

**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

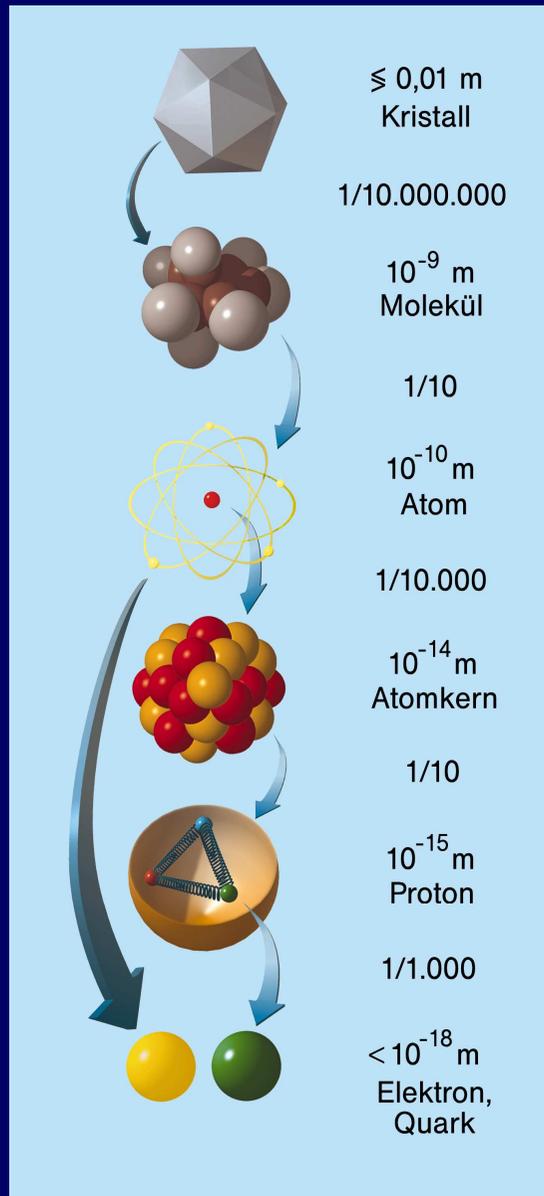
3. Die Teraskala

4. Der LHC und das ATLAS-Experiment

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

6. Ausblick

# Aufbau der Materie

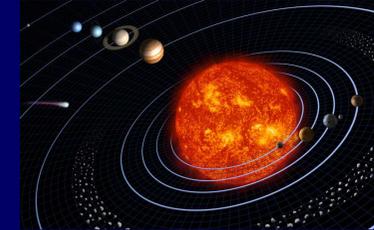


→ Entfernung zum Pluto

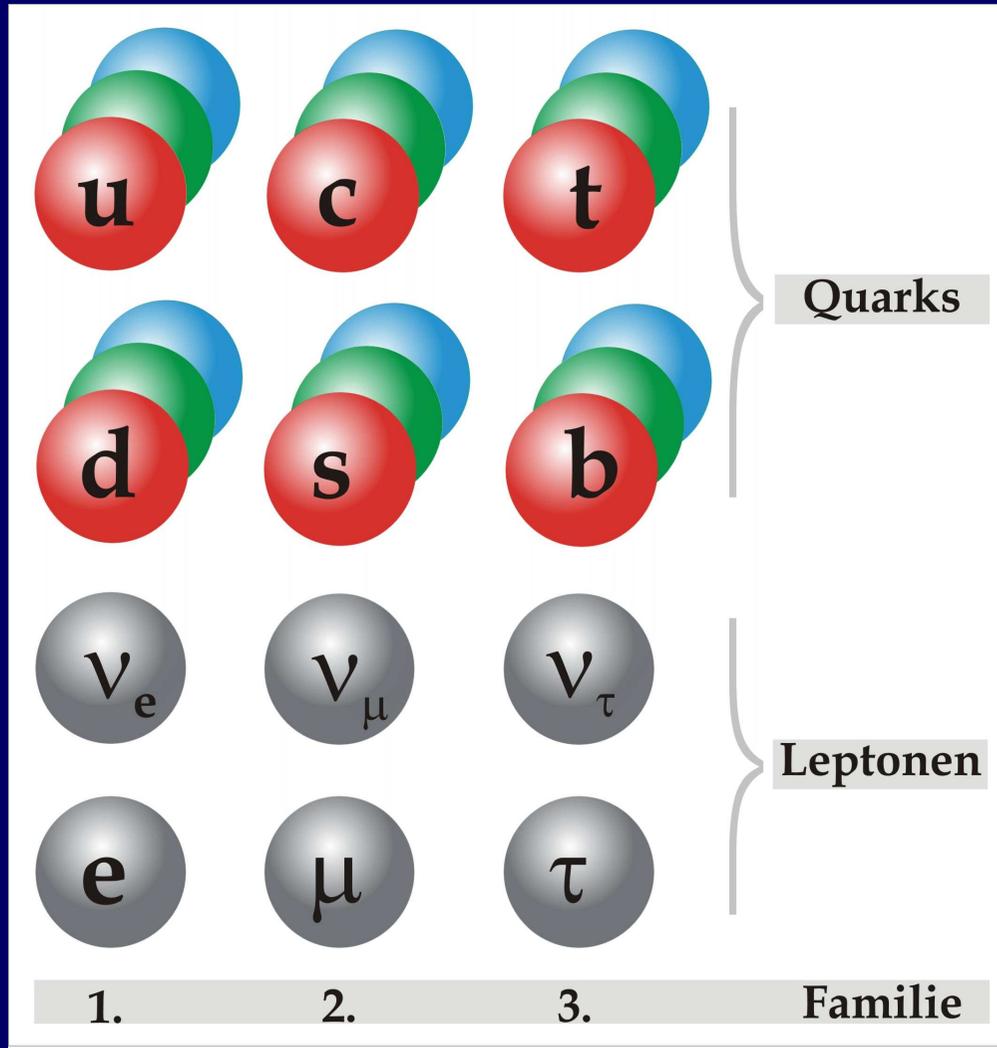
→ Mond

→ Fußballstadion

→ < Fußball



# Im Innersten: Bausteine der Materie



Es gibt genau drei Familien von Quarks und Leptonen

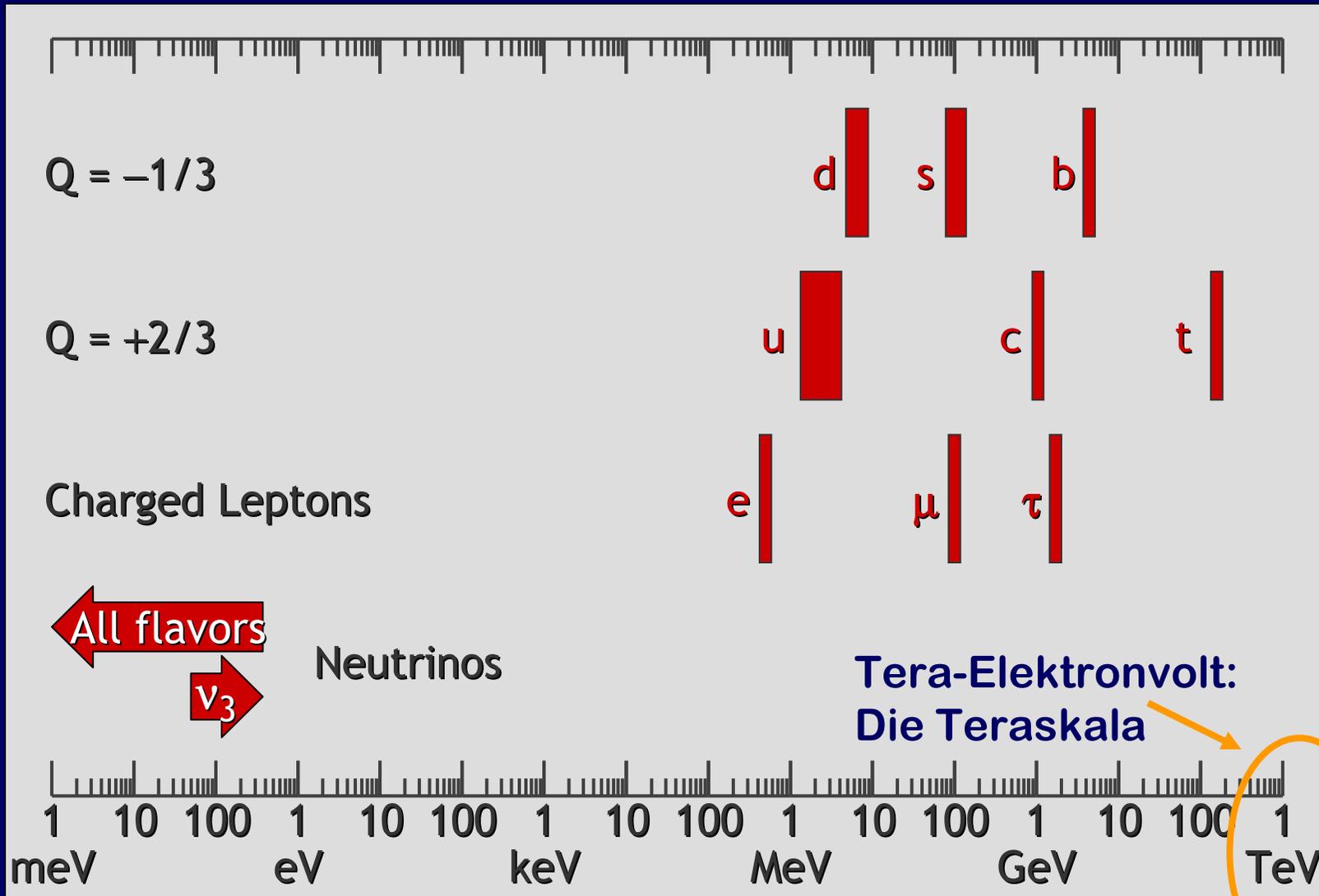
Fermionen (Spin- $1/2$ )  
Pauli-Prinzip  $\Rightarrow$   
eignen sich zum Aufbau komplexer Strukturen

“Dinge”

Alle experimentell nachgewiesen!

Unterschied: Massen

# Massen der Elementarteilchen

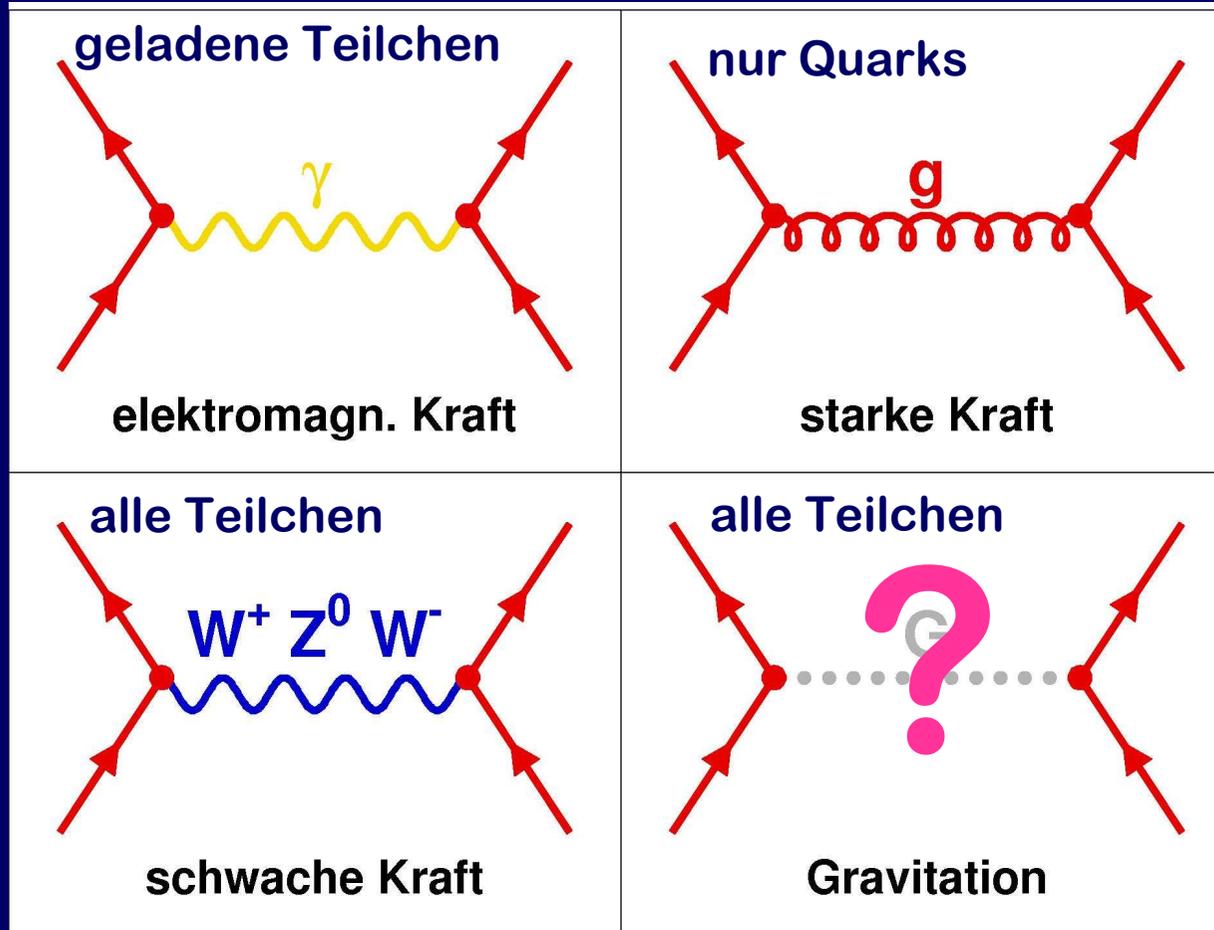


Warum so kompliziert???

# 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

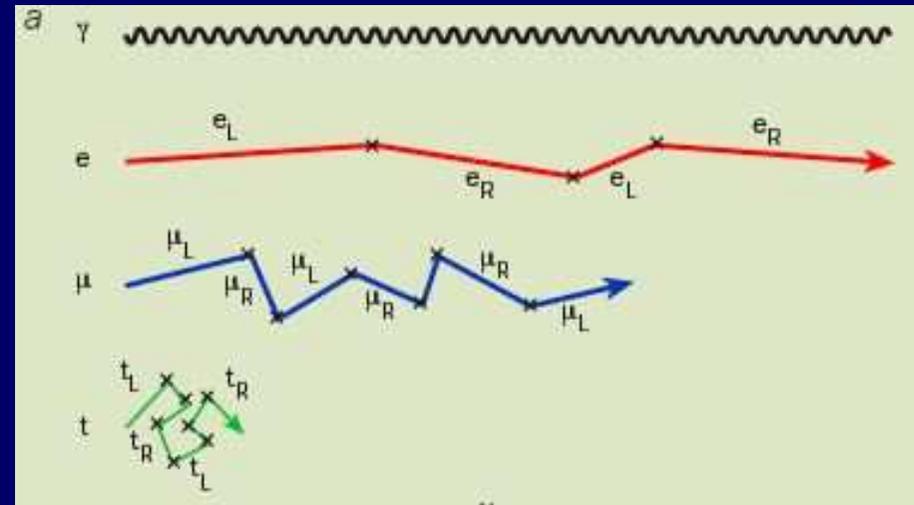
6. Ausblick

# Das Rätsel der Masse: Der Higgs-Mechanismus



Peter Higgs (1964!)

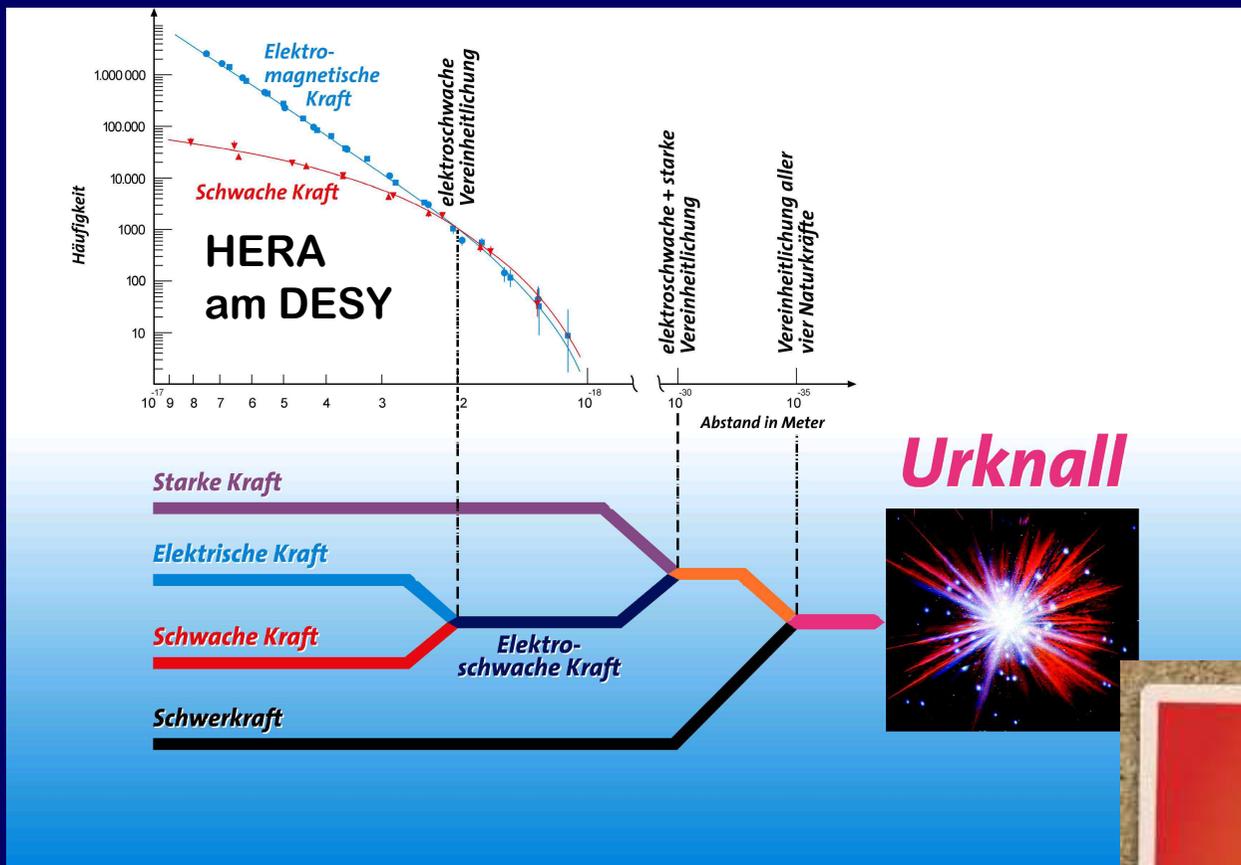
Ist Masse keine Eigenschaft der Teilchen, sondern nur das Ergebnis einer permanenten Kraft ???



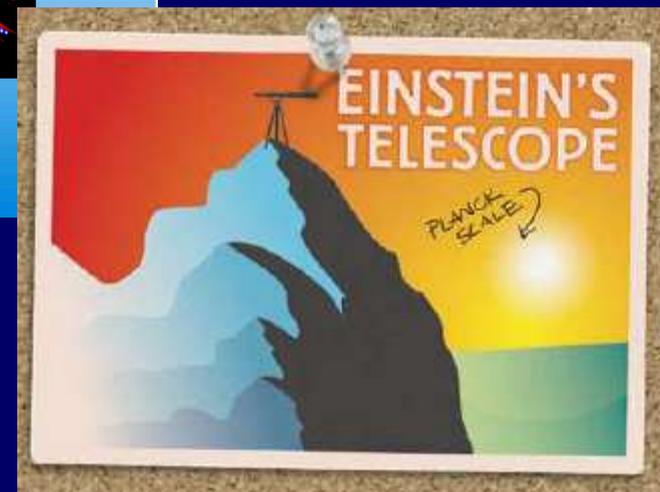
In ein paar Jahren werden wir es wissen!

⇒ Large Hadron Collider LHC

# Noch größere Fragen...



Urknall



Gibt es eine Urkraft ???

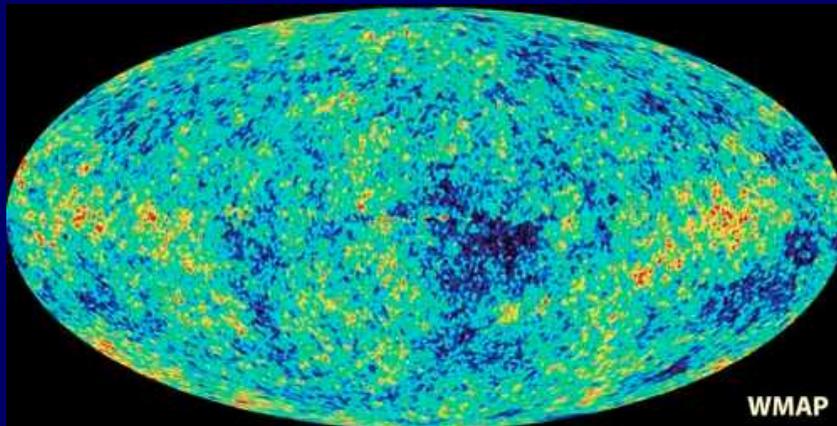
Vielleicht bei  $10^{19}$  GeV (Planck-Skala):  
wir brauchen ein "Teleskop": Präzision

## 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...

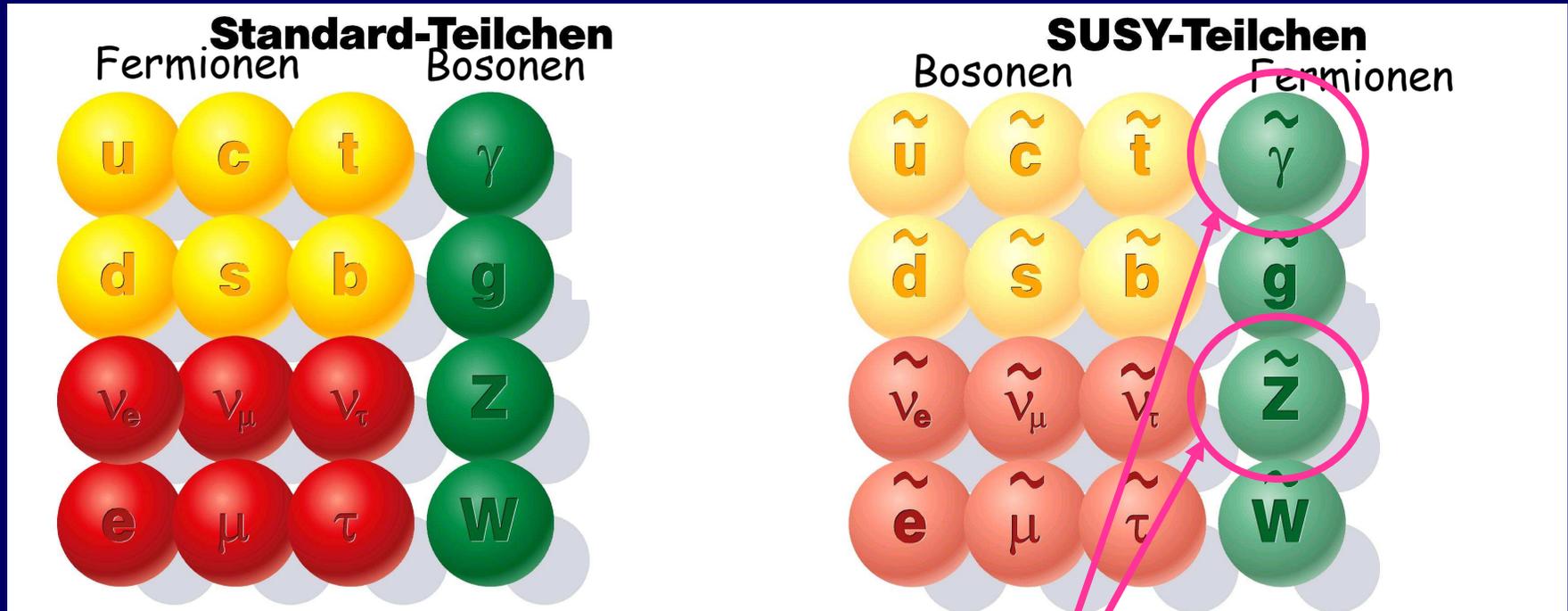


Woraus besteht die dunkle Materie ???

# 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

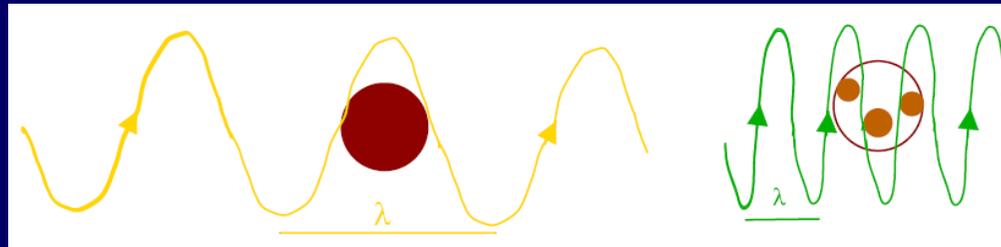
Wie kann man kleine Bausteine  
"sehen"?

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



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  $\sim 1$  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  $\sim 1$  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

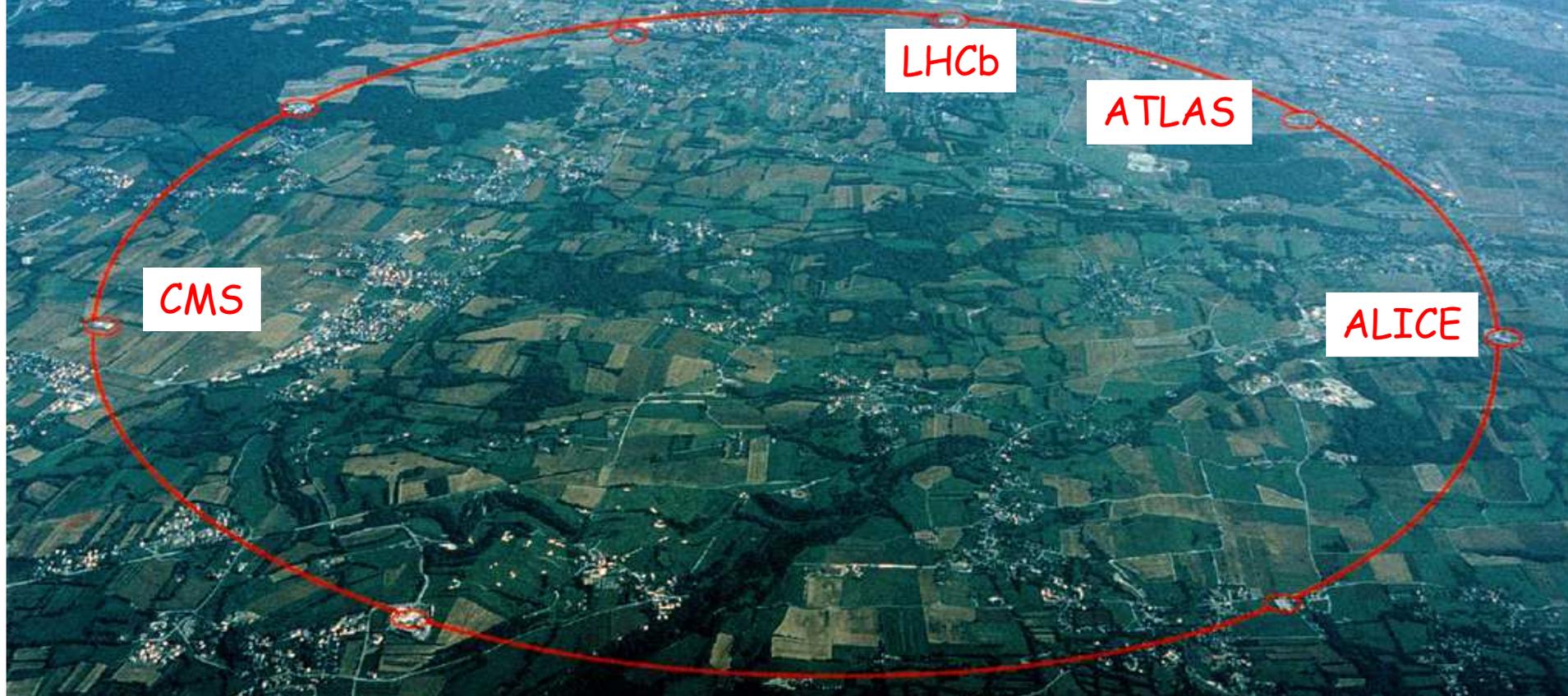
3. Die Teraskala

**4. Der LHC und das ATLAS-Experiment**

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

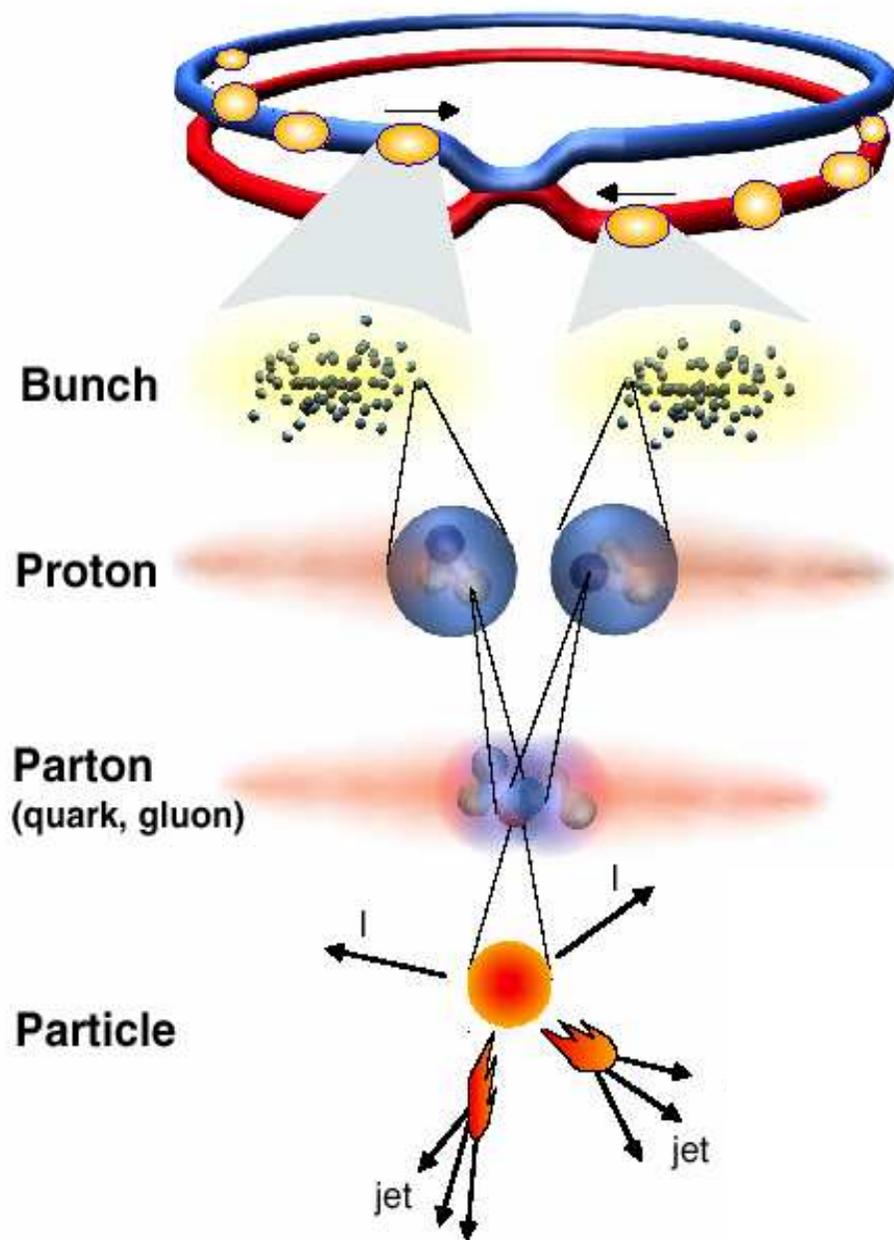
6. Ausblick

# 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

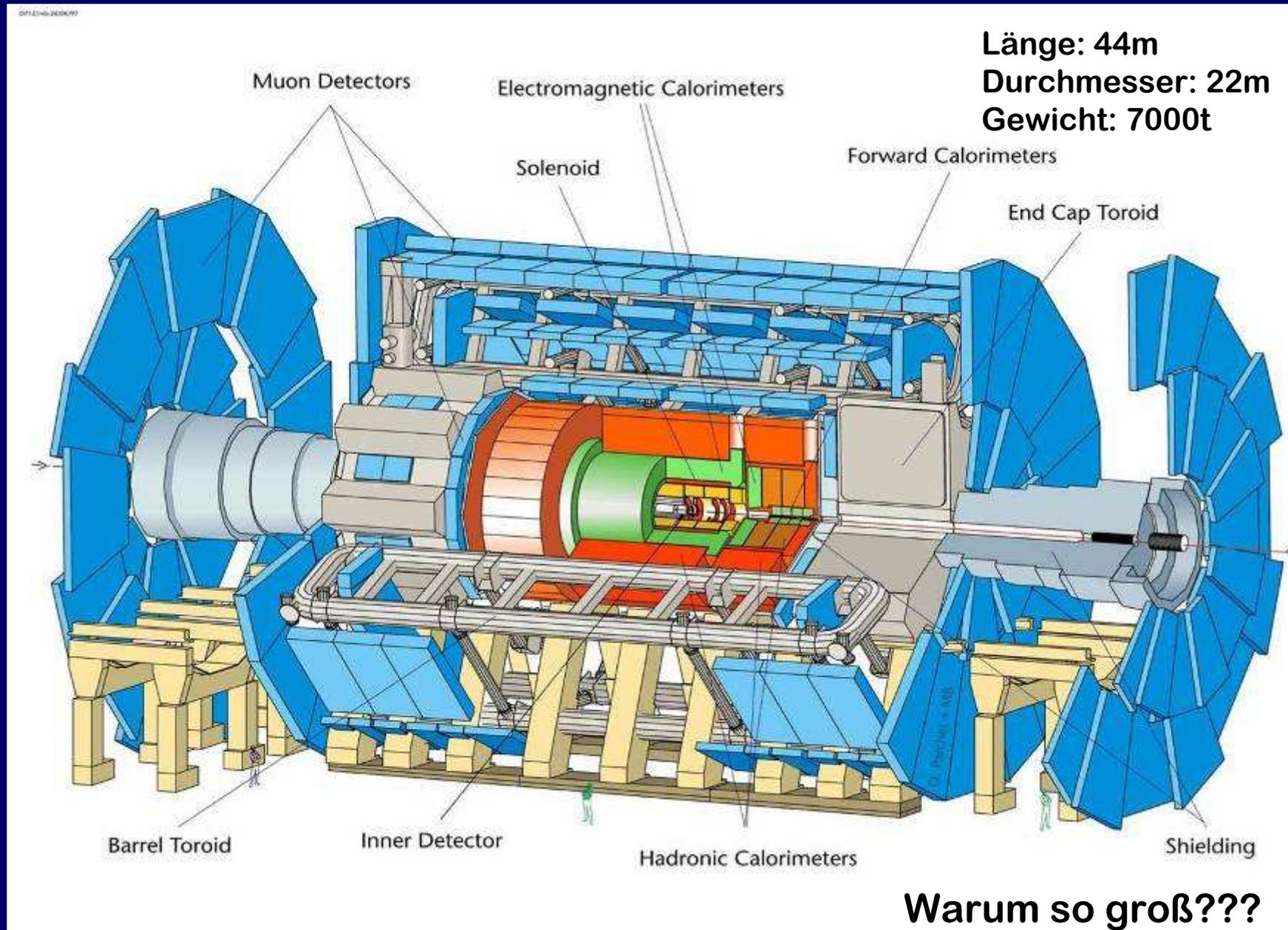
~25 pp-Kollisionen pro  
Bunch-Kollision

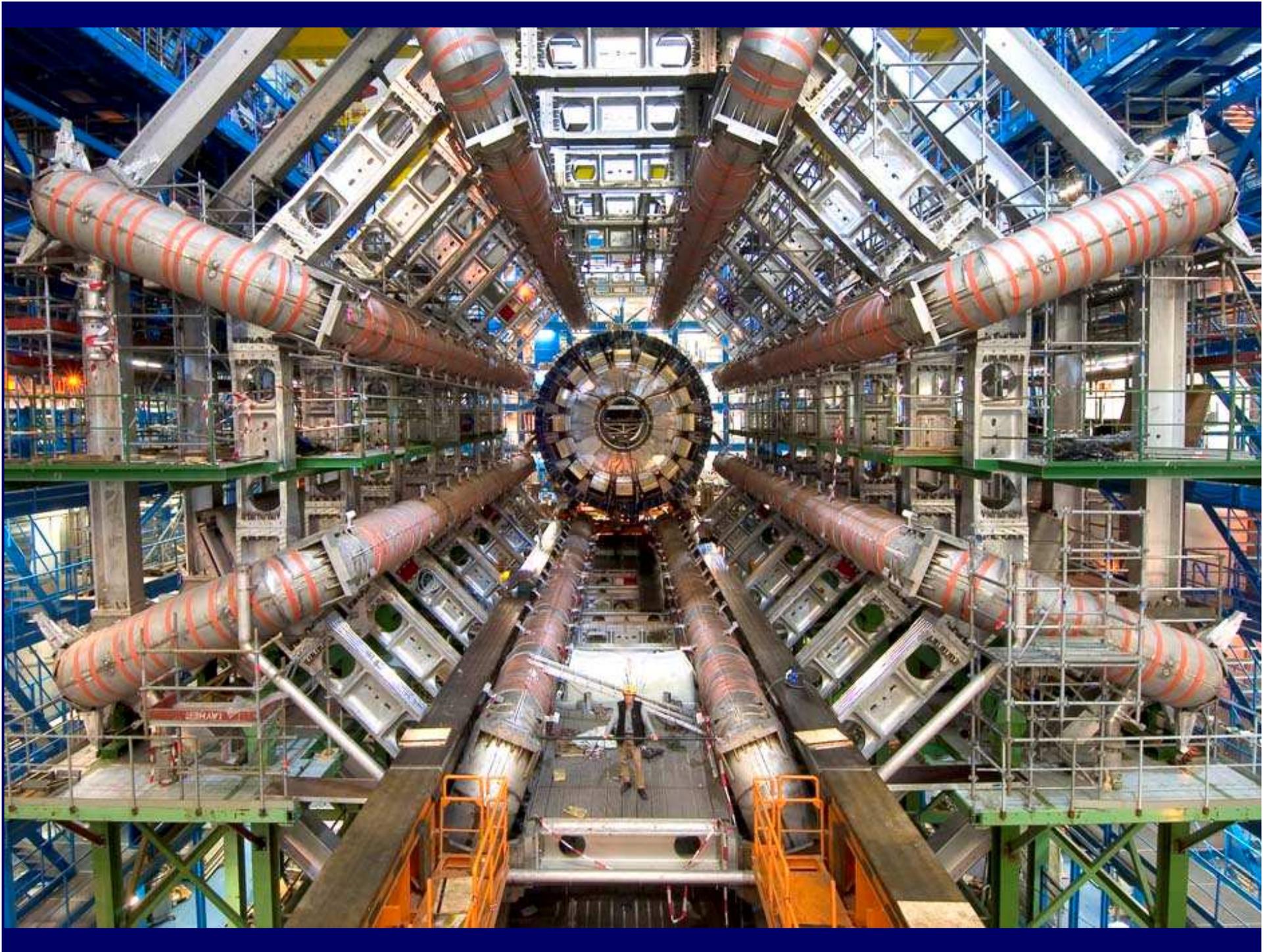
Interessante Ereignisse:  $10^{-9}$  –  $10^{-11}$   
unterdrückt!

# Was passiert am LHC?



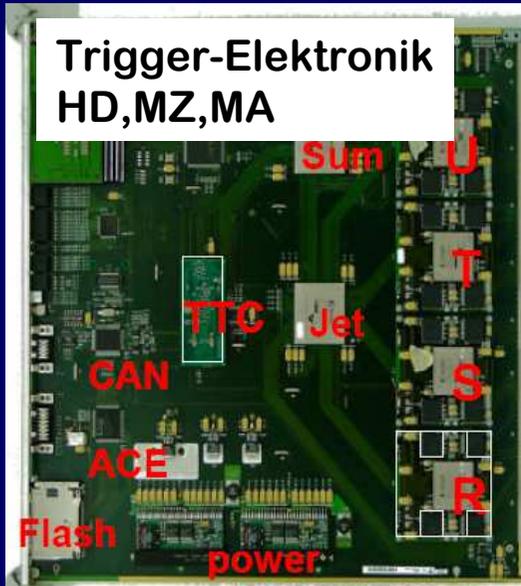
# Das ATLAS-Experiment: die Kollisionen sichtbar machen



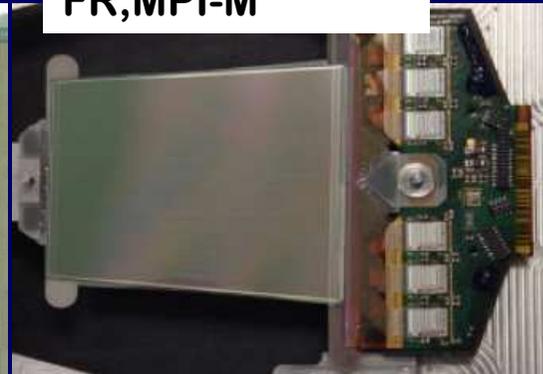


# Nicht nur groß, sondern vorallem komplex!

Beispiele für in Deutschland gebaute Komponenten:



Trigger-Elektronik  
HD, MZ, MA



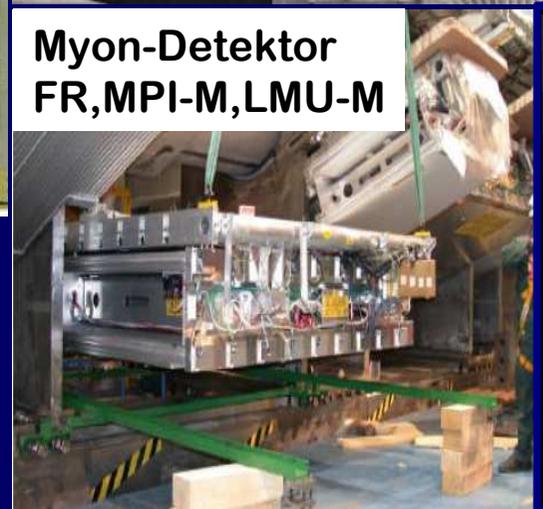
Si-Spur-Detektor  
FR, MPI-M



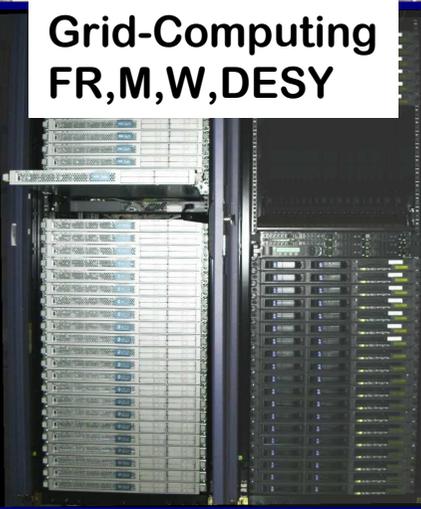
Kalorimeter  
MPI-M, MZ, W



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



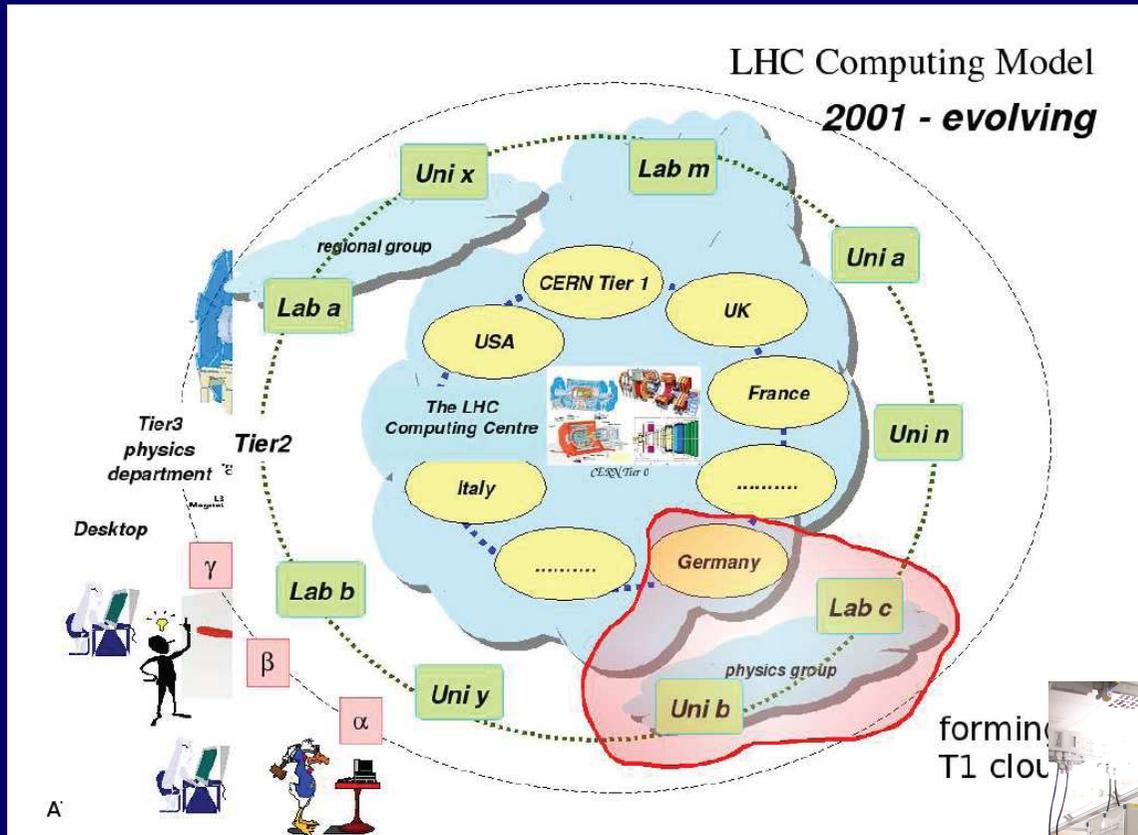
Getriggerte Ereignisse müssen mit 200 Hz auf Datenträger geschrieben werden (= 3 CD-ROMs pro Sekunde)

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

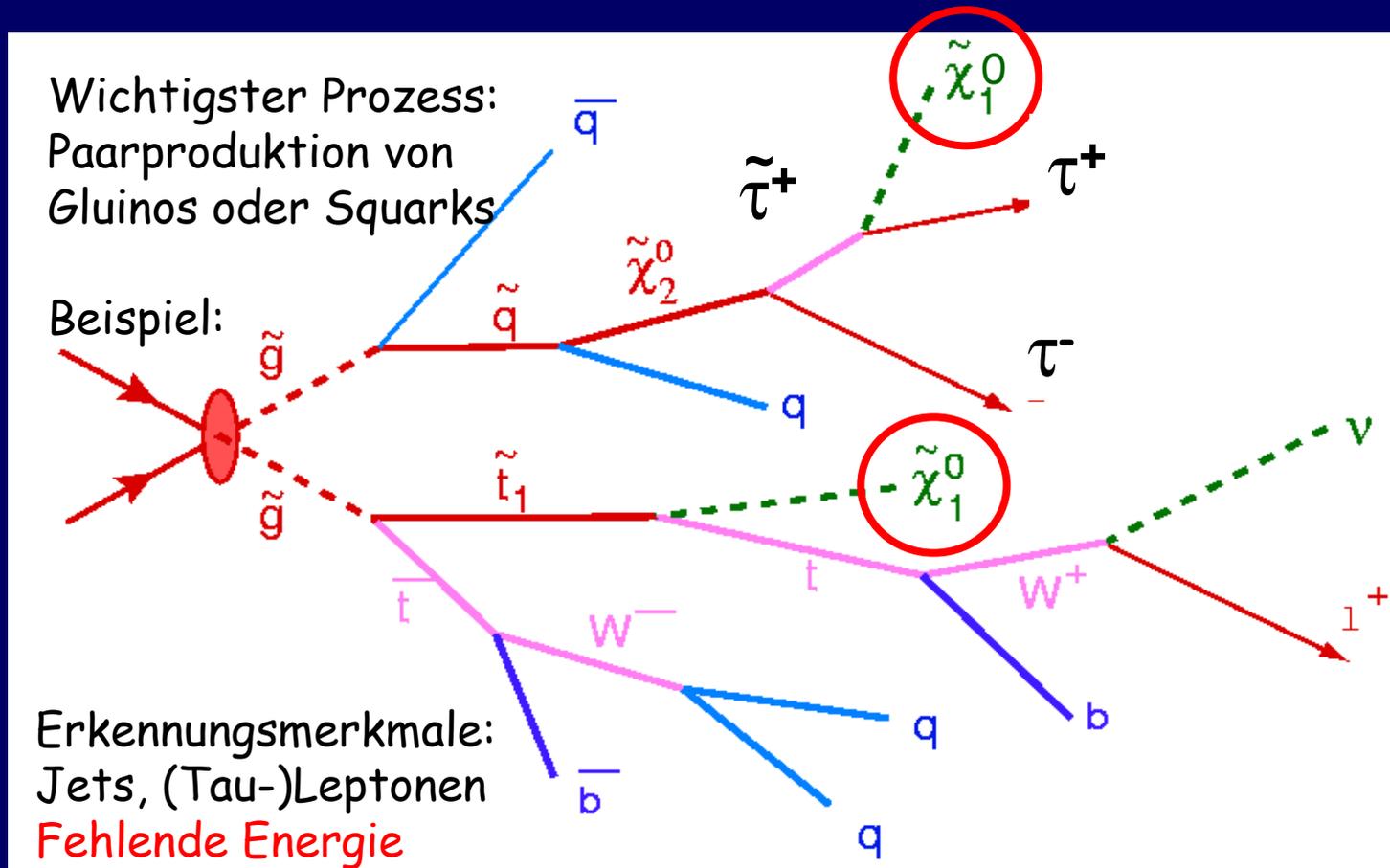


**Grid-Gedanke:**  
“Computing aus der Steckdose”

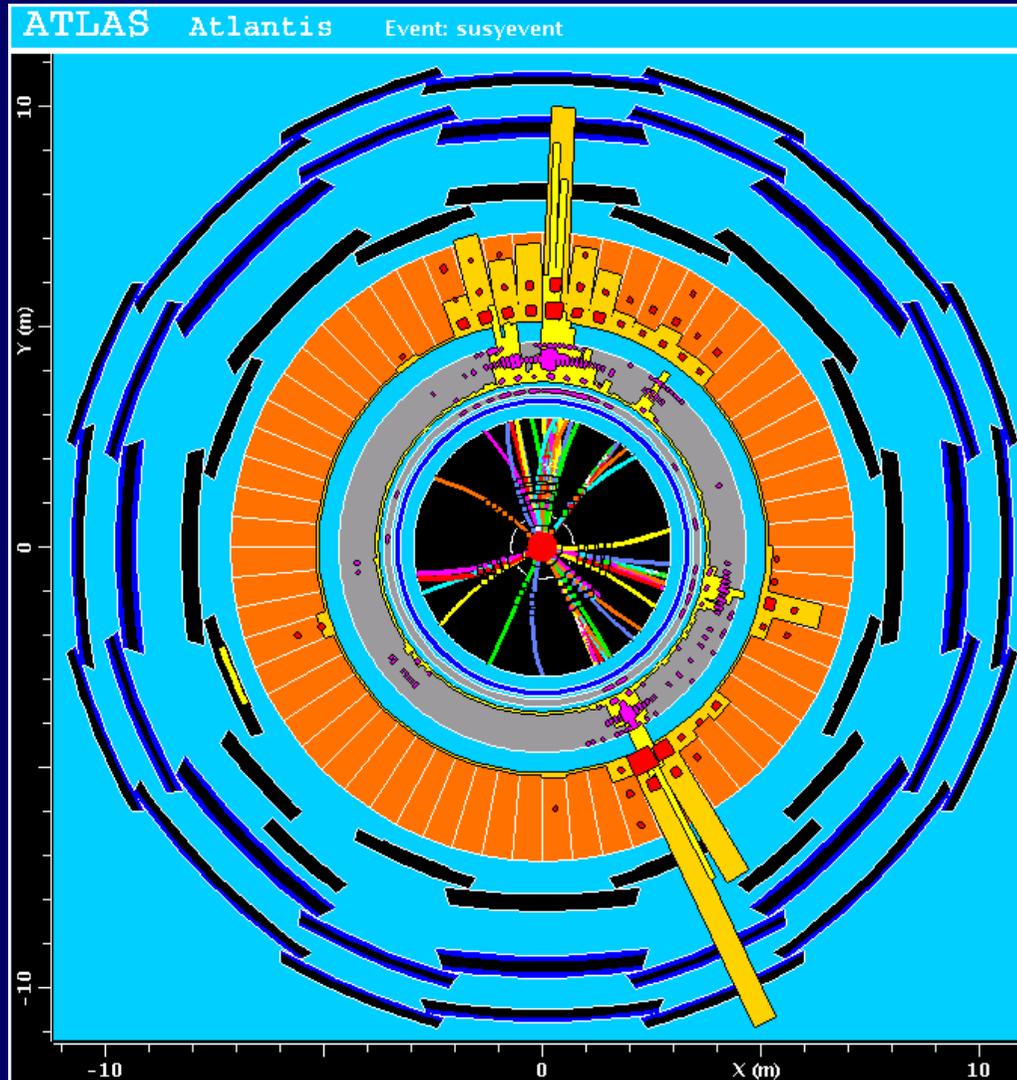
**Implementierung: weitaus komplexer**

# 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

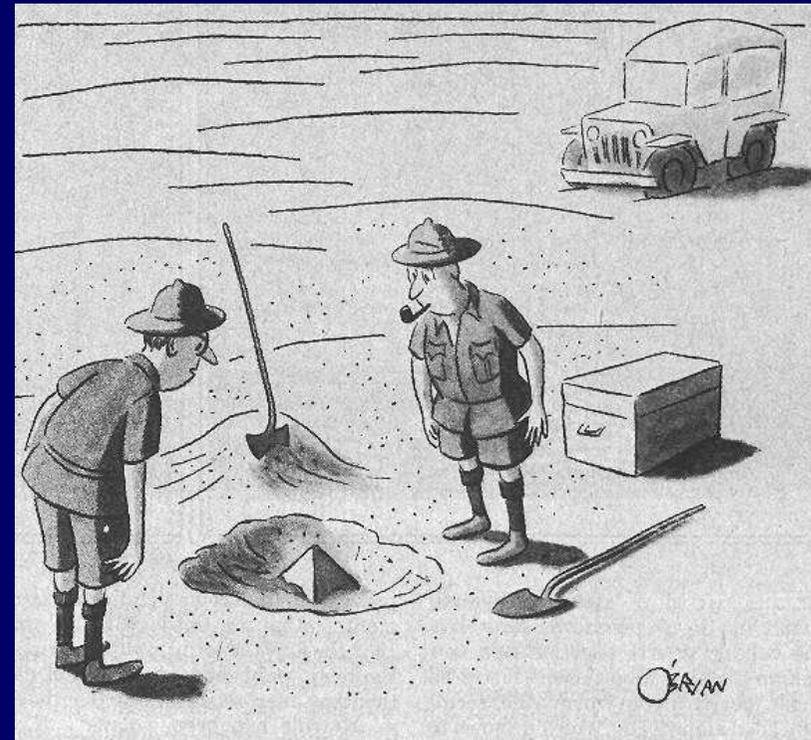
November 2007: Erste Kollisionen (bei niedriger Energie)

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

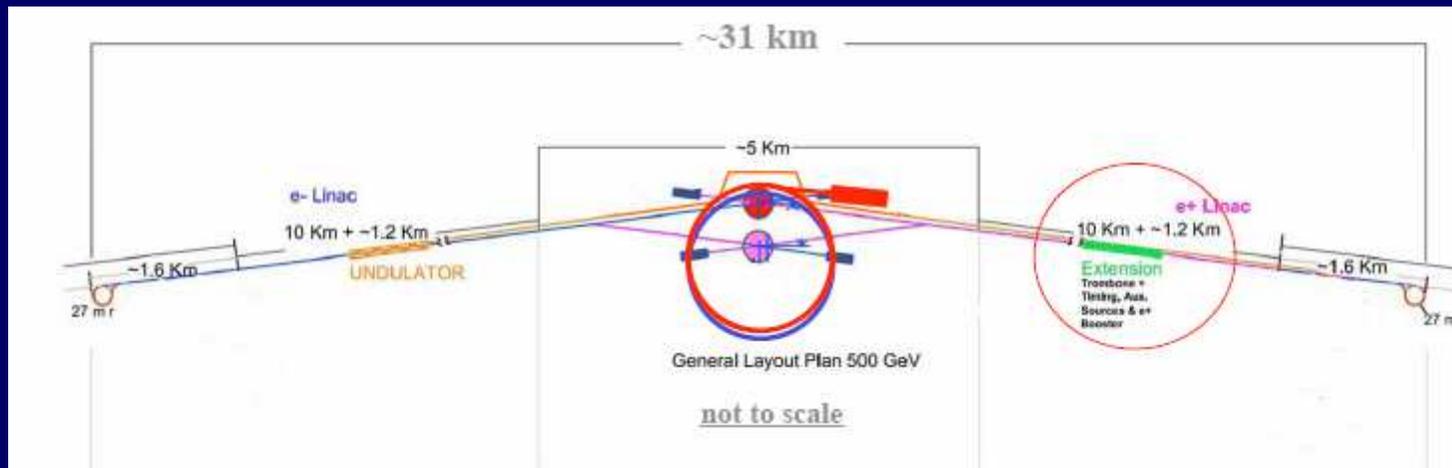
große Beschleunigerprojekte benötigen  
Weitblick und langen Atem



Planungen für LHC begannen in den 1980ern

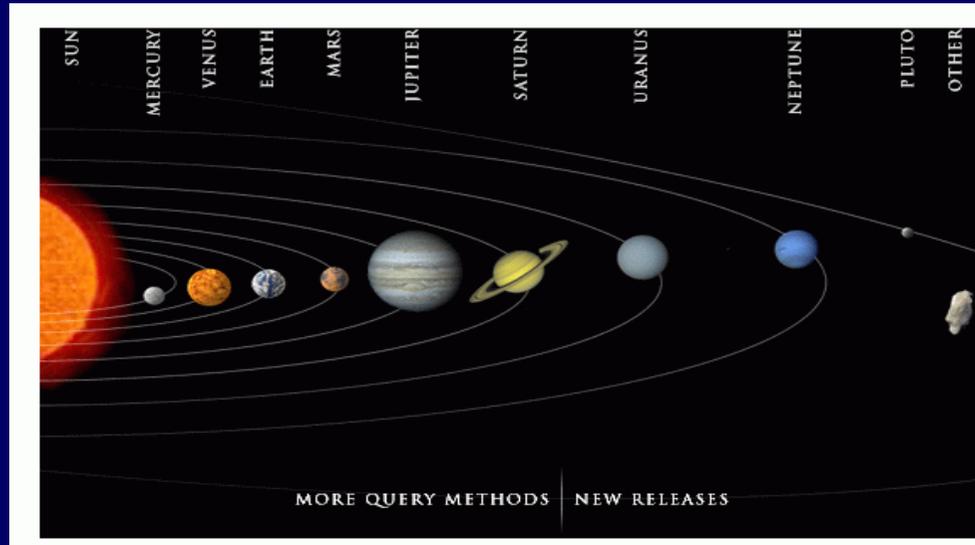
Wir wissen schon heute: die künftigen Ergebnisse  
des LHC erfordern ein Präzisionsinstrument:

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



# Ein Plädoyer für Präzision

## Beispiel: Astronomie



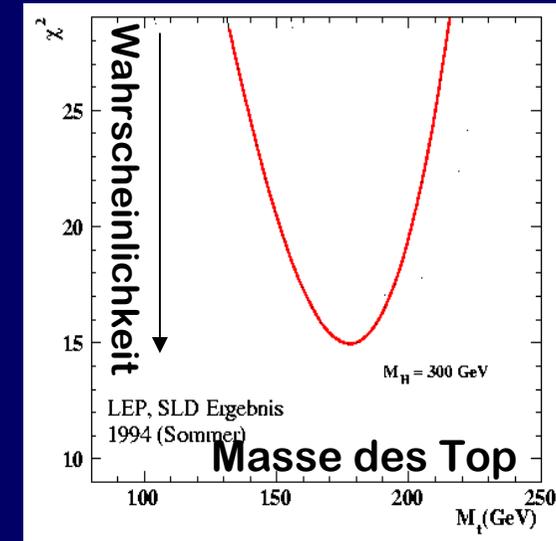
**1846:**

**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



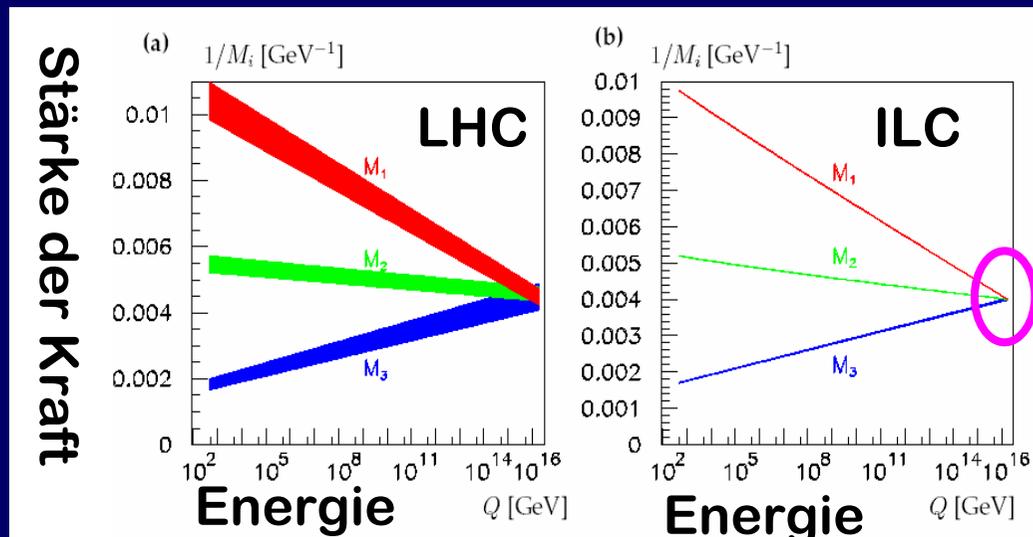
**1994-95**

**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



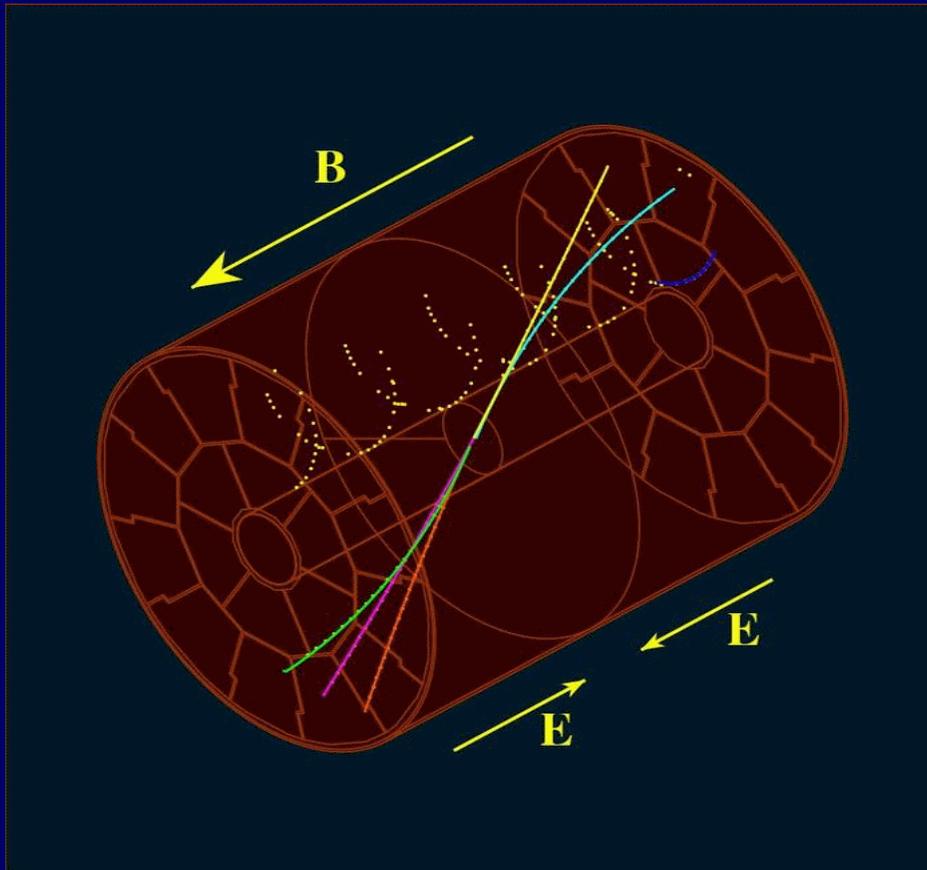
Treffer  
oder nicht?



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

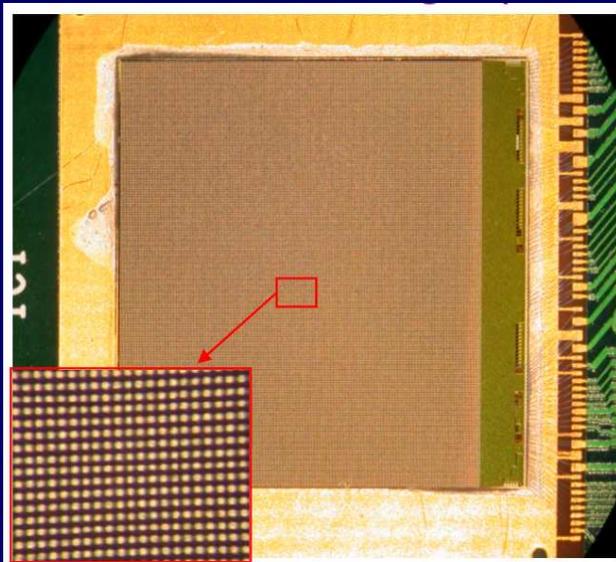
sehr genau

Herausforderung:  
Miniatursierung der  
Nachweiselektronik

# Teilchenspuren vermessen – digital und präzise

Bonn/Freiburg-Prototyp

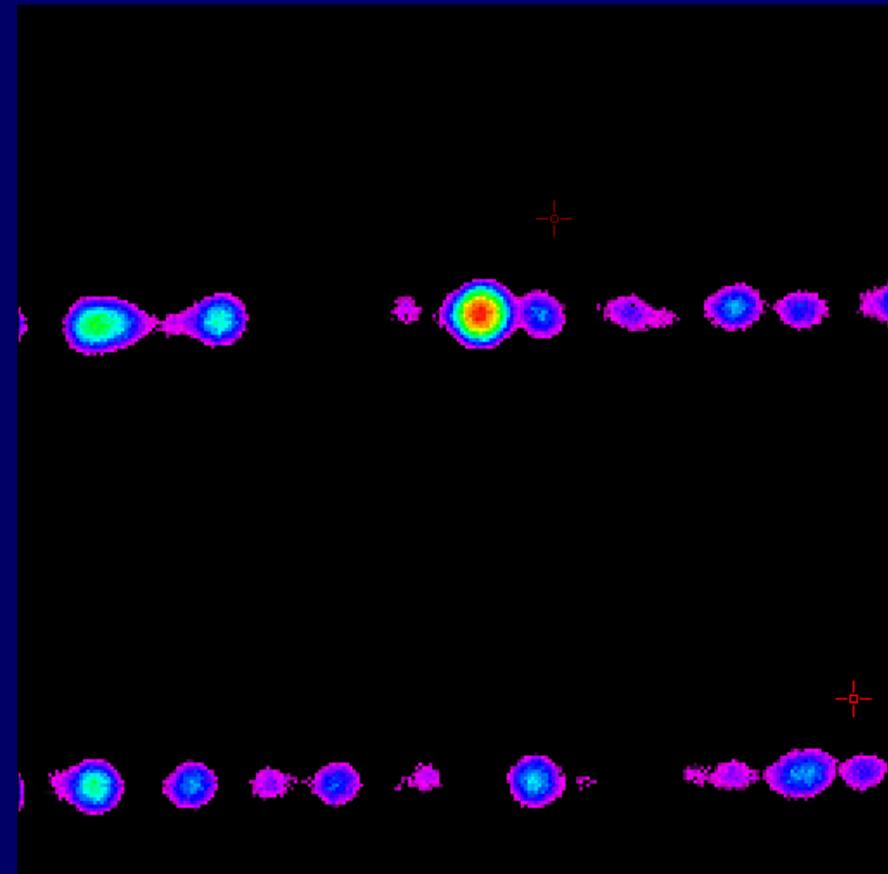
Timepix-Chip:



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

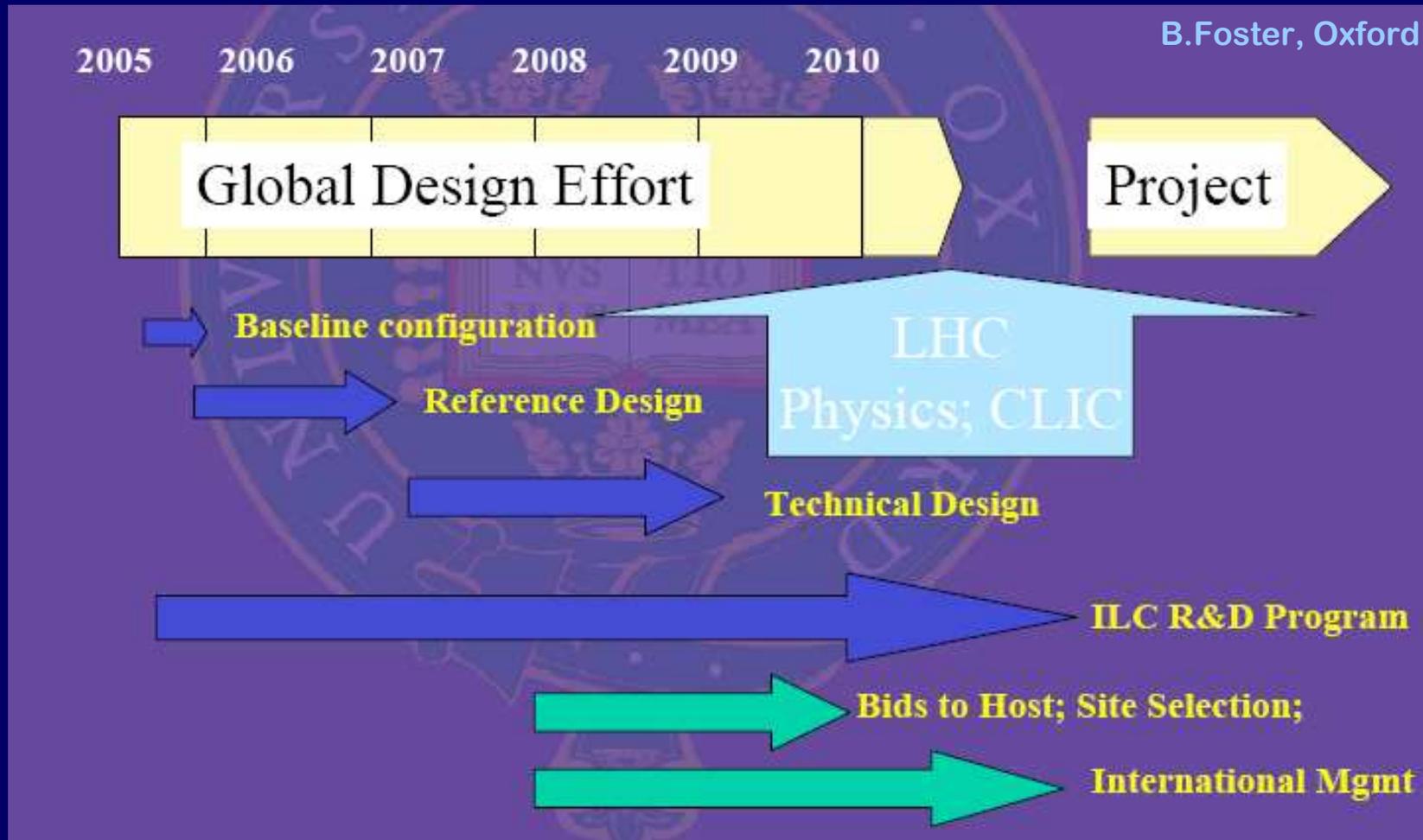
Definition der Spurposition  
auf  $20 \mu\text{m}$  genau!

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

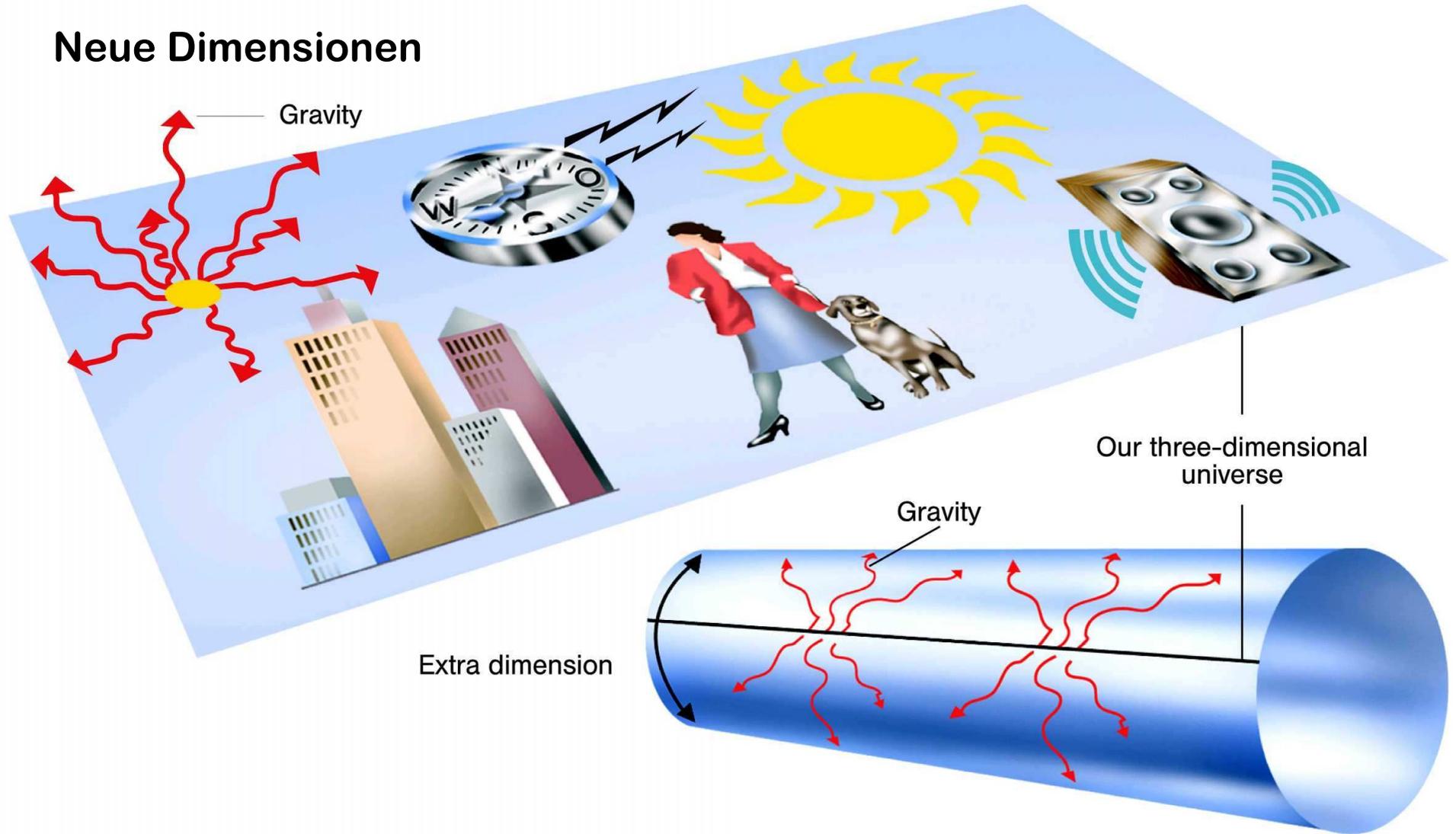
Quantentechnologie

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**

