

# Einführung in die Teilchenphysik



Lenggries, 17. Dezember 2010

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

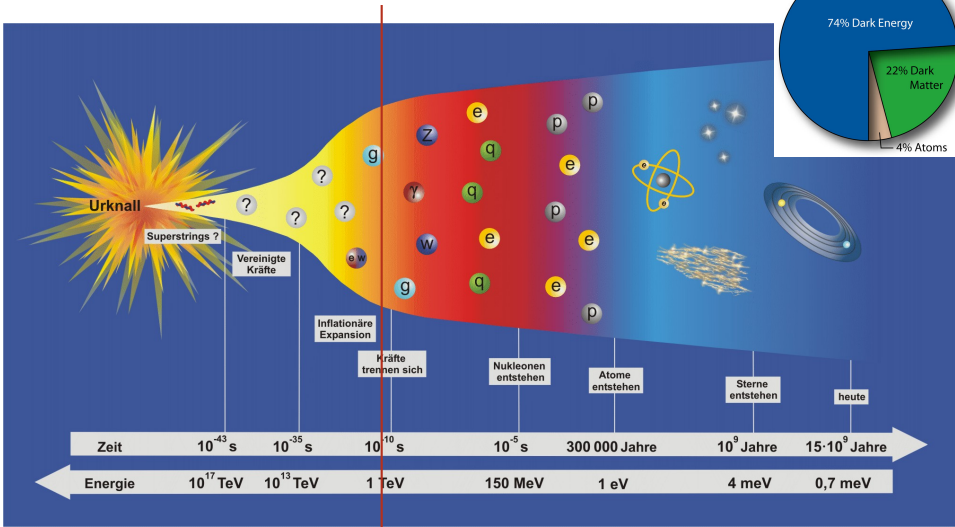
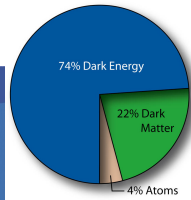


## Das Programm für die nächsten ca. vier Stunden

- |    |   |        |
|----|---|--------|
| 1. | Einführung in die Teilchenphysik                    | 60 min |
| 2. | Beantwortung von Fragen                             | 15 min |
| 3. | Pause   | 15 min |
| 4. | Messung der Zerfallsbreiten des Z-Bosons 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 |

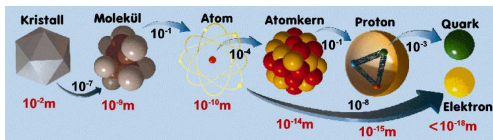
**Wie jede physikalische Messgröße haben auch diese Zeitangaben einen Messfehler.**

# 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

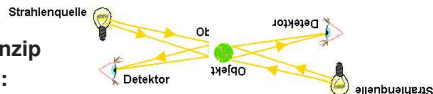
- Zur Lösung braucht man einen Weg kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen zu sehen, d.h. in irgendeiner Form zu messen.



- Wir machen zwar ein



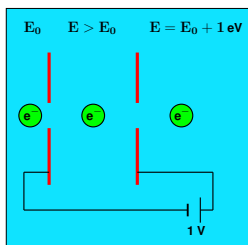
aber das Prinzip bleibt gleich:



**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.



### Gebäuchliche Einheiten:

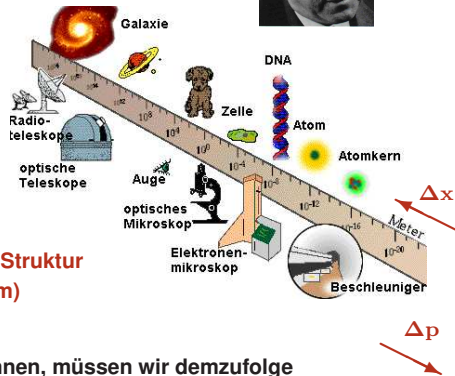
keV	=	1 000 eV	=	$10^3$ eV
MeV	=	1 000 000 eV	=	$10^6$ eV
GeV	=	1 000 000 000 eV	=	$10^9$ eV
TeV	=	1 000 000 000 000 eV	=	$10^{12}$ eV

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

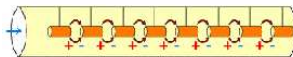


- Um diese kleinen Strukturen sehen zu können, müssen wir demzufolge

unsere



durch einen



ersetzen.

## Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



### Funktionsprinzip

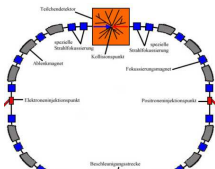
Energiezufuhr durch elektrisches Feld und Ablenkung durch Magnetfeld  $\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

### Leistungsmerkmale

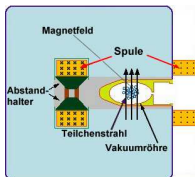
Beschleunigtes Objekt: Elektron  
Spannung: 20 kV  
Auflösungsvermögen: 10 000 fm

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

### Prinzipskizze



### Ablenkung

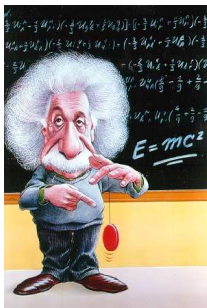


### Beschleunigung



## 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.



$$E = mc^2$$

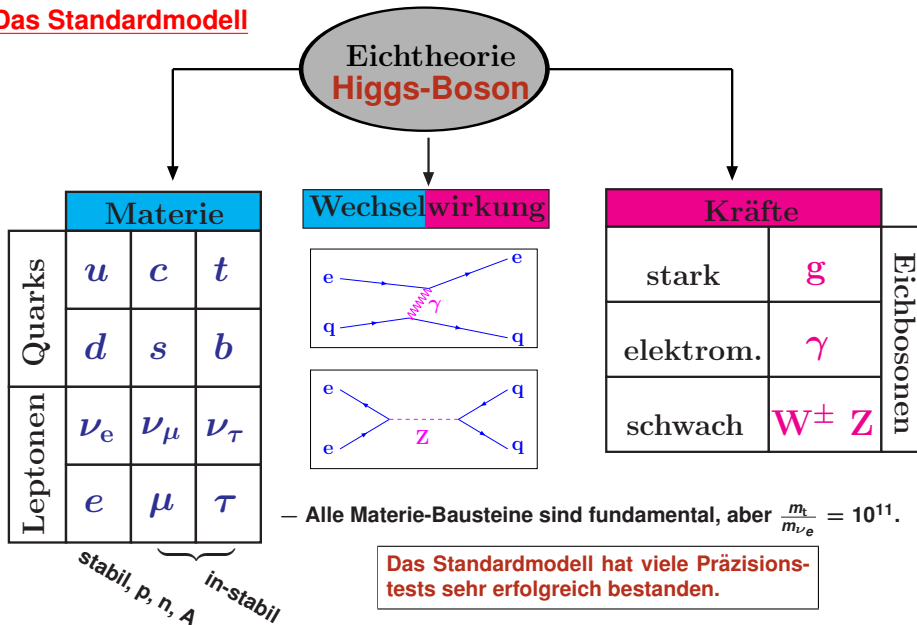
$m$  = Masse,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit = 1

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

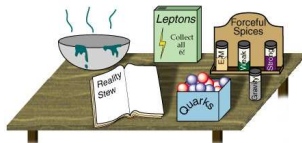


## Das Standardmodell



## Die elementaren Materiebausteine

– Unser heutiges Bild der Rezeptur



der Natur, ist:

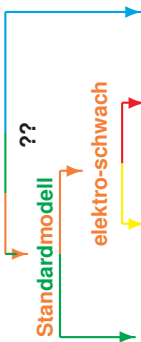
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III

- 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 (fast die Masse eines Gold-Atoms) 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, vorhersagt.

**Wir wollen das Massenspektrum erklären können.**

## Die fundamentalen Kräfte

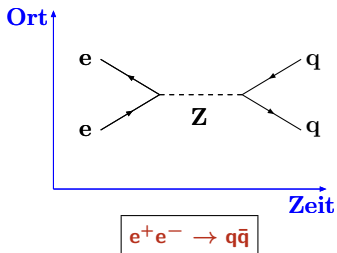
Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV]	el. Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton? G ?	0	0	$10^{-38}$ ( $\infty$ )
schwach	Kernzerfall	Z $W^{\pm}$	91.2 80.4	0 $\pm 1$	$10^{-5}$ ( $10^{-3}$ ) fm
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon $\gamma$	0	0	$10^{-2}$ ( $\infty$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



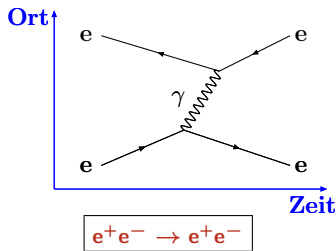
Außer für die Gravitation haben wir eine vereinheitlichte Beschreibung.

## Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



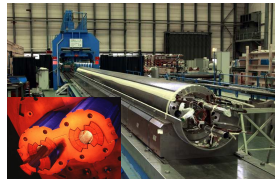
Emission und Absorption



Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertices.

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

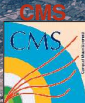
## Die supraleitenden Magnete



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:  $M_H = 100 - 1000$  GeV

## Ein Vergleichsobjekt



590 t

$v=18(620)$  km/h

## Beschleunigung und Teilchenkollisionen



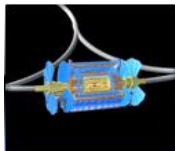
### Cable Car

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

### Ein paar Daten



- 26.6 km Umfang.
- 3300 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++

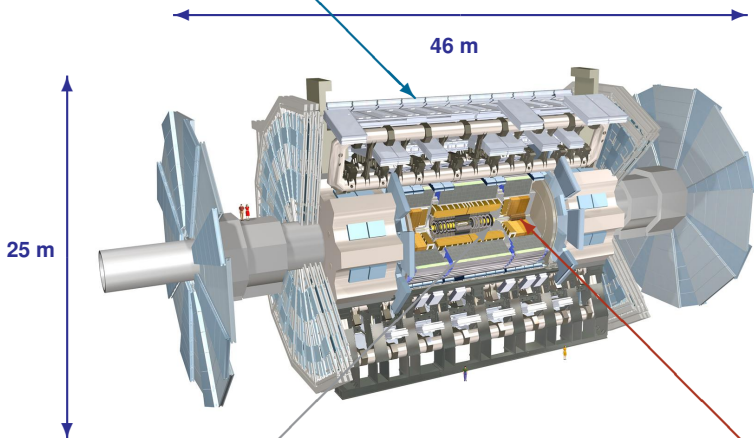
### Eine immense Energiedichte

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



**Die Kollision der Strahlen entspricht der zweier Cable Cars mit  $v=1150 \text{ km/h}=\text{Mach } 0.94$ .**

## Der ATLAS Detektor

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



$M = 7000 \text{ t}$   
 $V = 22580 \text{ m}^3$   
 $\Rightarrow$  ATLAS  
 könnte  
 schwimmen.

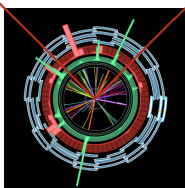
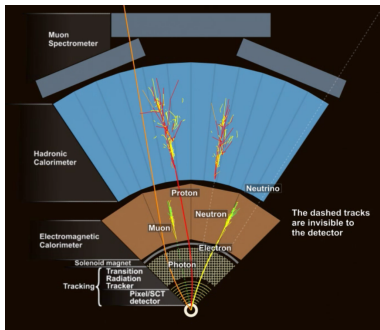


Beteiligungen

Semi Conductor Tracker (SCT), ( $H \rightarrow b\bar{b}$ )

Hadron End Cap (HEC), ( $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ )

## 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.

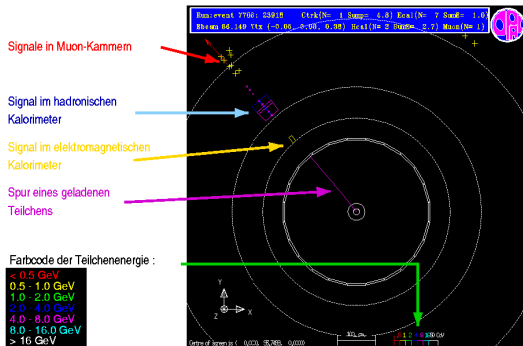
- Die jährliche Rohdatenmenge: 1000  à 2 TB.

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

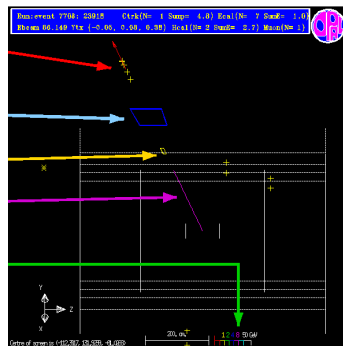


## Zur Interpretation der Ereignisbilder im OPAL Detektor

### Blick entlang der Strahlachse (xy)



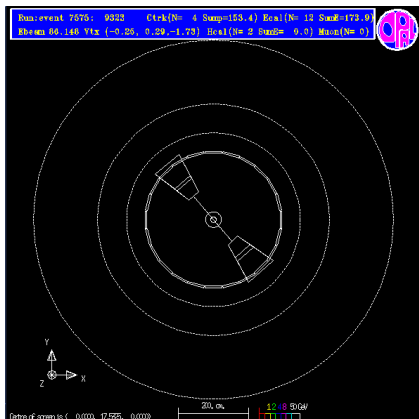
### Blick quer zur Strahlachse (rz)



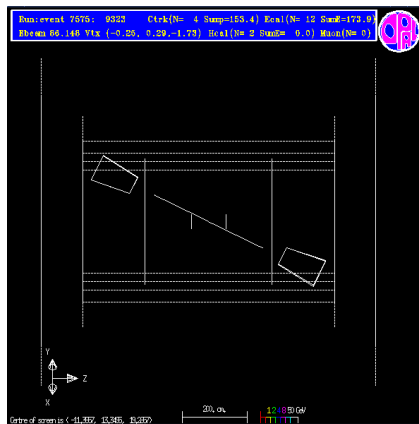
Verschieden Teilchen hinterlassen verschiedene Muster im Detektor.

# Ein Ereignis $Z \rightarrow e^+e^-$

## Blick entlang der Strahlachse



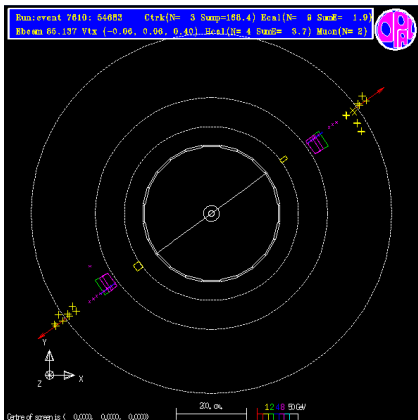
## Blick quer zur Strahlachse



**Eine Spur und reichlich Energie im elektromagnetischen Kalorimeter.**

# Ein Ereignis $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

## Blick entlang der Strahlachse



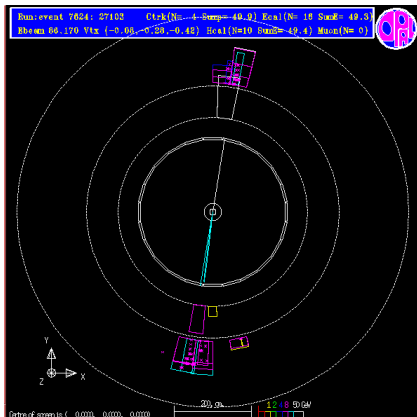
## Blick quer zur Strahlachse



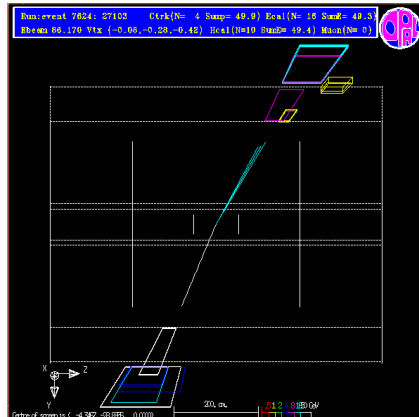
Die einfachste Signatur - zwei geladene Teilchen die ins äußere Muonsystem gelangen.

# Ein Ereignis $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$

## Blick entlang der Strahlachse



## Blick quer zur Strahlachse

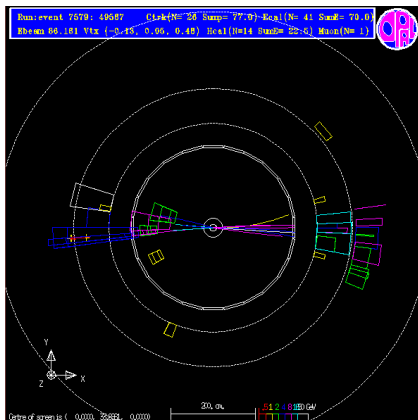


– Weitere Zerfallskanäle:  $\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau$ ,  $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ . Alle Kombinationen sind möglich.

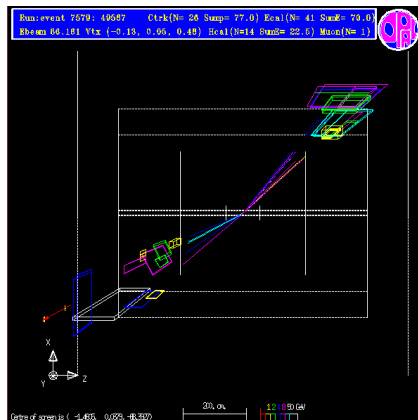
**Dies ist ein komplizierterer gemischter  $\tau\tau \rightarrow h 3h$  Zerfall.**

## Ein Ereignis $Z \rightarrow q\bar{q}$

### Blick entlang der Strahlachse



### Blick quer zur Strahlachse



– In ca. 10% der Fälle ist der Zerfall  $Z \rightarrow q\bar{q}g$ , und es gibt es einen dritten Jet.

**Dieser Zerfallskanal ist am häufigsten und am schwersten zu rekonstruieren.**

## Reflexionen am Ende einer kurzen Einführung

### Vor dem Vortrag



COSMOLOGY MARCHES ON



### Danach!



**Ich hoffe Sie sind jetzt motiviert selber Hand anzulegen.**

## Eine unvollständige Liste interessanter Links



**Dieser Vortrag**

<http://www.mpp.mpg.de/~nisius/welcomeaux/lehre.html>



**Die Startseite der Deutschen Teilchenphysik**

<http://www.teilchenphysik.de>

**Ein Lernprogramm der Universität Erlangen**

<http://www.solstice.de/teilchenphysik/>



**Eine Sammlung von Porträts vieler bekannter Physiker/innen**

<http://th.physik.uni-frankfurt.de/jr/portraits.html>

**Danke für die Aufmerksamkeit ... und ... viel Spass beim Weiterlesen.**