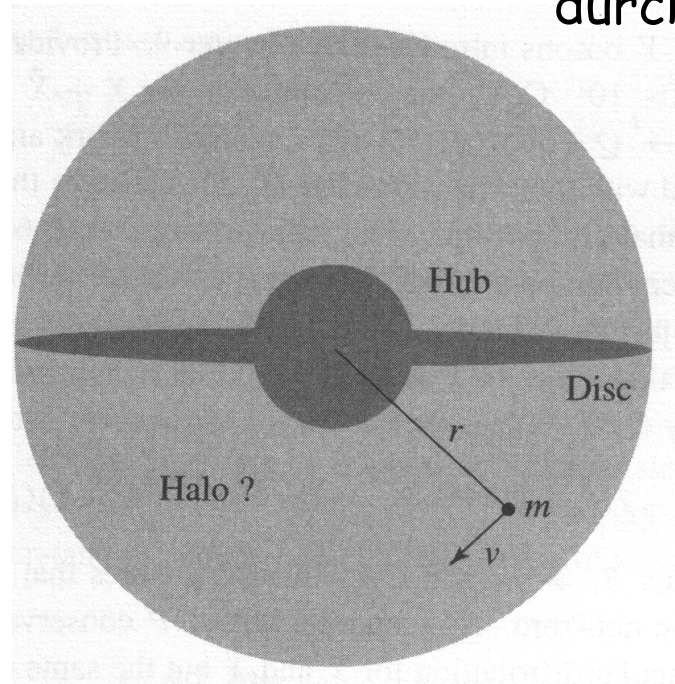


Dunkle Materie ?

Untersuchung von
Spiralgalaxien:

Es gibt mehr als
leuchtende Materie

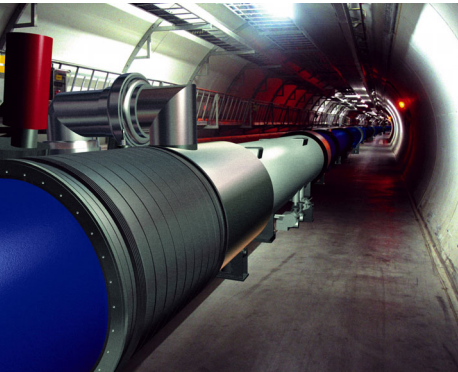
indirekt nachweisbar
durch Gravitation



Dunkle Materie = Neutralinos χ ?

LHC !

- CERN
- Elementarteilchen
- Urknall



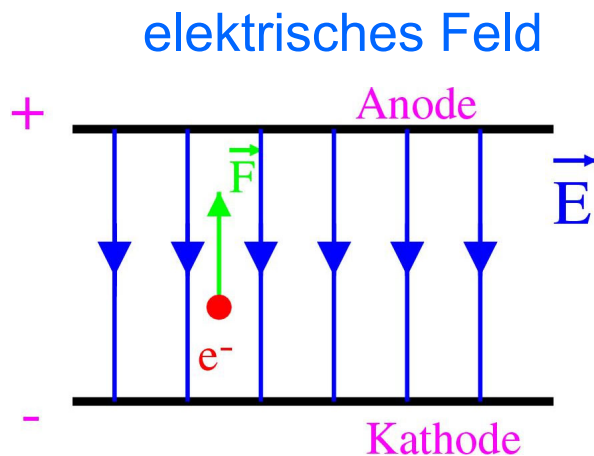
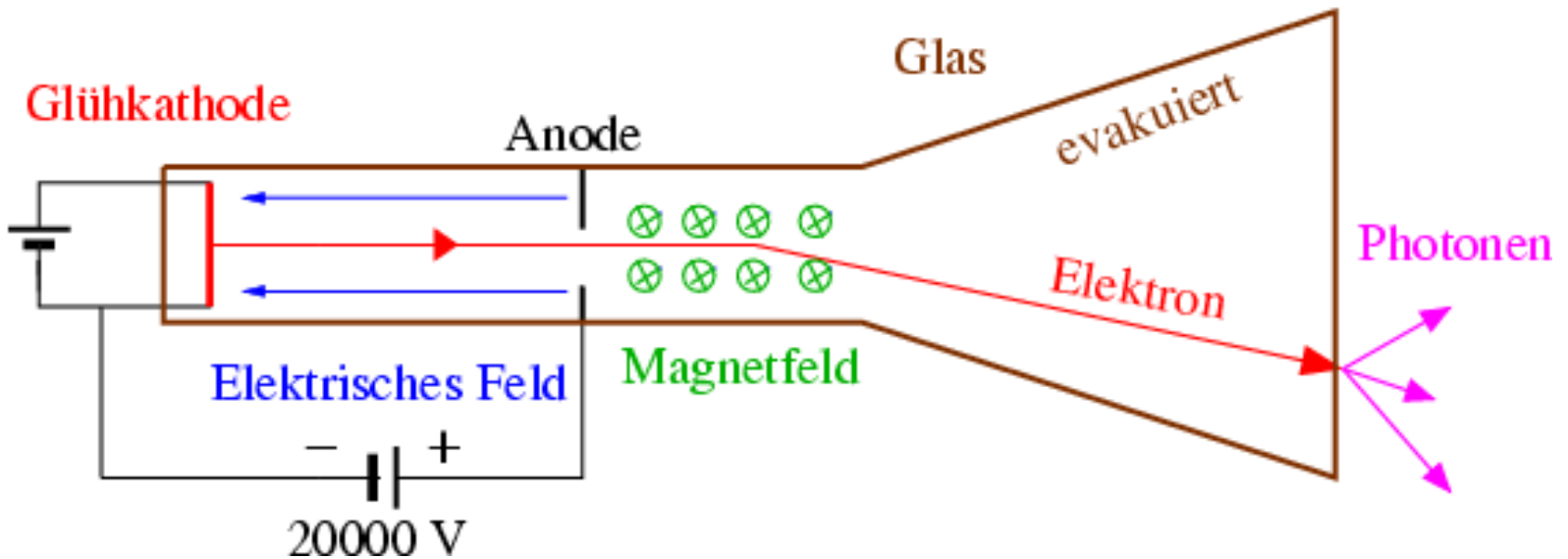
- **Beschleuniger LHC**
Teilchenbeschleuniger
Teilchendetektoren

- „Zeitmaschine“ ?

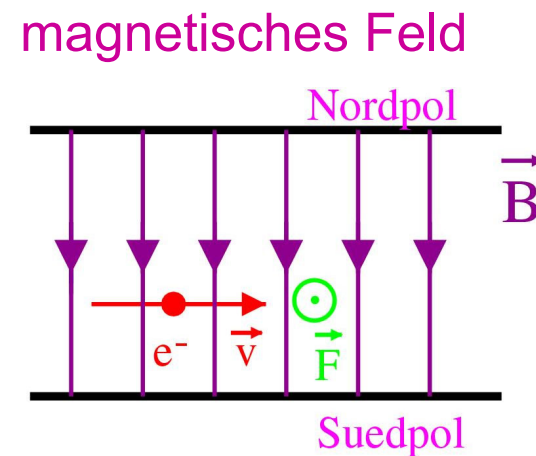
Teilchenbeschleuniger: Elektronen, 20 keV

Erzeugung Beschleunigung Ablenkung

Kollision



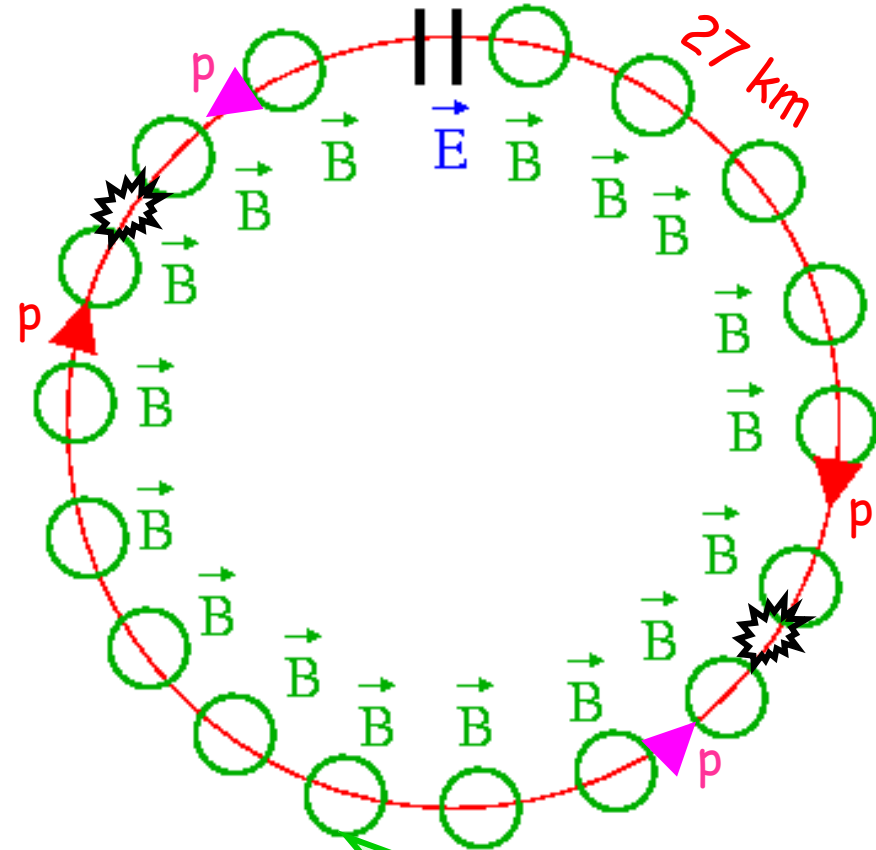
beschleunigt oder lenkt ab



lenkt (stark) ab



LHC = Large Hadron Collider



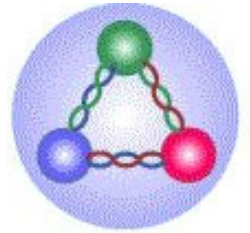
1200 Dipolmagnete,
supraleitend
je 14 m lang, $B = 8 \text{ Tesla}$

Large

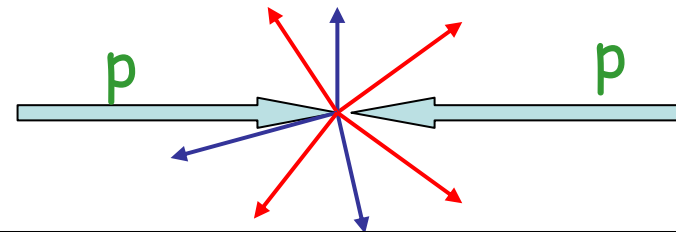
**27 km,
14000 GeV**

Hadron

Proton

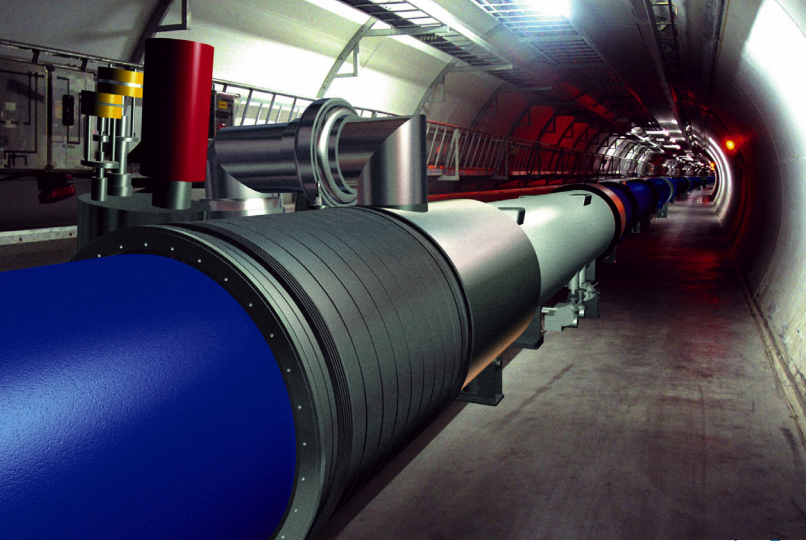


Collider

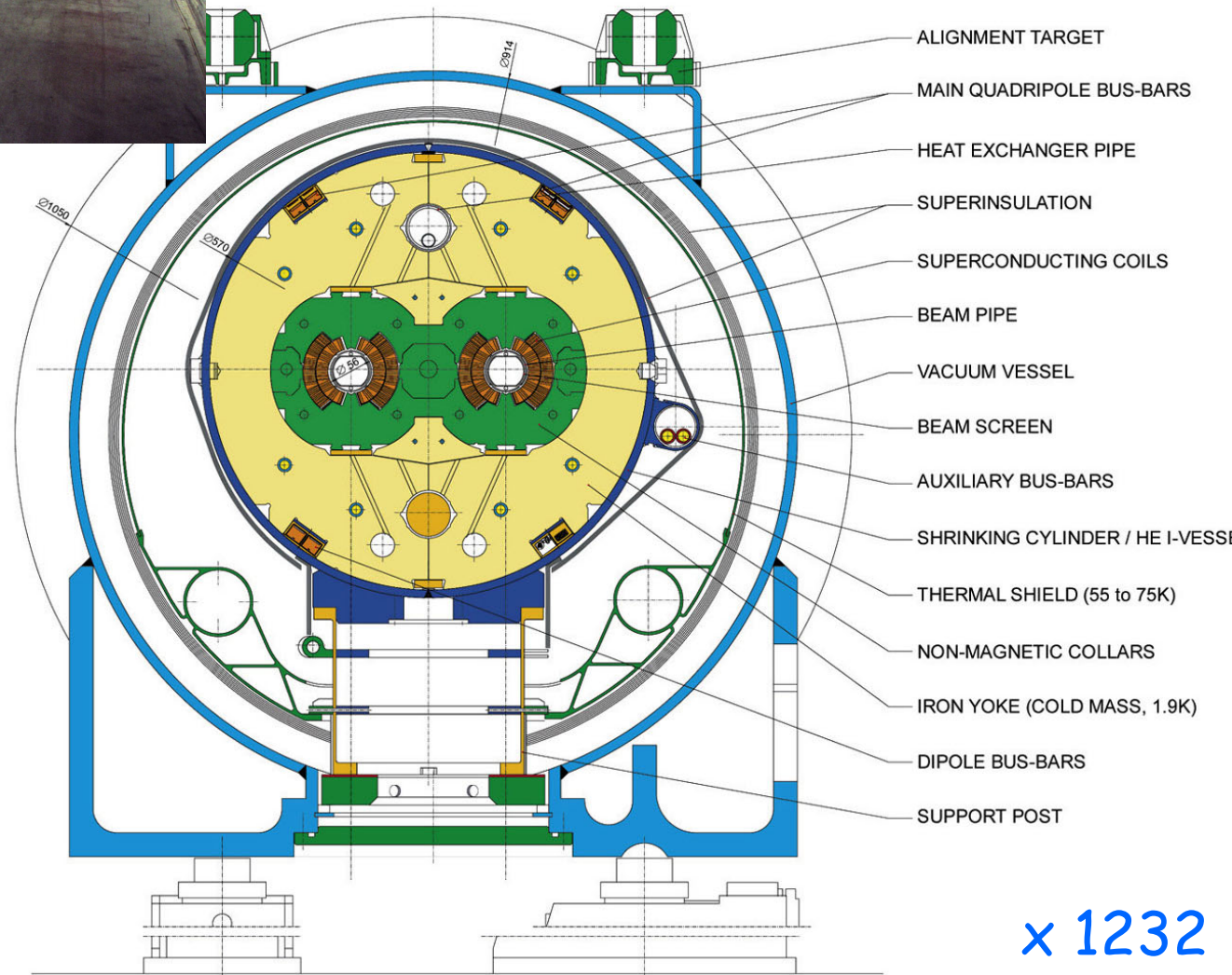


Größe
wächst mit
Energie!

Supraleitende Dipolmagnete



8 Tesla
14 Meter
30 Tonnen



x 1232

LHC + Teilchendetektoren

start: 2007

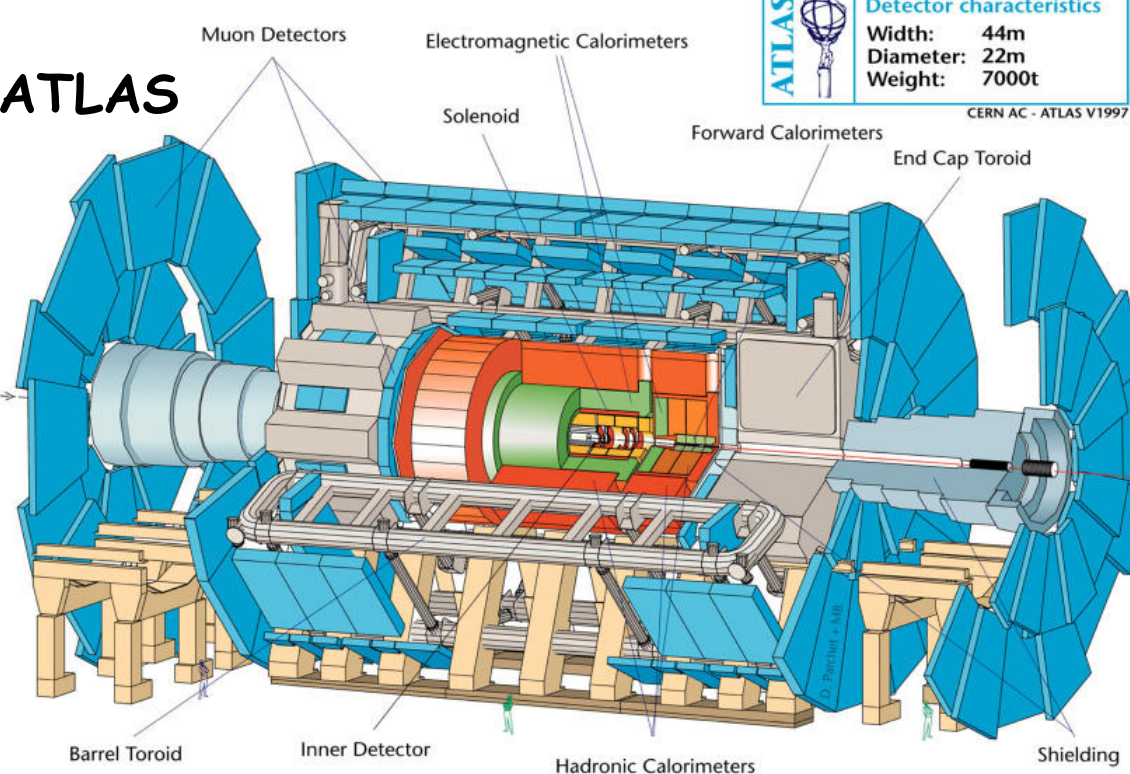


p

LHC = Large Hadron Collider



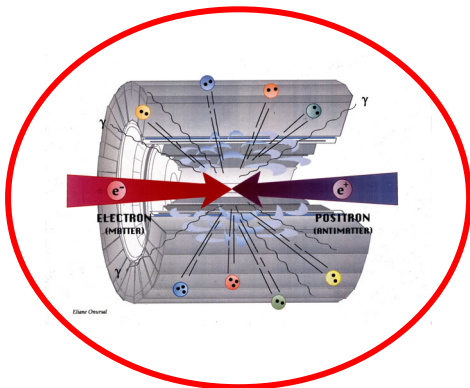
ATLAS



Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

40 m

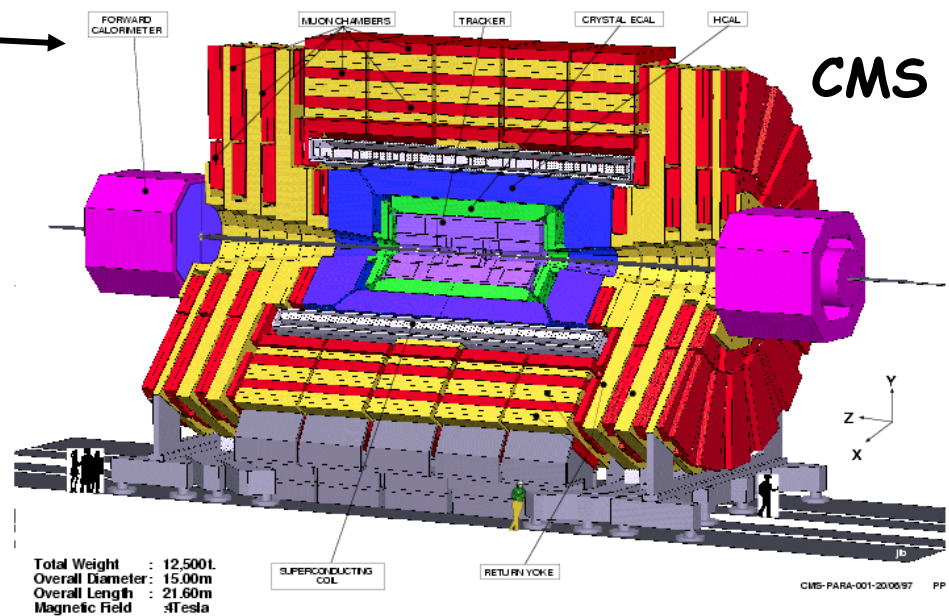


12000 t

LHC

Teilchen-detektoren

CMS



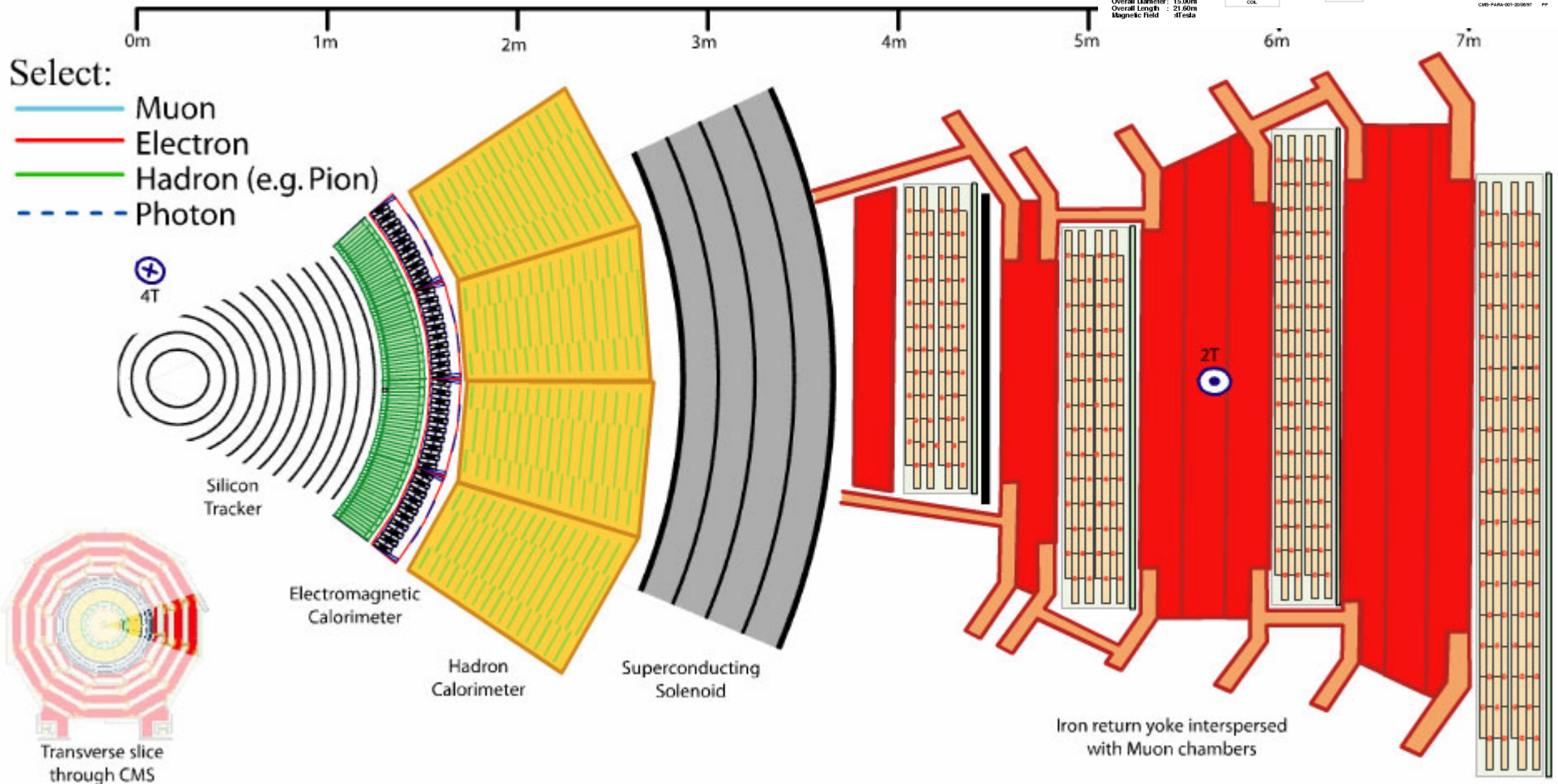
Total Weight	: 12.500t
Overall Diameter	: 15.00m
Overall Length	: 21.60m
Magnetic Field	: 4 Tesla

FILM

CMS-Detektor: Funktionsprinzip

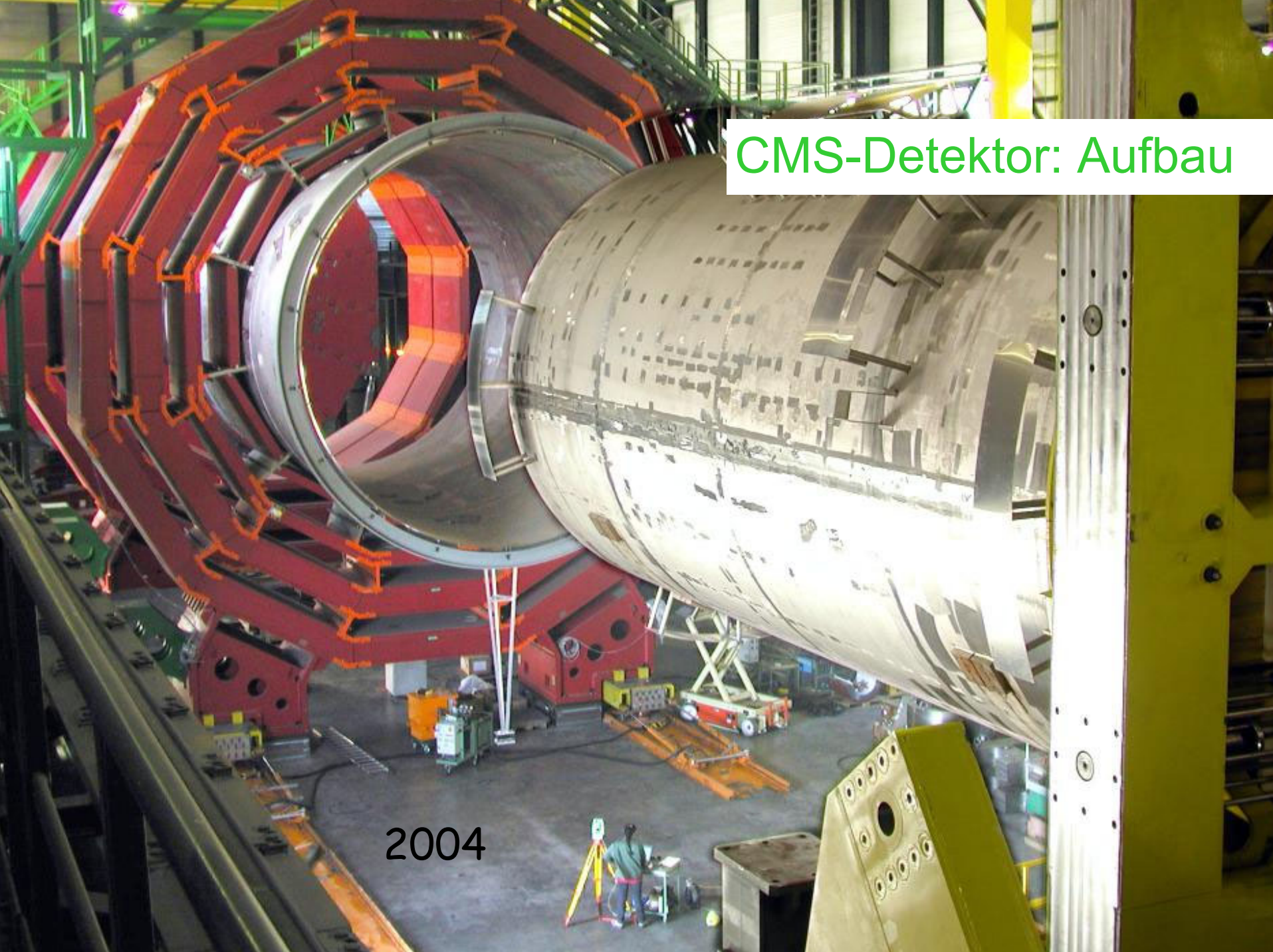
Select:

- Muon
- Electron
- Hadron (e.g. Pion)
- - - Photon



Größe wächst mit Teilchenenergie!

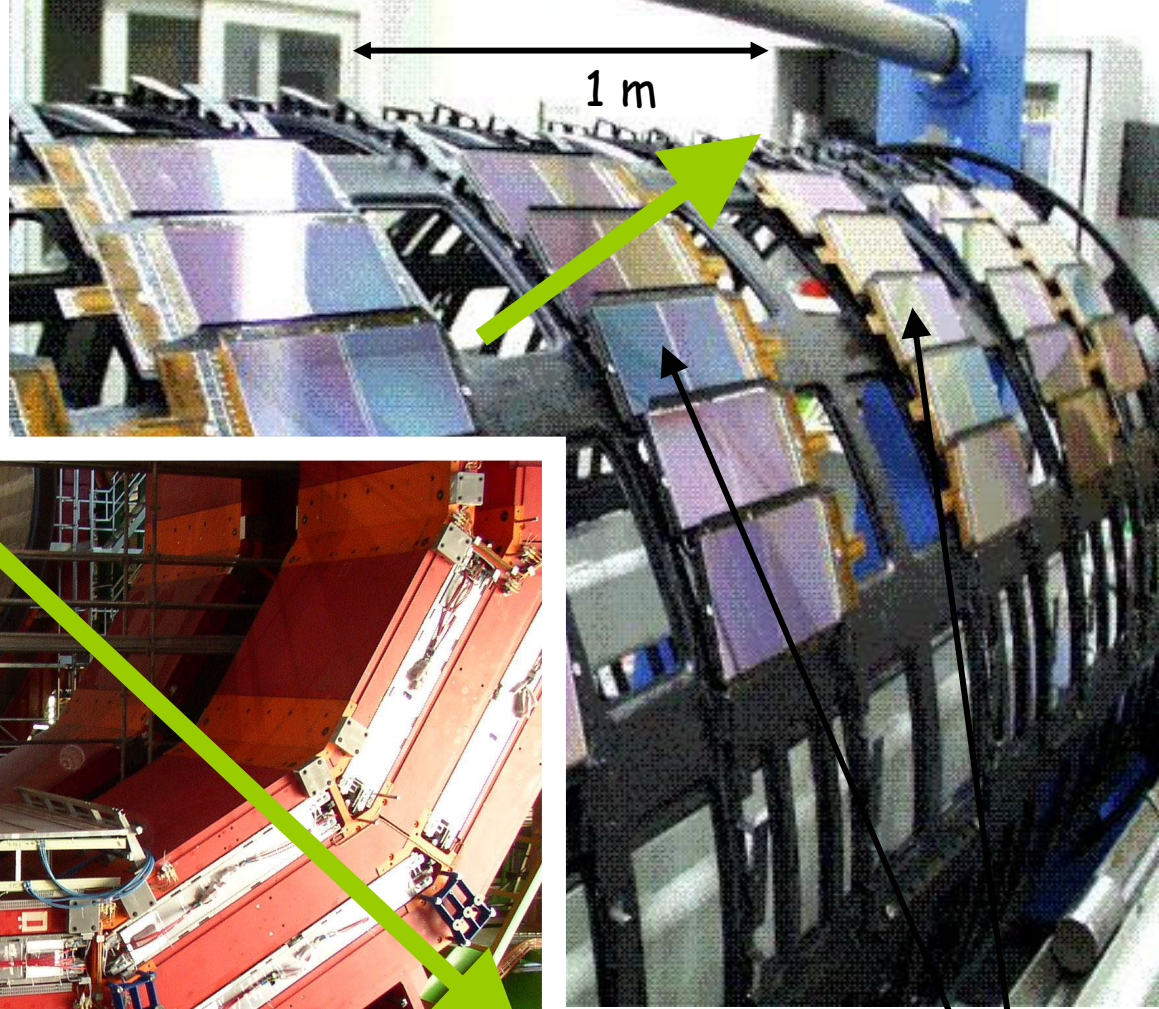
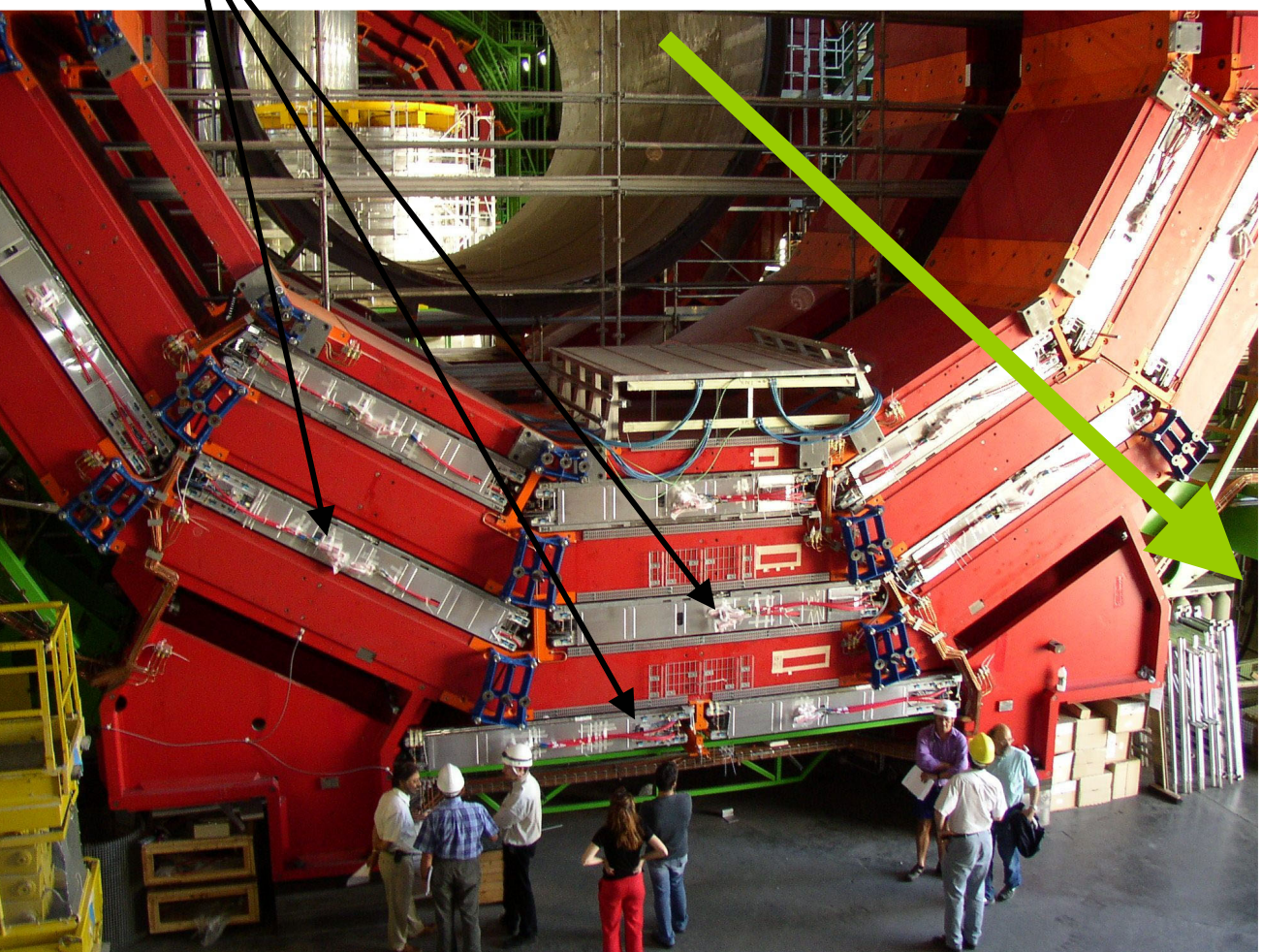
CMS-Detektor: Aufbau



2004

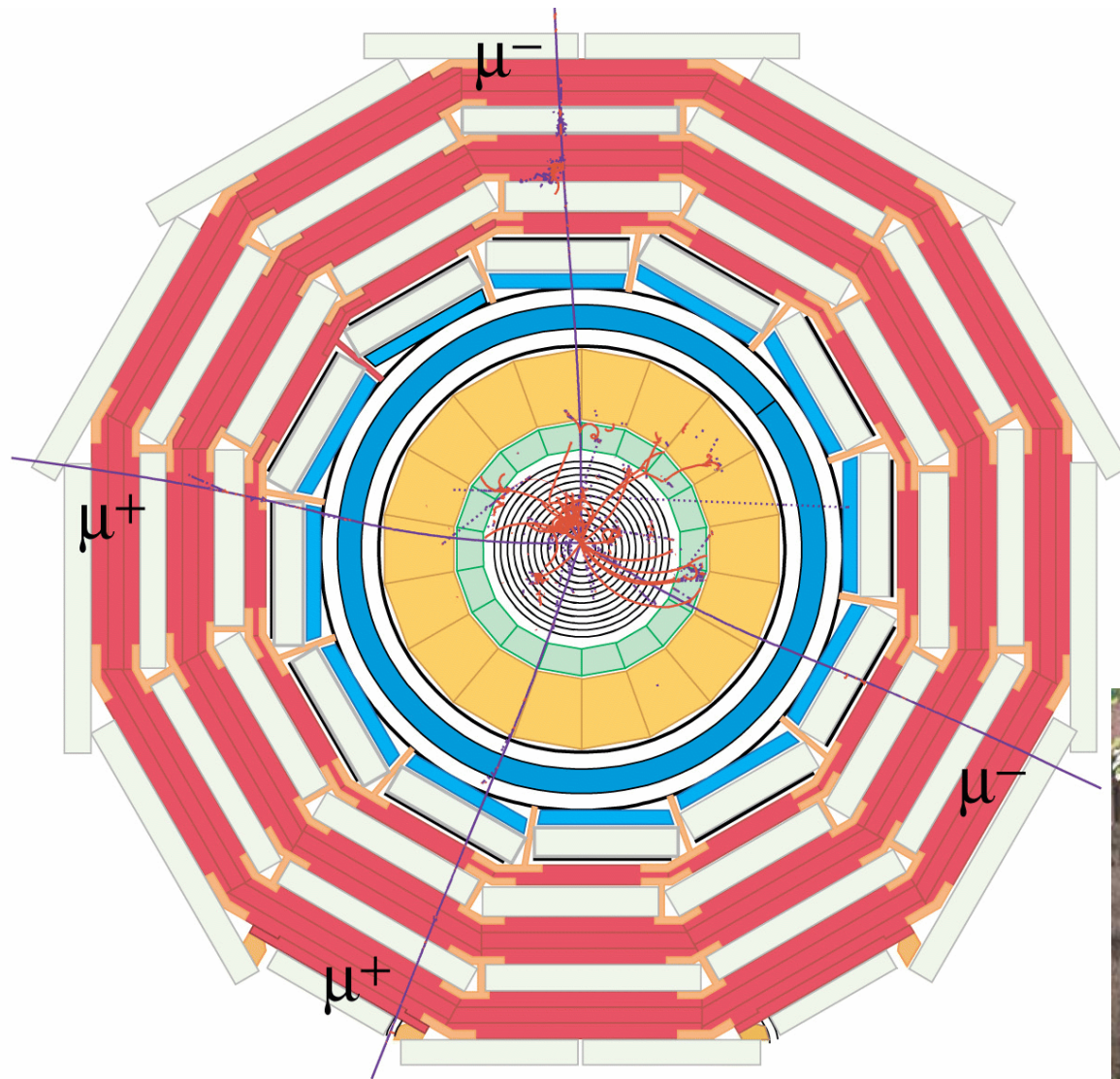
CMS-Detektor: Aachener Beteiligung

großflächige
Myondetektoren

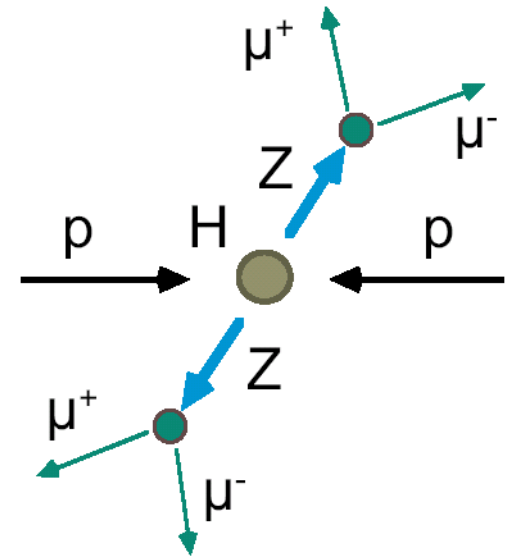


hochauflösende
Silizium-Detektoren

Die Suche nach dem Higgs



EXPERIMENTUM CRUCIS



LHC-Daten und Computer-Auswertung



40 Millionen Kollisionen/s

100 Milliarden Teilchen/s

Roh: 500 GBit/s

Zu speichern: 100 Ereignisse / s

= 1 DVD / Minute

Verarbeitung: 10000 PCs

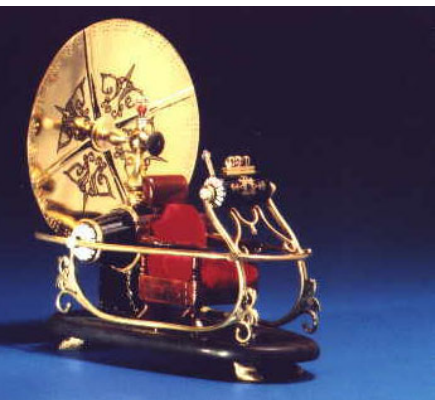


CERN Rechenzentrum



2000 Physiker/ Experiment

- CERN
- Elementarteilchen
- Urknall
- Beschleuniger LHC



- „Zeitmaschine“ ?

Frühes Universum und Teilchenphysik
Dunkle Materie

PRESENT heute

15 BILLION YEARS

5 BILLION YEARS

1 BILLION YEARS

THE UNIVERSE BECOMES TRANSPARENT

Decoupling of Matter-Radiation

Formation of Atoms

10⁻¹³ sec.

PHOTON EPOCH

Nucleosynthesis of Helium

10⁻² sec.

Disappearance of Positrons

LEPTON EPOCH

Confinement of Quarks

Formation of Protons, Neutrons

Disappearance of Antiquarks

10⁻¹⁰ sec.

ELECTROWEAK EPOCH

QUARK EPOCH

Asymmetry $Q - \bar{Q}$, $L - \bar{L}$

Magnetic Monopoles?

Cosmic Inflation?

10⁻³⁴ sec.

GRAND UNIFICATION EPOCH

QUANTUM GRAVITY EPOCH

10⁻⁴³ sec.

Big Bang

Spiral Galaxy

Heavy Atom

Heavy Star

Protoplanet

Black Hole

Hydrogen Atom

Helium Atom

Helium Nucleus

The Desert

WE ARE HERE

MATTER DOMINATED ERA

RADIATION DOMINATED ERA

microcosm

15 Milliarden J.

300 000 *J.* Atome

3 min Kerne

$$\frac{1}{10 \text{ Milliarden}} \text{ sec}$$

Teilchenphysik

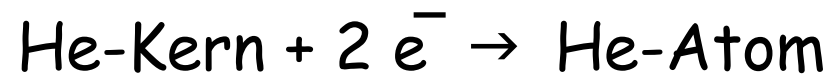
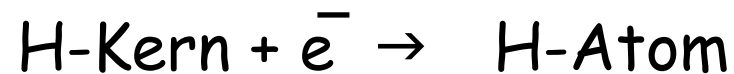
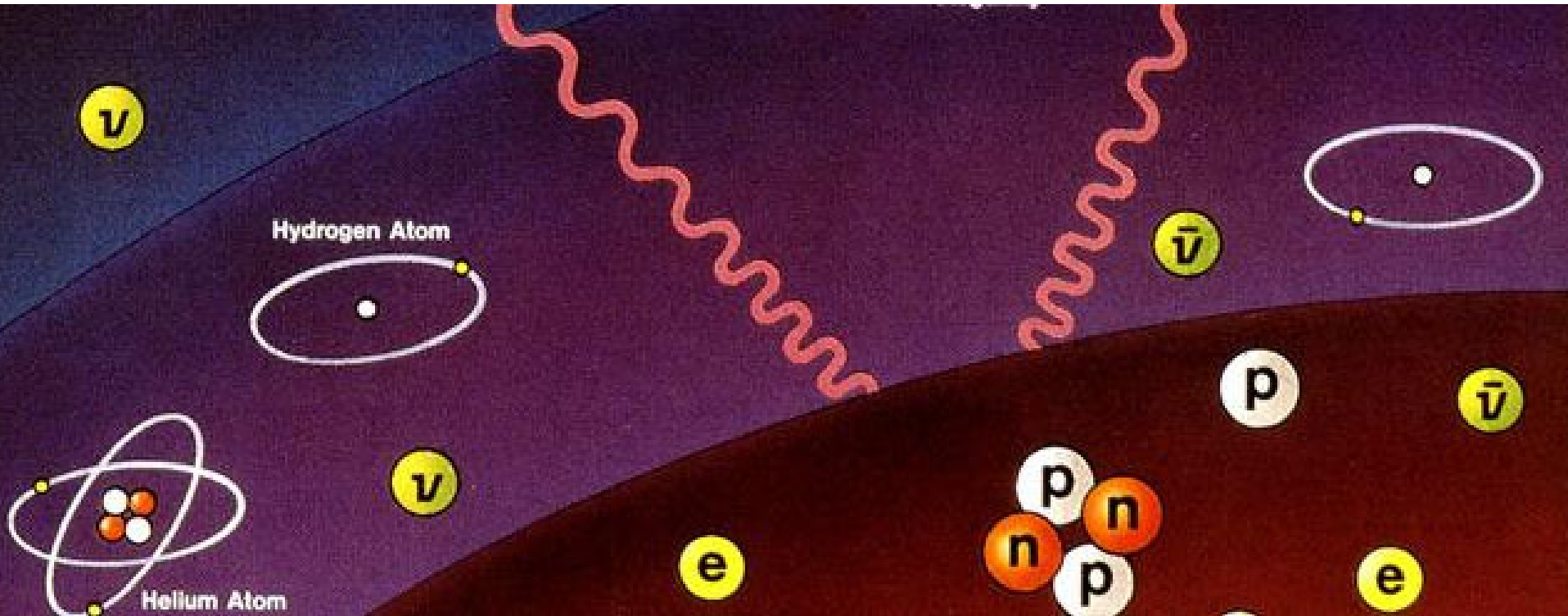


Bildung von Atomen

$t = 300\,000$ Jahre

$T = 3000\text{ °C}$

$E = 0.3\text{ eV}$



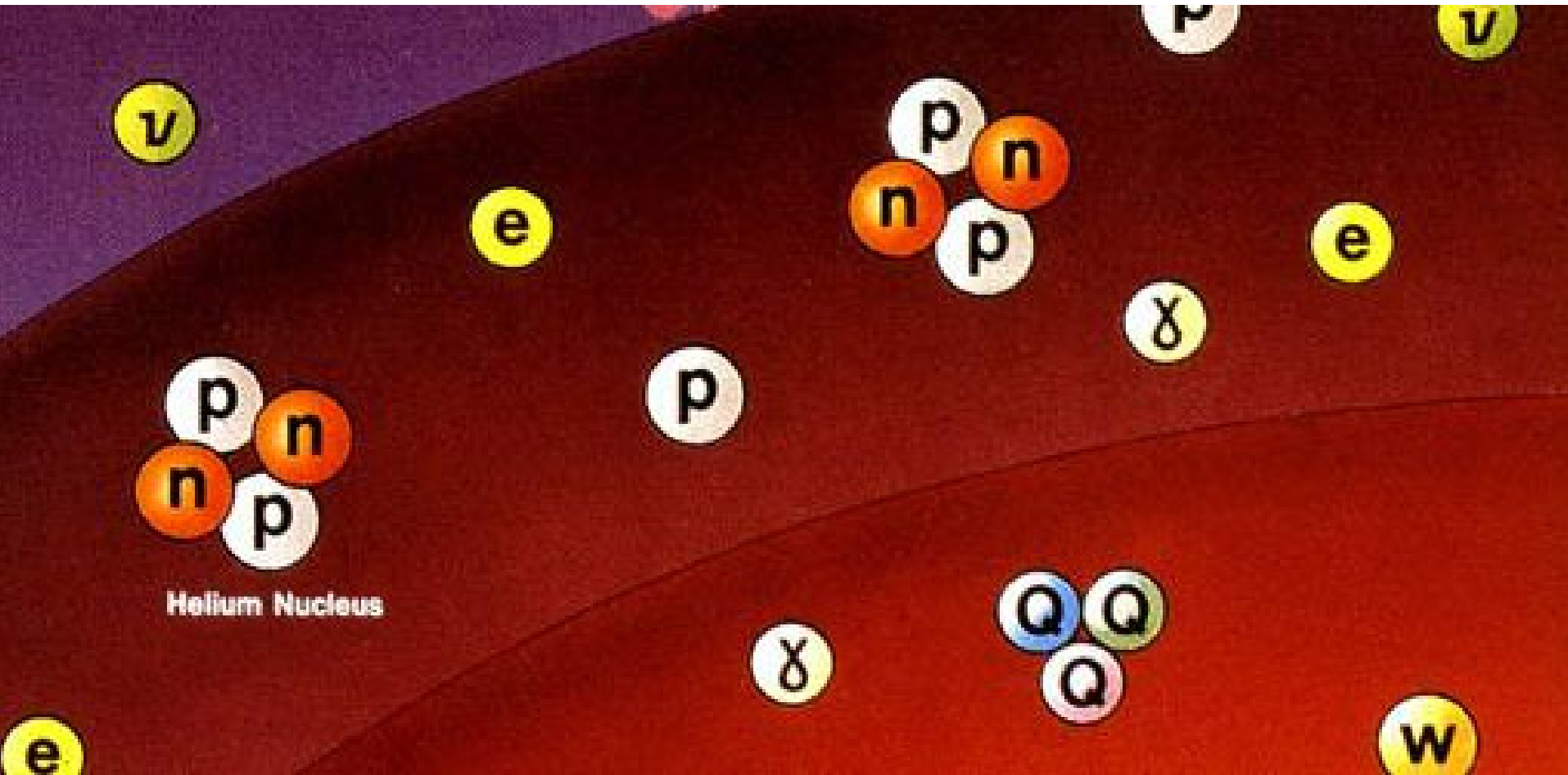
Licht = kosmische Hintergrundstrahlung!

Entstehung von Helium-Kernen

$t = 3 \text{ min}$

$T = 1\,000\,000\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$

$E = 0.1 \text{ MeV}$



$2n + 2p \rightarrow \text{He-Kern}$

$p = \text{H-Kern}$

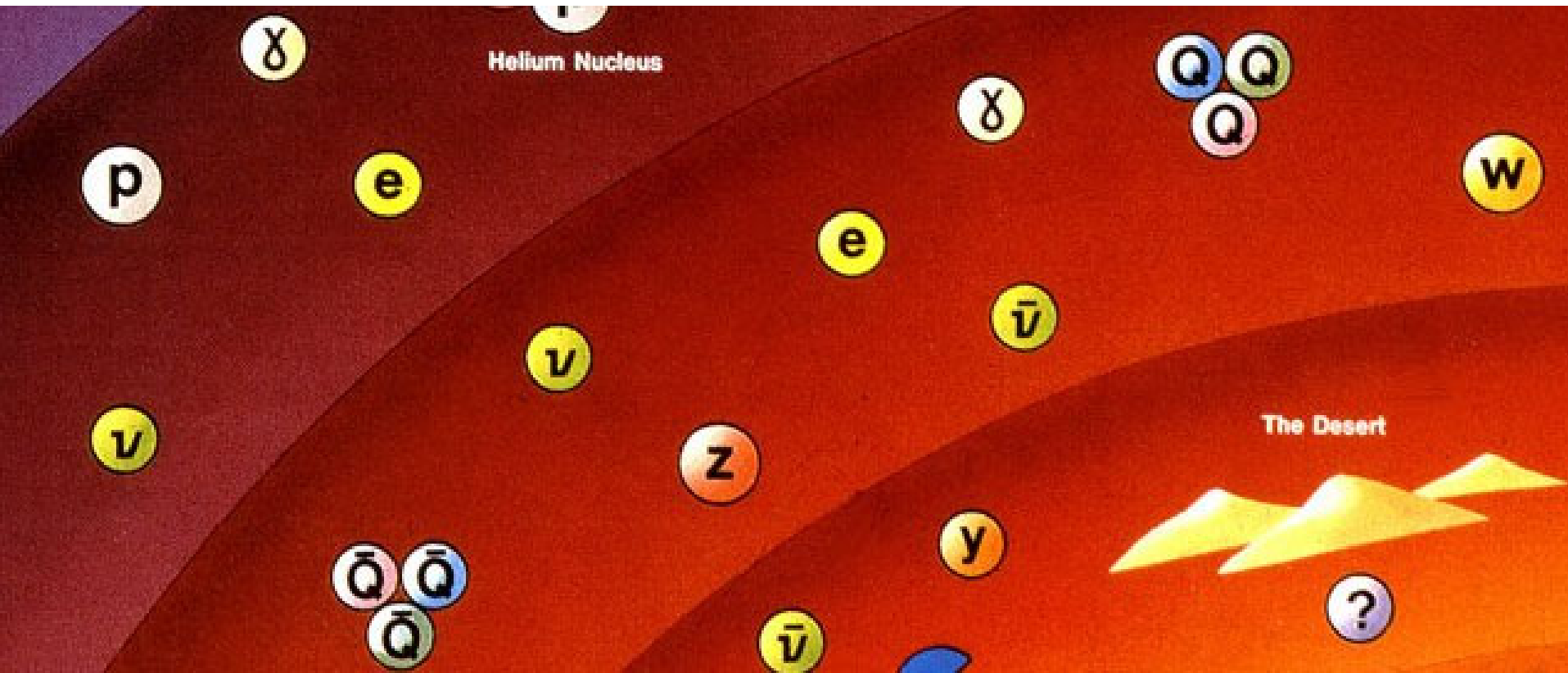
Schwere Kerne (C, O, U...) entstanden erst in Supernovae !

Elementarteilchen im frühen Universum

$t = 10^{-10} \text{ s}$

$E = 100 \text{ GeV}$

Teilchenbeschleuniger!



Heiße Elementarteilchen-Suppe !

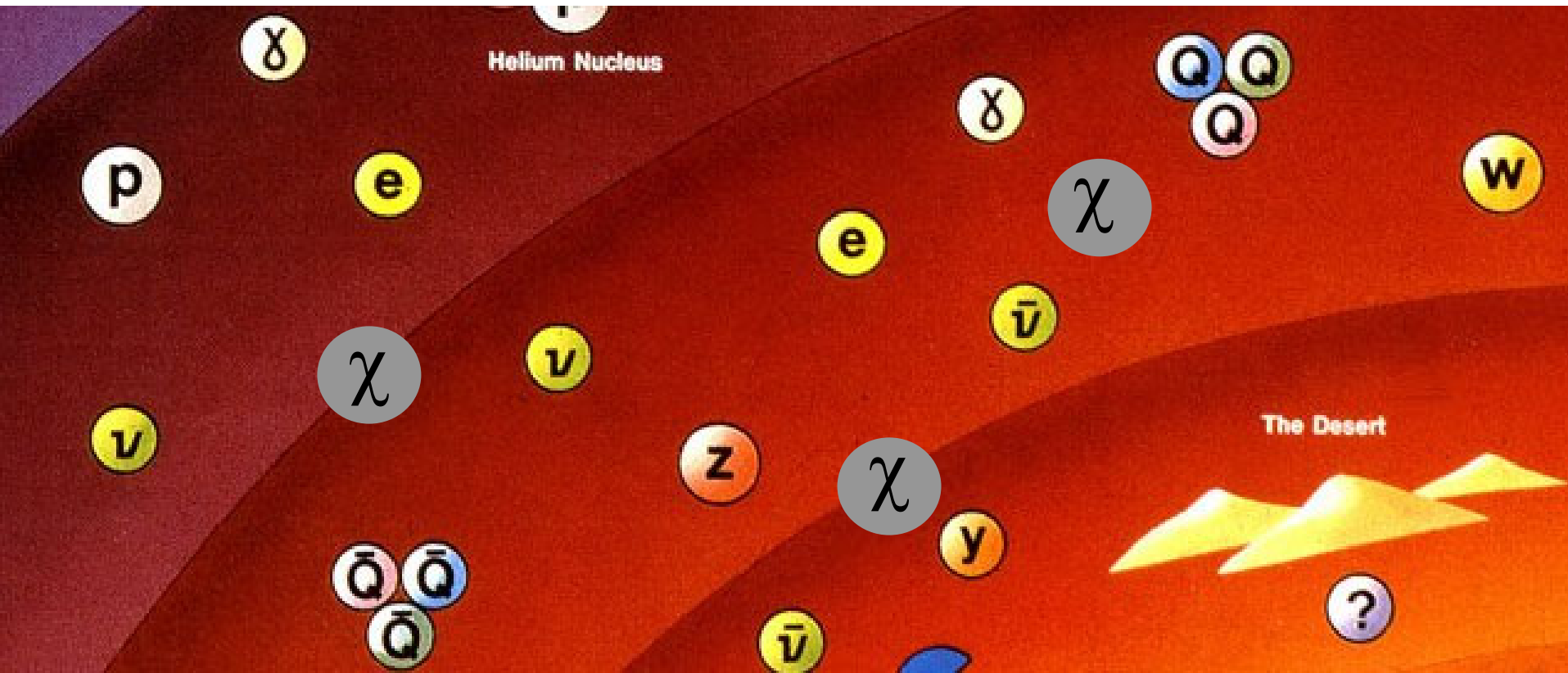
Welche Teilchen gibt es ? Wie wechselwirken sie ?

Elementarteilchen im frühen Universum

$t = 10^{-10} \text{ s}$

$E = 100 \text{ GeV}$

Teilchenbeschleuniger!



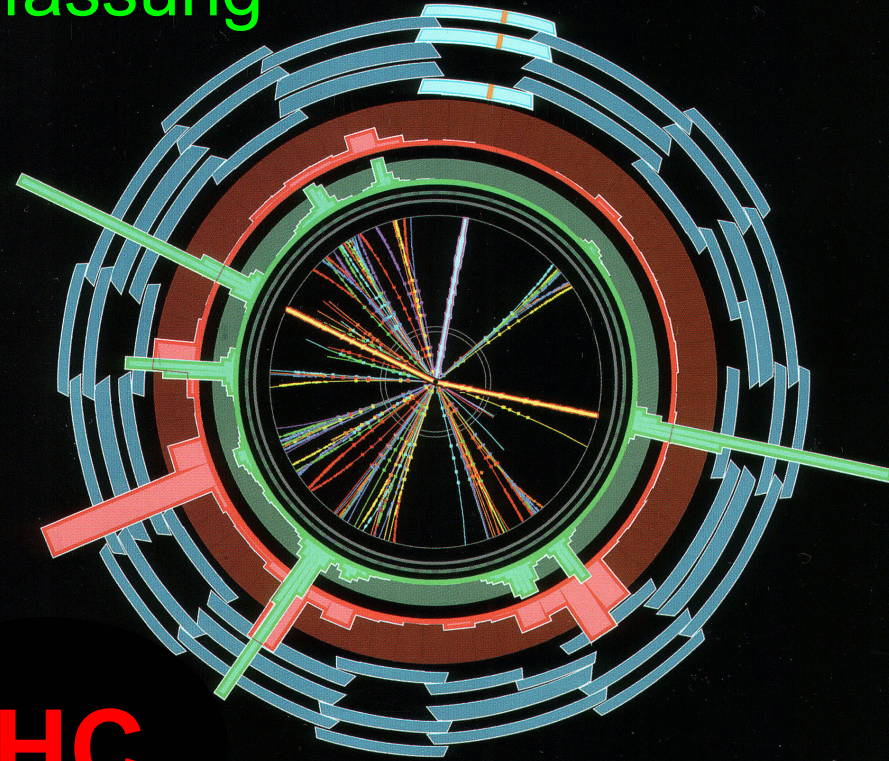
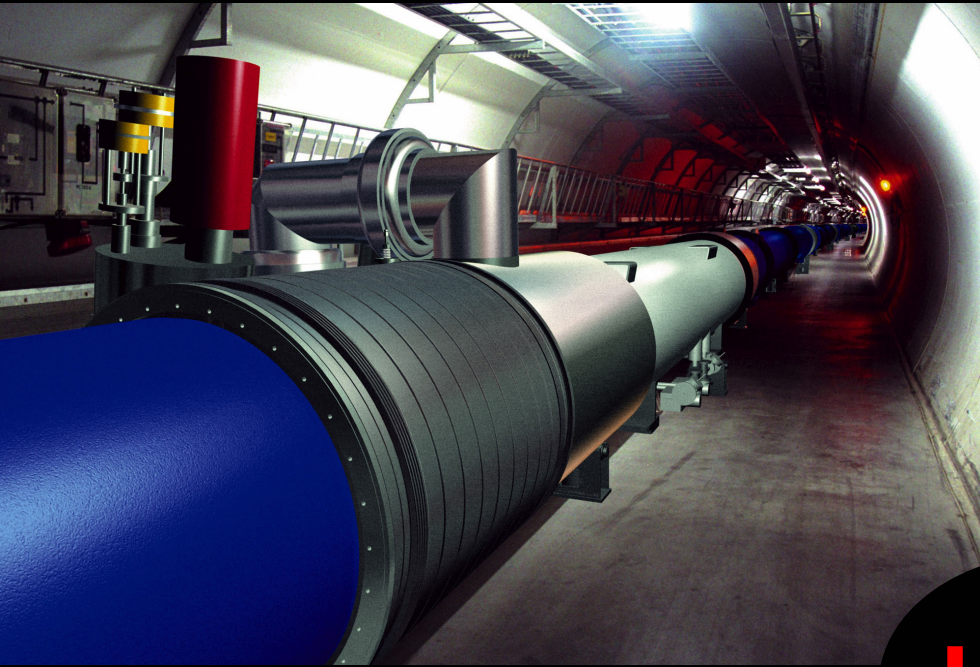
Heiße Elementarteilchen-Suppe !

Welche Teilchen gibt es ? Wie wechselwirken sie ?

Dunkle Materie = Neutralinos χ ???

LHC !

Zusammenfassung



LHC

wir wollen verstehen,

- „was die Welt im Innersten zusammenhält“
- und die Entwicklung des Universums

