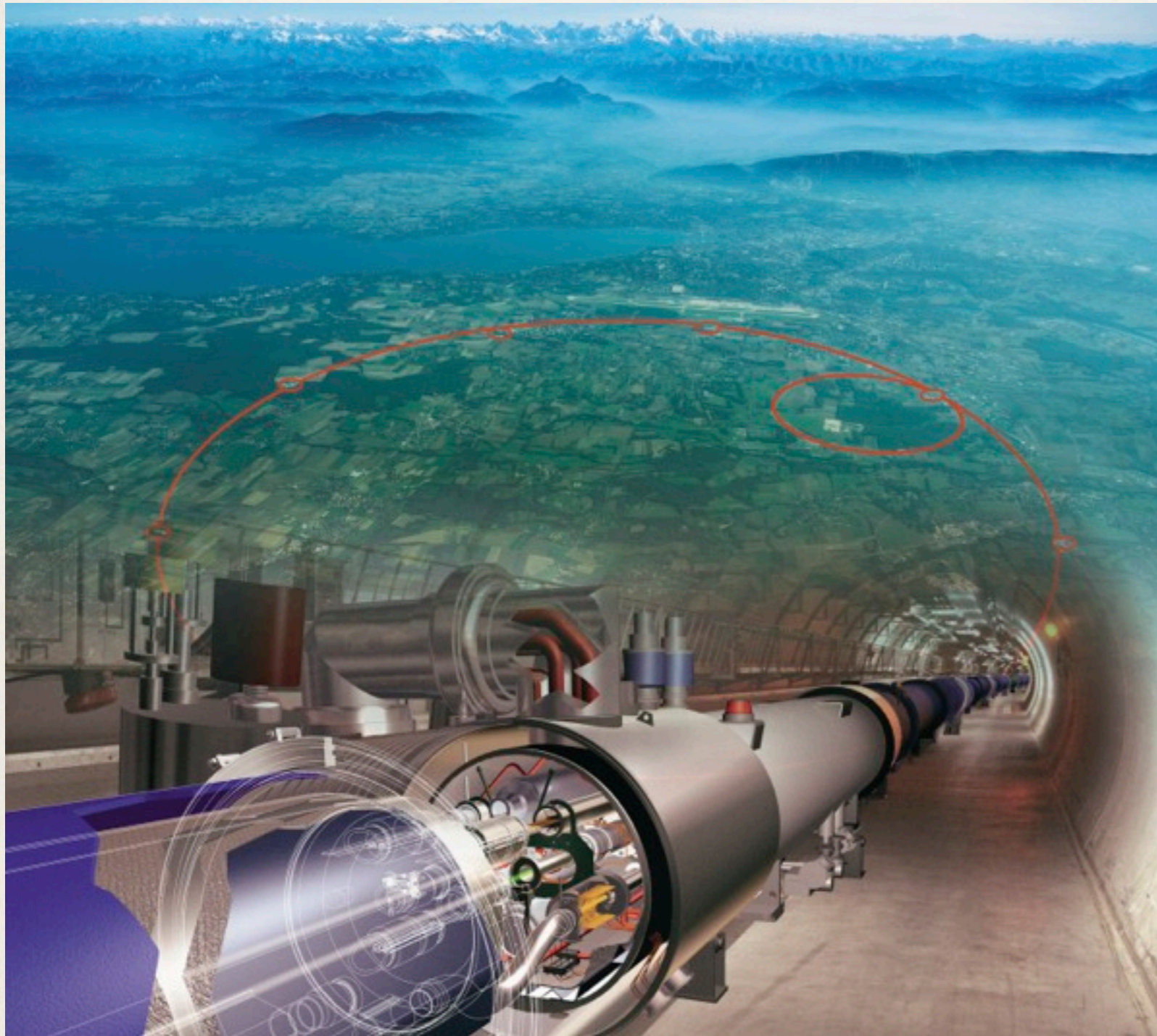


# Einführung in die Teilchenphysik

Pascal Nef

# Large Hadron Collider (LHC)



- ◆ Das CERN ist heute das Zentrum der Teilchenphysik
- ◆ Der LHC beschleunigt Protonen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit um sie in 4 Kollisionspunkten kollidieren zu lassen.
- ◆ Der LHC ist die grösste Maschine der Welt
- ◆ Die 4 grossen Experimente am LHC sind die komplexesten Experimente die je gebaut wurden



## Wieso das alles?



# Was ist Teilchenphysik?

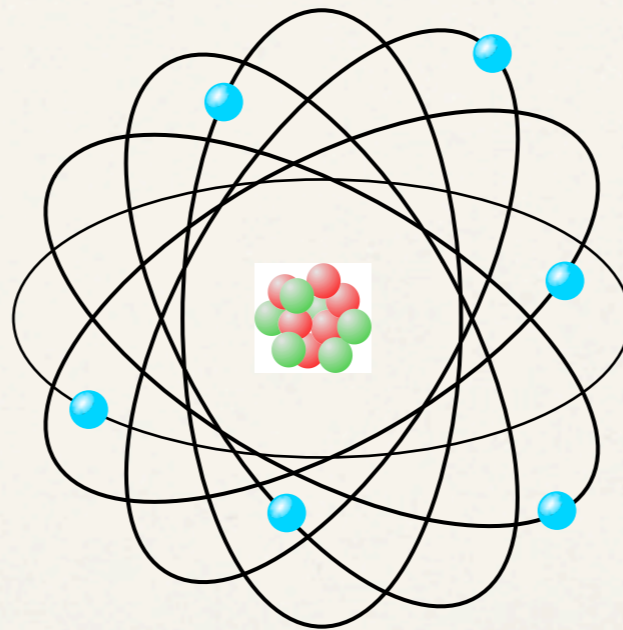
---

---



zentrale Frage:

**Was sind die fundamentalen Bausteine und Wechselwirkungen der Natur?**



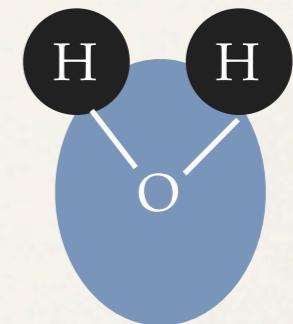
# 4 Elemente?



# Ist Wasser elementar?



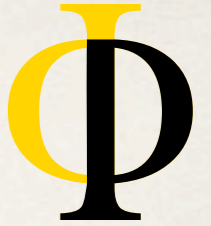
100'000'000 mal vergrößert



◆ H<sub>2</sub>O - Molekül

- ◆ Es gibt Moleküle. Aber auch die sind nicht elementar.
- ◆ Sind die Atome elementar?

# Die Atome?



- ◆ Atome: griechisch für “das Unzerschneidbare”.

## Periodic Table of Elements

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	H																		2	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	

**C** Solid

**Hg** Liquid

**H** Gas

**Rf** Unknown

**Metals**

Alkali metals | Alkaline earth metals | Lanthanoids | Actinoids | Transition metals | Poor metals

**Nonmetals**

Other nonmetals | Noble gases

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com). <http://www.ptable.com/>

- ◆ Sind die Atome die elementaren Bausteine der Materie?
- ◆ Kann man etwas so winziges noch weiter zerlegen?
- ◆ Wie wissen wir, wie ein Atom funktioniert?

# Kann man Atome zerlegen?



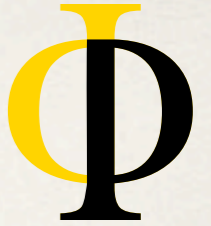
- ◆ Wie kann man die Struktur eines Atoms untersuchen, obwohl es so winzig ist?
- ◆ Einmal anders gefragt: Wie funktioniert ein Auto?
- ◆ Die Antwort des Teilchenphysikers sieht folgendermassen aus:



- ◆ Je grösser die Energie, desto mehr Bruchstücke entstehen.
- ◆ Schliesse auf die Funktionsweise des Autos durch eine Analyse der Bruchstücke.



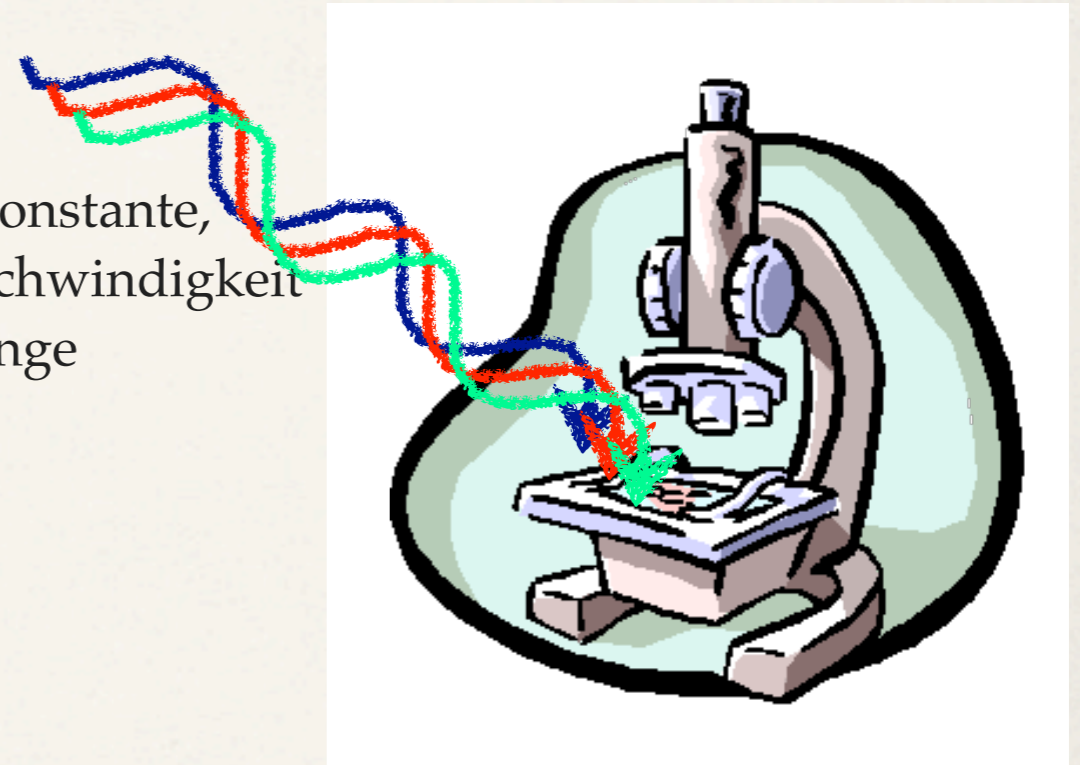
# Energie $\Leftrightarrow$ Auflösung



Luis de Broglie

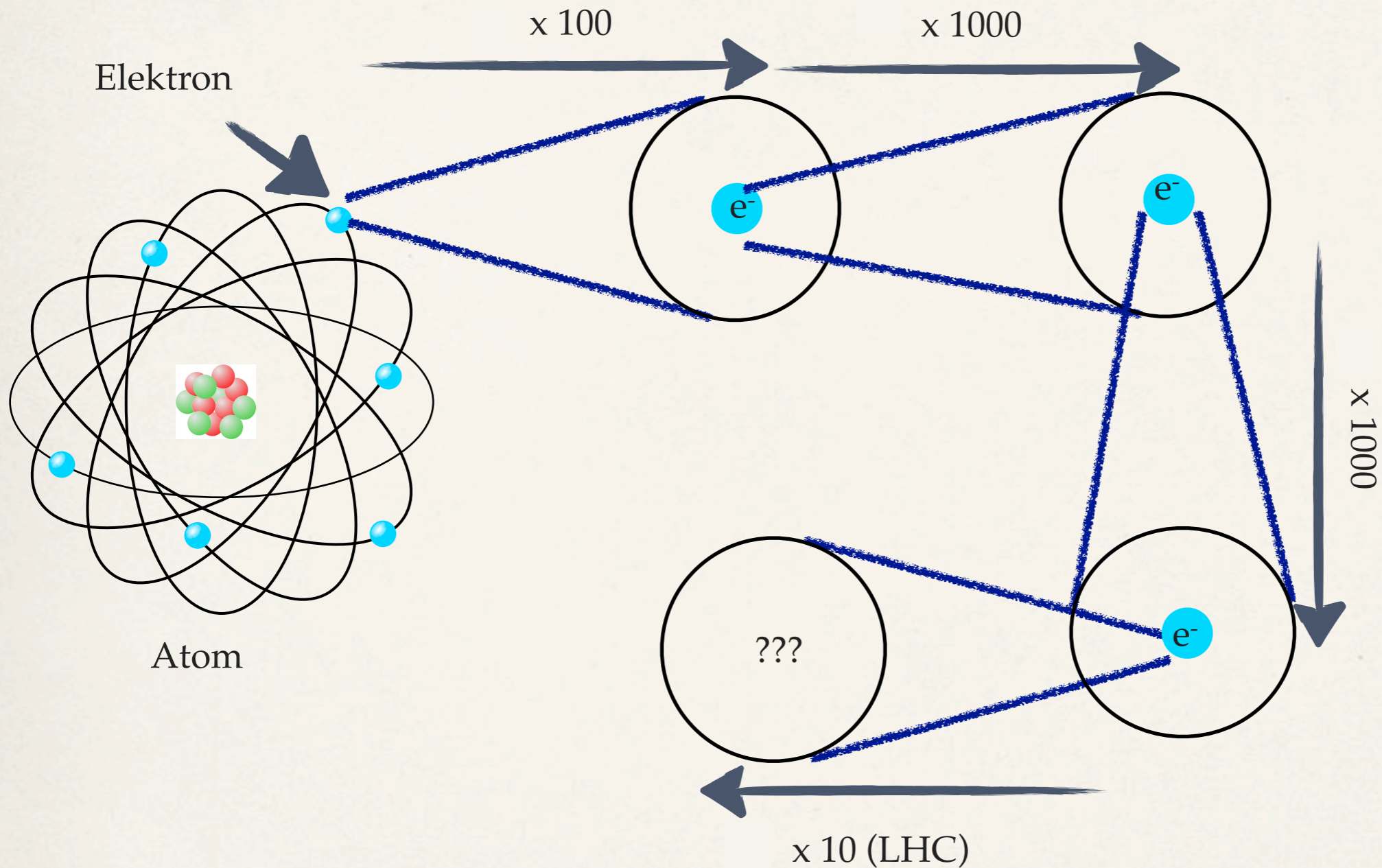
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

- ♦ h... Planck Konstante,
- ♦ c ... Lichtgeschwindigkeit
- ♦  $\lambda$ ... Wellenlänge

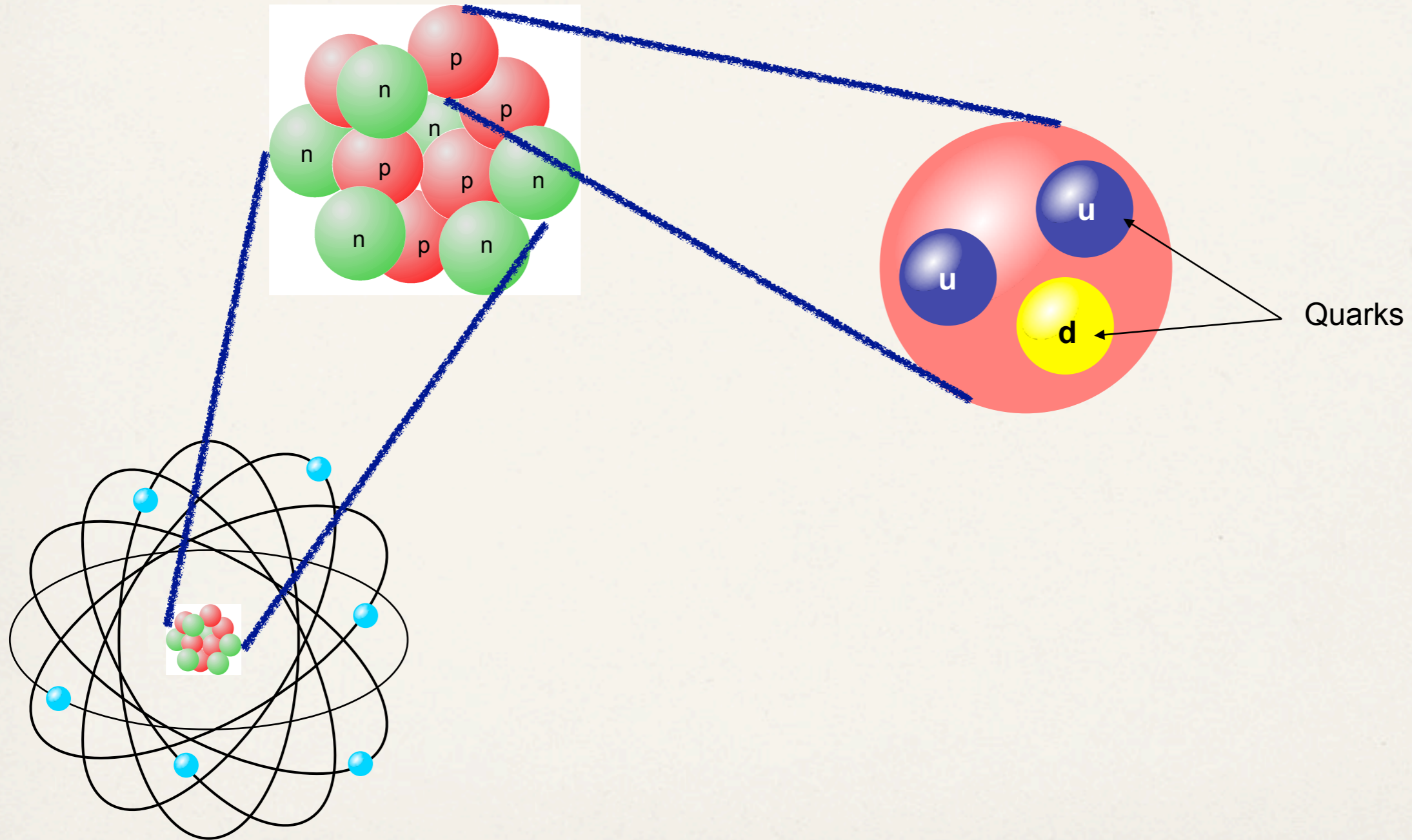


- ♦ Je grösser die Energie, desto kleiner die Wellenlänge.
- ♦ Die Wellenlänge bestimmt das Auflösungsvermögen:  
Je kleiner die Wellenlänge, desto kleinere Dinge kann man "sehen".
- ♦ Grosse Energien  $\rightarrow$  grosses Auflösungsvermögen!
  - ▶ hochenergetische Kollisionen am LHC

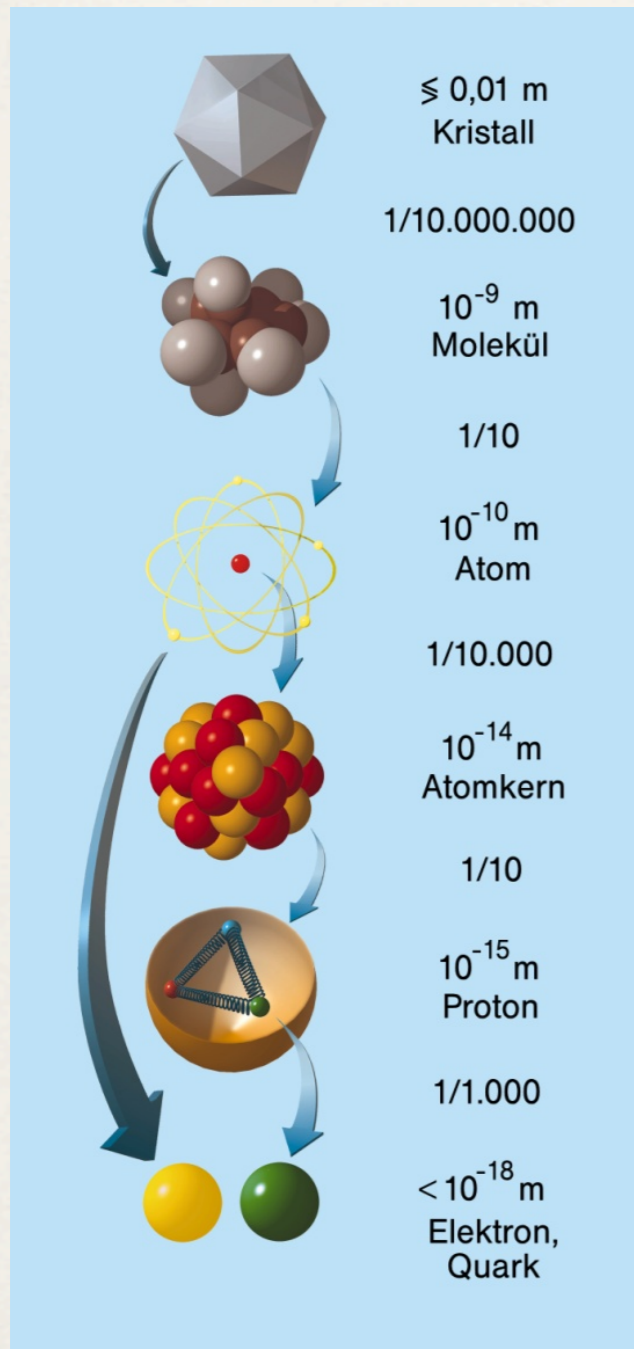
# Aus was besteht ein Elektron?



# Und aus was besteht der Atomkern?



# Wie gross sind die elementaren Teilchen ?



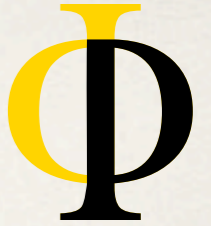
Atom  $\Leftrightarrow$  Mond



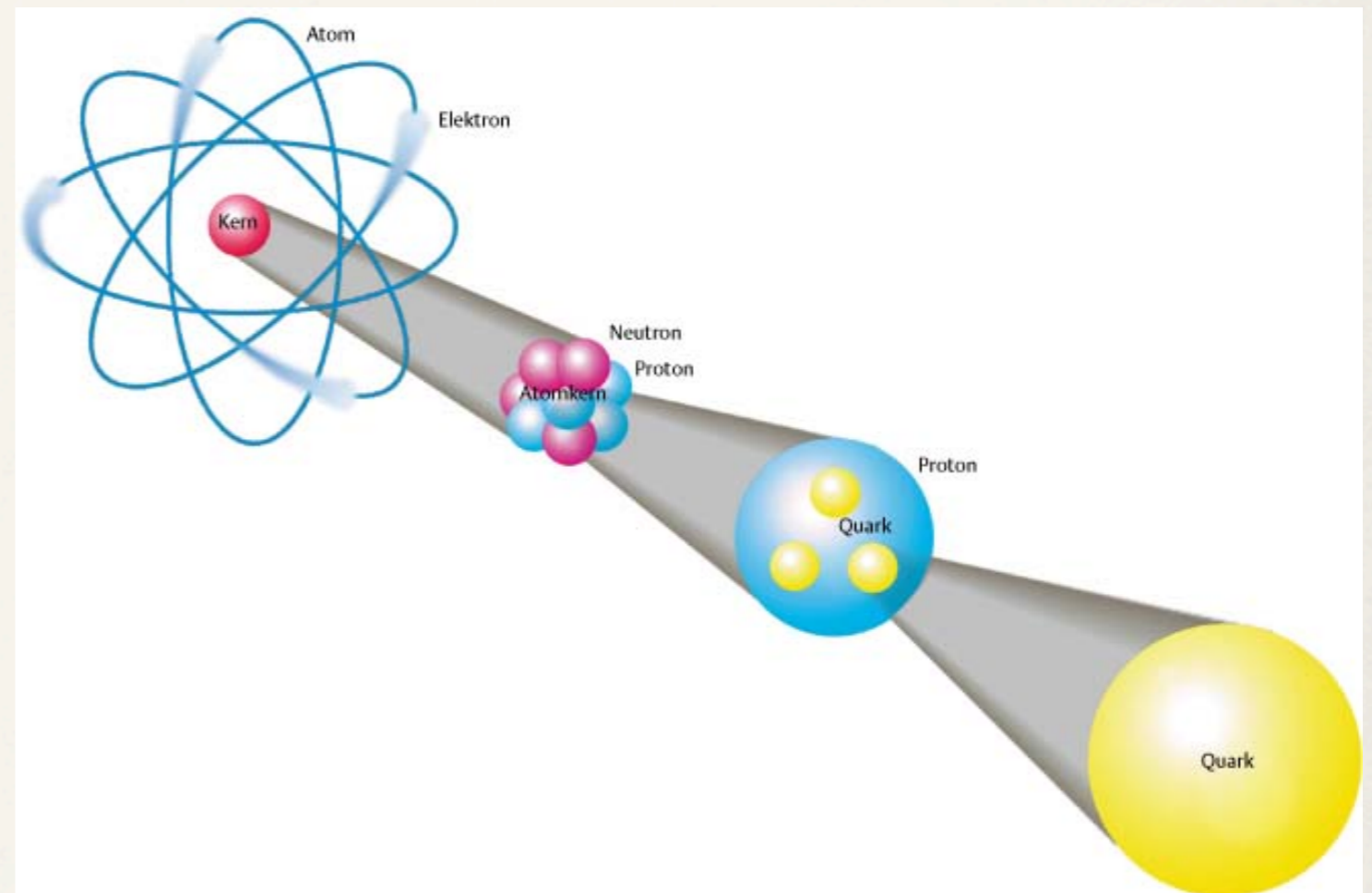
Quark  $\Leftrightarrow$  Tischtennisball



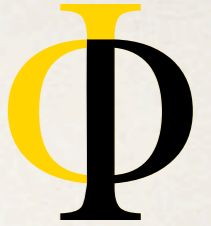
# Die kleinen Bausteine der Atome



- ♦ Ein **Atom** besteht aus **Elektronen** in der Hülle und einem **Kern**
- ♦ Der **Atomkern** besteht aus **Neutronen** und **Protonen**
- ♦ Auch die **Neutronen** und **Protonen** sind nicht elementar: sie bestehen aus **Quarks**
- ♦ und ein Quark? Bis heute haben wir keinen Hinweis für Bausteine von Quarks...



# Also was sind die Bausteine der Materie?



- ◆ Die “fassbare” Materie besteht aus nur wenigen Teilchen:
  - ▶ Atome bestehen aus **Elektronen, Neutronen und Protonen**.
    - ▶ Ein Elektron ist elementar
    - ▶ Protonen und Neutronen bestehen aus up- und down-Quarks:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e \end{pmatrix}$$

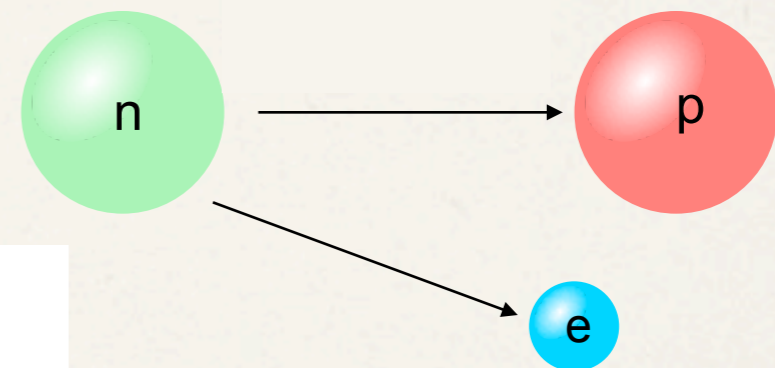
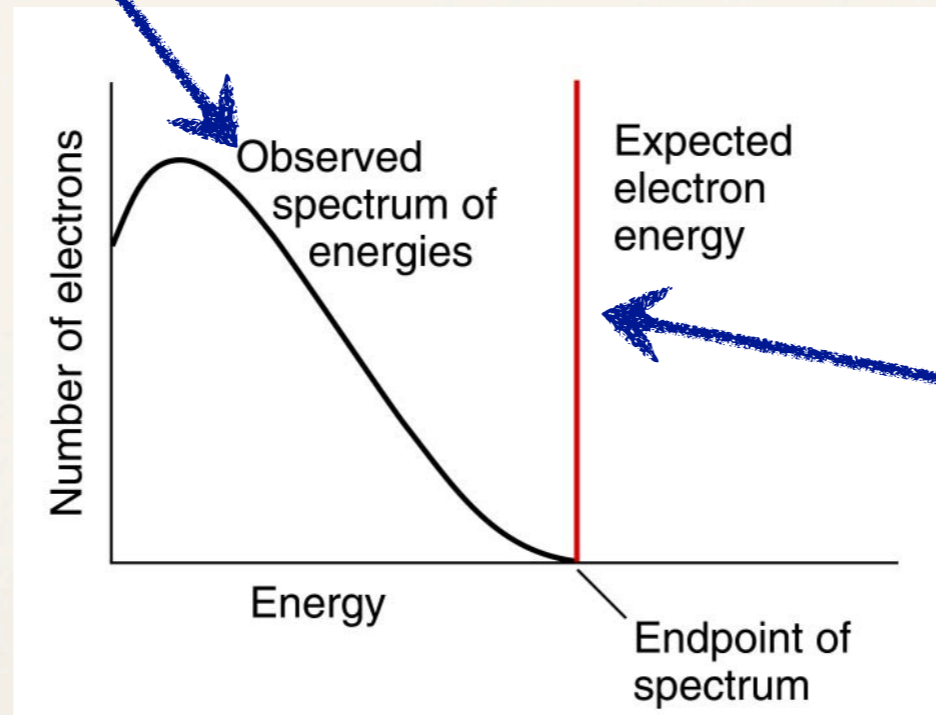
- ◆ Gibt es noch andere Elementarteilchen?

# $\beta$ -Zerfall



- ◆ Ein freies **Neutron** hat eine Lebensdauer von ca. 15min.
  - ▶ Danach **zerfällt es in ein Proton und ein Elektron.**
- ◆ Zerfällt ein ruhendes Teilchen in zwei, sind die Energien allein durch die Massenverhältnisse gegeben!

- ◆ Das gemessene Energie-Spektrum des Elektrons sieht aber anders aus!



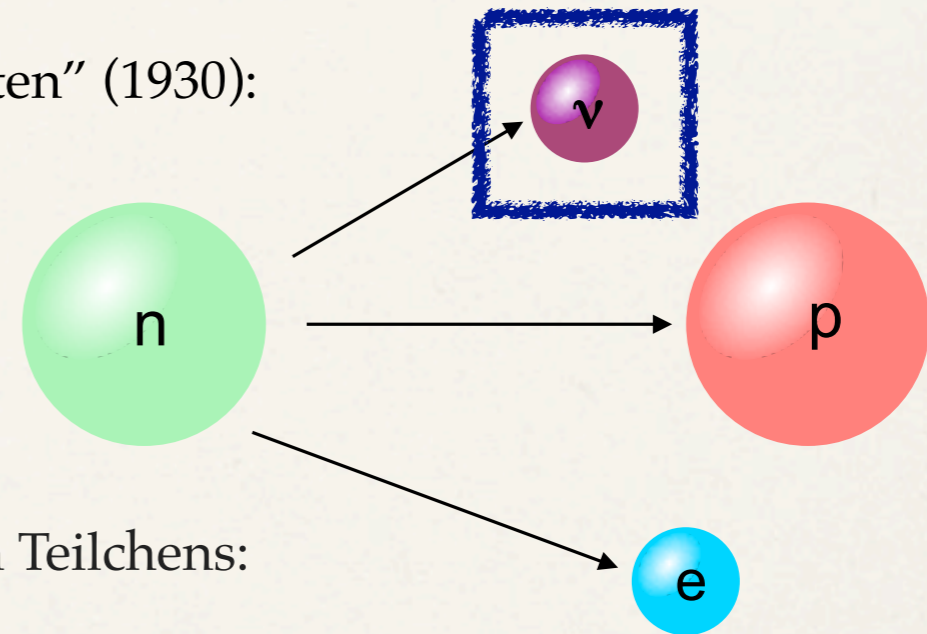
Elektron Energie  
im Falle von  
 $n \rightarrow p^+ + e^-$

# $\beta$ -Zerfall



- ◆ Aufgrund dieser Messung zogen gewisse Physiker in Erwägung das Konzept der Energieerhaltung aufzugeben!

- ◆ Vorschlag von W. Pauli um die Energieerhaltung zu “retten” (1930):
  - ▶ Es muss noch ein zusätzliches Teilchen geben!

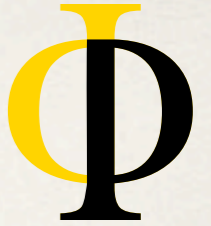


- ◆ Pauli kannte bereits die elektrische Ladung dieses neuen Teilchens:
  - ▶ Kennst du sie auch?

- ◆ Dieses elektrische neutrale Teilchen nennen wir heute Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ )

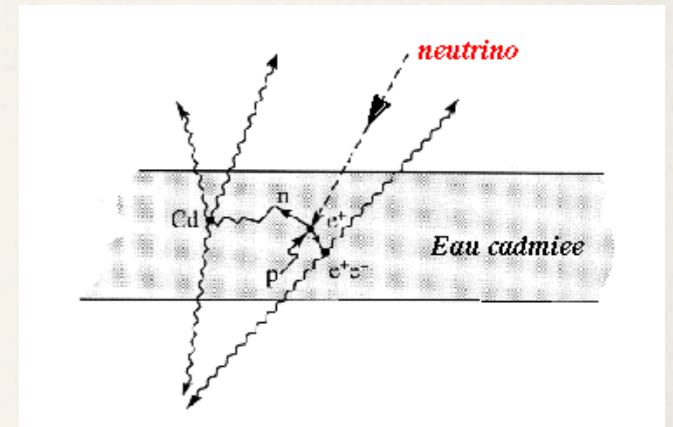


# Die Entdeckung des Neutrinos



- ◆ Dieses **rein theoretisch** vorgeschlagene Teilchen wurde 1956 von Frederick Reines & Clyde L. Cowan **experimentell gefunden**.

- ◆ Das Elektron-Neutrino wurde in der Reaktion  $(\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n)$  nachgewiesen.



- ◆ Es **dauerte also rund 26 Jahre bis es entdeckt wurde**.

- ◆ Jetzt kennen wir bereits folgende **Elementarteilchen**:

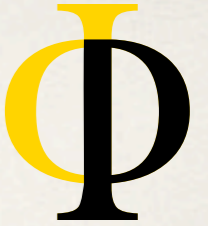
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

Quarks

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}$$

Leptonen

# Weitere Entdeckungen



- ◆ Weitere Experimente führten zu neuen Teilchen...
- ◆ **Noch mehr Leptonen:**
  - ▶ **Myon  $\mu$ :** Untersuchung der kosmischen Strahlung, Carl D. Anderson & Seth H. Neddermeyer (1937).
  - ▶ **Tau  $\tau$ :** Stanford Linear Beschleuniger (SLAC), Martin L. Perl et. al (1975).
- ◆ **Noch mehr Quarks:**
  - ▶ **Strange  $s$ :** kosmische Strahlung, Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, Richard E. Taylor (1974)
  - ▶ **Charm  $c$ :** Beschleuniger Experimente am SLAC und am Brookhaven National Laboratory, Burton Richter & Samuel C.C. Ting (1974)
  - ▶ **Bottom  $b$ :** Beschleuniger Experimente am Fermilab, Leon M. Ledermann (1977)
  - ▶ **Top  $t$ :** Beschleuniger Experimente am Fermilab, Collaboration (1995)

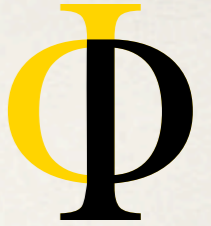
# Zusammenfassung I



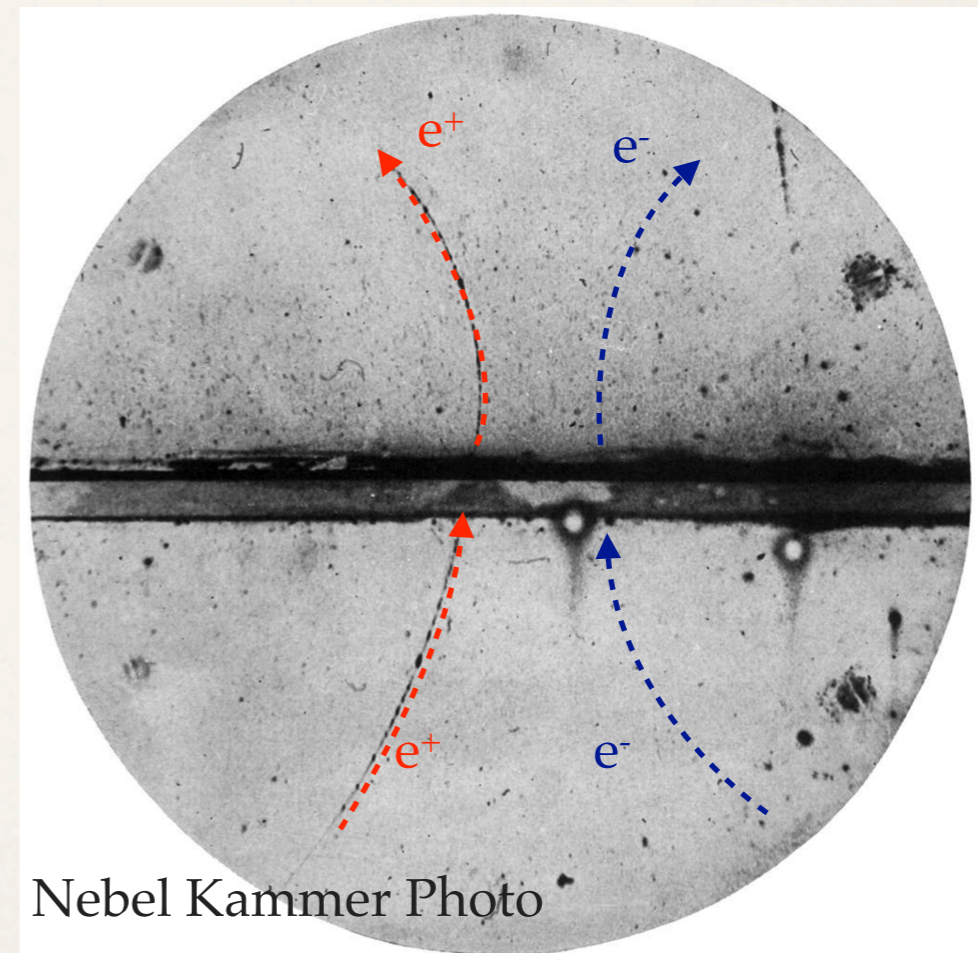
- ◆ Etliche Experimente führten zu folgenden **Elementarteilchen**:

Elementarteilchen			
Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	e	$\mu$	$\tau$
Quarks	u	c	t
	d	s	b

# Etwas haben wir vergessen

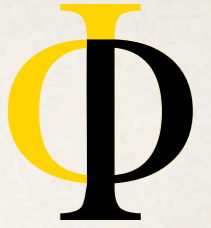


- ◆ Ein 26-jähriger theoretischer Physiker, namens Paul Dirac, verdoppelt die Anzahl bekannter Teilchen auf einen Schlag.
- ◆ Er postuliert 1928 eine neue Art von Teilchen: **Anti-Materie**
- ◆ 1932 entdeckt Carl D. Anderson in der kosmischen Strahlung das Anti-Teilchen des Elektrons; **das Positron**.
  - ▶ Physik Nobel Prize 1936



Nebel Kammer Photo

# Zusammenfassung II

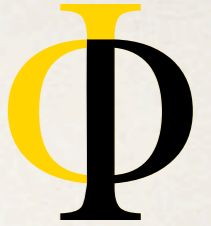


- ♦ Mit der Entdeckung der Antiteilchen haben wir die Anzahl Bausteine verdoppelt!
- ♦ Antiteilchen und Teilchen haben die gleiche Masse aber umgekehrte Ladung !
  - ▶ **Zu jedem Materie-Teilchen existiert ein Anti-Teilchen.**

Elementarteilchen			
Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	$e$	$\mu$	$\tau$
Quarks	$u$	$c$	$t$
	$d$	$s$	$b$

Elementar(anti)teilchen			
Leptonen	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$
	$\bar{e}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\tau}$
Quarks	$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$
	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$

# $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ am LEP (CERN)



- ◆ Ein Elektron ( $e^-$ ) kollidiert mit einem Positron ( $e^+$ )
  - ▶ dabei entsteht ein  $\mu^+\mu^-$  Paar.
- ◆ Doch wie ist das möglich? Das Myon ist rund 200 mal schwerer als das Elektron!
  - ▶ Woher kommt diese Masse?
  - ▶ Wohin sind die Elektronen gegangen? Und woher kommen die Myonen.

# Masse ist nicht erhalten!

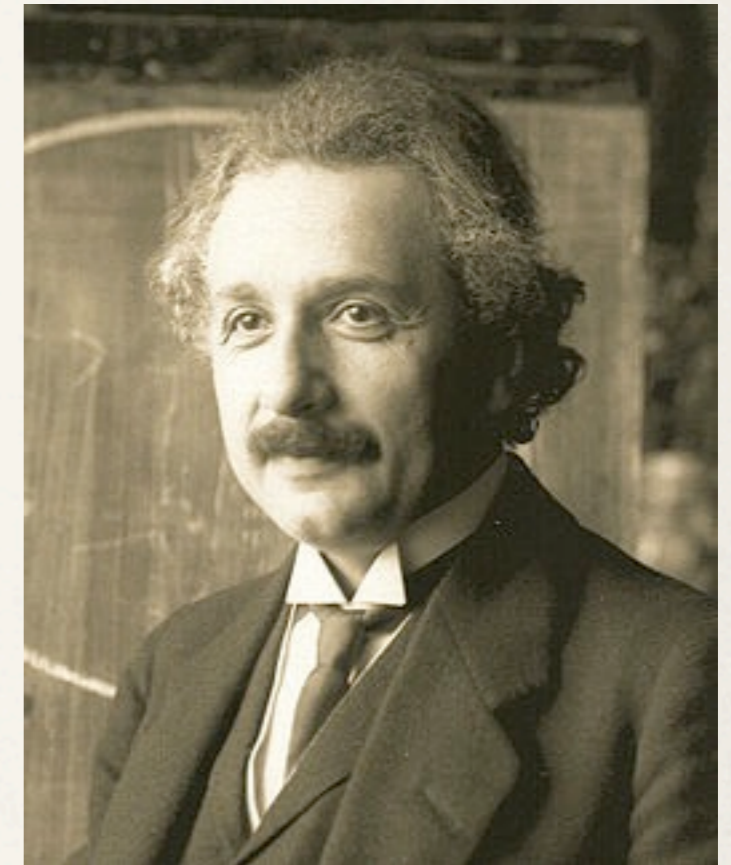


- ◆ Albert Einstein:

$$E = mc^2$$

Energie → Masse (Lichtgeschwindigkeit)<sup>2</sup> [grosse Zahl]

(eigentlich:  $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ )



- ◆ **Masse ist eine Form von Energie!**
- ◆ **Masse ist nicht erhalten.**  
**Masse kann erzeugt und vernichtet werden!**  
**Je mehr Energie, desto schwerere Teilchen kann man erzeugen!**
- ◆ Am LHC erzeugen wir schwere Teilchen (da die Energie sehr gross ist)!  
Diese Teilchen sind meist nicht stabil und zerfallen in leichtere Teilchen.

# Was sind die fundamentalen Kräfte?



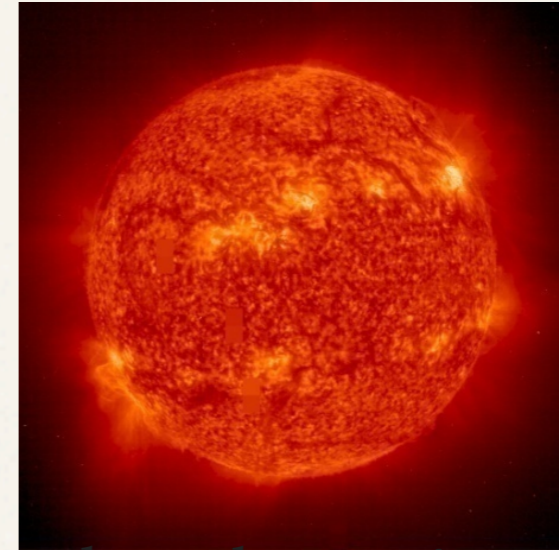
# Die 4 fundamentalen Kräfte



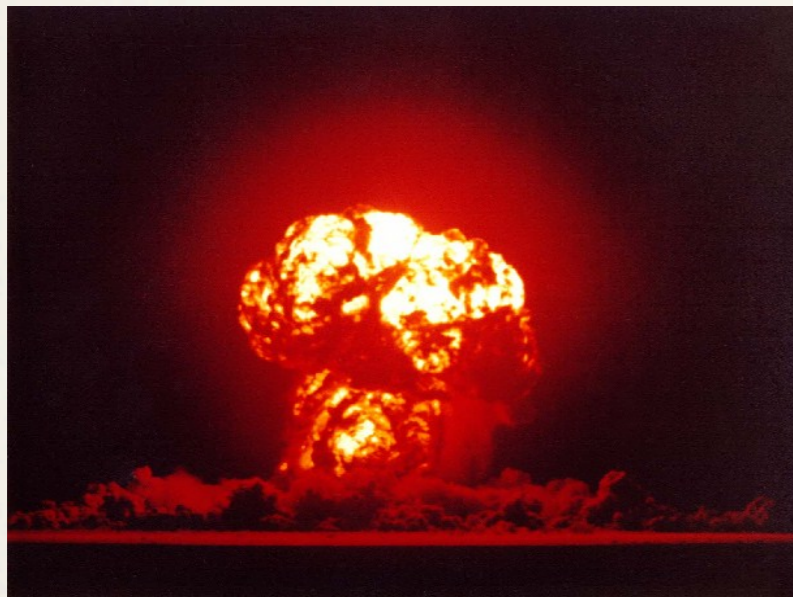
- ◆ Heute kennen wir vier fundamentale Kräfte:



elektromagnetische Kraft



schwache Kraft



starke Kraft



Gravitation

# Prinzip der Wechselwirkung



- ◆ Kräfte werden durch Botenteilchen übertragen, sogenannte Wechselwirkungs-Bosonen.

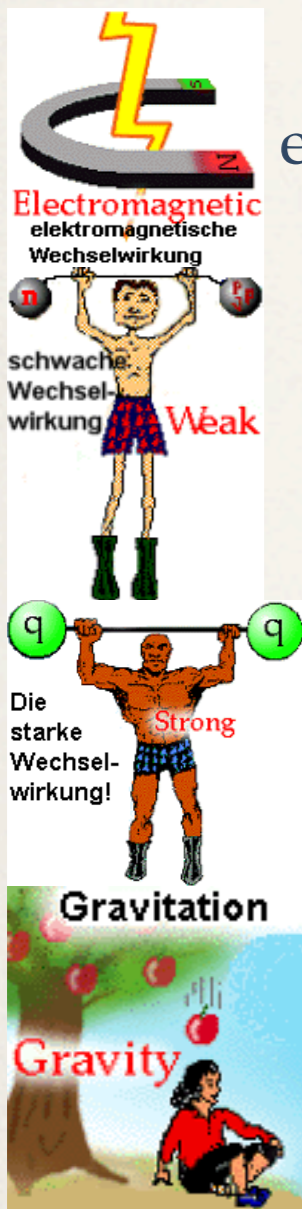


Bild für Anziehung?

# Wechselwirkungsteilchen



- ♦ Zu jeder Kraft gehören ein oder mehrere Wechselwirkungs-Bosonen und eine Ladung.



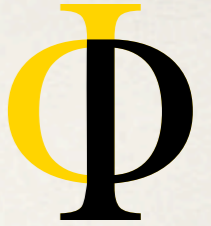
elektromagnetische WW  $\leftrightarrow$  elektrische Ladung  $\leftrightarrow$  Photon  $\gamma$

schwache WW  $\leftrightarrow$  schwache Ladung  $\leftrightarrow$   $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ -boson

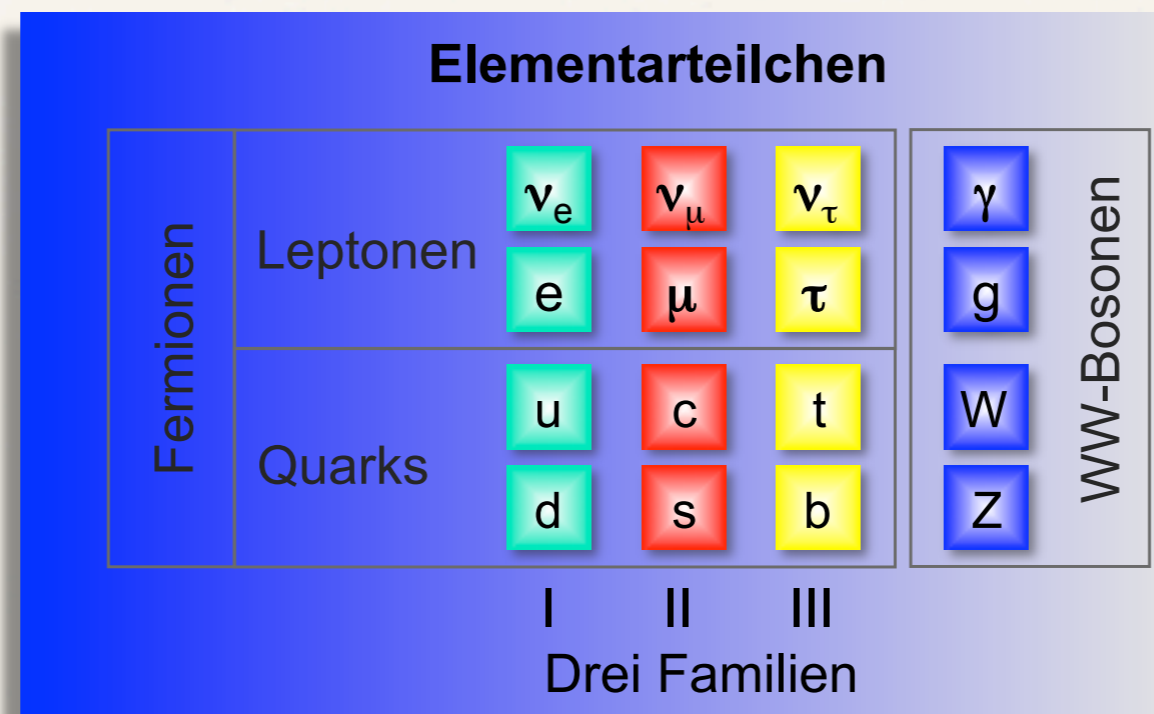
starke WW  $\leftrightarrow$  Farb-Ladung (Color)  $\leftrightarrow$  g (Gluon)

Gravitation  $\leftrightarrow$  ???  $\leftrightarrow$  Graviton??

# Zusammenfassung III

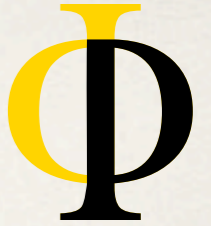


- ◆ Der Satz an Elementarteilchen erweitert sich um die Wechselwirkungsteilchen (**Anti-Teilchen hier nicht gezeichnet**):

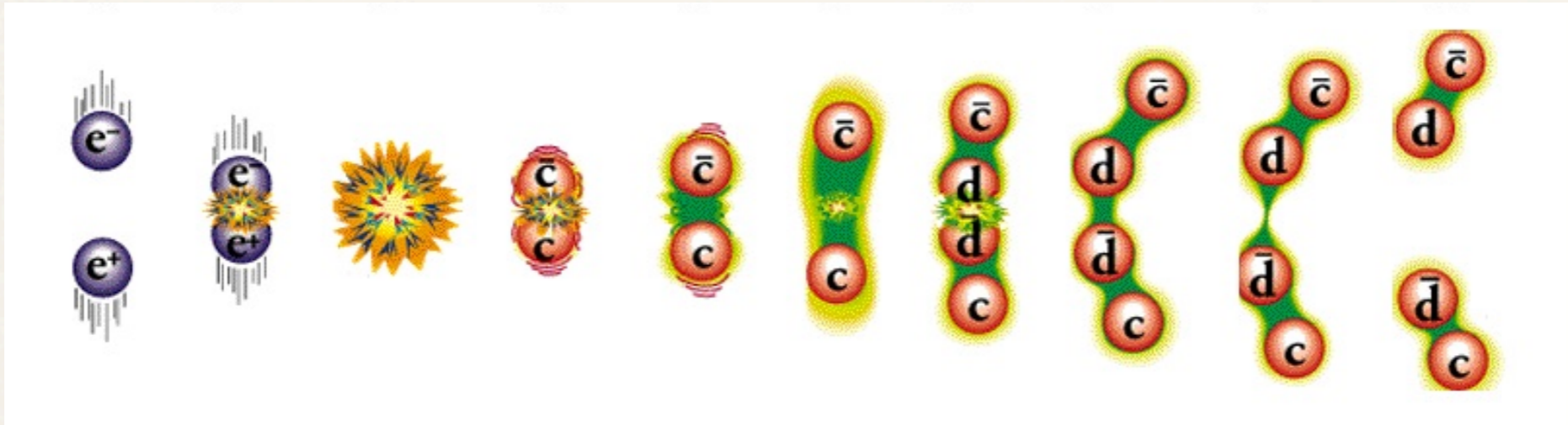


- ◆ Materie besteht aus **up-Quarks, down-Quarks und Elektronen**, zusammen mit dem **Elektron-Neutrino** bilden diese die erste Familie.
- ◆ Dieses Schema wiederholt sich nach heutigem Wissen zwei Mal.  
Wieso es 3 Familien gibt, wissen wir nicht!

# Starke Wechselwirkung



- ◆ Uns vertraute Kräfte (z.B. Elektromagn., Grav.) werden grösser je näher sich die Teilchen kommen ( $F \sim 1/r^2$ ).
- ▶ Die Starke Kraft verhält sich umgekehrt.
- ▶ Je mehr sich die Teilchen voneinander entfernen, desto grösser wird die Kraft!



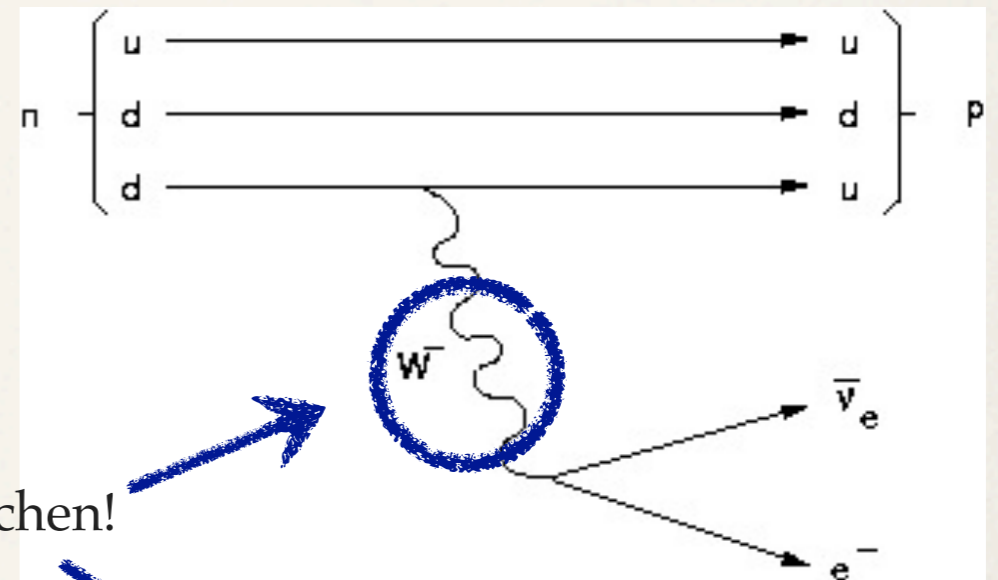
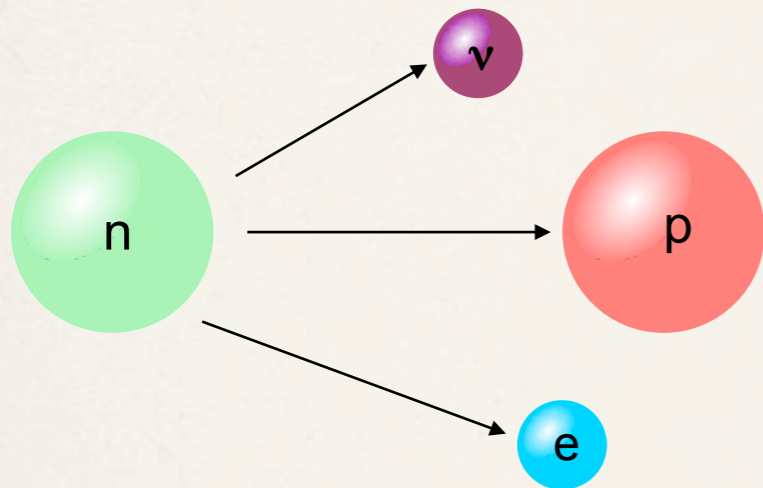
- ◆ Quarks kommen demzufolge immer in gebundenen Zuständen vor, sog. Hadronen. (z.B. als Baryonen ( $qqq$ ) oder Mesonen ( $q\bar{q}$ ))
- ◆ Sie ist verantwortlich für
  - ▶ das **Zusammenhalten des Atomkerns**
  - ▶ und die Bindung von Quarks zu **Baryonen** ( $p^+$ ,  $n$ , ...) und **Mesonen**.

# Schwache Wechselwirkung



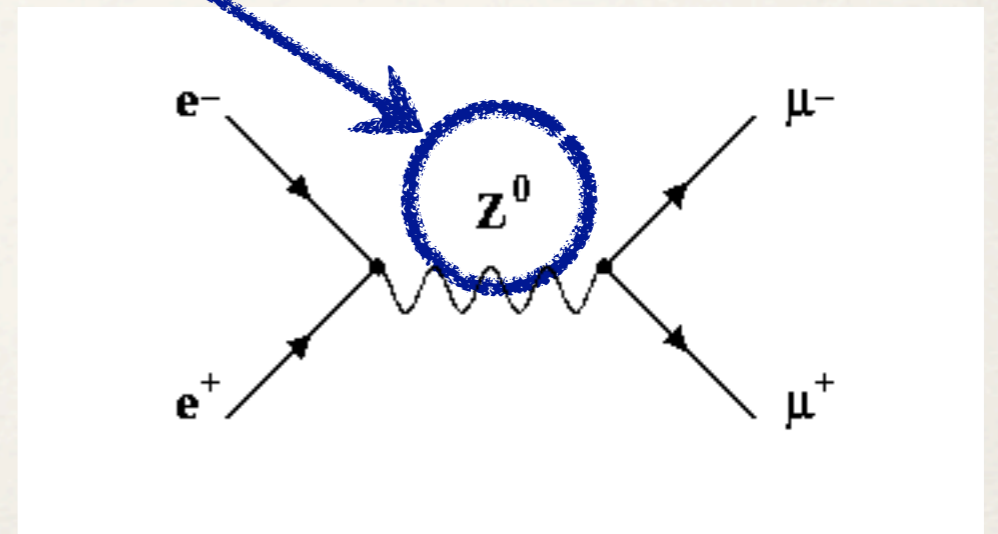
♦ Sie ist verantwortlich für:

♦ den Beta-Zerfall des Neutrons:



Wechselwirkungs-Teilchen!

♦  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  am LEP



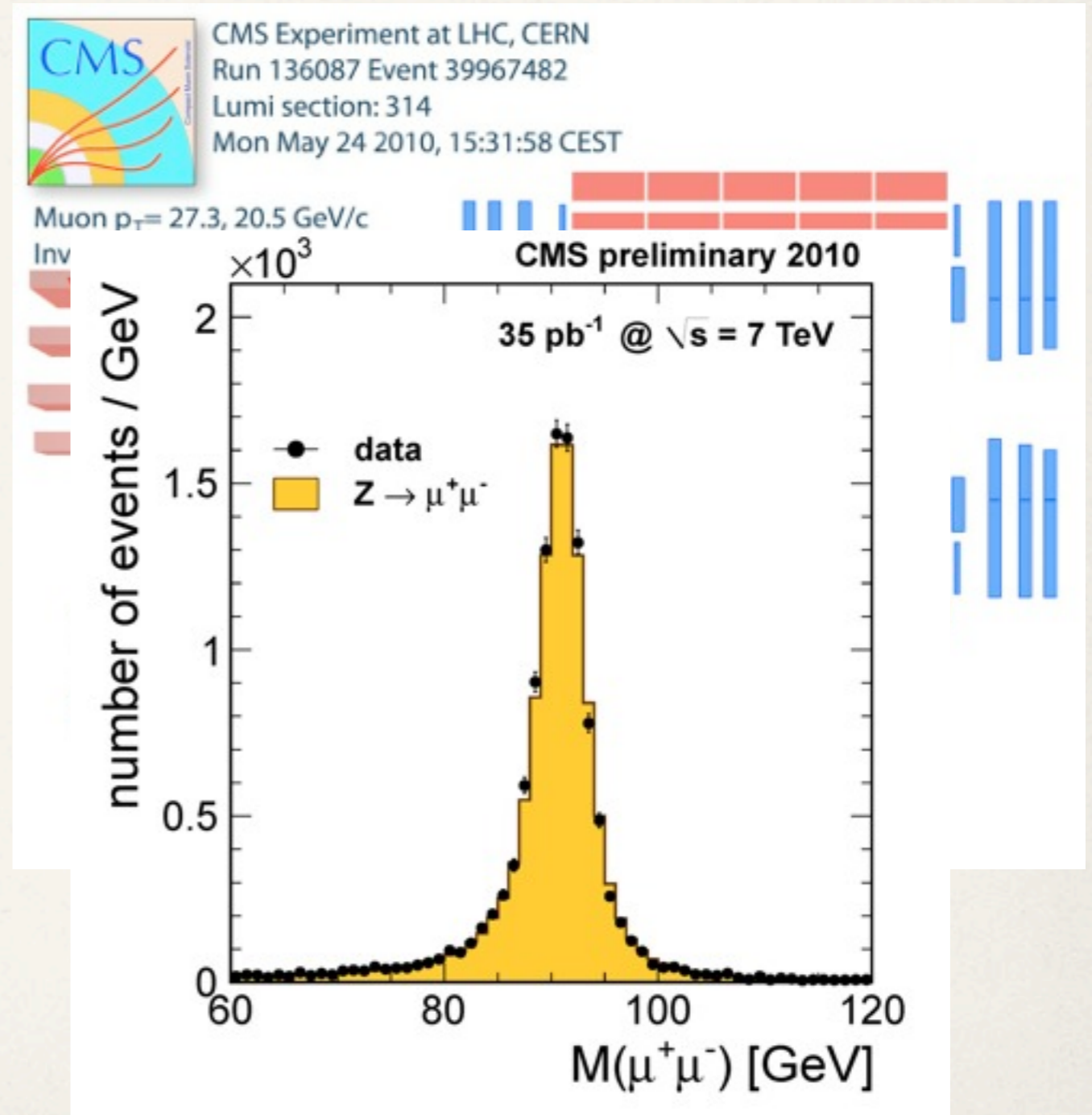
am LHC:  $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



# am LHC: $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

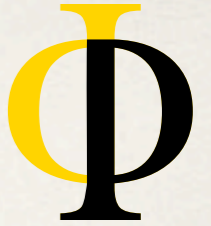


- ◆ Im der vorherigen Animation wurde ein  $\mu^+ \mu^-$ -Paar im Detektor rekonstruiert.
- ◆ Doch wie wissen wir, dass die beiden Myonen wirklich die Zerfalls-Produkte eines Z-bosons sind?
- ◆ Durch Messung der Impulse der Myonen kann die Masse des Mutter-Teilchens berechnet werden!
- ◆ Die Masse des Mutter-Teilchens verrät dessen Identität!





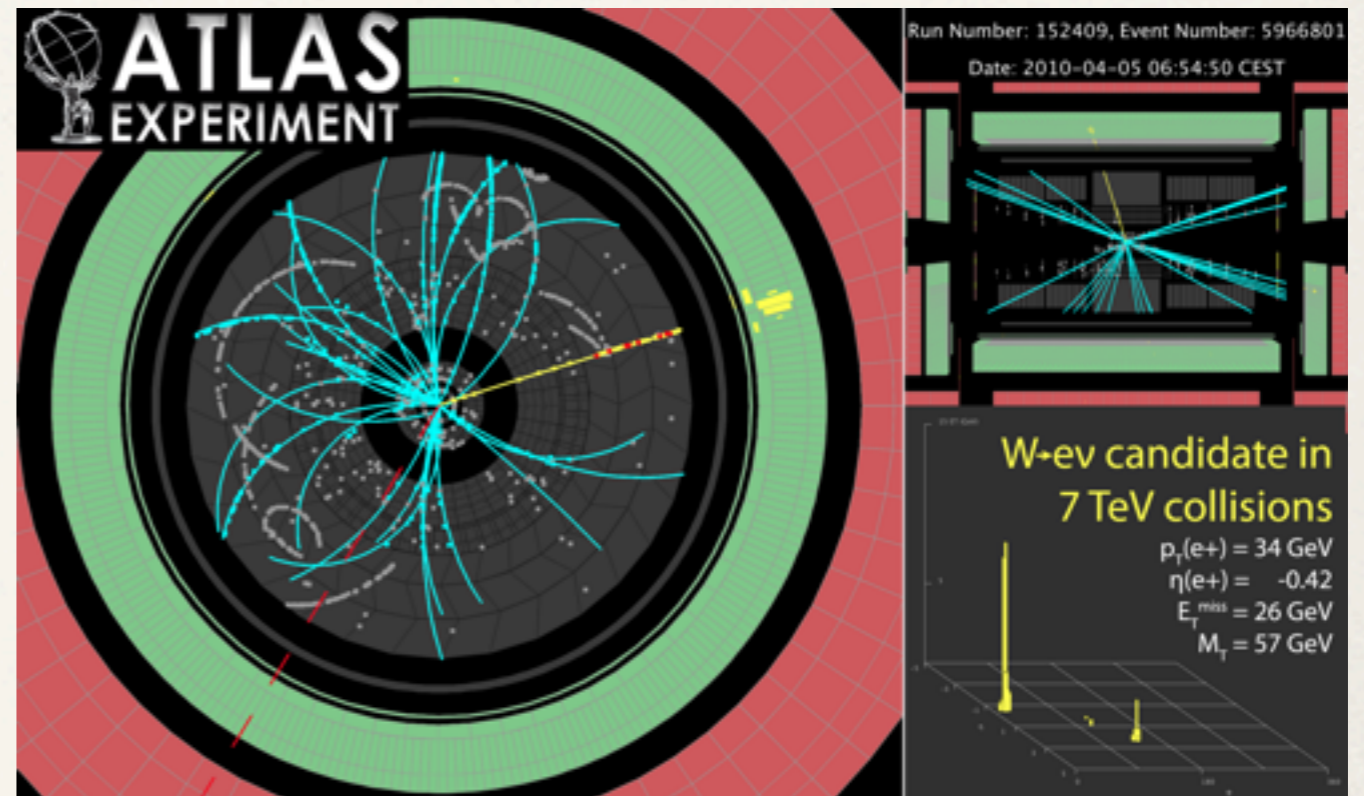
# am LHC: $pp \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$



- ◆ Am LHC werden auch W-Bosonen erzeugt.
- ◆ Das W-Boson kann positiv ( $W^+$ ) und negativ ( $W^-$ ) geladen sein.
- ◆ Zusammen mit dem Z-Boson bilden bilden das  $W^+$  und  $W^-$  die 3 Wechselwirkungs-Bosonen der schwachen Wechselwirkung

◆ Z und W Bosonen können in verschiedene Teilchen zerfallen.

- ▶  $W^+$  zerfällt in  $e^+ \nu_e$  oder  $\mu^+ \nu_\mu$  oder  $\tau^+ \nu_\tau$  oder in 2 Quarks
- ▶ Z zerfällt in  $e^+ e^-$ ,  $\mu^+ \mu^-$ ,  $\tau^+ \tau^-$ ,  $\nu \nu$  oder in 2 Quarks
- ▶ Die Zerfälle in Neutrinos ( $\nu$ ) sind schwierig nachzuweisen, da das Neutrino nicht detektiert werden kann!
- ▶ Die verschiedenen Zerfälle sind verschieden wahrscheinlich!



Event display eines  $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$  Ereignisses in ATLAS.

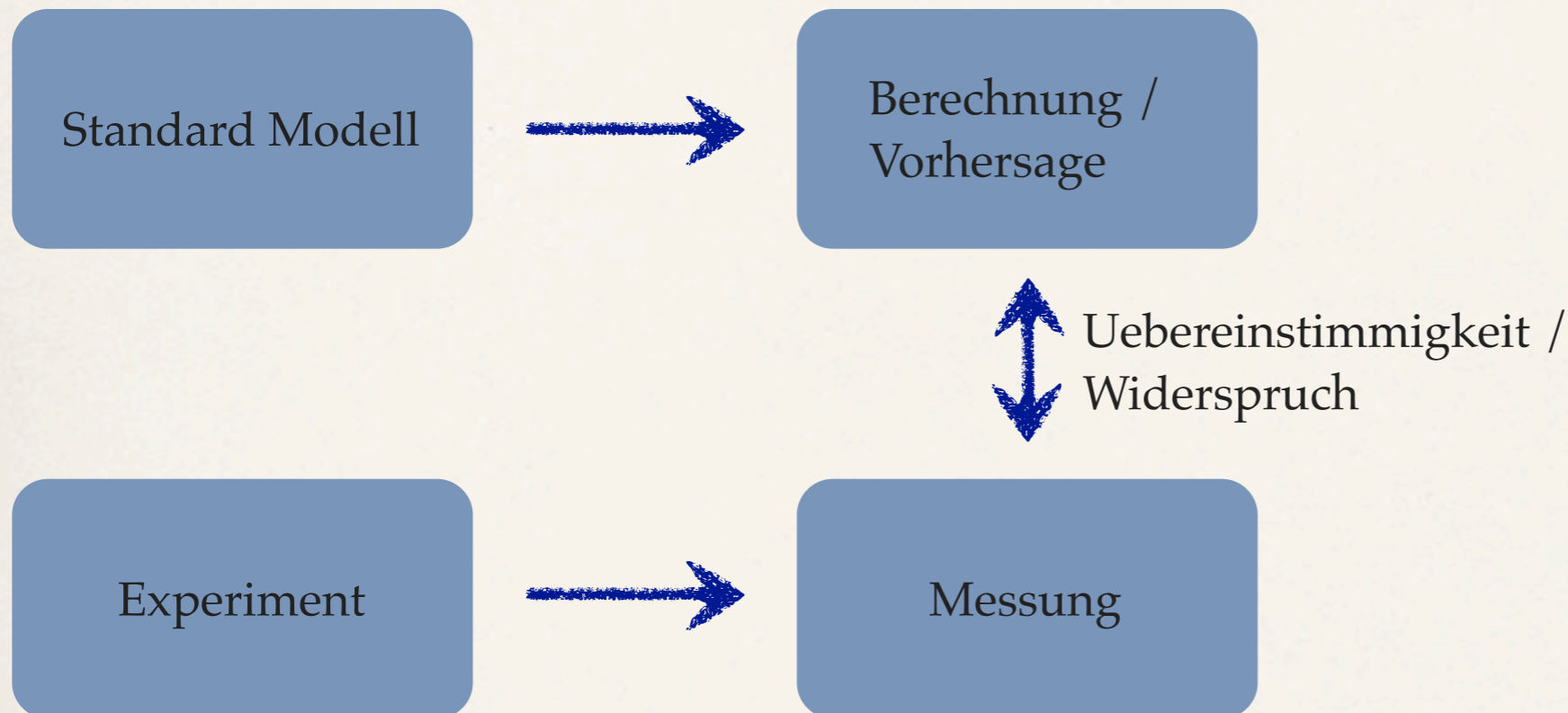
➔ mehr Details am Nachmittag im "Event Scanning"

Und für was brauchen  
wir den LHC?

# Experiment und Theorie



- ◆ Das Standard Model der Teilchenphysik ist die mathematische Beschreibung unseres heutigen Verständnisses der fundamentalen Teilchen und Wechselwirkungen.



Durch Experimente (wie diejenigen am LHC) können wir die Genauigkeit unserer Berechnungen (und unseres Verständnisses) testen!

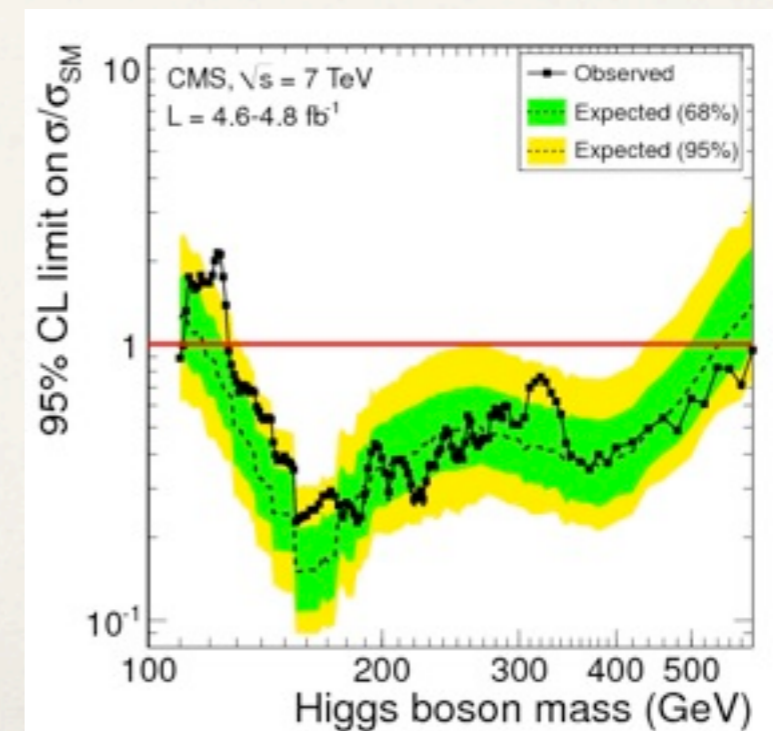
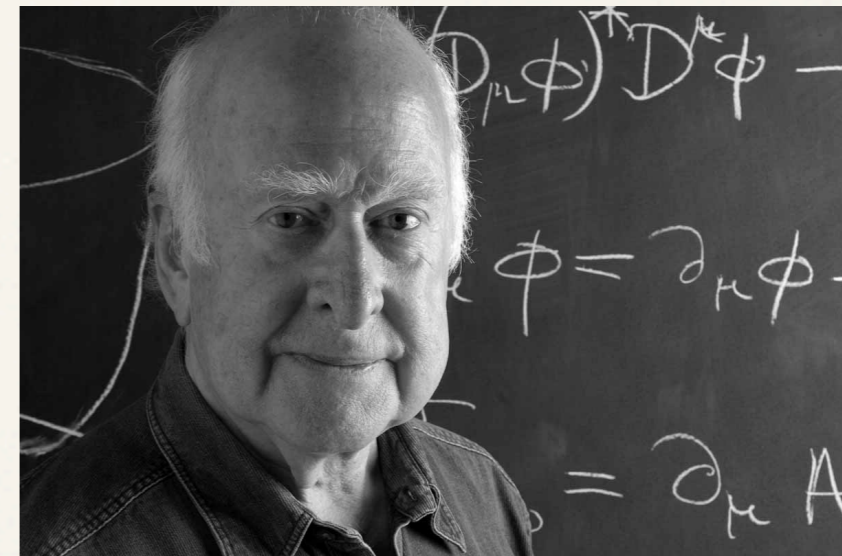
## ◆ Event Scanning am Nachmittag:

- ▶ Durch das Scannen von Ereignissen werdet Ihr Größen wie die Z-Masse und das  $W^+ / W^-$ -Verhältnis selbst bestimmen!

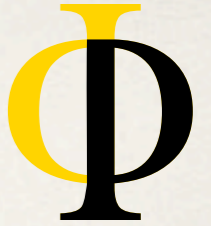
# Teilchenmassen



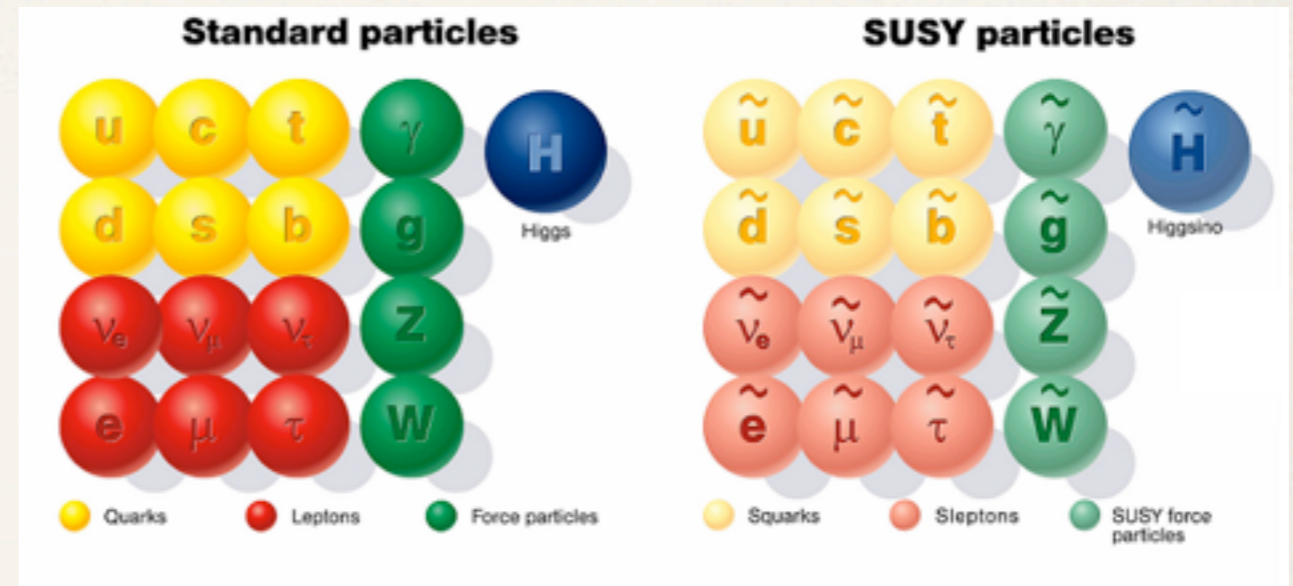
- ◆ Noch immer ist noch nicht verstanden wie die Teilchen ihre Masse erhalten!
  - ▶ nur Photon und Gluon sind masselos, alle anderen Teilchen haben eine Masse. Aber wieso? Und wie?
- ◆ Idee von Peter W. Higgs:
  - ▶ **Die Masse der Teilchen ist keine Teilcheneigenschaft, sondern das Resultat einer ständigen Kraftwirkung auf die Teilchen.**
- ◆ Eine neue Kraft bedeutet aber, dass es ein neues Wechselwirkungs-Boson geben muss!
  - ▶ das **Higgs-Teilchen**
  - ▶ bisher noch nicht entdeckt...  
... aber es wird intensiv danach gesucht...



# Und was suchen wir sonst noch?

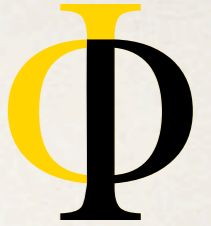


- ◆ Supersymmetry? Dies ist ein theoretisches Modell die einige Rätsel & Probleme des Standard Modells lösen würde...  
In SUSY hat jedes Teilchen mit halbzahligen Spin einen Partner mit ganzzahligen Spin. Und umgekehrt.

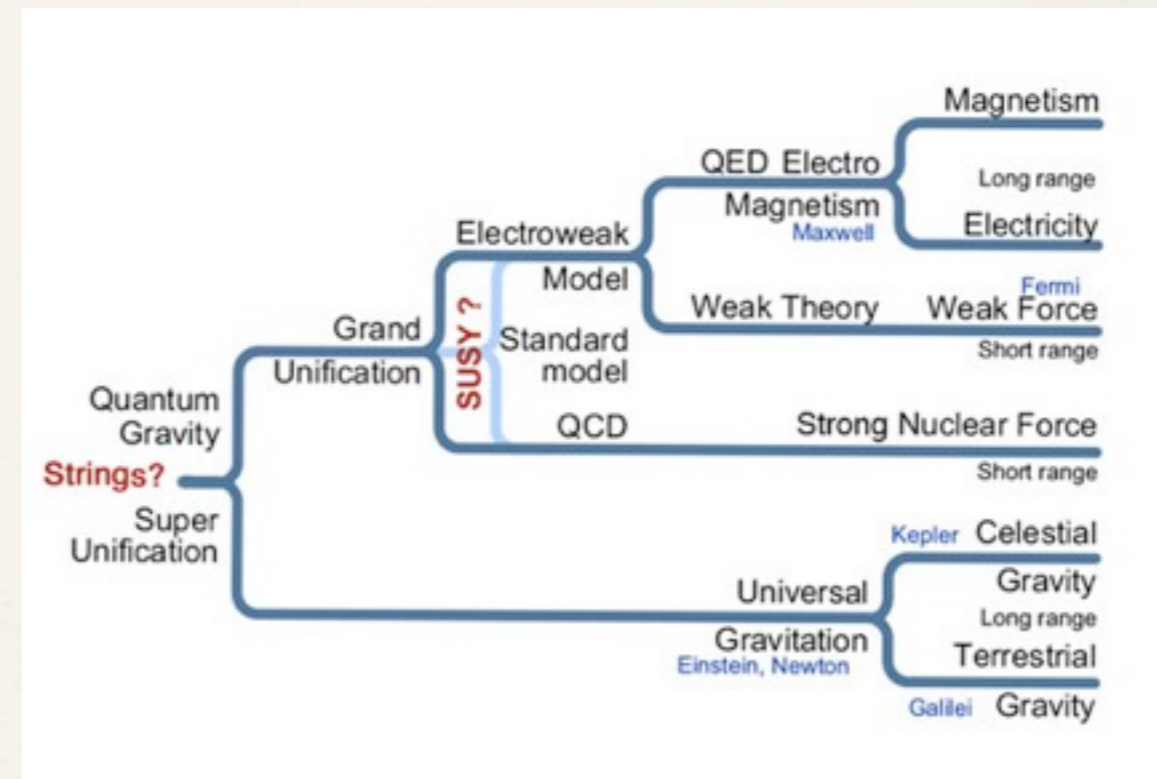


- ◆ Dunkle Materie?
  - ▶ Von astrophysikalischen Beobachtungen wissen wir: Die sichtbare Materie ist nur ein kleiner Teil der Materie im Universum. Können wir am LHC das Rätsel lösen?

# Andere offene Fragen



- ◆ Finden wir eine einheitliche Theorie des Ganzen?
  - ▶ Können wir auch die Gravitation als Teilchenwechselwirkung beschreiben?
- ◆ Gibt es zusätzliche Dimensionen?
- ◆ Wieso besteht das Universum aus Materie und nicht aus Anti-Materie?
- ◆ Überraschungen?



# Fragen?

---



## Habt Ihr noch Fragen?

# Backup