

# Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

- 1. Was wir schon wissen
- 2. Große Fragen
- 3. Wie kann man Teilchen überhaupt "sehen"
- 4. Ein Beispiel: Das Z-Teilchen und der LEP-Beschleuniger
- 5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

# Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

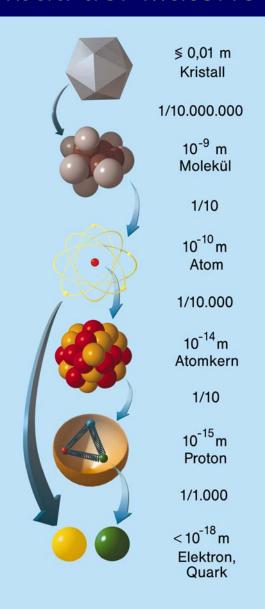
- 1. Was wir schon wissen
- 2. Große Fragen
- 3. Wie kann man Teilchen überhaupt "sehen"
- 4. Ein Beispiel: Das Z-Teilchen und der LEP-Beschleuniger
- 5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

### **Aufbau der Materie**

Auge, likroskop

Elektronenmikroskop

Teilchenbeschleuniger



→ Entfernung zum Pluto

**→** Mond





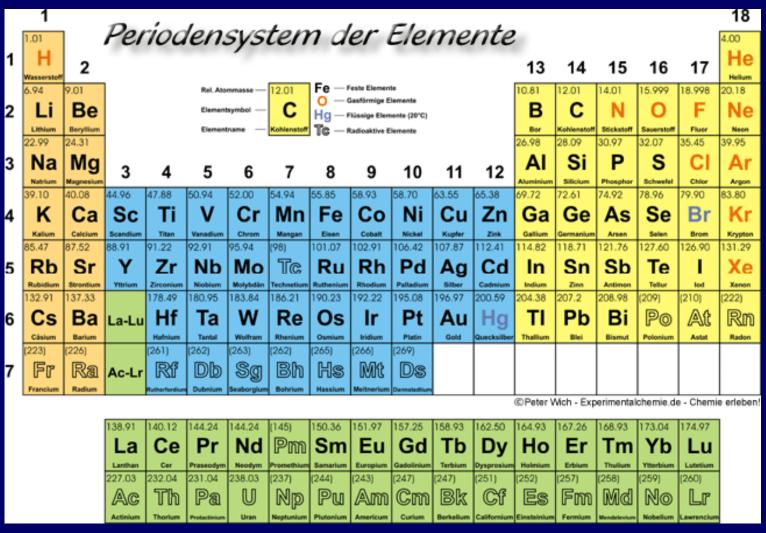
--- Fussballstadion



→ < Fussball</p>

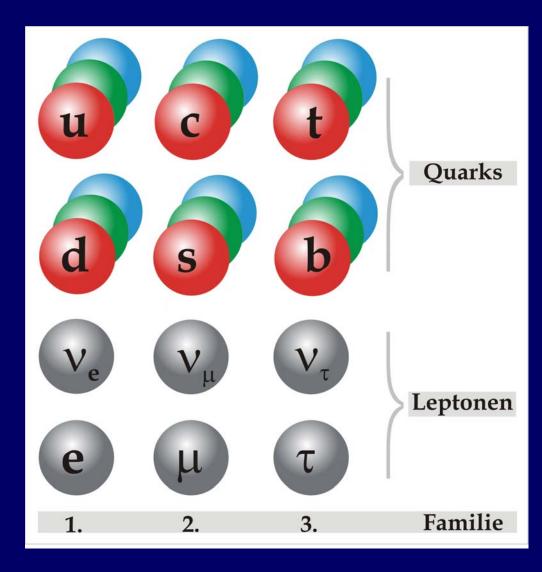


### Viele verschiedene Atome/Kerne



gemeinsame Bausteine: Elektronen, Protonen, Neutronen sind das die Elementarteilchen??

### Im Innersten: Bausteine der Materie



Es gibt genau drei Familien von Quarks und Leptonen

"Punktförmig" (überprüft bis 10<sup>-18</sup>m)

Fermionen (Spin-½)
Pauli-Prinzip 

eignen sich zum Aufbau
komplexer
Strukturen

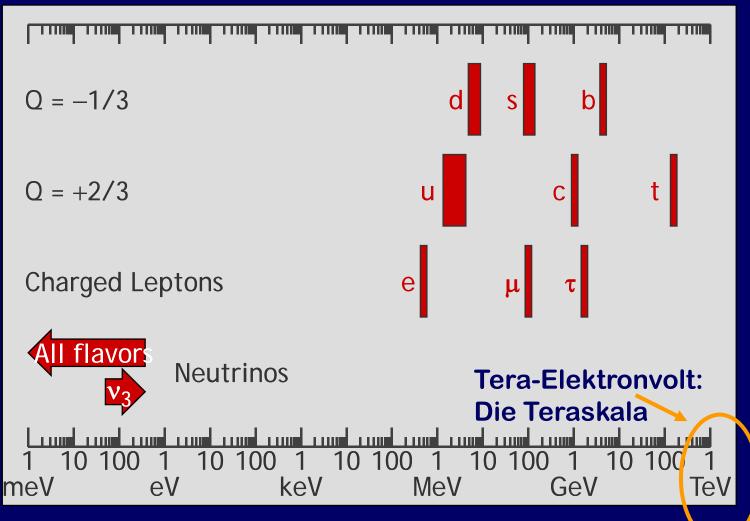
"Dinge"

Alle experimentell nachgewiesen!

**Unterschied:Massen** 

+ Antiteilchen

### Massen der Elementarteilchen



**Einheit: Energie ~ Masse (Einstein, später)** 

Warum so kompliziert???

### Im Innersten: Kräfte

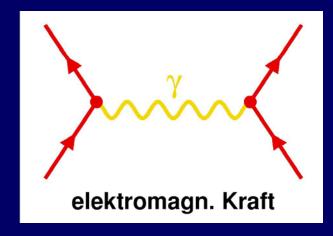
"Beziehung zwischen den Dingen"



Beschreibung von Kräften durch "Botenteilchen"



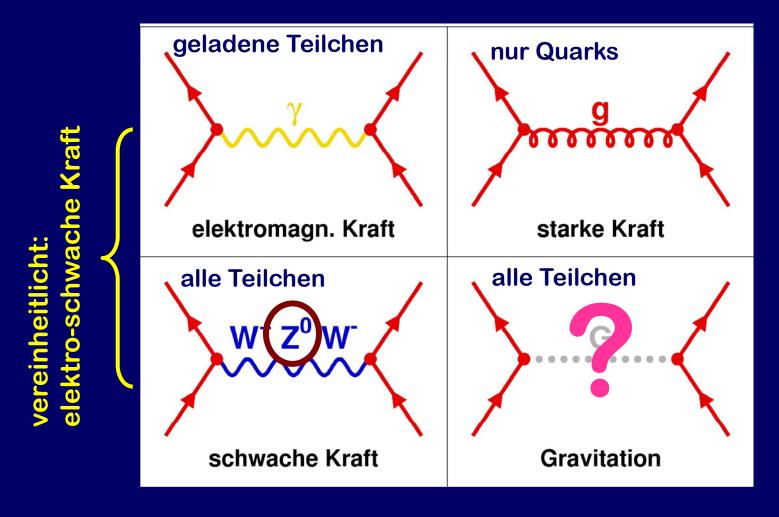
R. Feynman



elektrische und magnetische Kräfte werden durch Austausch von Photonen übermittelt

elektromagnetische Kraft ist nicht die Einzige...

### **Elementare Kräfte**



Austauschteilchen: "Bosonen" (Spin 1 oder 2), können "klumpen"

#### **Das Standard-Modell**

Konsistente theoretische Beschreibung der Elementarteilchen und Kräfte

- basiert auf einem Symmetrie-Prinzip: schön
- hält präzisen experimentellen Tests seit Jahrzehnten stand und dennoch:

das Standard-Modell lässt viele sehr wichtige Fragen offen

"neue Physik"

# Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

- 1. Was wir schon wissen
- 2. Große Fragen
- 3. Wie kann man Teilchen überhaupt "sehen"
- 4. Ein Beispiel: Das Z-Teilchen und der LEP-Beschleuniger
- 5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

### Was ist eigentliche Masse???

#### **Zwei Definitionen:**

Newton:  $F = m \cdot a$ 

Masse ist Trägheit bei Bewegungsänderungen

Einstein:  $E = \mathbf{m} \cdot \mathbf{c}^2$ 

Masse ist Energie → Gravitation!

(Energie krümmt Raum-Zeit)

Plato is my friend, Aristotle is my friend, But my best friend is truth.

Aber wodurch wird Masse erzeugt?
Ist sie eine Eigenschaft der Teilchen?

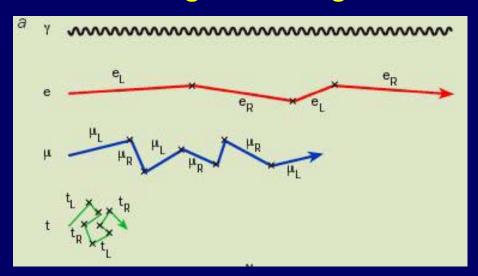
Theorie (Standard-Modell): Symmetrieprinzip funktioniert nur, alle (Elementar-)teilchen masselos sind... schlecht.

### Das Rätsel der Masse: Der Higgs-Mechanismus



Peter Higgs (1964!)

Ist Masse keine Eigenschaft der Teilchen, sondern nur das Ergebnis einer permanenten Kraft ??? Jedes masselose Teilchen bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit



Preis: mindestens ein grundlegend neues Teilchen: das Higgs-Boson

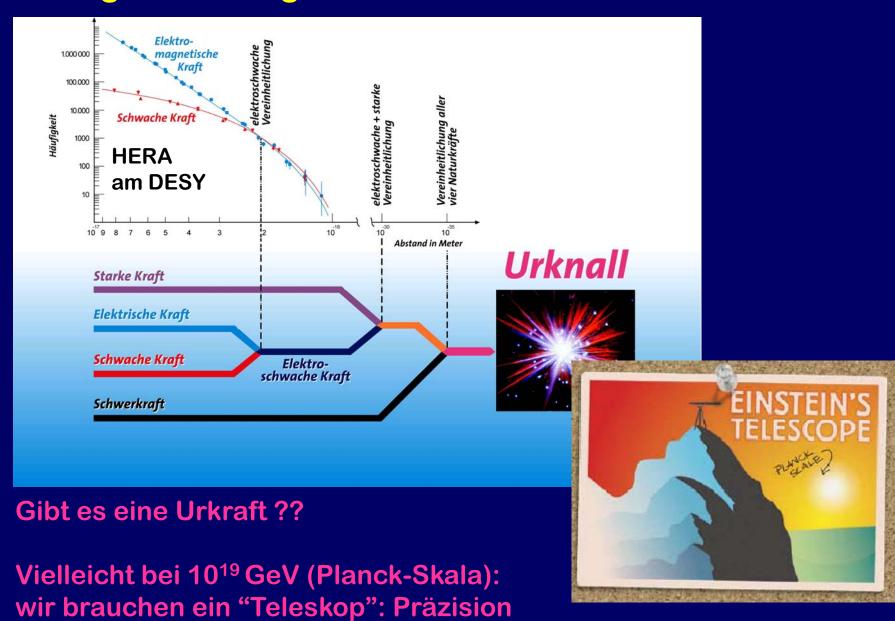
In ein paar Jahren werden wir wissen, ob diese Theorie stimmt!

⇒ Large Hadron Collider LHC

## Das Rätsel der Masse: Der Higgs-Mechanismus



### Noch größere Fragen...



### Noch größere Fragen...

Ein ganz einfaches Beispiel:

**Atome ist elektrisch neutral – Warum?** 

Gleichviele Elektronen (Hülle) und Protonen (Kern)

- elektrische Ladung hebt sich auf

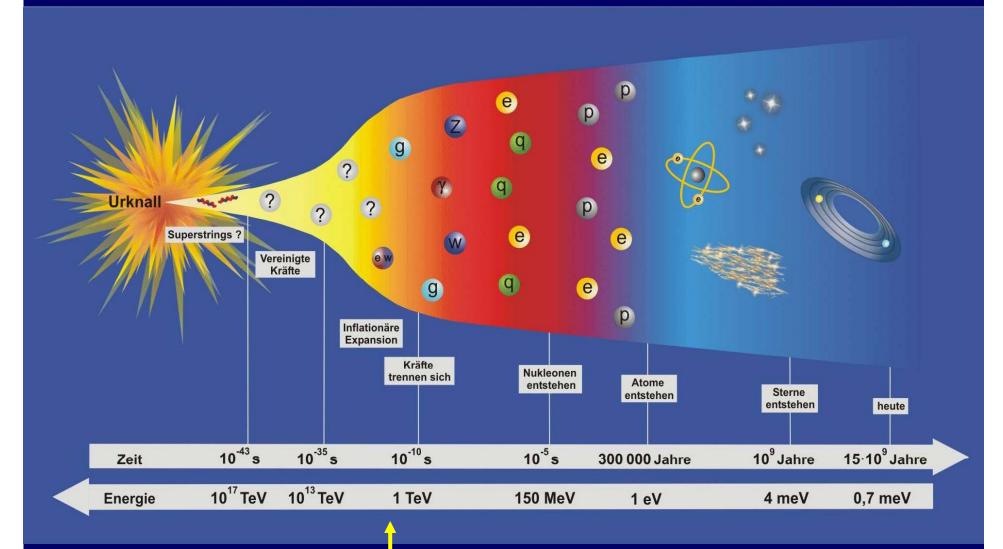
#### Genau?

Wenn die Ladung eines Elektrons nur 10<sup>-18</sup> mal größer wäre, als die des Protons, würden sich z.B. Erde und Mond mit der gleichen Kraft elekrisch abstoßen, mit der sie sich über die Gravitation anziehen!!

-> kein Mond, kein Planetensystem, keine Erde, keine Menschen...

Was sorgt dafür, dass Elektron und Proton die gleiche Menge Ladung tragen (Symmetrie!!): Antwort: wir haben keine Ahnung!

### Was haben kleinste Teilchen mit dem Universum zu tun?

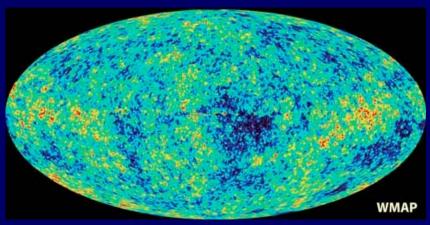


### Noch größere Fragen...

Im Universum gibt es eine Form von Materie, die nicht Quarks oder Leptonen sein kann! Kalte Dunkle Materie

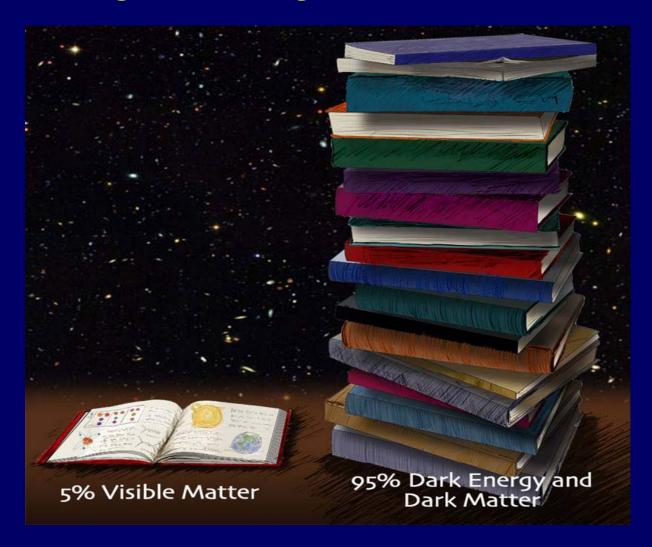


Sterne weit weg vom Zentrum einer Galaxie rotieren schneller um das Zentrum als erwartet



Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung lassen auf dunkle Materie und dunkle Energie schließen "Echo des Urknalls"

## Noch größere Fragen...

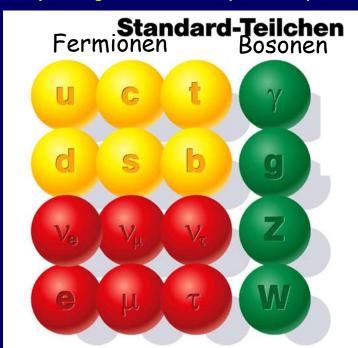


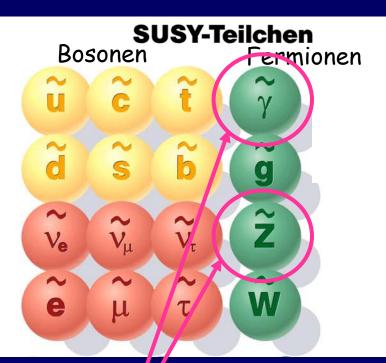
Woraus besteht die dunkle Materie???

### Mögliche Lösungen

"Symmetrie zwischen den Dingen und ihren Beziehungen"

Supersymmetrie (SUSY):





SUSY kann konzeptionelle Probleme lösen

Träger der dunklen Materie?

**Brücke zur Urkraft Brücke zur Gravitation?** 

zu schön? LHC kann SUSY sehen

# Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

- 1. Was wir schon wissen
- 2. Große Fragen
- 3. Wie kann man Teilchen überhaupt "sehen"
- 4. Ein Beispiel: Das Z-Teilchen und der LEP-Beschleuniger
- 5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

# Wie kann man kleine Bausteine "sehen"?

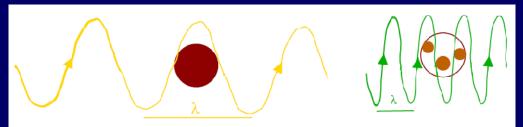
1. Energie = hc / Wellenlänge



**Energie, Scotty** 

Kleine Strukturen werden nur mit großer Energie

sichtbar



Wie kann man neue schwere Teilchen erzeugen?

2. Energie =  $c^2 * Masse$ 

Schwere Teilchen können mit großer Energie erzeugt werden

⇒ Teilchenbeschleuniger

### Teilchen auf hohe Energien befördern

Praktische Einheiten für Energie: Elektronvolt (eV)



Mit 20 keV kann man ~ 1/10 Atomradius auflösen Mit 2 GeV kann man ~ 1/10 Protonradius (0.1fm =  $10^{-16}$ m) auflösen Mit 200 GeV kann man ~  $10^{-18}$ m auflösen (z.B. HERA am DESY)

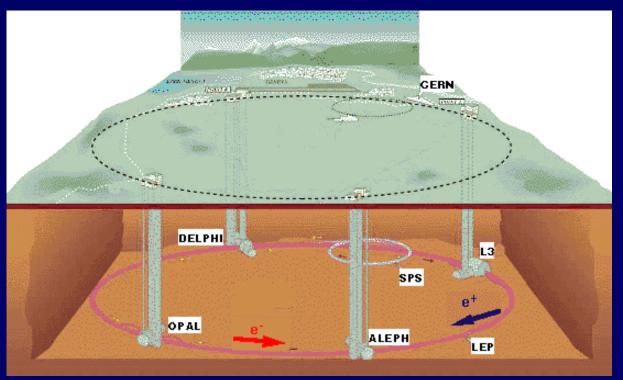
Am LHC erreichen die Teilchen Tera-Elektronvolt (TeV) = 10<sup>12</sup> eV

- ⇒ Auflösungsvermögen ~10<sup>-19</sup> m
- ⇒ genug Energie um die schwersten bekannten Teilchen (top) zu erzeugen, und vor allem neue, wenn sie existieren

### Weltliga der Beschleunigerzentren



### **Beispiel: LEP**



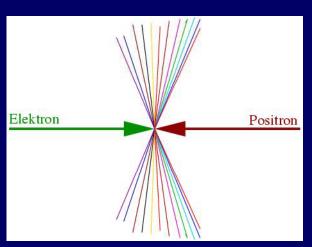
**Umfang 27 km** 

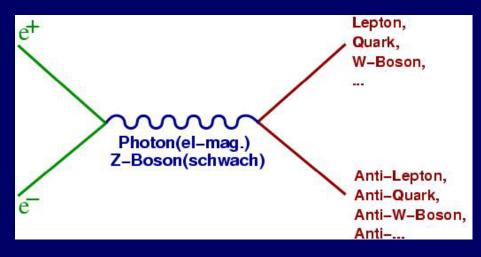
je 8 "Bündel" (bunch) mit je 100 Mrd Elektronen/Positronen

"Kollidieren" 100000 mal pro Sekunde

**Meistens passiert 'nichts'** 

Es entsteht ~ 1 Z-Boson pro Sekunde





### Die meisten Teilchen leben nicht lange...

Stabile Teilchen: Elektron, Proton, Neutrinos + deren Antiteilchen Photon, (Gluonen)

Alle anderen Teilchen zerfallen nach kurzer Zeit in leichtere

Lebensdauern (Beispiele)

Elektron: ∞

Neutrino: ∞ Müon: 2 x 10<sup>-6</sup> s

**Tau-Lepton: 3 x 10<sup>-13</sup> s** 

Photon: ∞

**Z-Boson:** 3 x 10<sup>-25</sup> s

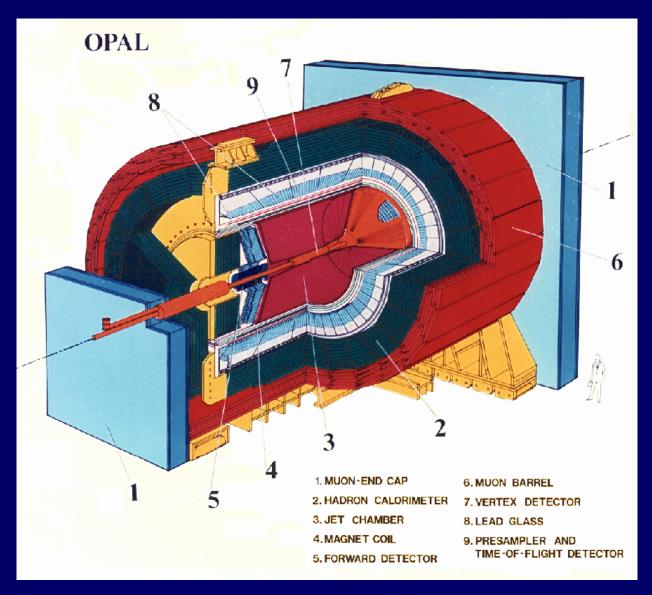
Proton: ∞ Neutron: 15 min Geladenes Pion: 2 x 10<sup>-8</sup>

Kaon: 1 x 10<sup>-8</sup>

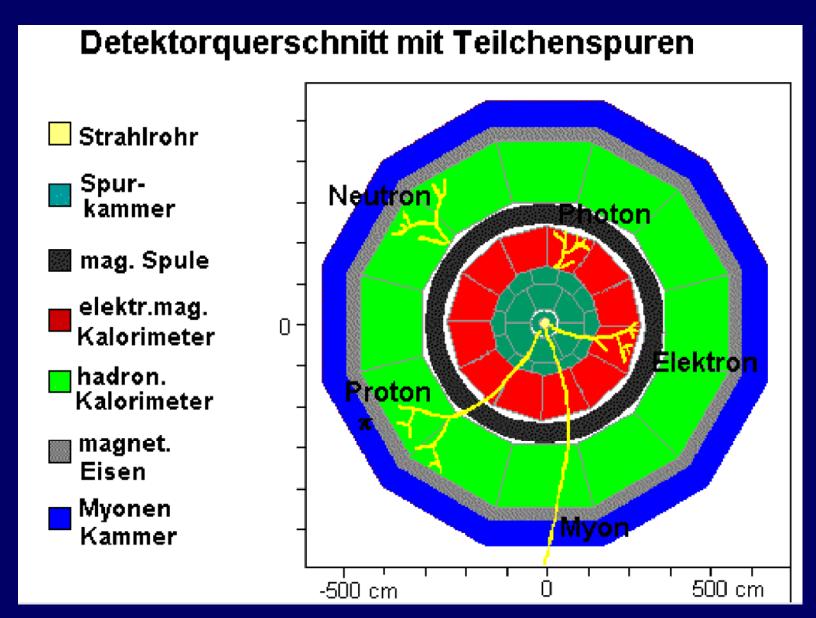
Nur die rosa Teilchen und ihre Antiteilchen lassen sich direkt in einem Detektor nachweisen

Auf die Existenz aller anderen muss man indirekt aus ihren Zerfallsprodukten schließen!

### Riesenkameras: die Detektoren



### Riesenkameras: die Detektoren

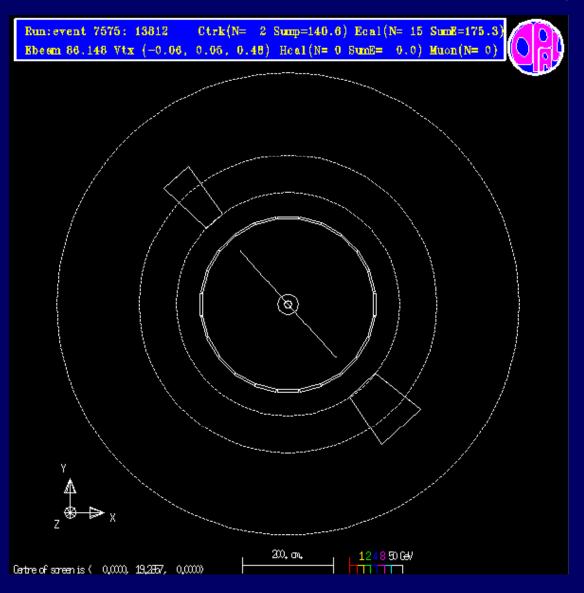


# Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

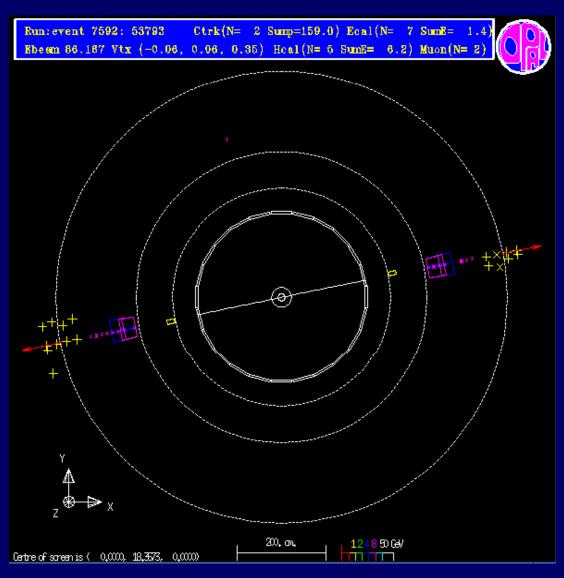
- 1. Was wir schon wissen
- 2. Große Fragen
- 3. Wie kann man Teilchen überhaupt "sehen"
- 4. Ein Beispiel: Das Z-Teilchen und der LEP-Beschleuniger
- 5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

### **Z-Zerfälle**

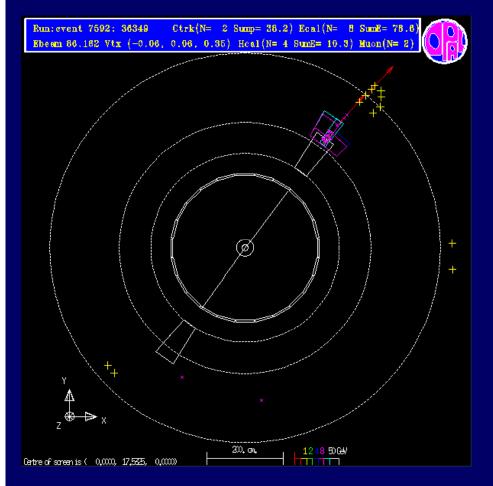
$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow e^+e^-$$

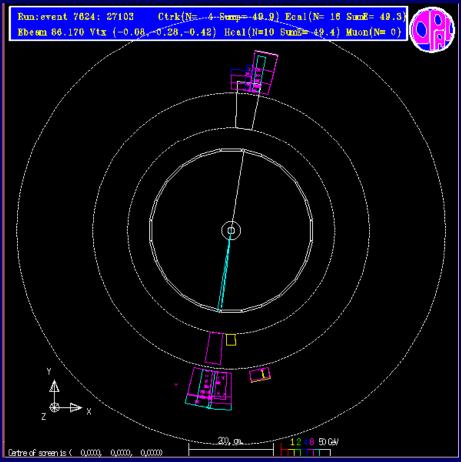


$$e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$$

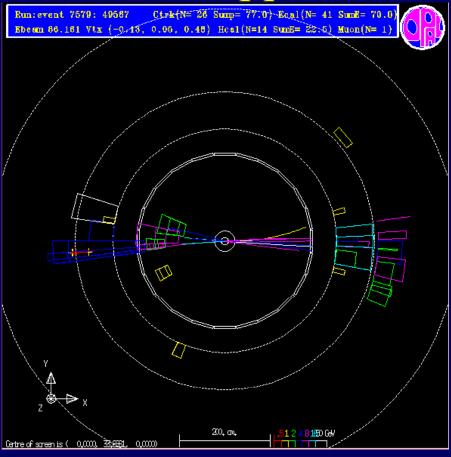


## $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \tau^+\tau^-$



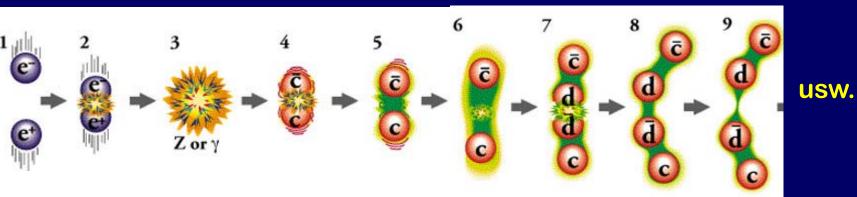


# $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow qq \rightarrow Jets$



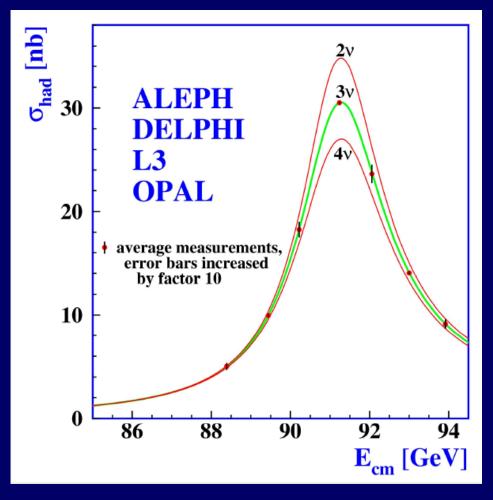
Quarks kann man nicht einzeln beobachten

Erkennungsmerkmal von Quarks sind Teilchenbündel (Jets)

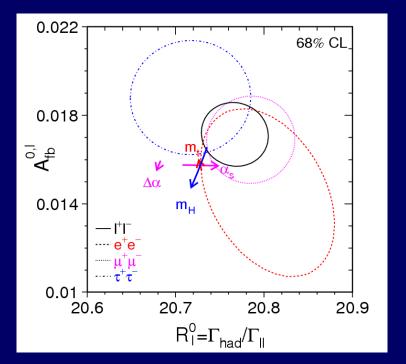


### Was kann man daraus lernen?

Z's zählen für verschiedene Strahlenergien → Anzahl der Neutrinofamilien:



Z-Zerfälle in Elektron, Müonen und Taus zählen → "Lepton-Universalität" (alle Leptonarten verhalten sich gleich, bis auf Masse)

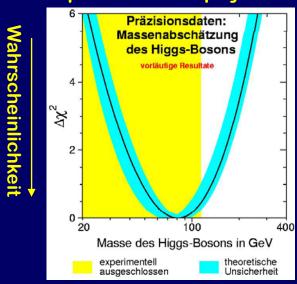


### Ein Schritt weiter: Präzisionsmessungen

#### **Beispiel: Astronomie**



#### Beispiel: Teilchenphysik



Masse des Higgs-Bosons

#### 1846:

Beobachtung: kleine Abweichung der Bahn des Uranus von den Keplerschen Gesetzen Interpretation: ein zusätzlicher Planet (damals unentdeckt) kann die Abweichungen erklären

**Kurz darauf: Neptun wurde entdeckt** 

#### 2000:

Die LEP Messungen lassen sich im Standardmodell nur erklären, wenn das Higgs-Boson leichter als ~200 GeV ist

Spanndend für LHC!

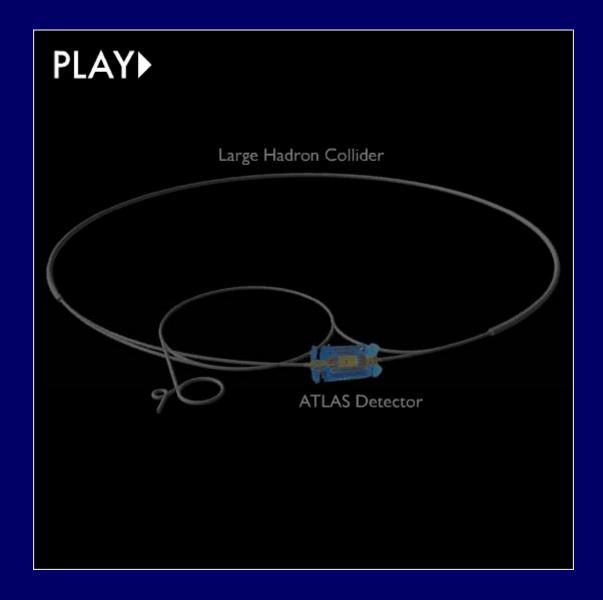
# Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

- 1. Was wir schon wissen
- 2. Große Fragen
- 3. Wie kann man Teilchen überhaupt "sehen"
- 4. Ein Beispiel: Das Z-Teilchen und der LEP-Beschleuniger
- 5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

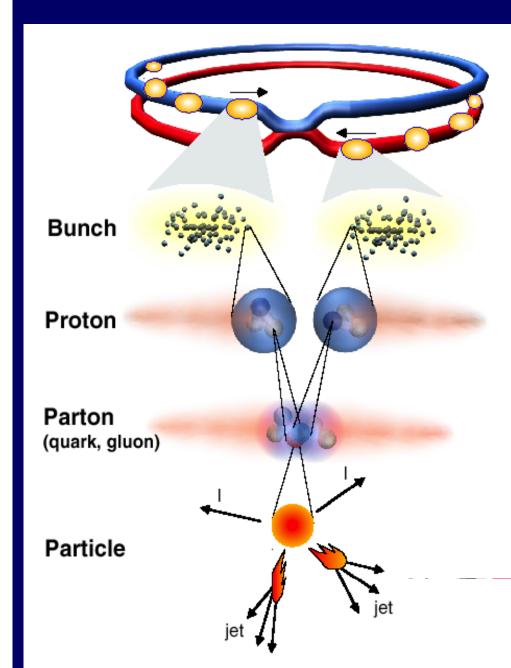




# **Beispiel: LEP**



## Proton-Proton-Kollisionen am LHC bei 14 TeV



Proton-Proton-Kollisionen 2835 Teilchenbündel (Bunch)

10<sup>11</sup> Protonen / Bunch Kollisionsrate 40 MHz (25 ns)

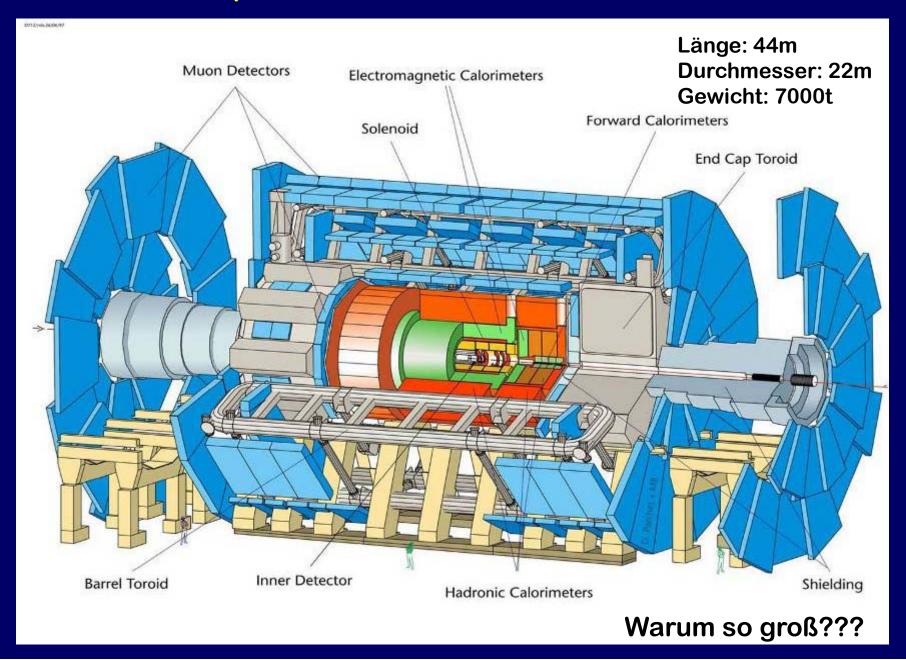
Schwerpunktsenergie 14 TeV (= 7400 x Ruheenergie der kollidierenden Teilchen)

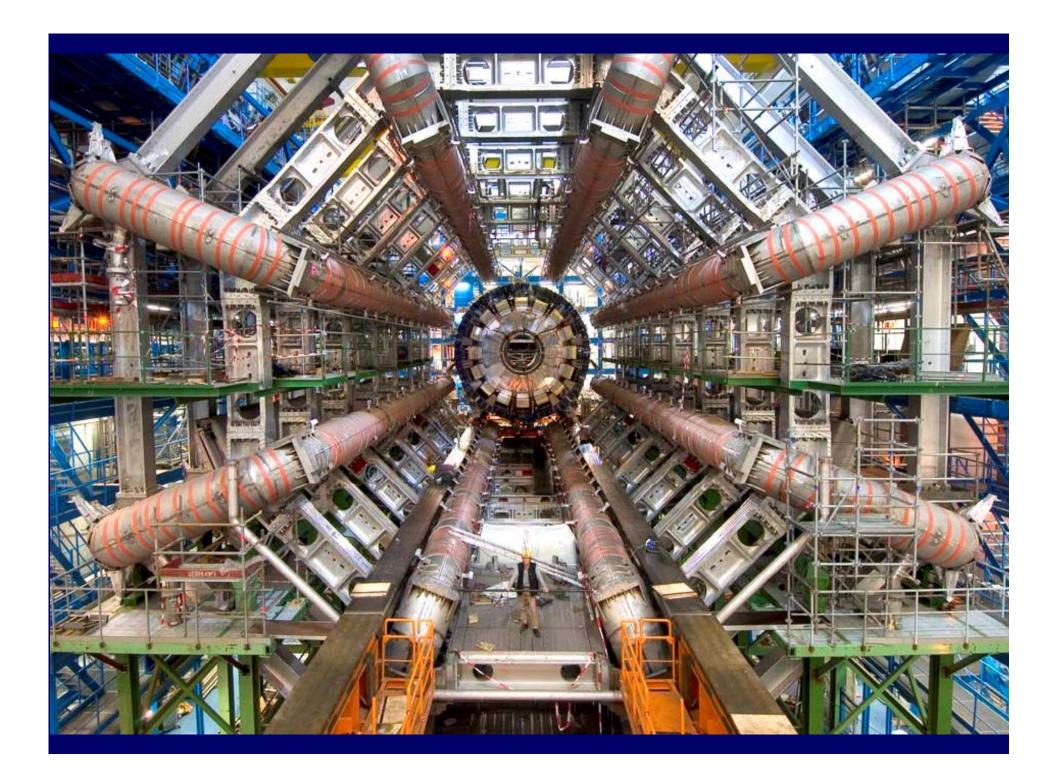
Schwerpunktsenergie der kollidierenden Quarks und Gluonen bis einige TeV

~25 pp-Kollisionen pro Bunch-Kollision

Interessante Ereignisse: 10<sup>-9</sup> – 10<sup>-11</sup> unterdrückt!

## Das ATLAS-Experiment: die Kollisionen sichtbar machen



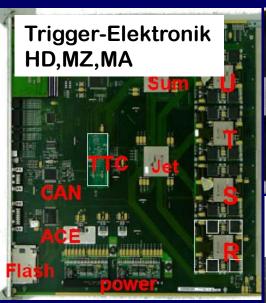


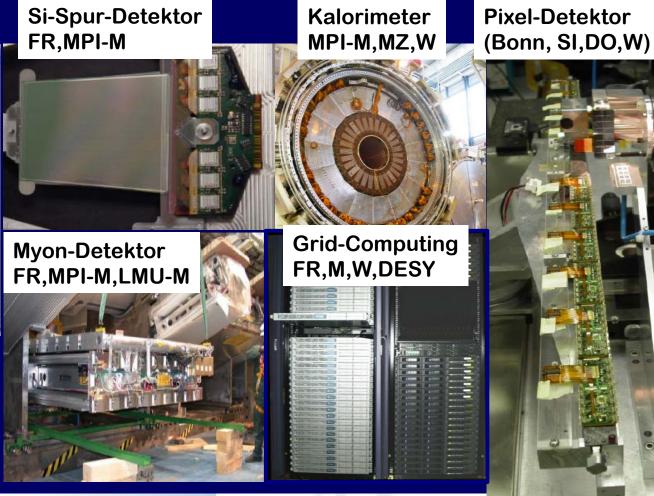
## **Das ATLAS-Experiment: Teamwork!**



## Nicht nur groß, sondern vorallem komplex!

Beispiele für in Deutschland gebaute Komponenten:





BMBF-Forschungsschwerpunkt ATLAS Experiment

ATLAS

Physics on the TeV-scale at the Large Hadron Collider

#### **Eine Datenflut**

Kollision zweier Teilchenpakete alle 25 ns

Kollision mit Erzeugung von SUSY-Teilchen: 1/Minute – 1/Stunde!

Nur eine aus 10<sup>9</sup> - 10<sup>11</sup> Kollisionen ist SUSY

Benötigt schnellste 'Online'-Selektion von Ereignissen: Trigger-System



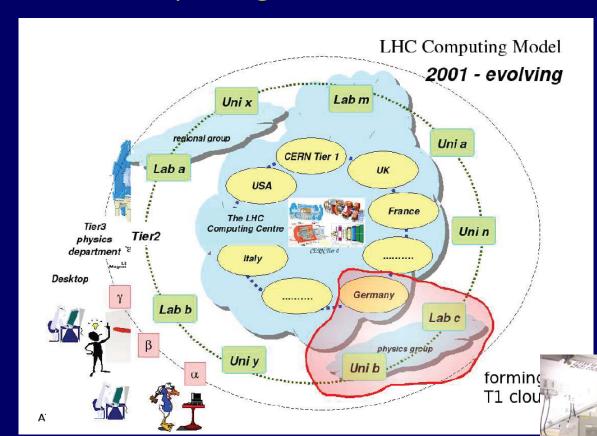
Getriggerte Ereignisse müssen mit 200 Hz auf Datenträger geschrieben werden (= 3 CD-ROMs pro Sekunde)

2.5 PetaByte pro Jahr + gleiche Menge simulierter Ereignisse ~2000 Physiker weltweit wollen zugreifen

**⇒** weltverteiltes System

⇒ 'Standard'-Hardware (PC's)

## **Grid-Computing**



deutsches Tier-1-Zentrum GridKa am FZK Karlsruhe

**Grid-Gedanke:**"Computing aus der Steckdose"

Implementierung: weitaus komplexer

#### Was können wir vom LHC und ATLAS erwarten?

Neuer Energiebereich → wir wissen nicht, was passieren wird! Benötigt Offenheit für unerwartete Phänomene

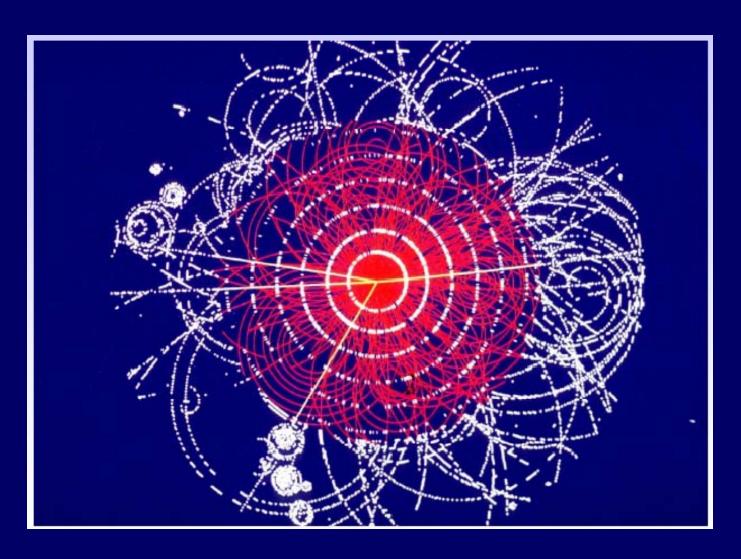
Gerade das macht es so spannend...

Trotzdem ein paar Beispiele:

- Higgs-Entdeckung
- Supersymmetrische Teilchen
- Neue Raumdimensionen ?!

## **Higgs-Entdeckung am LHC**

# Simulierte Kollision, in der ein Higgs-Teilchen entsteht

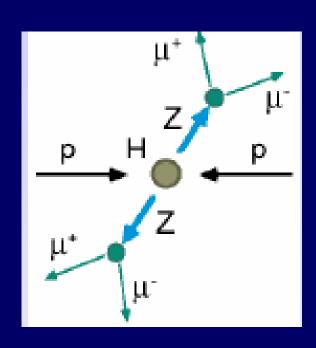


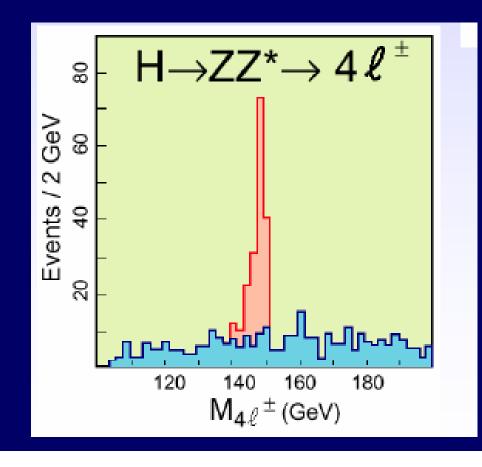
Nur 1 Higgs pro 10 000 000 000 000 Protonkollisionen

## **Higgs-Entdeckung am LHC**

Woran kann man ein Hiss-Boson erkennen z.B. Higgs →Z + Z→ Müon+Antimüon+Müon+Antimüon

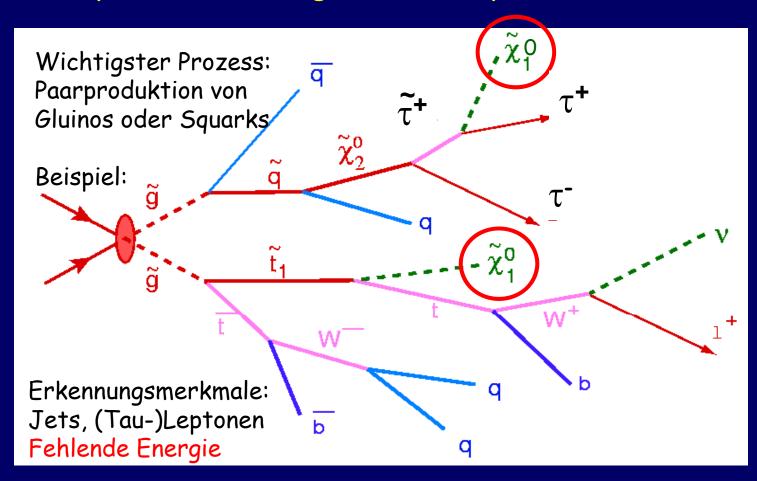
Aus der Messung der Energien/Impulse der 4 Müonen kann man die Masse der zerfallenen Teilchens berechnen



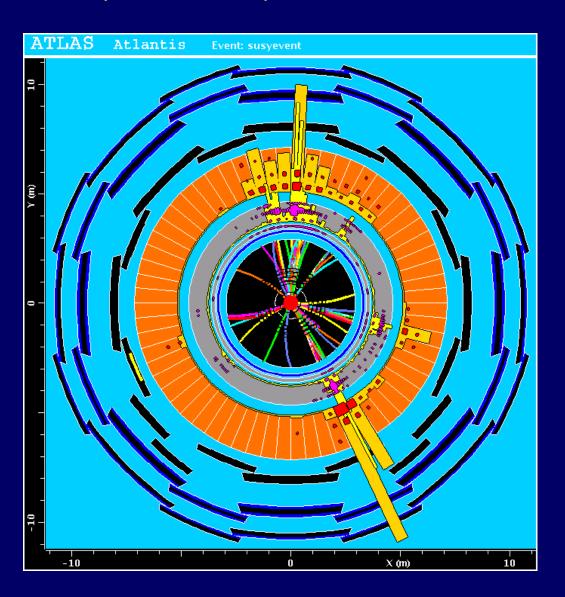


## Supersymmetrische Teilchen

- kein "Einschalten und glücklich sein"
- Untergründe verstehen
- Daten sammeln
- Komplexe Auswertungen Ein Beispiel: Suche nach SUSY

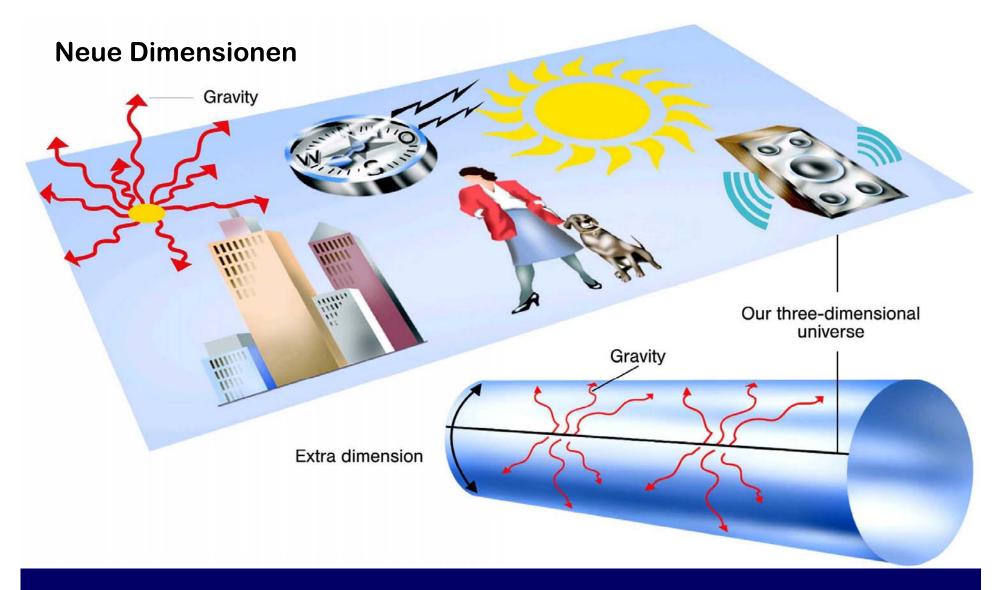


## Eine (simulierte) Kollision am LHC mit SUSY-Teilchen



mit dem Auge nicht von "normalen Prozessen" (Untergrund) zu unterscheiden

- ⇒ Entwicklung von Algorithmen zur Unterscheidung...
- ⇒ Simulationen zeigen, dass wir "Standard-SUSY" am LHC entdecken können, wenn die SUSY-Teilchen nicht schwerer als ~ 2-3 TeV sind. Aber gilt das für alle Szenarien??



Auch so etwas könnte am LHC entdeckt werden...

Wann geht's los? Wann gibt es Ergebnisse?

Herbst 2007: Maschine und Experimente fertig

November 2007: Erste Kollisionen (bei niedriger Energie)

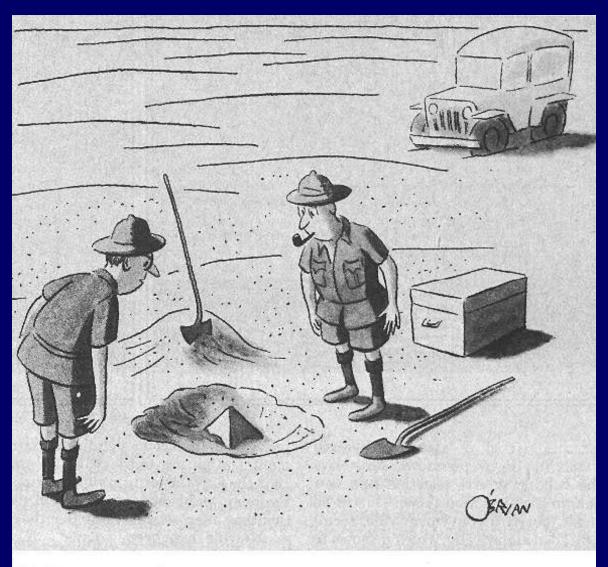
Frühjahr-Sommer 2008: Erste Kollisionen bei 14 TeV

(ab hier Spekulation)

2009-2011: Erste Entdeckungen? Spannende Zeit

Laufzeit 15-20 Jahre

## **Anstatt einer Zusammenfassung**



"This could be the discovery of the century. Depending, of course, on how far down it goes."