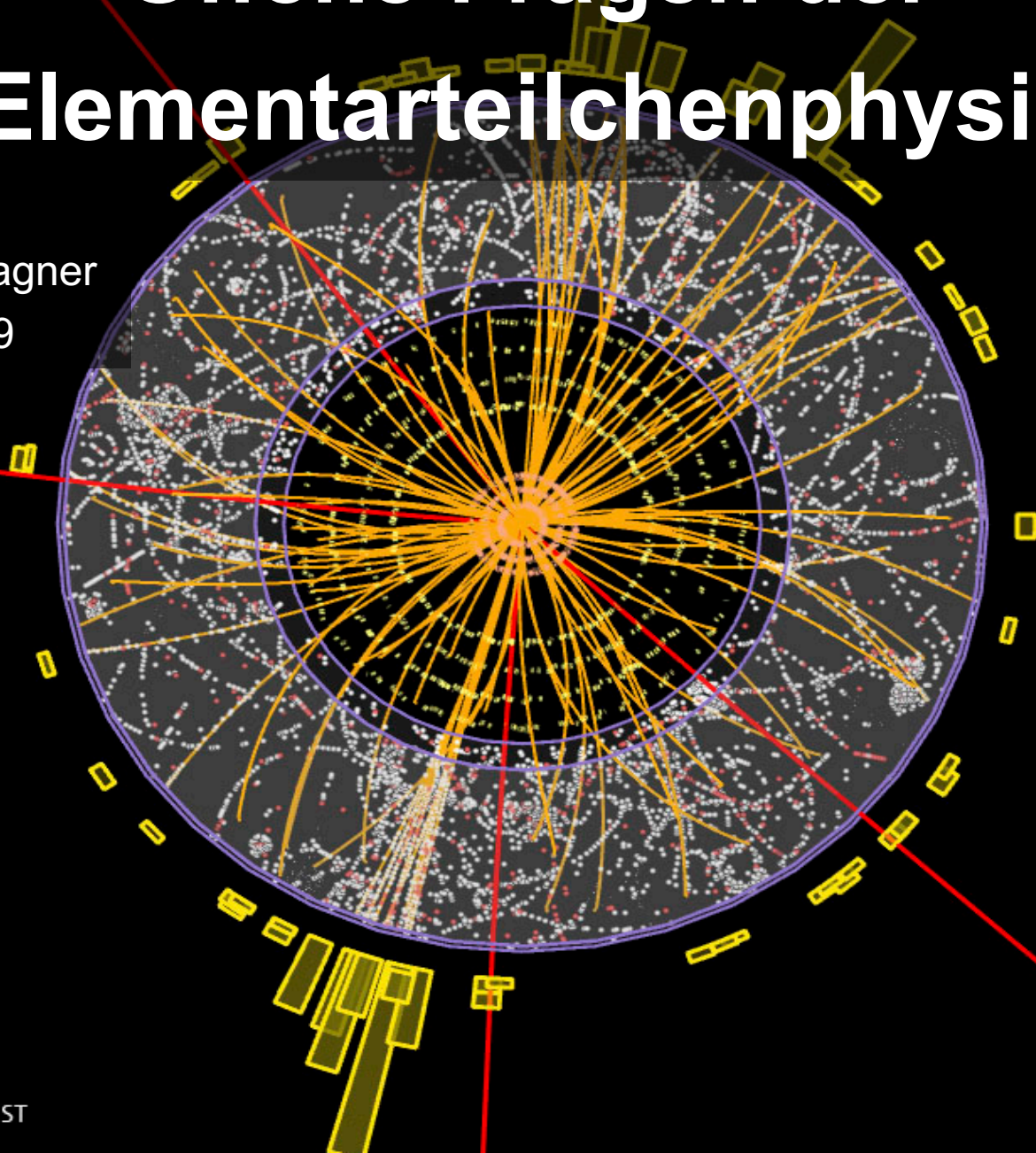


# Offene Fragen der Elementarteilchenphysik


















Wolfgang Wagner  
27. Juni 2019



 **ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

Run: 189280  
Event: 143576946  
2011-09-14 12:37:11 CEST

# Die Bausteine des Standardmodells

|        | mass →      | charge → | spin → |   |                   |             |      |     |   |               |             |      |     |  |              |          |   |   |           |   |   |             |
|--------|-------------|----------|--------|---|-------------------|-------------|------|-----|---|---------------|-------------|------|-----|--|--------------|----------|---|---|-----------|---|---|-------------|
| Quarks | ≈ 2.3 MeV   | 2/3      | 1/2    |    | Up Quark          | ≈ 1.275 GeV | 2/3  | 1/2 |    | Charm Quark   | ≈ 173.2 GeV | 2/3  | 1/2 |    | Top Quark    | 0        |  | Gluon   | ≈ 126 GeV | 0 |  | Higgs Boson |
|        | ≈ 4.8 MeV   | -1/3     | 1/2    |    | Down Quark        | ≈ 95 MeV    | -1/3 | 1/2 |    | Strange Quark | ≈ 4.78 GeV  | -1/3 | 1/2 |    | Bottom Quark | 0        |  | Photon  |           |   |   |             |
|        | ≈ 0.511 MeV | -1       | 1/2    |    | Electron          | ≈ 105.7 MeV | -1   | 1/2 |    | Muon          | ≈ 1.777 GeV | -1   | 1/2 |    | Tau          | 91.2 GeV | 0   |    | Z Boson   |   |   |             |
|        | < 2.2 eV    | 0        | 1/2    |  | Electron Neutrino | < 0.17 MeV  | 0    | 1/2 |  | Muon Neutrino | < 15.5 MeV  | 0    | 1/2 |  | Tau Neutrino | 80.4 GeV | ±1  |  | W± Boson  |   |   |             |
|        |             |          |        |   |                   |             |      |     |   |               |             |      |     |  |              |          |   |   |           |   |   |             |
|        |             |          |        |   |                   |             |      |     |   |               |             |      |     |  |              |          |   |   |           |   |   |             |

Gauge Bosons

Das Higgs-Boson:

- Letzter fehlender Baustein
- 2012 entdeckt

Marieteilchen:  
Quarks und Leptonen

Kraftteilchen:  
die Bosonen

# Ende der Teilchenphysik?

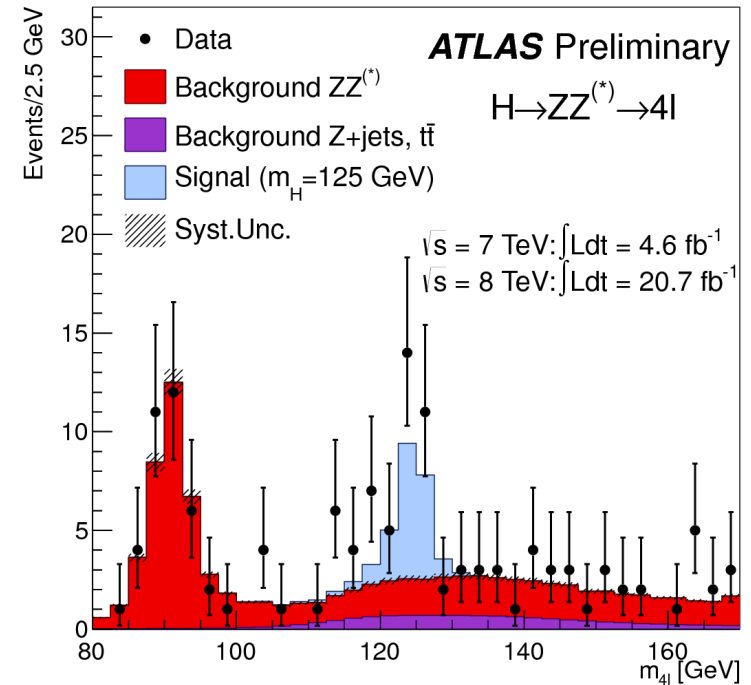
- Entdeckung des Higgs-Bosons 2012
- Ende einer fast 50-jährigen Suche
- Bestätigung des Higgs-Mechanismus als Ursache der Massen der Elementarteilchen
- Die erfolgreichste Theorie aller Zeiten!
- Große Zahl von Präzisionsvorhersagen werden bestätigt.

Ist die Teilchenphysik nun abgeschlossen?

Gibt es nichts mehr zu erforschen?



Nein, Vielzahl von offenen Fragen in der Kosmologie und Struktur der Theorie.



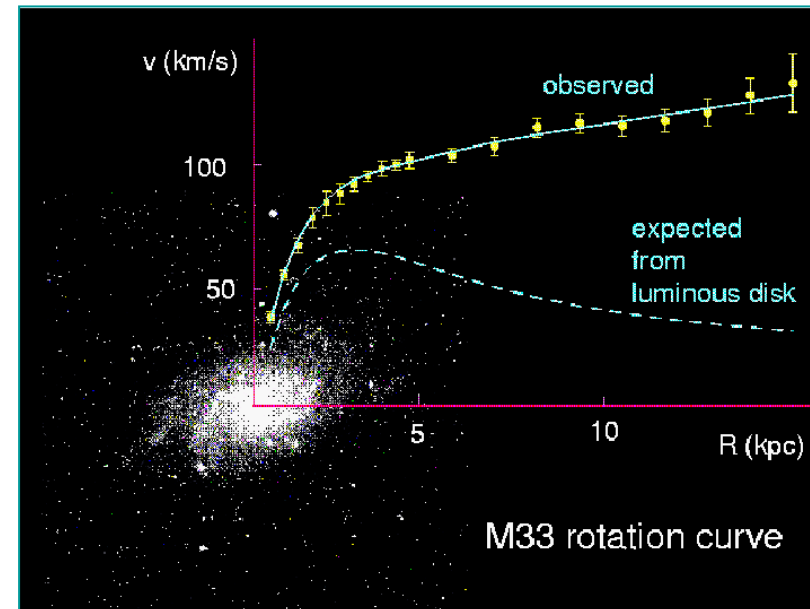
- Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum  
Wie verschwand die Antimaterie kurz nach dem Urknall?



- Vielzahl von astronomischen Beobachtungen zeigt:

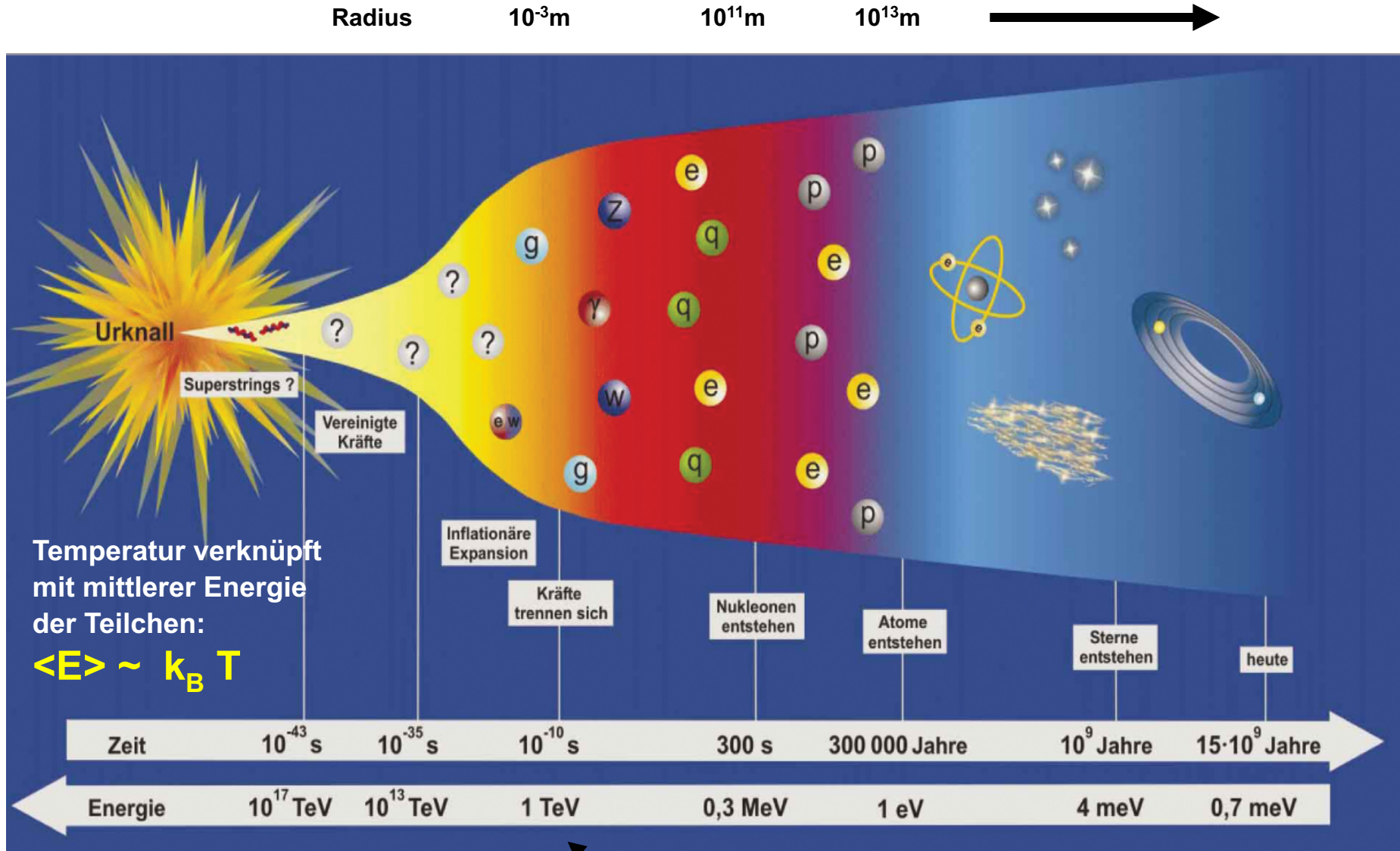
Es gibt fünfmal mehr Dunkle Materie im Universum als normale (baryonische) Materie.

z.B. Umlaufgeschwindigkeiten und -radien von Sternen in Spiralgalaxien ...



- Zustand zu Beginn des Universums ?
- Vereinigung aller fundamentalen Kräfte ?
- Wo ist die Antimaterie im Universum geblieben ?
- Unbekannte Formen von Materie ?  
z.B. „Dunkle Materie“  
supersymmetrische Materie
- Ursprung der Massen der Elementarteilchen ?
- Verborgene räumliche Dimensionen ?

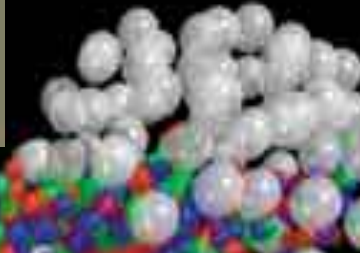




Teilchenbeschleuniger

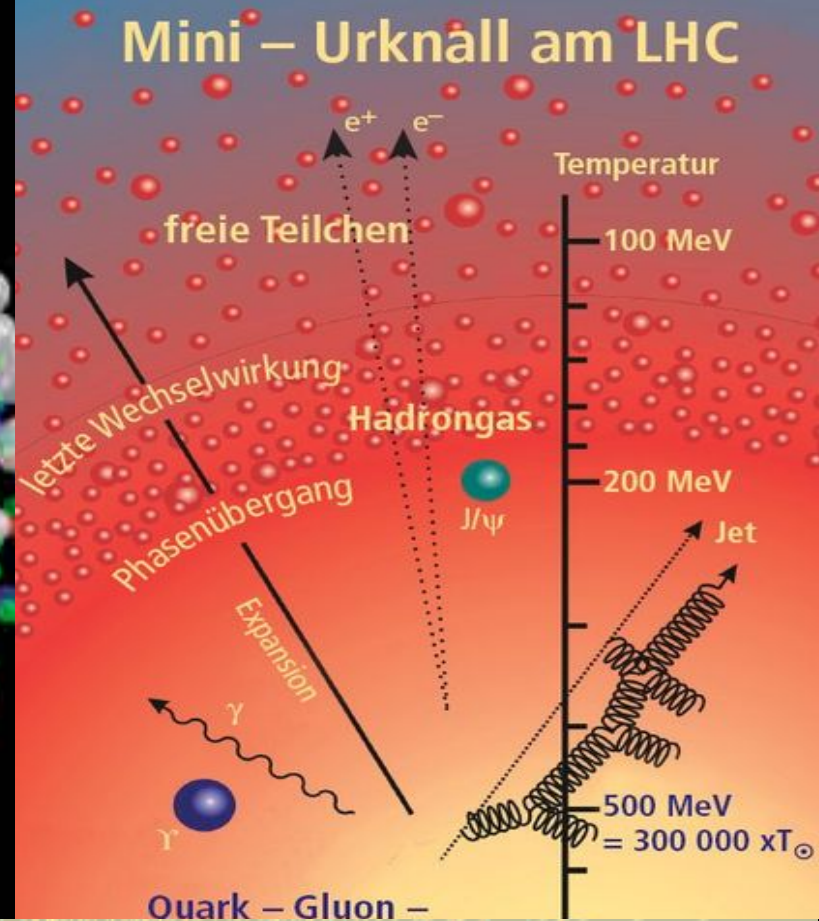
# 1 Woraus entstanden die ersten Protonen?

„Gewöhnliche Materie“  
ausgefroren aus heißer  
„Quark-Ursuppe“ im  
frühen Universum, dem  
**Quark-Gluon Plasma**

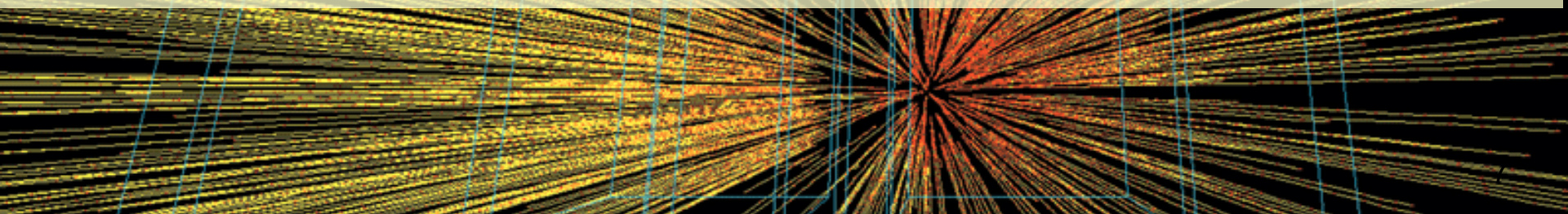


Könnte heute noch im **Inneren von Neutronensternen** existieren,  
oder am LHC entstehen:

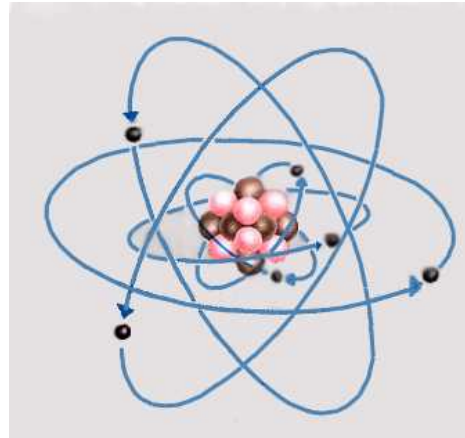
**Kollision von Blei-Kernen zur Erzeugung hoher Teilchendichte bei  $T \approx 1$  Million Millionen  $^{\circ}\text{C}$**



Simulierte Blei-Blei Kollision am LHC mit Tausenden von Teilchenspuren in **ALICE**



Atome sind neutral



Ladung des Elektrons ist exakt gleich der Ladung des Protons

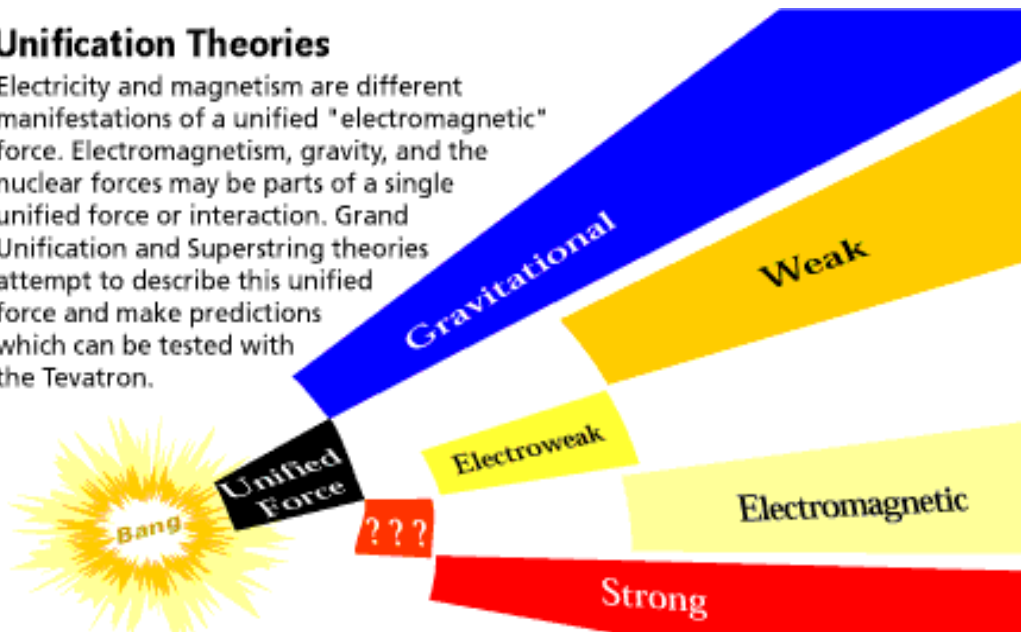
Warum?

Vorschlag: Vereinheitlichung der Kräfte

Gibt es eine verborgene Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen?

## Unification Theories

Electricity and magnetism are different manifestations of a unified "electromagnetic" force. Electromagnetism, gravity, and the nuclear forces may be parts of a single unified force or interaction. Grand Unification and Superstring theories attempt to describe this unified force and make predictions which can be tested with the Tevatron.

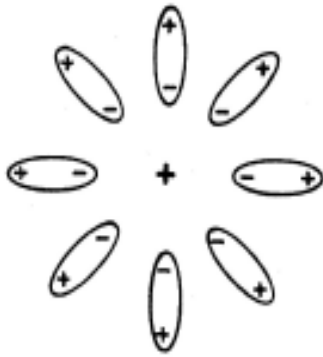




# Vereinigung aller Kräfte ?

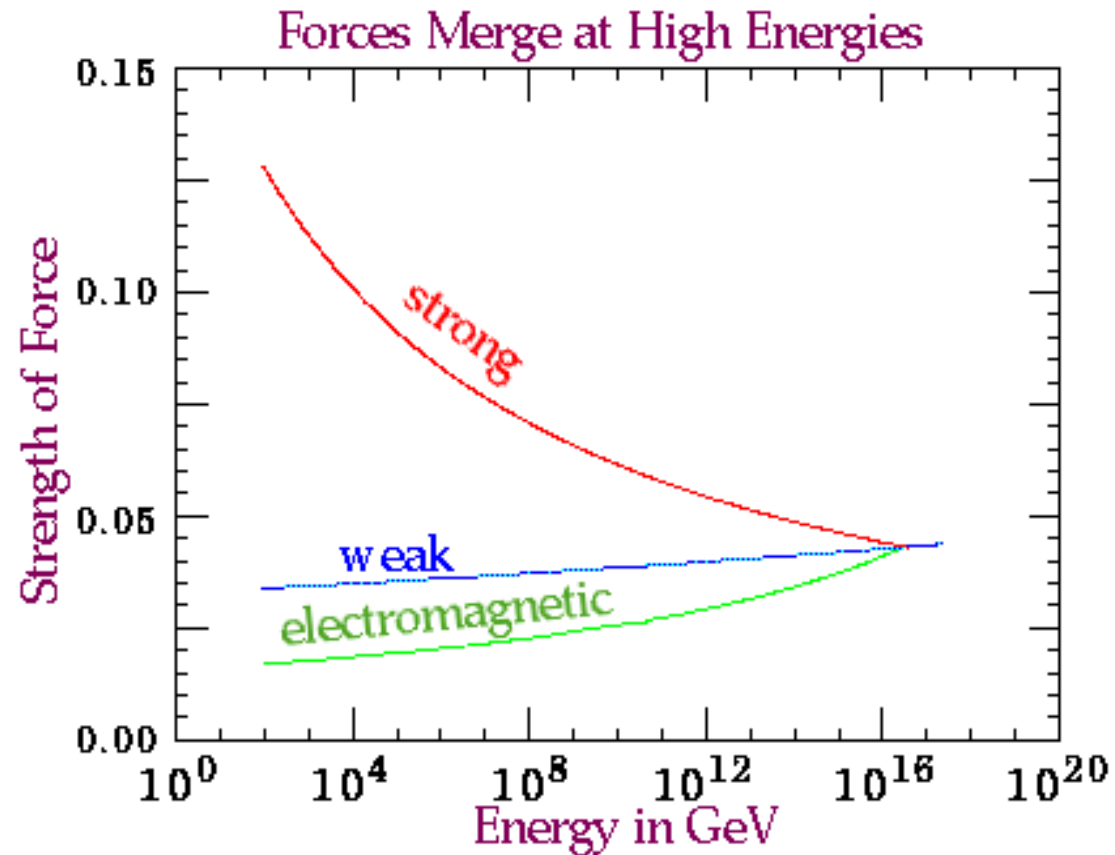
## Kopplungsstärke zwischen Teilchen ändert sich mit dem Abstand:

„Virtuelle Teilchen“ schirmen  
„nackte Ladung“ ab  
(sog. „Vakuumpolarisation“)



elektrische Ladung wird  
bei kleinen Abständen stärker !  
Effekt der „Quantenelektrodynamik“,  
modifiziert Coulomb-Gesetz, z.B.  
Lamb-Verschiebung beim Wasserstoff

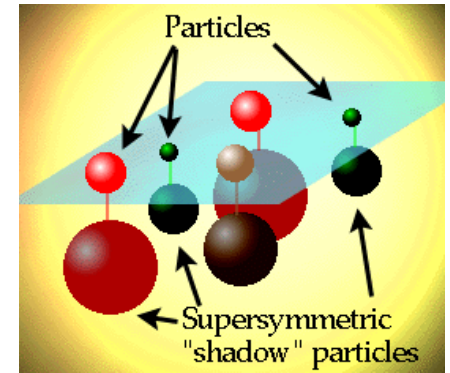
bei kleinen Abständen wird  
die **schwache Kraft** stärker,  
die **starke Kraft** schwächer



Vereinigen sich alle Kräfte bei hohen Energien  
(=kleinen Abständen) zu einer „Urkraft“ ?

Antworten auf die offenen Fragen

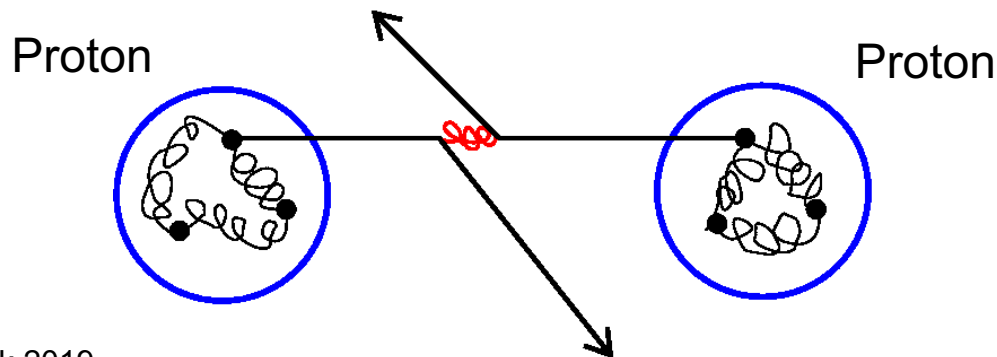
- Materie-Antimaterie-Asymmetrie
- Natur der Dunklen Materie
- Große Vereinheitlichung der Kräfte



erwartet man von bisher unbekanntem, sehr schweren Elementarteilchen,  
z.B. weitere Kraftteilchen, Materieteilchen oder Higgs-Bosonen

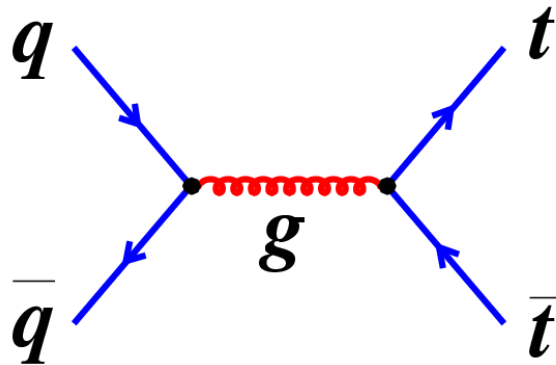


**Strategie der Teilchenphysiker:  
Kollidiere normale Materieteilchen bei sehr hoher Energie, erzeuge  
neue schwere Teilchen und beobachte sie mit Detektoren.**

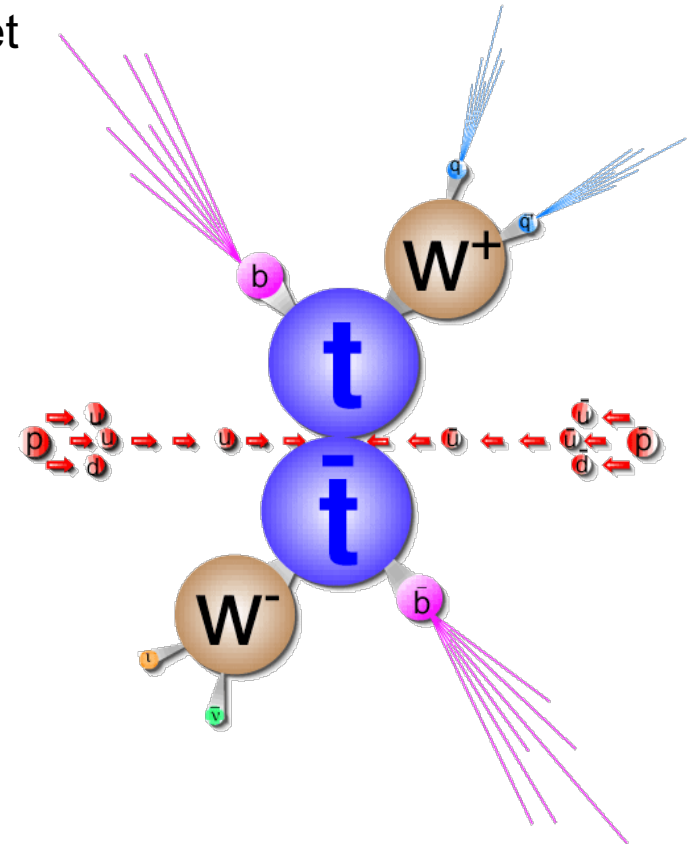


# Wie kann man Teilchen erzeugen?

Beispiel: Top-Quark-Antiquark-Paarherzeugung



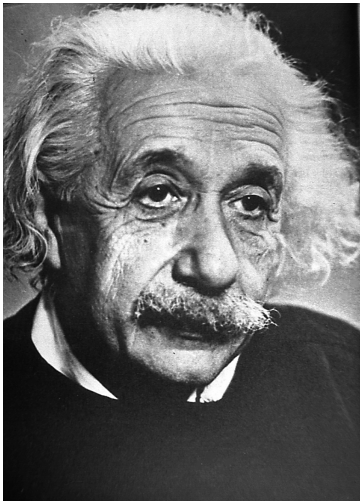
Jet



Erzeugung schwerer Teilchen:

$$m = E/c^2$$

Paarerzeugung:  $E_{\text{CMS}} \geq 2 M \cdot c^2$



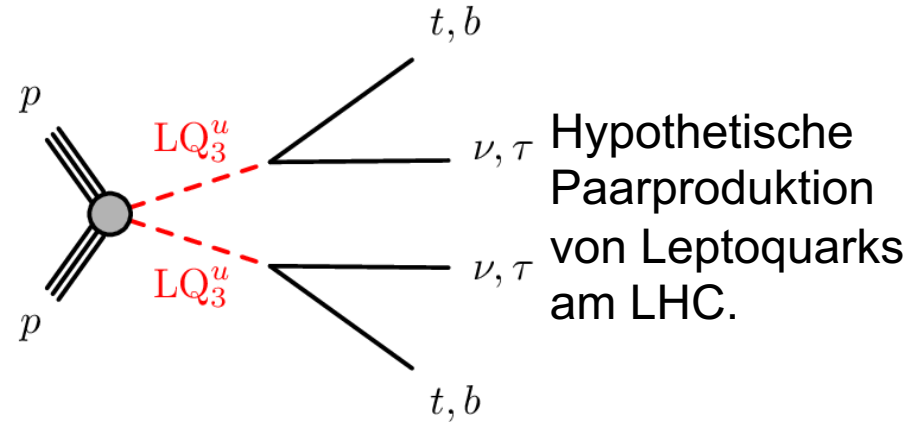
A. Einstein  
1879 - 1955



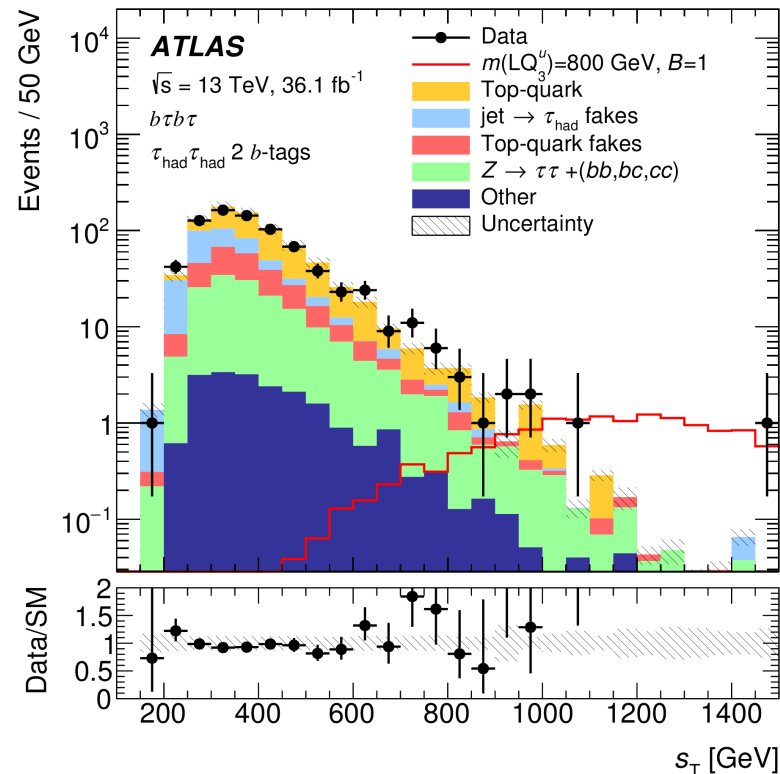
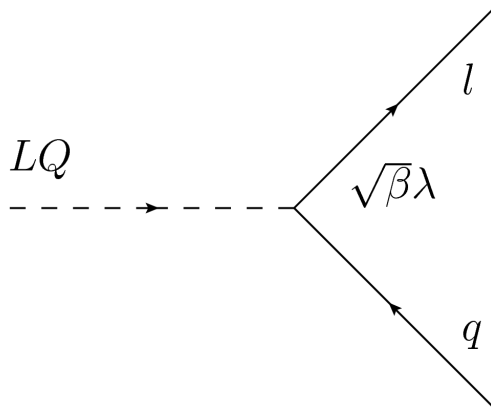
Protonen müssen auf sehr hohe Energie gebracht werden.

Jet

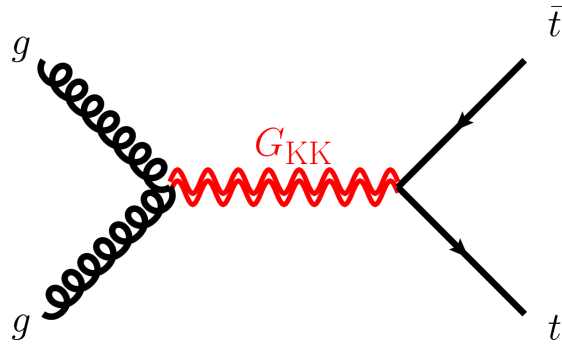
$$5^* = \begin{pmatrix} d_g^c \\ d_r^c \\ d_b^c \\ e^- \\ -\nu_e \end{pmatrix}_L$$
 Quarks und Leptonen werden durch ein gemeinsames mathematische Objekt repräsentiert.



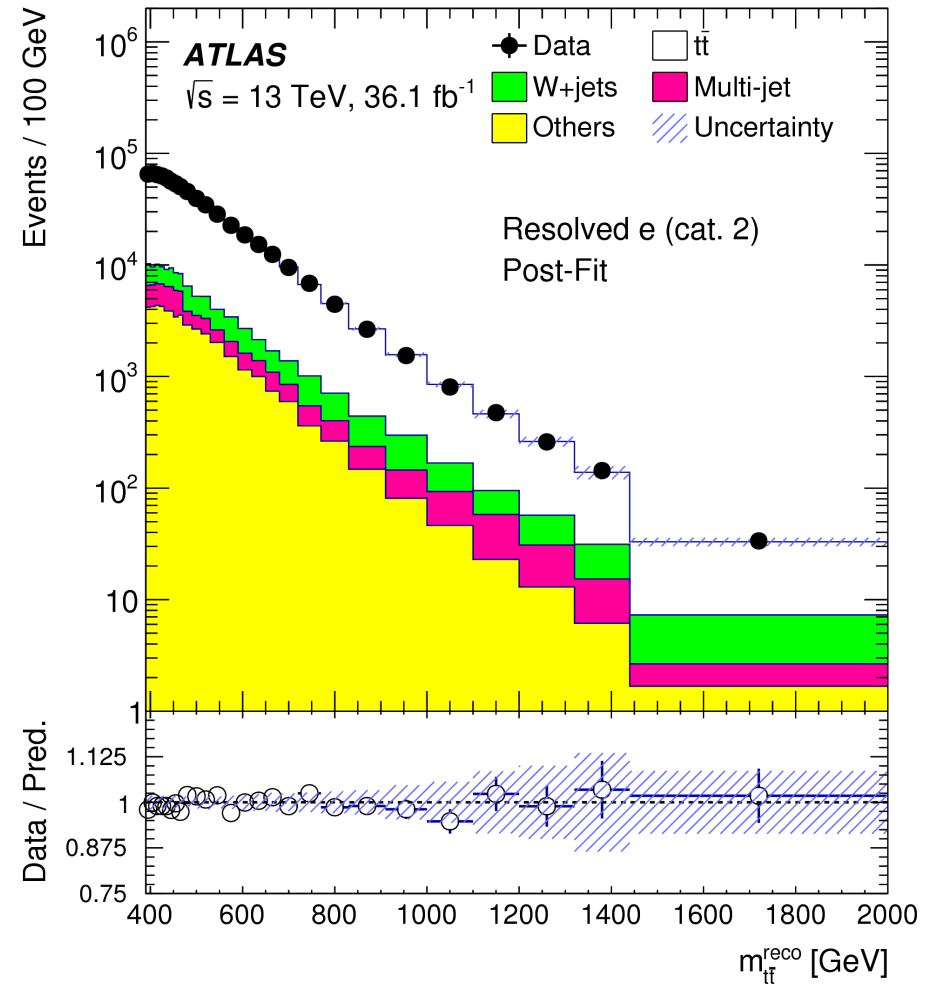
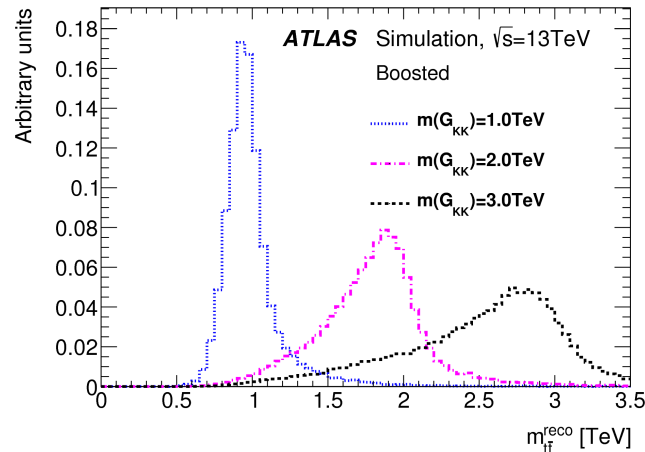
Zerfall eines Leptoquarks.



Höhere Symmetrie → mehr Wechselwirkungsteilchen (Eichbosonen)



Relevant für Top-Quark-Physik, wenn Zerfall in Top-Antitop-Paare bevorzugt ist.



# 3 Materie und Antimaterie

Was passiert,  
wenn Materie

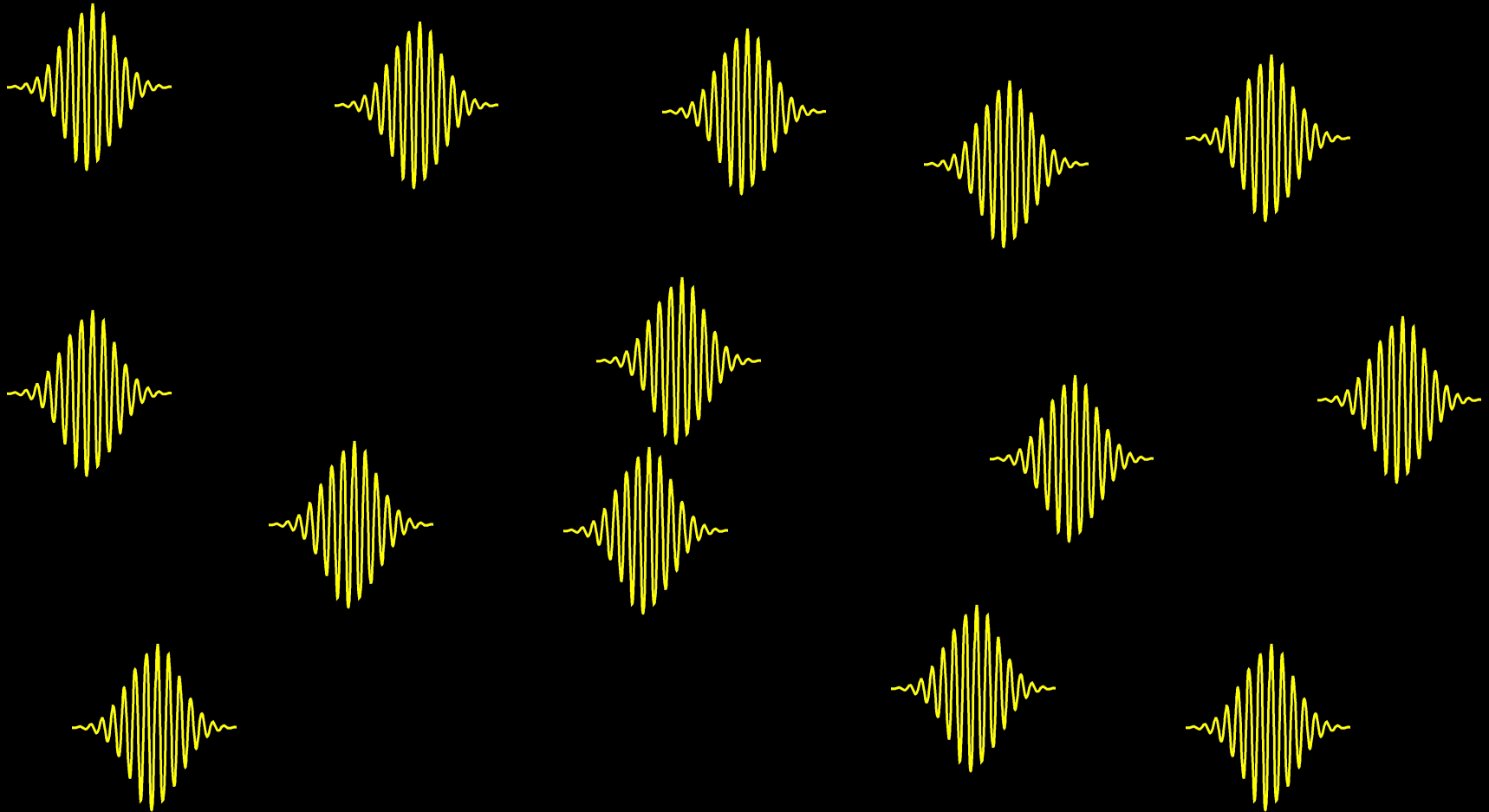


auf  
Anti-Materie trifft ?

# Warum gibt es überhaupt noch Materie ?



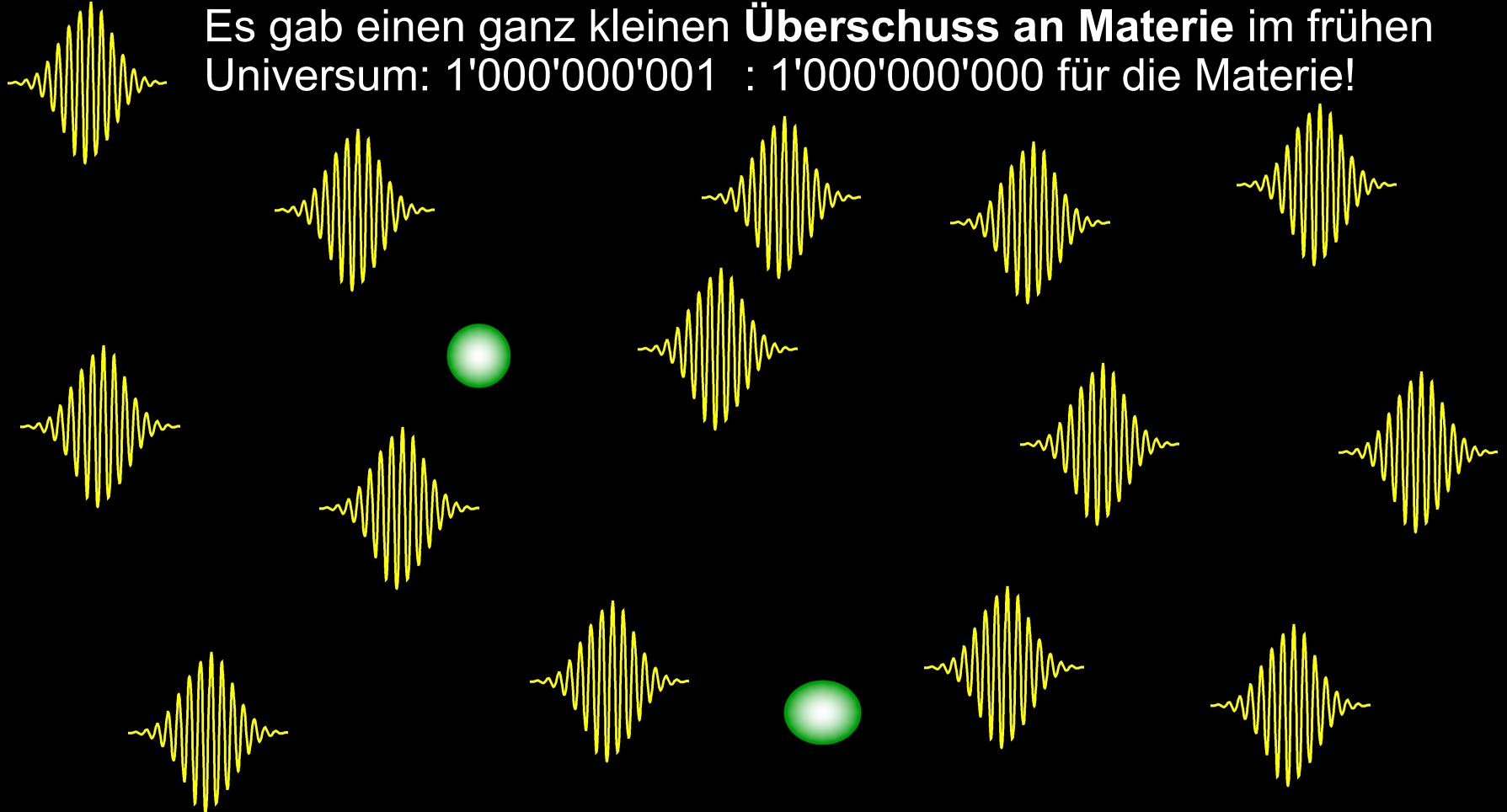
BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



Wenn Materie und Anti-Materie genau gleich wären,  
gäbe es im Universum nur noch Licht (=Photonen) !

# Warum gibt es überhaupt noch Materie ?

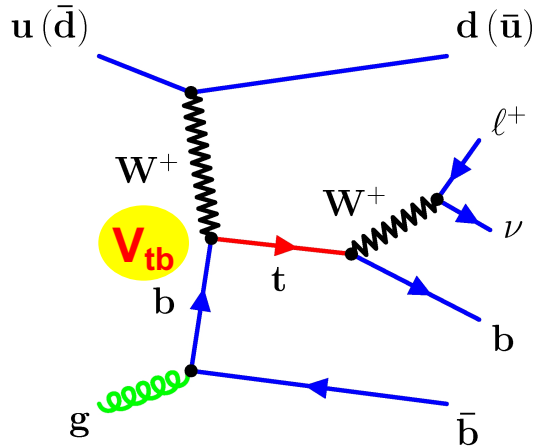
Es gab einen ganz kleinen **Überschuss an Materie** im frühen Universum: 1'000'000'001 : 1'000'000'000 für die Materie!



Etwas Materie hat überlebt, aus diesem Rest bestehen wir !!



## Top-Quark-Produktion mittels der schwachen Wechselwirkung



## Gibt es eine vierte Generation von Quarks?

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} & V_{uX}? \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} & V_{cX}? \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} & V_{tX}? \\ V_{Yd}? & V_{Ys}? & V_{Yb}? & V_{YX}? \end{pmatrix}$$

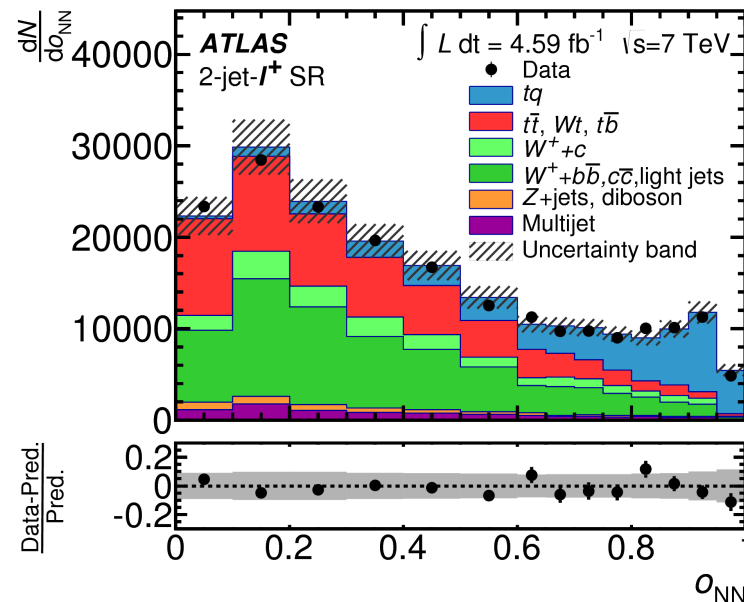
LHC ist eine Einzel-Top-Quark-Fabrik!

Beobachtung des Prozesses bei ATLAS:

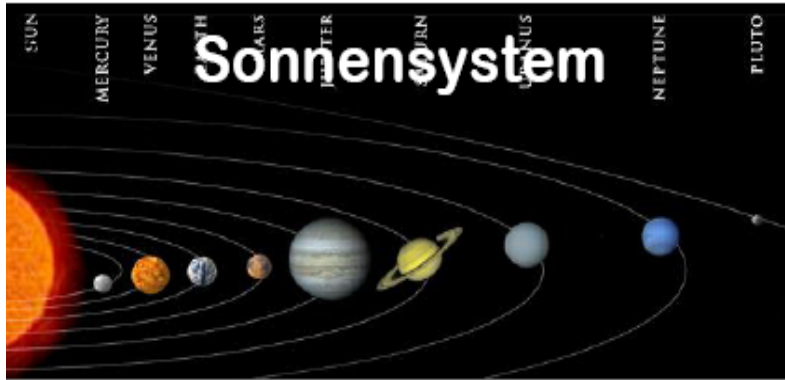
Nutzt künstliche neuronale Netze

Dissertation von Kathrin Becker

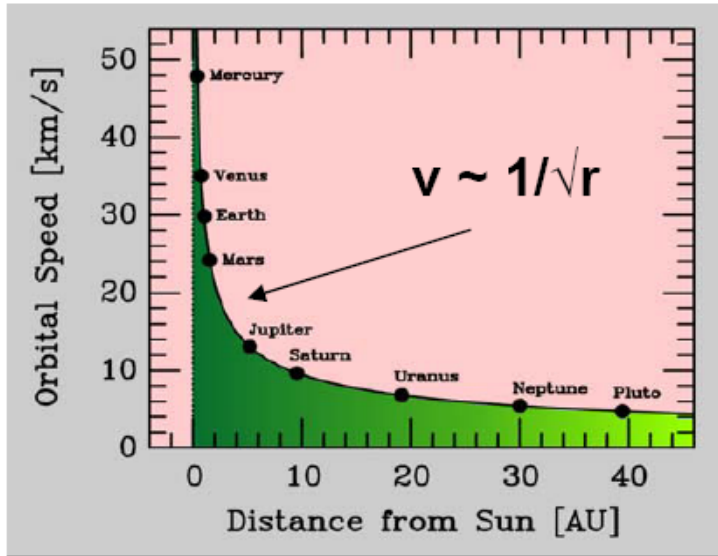
[Phys. Rev. D 90, 112006 \(2014\)](#)



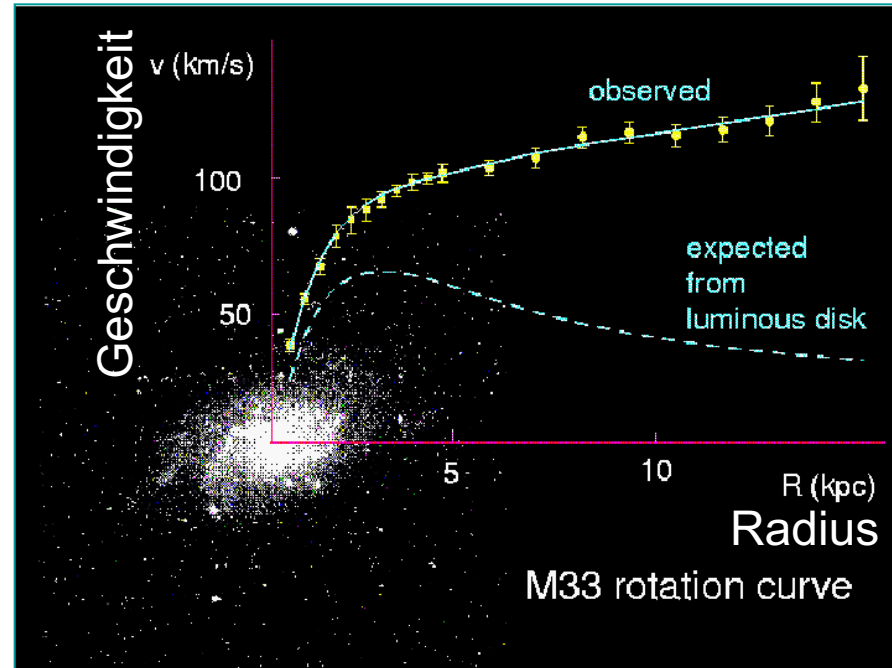
# 4 Das Wesen der Dunklen Materie



Im Sonnensystem gilt  
Keplers Gesetz



Umlaufgeschwindigkeiten und -radien von  
Sternen in Spiralgalaxien ...

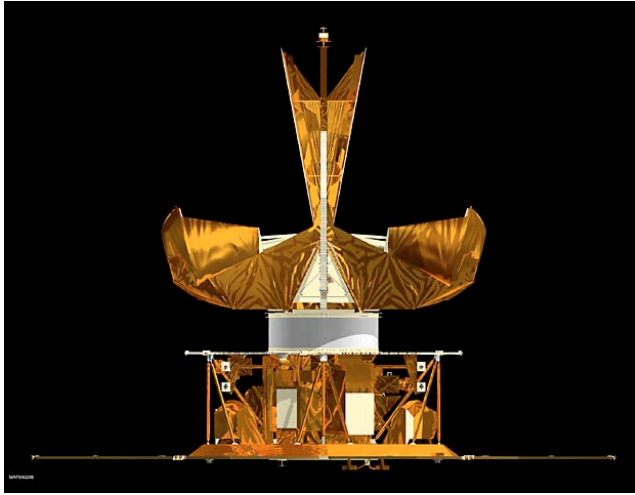


... scheinen **NICHT** im Einklang mit  
Gesetzen der Physik.  
⇒ mehr Materie da als sichtbar.

Dunkle Materie = keine elektromagnetische oder starke Wechselwirkung

# Wieviel Dunkle Materie gibt es?

Präzisionsmessung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit Satellitenexperimenten

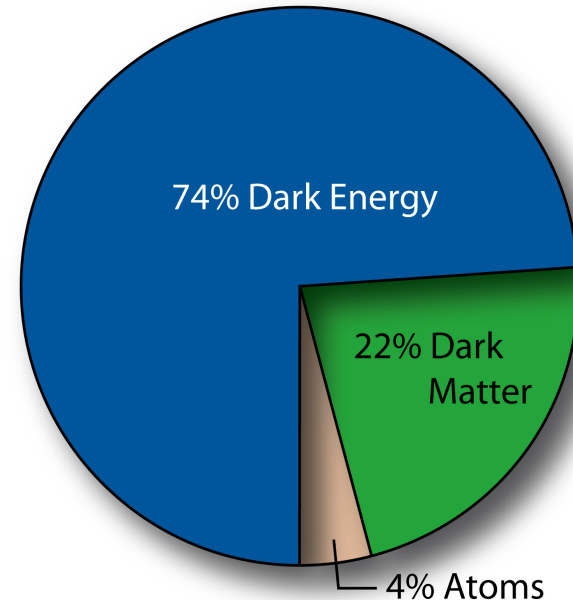
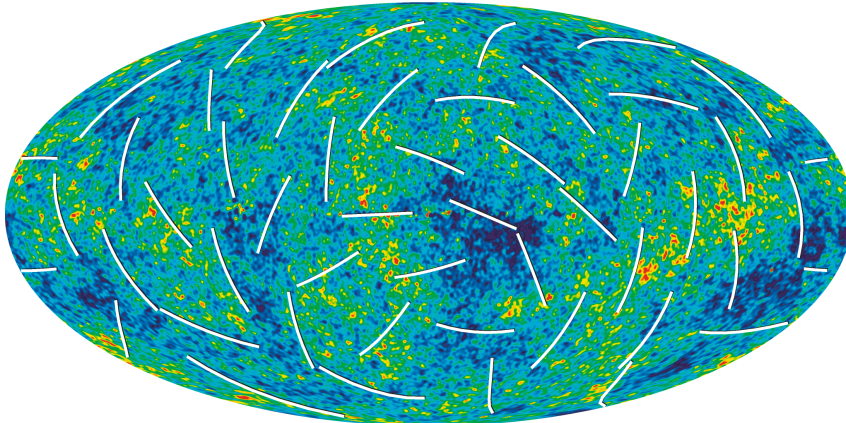


Messung von Differenzen in allen Richtungen des Weltalls auf  $10^{-5}$  Niveau mit Spezialantennen.

Analyse: nur 4% der Energiedichte des Universums von „normaler Materie“

Was ist der Rest?

Himmelskarte der Differenzen



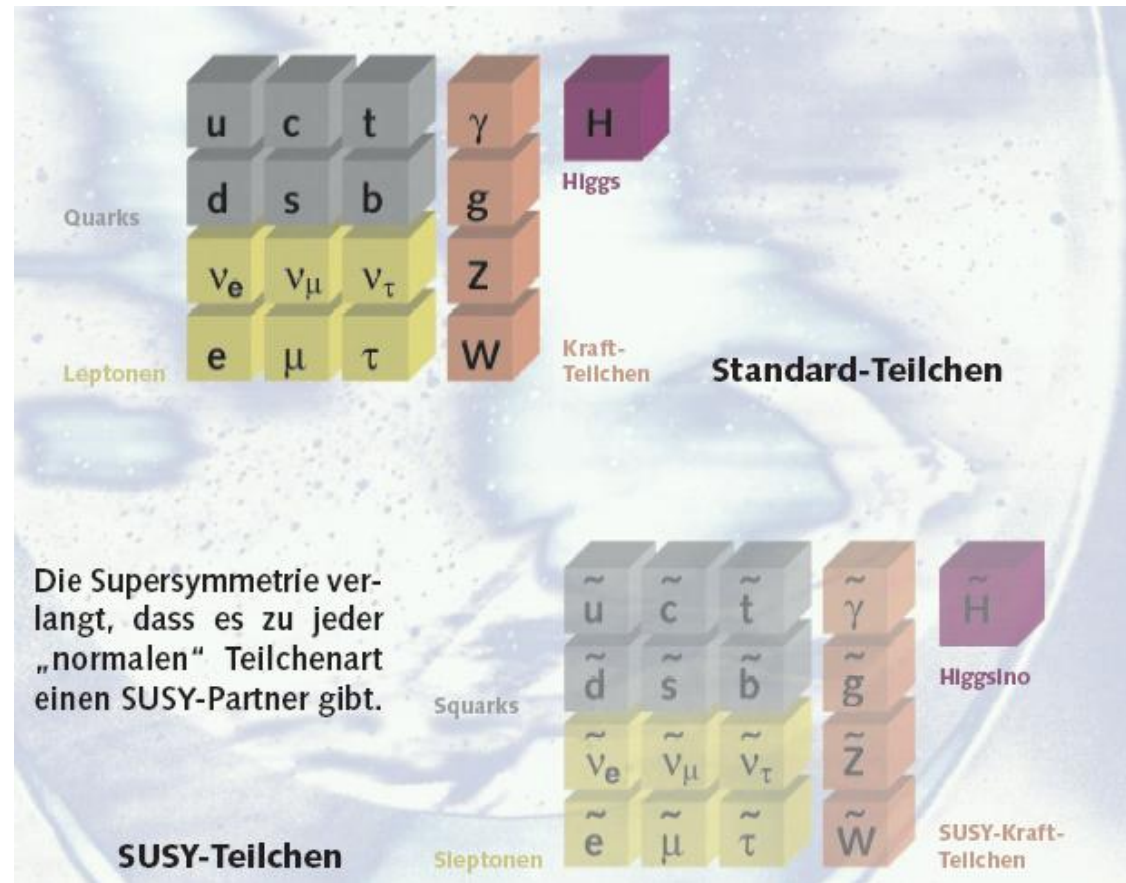
# Ist Supersymmetrie die Lösung ?

Supersymmetrie ordnet jedem Teilchen einen Partner zu

Leichtestes supersymmetrisches Teilchen ist

- stabil
- elektrisch neutral
- nicht stark-wechselwirkend?

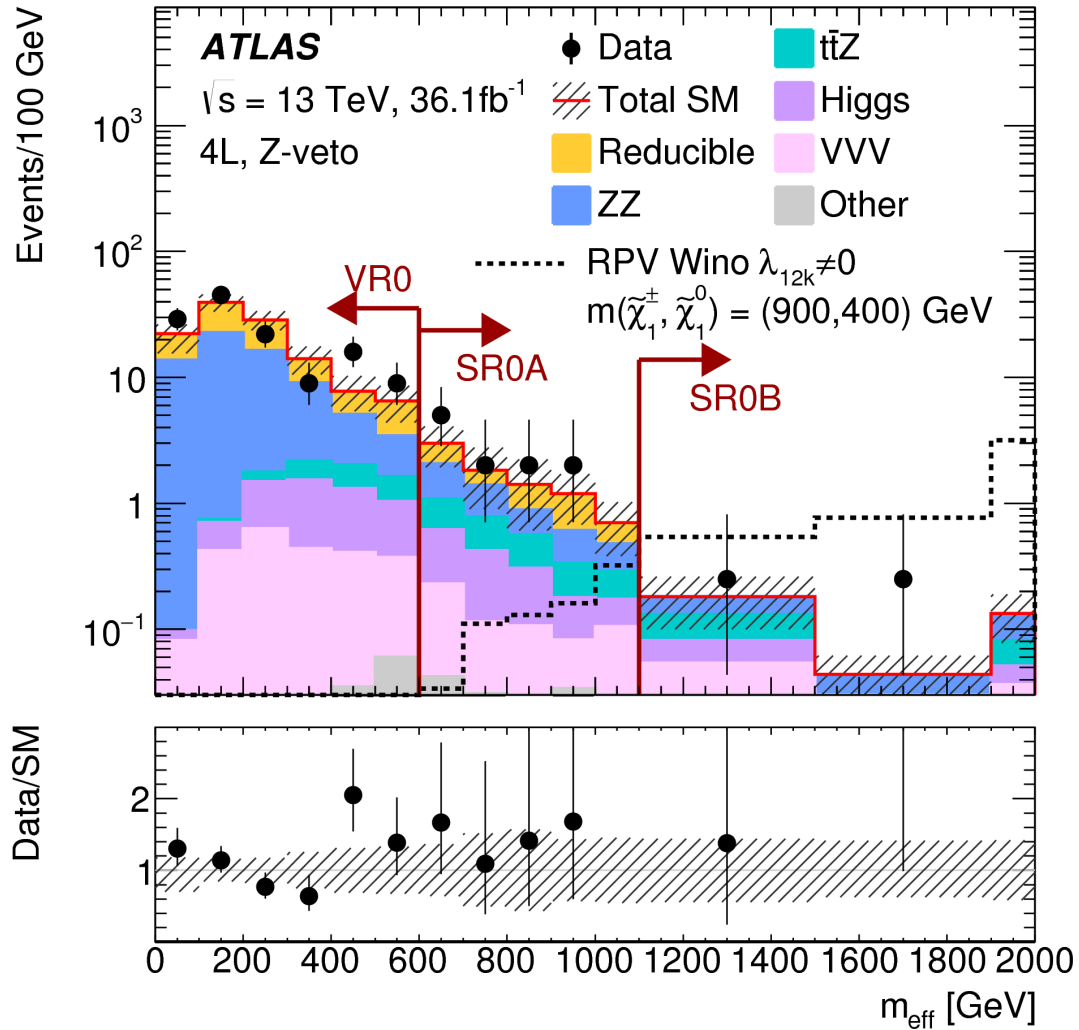
**Ist das die Dunkle Materie !?**

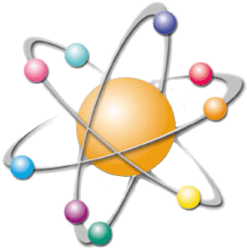


SUSY kann weitere Probleme des Standardmodells lösen:

- Verbindung zur Gravitation
- Brücke zur „Urkraft“

# Suche nach Supersymmetrie

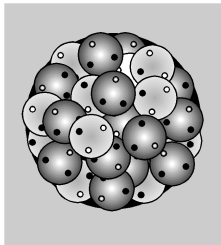




Masse der Atome  $\approx$  Masse des Kerns

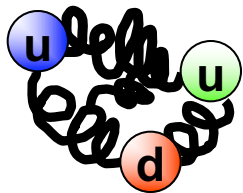
Massenanteil der Elektronen:  $10^{-3}$

Anteil kinetischer Energie:  $10^{-7}$



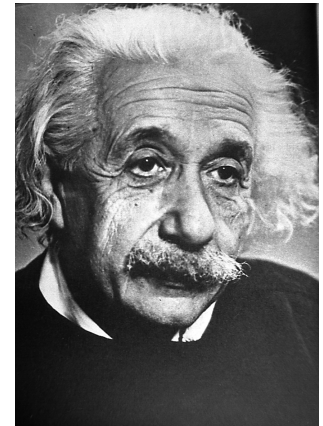
Masse des Atomkerns  $\approx$  Masse der Protonen und Neutronen

Anteil kinetischer / potentieller Energie:  $10^{-2}$



Masse der Nukleonen  $\approx$  zu 98% kinetische / potentielle Energie ( $M = E/c^2$ )

Nebenrechnung:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$ ,  $\Delta x \approx 0.8 \text{ fm}$ ,  $hc/2\pi \approx 200 \text{ MeV fm}$   
 $\Rightarrow E \geq pc \approx 250 \text{ MeV}$ ,  $M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$



1. Quarks sind sehr wahrscheinlich wirklich elementare Teilchen
2. 98% der Masse „normaler Materie“ sind verstanden

Higgs-Mechanismus  
Higgs-Feld  
+  
Teilchen

Cocktail Party



Berühmtheit betritt den Raum



Gerücht wird in den Raum gerufen

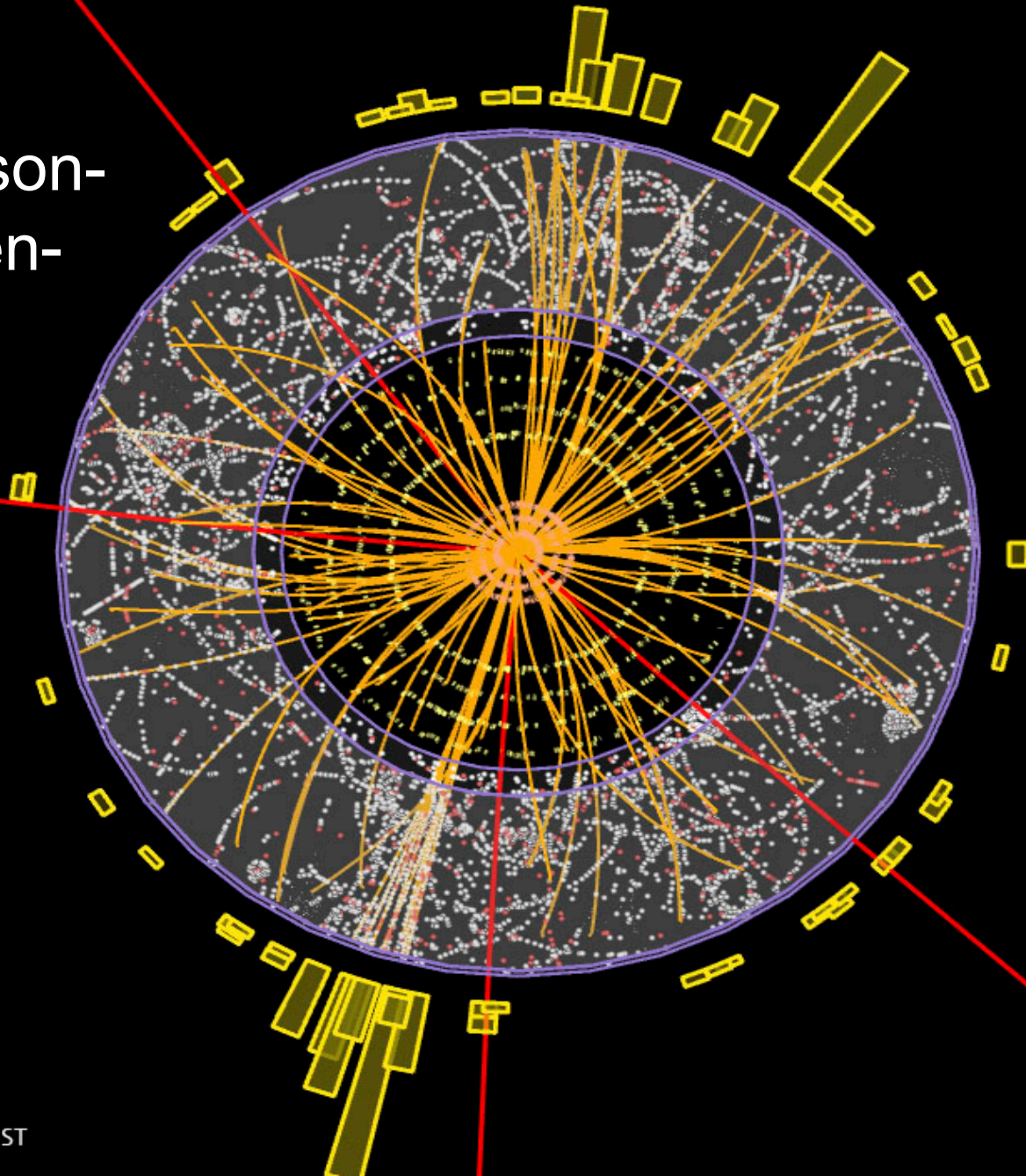


Gerücht bewegt sich durch den Raum



Higgs-Boson  
Quantum des  
Higgs-Feldes

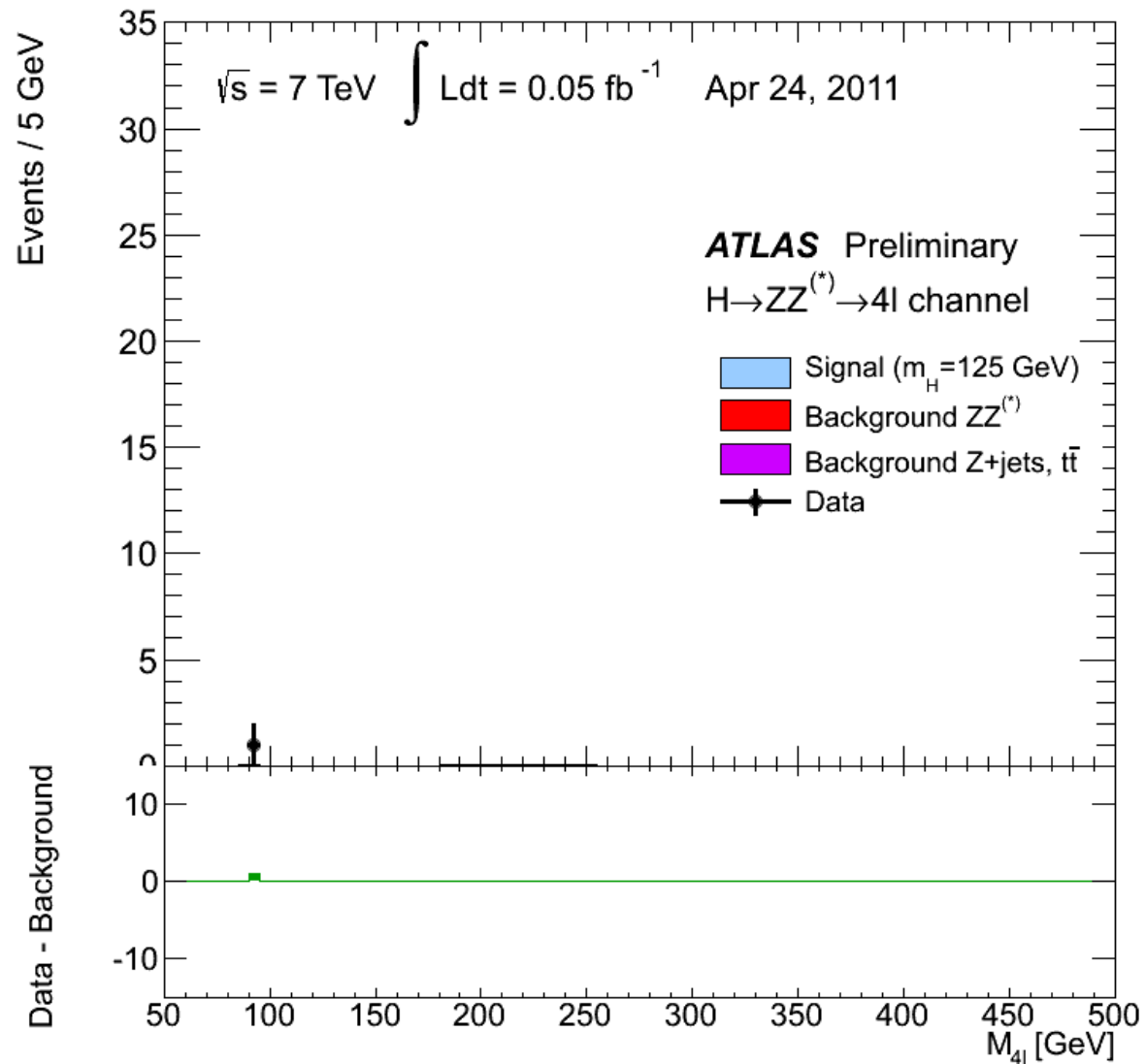
# Higgs-Boson-Kandidaten-Ereignis

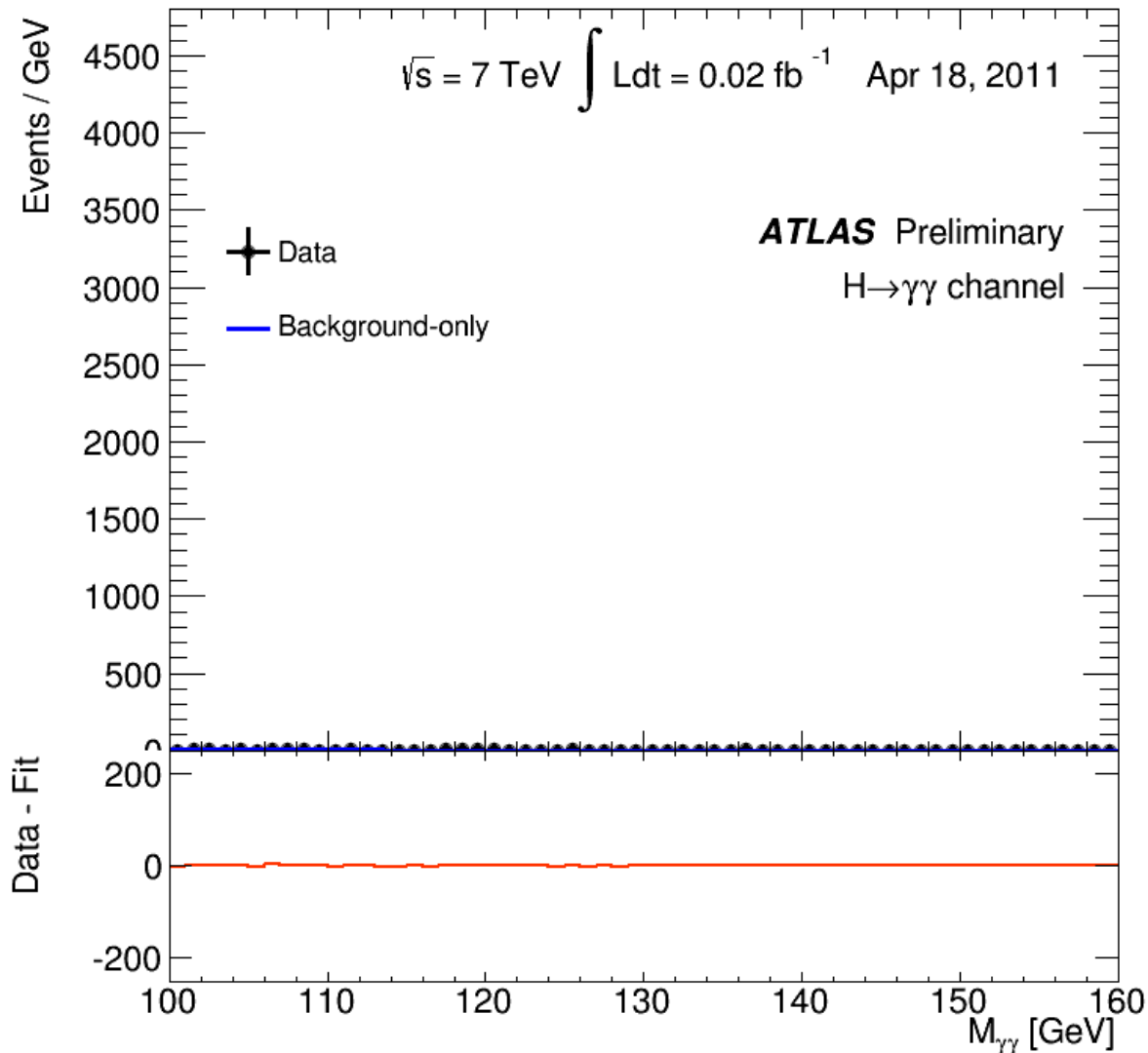


**ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

Run: 189280  
Event: 143576946  
2011-09-14 12:37:11 CEST







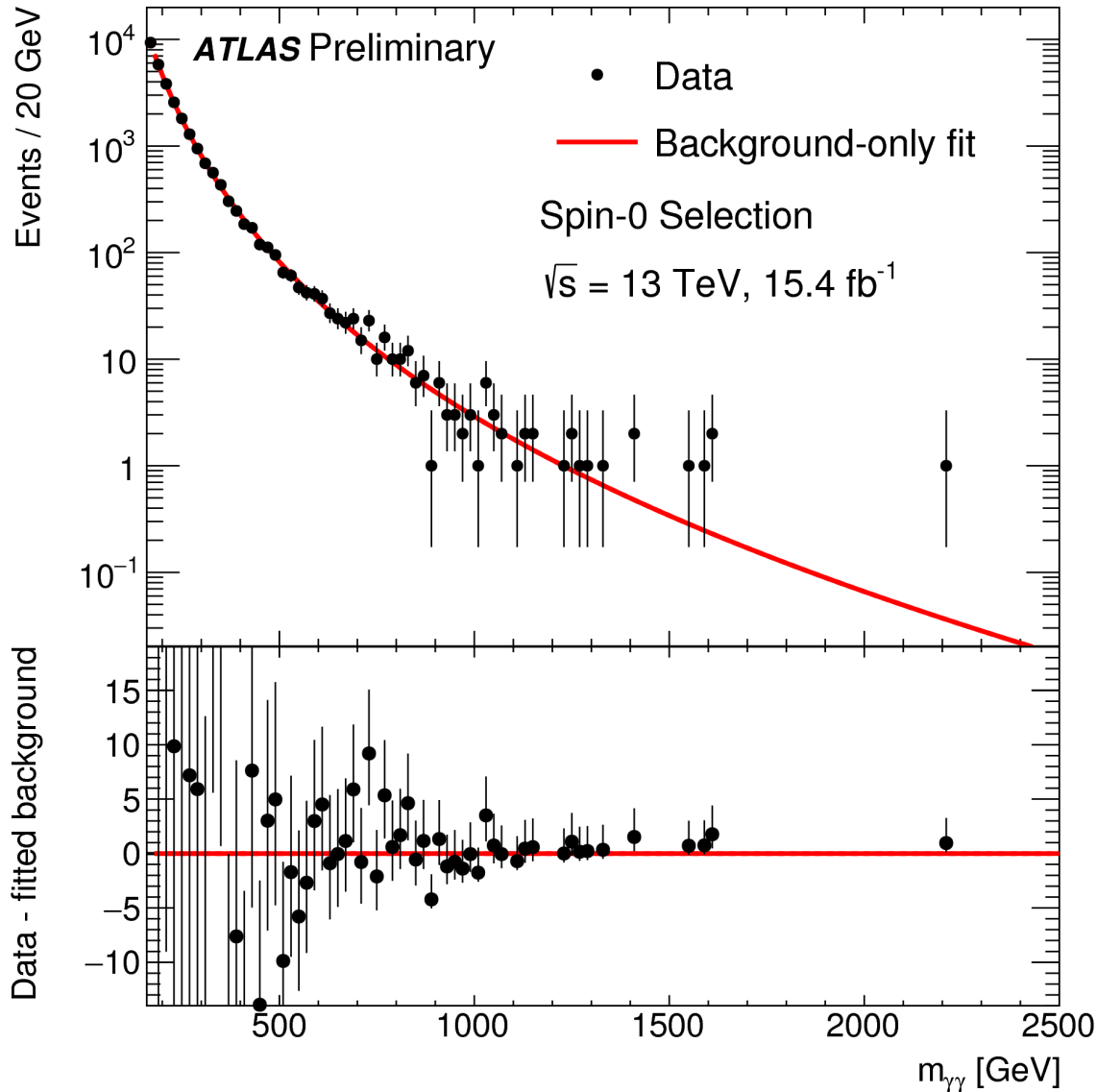
Benutzt ebenfalls Verteilung der invarianten Masse der beiden Photonen.

Addiere Energien und Impulse (Achtung Vektor) der Photonen und berechne:

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

Untergrund: abfallende „Exponentialfunktion“

Signal: Gaußfunktion zentriert bei Higgs-Boson-Masse

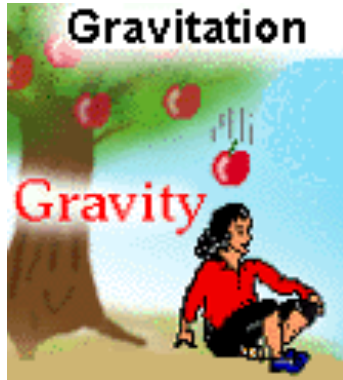


... oder anderen neuen  
Teilchen im Zwei-  
Photon-Endzustand

# 6 Quantentheorie der Gravitation

Die Gravitation ...

...prägt das Leben auf der Erde.



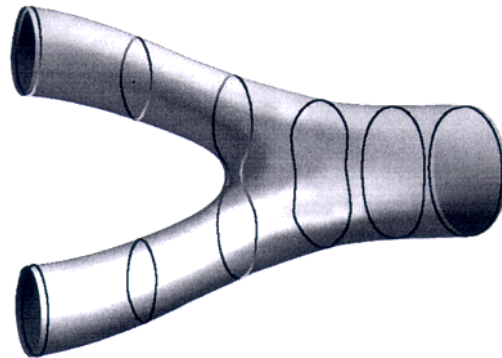
... beherrscht das Universum.



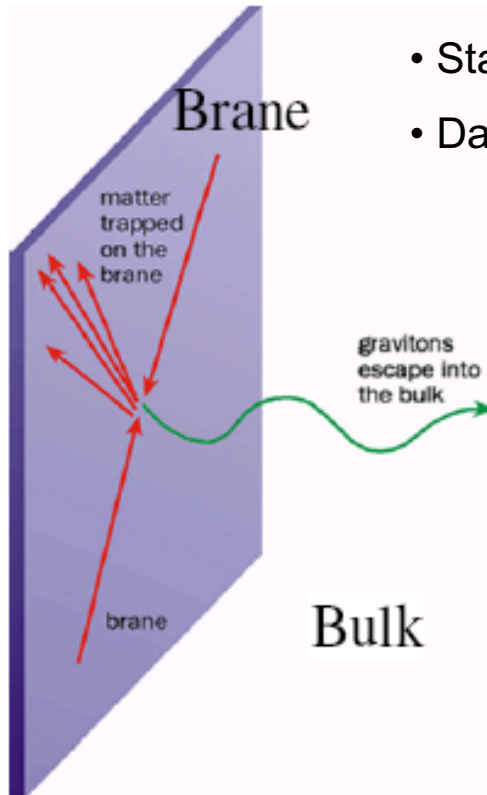
Suche nach einer Quantentheorie der Gravitation

Suche nach Gravitationswellen

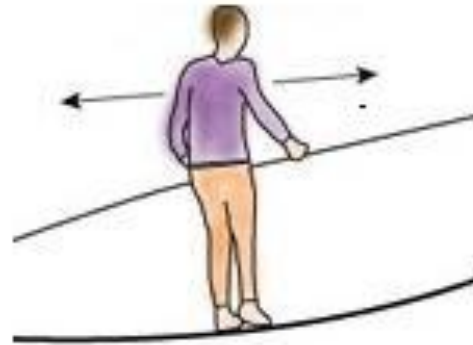
Stringtheorie  
Teilchen sind  
Schlaufen,  
keine Punkte



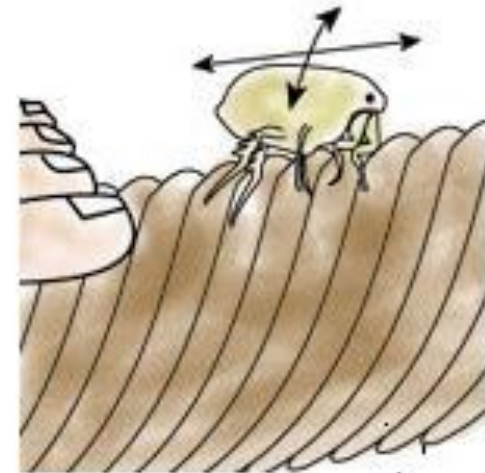
## Einführung zusätzlicher kompaktifizierter Raumdimensionen



- Standardmodell-Teilchen bewegen sich im 3D-Raum (Brane).
- Das Graviton kann sich auch in den extra Dimensionen bewegen.



Der Seiltänzer kann sich nur in einer Dimension entlang des Seils bewegen, ...



... aber ein Floh kann sich in zwei Dimensionen bewegen.

# Zusammenfassung



LHC und seine Detektoren sind der neuste Meilenstein auf der Suche des Menschen nach dem, „was die Welt im Innersten zusammenhält“.

Datennahme läuft sehr erfolgreich.

Hoffentlich finden wir Antworten auf einige Fragen wie

- was passierte am Anfang des Universums?
- wo ist die Antimaterie geblieben?
- Higgs-Teilchen wurde entdeckt.  
Erklärt den Mechanismus zur Erzeugung der Massen der Elementarteilchen?
- gibt es eine Vereinigung der Kräfte?
- gibt es mehr als 4 Raumdimensionen?