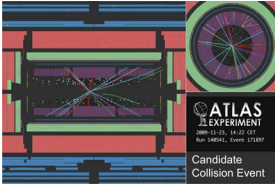


Einführung in die Teilchenphysik

... oder eine Reise vom CERN ...

... zum TMG



Thomas-Mann-Gymnasium, München
24. November 2015



Richard Nisius (MPP München)

Richard.Nisius@mpp.mpg.de

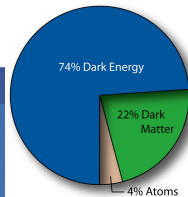
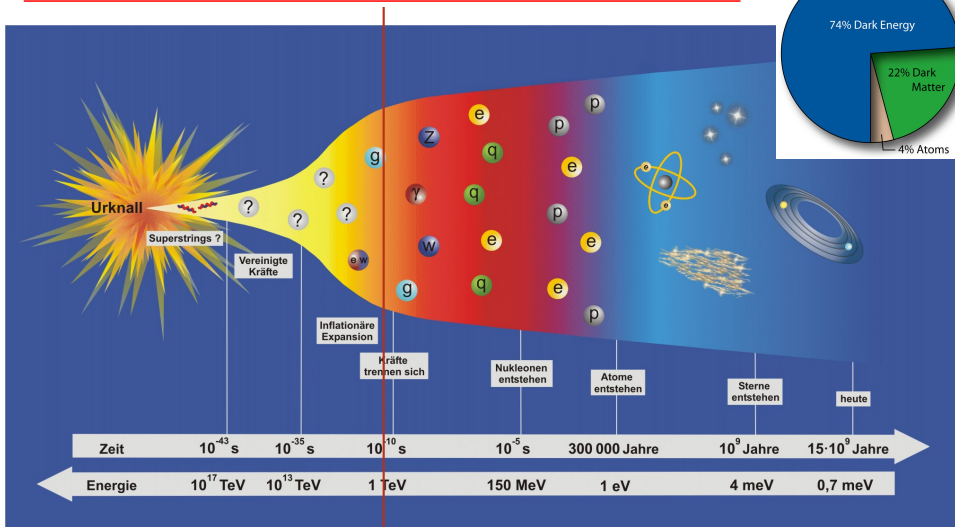


Das Programm für die nächsten ca. vier Stunden

- | | | |
|----|--|--------|
| 1. | Einführung in die Teilchenphysik | 60 min |
| 2. | Beantwortung von Fragen | 15 min |
| 3. | Pause | 15 min |
| 4. | Eigene Auswertung von ATLAS Daten in Gruppen | 45 min |
| 5. | Zusammentragen und Auswerten der Ergebnisse | 15 min |
| 3. | Pause | 15 min |
| 6. | Teilchenphysik Quiz und Auswertung | 30 min |
| 7. | Vorstellung des Netzwerk Teilchenwelt | 15 min |

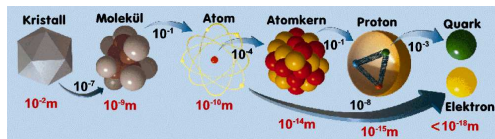
Wie jede physikalische Messgröße haben auch diese Zeitangaben einen Messfehler.

Mit dem Large Hadron Collider (LHC) in Richtung Urknall



Der LHC bietet eine Zeitreise bis etwa hier.

Dass ich erkenne, was die Welt, im Innersten zusammenhält

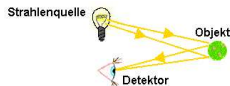


Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik

- Welches sind die kleinsten Bausteine der Natur, und was sind ihre Eigenschaften?
- Was sind die fundamentalen Wechselwirkungen dieser Bausteine?

Der Weg der Beschleunigerphysik

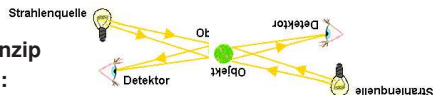
- Zur Lösung braucht man einen Weg kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen zu sehen, d.h. in irgendeiner Form zu messen.



- Wir machen zwar ein



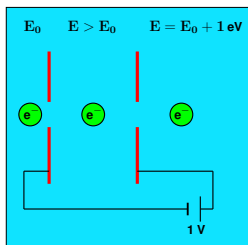
aber das Prinzip bleibt gleich:



Was immer man tut, sehen ist und bleibt ein Streuprozess.

Die Elementarladung und das Elektronenvolt

- Die Elementarladung $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb ist die elektrische Ladung Q eines Elektrons ($Q_{\text{Elektron}} = -Q_{\text{proton}}$ ein ungelöstes Rätsel!).
- Ein Teilchen der Ladung e , z.B. ein Elektron, das eine Spannung von einem Volt durchläuft, erhält eine Energie von $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule.



Gebräuchliche Einheiten:

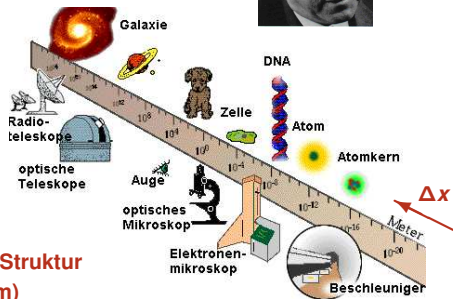
keV	=	1 000 eV	=	10^3 eV
MeV	=	1 000 000 eV	=	10^6 eV
GeV	=	1 000 000 000 eV	=	10^9 eV
TeV	=	1 000 000 000 000 eV	=	10^{12} eV

- Die Energie von 1 GeV ist viel für ein einzelnes Elektron, aber makroskopisch ist sie winzig. Sie reicht gerade mal, um eine Taschenlampe (1.6 Watt) für 0.000 000 000 1 s zum Leuchten zu bringen.

Energien werden typischerweise in GeV oder TeV angegeben.

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

- Die Quantenmechanik macht nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, d.h. Aussagen über das mittlere Ergebnis vieler Ereignisse. Das Einzelereignis jedoch ist völlig unbestimmt!
- Mit der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation kann man das Auflösungsvermögen abschätzen.
Faustformel: $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ fm GeV}$. Ein Teilchen mit Impuls 1 GeV kann also eine Struktur der Größe 0.2 fm auflösen. (1 fm = 10^{-15} m)

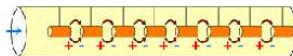


- Um diese kleinen Strukturen sehen zu können, müssen wir demzufolge

unsere



durch einen



ersetzen.



Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



Funktionsprinzip

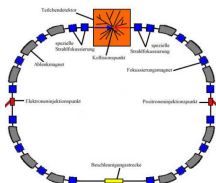
Energiezufuhr durch elektrisches Feld und
Ablenkung durch Magnetfeld $\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

Leistungsmerkmale

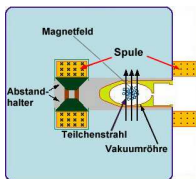
Beschleunigtes Objekt: Elektron
Spannung: 20 kV
Auflösungsvermögen: 10 000 fm

Im Prinzip nicht schlecht, aber ein bißchen mehr sollte es schon sein!

Prinzipskizze



Ablenkung

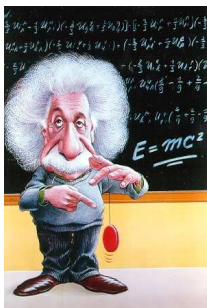


Beschleunigung



Der Energiebegriff

- Energie hat viele Formen, die ineinander umgewandelt werden können.
Beispiele sind:
 - Die Bewegungsenergie (z.B. Wind zum Segeln).
 - Die Lage- oder potentielle Energie (z.B. Skilift).
 - Die Wärme (z.B. Aufheizen der Bremsscheiben beim Abbremsen).
- Eine im Alltag nicht so gebräuchliche Form der Energie ist die Masse.



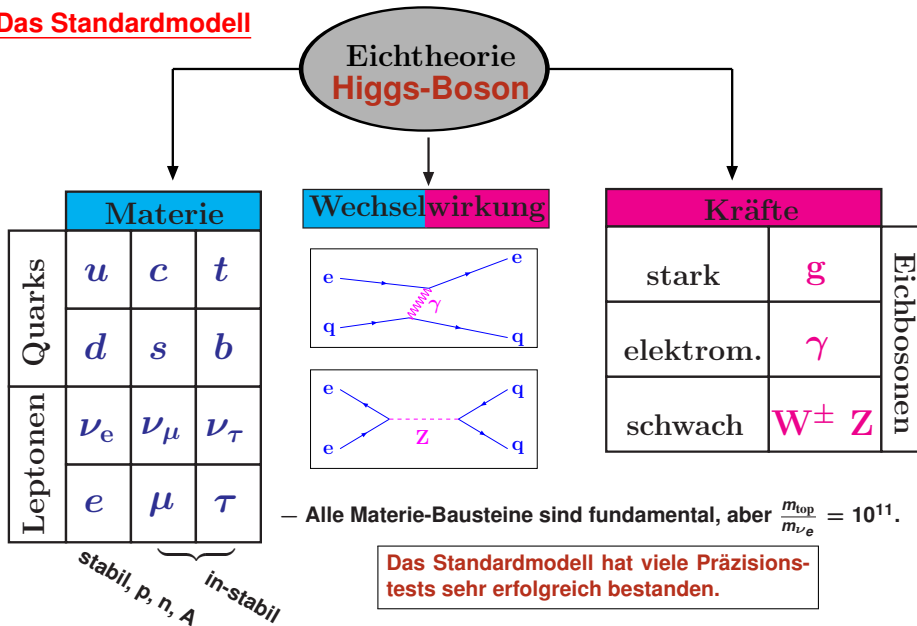
$$E = mc^2$$

m = Masse, c = Lichtgeschwindigkeit = 1

Masse und Energie sind äquivalent (d.h. proportional)! Energie lässt sich in Teilchen / Masse umwandeln und umgekehrt!.

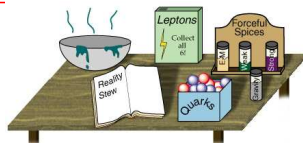
- Massen von Teilchen werden in eV gemessen,
z.B. $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ und $m_p = 0.938 \text{ GeV}$.

Das Standardmodell



Die elementaren Materiebausteine

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	I	II	III

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2), und nur die erste Familie bildet stabile Materie, $p = uud$ und $n = udd$.
- Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.
- Die Massen sind sehr verschieden und niemand weiß warum. Die Massen reichen von weniger als 1 eV für das ν_e bis zu 173 GeV (etwa 185 Protonmassen) für das top Quark.
- Die Theorie zur Erklärung der Massen ist der Higgs-Mechanismus. Das erforderliche Teilchen, das Higgs-Boson, wurde kürzlich am LHC gefunden.

Wir können das Massenspektrum nun besser verstehen.

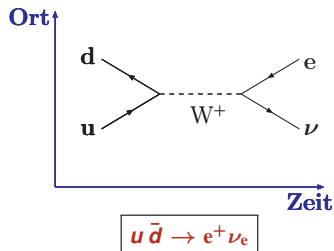
Die fundamentalen Kräfte

Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV]	el. Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton? G ?	0	0	10^{-38} (∞)
schwach	Kernzerfall	Z W^{\pm}	91.2 80.4	0 ± 1	10^{-5} (10^{-3}) fm
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon γ	0	0	10^{-2} (∞)
stark	Quark-Einschluss	Gluon g	0	0	1 (1 fm)

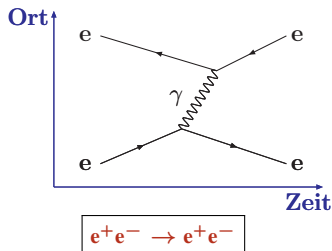
Außer für die Gravitation haben wir eine vereinheitlichte Beschreibung.

Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption



Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertices.

Probleme mit der Masse?



- Wieso habe ich eine so große Masse? **Wildschweine!**
- Klar, Wildschweine haben innere Struktur, sie bestehen z.B. aus **Fleisch**. Fleisch hat eine Masse, also haben Wildschweine eine Masse. Aber wieso hat Fleisch eine Masse?
- Klar, Fleisch besteht aus **Eiweißen**.
Eiweiße haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Eiweiße bestehen aus **Molekülen**.
Moleküle haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Moleküle bestehen aus **Atomen**.
Atome haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Atome bestehen aus **Protonen** und **Neutronen**.
P und n haben eine Masse, also Aber wieso ... ?
- Klar, Protonen und Neutronen bestehen aus **Quarks**.
Aber wieso haben Quarks eine Masse?

Wir brauchen eine andere Erklärung als den Aufbau aus kleineren massiven Bausteinen.

Probleme mit der Masse - die gefundene Lösung

Die Vermutung (1965)

- Fundamentale Teilchen, sowohl Fermionen als auch Bosonen, sind an sich masselos.
- Massen werden erst durch Wechselwirkungen mit einem Hintergrundfeld, dem **Higgsfeld**, erzeugt.
- Je stärker die Kopplung, um so größer die Masse.

Die Konsequenz

- Die Existenz des **Higgs-Bosons** als Anregung des **Higgsfelds**.

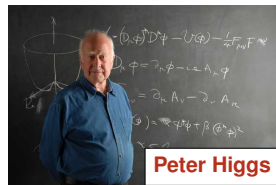


- Ein möglicher Zerfall ist

- Von diesen Ereignissen wollen wir den Winkel zwischen den geladenen Leptonen messen

In den Datensätzen gibt es auch einige W-Paar Ereignisse.

Ein Vater des Gedankens



Das Resultat des LHC

- Higgs-Boson gefunden mit:
 $M_H = 125.09 \pm 0.24 \text{ GeV} \checkmark$
- Nobelpreis 2013 (Englert, Higgs).

mit den anschließenden W-Zerfällen die wir noch besprechen werden.

Ein Teilchen im Higgsfeld



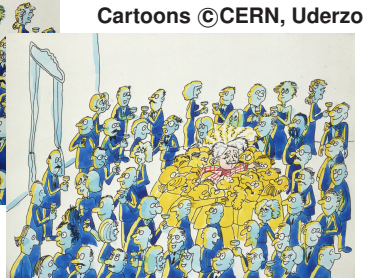
Eine gleich verteilte Gruppe eifrig diskutierender Physiker am Konferenzbuffet \Leftrightarrow *Higgsfeld*



Ein sehr beliebter (an sich masseloser) Kollege betritt den Raum \Leftrightarrow *Teilchen*



Wildschweine? So ein Unsinn ich bin einfach nur seeeeeehr beliebt.



Die erfreut mitgehenden Physiker behindern ihn in seiner Bewegung in Raum und Zeit. Er (das *Teilchen*) bekommt dadurch *seine Masse*.

Cartoons ©CERN, Uderzo

Das Higgs Boson als Anregung des Higgsfelds



Das baldige Erscheinen eines Nobelpreisträgers wird angekündigt
 \Leftrightarrow Anregung des Higgsfelds



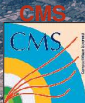
Was, hier ist kein Platz für mich? Die spinnen die ...

Cartoons ©CERN, Uderzo



Die neugierigen Kollegen sammeln sich spontan lokal an einem Platz in der Hoffnung auf ein kurzes Gespräch mit dem Nobelpreisträger. Diese Anregung des Felds \Leftrightarrow Higgs-Boson

Der Large Hadron Collider, 2009⁺⁺, $E_p = 6.5 \text{ TeV}$



p

p

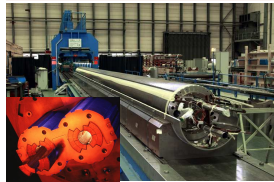


ATLAS



LHCb
THCP
LHCb

Die supraleitenden Magnete



Anzahl	1232
Länge	14.3 m
Gewicht	35 t
B-Feld	8.4 T
Temperatur	1.9 K
Strom	11700 A
Energie	7.1 MJ

Einzelheiten



Ein Vergleichsobjekt

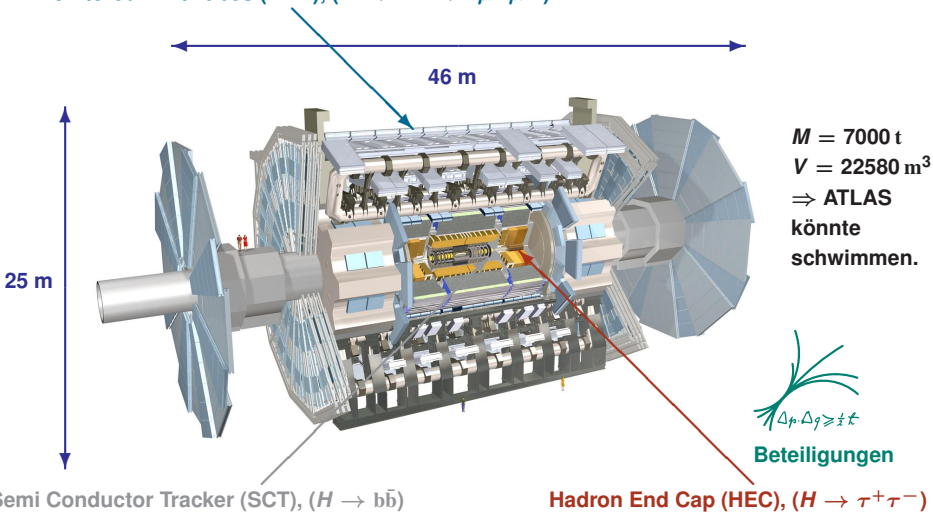


590 t

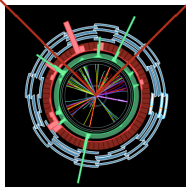
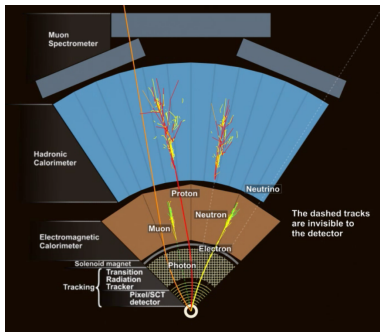
 $v=18(620) \text{ km/h}$

Der ATLAS Detektor

Monitored Drift Tubes (MDT), ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu^+\mu^-$)



Das Bauprinzip von Teilchen-Detektoren



Das Prinzip

- In einer Art Zwiebelschalendesign um die Strahlröhre werden die verschiedenen Teilchen an Hand ihrer typischen Wechselwirkungen nachgewiesen.
- Die Messgrößen sind Ort, Impuls, Ladung, Energie...
- Bei komplizierten Zerfällen wird aus der Summe aller Zerfallsprodukte auf die Eigenschaften der primär erzeugten Teilchen geschlossen.
- Datenmenge einer 100 Megapixel Kamera mit 40 Millionen Schnappschussmöglichkeiten pro Sekunde.
- Ein 3-stufiger Entscheidungsprozess bringt uns von

40 MHz →  ,  ,  → 200 Hz.

- Die jährliche Rohdatenmenge: 1000  à 2 TB.

Bau- und Betrieb von Teilchendetektoren sind sehr komplexe Aufgaben.

Abschluss und Ausblick



nur Mut!



Bild vom nächsten Schulfest?



Nur Mut!



noch
Fragen?



Danke für die Aufmerksamkeit.