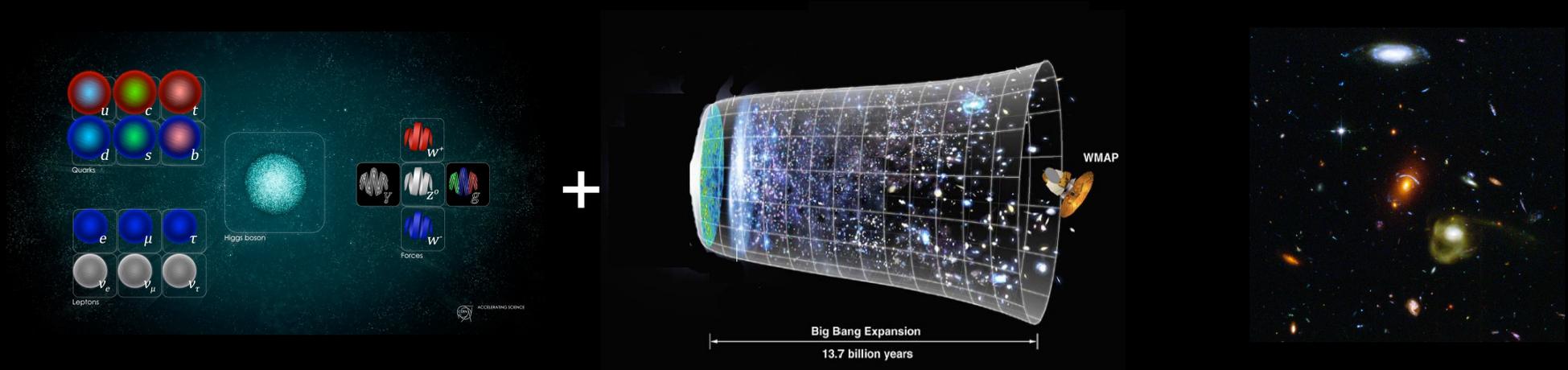


Die Rätsel des 21. Jahrhunderts

Teilchenphysik + Kosmologie = Universum ?



Nein !

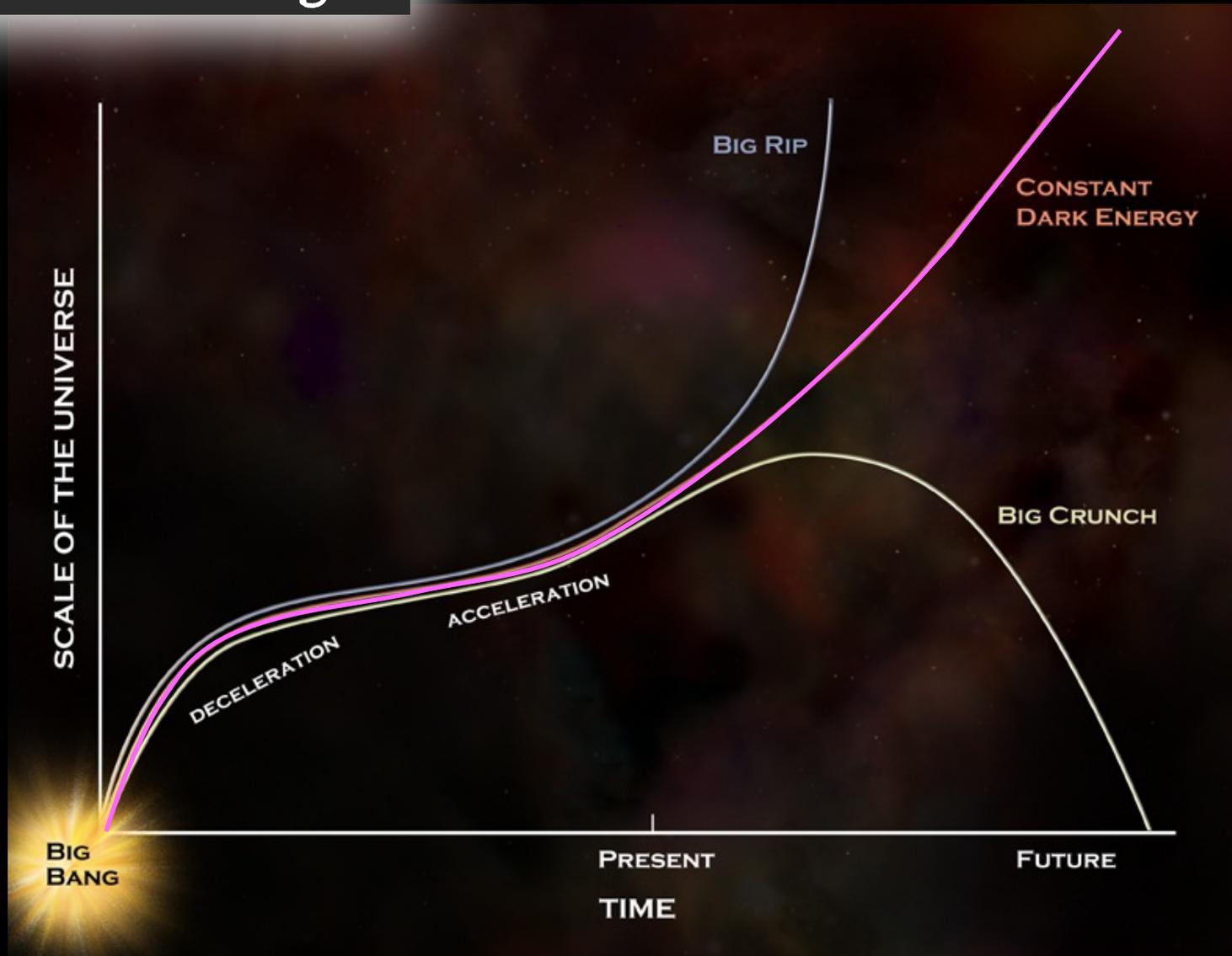
Nur 4% des Energieinhalts unseres Universums sind wirklich verstanden !

Dunkle Materie



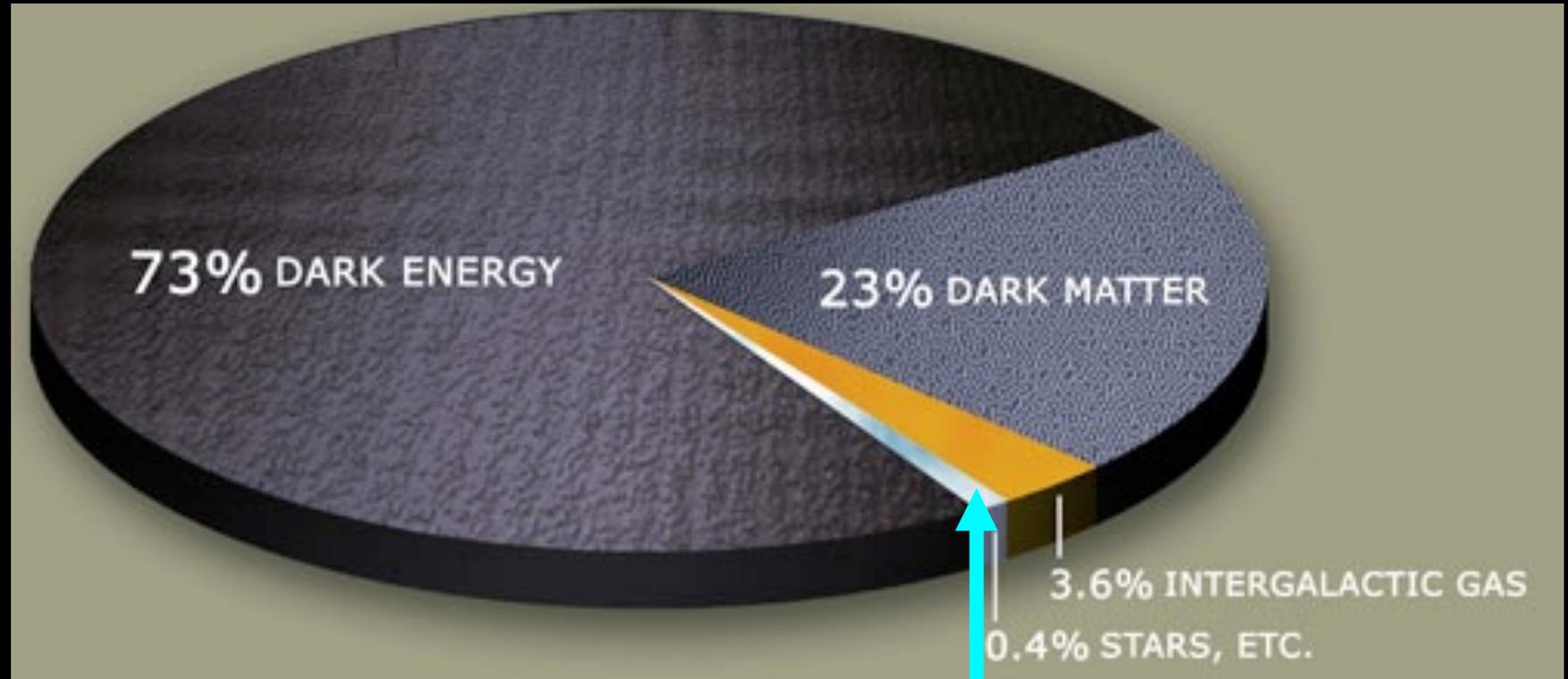
Galaxien rotieren zu schnell

Dunkle Energie



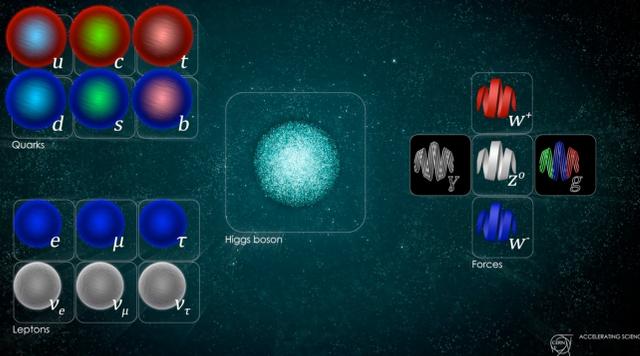
Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich

96 % der Energie des Universums ist "im Dunkeln":
dunkle Energie und dunkle Materie



You are here

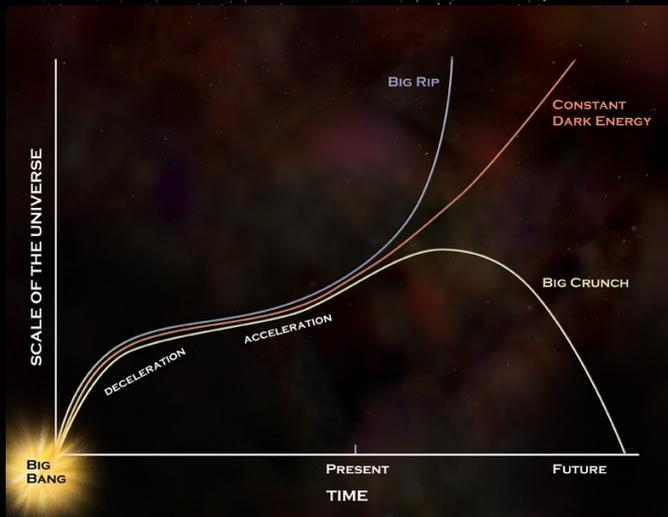
Die grossen Fragen 2012:



Wie kommen Teilchen zu ihrer Masse?



Was ist dunkle Materie?



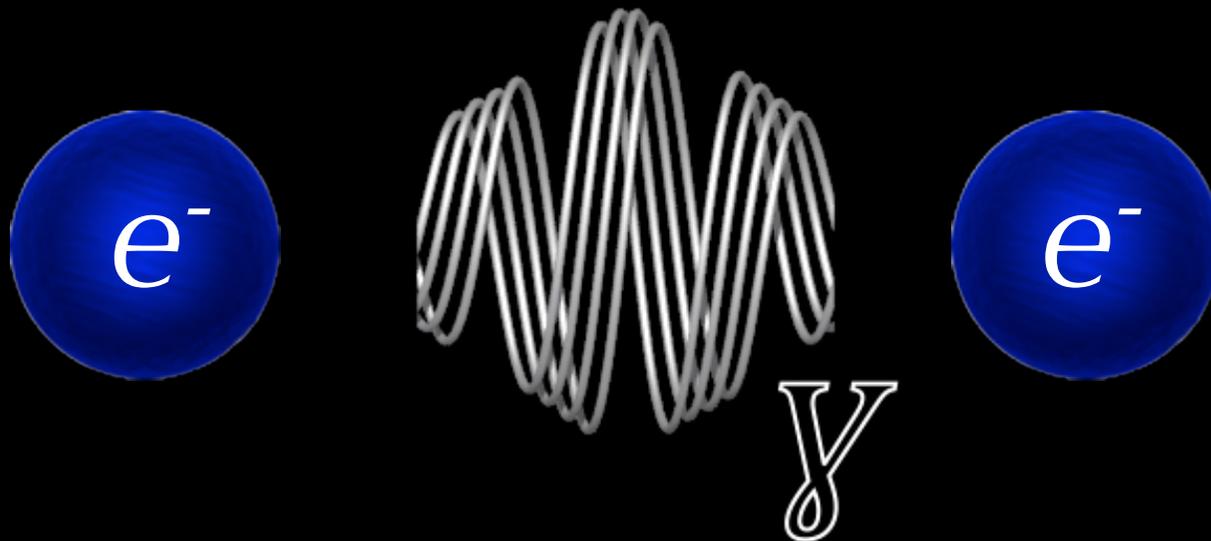
Was ist dunkle Energie?

Reise in die kleinsten Dimensionen



Alle sichtbaren und 'fassbaren' Objekte des Universums bestehen aus drei Teilchen: **Up-Quark, Down-Quark, Elektron.**

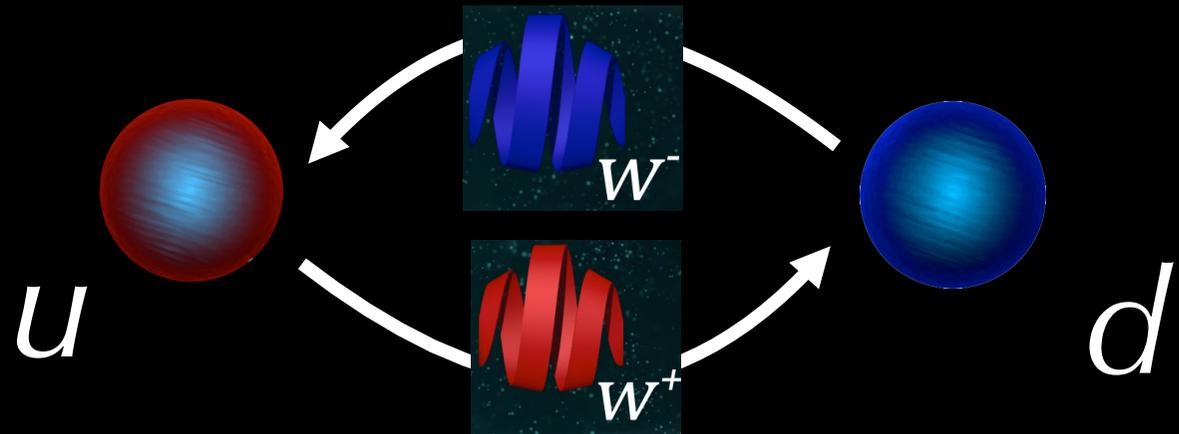
Kräfte werden durch Austauschteilchen übertragen



Elektromagnetische Kraft : **Photon**

Zwei weitere Kräfte mit kurzer Reichweite :

Radioaktiver Zerfall



Schwache Kraft : **W- und Z-Bosonen**

Kernkräfte



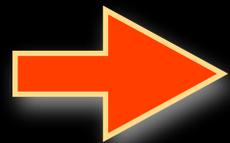
Starke Kraft : **Gluonen**

Woher wissen wir das?

$$E=mc^2$$

Energie kann zu Materie werden

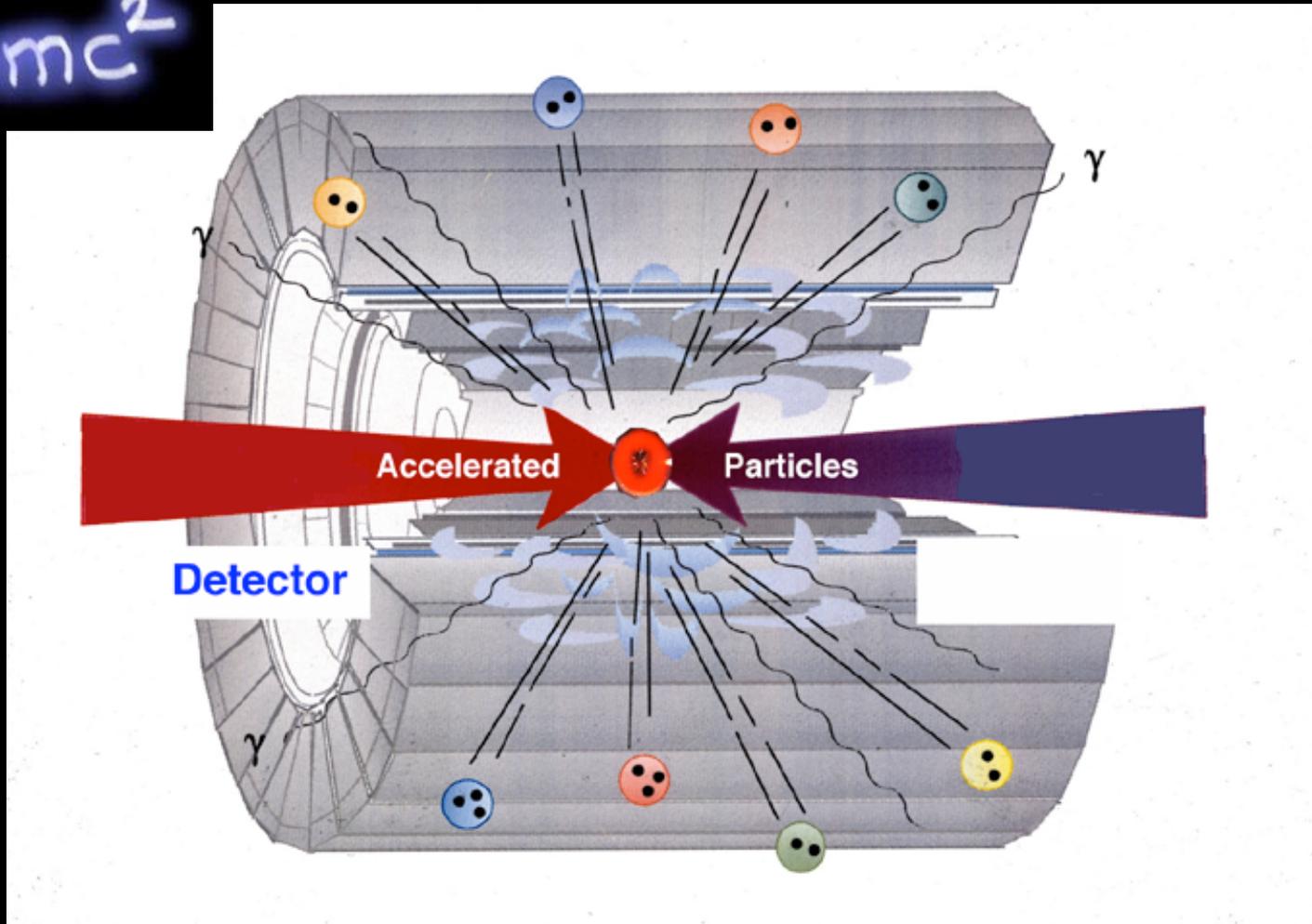
Trick: Erzeugung einer hohen Energiedichte



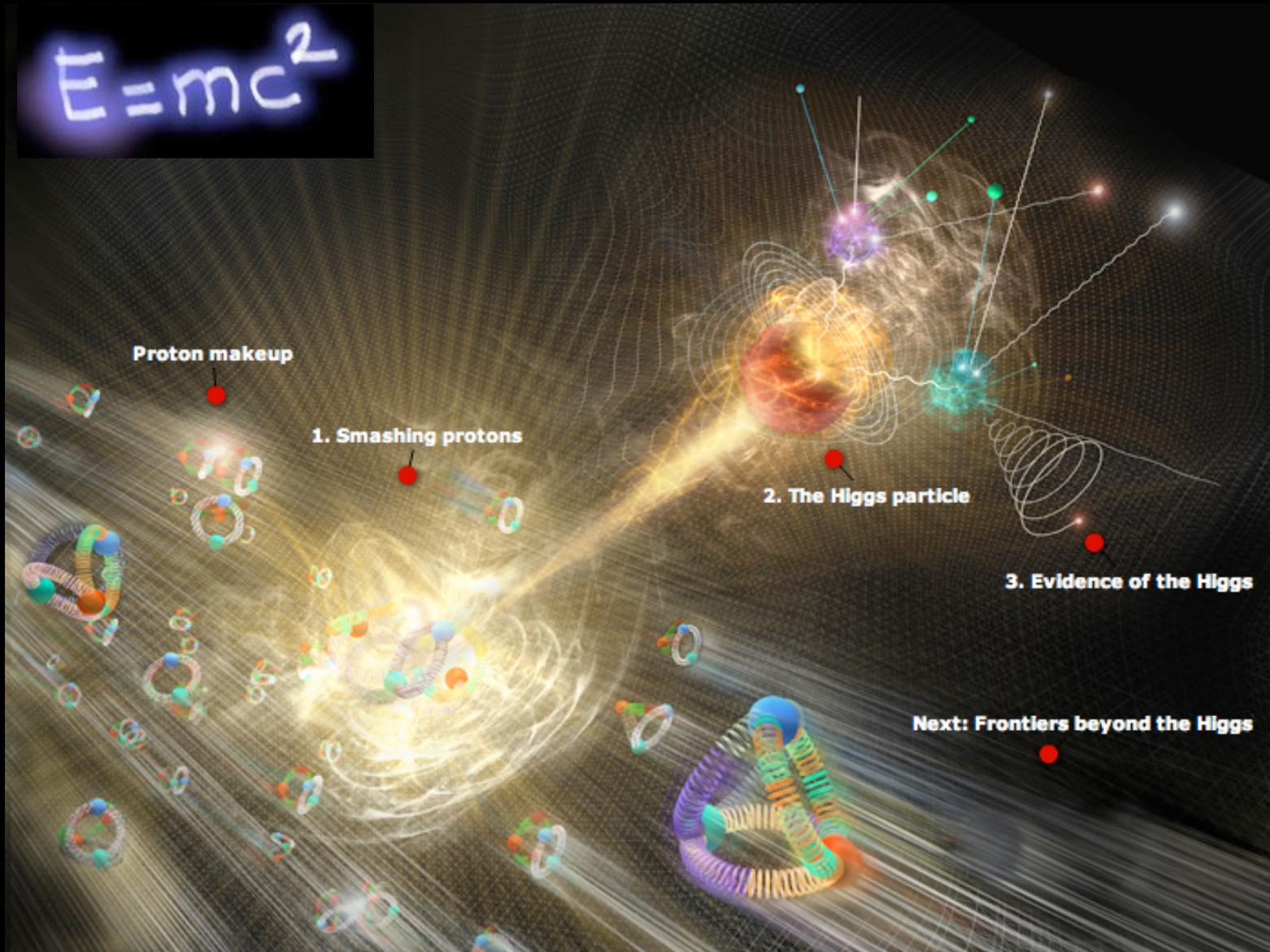
Teilchenkollisionen bei hoher Energie

Energie wird zu Masse

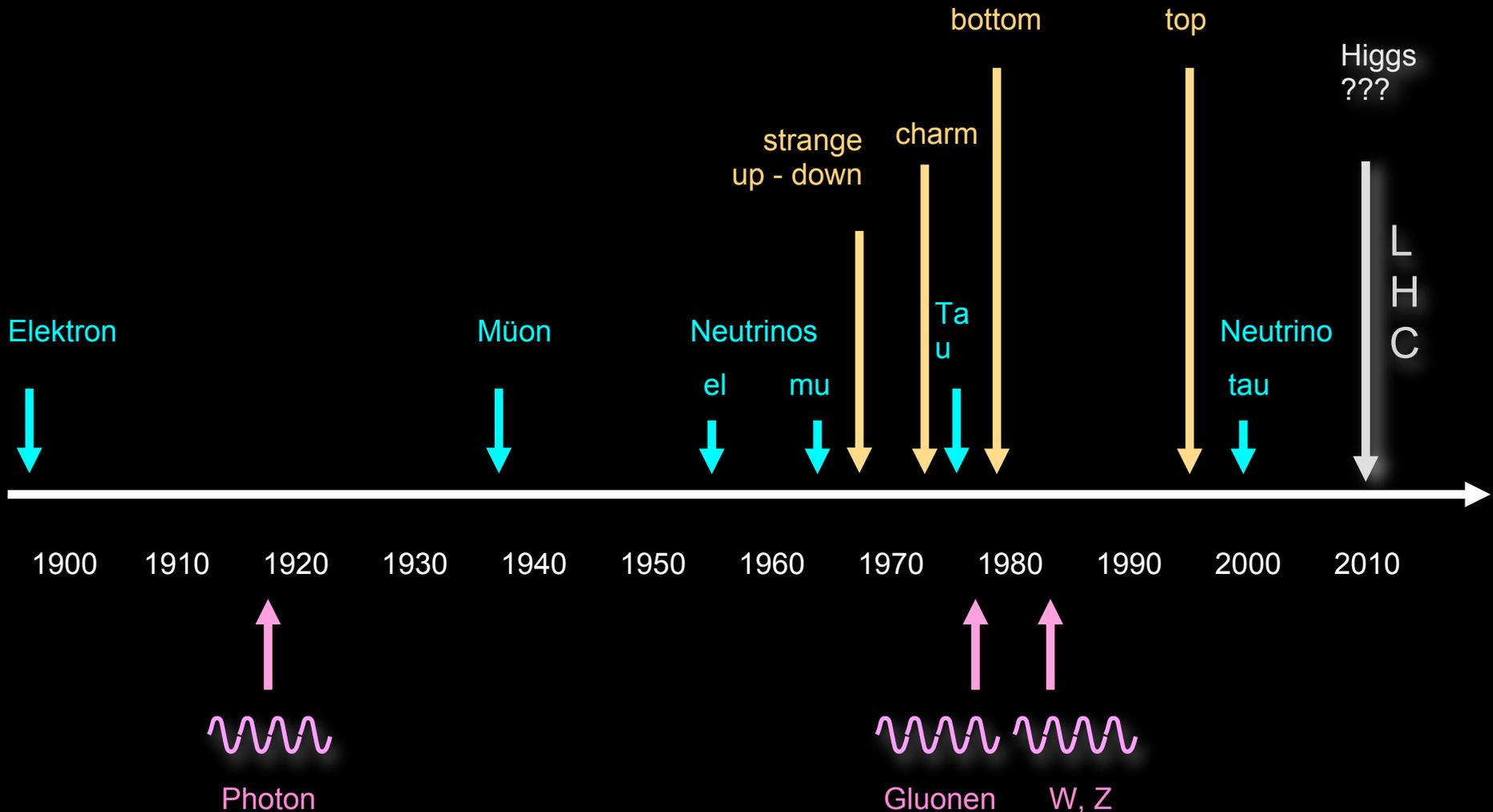
$$E=mc^2$$



In Teilchenkollisionen wird Energie zu neuen Elementarteilchen

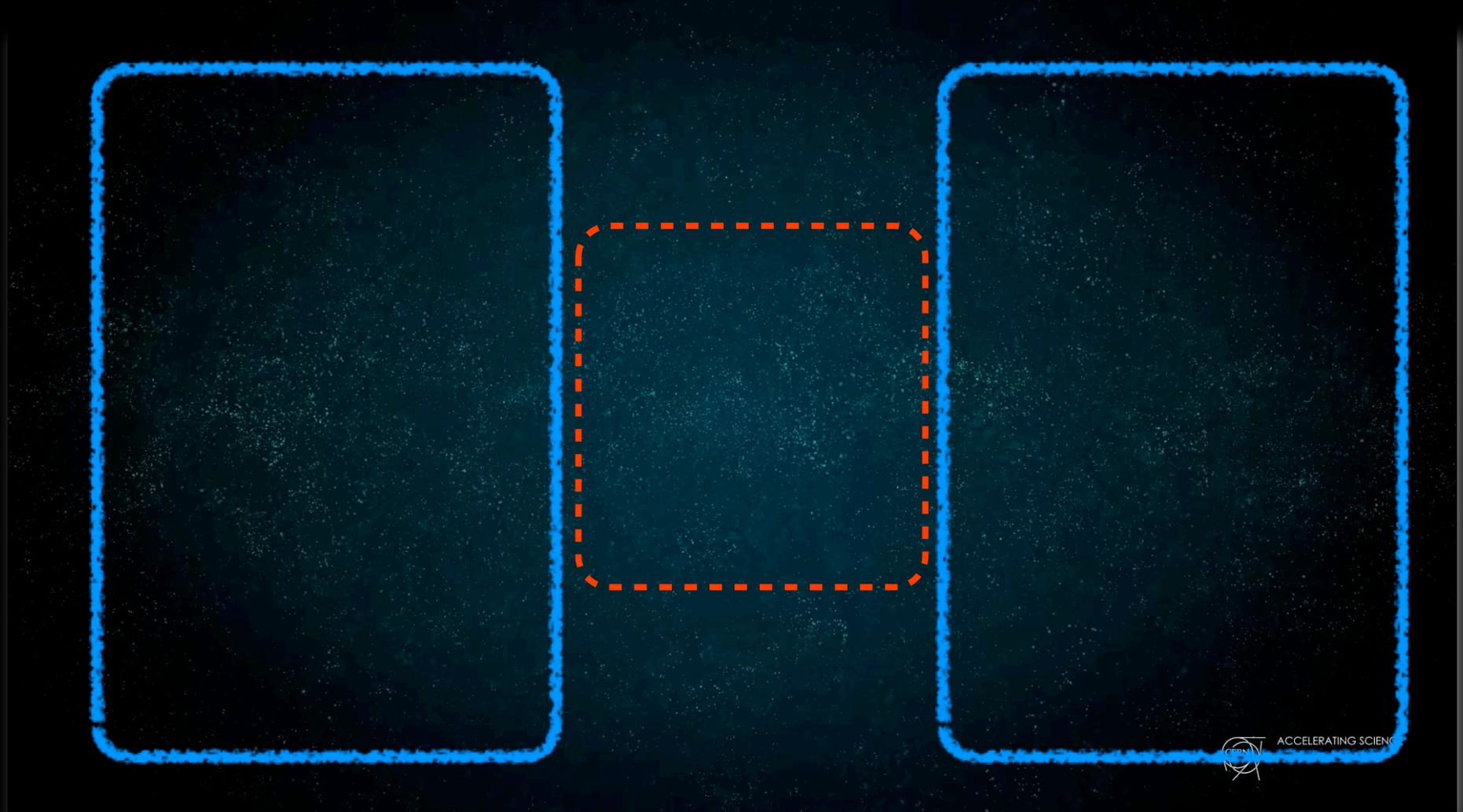


Experimente an Beschleunigern entdeckten alle (?) elementaren Teilchen und Feldquanten



Das "Periodensystem" der Elementarteilchen

"Das Standard-Modell"



Teilchen

Higgs?

Felder

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

1) Wie kommen Teilchen zu ihrer Masse - durch das "Higgs" Feld ?

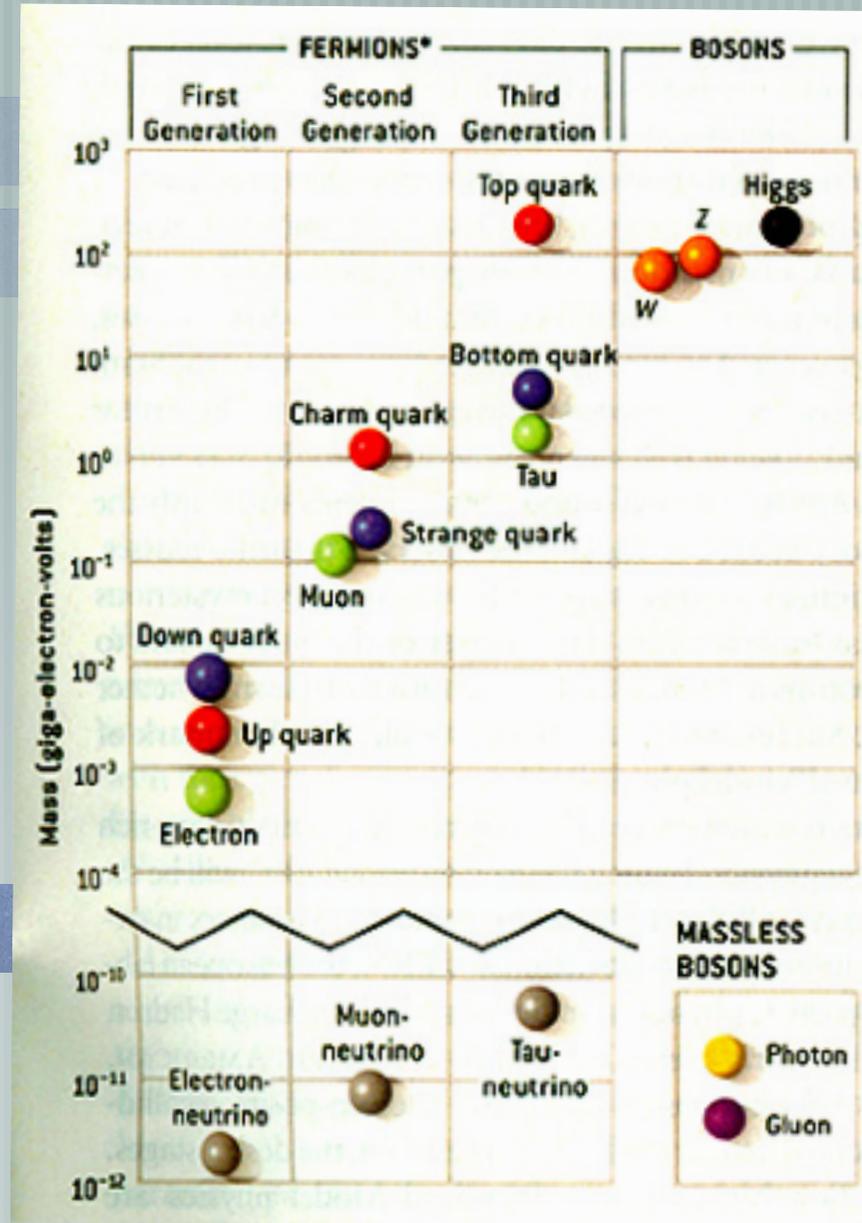
1 TeV →

100 GeV →

1 GeV →

1 MeV →

0.01 eV →

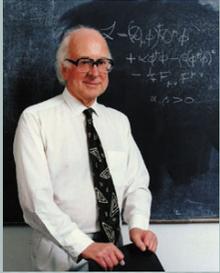


Das Rätsel der Teilchenmasse

Masselose Teilchen - Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit

KEINE SOLIDEN OBJEKTE !

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS



Sir Peter Higgs

Was ist so besonders am Higgs-Feld?

Es füllt das gesamte Universum gleichmässig (seit dem Big Bang)

Es gibt jedem Teilchen (auch den neu entstehenden) seine exakte Masse

Es ist wie eine 'kosmische DNS' (die 'Erbinformation' des Universums)



Eine Party-Gesellschaft ...



.. ein berühmter Gast will den Raum durchqueren...



.. wird aber von den Gästen umringt und kommt nur schwer voran...

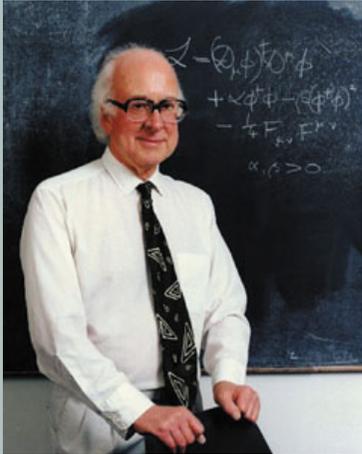
Das Higgs-Feld ...

... ein neues Teilchen wird erzeugt ...

... das Higgs-Feld macht das Teilchen 'schwer' ...

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

Das Higgs-Teilchen



Sir Peter Higgs



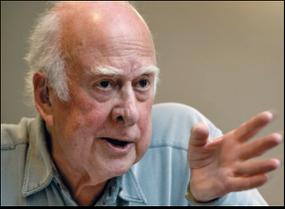
Ein Gerücht wird in die Party-Gesellschaft gerufen ...

Das Higgs-Feld ...



.. alle kommen zusammen und tuscheln über die Nachricht...

... erzeugt seine erste Anregung, das Higgs-Teilchen ...



Das Rätsel der Teilchenmassen?

Lösung: ein Feld im leeren Raum wechselwirkt mit den Teilchen

Sir Peter Higgs

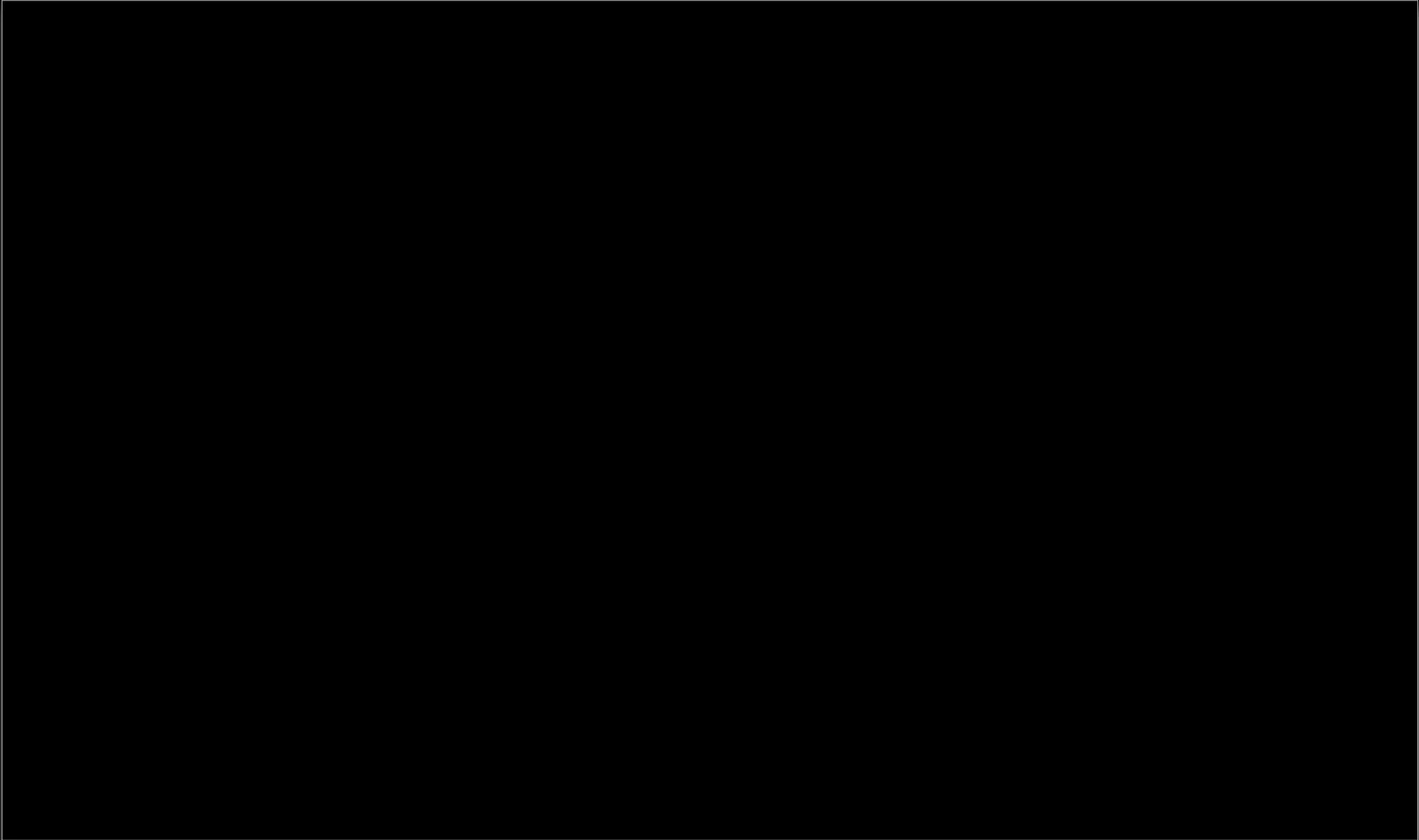


Die Anregung des Feldes ist das “Higgs-Boson”



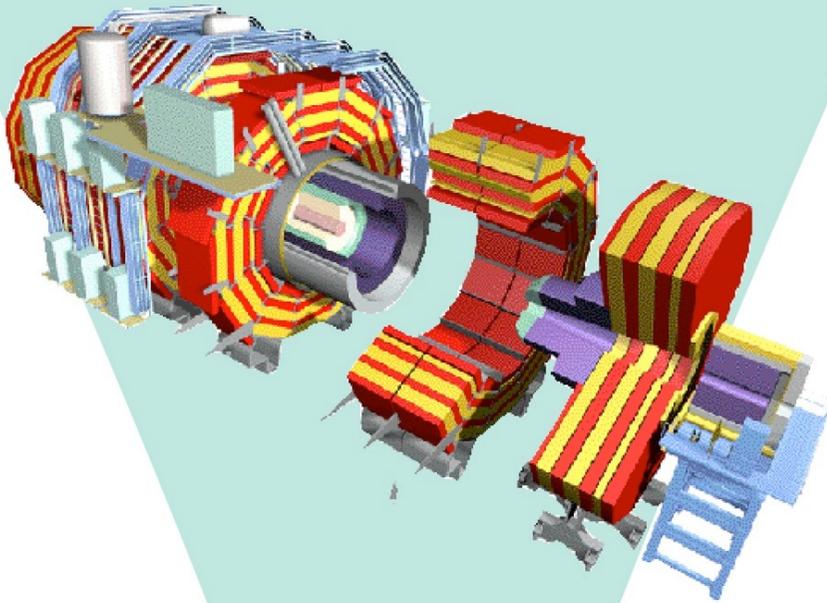
... es wird aber nur einmal in etwa 10,000,000,000 (10^{10}) Kollisionen produziert !

Das Higgs-Boson sollte in 2 Photonen zerfallen



aber nur mit 0.2 % Wahrscheinlichkeit ...

Die LHC-Detektoren messen 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde



40 MHz, 10^9 events/sec, < 1 Peta Byte/sec (equivalent FE)

Level 1 – special hardware

75 KHz

level 2 – embedded processors

5KHz

level 3 – PCs, Event Filter

100 Hz, 100 events/sec, 100 Mega Byte/sec

data recording, 10^7 sec/year,
1Peta Byte/year & offline analysis

Rohdaten - Rate:

1,000,000 GB /s

Auswahl:

1 GB /s

Selektion:

1 von 1,000,000 Ereignissen

1 Jahr Daten ~ 100 Peta-Byte

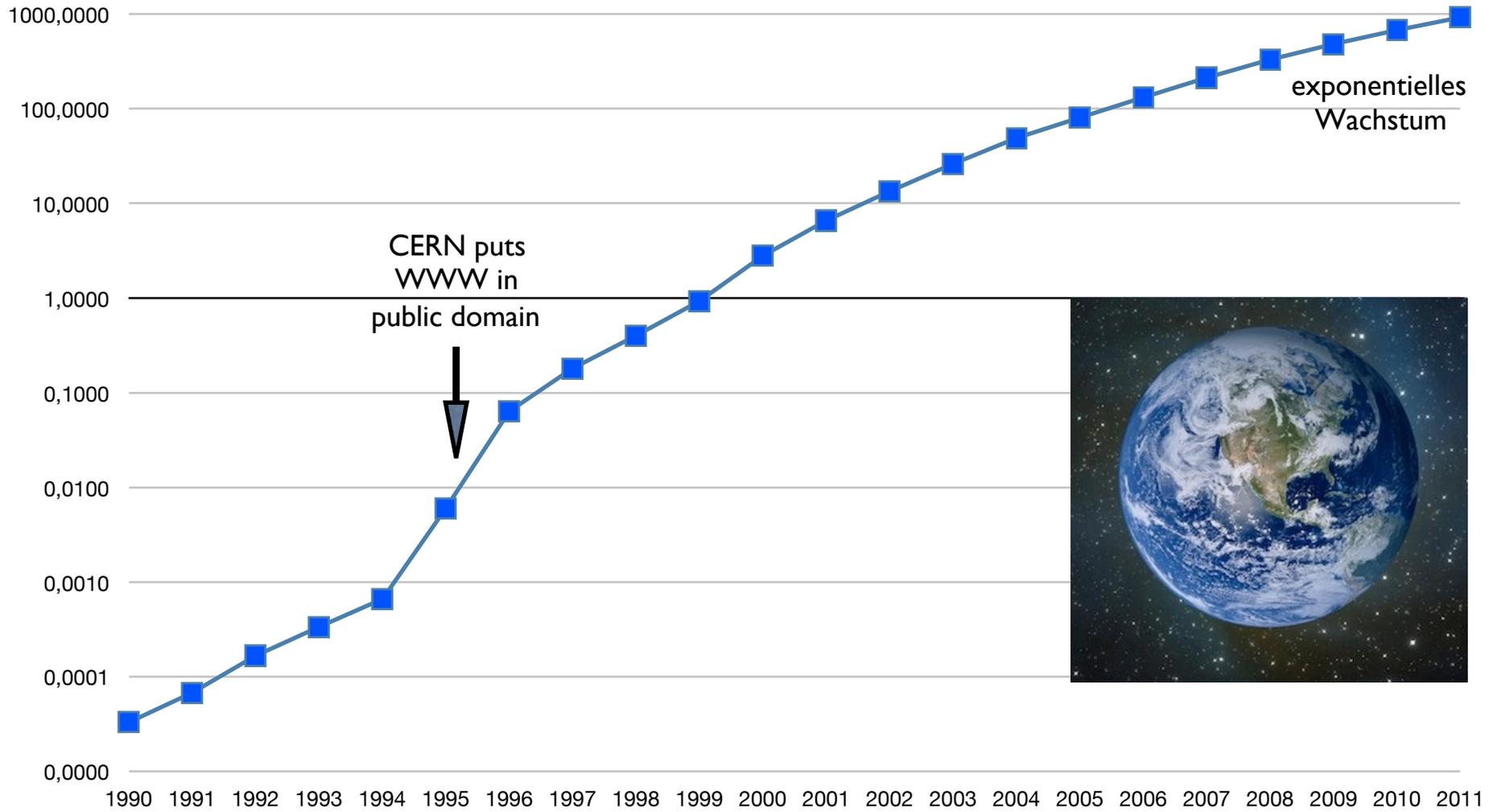
Internet Datenverkehr (Welt)

1990-2011

LHC Raw
Data Rate



■ PB/day



Logarithmische
Skala

Jahr

Source: Cisco

Analyse der Daten im planetaren LHC- Computer - GRID



350,000 CPUs world-wide



Data GRID:
distributed data storage with
high-speed 100 Gb/s data transfer

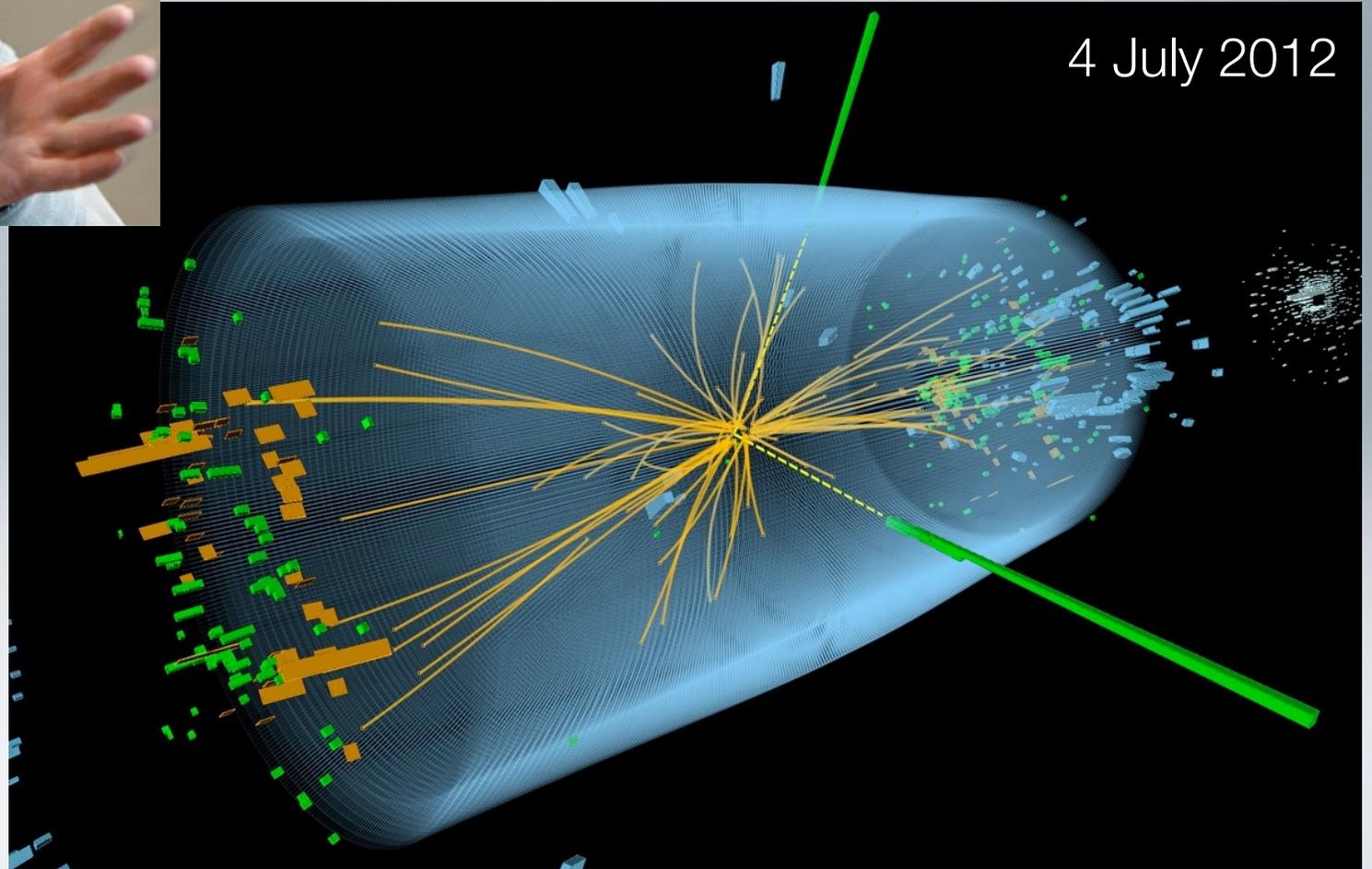


Ist das neuentdeckte Teilchen...

das Higgs Boson?

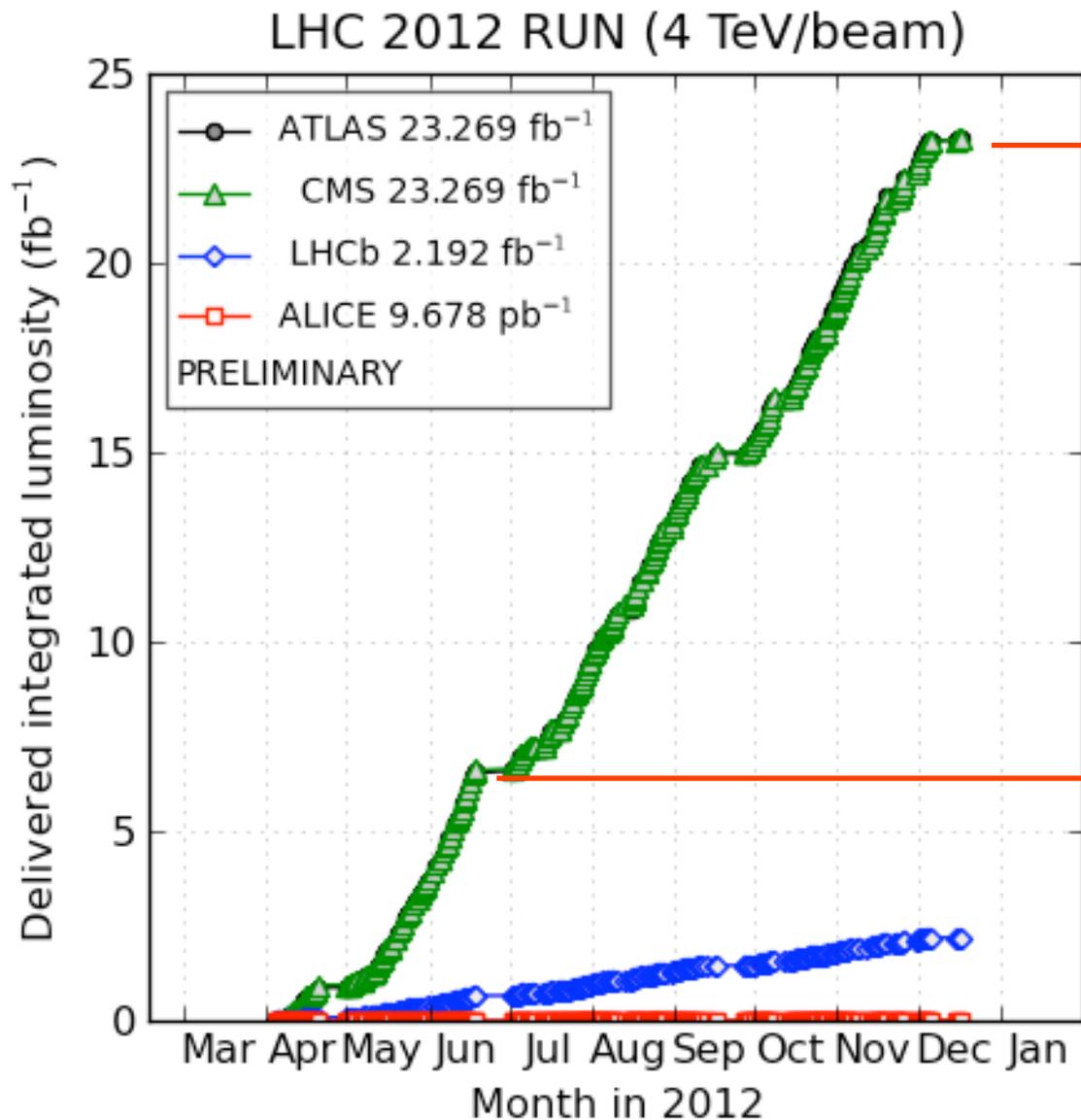


Peter Higgs sagte
dieses Teilchen im
Jahr 1964 vorher



2011 - 2012 : LHC läuft auf Hochtouren

Higgs: 1 aus 10,000,000,000 (10^{10}) Kollisionen

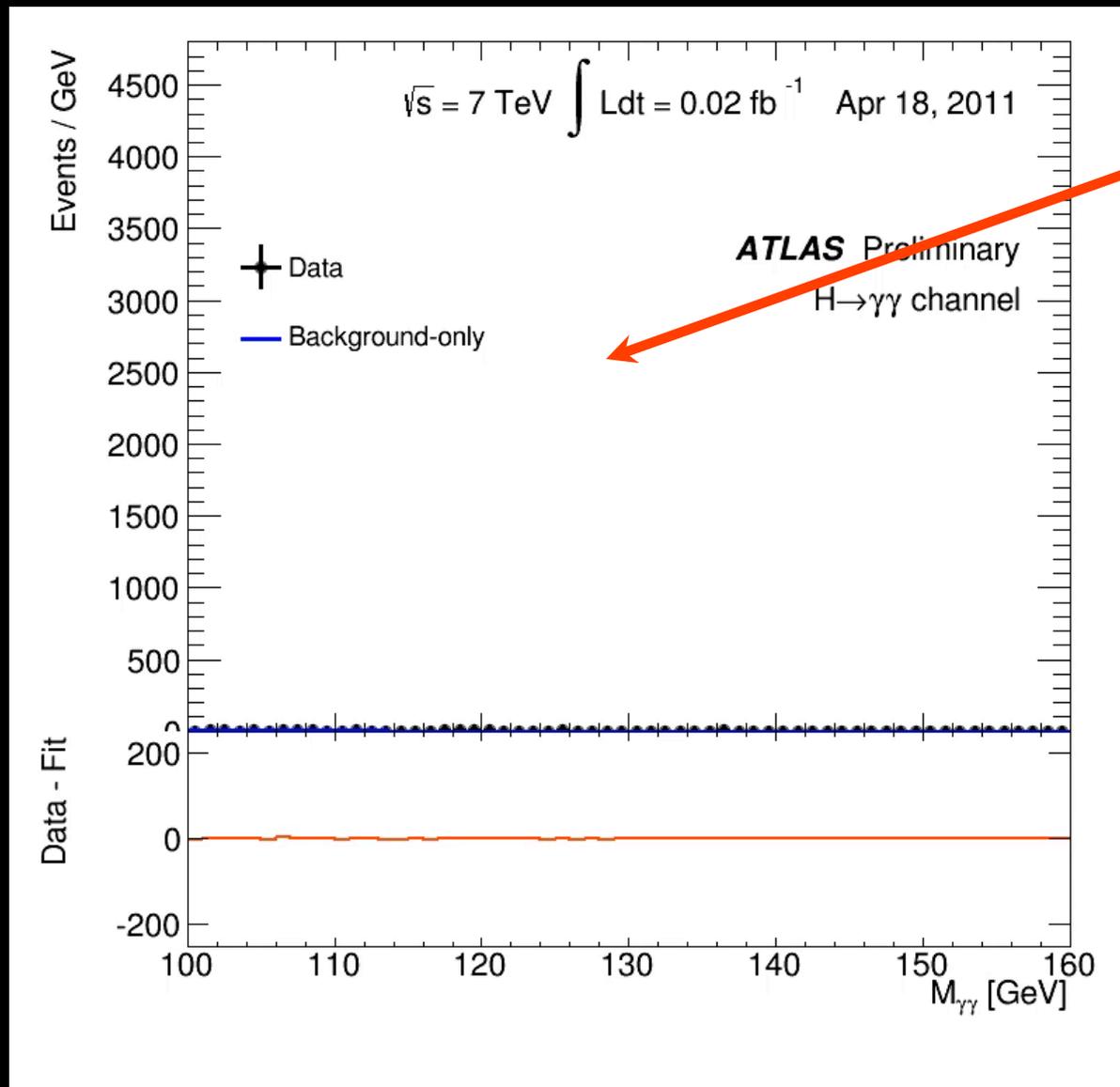


15.12.2012

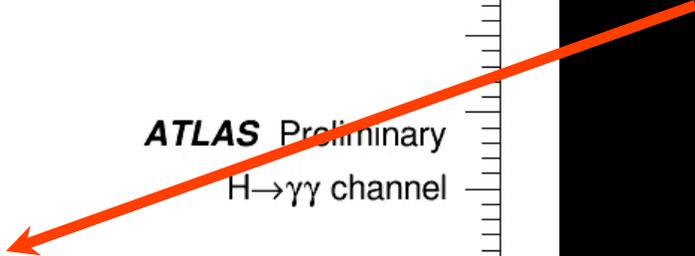
$3,000,000,000,000,000$ ($3 \cdot 10^{15}$)
(3000 Billionen Ereignisse !)

4.7.2012

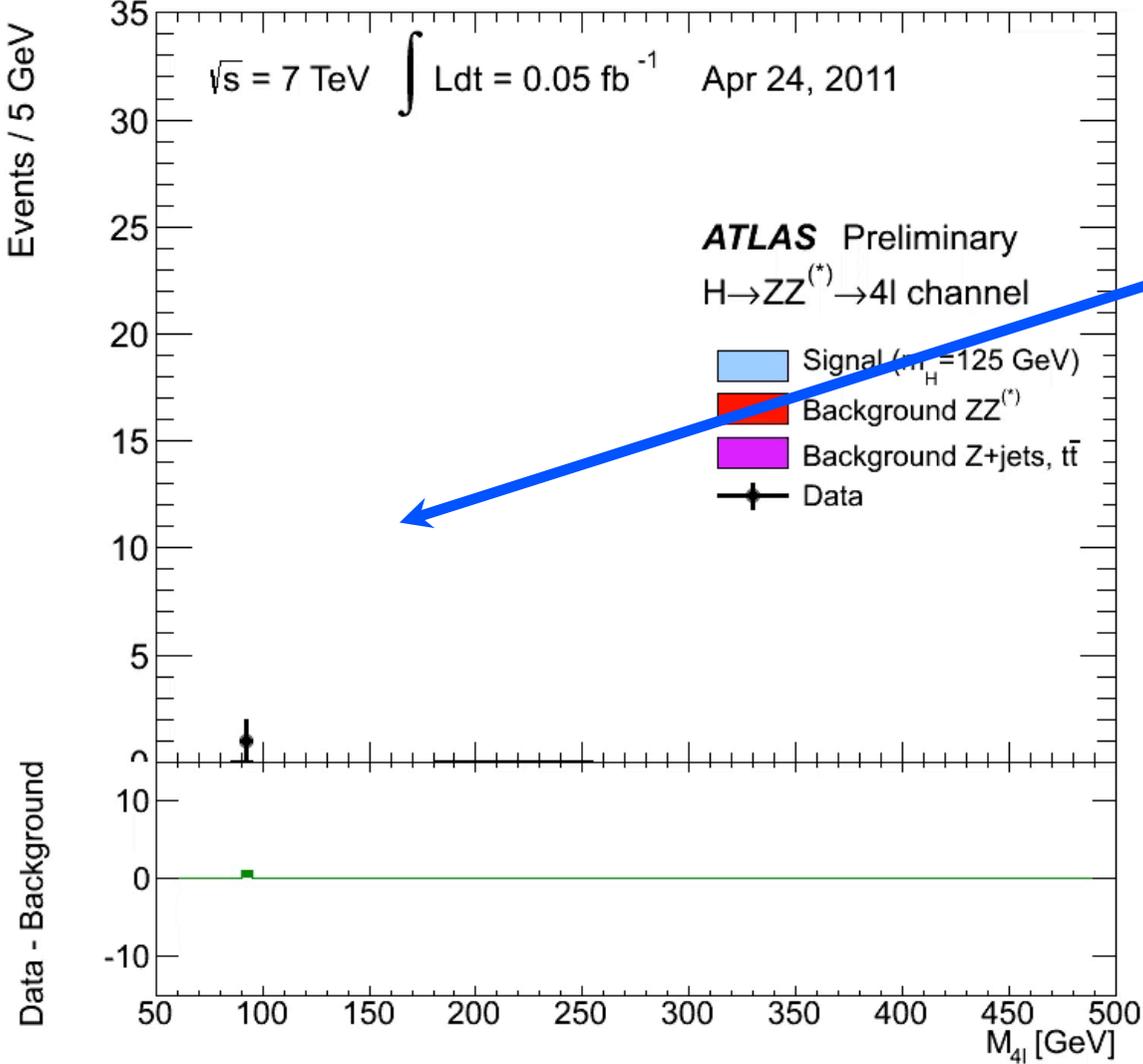
Entwicklung des Histogramms für Ereignisse mit zwei Photonen



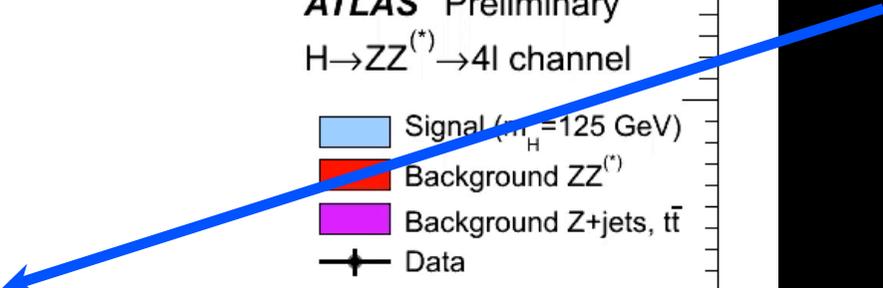
Higgs-Boson



Entwicklung des Histogramms für Ereignisse mit vier Leptonen (aus Z^0 Zerfall)



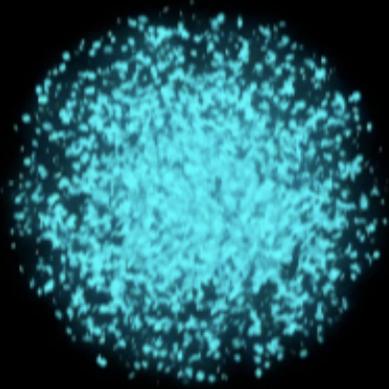
Higgs-Boson



Update 14.3.2013: CERN Press Release

Neue Daten bekräftigen: neuentdecktes Teilchen = Higgs-Boson

Higgs-Boson-Zerfall



$\gamma\gamma$



$Z^0 - Z^0$



Tau- Antitau



Bottom - Antibottom

Vorhersagen der Theorie sind konsistent mit den Messungen

Was bedeutet das ?

Wir wissen jetzt

- das Higgs-Boson existiert
- das Higgs-Feld existiert
- wie Teilchen zu ihrer Masse kommen
- das Standard-Modell ist komplett
- der "leere" Raum ist nicht "leer"
- ein erster Einblick in die 'dunkle Energie'?



Und mehr:

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

2) Supersymmetrie zwischen Teilchen und Feldern ?

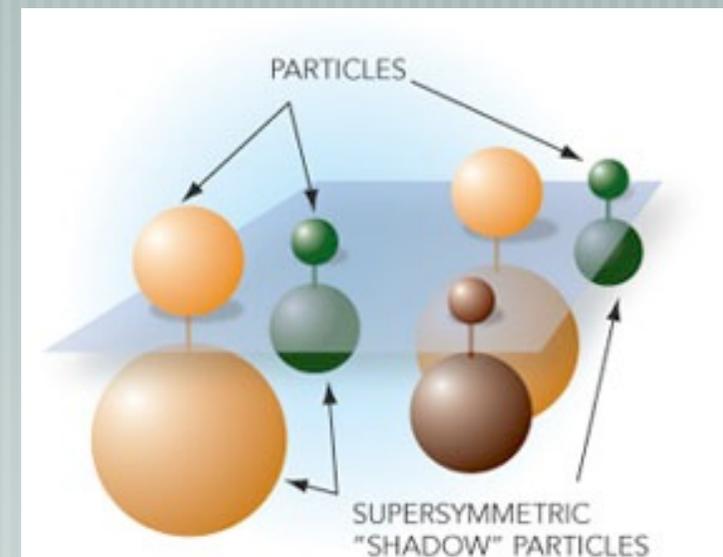
'Materie'-Teilchen (Spin $1/2$ = Fermion) wechselwirken miteinander durch den Austausch von 'Feld'-Teilchen (Spin 1 = Boson).

Alle Teilchen (Elektronen, Neutrinos, Quarks) wechselwirken durch W/Z Feldteilchen
Teilchen mit elektrischer Ladung (e.g. Elektronen, Quarks) wechselwirken durch Photonen
Teilchen mit Farbladung (Quarks) wechselwirken durch Gluonen

Wenn es eine 'Supersymmetrie' zwischen Teilchen und Feldern gibt:

Materie-Teilchen haben einen Feldteilchen-Partner
Feldteilchen haben einen Materie-Teilchen-Partner

Spin $1/2$	Spin 0, Spin 1
electron	selectron (S=0)
quark	squark (S=0)
photino	photon (S=1)
gluino	gluon (S=1)
gaugino (Wino, Zino)	W, Z (S=1)

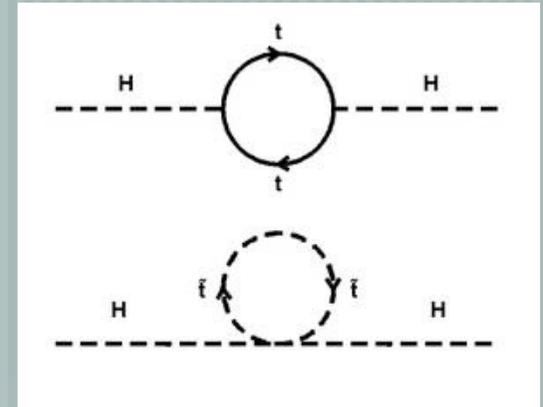


Noch nie wurde ein supersymmetrisches Teilchen beobachtet - falls sie existieren, müssen sie eine grosse Masse ($>0.5-1$ TeV) haben

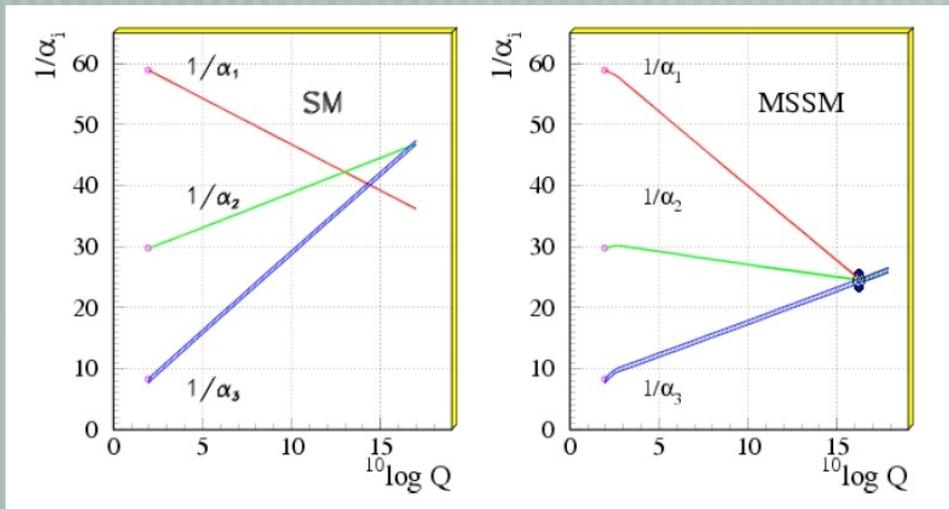
Warum Supersymmetrie?

1) Eine fundamentale Raum-Zeit-Symmetrie

2) 'Schutz' des (skalaren) Higgs-Bosons ($M \sim 10^2$ GeV)
vor dem Einfluss von Vakuumschwankungen ($\sim 10^{19}$ GeV)



3) Vereinigung von elektroschwacher und starke WW bei $\sim 10^{17}$ GeV

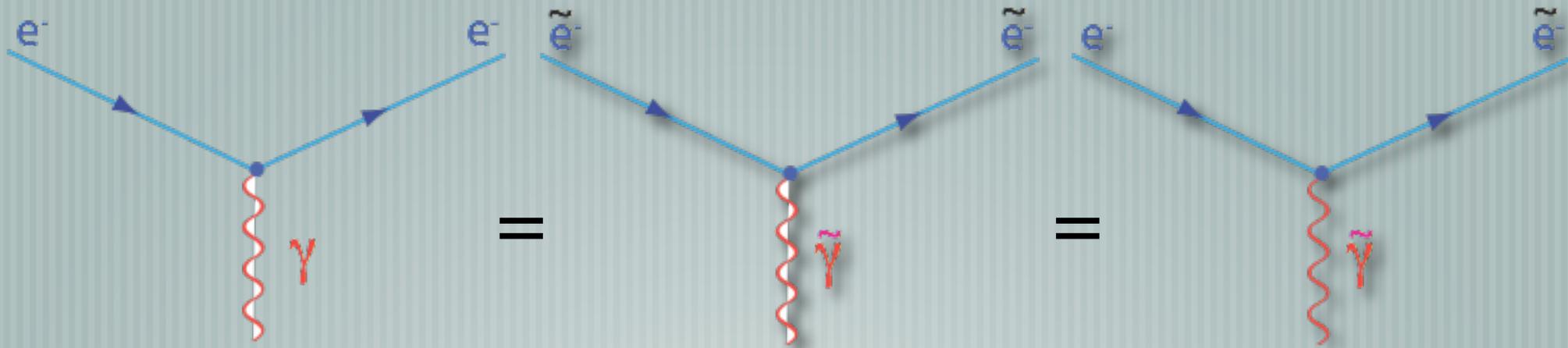


4) Mögliche Erklärung der kosmologischen Materie-Antimaterie-Asymmetrie

5) **Dunkle Materie** ?

Supersymmetrie ist relativ einfach zu berechnen:

Teilchen und Super-Partner lassen sich einfach austauschen



e^- = electron

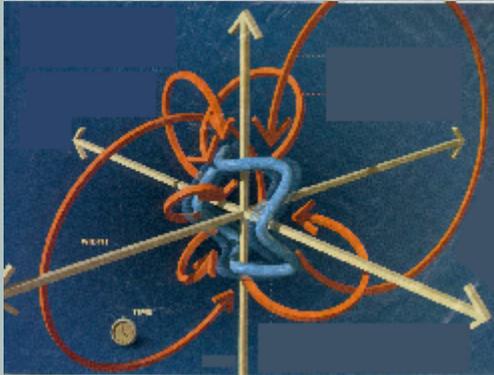
γ = photon

\tilde{e}^- = selectron

$\tilde{\gamma}$ = photino

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

Was sind Teilchen?



Superstrings in 10 Dimensionen?

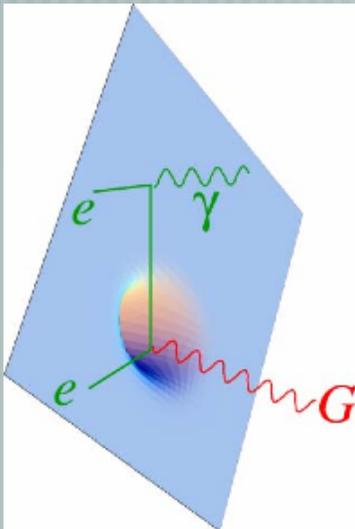
Sind Teilchen kleine 'Strings' die im 10-dimensionalen Raum vibrieren?
Länge $\sim 10^{-35}$ m (Planck Länge)
Verschiedene Schwingungsmoden entsprechen verschiedenen Teilchen
Graviton ist im Spektrum enthalten!

Aber:

Es gibt keine Voraussage, warum und wie die zusätzlichen Dimensionen verschwunden sind.

Es gibt keine eindeutige Möglichkeit, die Eigenschaften der Teilchen vorherzusagen.

Quanten-Gravitation ?



'Sieht' ein Graviton **mehr als 3 Raumdimensionen?**

Die Gravitation könnte deshalb so schwach sein weil sich die Gravitation in 4 oder mehr Raum-Dimensionen ausbreitet und damit aus unserem 3-dimensionalen Universum entkommt.

Kollisionen im LHC könnten dann mikroskopische schwarze Löcher erzeugen.

Die Fragen des 21. Jahrhunderts

1900 - 2000: Phantastischer Fortschritt im Verständnis von Materie und Universum

Wir wissen heute woraus die Materie besteht.
Wir kennen auch die wichtigsten Etappen in der Entstehung des Universums

Neue, tiefere Fragen:

Was geht im "Vakuum" vor - Higgs Feld? Dunkle Energie? Kosmische Inflation?

Was ist die dunkle Materie?

Was macht die 'Teilchenfamilien' aus? Warum gibt es genau drei?

Wo liegt die Verbindung zwischen Quarks und Leptonen (identische Ladung!!)

Wie ist die Antimaterie verschwunden?

Was ist der Ursprung der Naturkonstanten, ihre relative Grösse?

Ist das Leben im Universum ein Zufall?

Was sind Teilchen?

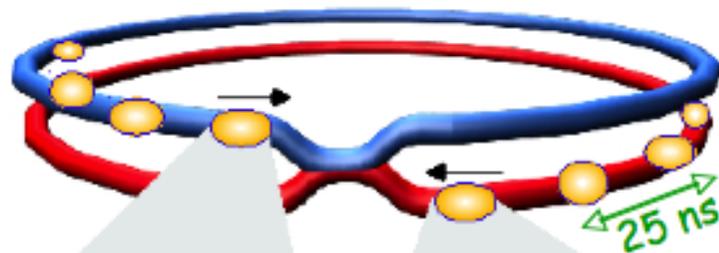
Die Physik des 21. Jahrhunderts ...

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS



Neue Entdeckungen warten

Collisions at LHC



Proton-Proton

Protons/bunch	10^{11}
Beam energy	7 TeV (7×10^{12} eV)
Luminosity	10^{34} cm ⁻² s ⁻¹

Bunch



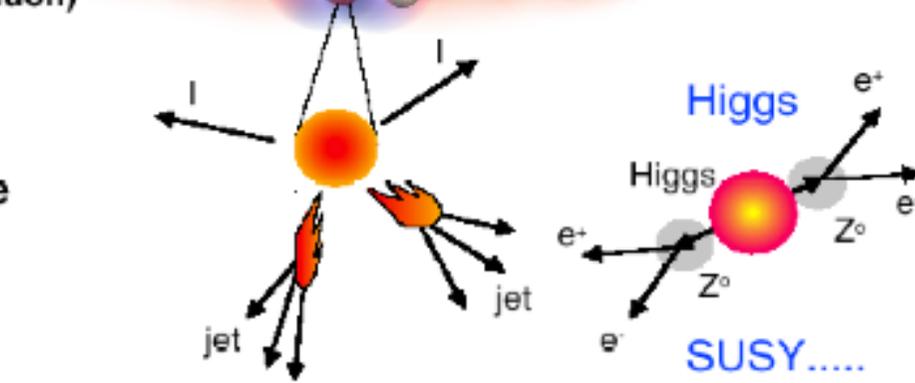
Proton



Parton
(quark, gluon)



Particle



Event rate in ATLAS :

$$N = L \times \sigma (pp) \approx 10^9 \text{ interactions/s}$$

Mostly soft (low p_T) events

Interesting hard (high- p_T) events are rare

**Selection of 1 in
10,000,000,000,000**