

Der Large Hadron Collider am CERN

Wie wir aus Teilchenkollisionen etwas über elementare Teilchen und das Universum lernen können

Klaus Desch
Physikalisches Institut der Universität Bonn

Physik heute – 17. Februar 2010

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

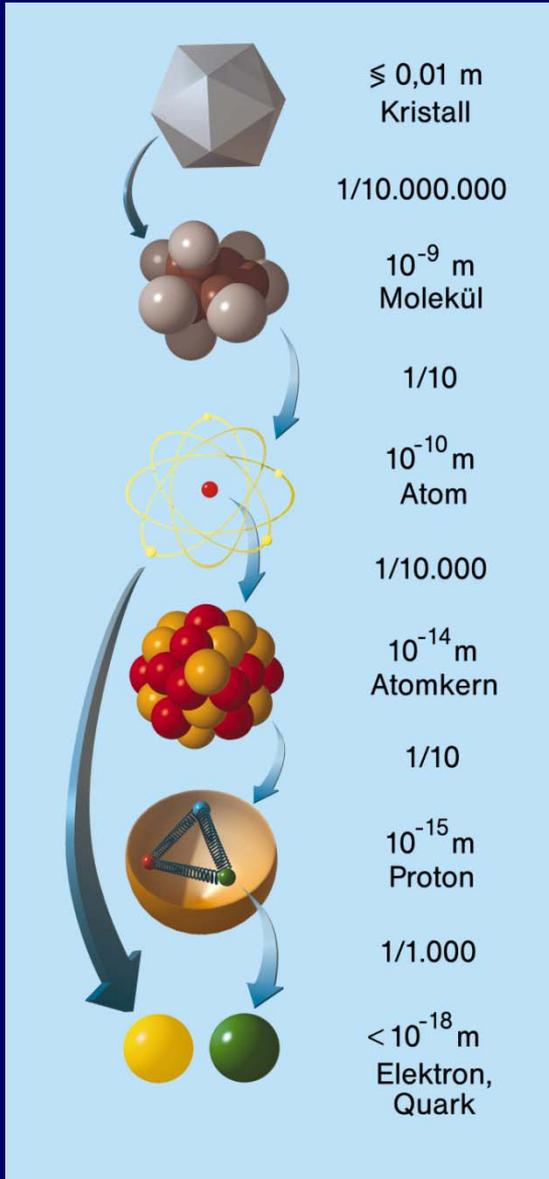
5. Der nächste Schritt: LHC und das ATLAS-Experiment

Aufbau der Materie

Auge,
Mikroskop

Elektronen-
mikroskop

Teilchen-
beschleuniger

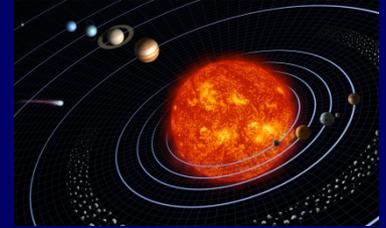


Entfernung
zum Pluto

Mond

Fussballstadion

< Fussball



Viele verschiedene Atome/Kerne

Periodensystem der Elemente

1	<i>Periodensystem der Elemente</i>																18
1	2											13	14	15	16	17	18
1	2											13	14	15	16	17	18
1	2											13	14	15	16	17	18
1	2											13	14	15	16	17	18
2	2											13	14	15	16	17	18
2	2											13	14	15	16	17	18
3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
6	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
7	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
7	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Legend:

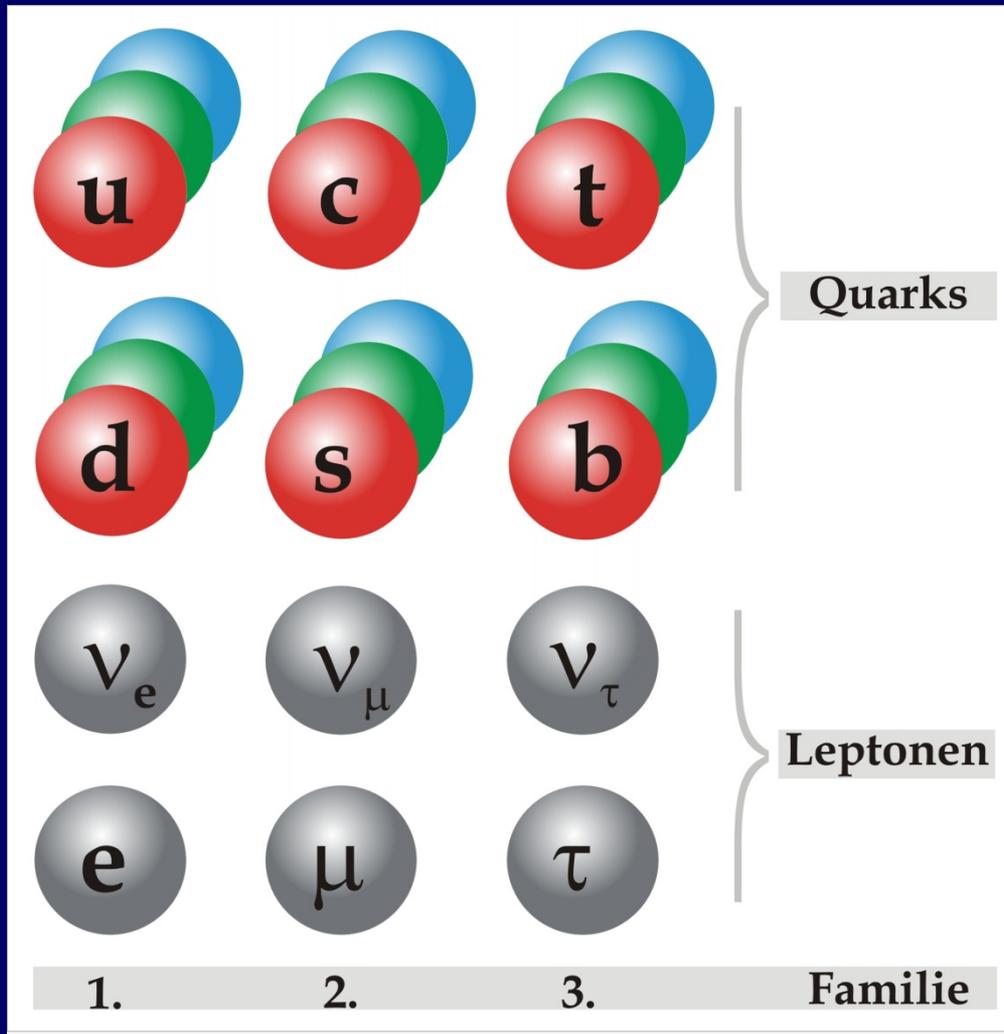
- Rel. Atommasse — 12.01
- Elementsymbol — C
- Elementname — Kohlenstoff
- Fe — Feste Elemente
- O — Gasförmige Elemente
- Hg — Flüssige Elemente (20°C)
- Tc — Radioaktive Elemente

©Peter Wäch - Experimentalchemie.de - Chemie erleben!

138.91	140.12	144.24	144.24	(145)	150.36	151.97	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.04	174.97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Luferium
227.03	232.04	231.04	238.03	(237)	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)	(260)
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Actinium	Thorium	Protactinium	Uran	Neptunium	Plutonium	Americum	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium

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

Im Innersten: Bausteine der Materie



+ Antiteilchen

Es gibt genau drei Familien von Quarks und Leptonen

“Punktförmig”
(überprüft bis 10^{-18}m)

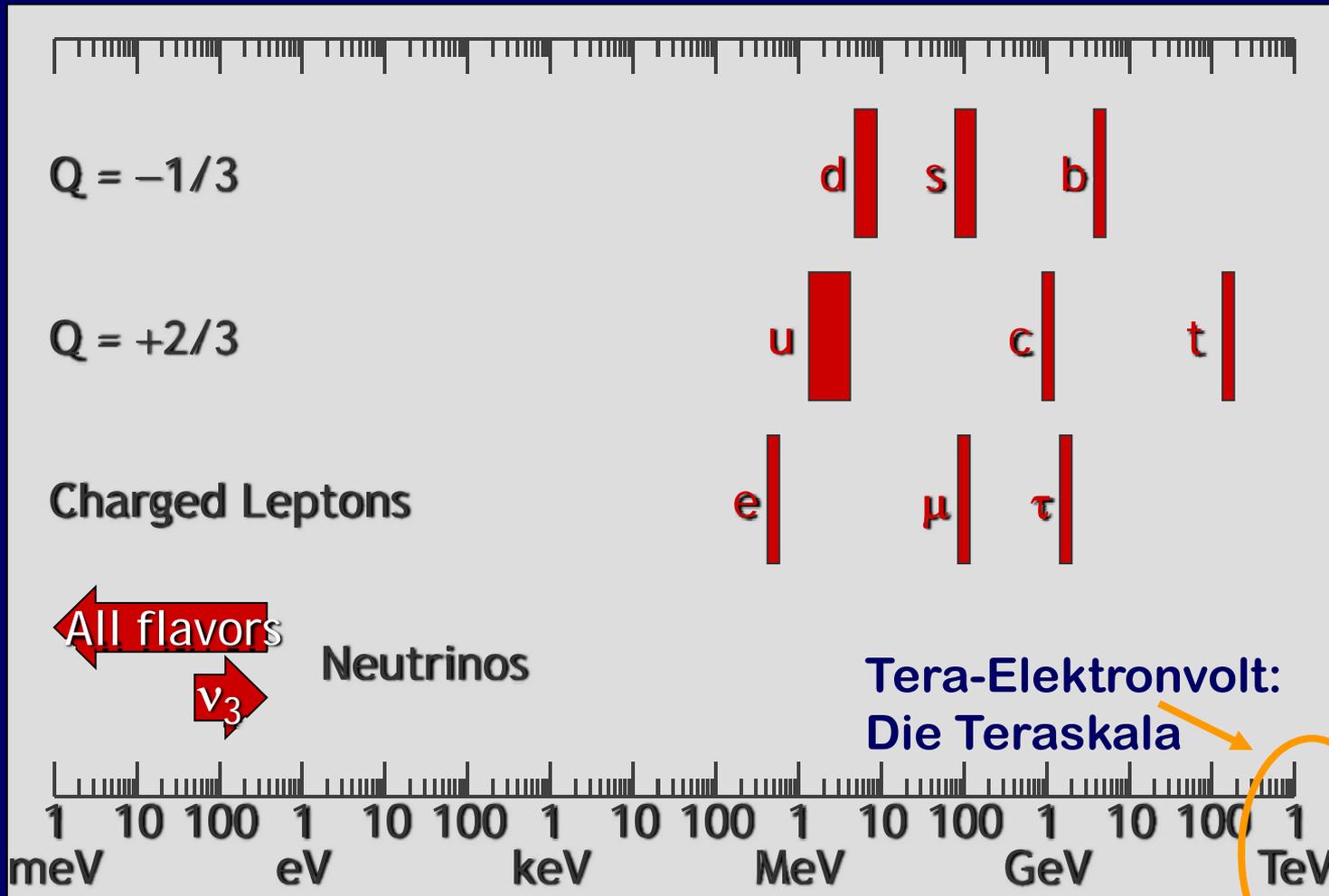
Fermionen (Spin- $1/2$)
Pauli-Prinzip \Leftrightarrow
eignen sich zum Aufbau komplexer Strukturen

“Dinge”

Alle experimentell nachgewiesen!

Unterschied: Massen

Massen der Elementarteilchen

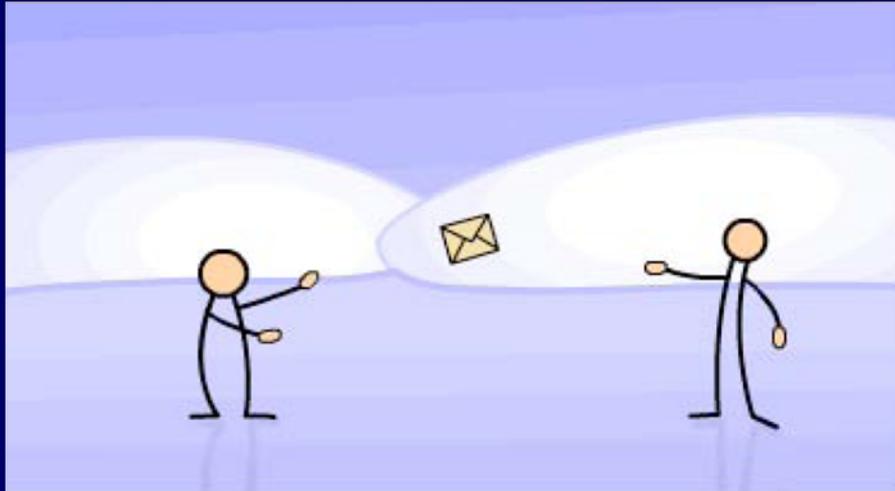


Einheit: Energie ~ Masse (Einstein, später)

Warum so kompliziert???

Im Innersten: Kräfte

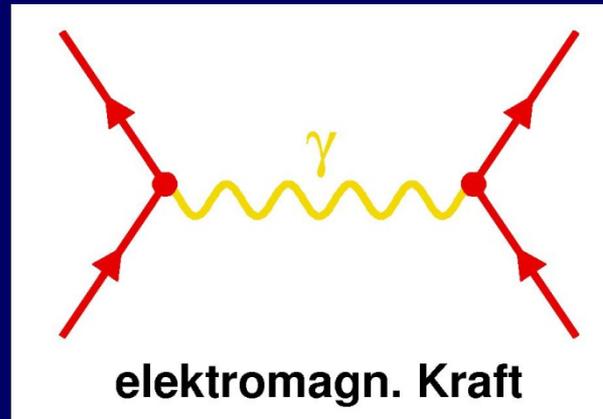
“Beziehung zwischen den Dingen”



Beschreibung von Kräften durch “Botenteilchen”



R. Feynman

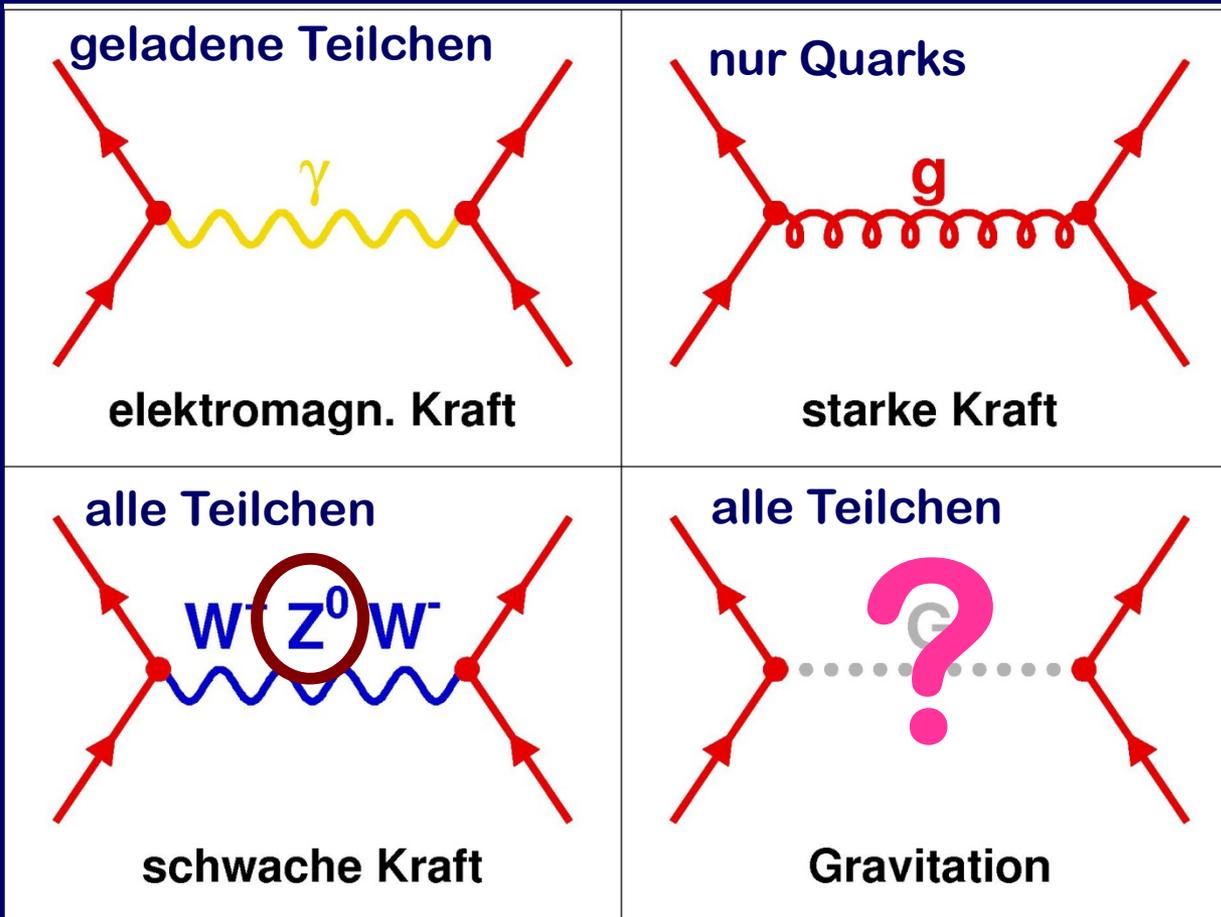


elektrische und magnetische Kräfte werden durch Austausch von **Photonen** übermittelt

elektromagnetische Kraft ist nicht die Einzige...

Elementare Kräfte

vereinheitlicht:
elektro-schwache Kraft



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:

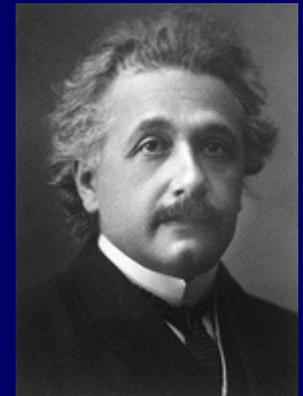
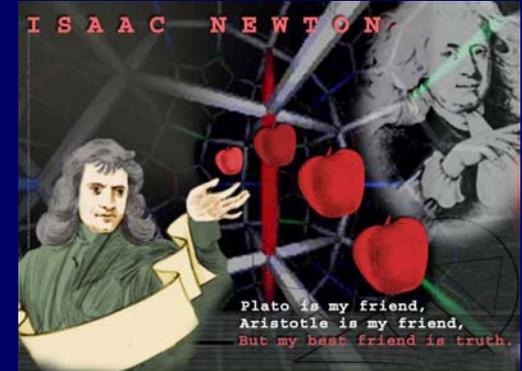
Newton: $F = m \cdot a$

Masse ist Trägheit bei Bewegungsänderungen

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

Masse ist Energie → Gravitation!

(Energie krümmt Raum-Zeit)



Aber wodurch wird Masse erzeugt ?

Ist sie eine Eigenschaft der Teilchen ?

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

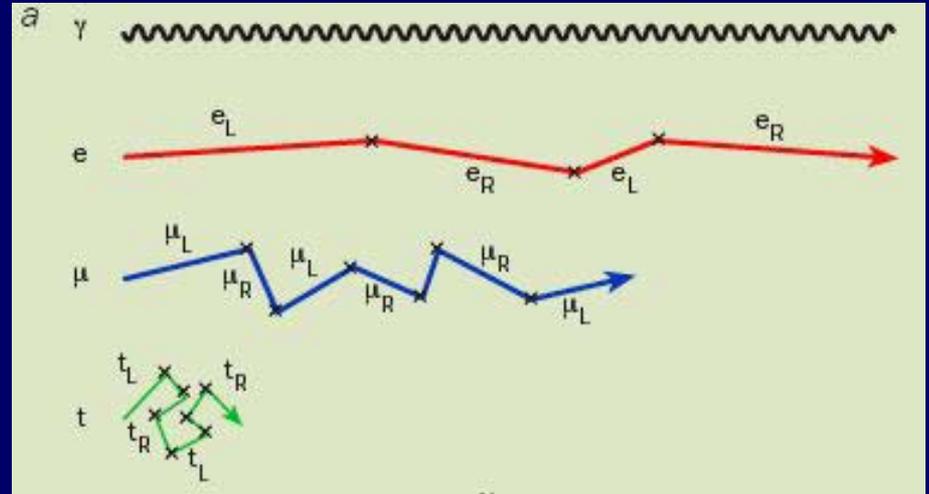
Das Rätsel der Masse: Der Higgs-Mechanismus



Peter Higgs (1964!)

Ist Masse keine Eigenschaft der Teilchen, sondern nur das Ergebnis einer permanenten Kraft ???

Jedes masselose Teilchen bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit

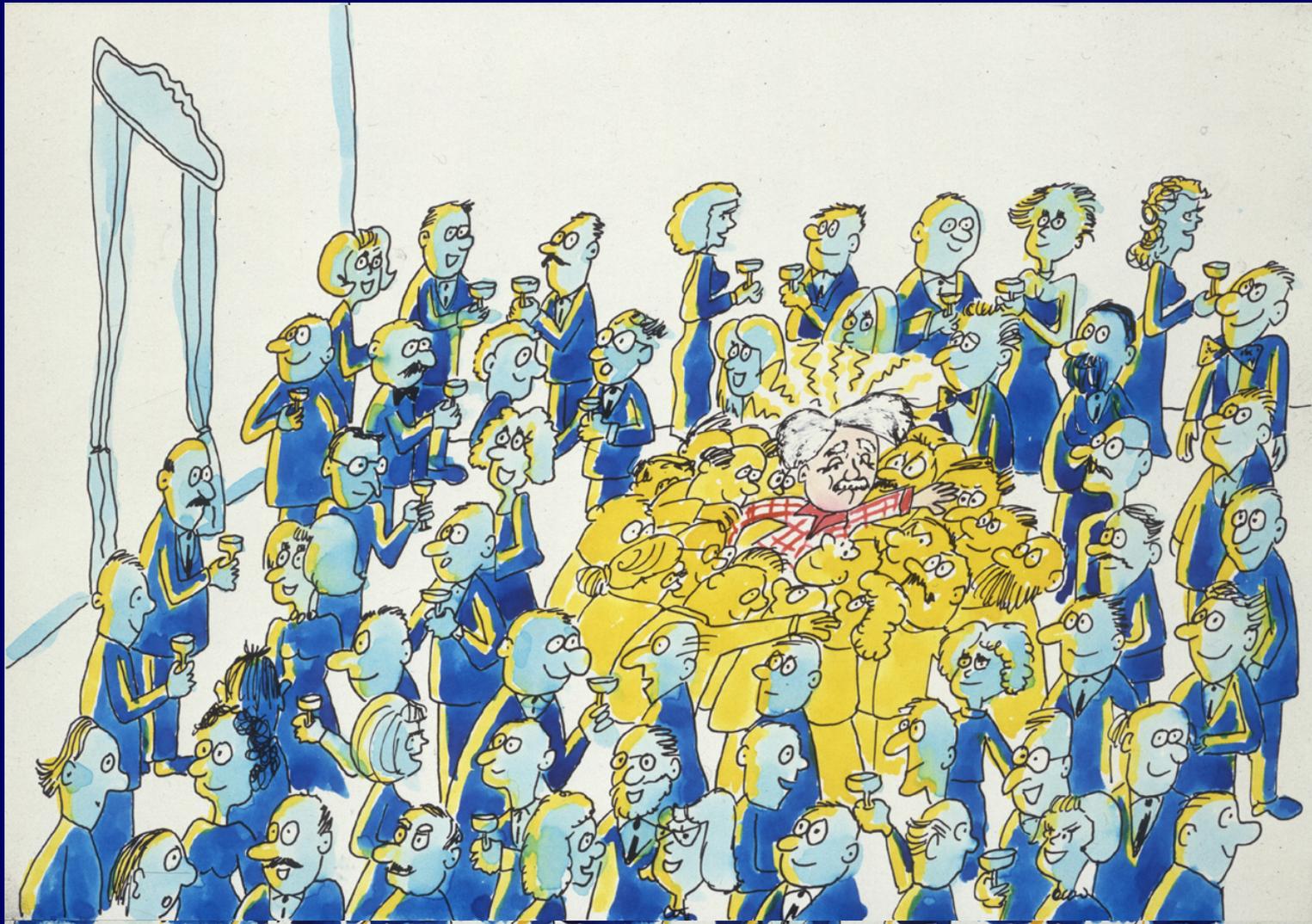


Preis: mindestens ein grundlegend neues Teilchen: das Higgs-Boson

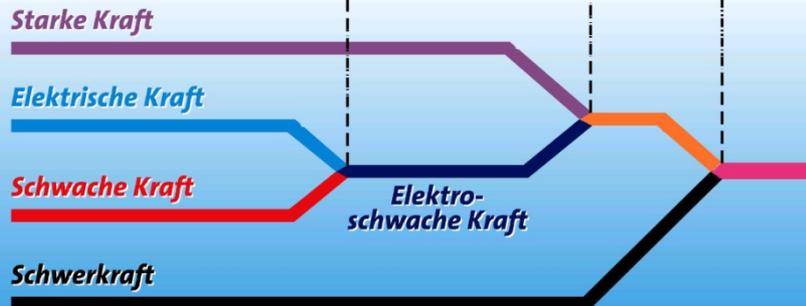
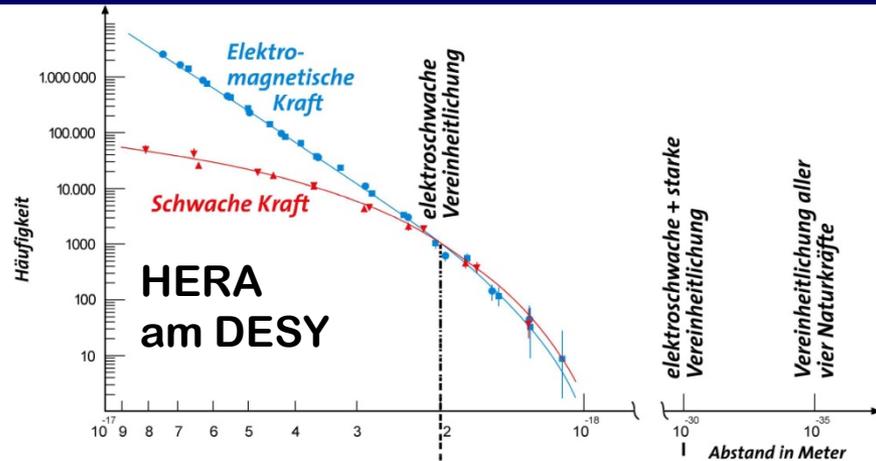
In ein paar Jahren werden wir wissen, ob diese Theorie stimmt!

⇒ Large Hadron Collider LHC

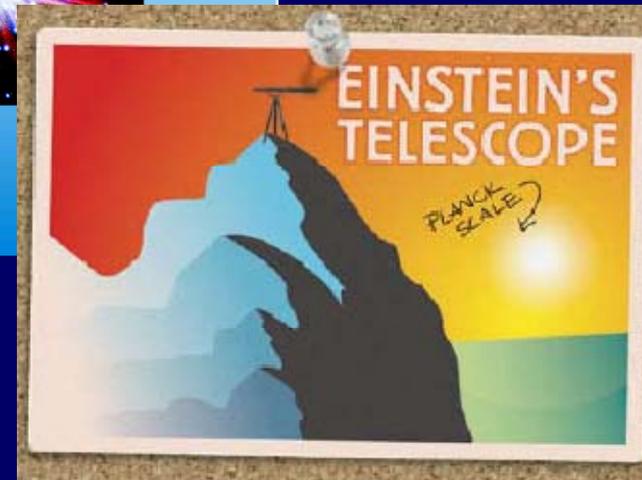
Das Rätsel der Masse: Der Higgs-Mechanismus



Noch größere Fragen...



Urknall



Gibt es eine Urkraft ??

Vielleicht bei 10¹⁹ GeV (Planck-Skala):
wir brauchen ein "Teleskop": Präzision

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^{-18} mal größer wäre, als die des Protons, würden sich z.B. Erde und Mond mit der gleichen Kraft elektrisch abstoßen, mit der sie sich über die Gravitation anziehen!!

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

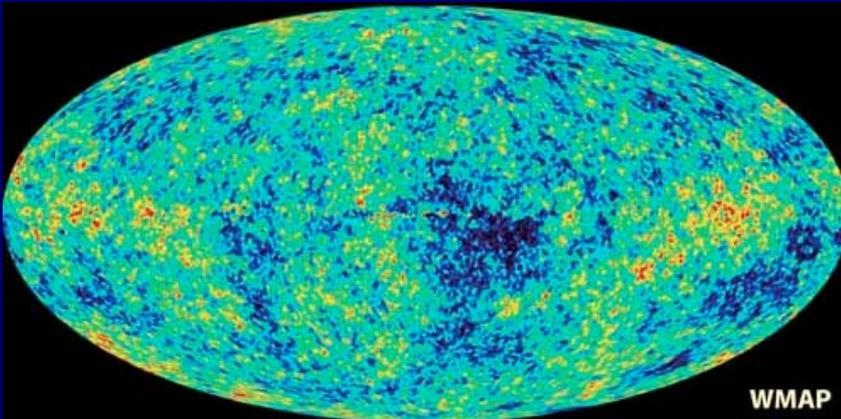
Was sorgt dafür, dass Elektron und Proton die gleiche Menge Ladung tragen (Symmetrie!!): Antwort: wir haben keine Ahnung!

Noch größere Fragen...

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

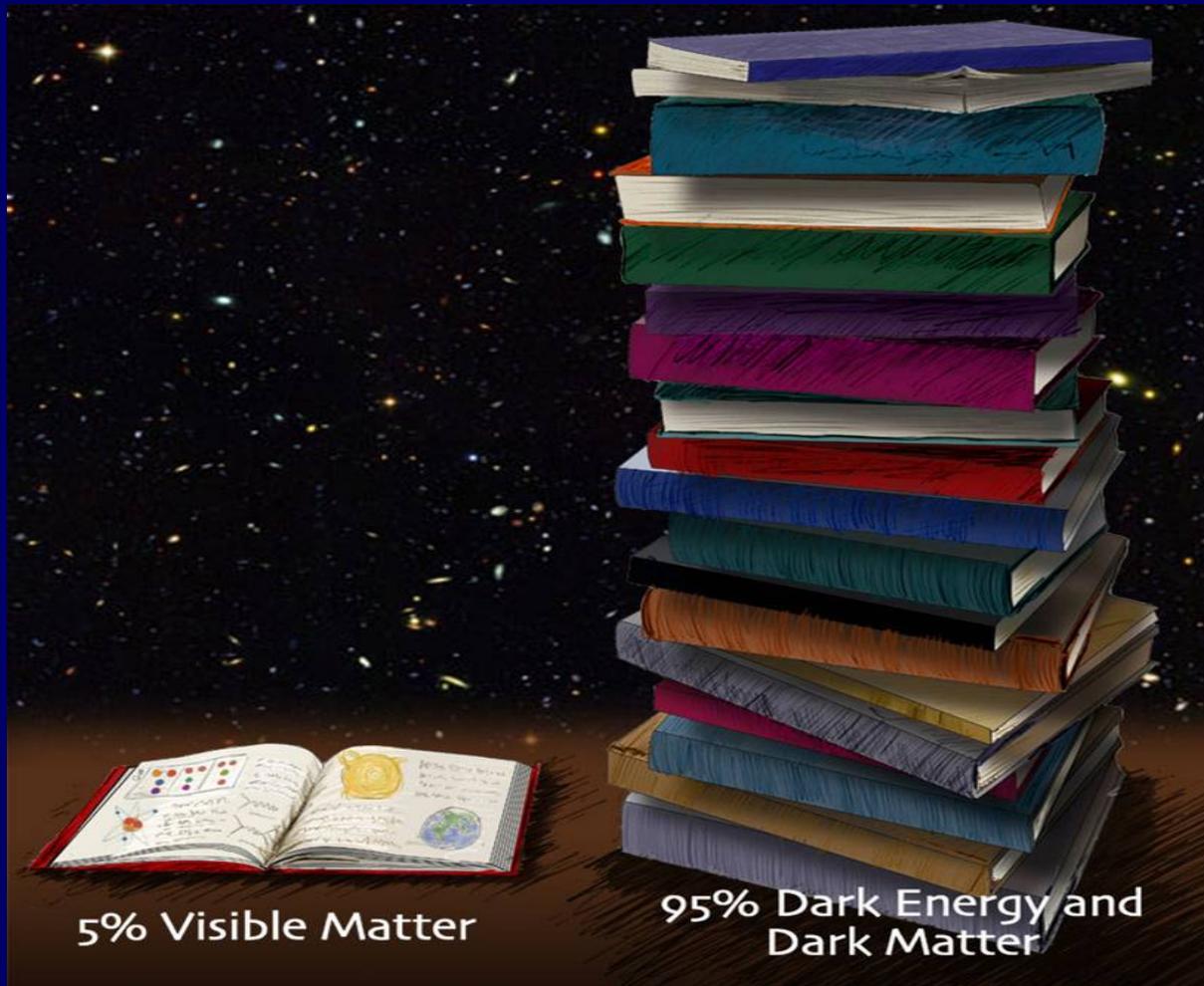


Sterne weit weg vom Zentrum einer Galaxie
rotieren schneller um das Zentrum als
erwartet



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

Noch größere Fragen...

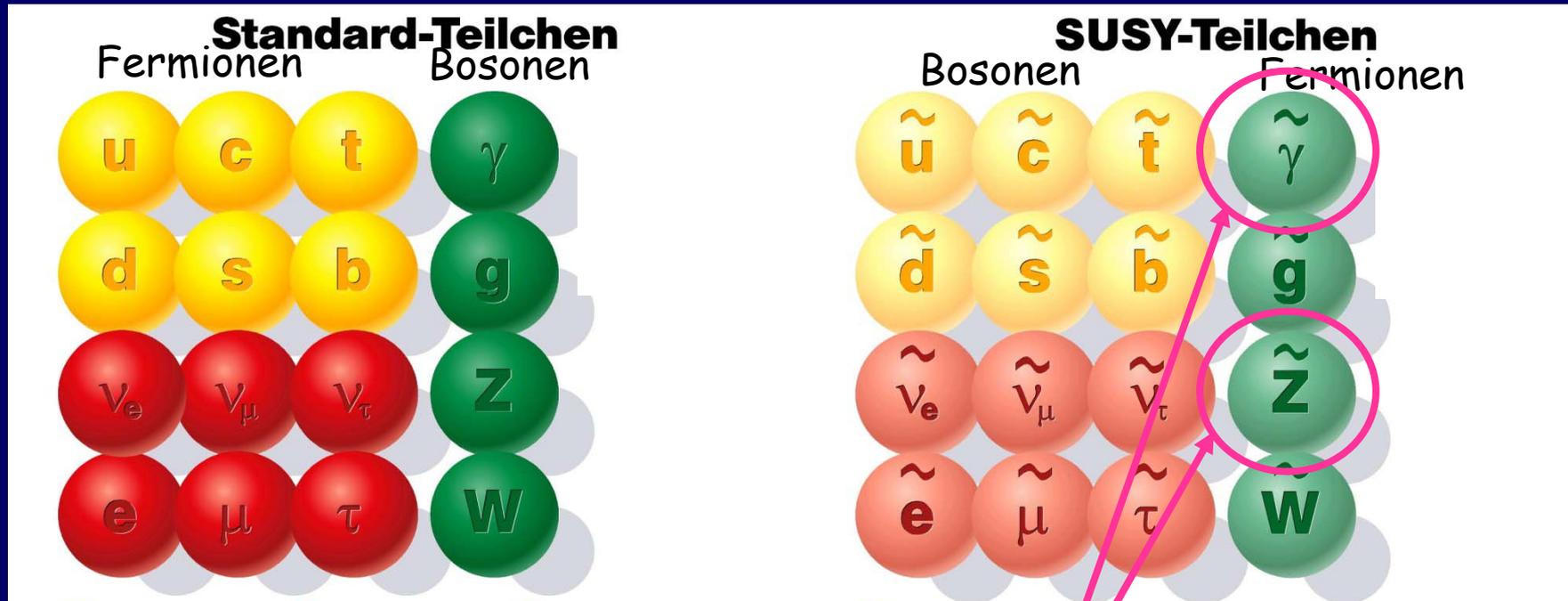


Woraus besteht die dunkle Materie ???

Mögliche Lösungen

“Symmetrie zwischen den Dingen und ihren Beziehungen”

Supersymmetrie (SUSY):



SUSY kann konzeptionelle Probleme lösen

Brücke zur Urkraft
Brücke zur Gravitation?

Träger der dunklen Materie?

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

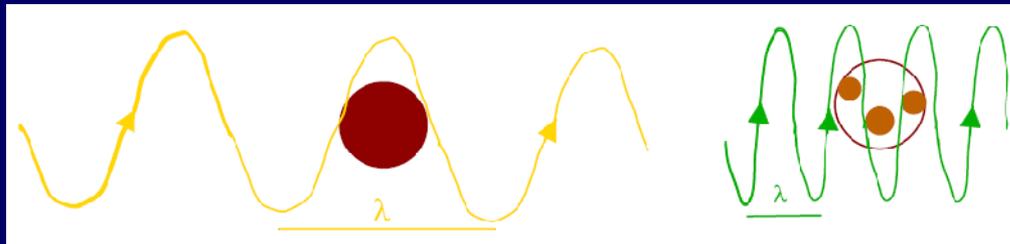
Wie kann man kleine Bausteine
"sehen"?



Energie, Scotty

1. Energie = hc / Wellenlänge

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 $\sim 1/10$ Atomradius auflösen

Mit 2 GeV kann man $\sim 1/10$ Protonradius ($0.1\text{fm} = 10^{-16}\text{m}$) auflösen

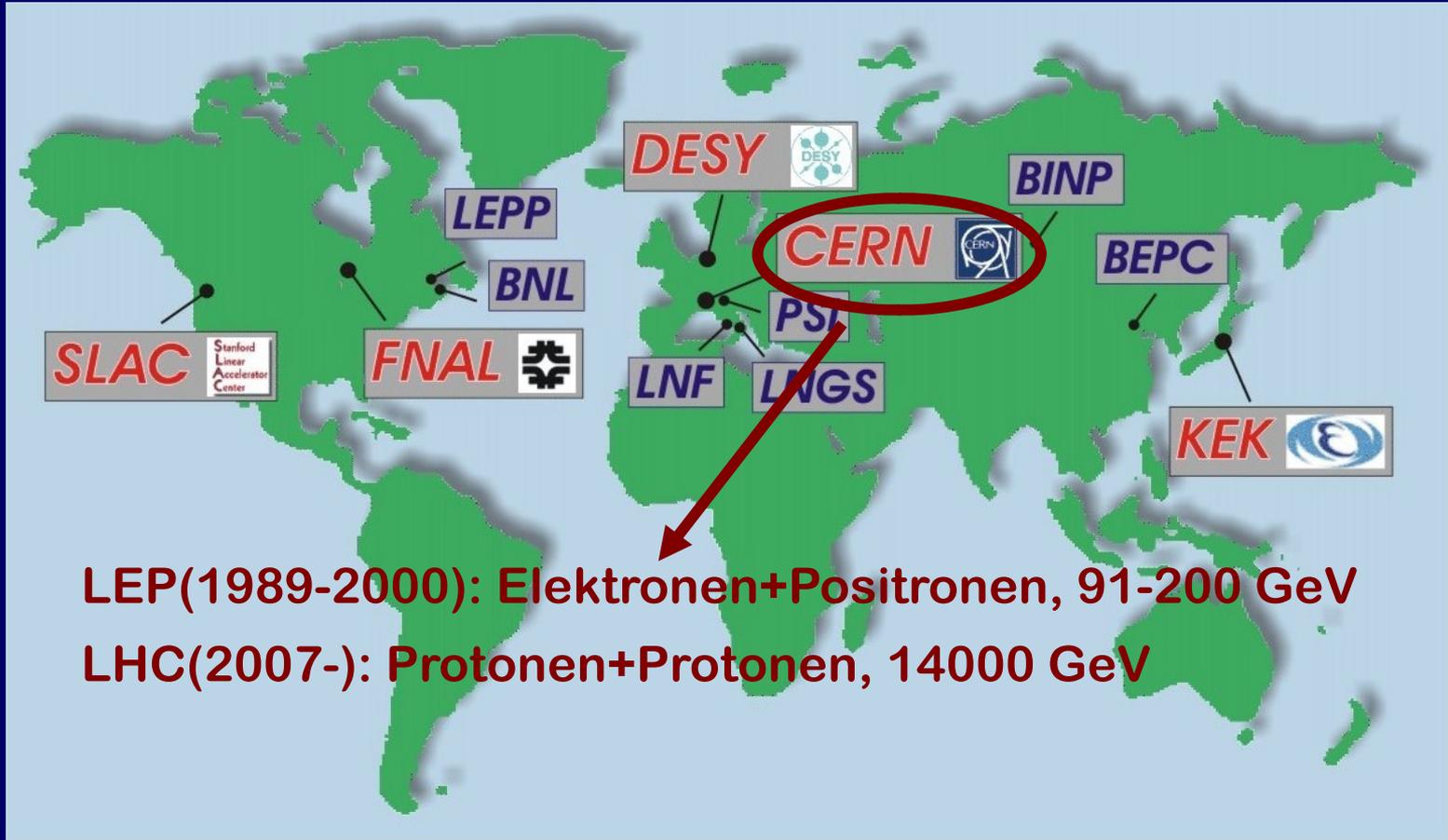
Mit 200 GeV kann man $\sim 10^{-18}\text{m}$ auflösen (z.B. HERA am DESY)

Am LHC erreichen die Teilchen Tera-Elektronvolt (TeV) = 10^{12} eV

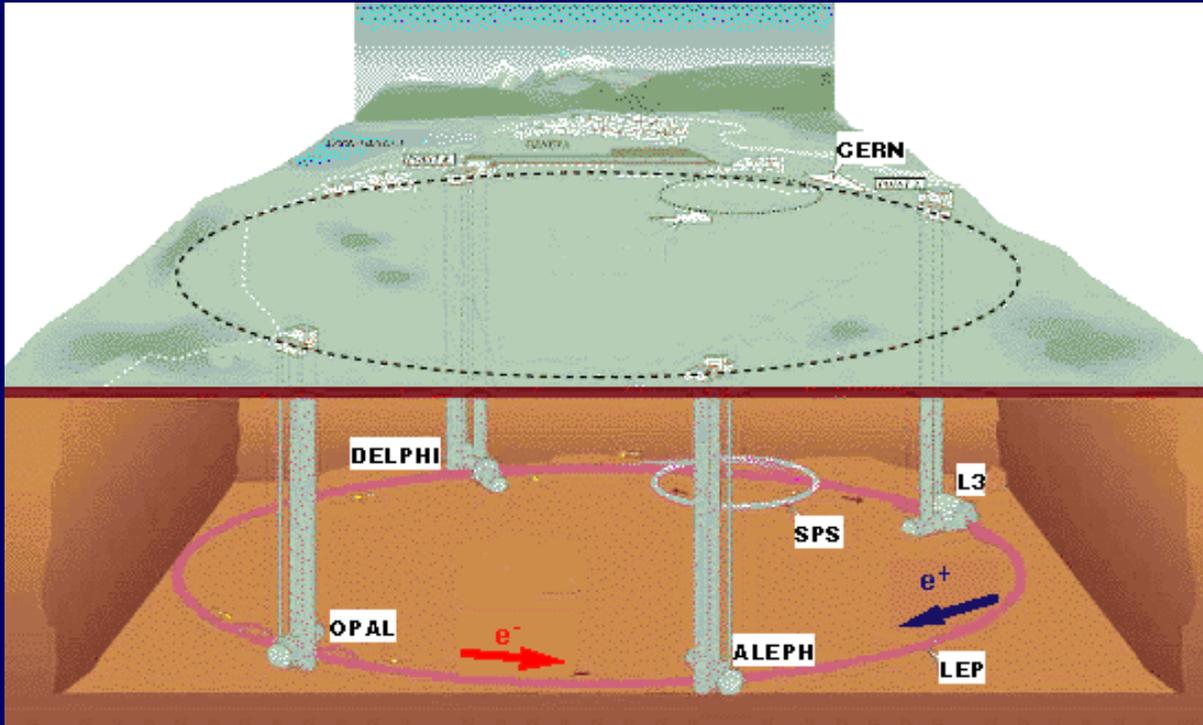
⇒ Auflösungsvermögen $\sim 10^{-19}$ m

⇒ genug Energie um die schwersten bekannten Teilchen (top) zu erzeugen, und vor allem **neue**, wenn sie existieren

Weltliga der Beschleunigerzentren



Beispiel: LEP



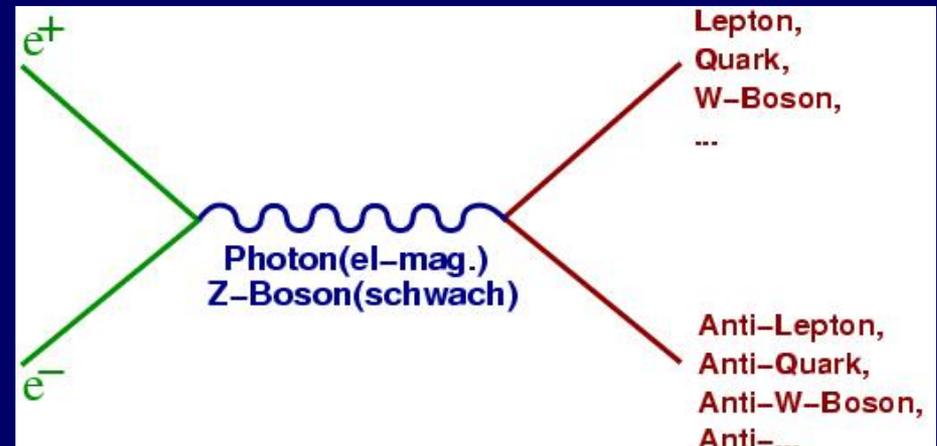
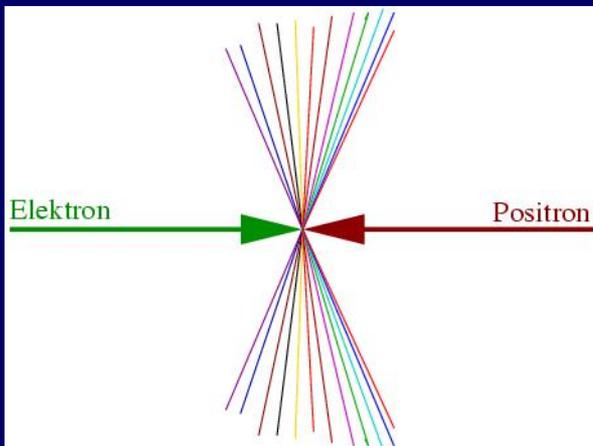
Umfang 27 km

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: $2 \times 10^{-6} \text{ s}$

Tau-Lepton: $3 \times 10^{-13} \text{ s}$

Photon: ∞

Z-Boson: $3 \times 10^{-25} \text{ s}$

Proton: ∞ Neutron: 15 min

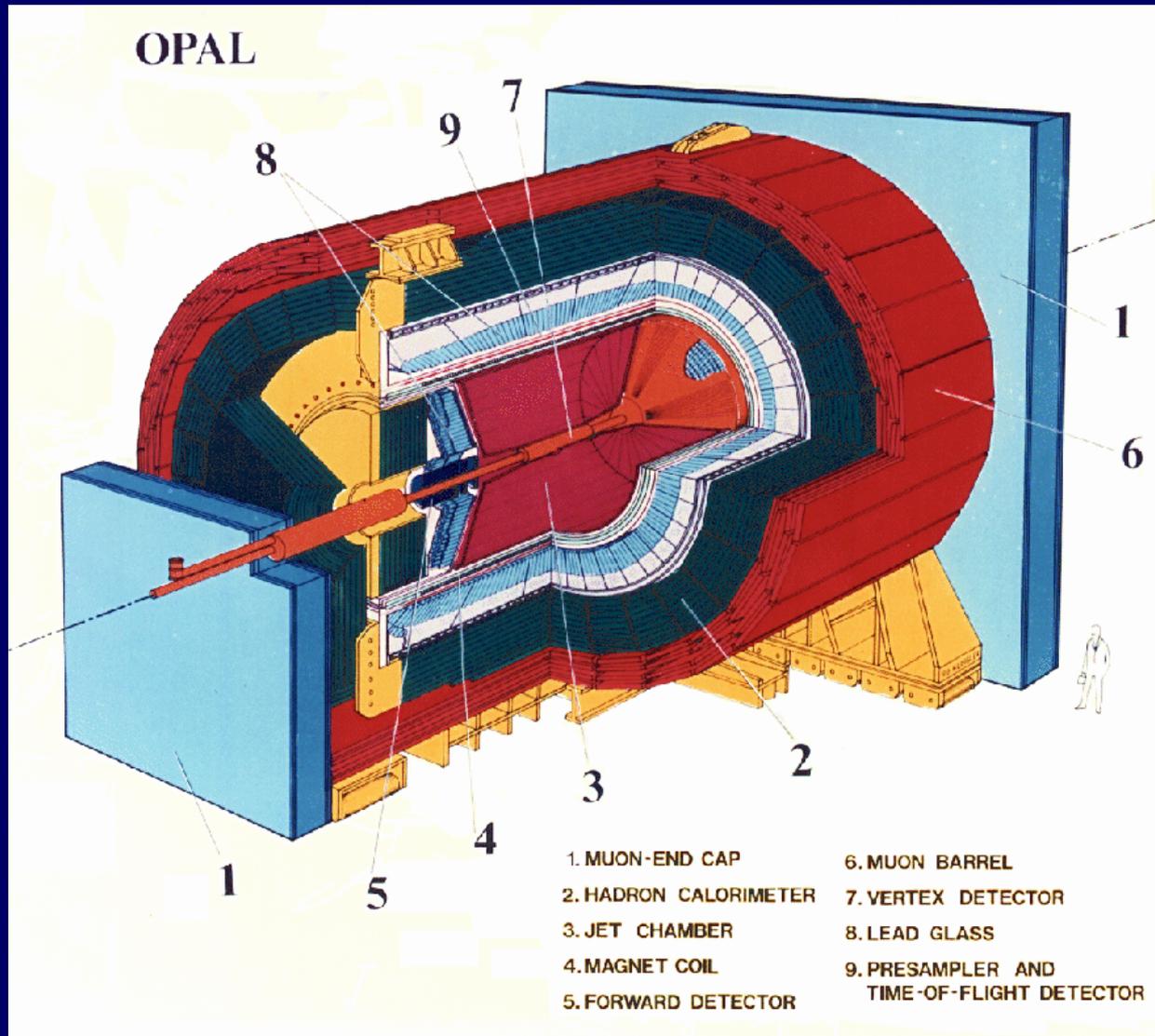
Geladenes Pion: 2×10^{-8}

Kaon: 1×10^{-8}

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!

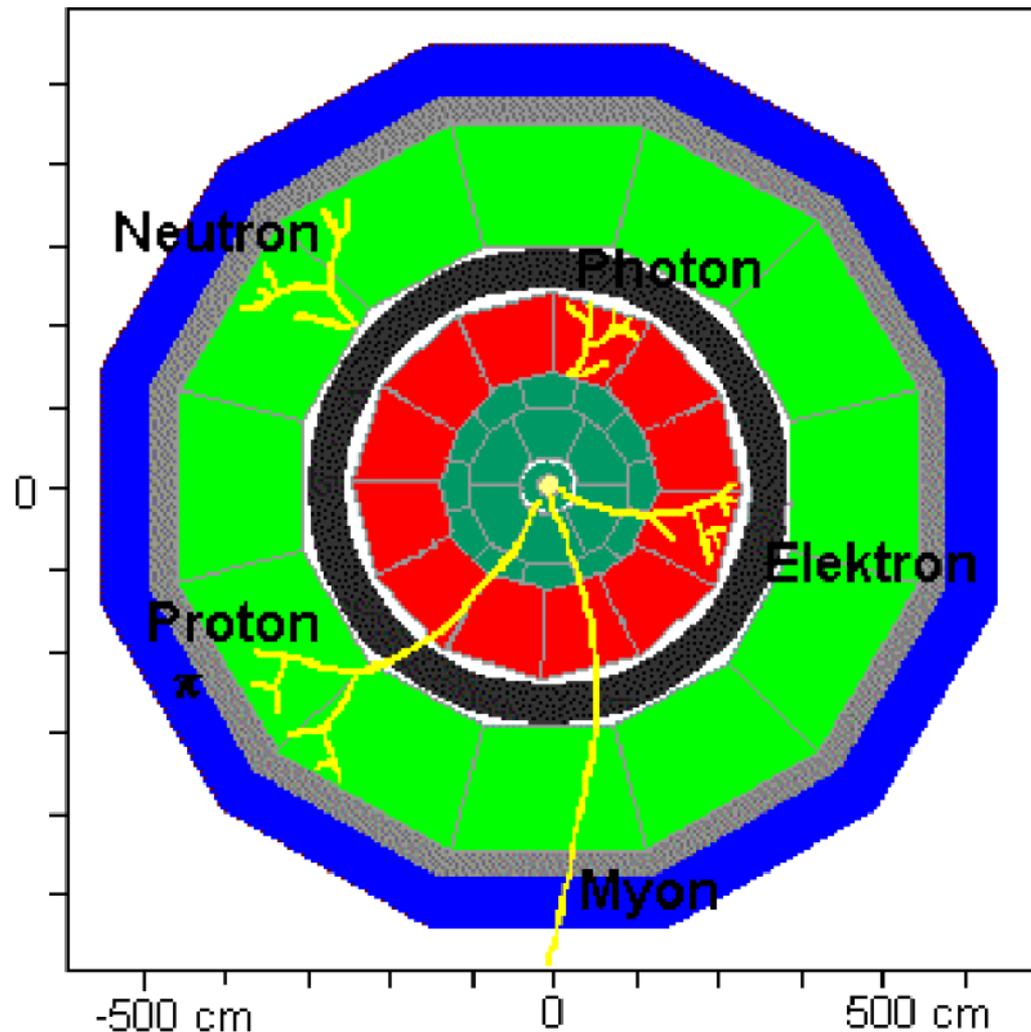
Riesenkameras: die Detektoren



Riesenkameras: die Detektoren

Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

- Strahlrohr
- Spur-
kammer
- mag. Spule
- elektr. mag.
Kalorimeter
- hadron.
Kalorimeter
- magnet.
Eisen
- Myonen
Kammer



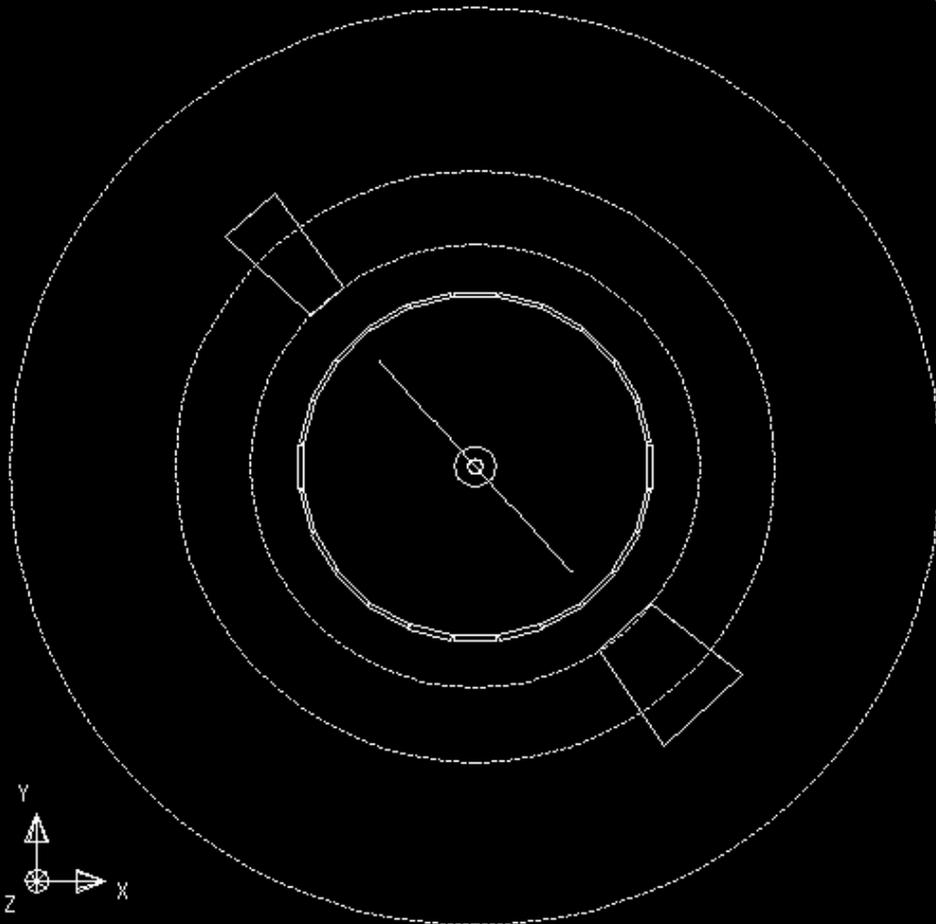
Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...

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

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

Run: event 7575: 13812 Ctrk(N= 2 Sump=140.6) Ecal(N= 15 SumE=175.3)
Ebeam 86.148 Vtx (-0.06, 0.06, 0.48) Hcal(N= 0 SumE= 0.0) Muon(N= 0)

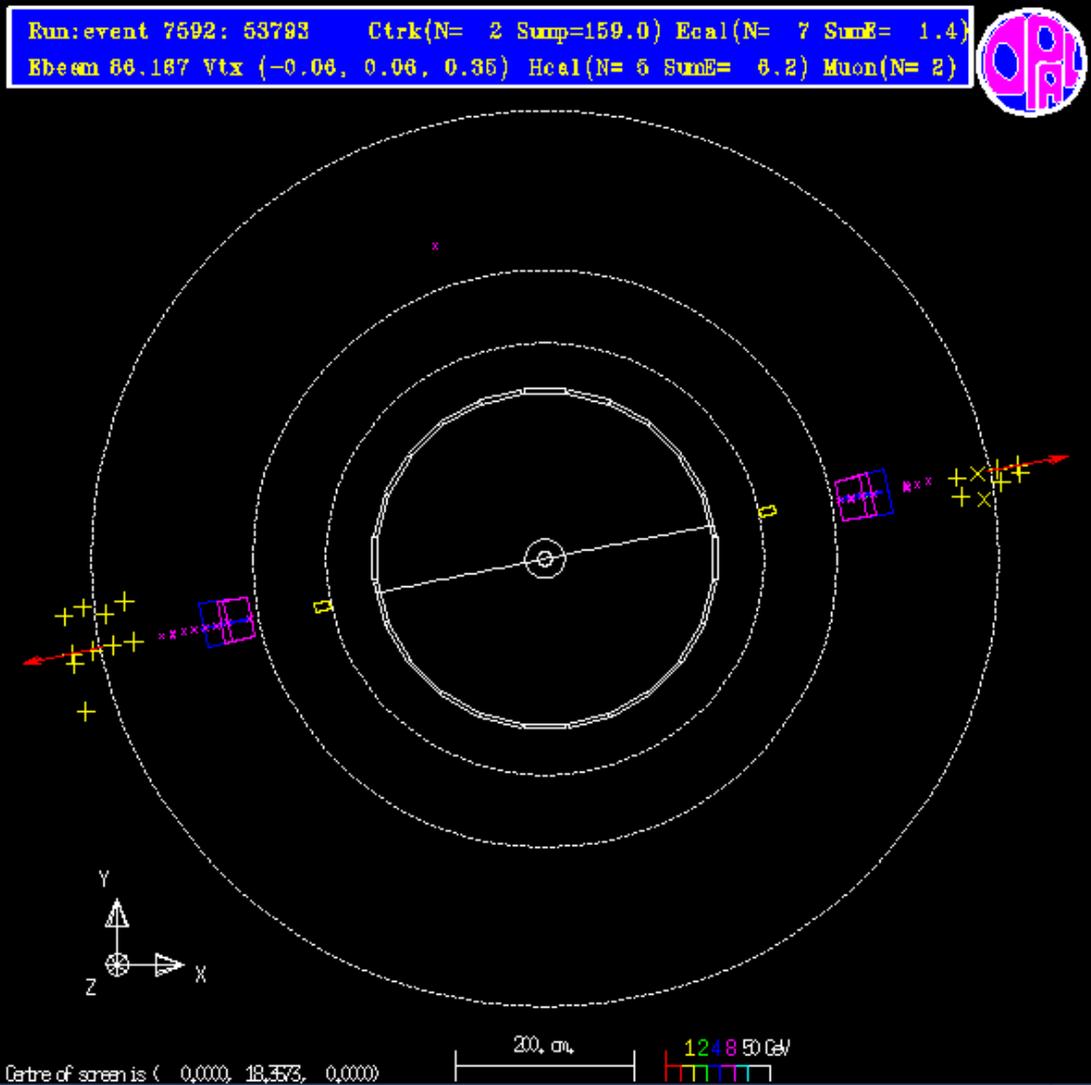


Centre of screen is (0.000, 19.257, 0.000)

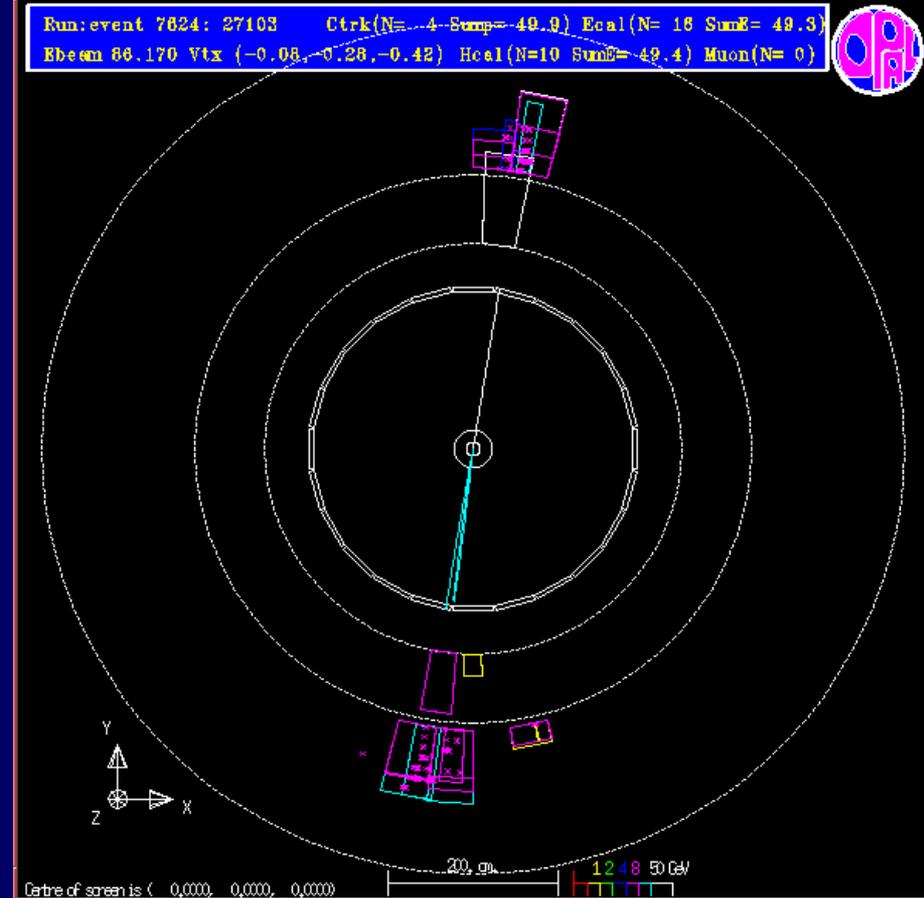
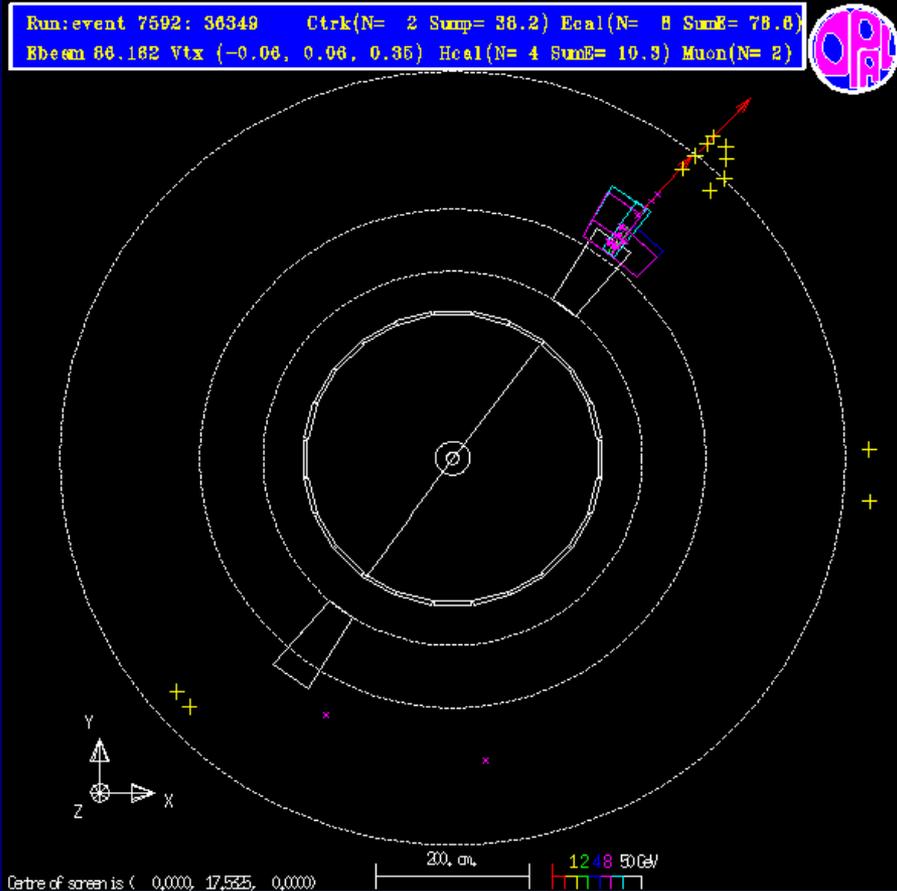
200 cm

1248 50 GeV

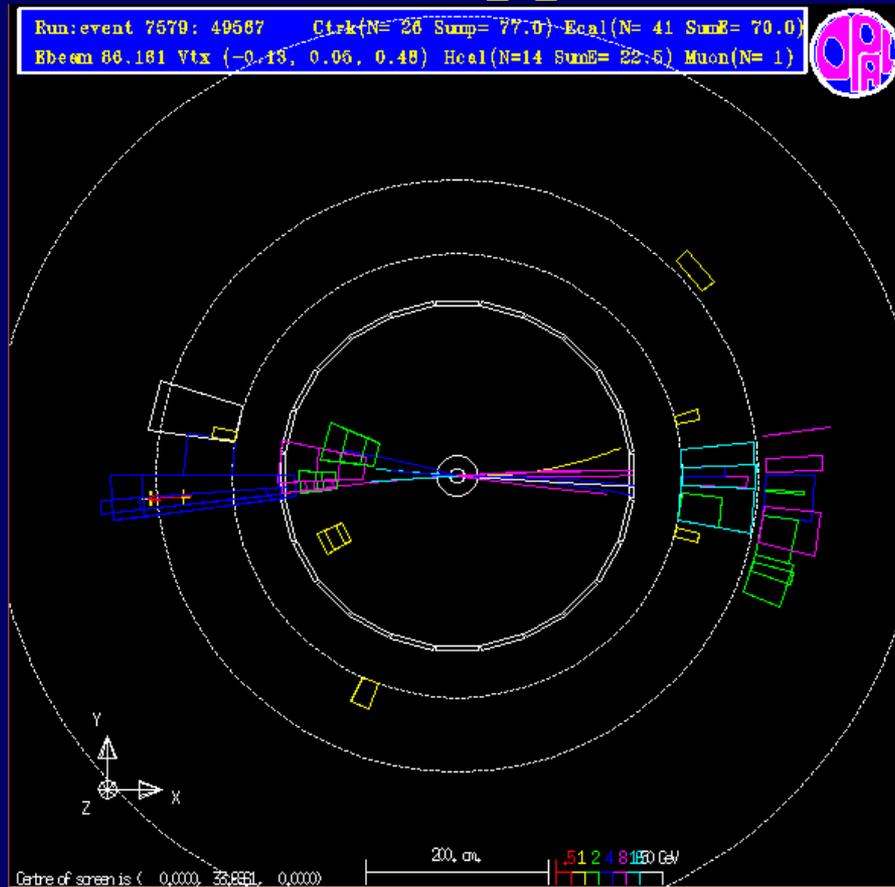
$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



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

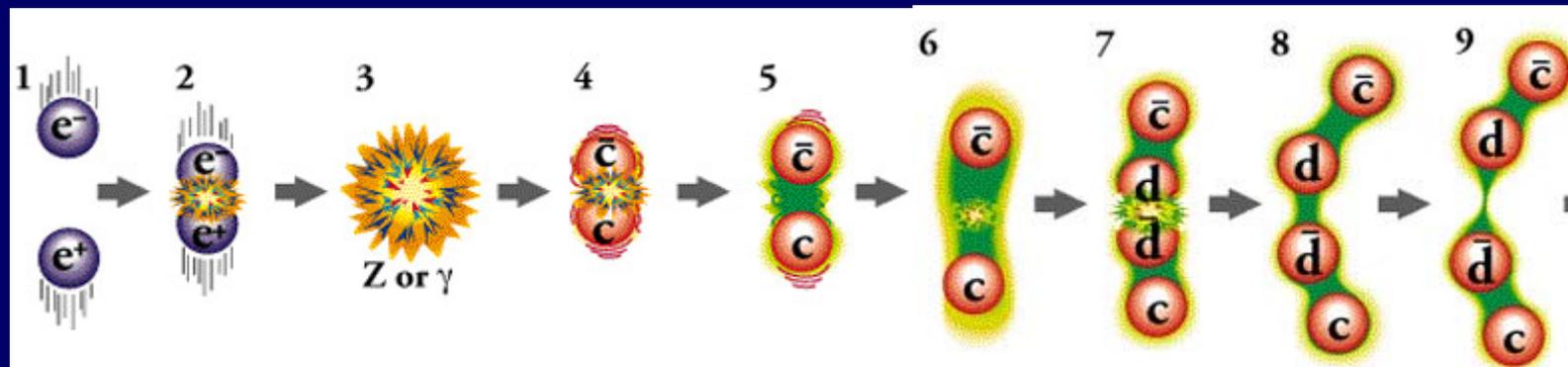


$$e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow q \bar{q} \rightarrow \text{Jets}$$



Quarks kann man nicht
 einzeln beobachten

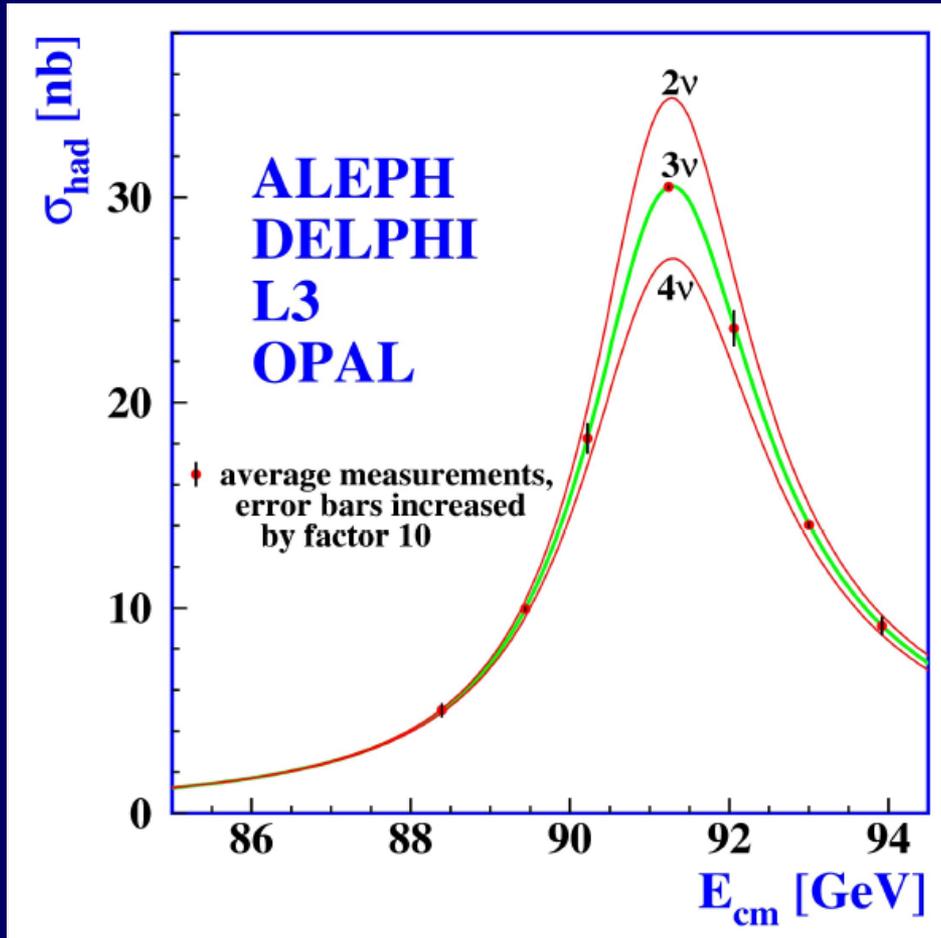
Erkennungsmerkmal von
 Quarks sind Teilchenbündel
 (Jets)



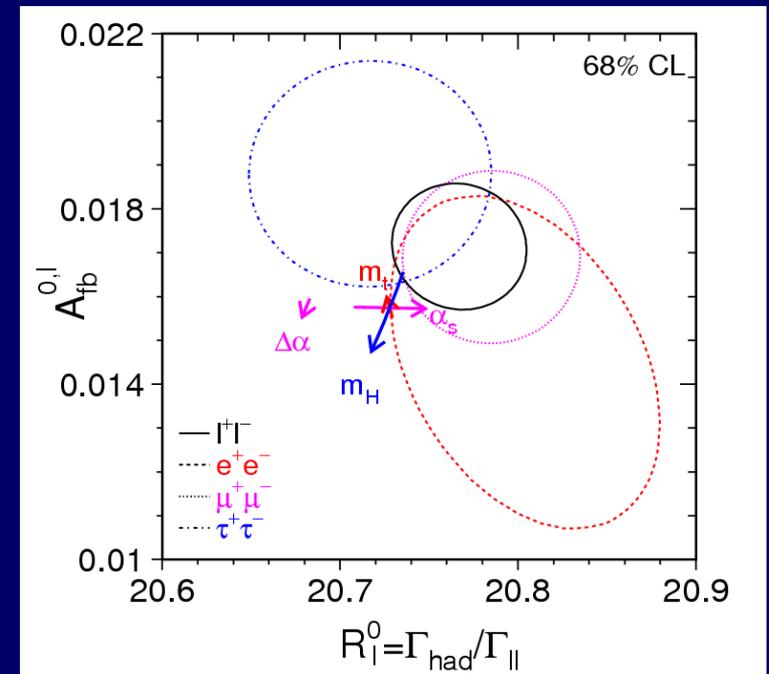
usw.

Was kann man daraus lernen?

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

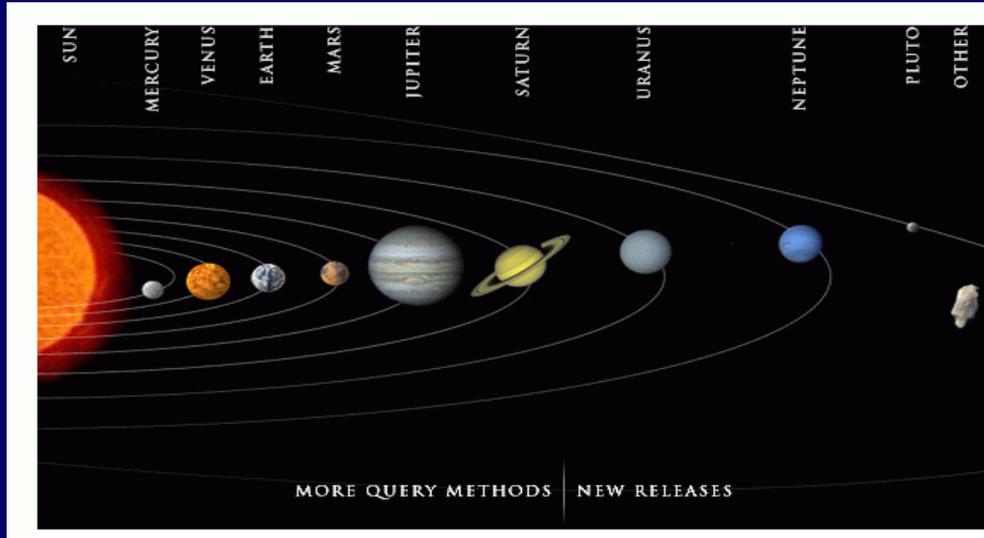


Z-Zerfälle in Elektron, Müonen
und Taus zählen →
“Lepton-Universalität”
(alle Leptonarten verhalten sich
gleich, bis auf Masse)



Ein Schritt weiter: Präzisionsmessungen

Beispiel: Astronomie

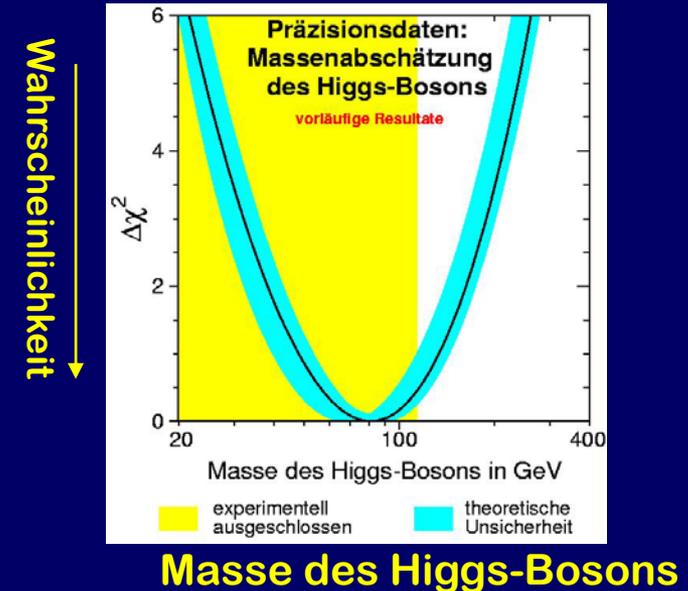


1846:

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

Beispiel: Teilchenphysik



2000:

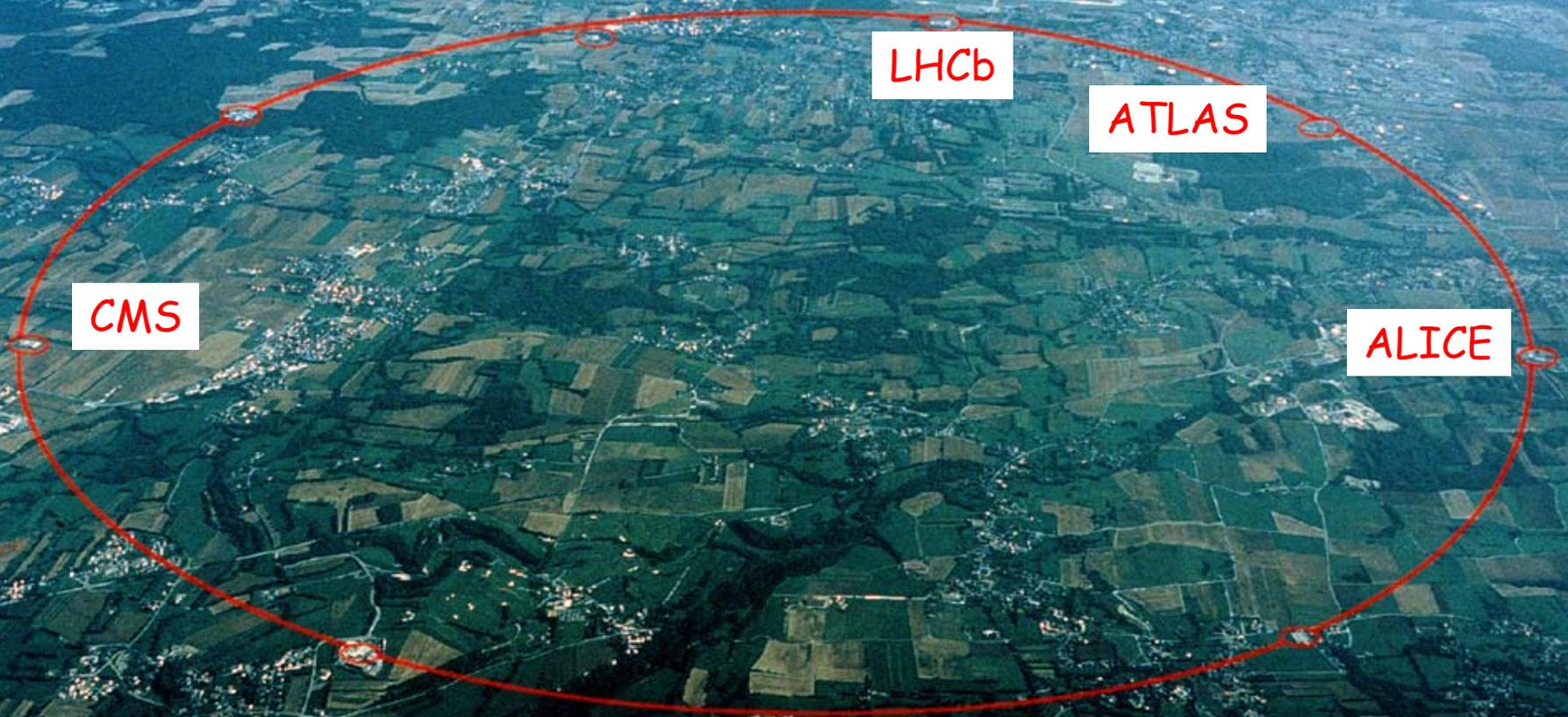
Die LEP Messungen lassen sich im Standardmodell nur erklären, wenn das Higgs-Boson leichter als ~200 GeV ist

Spannend 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

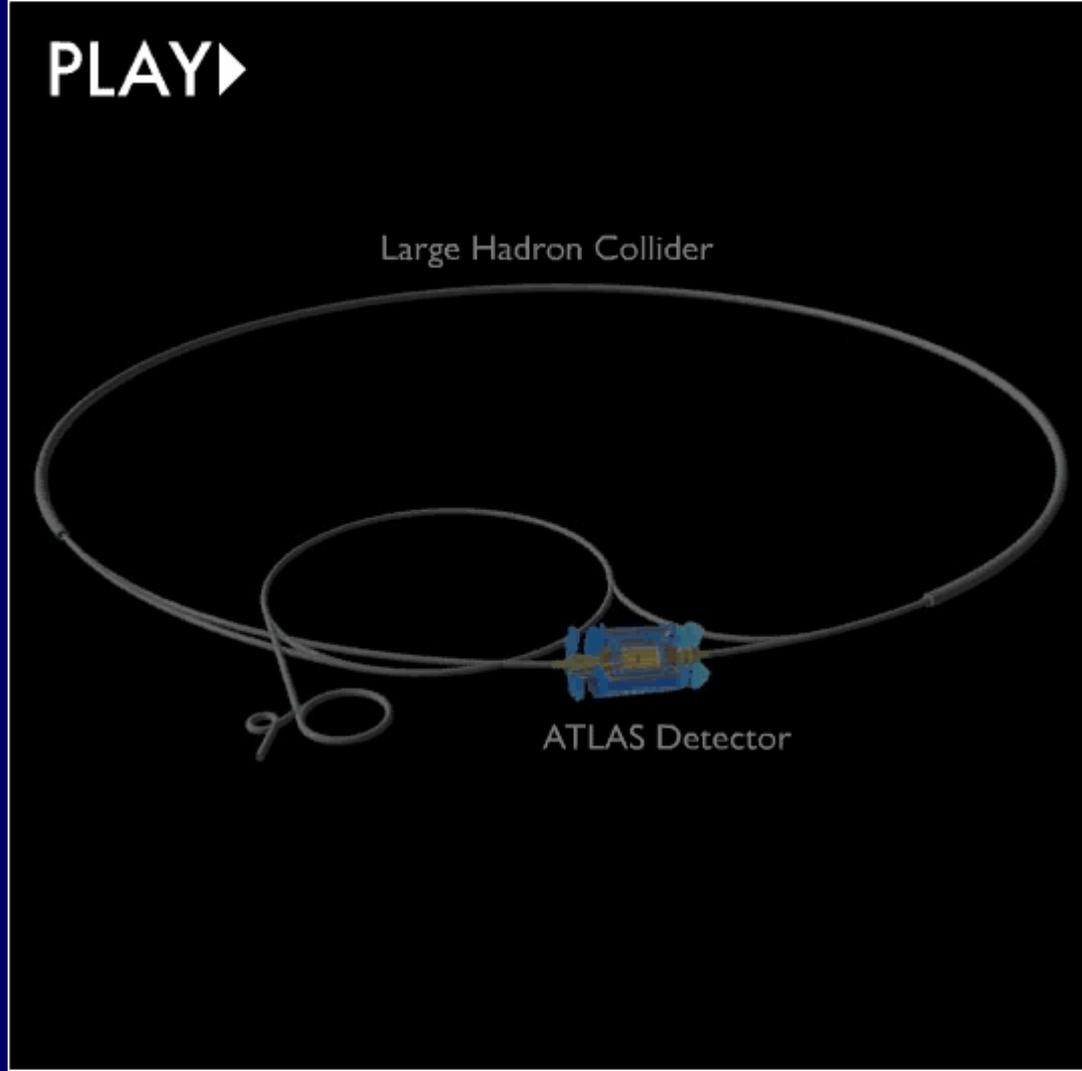
Der Large Hadron Collider LHC



Herzstück des beschleunigers:
Supraleitende Magnete (Flüssig-He, 1.9K)

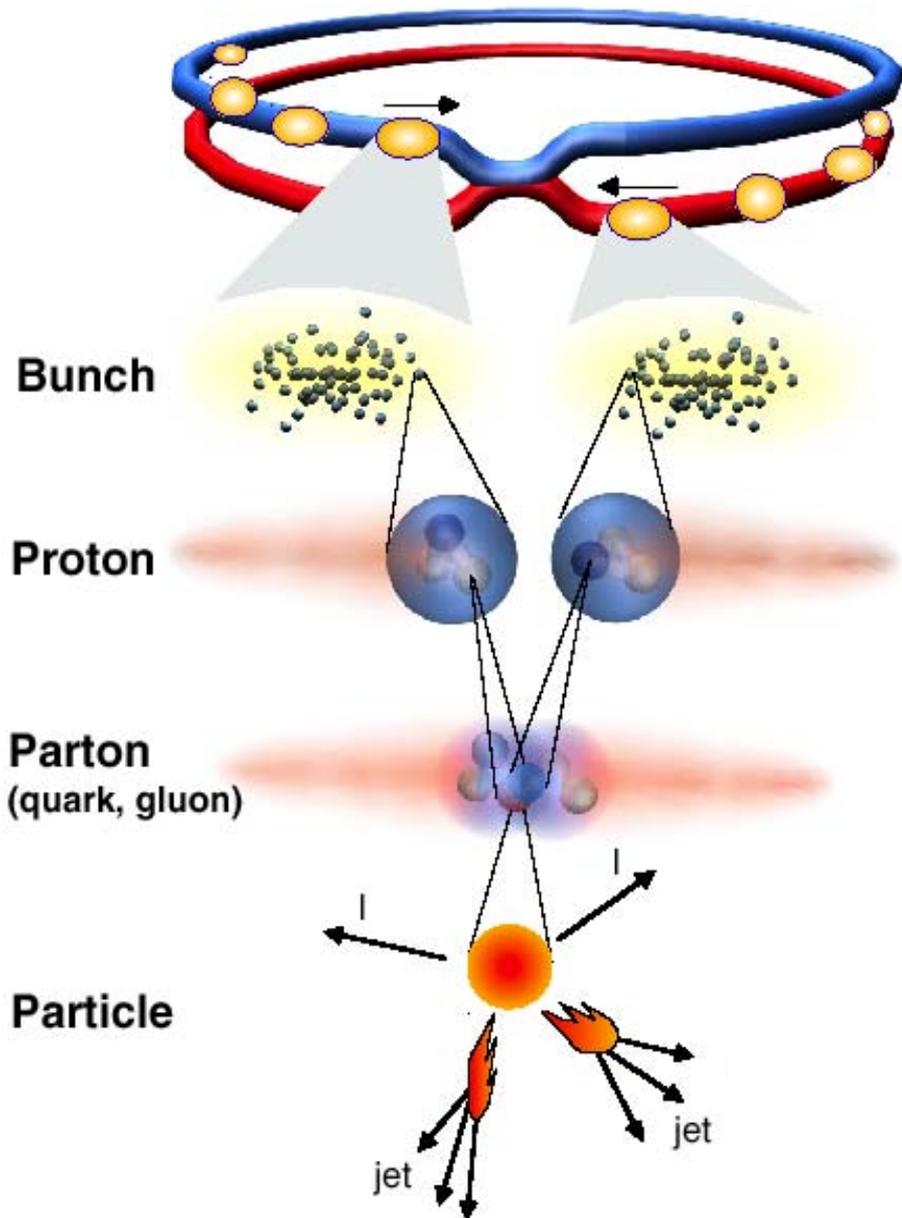


Beispiel: LEP



Protonen fliegen rund 10000 mal pro Sekunde durch den Ring

Proton-Proton-Kollisionen am LHC bei 14 TeV



Proton-Proton-Kollisionen
2835 Teilchenbündel (Bunch)

10^{11} Protonen / Bunch
Kollisionsrate 40 MHz (25 ns)
Schwerpunktenergie 14 TeV
(= 7400 x Ruheenergie der
kollidierenden Teilchen)

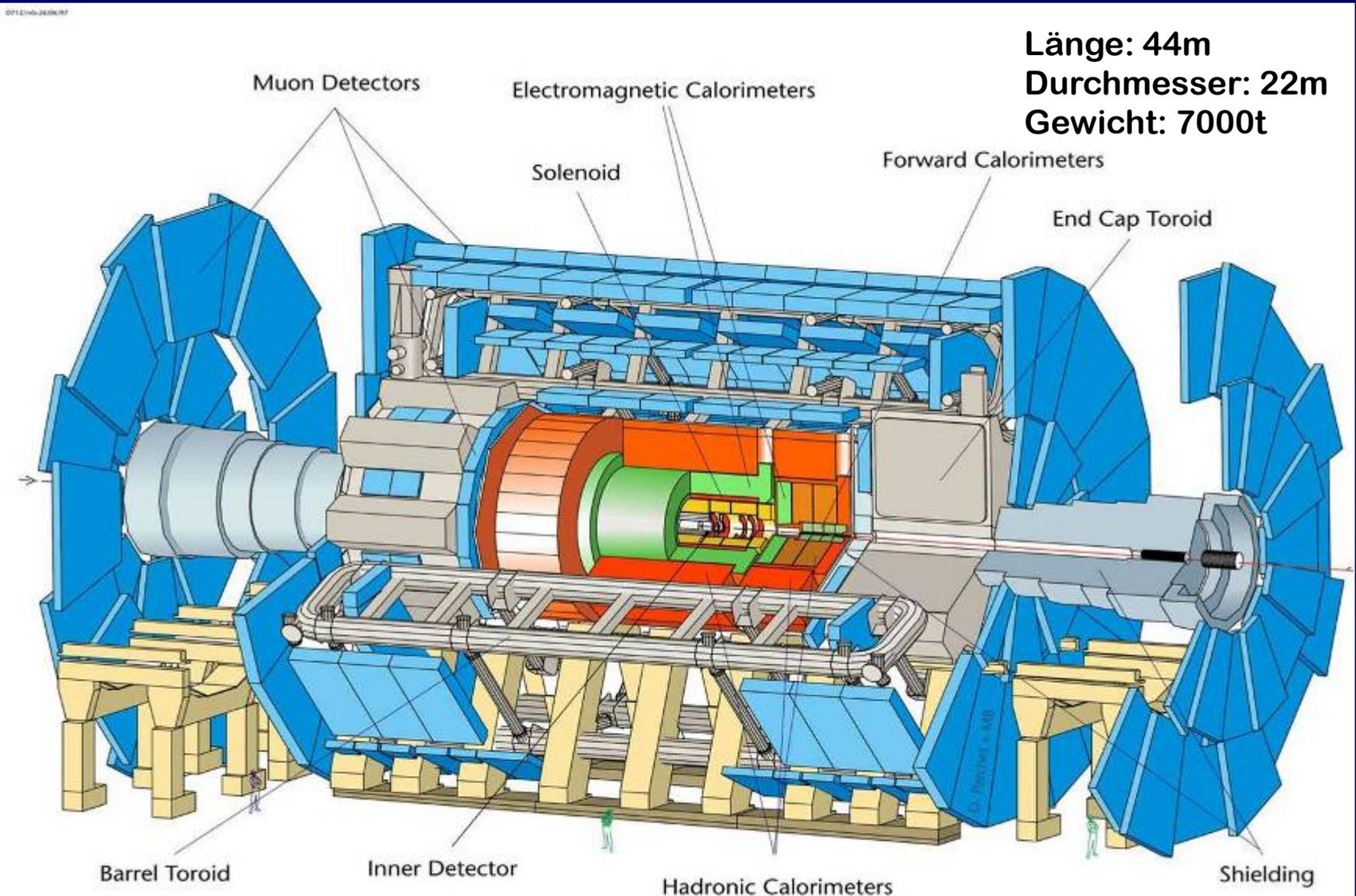
**Gesamtenergie der Protonen
entspr. kinet. Energie eines
Autos bei ~2000 km/h**

Schwerpunktenergie der
kollidierenden Quarks und Gluonen
bis einige TeV

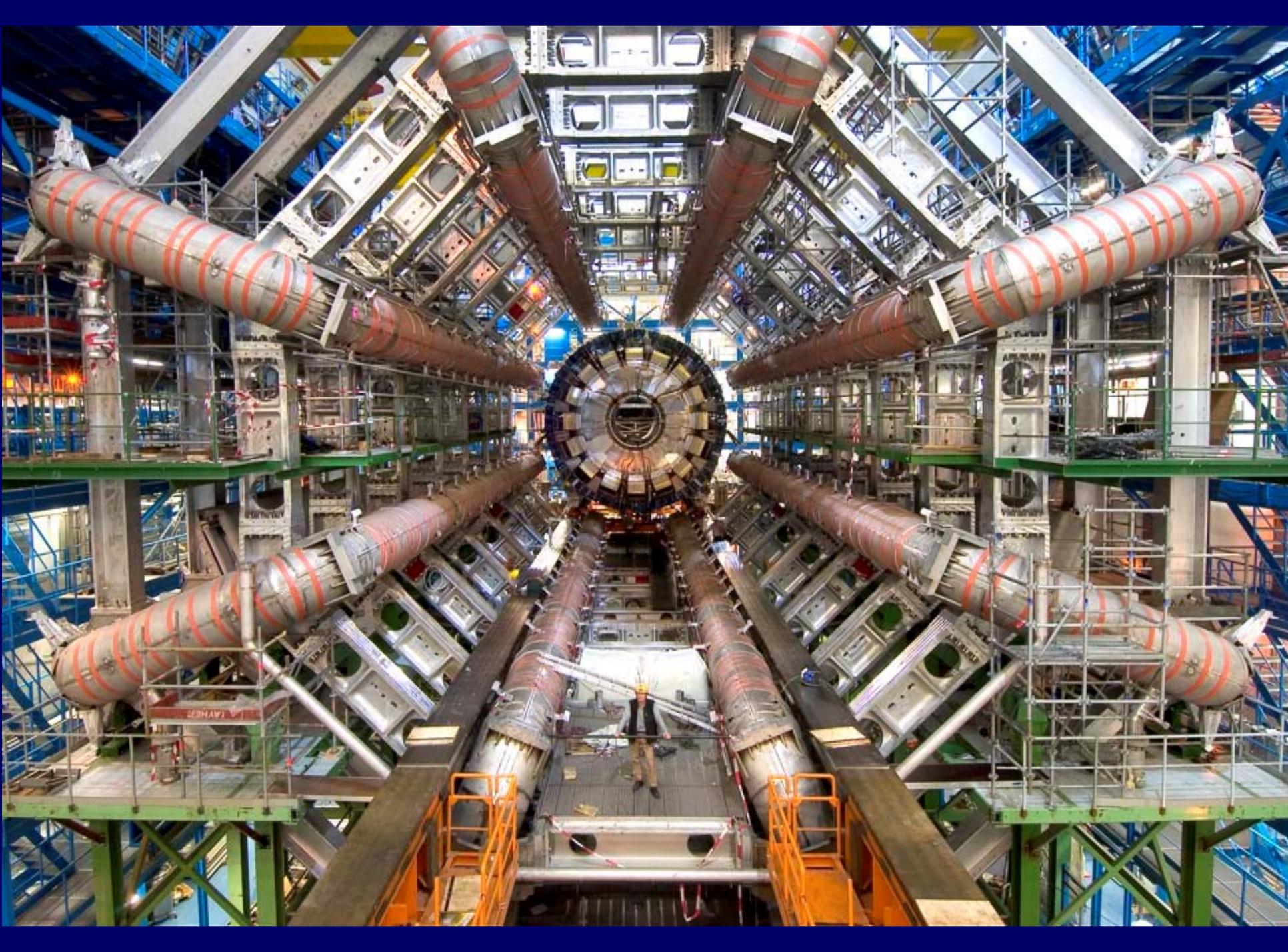
~25 pp-Kollisionen pro
Bunch-Kollision

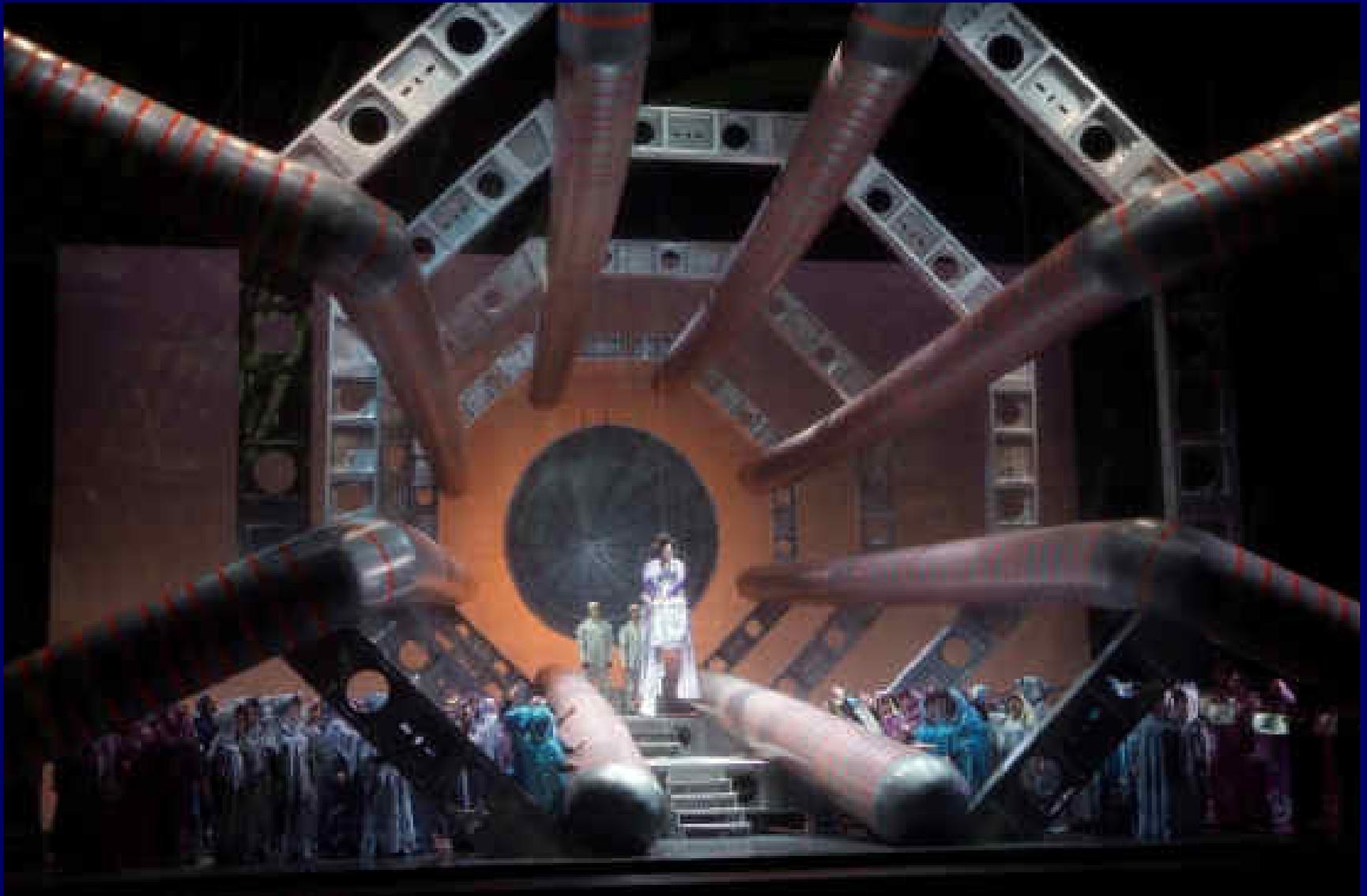
Interessante Ereignisse: 10^{-9} – 10^{-11}
unterdrückt!

Das ATLAS-Experiment: die Kollisionen sichtbar machen

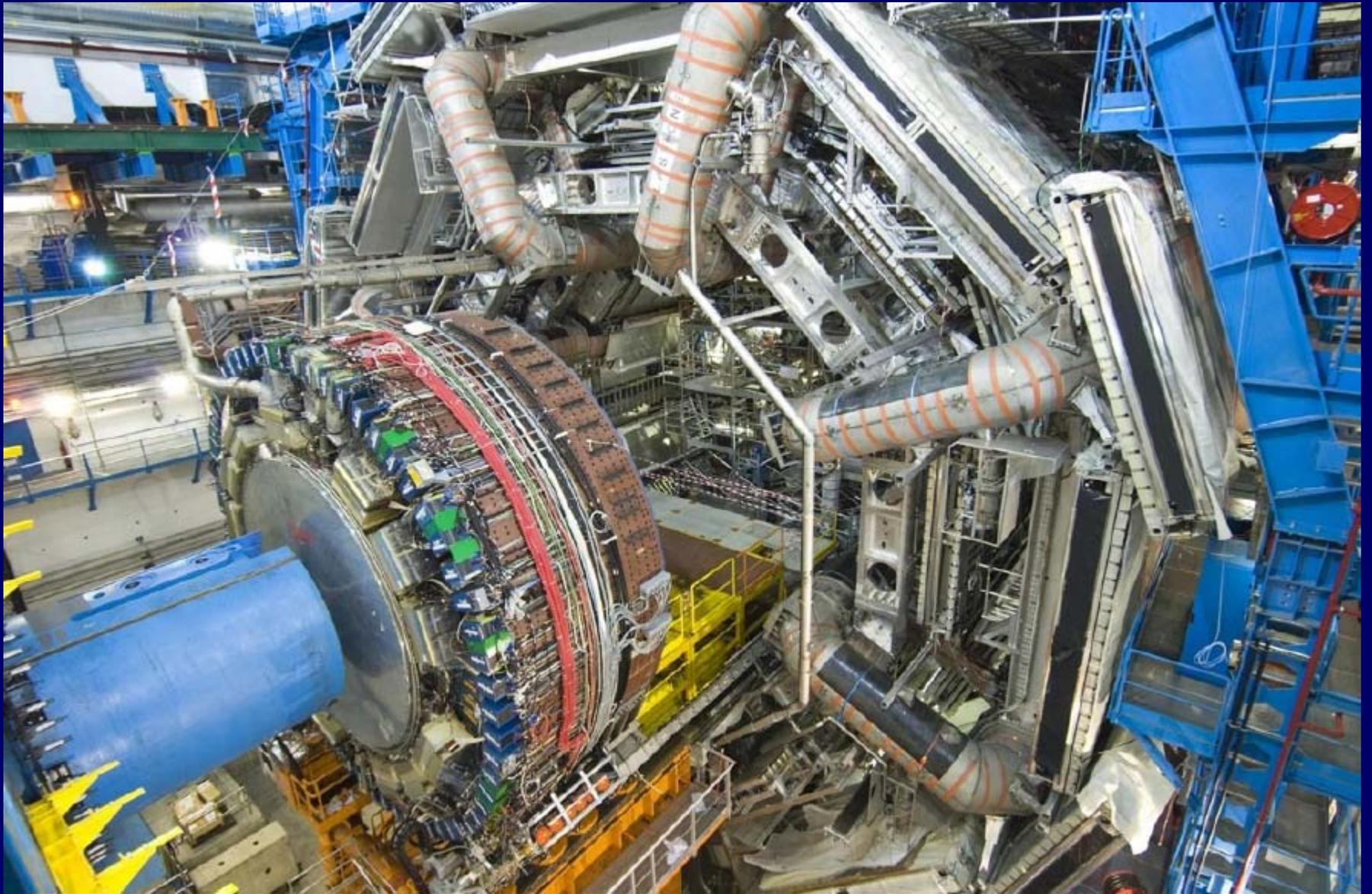


Warum so groß???





Bühnenbild „Les Troyens“ (Berlioz) in Valencia



Das ATLAS-Experiment: Teamwork!

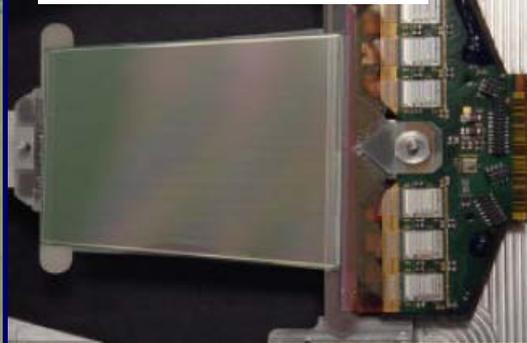
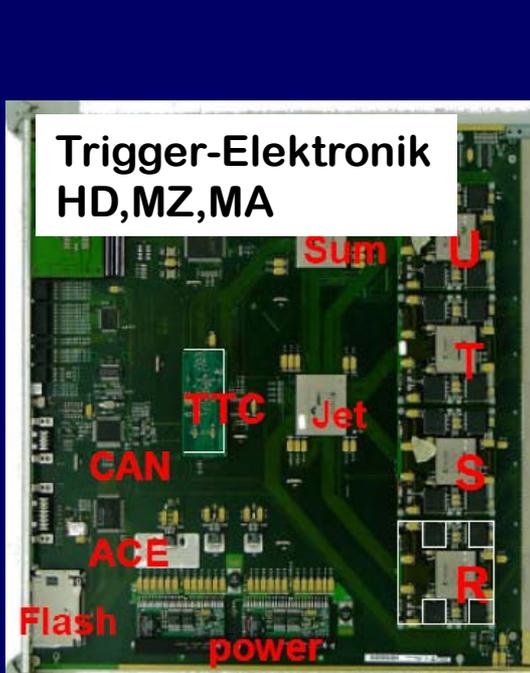


>1500 Physiker

~100 Nationen!

Nicht nur groß, sondern vorallem komplex!

Beispiele für in Deutschland gebaute Komponenten:



BMBF-Forschungsschwerpunkt
ATLAS Experiment

FSP 101

Physics on the TeV-scale at the Large Hadron Collider

ATLAS

Eine Datenflut

Kollision zweier Teilchenpakete alle 25 ns

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

Nur eine aus $10^9 - 10^{11}$ Kollisionen ist SUSY

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

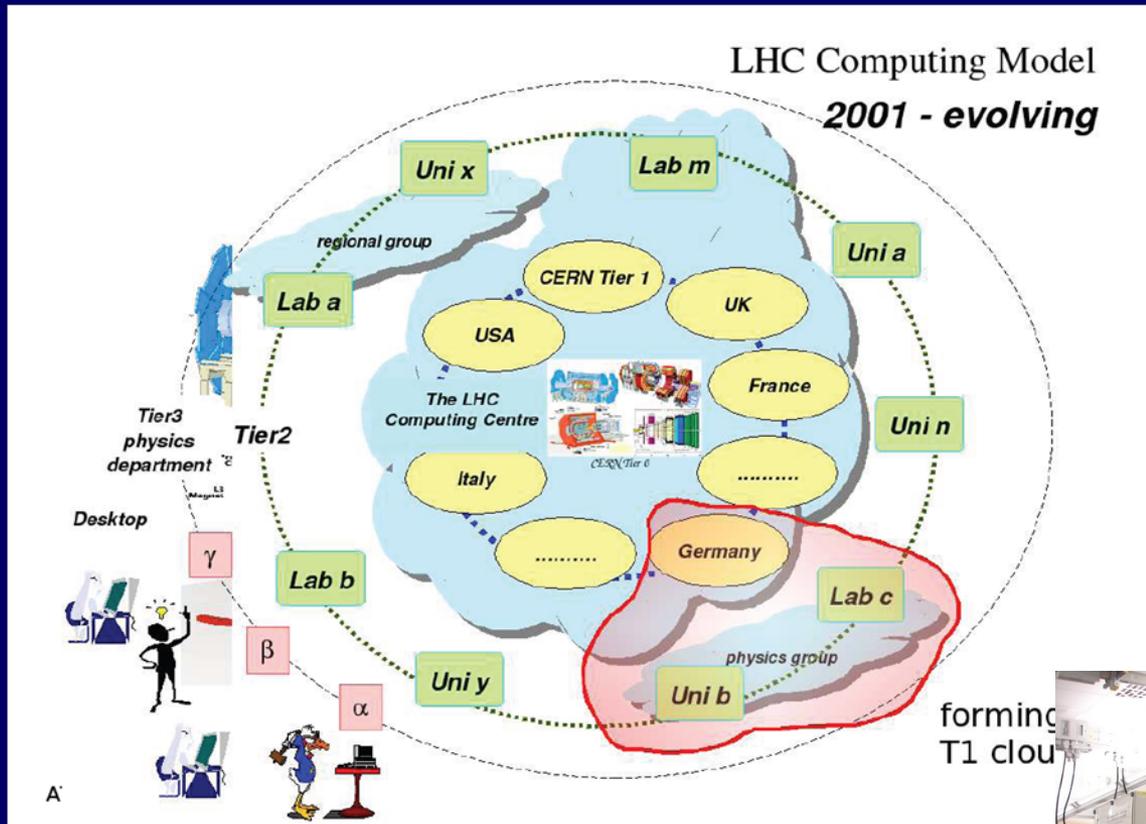


Getriggerte Ereignisse müssen mit 200 Hz auf Datenträger geschrieben werden (= 3 CD-ROMs pro Sekunde) – **20000m hoher CD-Turm pro Jahr!**

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

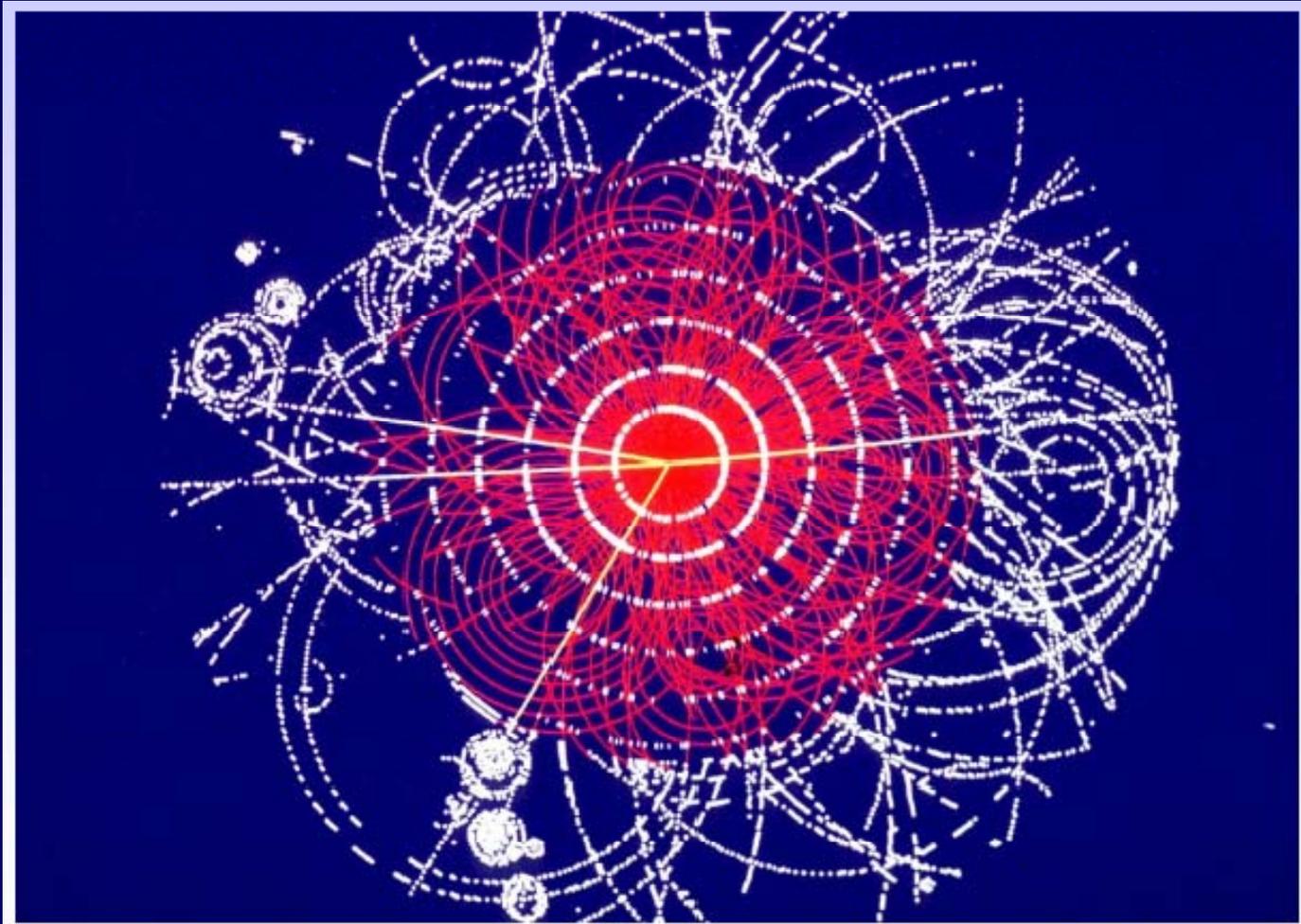
Gerade das macht es so spannend...

Trotzdem ein paar Beispiele:

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

Higgs-Entdeckung am LHC

Simulierte Kollision, in der ein Higgs-Teilchen entsteht



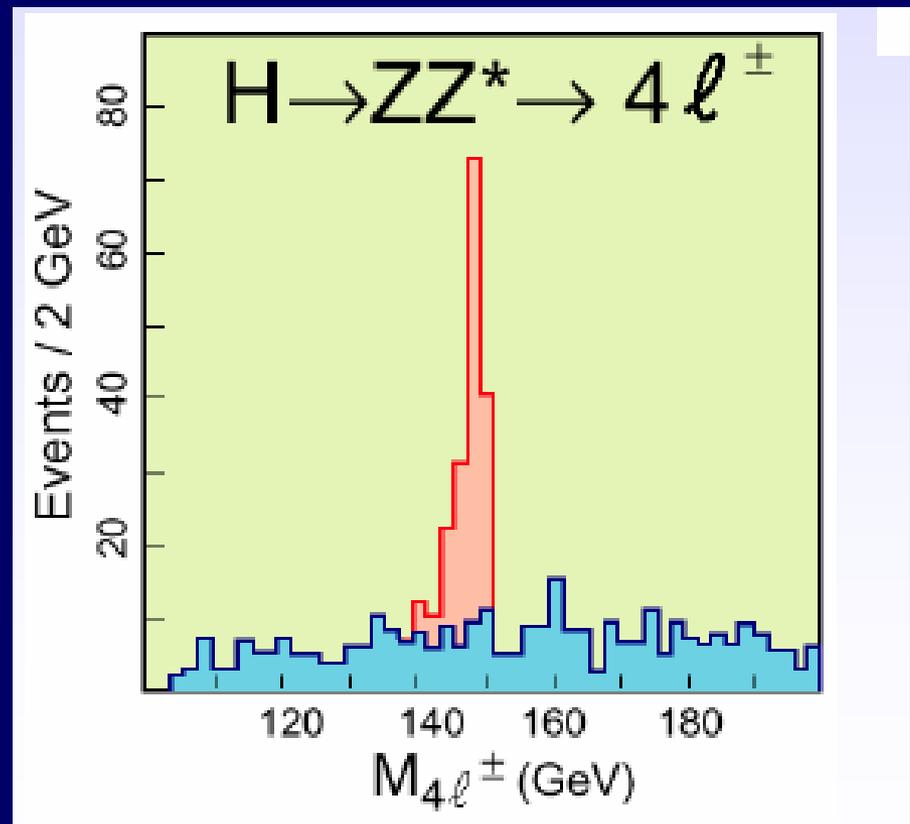
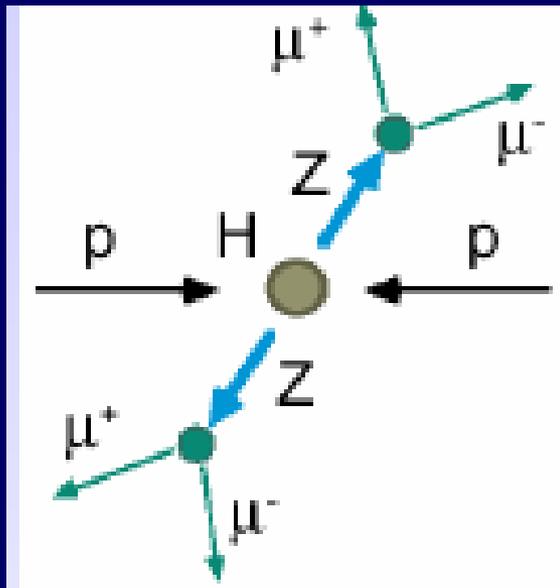
Nur 1 Higgs pro 10 000 000 000 000 Protonkollisionen

Higgs-Entdeckung am LHC

Woran kann man ein Higgs-Boson erkennen

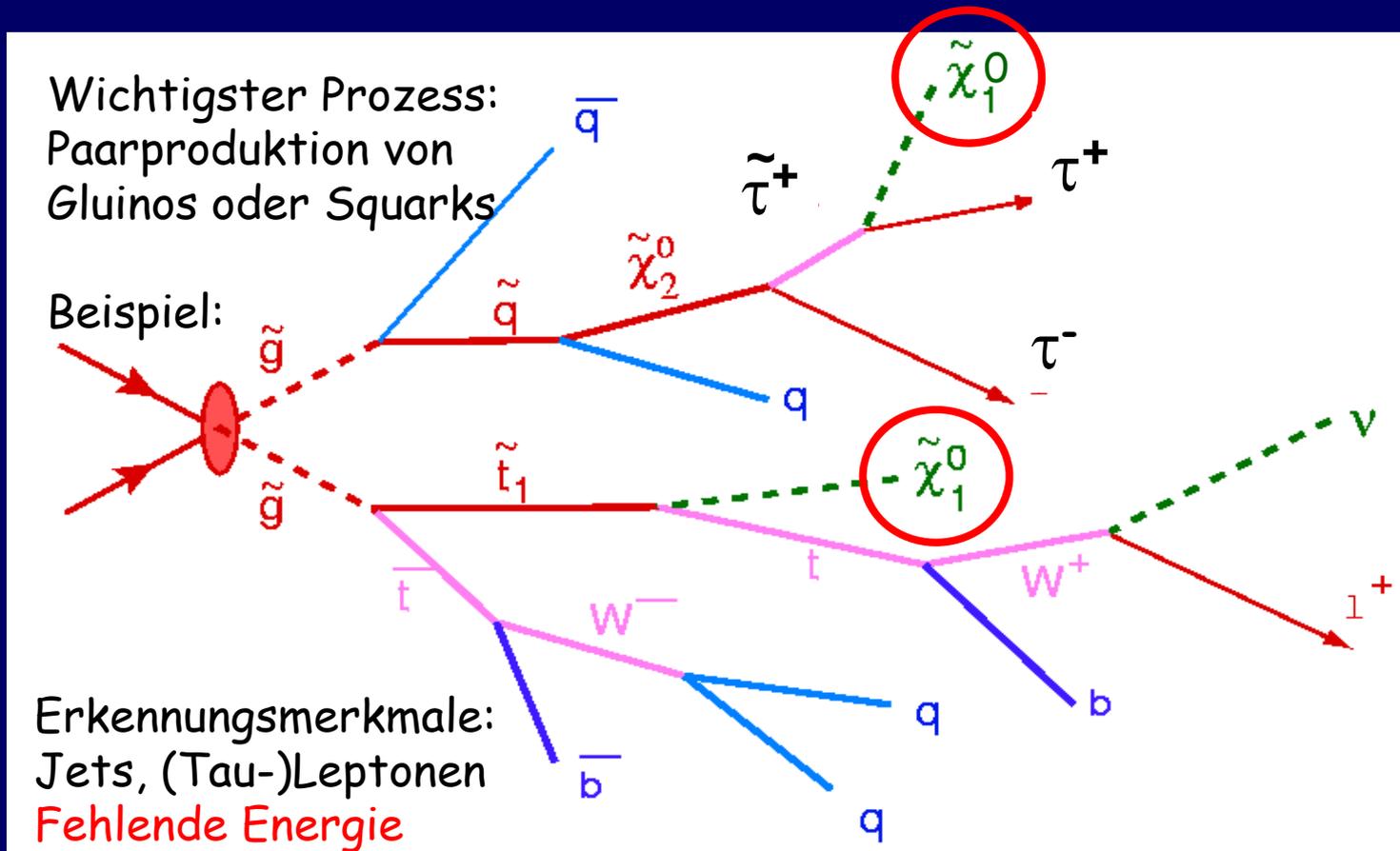
z.B. Higgs $\rightarrow Z + Z \rightarrow \text{Müon} + \text{Antimüon} + \text{Müon} + \text{Antimüon}$

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

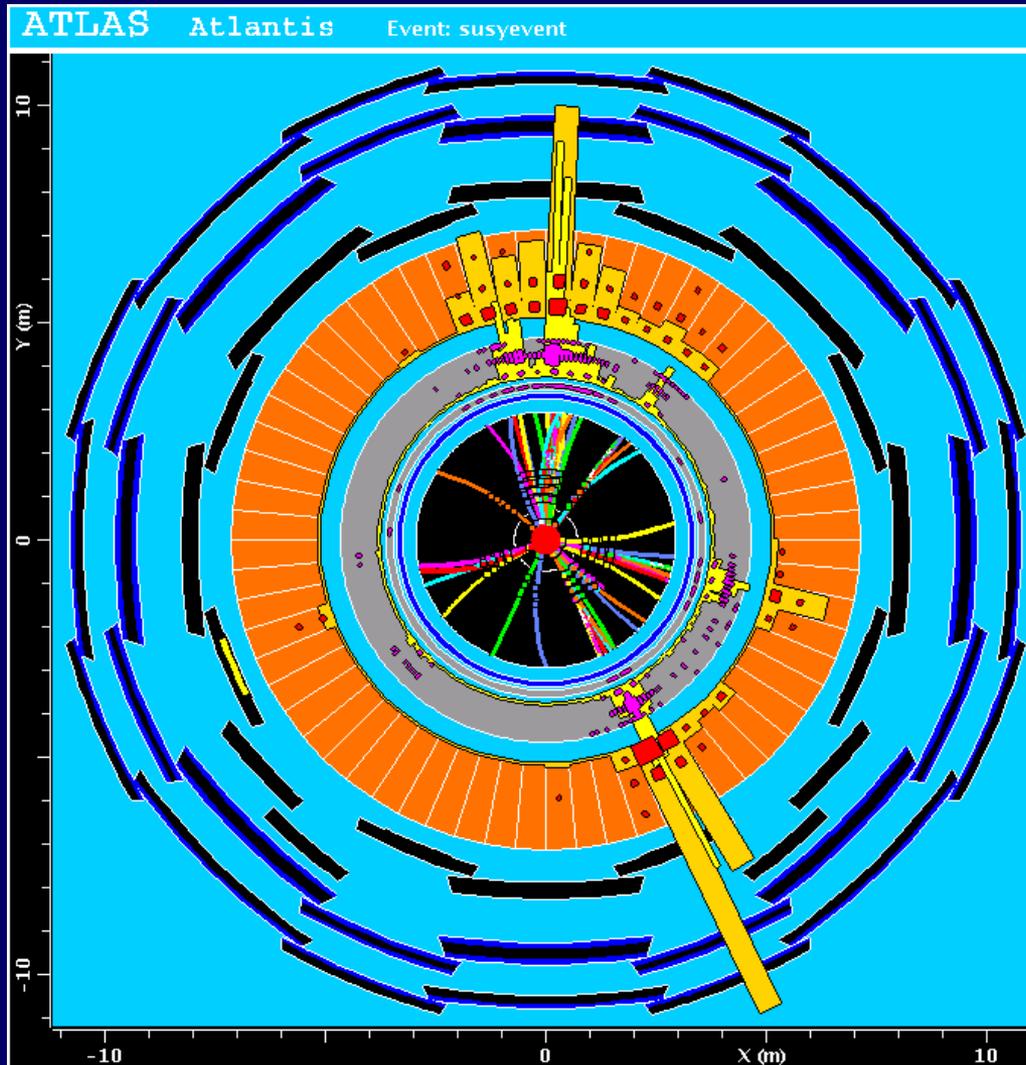


Supersymmetrische Teilchen

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



Eine (simulierte) Kollision am LHC mit SUSY-Teilchen



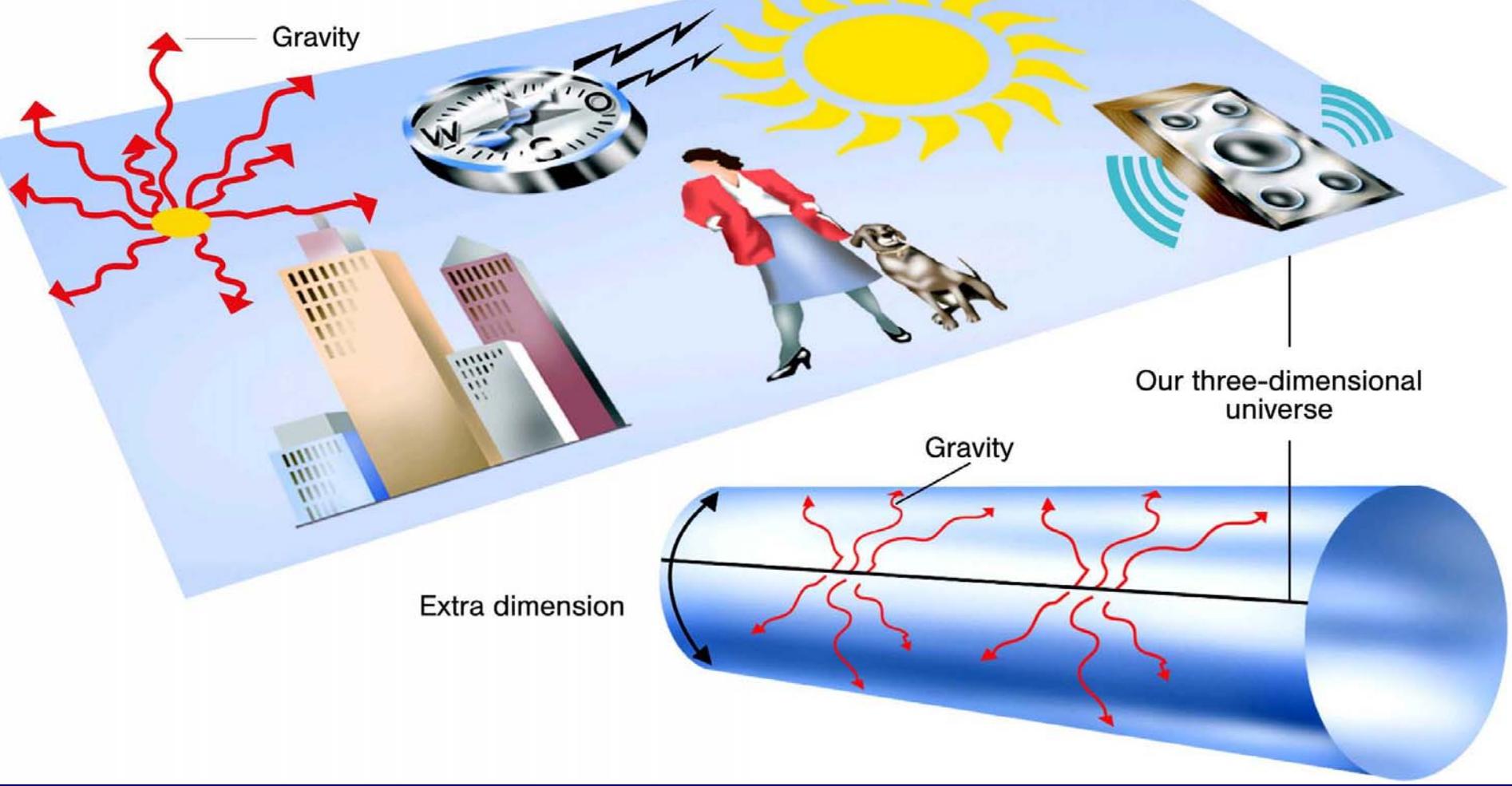
mit dem Auge nicht von
“normalen Prozessen”
(Untergrund) zu
unterscheiden

⇒ 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??

Neue Dimensionen



Auch so etwas könnte am LHC entdeckt werden...

Wann geht's los? Wann gibt es Ergebnisse?

Frühjahr 2008: Maschine und Experimente fertig

Herbst 2008: Erster Strahl im LHC – dann Panne...

Herbst 2009: Restart nach Reparatur und Verbesserung

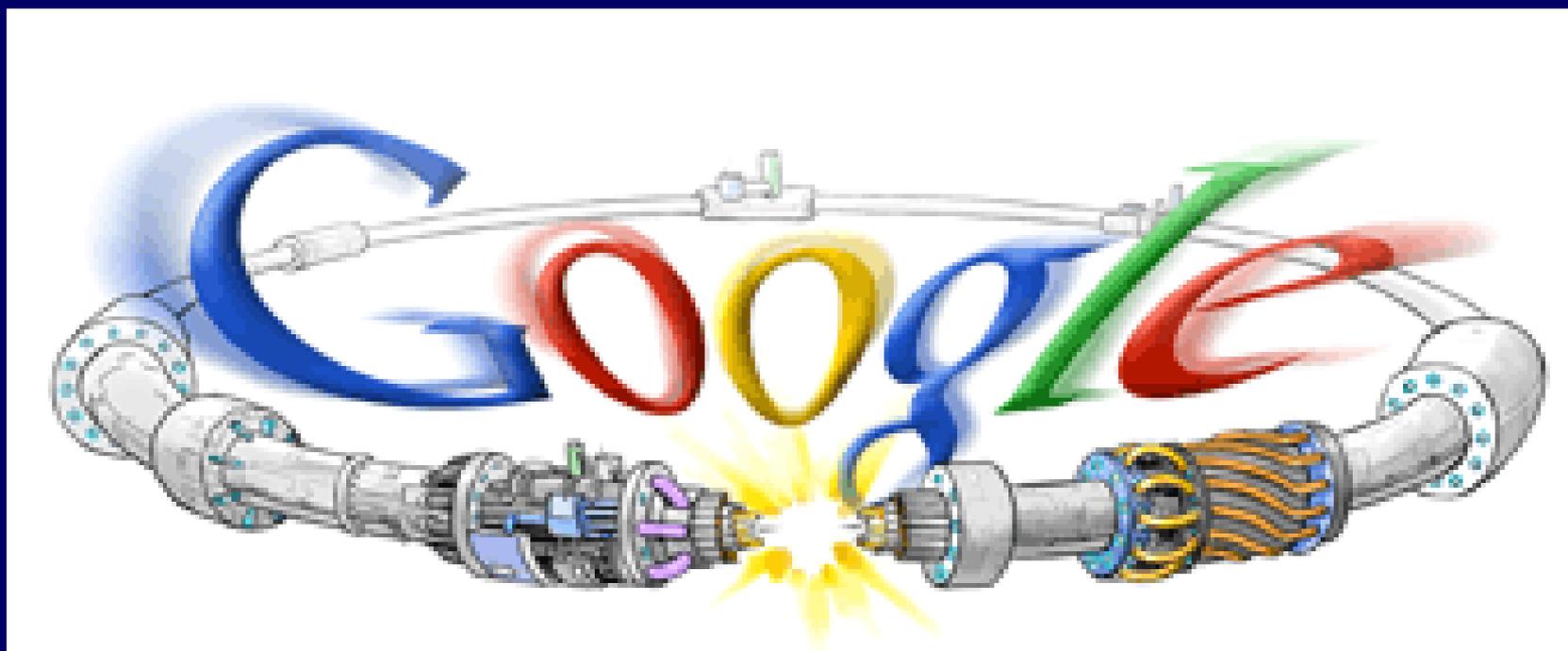
- erste Kollisionen bei Einschussenergie
- erste Kollisionen bei 2.36 TeV (Weltrekord)

März 2010: Kollisionen bei 7 TeV für 1-2 Jahre

dann Upgrade auf 14 TeV

Laufzeit 15-20 Jahre

First Beam Day

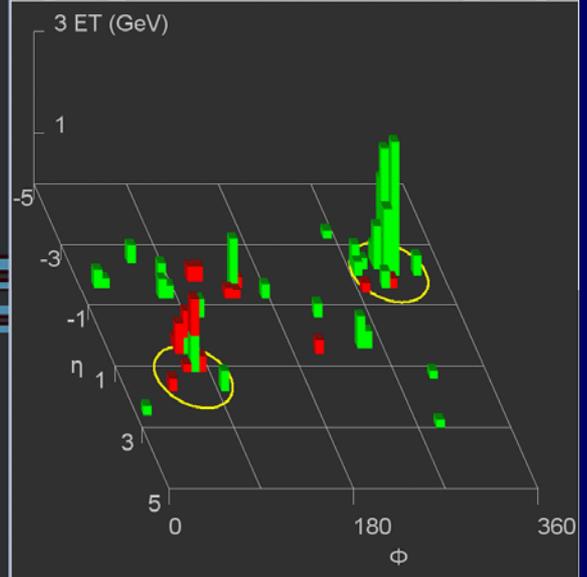
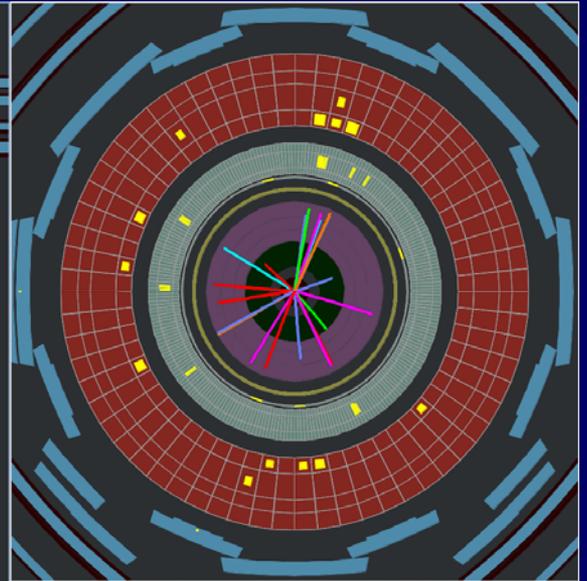
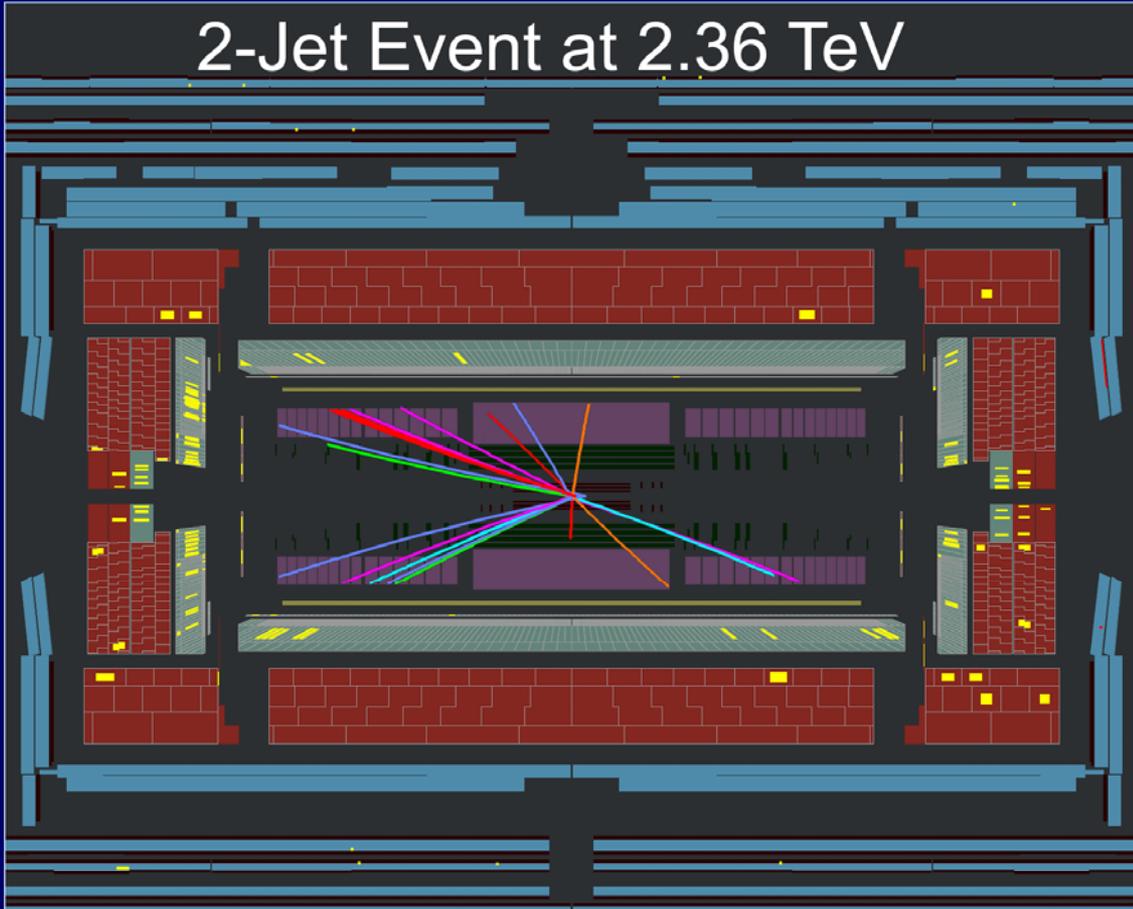


Erste Ereignisse in ATLAS



Erste Ereignisse in ATLAS

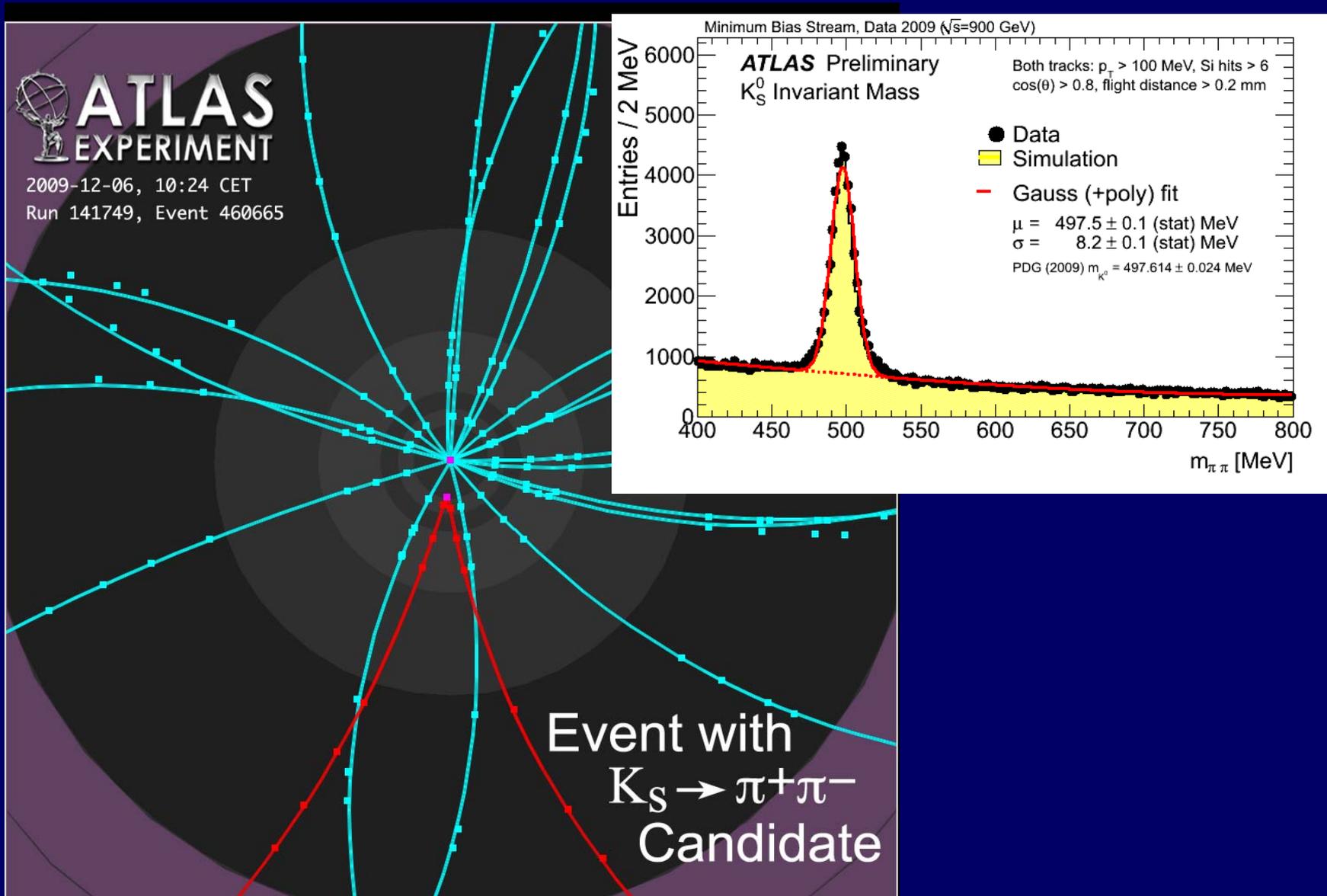
2-Jet Event at 2.36 TeV



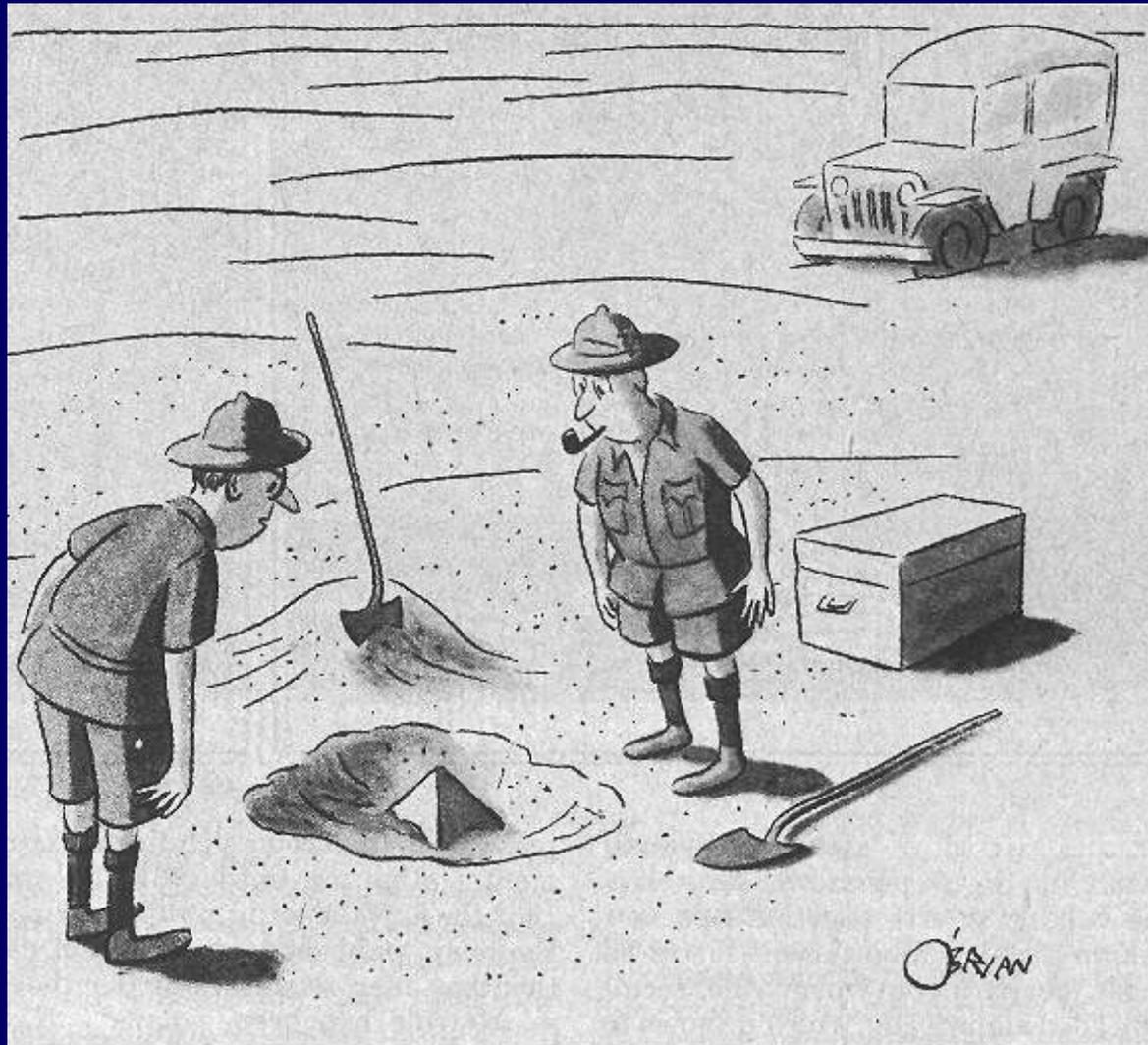
 **ATLAS**
EXPERIMENT

2009-12-08, 21:40 CET
Run 142065, Event 116969

“Wiederentdeckung” bekannter Teilchen



Anstatt einer Zusammenfassung



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