

Physik an der Teraskala:

Ein neues Fenster in den Mikrokosmos

Klaus Desch

Physikalisches Institut der Universität Bonn

Antrittsvorlesung – Dies academicus 06.12.2006

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

1. Was wir schon wissen

2. Große Fragen

3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

6. Ausblick

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

1. Was wir schon wissen

2. Große Fragen

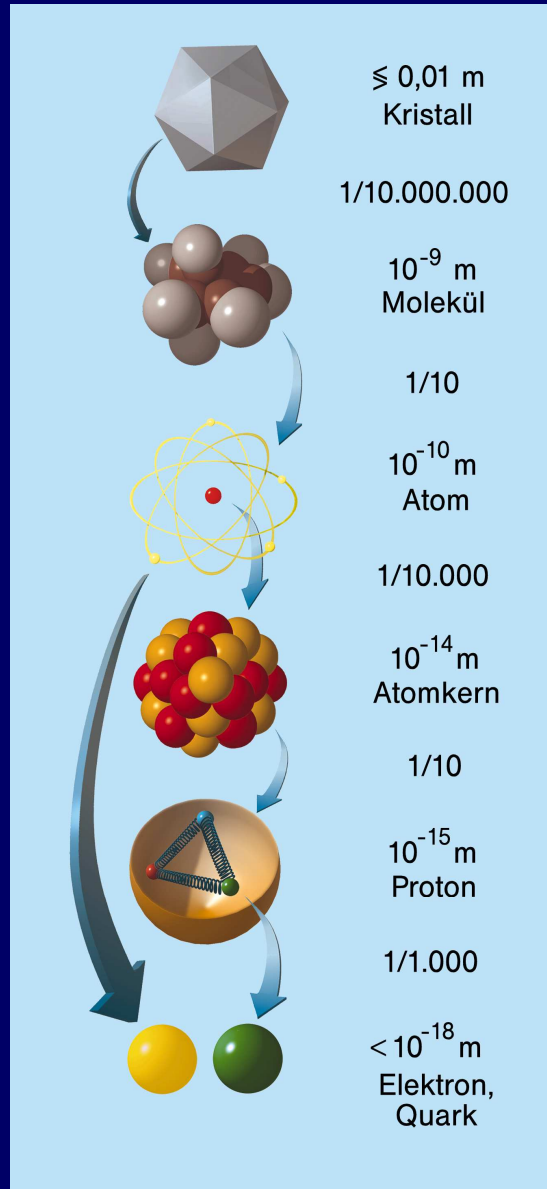
3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

6. Ausblick

Aufbau der Materie

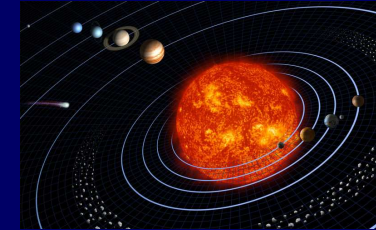


→ Entfernung zum Pluto

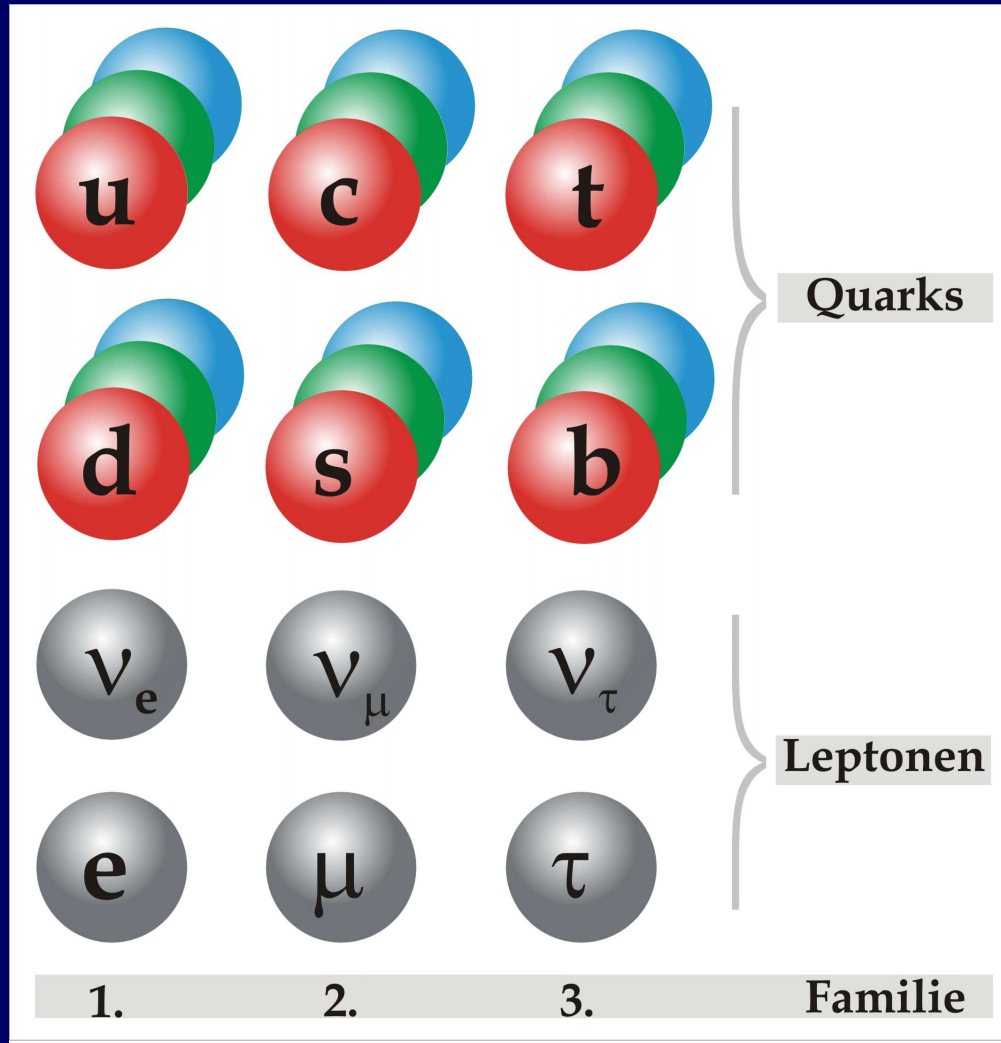
→ Mond

→ Fußballstadion

→ < Fußball



Im Innersten: Bausteine der Materie



Es gibt genau drei Familien von Quarks und Leptonen

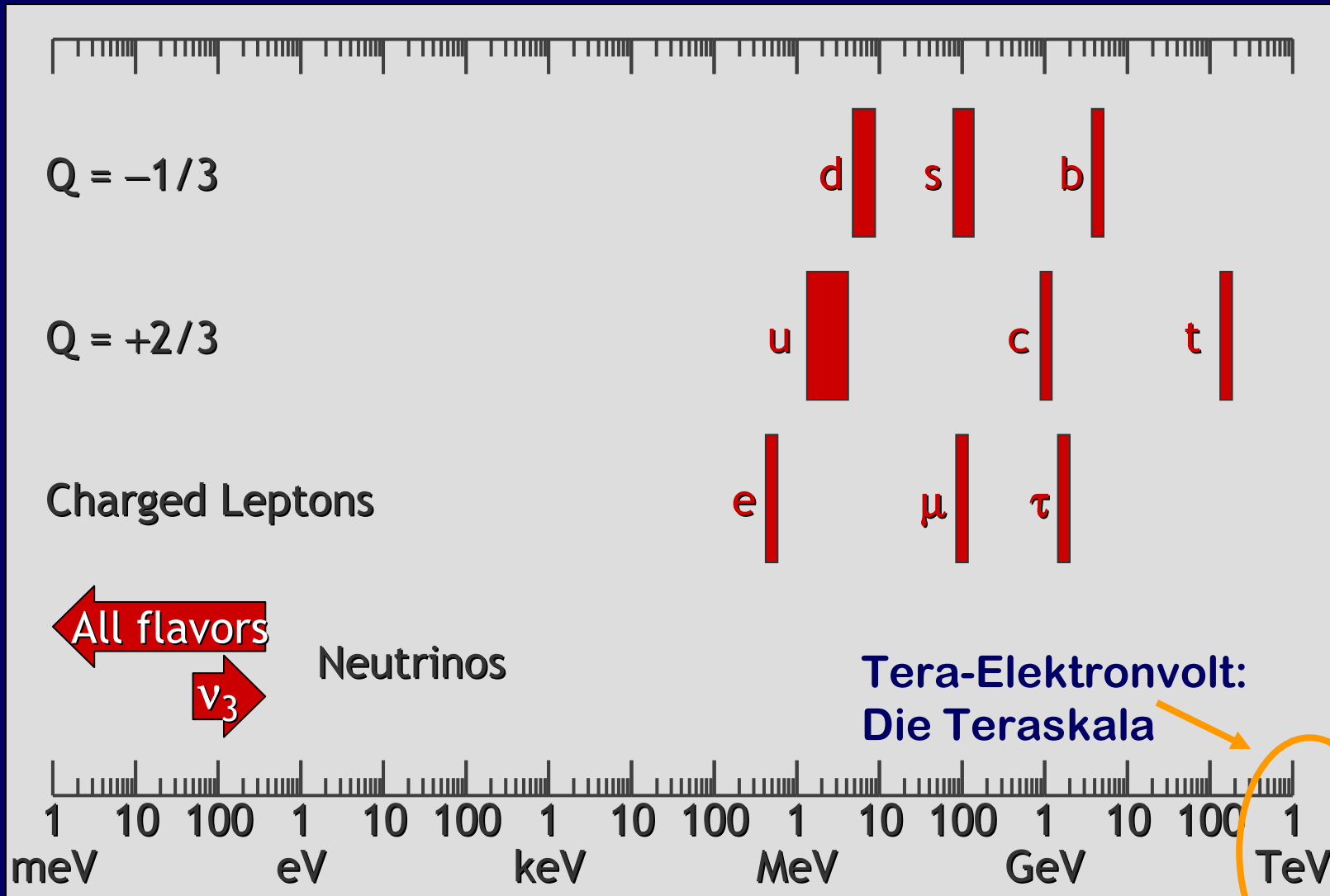
Fermionen (Spin- $1/2$)
Pauli-Prinzip \Rightarrow
eignen sich zum Aufbau komplexer Strukturen

“Dinge”

Alle experimentell nachgewiesen!

Unterschied: Massen

Massen der Elementarteilchen

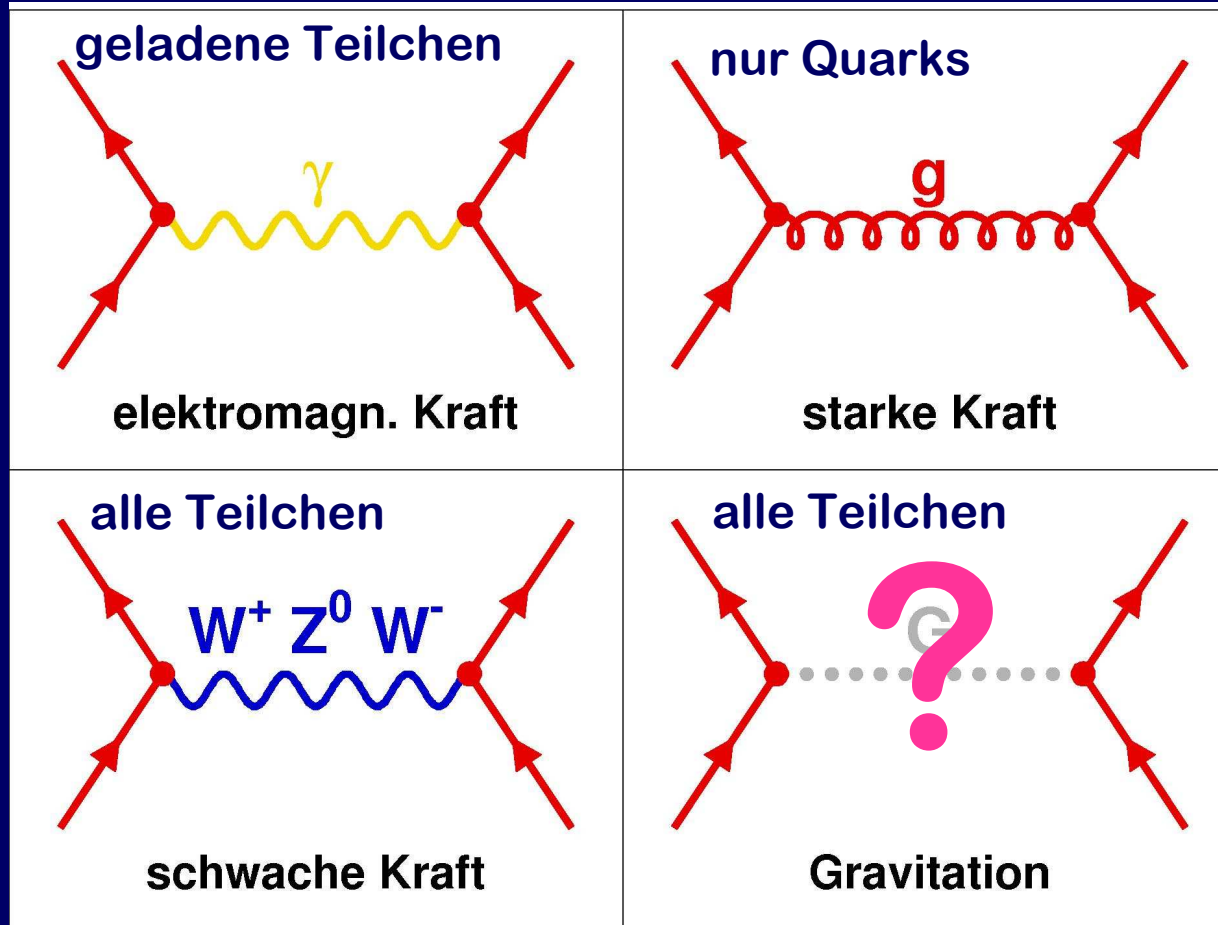


Warum so kompliziert???

Im Innersten: Kräfte

“Beziehung zwischen den Dingen”

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:

es gibt sehr viele Gründe, dass das Ende des Standard-Modells nah ist

“neue Physik” an der Teraskala

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

1. Was wir schon wissen

2. Große Fragen

3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

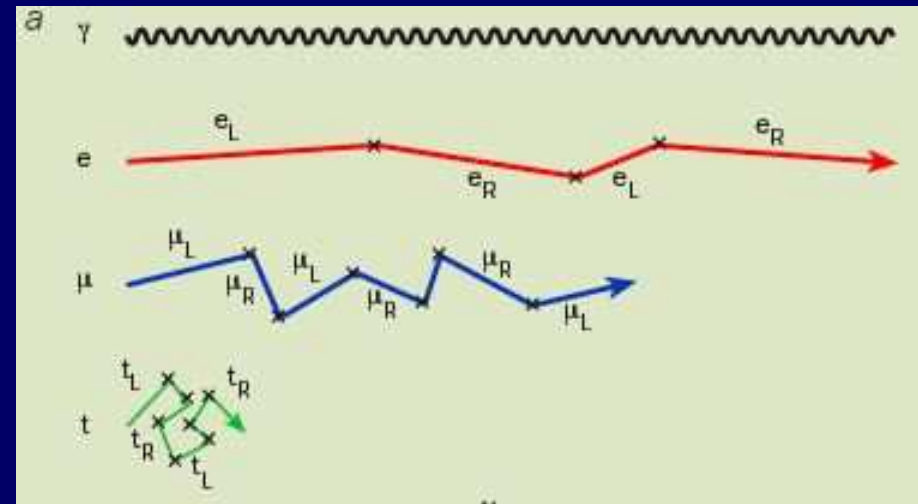
6. Ausblick

Das Rätsel der Masse: Der Higgs-Mechanismus



Peter Higgs (1964!)

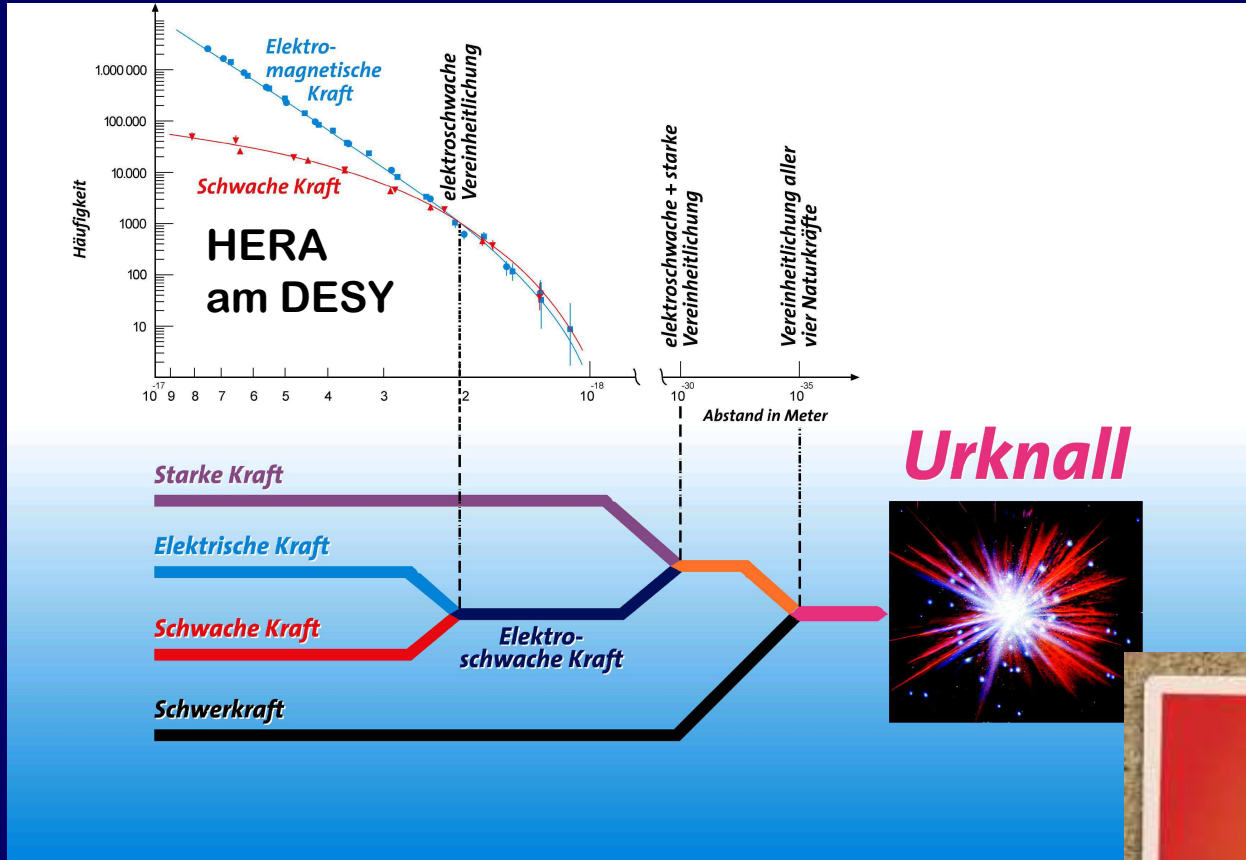
Ist Masse keine Eigenschaft der Teilchen, sondern nur das Ergebnis einer permanenten Kraft ???



In ein paar Jahren werden wir es wissen!

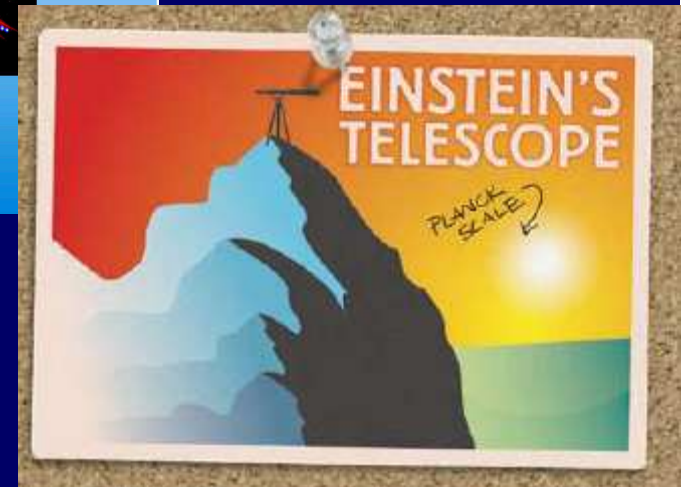
⇒ Large Hadron Collider LHC

Noch größere Fragen...



Gibt es eine Urkraft ???

Vielleicht bei 10^{19} GeV (Planck-Skala):
wir brauchen ein "Teleskop": Präzision

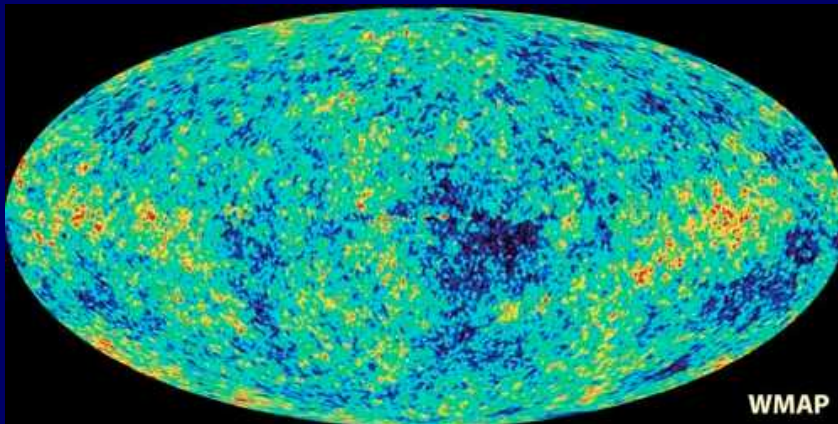


Noch größere Fragen...

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...

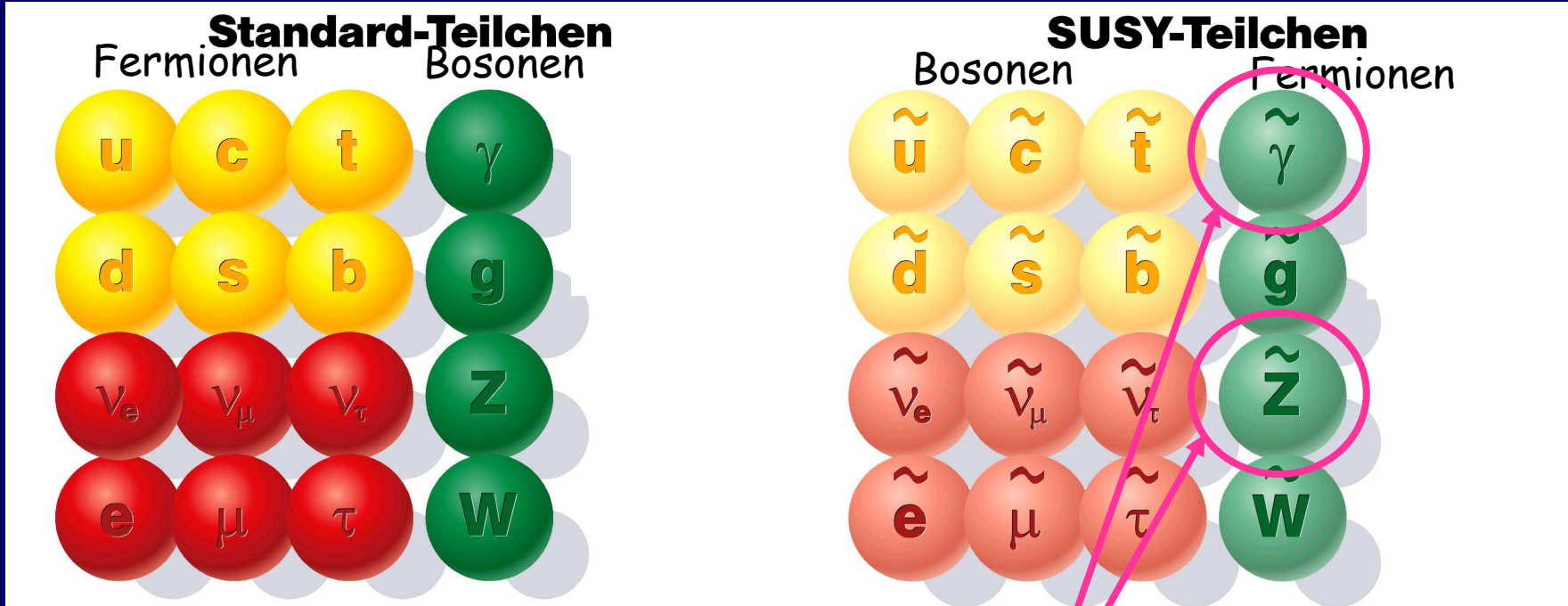


Woraus besteht die dunkle Materie ???

Mögliche Lösungen

“Symmetrie zwischen den Dingen und ihren Beziehungen”

Supersymmetrie (SUSY):



SUSY kann konzeptionelle Probleme lösen

Brücke zur String-Theorie?

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. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

6. Ausblick

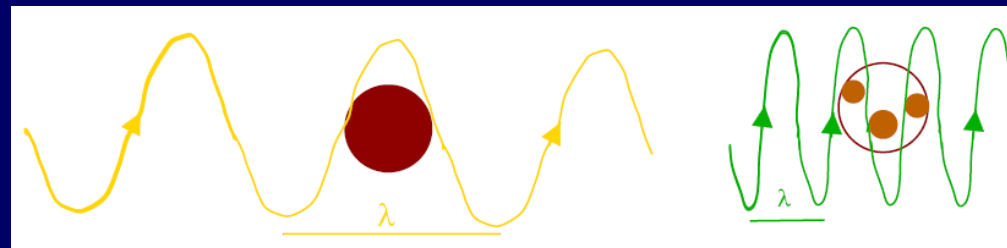
Wie kann man kleine Bausteine
"sehen"?

$$\text{Energie} = hc / \text{Wellenlänge}$$



Energie, Scotty

Kleine Strukturen werden nur mit großer Energie
sichtbar



Wie kann man neue schwere Teilchen erzeugen?

$$\text{Energie} = c^2 * \text{Masse}$$

Schwere Teilchen können mit großer Energie erzeugt
werden

⇒ Teilchenbeschleuniger

Teilchen an die Teraskala 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)

Der Name **Teraskala** kommt von 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

Was macht die Teraskala so besonders?

Wir wissen natürlich nicht, **was** an der Teraskala passieren wird.

Aber: wir sind ziemlich sicher, **dass** etwas grundlegend neues passieren wird

1. Das Higgs-Boson (wenn es existiert) kann nicht schwerer als ~ 1 TeV sein (sonst erfüllt es seinen Zweck nicht)
2. Wenn es **existiert**, muss es einen Mechanismus im TeV-Bereich geben, der dafür sorgt, dass es nicht viel schwerer ist (“natürliche” Higgs-Masse $\sim 10^{16}$ TeV !)
3. Wenn es **nicht existiert**, wird das Standard-Modell bei ~ 1 TeV widersprüchlich, also sinnlos: neue Phänomene (Teilchen?) müssen in Erscheinung treten

eine Win-Win Situation...

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

1. Was wir schon wissen

2. Große Fragen

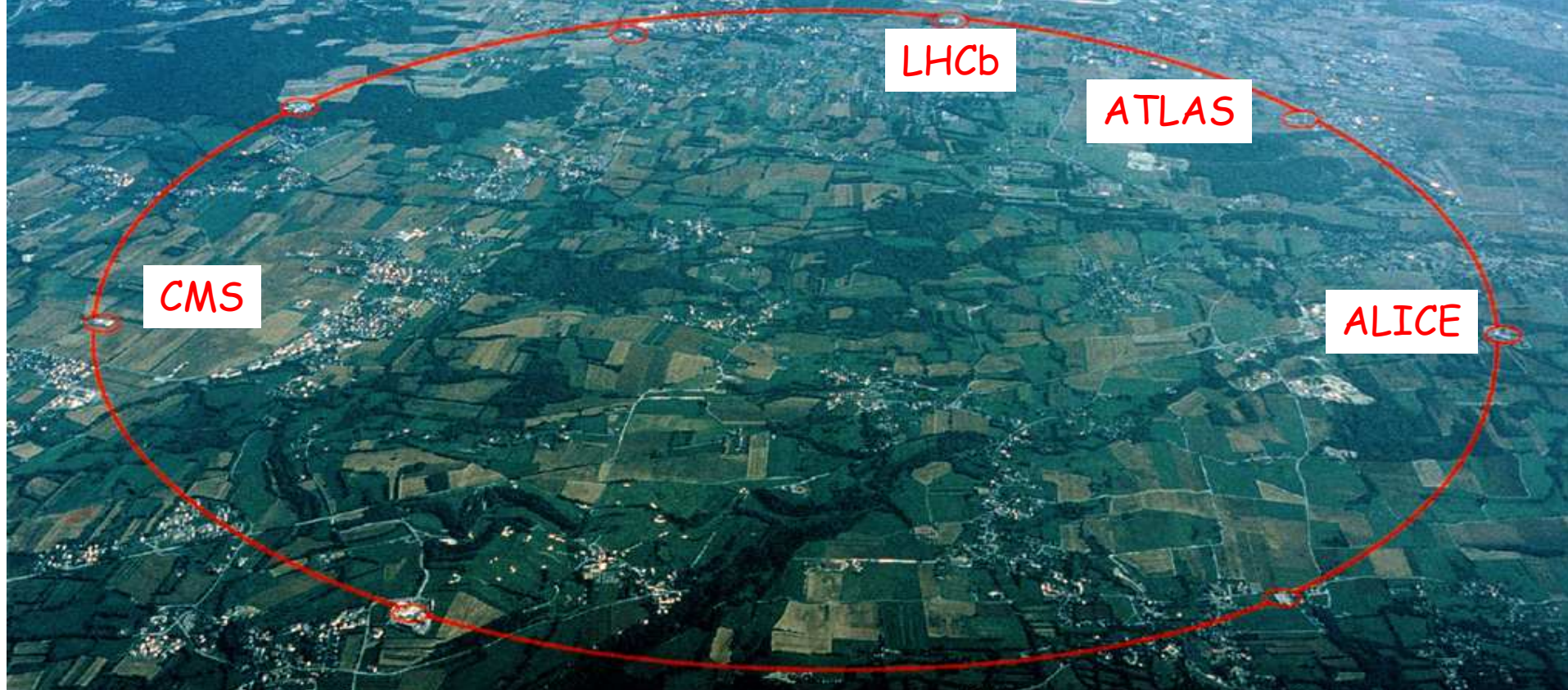
3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

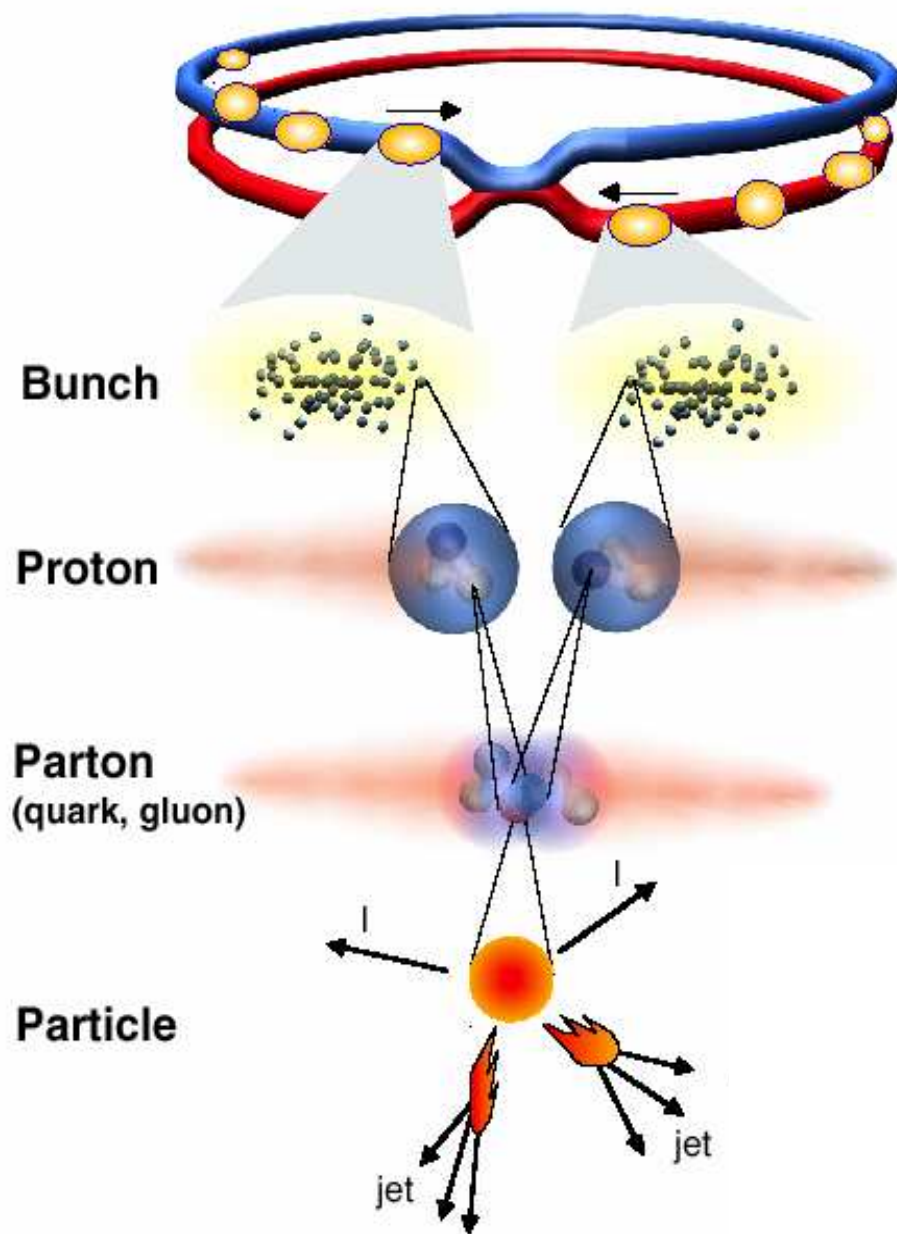
6. Ausblick

Der Large Hadron Collider LHC





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)

Schwerpunktenergie der
kollidierenden Quarks und Gluonen
bis einige TeV

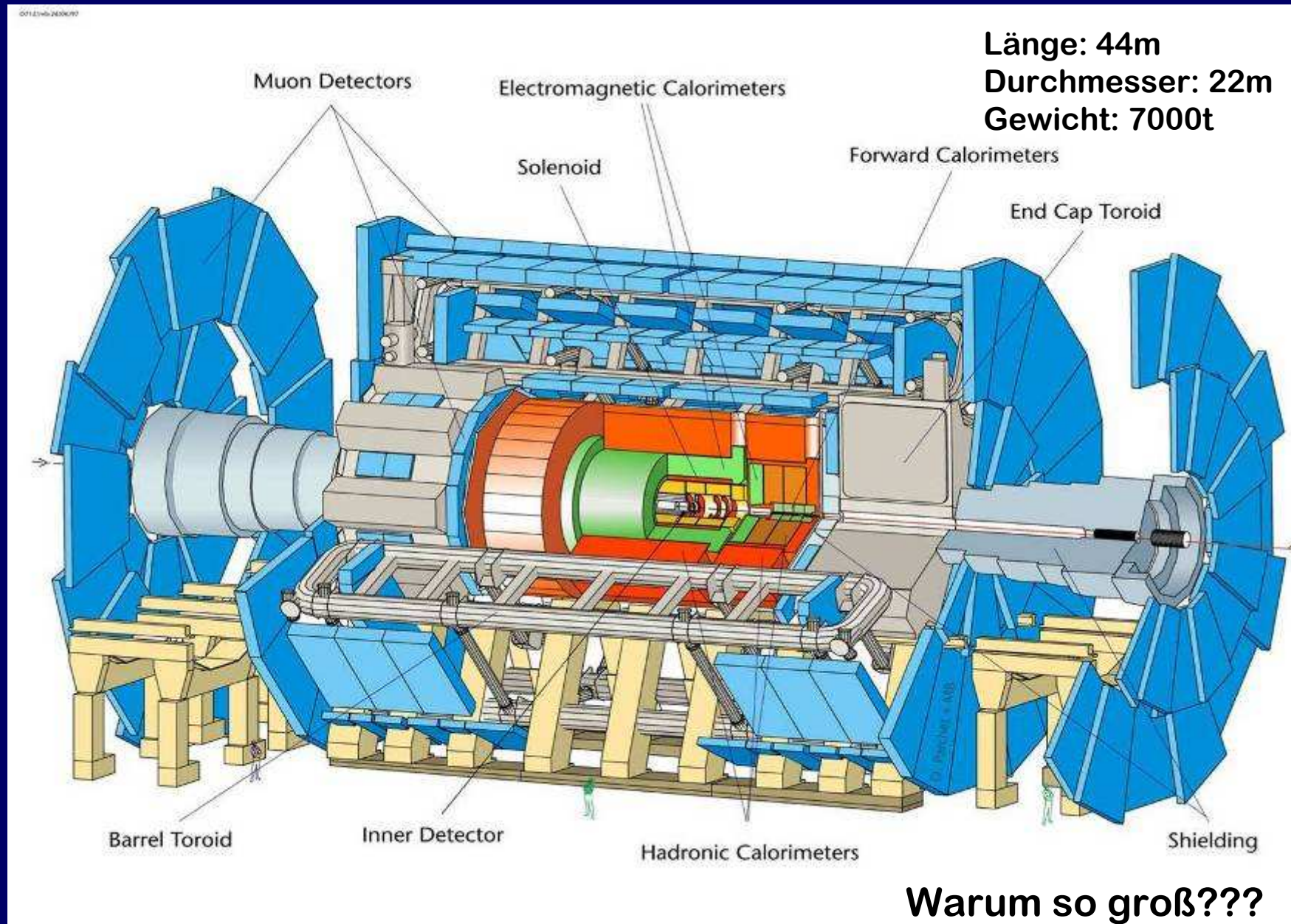
~25 pp-Kollisionen pro
Bunch-Kollision

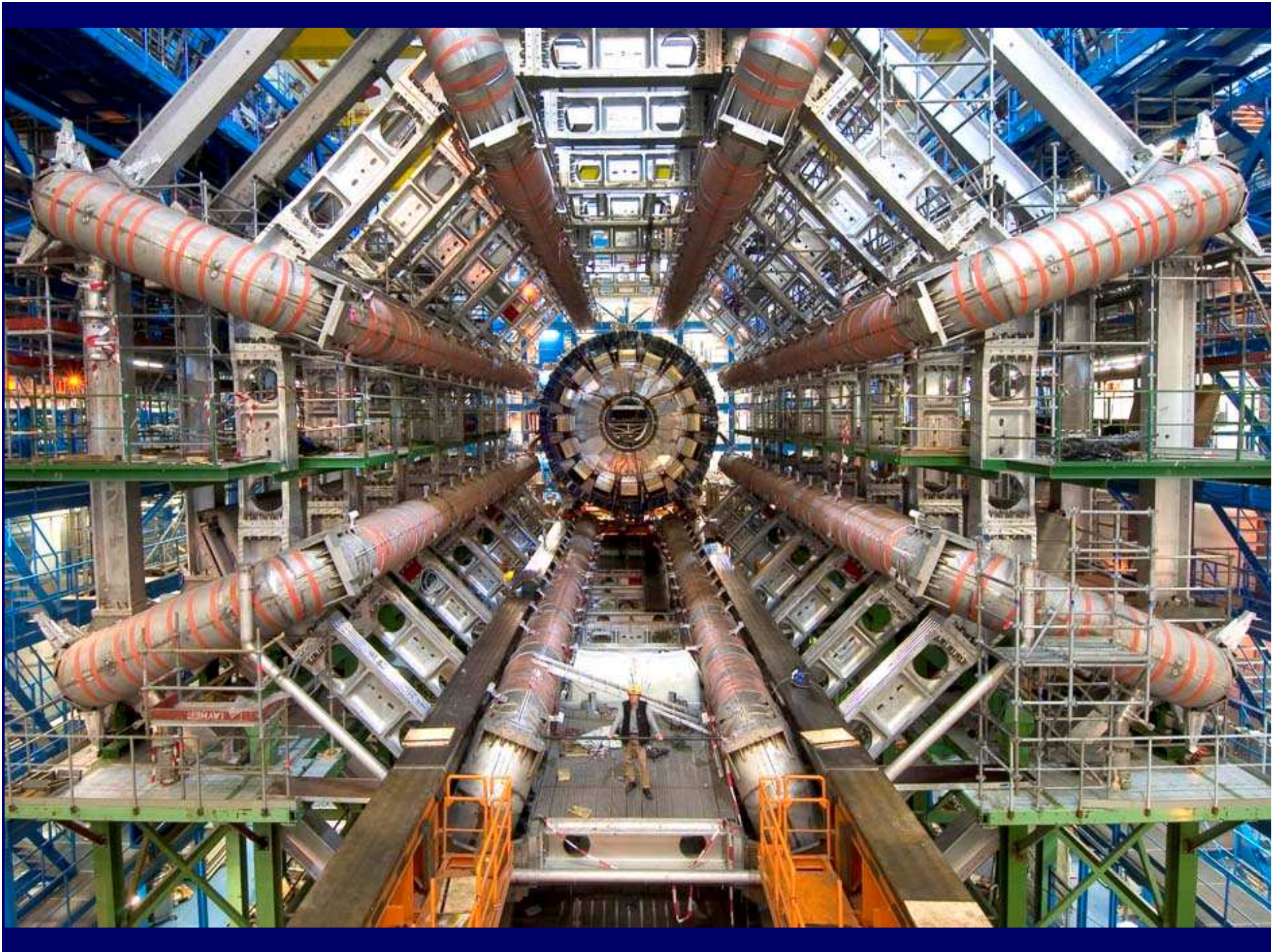
Interessante Ereignisse: 10^{-9} – 10^{-11}
unterdrückt!

Was passiert am LHC?



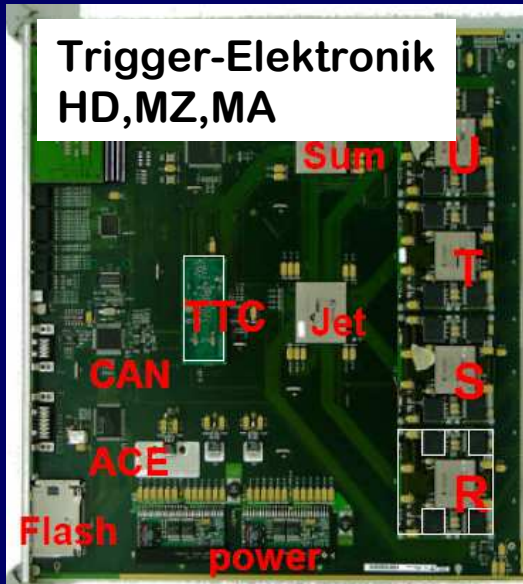
Das ATLAS-Experiment: die Kollisionen sichtbar machen



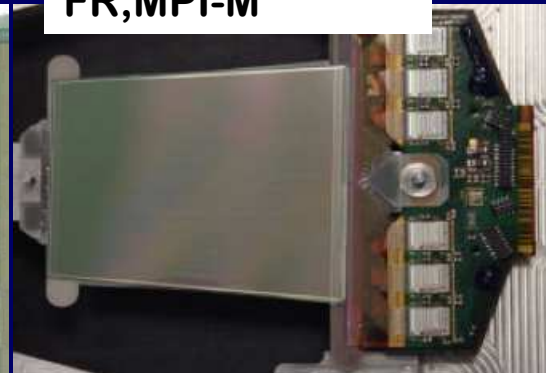


Nicht nur groß, sondern vorallem komplex!

Beispiele für in Deutschland gebaute Komponenten:



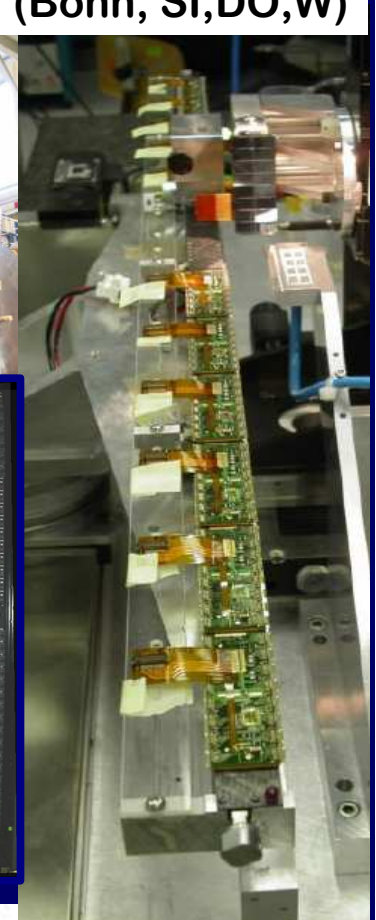
Trigger-Elektronik
HD, MZ, MA



Si-Spur-Detektor
FR, MPI-M



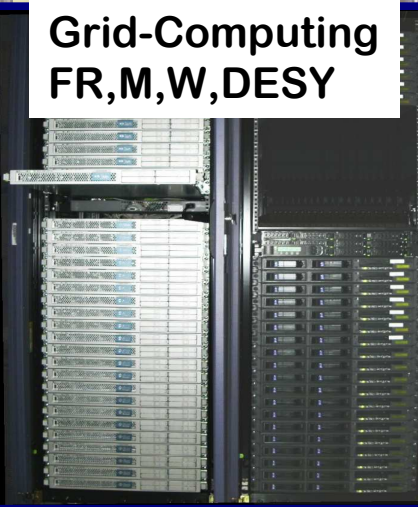
Kalorimeter
MPI-M, MZ, W



Pixel-Detektor
(Bonn, SI, DO, W)



Myon-Detektor
FR, MPI-M, LMU-M



Grid-Computing
FR, M, W, DESY

BMBF-Forschungsschwerpunkt
ATLAS Experiment

Physics on the TeV-scale at the Large Hadron Collider

FSP 101
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



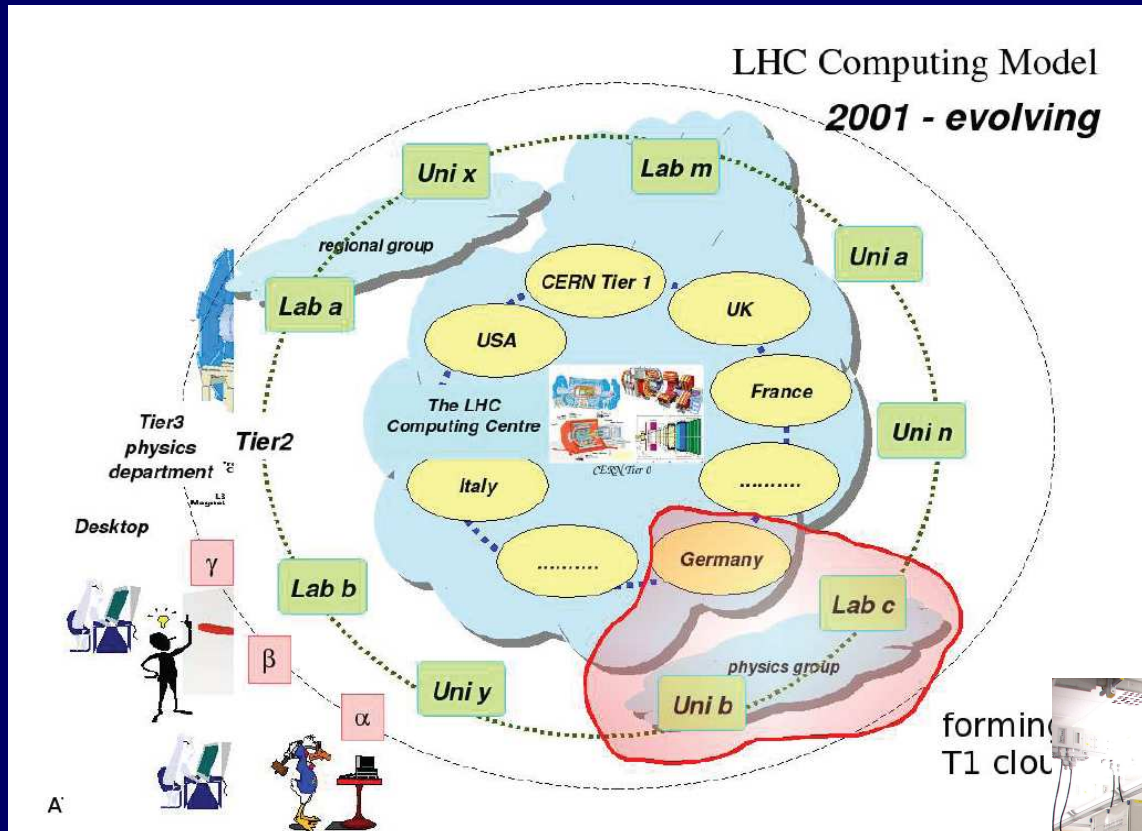
Getriggerte Ereignisse müssen mit 200 Hz auf Datenträger geschrieben werden (= 3 CD-ROMs pro Sekunde)

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

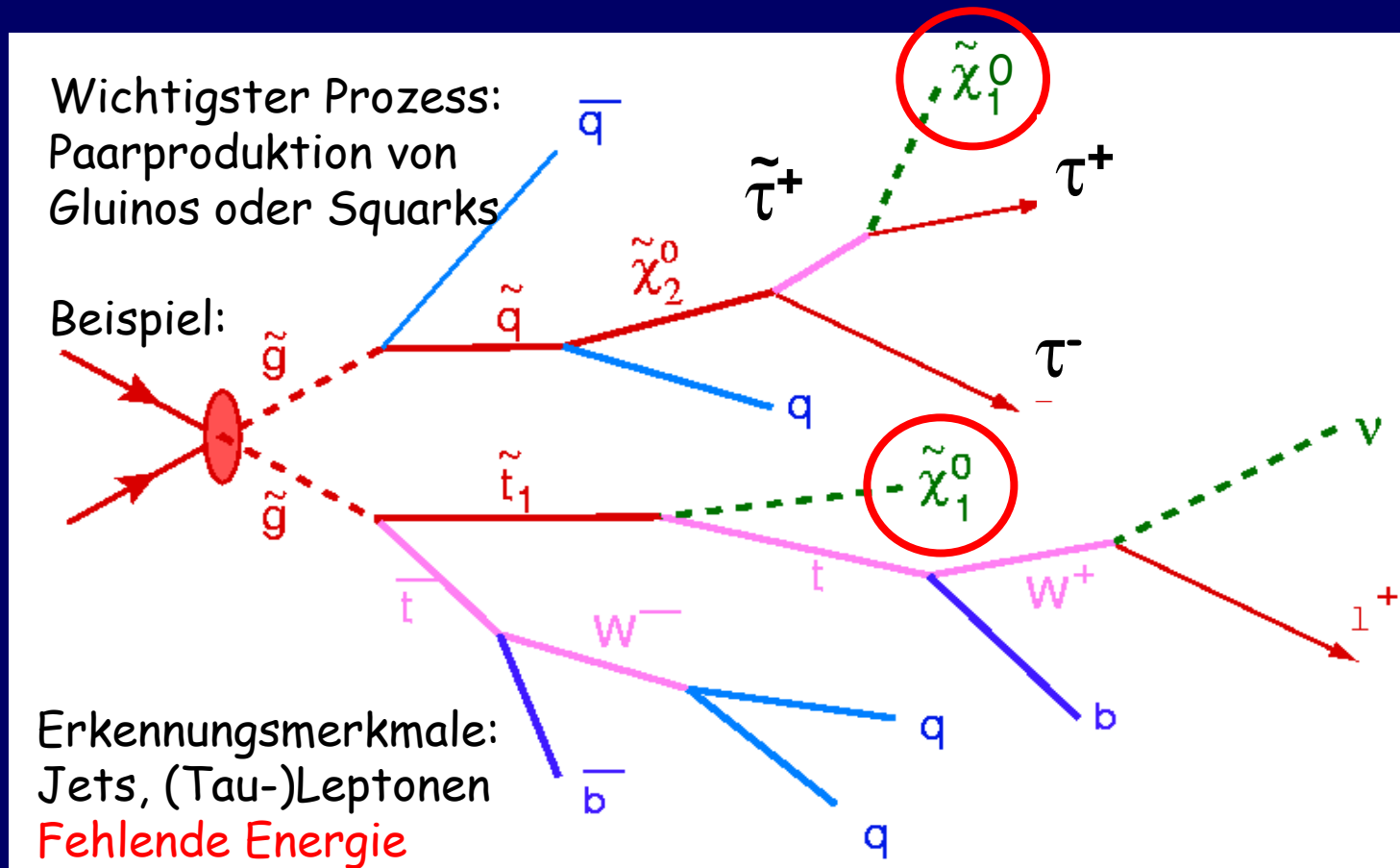


Grid-Gedanke:
“Computing aus der Steckdose”

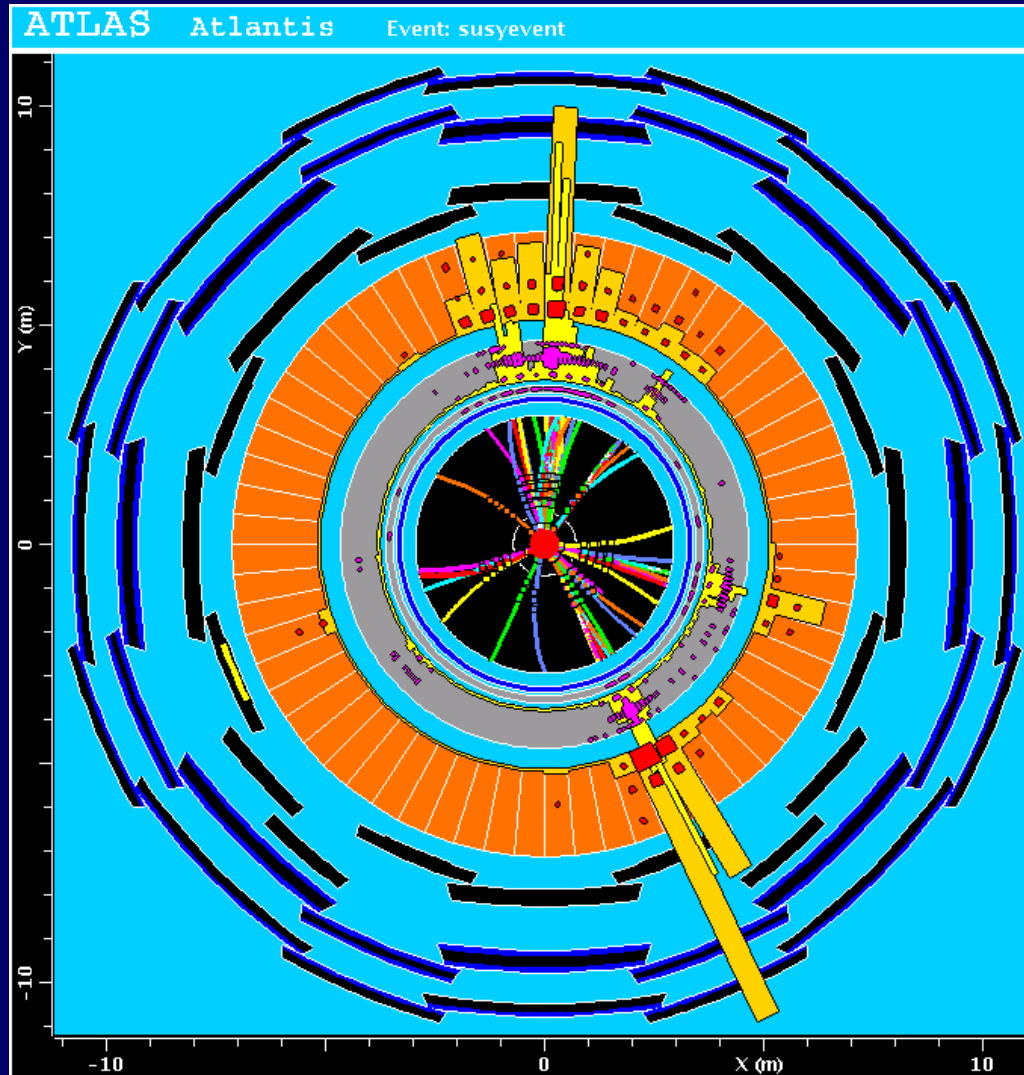
Implementierung: weitaus komplexer

In den Startlöchern für die Datenanalyse

- 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??

Wann geht's los? Wann gibt es Ergebnisse?

Sommer 2007: Maschine und Experimente fertig

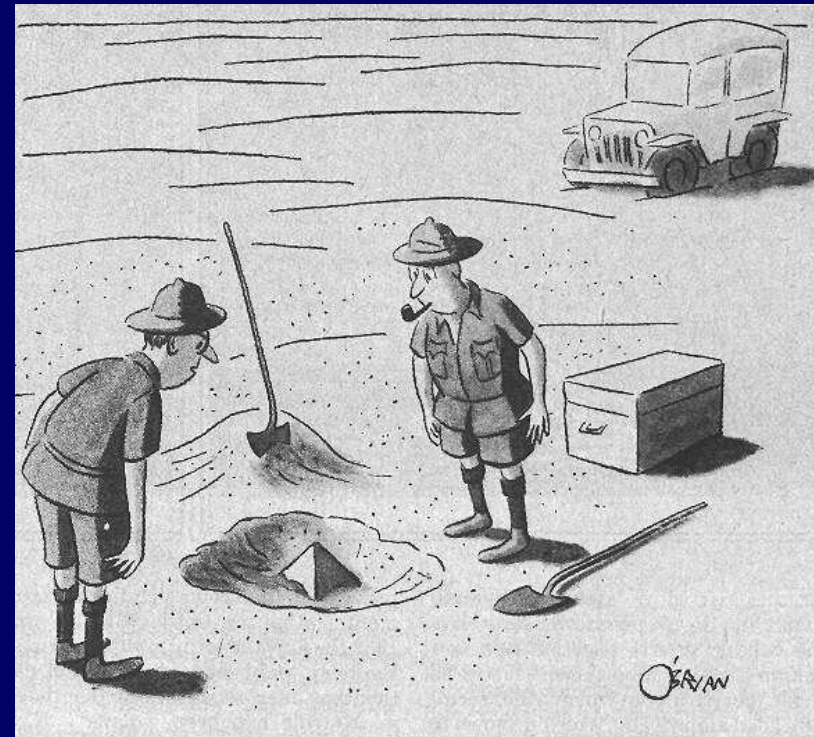
November 2007: Erste Kollisionen (bei niedriger Energie)

Frühjahr-Sommer 2008: Erste Kollisionen bei 14 TeV

(ab hier Spekulation)

2009-2010: Erste Entdeckungen?
Spannende Zeit

Laufzeit 15-20 Jahre



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

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

1. Was wir schon wissen

2. Große Fragen

3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

6. Ausblick

Der nächste Schritt: eine Präzisionsmaschine

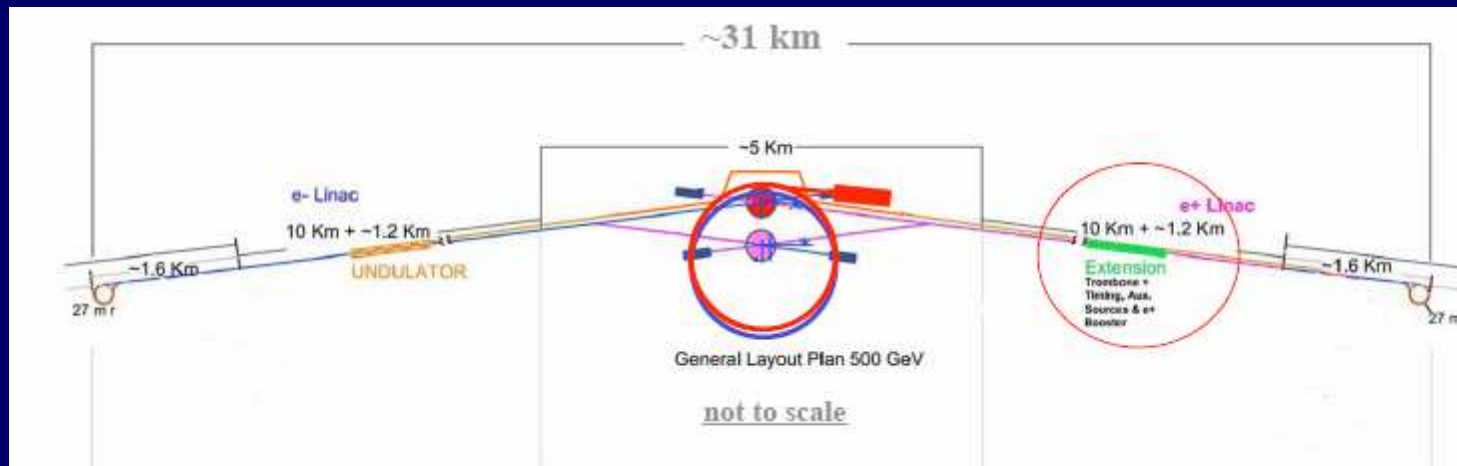
große Beschleunigerprojekte benötigen
Weitblick und langen Atem



Planungen für LHC begannen in den 1980ern

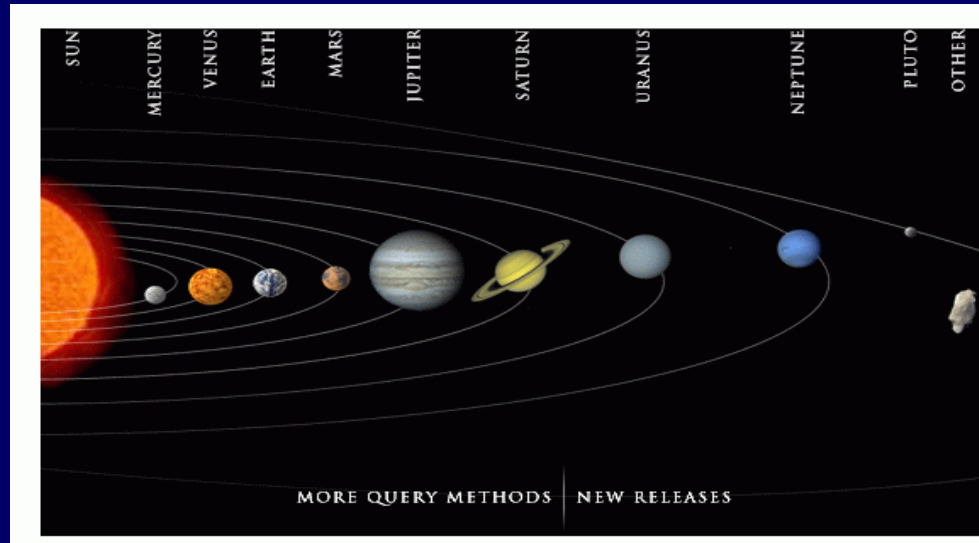
Wir wissen schon heute: die künftigen Ergebnisse
des LHC erfordern ein Präzisionsinstrument:

Ein Elektron-Positron-Beschleuniger an der Teraskala,
der International Linear Collider ILC



Ein Plädoyer für Präzision

Beispiel: Astronomie



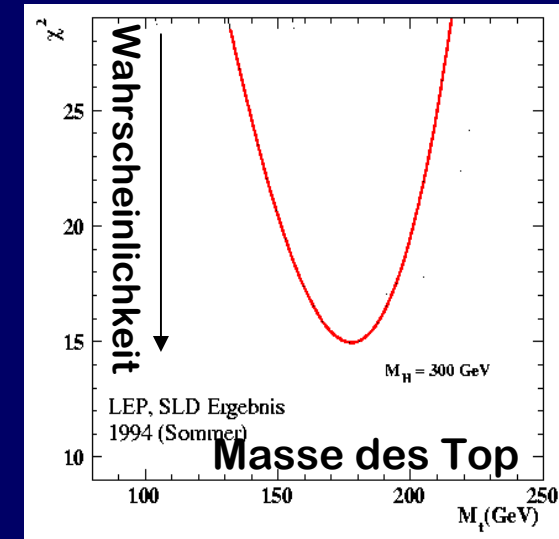
1846:

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



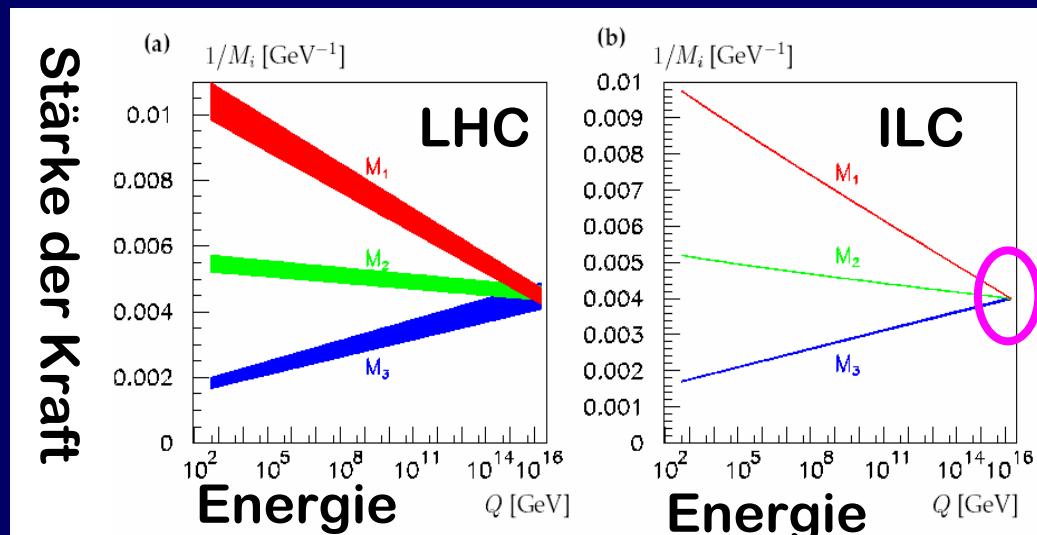
1994-95

LEP/SLD Beschleuniger: indirekte Bestimmung der Masse der Top-Quarks

Kurz darauf: Entdeckung des Top-Quarks am Tevatron/USA

Was der ILC kann...

- Die Massen und Eigenschaften von Higgs und SUSY-Teilchen 10-1000mal genauer messen als der LHC
- Das schwerste Quark (top) viel präziser vermessen
- Hinweise auf neue Phänomene weit oberhalb der Energie des Beschleunigers sichtbar machen: "Teleskop"-Effekt



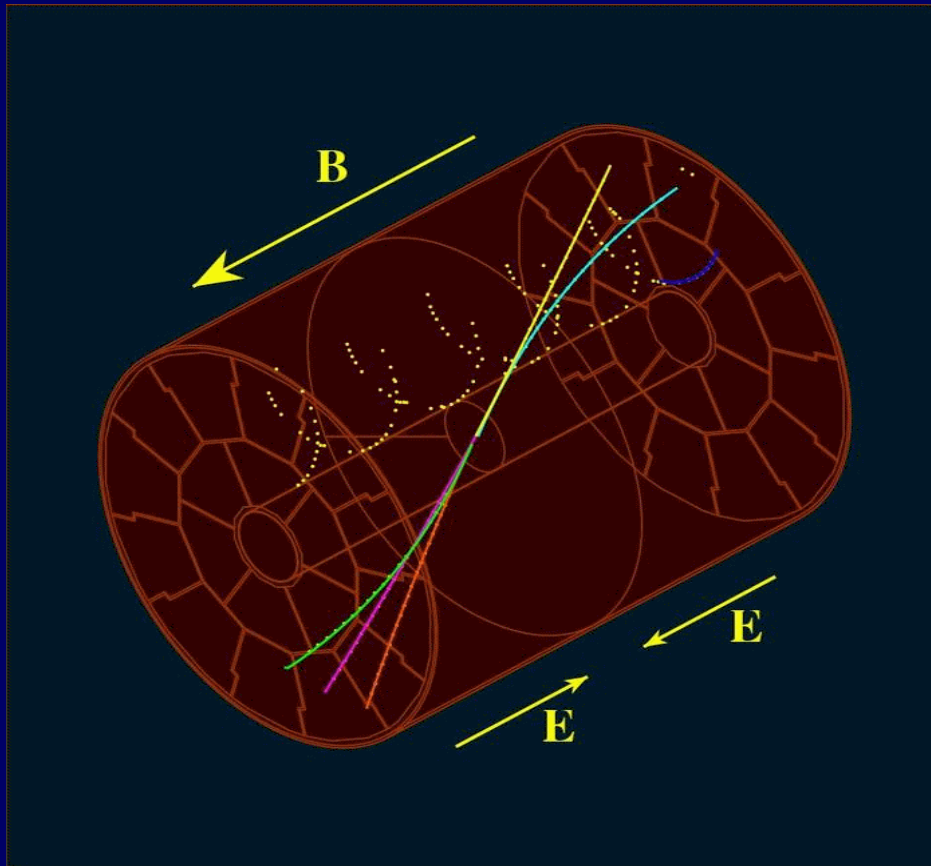
Treffer
oder nicht?



Zukunftsmusik. Aber:

Präzise Detektoren für den ILC jetzt entwickeln!

Ein Beispiel: Zeitprojektionskammer



elegantes Nachweisprinzip
für geladene Teilchen

wenig Material: stört die
zu messenden Teilchen
nicht

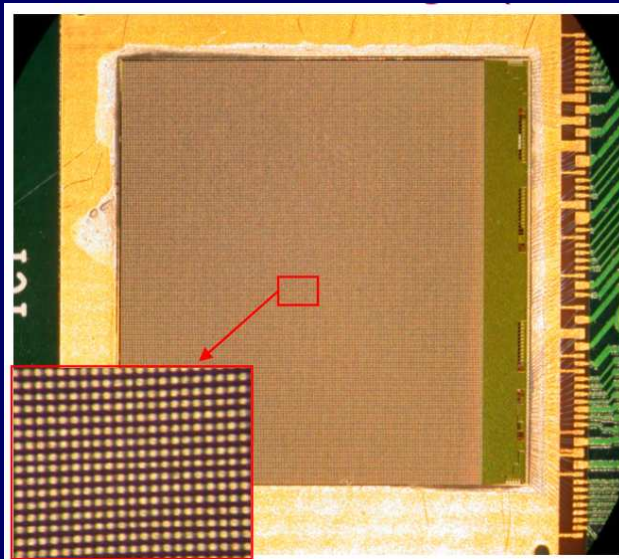
sehr genau

Herausforderung:
Miniatürisierung der
Nachweiselektronik

Teilchenspuren vermessen – digital und präzise

Bonn/Freiburg-Prototyp

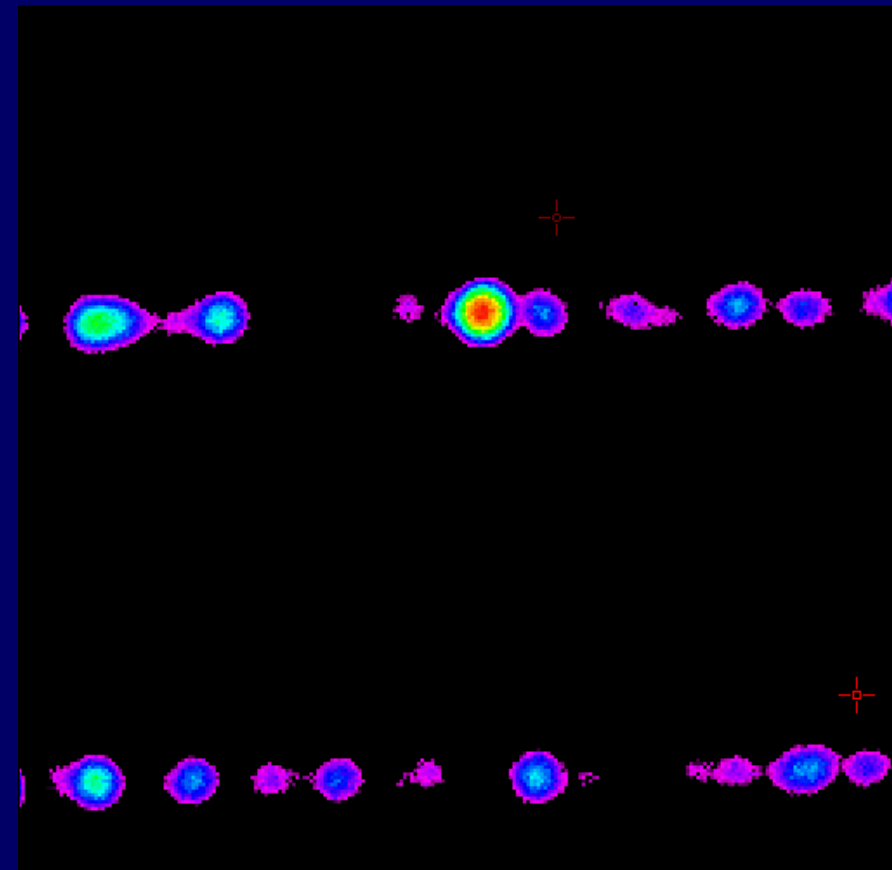
Timepix-Chip:



65000 Pixel auf $1.4 \times 1.4 \text{ cm}^2$

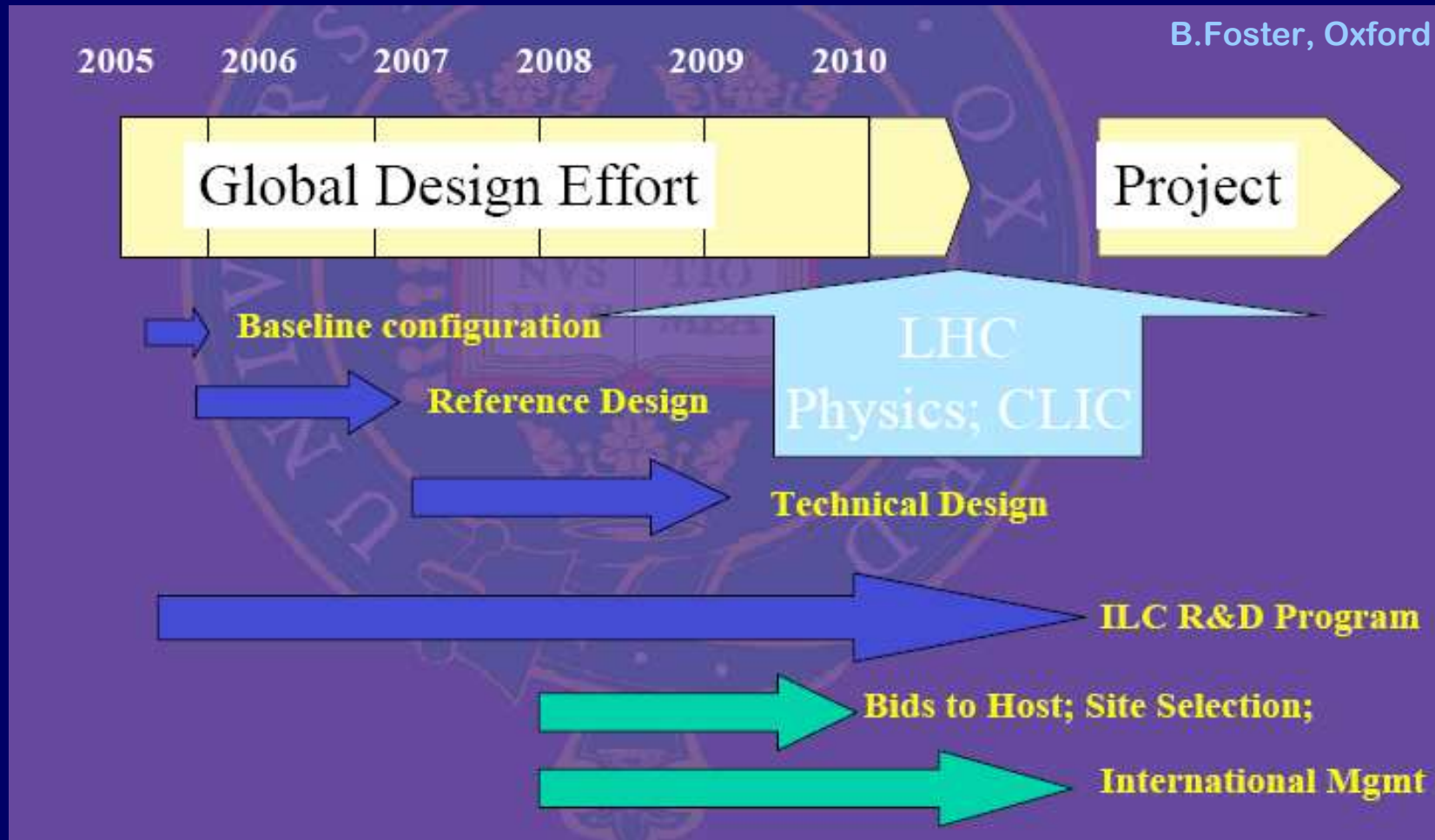
Definition der Spurposition
auf $20 \mu\text{m}$ genau!

erste Spuren im Teststrahl am DESY:



14 mm

Projektplanung: Das ILC Projekt



Vorbereitung für eine Bauentscheidung ~2010+ läuft jetzt auf Hochtouren

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

1. Was wir schon wissen

2. Große Fragen

3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

5. Ein Blick in die Zukunft: der Internationale Linearcollider ILC

6. Ausblick

Fundamentale Physik im 21. Jahrhundert

Verbindungen wachsen zusammen: interdisziplinär

das extrem Kleine – das extrem Große – das extrem Komplexe

Strings

Zu wenig Dimensionen um alle Verbindungen zu zeichnen

⇒ **Zusätzliche Raumdimensionen!**

Kosmologie

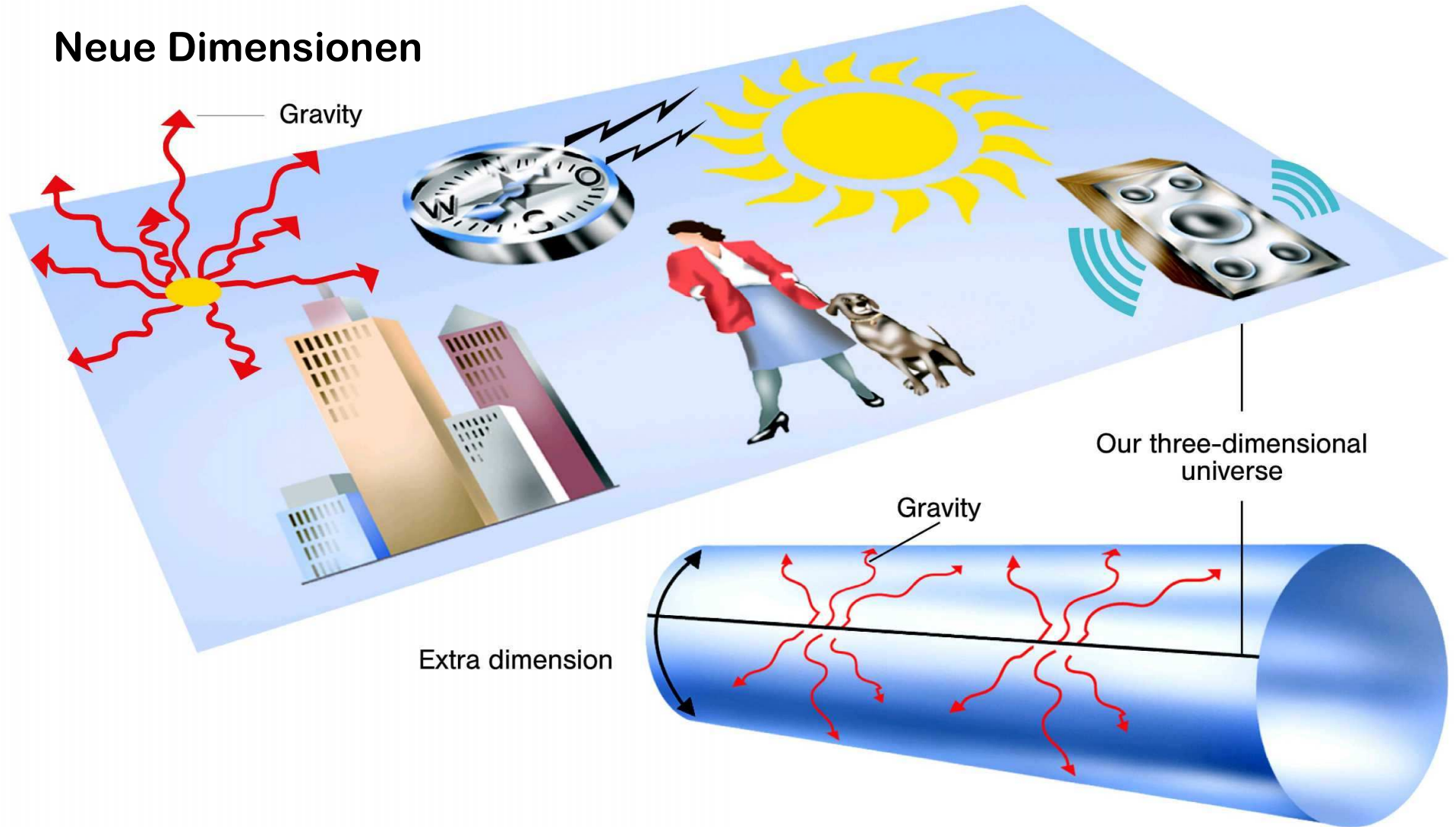
Quantentechnologie

Astroteilchen-
und Neutrino-
physik

Detektoren
für Strahlung
und Materie

Kondensierte
Materie

Neue Dimensionen



Auch so etwas könnte an LHC und ILC entdeckt werden...

Kölner Bibel, 1478

**Apollo 17,
1972**

