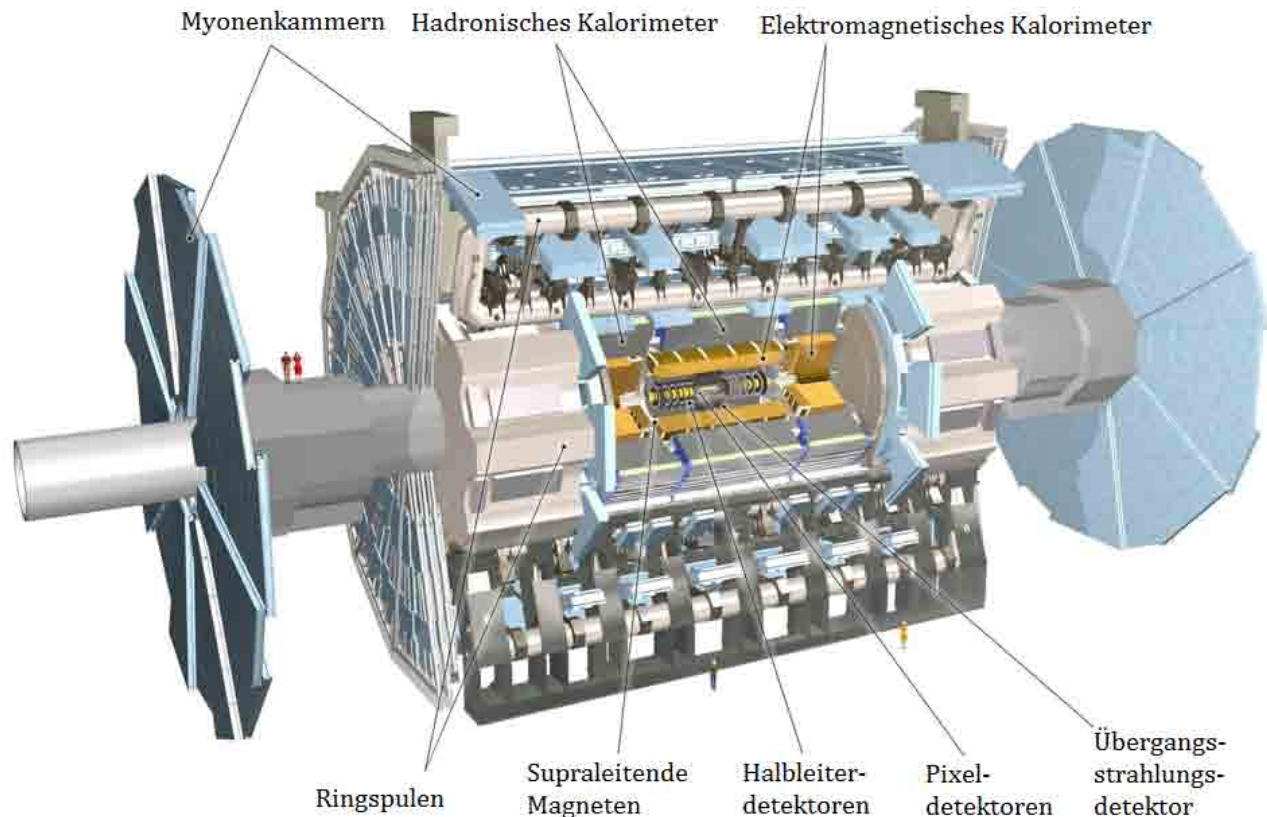


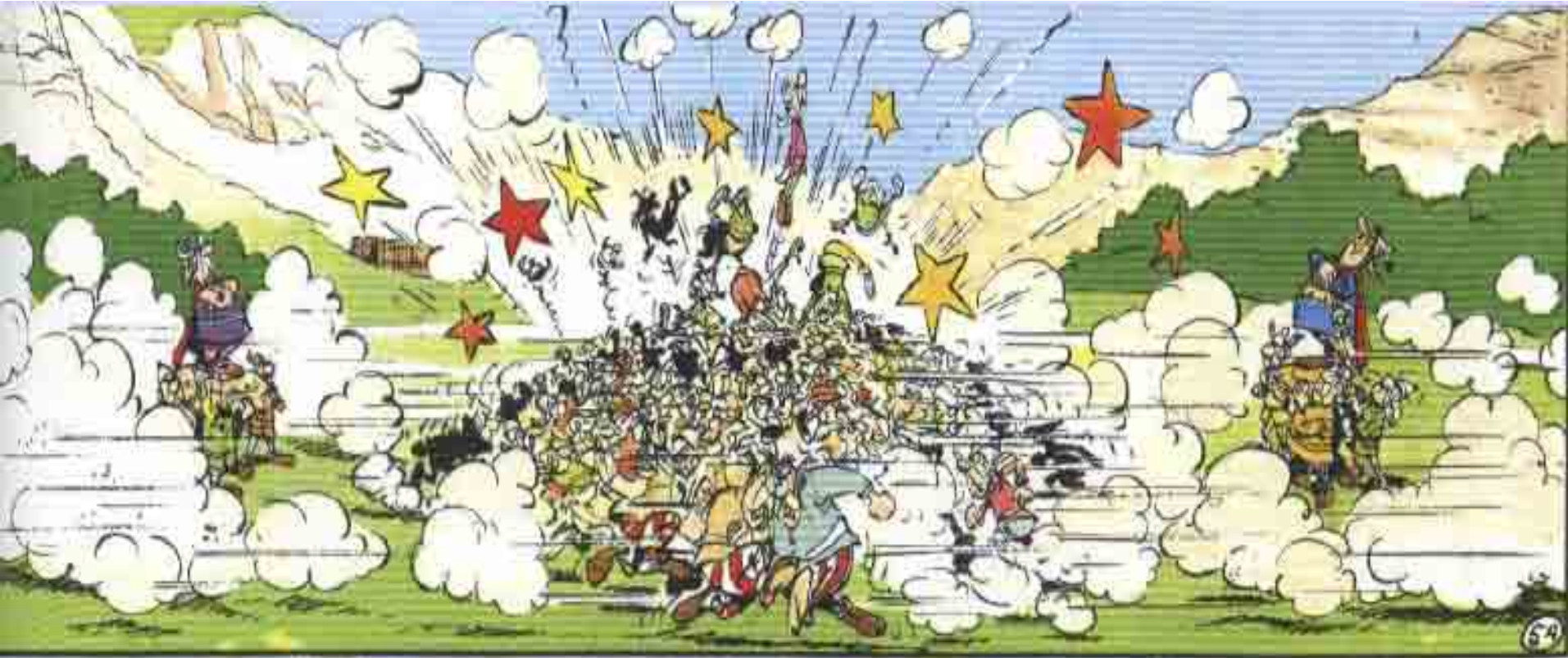
Das Standardmodell der Teilchenphysik und die Bedeutung der Teilchenmassen

Michael Kobel (TU Dresden)

Schülertag Internationale Masterclasses, Dresden
11.03.2013







Warum?



Raum



Zeit



Materie

...Raum:

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

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

... Materie:

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

Albert Einstein

neue und schwere Materie

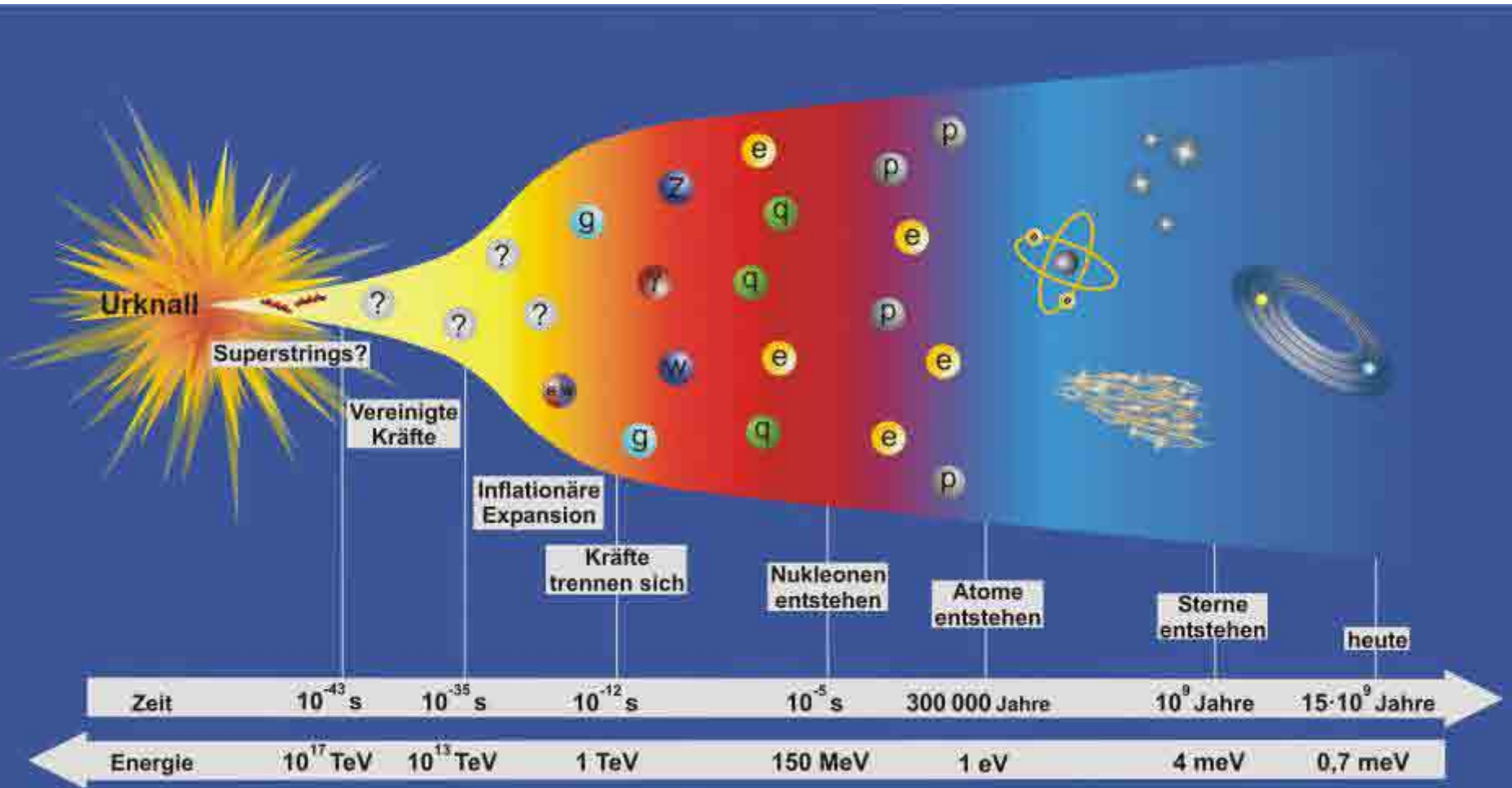
... Zeit:

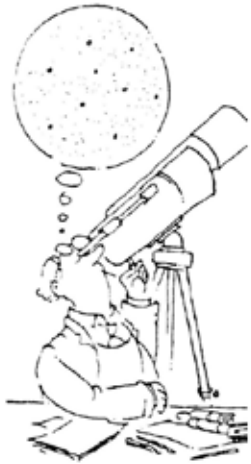
$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit

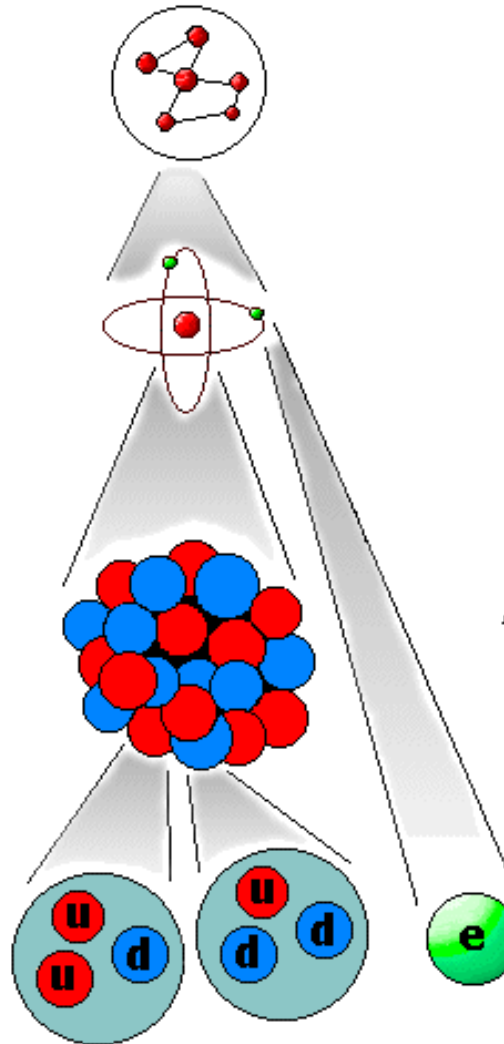




Makrokosmo



Mikrokosmos



Molekül (aus Atomen)

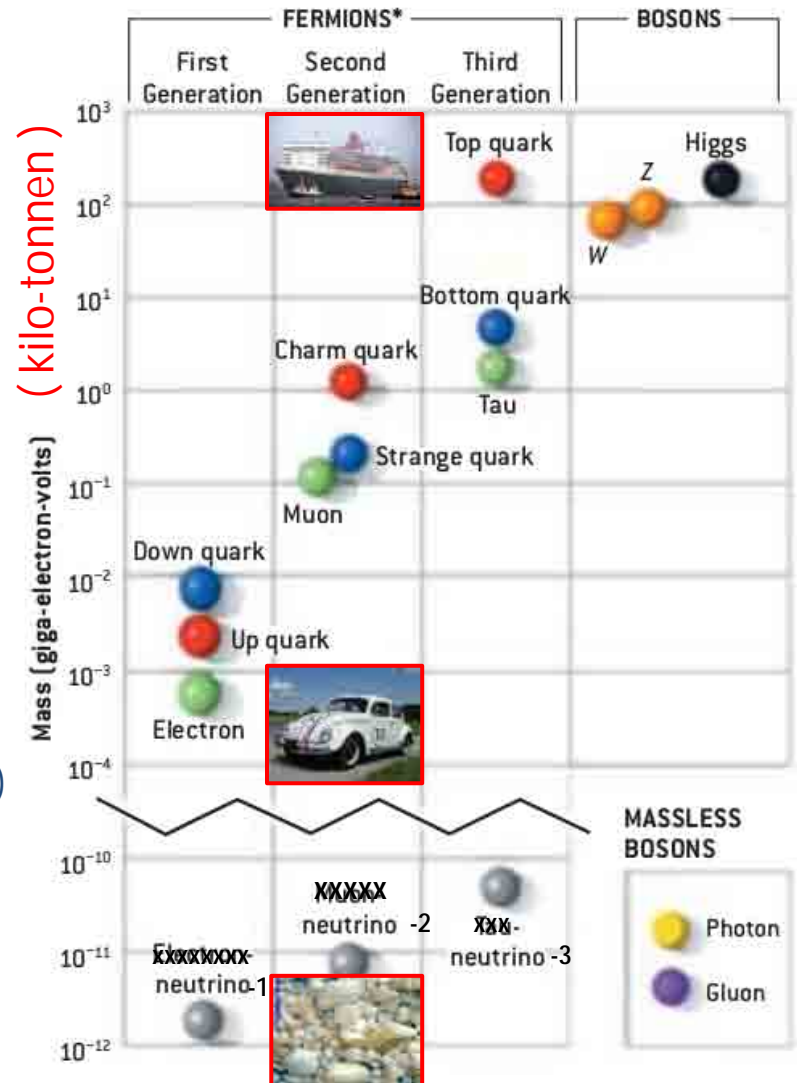
Atom (aus Atomkern
und Atomhülle)

Atomkern (aus Protonen
und Neutronen)

Elementarteilchen
(Up-Quark,
Down-Quark,
Elektron, Neutrino)

Die Massen der Elementarteilchen...

- ...überdecken 14(!) Größenordnungen
 - Neutrino n ~ Sandkorn
 - Elektron e ~ Auto
 - Top-Quark t ~ Ozeandampfer
- ... sind eine Eigenschaft von
 - Teilchen ohne Unterstruktur (ziemlich sicher für Fermionen)
 - d.h. sind keine Frage von „Größe“
- ... haben ein charakteristisches Muster
 - In bezug auf Familien (auch: „Generationen“)
 - In bezug auf Neutrinos ($\sim 10^{10}$ mal leichter als ihre Partner)



The Dawn of Physics Beyond the Standard Model,
by Gordon Kane, Scientific American, June 2003

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

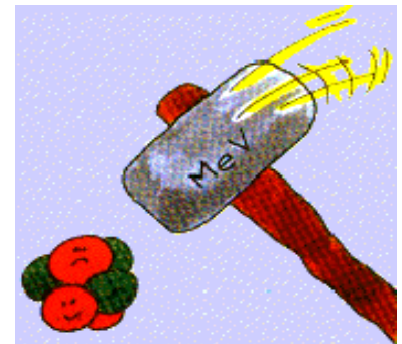
Elektronmasse regiert atomare **Energien** und **Radien**,
sowie Stabilität des Wasserstoffatoms

- Ⓡ Bindungsenergie steigt mit m_e
- Ⓡ Atomdurchmesser fällt mit $1 / m_e$
- Ⓡ Kleinere Massendifferenz $m_d - m_e$
würde H-Atome instabil machen: $p + e^- \rightarrow n + n$



Ⓡ Kein Sternbrennen ohne Protonen

- Ⓡ Proton stabil, da leichter als Neutron
 $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$, $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$
- Ⓡ Unterschied ($1,3 \text{ MeV}/c^2$) kommt von
 - Ⓡ Massendifferenz: $m_d - m_u = 2,5 \text{ MeV}/c^2$
 - Ⓡ Effekten der elektromagnetischen Kraft ($-1,2 \text{ MeV}/c^2$)



Tatsächlicher kosmologischer Ablauf



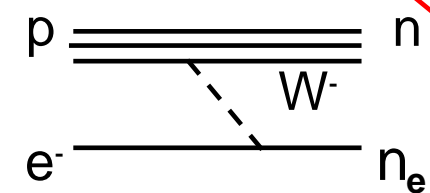
View Online: www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs

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, g, 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.



Basis #1 des Standardmodells: Wechselwirkung

- Pierers Universallexikon:

- **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier gleichzeitig vorhandener Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.

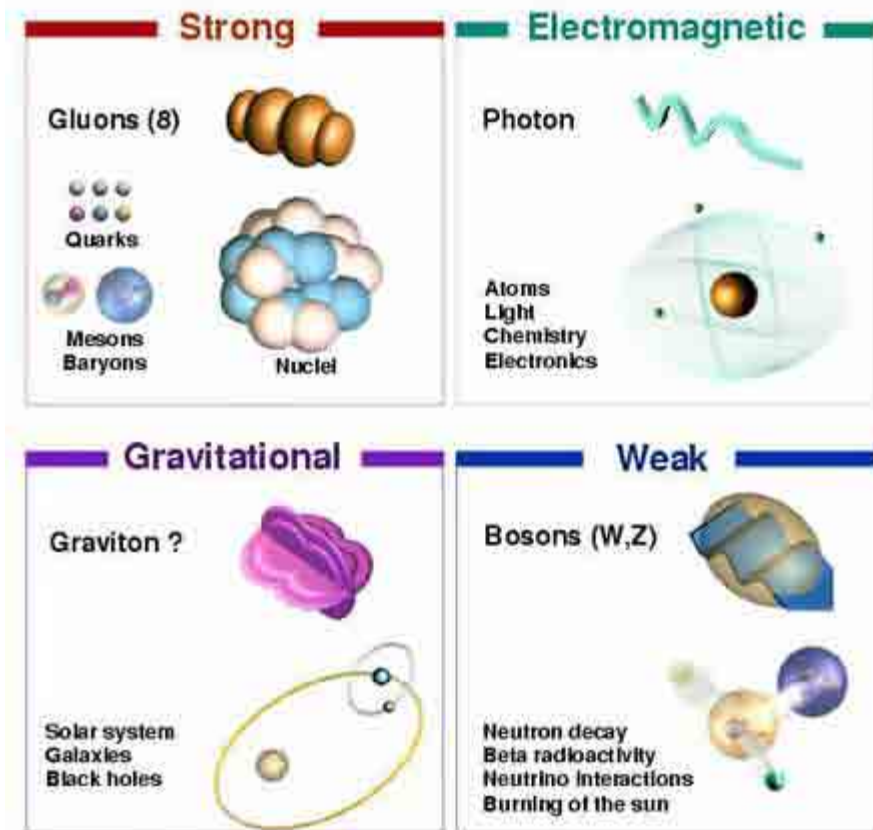


- In der Teilchenphysik sogar mehr als das

- Alle(!) Vorgänge in der Natur lassen sich zurückführen auf nur **4 Fundamentale Wechselwirkungen**
- 3 dieser Wechselwirkungen werden im Standardmodell erklärt
- Diese vereinigen die Phänomene „Entstehung“, „Kraft“ u. „Zerfall“

Einteilung (Aufgabe für Euch)

- Welche „Kräfte“ gehören zu welcher fundamentalen Wechselwirkung?
 - Schwerkraft
 - Kernkraft
 - Coulomb-Kraft
 - Reibungskraft
 - Muskelkraft
 - Motorkraft
 - ...
- Woran könnte es liegen, dass wir von manchen Wechselwirkungen nichts „merken“? Von welchen?
- Welche können wir direkt spüren?
 - Gravitation
 - Elektromagnetismus
- Welche der beiden ist stärker?







The particle drawings are simple artistic representations

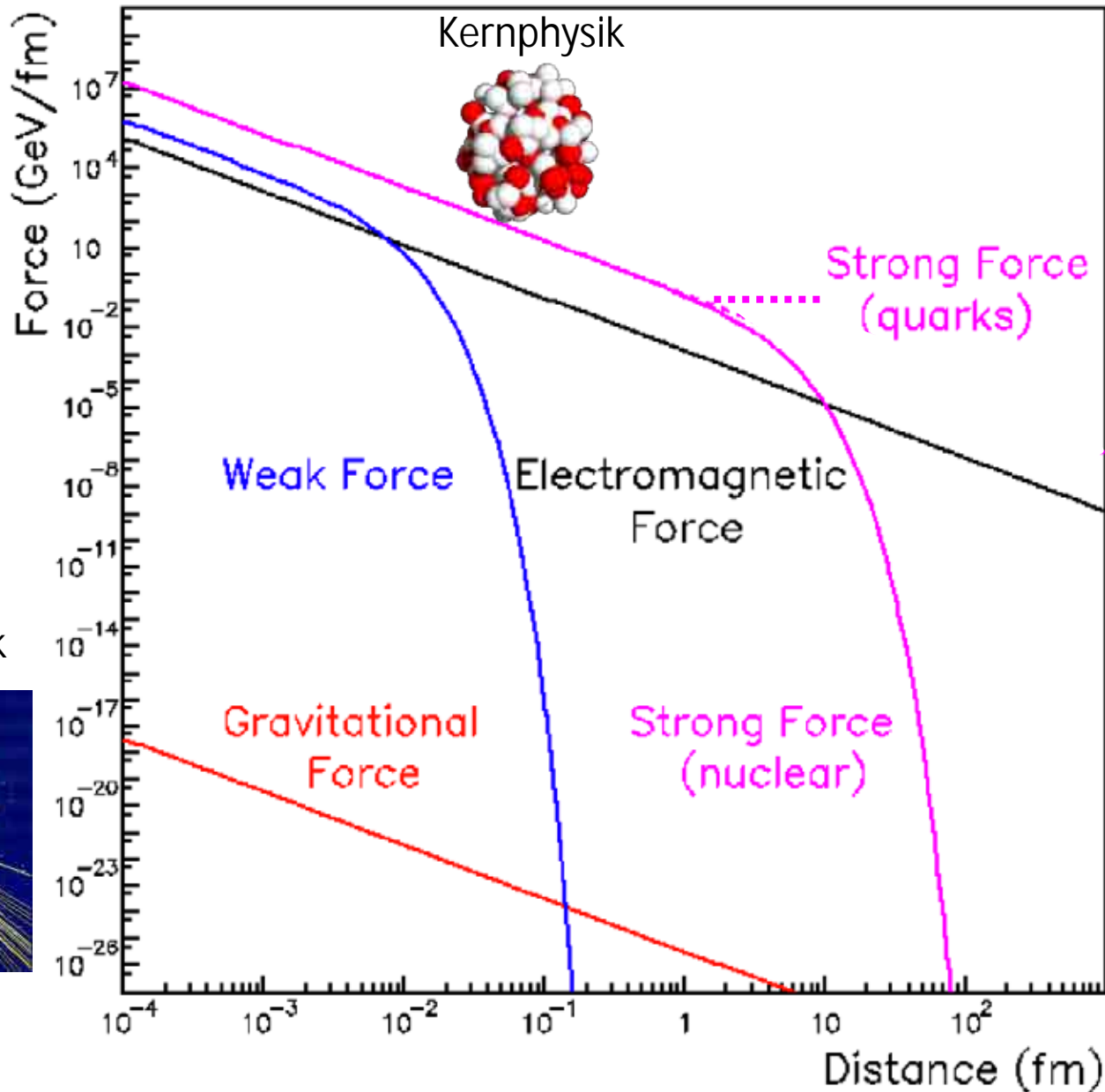
Ordnet die Stärke der Wechselwirkungen !

- Dies geht nicht eindeutig!
- Verbreiteter Fehler: jeder schreibt ab...

z.B. www.drillingsraum.de/4_grundkraefte_physik/4_grundkraefte_physik.html
(keine der schlechtesten Physikseiten...!)

| Kraft | relative Stärke | Bosonen | Masse [GeV/c ²] | Reichweite [Meter] |
|---|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|
| Stark  | 1 | 8 Gluonen | 0 | $2,5 \times 10^{-15}$ |
| E.M.  | 10^{-2} | Photon | 0 | ∞ |
| Schwach  | 10^{-6} | W^-, W^+, Z^0 | 80,80,91 | 10^{-18} |
| Gravitation  | 10^{-38} | Graviton? | 0 | ∞ |

Die Ordnung der WW-Stärke hängt vom Abstand ab!



Kernphysik



Strong Force (quarks)

Weak Force

Electromagnetic Force

Gravitational Force

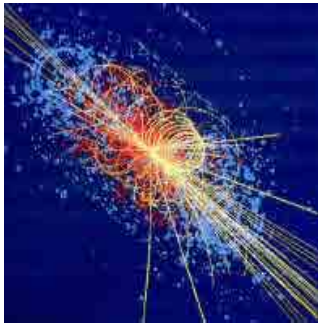
Strong Force (nuclear)

„Wir“





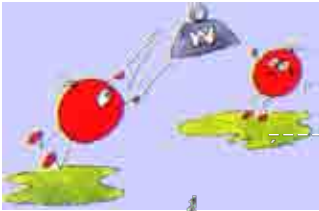
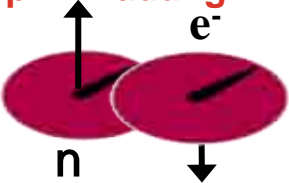
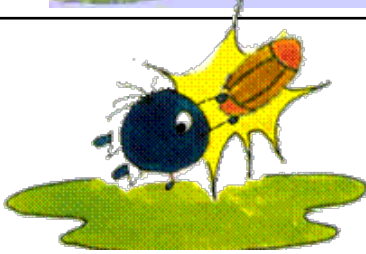
www.schmunze.mal.de

Teilchenphysik



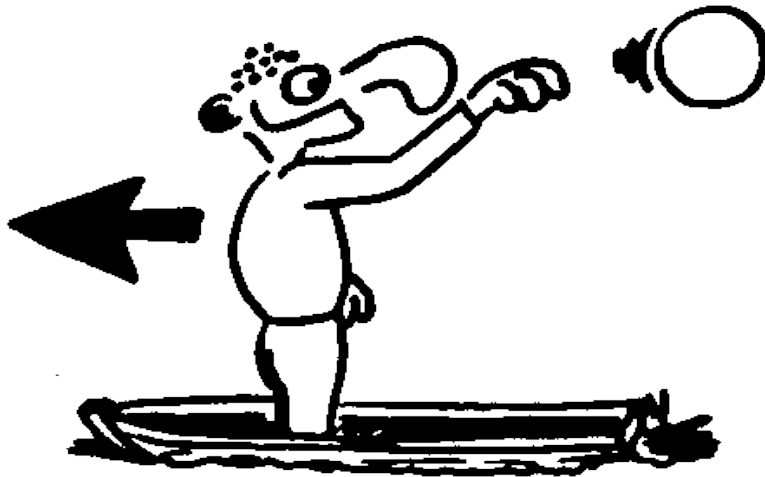
Die Theorie der Wechselwirkungen

- Jede Wechselwirkung (= Kraft+Umwandlung) hat eigene Botenteilchen
- Boten nur sendbar, wenn entsprechende Ladung vorhanden

| Wechselwirkung | Botenteilchen | Ladung der Materieteilchen |
|--------------------|---|---|
| Starke | Gluonen g  | Starke „Farb“-Ladung „Rot“, „Blau“, „Grün“  |
| Schwache | „Weakonen“ (W ⁺ , W ⁻ , Z)  | Schwache „Isospin“-Ladung $I_3^W = \begin{matrix} \uparrow & 1/2 & \ddot{o} \\ \downarrow & -1/2 & \ddot{o} \end{matrix}$  |
| Elektromagnetische | Photonen g  | Elektrische Ladung $Q = -1, +2/3, -1/3, \dots$ |
| Gravitation | Gravitonen ? Wahrscheinlich! | Masse ??? Eher nicht... |

Grundlegende Erkenntnis des „Standardmodells“

- 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

Basis #2 des Standardmodells: Ladung

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

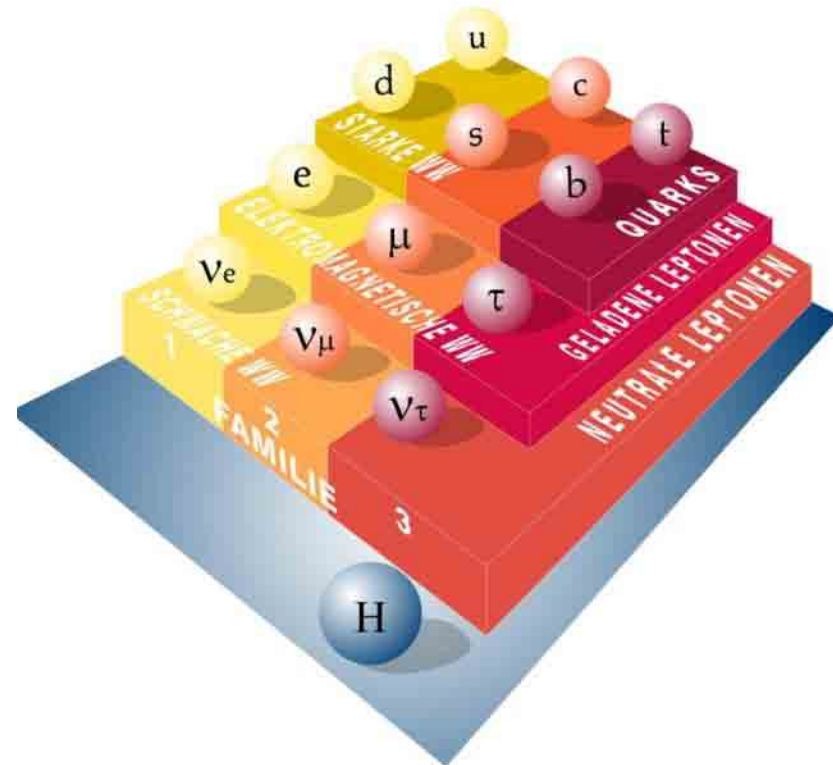
Neues über Ladung

- Es gibt 3 völlig verschiedene Ladungen (für jede WW des Standardmodells eine)
- Diese können Vektorcharakter haben (!)
- Die Teilchen ordnen sich bezüglich dieser Ladungen in „Multipletts“
 - Warum genau diese Anordnung im „Periodensystem der Teilchen“? → immernoch unverstanden!

| Elektrische Ladung Q | Schwache Ladung I^W_3 | Starke Ladung | Blau Grün Rot | |
|------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| $+2/3$ | $+1/2$ | u | c | t |
| $-1/3$ | $-1/2$ | d | s | b |
| 0 | $+1/2$ | ν_e | ν_μ | ν_τ |
| -1 | $-1/2$ | e | μ | τ |
| | | 1. | 2. | 3. |
| | | Familie | | |

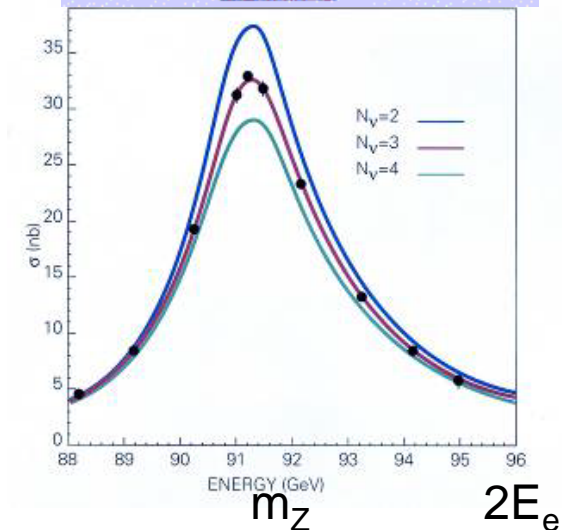
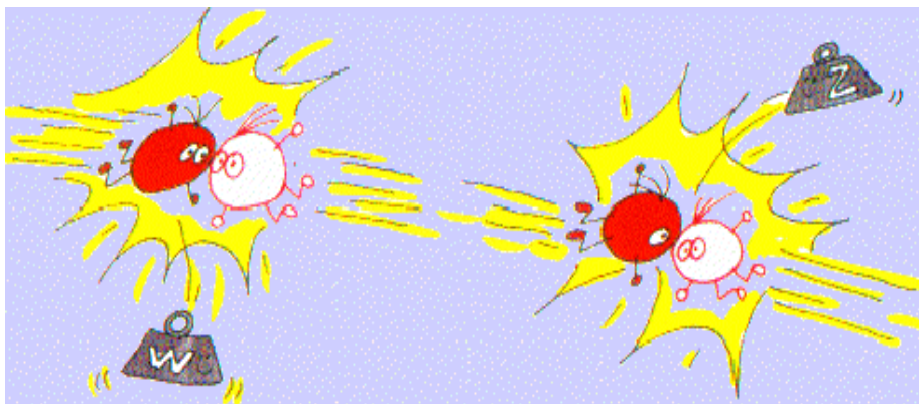
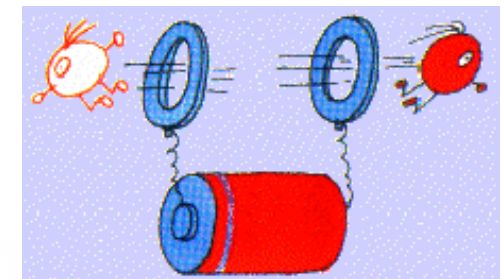
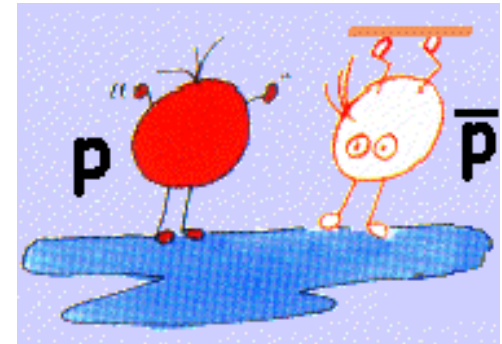
Quarks

Leptonen

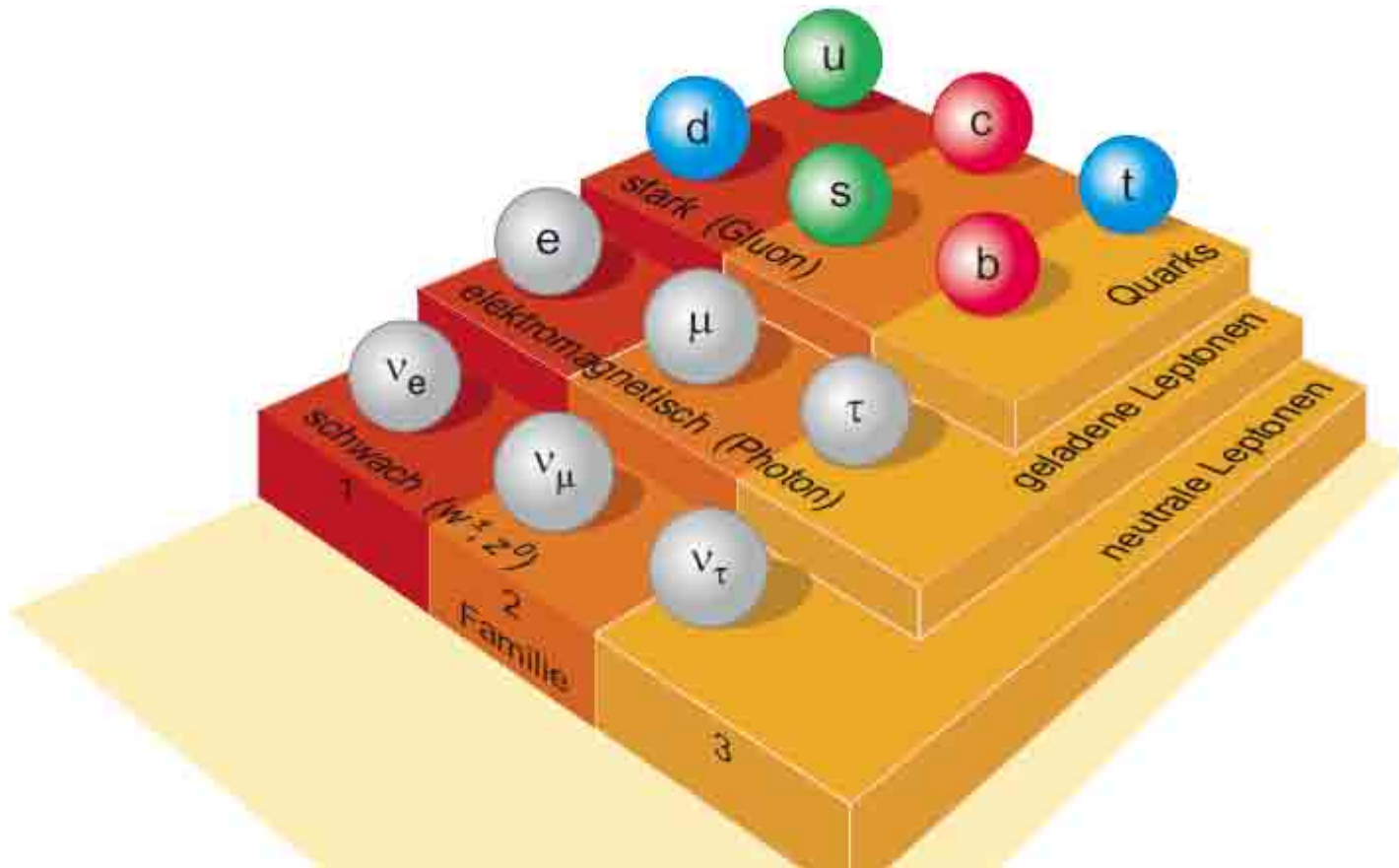


Antimaterie

- 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 (nicht: „reine Energie“!) **vernichten**



Standardmodell : weit mehr als Elementare Bausteine!

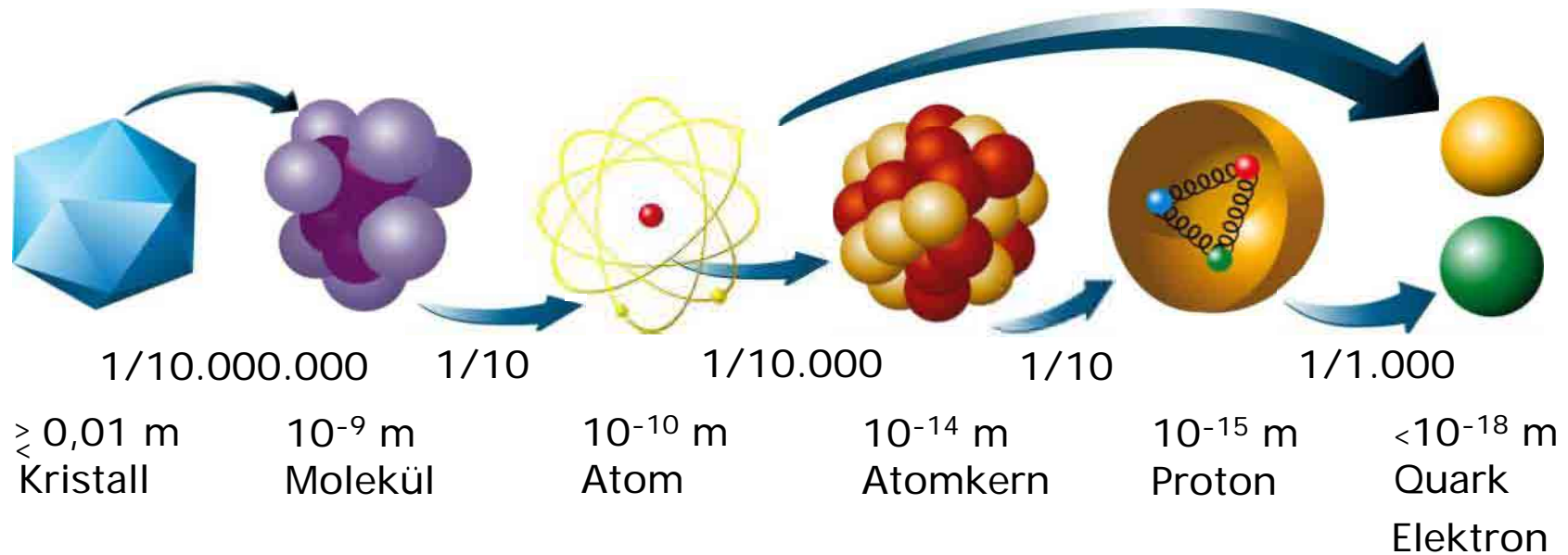


1. Elementare Bausteine sind eine herausragende experimentelle Erkenntnis
x eine weitere Substruktur ist „so gut wie“ ausgeschlossen !
2. Aber: sind nicht die theoretische Grundidee des Standardmodells
x Anordnung weder vorhergesagt, noch bisher nachträglich verstanden !
3. Die grundlegenden theoretische Erkenntnisse sind Wechselwirkungen und Ladungen
4. Die Elementarteilchen sind die „Spieler“ in einer Welt, in der sich die „Spielregeln“ = Wechselwirkungen aus Symmetrien herleiten lassen

Heutiges "Standardmodell" der Teilchenphysik (1961-73)

- Fundamentale Wechselwirkungen zwischen Teilchen
 - erfordern Botenteilchen (Austauschteilchen)
 - sind aus Symmetrien ableitbar !!
- Bausteine der Welt
 - Träger von Ladungen
 - Spielen nach Regeln der entsprechenden Wechselwirkungen
- Massenmechanismus
 - Symmetrien verbieten Teilchenmassen !!
 - Herkunft der Teilchenmassen noch unbekannt
 - Hypothese: "Higgsmechanismus", Nachweis: Higgs-Teilchen
- Errungenschaft des Standardmodells
 - beschreibt *alle* bekannten Prozesse
 - Ist (derzeit) DIE grundlegende Theorie der Physik

Materie und fundamentale Bausteine



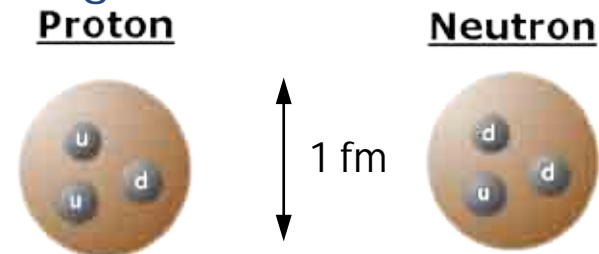
- Aufbau der stabilen Materie nur aus der ersten Familie

- Zwei „Quarks“ zu Protonen und Neutronen gebunden

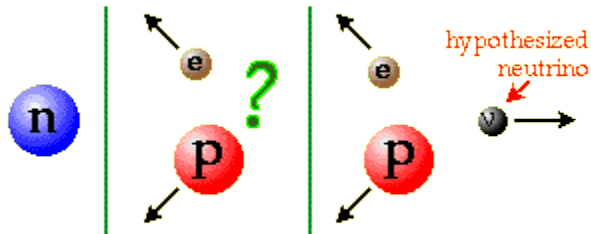
- Down: d (Q= $-1/3$)
- Up: u (Q= $+2/3$)

- Zwei „Leptonen“

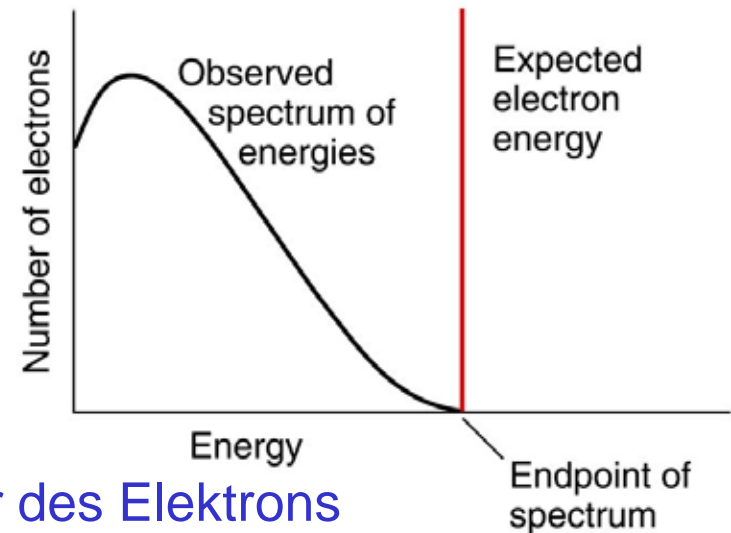
- Elektron e: gebunden in Atomhülle
- Neutrino n: ungebunden, entsteht in Kernumwandlungen (Kernfusion Sonne, Radioaktive Kernzerfälle)



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



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

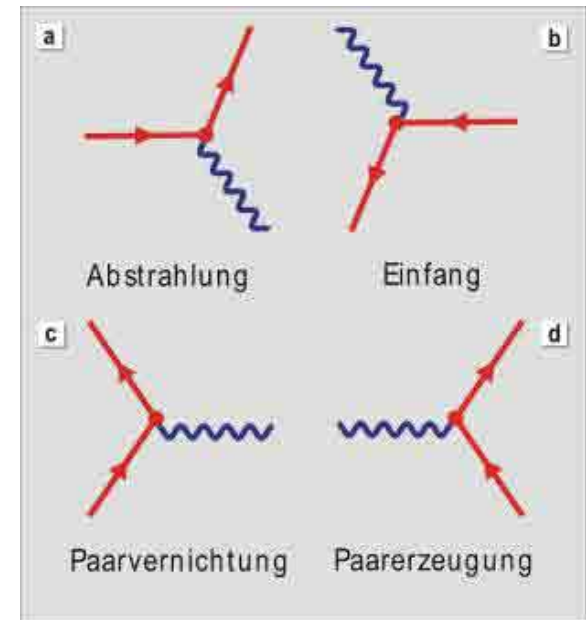
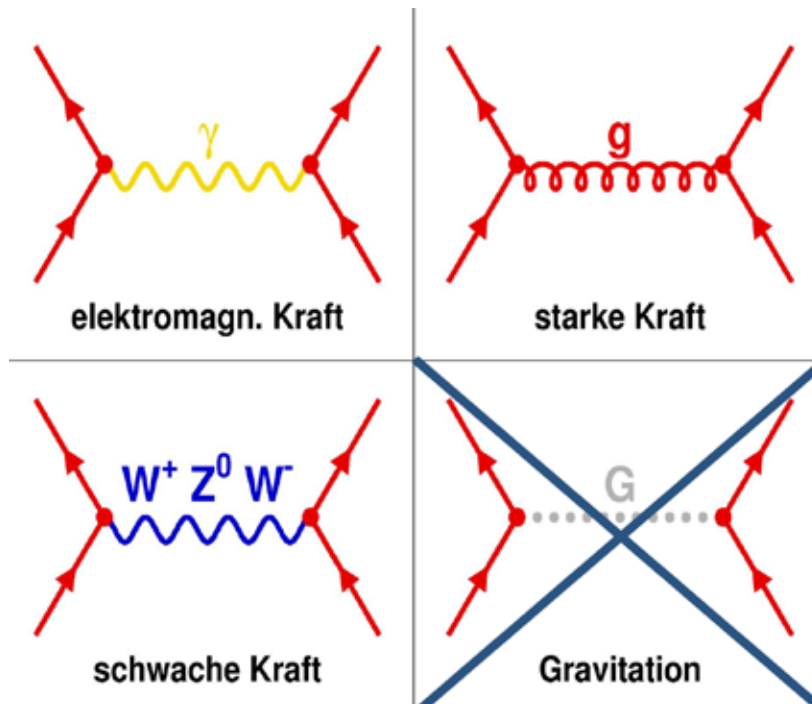


- sehr leicht
- schwach wechselwirkend (Fermi):
999.999.999 von 1.000.000.000 Sonnenneutrinos schaffen Erddurchquerung!
- ziemlich verbreitet im Universum
366.000.000 Neutrinos / m³
im Vergleich zu 0,2 Protonen / m³



Vorhersagen der Theorie

- Eindeutiges Set von fundamentalen "Vertices" für jede Wechselwirkung
- Bilden Grundlage von Feynman-Diagrammen zur Beschreibung von Reaktionen, die auf Abständen \ll fm ablaufen
- Alle Prozesse sind Kombination solch fundamentaler Vertices
- Andere Prozesse können nicht stattfinden !




Zeit \rightarrow

- z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



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

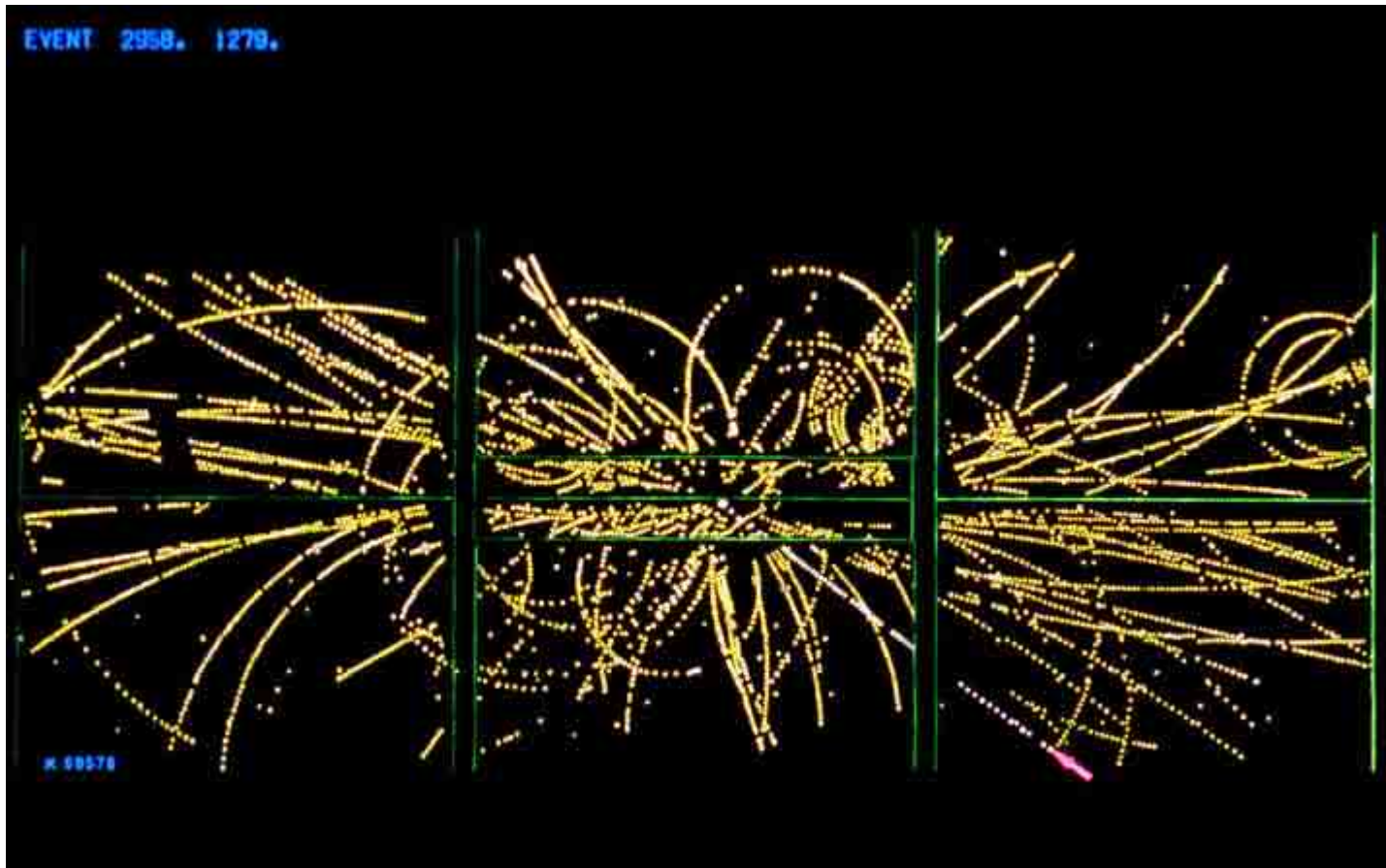
Beispiel: Kalium 40

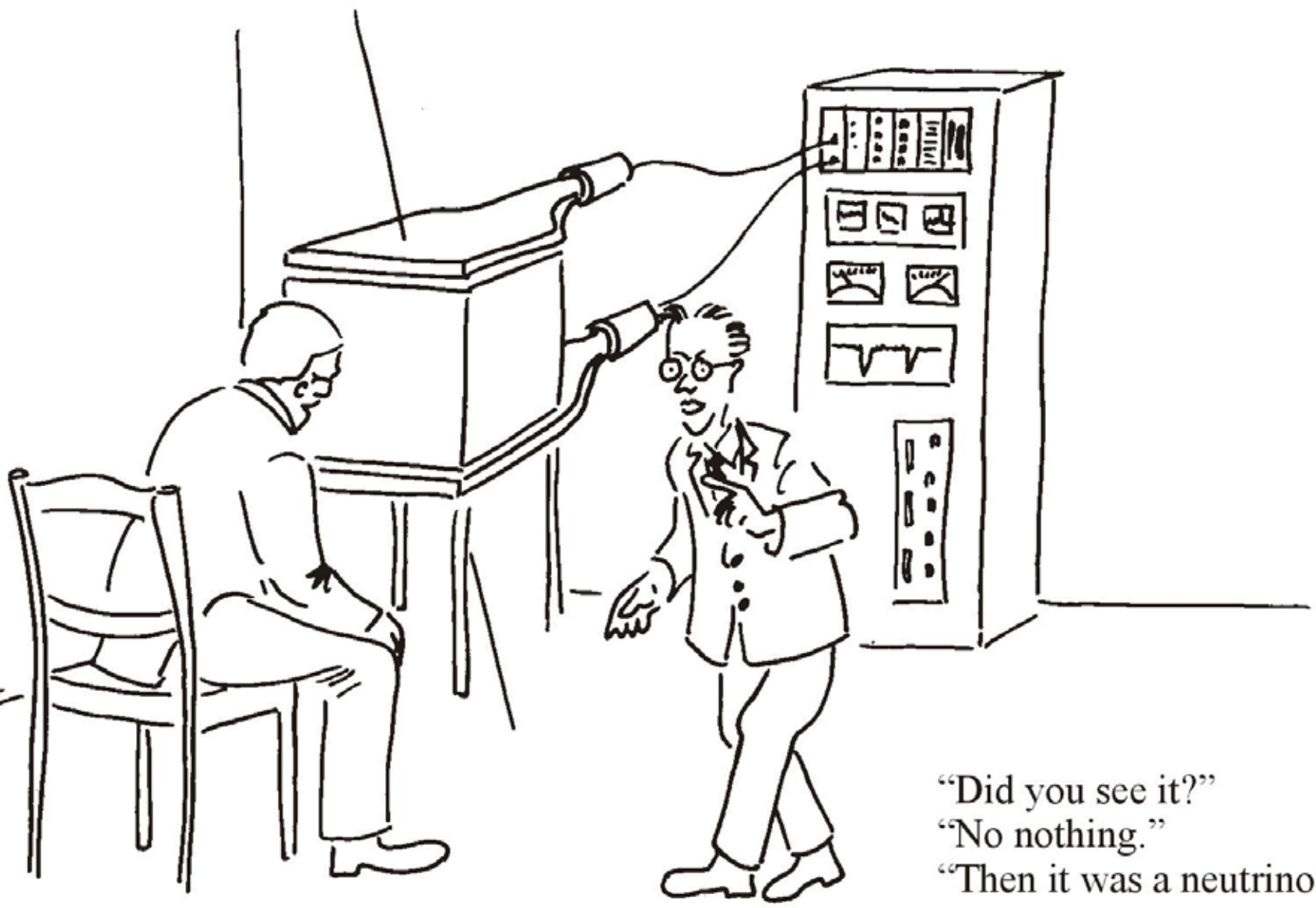
- Instabiles Isotop mit 40 Nukleonen (19 Protonen und 21 Neutronen)
- Zerfällt durch den Betaminus- oder Betapluszerfall mit Halbwertszeit von 1,28 Mrd. Jahren
- für den menschlichen Körper lebensnotwendig:
 - Regelt als Mineralstoff Wassergehalt in den Zellen
 - Wichtiger Elektrolyt der Körperflüssigkeit.
 - Ca jedes 9000ste Kaliumatomder ca. 100-150g Kalium in unserem Körper ist Kalium-40.
- Animation: 
potassium.swf
- Schätzung von Euch (kann man aus Zahlen oben ausrechnen):
 - Mit wie vielen Neutrinos pro Sekunde bestrahlt Ihr Eure/n Nachbar/in ?

Die Entdeckung des W

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

- Erstes Ereignis $\bar{p}p \rightarrow W + \dots \rightarrow e\nu + \dots$
- Das Elektron ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet
- Das Neutrino wird durch fehlenden Transversalimpuls (Summe aller Spurimpulse $\neq 0$!) indirekt nachgewiesen





C. Guepou

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

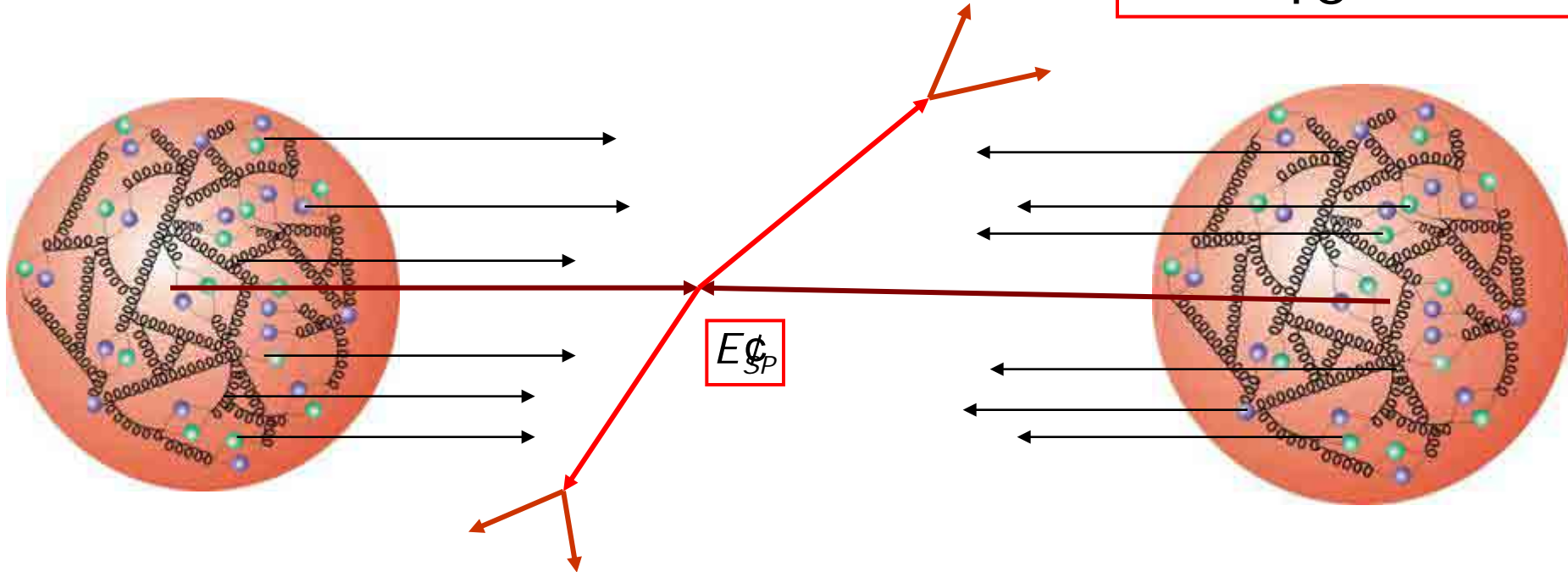
Was kollidiert eigentlich im LHC?

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

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

Schwerpunktenergie der kollidierenden Partonen (q, g)

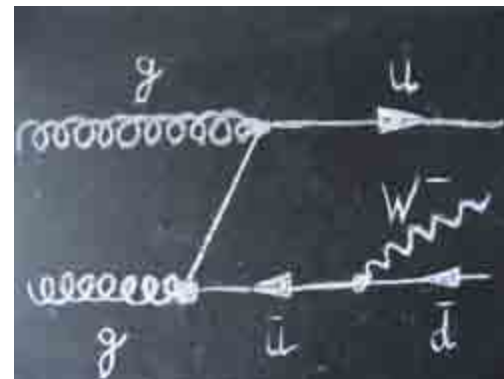
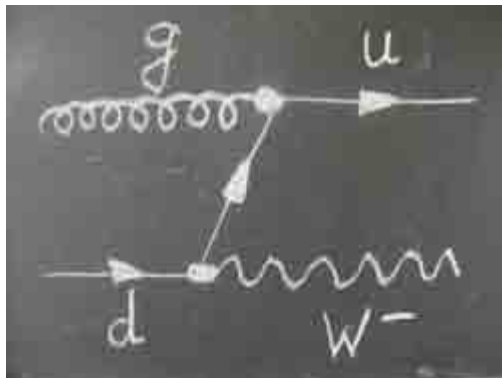
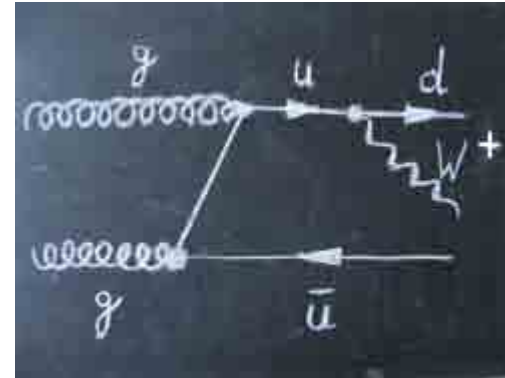
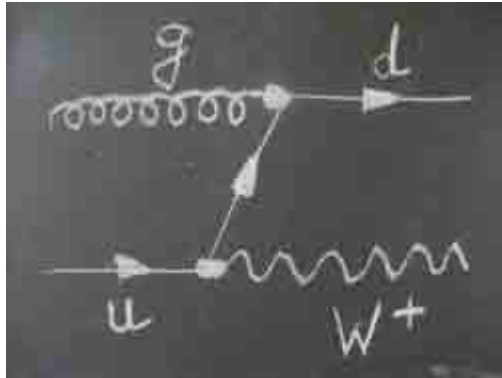
$$E_{SP} \gg \frac{1}{10} E_{SP}(pp)$$



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

Mögliche W-Herstellung am LHC

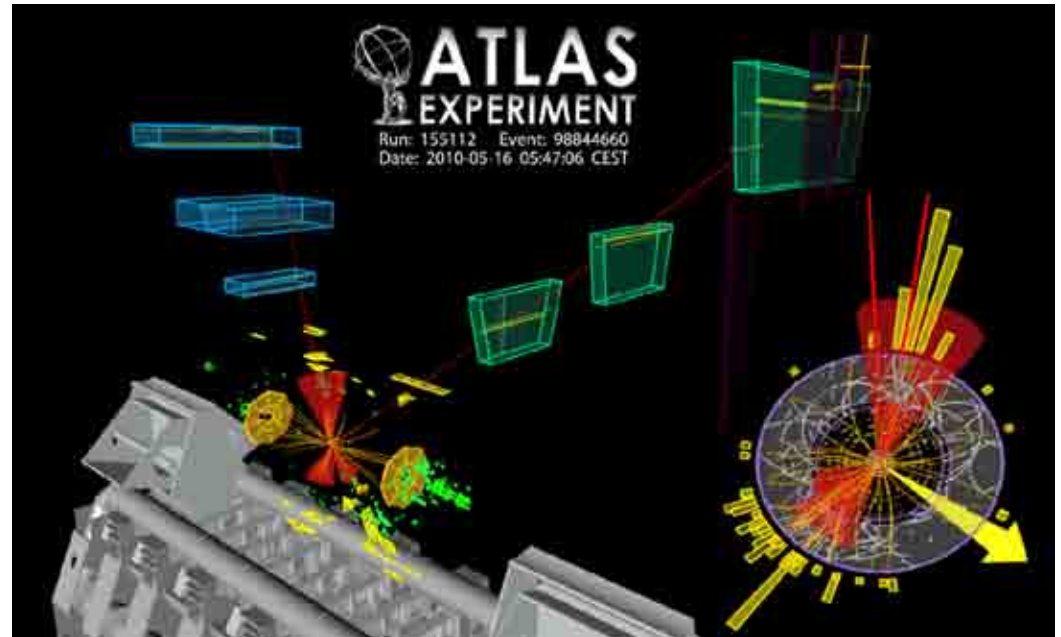
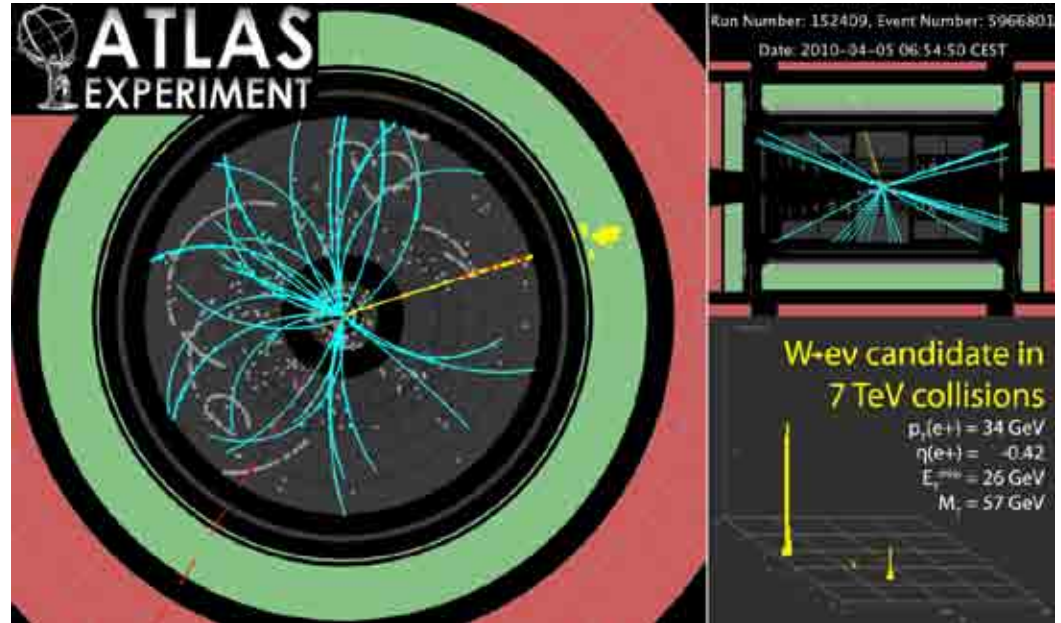
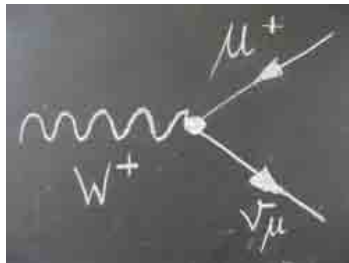
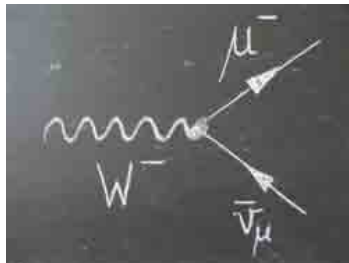
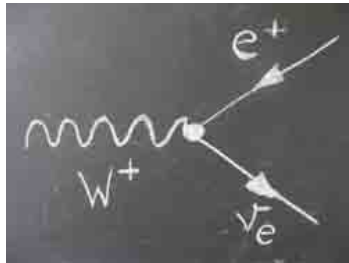
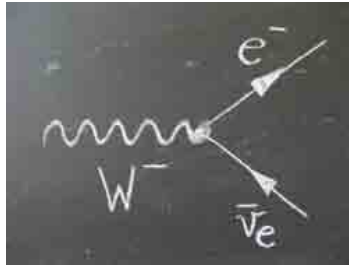
- Entweder durch Gluon-Quark oder Gluon-Gluon



- Aus den auslaufenden Quarks entstehen Jets

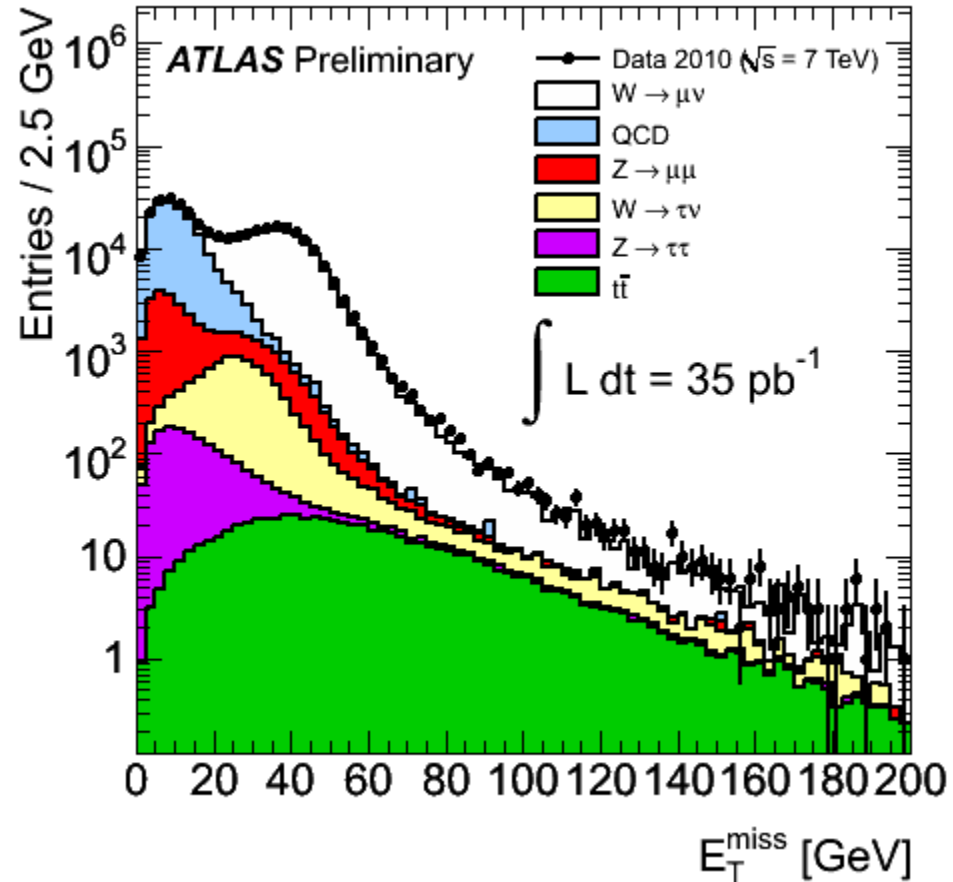
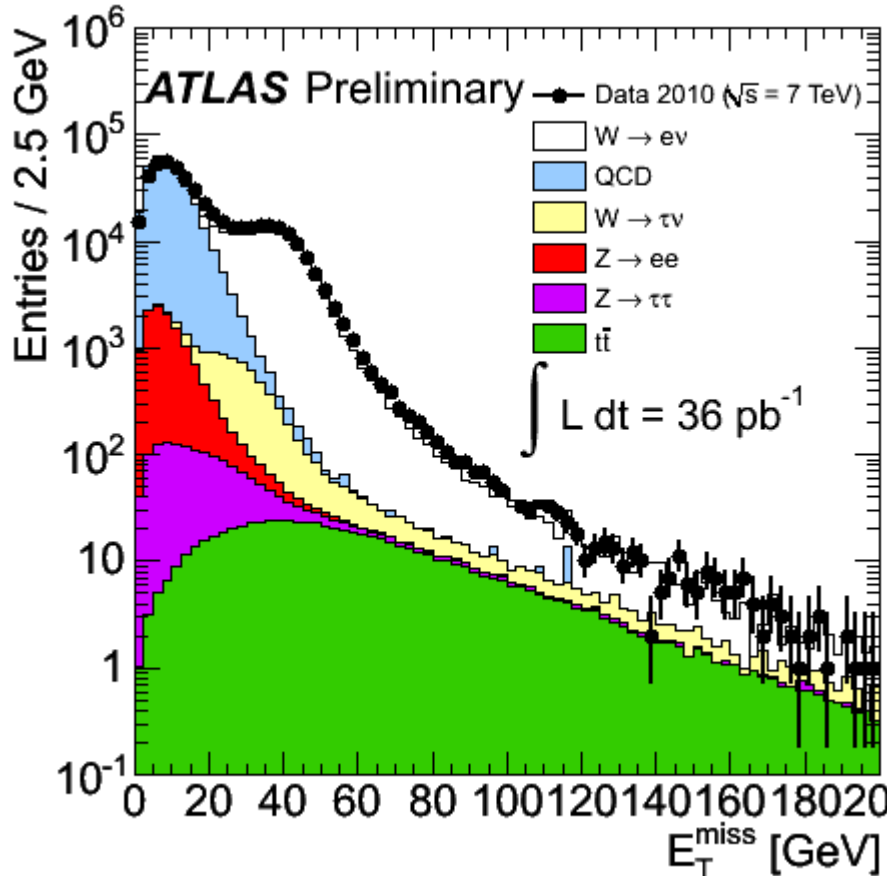
Signaturen des W-Teilchens

- 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

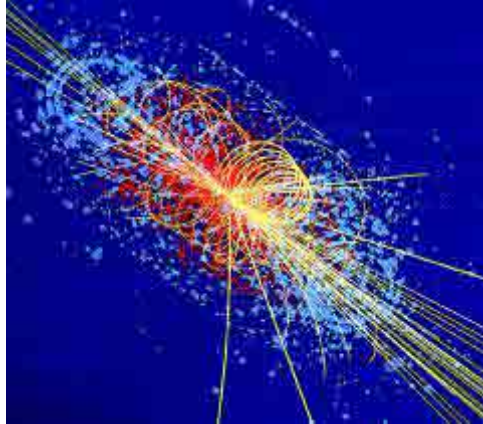
W \rightarrow e ν

W \rightarrow $\mu\nu$

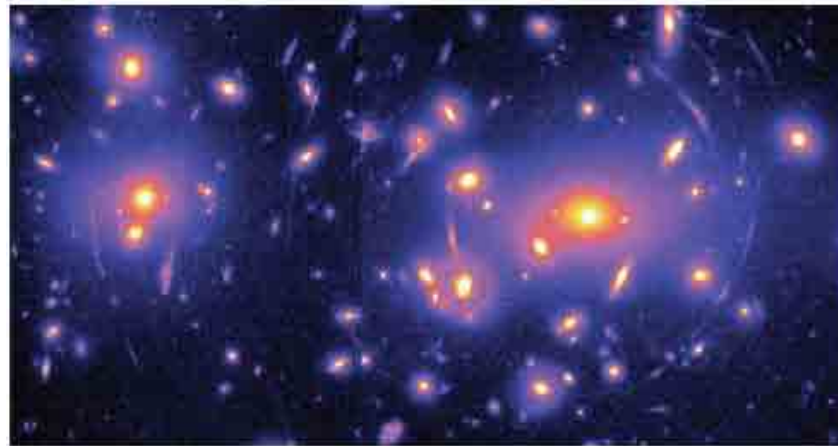
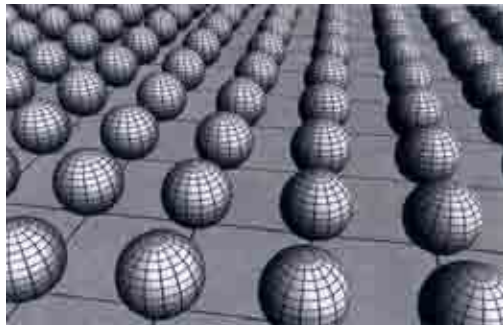
immer vorhanden: „Signal (weiß)“ und „Untergrund (bunt)“

Ziele des LHC

Wiederentdecken des Bekannten + Suche nach Neuem!



- Higgs Teilchen
 - was ist überhaupt Masse?
- Supersymmetrie (à Dunkle Materie?)
 - nur 4,6% des Weltalls ist „normale“ atomare Materie !



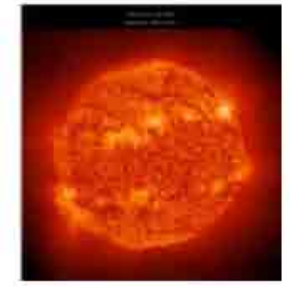
UNSICHTBAR!

Messbare Gravitationslinsen
aus leuchtender und dunkler
Materie

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

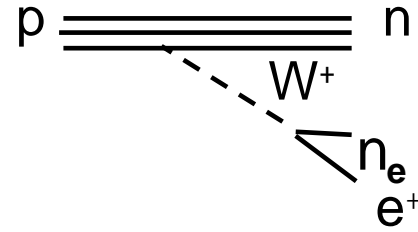
- zusätzliche
Raumdimensionen?

Massen der Teilchen



- Unter Benützung experimenteller Teilchenmassen beschreibt Theorie der schwachen Kraft alles, z.B.
- langsames Brennen der Sonne

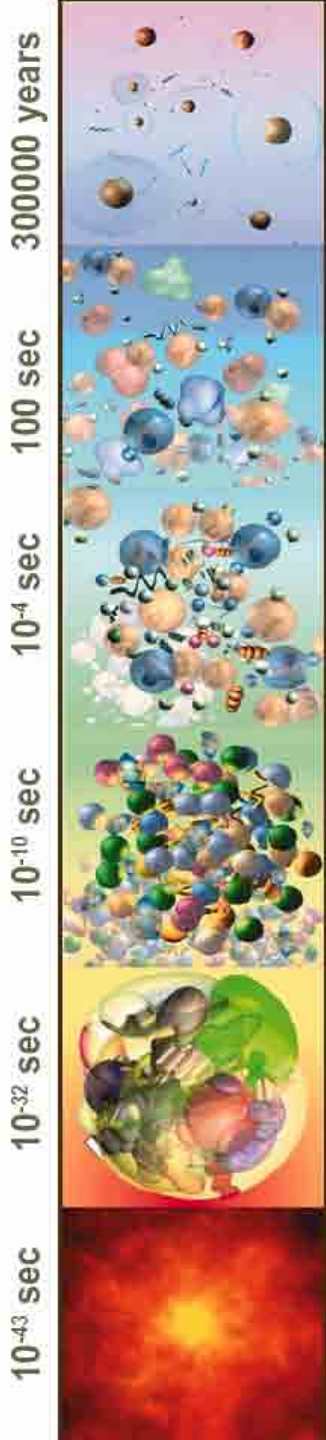
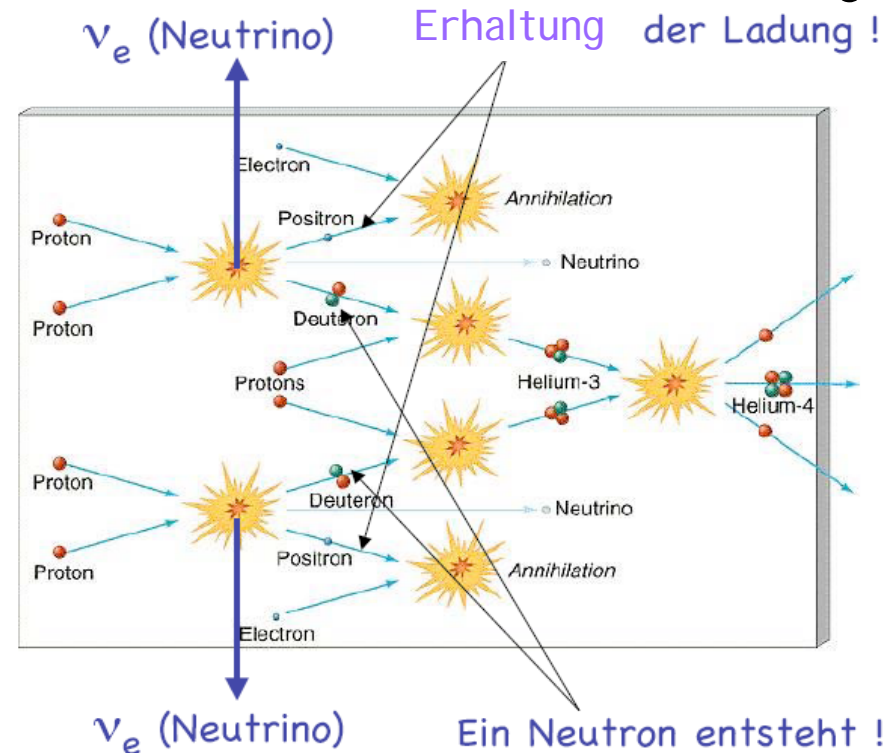
- $p + p \rightarrow D + e^+ + n$ (Energiegewinn: $\Delta E = 0,9 \text{ MeV}$)
- Masse des Zwischenzustands $m_W = 80400 \text{ MeV}$
- Rate unterdrückt um $\sim (\Delta E / m_W)^4 > 10^{-20}$



Fundamentales Problem

| (MeV) | Experim. | Theorie |
|-------|---------------|----------|
| m_W | 80400 | 0 |
| m_Z | 91200 | 0 |
| m_e | 0,5 | 0 |
| m_t | 173000 | 0 |
| ... | | |

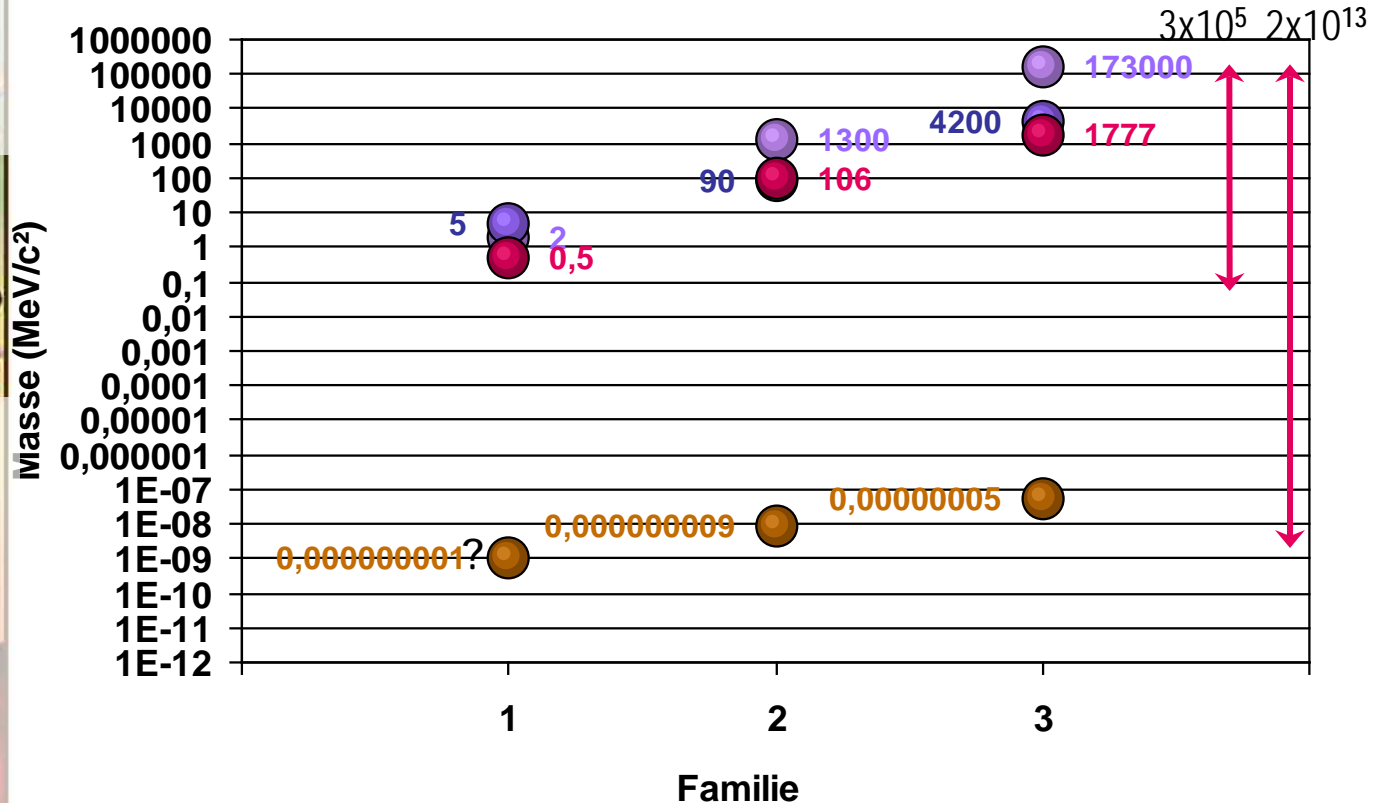
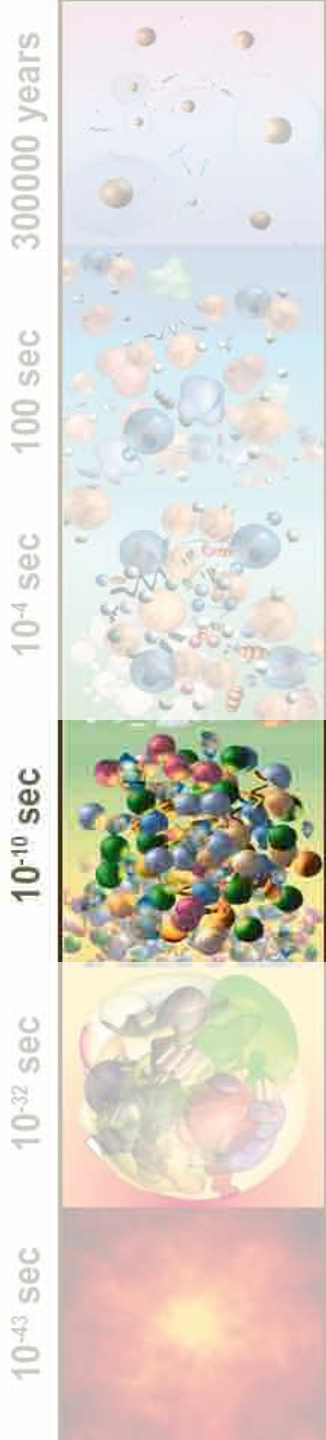
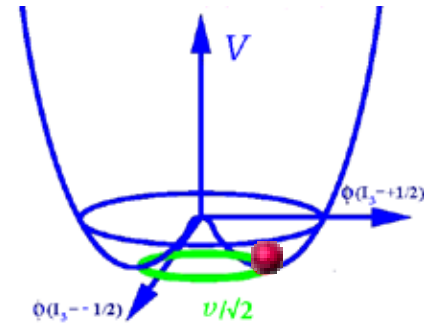
- Grund: schwache Eichsymmetrie



Die Ruhemassen der Bausteine

n Symmetrien erfordern masselose Teilchen

- Erhalten Masse erst $\sim 10^{-12}$ sec nach Urknall durch „spontane“ Symmetriebrechung
- Entsteht Masse durch Kopplung an „Brout-Englert-Higgs“ Hintergrundfeld?
- Was verursacht die riesigen Massenunterschiede ?



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

Was ist Masse?

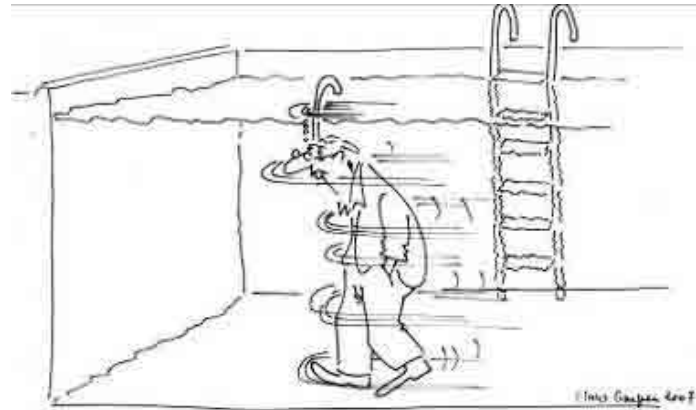
■ “Leeres” Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



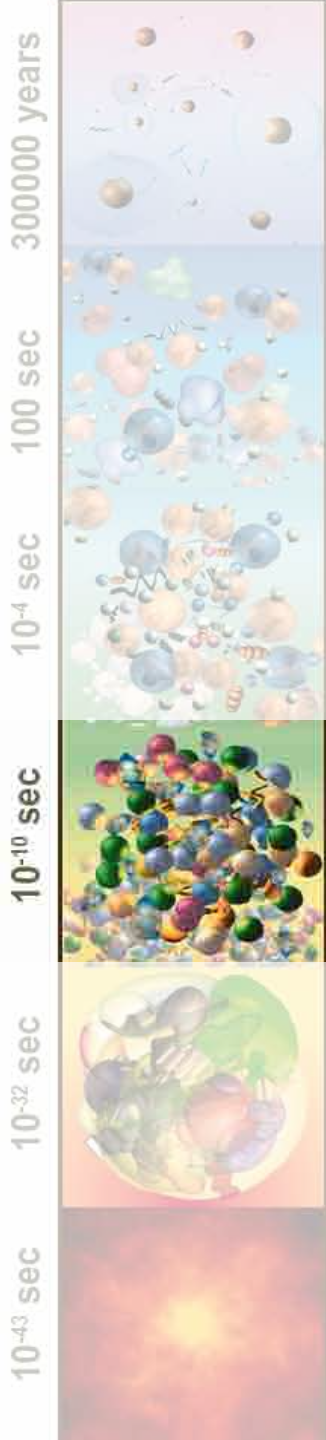
■ Vakuum mit Hintergrundfeld

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



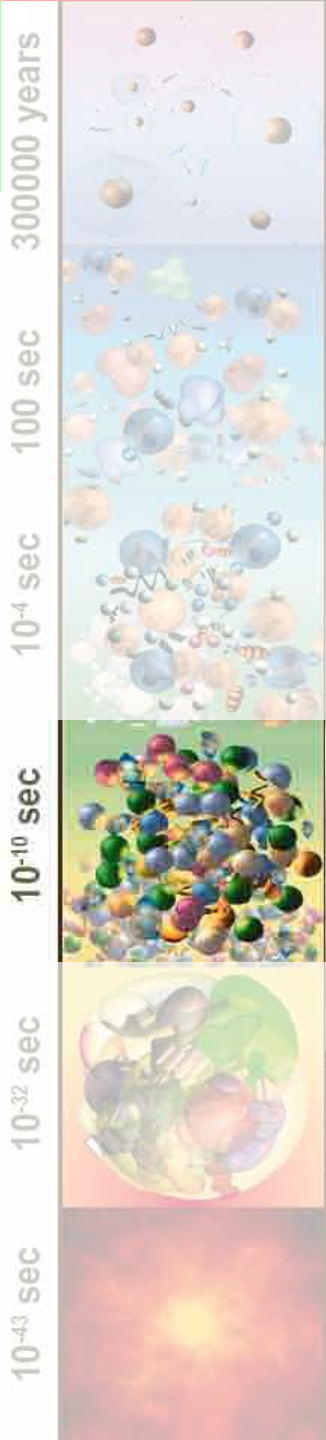
■ Higgs-Teilchen

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



Mechanische Analogie zur Higgs Produktion

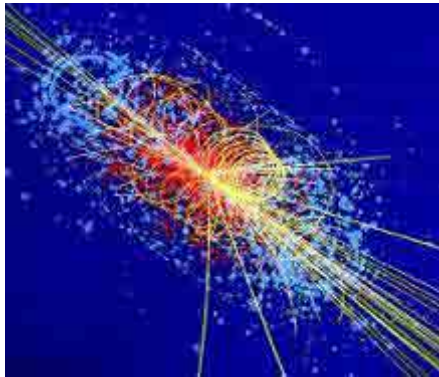
- n Luft (~ Hintergrundfeld) normalerweise kaum zu spüren
am Besten erfahrbar, wenn in Bewegung
- n Objekte hoher Energie erzeugen Anregungen der Luft
- n Objekte hoher Masse erzeugen Anregung im Hintergrundfeld
= Higgs-Teilchen



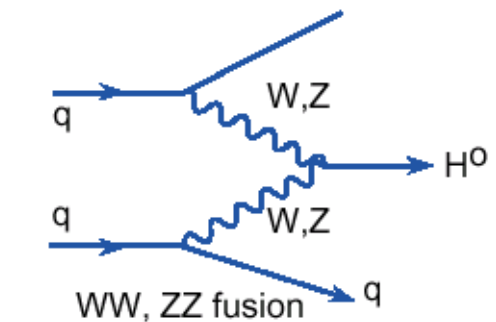
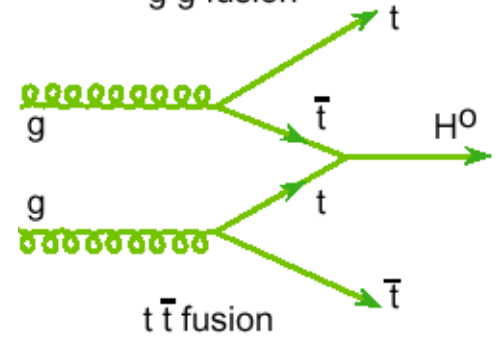
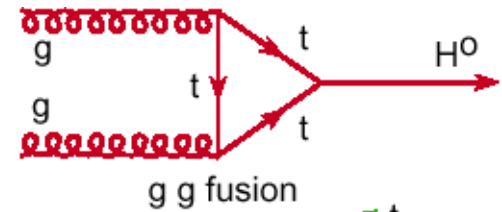
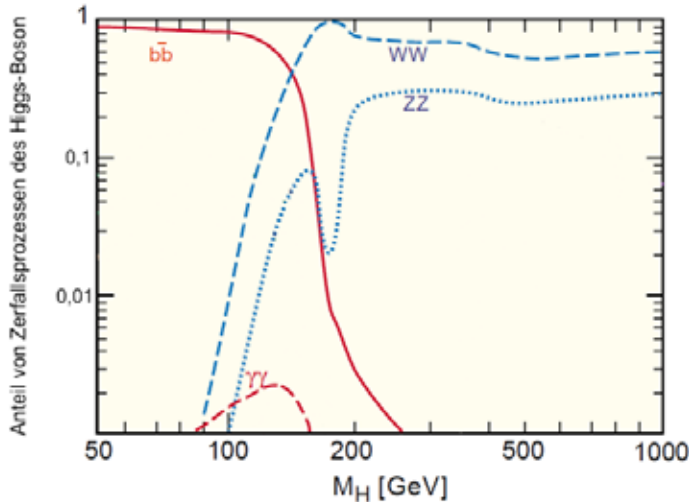
Higgs Suche am LHC

n Higgs Masse unbekannt:

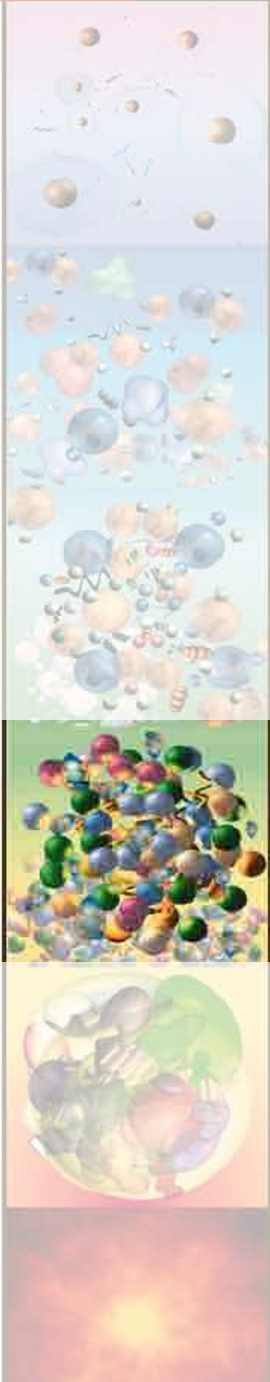
- Viele Produktionsmechanismen
- Viele mögliche Zerfälle



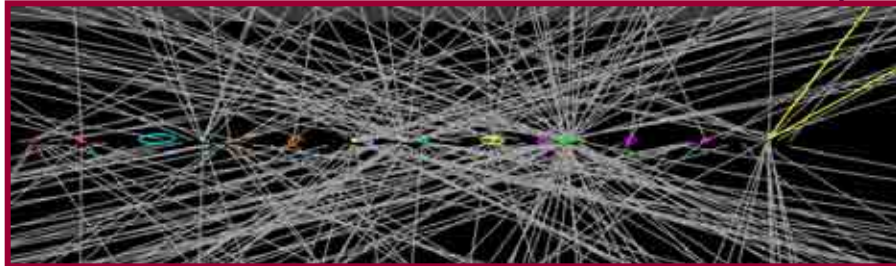
• Als Funktion der Masse vorhersagbar



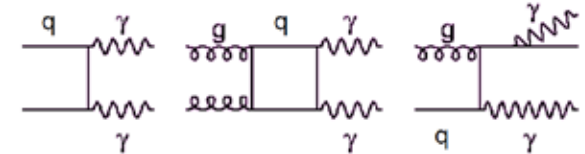
300000 years
100 sec
10⁻⁴ sec
10⁻¹⁰ sec
10⁻³² sec
10⁻⁴³ sec



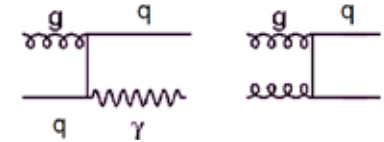
- ✓ Empfindlichster Kanal bei $m_H < 120$ GeV
- ✓ Zweitempfindlichster Kanal bei $120 < m_H < 130$ GeV
- ✓ Erwartung kleines Signal bei sehr großem Untergrund
- ✓ Zusätzliches Problem:
Überlagerung vieler pp-Kollisionen
Photonen besitzen keine Teilchenspur !



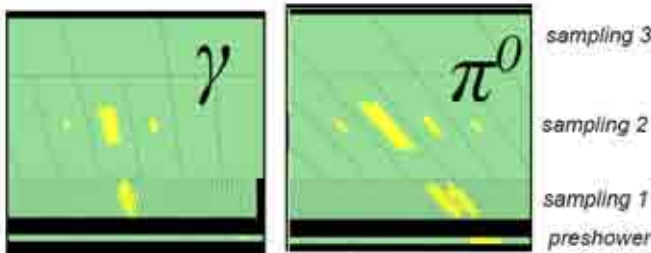
- Irreducible



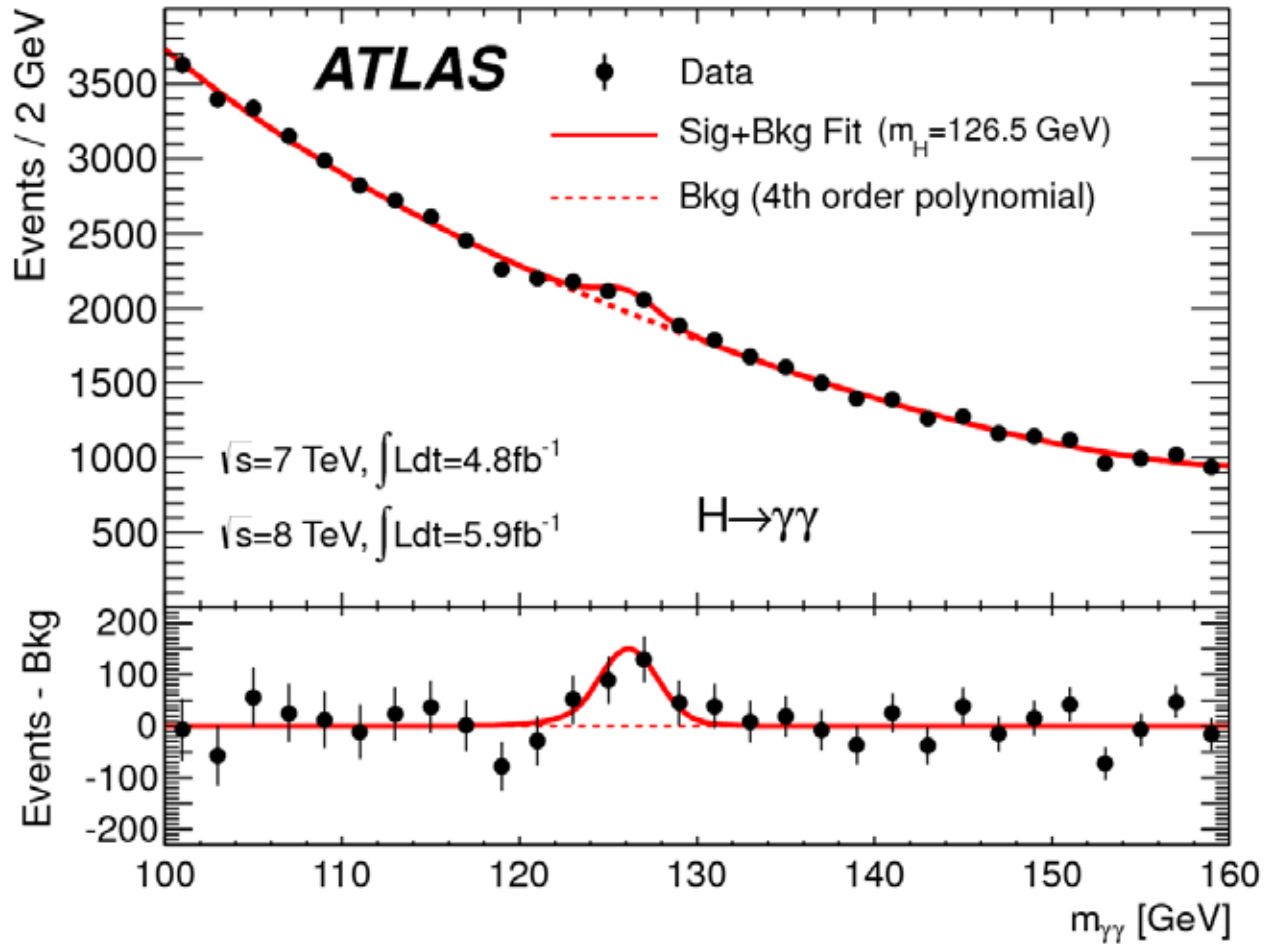
- Reducible : one or more jets misidentified as photons



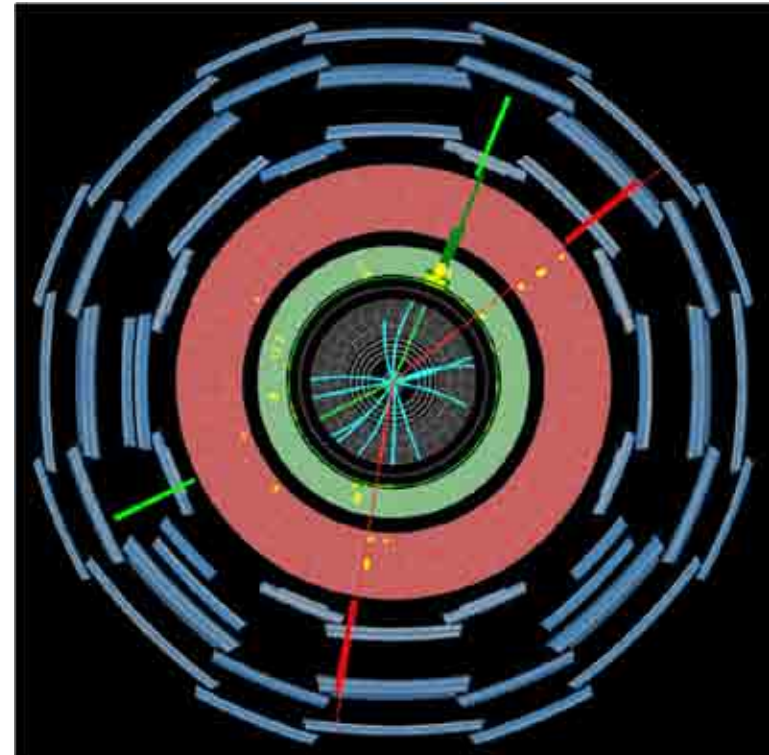
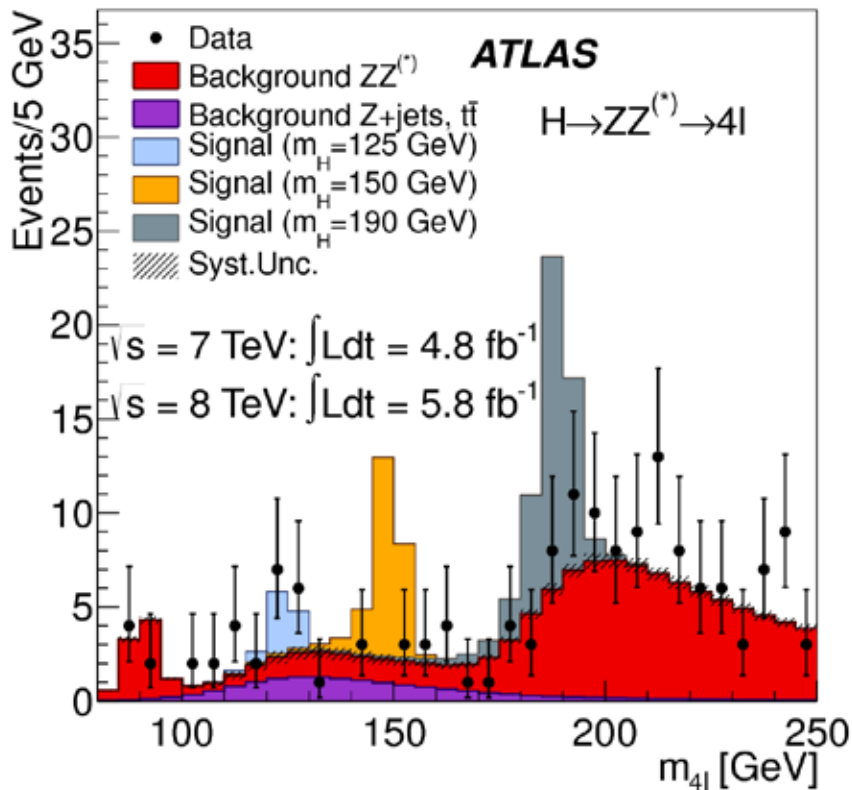
- ✓ Kalorimeter-Segmentierung hilft gegen p^0 Untergrund und falsche Kombinationen aus verschiedenen Vertices
 - Extrapolation ergibt Vertex-Zuordnung mit Präzision von wenigen mm



Wenn Photonen aus Higgs-Zerfall,
dann ist dessen Masse berechenbar:
 $m_{gg}^2 = 2E_1E_2(1-\cos\theta)$



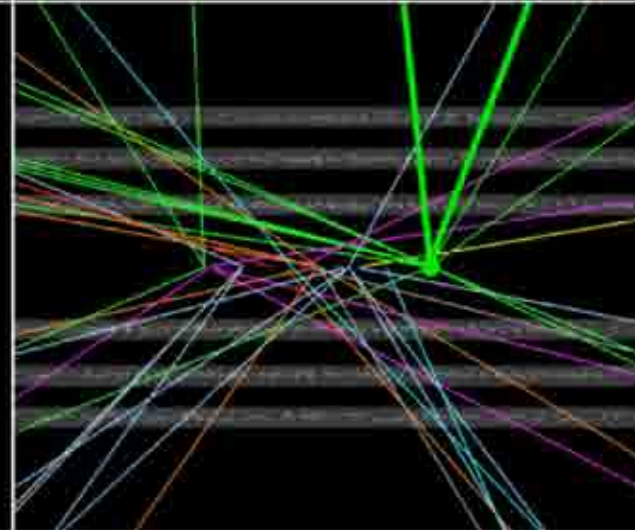
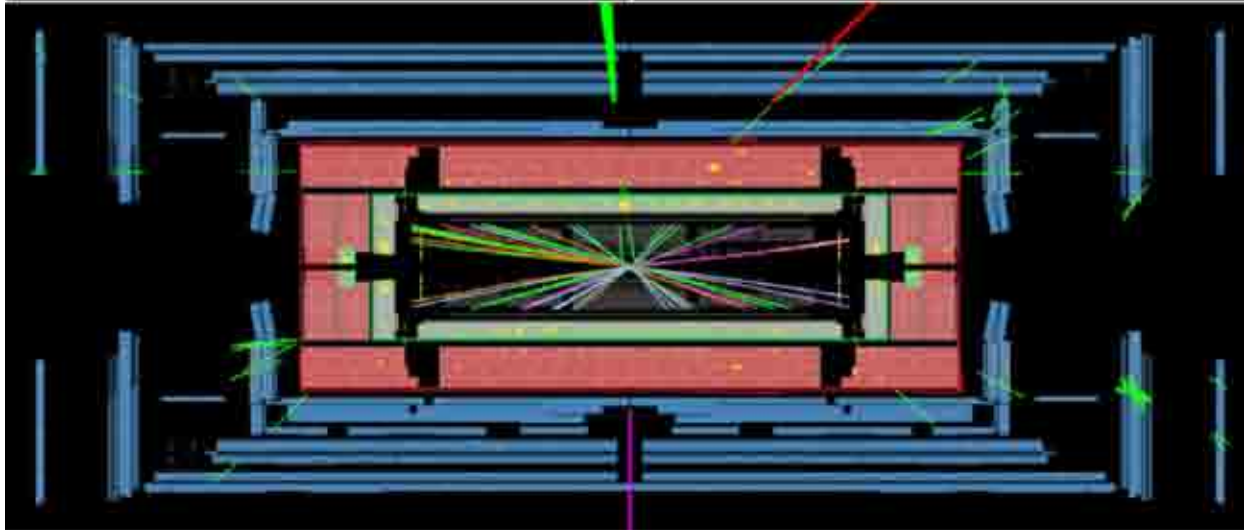
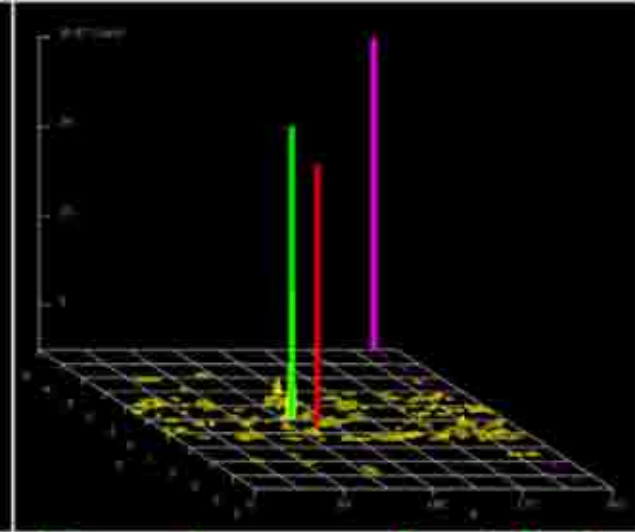
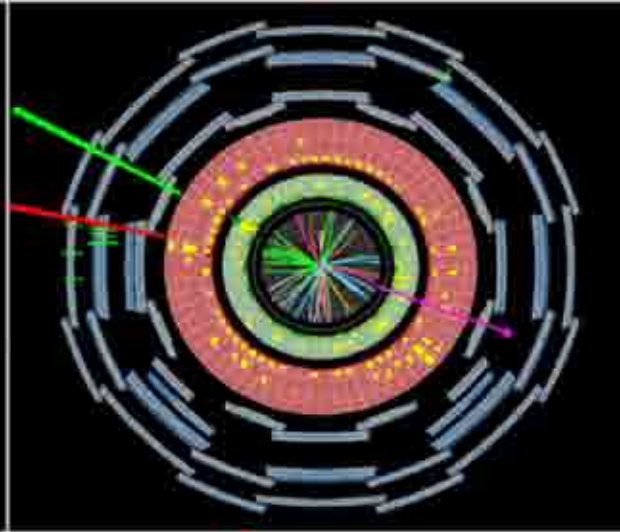
- ✓ „Goldener Kanal“ (praktisch kein Untergrund außer ZZ ohne Higgs)
- ✓ **Sensitivster Endzustand für $200 \text{ GeV} < m_H < 275 \text{ GeV}$**
- ✓ zweitensensitivster (nach WW) für $130 \text{ GeV} < m_H < 200 \text{ GeV}$
- ✓ **Sehr gute Massenrekonstruktion möglich**



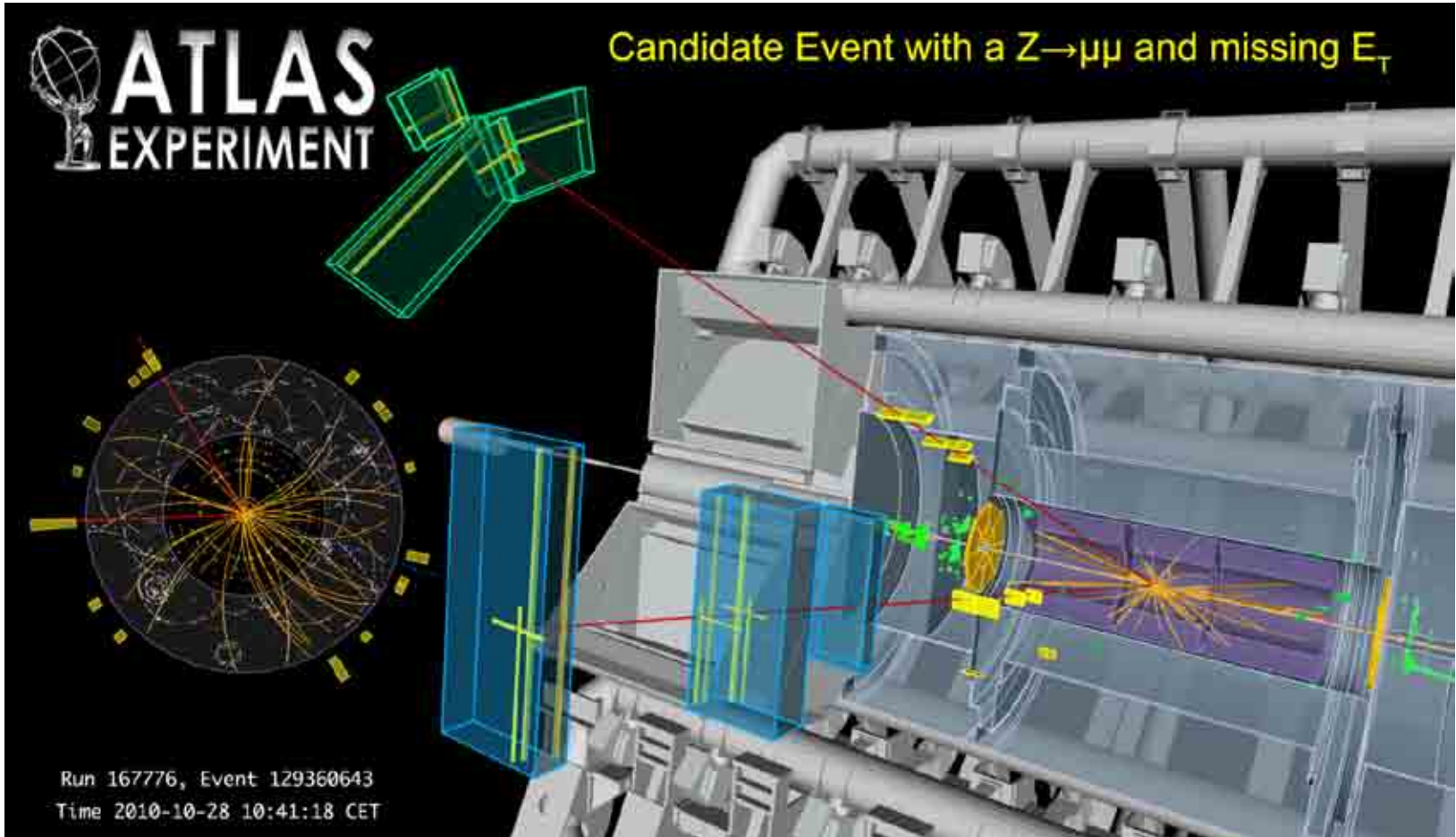


ATLAS
EXPERIMENT

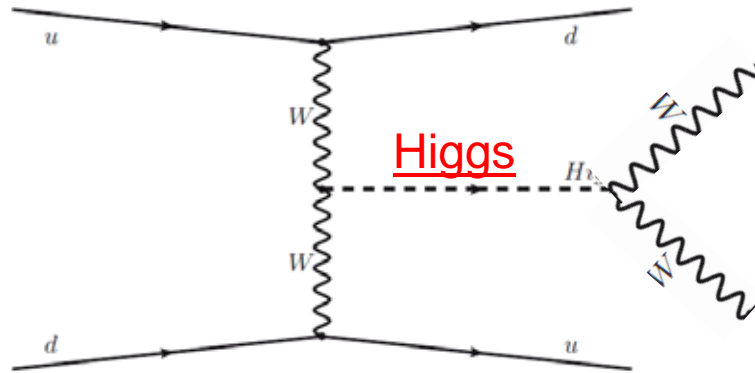
Run Number: 204026, Event Number: 33133446
Date: 2012-05-28 07:23:47 CEST



- ✓ Scheinbares WW -Paar $W^+W^- \rightarrow \mu^+\nu \mu^-\nu$ über $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ und fehlende Energie durch exp. Messunsicherheiten

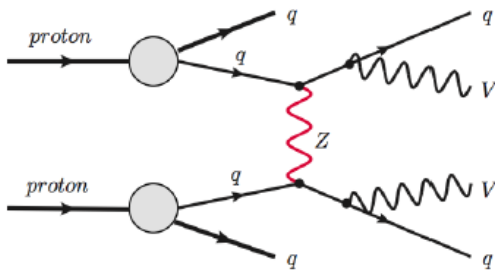


n Gesuchtes Signal $H \rightarrow W^+ W^-$

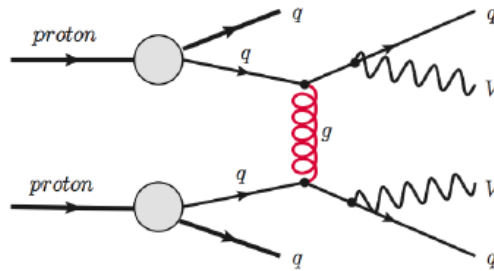


n Untergrund aus anderer $W^+ W^-$ Erzeugung oder scheinbare WW

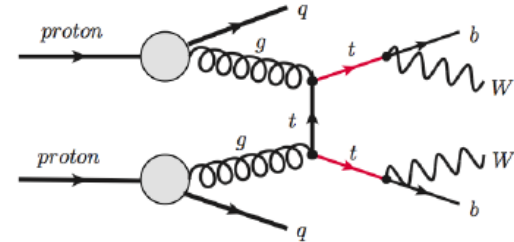
A) EW



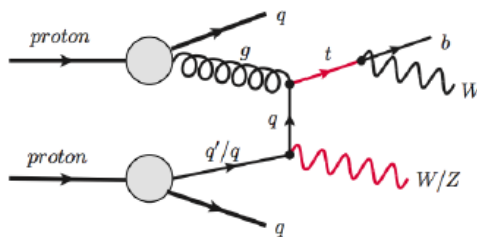
B) QCD



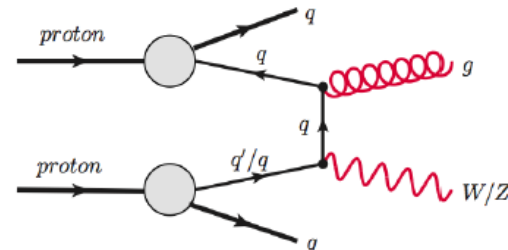
C) Top pairs



D) Single top

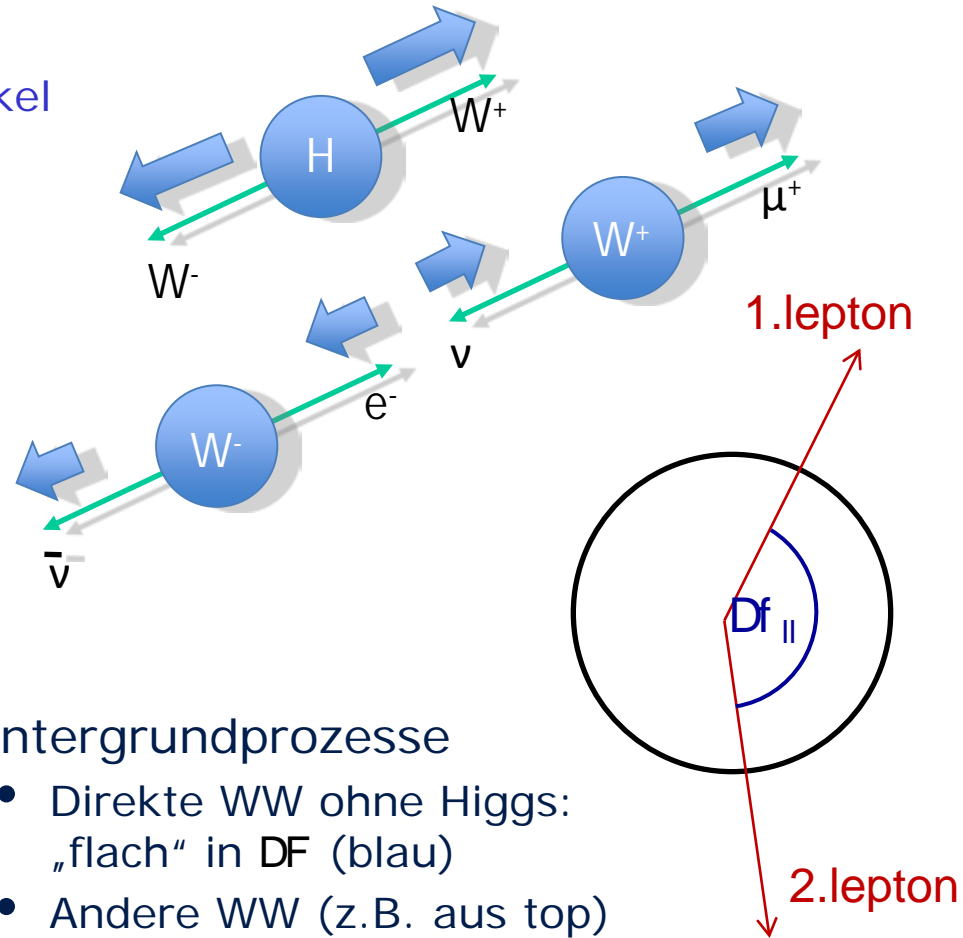
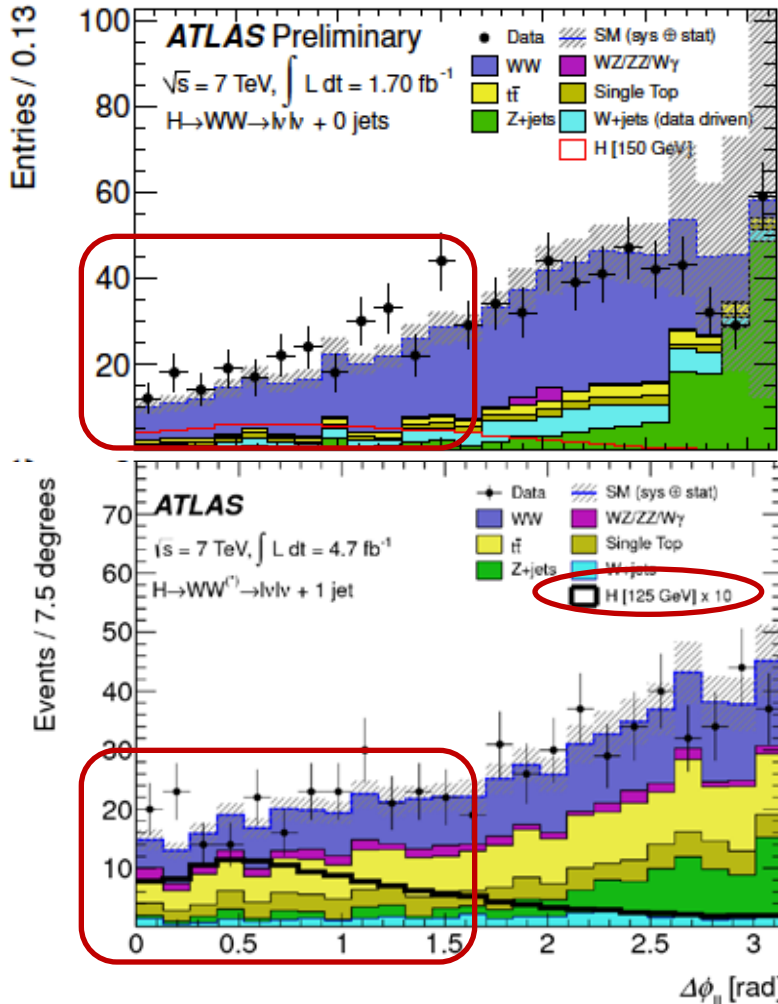


E) W/Z + jets



Spin-Korrelation:

- Leptonen aus H \rightarrow WW Zerfall bevorzugen kleine DF Öffnungswinkel

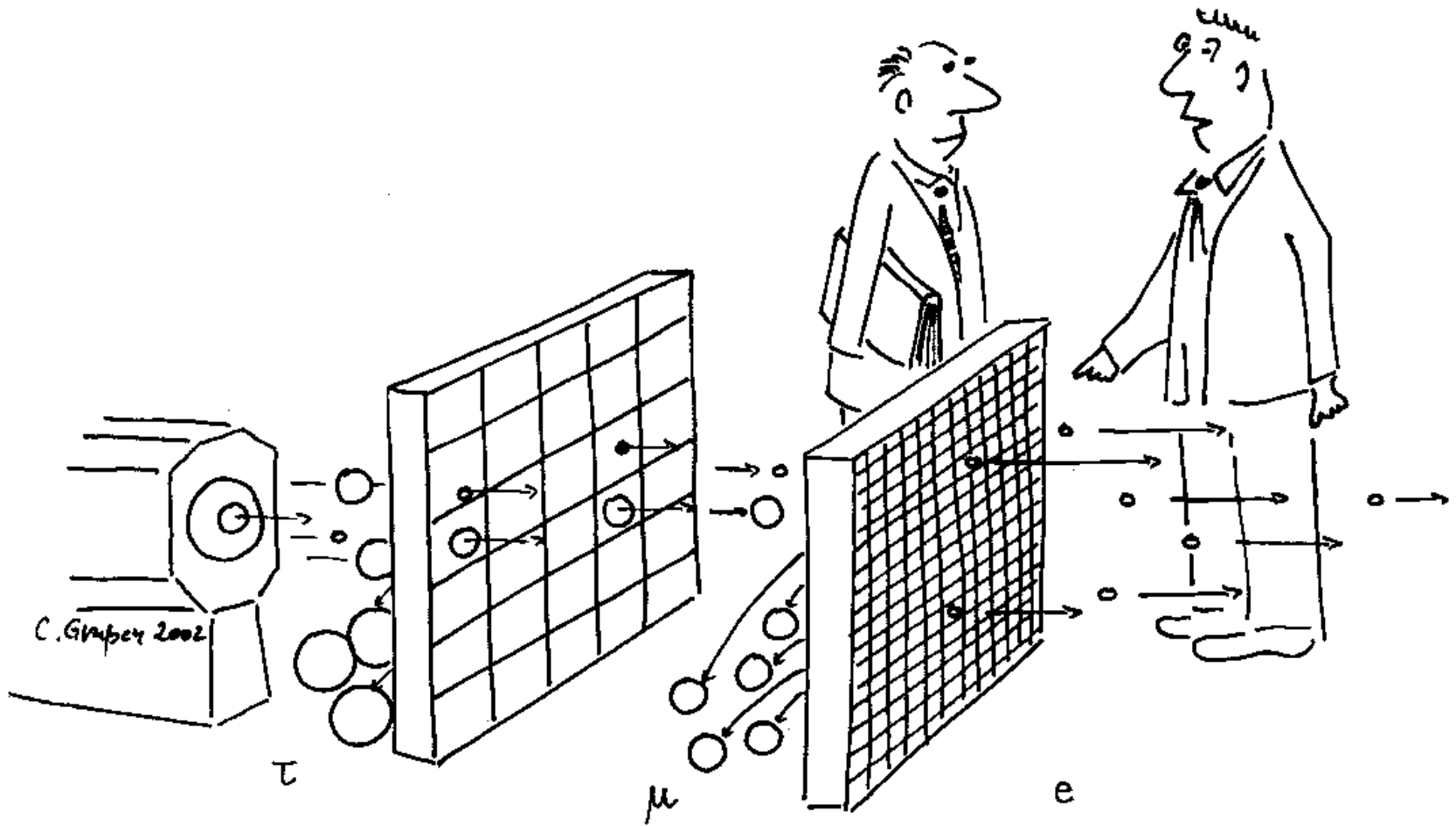


Untergrundprozesse

- Direkte WW ohne Higgs: „flach“ in DF (blau)
- Andere WW (z.B. aus top) o. scheinbare WW (z.B. aus Z): „ansteigend“ in DF (gelb/grün)

Suche Überschuss bei kleinen DF

VIEL SPAß BEIM MESSEN !



"Our new lepton identifier!"