Elementarteilchenphysik

eine Reise in Mikro- und Makrokosmos

Thomas Hebbeker

RWTH, III. Phys. Inst. A

Schüleruni RWTH Aachen 2009

- Teilchen und Kräfte
- Beschleuniger und Detektoren
- Beschleuniger LHC am CERN
- Astrophysik und Kosmologie

CERN

Woraus besteht die Welt ?
Welche Kräfte bestimmen das Universum ?
Wie sind diese Teilchen entstanden ?

Inhalt

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

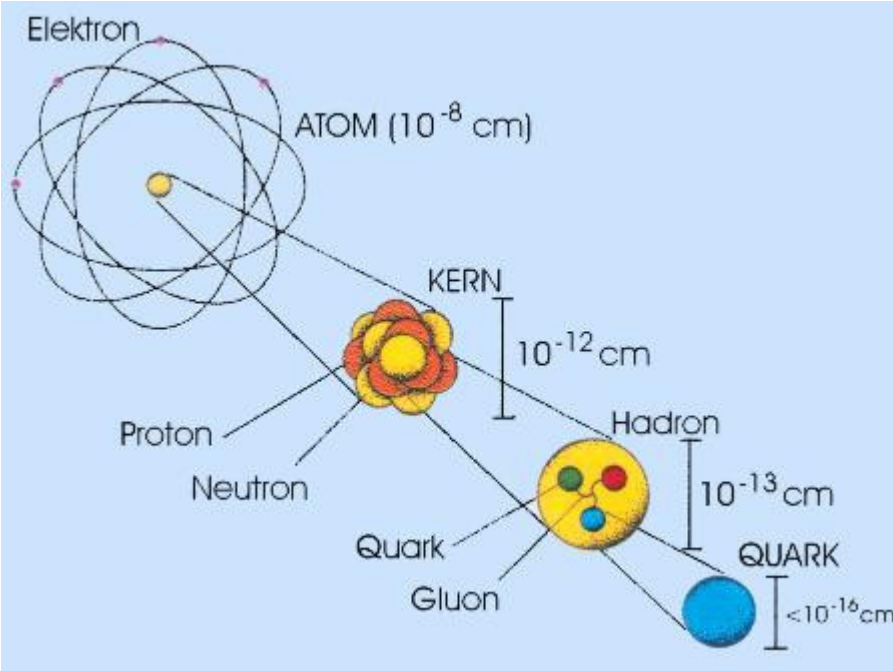
- **Teilchen und Kräfte**

Aufbau der Materie

Die vier Kräfte=Wechselwirkungen

Leptonen und Quarks

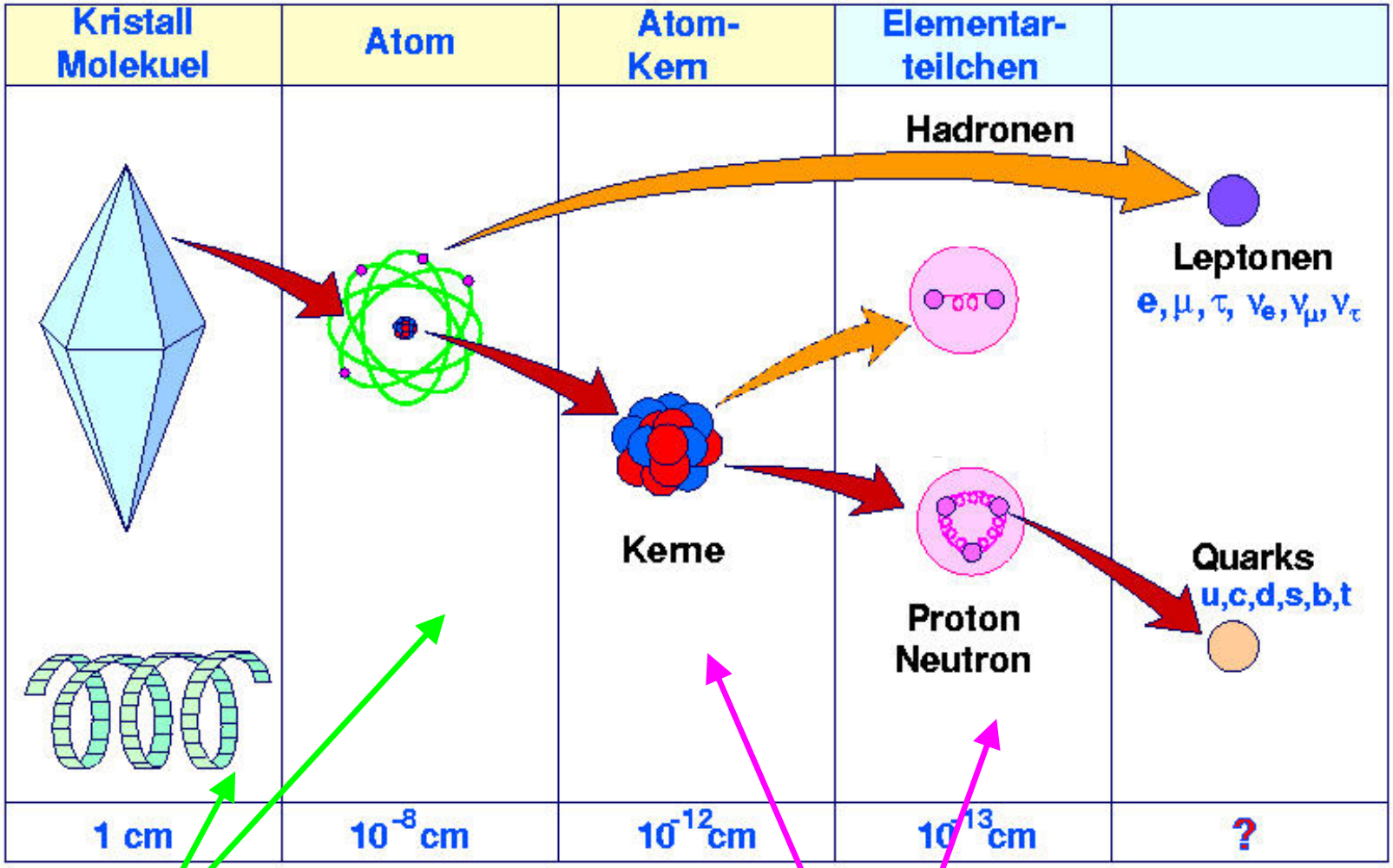
Das Standardmodell der Teilchenphysik



- **Beschleuniger und Detektoren**
- **Der Beschleuniger LHC am CERN**
- **Astrophysik und Kosmologie**

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Die Struktur der Materie



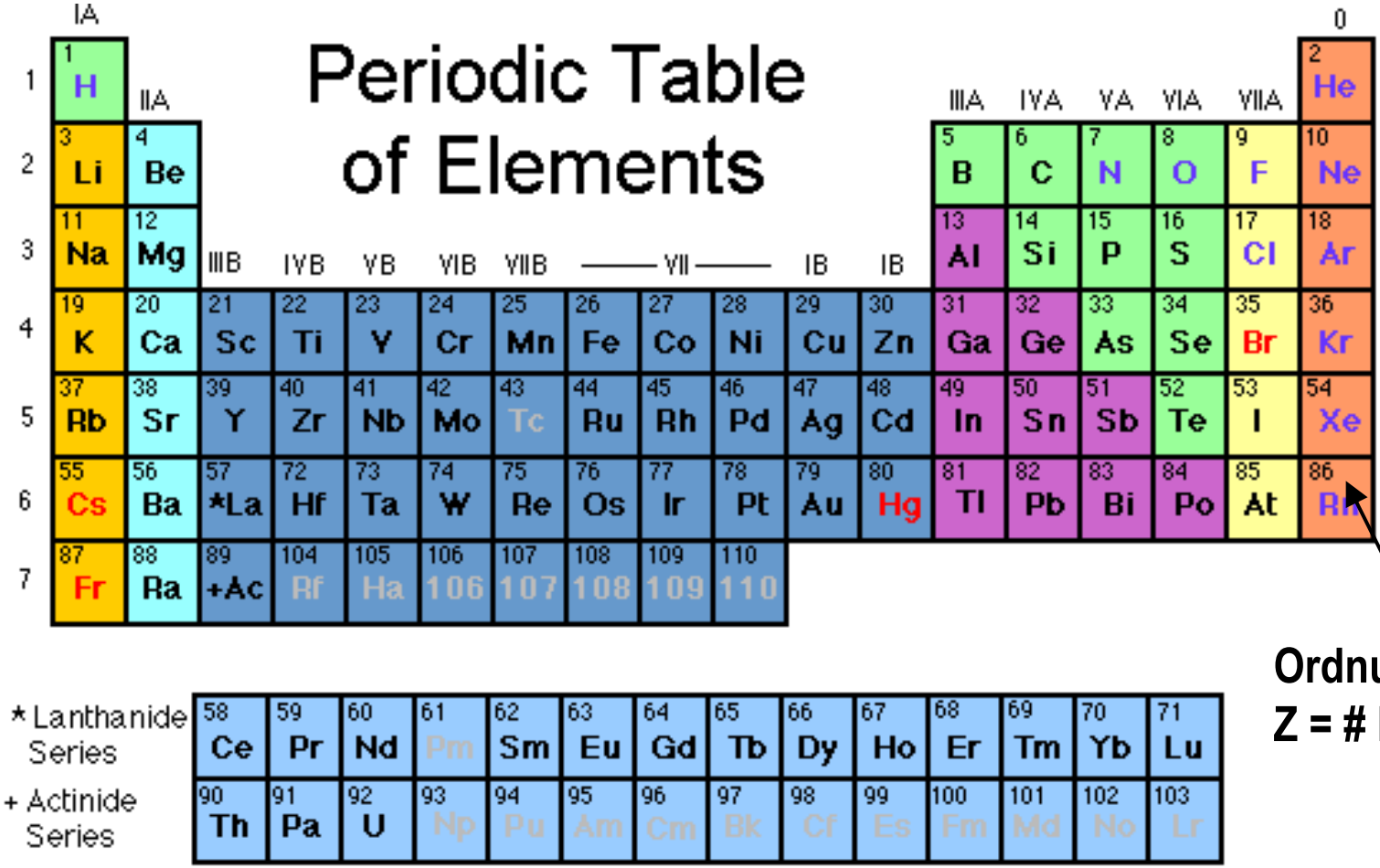
$= 10^{-15}$ m

elektromagnetische Kraft
(= elektromagnetische Wechselwirkung)

Kernkraft ~ starke Wechselwirkung

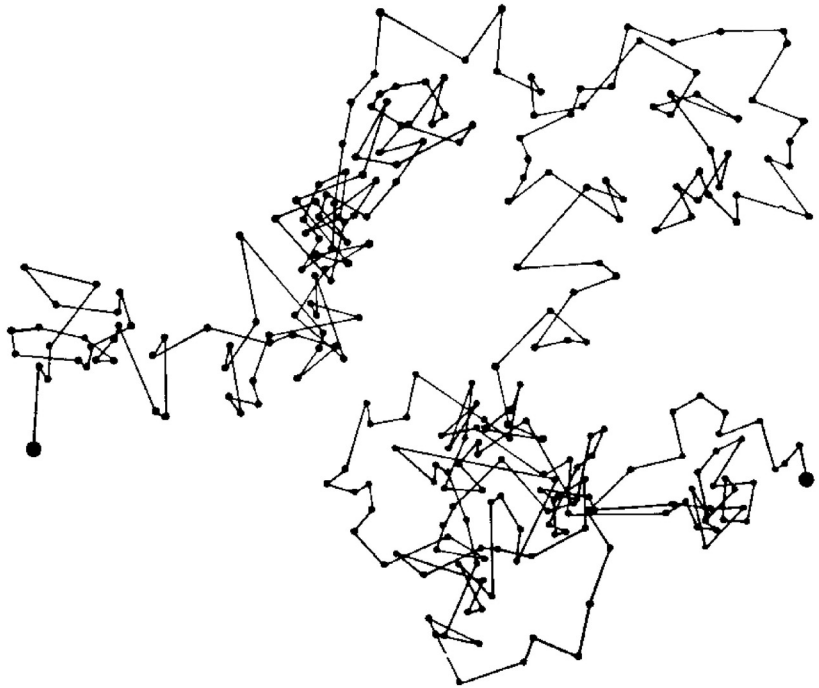
T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Das Periodensystem der Elemente



Ordnungszahl
Z = # Protonen

Blick in den Mikrokosmos



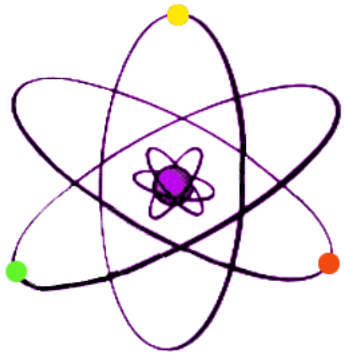
T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Die 4 Kräfte/Wechselwirkungen

Gravitation:

vernachlässigbar im Mikrokosmos

Elektromagnetische WW:



Atom

Schwache WW:

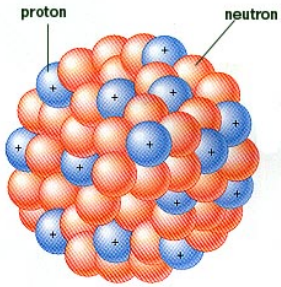
Radioaktiver Zerfall

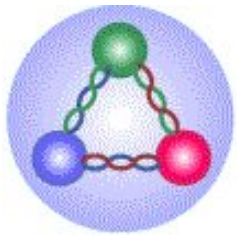
Sterne

Beta-Zerfall

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

Starke WW:





Nukleonen im Kern

Quarks im Nukleon

Grundlagen der Teilchenphysik

Relativitätstheorie

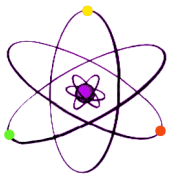
relevant wenn Geschwindigkeiten $v \rightarrow c = 3.0 \cdot 10^8 \; m/s$

Beispiel: Quark im Proton: $v \approx 0.999\, c$

Konsequenzen: $v \leq c$ $\quad E = m \cdot c^2$

Quantentheorie

relevant im Mikrokosmos:



Konsequenzen: Quantisierung, „Zufall“, Messgenauigkeit

jeder Prozess sieht anders aus ➔ Wahrscheinlichkeitsverteilungen:

Beispiel:

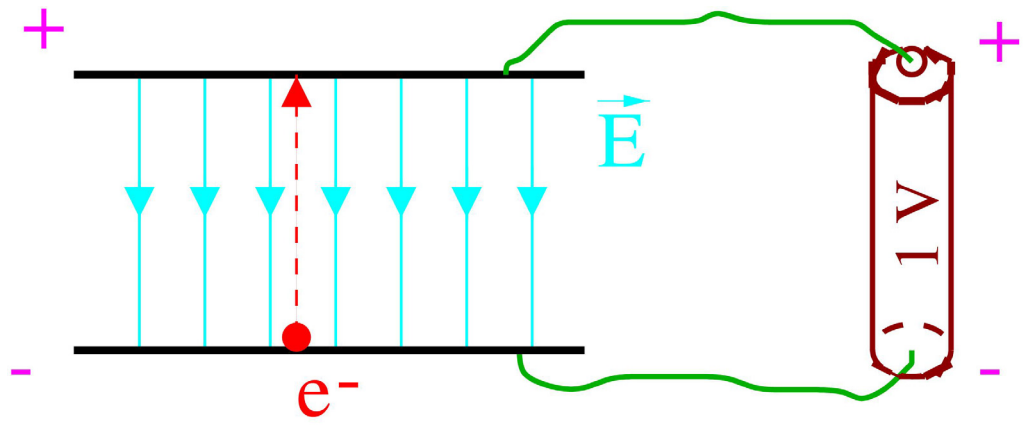
T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Energie und Masse

Energie-Einheit

eV = Elektronenvolt

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



Energie und Masse

$$E = m\,c^{2}$$

$$c = 300000\ km/s$$

Energie kann in Masse umgewandelt werden und umgekehrt !

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

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Die 4 Grundbausteine des Sonnensystems

0	ν_e	Neutrino	Leptonen
-1	e^-	Elektron	
2/3	u	up-Quark	
-1/3	d	down-Quark	

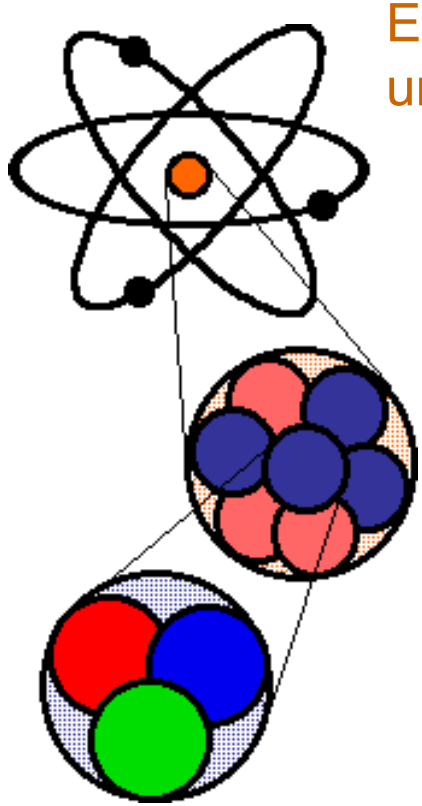
Kernbausteine = Nukleonen:

p = Proton = u + u + d

n = Neutron = u + d + d

$\sim 1\ GeV$

$\sim 10^{-15} m$



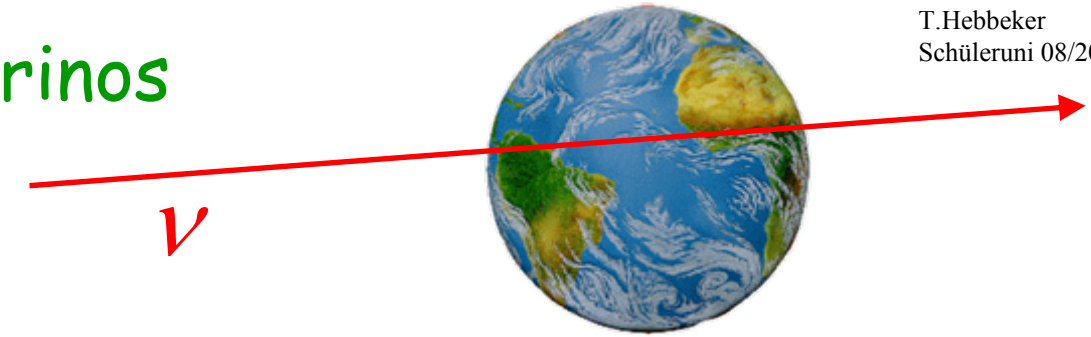
Atom aus Elektronen und Kern

Kern aus Nukleonen

Nukleon aus Quarks

Grundbausteine (Leptonen und Quarks) sind punktförmig: "Elementarteilchen"

Neutrinos

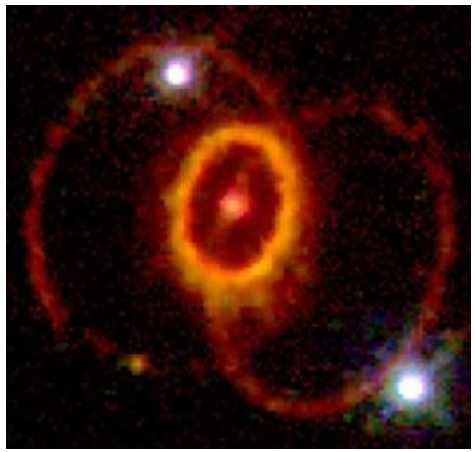


Eigenschaften:

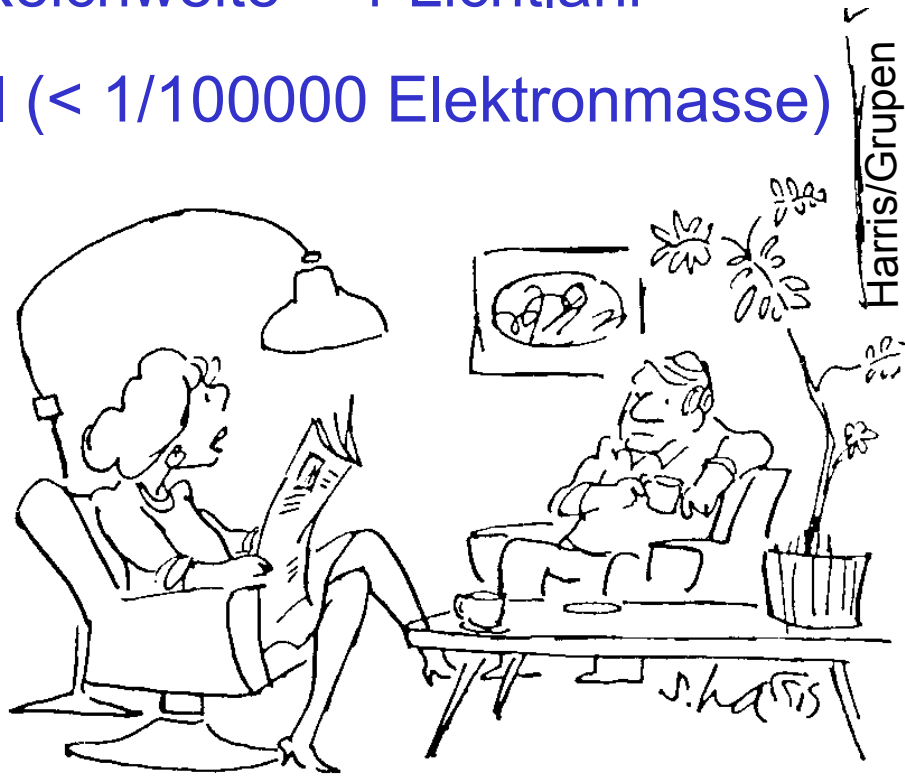
- sehr geringe Wechselwirkung: Reichweite > 1 Lichtiahr
- sehr kleine Masse, vielleicht null (< 1/100000 Elektronmasse)

Quellen:

- natürliche Radioaktivität
- Sonne
- Supernovae



- Kernreaktoren



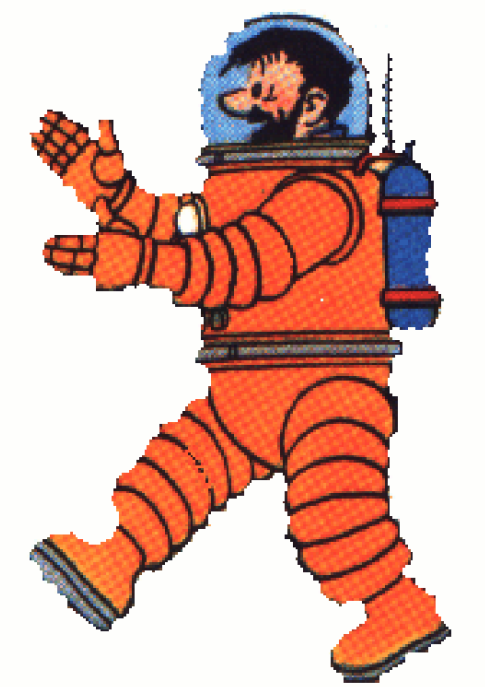
„Durch unsere Körper strömen in jeder Sekunde viele Milliarden Neutrinos, und wir machen uns Gedanken über die Benzinpreise ?“

Materie - Antimaterie

Zu jedem Lepton und Quark existiert ein **Antiteilchen**

Beispiele:

e^-	e^+
Elektron	Positron

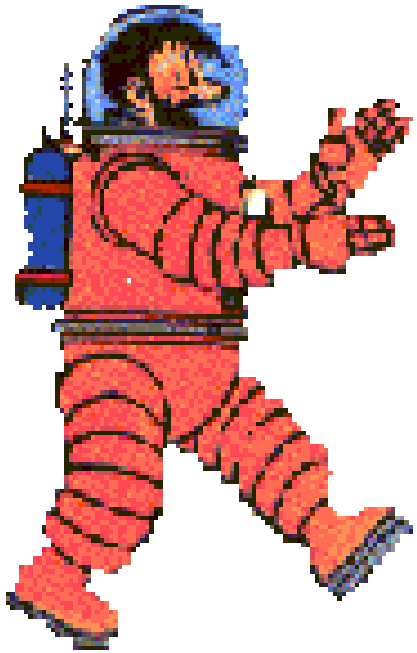


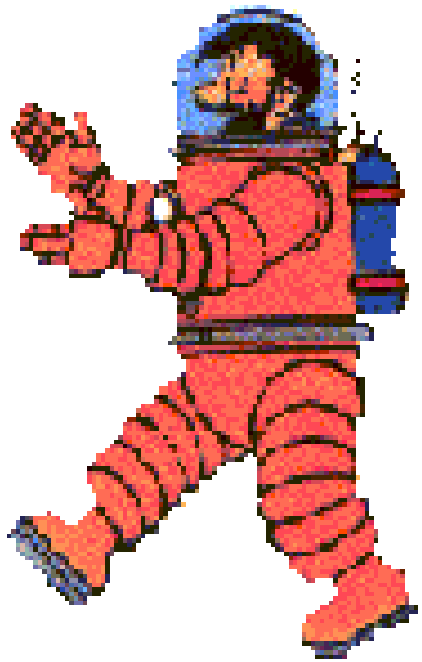
Materie - Antimaterie

Zu jedem Lepton und Quark existiert ein **Antiteilchen**

Beispiele:

$$e^- \qquad e^+$$





Anwendung Medizin: Diagnoseverfahren PET

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Positron-Emissions-Tomographie

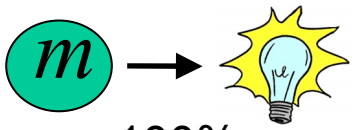
Grundlage:

Positron-Elektron-Vernichtung

in zwei hochenergetische Photonen = „Lichtteilchen“

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \; \gamma$$

Photonen

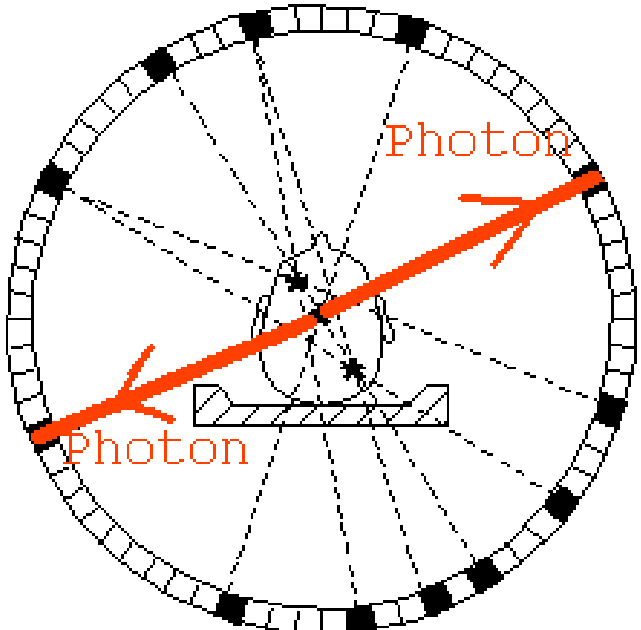


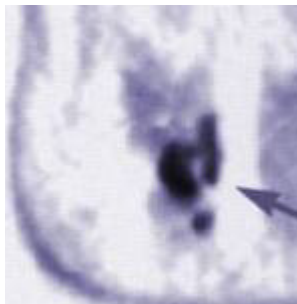
100%

$$E = m c^2$$

Positron e^+ aus radioaktivem Zerfall, z.B.

$$^{11}C \rightarrow {}^{11}B + e^+$$



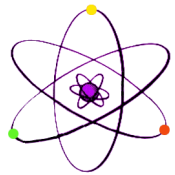


Kräfte = Wechselwirkungen - mögliche Wirkungen

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

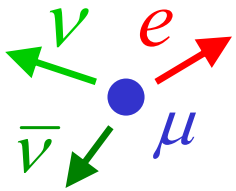
- **Teilchen werden "zusammengeklebt":**

Elektronen + Atomkern = Atom



- **Teilchen können zerfallen:**

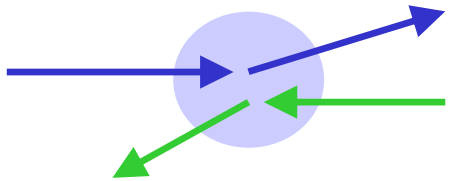
Myon-Zerfall



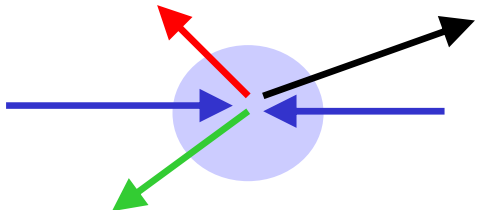
$\tau = 2\ \mu s$

kosmische Strahlung !

- **Teilchen können aneinander "streuen":**



- **Teilchen können neue Teilchen erzeugen (und dabei verschwinden):**



T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Das Standardmodell der Teilchenphysik

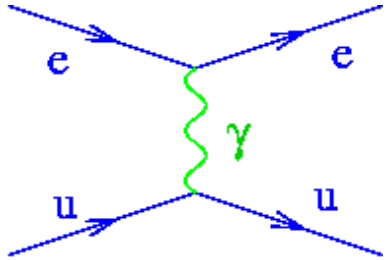
Materie: Fermionen:

3 `Familien'

viele Teilchen instabil, kurzlebig !

Leptonen: $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_{0.5MeV} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

Quarks: $\begin{pmatrix} u\,u\,u \\ d\,d\,d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c\,c\,c \\ s\,s\,s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t\,t\,t \\ b\,b\,b \end{pmatrix}^{170\ GeV}$



Wechselwirkungen: Eichbosonen:

elektroschwach:

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

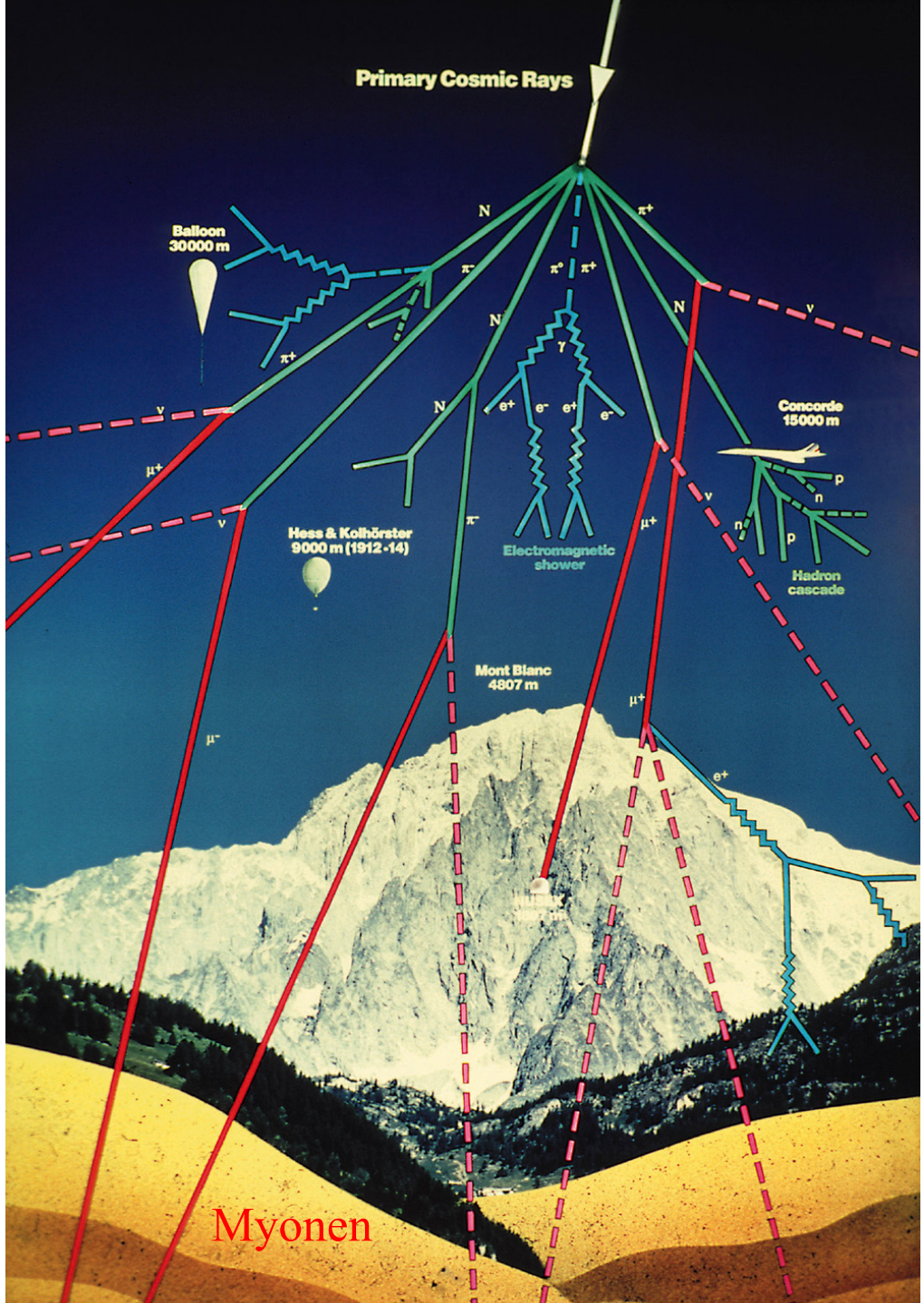
stark:

Gluon	g	masselos

Alle experimentellen Daten werden akkurat beschrieben!

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Teilchen aus dem Universum



kosmische Strahlung!

ca. 200 Myonen /qm /sec

Das Higgs-Boson

ABER:
Standardmodell verlangt:
Alle Teilchen sind **masselos** !

Ausweg:

zusätzliches Teilchen:
Higgs: neutral, instabil

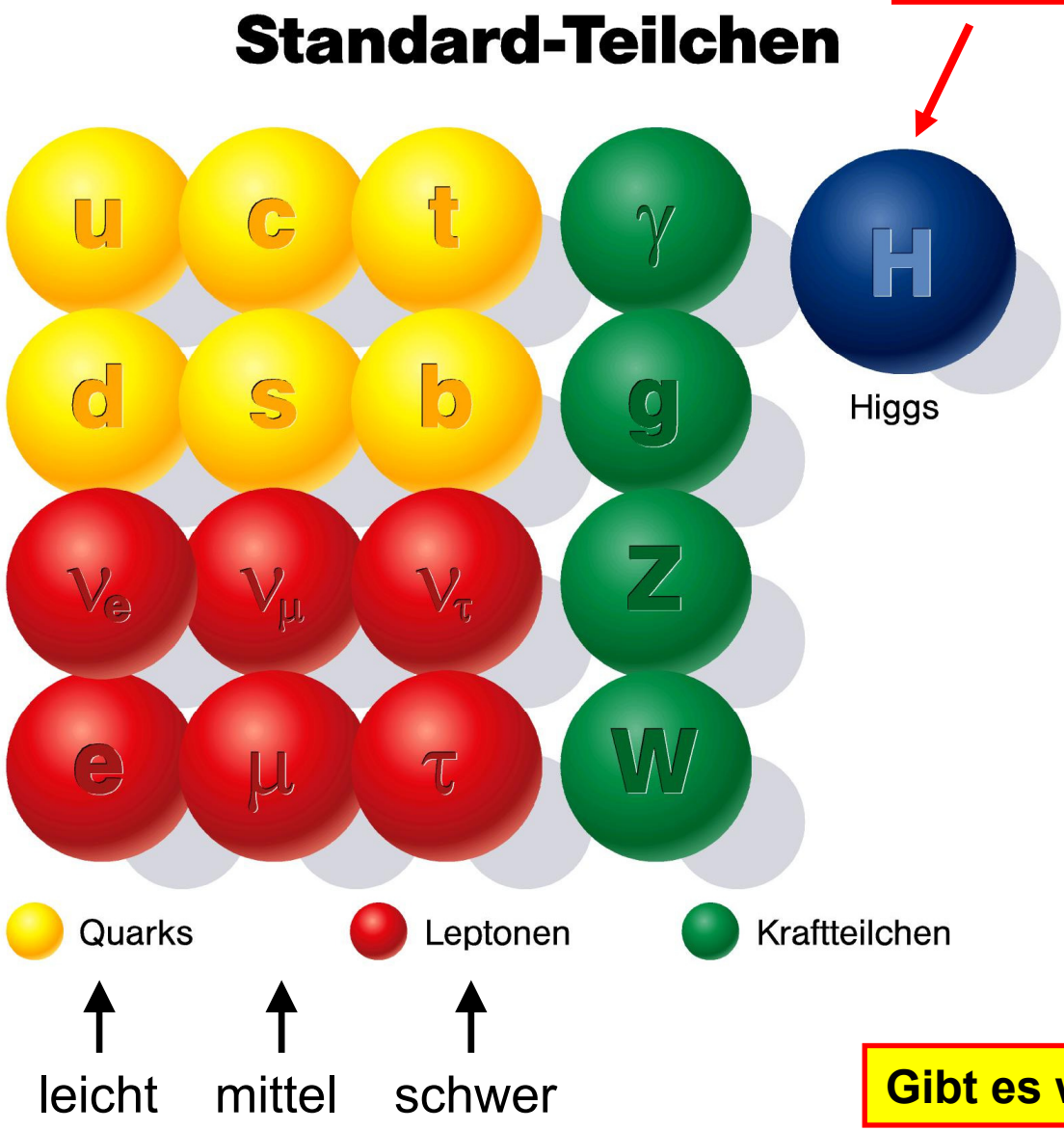
wechselwirkt mit anderen Teilchen und gibt ihnen so Masse

bisher experimentell nicht gefunden: Masse > 115 GeV

Das Standardmodell der Teilchenphysik

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Gibt es Higgs-Bosonen ?



Gibt es weitere Teilchen ?

Zusammenfassung

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

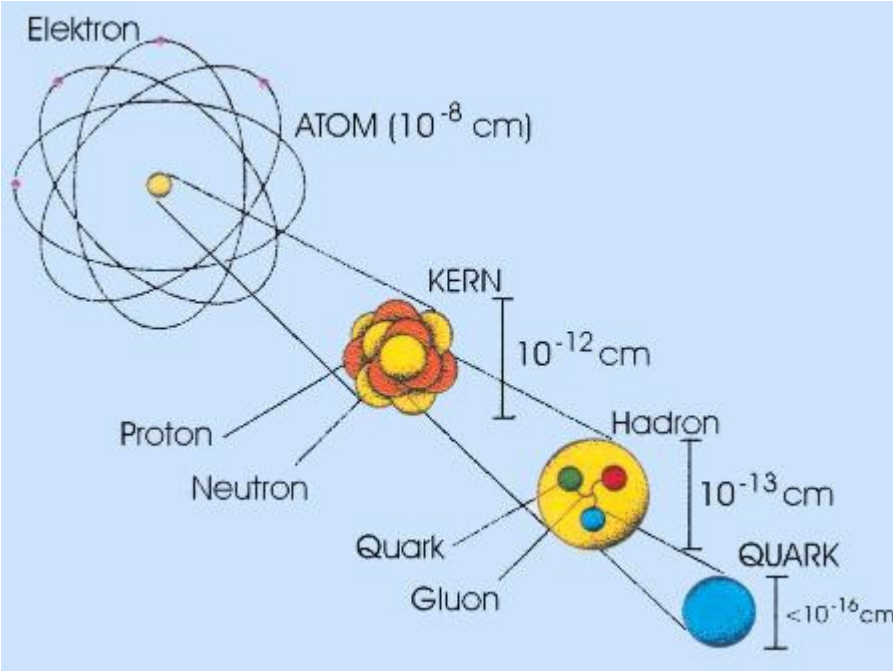
- **Teilchen und Wechselwirkungen**

Aufbau der Materie

Die vier Kräfte/Wechselwirkungen

Leptonen und Quarks

Das Standardmodell der Teilchenphysik



- **Gutes Verständnis von elementaren Teilchen und Wechselwirkungen**
- **Aber noch offene fundamentale Fragen:**

Higgs ? **Weitere neue Teilchen ?**

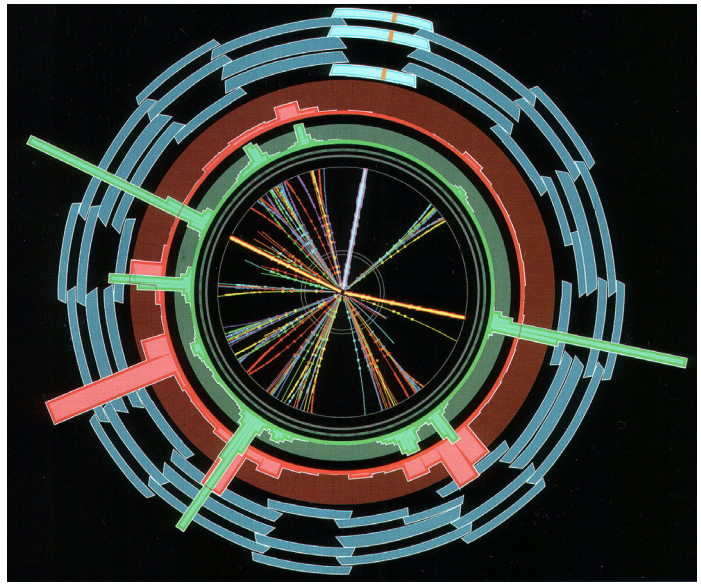
Inhalt

- Teilchen und Wechselwirkungen
- **Beschleuniger und Detektoren**

Strukturuntersuchungen

Teilchenbeschleuniger:

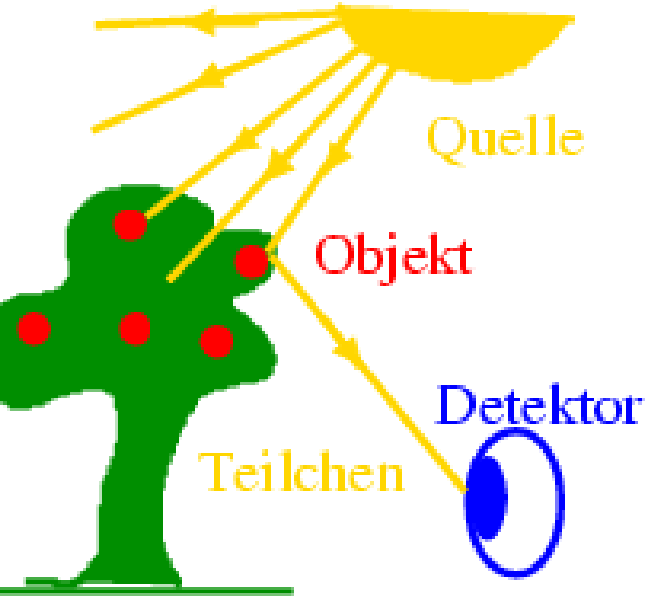
Teilchendetektoren:



- **Der Beschleuniger LHC am CERN**
- **Astrophysik und Kosmologie**

Strukturuntersuchung

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009



Prinzip: Streuung liefert Information über Objekt

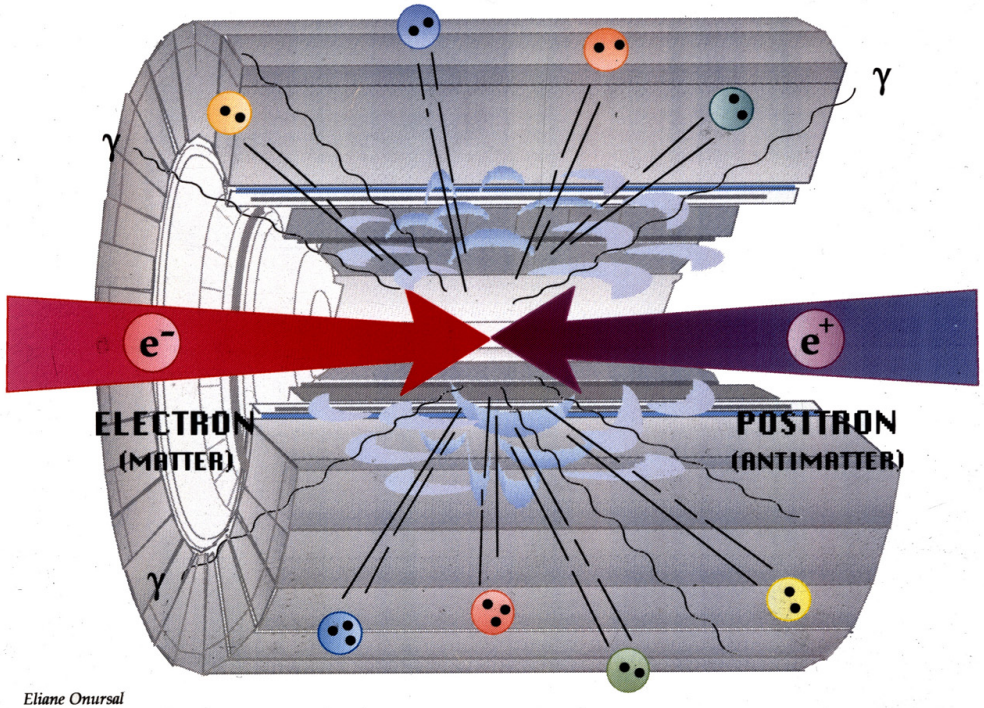
Quantentheorie

‘Teilchen’	Quelle	Detektor	Auflösung = Wellenlänge	Energie
Schallwellen	Fledermaus-Kehlkopf	Fledermaus-Ohr	$1\,\mathrm{cm}$	
Photonen (Licht)	Sonne	Auge	$1\,\mu\mathrm{m}$	$1\,\mathrm{eV}$
Elektronen	Elektronen-	mikroskop	$10^{-12}\,\mathrm{m}$	$100000\,\mathrm{eV}$
Elektronen	Teilchen-beschleuniger	Teilchen-detektor	$10^{-18}\,\mathrm{m}$	$100\,\mathrm{GeV}$

Methoden der experimentellen Teilchenphysik

Werkzeuge:

- Teilchenbeschleuniger („Mikroskop“)
- Teilchendetektoren (“Auge”)



Wellenlänge / Auflösung

Studium der Kräfte bei hohen Energien:

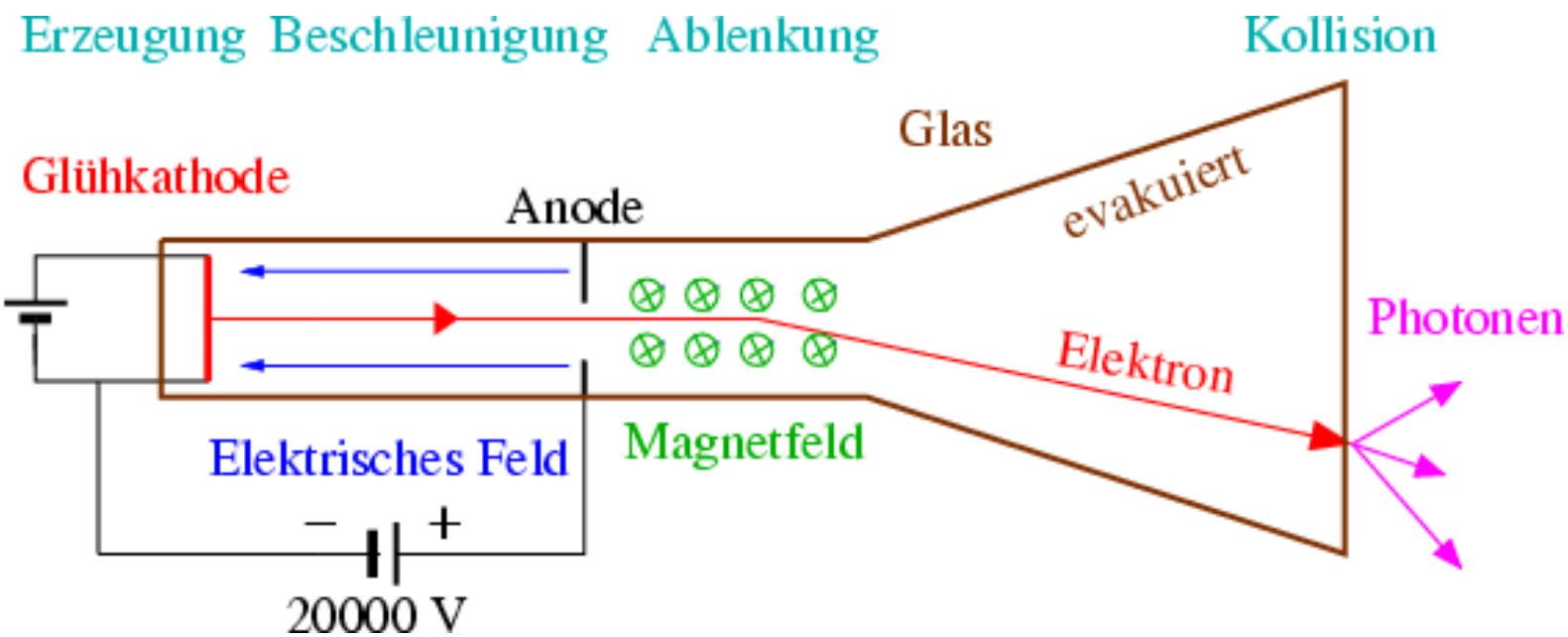
(Big Bang!)

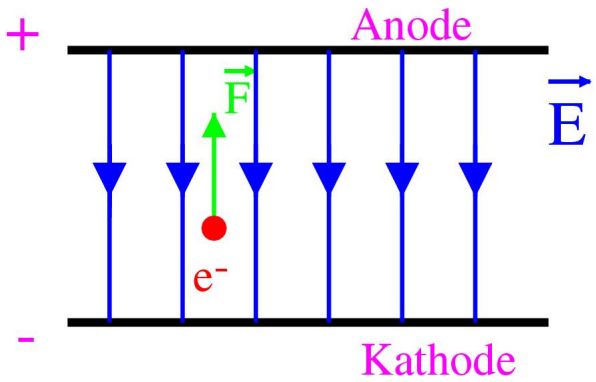
Neue schwere Teilchen (Masse m):

HOHE ENERGIE !

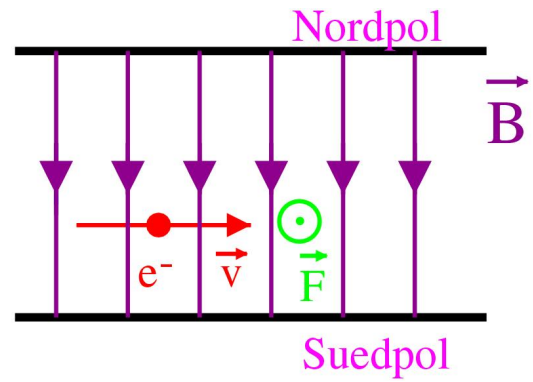
T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Teilchenbeschleuniger: Elektronen, 20 keV





beschleunigt oder lenkt ab



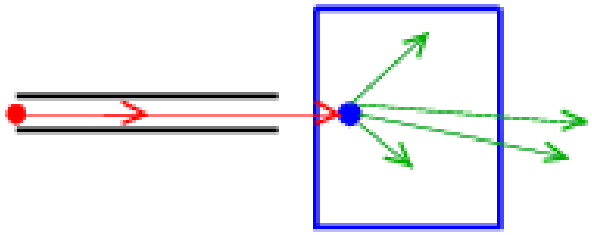
lenkt (stark) ab

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

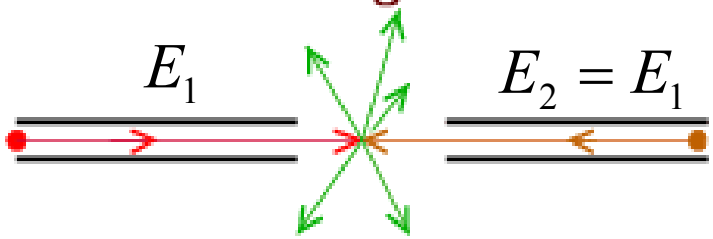
Teilchenkollisionen

Drei Möglichkeiten:

- Teilchen werden auf ruhende Materie geschossen



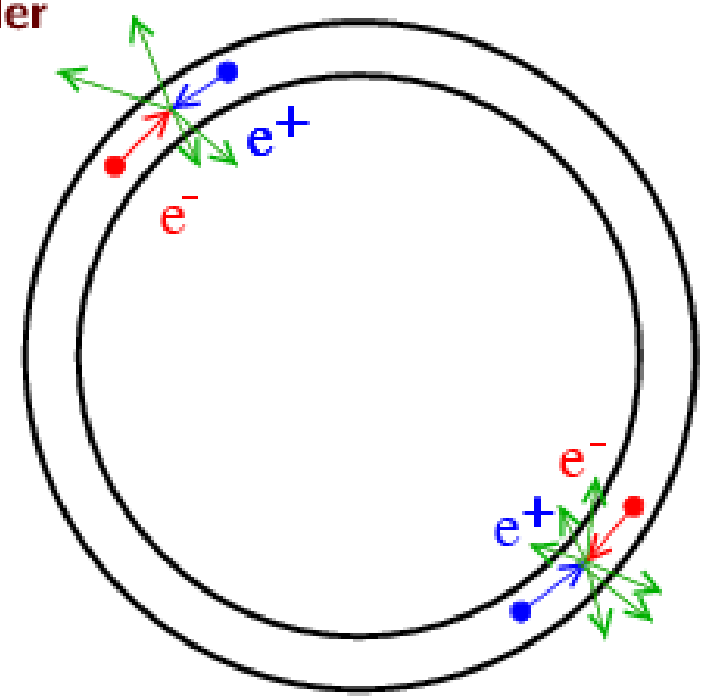
- Zwei Beschleuniger schießen Teilchen aufeinander



Hohe Kollisionsenergie! $E = E_1 + E_2 = 2\,E_1$

- EIN Ring mit entgegenlaufenden Teilchen und Antiteilchen

Hohe Kollisionsenergie! Elegant!

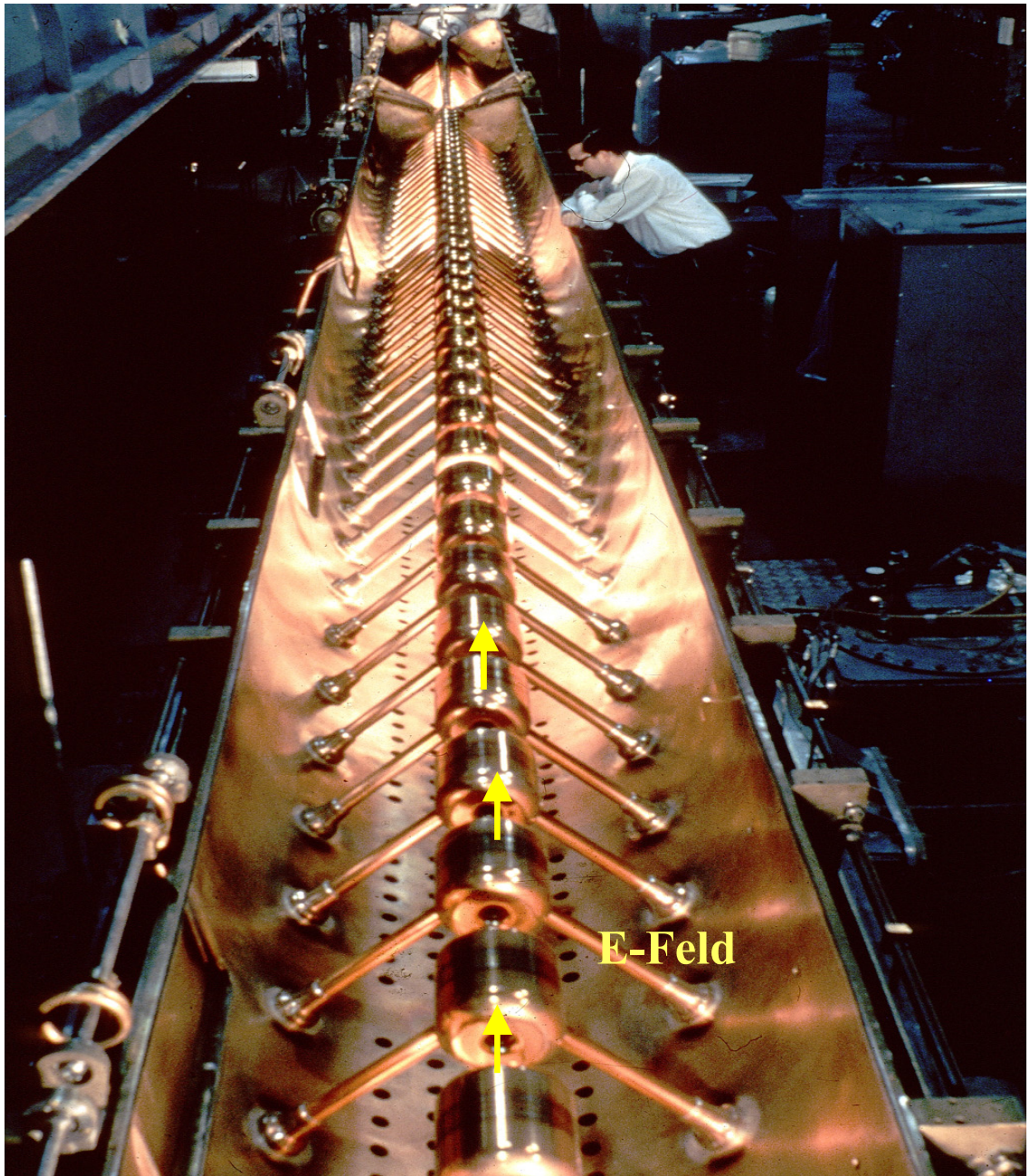


Teilchensorten:

p, e und Antiteilchen,

Kerne

Linearbeschleuniger

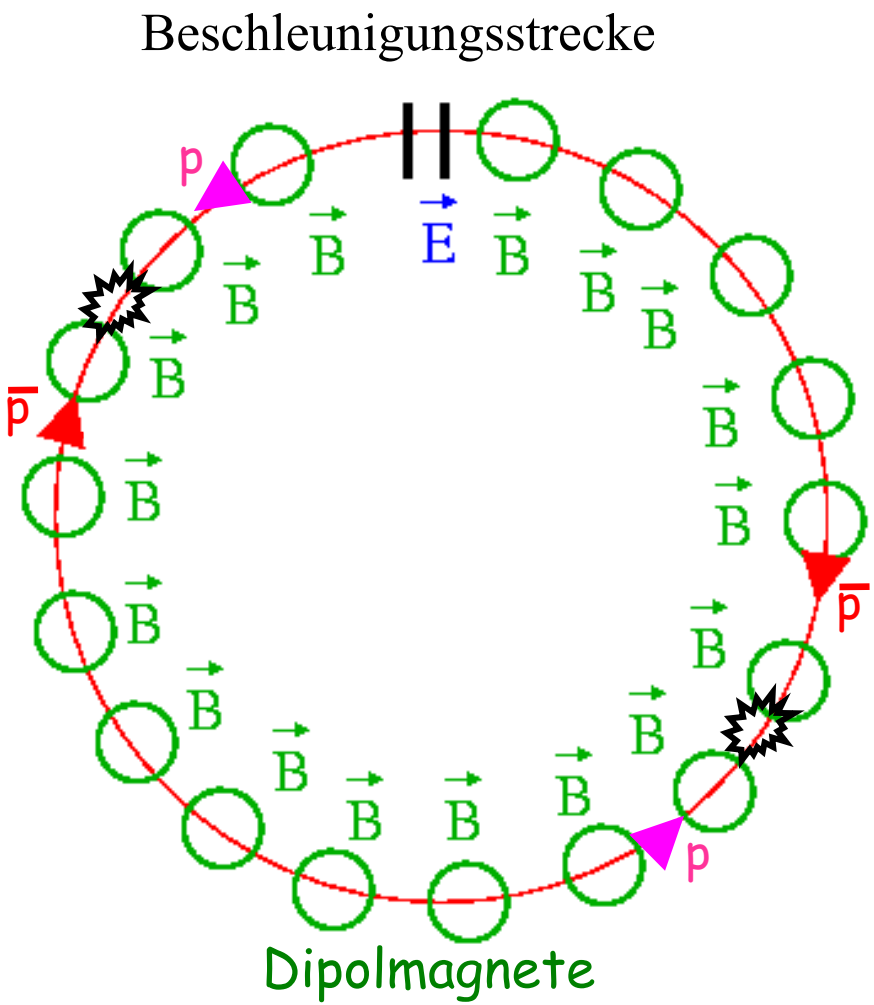


CERN 1968

Protonen, 50 MeV

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

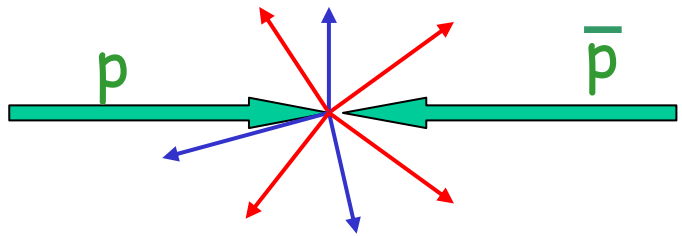
Kreisbeschleuniger („Collider“)



Beispiel:

Proton-Antiproton-Collider

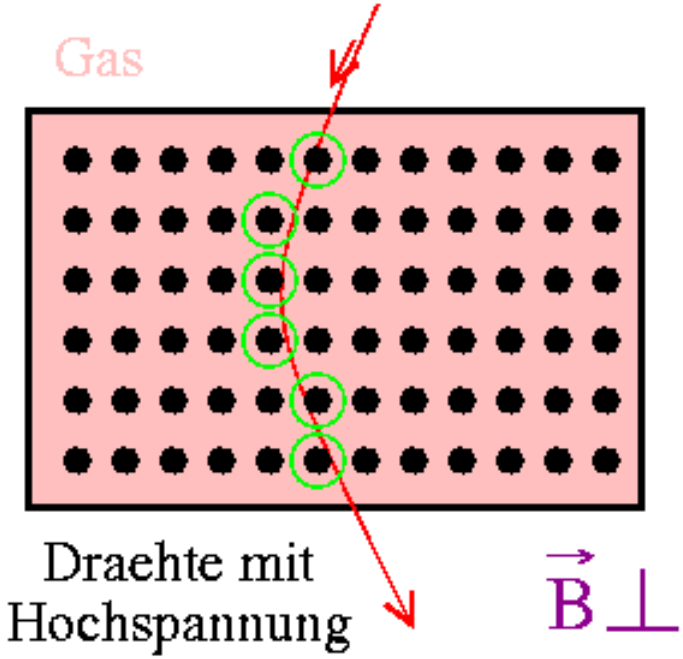
viele Protonen und Antiprotonen laufen gleichzeitig um



Energie wächst mit Größe des Beschleunigers !

Teilchendetektoren

Jeder Teilchennachweis via elektromagnetische Wechselwirkung!



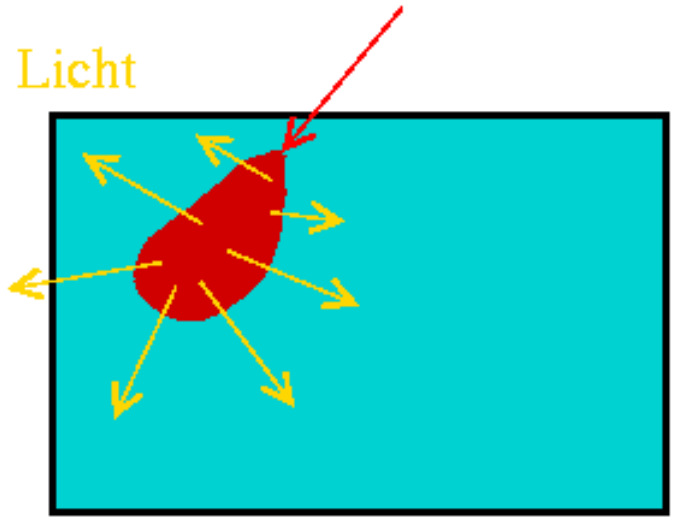
Spurdetektoren:

Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt.

Ionisation des Gases ergibt elektrisches Signal.

Ortsauflösung ~ 0.1 mm

Aus Krümmung folgt Impuls /Energie



Kalorimeter:

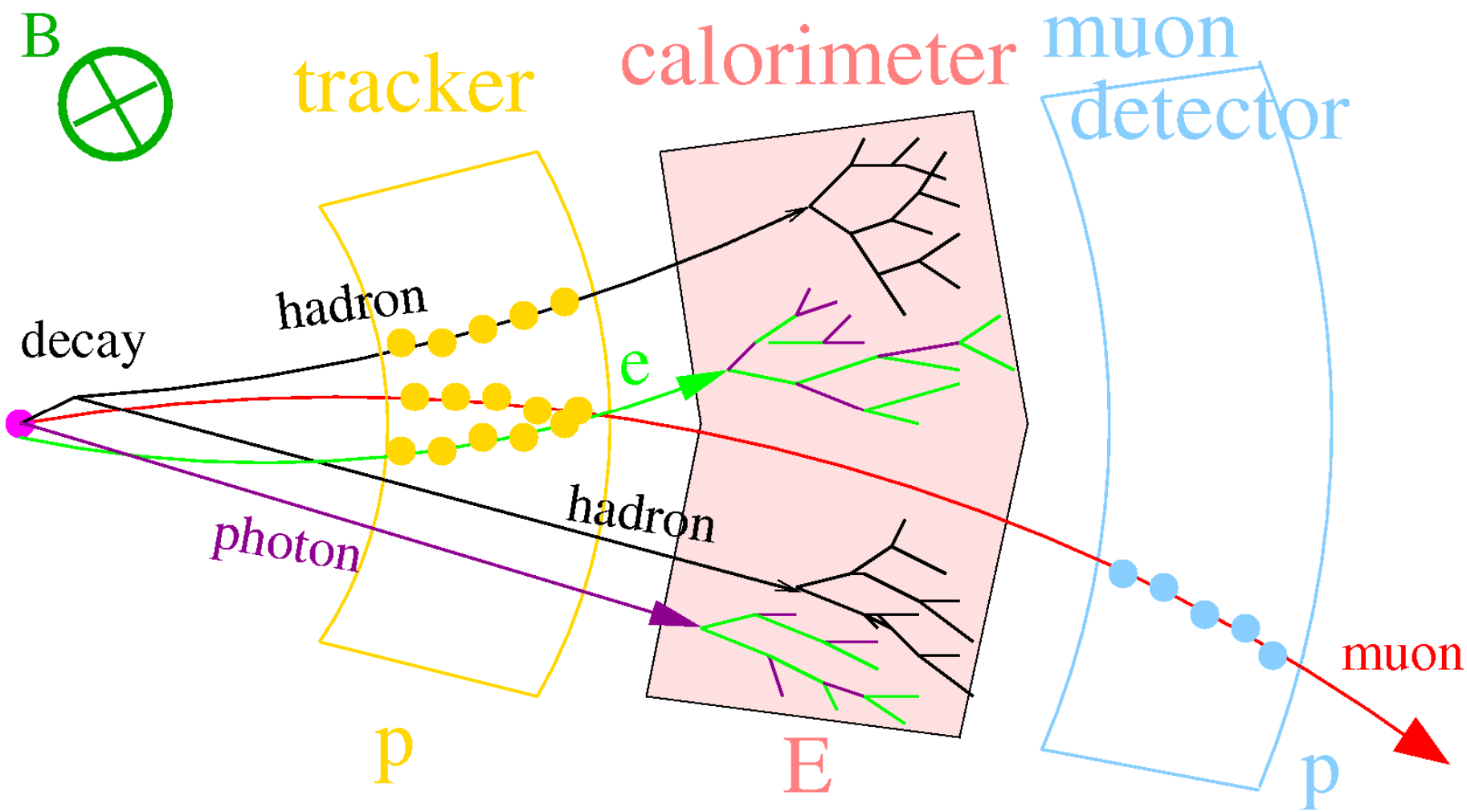
In Materie enstehen viele Sekundärteilchen, die Moleküle anregen.

Das entstehende Licht ist ein Maß für die Energie.

Energieauflösung ~ Prozent

Universaldetektoren

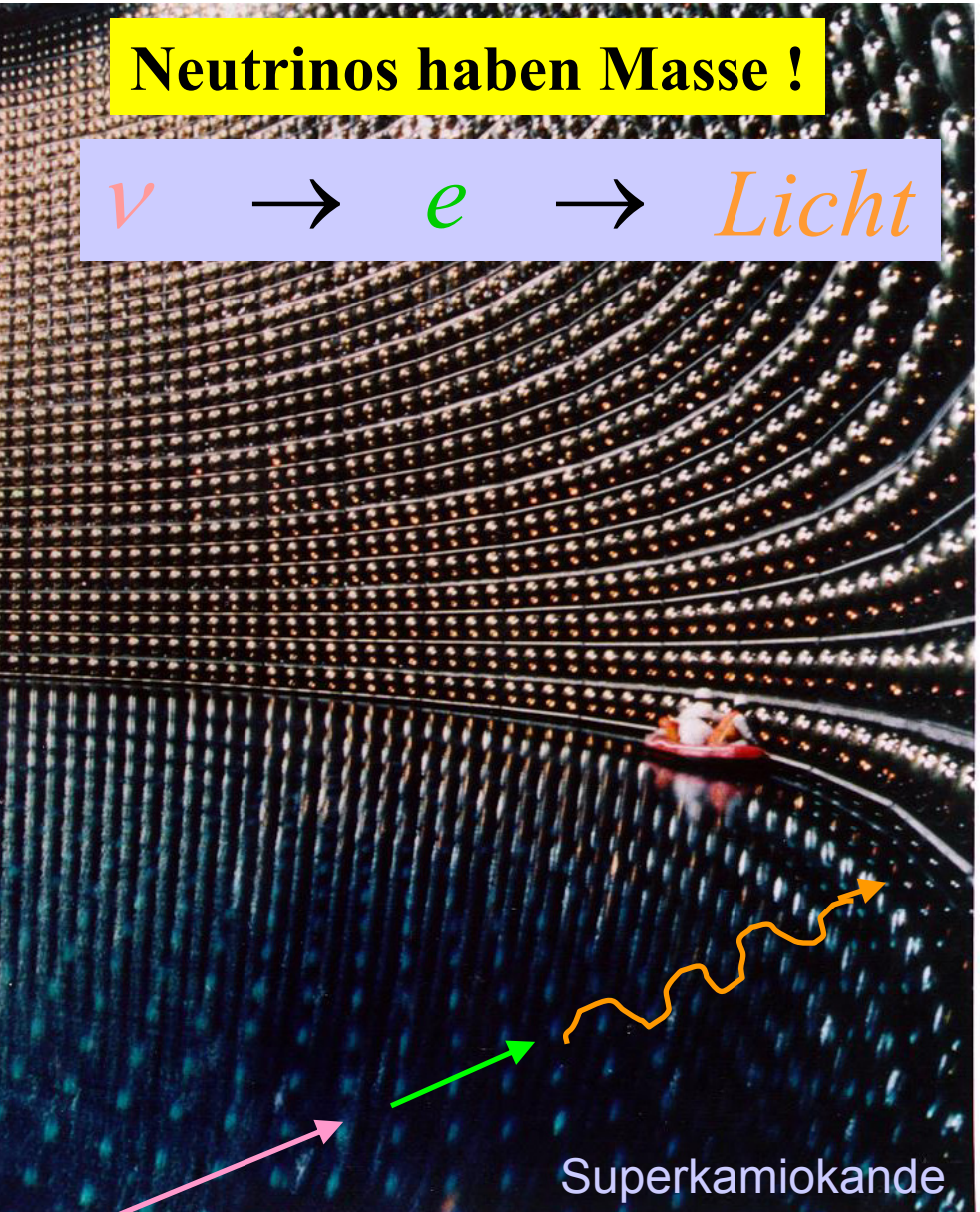
Nachweisbar: langlebige Teilchen mit elektromagnetischer Wechselwirkung

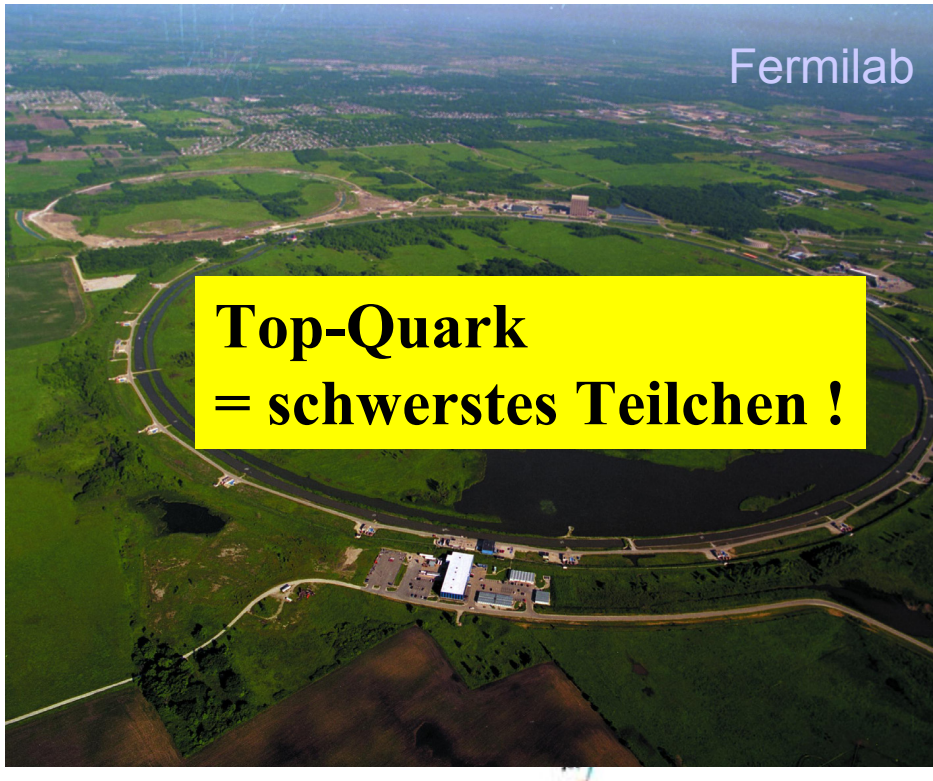


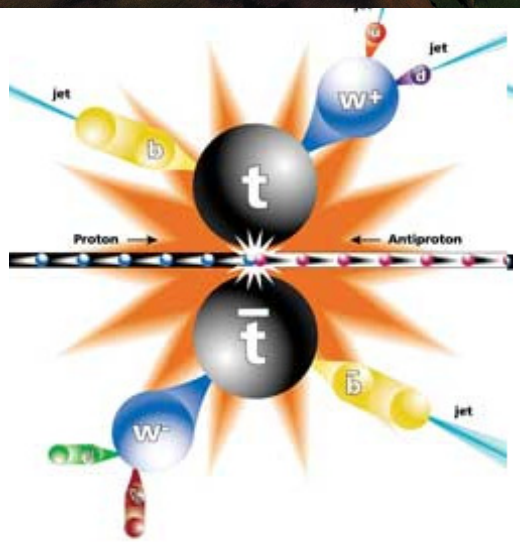
Viele Teilchen sind kurzlebig → Nachweis nur über ihre Zerfallsprodukte

Wichtige Entdeckungen der letzten Jahre

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009







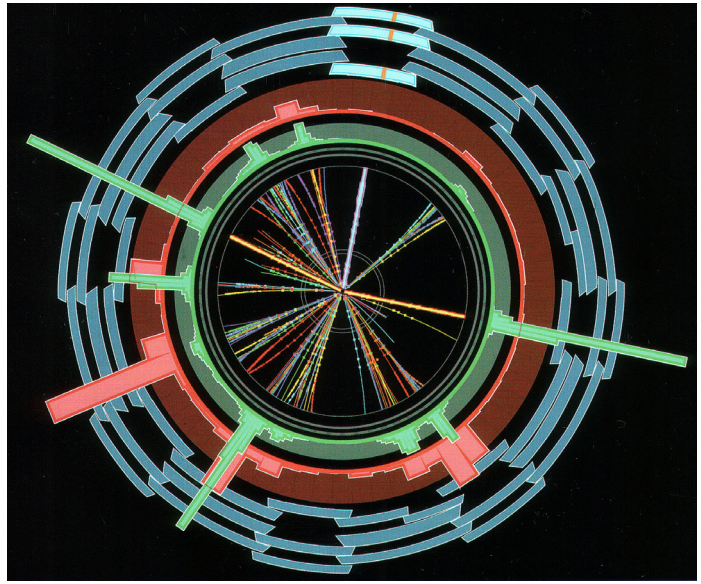
Zusammenfassung

- **Beschleuniger und Detektoren**

Strukturuntersuchungen

Teilchenbeschleuniger

Teilchendetektoren



- **Zur Erforschung des Mikrokosmos:**

  große Beschleuniger und Detektoren

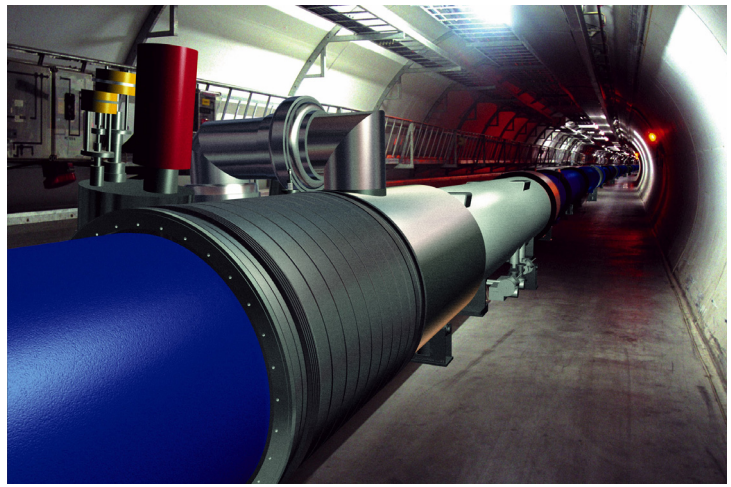
  Erreicht: 1000 GeV $\Longleftrightarrow$ 1/10000 Protonradius

Inhalt

- Teilchen und Wechselwirkungen
- Beschleuniger und Detektoren
- **Der Beschleuniger LHC am CERN**

CERN

LHC = Large Hadron Collider



- Astrophysik und Kosmologie

CERN

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

CERN Cafeteria

- Weltgrößtes Labor für Elementarteilchenphysik

  7000 Wissenschaftler

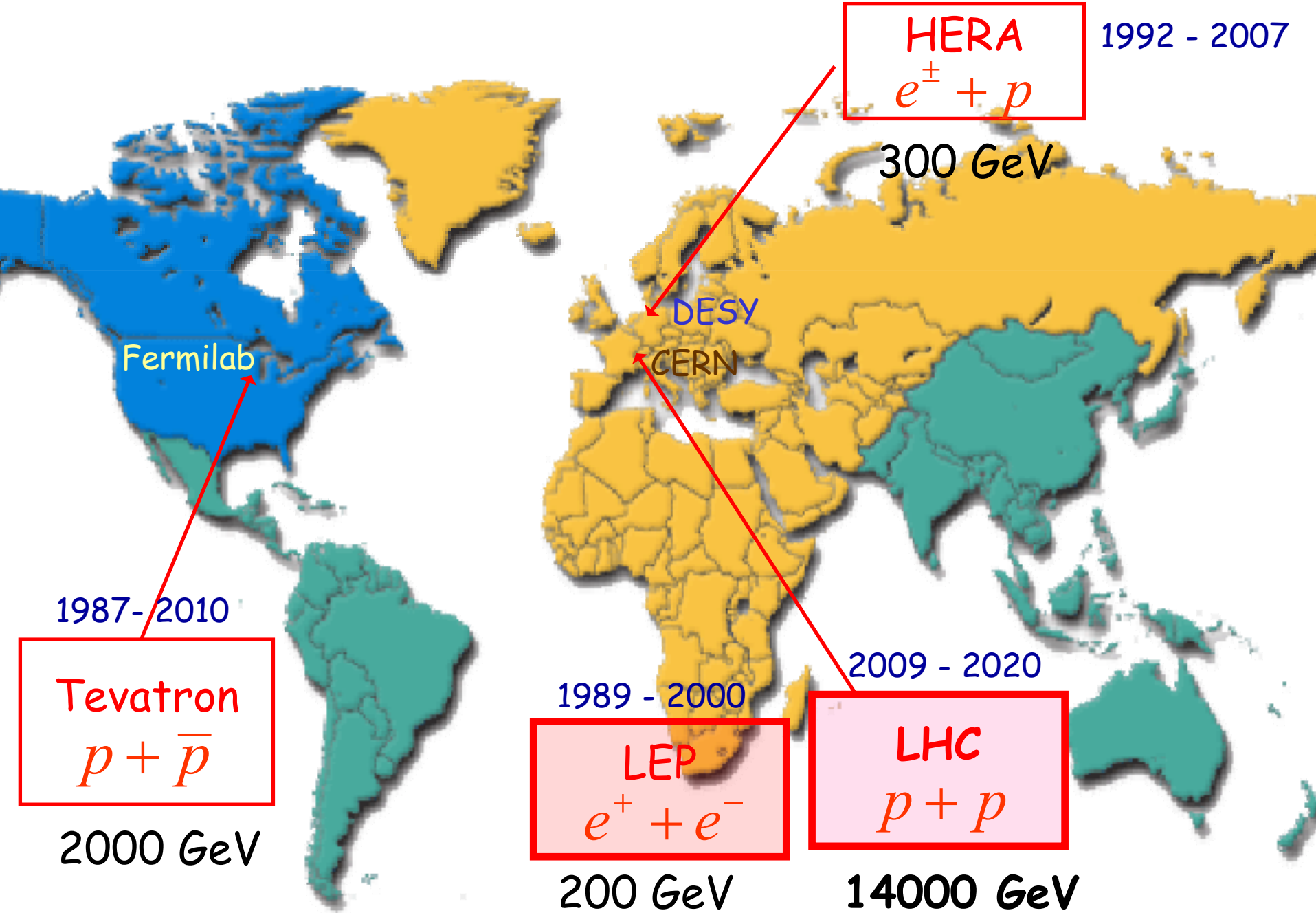
  800 Millionen Euro / Jahr

(Astro-)Teilchenphysiker der RWTH

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

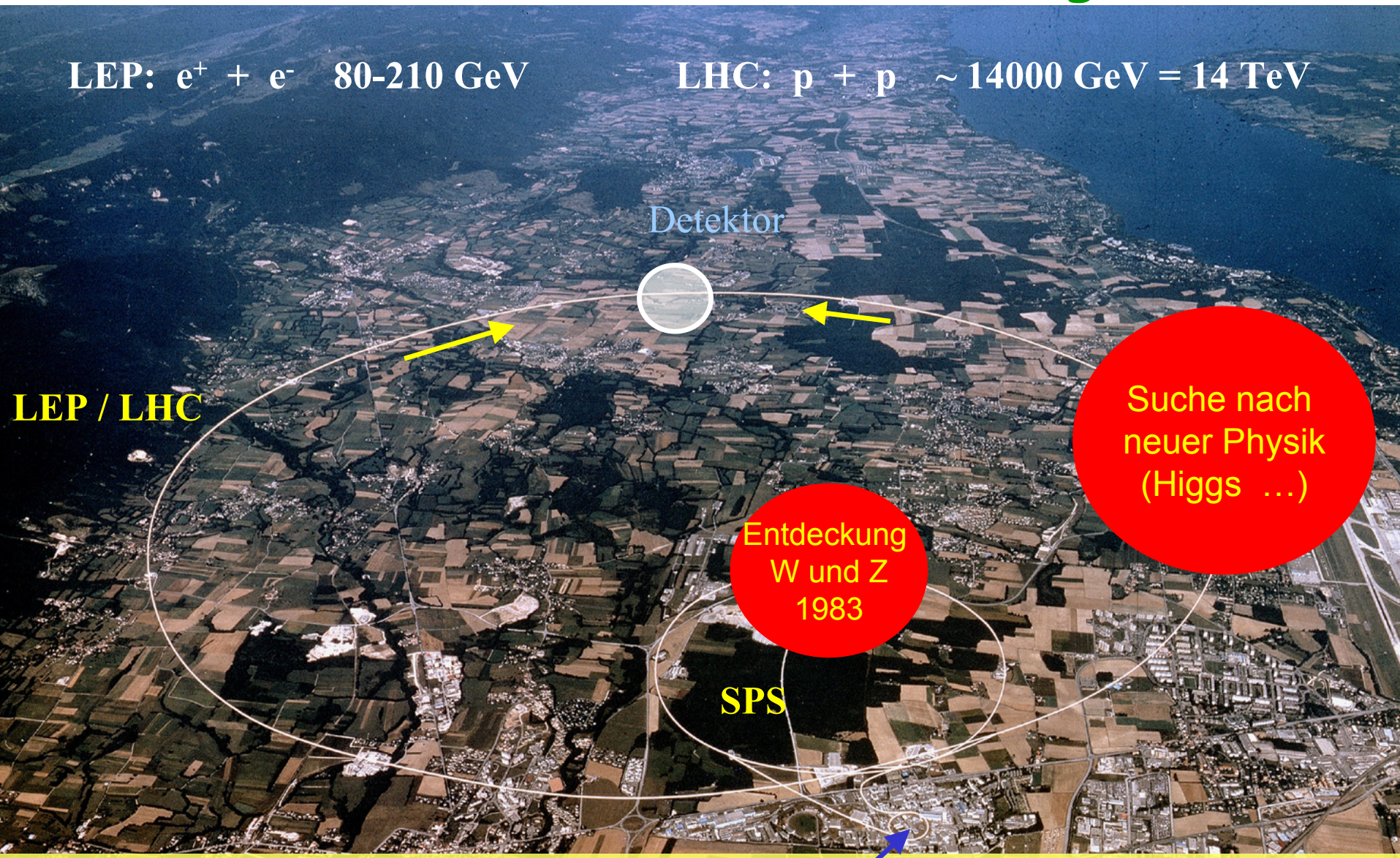
Hochenergie-Teilchenbeschleuniger

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009



CERN und seine Beschleuniger

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

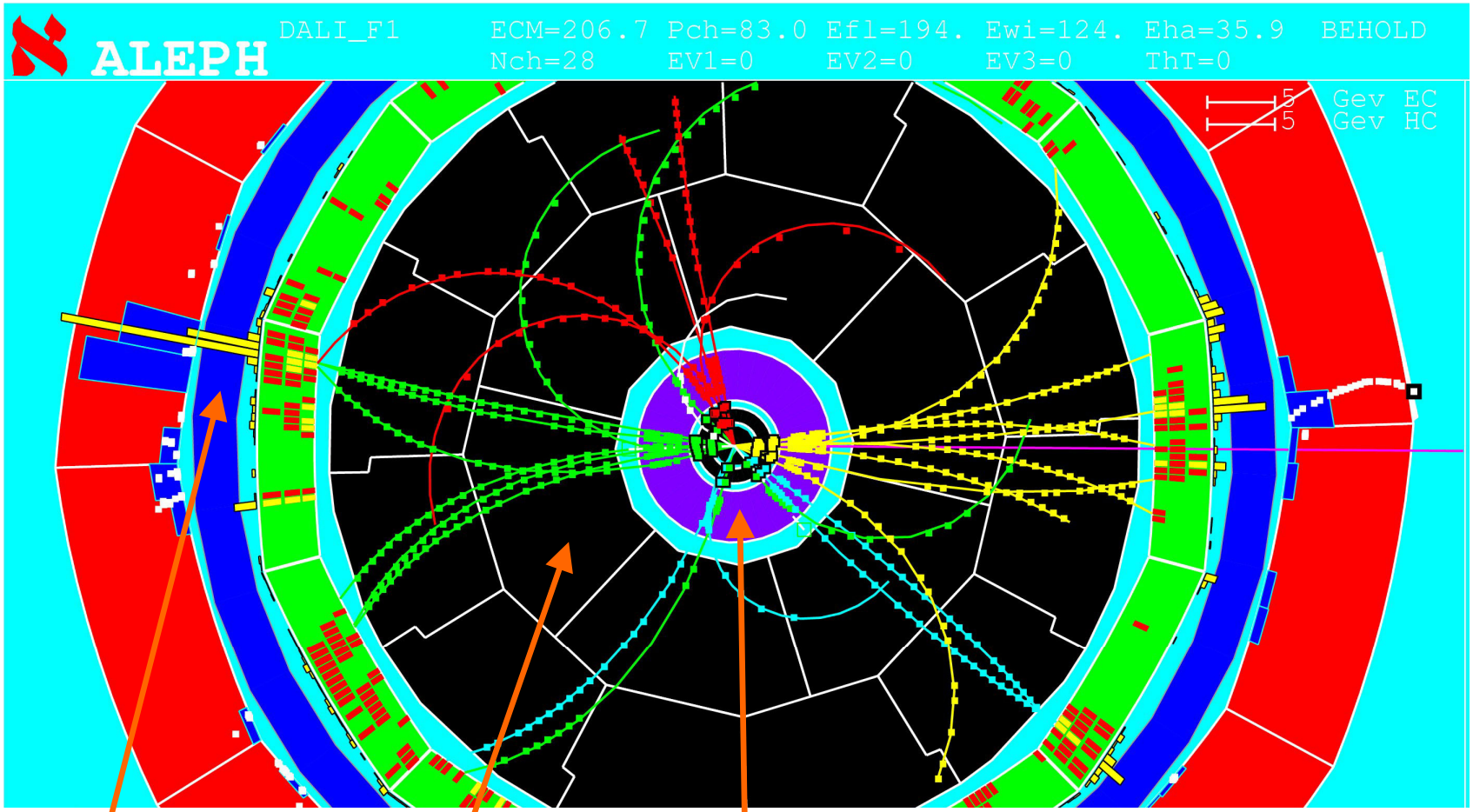


CERN / Genf

weltweit führendes Forschungszentrum der Elementarteilchenphysik

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Kollisionsereignis (LEP-Beschleuniger)



Energie im Kalorimeter

Spuren geladener Teilchen

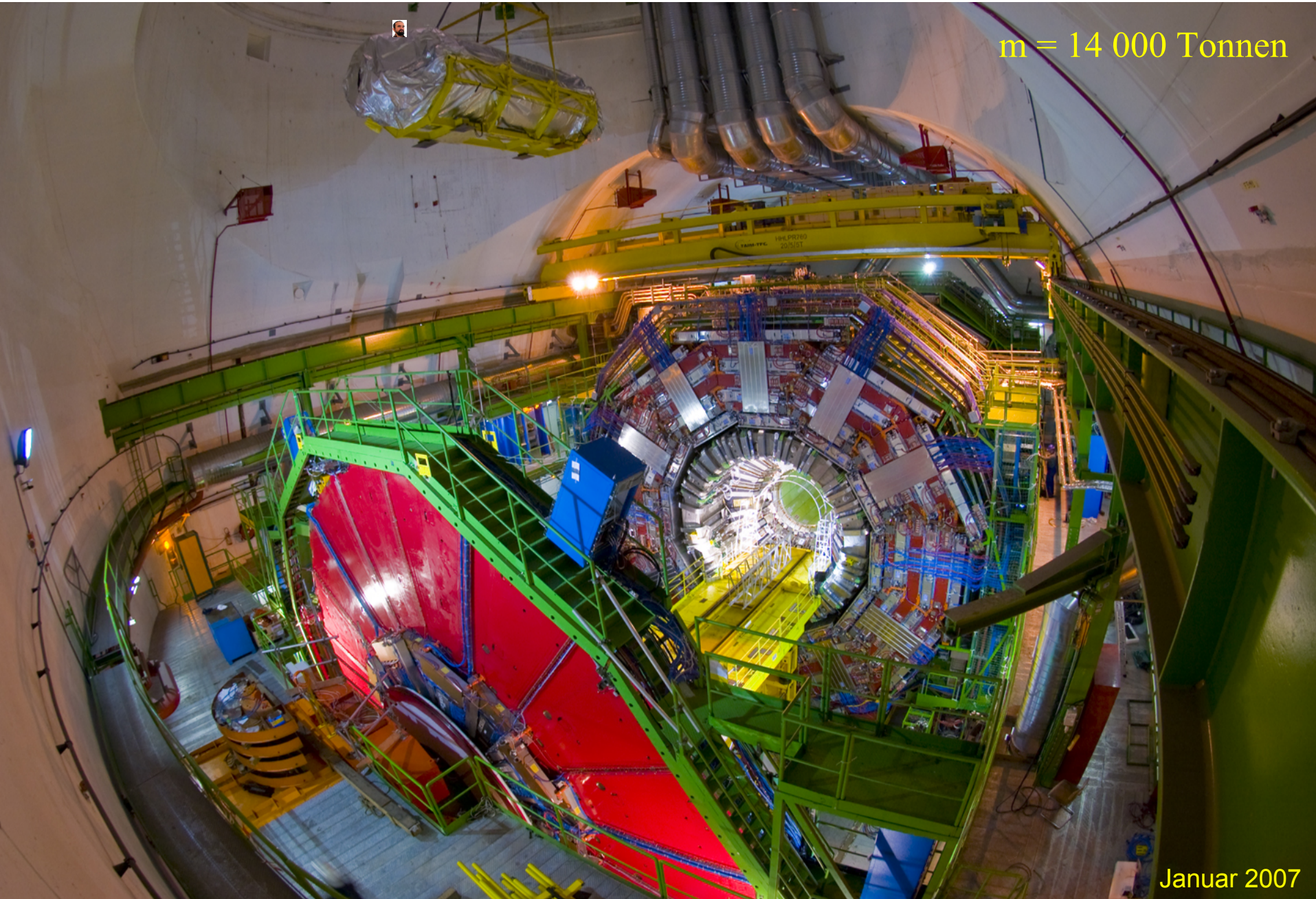
$e^+ e^-$ Kollision

Puzzle !

LHC Beschleuniger (im LEP-Tunnel)

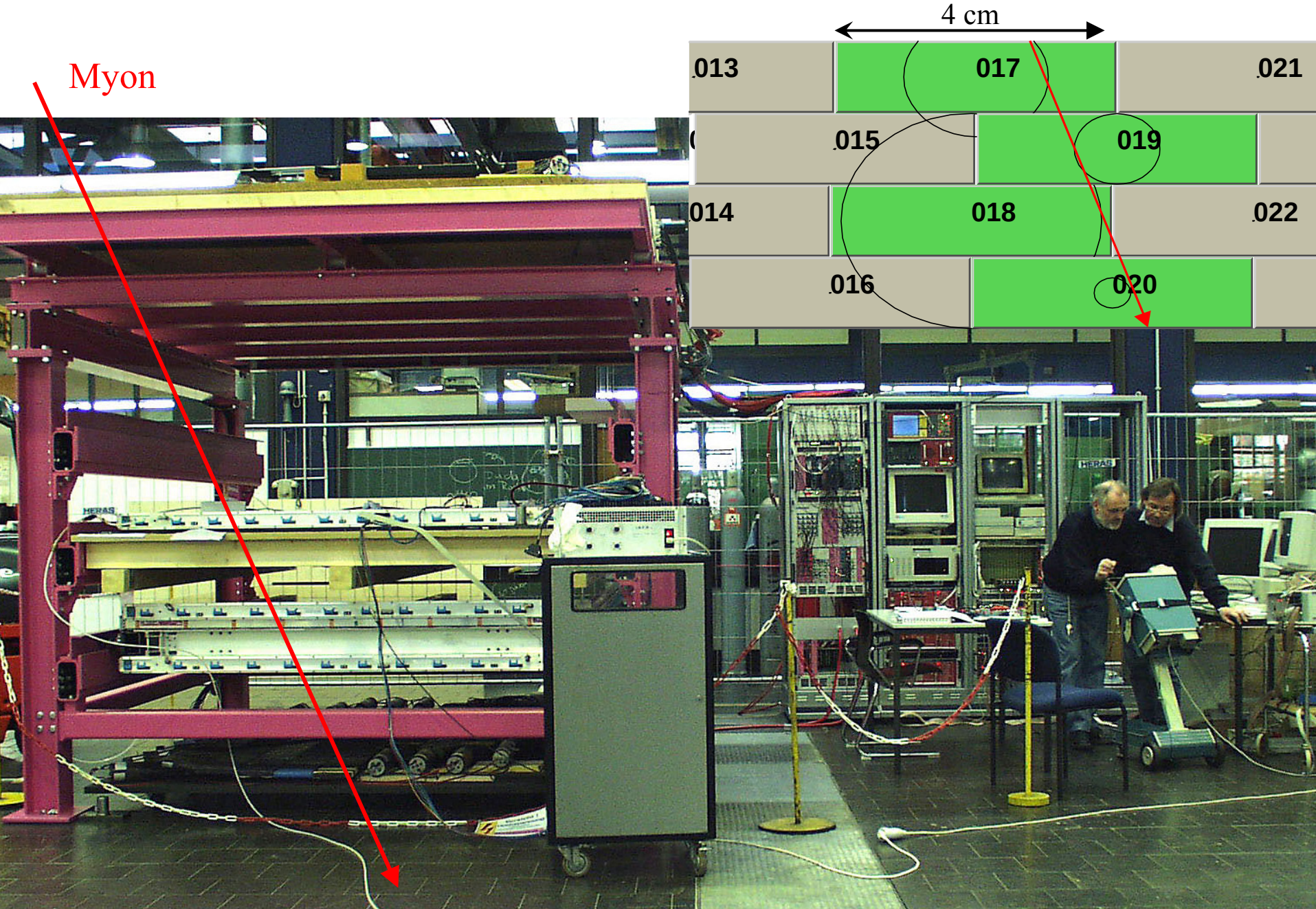
CMS-Detektor am LHC (im Aufbau)

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

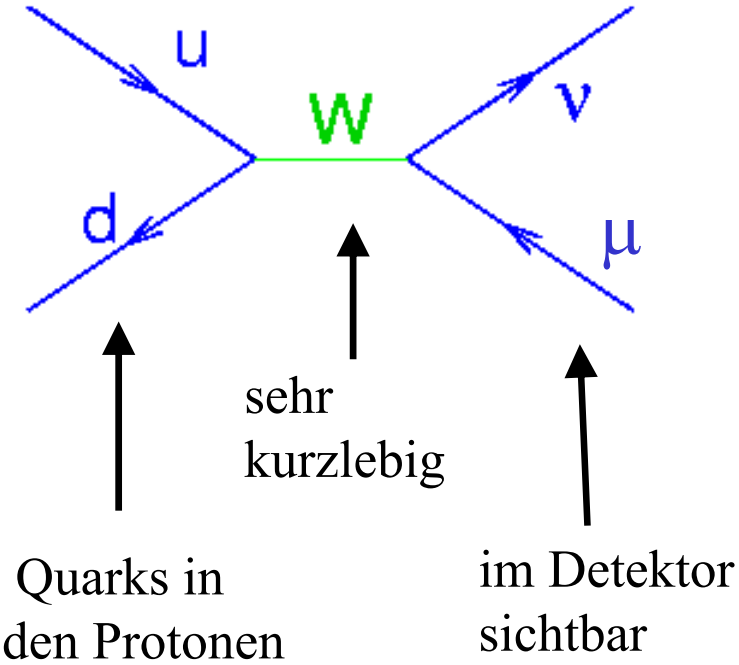


CMS – Myondektorbau in Aachen

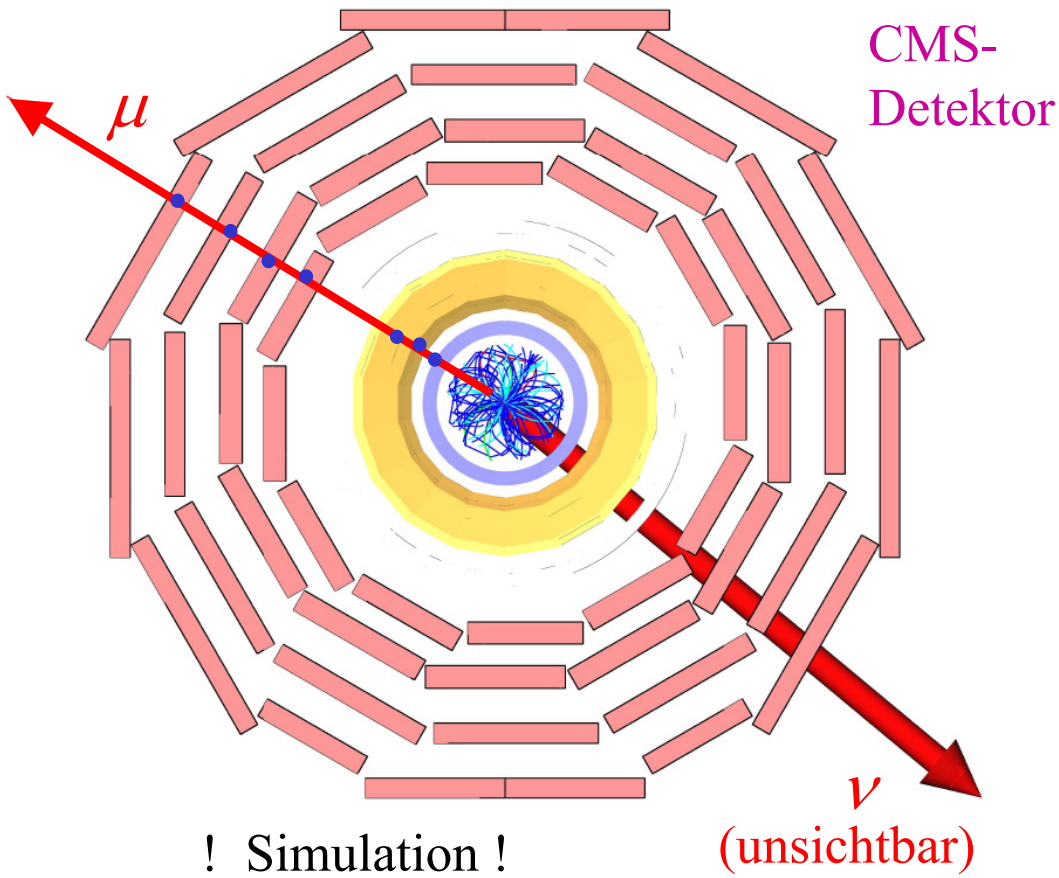
T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009



Erzeugung von W-Bosonen mit dem LHC



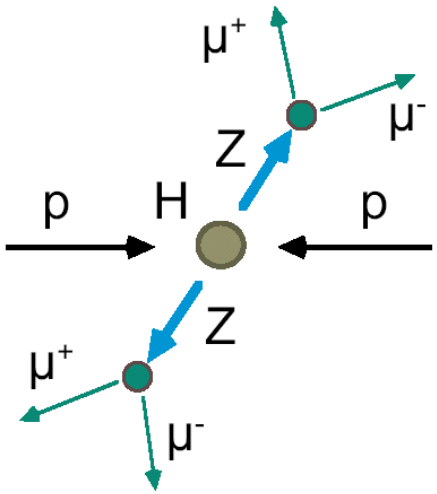
$$p + p \rightarrow W \rightarrow \mu\,\nu$$

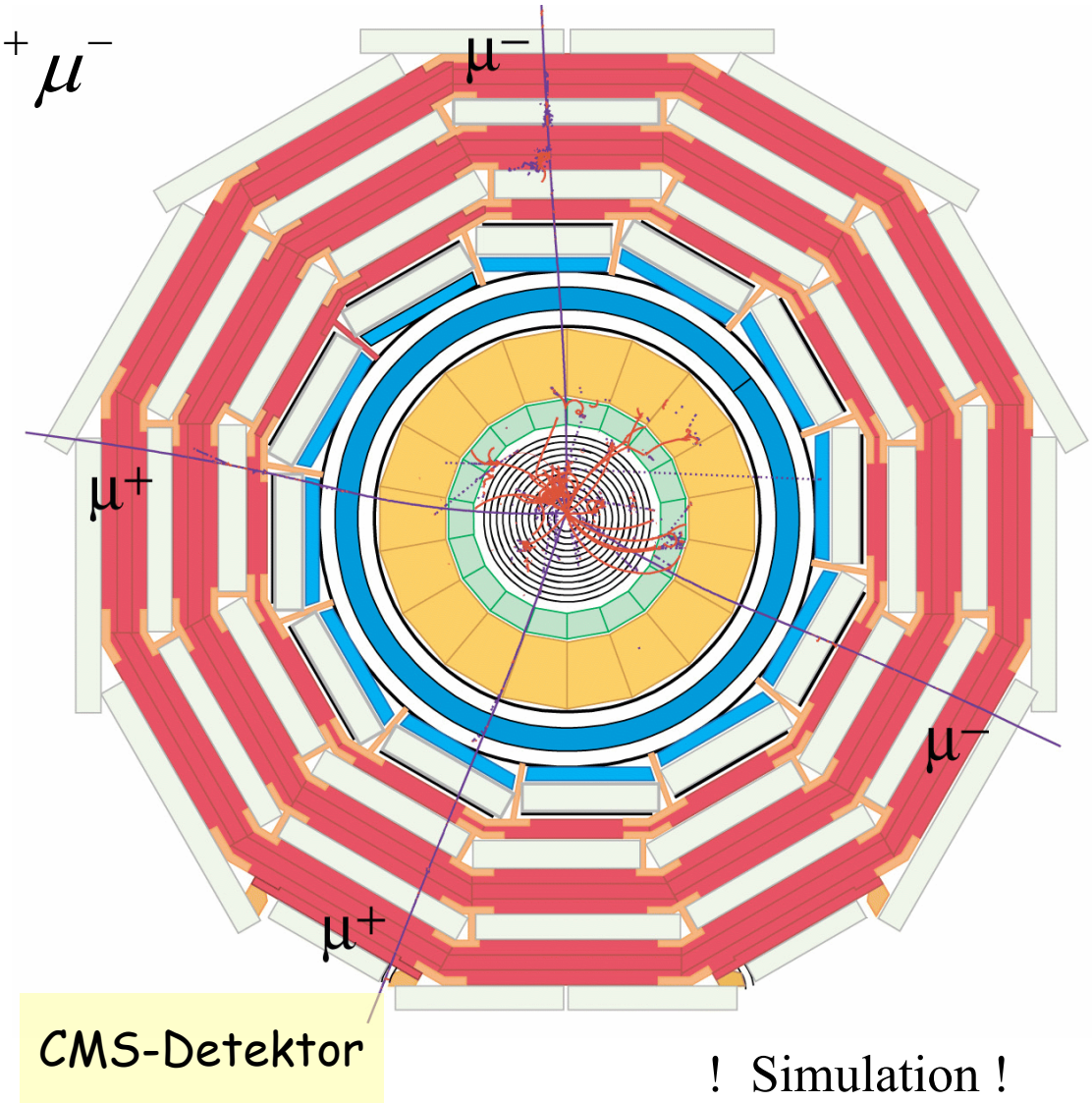


! Simulation !

Higgs - Entdeckung ?

$$H \rightarrow Z\,Z \rightarrow \mu^+\mu^-\,\mu^+\mu^-$$





! Simulation !

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

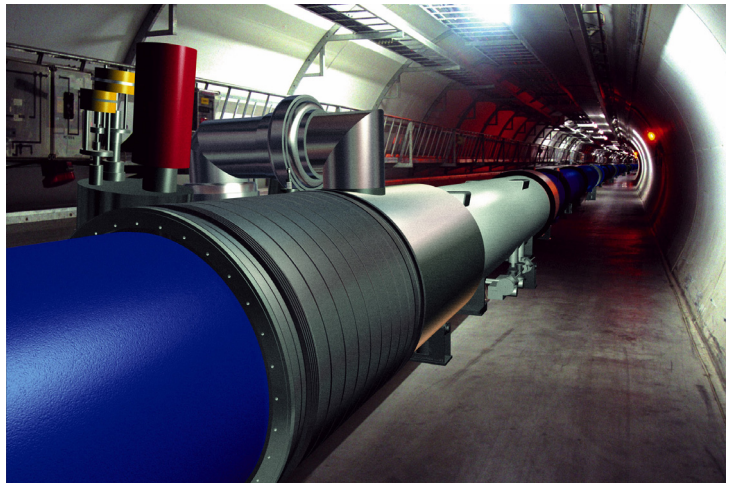
GRID Computing

Zusammenfassung

- **Der Beschleuniger LHC am CERN**

CERN

LHC = Large Hadron Collider (ab 2009)



- **LHC: Proton-Proton-Kollider mit der höchsten Energie**

wird vielleicht das Higgs und/oder andere neue Teilchen entdecken

Inhalt

- Teilchen und Wechselwirkungen
- Beschleuniger und Detektoren
- Der Beschleuniger LHC am CERN
- **Astrophysik und Kosmologie**

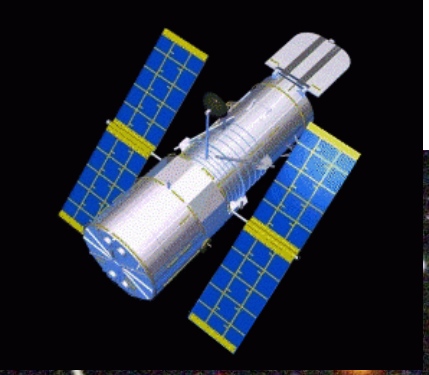
Astronomie und Astrophysik

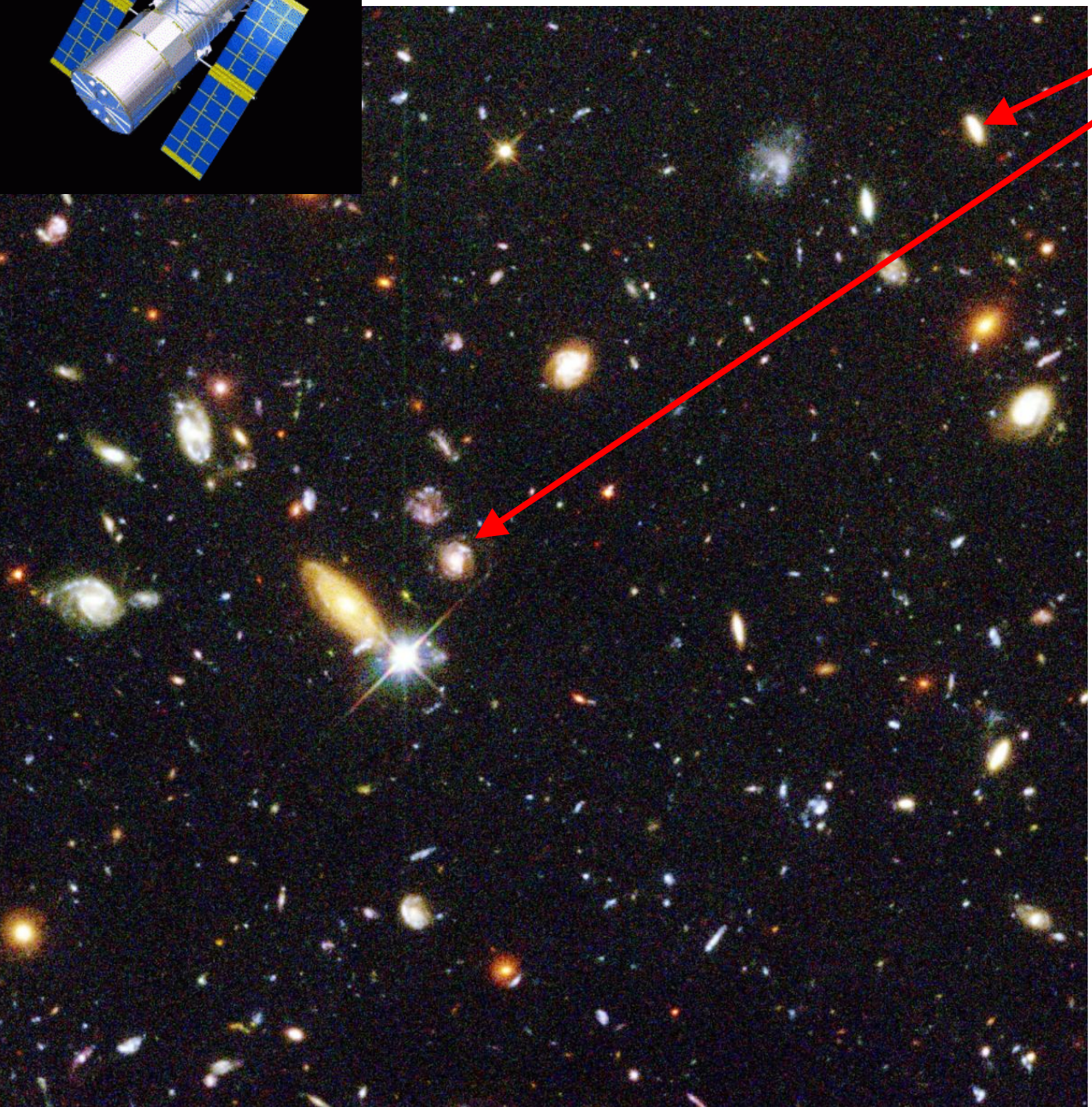
Kosmologie und Teilchenphysik

Kosmische Strahlung

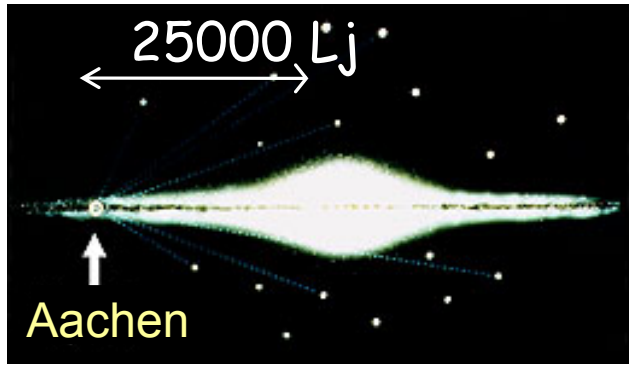
Blick ins Weltall

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009





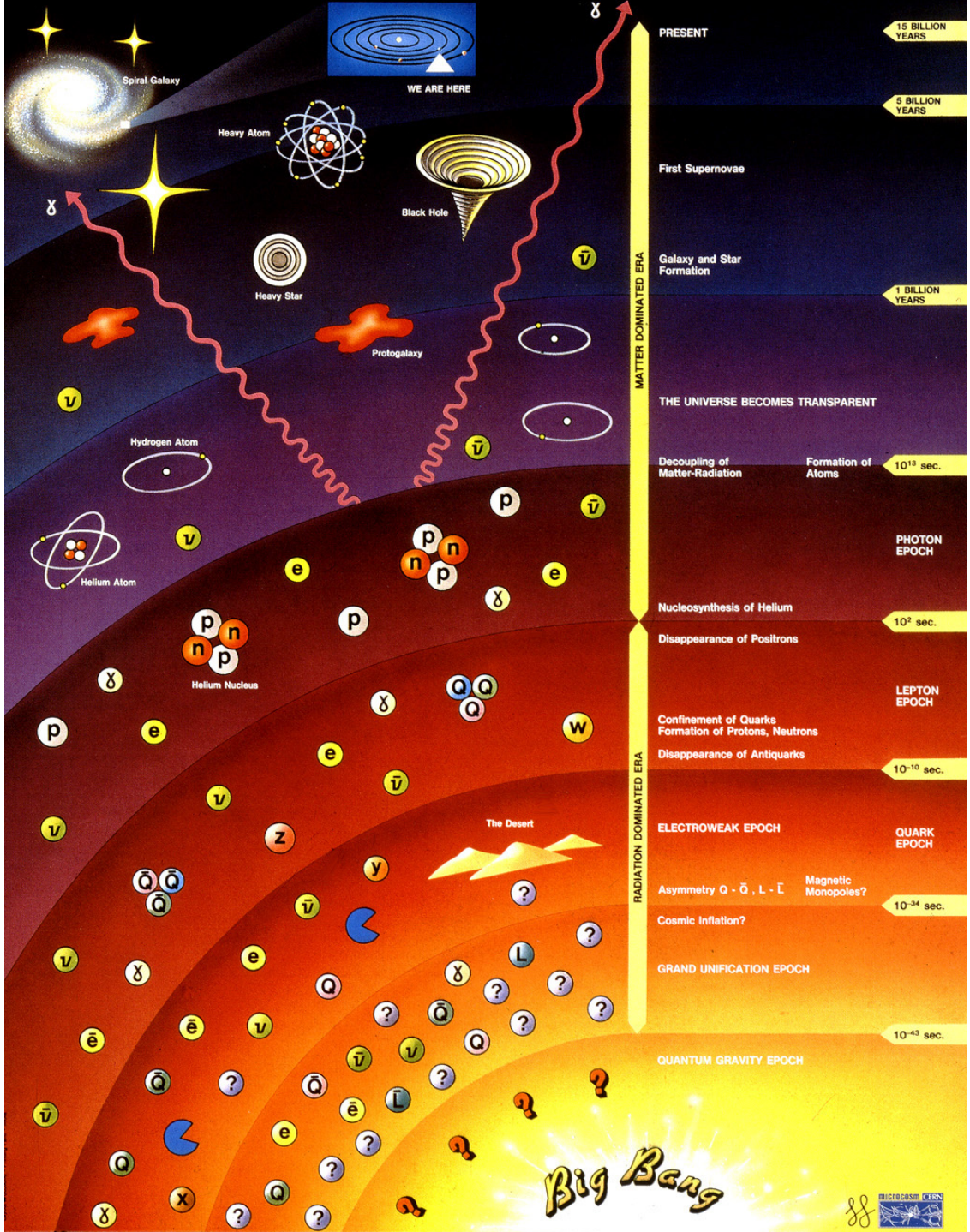
Andromeda-Galaxie



Das Sonnensystem
in der Milchstrasse

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Teilchenphysik und Kosmologie

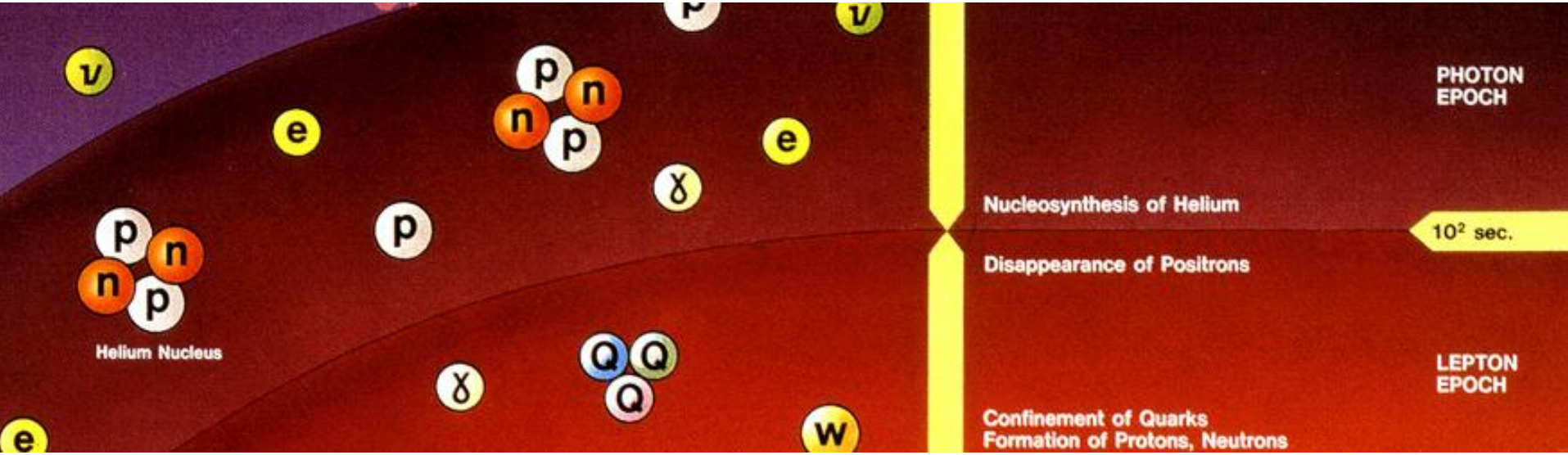


Teilchenbeschleuniger untersuchen Prozesse 10^{-10} s nach dem Urknall (100 GeV)

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Nukleosynthese = Bildung der Atomkerne

t = 3 min T = 1 000 000 000 K



2 n + 2 p → He-Kern (stabil)

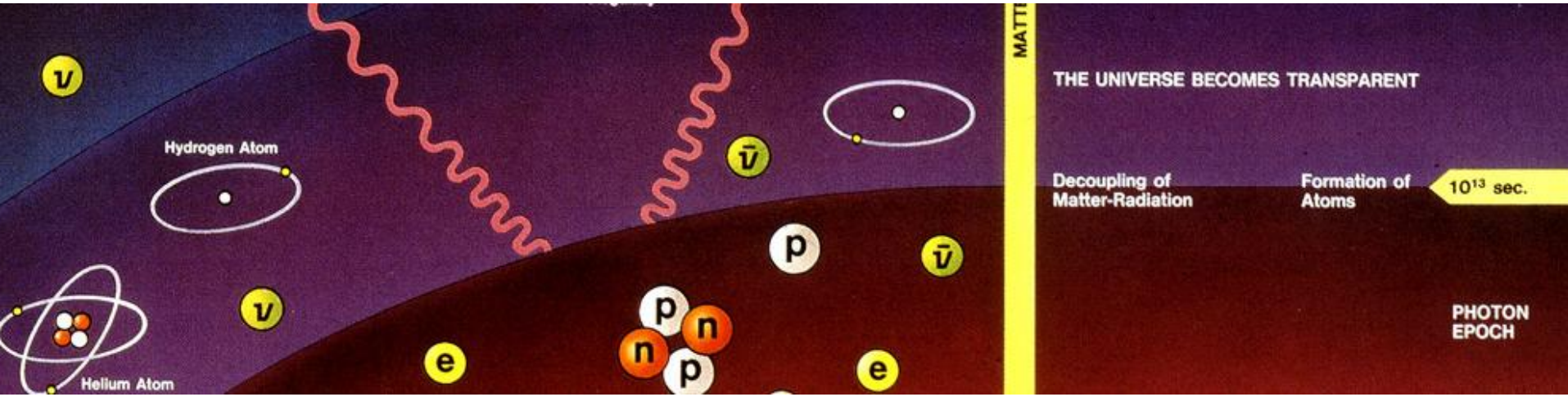
p = H-Kern (übriggebliebene Protonen)

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

T.Hebbeker
Schüleruni 08/2009

Bildung von Atomen

t = 300 000 a T = 3000 K



He-Kern + 2 e → He-Atom 25% Masse

H-Kern + e → H-Atom 75%

„kosmische Hintergrund-strahlung"

Weltall ohne freie Ladung!

Licht kann sich ungehindert ausbreiten!

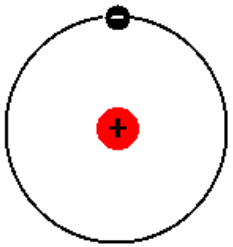
Atome bilden Sterne und Galaxien

Die Chemie des Universums

Vor der Sternbildung:

75 %

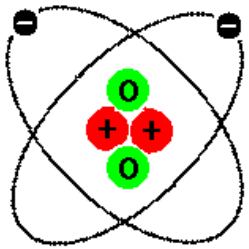
Wasserstoff



^{1}H

25 %

Helium



^{4}He

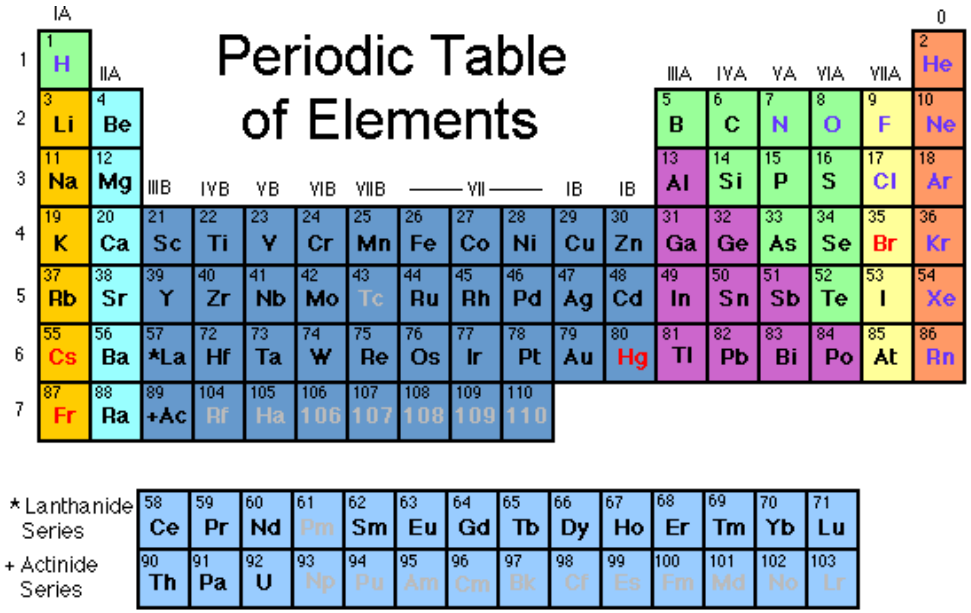
proton: +

electron: −

neutron: o

BIG BANG-Modell sagt Messdaten richtig voraus!

Am Ende des Sternenlebens:



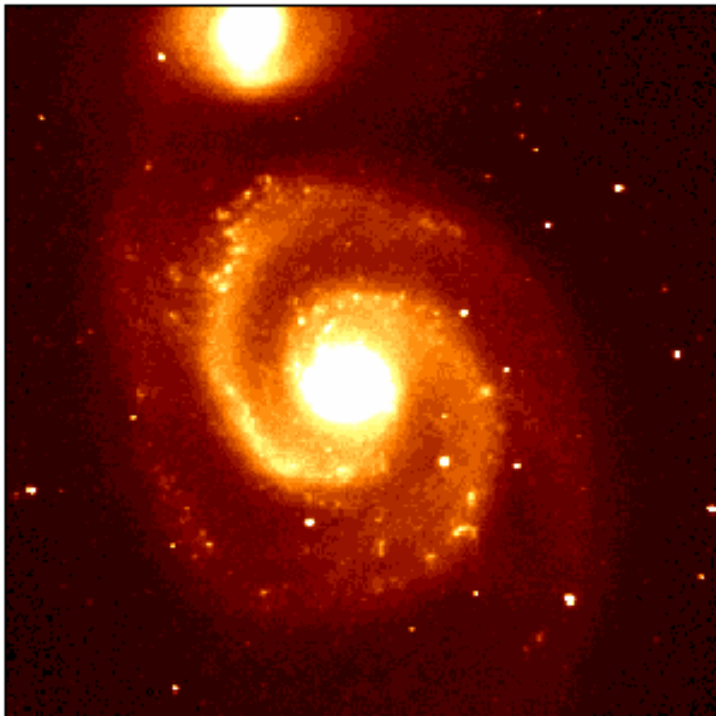
Wir bestehen aus Sternenasche !

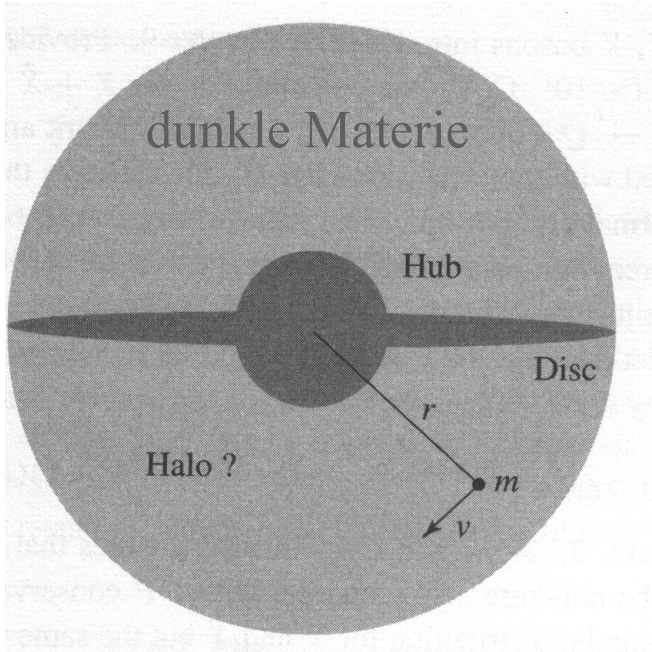
Dunkle Materie ?

Gibt es große Mengen nichtleuchtender Materie im Kosmos ?

⇨ Nachweis: Gravitation!

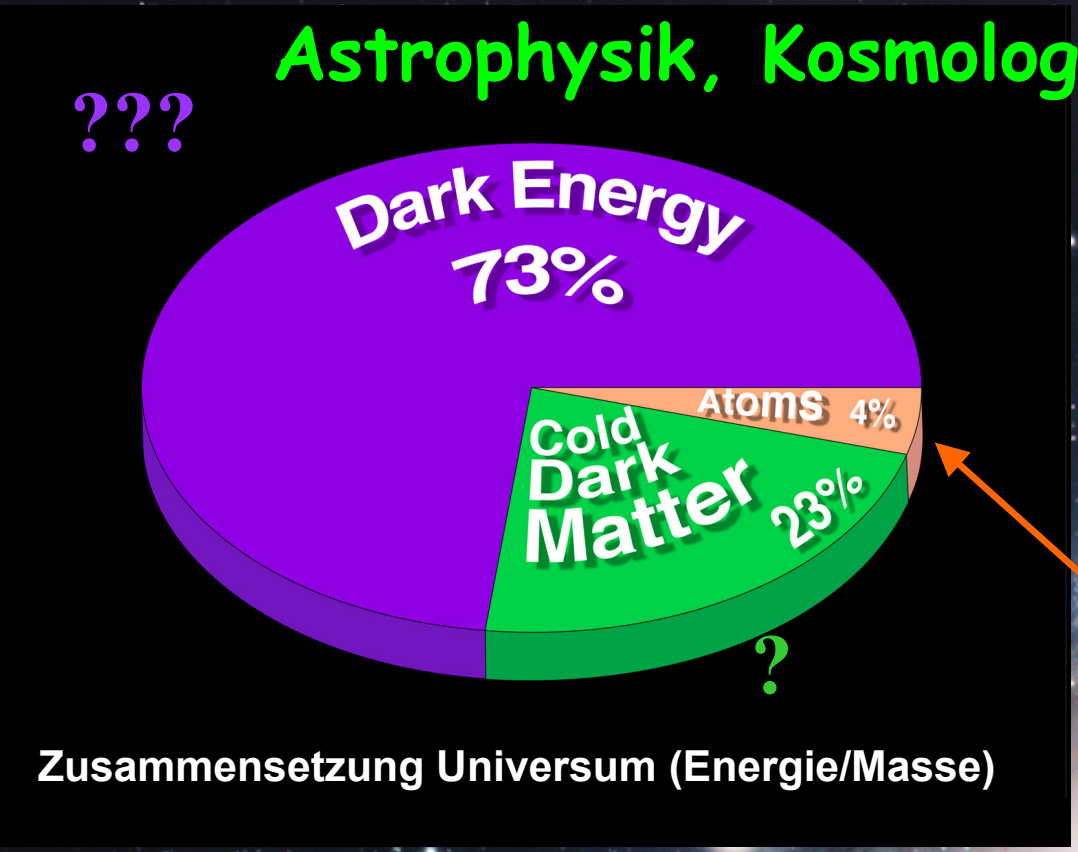
Untersuchung von Spiralgalaxien:





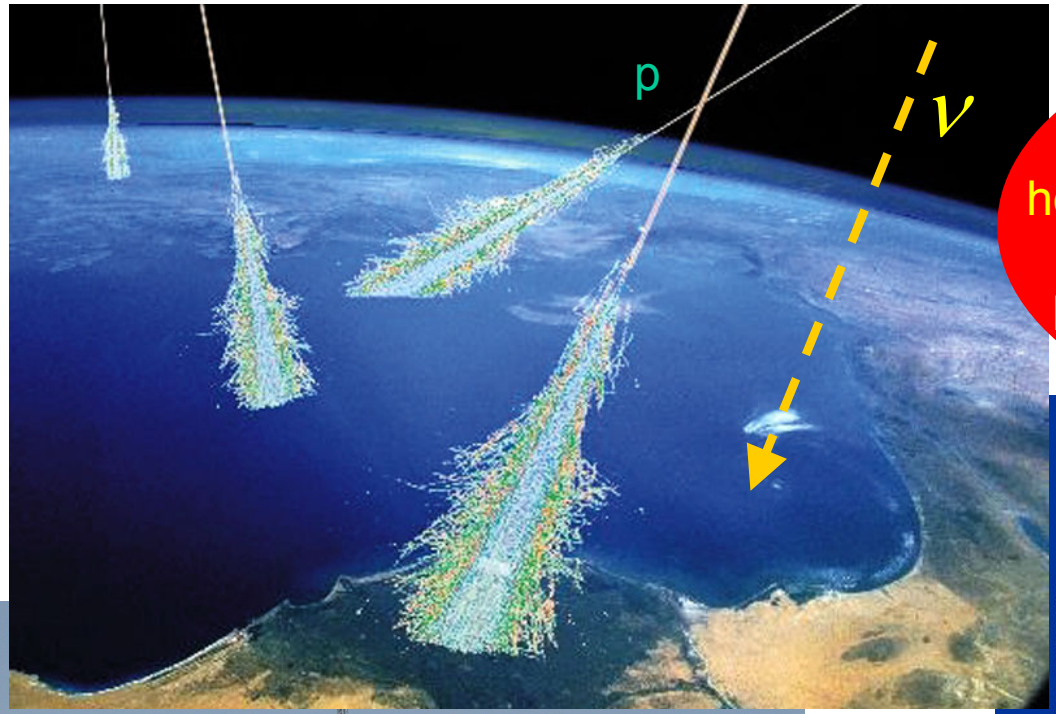
= Neutralino ?
Suche am LHC !

Astrophysik, Kosmologie, Astroteilchenphysik



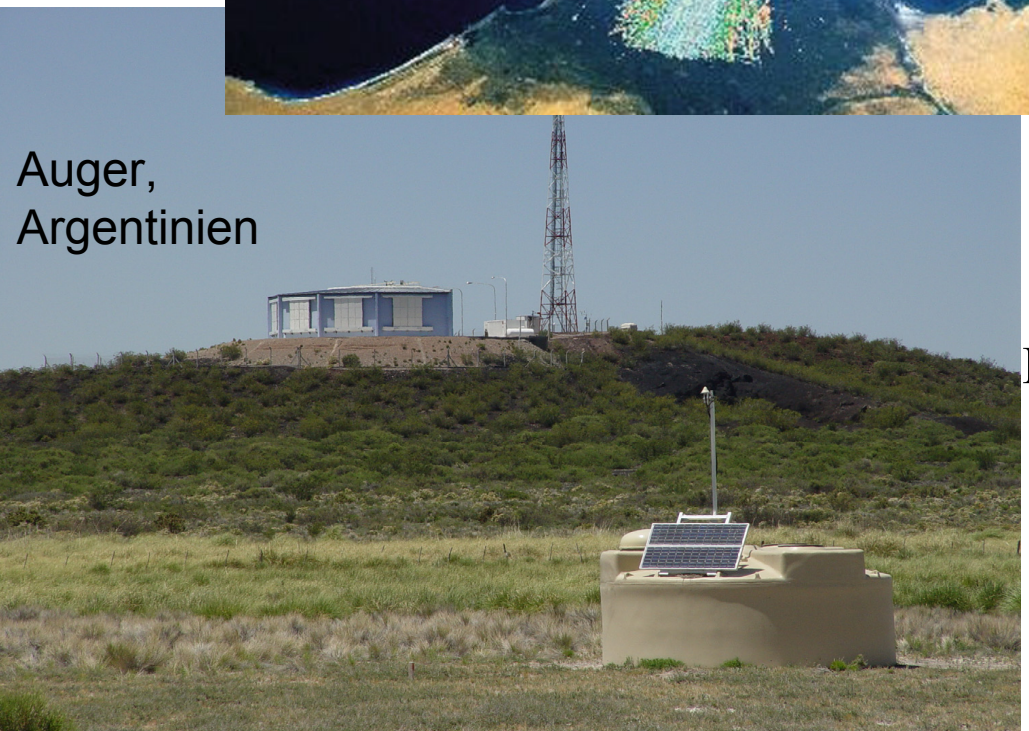
Zusammensetzung Universum (Energie/Masse)

Hochenergetische Teilchen aus dem Universum ?!

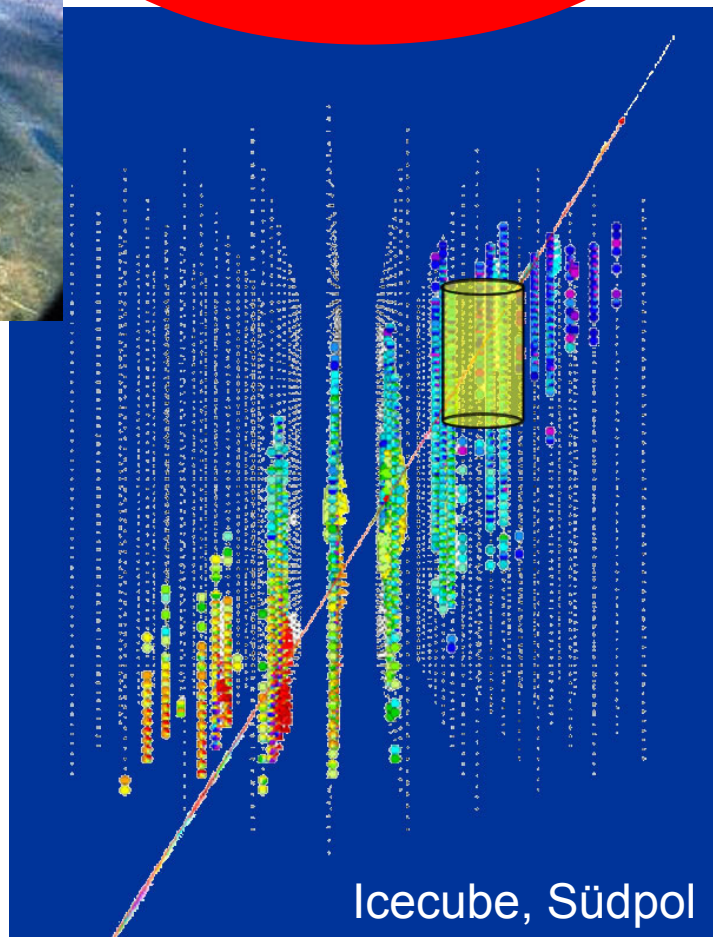


Woher kommen
höchstenergetische Teilchen ?

Neutrinos aus dem Weltall ?



RWTH



Zusammenfassung

▪ **Astrophysik und Kosmologie**

Astronomie, Astrophysik

Kosmologie und Teilchenphysik

Kosmische Strahlung

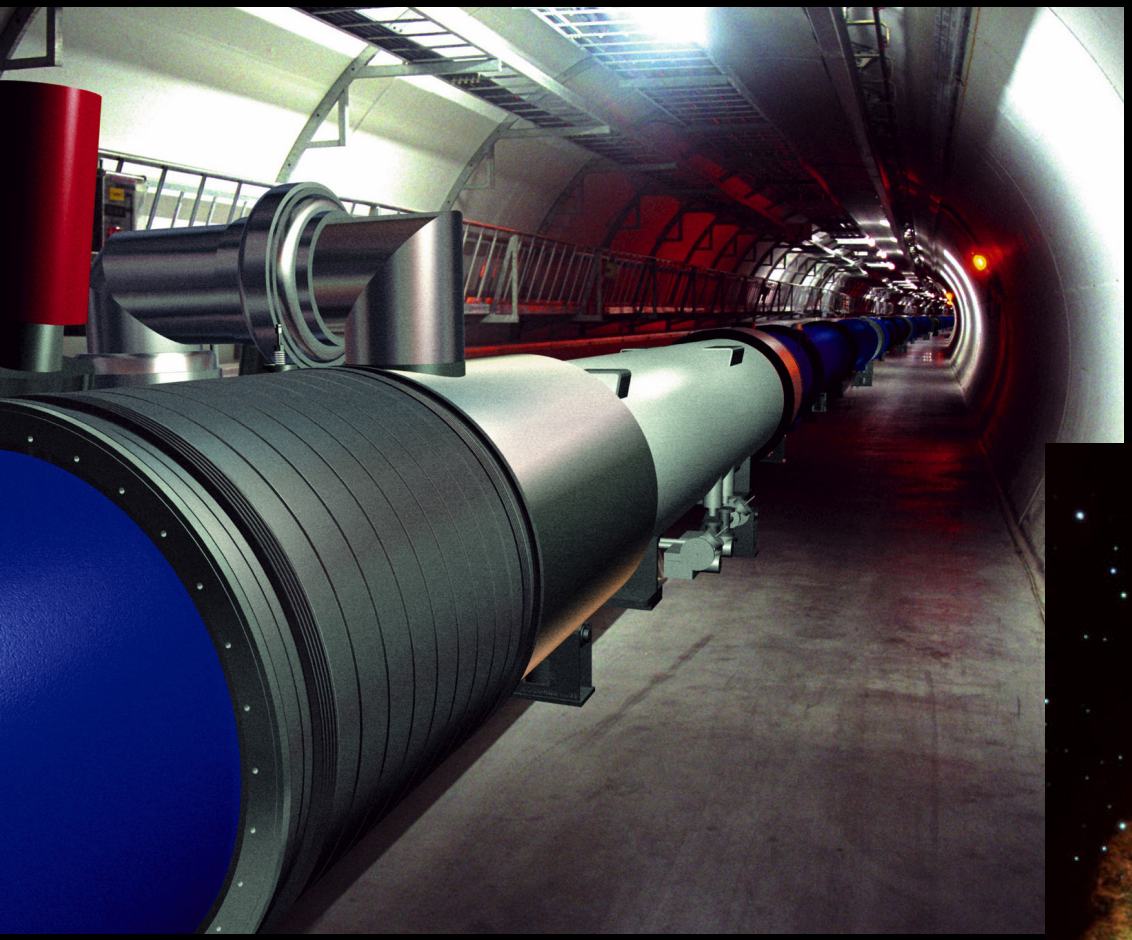
- **Ursprung der Teilchen:**

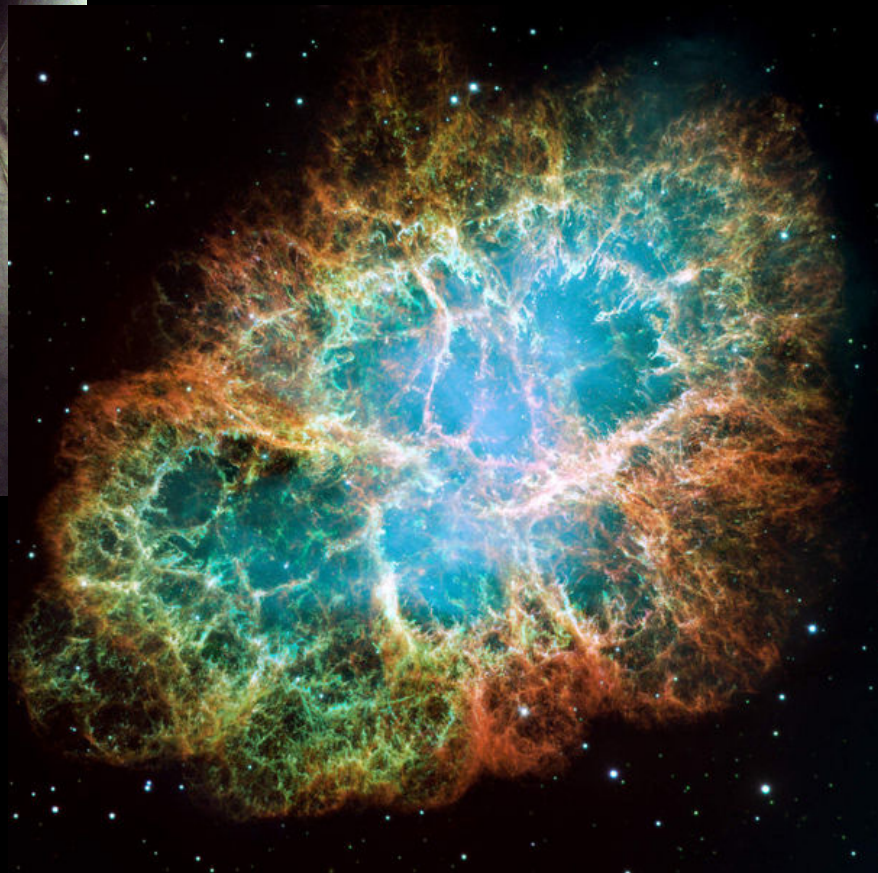
  Urknall: Wasserstoff, Helium **Sterne: schwerere Elemente**

- **Noch unverstanden:**

  dunkle Materie, hochenergetische kosmische Strahlung …

Teilchenphysik / Astrophysik





spannend !