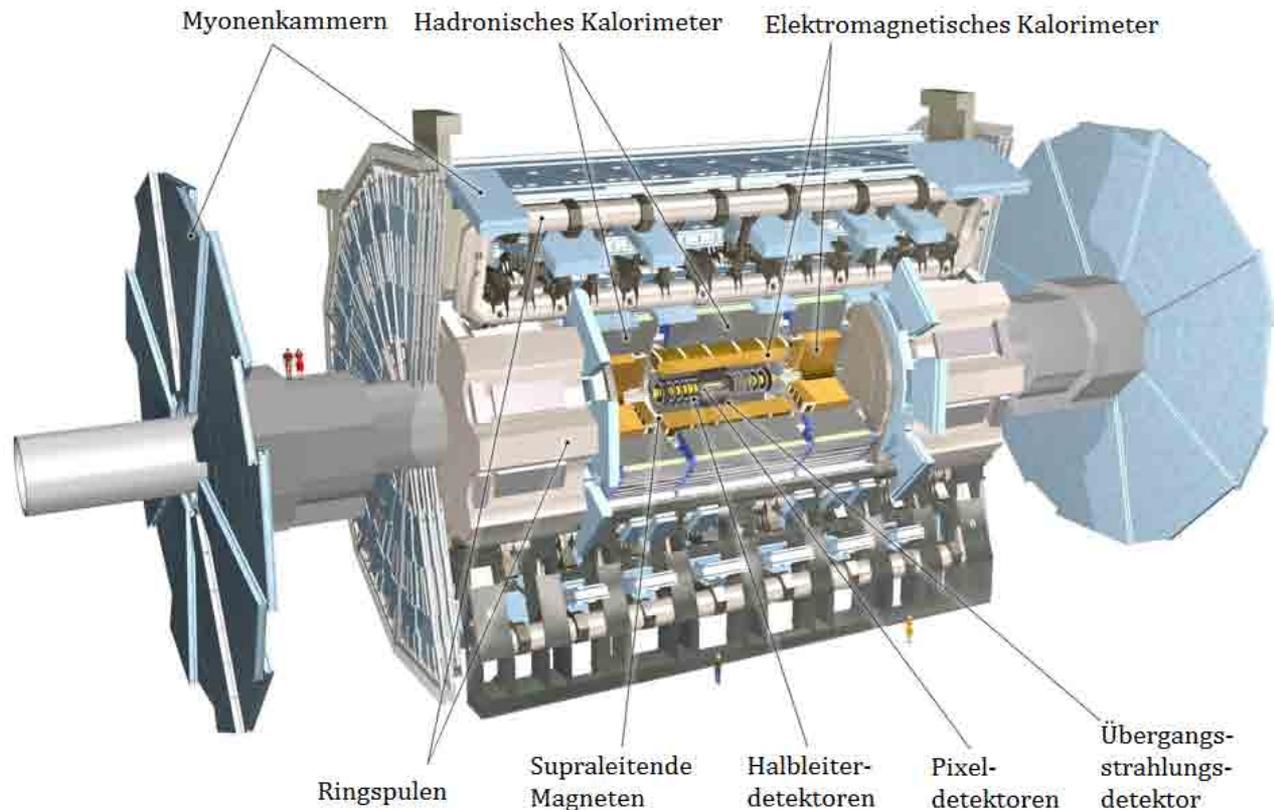
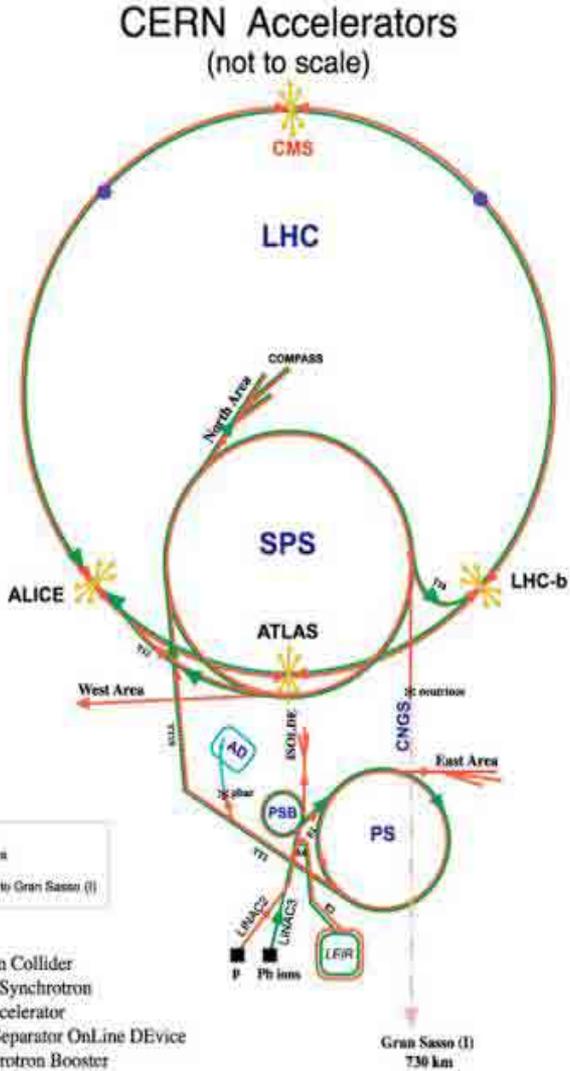


Masterclasses mit LHC Daten – Auf Augenhöhe mit der aktuellen Forschung

Michael Kobel (TU Dresden)

Schülertag Internationale Masterclasses, Dresden
19.03.2012



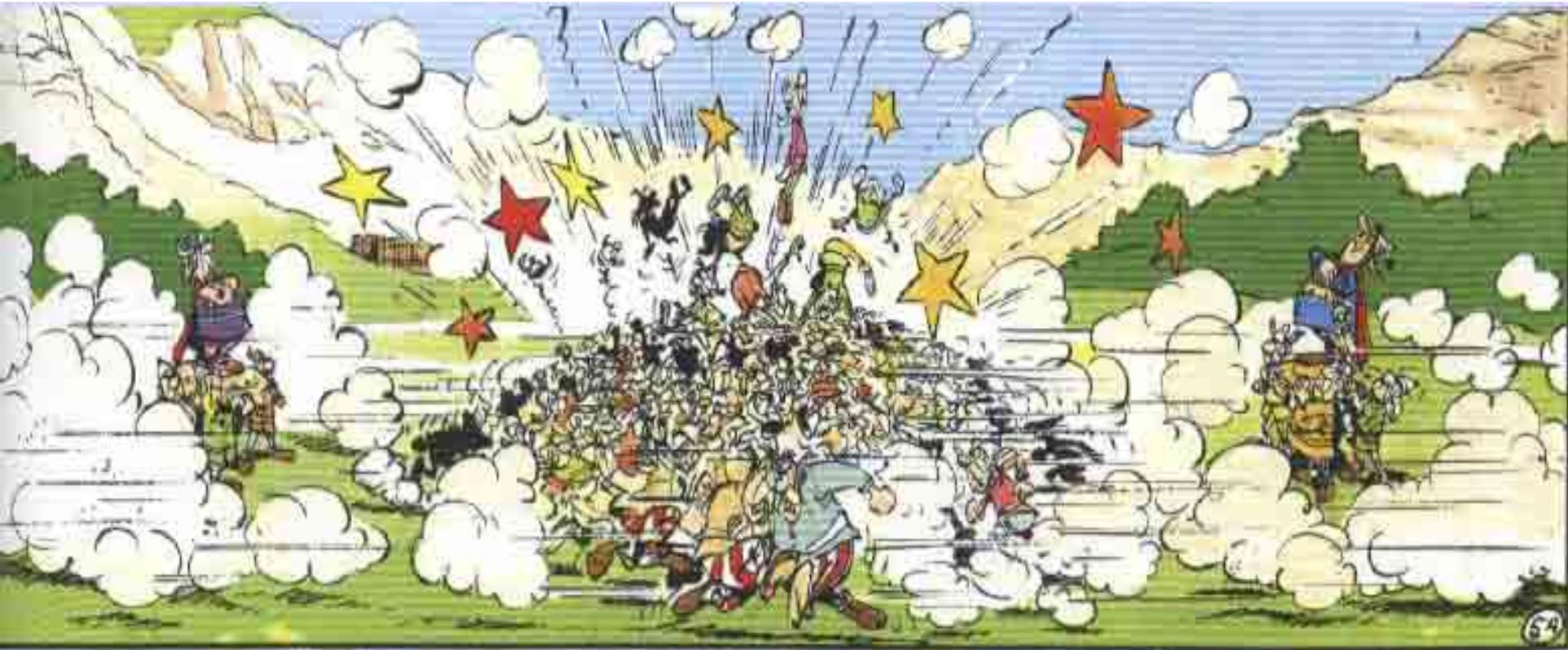


LEP (e^+e^-)	1989-1995	45+45 GeV
	1995-2000	bis 104+104 GeV
LHC (pp)	seit 2010	3500+3500 GeV
	> 2015	6500+6500 GeV?

LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: LINear ACcelerator
 LEIR: Low Energy Ion Ring
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Rediff: LEP, PS Division, CERN, 02.09.98
 Revised and adapted by Antonella Del Rossio, IFT Div.,
 in collaboration with B. Deserres, SI, Div., and
 D. Manghachi, PS Div. CERN, 23.05.01





Warum?

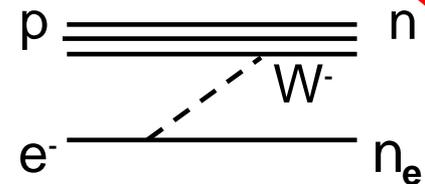
Tatsächlicher kosmologischer Ablauf



View Online: www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs

Download: : www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen

- n **Erniedrige $m_d - m_u$ um $2 \text{ MeV}/c^2$**
 - Protonzerfall, nach wenigen Minuten
 - Keine Sterne, nur neutrale Teilchen (n, \bar{n})
- n **Erniedrige $m_d - m_e$ um $1 \text{ MeV}/c^2$**
 - | ermöglicht Umwandlung des Wasserstoffs:
 - | keine Wasserstoff-Atome, n stabil
- n **Ein Ziel des LHC:**
 - | Klären, wie Teilchenmassen entstanden sind
 - | Erforschen, wie ihre Werte zustande kamen.



Ⓡ Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, ...)

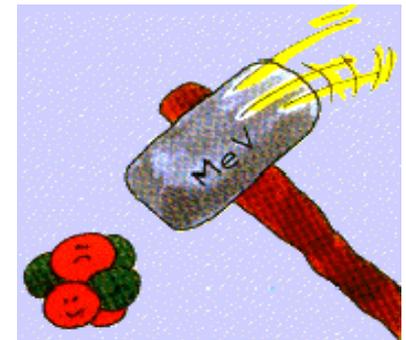
Elektronmasse regiert atomare **Energien** und **Radien**,
sowie Stabilität des Wasserstoffatoms

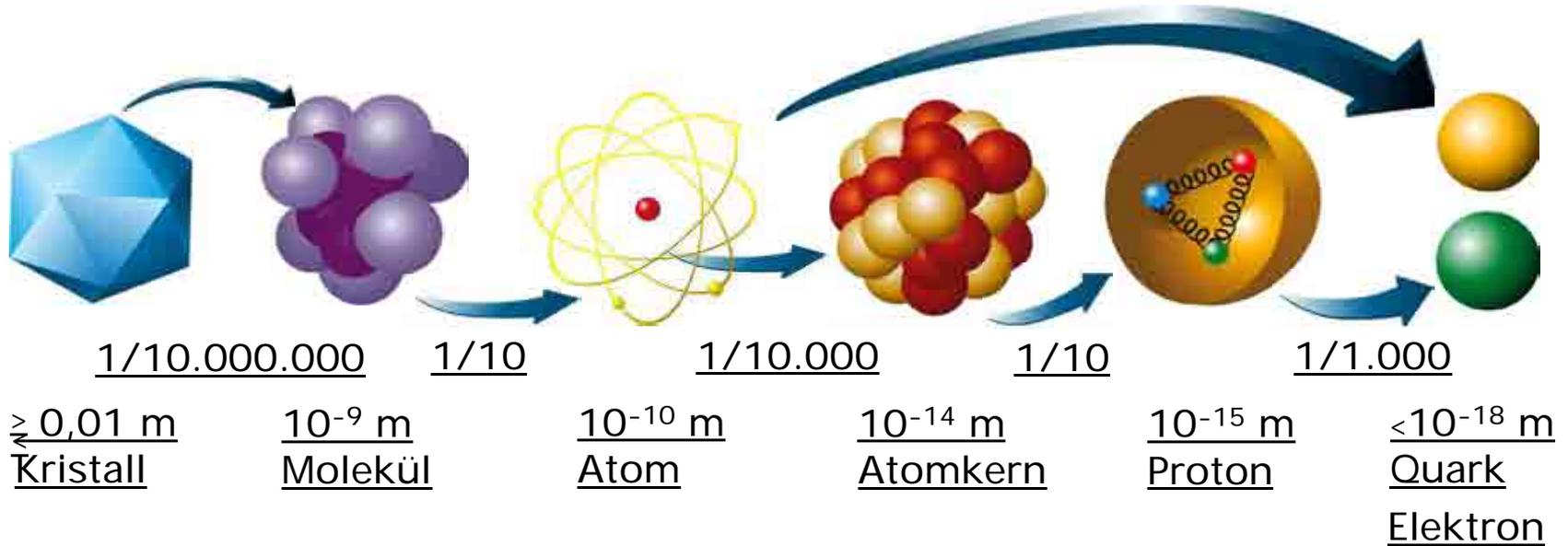
- Ⓡ Bindungsenergie steigt mit m_e
- Ⓡ Atomdurchmesser fällt mit $1 / m_e$
- Ⓡ Kleinere Massendifferenz $m_d - m_e$ verhindert H-Atome



Ⓡ Kein Sternbrennen ohne Protonen

- Ⓡ Wichtig: Proton stabil, da leichter als Neutron
 $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$, $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$
- Ⓡ Unterschied kommt von
 - Ⓡ Massendifferenz: $m_d - m_u$
 - Ⓡ Effekten der starken und elektromagnetischen Kraft





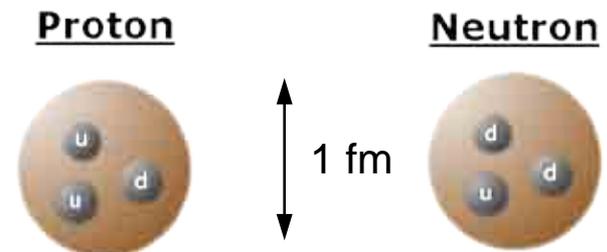
4 Fundamentale Bausteine der Materie (punktförmig)

- Zwei „Quarks“: zu Protonen und Neutronen gebunden

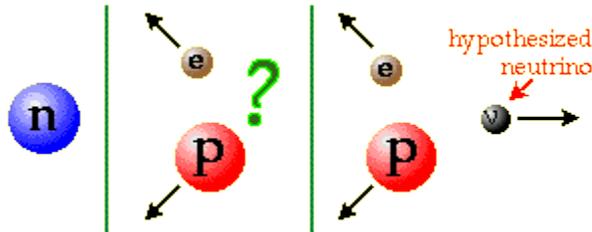
- Down: d ($Q = -1/3$), Masse $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$
- Up: u ($Q = +2/3$), Masse $\sim 2 \text{ MeV}/c^2$

- Zwei „Leptonen“:

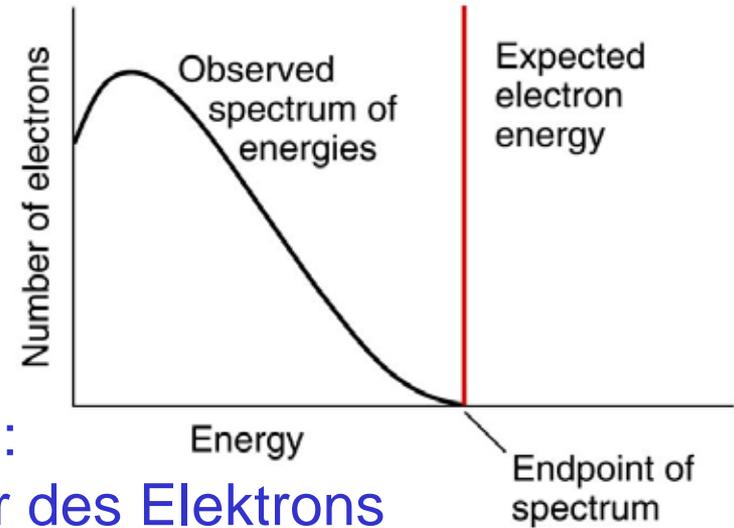
- Elektron e : ($Q = -1$), Masse = $0,5 \text{ MeV}/c^2$
- Neutrino ν : ($Q = 0$), Masse $\sim 0,000000003 - 0,00000003 \text{ MeV}/c^2$
ungebunden, entsteht in Kernprozessen (Sonne, Radioakt.)



1914 Chadwick b-Zerfall: $n \rightarrow p + e^-$
 \rightarrow Unerwartete Energieverteilung!

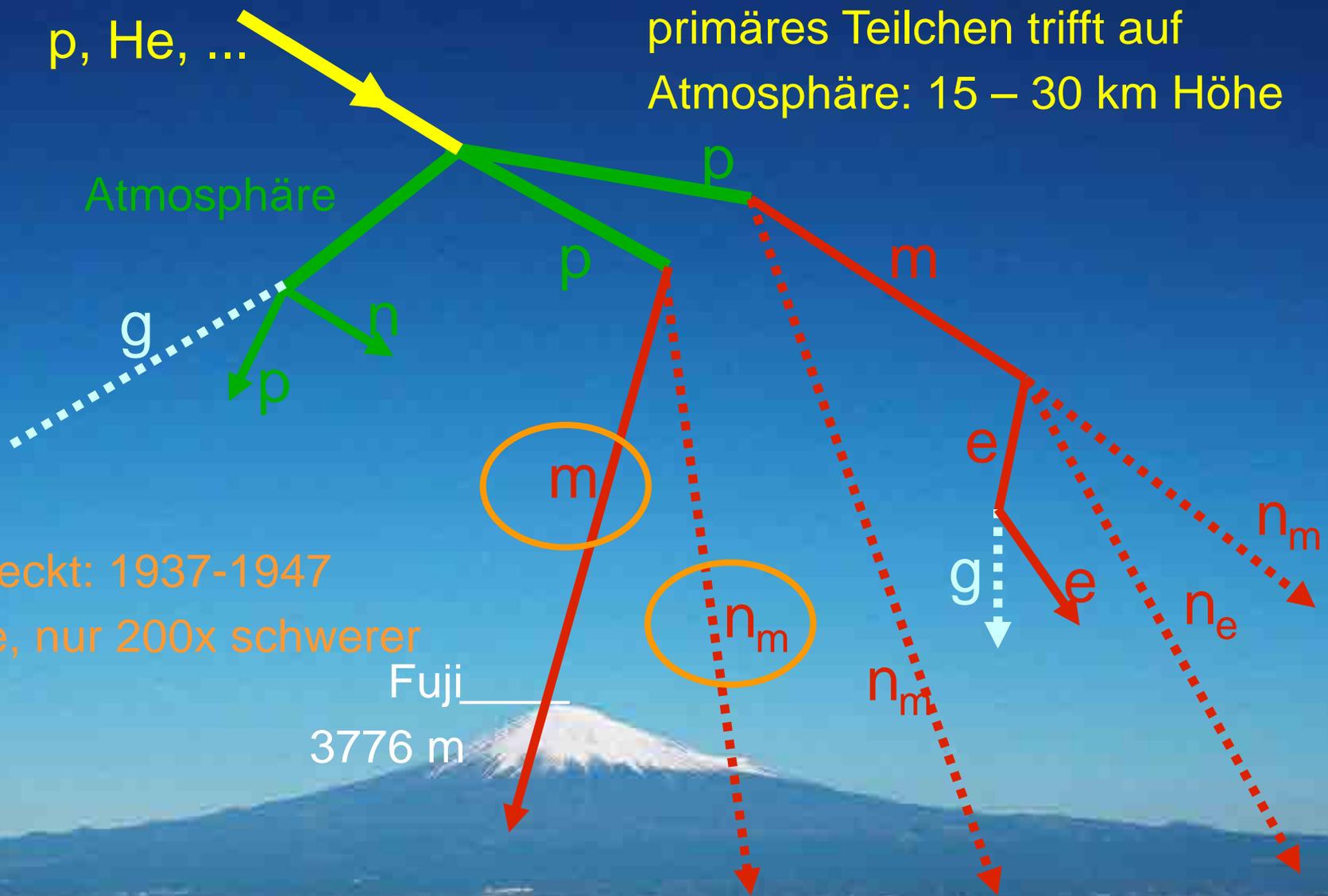


Pauli (1930) postuliert neues Teilchen:
 Neutrino n als elektr. neutraler Partner des Elektrons

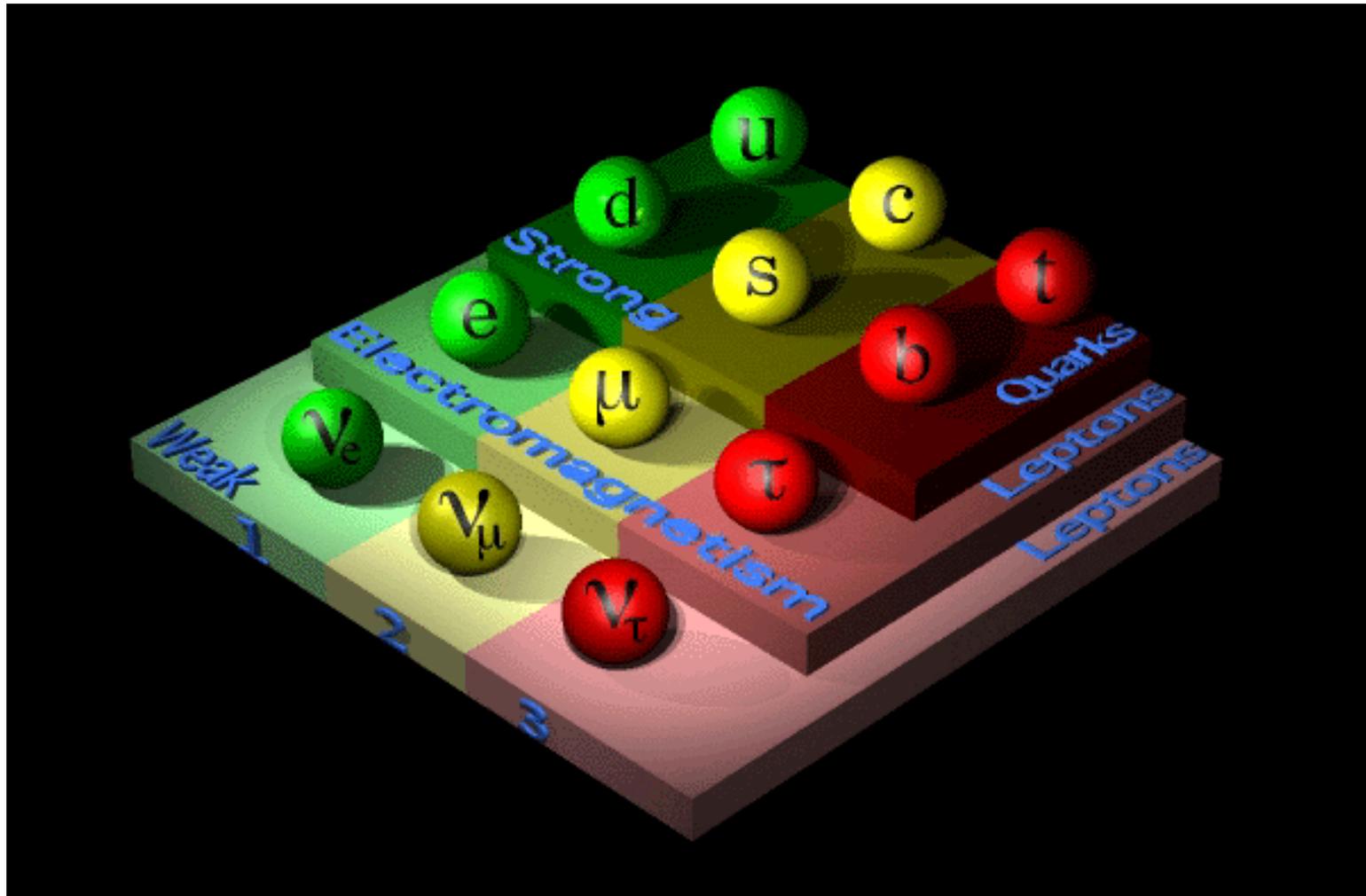


- sehr leicht
- schwach wechselwirkend (Fermi):
999.999.999 von 1.000.000.000 schaffen Erddurchquerung!
- ziemlich verbreitet im Universum
366.000.000 Neutrinos / m³
im Vergleich zu 0,2 Protonen / m³

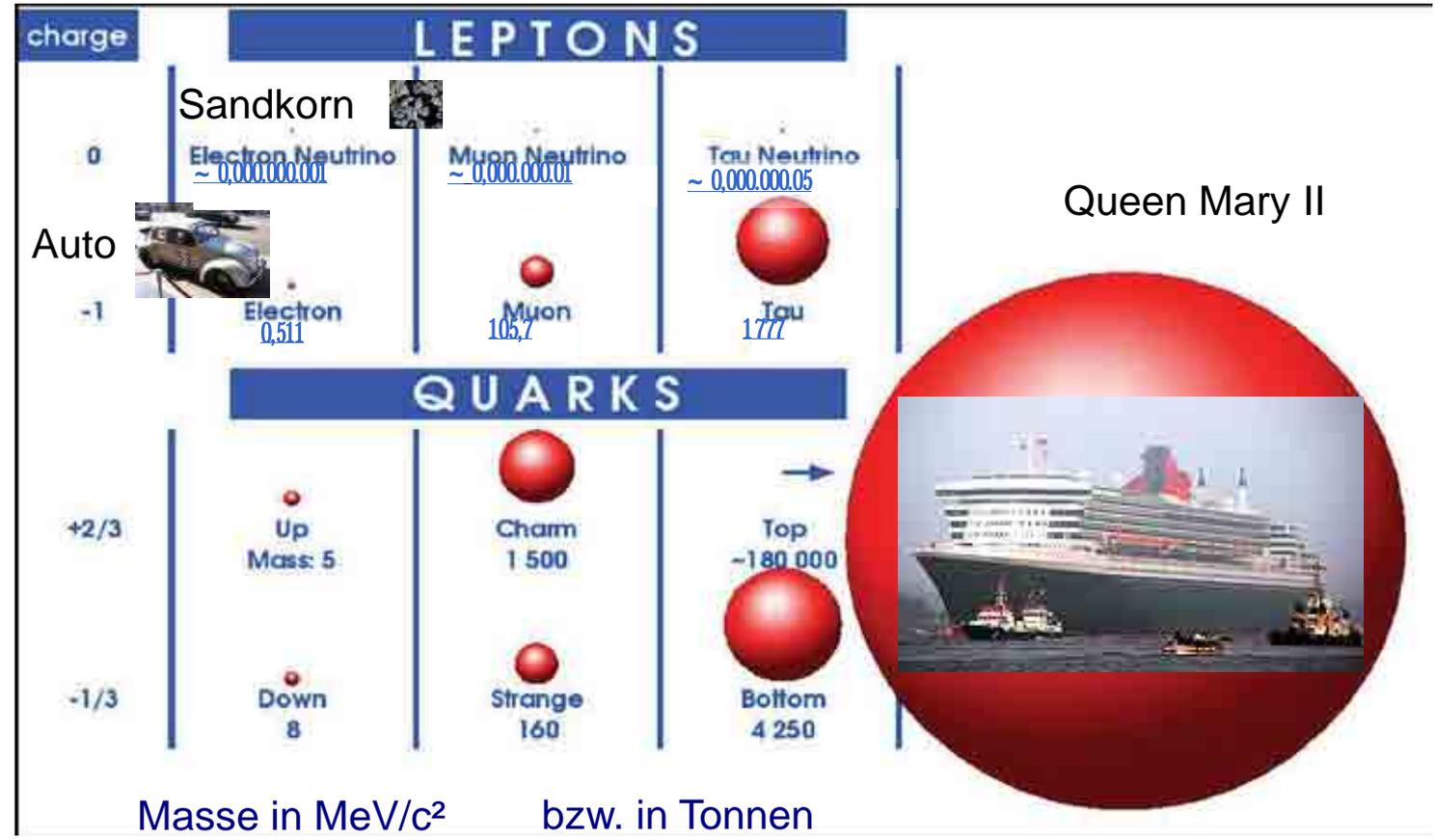




Entdeckt: 1937-1947
wie e , nur 200x schwerer



Ursache der Existenz von 3 Familien noch ungeklärt!



Queen Mary II



Raum



Zeit



Materie

ENERGIE ist der Schlüssel

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein

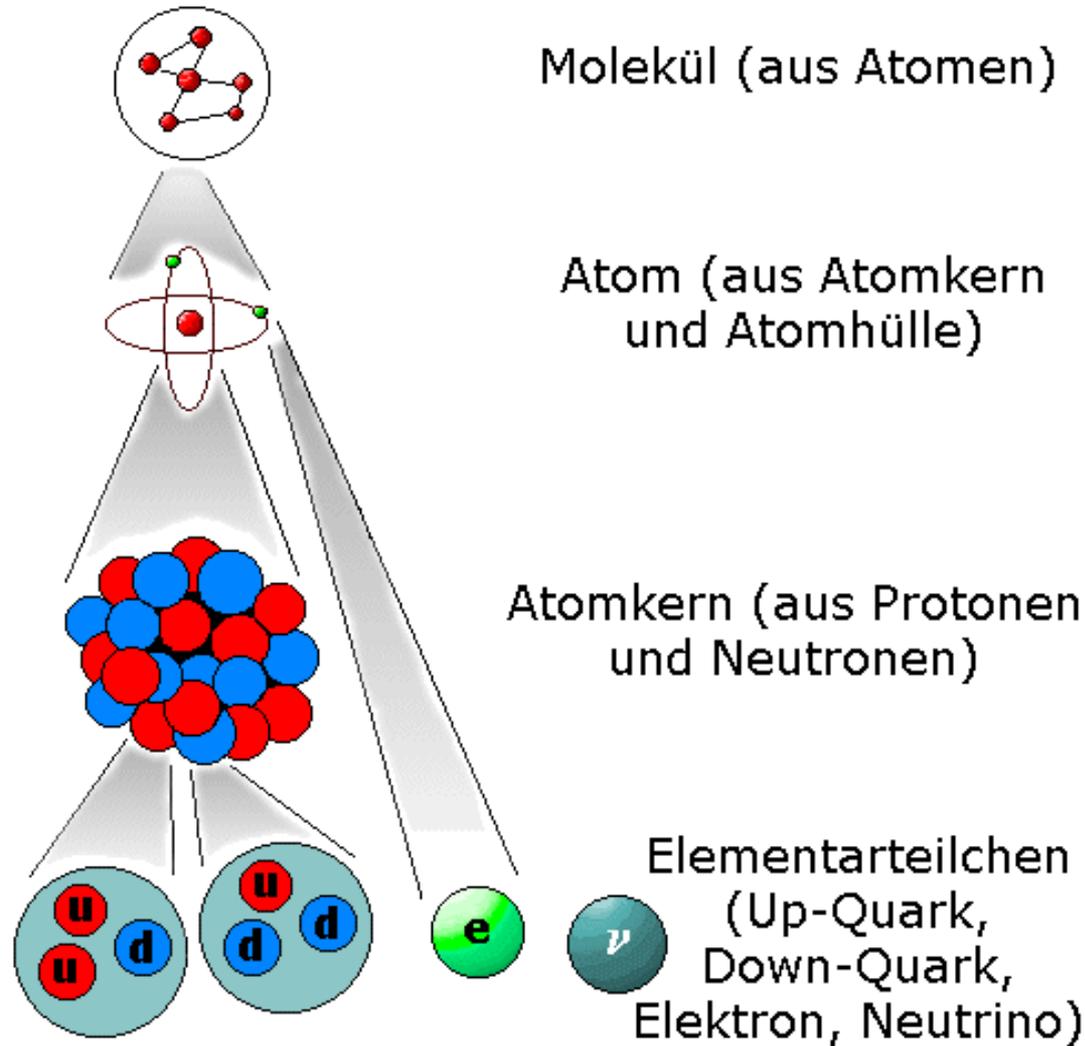
neue und schwere Materie

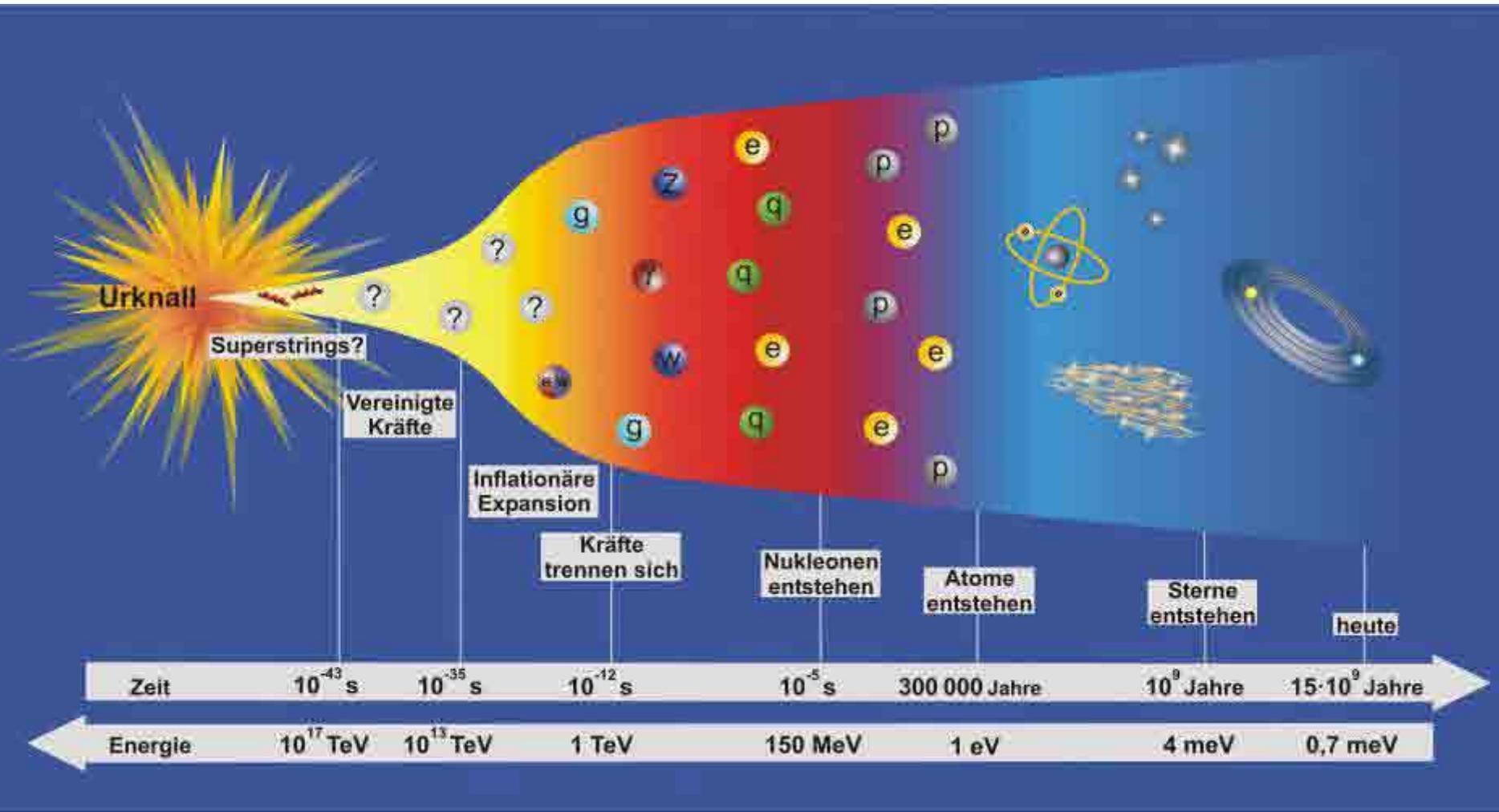
$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

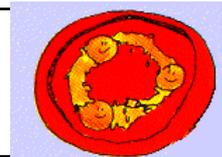
hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit





- Jede Kraft hat eigene Botenteilchen

Kraft (Wechselwirkung)	Botenteilchen
Starke Kernkraft	Gluonen g 
Schwache Kraft	„Weakonen“ (W und Z) 
Elektromagnetismus	Photonen γ 
Schwerkraft	Gravitonen ?

- Wechselwirkung nur dann, wenn entsprechende Ladung vorhanden
 - **Es gibt also 3 verschiedene Ladungstypen (stark, schwach, elektrisch)**

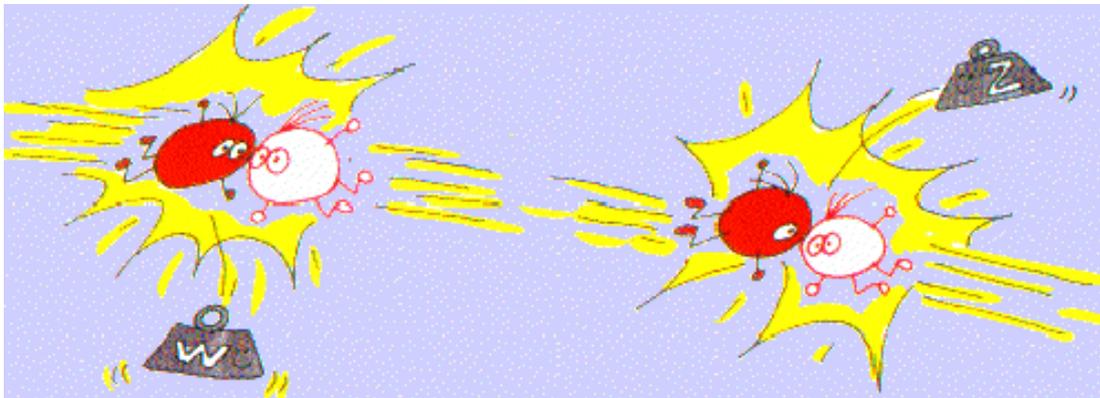
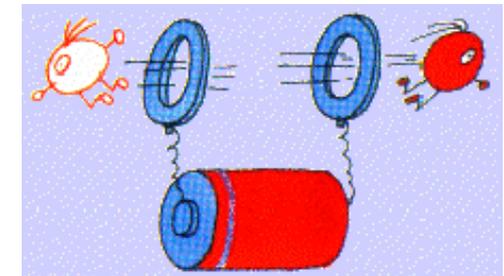
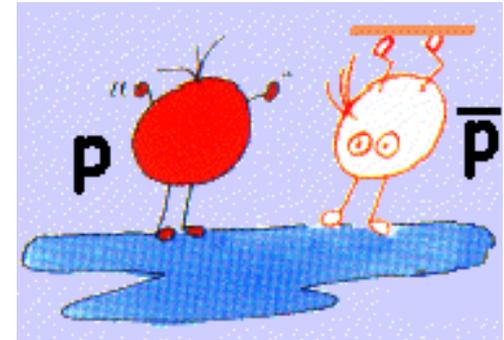
Ladung ...

- ... ist **kein Stoff !**
- ... beschreibt die **Sensitivität** von Teilchen **bezüglich der jeweiligen Wechselwirkung**

Eigenschaften:

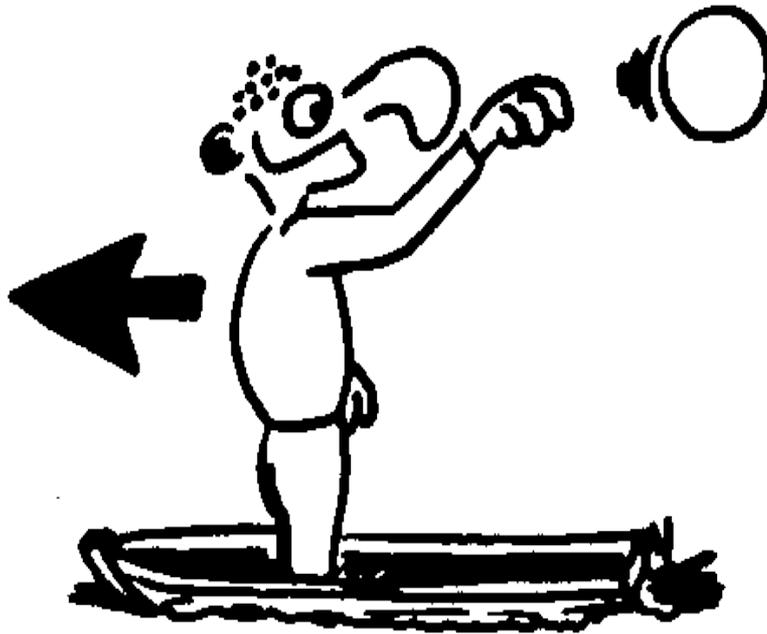
- Ladungen sind **Additiv**
 $\text{Ladung}(A+B) = \text{Ladung}(A) + \text{Ladung}(B)$
- Ladungen kommen nur in Vielfachen einer **kleinsten Ladung** vor
- Ladung ist **erhalten**,
d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren

- Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit **umgekehrten Vorzeichen** von **allen** Ladungen
- Sonst sind **alle Eigenschaften** (Masse, Lebensdauer) **gleich**
- Aus Botenteilchen können **paarweise** Materie- und Antimaterieteilchen **entstehen**
- Umgekehrt können sie sich **paarweise** wieder zu Botenteilchen („Energie“) **vernichten**



Prinzip von Kraftwirkungen

- Zu jeder **Wechselwirkung** gehört eine **Ladung**
- Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
- Wechselwirkung erfolgt über Austausch von **Botenteilchen**



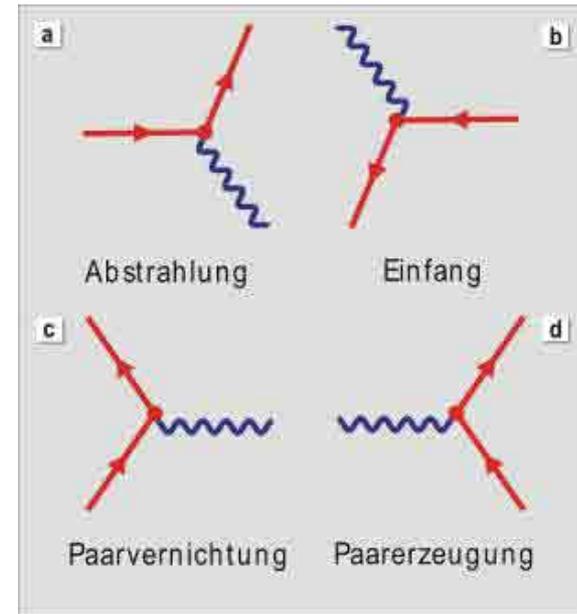
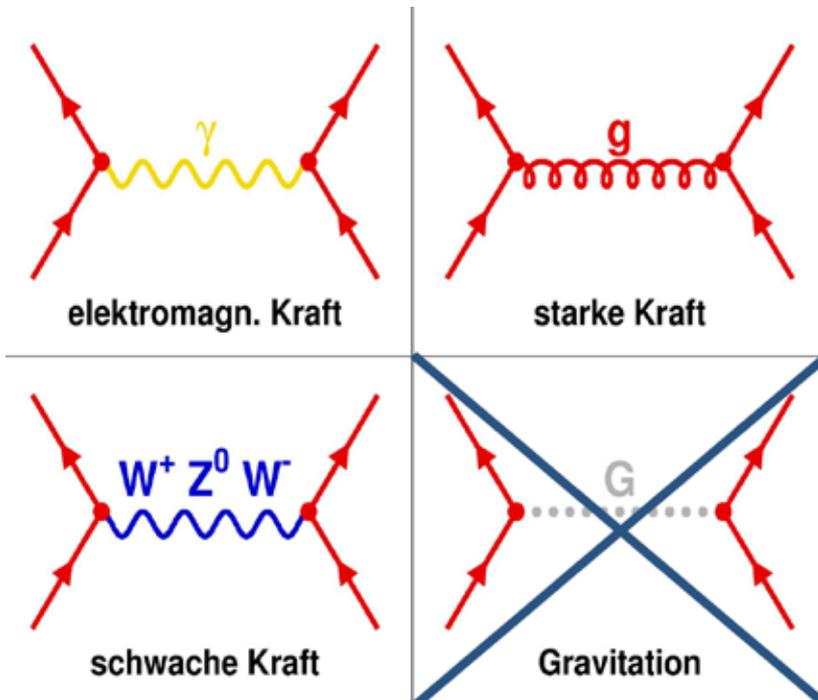
Abstoßend



Anziehend

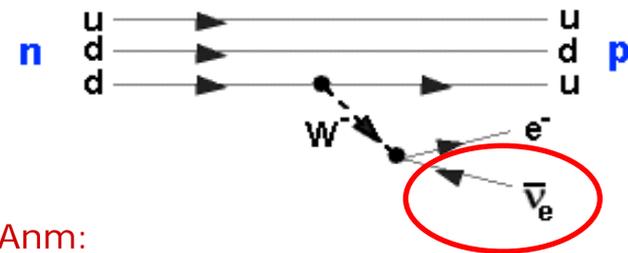
www.physicsmasterclasses.org/exercises/unischule/baust/bs_6fram_lv123.html
(nur in internet explorer abspielbar)

- Ursache jeder Wechselwirkung ist: **Erhaltung von Symmetrien**
- Ergibt **eindeutiges Set** von fundamentalen "Vertices"
- Alle Prozesse sind Kombination solch fundamentaler Vertices



Zeit \rightarrow

► z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



Anm:
Pfeilrichtung β symbolisiert Antiteilchen
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts



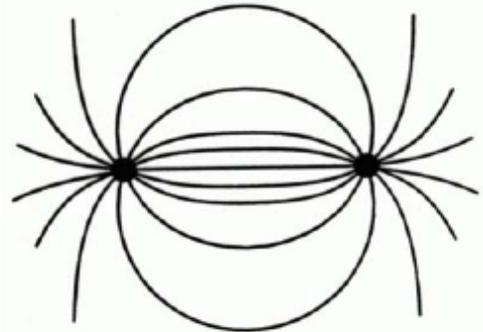
- Instabiles Isotop mit 40 Nukleonen (19 Protonen und 21 Neutronen)
- Zerfällt durch den Beta minus- oder Beta pluszerfall mit Halbwertszeit von 1,28 Mrd. Jahren
- für den menschlichen Körper lebensnotwendig:
 - Regelt als Mineralstoff Wassergehalt in den Zellen
 - Wichtiger Elektrolyt der Körperflüssigkeit.
 - Ca jedes 9000ste Kaliumatom der ca. 100-150g Kalium in unserem Körper ist Kalium-40.



potassium.swf

Confinement

QED



Feldlinien eines elektrischen Dipols reichen ins Unendliche

QCD

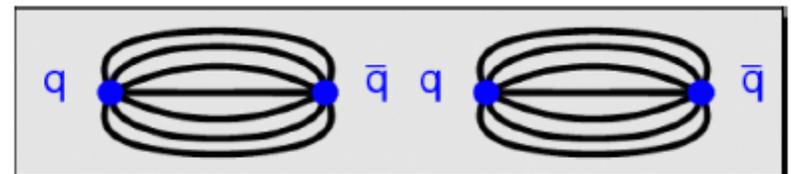


Feldlinien eines Farbdipols bilden einen engen Flussschlauch
Grund: Selbstkopplung der Gluonen

Die Feldenergie des Farbdipols wächst proportional zur Länge:

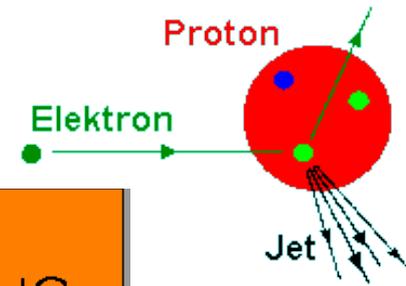
$$V(x) = k \cdot x \quad \text{mit} \quad k \approx 1 \text{ GeV} / \text{fm}$$

Bei Abständen von $x > 1 \text{ fm}$ ist es energetisch günstiger neue Quark-Antiquark-Paare zu bilden, als das Farbfeld weiter in die Länge zu ziehen.



Einzelne Quarks ergeben „Hadronen“ Jets

- e-p Kollisionen bei HERA am DESY



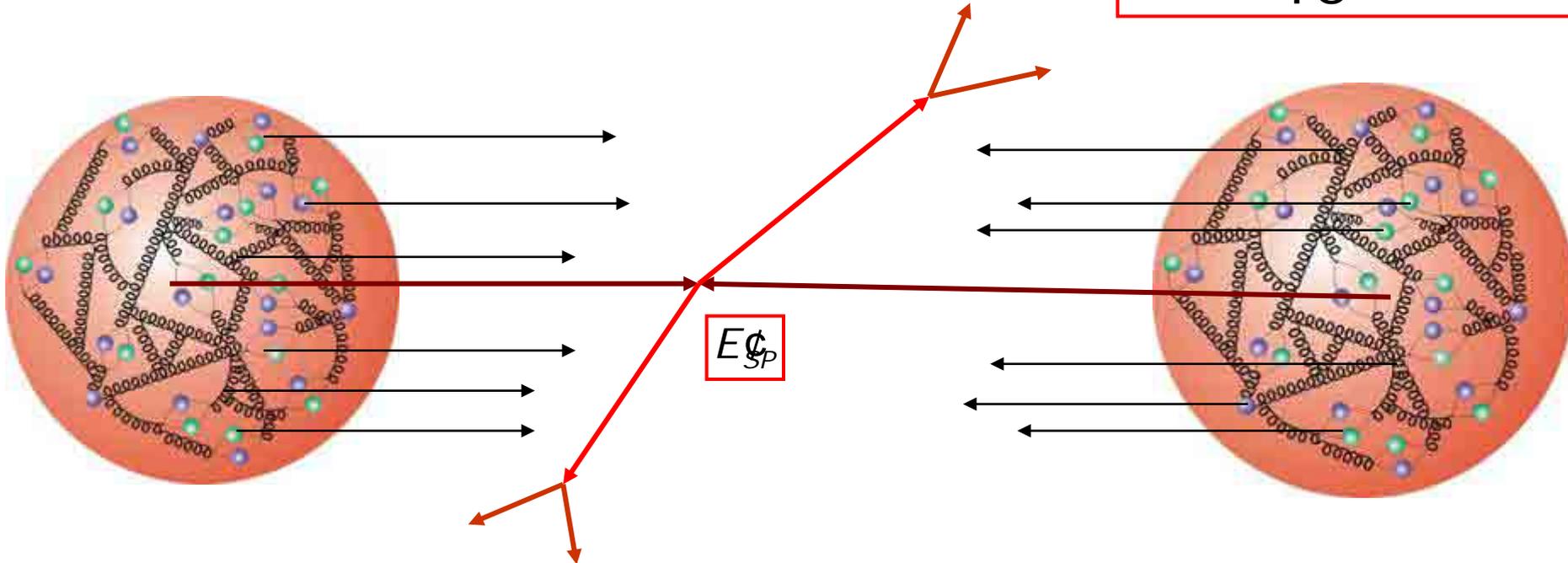
Was kollidiert eigentlich im LHC?

Wechselwirkung nur von Bruchteilen des Protons (**Partonen: Quarks und Gluonen**)

PROTON BESTEHT I.W. AUS $2u + 1d$ QUARK U. GLUONEN

Schwerpunktsenergie der kollidierenden **Partonen** (q, g)

$$E_{SP} \gg \frac{1}{10} E_{SP}(pp)$$

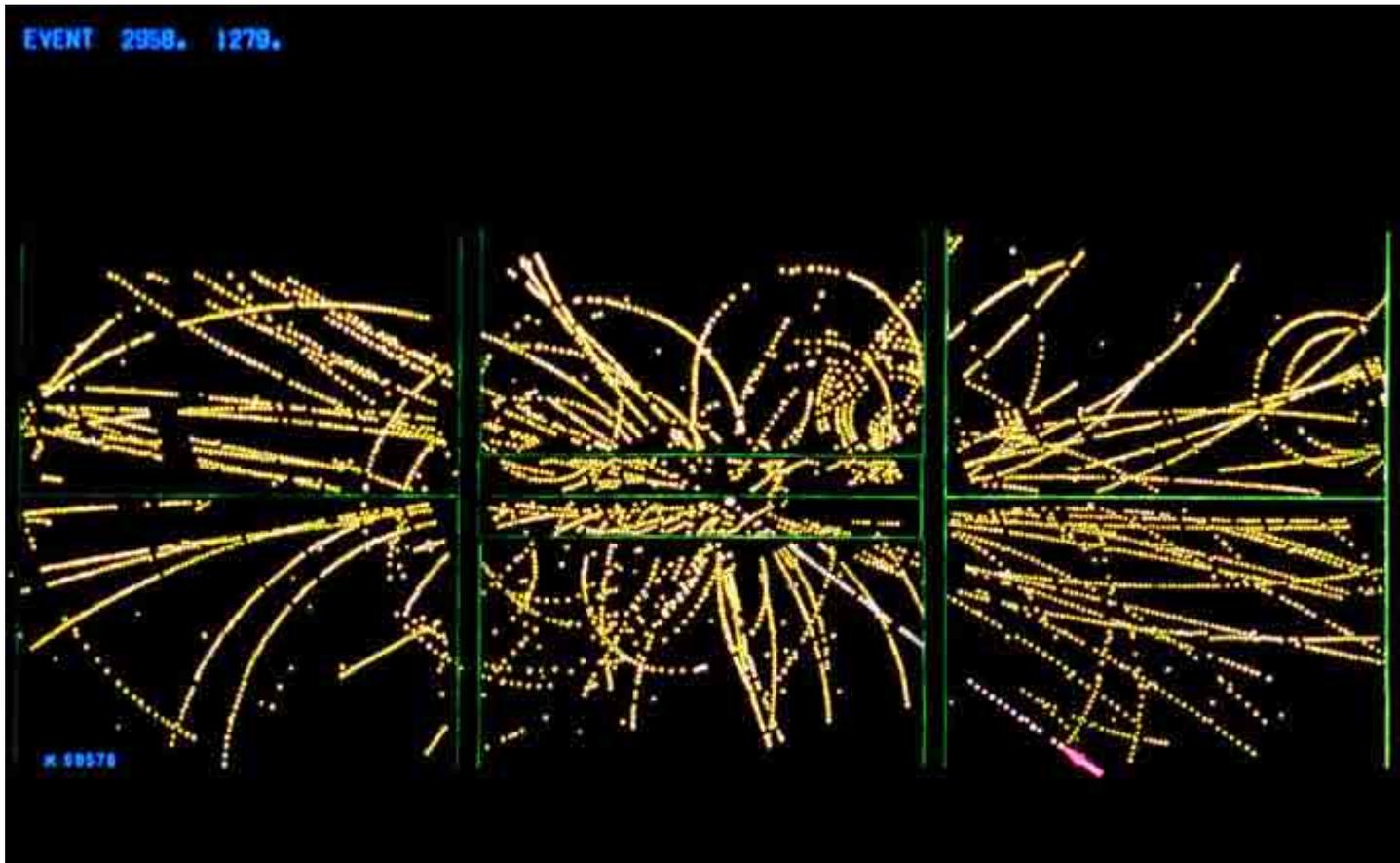


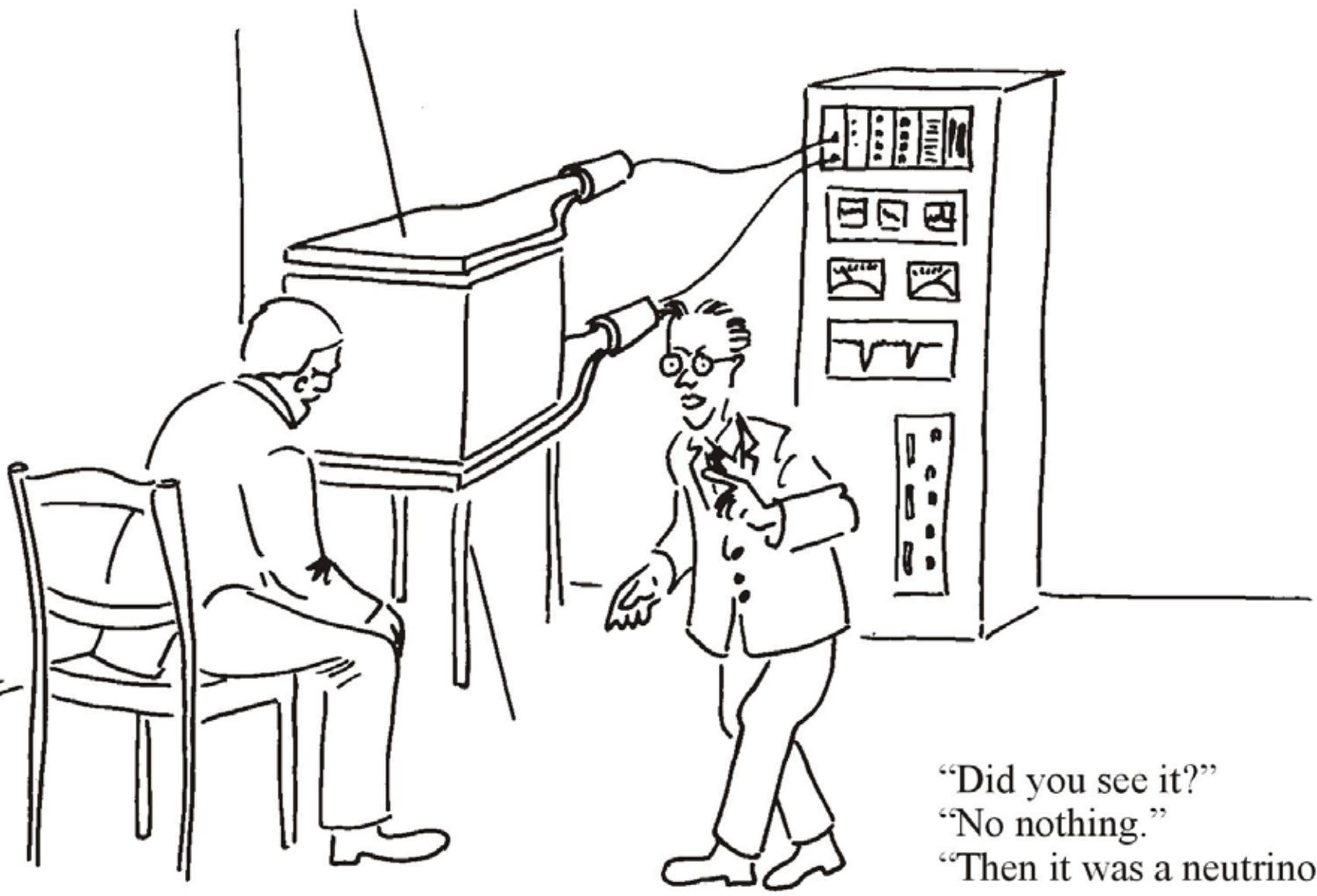
Neue Teilchen mit Massen bis zu ~ 1 TeV (ca. 1000 Protonmassen) erzeugbar

Die Entdeckung des W

1983 am Super-Antiproton-Proton Synchrotron (S⁻ ppS) am CERN

- Erstes Ereignis $\bar{p}p \rightarrow W + \dots \rightarrow e + \dots$
- Das Elektron ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet
- Das Neutrino wird durch fehlenden Transversalimpuls (Summe aller Spuren!) indirekt nachgewiesen



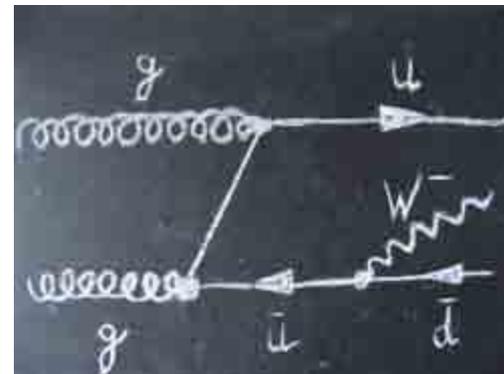
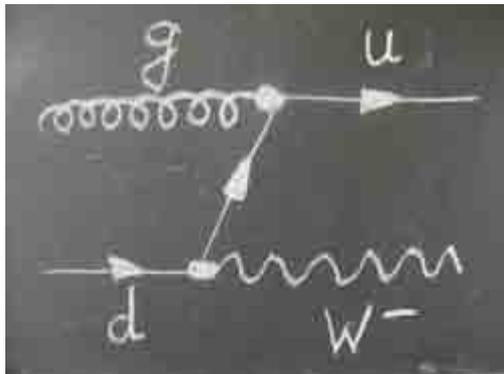
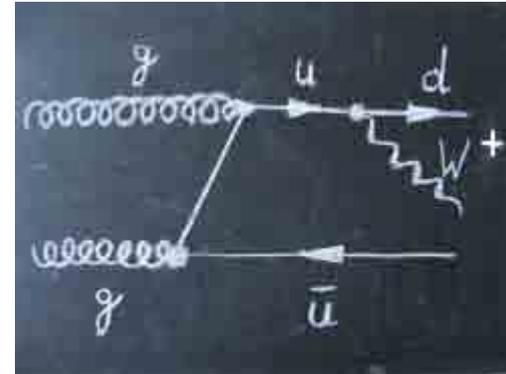
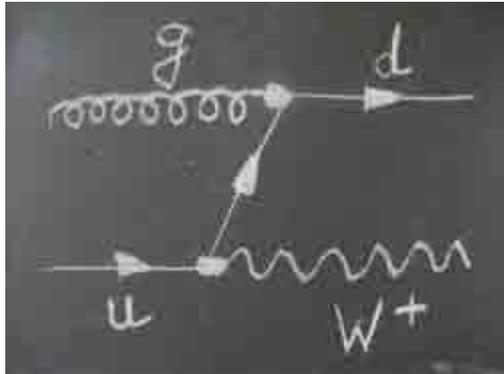


C. G. G. G.

“Did you see it?”
“No nothing.”
“Then it was a neutrino!”

Mögliche Herstellung am LHC

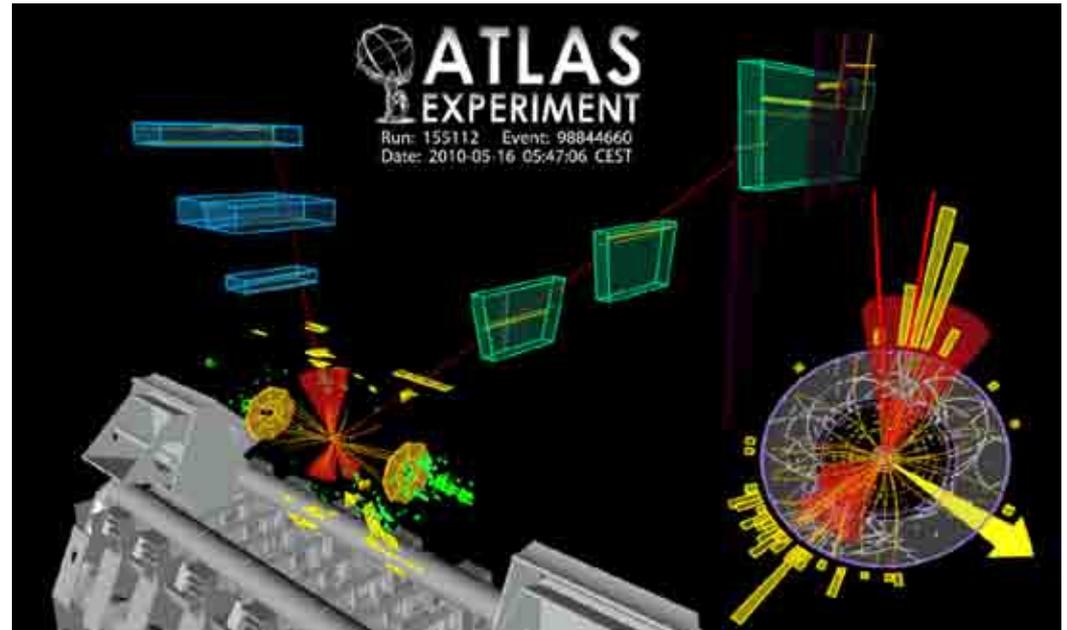
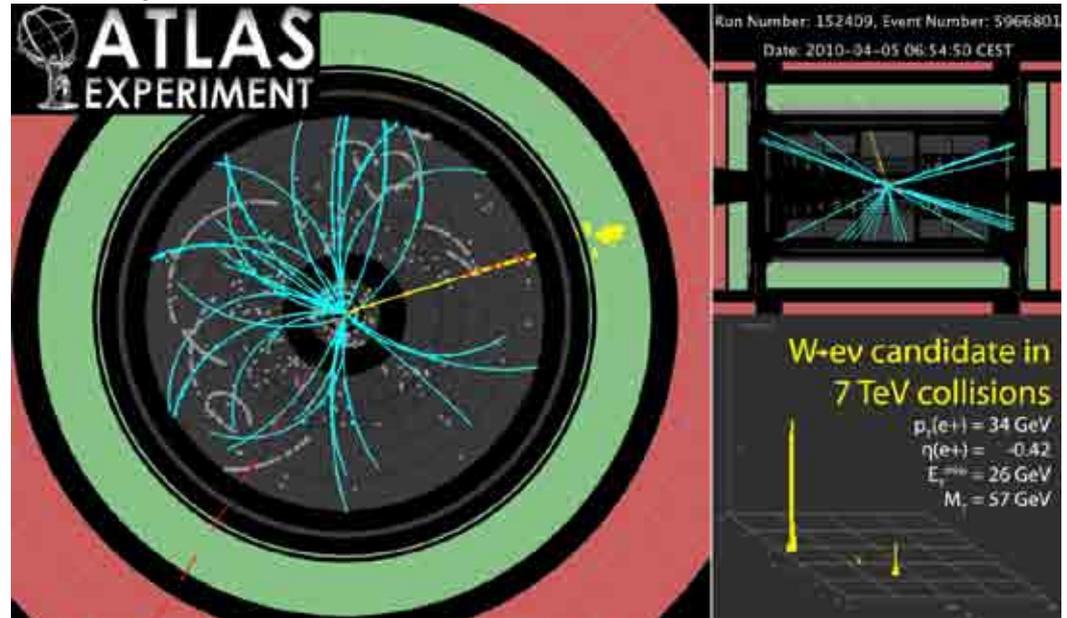
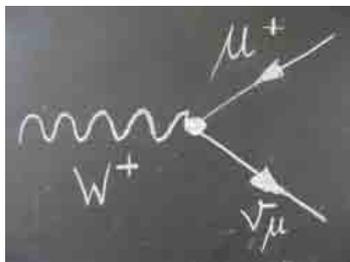
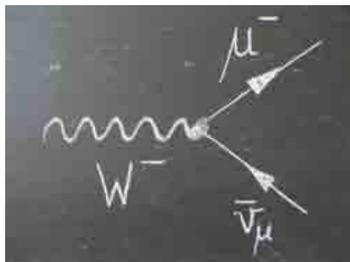
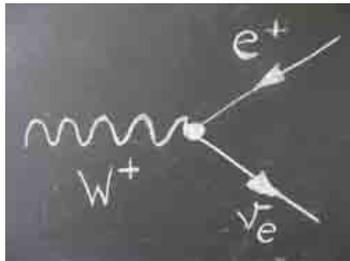
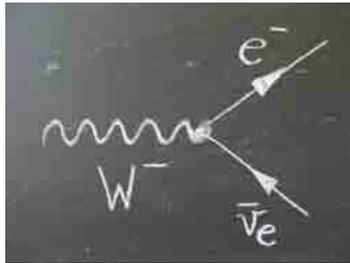
- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



- Aus den auslaufenden Quarks entstehen Jets

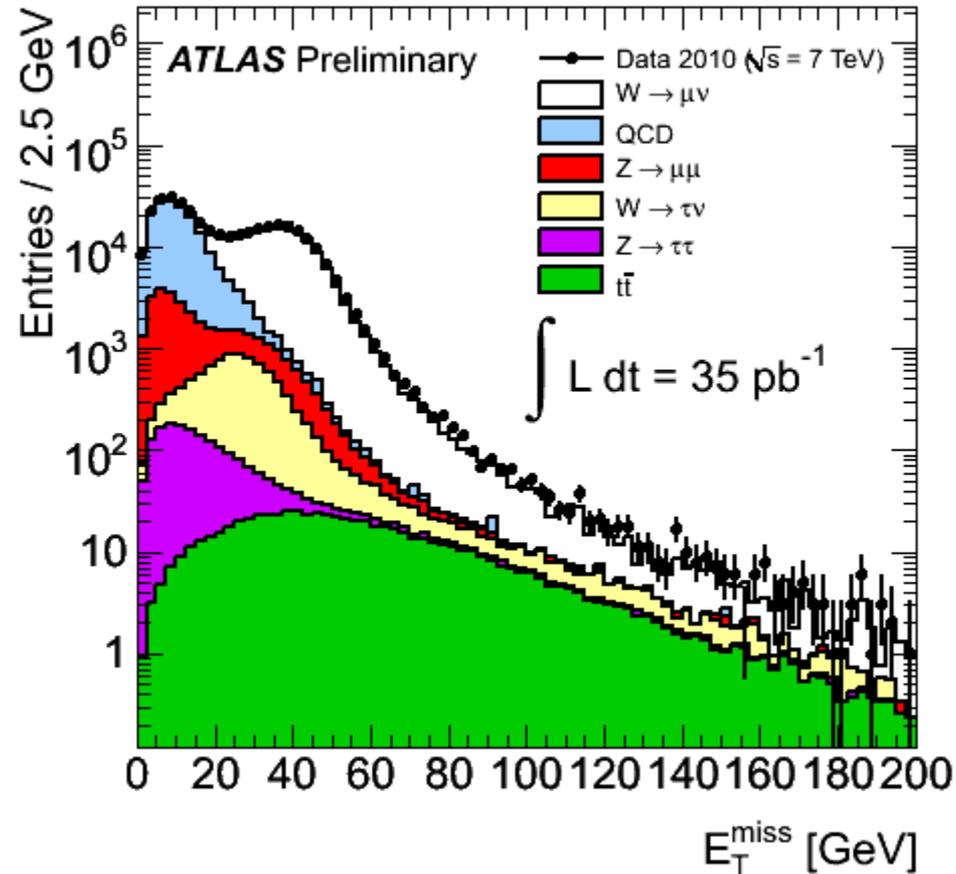
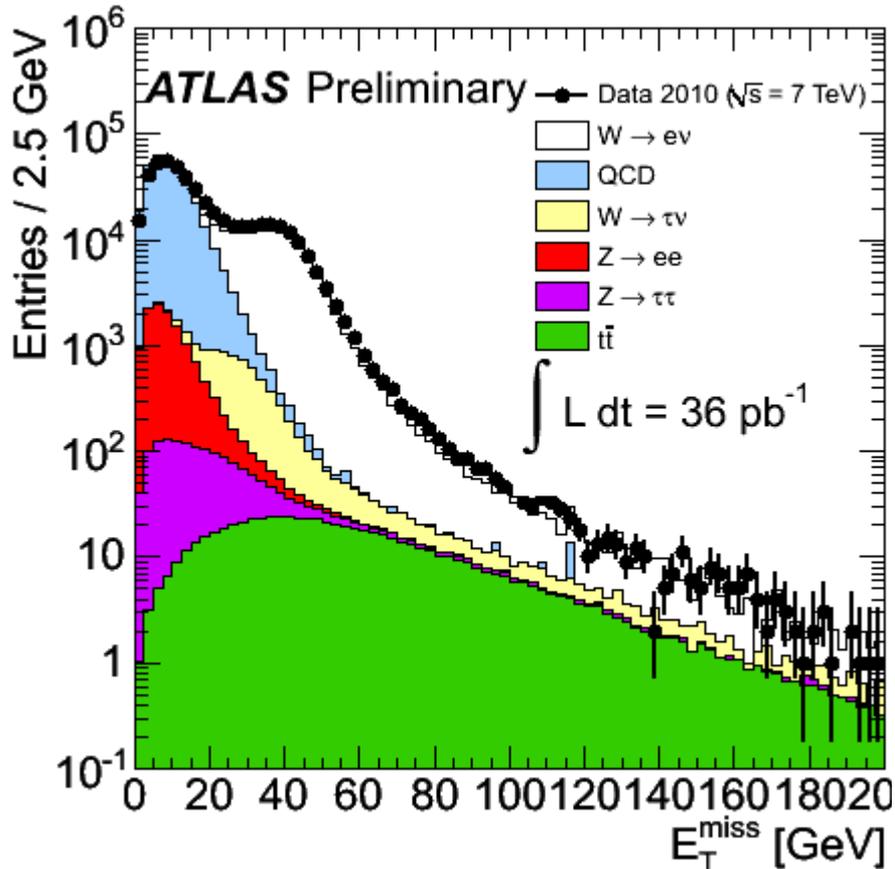
Signaturen des W-Teilchens

- Am einfachsten zu sehen : $e\nu$ und $\mu\nu$



Charakteristik

fehlender Impuls durch Neutrinos senkrecht zum Strahl: \vec{p}_T^{miss}
 Definition: fehlende „transversale“ Energie: $E_T^{\text{miss}} := |\vec{p}_T^{\text{miss}}|c$



sichtbar: elektrisch geladenes Lepton

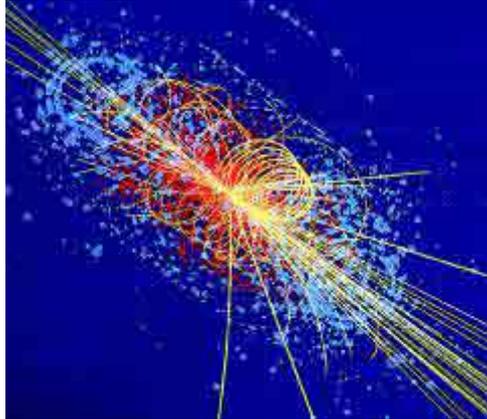
W \rightarrow $e\nu$

W \rightarrow $\mu\nu$

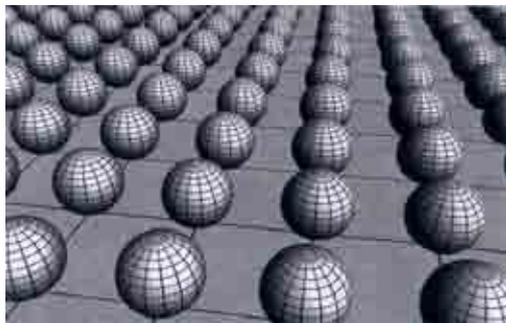
aber trotzdem immer vorhanden: „**Signal**“ und „**Untergrund**“

Ziele des LHC

Wiederentdecken des Bekannten + Suche nach Neuem!



- Higgs Teilchen
 - was ist überhaupt Masse?
- Supersymmetrie (à Dunkle Materie?)
 - nur 4% des Weltalls ist „normale“ Materie !



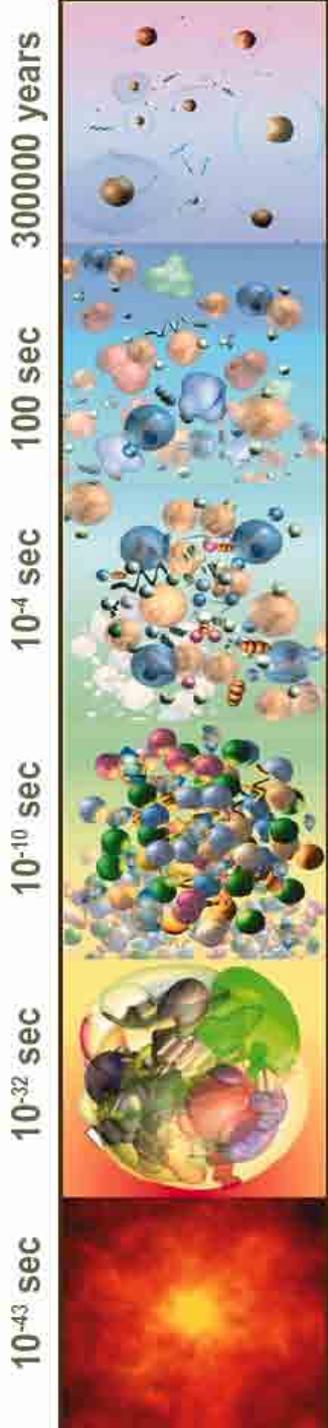
UNSICHTBAR!

Messbare Gravitationslinsen
aus leuchtender und dunkler
Materie

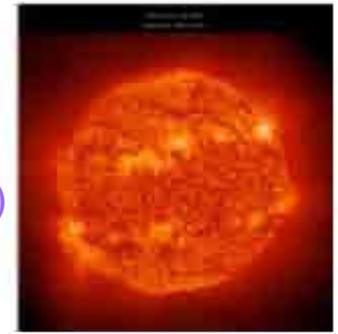
3000 unsichtbare, aber im
Prinzip spürbare Teilchen pro
Kubikmeter Universum ?

- zusätzliche
Raumdimensionen?

Massen der Teilchen



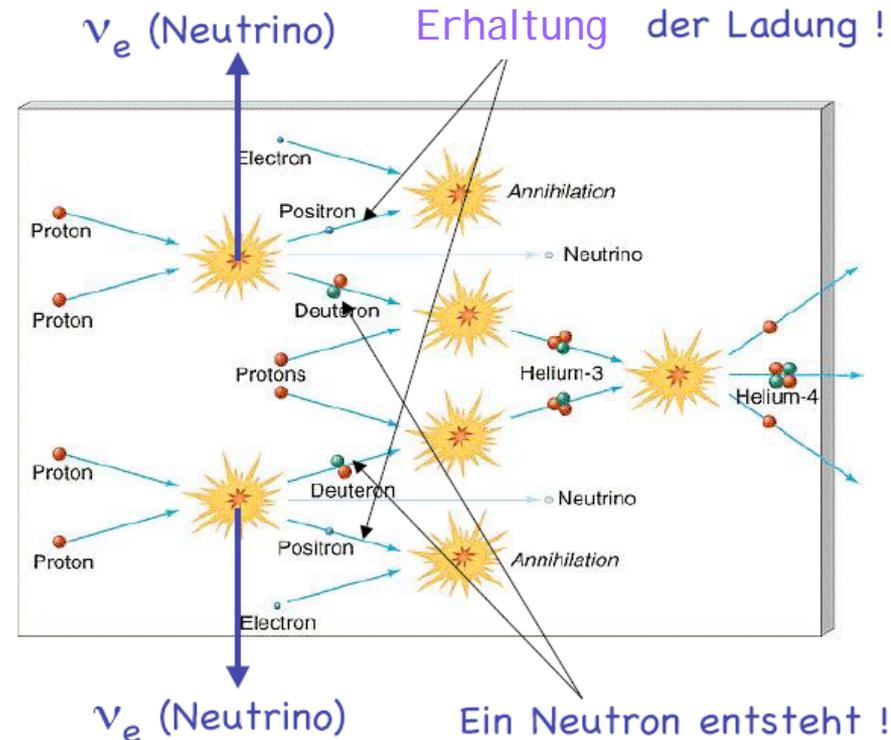
- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne
 - $p + p \rightarrow D + e^+ + n$ (Energiegewinn: $\Delta E = 0,5 \text{ MeV}$)
 - Masse des Zwischenzustands $m_W = 80400 \text{ MeV}$
 - Rate unterdrückt um $\sim (\Delta E / m_W)^4 > 10^{-20}$



Fundamentales Problem

(MeV)	Experim.	Theorie
m_W	80400	0
m_Z	91200	0
m_e	0,5	0
m_t	172000	0
...		

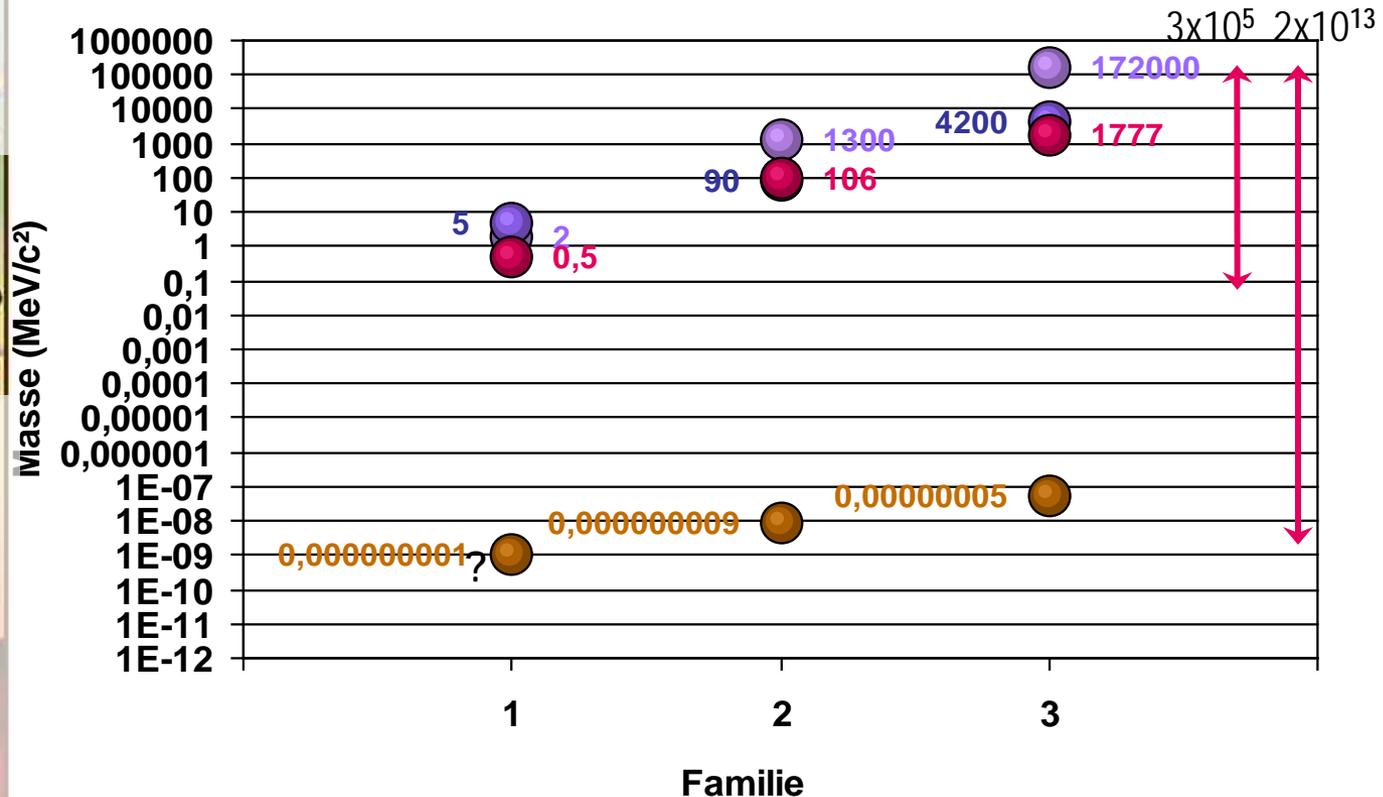
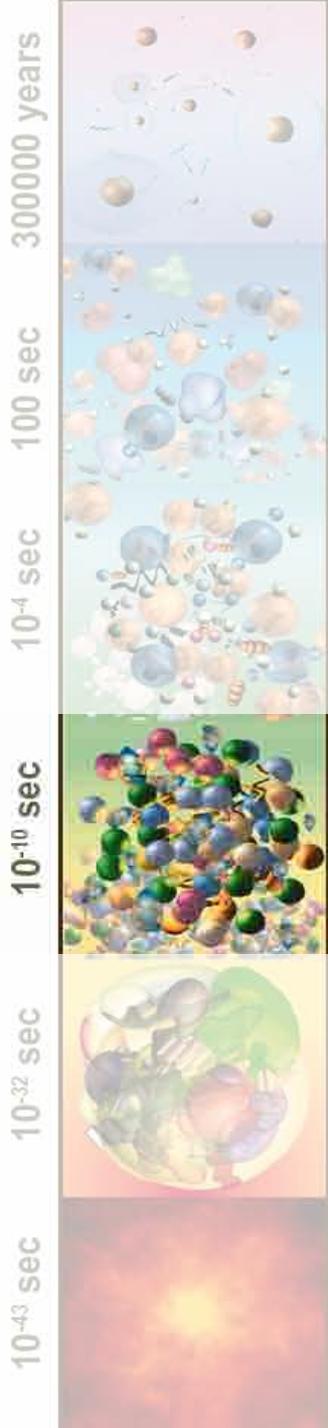
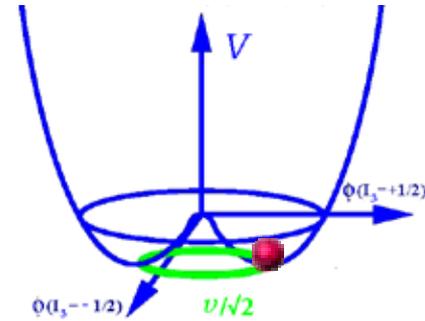
- Grund: Symmetrieprinzipien



Die Ruhemassen der Bausteine

n Symmetrien erfordern masselose Teilchen

- Erhalten Masse erst $\sim 10^{-11}$ sec nach Urknall durch „spontane“ Symmetriebrechung
- Entsteht Masse durch Kopplung an ein „Higgs“ Hintergrundfeld?
- Was verursacht die riesigen Massenunterschiede ?



- Up Typ
- Down Typ
- Lepton +/-
- Neutrino

Was ist Masse?

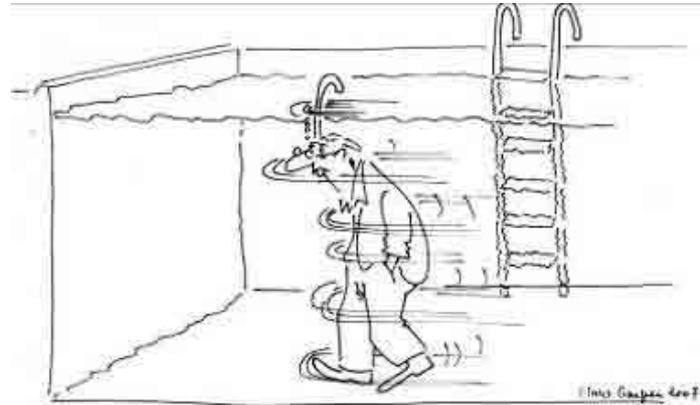
■ “Leeres” Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



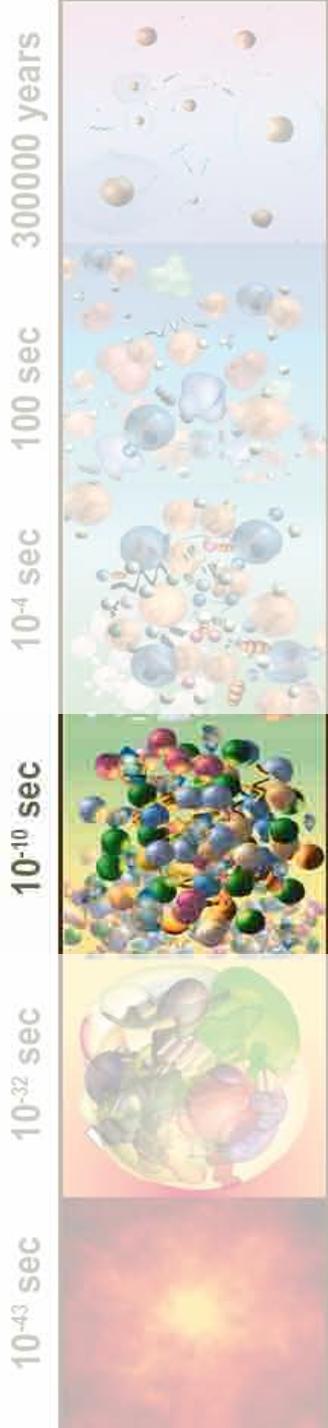
■ Higgshintergrundfeld

- Teilchen werden d. Wechselwirkung mit dem Higgsfeld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der WW mit dem Hintergrundfeld ab



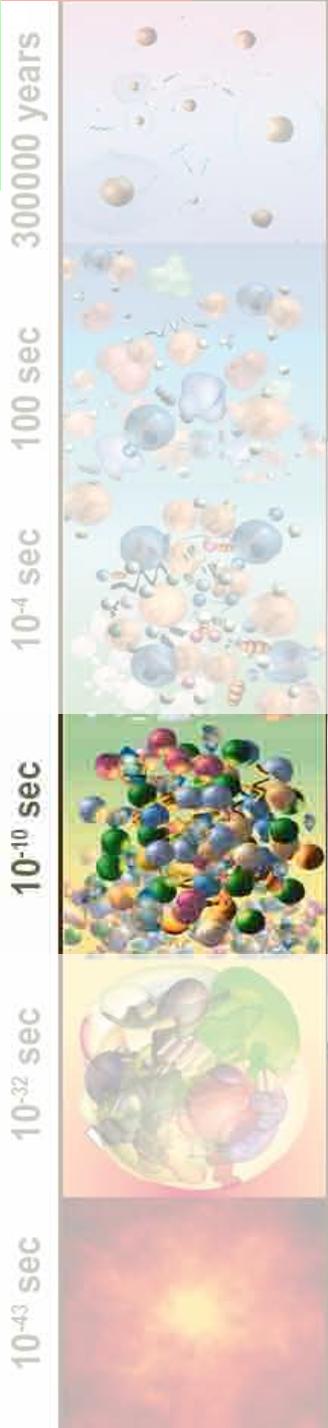
■ Higgs-Teilchen

- quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes
- **notwendige Konsequenz des Konzepts!**



Mechanische Analogie zur Higgs Produktion

- Luft (~ Higgsfeld) normalerweise kaum zu spüren
am Besten erfahrbar, wenn in Bewegung
- Objekte hoher Energie erzeugen Anregungen der Luft
- Objekte hoher Masse erzeugen Anregung im Higgsfeld
= Higgs-Teilchen

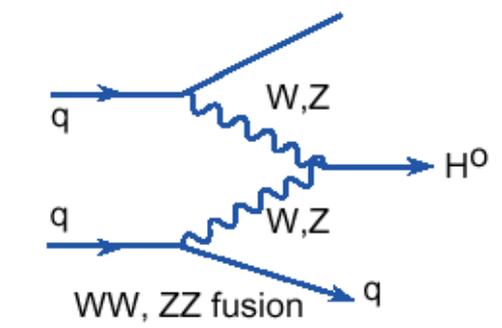
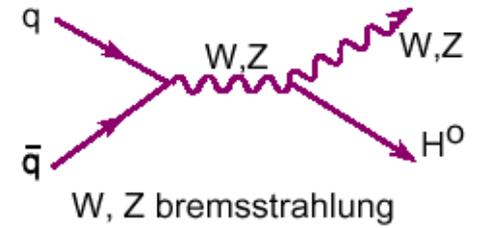
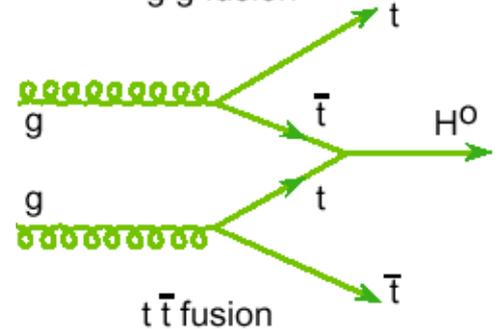
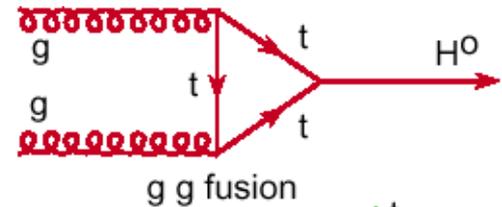
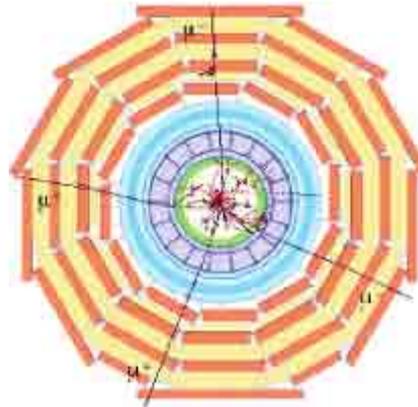
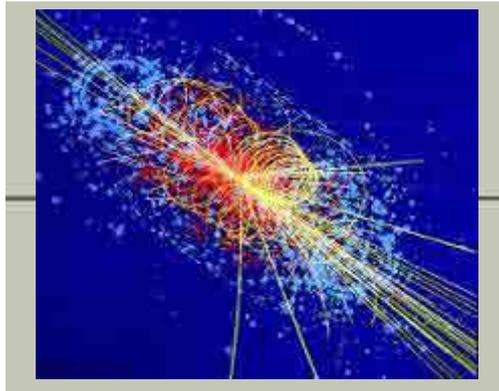


Higgs Suche bei ATLAS und CMS

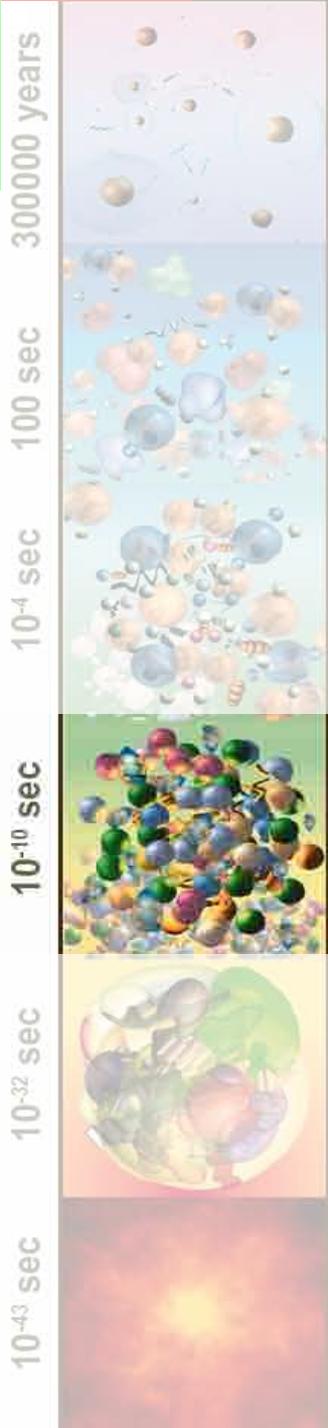
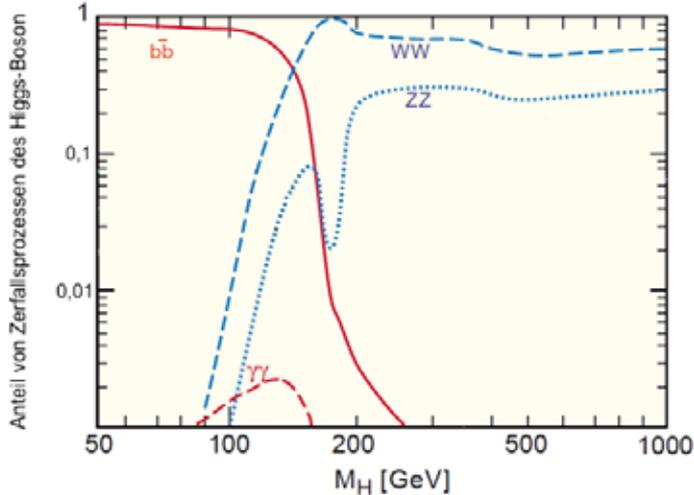
à www.atlas.ch/multimedia

n Higgs Masse unbekannt:

- Viele Produktionsmechanismen
- Viele mögliche Zerfälle



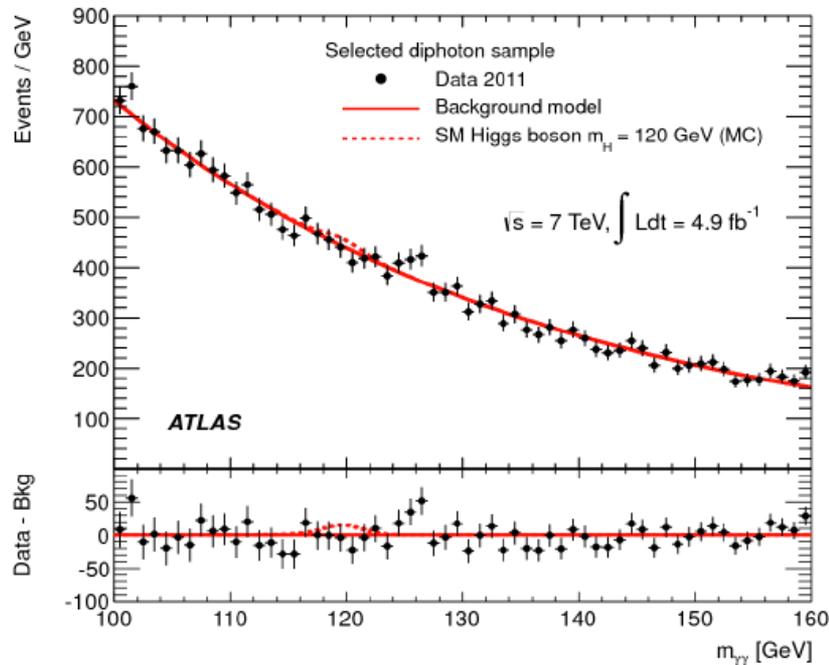
• Als Funktion der Masse vorhersagbar



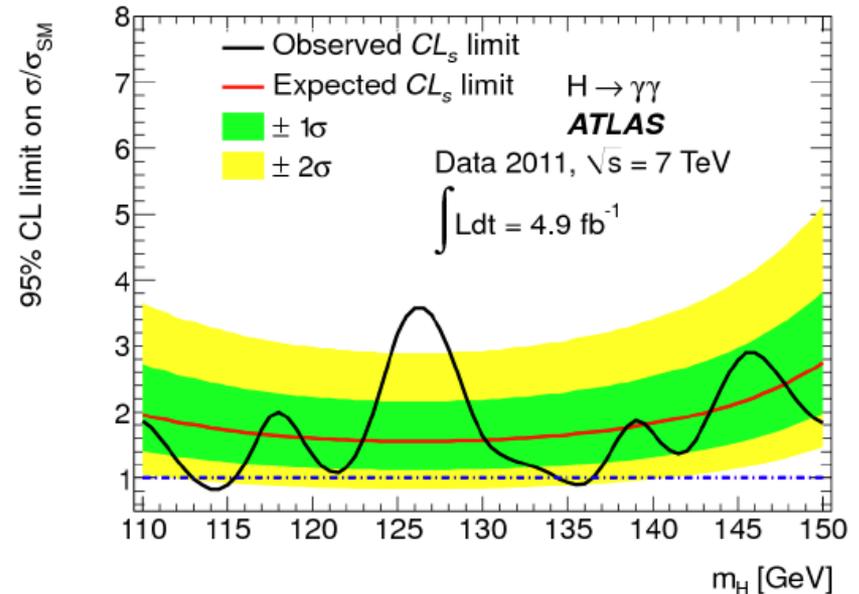
ATLAS Suche nach $H \rightarrow \gamma\gamma$ (7. März 2012)

- Signatur:
Anhäufung bei bestimmter „invarianter“ Masse $m_{\gamma\gamma}$

Invariant $m_{\gamma\gamma}$ distribution,
summed over all categories:



Exclusion limit:

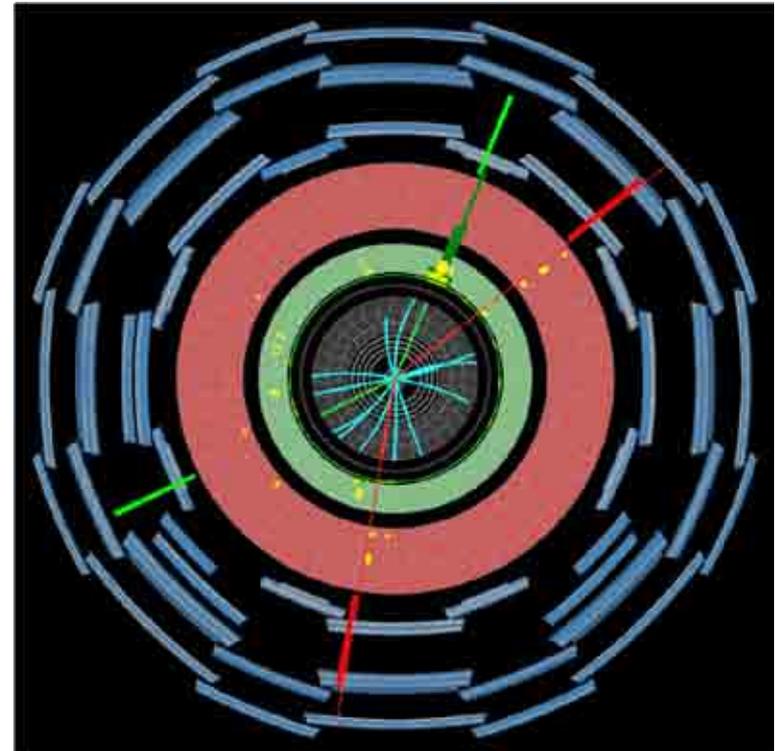
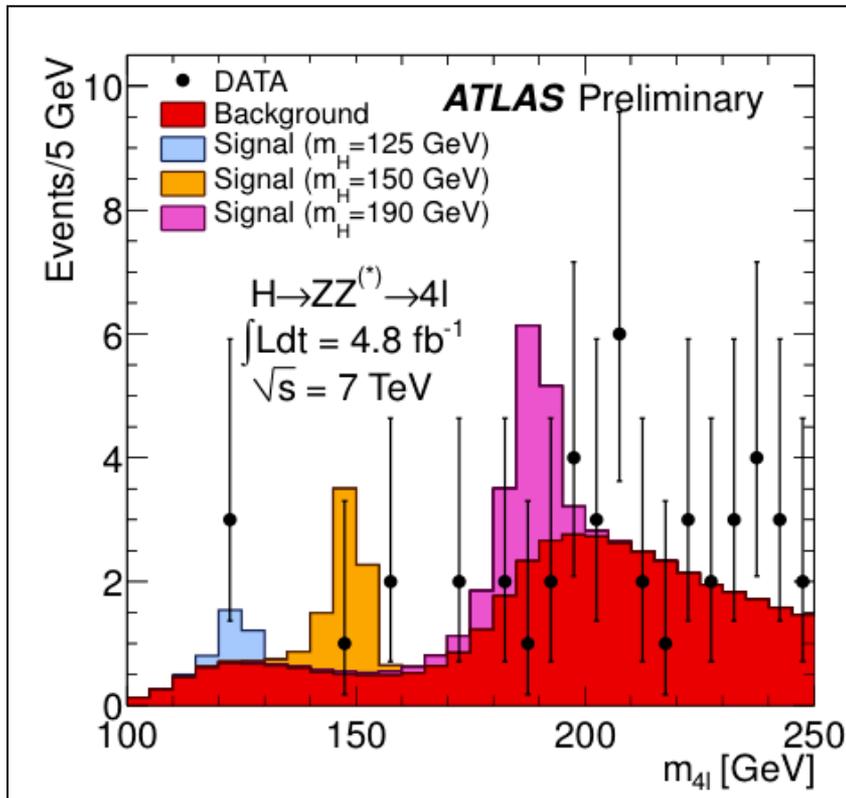


- Observed exclusion:
113-115 GeV, 134.5-136 GeV.

Largest excess of events observed at 126.5 GeV.

- Local significance: 2.8σ (Global: 1.5σ for $m_H = 110$ -150 GeV).

- ✓ „Goldener Kanal“ (kein „Untergrund“ außer echten ZZ)
- ✓ Am sensitivsten für $200 \text{ GeV} < m_H < 275 \text{ GeV}$
- ✓ Am zweitsensitivsten (nach WW) für $130 \text{ GeV} < m_H < 200 \text{ GeV}$



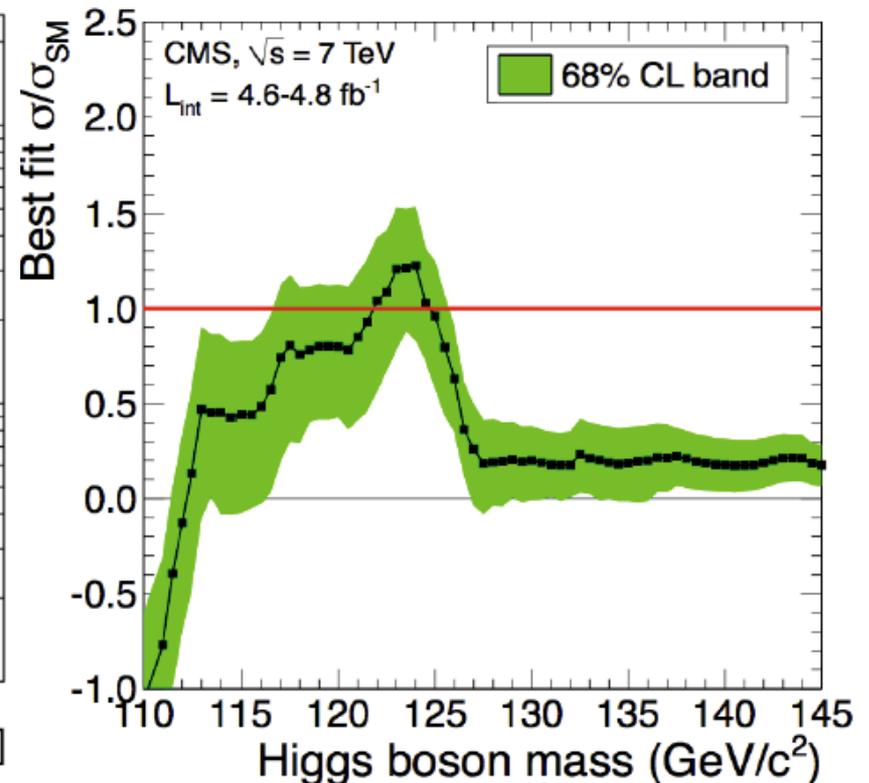
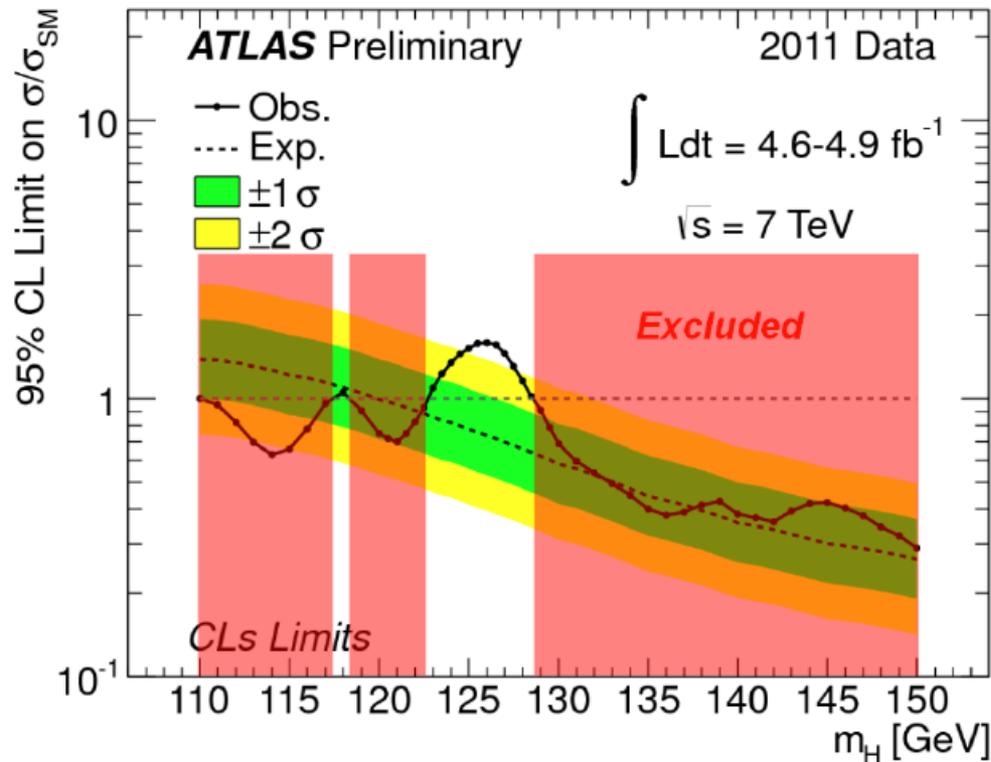
ATLAS

∨ Ausschlussgebiete möglicher Massen des Higgs Bosons

CMS

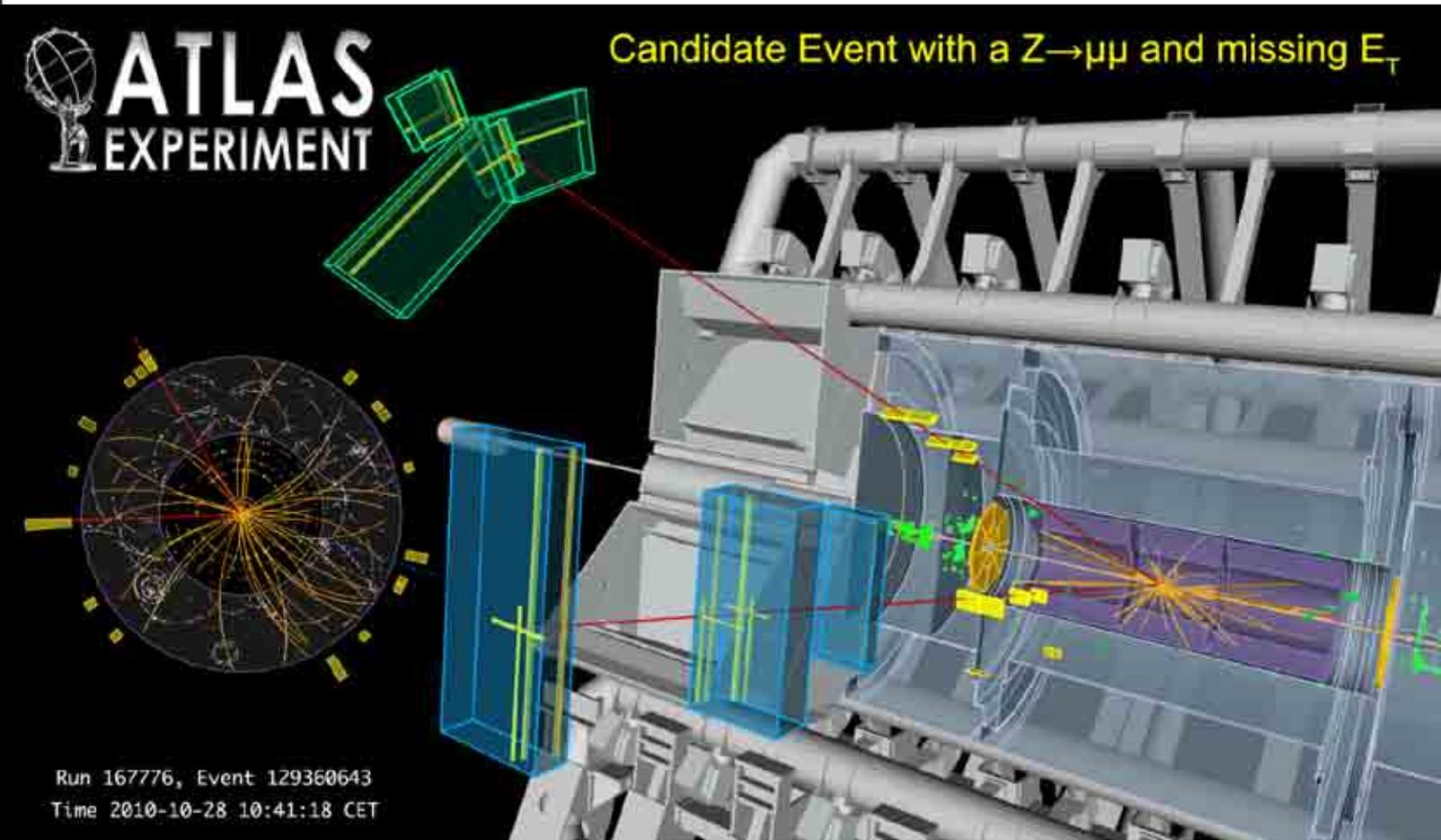
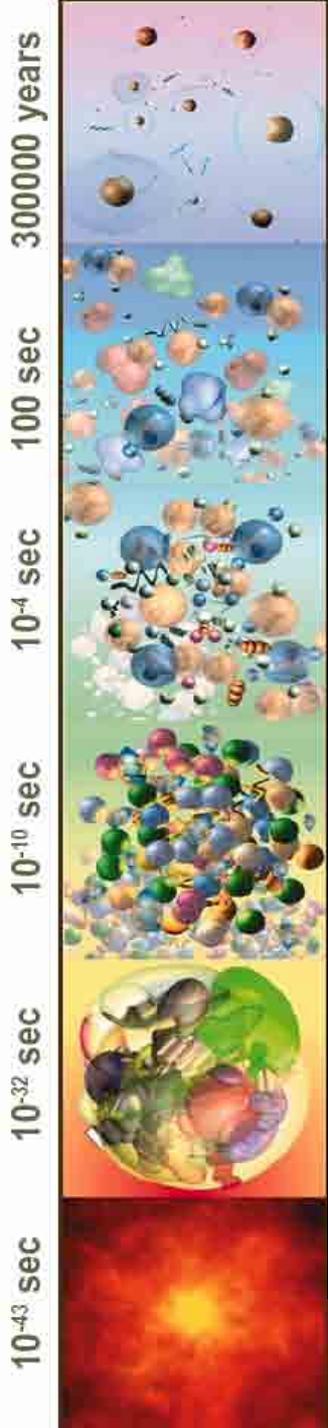
∨ Vereinbarkeit der Häufigkeit mit der Vorhersage

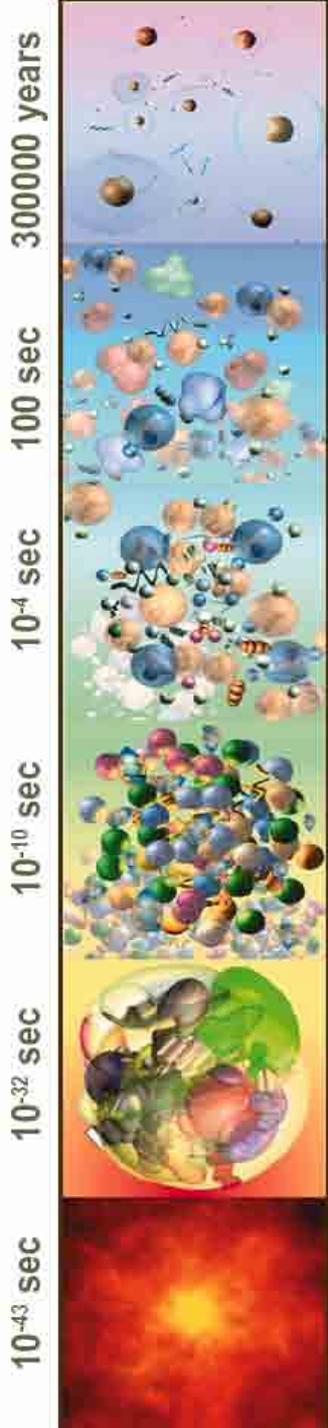
arXiv:1202.1488
Accepted by PLB



Zweite Aufgabe für später

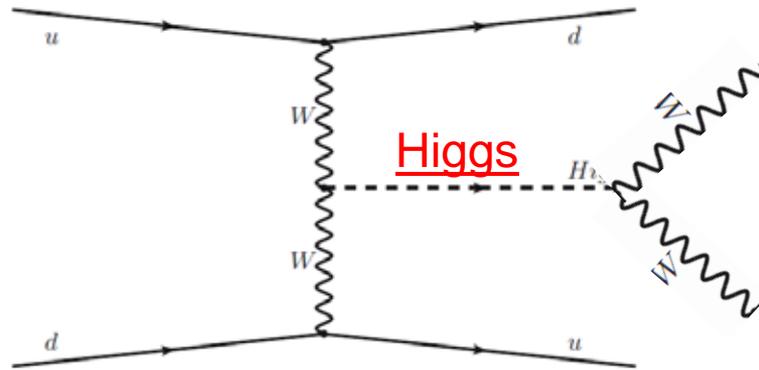
- Finden Sie Kandidaten für $H \rightarrow W^+ W^-$





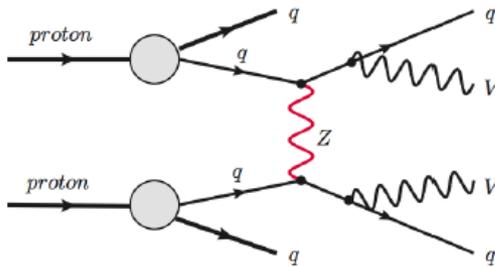
Konkurrenz anderer echter WW Erzeugung

n Gesuchtes Signal $H \rightarrow W^+ W^-$

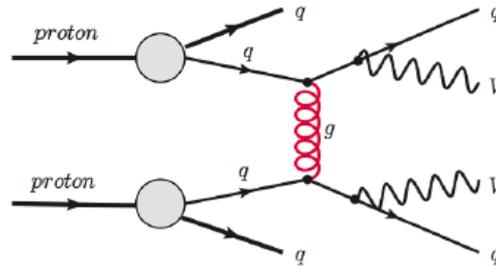


n Untergrund aus anderer $W^+ W^-$ Erzeugung

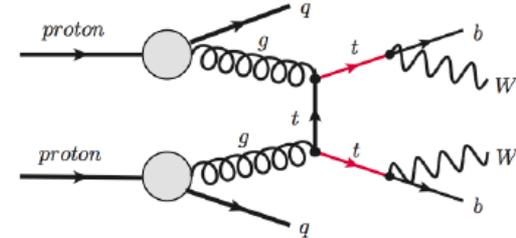
A) EW



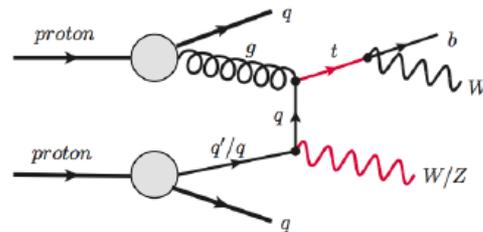
B) QCD



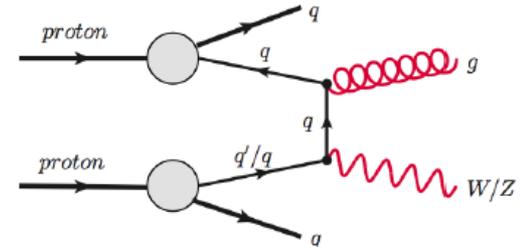
C) Top pairs



D) Single top



E) WZ+jets

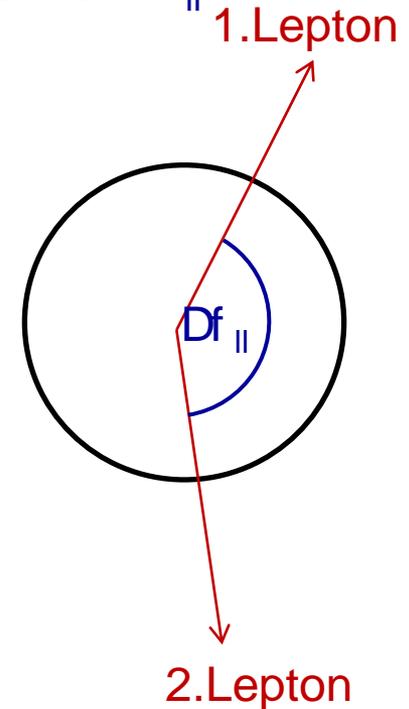
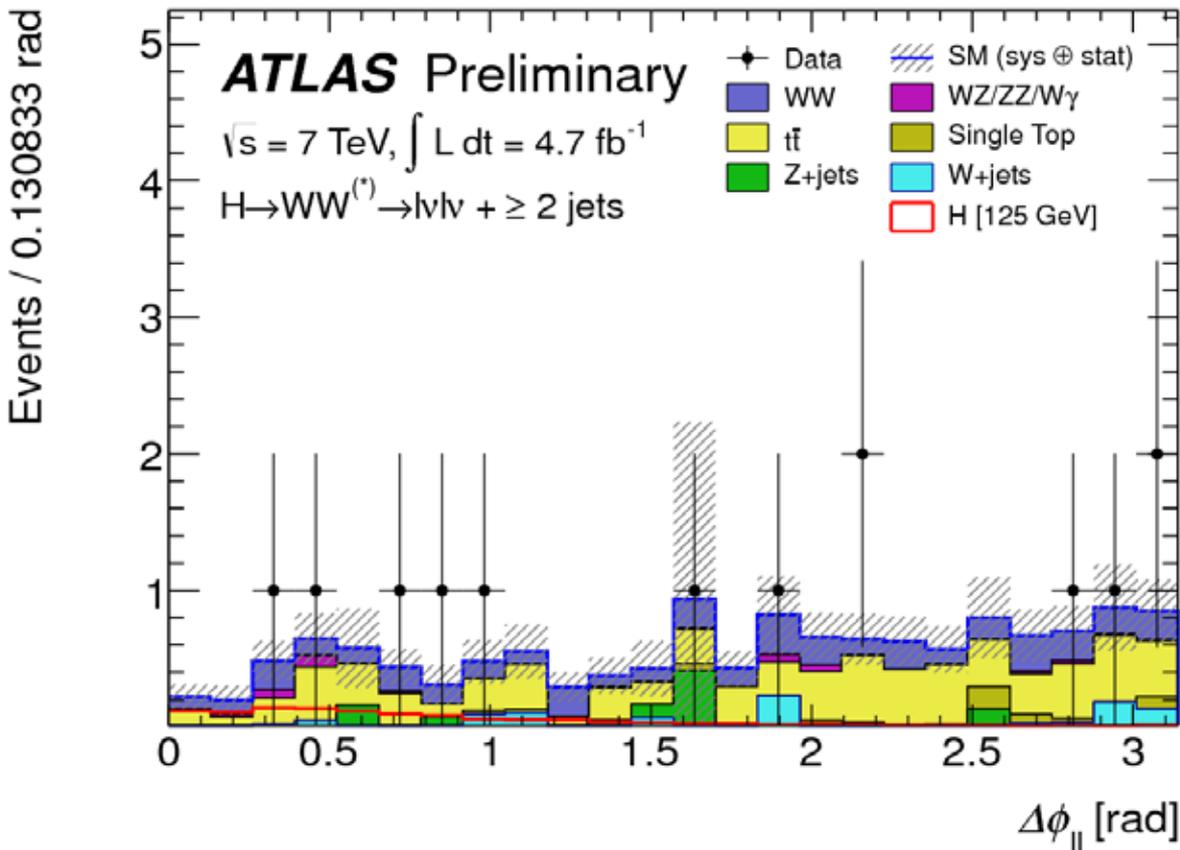


Neuestes ATLAS Ergebnis:

Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ decay mode with 4.7 fb⁻¹ of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV

ATLAS Collaboration, **05 March 2012**, <http://cdsweb.cern.ch/record/1429660>

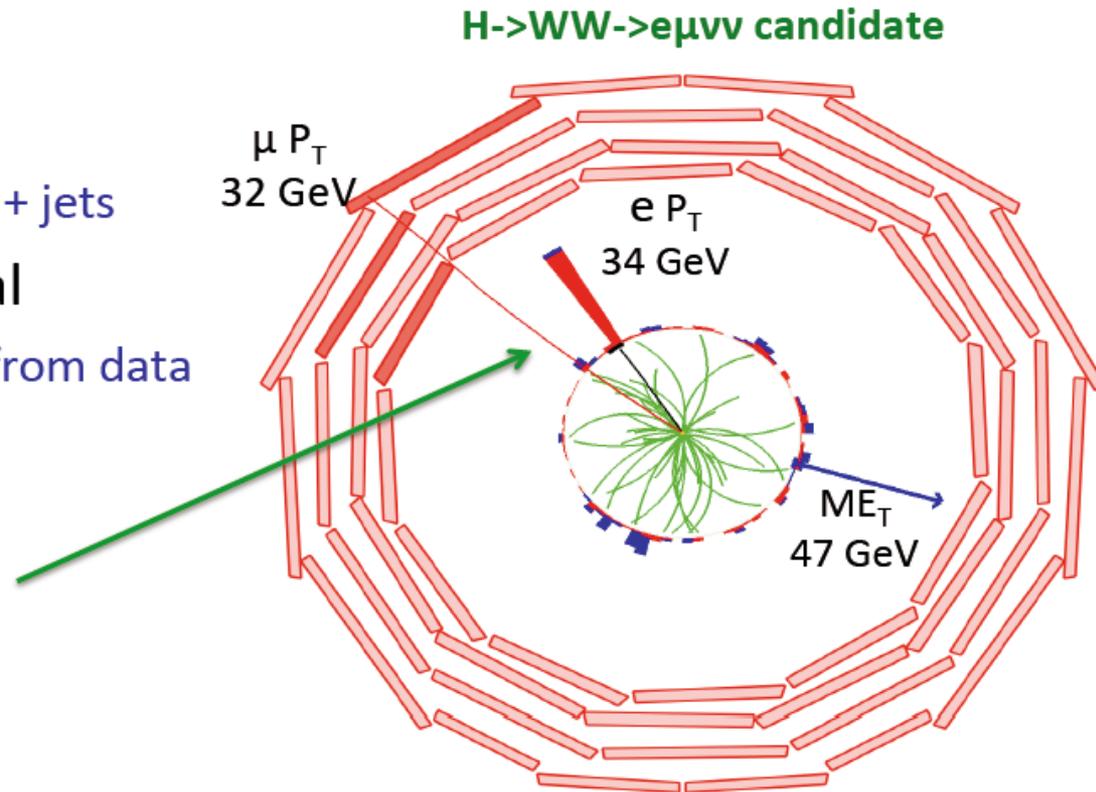
- Beispiel: 13 W^+W^- + 2 Jets Kandidaten
- (mehr Kandidaten mit 1 Jet oder 0 Jets)
- Higgs signal (Rot) erwartet bei kleinen werten von Df_{\parallel}



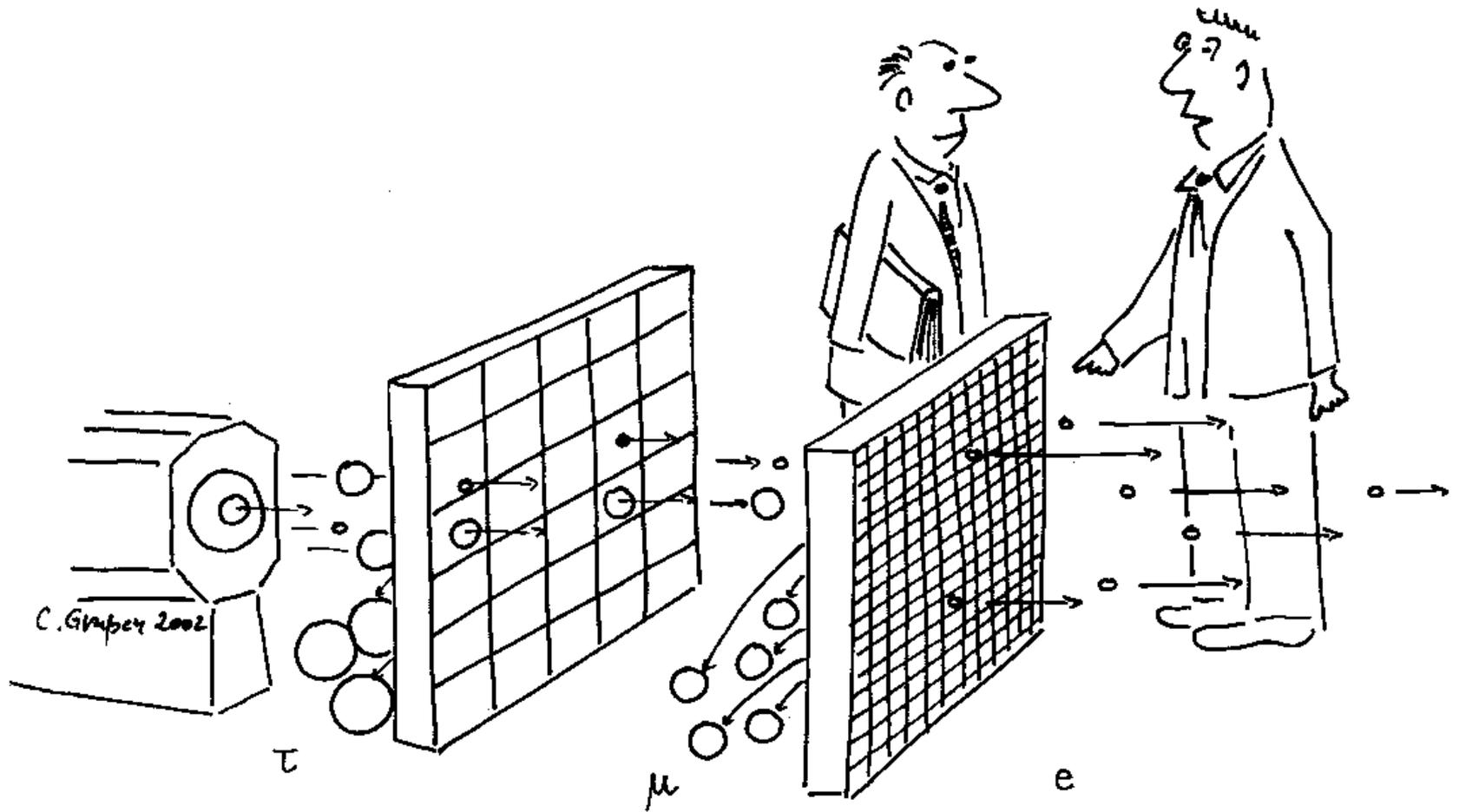
Ähnlich in CMS

- Two high p_T isolated leptons + MET
- Main backgrounds
 - WW (irreducible)
 - Z+jets, WZ, ZZ, tt, W + jets
- BG estimation crucial
 - Main BG estimated from data

Scalar BEH boson +
V-A structure of W decay
favors small opening angle
between the 2 charged
leptons
(tend to have small $\Delta\phi$)



UND VIEL SPAß!



"Our new lepton identifier!"