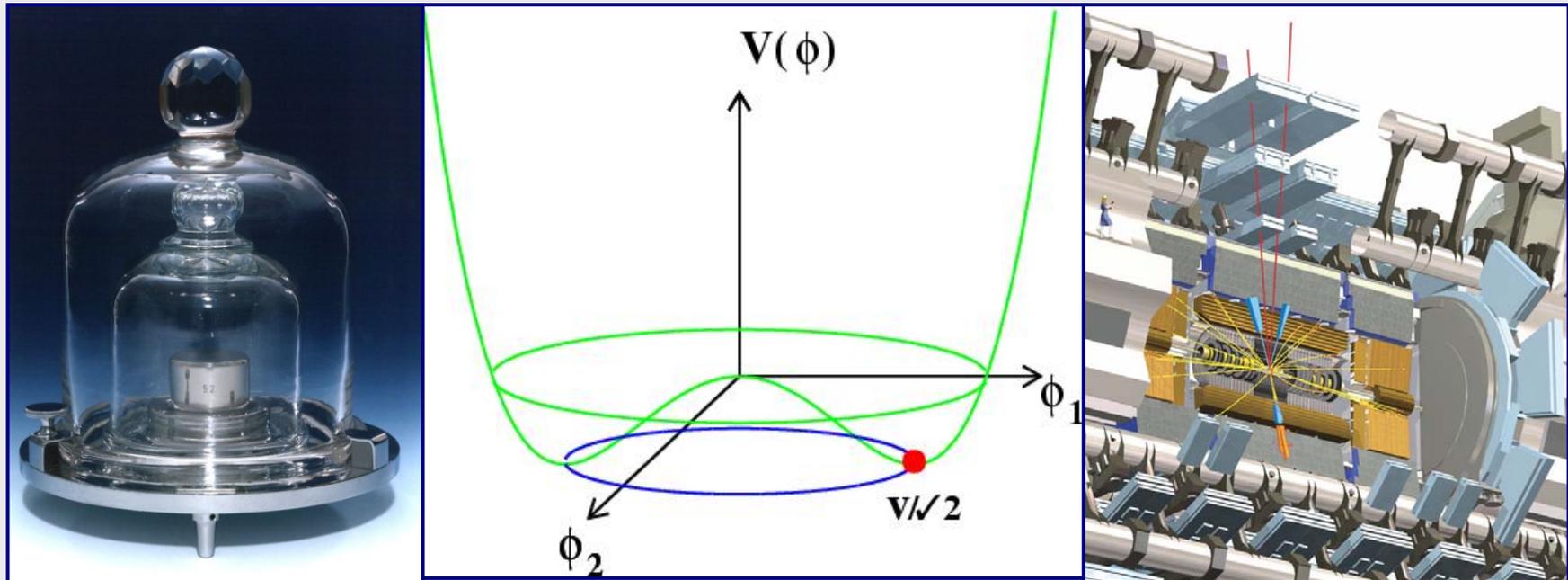


Das Mysterium der Masse

-

Die Jagd nach dem Higgs-Teilchen mit ATLAS

Markus Schumacher



Schülervorlesung, 21. Februar 2007, Universität Siegen

Der Begriff der Masse in der Physik

$$F = m a$$

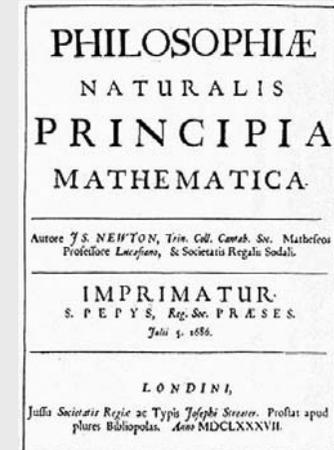
„Trägheit“

Newtons 2. Axiom

$$F = m \frac{G_N M}{R^2}$$

„Schwere“

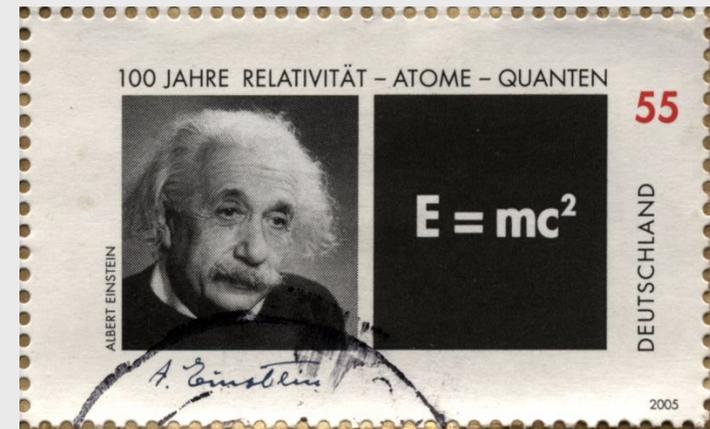
Newtons Gravitationsgesetz



$$m = E/c^2$$

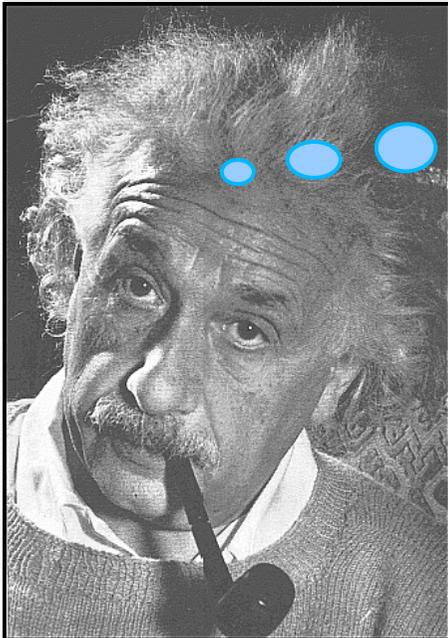
Einsteins „berühmte“ Gl.

(für Partikel in Ruhe)



... aber was macht nun eigentlich Masse?

$E=mc^2$ und die Einheit des Elektronvolt

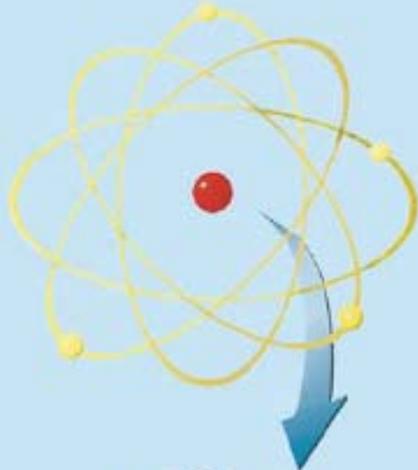


$$E = mc^2$$



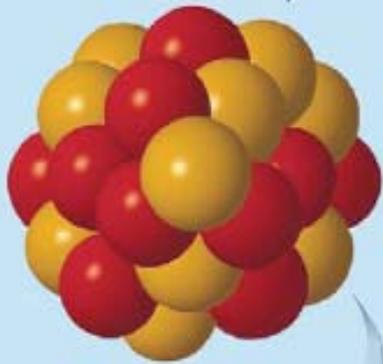
Zuwachs der Energie des Protons

1	GeV	Masse des Protons
52	GeV	Masse eines Eisenatoms
0.5	MeV	Masse des Elektrons
0.025	eV	Temperatur in diesem Raum
2.3×10^{-13}	eV	heutige Temperatur des Universum



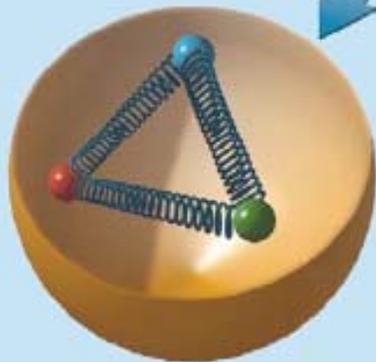
10^{-10} m
Atom

1/10.000



10^{-14} m
Atomkern

1/10



10^{-15} m
Proton

1/1.000

„up“ „up“ „down“

Wasserstoffatom:

$$\text{Masse} = m_p + m_e - E_{\text{bind.}}$$

$$938000000 + 511000 - 13.4 \text{ eV}$$

Heliumkern:

$$\text{Masse} = 2m_p + 2m_n - E_{\text{bind.}}$$

$$2 \times 938 \text{ MeV} + 2 \times 939 \text{ MeV} - 28 \text{ MeV}$$

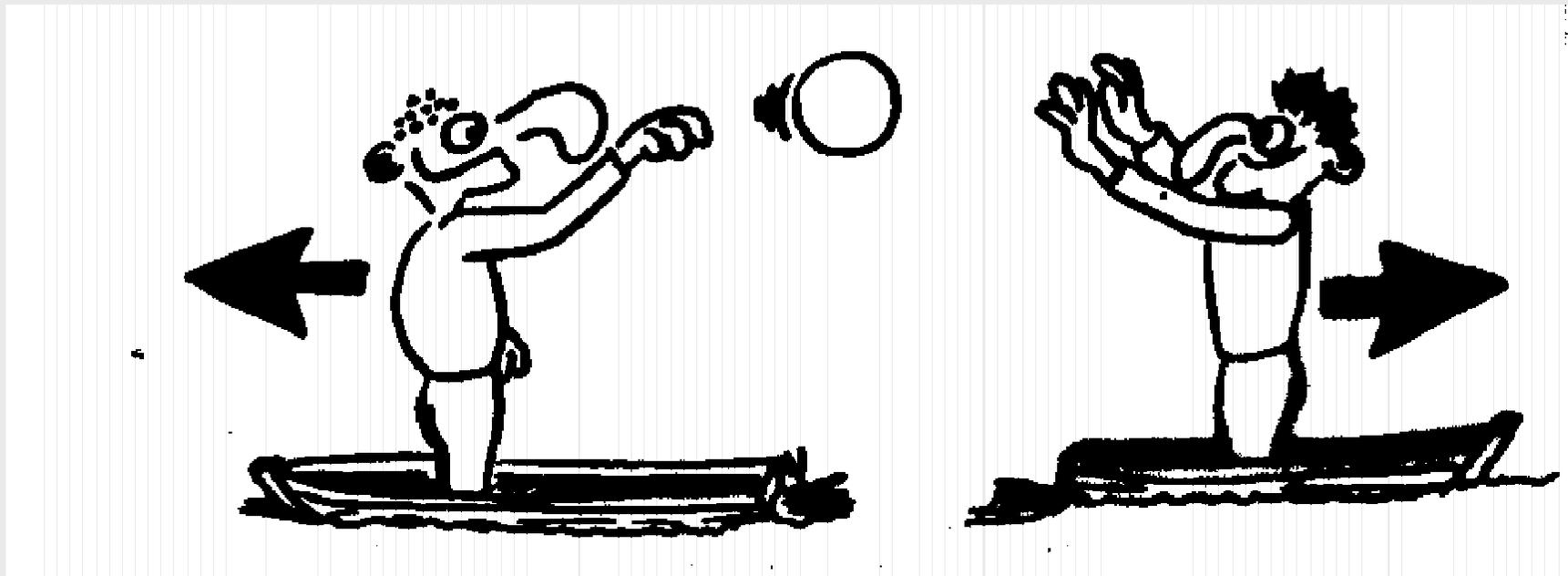
Nukleon (Proton/Neutron):

$$\text{Masse} = 3 m_q - E_{\text{bind.}} = ?$$

so einfach ist es diesmal nicht!

$$M_q = 5 \text{ bis } 10 \text{ MeV}$$

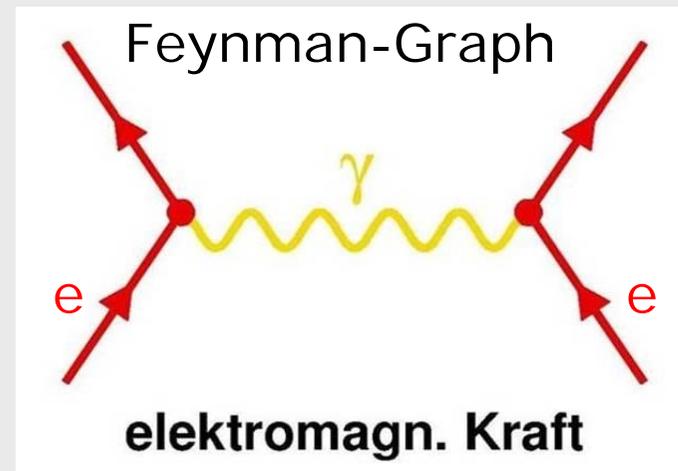
Prinzip von Kraftwirkungen



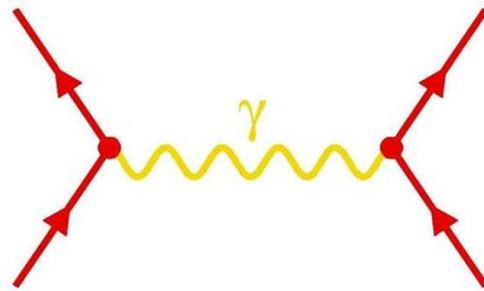
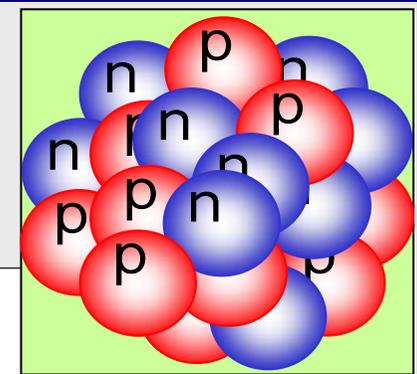
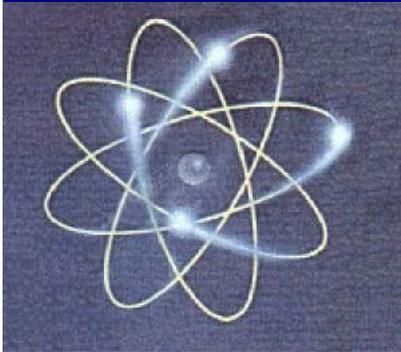
Kräfte = Austausch von Botenteilchen

z.B. Elektromagnetismus:
zwei Elektronen tauschen
ständig Photonen aus.
Stärke hängt von Ladung der
Materieteilchen (hier e)
u. Masse des Boten (hier 0) ab

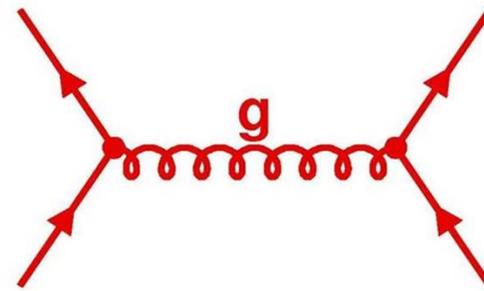
Zeit



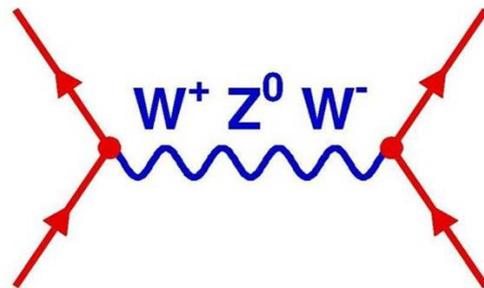
Die 4 Kräfte und ihre Botenteilchen



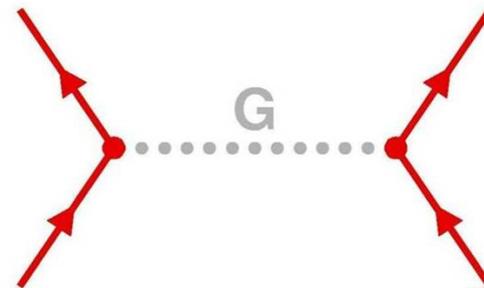
elektromagn. Kraft



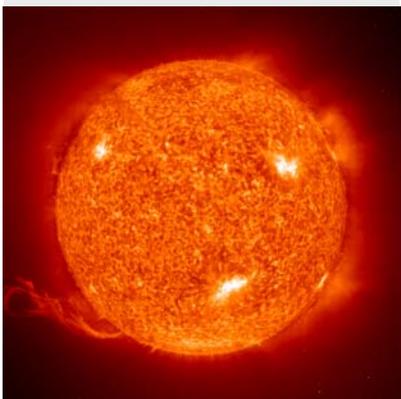
starke Kraft



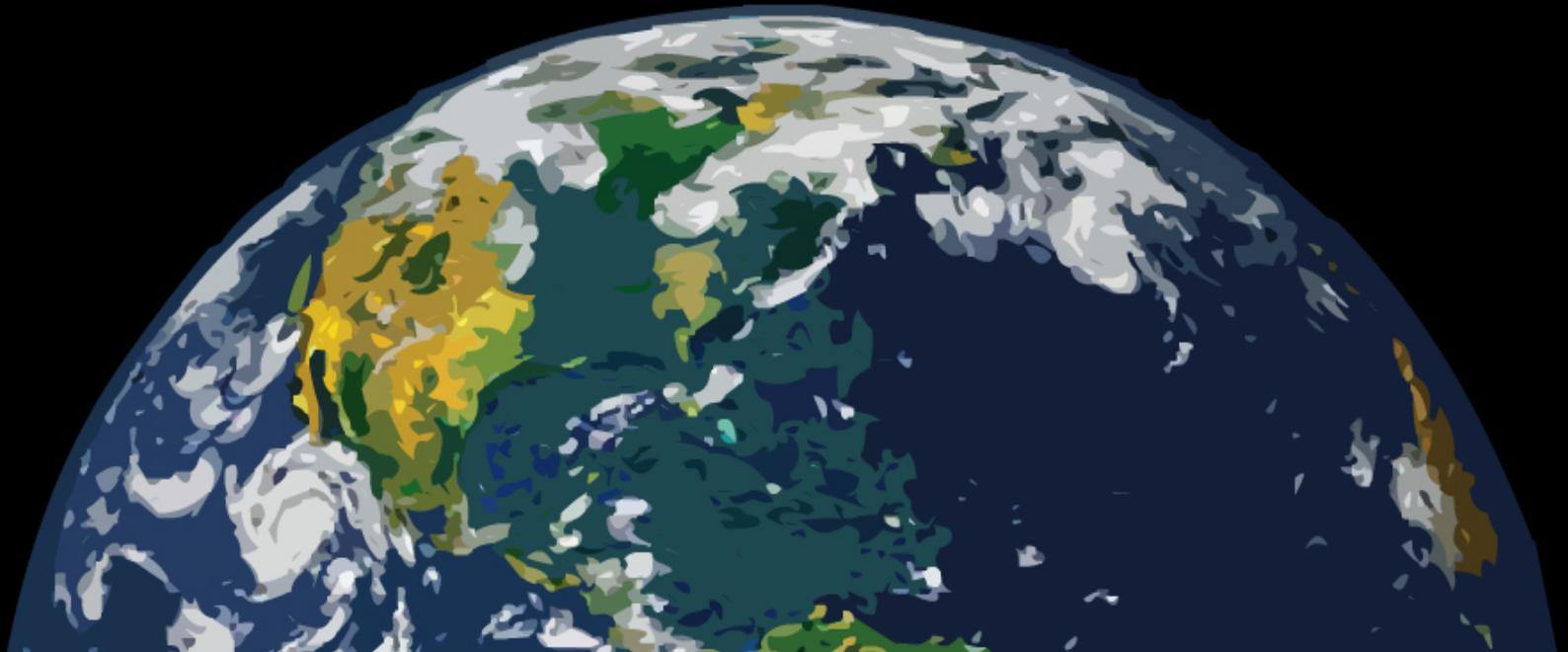
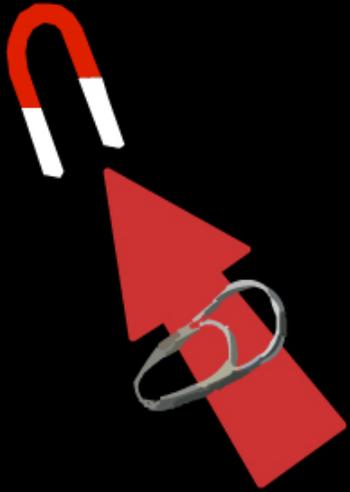
schwache Kraft



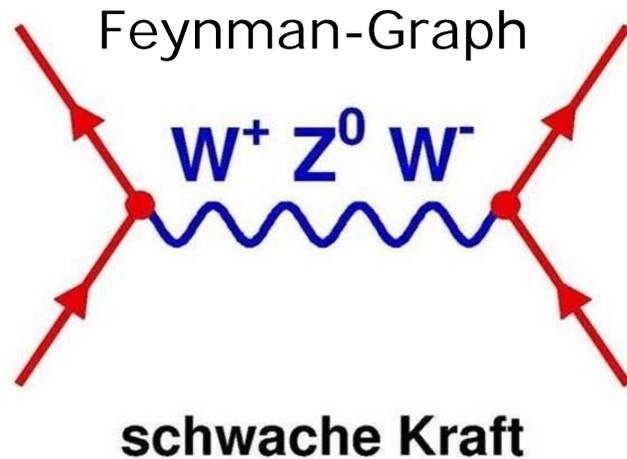
Gravitation



Elektromagnetismus gewinnt gegen Schwerkraft um das
100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000fache



Die schwache Kraft



Austausch von W und Z Teilchen.

schwache Ladung etwas grösser als el.-mag.

aber Masse von W, Z etwa $85 \times M_{\text{Proton}}$

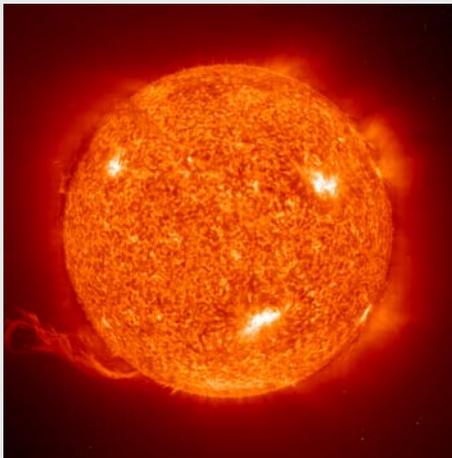
→ endliche Reichweite ca 0.0025 fm

→ Stärke $1/10000$ x elektromagnetische Kraft

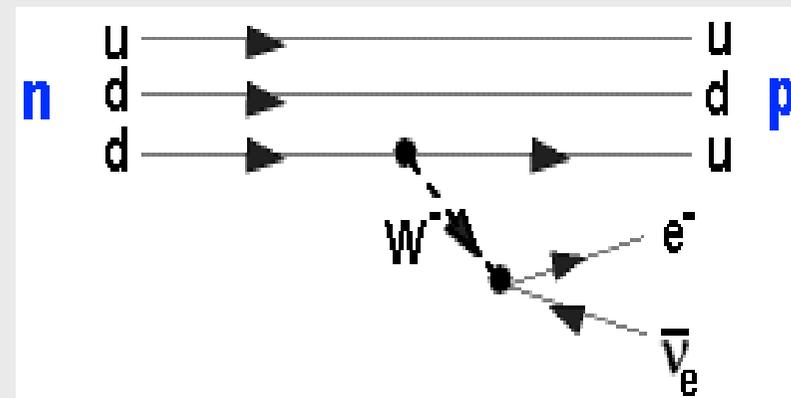
-> Makroskopisch nicht beobachtbar, außer

Brennen der Sonne

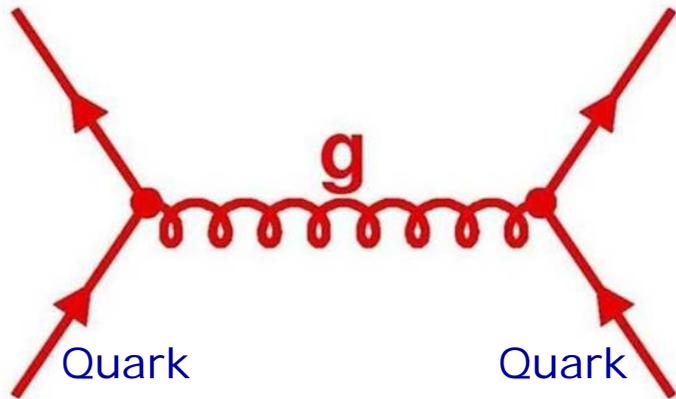
$p+p \rightarrow D+e+\nu$



Radioaktive Umwandlung
(„Zerfall“) des Neutron



Die starke Kraft: „Quantenchromodynamik“



starke Kraft

Botenteilchen = 8 Gluonen (glue = Leim)

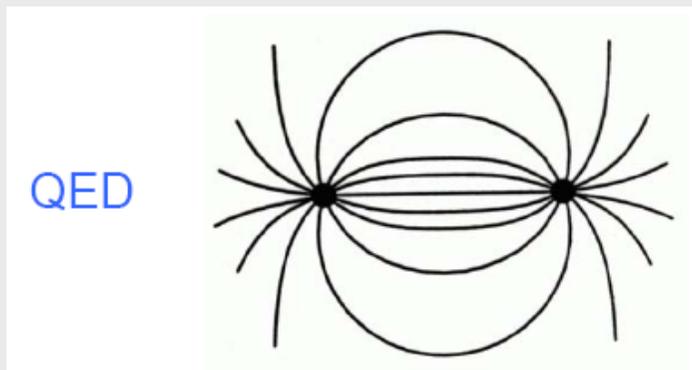


3 Ladungen: **rot**, **grün**, **blau**

Quarks sind eingesperrt, es gibt nur farbneutrale Objekte

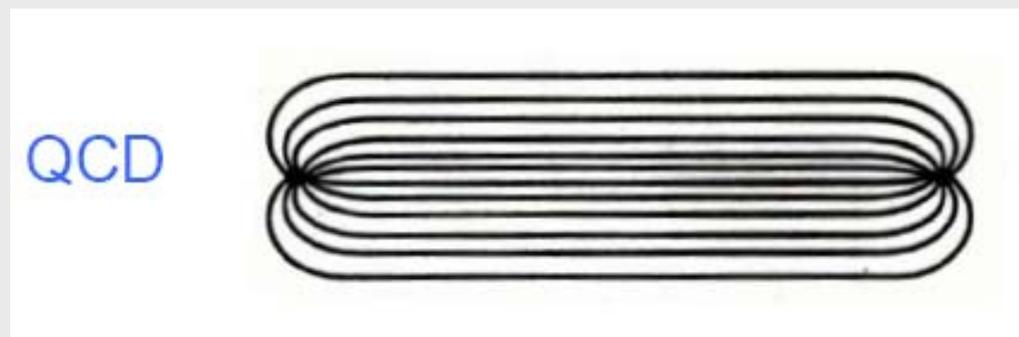
Feldlinienverlauf

Elektromagnetismus



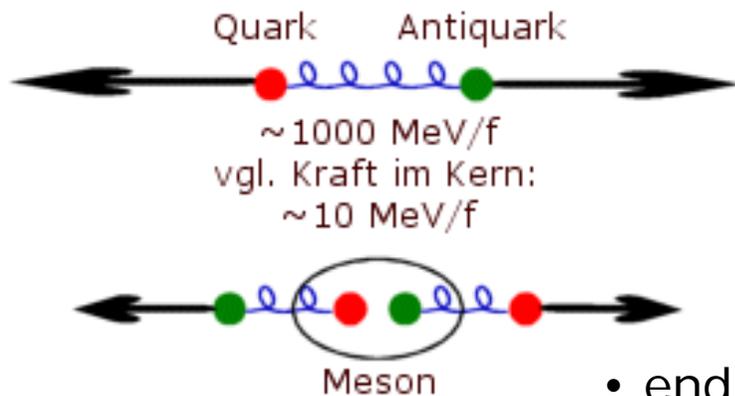
Photon trägt keine Ladung

Starke Kraft



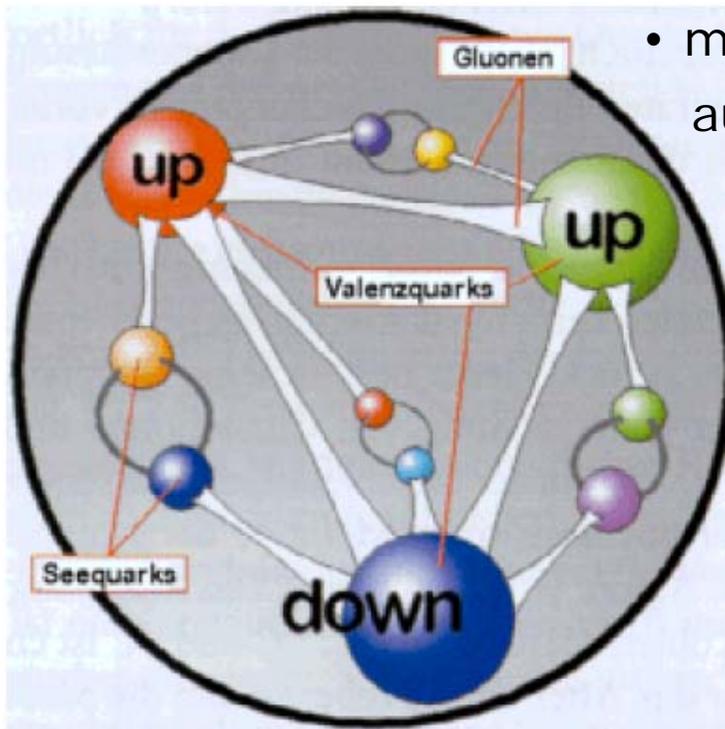
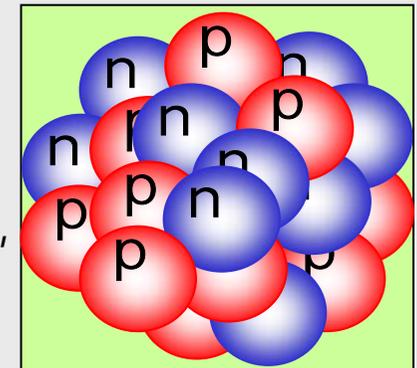
Gluonen sind farbgeladen

Die Masse des Protons aus der starken Kraft



viel Energie im Feldschlauch gespeichert
wenn man versucht 2 Quarks zu trennen
entsteht lieber ein $q\bar{q}$ -Paar

- endliche Reichweite ca 1 fm
- hält p, n u. Atomkern zusammen
- makroskopisch nicht beobachtbar, außer im radioaktiven α -Zerfall



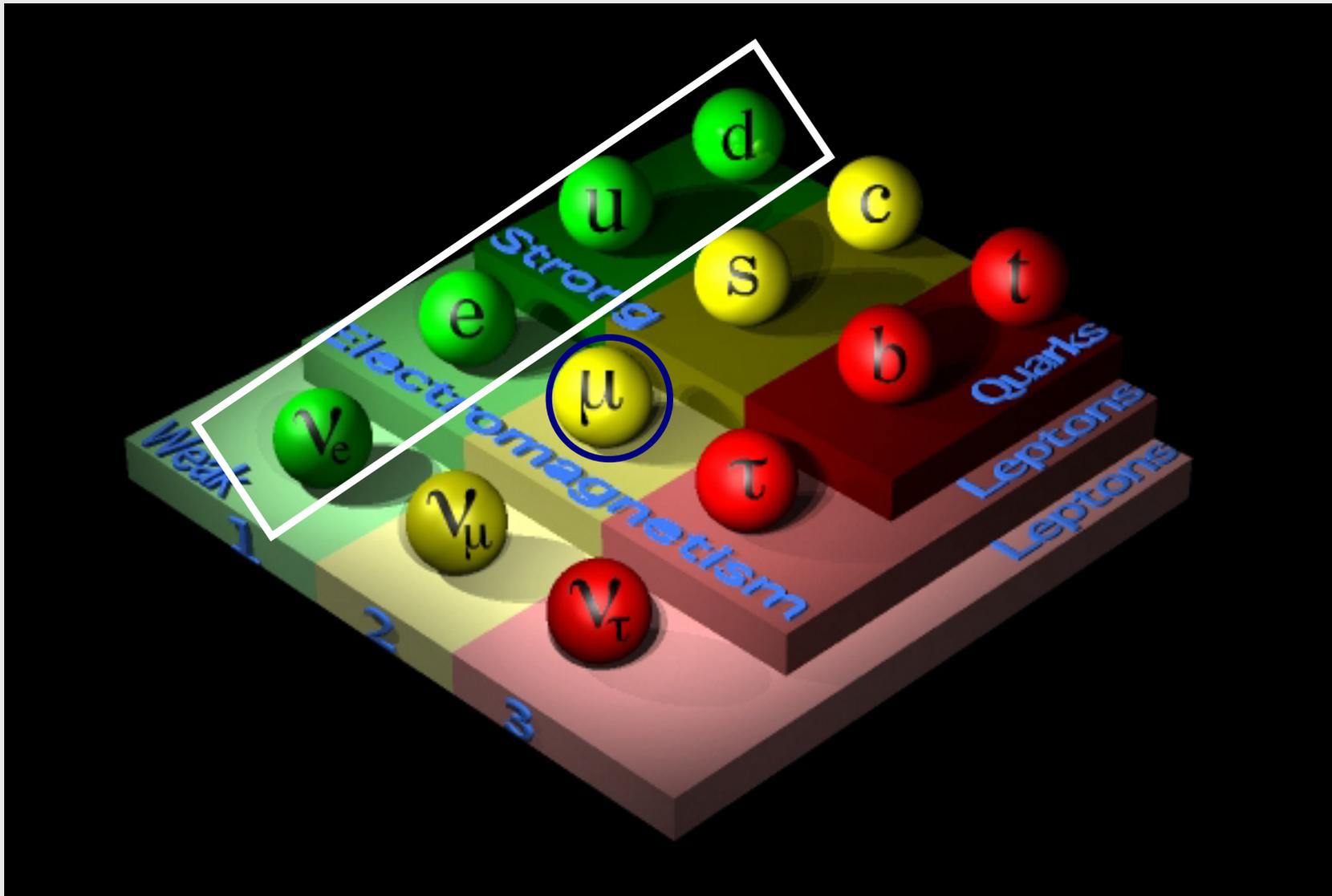
Masse des Protons: $M = E/c^2$

Energie der Bindung

(Gluonen und aller Quarks)

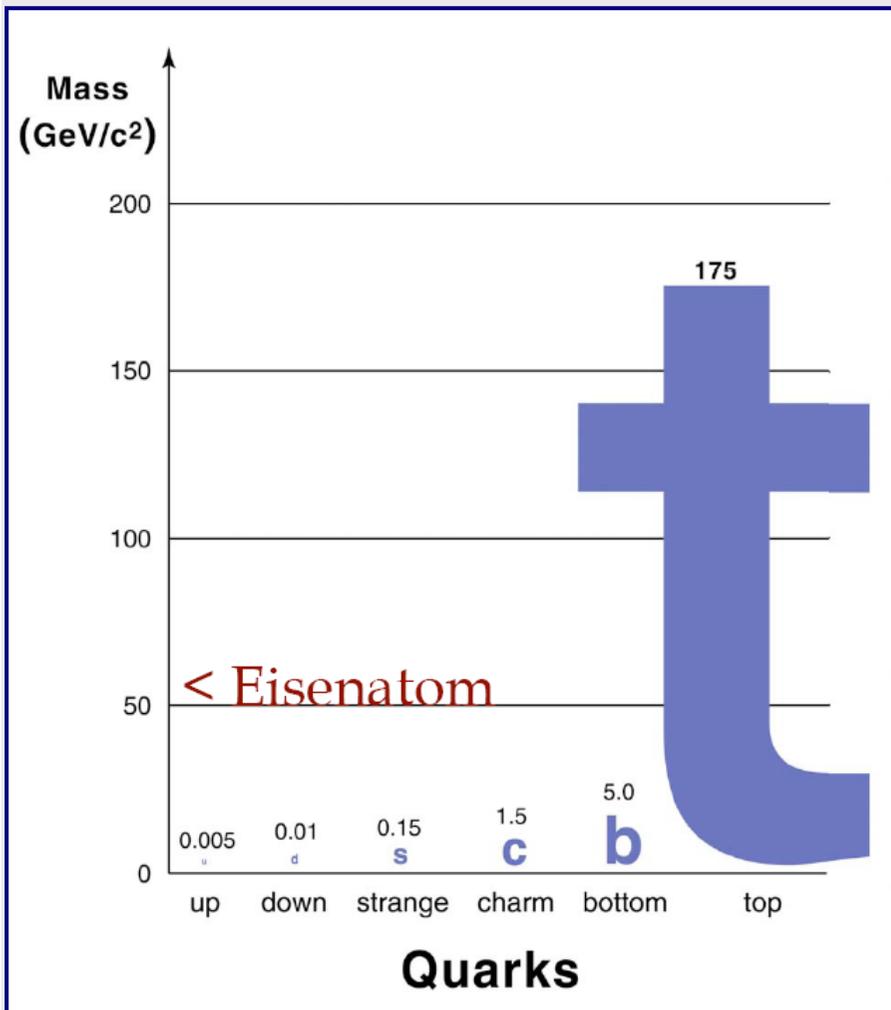
auch wenn Quarks masselos wären

Das vollständige Set der Bausteinteilchen



Das 4er Set der „1.Baustein-Generation“ wiederholt sich genau 2 Mal

Elementare Teilchen haben unterschiedliche Massen? Warum?



Experiment:

alle Teilchen bis auf Gluonen und Photonen besitzen eine Masse

Theorie bis 1964:

alle Teilchen müssen masselos sein, sonst bricht das Modell zusammen und keine Vorhersagen sind möglich

Die Massen der elementaren Teilchen sind sehr unterschiedlich!

z.B. u-Quark 0.005 GeV

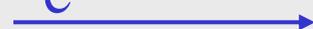
t-Quark 175 GeV

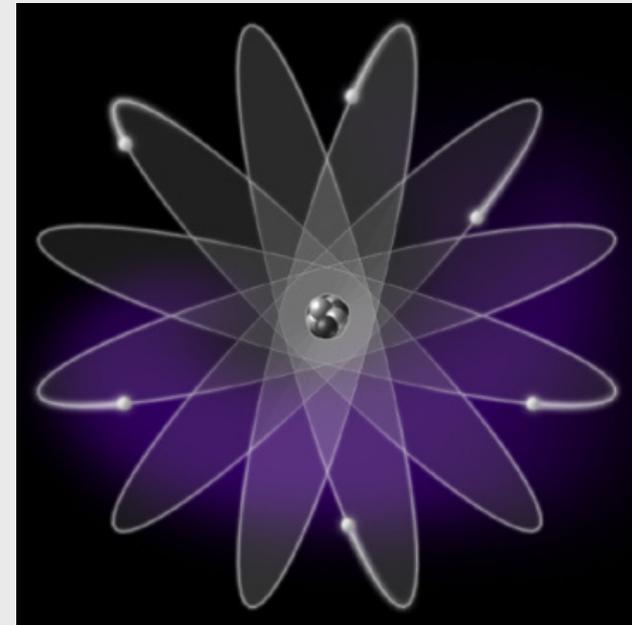
Was erzeugt diese Massen?

Teilchenmassen und ihre Bedeutung

- ❖ Elektronmasse: definiert Längenskala unserer Welt
Bohrradius $a = 1/\alpha_{em} m_e$ ($m_e = 0.5 \text{ MeV}$)

$m_e = 0$	keine Atombindung
$m_e = 0.02 \text{ MeV}$	menschliche Riesen 45 m sichtbares Licht im Infrarot
$m_e = 105 \text{ MeV}$	Kern-Einfang $pe \rightarrow nn$ energetisch möglich \rightarrow nur Helium, $n + \nu$ \rightarrow anderes Universum

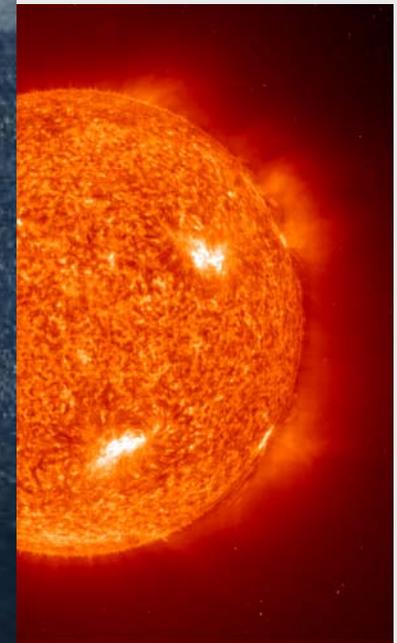
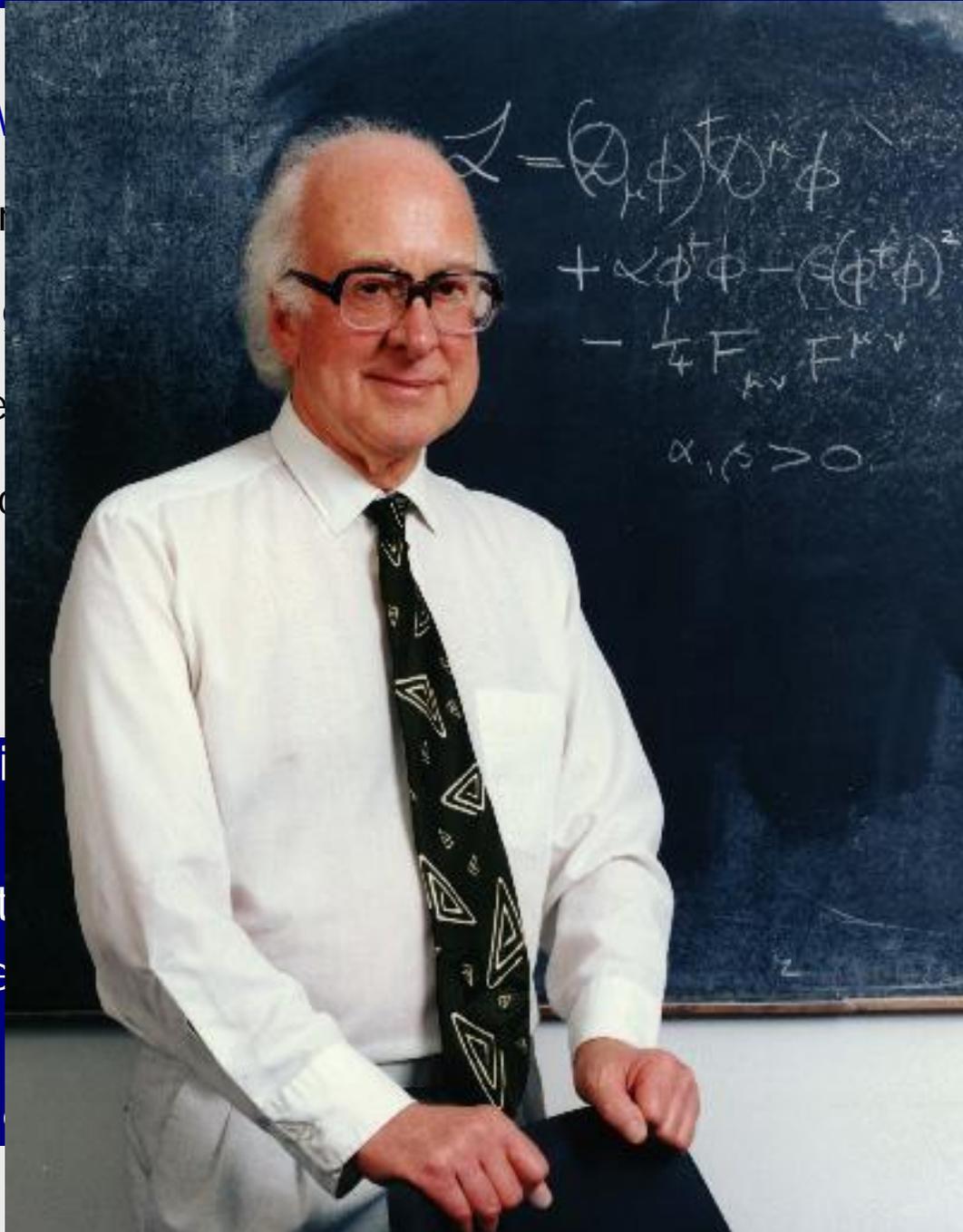
$$R \sim 1/m_e$$




- ❖ Ähnliche Argumente für Massen der Quarks: $m_u < m_d$

Teilchenmassen und ihre Bedeutung

keine/kleine W
Fusion in Stern
Stärke / Häufi
kurze Brennze
→ keine Mensc



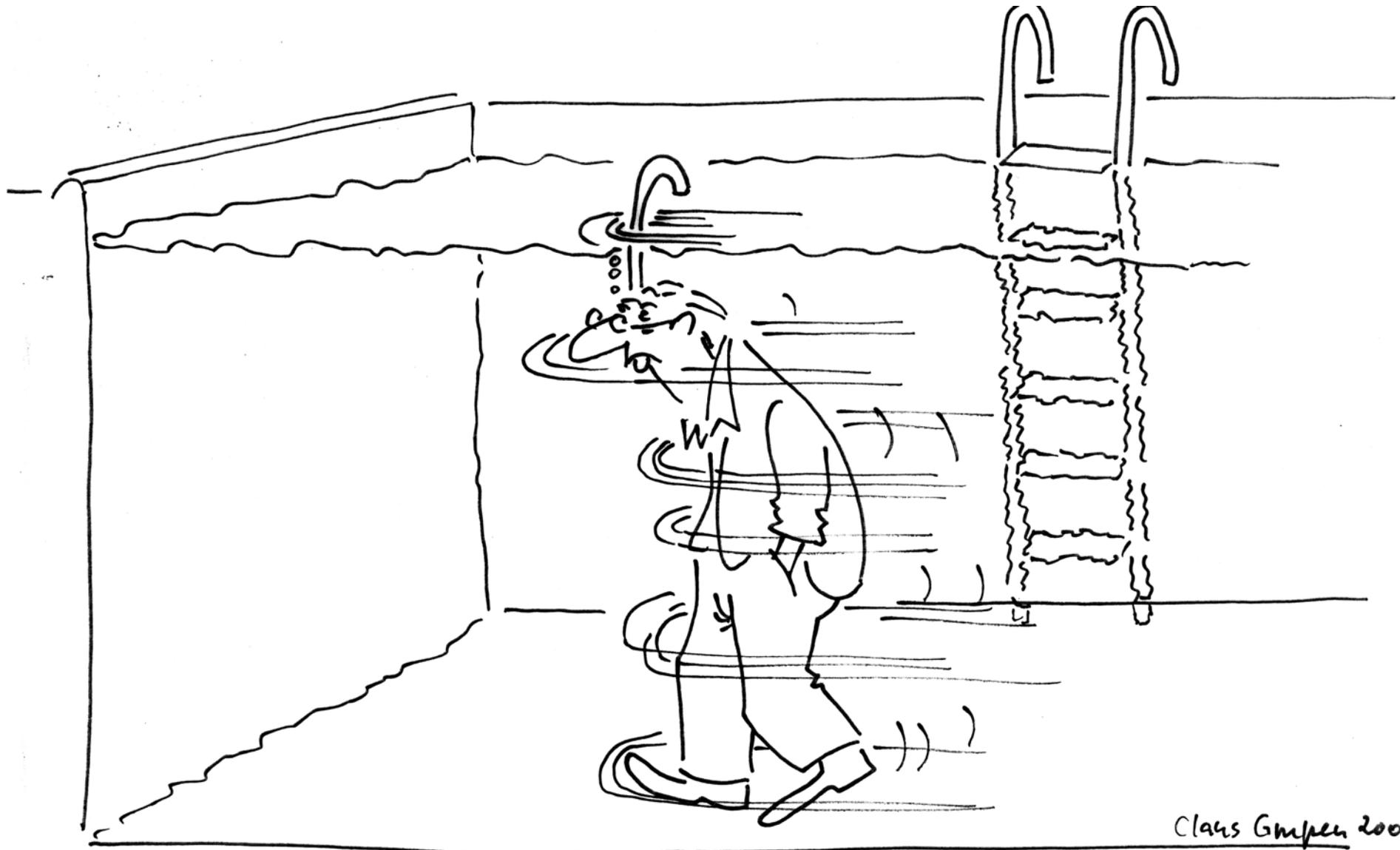
Elementare Teilchen

Deren Feinabstimmung
Entwicklung der

Theorie vor 19

ung und

ilemma!

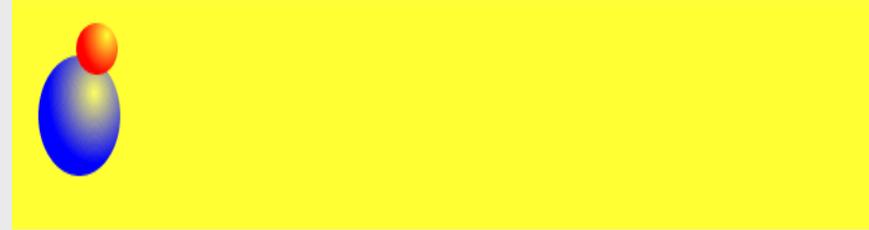


Clas Gmpen 2007

Der Higgs-Mechanismus

Leeres Vakuum

Alle Teilchen sind masselos und bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit.



Higgshintergrundfeld

Teilchen wechselwirken mit dem Higgs-Hintergrundfeld und werden dadurch verlangsamt. Sie erhalten effektiv eine Masse. Die Masse hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Hintergrundfeld ab.



Higgs-Teilchen

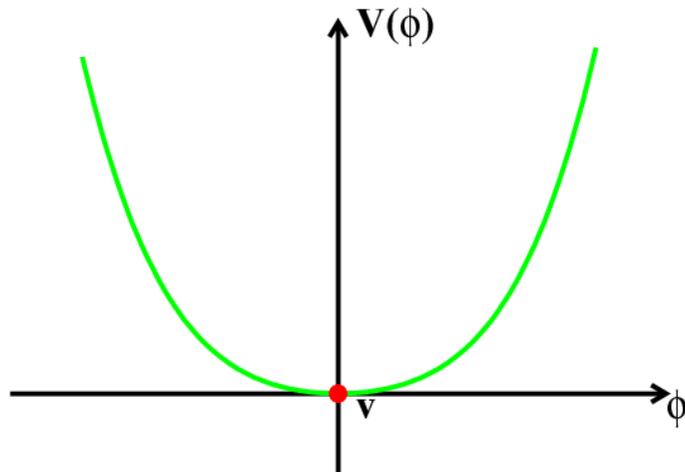
Eine quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes

Eine notwendige Konsequenz dieses Konzepts !



Potenzielle Energie V und Spontane Symmetriebrechung

Frühes Universum

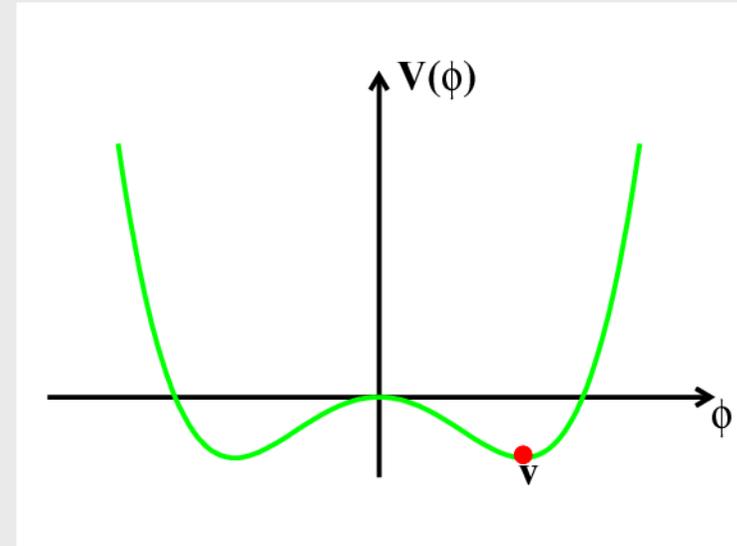


10^{-12} s nach dem Urknall



Elektroschwacher Phasenübergang

Heute



Higgsfeld besitzt zwei „Komponenten“

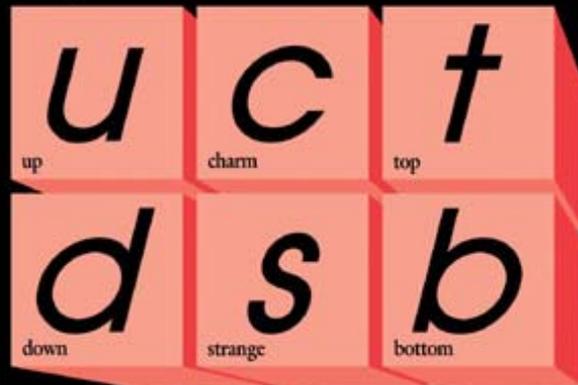
1) omnipresentes, konstantes **Hintergrundfeld** $v = 247 \text{ GeV}$ (Äther)

→ nicht direkt nachweisbar

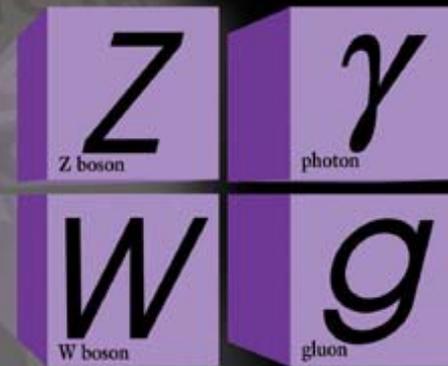
2) **Higgs-Boson** H mit unbekannter Masse M_H

→ entdeckbar am Large Hadron Collider

Quarks



Forces



Leptons

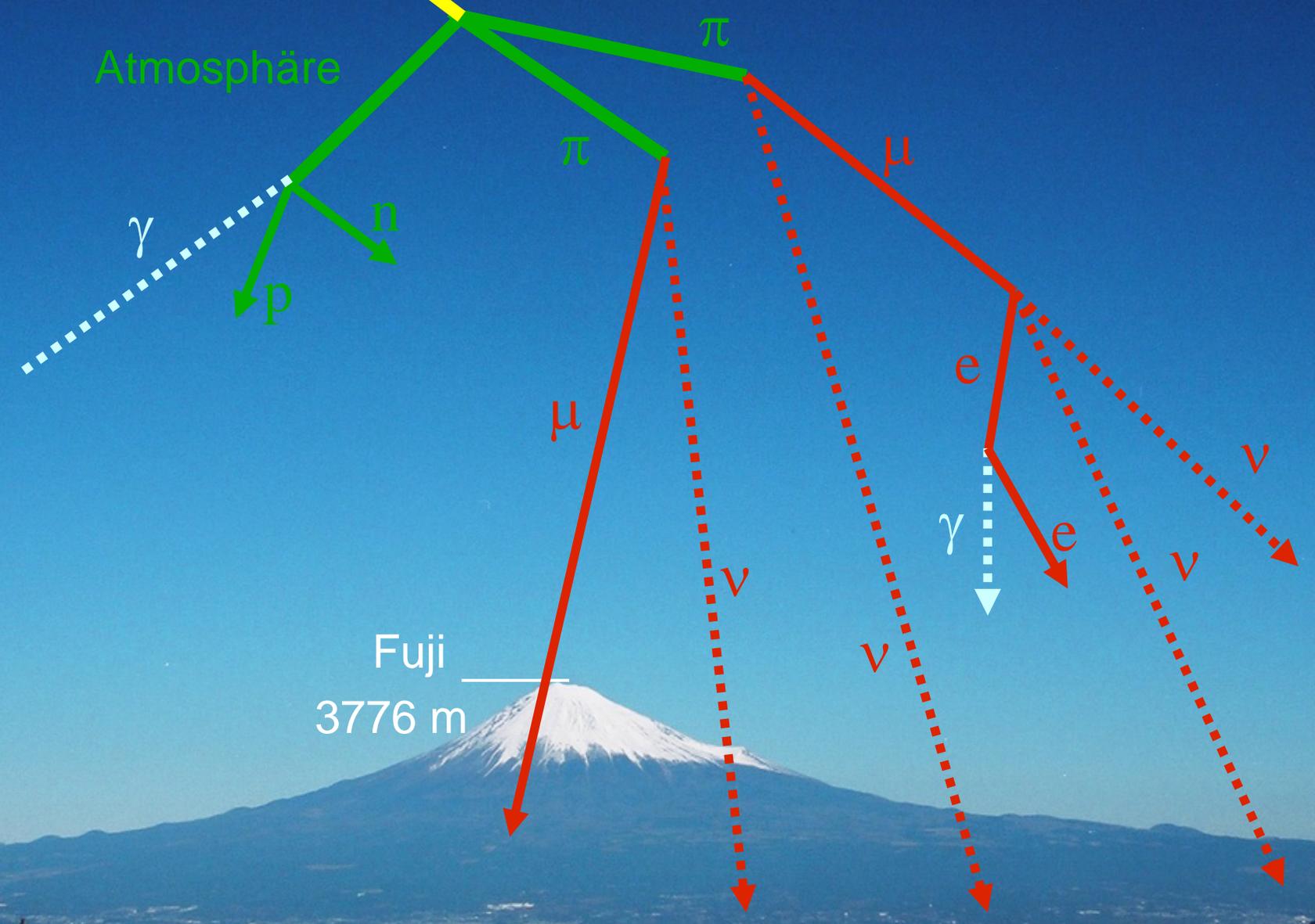


Quarks. Neutrinos. Mesons. All those damn particles you can't see. That's what drove me to drink. But now I can see them.

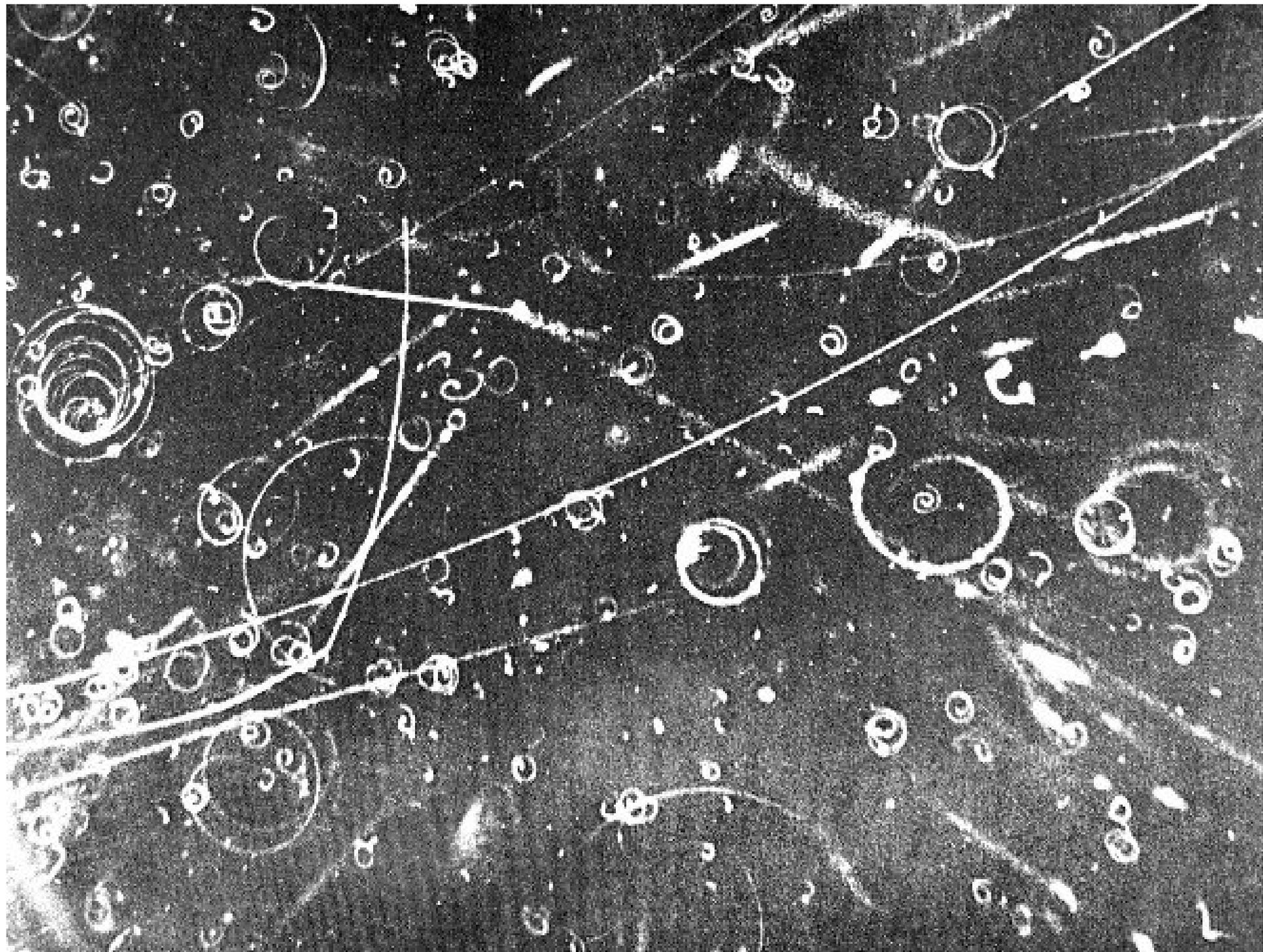
p, He, \dots

primäres Teilchen trifft auf
Atmosphäre: 15 – 30 km Höhe

Atmosphäre

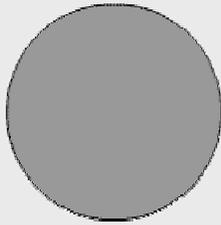


Fuji
3776 m



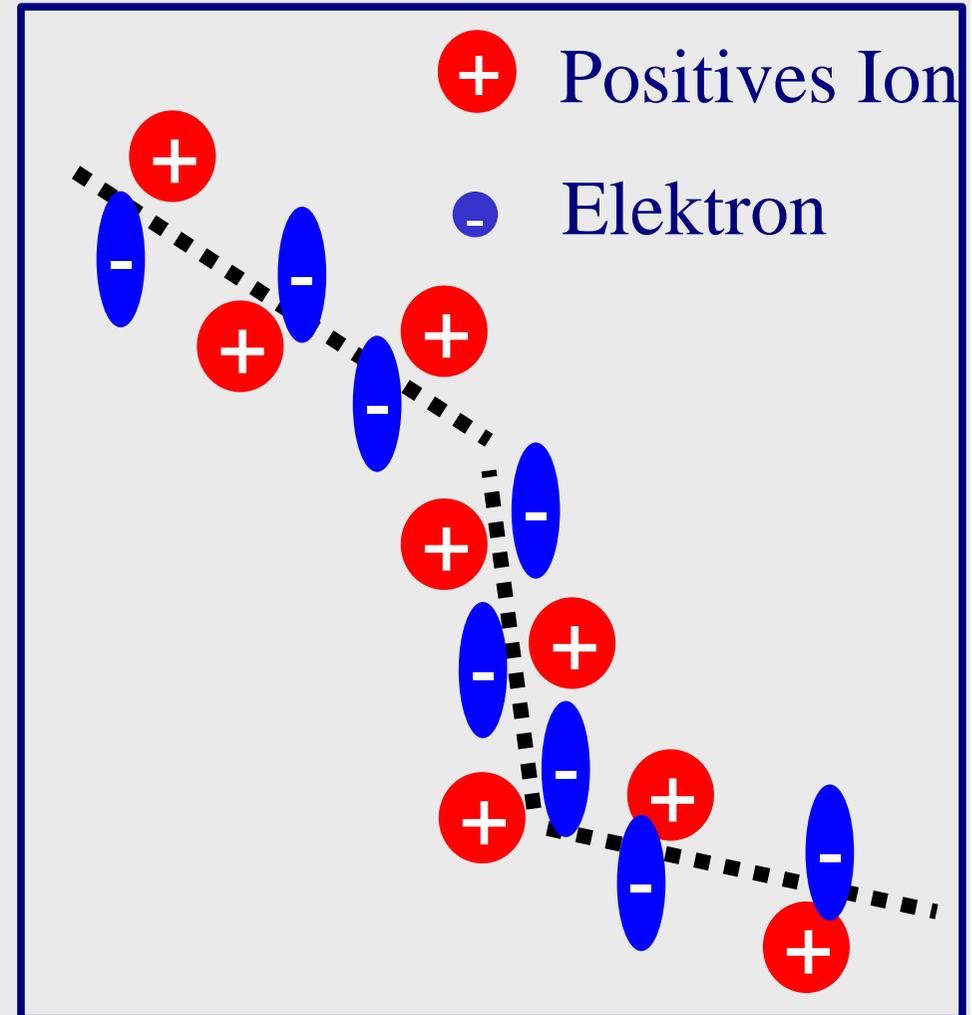
Nachweis von Teilchen

Stossionisation



Elektron + Atom \rightarrow Protonenstärke 2004

Elektron + Elektron + **positives Ion**



Nebelkammer

... erinnern an:

*Kondensstreifen beim
Flugzeug*

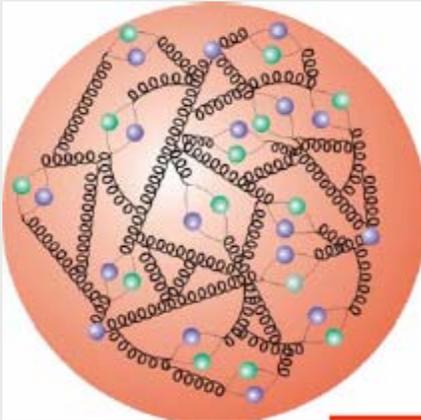


Rußpartikel aus
Triebwerken

Kondensierter
Wasserdampf

Higgs Produktion am Large Hadron Collider

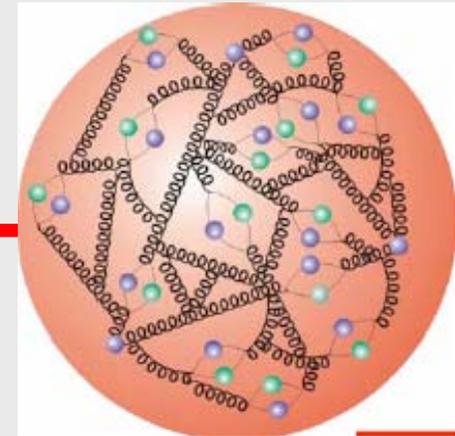
Proton



$$E = mc^2$$

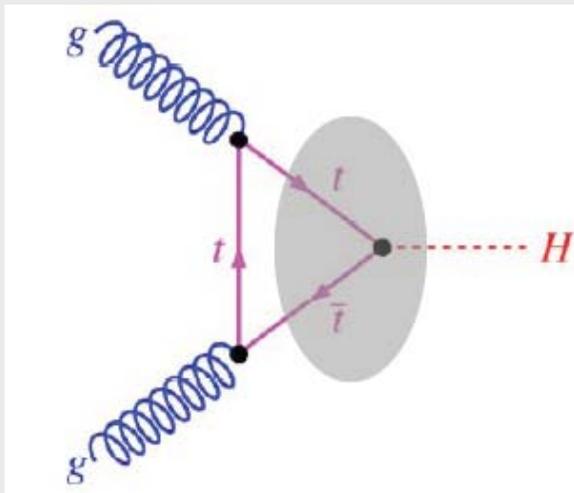


Proton



Welche Energie für die Protonstrahlen?

Higgs-Masse im Bereich 100 GeV (Exp.) bis 1000 GeV (Theorie)



Aber: Gluonen u. Quarks im Proton kollidieren.

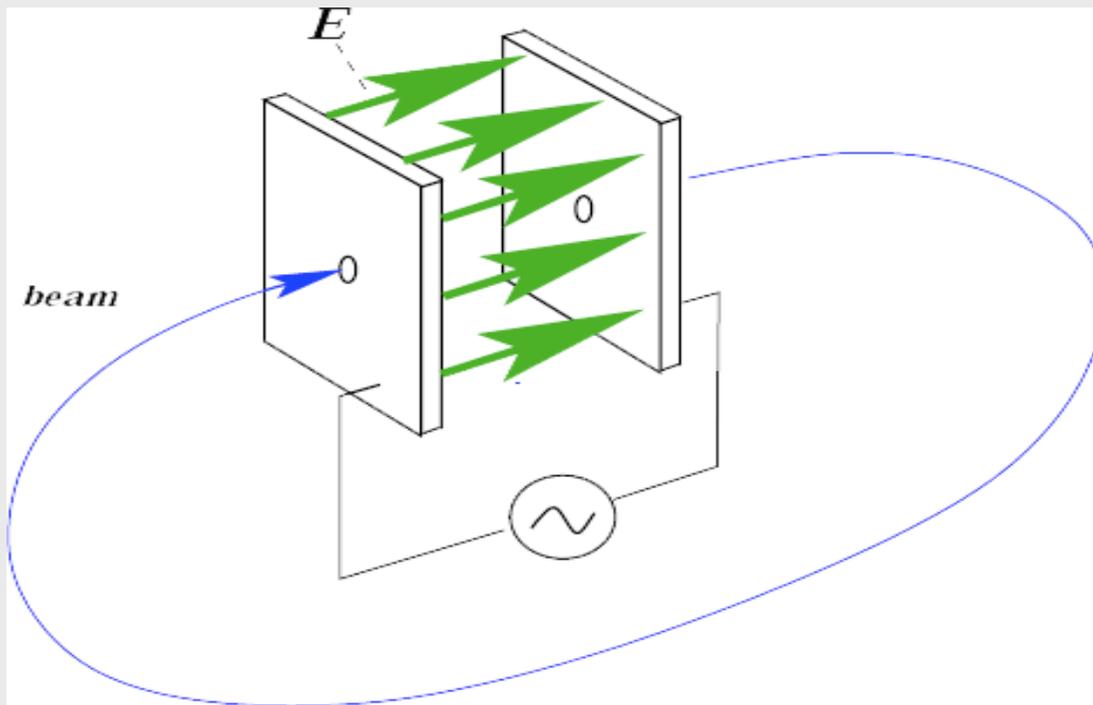
Diese tragen im Mittel $\sim 1/3$ der Energie

$$E_{\text{Strahl}} = 1000 \text{ GeV} * 10 / 2 \sim 5000 \text{ GeV}$$

Bei LHC werden Protonen mit 7TeV kollidieren!

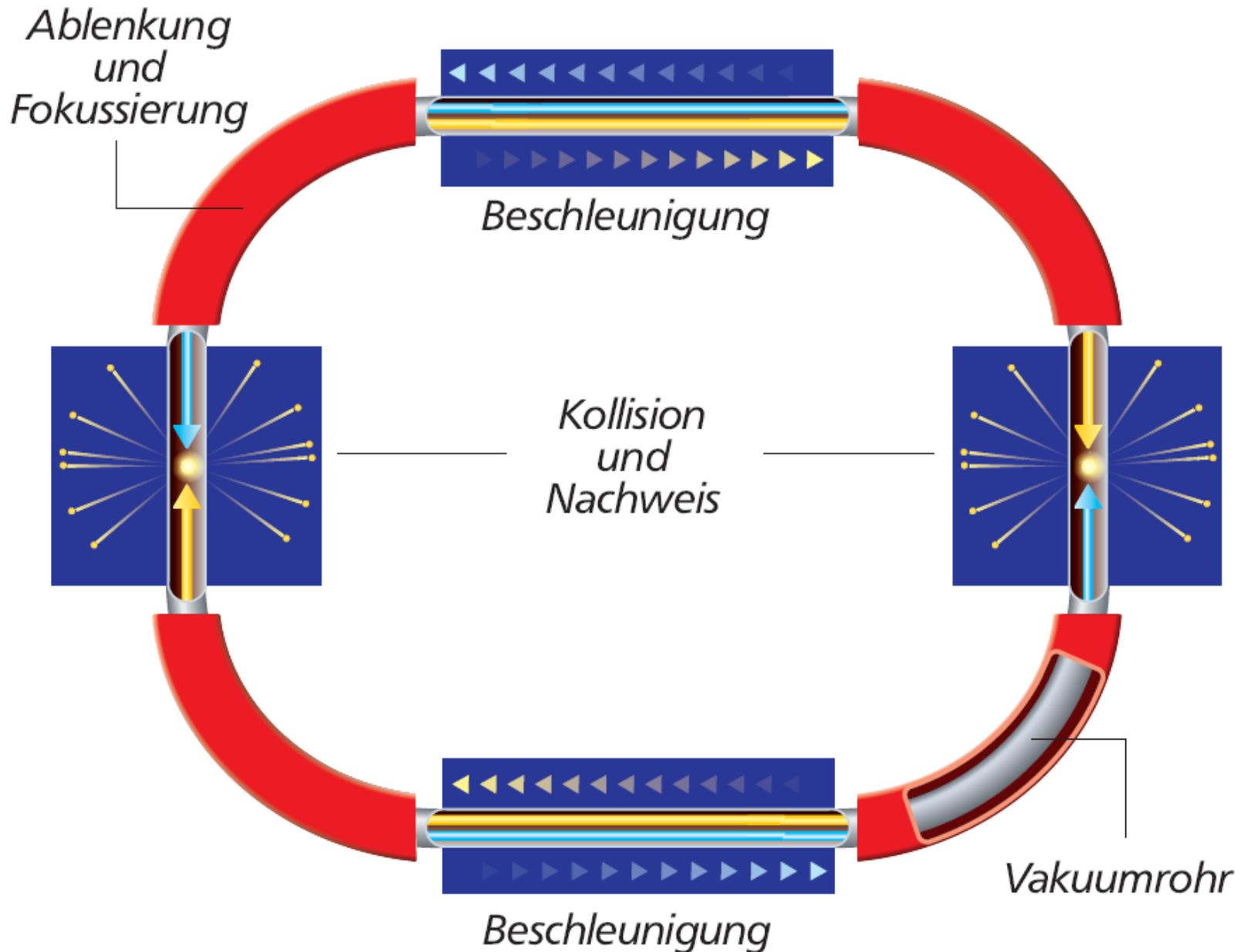
Wie beschleunigt man ein Teilchen?

mit einem elektrischen Feld! $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$



Heutige Beschleuniger:
Elektromagnetische
Wechselfelder
(10 Millionen V/m)

Prinzip eines Ringbeschleunigers



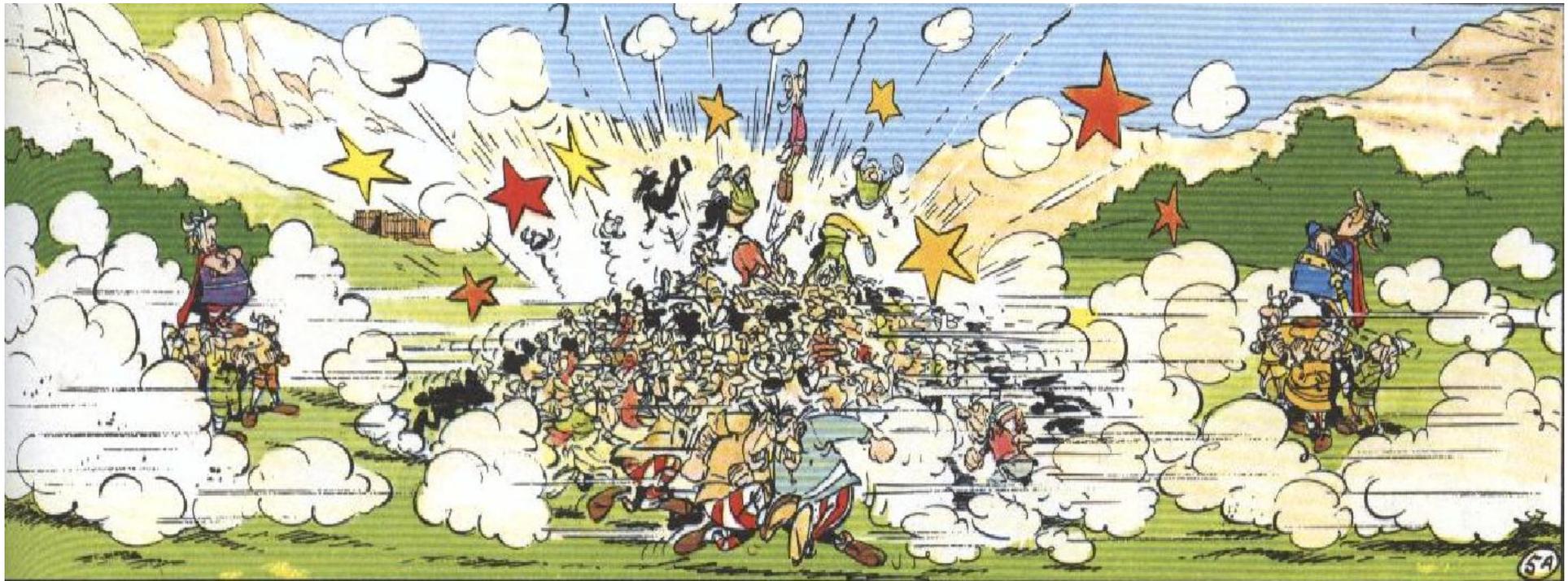
Wie lenkt man ein Teilchen ab?



1232 Supraleitende Magnete (15m, 35t) bei 1.9 Kelvin
7000l flüssiges Helium (grösste Kühlanlage der Welt)

Die zweite Kenngrösse: Luminosität L

Wahrscheinlichkeit für Higgs in einem Proton-Proton-Stoss sehr klein!



N: 100 000 000 000 Protonen pro Paket

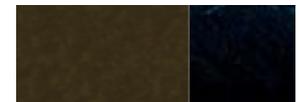
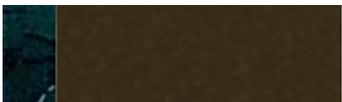
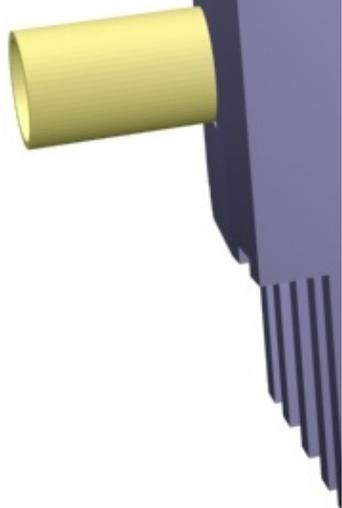
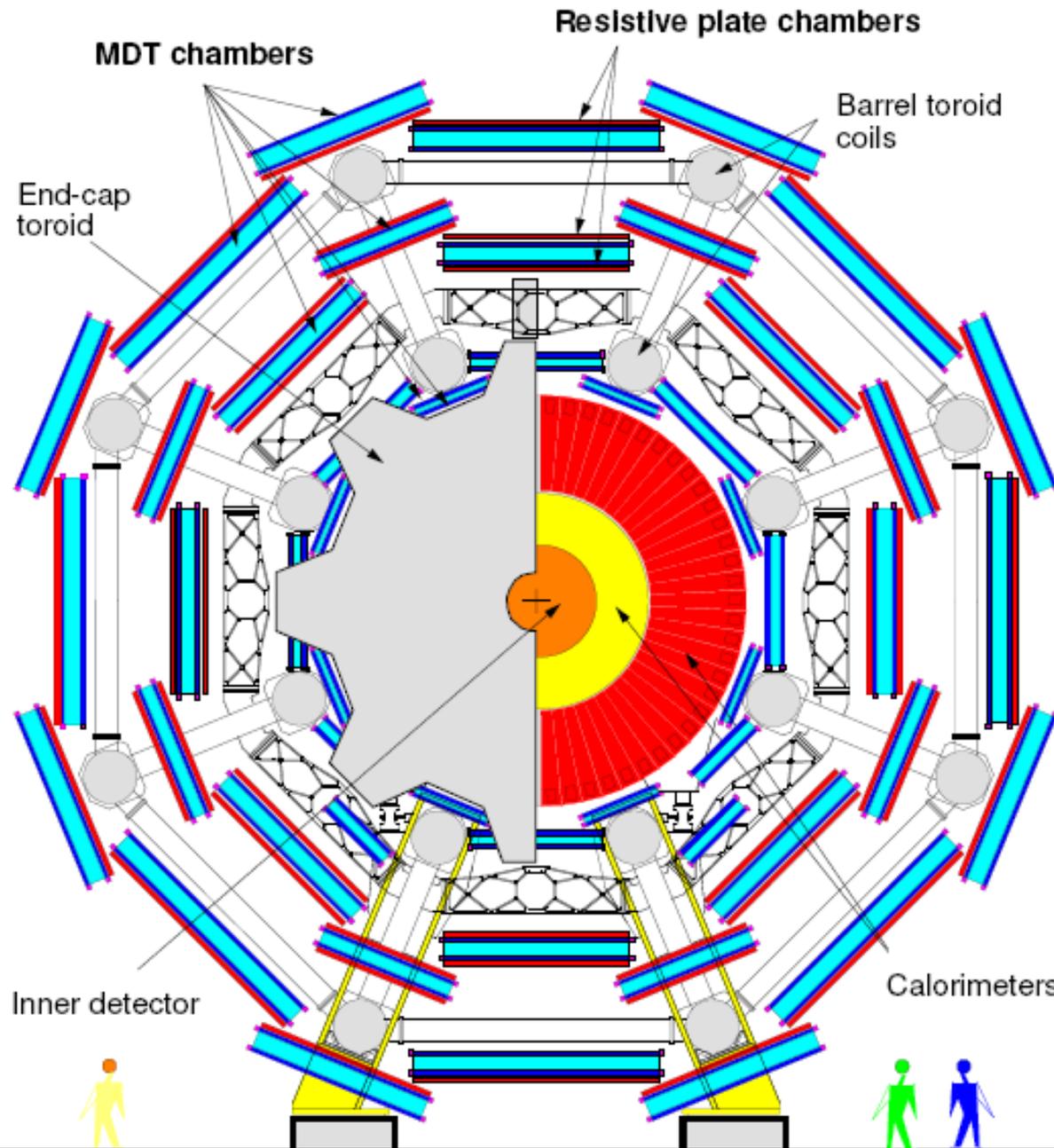
A: Strahlquerschnitt $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$

f: alle 25 Nanosekunden \rightarrow 40 000 000 mal pro Sekunde

\rightarrow das Ergebnis: ca. 1 Higgs-Teilchen pro Stunde

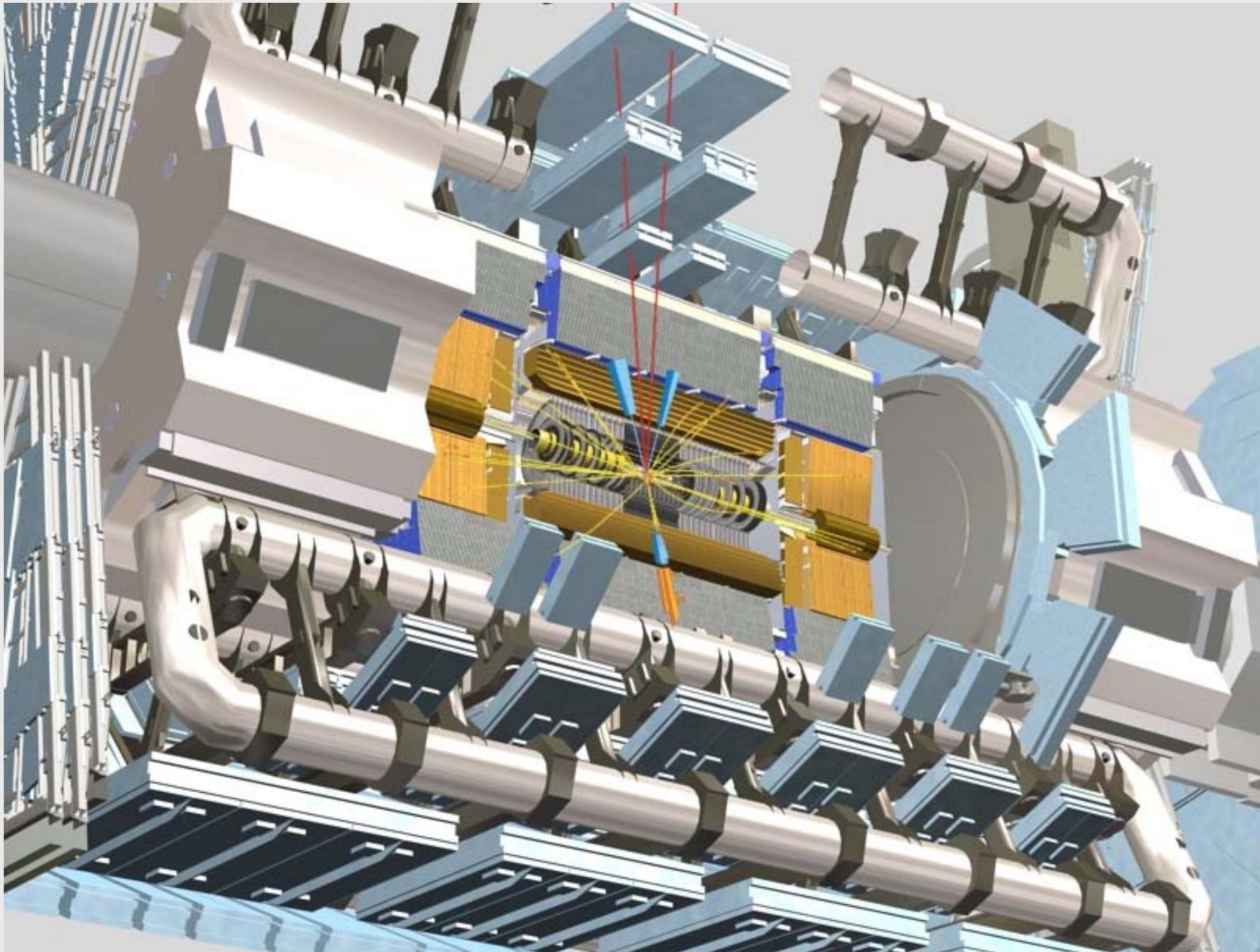


Das ATLAS Experiment





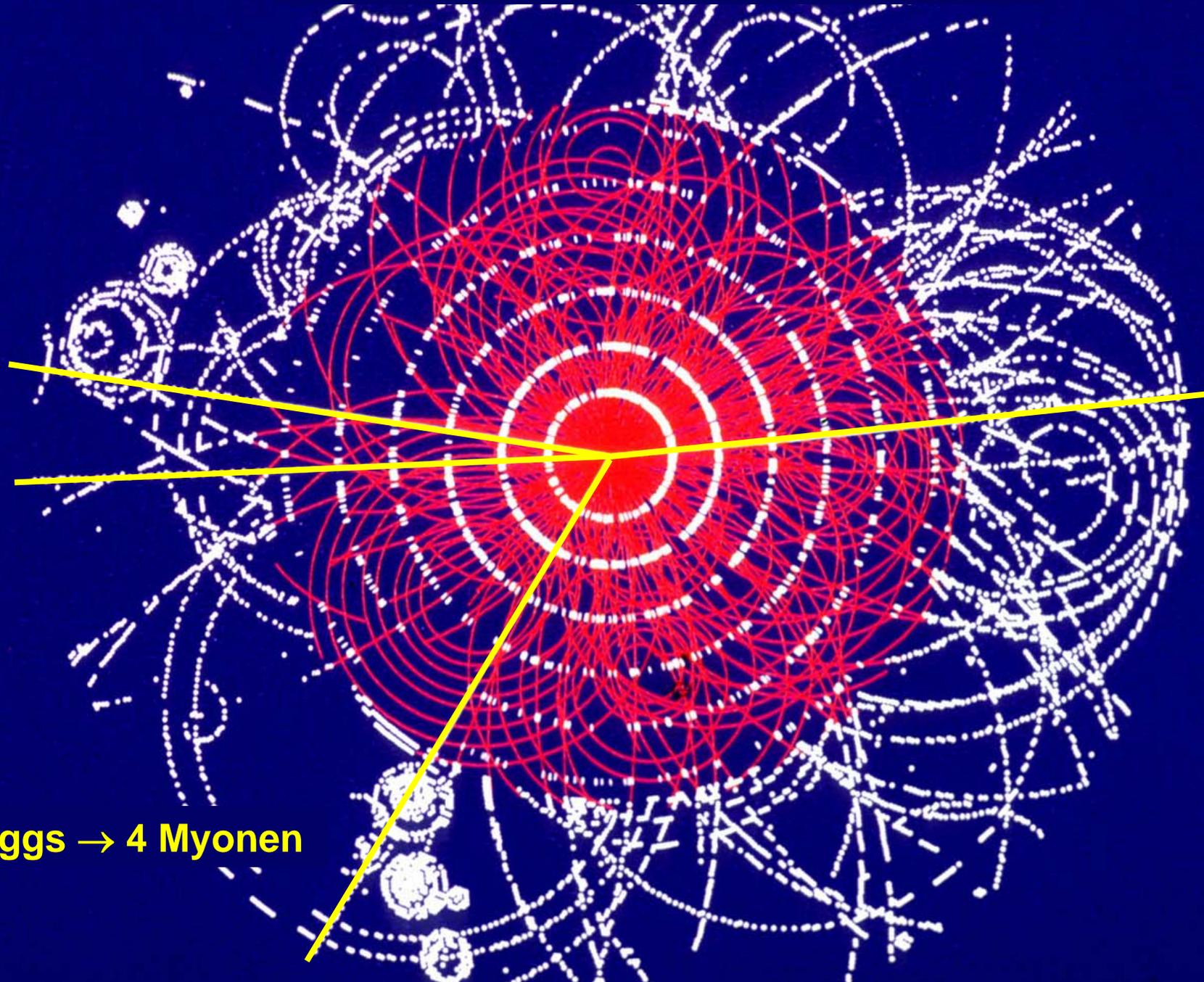
Ein Higgs-Ereignis im ATLAS-Detektor



Die Higgs-Nadel im Daten-Heuhaufen

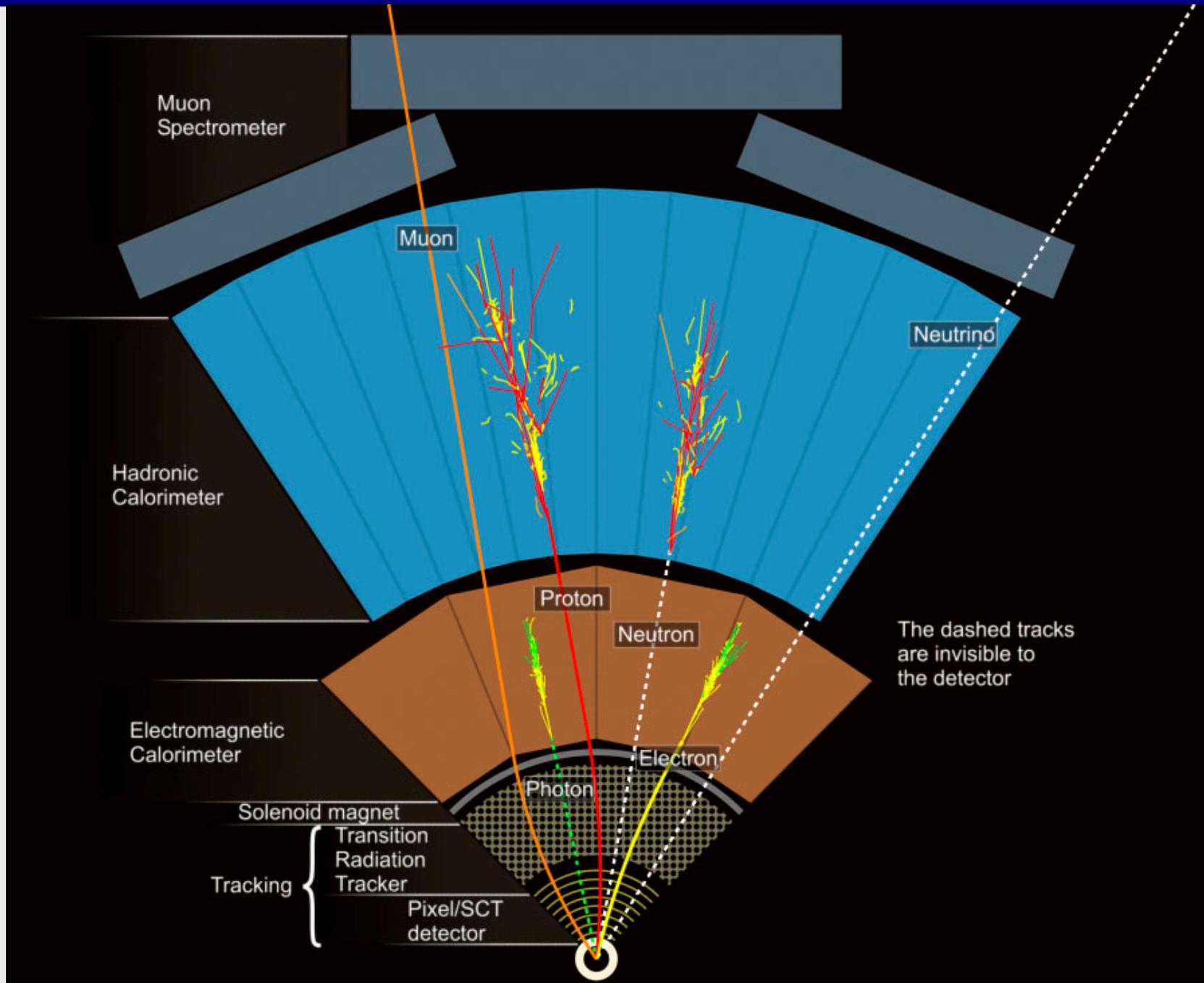


pp-Kollision am LHC (simuliert)

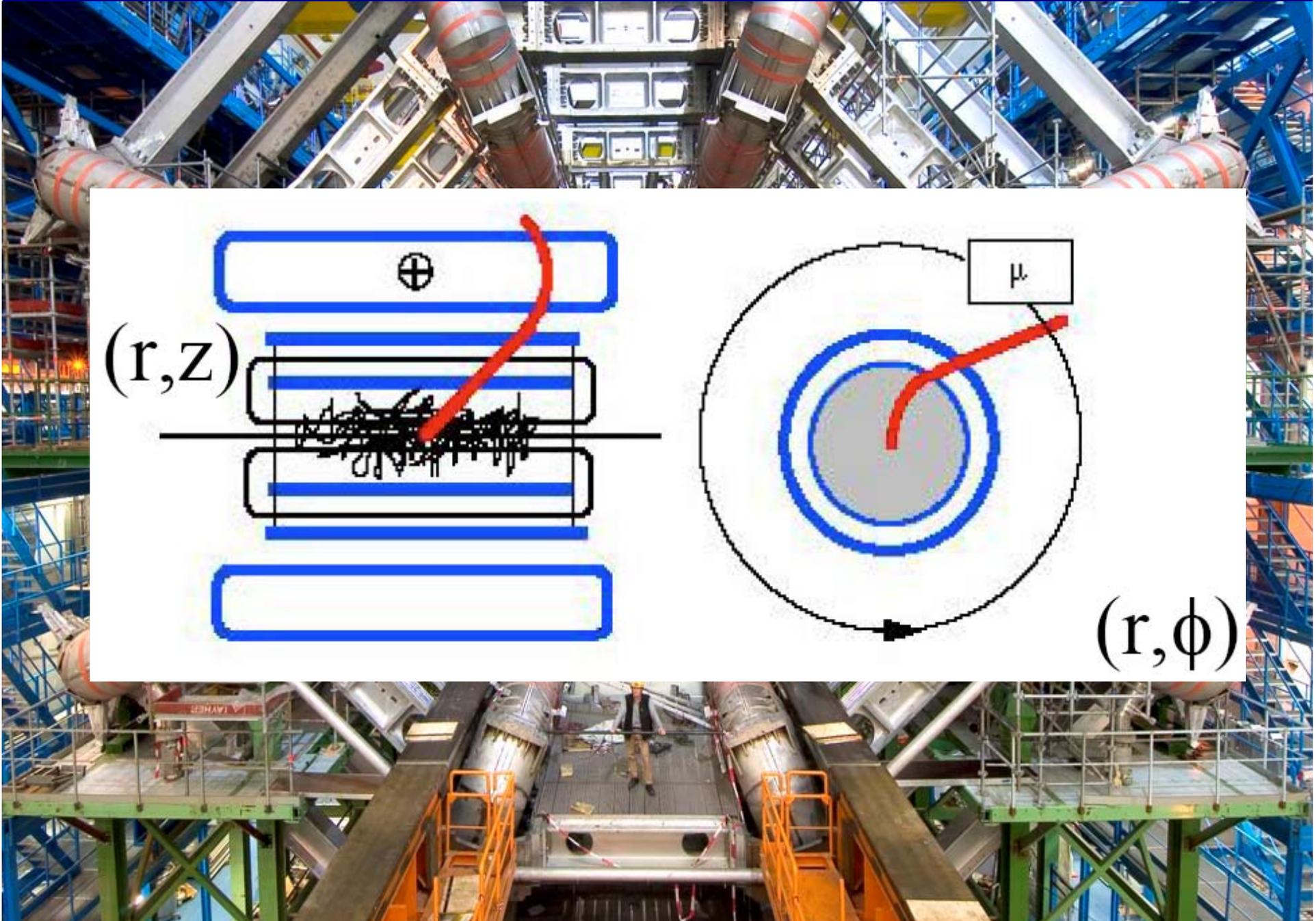
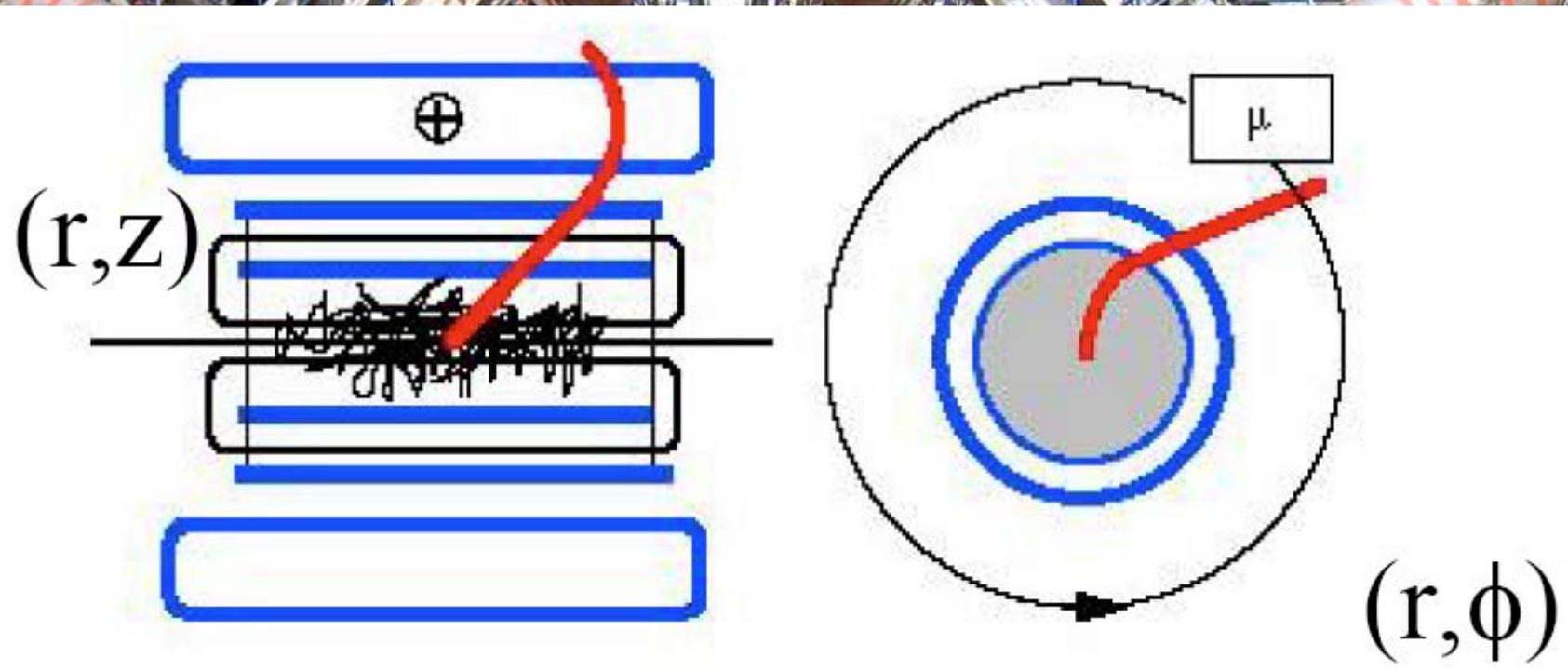


Higgs \rightarrow 4 Myonen

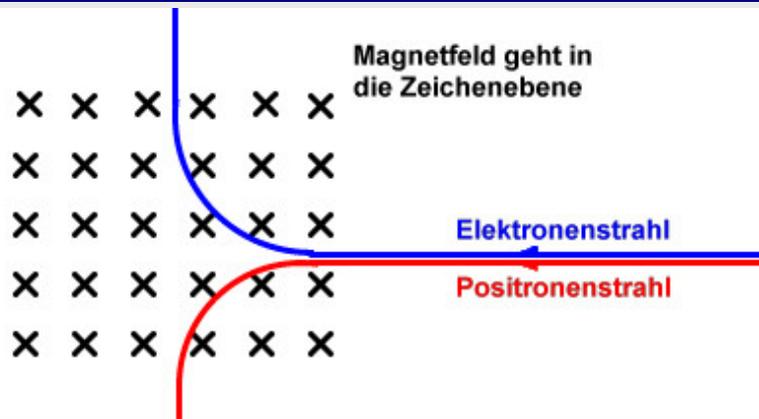
Teilchenidentifikation mit ATLAS



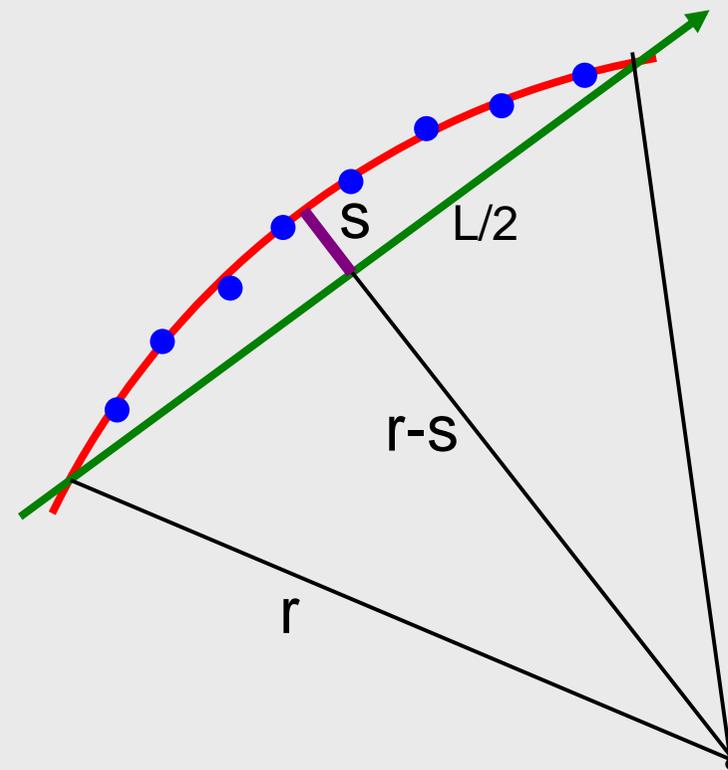
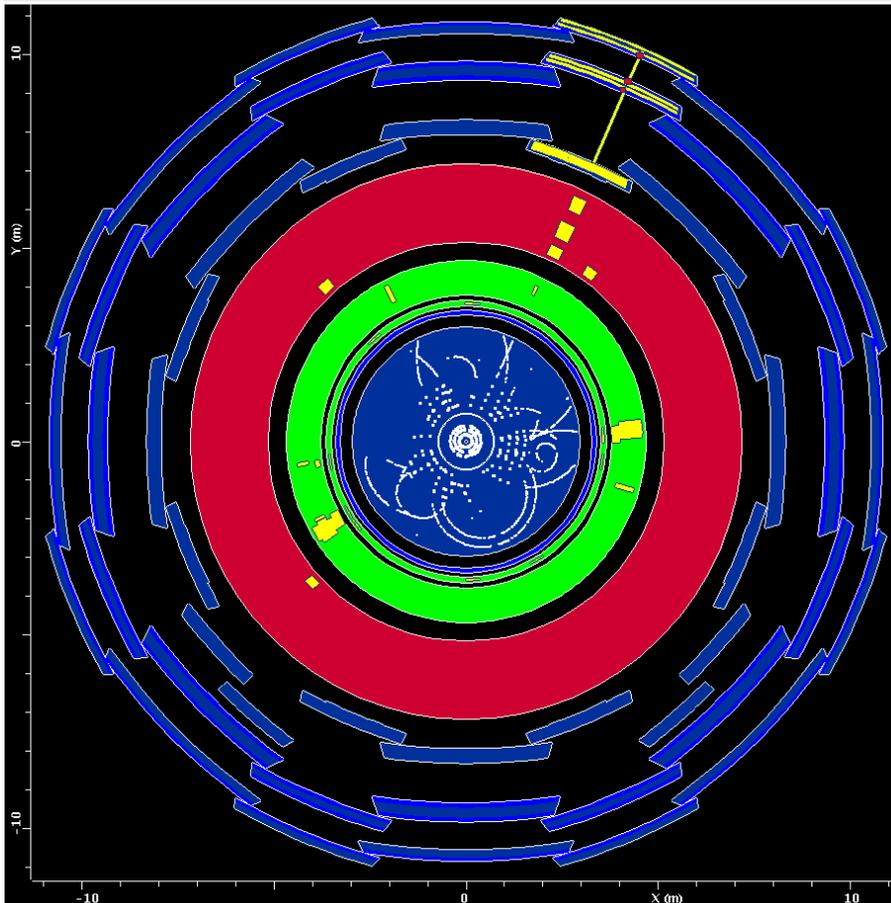
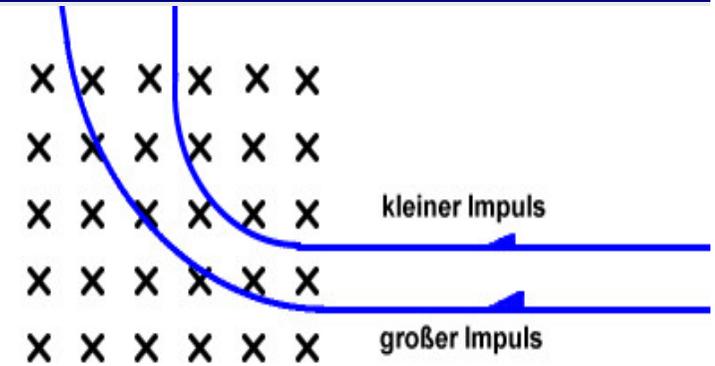
ATLAS: A Toroidal Lhc Apparatus



Impulsmessung von Teilchen



$$\frac{mv^2}{\rho} = qvB$$

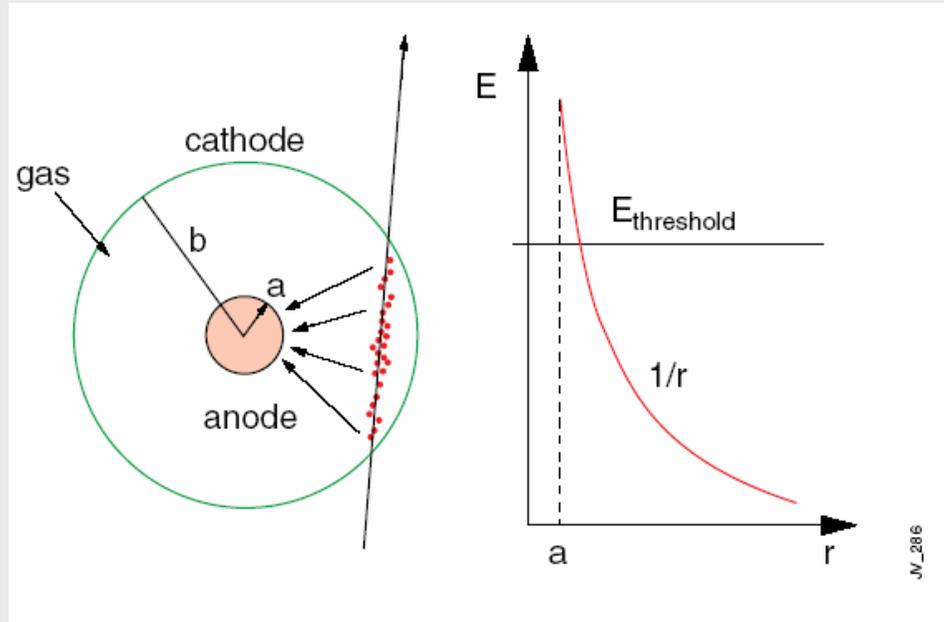


$$P(\text{GeV}) = 0.3 \rho(\text{Meter}) B(\text{Tesla})$$

Rekonstruktion von Spurpunkten

Golddraht in gasgefülltem Zylinder

(Prinzip ähnlich dem Geiger-Müllerzählrohr)



Primär 100 Elektronen/cm \rightarrow zu klein

$1/r$ -Feld: Lawinenbildung $\rightarrow > 100\ 0000e^-$

Anodendraht: vergoldeter Wolfram $50\mu\text{m}$

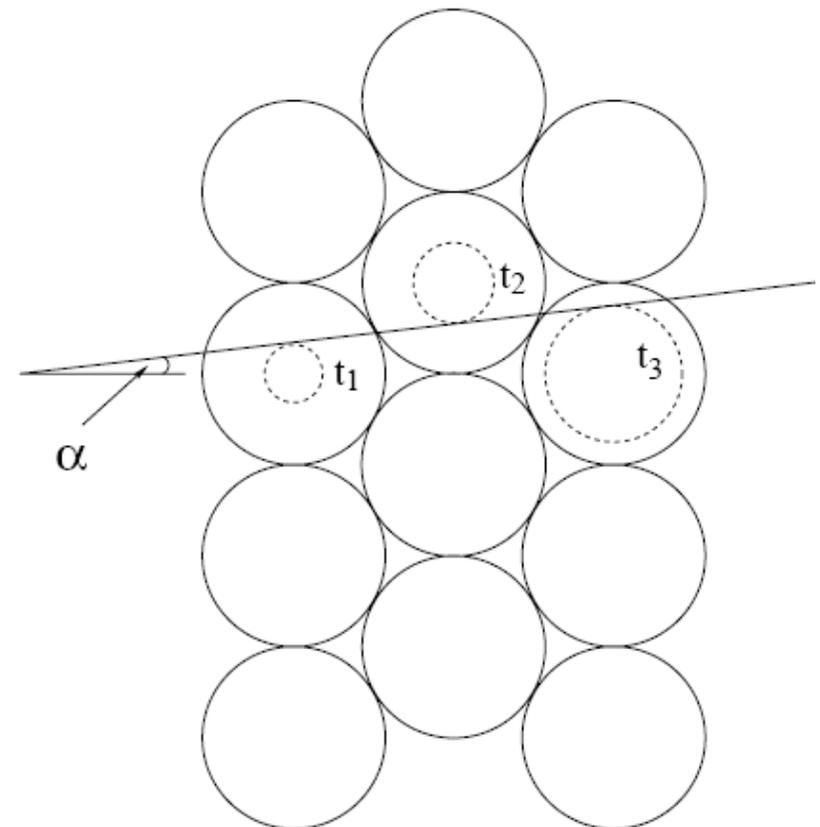
Kathode: dünner Metallzylinder $r=15\text{mm}$

Messpunktgenauigkeit: $80\ \mu\text{m}$

Messe: von Zeitabstand Kollision
zu Signal am Draht

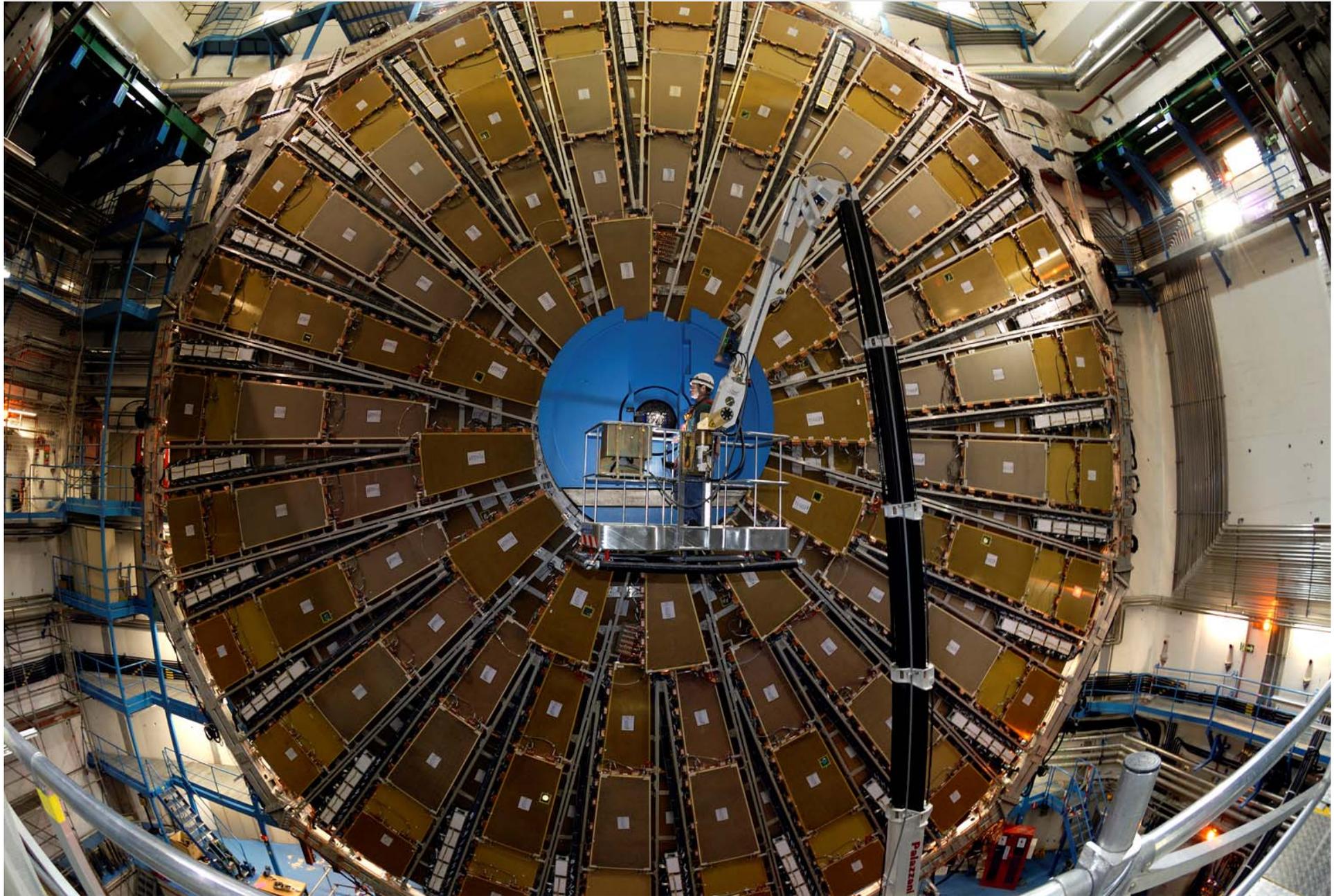
Kenne/Kalibriere: Geschwindigkeit
der Ladungen im Gas

Rechne: Abstand Teilchen zu Draht

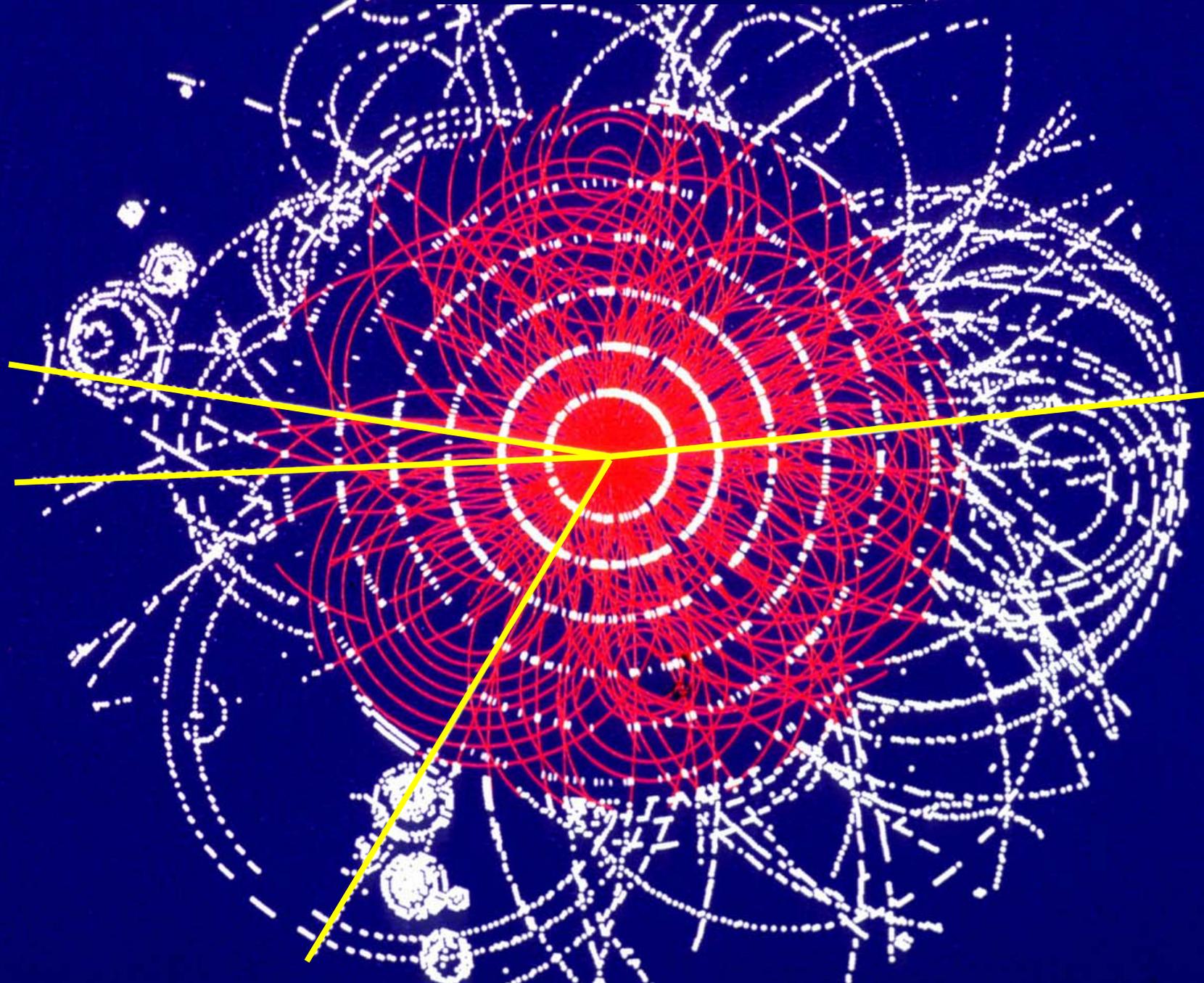


Online-Ereignis eines kosmischen Myons

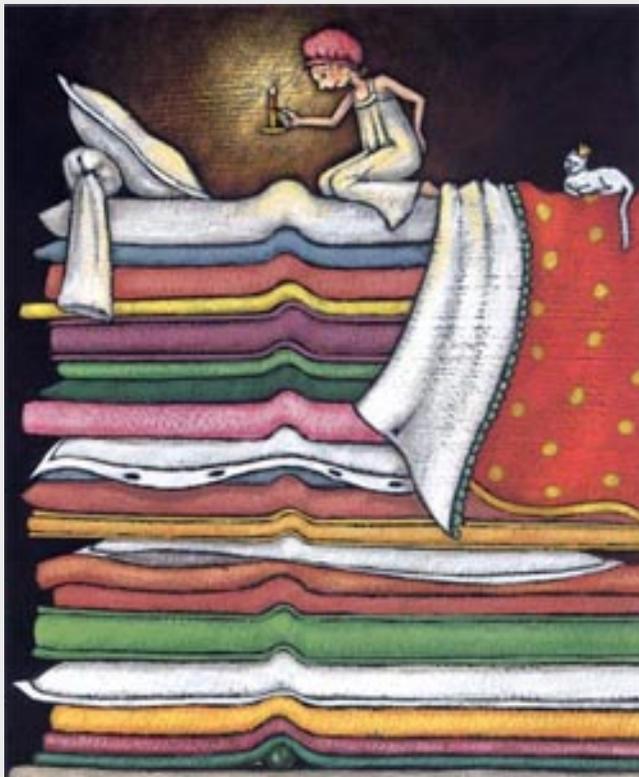
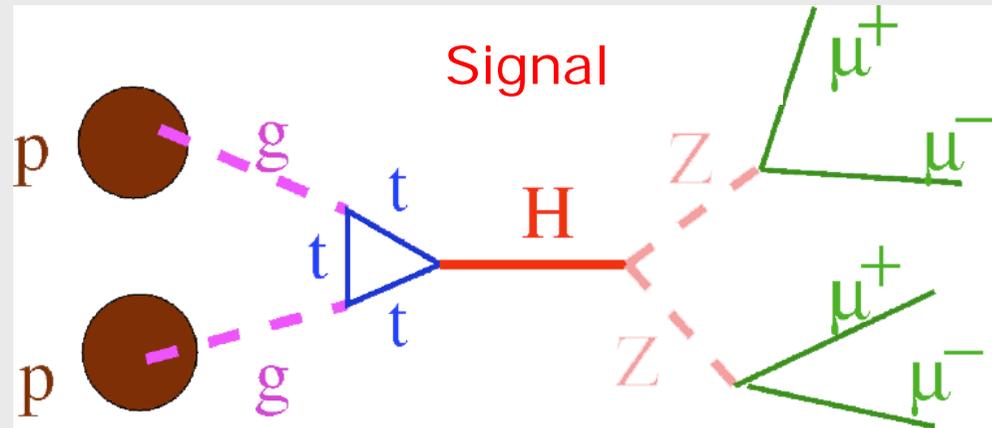
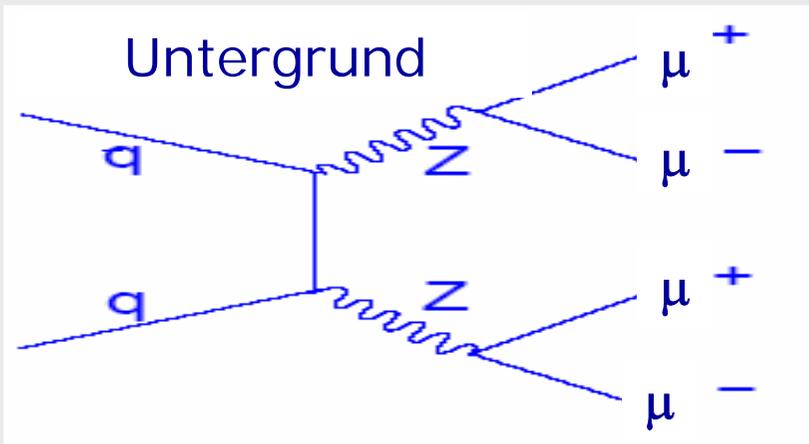
Das Myonspektrometer von ATLAS



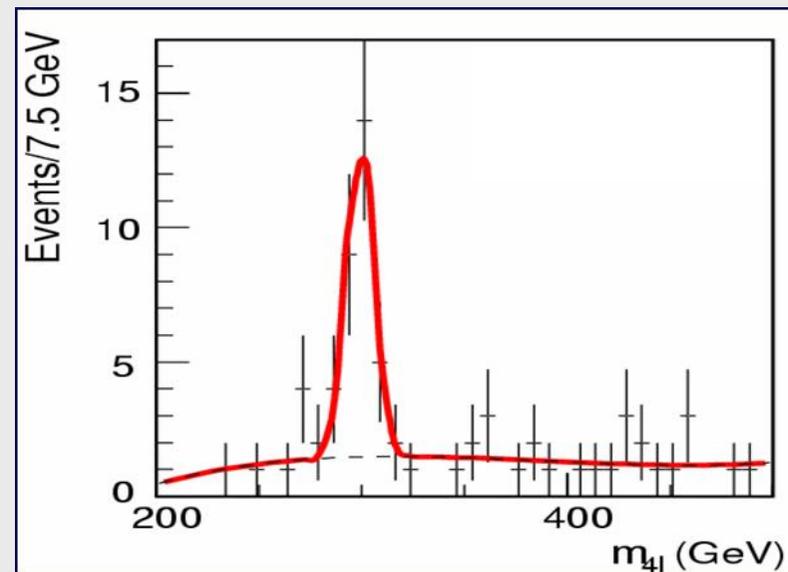
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Myonen}$



Bestimmung der Masse des Higgs-Teilchens

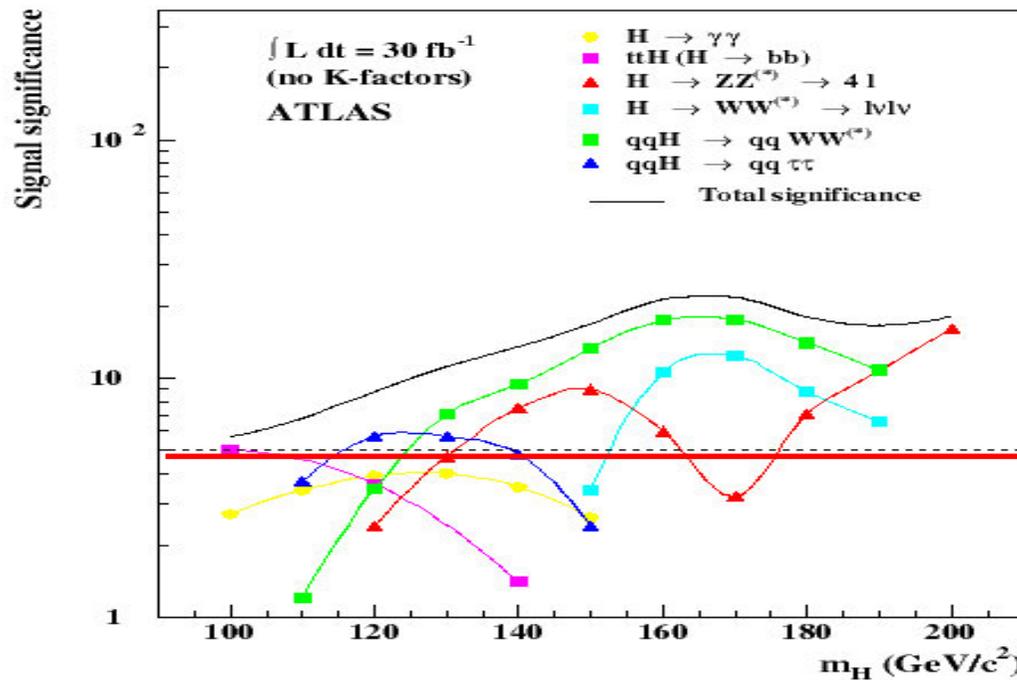
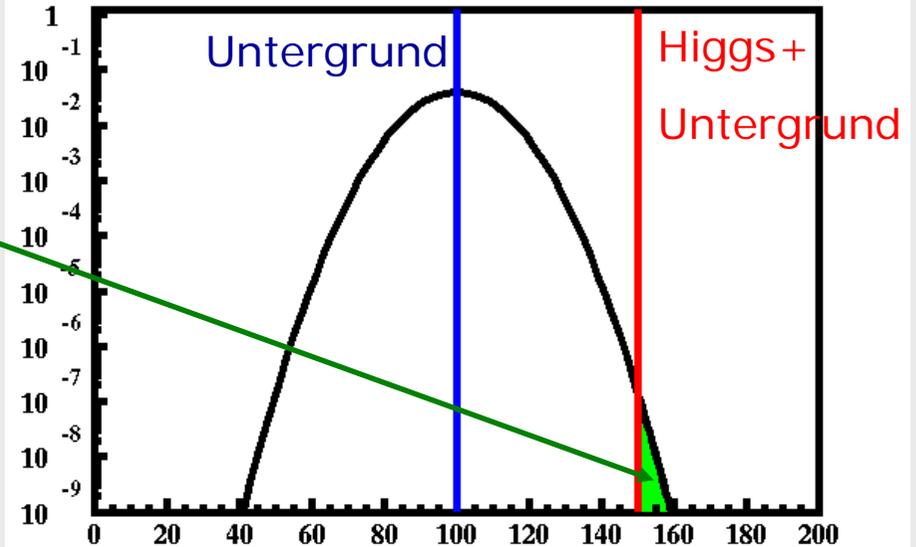


erwartetes Higgs-Signal nach einem Jahr Messzeit von ATLAS



Entdecken? Entdecken!

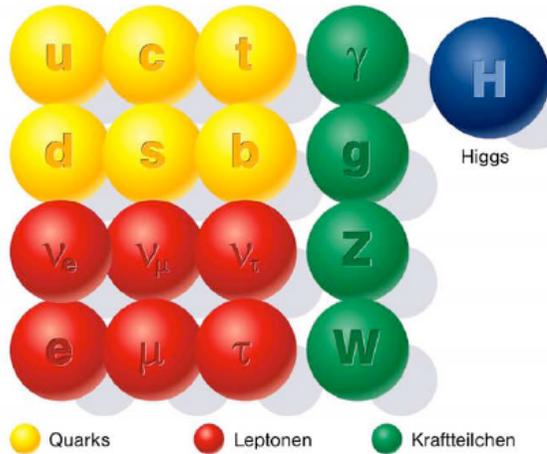
Entdeckung = Wahrscheinlichkeit
einer Fluktuation 0.00000029
(~ 5 Richtige + Zufallszahl)



Mit dem LHC werden wir
das Higgs-Teilchen nach
etwa 2 Jahren entdecken

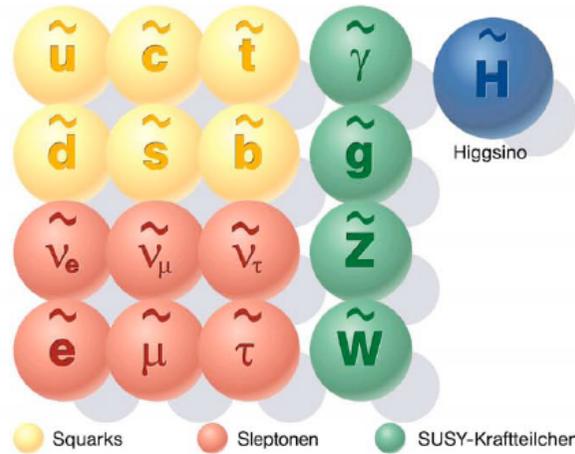
Higgs-Teilchen entdeckt, Teilchenphysik am Ende?

Standard-Teilchen



Die bekannte Welt

SUSY-Teilchen



Eine neue Welt ?

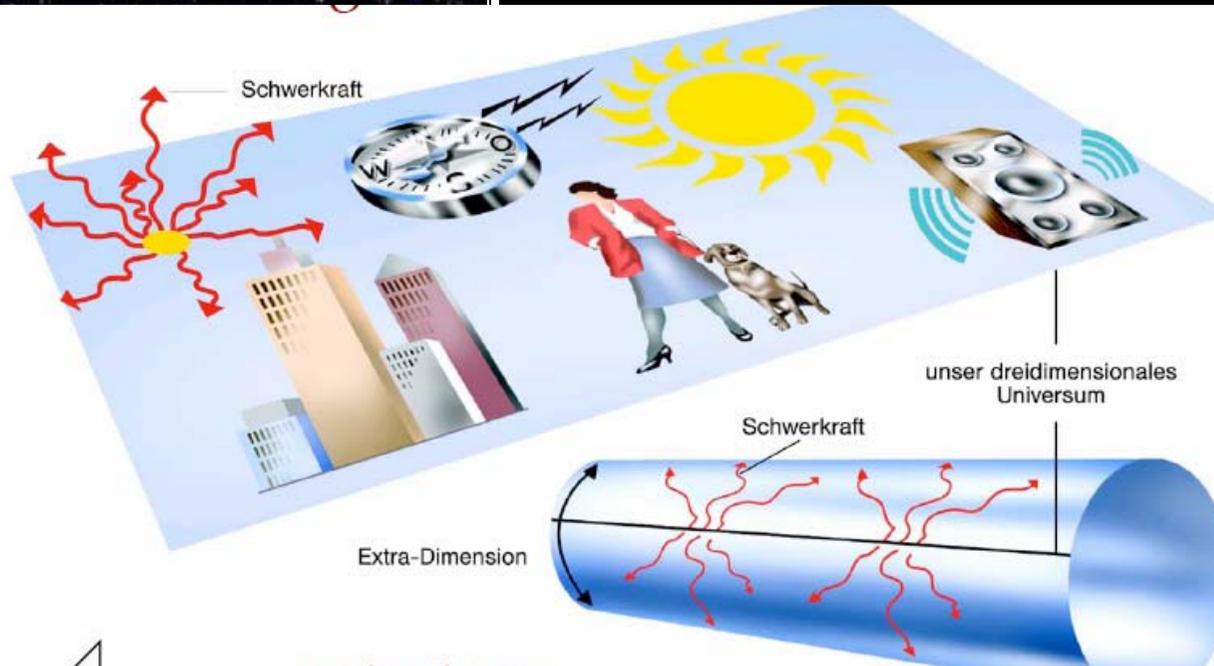
Warum ist

Higgs-Masse 100 GeV

$\ll M_{\text{Planck}} 10^{19} \text{ GeV} ?$

Gibt es eine Urkraft?

40%



Was ist die Struktur der Raum-Zeit?

Gibt es mehr als drei Raumdimensionen?

An Stelle eines Schlusswortes ...



Was wir wissen, ist ein Tropfen; was wir nicht wissen, ein Ozean.

Isaac Newton 1643 - 1727