

# Einführung in die Teilchenphysik



**Bernhard-Strigel-Gymnasium  
Memmingen  
27. Mai 2011**



**[Richard.Nisius@mpp.mpg.de](mailto:Richard.Nisius@mpp.mpg.de)  
(MPP München)**

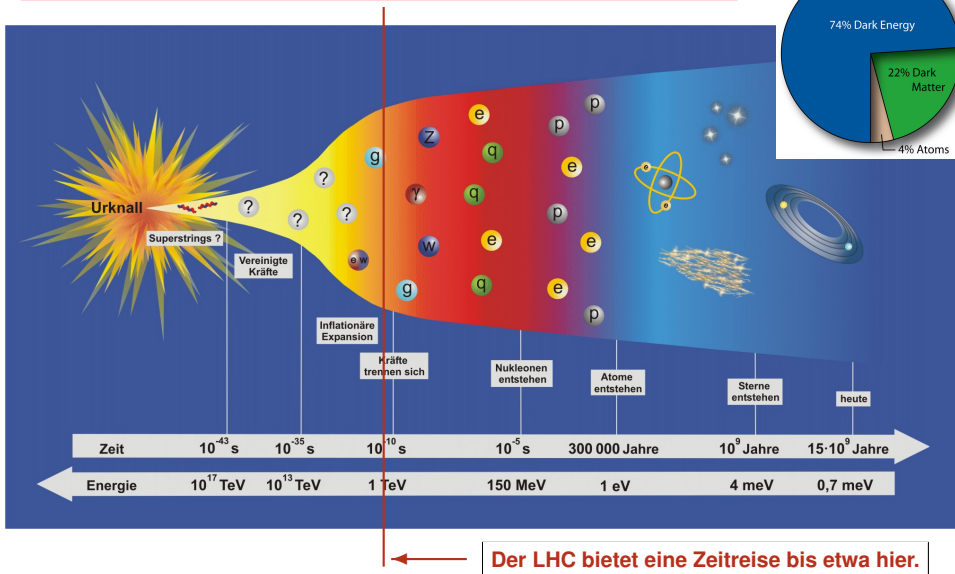


## Das Programm für die nächsten ca. vier Stunden

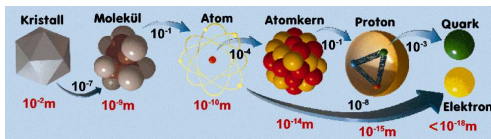
- |    |  |        |
|----|--|--------|
| 1. | Einführung in die Teilchenphysik             | 60 min |
| 2. | Beantwortung von Fragen                      | 15 min |
| 3. | Pause  | 15 min |
| 4. | Eigene Auswertung von ATLAS Daten in Gruppen | 45 min |
| 5. | Zusammentragen und Auswerten der Ergebnisse  | 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



## 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

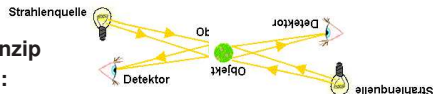
- Zur Lösung braucht man einen Weg kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen zu sehen, d.h. in irgendeiner Form zu messen.



- Wir machen zwar ein



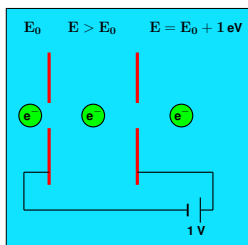
aber das Prinzip bleibt gleich:



**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.



### Gebäuchliche Einheiten:

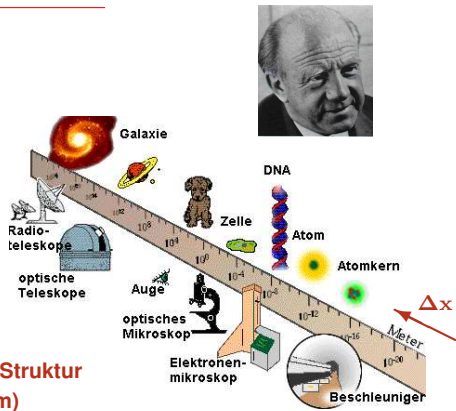
keV	=	1 000 eV	=	$10^3$ eV
MeV	=	1 000 000 eV	=	$10^6$ eV
GeV	=	1 000 000 000 eV	=	$10^9$ eV
TeV	=	1 000 000 000 000 eV	=	$10^{12}$ eV

- 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:  $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ GeV}$ . Ein Teilchen mit Impuls 1 GeV kann also eine Struktur der Größe 0.2 fm auflösen. (1 fm =  $10^{-15} \text{ m}$ )

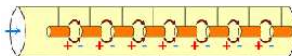


- Um diese kleinen Strukturen sehen zu können, müssen wir demzufolge

unsere



durch einen



ersetzen.

## Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



### Funktionsprinzip

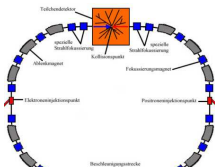
Energiezufuhr durch elektrisches Feld und Ablenkung durch Magnetfeld  $\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

### Leistungsmerkmale

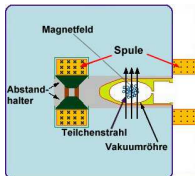
Beschleunigtes Objekt: Elektron  
 Spannung: 20 kV  
 Auflösungsvermögen: 10 000 fm

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

### Prinzipskizze



### Ablenkung

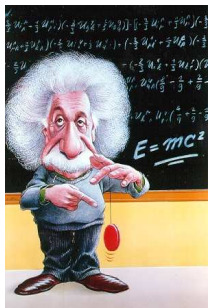


### Beschleunigung



## 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 Brems Scheiben beim Abbremsen).
- Eine im Alltag nicht so gebräuchliche Form der Energie ist die Masse.



$$E = mc^2$$

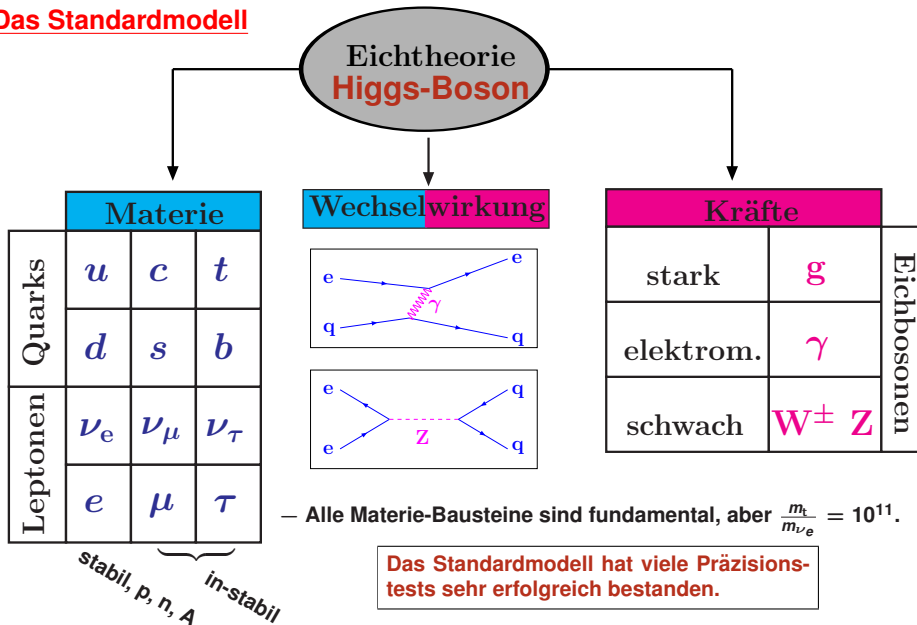
$m$  = Masse,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit = 1

**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  $m_p = 0.938 \text{ GeV}$ .

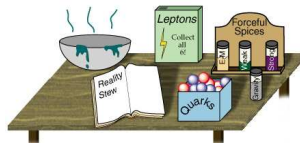


## Das Standardmodell



## Die elementaren Materiebausteine

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

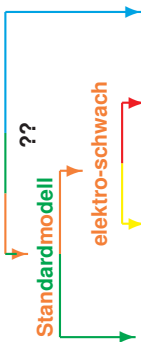
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III

- 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  $\nu_e$  bis zu 173 GeV (etwa 185 Protonmassen) für das top Quark.
- Eine Theorie zur Erklärung der Massen ist der Higgs-Mechanismus. In dieser Theorie wird ein zusätzliches Teilchen, das noch zu findende Higgs-Boson, vorhergesagt.

**Wir wollen das Massenspektrum erklären können.**

## Die fundamentalen Kräfte

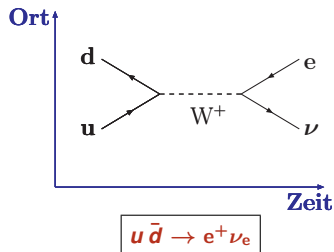
Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV]	el. Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton? G ?	0	0	$10^{-38}$ ( $\infty$ )
schwach	Kernzerfall	Z W $^{\pm}$	91.2 80.4	0 $\pm 1$	$10^{-5}$ ( $10^{-3}$ ) fm
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon $\gamma$	0	0	$10^{-2}$ ( $\infty$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



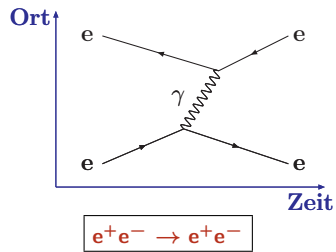
Außer für die Gravitation haben wir eine vereinheitlichte Beschreibung.

## Wechselwirkungen im Standardmodell

### Paarvernichtung und Paarerzeugung



### Emission und Absorption



Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertizes.

## 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?**

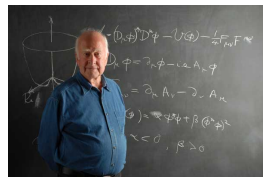
**Wir brauchen eine andere Erklärung als den Aufbau aus kleineren massiven Bausteinen.**

## Probleme mit der Masse - eine mögliche 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.

### Der Vater des Gedankens



**Peter Higgs**

### Die Konsequenz

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

### Die Vorhersagen des Standardmodells

- Die Kopplungen des **Higgs-Bosons** an alle Teilchen sind vorhergesagt, und damit liegen die Zerfallskanäle und -raten des **Higgs-Bosons** bei gegebener Masse fest.

**Die Masse des Higgs-Bosons ist nicht vorhergesagt und muß gemessen werden.**

## Ein Teilchen im Higgsfeld



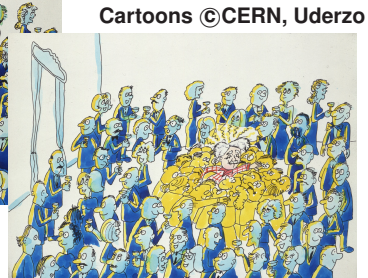
Eine gleich verteilte Gruppe eifrig diskutierender Physiker am Konferenzbuffet  $\Leftrightarrow$  *Higgsfeld*



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  
 ⇔ Anregung des Higgsfelds



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

Cartoons ©CERN, Uderzo

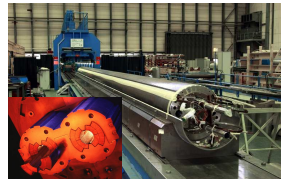


Die neugierigen Kollegen sammeln sich spontan lokal an einem Platz in der Hoffnung auf ein kurzes Gespräch mit dem Nobelpreisträger. Diese Anregung des Felds ⇔ Higgs-Boson



Der Large Hadron Collider, 2009<sup>++</sup>,  $E_p = 7 \text{ TeV}$

## 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

p

p



## Einzelheiten



Entdeckungspotential:  $M_H = 100 - 1000 \text{ GeV}$

## Ein Vergleichsobjekt



590 t

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

## Beschleunigung und Teilchenkollisionen



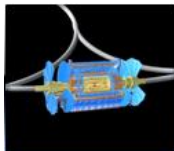
### Cable Car

- Masse = 7 t.
- $F = 5 \text{ m}^2$ .

### Ein paar Daten

- 26.7 km Umfang.
- 3400 Umläufe je Blinzeln.
- $1.15 \cdot 10^{11}$  Protonen je Paket.
- 2808 Pakete je Strahl.
- 7 TeV Endenergie je Proton.
- 362 MJ Energie je Strahl.
- $F = 10^{-11} \text{ m}^2$  Strahlquerschnitt

### LHC und ATLAS



LHC 2009++

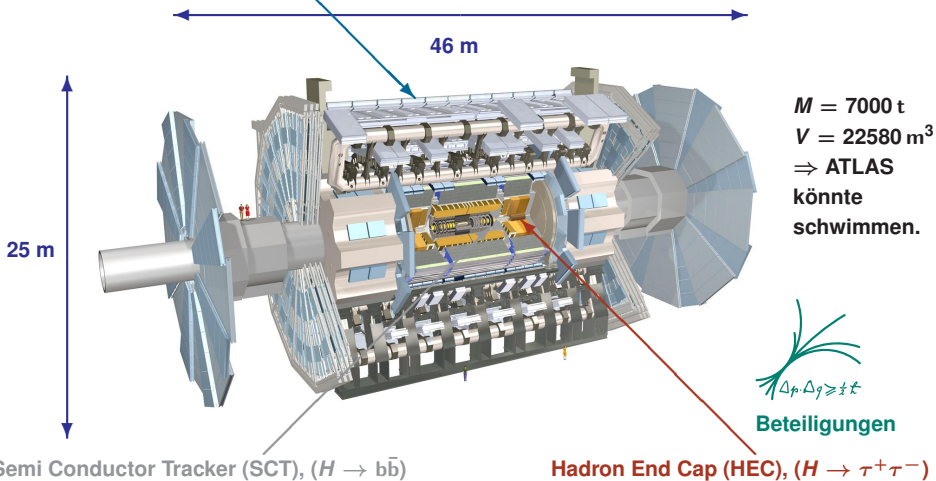
### Eine immense Energiedichte

$$\frac{F_{\text{CableCar}}}{F_{\text{Strahl}}} = \frac{\text{Image of Earth}}{\text{Image of Hot Air Balloon}}$$

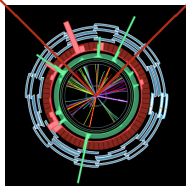
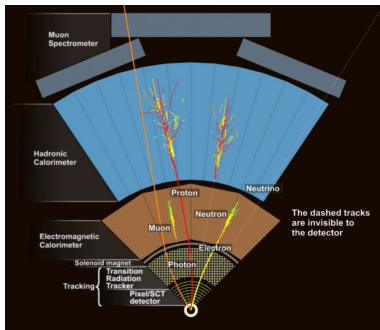
**Die Kollision der Strahlen entspricht der zweier Cable Cars mit  $v=1160 \text{ km/h}=\text{Mach } 0.92$ .**

## 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.

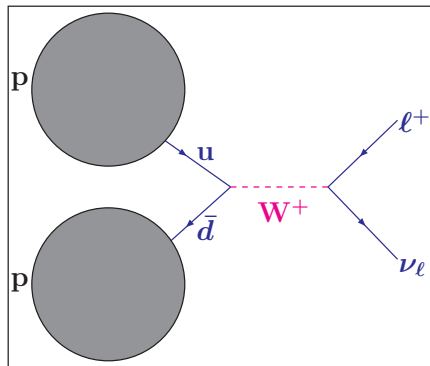
**Bau- und Betrieb von Teilchendetektoren sind sehr komplexe Aufgaben.**

## Die W-Boson Produktion

### Die Quarks im Proton

–  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix}$  b,t sind zu schwer.

### Die wahrscheinlichste Reaktion



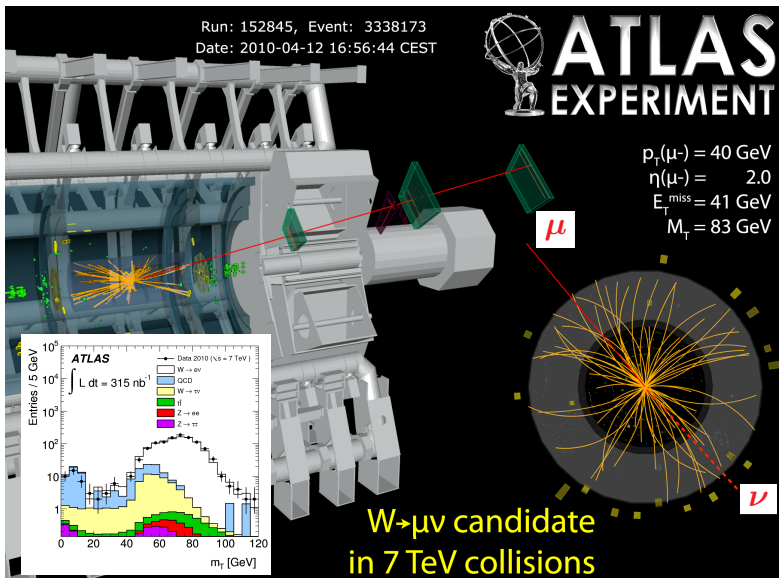
### Einige Überlegungen

- $f_{q/p}$  = Wahrscheinlichkeit ein Quark, q, mit einem bestimmten Impuls im Proton zu finden.
- Ladungserhaltung  $\Rightarrow q\bar{q}' \rightarrow W^+$ , z.B.  $Q_u + Q_d = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{1}{3} \neq 1$  geht nicht.
- Das Proton hat 3-Valenz-Quarks  $p = uud$ , da ist kein Platz für c-Quarks.
- Diese Quarks sind aber durch Gluonen gebunden  $\Rightarrow$  es gibt eine Impulsverteilung.
- Die Gluonen können in Quarkpaare fluktuieren,  $g \rightarrow q\bar{q}$ . Daraus entstehen die See-Quarks, und damit sind c-Quarks doch möglich.
- Anti-Quarks gibt es nur im See. Hier sind dann also  $\bar{d}$  und  $\bar{s}$  möglich.
- Die Reaktion  $\bar{q}q' \rightarrow W^-$  geht analog.
- **Was erwartet man wohl für das Verhältnis der Ereignisraten  $W^+/W^-$ ?**

**Diese Messung werden wir später gemeinsam durchführen.**

## Ein W-Boson Zerfall

$$pp \rightarrow W + X \rightarrow \mu \nu + X$$



## Abschluss und Ausblick



nur Mut!



**Bild vom Schulfest am 28.7.2011**



Nur Mut!

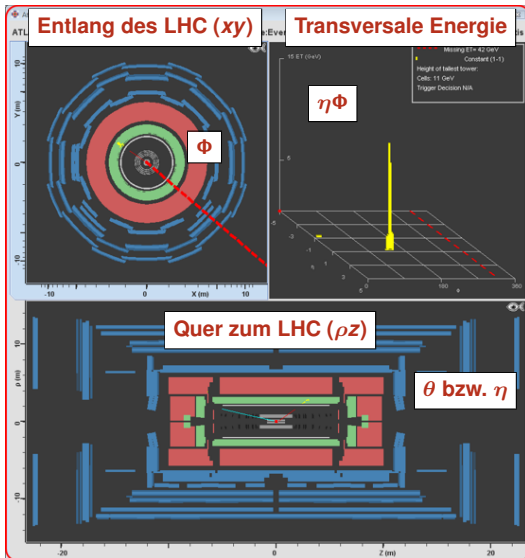


noch Fragen?

FRAGEN?  
& I TEIL  
ANTWORTEN

**Danke für die Aufmerksamkeit.**

## Zur Interpretation der Ereignisbilder im ATLAS Detektor



**Eingabefeld**

Name	Value
Status	
<input checked="" type="checkbox"/> InDet	
<input checked="" type="checkbox"/> Calo	
<input checked="" type="checkbox"/> MuonDet	
<input checked="" type="checkbox"/> Objects	

**Ausgabefeld**

$$\eta = \ln \tan(\theta/2)$$

$$\eta = -5 / -3 / -1 / 1 / 3 / 5$$

$$\Leftrightarrow \theta = (179 / 174 / 140 / 40 / 6 / 1) \text{ Grad}$$



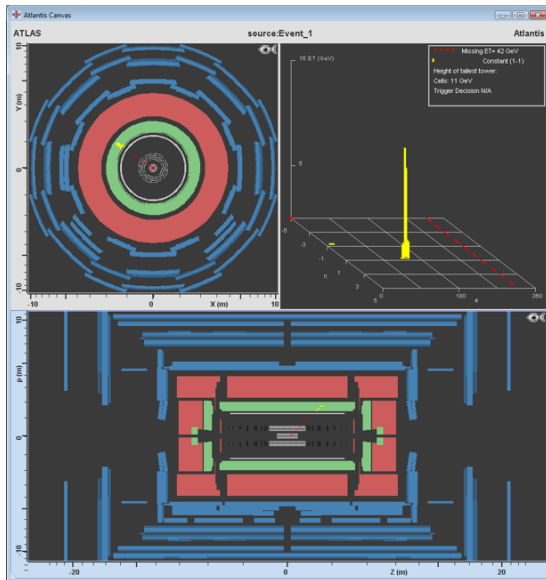
## Die Elektron Signatur

- Eine Spur in den Spurdetektoren.
- Reichlich Energie im elektromagnetischen Kalorimeter.
- Keine Energie im hadronischen Kalorimeter.
- Keine Spur in der Muonkammer.

⇒



- Ein Positron hat eine entgegengesetzte Spurkrümmung.

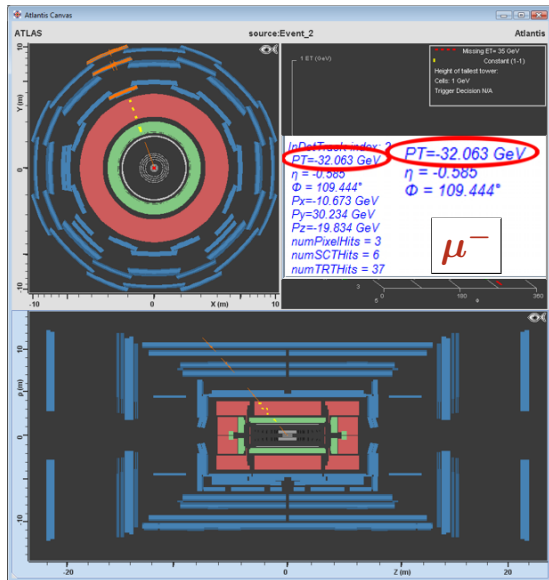


## Die Muon Signatur

- Eine Spur in den Spurdetektoren.
- Wenig Energie im elektromagnetischen Kalorimeter.
- Wenig Energie im hadronischen Kalorimeter.
- Eine Spur in der Muonkammer.

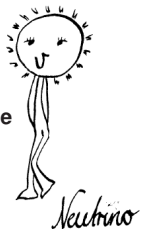


- Ein Anti-Muon hat eine entgegengesetzte Spurkrümmung.

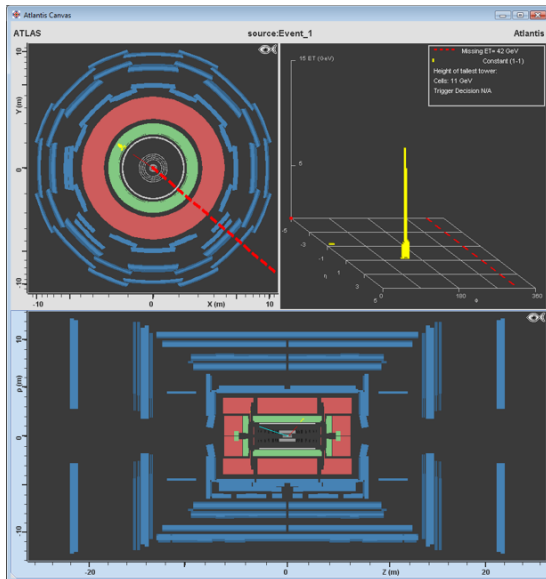


## Die Neutrino Signatur

- Eine Neutrino wechselwirkt mit **keiner** der Detektor-Komponenten.
- Der Anfangsimpuls ist nur entlang der Strahlachse gerichtet,  $p \rightarrow \leftarrow p$ .
- Es gilt Impulserhaltung!
- Die Summe aller gemessener transversaler Impulse muss Null sein.
- Fehlender transversaler Impuls wird den Neutrinos zugeordnet.

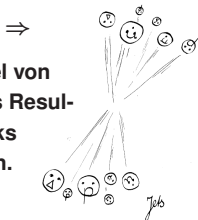


- Ich bin der fehlende Rest vom Ganzen.



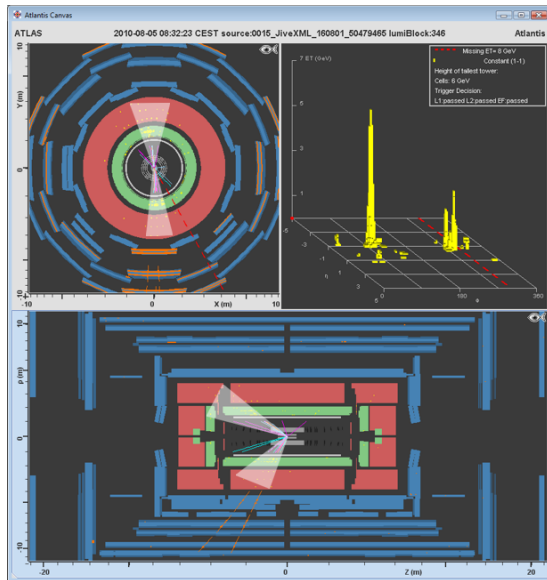
## Die Teilchen-Jet Signatur

- Spuren in den Spurdetektoren.
- Energieeinträge im elektromagnetischen Kalorimeter.
- Viel Energie im hadronischen Kalorimeter.
- Teilweise Spuren in der Muonkammer.





**Jets = Bündel von Hadronen als Resultat von Quarks oder Gluonen.**

- Von Quarks, Anti-Quarks oder Gluonen induzierte Jets lassen sich nur schwer unterscheiden.



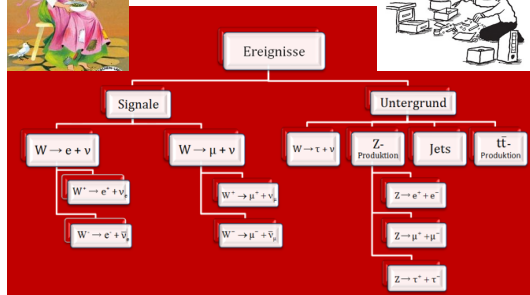
## Die wissenschaftliche Fragestellung

- Die einfachsten 3-Quark Zustände sind das Proton  und das Neutron 
- Die elektrischen Ladungen (Q) der Quarks (q) sind:  $Q_u = \frac{2}{3}$ ,  $Q_d = -\frac{1}{3}$ , mit  $Q_{\bar{q}} = -Q_q$ .
- Das relative Erzeugungsrate vom  $W^+$ - und  $W^-$ -Bosonen gibt indirekt Aufschluß über den Quarkinhalt des Protons.

## Die Kriterien für Signalereignisse

- 1) genau ein Lepton ( $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ), dass isoliert, d.h. nicht in einem Jet auftritt.
- 2) ein transversaler Impuls (PT) von mindestens 20 GeV.
- 3) ein fehlender transversaler Impuls (MET) von mindestens 25 GeV.
- 4) ein Winkel zwischen Lepton und MET-Linie in der Ebene senkrecht zur Strahlachse zwischen  $160^\circ$  und  $200^\circ$ .

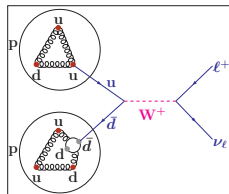
## Die Aufgabenstellung



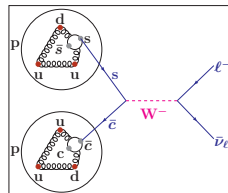
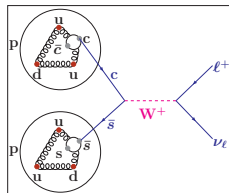
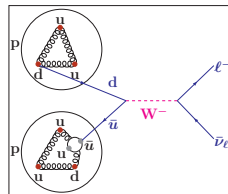
Wenn alle Kriterien erfüllt sind handelt es sich sehr wahrscheinlich um eine Signalereignis.

## Die wissenschaftliche Auswertung

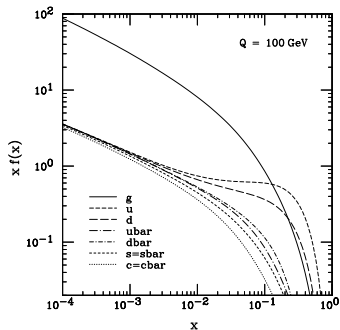
### Die $W^+$ - Produktion



### Die $W^-$ - Produktion



### Die Impulsverteilungen



– Der vereinfachte Weg.

$$1) \sigma_{q\bar{q}} \equiv \sigma(q\bar{q} \rightarrow W^\pm)$$

$$2) m_W^2 = x_1 x_2 S_{pp}$$

$$\frac{W^+}{W^-} \approx \frac{\int [u(x_1)\bar{d}(x_2) + c(x_1)\bar{s}(x_2)] \sigma_{q\bar{q}}}{\int [d(x_1)\bar{u}(x_2) + s(x_1)\bar{c}(x_2)] \sigma_{q\bar{q}}}$$

Durch Mittelung über die Impulsverteilungen kommt nicht genau zwei heraus.