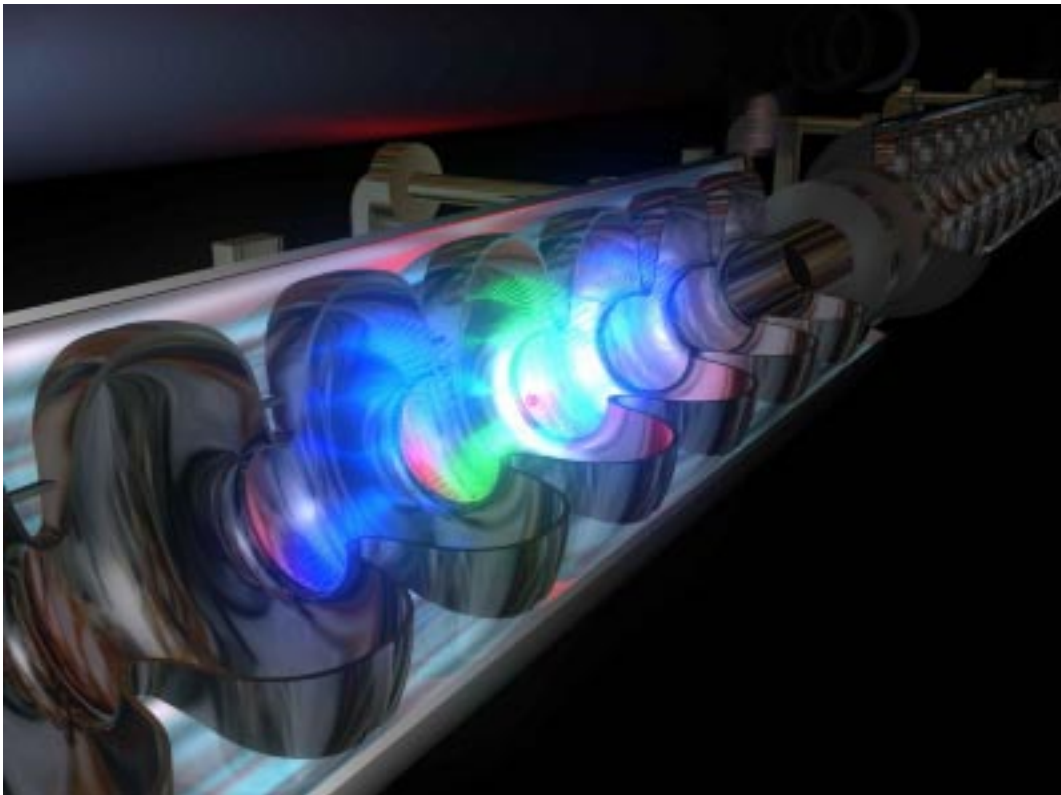


Mit dem Teilchenbeschleuniger TESLA auf der Suche nach dem Bauplan des Universums



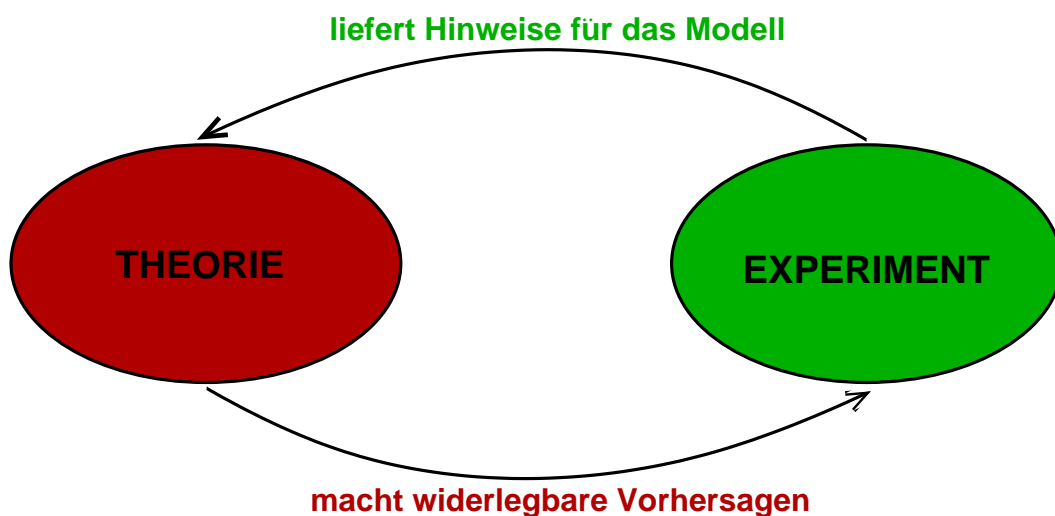
- **Stand der Elementarteilchenphysik**
- **Die großen Fragen**
- **Teilchenbeschleuniger**
- **Wozu TESLA: Highlights**

Elementarteilchen-Physik

sucht nach
kleinsten Bausteinen der Materie
und
Beschreibung der Kräfte zwischen ihnen

⇒ keine direkte Wahrnehmung

⇒ Entwicklung eines theoretischen Modells



”Gute Theorie:”

= wenig ”Zutaten” (wenig Naturkonstanten)

⇒ Weltformel

(Ästhetik ↔ Symmetrie)

Maßeinheiten

Experimente messen = quantitative Aussagen.

⇒ Grundeinheiten

klass. Physik

Länge

Zeit

Energie

Ladung

Temperatur

Masse

...

Teilchenphysik

Zusammenhang zwischen den
Grundeinheiten (Quanten-
theorie, Relativitätstheorie,...)

Energie ↔ Masse

$$E = mc^2$$

Länge ↔ Zeit

$$c = \nu\lambda$$

Energie ↔ Zeit

$$E = h\nu$$

Temperatur ↔ Energie

$$E = kT$$

Ladung ↔ dimensionslos (rel. Stärke einer Kraft)

Maßeinheiten

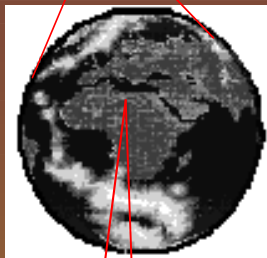
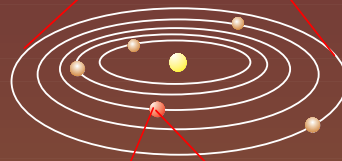
[Energie] = Joule = Ws

in der Teilchenphysik:

**1 Elektronvolt = 1 eV = Energie eines Elektrons,
das von einer Spannung
1 Volt beschleunigt wurde**

1 eV =	1.602×10^{-19} J	Bindungsenergie äuß. Atomhülle
1 keV =	10^3 eV	Bindungsenergie innerer Schalen (Röntgenstrahlung)
1 MeV =	10^6 eV	Bindungsenergie Atomkern
1 GeV =	10^9 eV	Masse Proton "Bindungsenergie der Quarks"
1 TeV =	10^{12} eV	= ?? Energie des TESLA Beschleunigers

Dimensionen und Struktur der Materie



Universum $10^{26} \text{ m}, 10^{52} \text{ kg}$

Galaxie $10^{21} \text{ m}, 10^{41} \text{ kg}$

Sonnensystem $10^{13} \text{ m}, 10^{30} \text{ kg}$

Erde $10^7 \text{ m}, 10^{24} \text{ kg}$

Mensch $10^0 \text{ m}, 10^2 \text{ kg}$

Atom $10^{-10} \text{ m}, 10^{-26} \text{ kg}$

Atomkern $10^{-14} \text{ m}, 10^{-26} \text{ kg}$

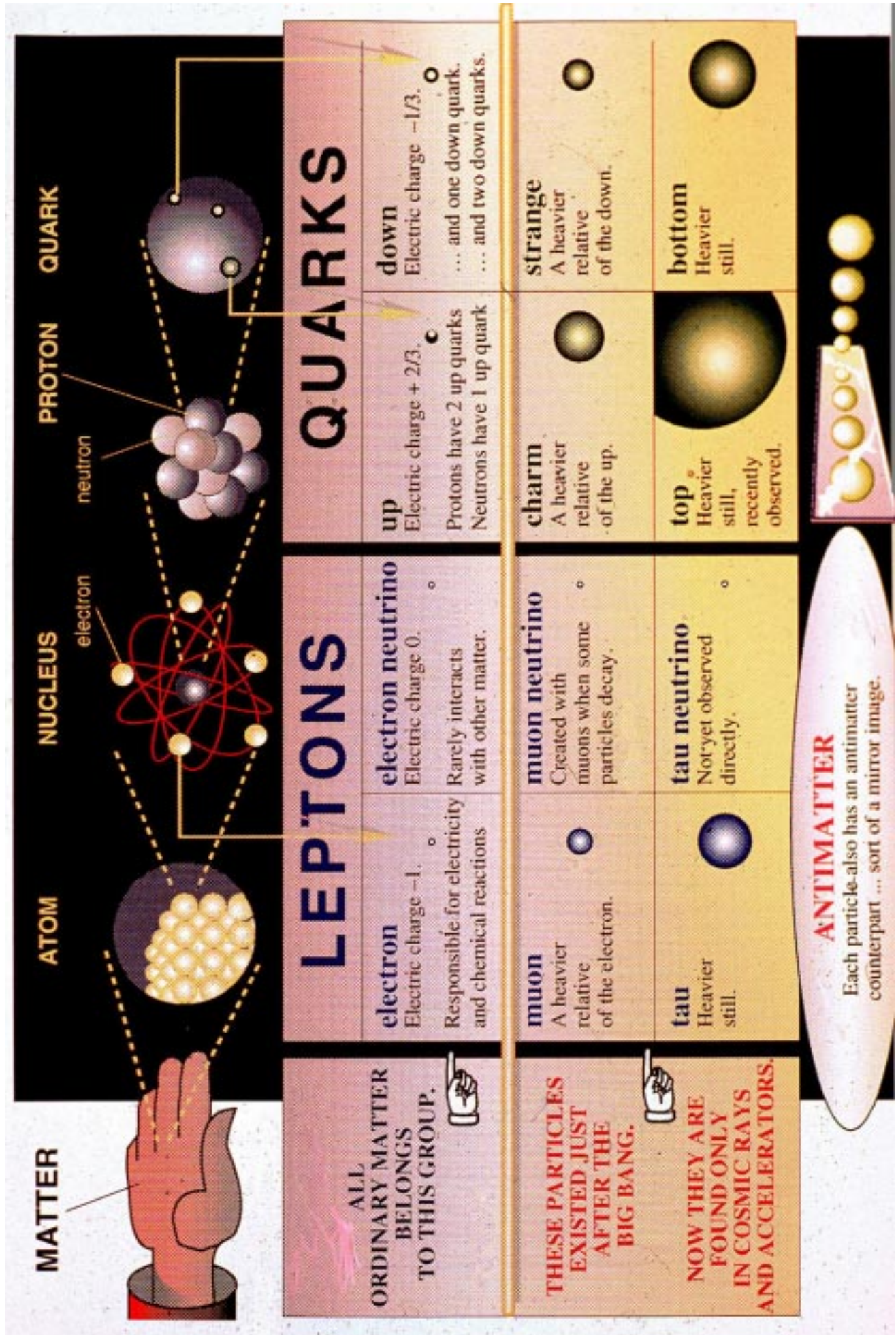
Nukleon $10^{-15} \text{ m}, 10^{-27} \text{ kg}$

Quark, Lepton $<10^{-18} \text{ m}, 10^{-30} \text{ kg}$

?????

?

?

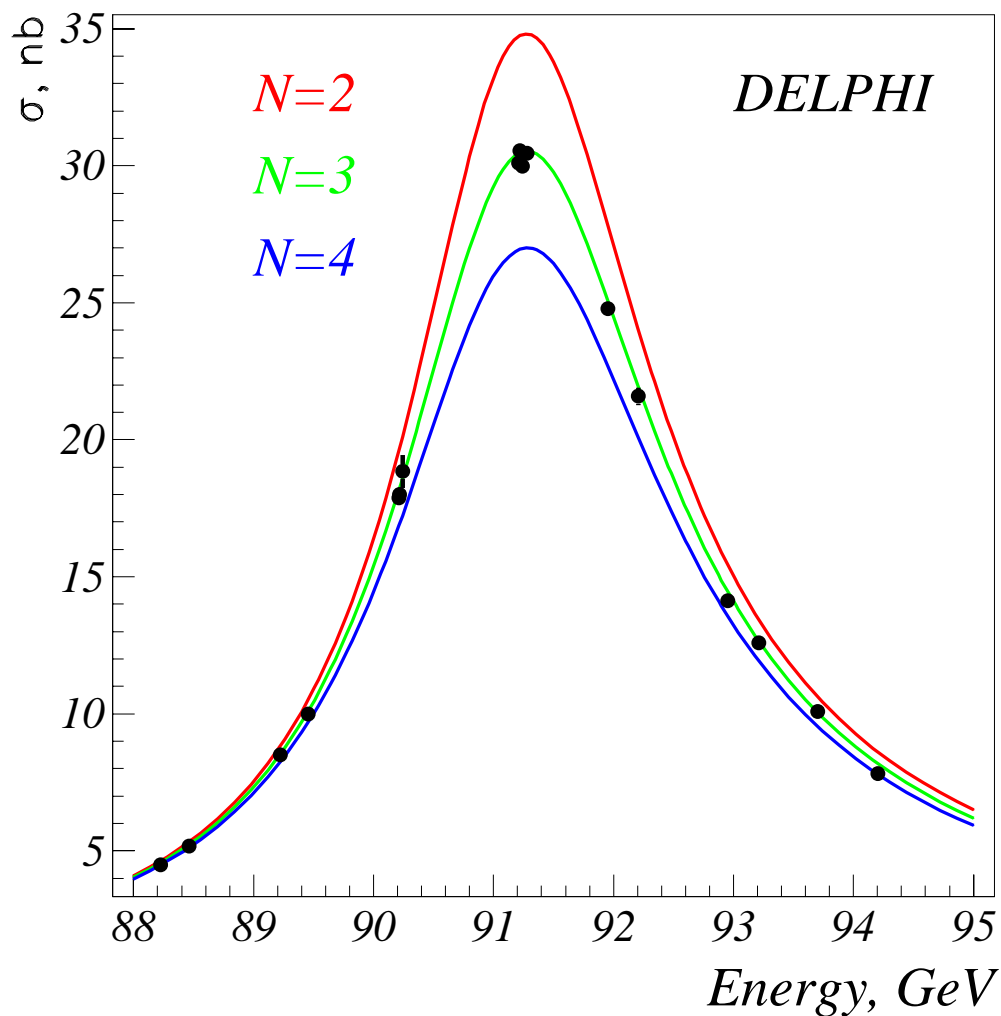


Drei Familien ?

Woher wissen wir, dass es wirklich drei Familien sind?

⇒ LEP Beschleuniger (CERN):

die (leichten) Neutrinos einer vierten Familie würden sichtbare Effekte hinterlassen.



Substruktur ?

Warum glauben wir, dass die momentan kleinsten Bausteine elementar sind?

Wir wissen, dass:

$$r_{Elektron} \leq 10^{-18} \text{ m (LEP) und}$$
$$r_{Quark} \leq 10^{-18} \text{ m (HERA)}$$

(1/1000 Protonradius!)

keine Hinweise auf weitere Substruktur

Theoretisch nicht favorisiert (aber auch nicht ausgeschlossen)

→ Experimente!

(10^{-18} m, $E = h/\lambda \rightarrow E \sim 200$ GeV)

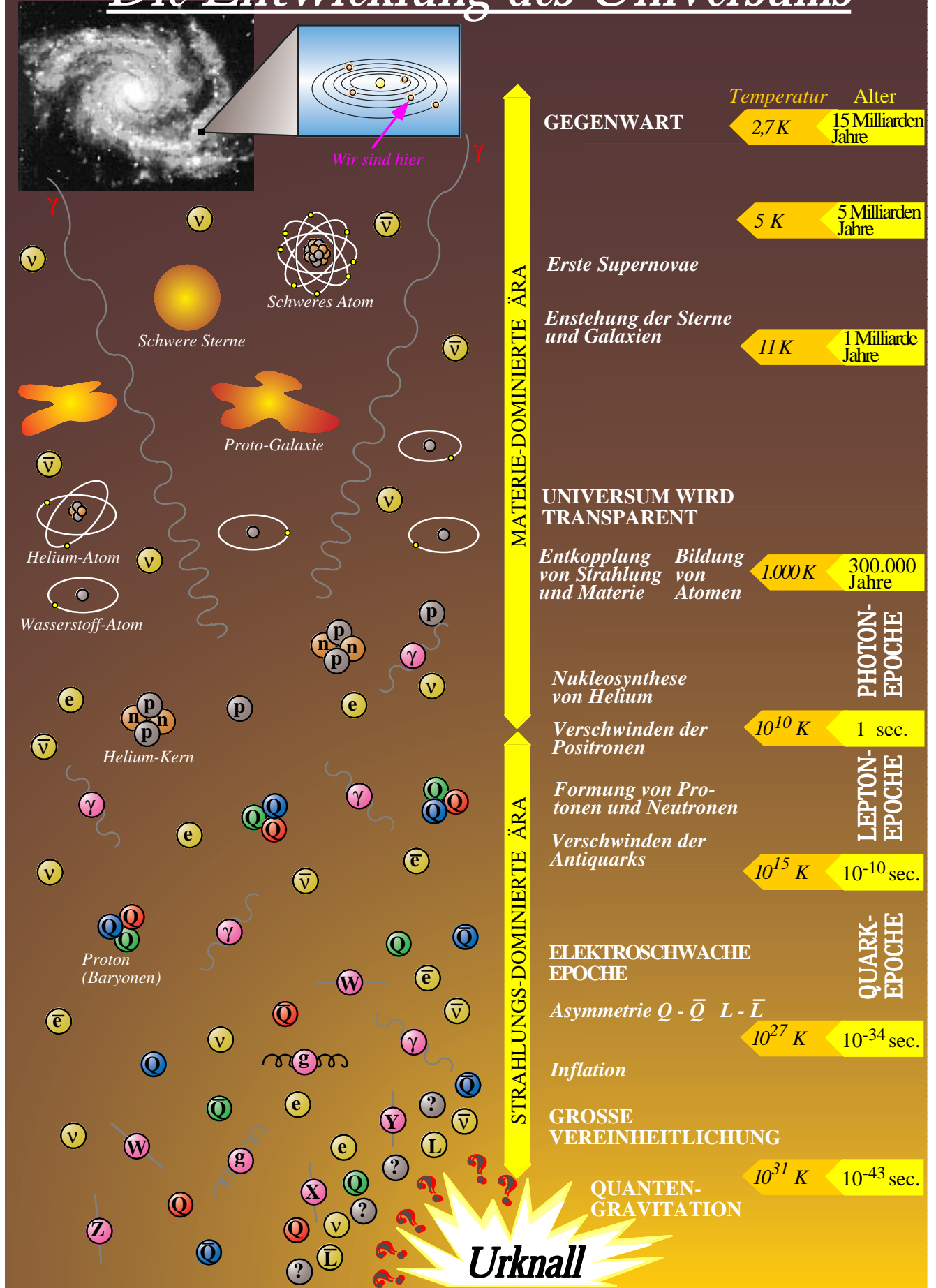
Bauplan Materie ↔ Bauplan Universum

Urknalltheorie:

- am Anfang gesamte Energie des Universums auf sehr kleinen Raum
- hohe Energiedichte (hohe Temperatur)
- Prozesse, die (heute) nur in Beschleunigern untersucht werden können, waren für den Ablauf der Expansion/Abkühlung des Universums entscheidend.

Struktur der Materie ↔ Entstehung des Universums

Die Entwicklung des Universums



© S. Bethke

Zusammenfassung: Bausteine

Aus heutiger Sicht:

- **Materie besteht Quarks und Leptonen**
- **6 verschiedene Quarks (3 Familien)**
- **6 verschiedene Leptonen (3 Familien)**
- **'gewöhnliche' Materie: nur 2 Sorten Quarks und 1 Lepton (Elektron)**
- **hohe Energien: Gleichberechtigung der Quark- und Lepton-Sorten. (wichtig bei Entstehung des Universum)**
- **Es gibt (vermutlich) keine weiteren Quarks/Leptonen**
- **Zu jedem Teilchen (Quarks,Leptonen) gibt es ein Antiteilchen**
- **Antimaterie wurde bei Urknall genauso wie Materie erzeugt (wo ist sie heute ?)**

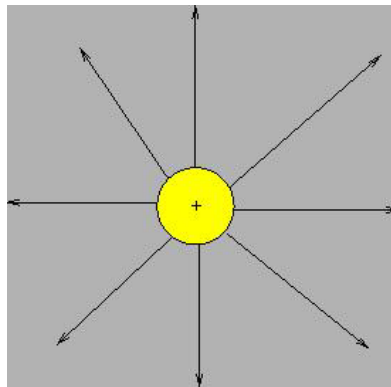
Kräfte: Historisches

Unser Kraftbegriff hat sich mehrfach geändert:

1. Newton: Kraft als Fernwirkung



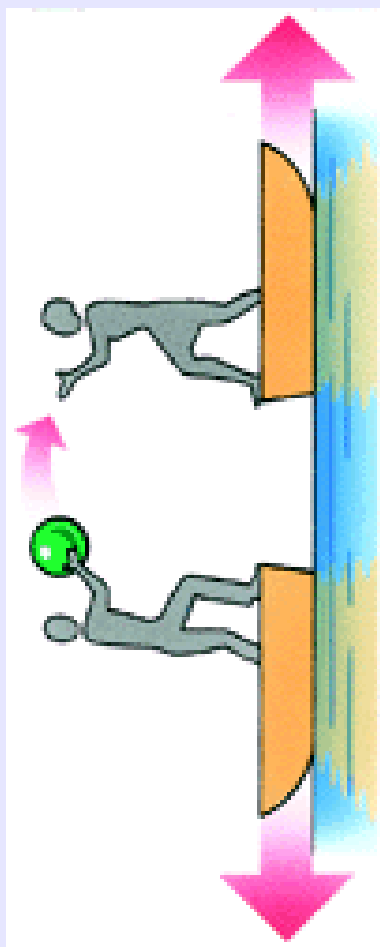
2. Maxwell: Kraft als Wirkung eines Feldes



3. Planck: Feld ist quantisiert → Feldquanten, Austauscheteilchen

Die Kräfte in der Natur

Typ	Rel. Stärke	Austauschteilchen	wirkt auf/bei
Starke Kraft	1	Gluonen $m=0$	Quarks Atomkern
Elekt.-Magn.Kraft	$\approx 1/1000$	Photon $m=0$	elektr. Ladung Atome, Chemie
Schwache Kraft	$\approx 10^{-5}$	W, Z Bosonen 80 GeV, 91 GeV	Leptonen, Quarks Radioaktive Beta-Zerfälle
Gravitation	$\approx 10^{-38}$	Graviton ? $m=0$	Masse, Energie

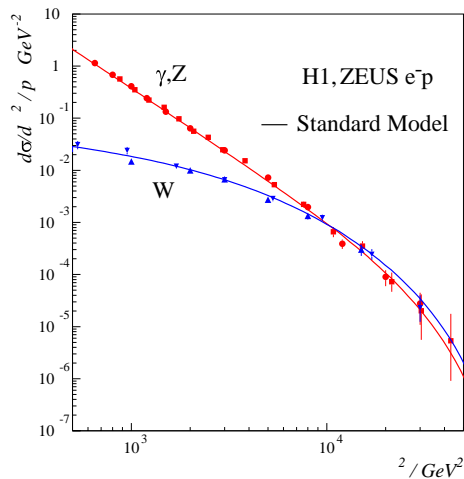
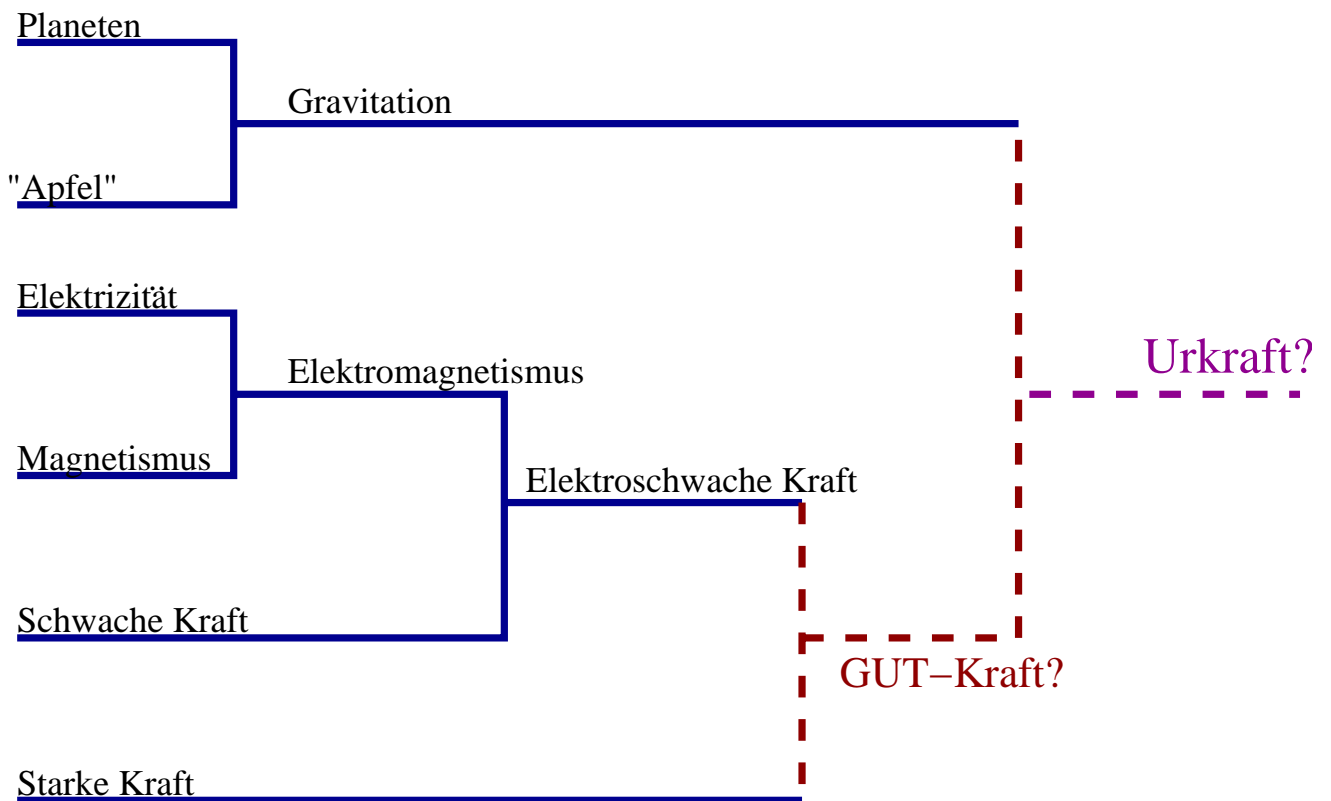


Die Austauschteilchen (Bosonen) übertragen die Kraft.

Vereinigung der Kräfte ?

Grundfrage (-hoffung):

Sind die verschiedenen Kräfte auf ein gemeinsames Prinzip (eine "Urkraft") zurückzuführen?



Zusammenfassung: Kräfte

- Zwischen Materieteilchen (Quarks+Leptonen) wirken 4 verschiedene Kräfte.
- Kräfte werden durch Austauschpartikel vermittelt.
- Unterschiedliche Stärke der Kräfte (im uns zugänglichen Energiebereich)
- Hohe Energien: Annäherung der Stärke. Vielleicht gleiche Stärke bei $\sim 10^{16} - 10^{19}$ GeV.
- Entstehung des Universums von Urkraft geprägt ?

Struktur der Kräfte \leftrightarrow Entstehung des Universums

Der Stand Heute

- Experimentell:

- Alle Materiebausteine entdeckt
- Austauschteilchen der elektromagnetischen, schwachen und starken Kraft entdeckt
- Gravitation: zu schwach

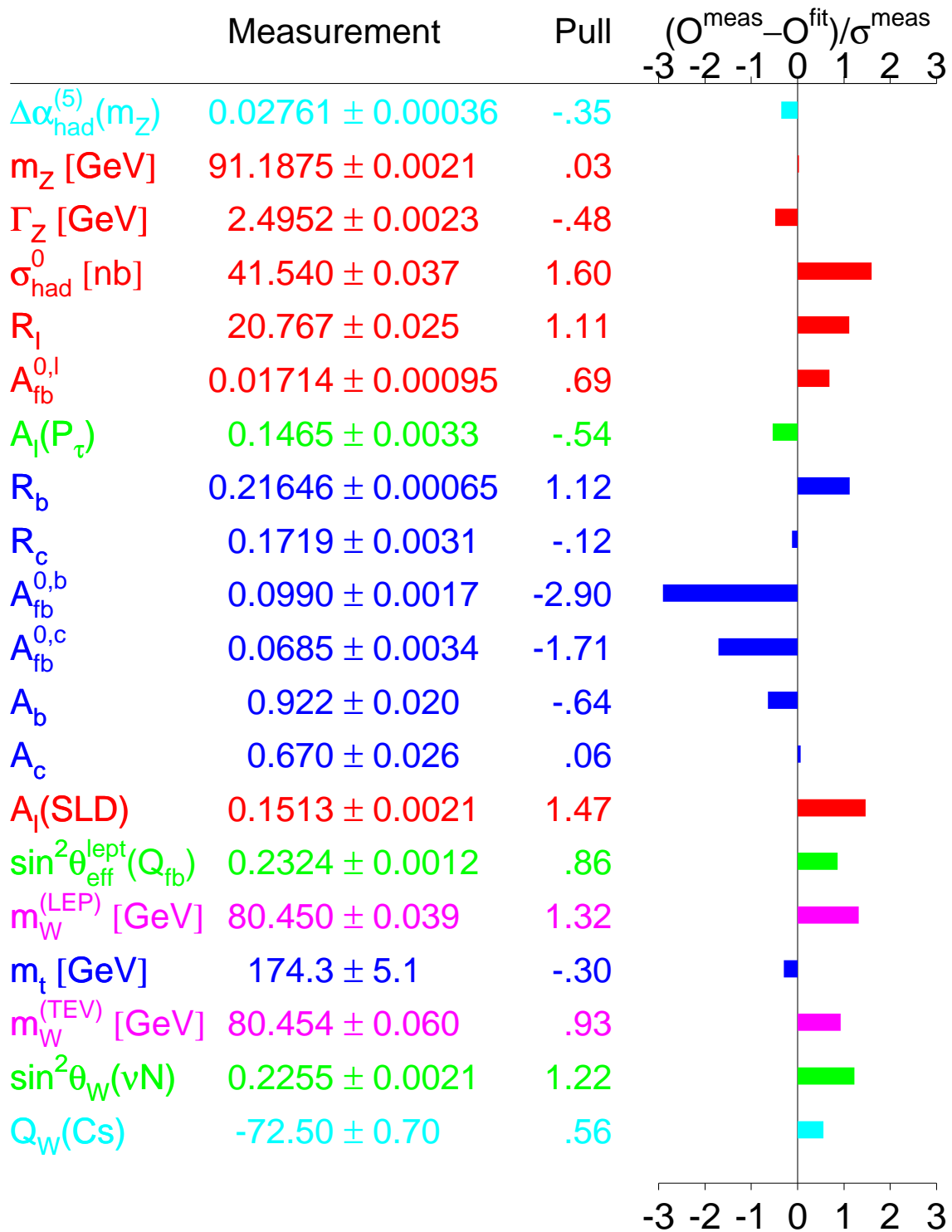
- Theoretisch:

- Standard-Modell beschreibt alle Kräfte (außer Gravitation) mit "einfachem" Symmetrieprinzip ("lokale Eichtheorie").
- viele Vorhersagen !
- präzise (LEP) überprüft

Sind wir fertig ???

Der Stand Heute

Summer 2001



Die großen Fragen:

Das Standard-Modell ist sehr erfolgreiche Beschreibung, lässt aber viele sehr grundlegende Fragen offen:

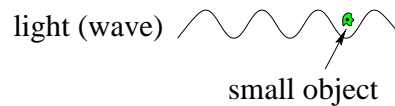
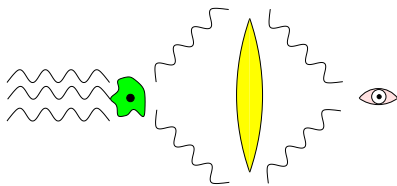
- **Ursprung der Masse? (Higgs Boson)**
- **Warum drei Familien?**
- **Vereinigung der Kräfte (Urkraft)?**
- **Warum ist die Ladung von Elektron und Proton exakt gleich (Zusammenhang zwischen Quarks und Leptonen)?**
- **Kann das Modell die Entstehung des Universums beschreiben? (Konsistenz zw. Kosmologie und Teilchenphysik)**
 - **dunkle Materie ?**
 - **wo sind die Antiteilchen ?**
 - **Gravitation ?**

Teilchenbeschleuniger

Zwei Möglichkeiten, Einblick in den Bauplan zu erhalten (beide benötigen Beschleuniger):

1. "Abtasten" kleiner Strukturen

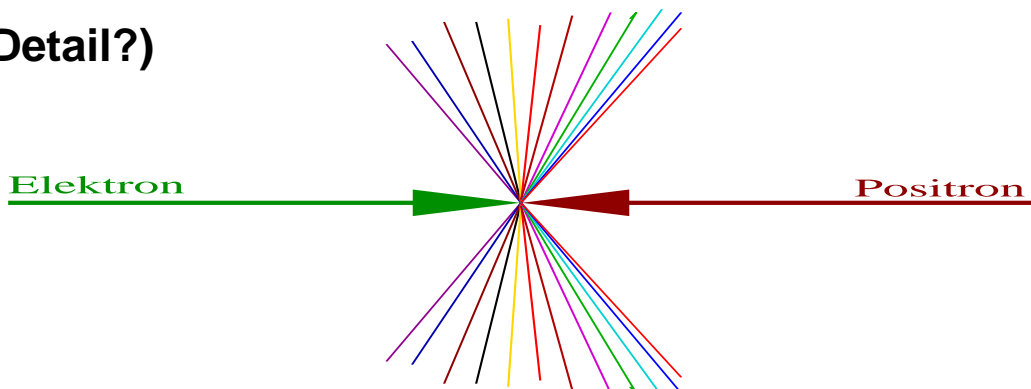
"Mikroskopie"



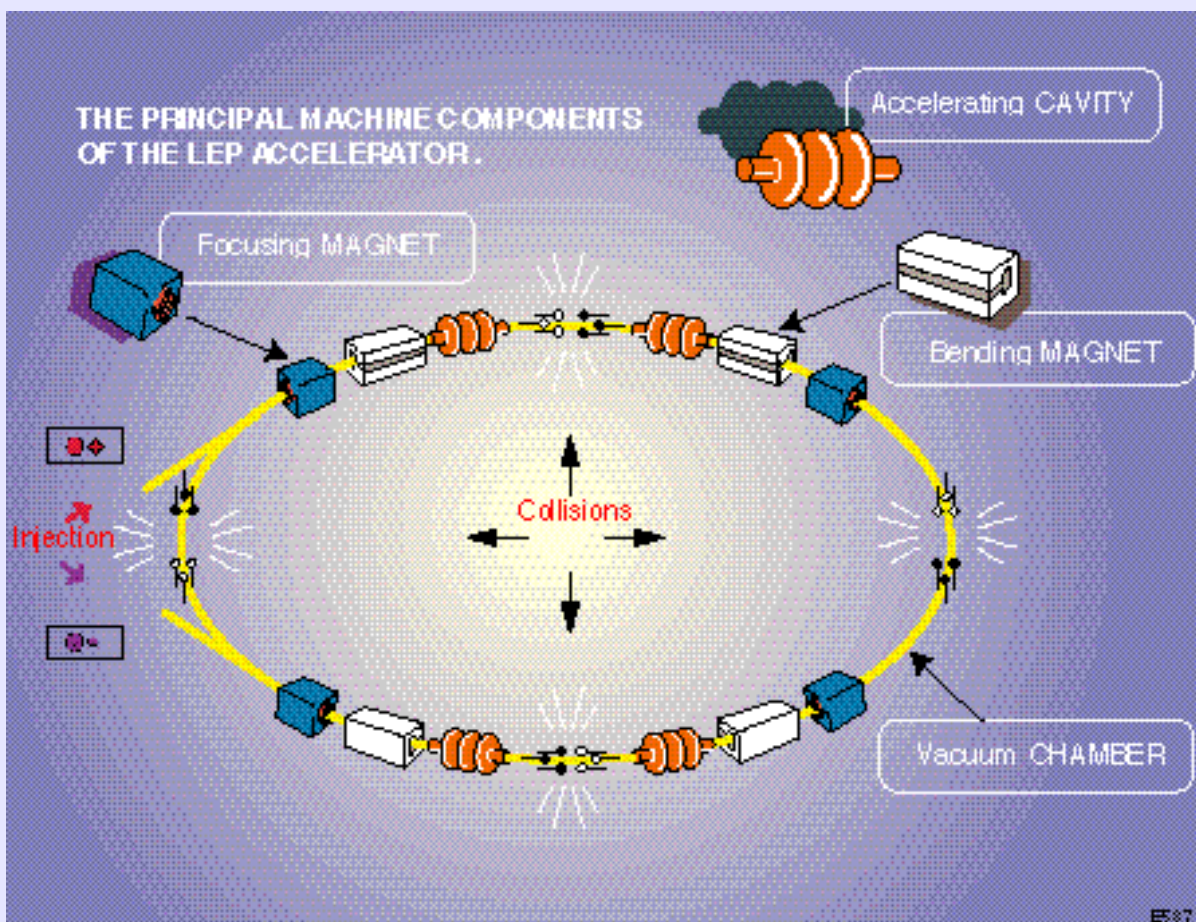
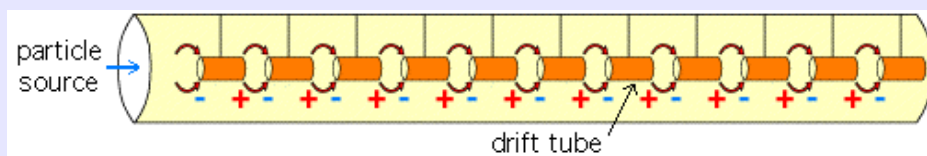
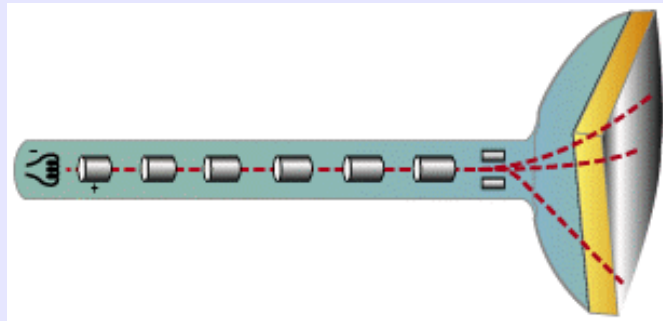
2. Erzeugung neuer schwerer Teilchen aus Energie:

Paarvernichtung von (z.B. Elektron und Positron).

- Entdeckung neuer Teilchen ($E = mc^2$)
- Präzisionsmessung (stimmen die Vorhersagen im Detail?)

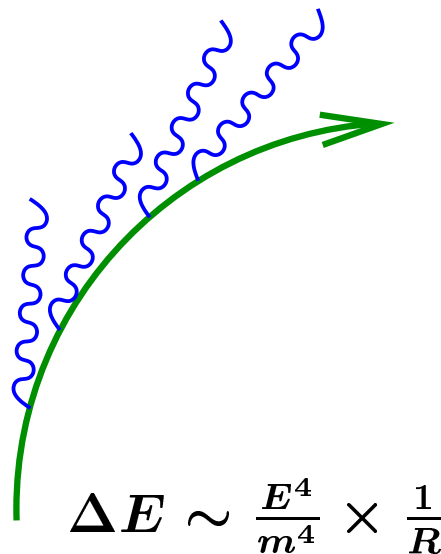


Teilchenbeschleuniger



Das Ende der Kreisbeschleuniger

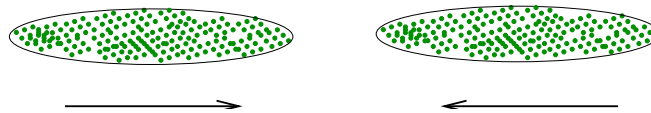
”Beschleunigte Ladungen strahlen”



- wichtig bei kleinen beschleunigten Massen (Elektronen)
- LEP Beschleuniger war größter realistischer Kreisbeschleuniger für Elektronen
- höhere Energien für Elektronen:
Linearbeschleuniger

Technologische Herausforderung

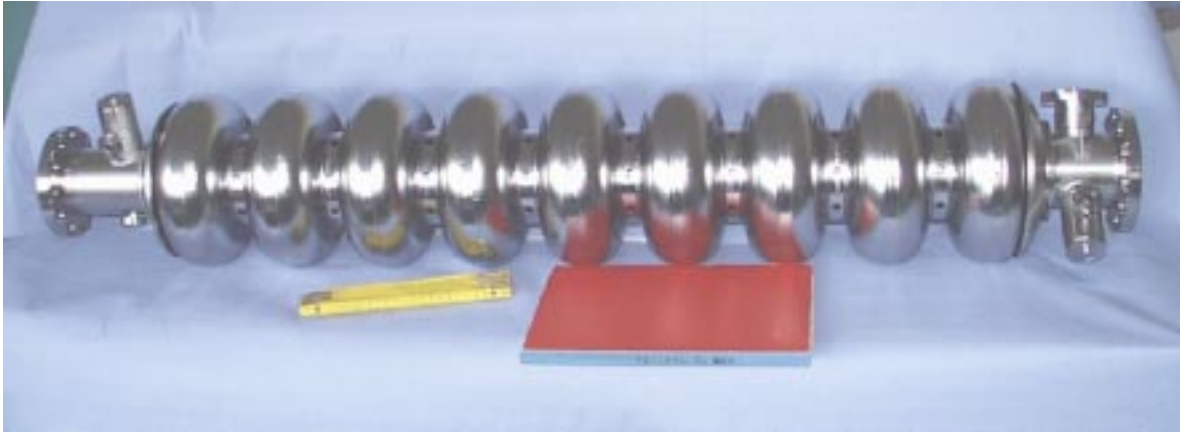
- **Teilchenstrahlen stehen nur einmal zur Kollision zur Verfügung**
 - **Luminosität!**
 - **kleine Ausdehnung der Teilchenpakete nötig (Fokussierung)**



- **Beschleunigung: hohe Gradienten (= Energiegewinn/Meter) erforderlich**
- **Energieverlust in den Beschleunigungsstrukturen (Stromkosten/Kühlung)**
 - **Supraleitung!**

Technologie für 500 GeV Linearbeschleuniger TESLA steht jetzt zur Verfügung!

Beschleunigungs-Elemente



- **aus reinem Niob (Supraleiter)**
- **kritisch:**
 - **glatte Oberfläche**
 - **absolute Staubfreiheit**
 - **Massenproduktion**
(für TESLA: \sim 20000 Elemente)

Der TESLA Beschleuniger

Länge: 32 km

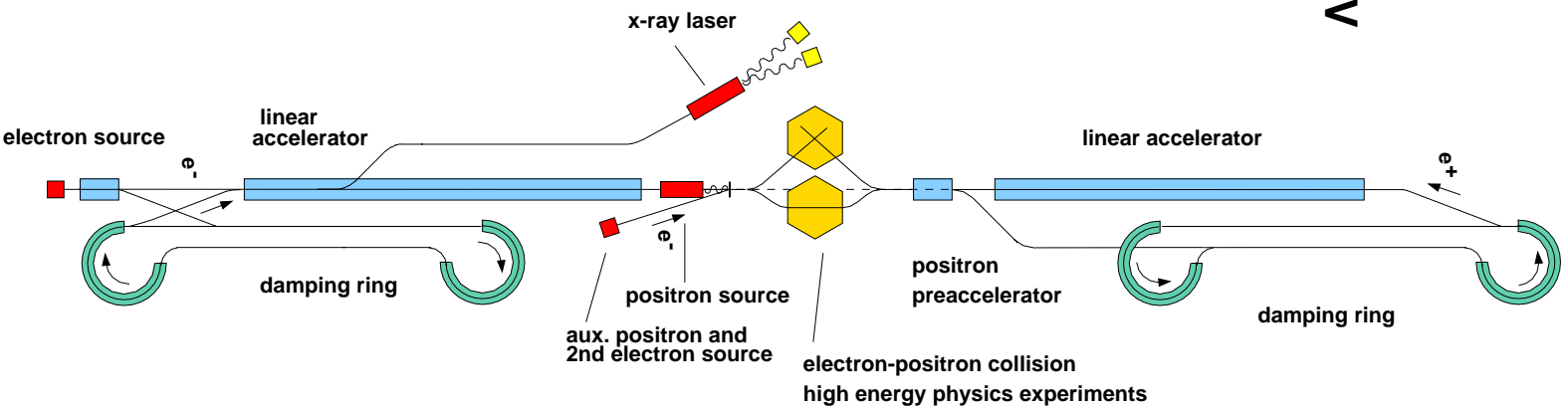
Energie: 500 - 800 GeV

hohe Luminosität

($\sim 1000 \times$ LEP)

\Rightarrow hohe Sensitivität

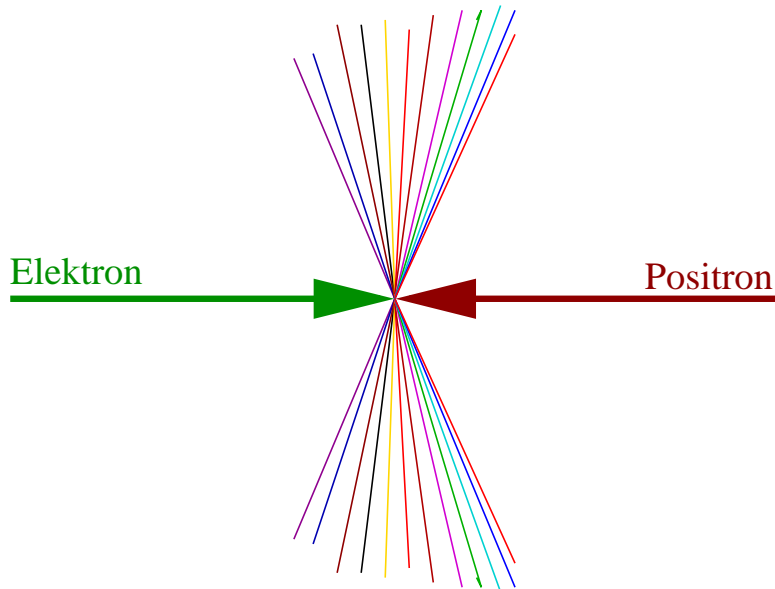
aus seltene Prozesse



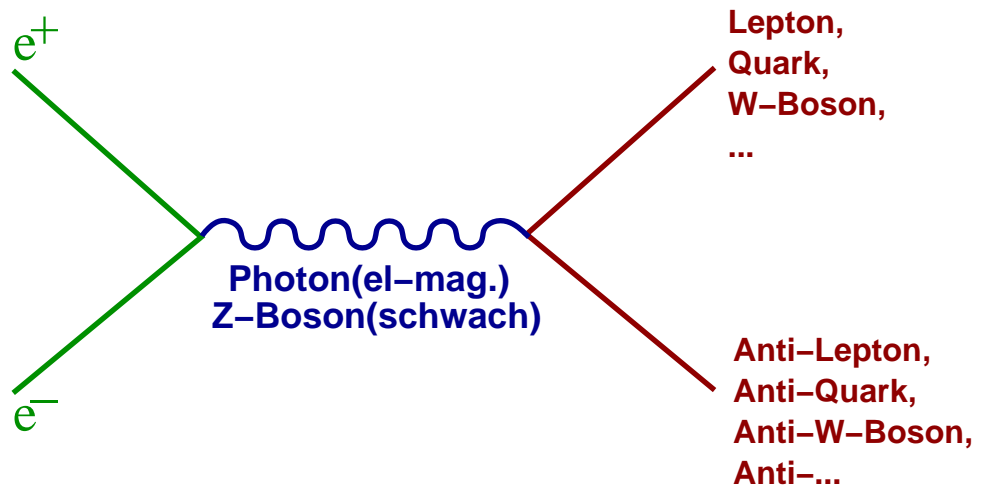
Der TESLA Beschleuniger



Elektron-Positron-Kollisionen



Darstellung in der Teilchenphysik:
"Feynman-Diagramme"

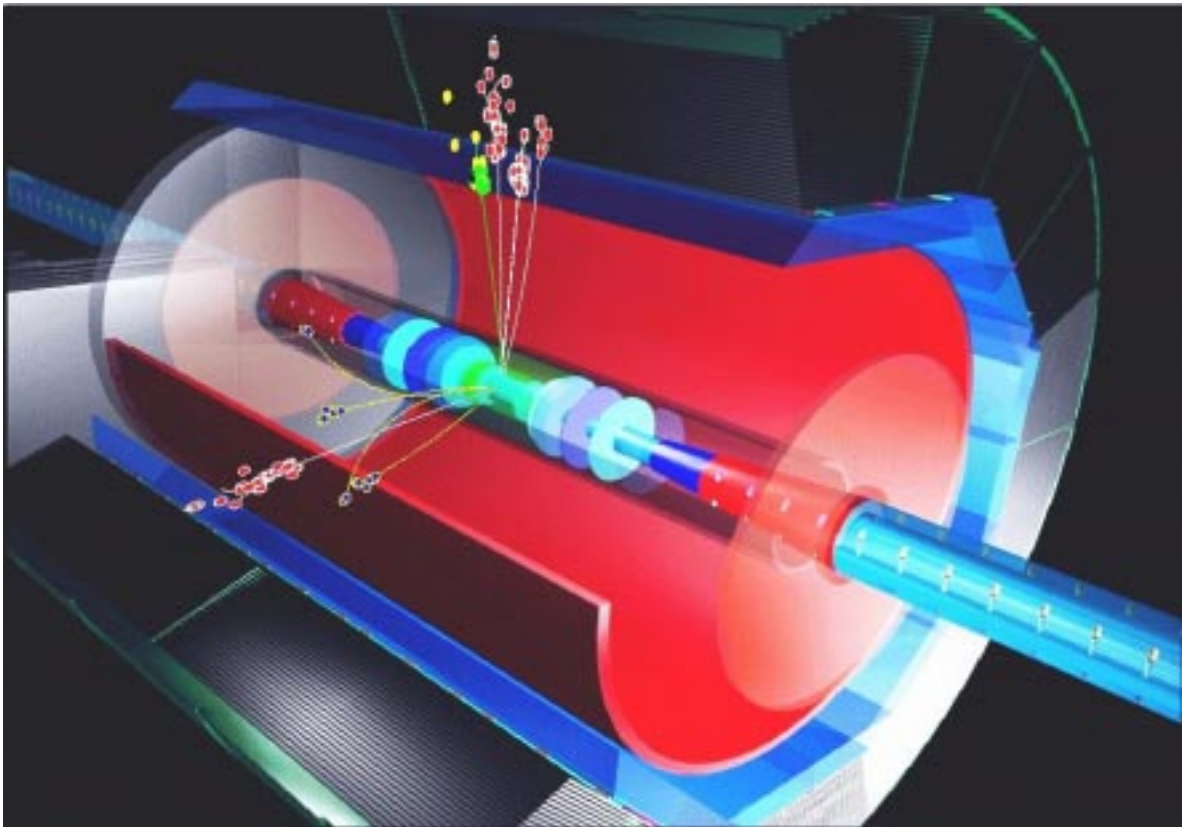


Elektron-Positron-Kollisionen

Nachweis der Kollisionen im **Detektor**

- Identifikation der entstandenen Teilchen
- Messung ihrer Eigenschaften (Energien, Winkel)

⇒ **Rekonstruktion des Gesamt ereignisses**



Physik mit TESLA

Highlights:

- **Ursprung der Masse?**
→ **Higgs-Boson(en)**
- **Vereinheitlichung der Kräfte und dunkle Materie**
→ **Supersymmetrie**
- **Neue Struktur der Raum-Zeit ?**
→ **Gravitation ?!**

Dies sind nur Beispiele...

Viele weitere Fragen und Modelle wurden untersucht...

Ursprung der Masse

Dilemma der (theoret.) Teilchenphysik:

Theorie funktioniert nur für **masselose** Teilchen
aber: die meisten bekannten Teilchen sind **massiv**
(exp. Befund).

Mögliche Lösung:

Die Teilchen **erscheinen** uns nur massiv, da sie permanent einer (neuen) Kraft ausgesetzt sind, die wir ansonsten nicht spüren!

3 Beispiele:

1. Helium-Ballon im Auto
2. V.I.P. auf einer Party
3. Der Higgs-Mechanismus

Der Higgs-Mechanismus



Der Higgs-Mechanismus

- Im "leeren Raum" (Vakuum) herrscht ein konstantes nicht verschwindendes Kraftfeld (ohne Richtung!): "skalare Kraft" (Higgs-Feld)

- Sie hindert die Teilchen die diese Kraft spüren an ihrer freien Bewegung:

$$m = 0 \Rightarrow v = c \text{ (ohne Feld)}$$

↓ (Wechselwirkung mit Higgs-Feld)

$$m \neq 0 \Leftarrow v = \beta c (\beta < 1)$$

- Das Feld ist überall, wir spüren es nicht
→ alle Teilchen die mit dem Feld wechselwirken erscheinen uns (wenn wir das Feld ignorieren) als hätten sie Masse

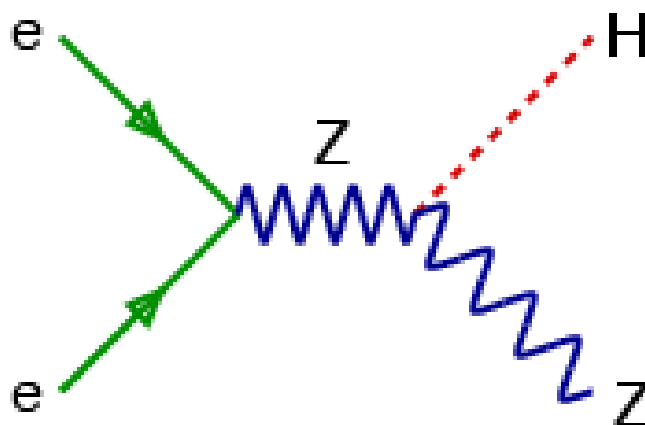
Das Higgs-Boson

Überprüfbare Konsequenz des Higgs-Feldes:

Es muss ein diesem Feld zugeordnetes Teilchen geben, das Higgs-Boson

- Letzter fehlender Baustein des Standard-Modells
- Im SM wird alles über das Higgs-Boson vorhergesagt außer seiner Masse (→ entscheidender Test!)

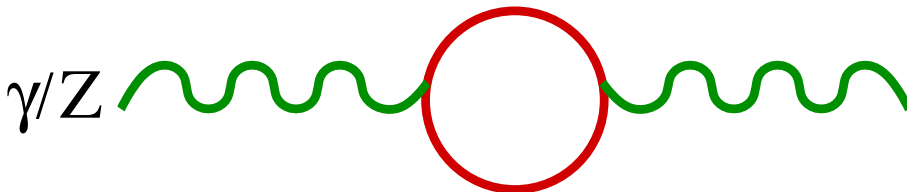
Higgs-Suche bei LEP:



$$m_H > 114 \text{ GeV}$$

aber...

Indirekte Effekte



Heisenberg'sche Unschärfe-Relation: $\Delta t \Delta E > \hbar$
 \Rightarrow für kurze Zeit können "virtuelle" Teilchen entstehen, auch wenn die Beschleunigerenergie hierfür nicht ausreicht.

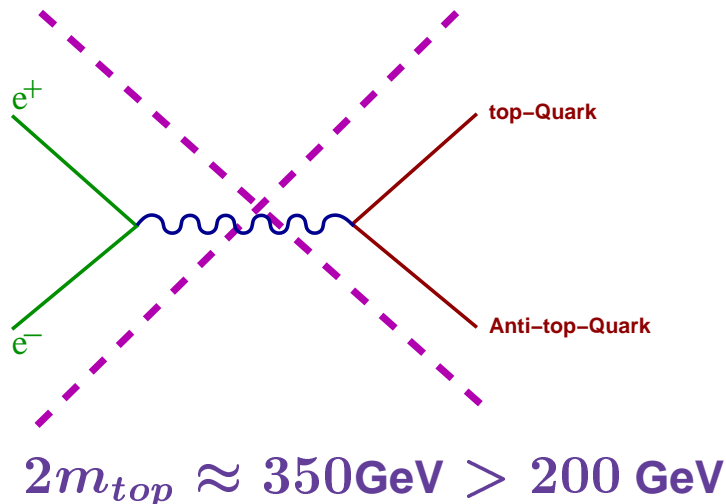
\Rightarrow Die Möglichkeit der Fluktuation verändert geringfügig

- die Reaktionsrate
- die Reaktionseigenschaften

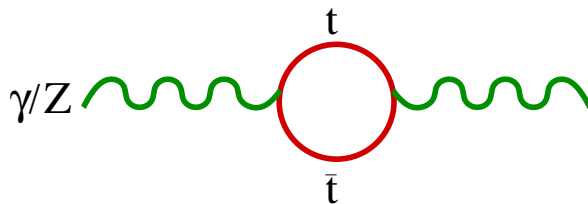
\Rightarrow Präzisionsmessung ($< \sim 1\%$) der bekannten Prozesse erlaubt Rückschlüsse über die virtuellen Teilchen.

Beispiel: top-Quark

Konnte bei LEP nicht erzeugt werden (zu wenig Strahlenergie):



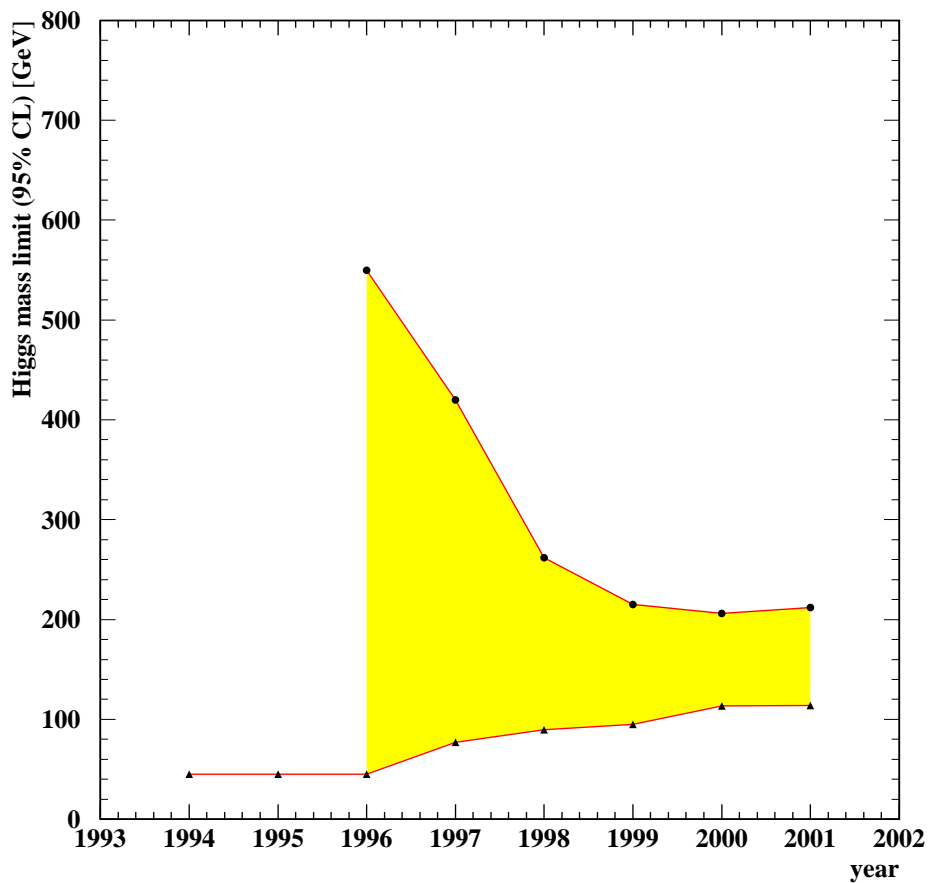
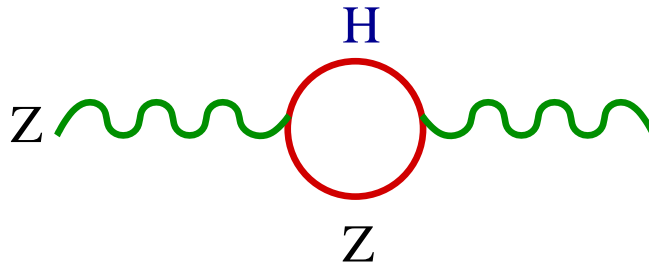
Trotzdem konnte die Top Masse mit Hilfe von:



vorhergesagt werden: $m_{top} = 180 \pm 20 \text{ GeV}$ (1994)
1995: Entdeckung des top-Quarks am Tevatron Beschleuniger:

$$m_{top} = 175 \pm 5 \text{ GeV (direkte Beobachtung)}$$

Indirekte Hinweise auf Higgs-Boson



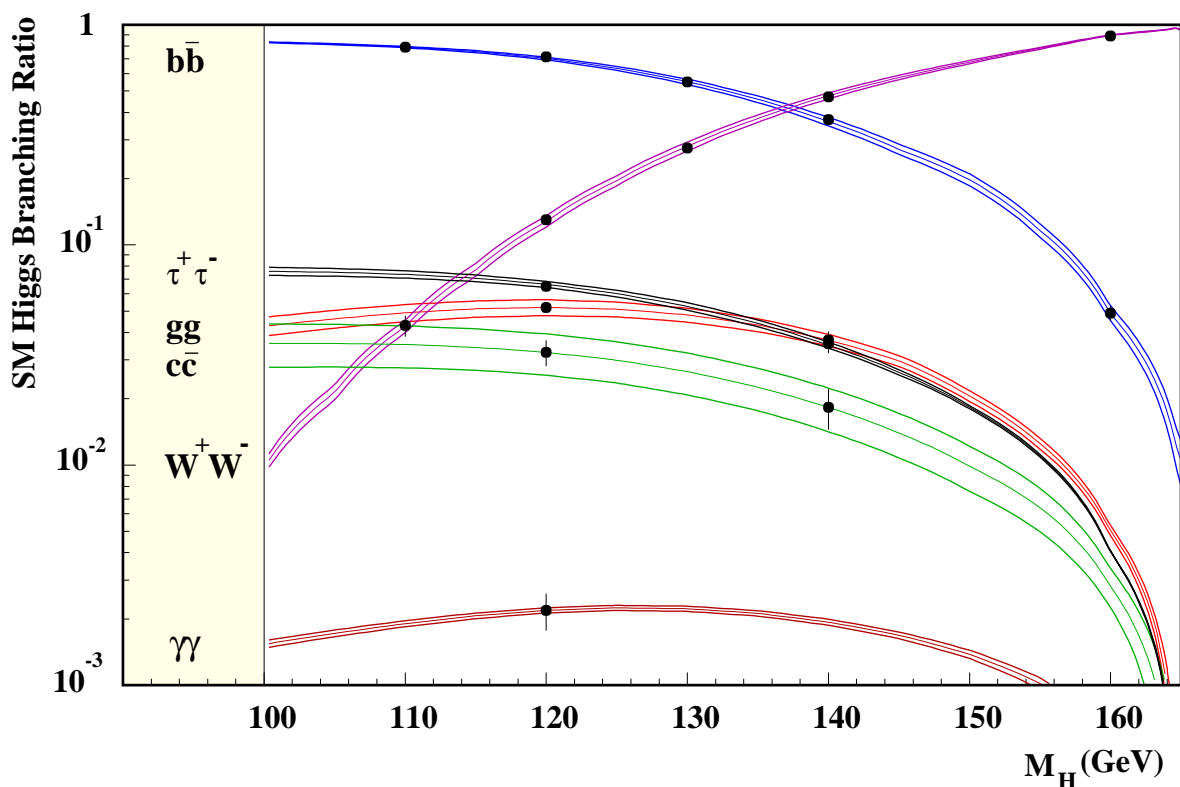
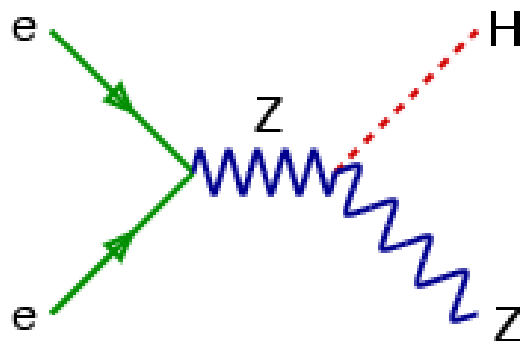
$m_H < 200 \text{ GeV} !$

Higgs-Physik bei TESLA

Präzisionsmessung aller Eigenschaften des Higgs-Bosons.

⇒ Beweis, dass alle Teilchen nur eine scheinbare Masse haben!

oder: Überraschungen (Verständnis durch Genauigkeit).

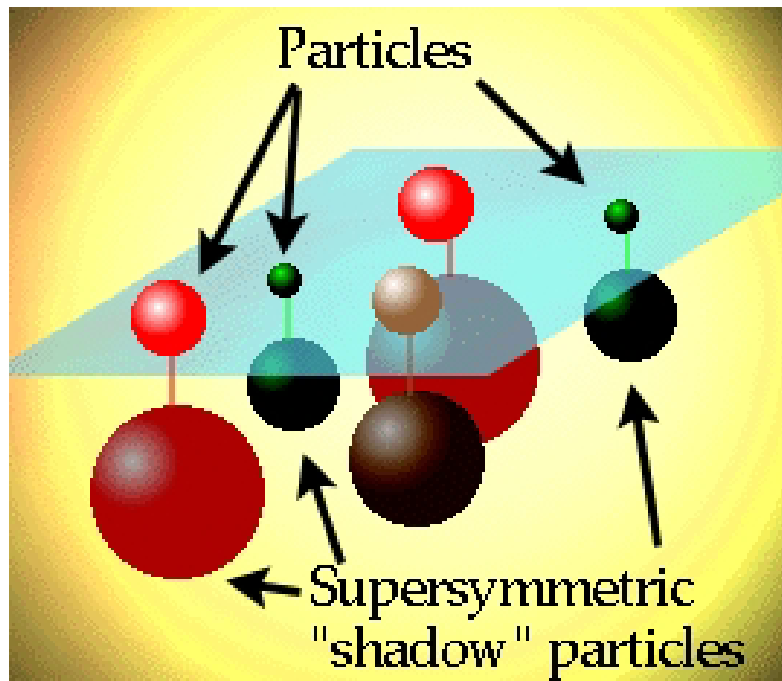


Jenseits des Standard-Modells

- Das SM ist vermutlich "nur" eine Näherung für nicht allzuhohe Energien
erklärt nicht:
 - dunkle Materie
 - verschwinden der Antimaterie
 - warum Gravitation so schwach ist
 - + theoretische Probleme (Unendlichkeiten...)
- Konsistente Erweiterung des Standard-Modells zu finden ist nicht trivial...
- erster sehr vielversprechender Schritt:

Supersymmetrie

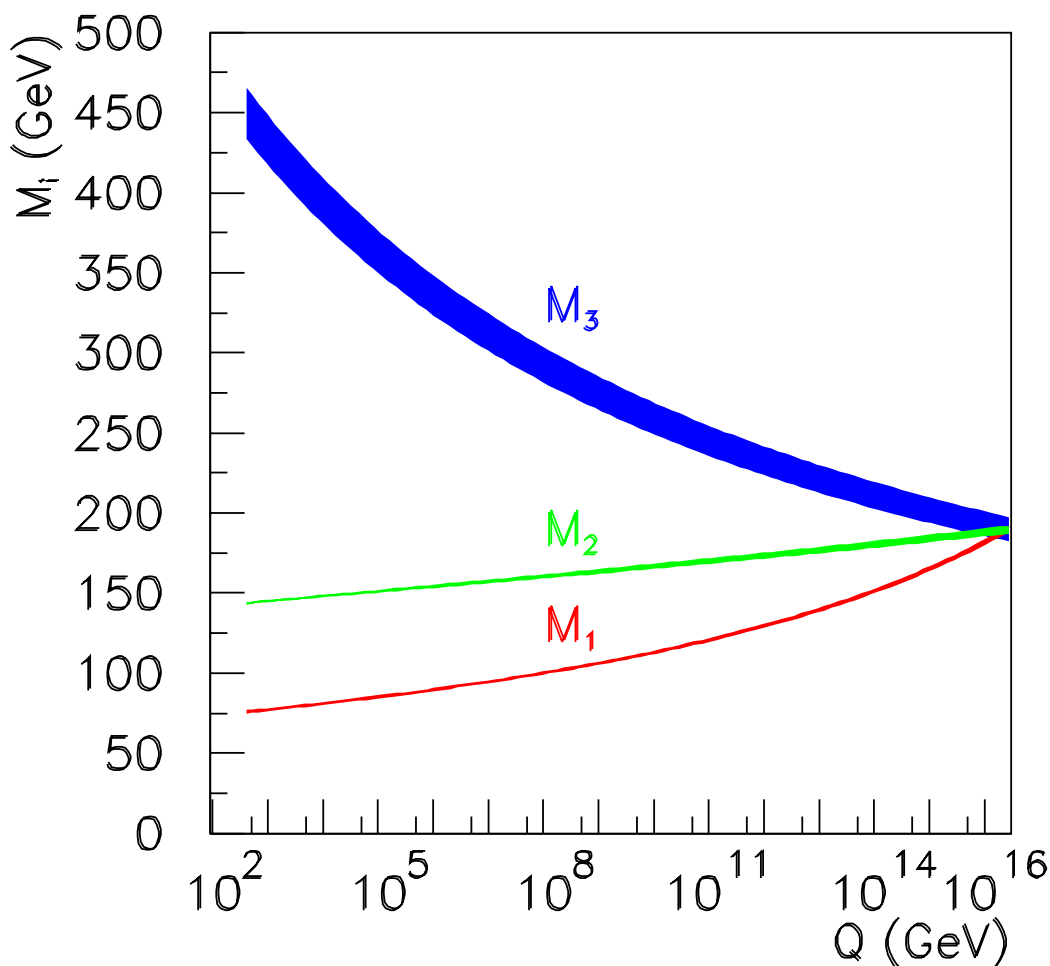
Supersymmetrie



- Zu jedem SM Teilchen (Materie+WW-Teilchen) gibt es ein supersymmetrisches Partnerteilchen
- → Symmetrie zwischen Materie (Fermionen) und Kraftteilchen (Bosonen)
- Supersymmetrie muss "gebrochen" sein (sonst hätten die SUSY Partner die gleiche Masse wie ihre SM Teilchen)
- Leichtestes SUSY Teilchen stabil → dunkle Materie
- beinhaltet Konzept für Vereinheitlichung der Kräfte bei sehr hohen Energien

Supersymmetrie

- SUSY Teilchen können bei TESLA präzise untersucht werden, wenn sie existieren
- **Präzision** = Schlüssel zu sehr hohen Energien (weit höher als jeder denkbare Beschleuniger)



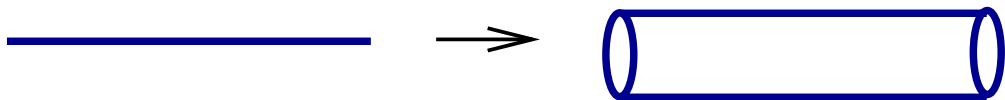
„Teleskop zum Urknall“

Neue Dimensionen

ganz neues Modell:

es könnte sein, dass:

- es weitere Raumdimensionen aufgerollt auf einer Skala von $\sim \mu\text{ m}$ gibt.



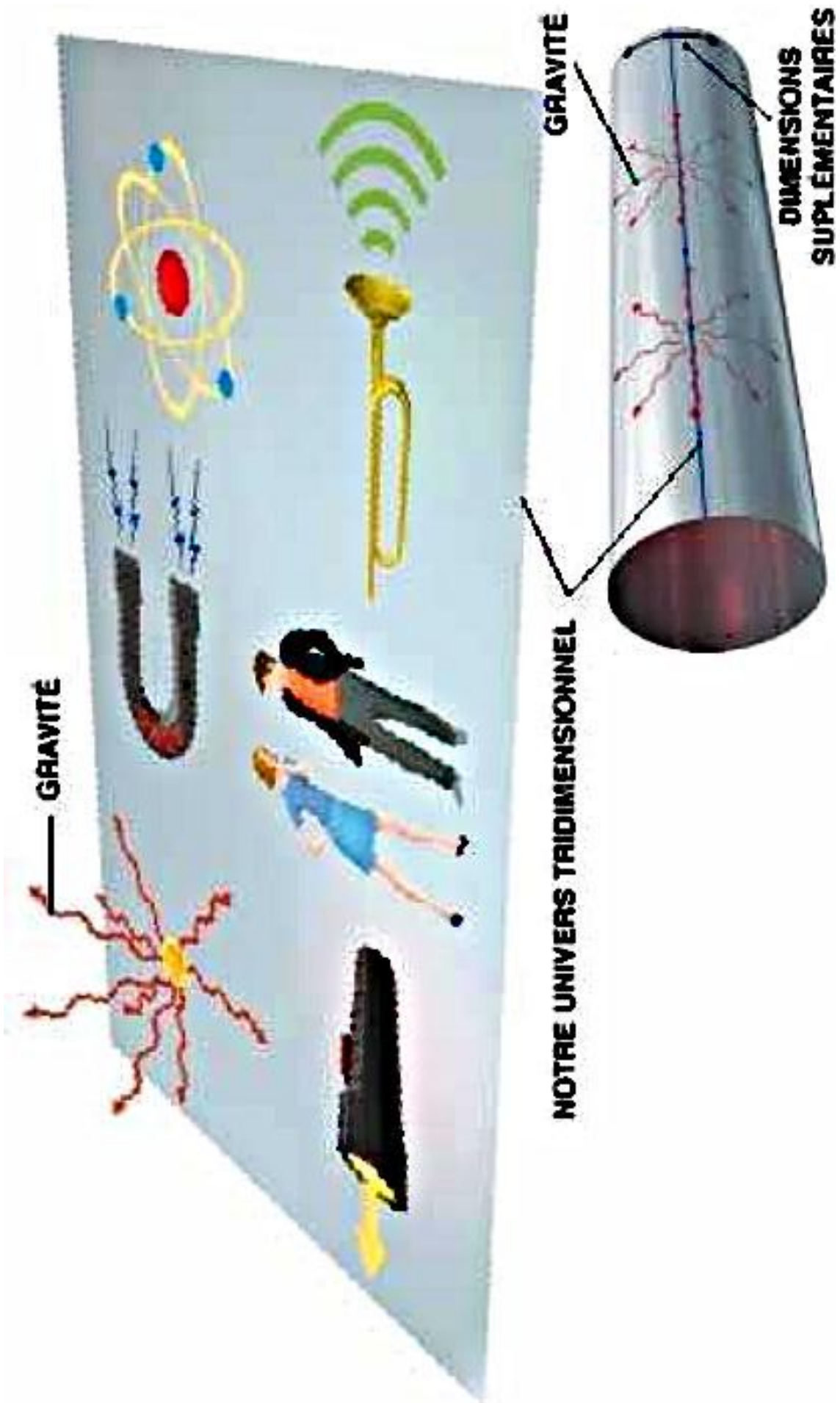
1-dim. Welt

'aufgerollte' Extra-Dimension

- SM Kräfte (elektro-schwach und stark) nur in der "normalen" 3+1-dimensionalen Welt ("auf der Oberfläche") existieren können
- Gravitation ins "Innere" dringt (\rightarrow Abweichung von Newton's Gravitationsgesetz)
- die Gravitation nur deshalb so schwach erscheint, weil sich die Gravitonen in die anderen Dimensionen 'verirren'

\Rightarrow völlig neue Vorstellung um Quantengravitation zu verstehen

\Rightarrow TESLA kann die Auswirkungen dieses Modells sehen!



Zusammenfassung

- **Struktur der Materie und der Kräfte bestimmt die Entstehung unseres Universums**
 - **Mit TESLA können viele sehr grundlegende Fragen untersucht werden:**
 - **Ursprung der Masse**
 - **Urkraft**
 - **Rolle der Gravitation u.a.**
 - **Technologie hierfür steht jetzt zur Verfügung**
- **aufregende Zeiten!**