

Netzwerk Teilchenwelt: Hands on Particle Physics

Klaus Zenker

DESY Hamburg



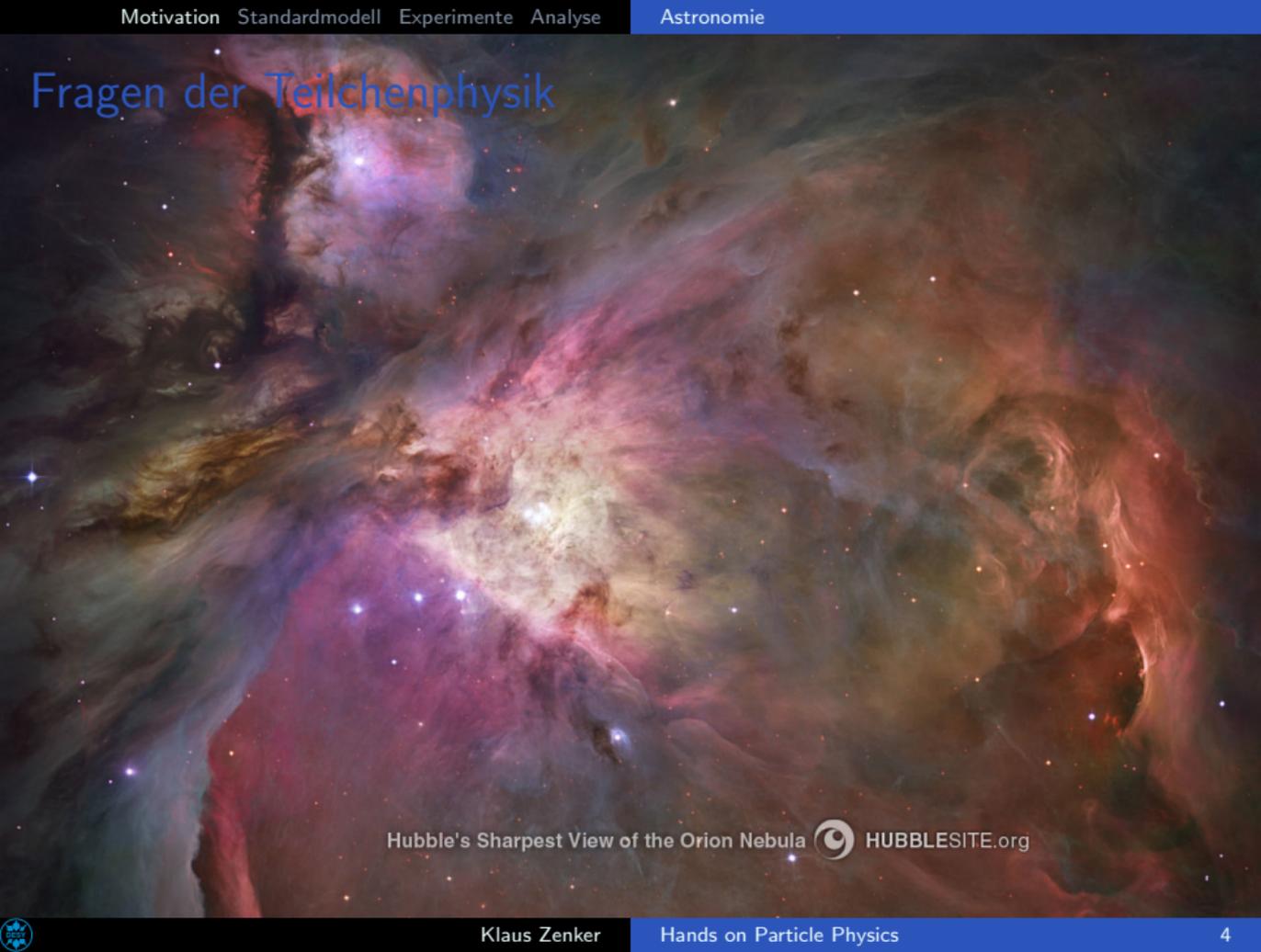
Ablauf des Tages

1. Einführung in die Teilchenphysik
2. Einführung in die Detektorphysik
3. Datenanalyse
 - 3.1 Einführung
 - 3.2 Übung Teilchensignaturen im Detektor
 - 3.3 Übung Ereignistypen
 - 3.4 Auswertung der ATLAS Daten
4. Auswertung
5. Quiz

Teilchenphysik

- Eine Einführung -

Fragen der Teilchenphysik



Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org



Fragen der Teilchenphysik

Was ist Materie?

- ▶ Woraus bestehen wir?
- ▶ Woraus besteht das Universum?

Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

Fragen der Teilchenphysik

Was ist Materie?

- ▶ Woraus bestehen wir?
- ▶ Woraus besteht das Universum?

Welchen Gesetzmäßigkeiten unterliegt die Materie?

- ▶ Wie ist das Universum entstanden?
- ▶ Wie wird sich das Universum entwickeln...?

Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

Fragen der Teilchenphysik

Was ist Materie?

- ▶ Woraus bestehen wir?
- ▶ Woraus besteht das Universum?

Welchen Gesetzmäßigkeiten unterliegt die Materie?

- ▶ Wie ist das Universum entstanden?
- ▶ Wie wird sich das Universum entwickeln...?

Ziel der Teilchenphysik

Verständnis der fundamentalen Bausteine und Kräfte des Universums

Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

The Big Bang

15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

1 second

10^{-10} seconds

10^{-34} seconds

10^{-43} seconds

10^{32} degrees

10^{27} degrees

10^{15} degrees

10^{10} degrees

10^9 degrees

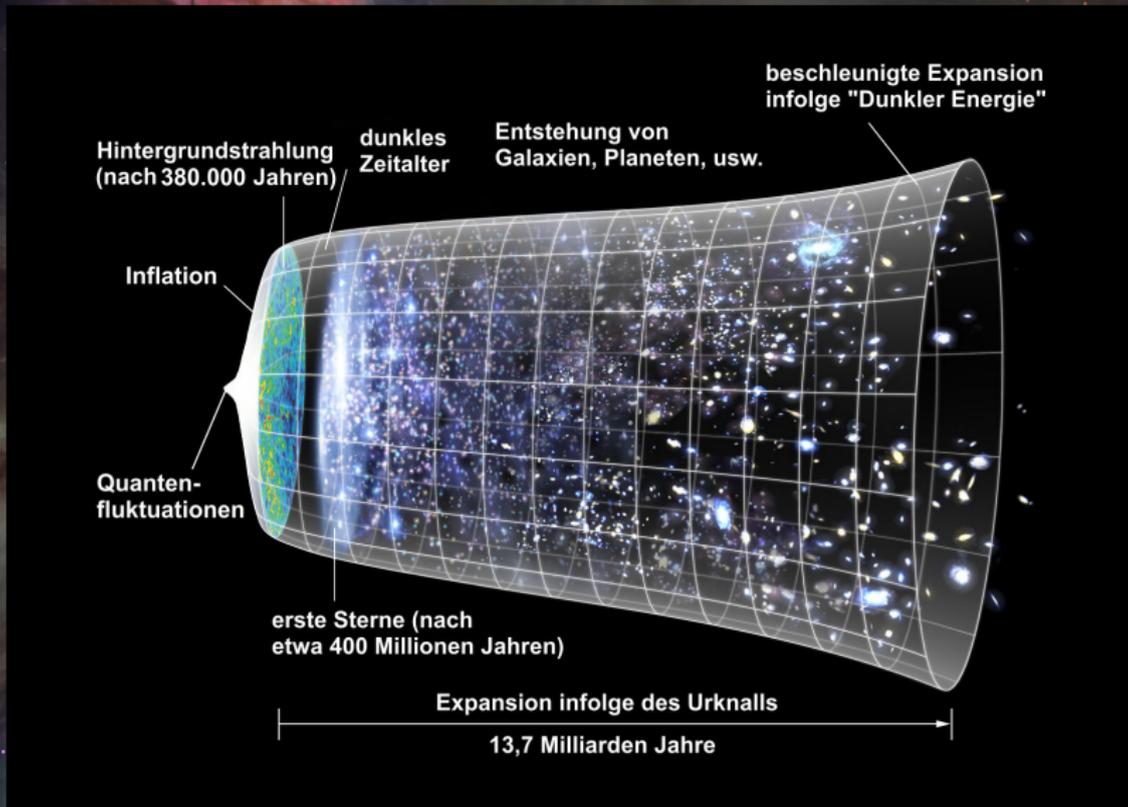
6000 degrees

18 degrees

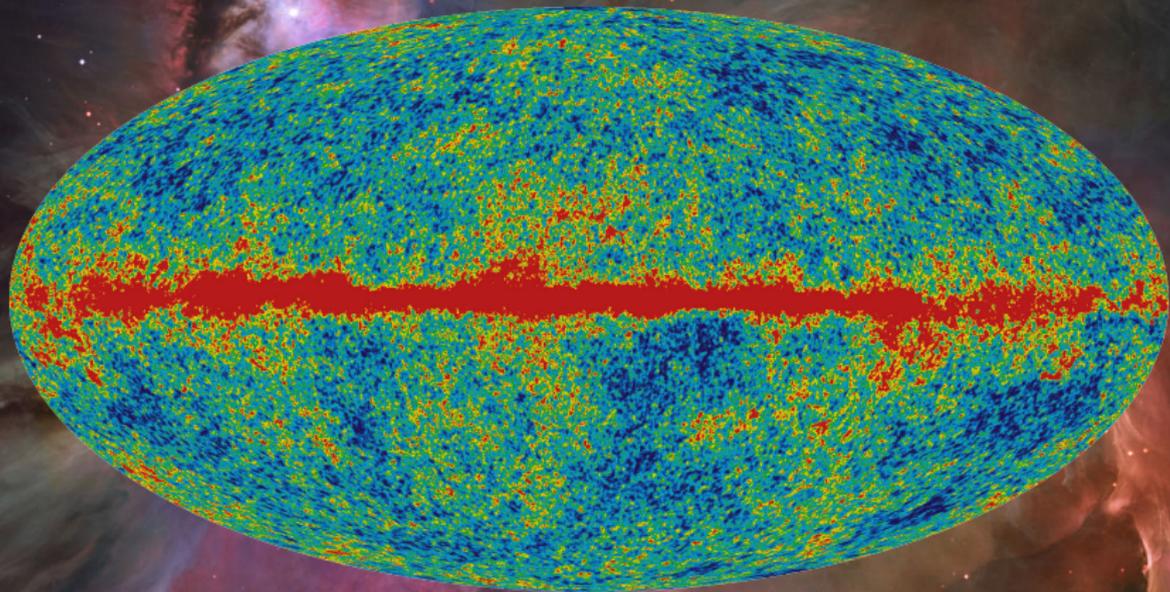
3 degrees K

- radiation
- particles
- heavy particles carrying the weak force
- quark
- anti-quark
- electron
- positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- hydrogen
- deuterium
- helium
- lithium

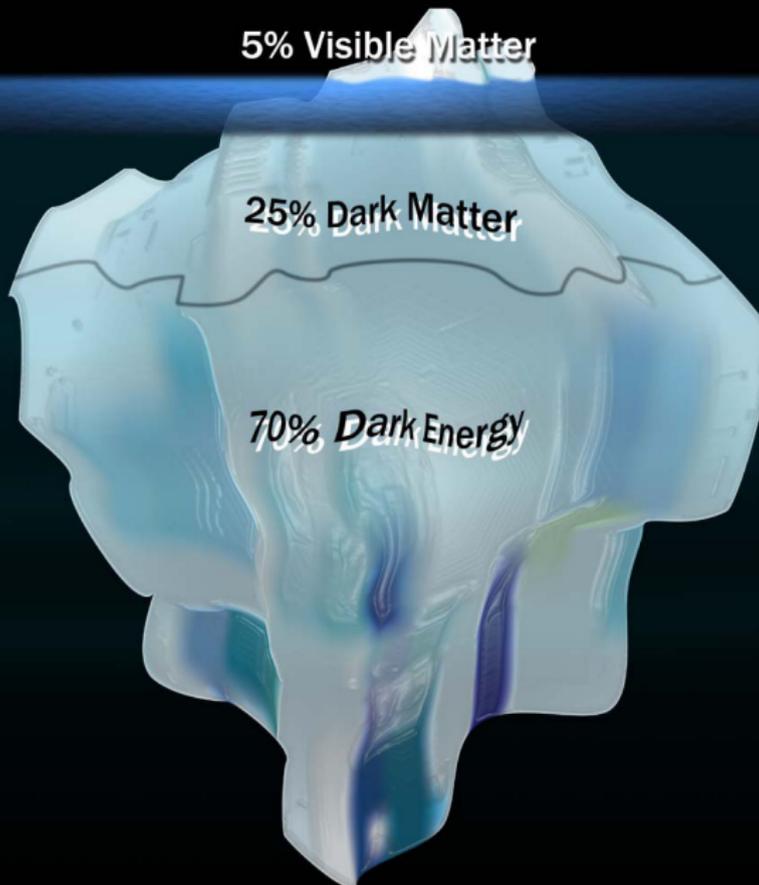
DI-9112020_03



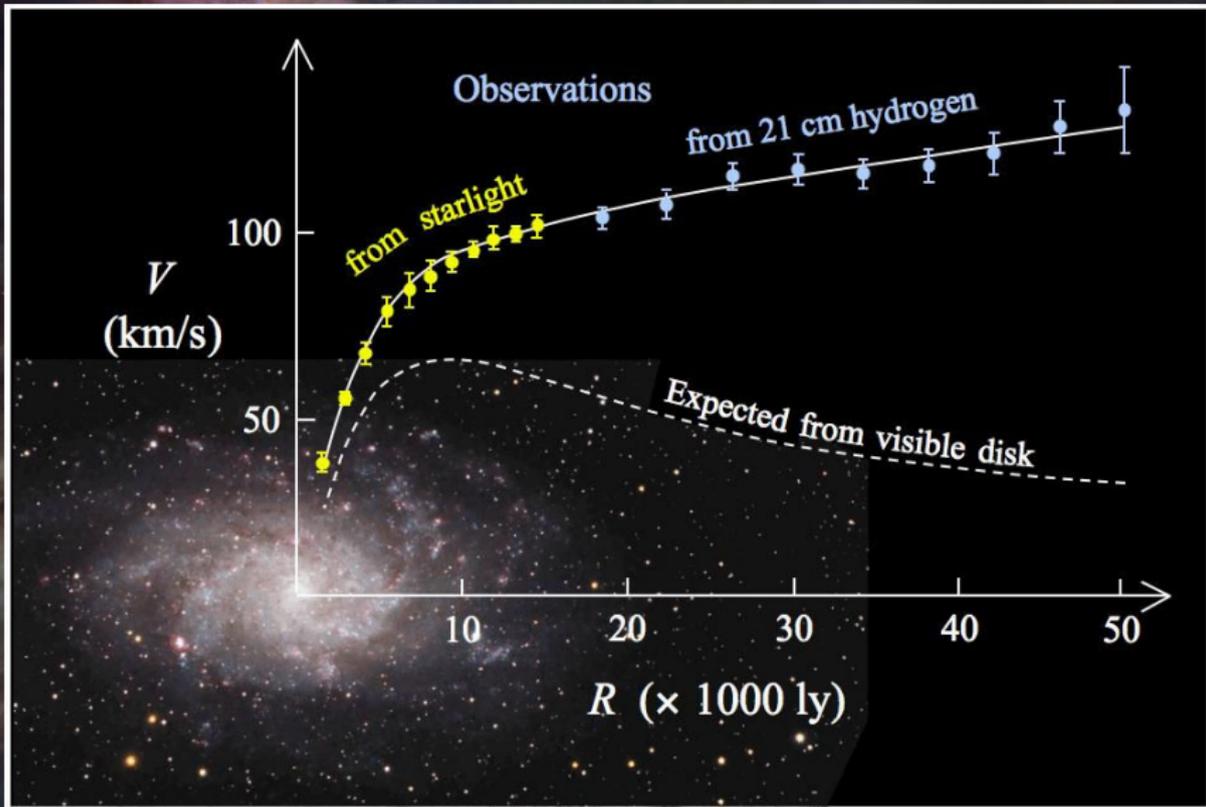
Hubble's Sharpest view of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org



Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org



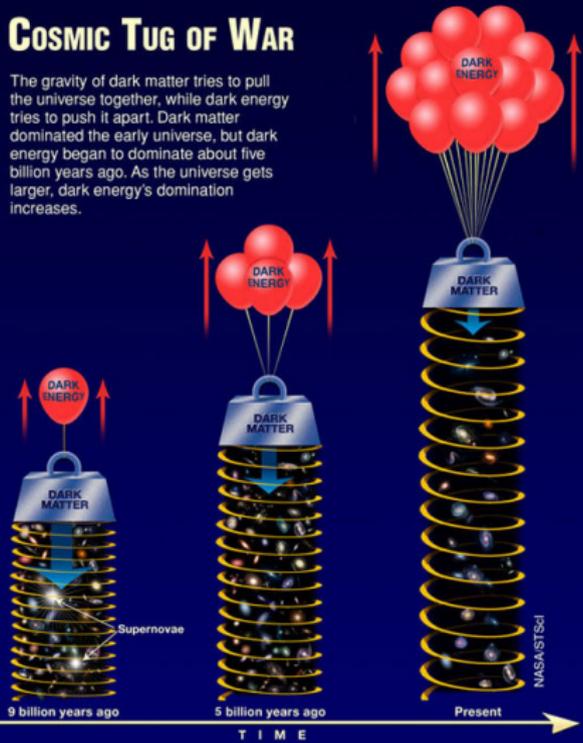
.org



Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

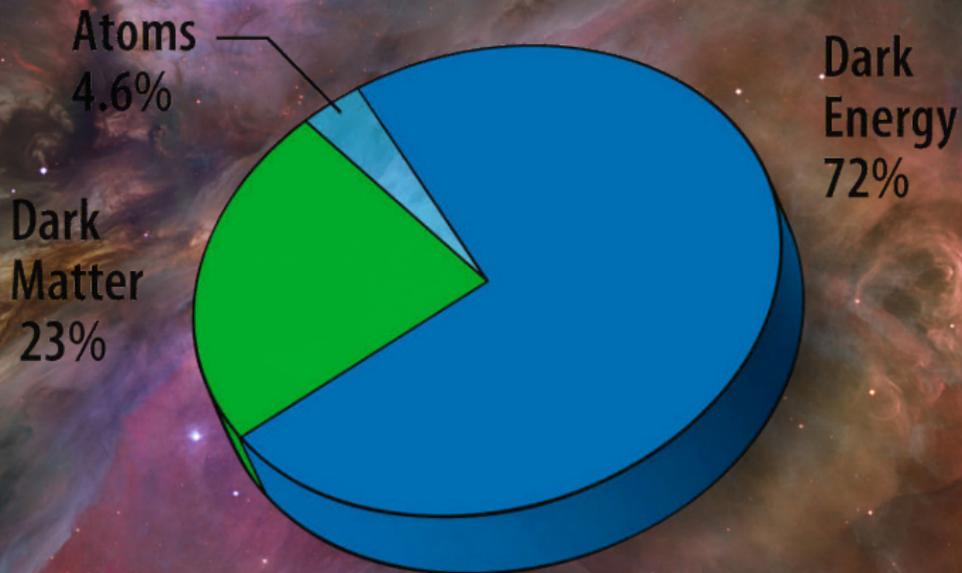
COSMIC TUG OF WAR

The gravity of dark matter tries to pull the universe together, while dark energy tries to push it apart. Dark matter dominated the early universe, but dark energy began to dominate about five billion years ago. As the universe gets larger, dark energy's domination increases.



Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org





Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

Zusammenfassung

Was können wir beschreiben...?

Bestandteile des Universums:

- ▶ 74 % Dunkle Energie
- ▶ 22 % Dunkle Materie
- ▶ 4 % sichtbare Materie → STANDARDMODELL

Hubble's Sharpest View of the Orion Nebula  HUBBLESITE.org

Zusammenfassung

Was können wir beschreiben...?

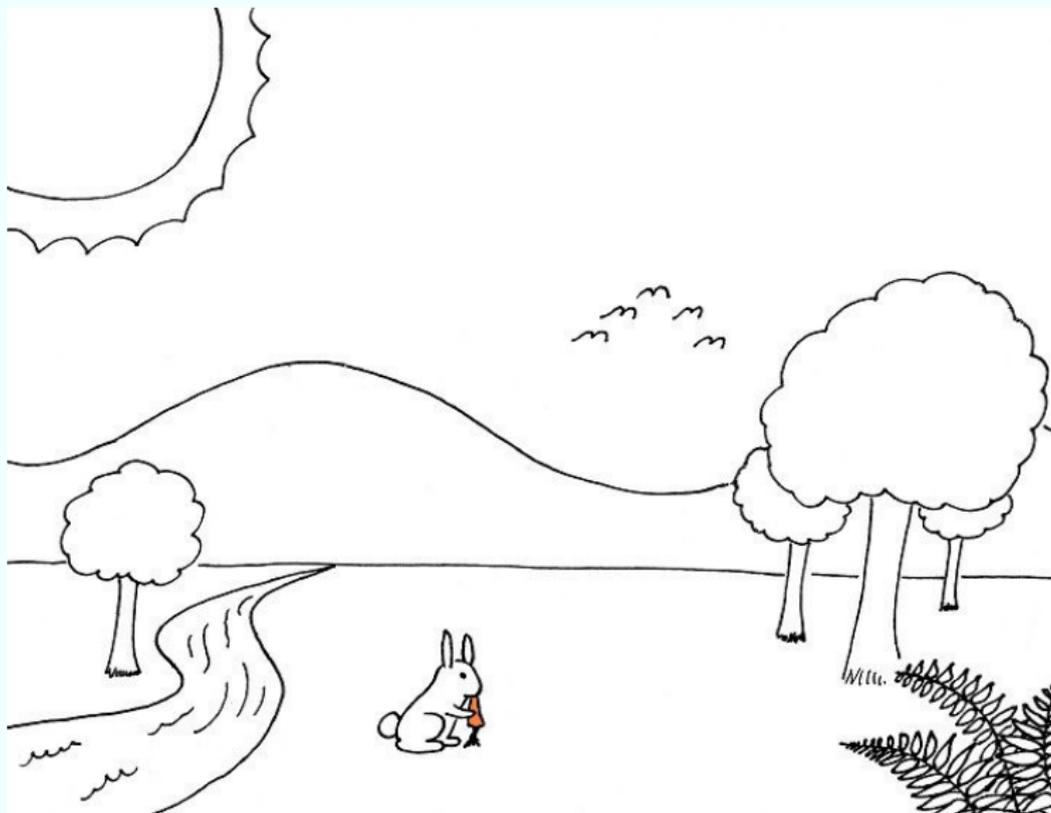
Bestandteile des Universums:

- ▶ 74 % Dunkle Energie
- ▶ 22 % Dunkle Materie
- ▶ 4 % sichtbare Materie → STANDARDMODELL

ABER:

- ▶ bei hohen Energien macht das Standardmodell unphysikalische Vorhersagen
- das Standardmodell kann nicht den Urknall erklären (sondern nur Prozesse, die kurz nach dem Urknall stattfanden)
- ▶ keine Erklärung im Standardmodell für die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie
- ▶ ...

Auf dem Weg zum Standardmodell



Auf dem Weg zum Standardmodell

$1\text{H} + 1\text{H} \rightarrow 2\text{H} + e^+ + \nu$
 $2\text{H} + 1\text{H} \rightarrow 3\text{He} + \gamma$
 $3\text{He} + 3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + 2\text{H}$

$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$
 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
 $\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$
 $\nabla \times \mathbf{B} - \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mathbf{j}$

$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
 $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$

$\mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mathbf{j}$
 $f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$

$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = C$
 $n \text{CO}_2 + n \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + n \text{O}_2$

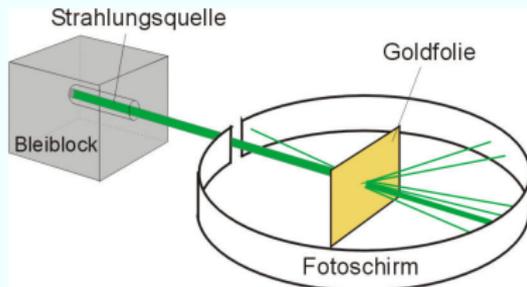
$[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V] \psi = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$

$f_1(x, y) = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \dots$
 $f_2(x, y) = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \dots$

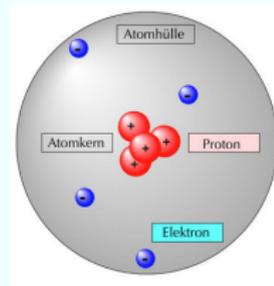
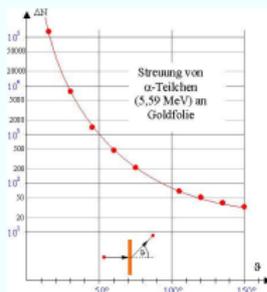
$\frac{\partial}{\partial t} \mu_i + \dots$
 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$

Die innere Struktur des Atoms

Rutherford's Streuexperiment (1910):

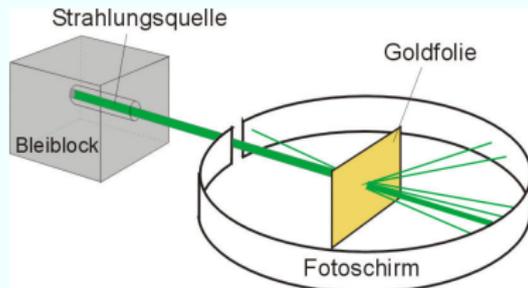


- ▶ Streuung von α -Strahlung (He-Kerne) an einer Goldfolie
- ▶ Messung der Winkelverteilung der gestreuten Strahlung



Die innere Struktur des Atoms

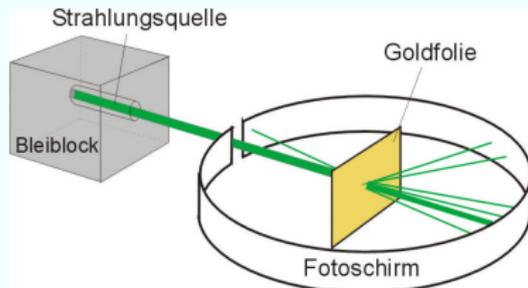
Rutherfords Streuexperiment (1910):



- ▶ Streuung von α -Strahlung (He-Kerne) an einer Goldfolie
 - ▶ Messung der Winkelverteilung der gestreuten Strahlung
-
- ▶ Atom: Elektronenhülle, Atomkern
 - ▶ Atomkern: Protonen, Neutronen
 - ▶ Proton: stabil
 - ▶ Neutron: $n \rightarrow e^- + p$

Die innere Struktur des Atoms

Rutherfords Streuexperiment (1910):



Strahlungsquelle

Bleiblock

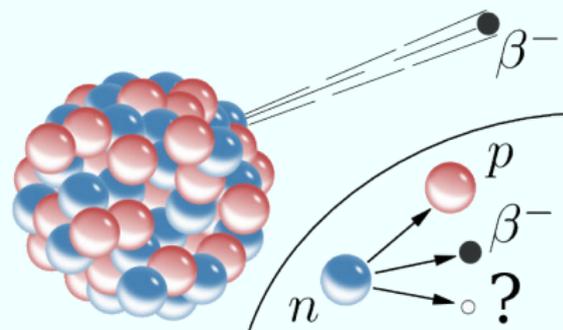
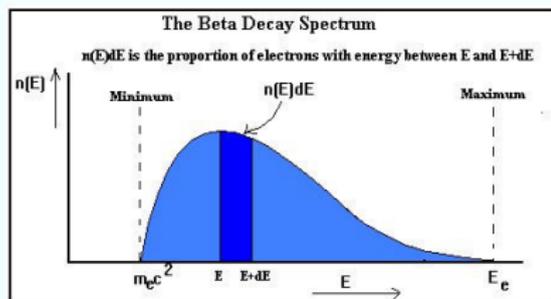
Goldfolie

Fotoschirm

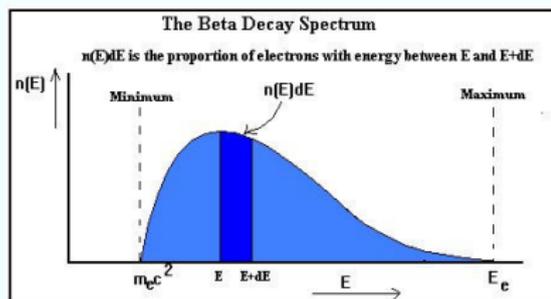
- ▶ Streuung von α -Strahlung (He-Kerne) an einer Goldfolie
- ▶ Messung der Winkelverteilung der gestreuten Strahlung

- ▶ Atom: Elektronenhülle, Atomkern
- ▶ Atomkern: Protonen, Neutronen
- ▶ Proton: stabil
- ▶ Neutron: $n \rightarrow e^- + p??$

Der Neutronenzerfall

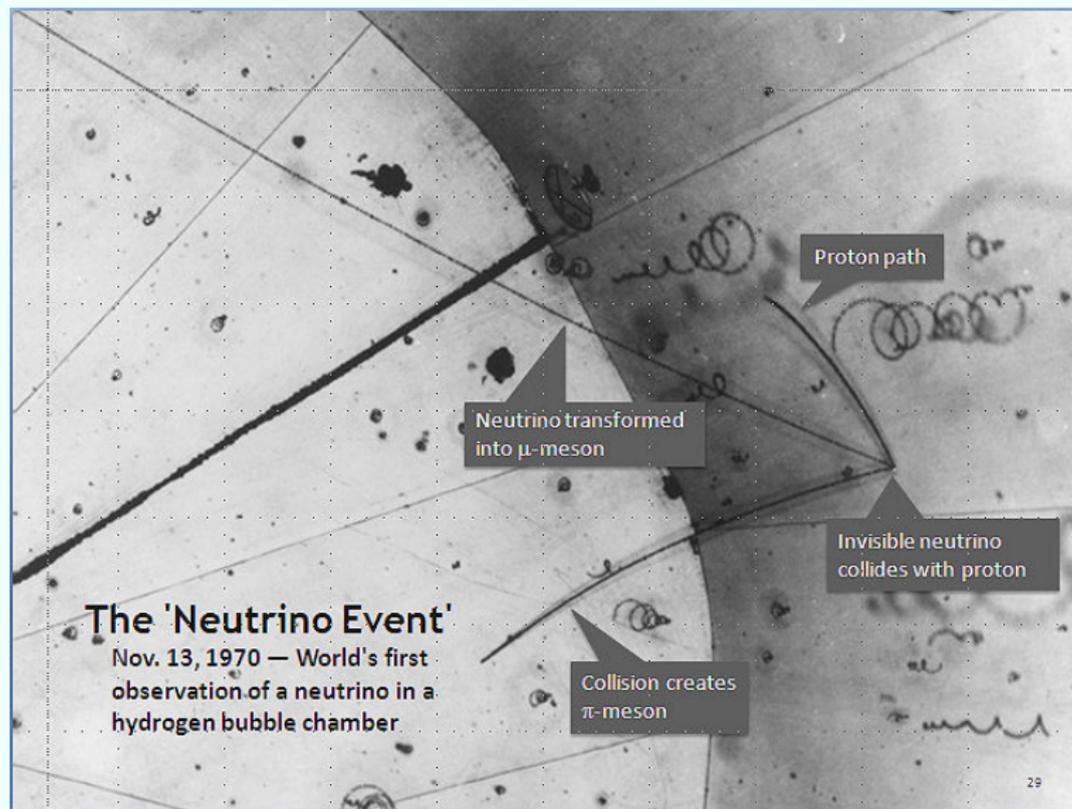


Der Neutronenzerfall

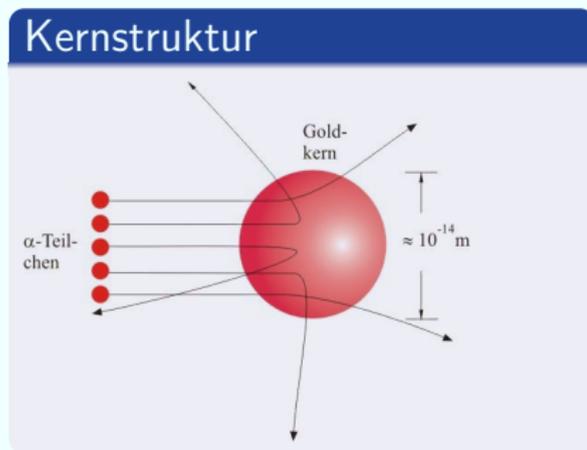


- ▶ Reines und Cowan entdecken 1956 an einem Kernreaktor das Neutrino
- ▶ Reines erhält dafür 1995 den Physiknobelpreis

Der Neutronenzerfall

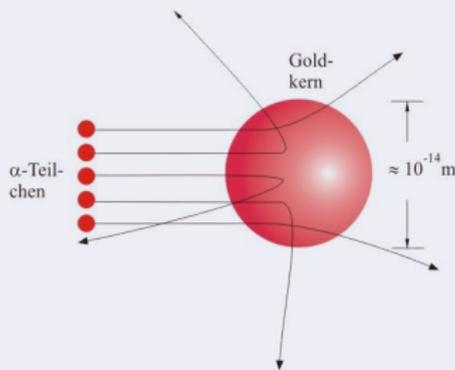


Die innere Struktur...

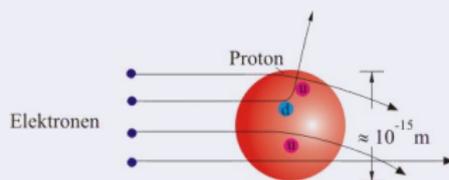


Die innere Struktur...

Kernstruktur



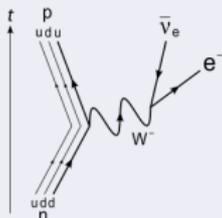
Protonstruktur



Zwei unterschiedliche Quarks
(up- und down-Quark)

- ▶ Protonbestandteile: uud
- ▶ Neutronbestandteile: udd

Neutronenzerfall



- ▶ ein Quark (d-Quark) des Protons wandelt sich in ein anderes um (u-Quark)
- ▶ dabei entsteht ein Elektron und ein Neutrino
- ▶ es findet eine Wechselwirkung statt:
schwache Wechselwirkung

Reicht das...?

Alle Elementarteilchen bis jetzt:

- ▶ Elektron e^- und Neutrino ν_e
- ▶ up- und down-Quark

→ damit kann man alle sichtbare Materie erklären!

Reicht das...?

Alle Elementarteilchen bis jetzt:

- ▶ Elektron e^- und Neutrino ν_e
- ▶ up- und down-Quark

→ damit kann man alle sichtbare Materie erklären!



Reicht das...?

Alle Elementarteilchen bis jetzt:

- ▶ Elektron e^- und Neutrino ν_e
- ▶ up- und down-Quark

→ damit kann man alle sichtbare Materie erklären!



Gibt es noch andere Elementarteilchen?

1936: Entdeckung eines weiteren Elementarteilchens – Myon μ

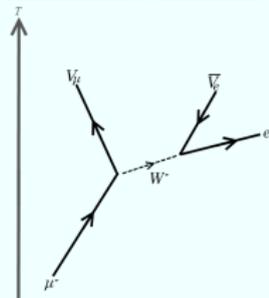
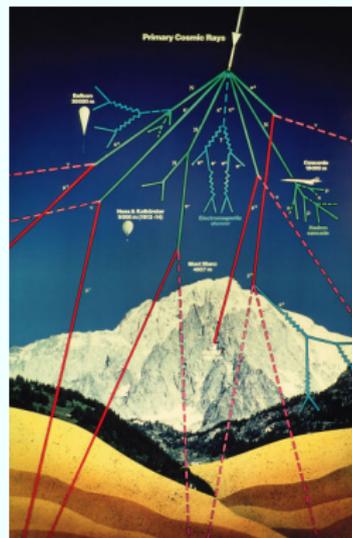
- ▶ Produktion durch kosmische Höhenstrahlung
- ▶ das Myon hat eine Lebensdauer von $1,83 \mu\text{s}$ und zerfällt:

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

Eigenschaften:

- ▶ Masse: 200 mal schwerer als ein Elektron
- ▶ Ladung: gleiche Ladung wie ein Elektron (einfach negativ)

Myon = schweres Elektron



Die bekannten Elementarteilchen

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV			
charge →	$\frac{2}{3}$			
spin →	$\frac{1}{2}$			
name →	u up			
Quarks	4.8 MeV			
	$-\frac{1}{3}$			
	$\frac{1}{2}$			
	d down			
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV		
	0	0		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino		
0.511 MeV	105.7 MeV			
-1	-1			
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			
	e electron	μ muon		

Die bekannten Elementarteilchen

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name	u up	c charm	t top	
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	
Leptons				

Teilchen der 2. und 3. Generation

- ▶ gleiche Eigenschaften wie 1. Generation
- ▶ Masse steigt von Generation zu Generation
- ▶ instabil

Die bekannten Elementarteilchen

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name	u up	c charm	t top	
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	d down	s strange	b bottom	
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	
	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	
Leptons	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	
	-1	-1	-1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	e electron	μ muon	τ tau	

Teilchen der 2. und 3. Generation

- ▶ gleiche Eigenschaften wie 1. Generation
- ▶ Masse steigt von Generation zu Generation
- ▶ instabil

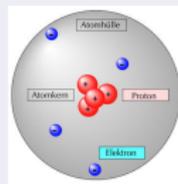
Antiteilchen

- ▶ prinzipiell gleiche Eigenschaften
- ▶ alle Ladungen sind gespiegelt
- ▶ $e^- \leftrightarrow e^+$, $u \leftrightarrow \bar{u}$

Die Kräfte des Standardmodells

Elektromagnetische Kraft

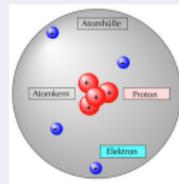
- ▶ Kraft zw. elektrisch geladenen Teilchen
- alle außer Neutrinos
- ▶ Vermittelt durch das Photon γ
- ▶ *Elektrizität, Chemie, ...*



Die Kräfte des Standardmodells

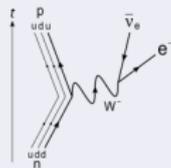
Elektromagnetische Kraft

- ▶ Kraft zw. elektrisch geladenen Teilchen
- alle außer Neutrinos
- ▶ Vermittelt durch das Photon γ
- ▶ *Elektrizität, Chemie, ...*



Schwache Kraft

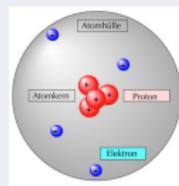
- ▶ schwache Ladung ist Grundlage der Interaktion
- alle Teilchen haben einen schwach geladenen Anteil
- ▶ Vermittelt durch W^{\pm} - und Z -Austauschteilchen
- ▶ *Kernzerfälle → Radioaktivität*



Die Kräfte des Standardmodells

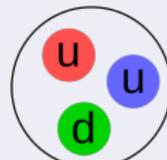
Elektromagnetische Kraft

- ▶ Kraft zw. elektrisch geladenen Teilchen
- alle außer Neutrinos
- ▶ Vermittelt durch das Photon γ
- ▶ *Elektrizität, Chemie, ...*

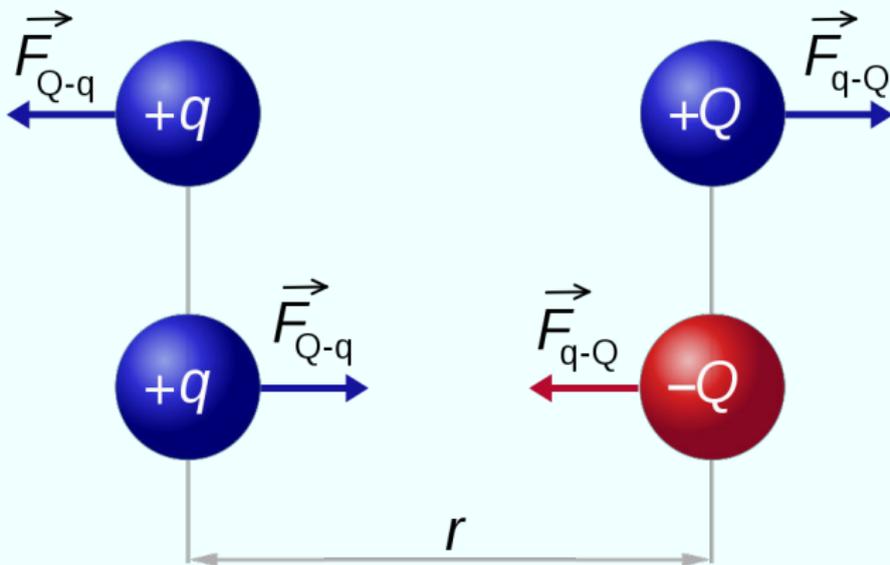


Starke Kraft

- ▶ Farbladung ist Grundlage der Interaktion
- alle Quarks tragen eine Farbladung
- ▶ Vermittelt durch Gluonen g
- ▶ *Bindung der Hadronen (qqq) und Mesonen ($q\bar{q}$)*

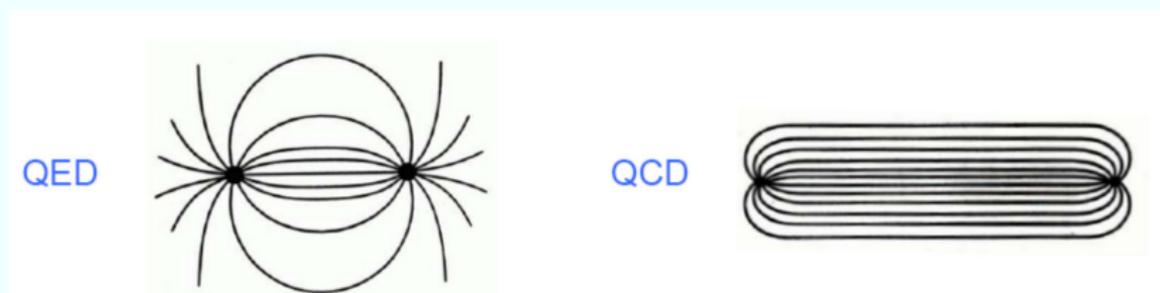


Das besondere der starken Kraft – Confinement



$$|\vec{F}_{Q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times Q|}{r^2}$$

Das besondere der starken Kraft – Confinement



- ▶ Feldlinien der QED haben unendliche Reichweite
- ▶ Feldlinien der QCD formen einen dichten Flussschlauch

Grund: Gluonen können Selbstwechselwirken

Confinement

Ab einem Abstand von $x > 1 \text{ fm}$ (\sim Protonradius) ist es energetisch günstiger neue $q\bar{q}$ -Paare zu bilden, als den Farbschlauch zu verlängern!

Das Standardmodell

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

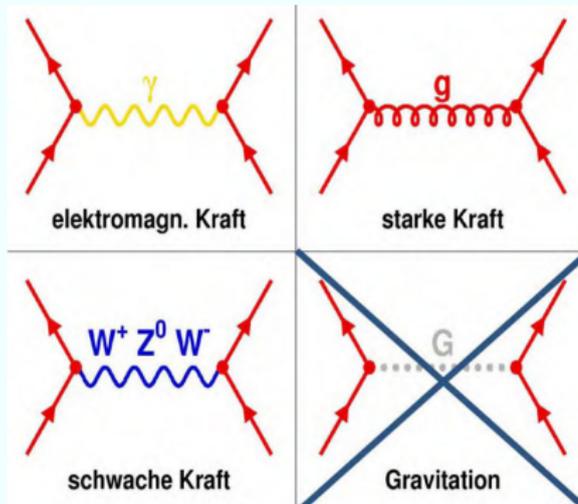
- ▶ Einheitliche Beschreibung der
 - ▶ fundamentalen Teilchen und ihrer Eigenschaften
 - ▶ fundamentalen Kräfte

Das Standardmodell

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)



Das Standardmodell

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV ⁰
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV [±]
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W weak force

Bosons (Forces)

- ▶ Einheitliche Beschreibung der
 - ▶ fundamentalen Teilchen und ihrer Eigenschaften
 - ▶ fundamentalen Kräfte (außer Gravitation)
- ▶ Beruht auf
 - ▶ Spezieller Relativitätstheorie
 - ▶ Quantenmechanik
- ▶ Liefert die zur Zeit genaueste Beschreibung der Natur

Das Standardmodell

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	
-1	-1	-1	+1	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

- ▶ Einheitliche Beschreibung der
 - ▶ fundamentalen Teilchen und ihrer Eigenschaften
 - ▶ fundamentalen Kräfte (außer Gravitation)
- ▶ Beruht auf
 - ▶ Spezieller Relativitätstheorie
 - ▶ Quantenmechanik
- ▶ Liefert die zur Zeit genaueste Beschreibung der Natur

Problem

Teilchen sind nicht masselos ↔

$$m(t) = 170 \cdot m(p) = 340000 \cdot m(e^-)$$

Der Higgsmechanismus



Physik: Das Higgsfeld füllt als Hintergrundfeld das gesamte Universum.

Analogie: Ein Raum voller Physiker bei einer Cocktailparty.

Der Higgsmechanismus



Physik: Ein ursprünglich masseloses Feld erhält durch WW mit dem Hintergrundfeld Masse.

Analogie: Ein berühmter Physiker betritt den Raum. Um ihn bildet sich eine Menschentraube und er kann sich nur langsam durch den Raum bewegen.

Der Higgsmechanismus



Physik: Das Higgsteilchen ist der Anregungszustand des Hintergrundfeldes.

Analogie: Jemand streut ein Gerücht in den Raum. Es bildet sich wieder eine Mensentraube während sich das Gerücht verbreitet.

Der Higgsmechanismus

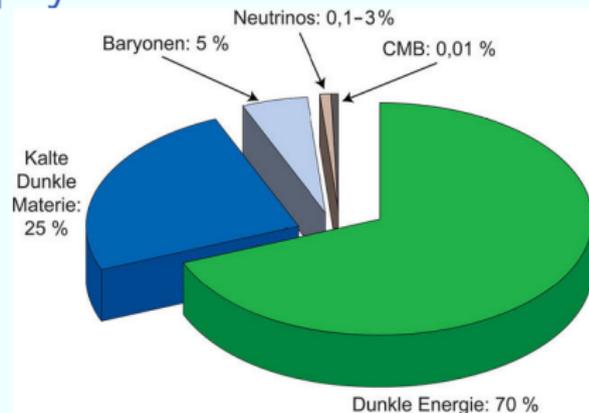


Physik: Masselose Teilchen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.

Analogie: Der arme Student der an dem Abend die Getränke verteilen muss, bewegt sich schnell und ungehindert durch den Raum.

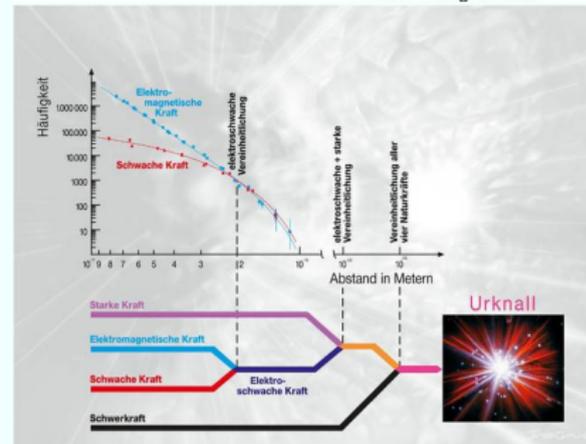
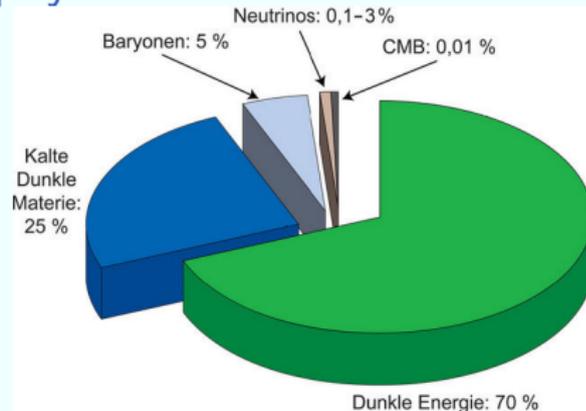
Aktuelle Fragen der Teilchenphysik

- ▶ Was ist die Ursache für Masse und gibt es das Higgs-Teilchen?
- ▶ Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- ▶ Was ist dunkle Energie/Materie?
- ▶ Kann die Gravitation durch Teilchenaustausch beschrieben werden?



Aktuelle Fragen der Teilchenphysik

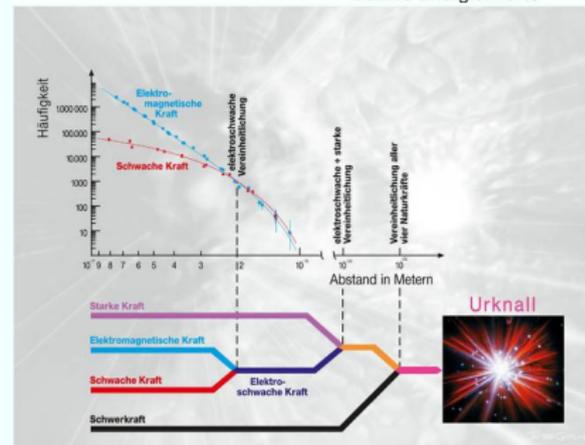
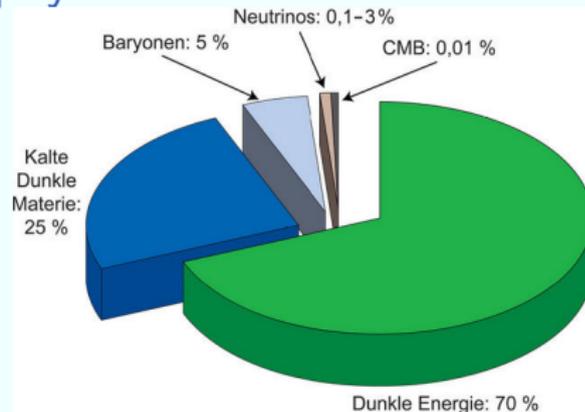
- ▶ Was ist die Ursache für Masse und gibt es das Higgs-Teilchen?
- ▶ Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- ▶ Was ist dunkle Energie/Materie?
- ▶ Kann die Gravitation durch Teilchenaustausch beschrieben werden?



Aktuelle Fragen der Teilchenphysik

- ▶ Was ist die Ursache für Masse und gibt es das Higgs-Teilchen?
- ▶ Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie?
- ▶ Was ist dunkle Energie/Materie?
- ▶ Kann die Gravitation durch Teilchenaustausch beschrieben werden?

Physik am LHC!



Pause

Wie arbeiten Naturwissenschaftler?

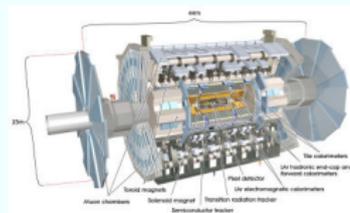


Theoretischer Physiker

- ▶ Entwickelt Theorien:
 - ▶ Standardmodell
 - ▶ SUSY
- ▶ **Vorhersage** von Teilchen (Observablen)



Experimentalphysiker



- ▶ **Messung** von Teilchen (Observablen)

Das Zusammenspiel

Theorie muss durch Experimente überprüft und inspiriert werden.

Einheiten der Teilchenphysik

Größe

1 fm = 1 Femtometer ("Fermi") = 10^{-15} m (~ 1 Proton)
 (100 μ m = 100.000.000.000 fm ~ 1 Haar)

Energie

1 ElektronVolt	=	1 eV	
1 MegaElektronVolt	=	1 MeV	= 1.000.000 eV
1 GigaElektronVolt	=	1 GeV	= 1.000.000.000 eV
1 TeraElektronVolt	=	1 TeV	= 1.000.000.000.000 eV

1 TeV

Viel für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig: könnte Taschenlampe (1,6 W) für ganze 0,000.000.1 Sekunden zum Leuchten bringen!

Teilchenbeschleuniger

Warum brauchen wir Beschleuniger?

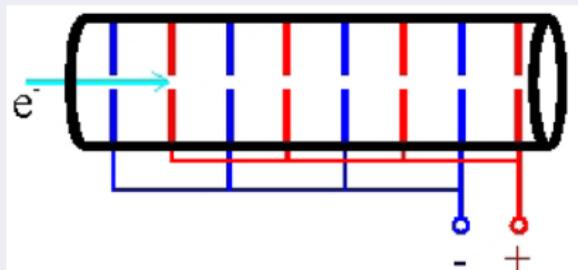
- ▶ Untersuchung instabiler, schwerer Teilchen
- ▶ höhere Statistik als in der kosmischen Höhenstrahlung
- ▶ Erzeugung kontrollierter Bedingungen

Teilchenbeschleuniger

Warum brauchen wir Beschleuniger?

- ▶ Untersuchung instabiler, schwerer Teilchen
- ▶ höhere Statistik als in der kosmischen Höhenstrahlung
- ▶ Erzeugung kontrollierter Bedingungen

Wie funktioniert ein Beschleuniger?



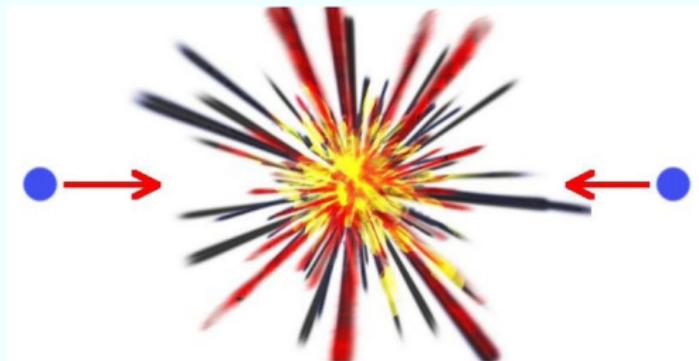
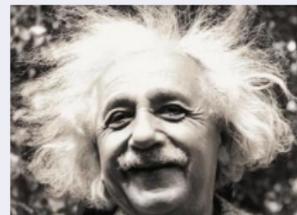
- ▶ Beschleunigen elektrisch geladener Teilchen mittels elektrischer Wechselspannung
- ▶ Einfaches Beispiel: Röhrenfernseher

Teilchenbeschleuniger

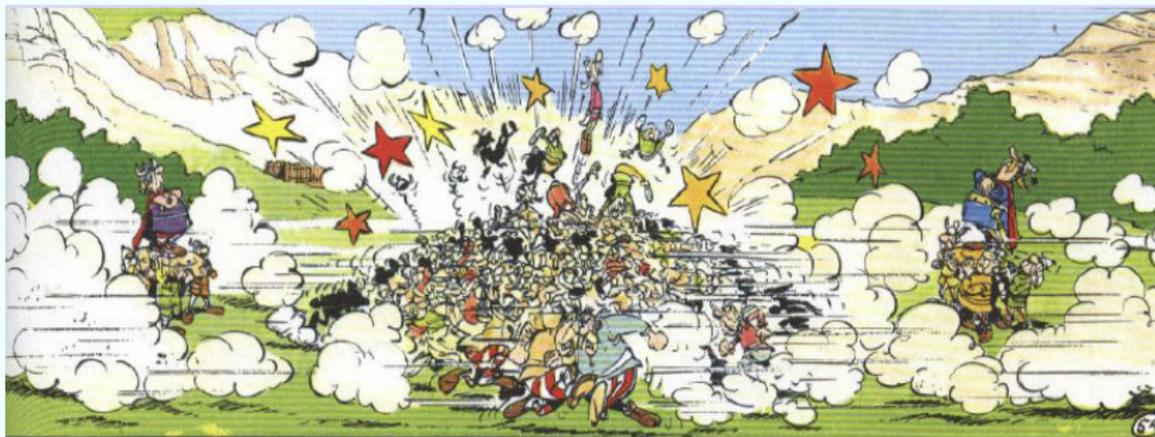
Wie können schwere Teilchen erzeugt werden?

$$E = mc^2$$

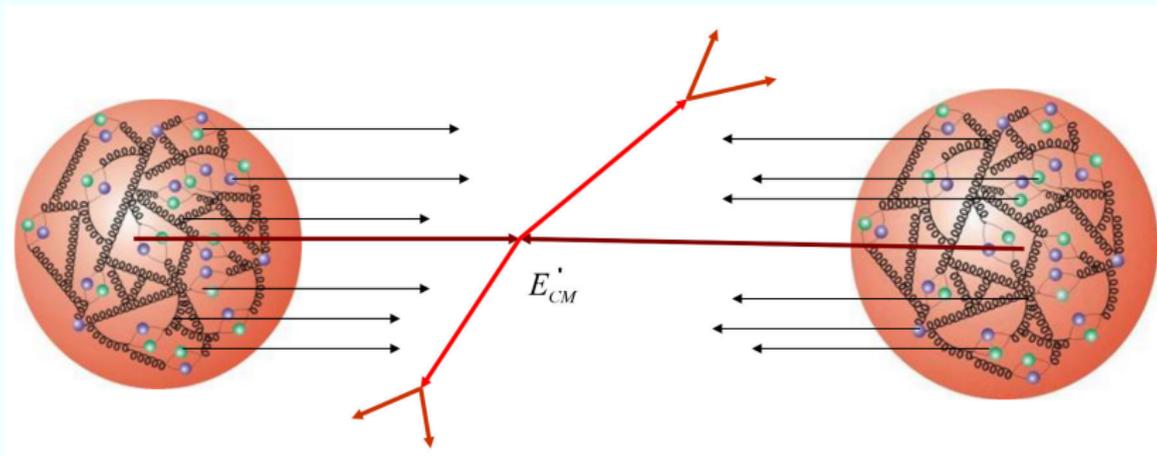
- ▶ Erzeugung eines Teilchens mit Masse m durch Kollision von 2 Teilchen mit Energie $E/2$



Was kollidiert beim LHC?



Was kollidiert beim LHC?



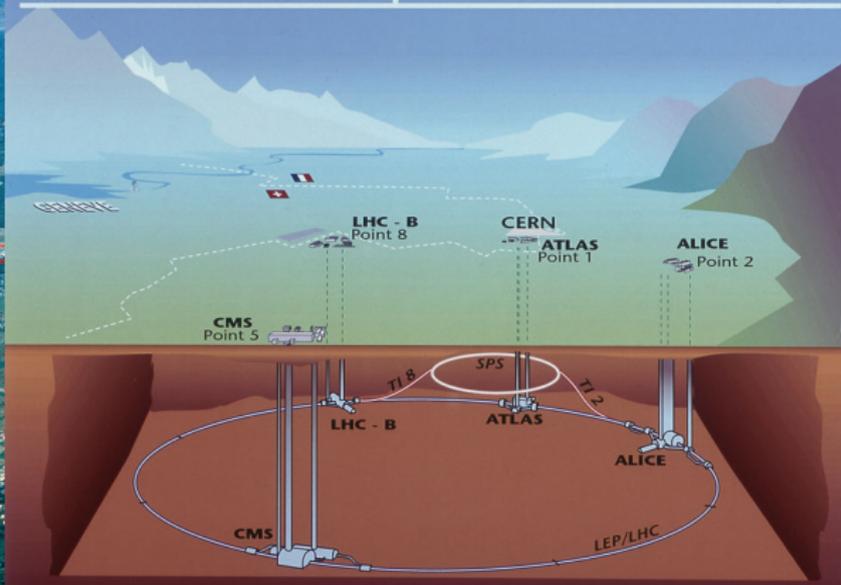
- ▶ Es wechselwirken nur Teile des Protons (die Partonen q, g)
 - ▶ Die Schwerpunktsenergie der kollidierenden Partonen ist viel geringer als die der Protonen
- $E'_{CM} \approx \frac{1}{10} E_{CM}(pp)$
- ▶ Neue Teilchen mit Massen bis zu $\sim 1 \text{ TeV}$ können erzeugt werden



Large Hadron Collider (LHC)

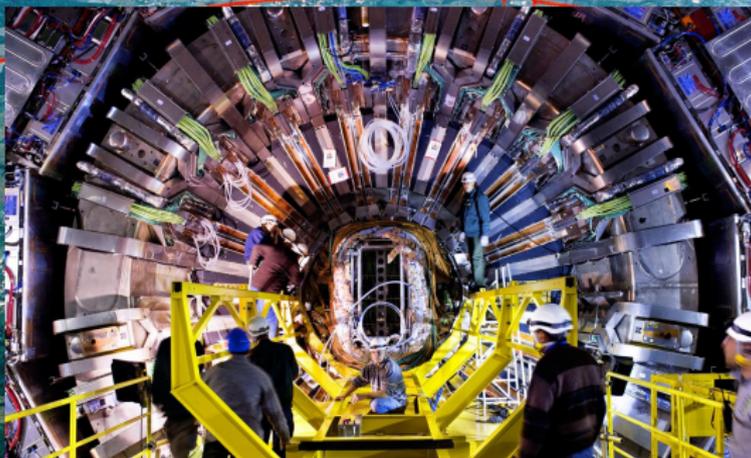
- ▶ Proton-Proton Beschleuniger am CERN
- ▶ Umfang von 27 km
- ▶ Zwischen 50 und 175 m unter der Erde

Overall view of the LHC experiments.



4 Detektoren am LHC

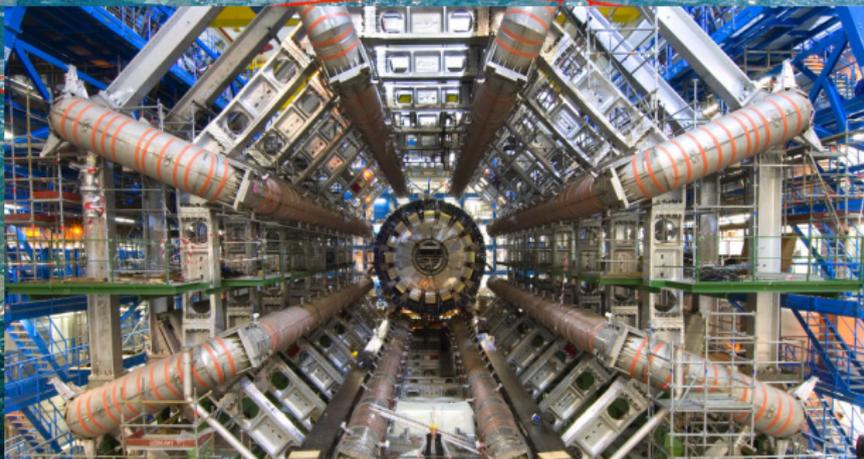
CMS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?



4 Detektoren am LHC

CMS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?

ATLAS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?



4 Detektoren am LHC

CMS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?

ATLAS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?

ALICE Wie sah das Universum in den ersten Sekunden aus?



4 Detektoren am LHC

CMS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?

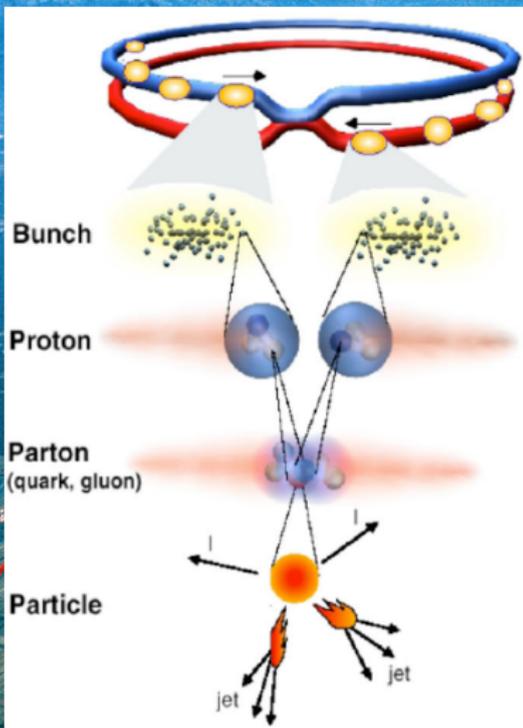
ATLAS Gibt es das Higgs und/oder noch unbekannte Teilchen?

ALICE Wie sah das Universum in den ersten Sekunden aus?

LHCb Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie im Universum?



LHC – Der stärkste Beschleuniger der Welt



Zwei gegenläufige Strahlen

- ▶ 2808 “Teilchenpakete”
- ▶ ca. 100 Milliarden Protonen pro Paket
- ▶ 99,9999991 % der Lichtgeschwindigkeit
- ▶ 11245 Umläufe pro Sekunde
- ▶ Pro Füllung (~ 10 Std.): Strecke Erde – Neptun einmal hin und zurück (≈ 9 Milliarden km)

LHC – Der kälteste Ort der Welt

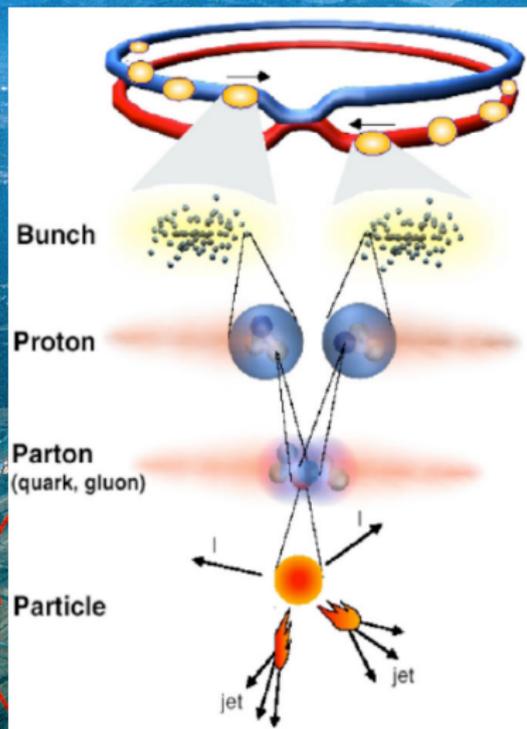
Supraleitende Magnete halten die Protonen auf der Kreisbahn

→ 80.000 mal stärker als das Erdmagnetfeld

▶ Temperatur für Supraleitung:

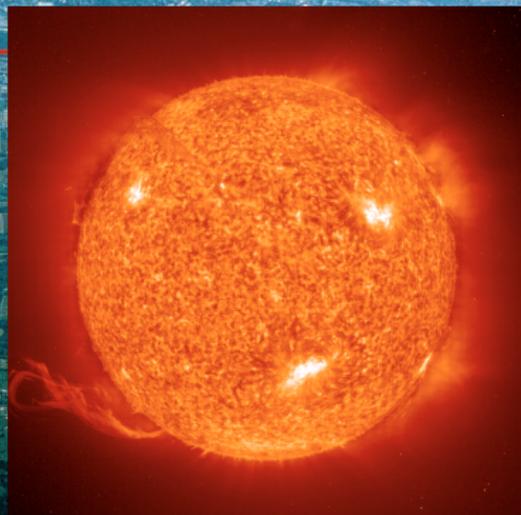
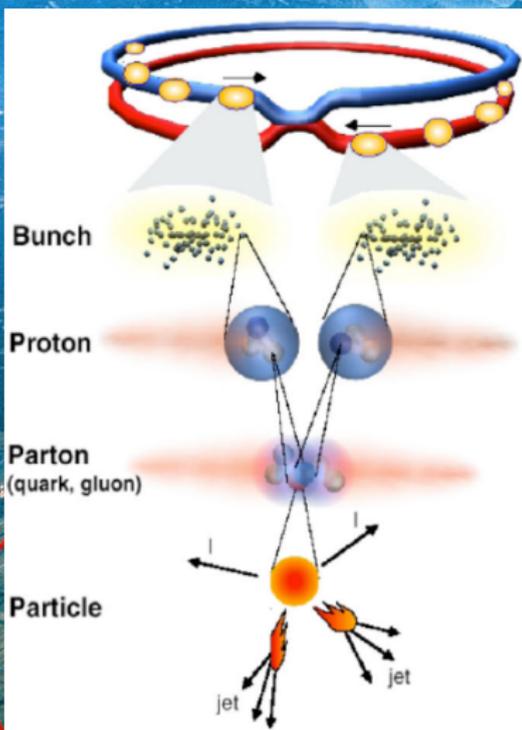
$1,9\text{ K} = -271,3\text{ }^\circ\text{C}$

→ kälter als das Universum (2,7 K)



LHC – Heißer als die Sonne

- ▶ ca. 40.000 Kollisionen pro Sekunde
- ▶ Energie von $7\text{ TeV} \approx 80m_Z$
- ▶ 100.000 mal heißer als im Inneren der Sonne

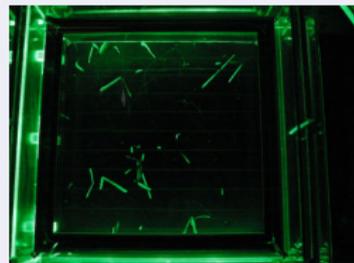


Wie können wir Elementarteilchen vermessen?

Spurdetektor

Geladene Teilchen ionisieren ein Gas:

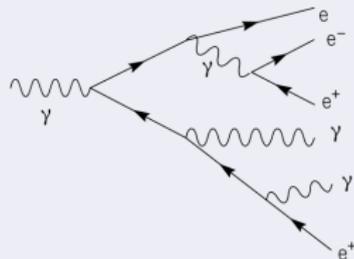
- ▶ Messung von Ladung und Impuls



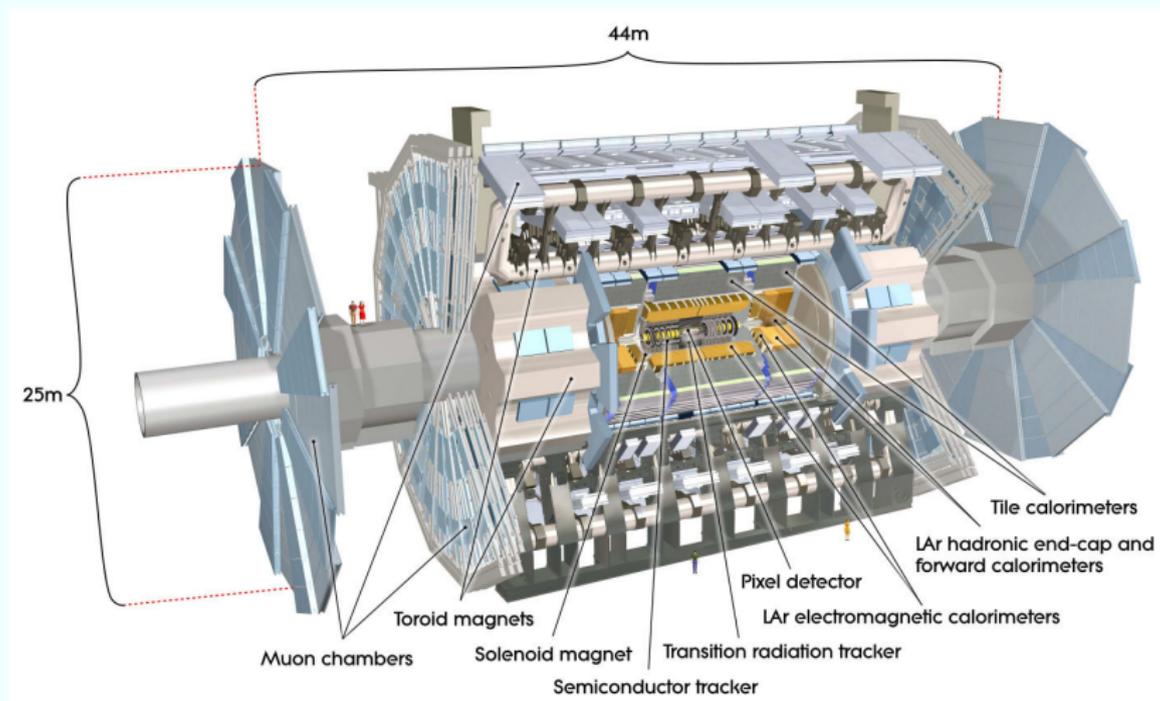
Kalorimeter

Teilchen werden im Material gestoppt:

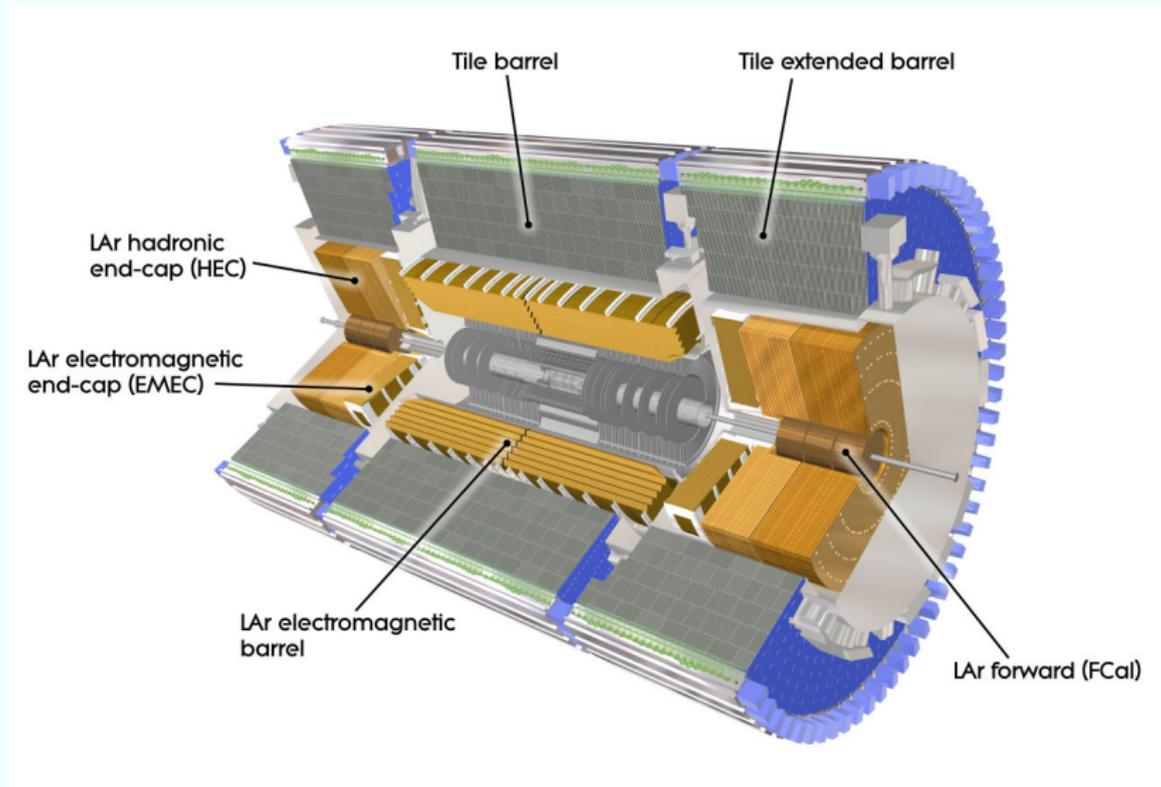
- ▶ dabei werden Sekundärteilchen erzeugt
 - ▶ es bildet sich ein Teilchenschauer mit Lichtblitzen
- Lichtmenge ist proportional zum Energieverlust des Teilchens



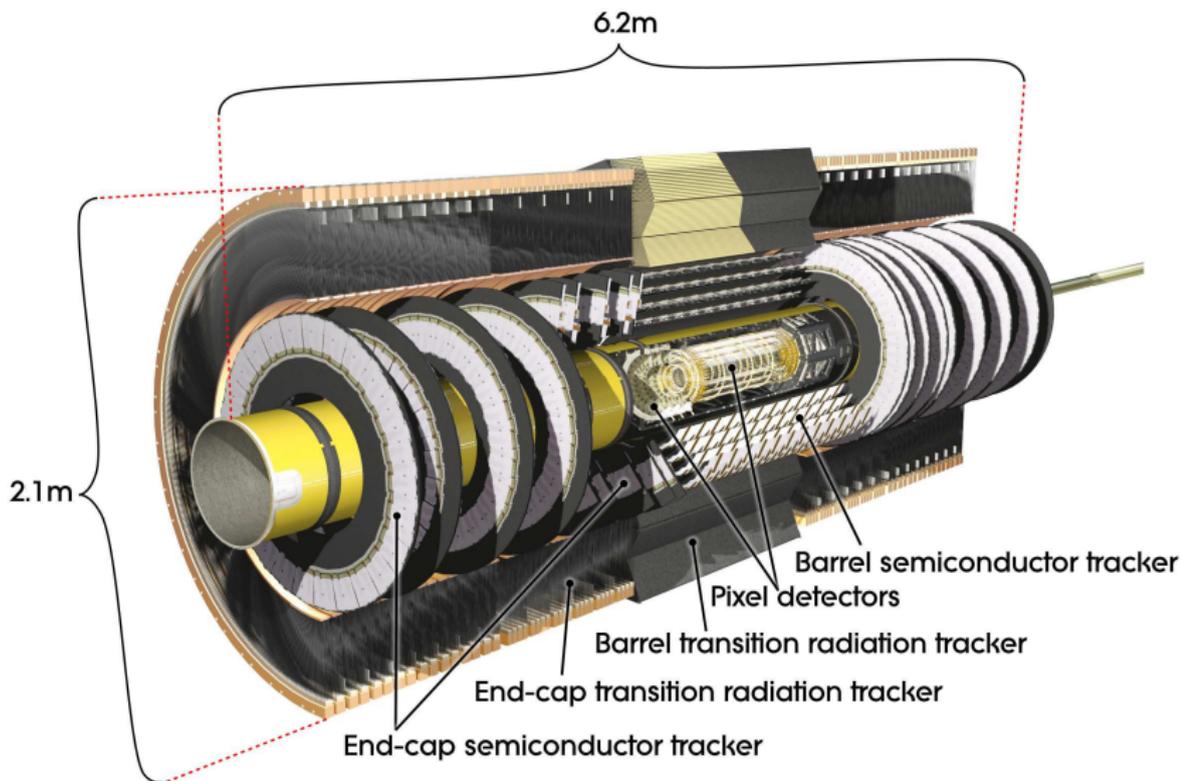
Der ATLAS Detektor



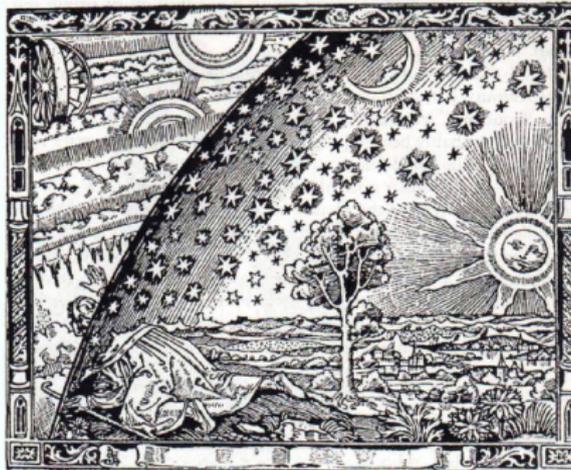
Das Kalorimeter



Der innere Spurdetektor



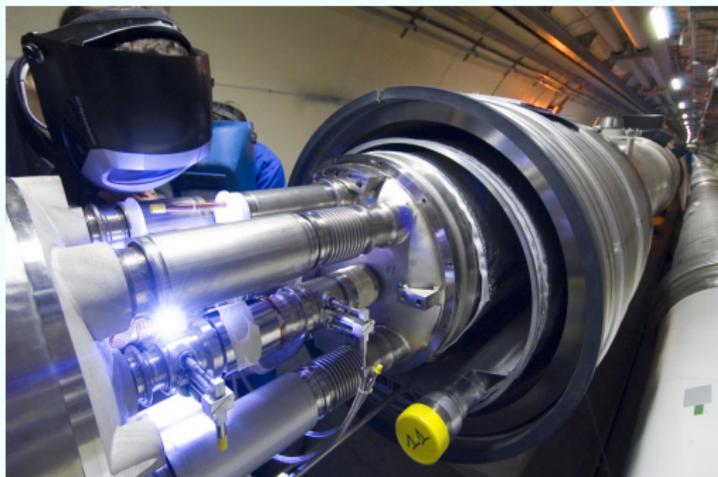
Nutzen der Teilchenphysik?



1) Erkenntnisgewinn

- ▶ Teilchenphysik ist Grundlagenforschung
- ▶ Sucht nach einer fundamentalen Beschreibung der Welt

Nutzen der Teilchenphysik?



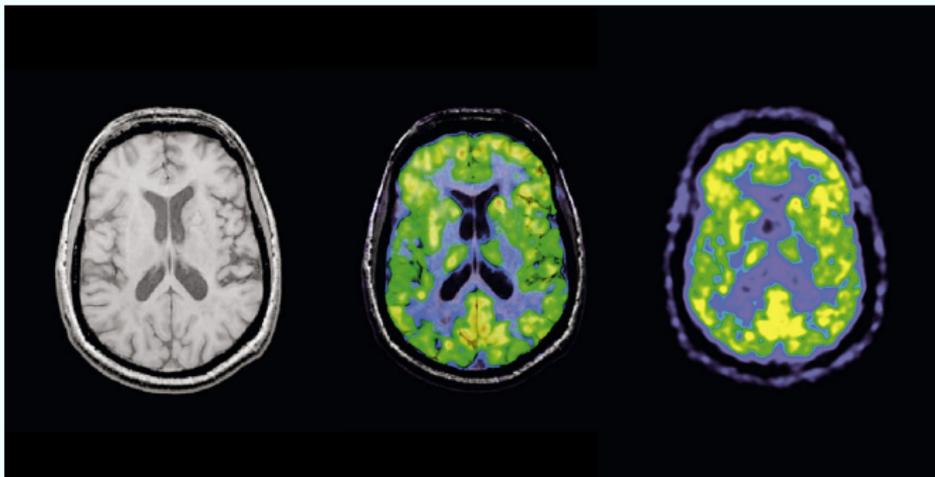
- 1) Erkenntnisgewinn
- 2) Entwicklung neuer Technologien
 - ▶ Beschleuniger und Detektoren an der Grenze des technisch Machbaren
 - Dabei müssen immer wieder neue Lösungen in verschiedensten Aufgabengebieten gesucht werden

Nutzen der Teilchenphysik?



- 1) Erkenntnisgewinn
- 2) Entwicklung neuer Technologien
- 3) Neuartige Methoden der Datenverarbeitung
 - ▶ aktuell entstehen jährlich mehrere Petabyte Daten durch die LHC Experimente → Grid-Computing
 - im Zuge dessen wurde am CERN das www entwickelt

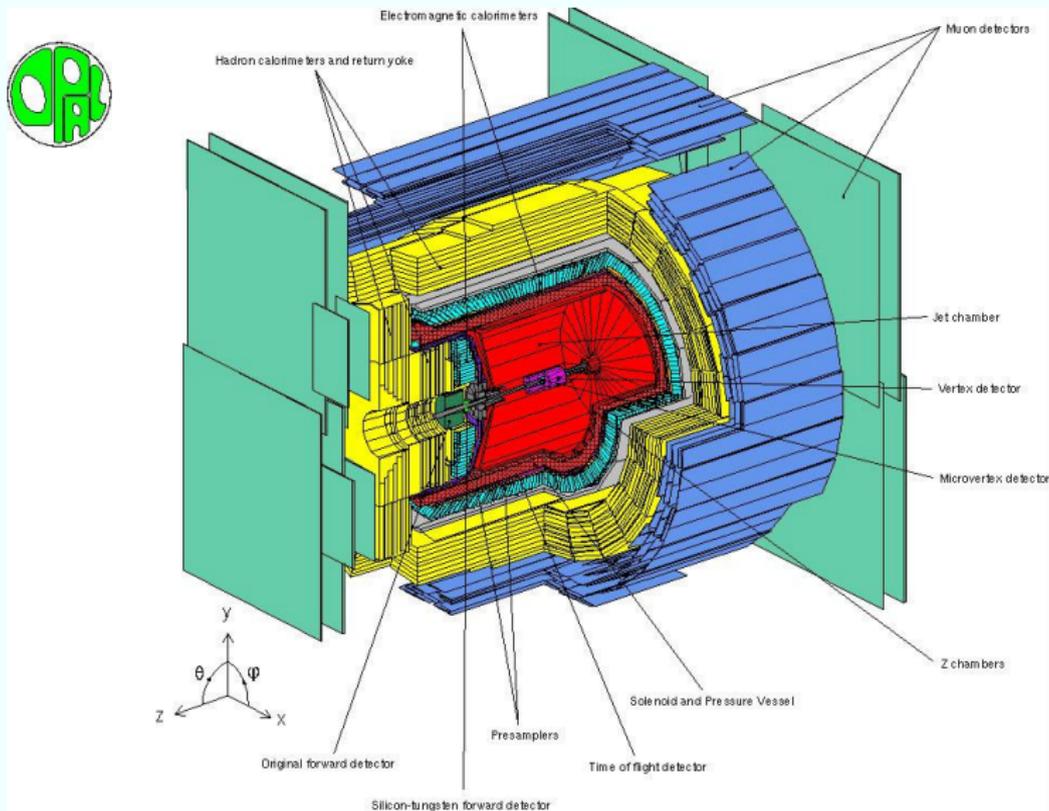
Nutzen der Teilchenphysik?



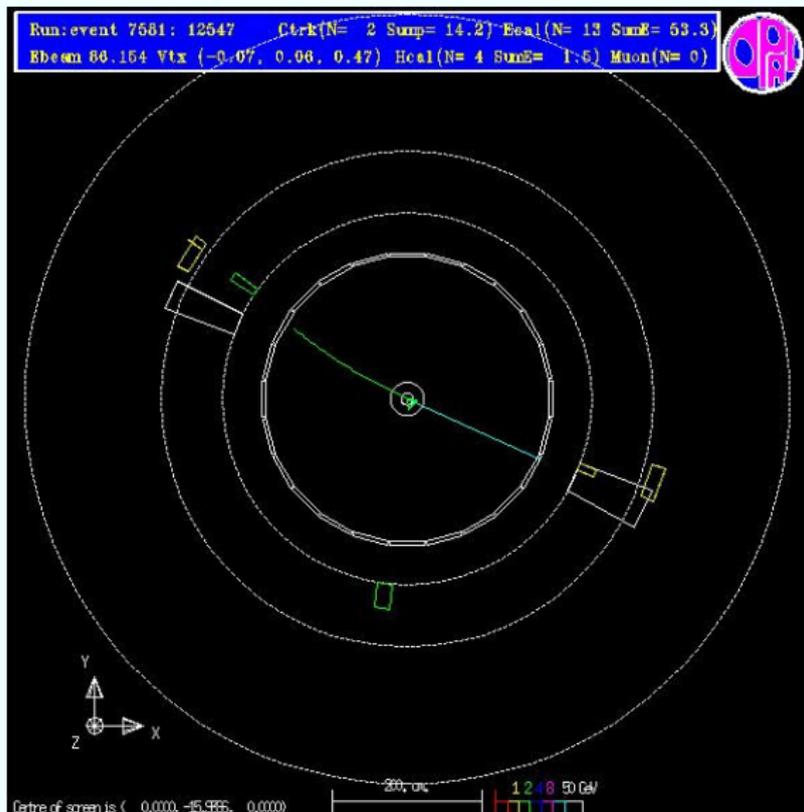
- 1) Erkenntnisgewinn
- 2) Entwicklung neuer Technologien
- 3) Neuartige Methoden der Datenverarbeitung
- 4) Übertragung von Technologien in andere Bereiche
 - ▶ Krebstherapie mit Protonen
 - ▶ Bildgebende Verfahren in der Medizin (PET)

Pause

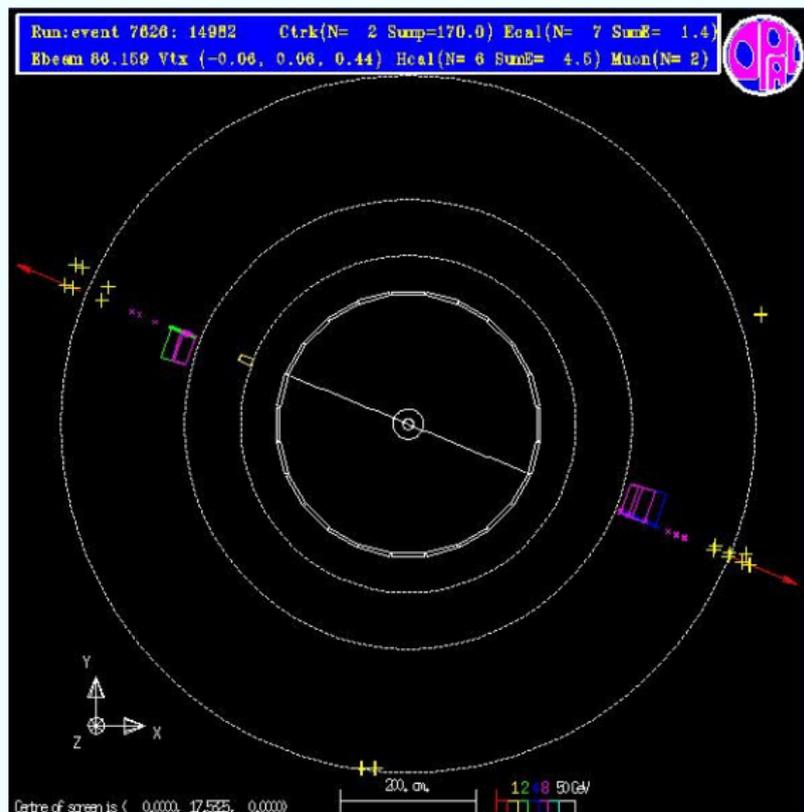
Rückblick: Der OPAL Detektor bei LEP



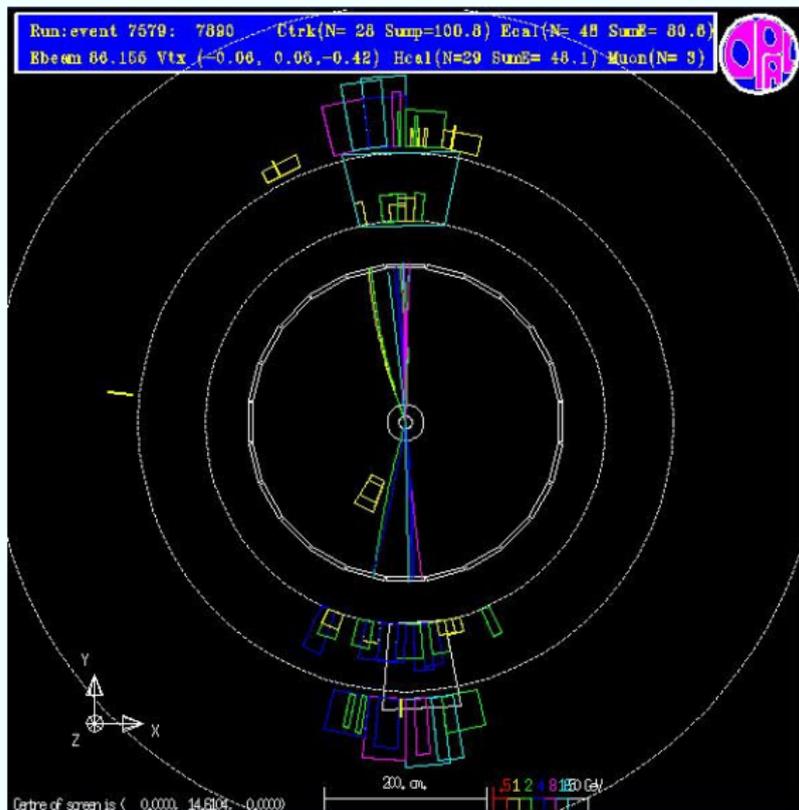
Ereignistyp I



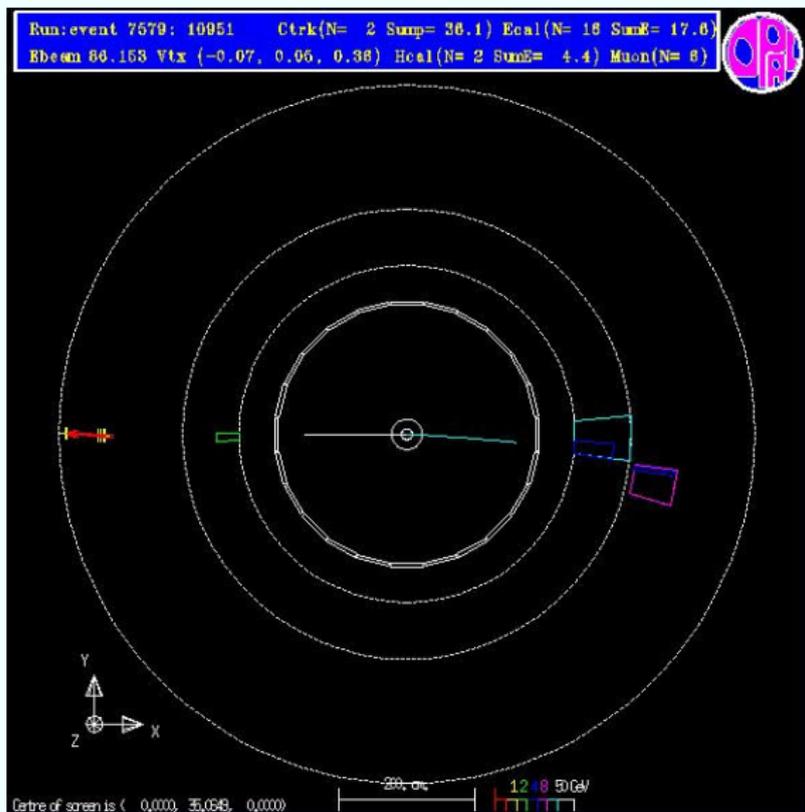
Ereignistyp II



Ereignistyp III



Ereignistyp IV



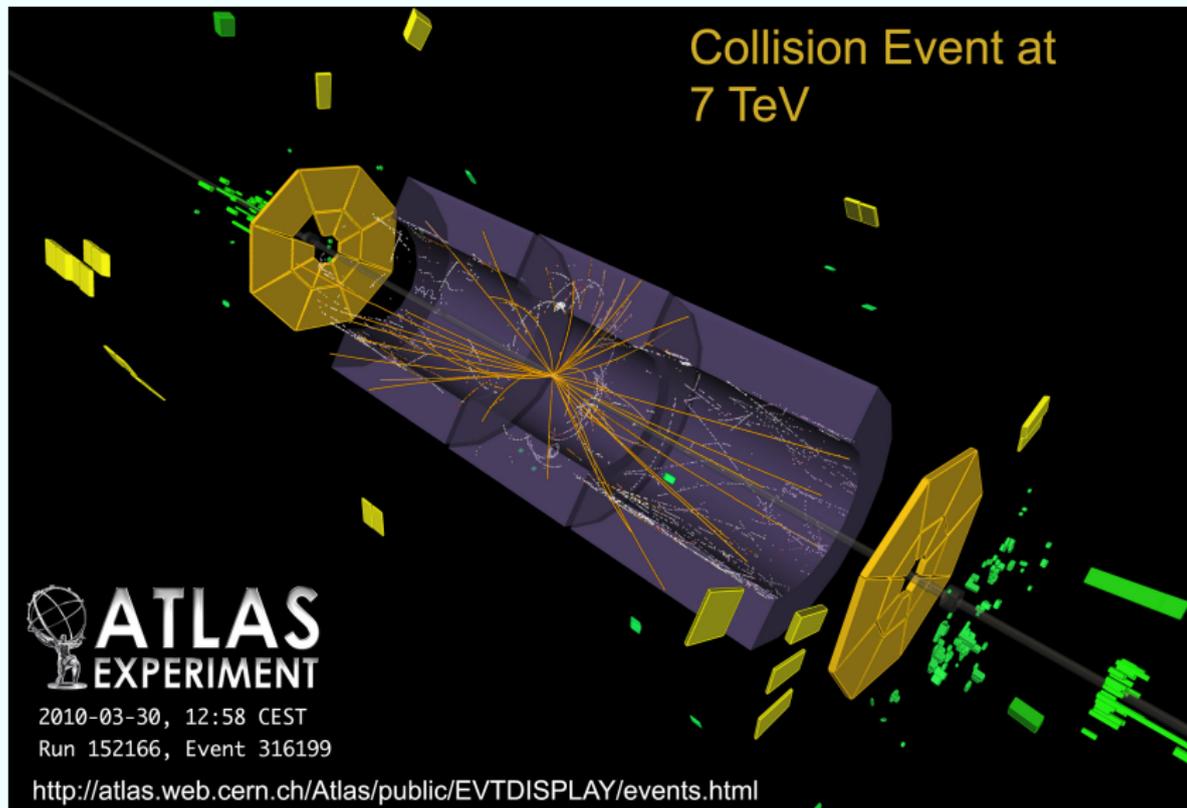
Die Energie bei LEP hat nicht gereicht...?



Erste Kollisionen bei ATLAS



Erste Kollisionen bei ATLAS



Das W^\pm -Austauschteilchen

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	$\frac{1}{2}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force

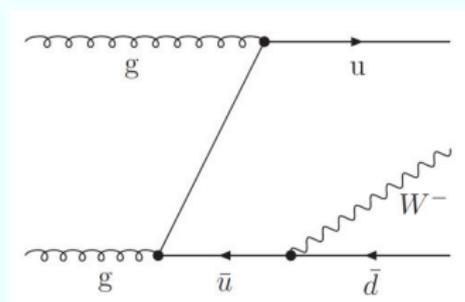
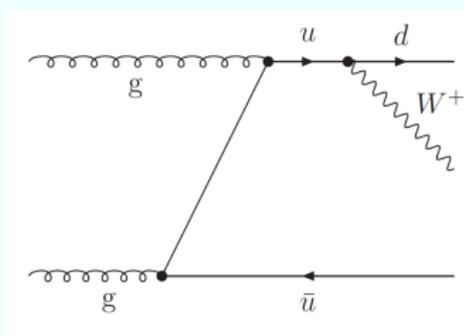
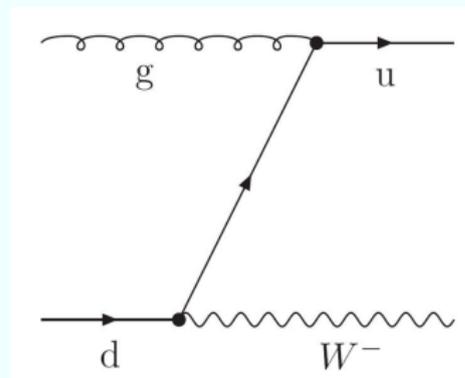
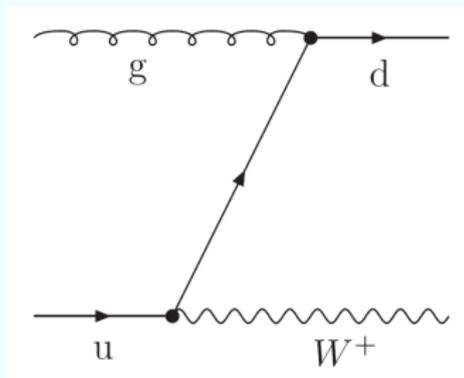
Bosons (Forces)

W^\pm -Austauschteilchen:

- ▶ Austauschteilchen der schwachen Kraft
- ▶ elektrisch geladen
- ▶ 80 mal so schwer wie ein Proton
- ▶ Umwandlung ("Zerfall") in leichte Teilchen nach $3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

→ der Detektor kann nur die Zerfallsprodukte nachweisen

Produktion des W^\pm -Austauschteilchen



W^\pm -Zerfälle

Mögliche Zerfälle:

- ▶ Zu 11 % zerfällt es in Leptonen l^\pm (e^\pm , μ^\pm , τ^\pm)
- ▶ Zu 68 % zerfällt es in Hadronen

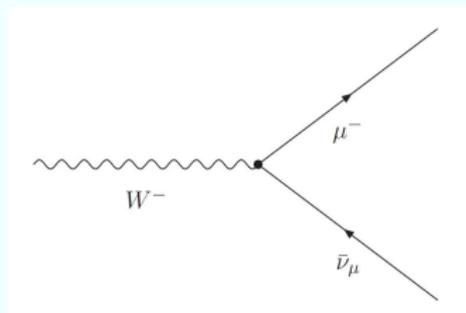
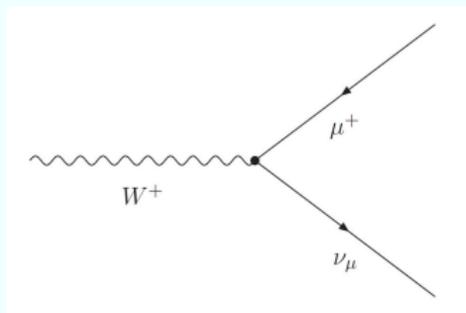
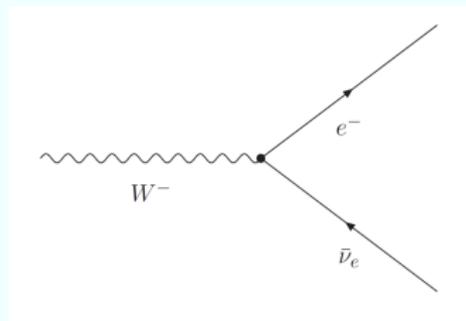
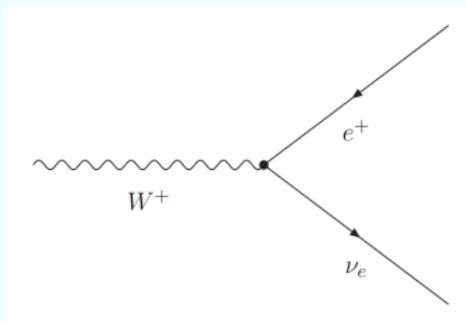
Was werden wir messen?

- ▶ Nur Zerfälle in e^\pm und μ^\pm
- ▶ Zerfälle in τ^\pm sind schwieriger zu identifizieren, da die Ereignisse den hadronischen Zerfällen sehr ähnlich sind

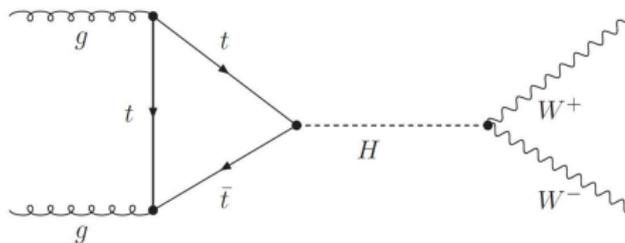
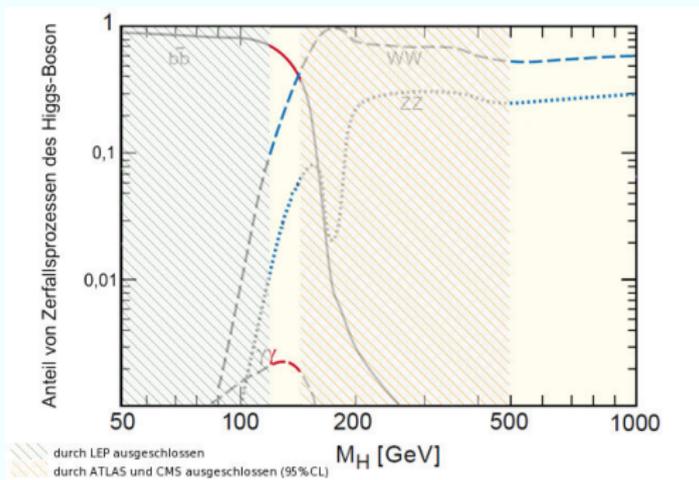
Charakteristik des Zerfalls:

- ▶ ein geladenes Lepton
- ▶ fehlende Energie auf Grund des Neutrinos

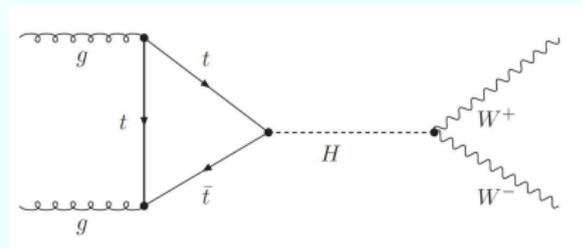
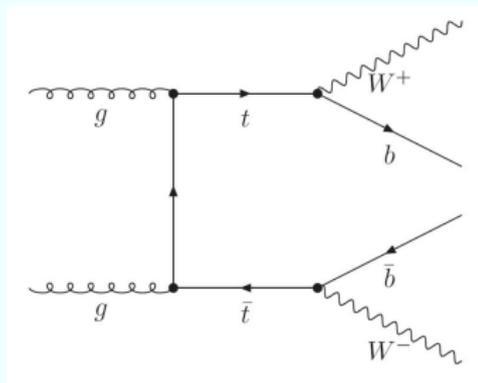
W^\pm -Zerfälle



Higgs am LHC

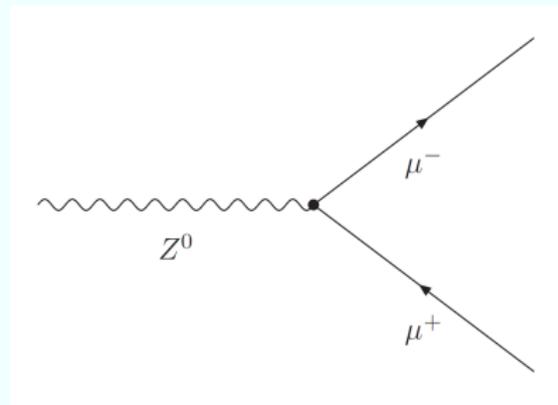
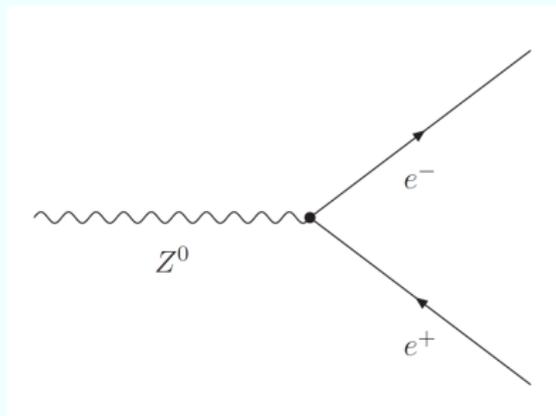


Higgs am LHC



- ▶ beide Zerfälle beinhalten 2 W^\pm -Austauschteilchen
- jedes Ereignis mit zwei W^\pm -Austauschteilchen könnte ein Higgs-Ereignis sein

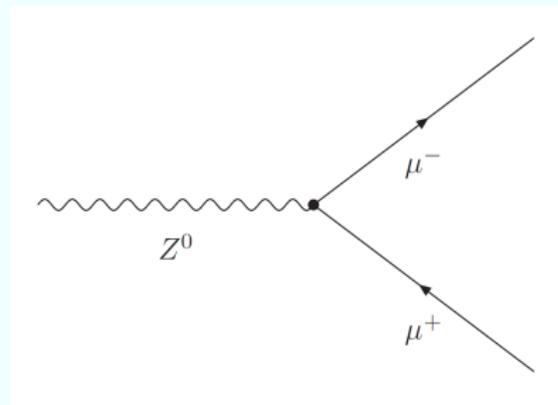
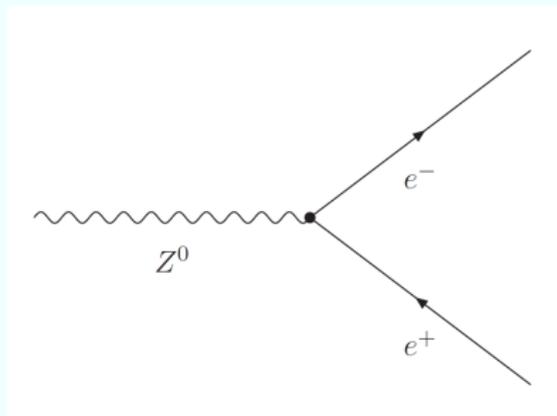
Untergrundereignisse



Charakterisiert durch:

- ▶ zwei Leptonen

Untergrundereignisse



Charakterisiert durch:

- ▶ zwei Leptonen
- ▶ keine/wenig fehlende Energie

Zusammenfassung

Aufgabe 1: Innere Struktur des Protons

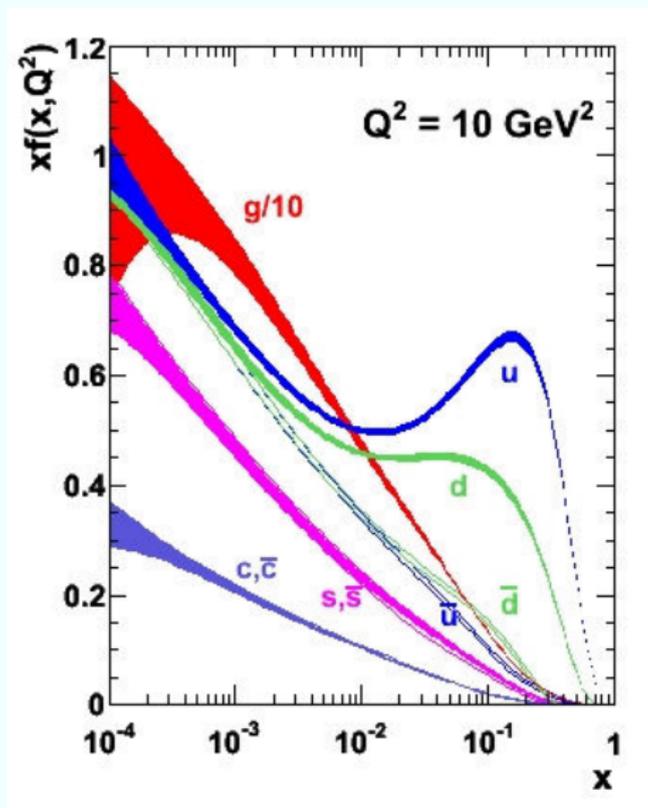
- ▶ genau 1 isoliertes Lepton (e^\pm/μ^\pm)
- ▶ $p_t(l^\pm) > 20 \text{ GeV}$
- ▶ $E_t^{\text{miss}} > 25 \text{ GeV}$

Aufgabe 2: Higgs-Suche

- ▶ zwei elektrisch entgegengesetzt geladene isolierte Leptonen
- ▶ $p_{t,1}(l^\pm) > 25 \text{ GeV}$
- ▶ $p_{t,1}(l^\pm) > 15 \text{ GeV}$
- ▶ $E_t^{\text{miss}} > 40 \text{ GeV}$ ($l_1 = l_2$)
- ▶ $E_t^{\text{miss}} > 25 \text{ GeV}$ ($l_1 \neq l_2$)

Backup

Partondichtefunktion



Higgs-Suche

