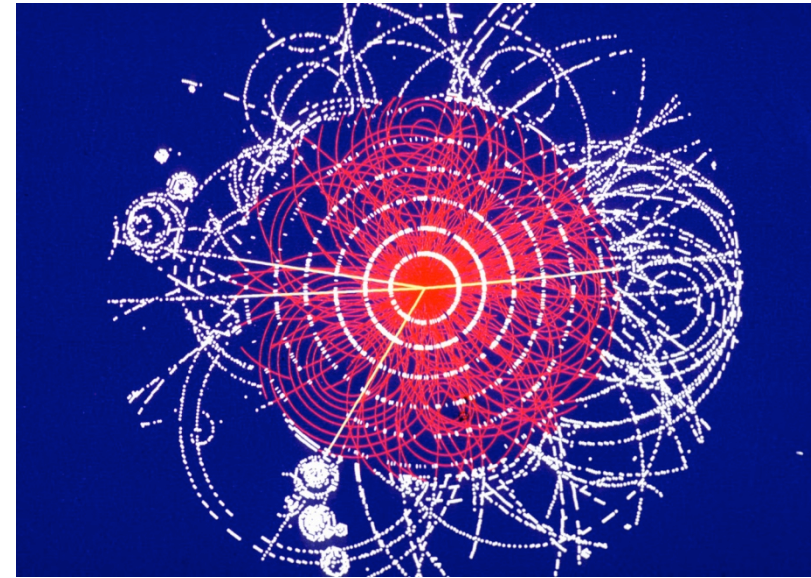
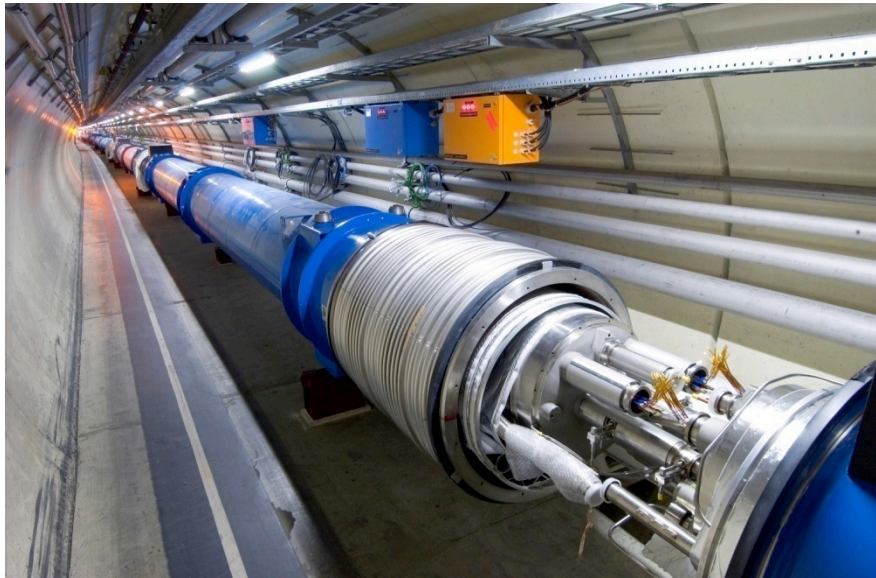




Universität Zürich



Teilchenphysik



Christian Kurz



Universität Zürich

Masterclass 23.03.2009



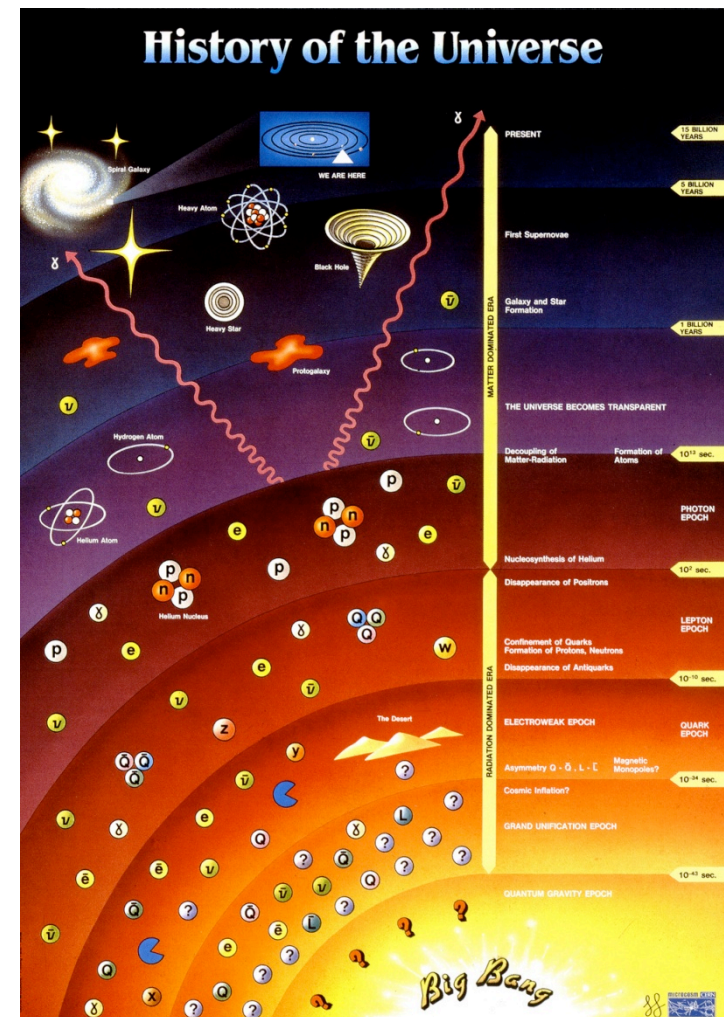
Einige Grundfragen der Physik

- Woraus bestehen wir?
- Welches sind die fundamentalen Teilchen?
- Welches sind die Kräfte, die alles zusammen halten?
- Gibt es eine einfache, einheitliche Beschreibung für das Ganze?
- Woher kommen wir?
- Wohin gehen wir?



Überblick

- „Sehen“ von Strukturen
- Die Größe der Bausteine
- Die ersten Bausteine
- Die Kräfte und ihre Wirkung
- Zerfälle instabiler Teilchen
- Zusammenfassung

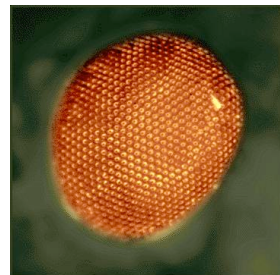




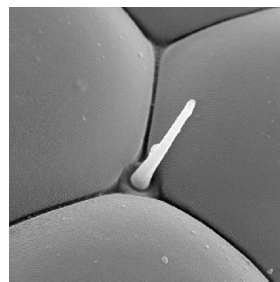
Wie sehen wir Strukturen?



- bloßes Auge: $\sim 1\text{mm}$



- Auge plus Lupe: $\sim 1/10\text{ mm}$
10-fach vergrößert



- Auge plus
 $\sim 1/1000\text{ m}$
1000-fach

Immer noch keine
Bausteine sichtbar!

Wie groß sind sie
eigentlich?

Wie kann man Strukturen der Größenordnung 1 nm „sehen“?



Universität Zürich



- Sehen = Abbilden

Projektil → Ziel (Target) → Nachweis



- Wichtig: **Auflösungsvermögen**, d.h. Strukturen bis zu welcher Größenordnung können erkannt werden
- Bedingungen:
 - Größe der Projektile \ll Größe der Strukturen
 - Treffgenauigkeit \ll Größe der Strukturen

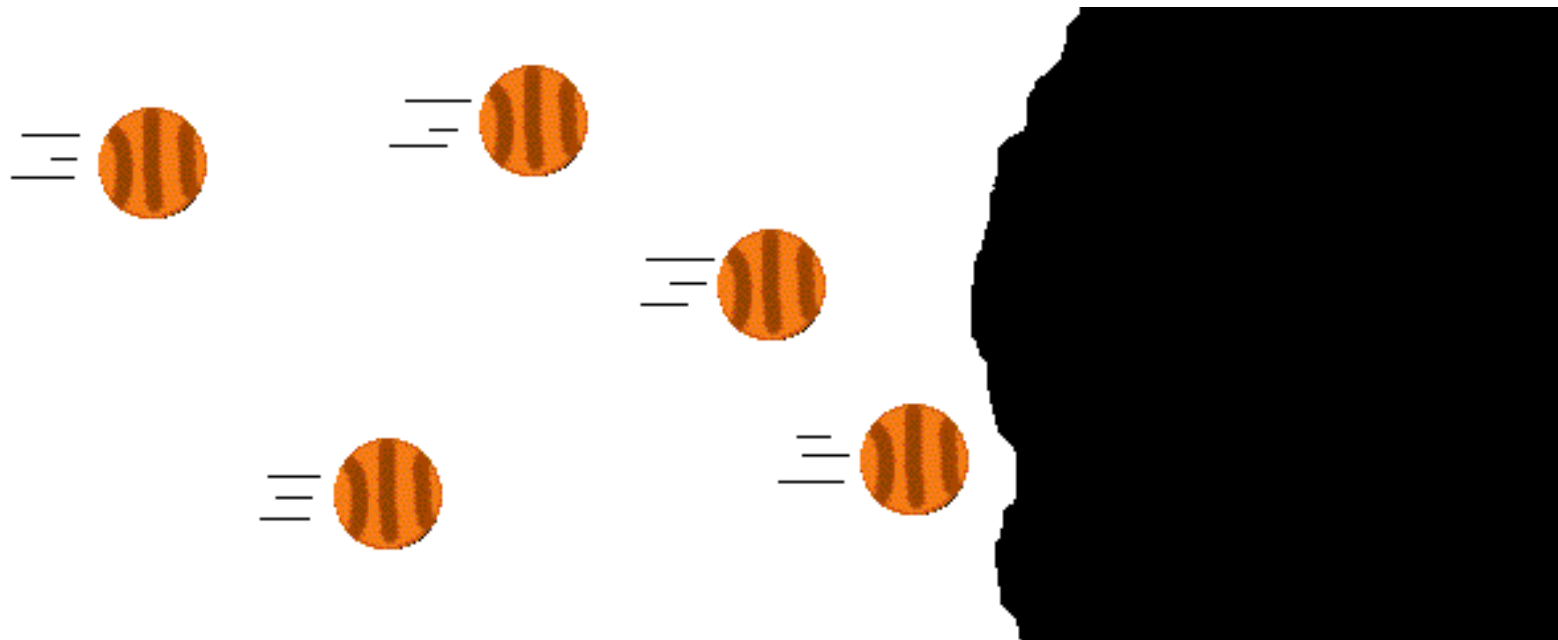
Unbekanntes Objekt in einer Höhle



Universität Zürich



- Projektil: Basketbälle



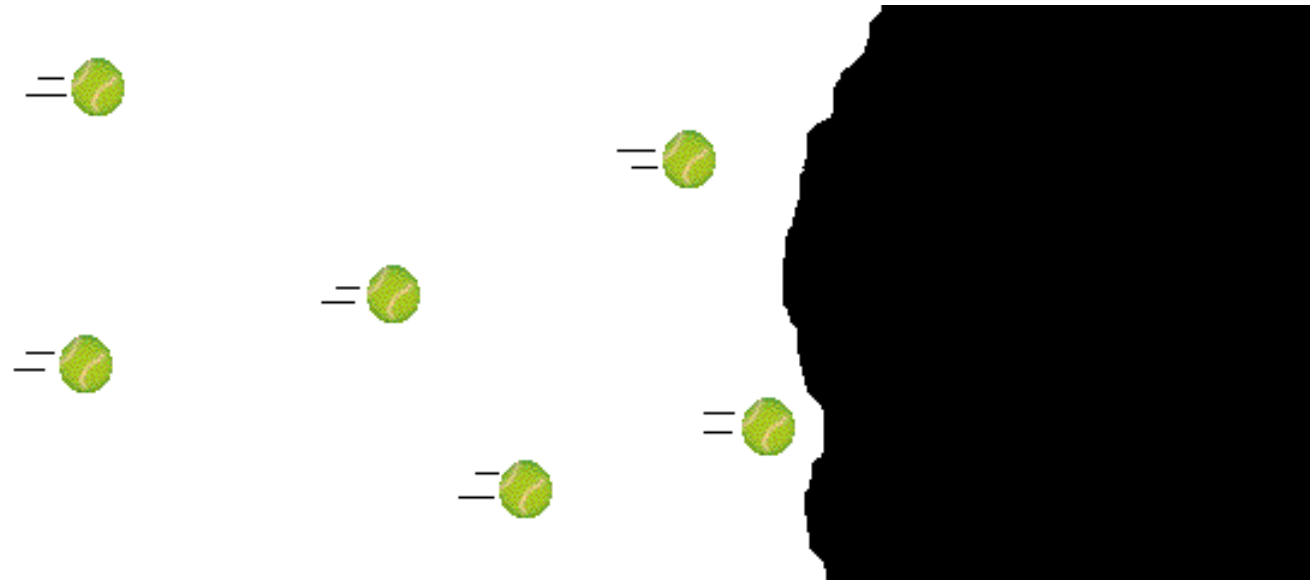
Unbekanntes Objekt in einer Höhle



Universität Zürich



- Projektil: Tennisbälle



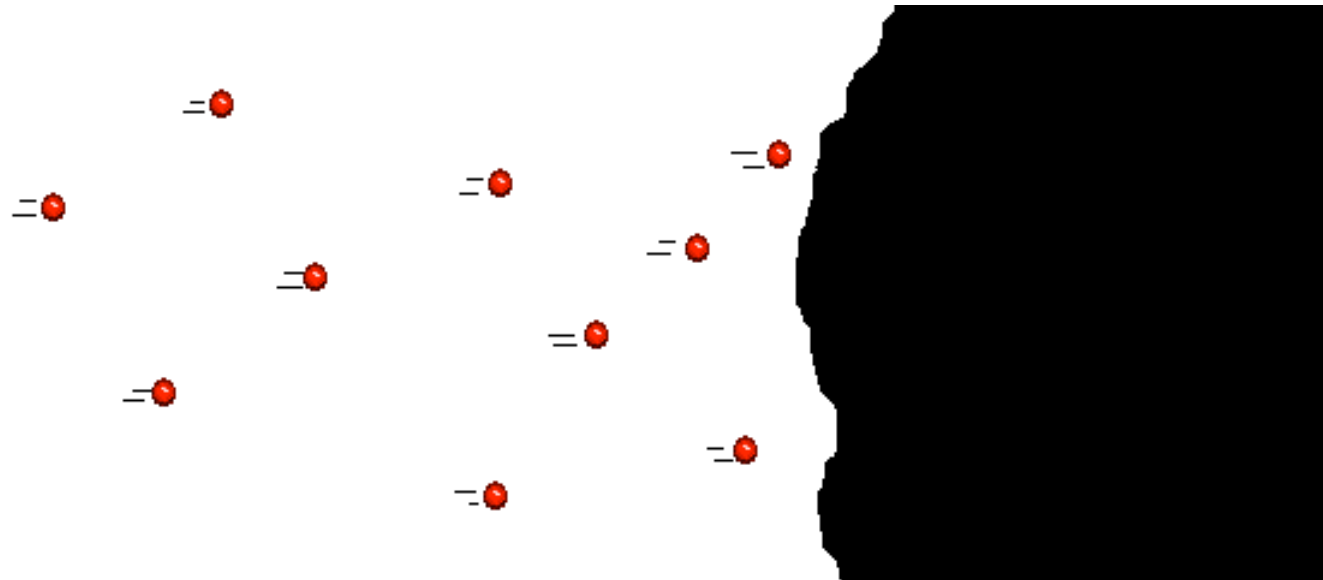
Unbekanntes Objekt in einer Höhle



Universität Zürich



- Projektil: Murmeln





Einschub: Nützliche Einheiten für Teilchen

- **Größe:** 1 fm = 1 Femtometer (1 „Fermi“) = 1×10^{-15} m
- **Energie:** 1 ElektronVolt = 1 eV
 - in der Teilchenphysik typischerweise verwendet:
 - 1 KiloElektronVolt = 1 keV = 1000 eV
 - 1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1000000 eV
 - 1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1000000000 eV
 - 1 TeraElektronVolt = 1 TeV = 1000000000000 eV
- 1 GeV viel für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig, könnte 1.6 V **Taschenlampe** für 1 ns zum Leuchten bringen





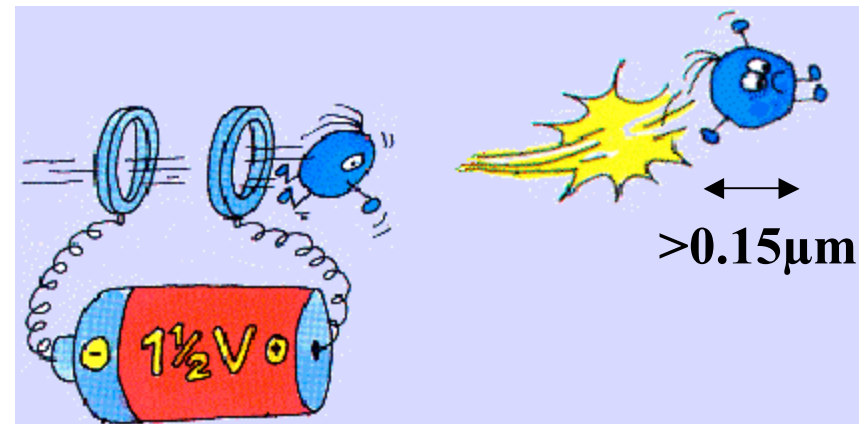
Energie und Masse

- Nach **Einstein**: $E = mc^2$
- messe alle Geschwindigkeiten in Bruchteilen der Lichtgeschwindigkeit \Rightarrow **natürliche Einheiten**: $c = 1$
- d.h. geeignete Einheit für Masse ist Energie
 - z.B. Elektronmasse $m_e \approx 0.5 \text{ MeV}$
 - Protonmasse $m_p \approx 1 \text{ GeV}$
- Nur **masselose** Teilchen (z.B. Photonen oder Neutrinos) können sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.
- Will man neue, schwere Teilchen entdecken, benötigt man hohe Energien.



Treffgenauigkeit

- Quantenmechanische Eigenschaft eines Teilchens
- Hat **keine** Entsprechung in unserer Erfahrungswelt
(**Wellenbild**, $E = h / \lambda$)
- Grundregel für (hochenergetische Teilchen):
Treffgenauigkeit = 200 fm / Energie (in MeV)
- Zum Beispiel
 - 0.2 fm bei 1 GeV
 - 200 fm bei 1 MeV
 - 10 nm bei 20 keV





Mögliche Projektile für Strukturen < 1 nm

Sichtbare Lichtteilchen (!) (Photonen bei 0.25-0.5 eV)

- Punktförmig (< 0.001 fm)
- Treffgenauigkeit: $0.8 \mu\text{m} - 0.4 \mu\text{m}$ („Wellenlänge“)

Röntgenstrahlen (Photonen bei 20 keV)

- Punktförmig (< 0.001 fm)
- Treffgenauigkeit: 0.01 nm ($\sim 1/10$ Atomradius)
- Abbildung schwierig, da nicht fokussierbar

Elektronen bei 20 keV

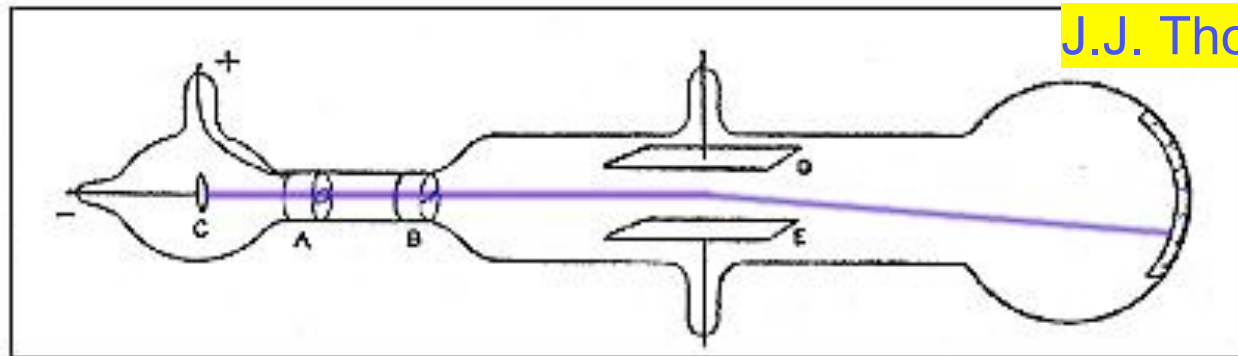
- Punktförmig (< 0.001 fm)
- Treffgenauigkeit: 0.01 nm ($\sim 1/10$ Atomradius (!))

Protonen bei 2 GeV

- Größe: 1 fm
- Treffgenauigkeit: 0.1 fm ($\sim 1/10$ Protonradius)

...

Das erste Elementarteilchen

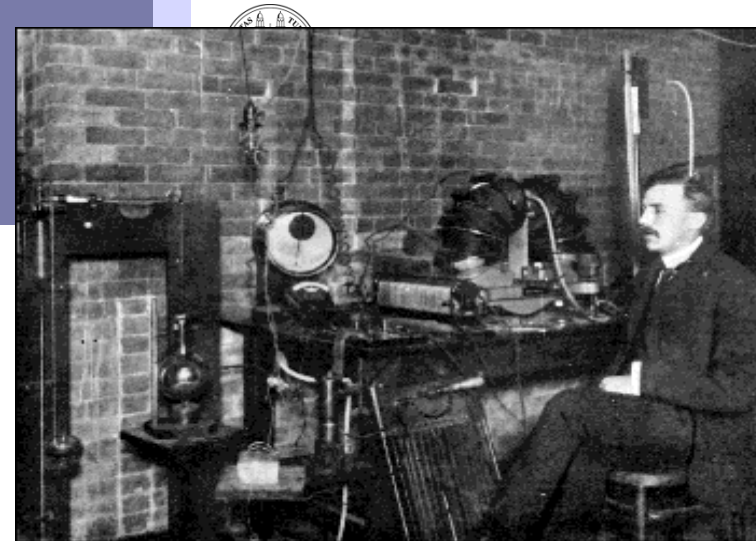


J.J. Thomson (1897)

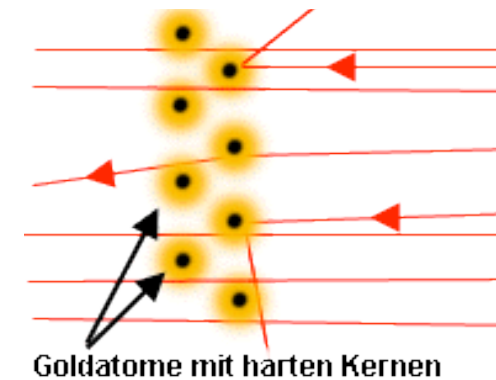
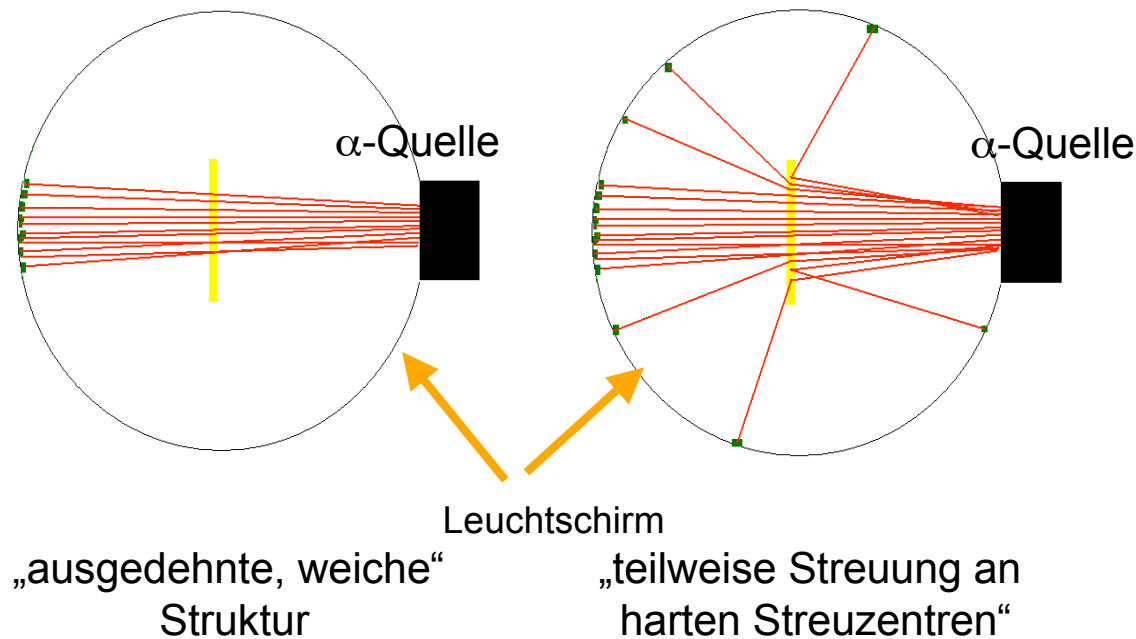
- Das Elektron wurde vor mehr als 100 Jahren entdeckt
 - Thompson maß ein Ladungs-Masse-Verhältnis, das dem 2000-fachen eines Protons entsprach
- ➔ das Elektron ist entweder sehr **leicht** oder sehr **stark geladen**

Struktur der Atome

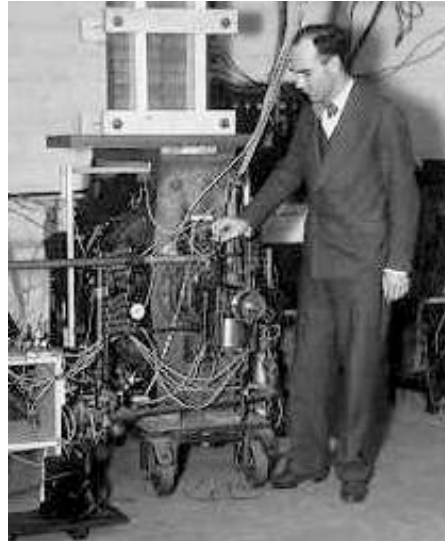
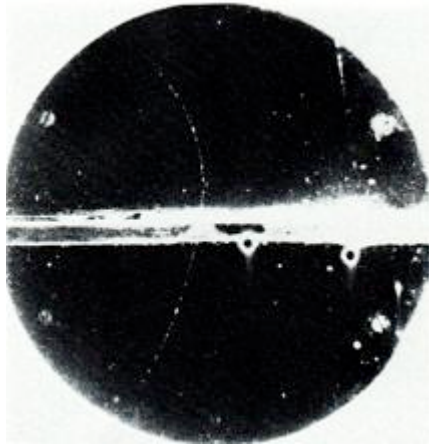
1911: E.Rutherford
Streuexperiment:
Streuung von α -Teilchen (Helium-Kern)
an einer Goldfolie



Ernest Rutherford with Gold Foil Experiment



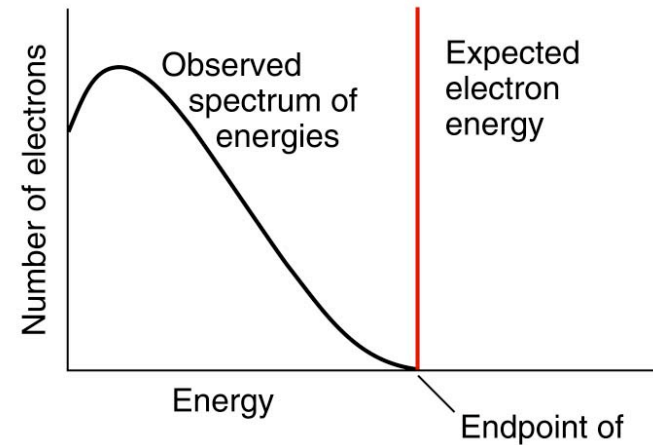
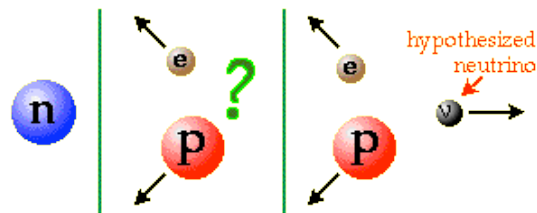
Das zweite Elementarteilchen



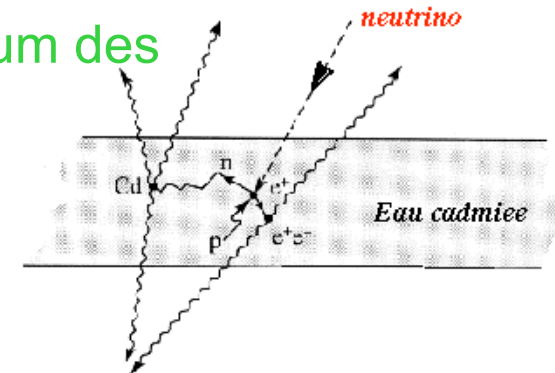
Anderson (1933)

- Das Positron wurde vor mehr als 70 Jahren entdeckt
- Seine **Masse** entspricht der des Elektrons, seine **Ladung** der des Elektrons mit **umgekehrtem Vorzeichen**.
- Das Positron ist das zum Elektron gehörige Antiteilchen (von Dirac theoretisch vorhergesagt).

Das Neutrino



- 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um **Spektrum des β -Zerfalls** (Chadwick 1914) zu erklären.
- 1956 von **Cowan und Reines** in der Reaktion $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ nachgewiesen.
- Extrem kleine Masse ($< 1 / 1.000.000.000$ Elektronmasse), elektrisch neutral.





Die Bausteine bis Mitte 1950

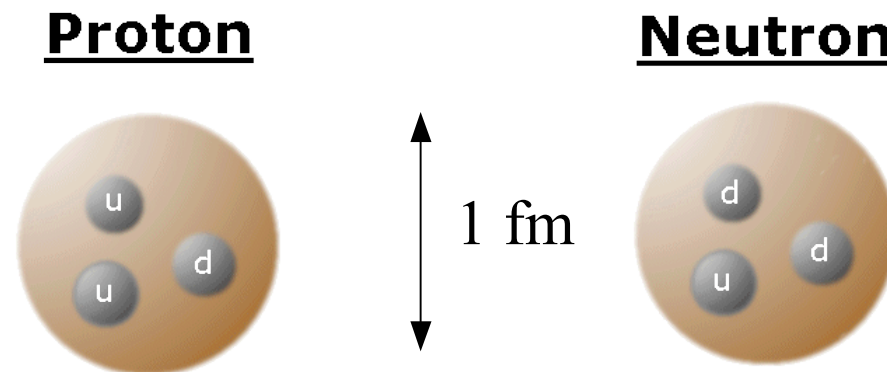
- Das **Neutron**: $m_n = 940 \text{ MeV}, e_n = 0$
- Das **Proton**: $m_p = 938 \text{ MeV}, e_p = +1e$
- Das **Elektron**: $m_{e^-} = 0.511 \text{ MeV}, e_{e^-} = -1e$
- Das **Positron**: $m_{e^+} = 0.511 \text{ MeV}, e_{e^+} = +1e$
- Das **Neutrino**: $m_\nu < 2.3 \text{ eV}, e_\nu = 0$

Und es geht weiter!!!



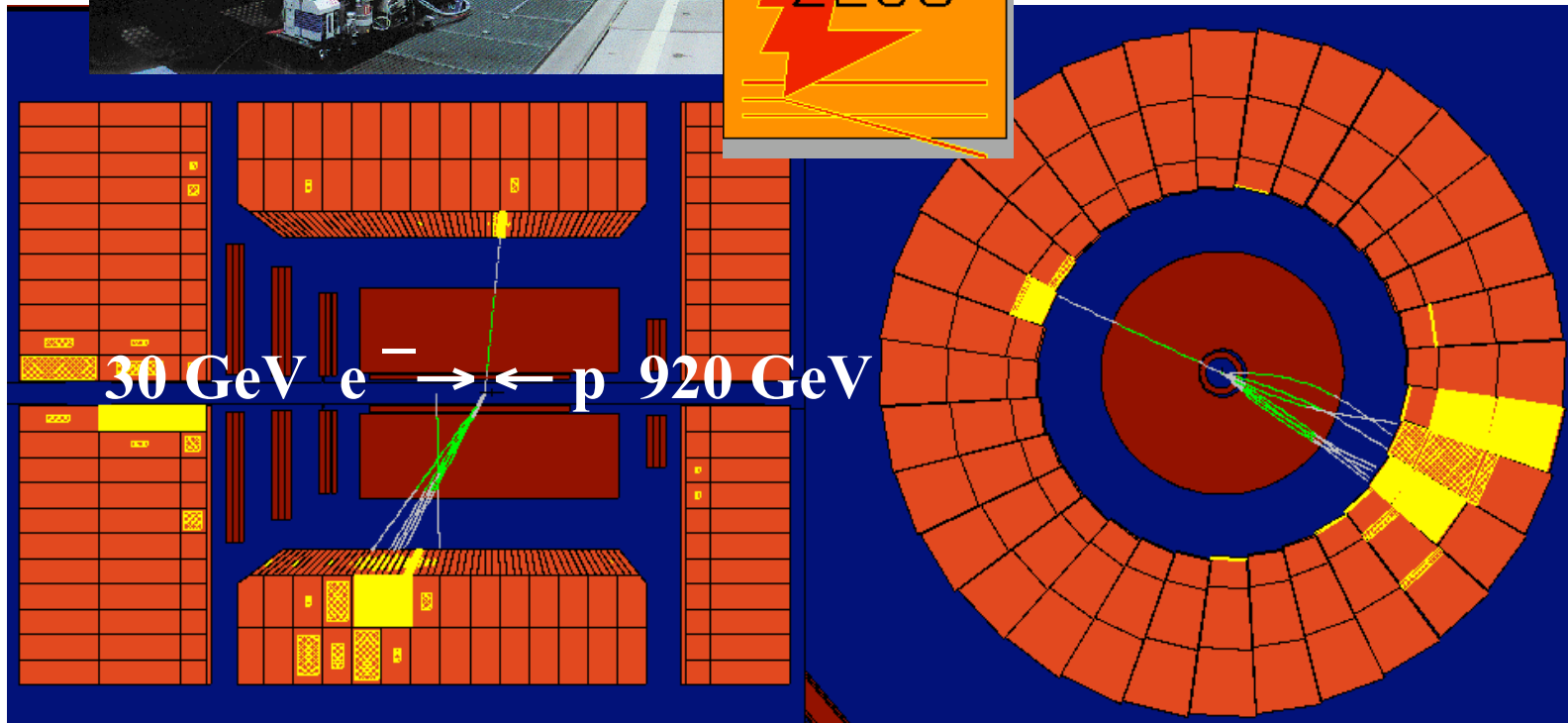
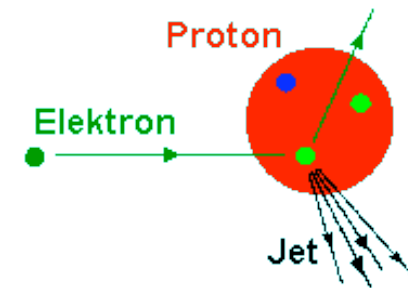
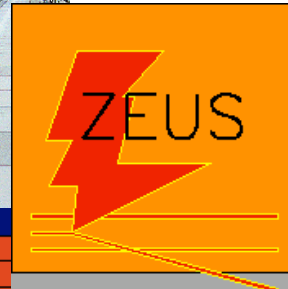
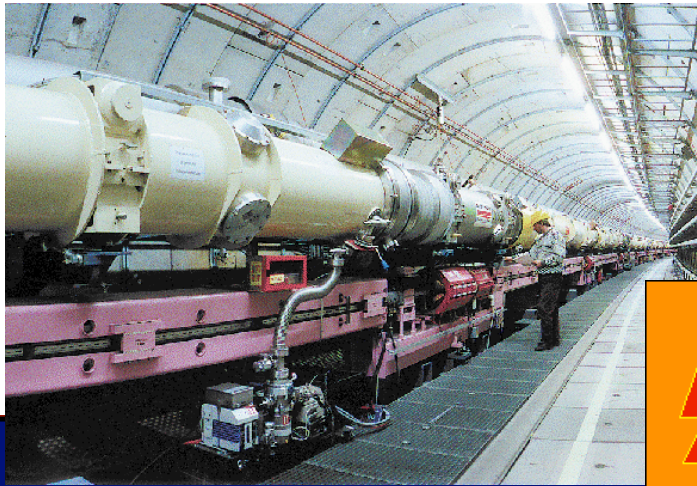
Protonen und Neutronen sind nicht elementar

- Direkter Beweis: Beschuss von Protonen mit Elektronen → Quarks
1970: Stanford, Kalifornien; seit 1989: DESY, Hamburg (HERA-Beschleuniger)
- Nötige Treffgenauigkeit $\ll 1 \text{ fm}$ → Energie $\gg 0.2 \text{ GeV}$
- Resultat:



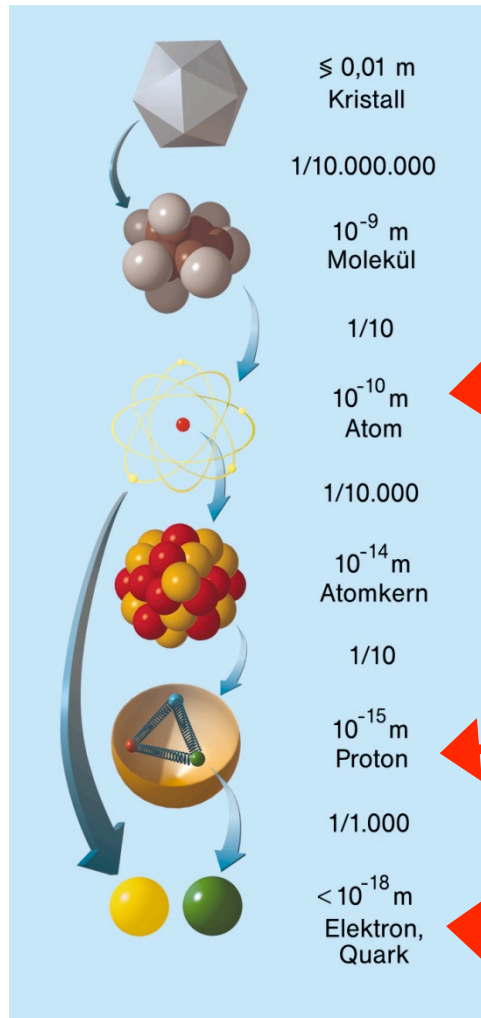


Direkter Nachweis von Quarks im Proton





Zusammenfassung: Struktur der Materie

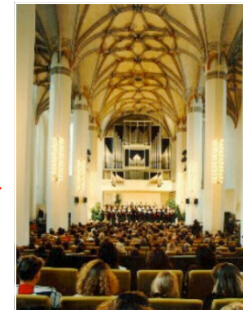


Christian Kurz
Institut für theoretische Physik

Mensch:
Entfernung zu benachbarten Sternen
z.B. Sirius: 10^{14} km



Atom:
Mond



Proton:
Kirchenschiff



Quark:
Tischtennisball

Teilchenphysik

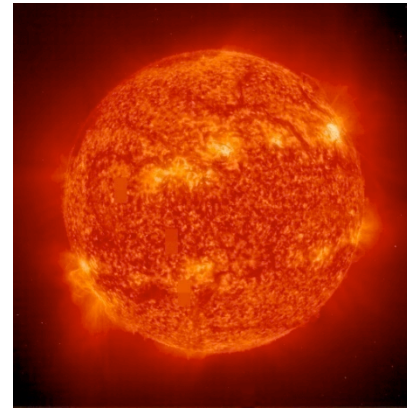
Die elementaren Kräfte und ihre Wirkung auf die Materieteilchen (Standardmodell)



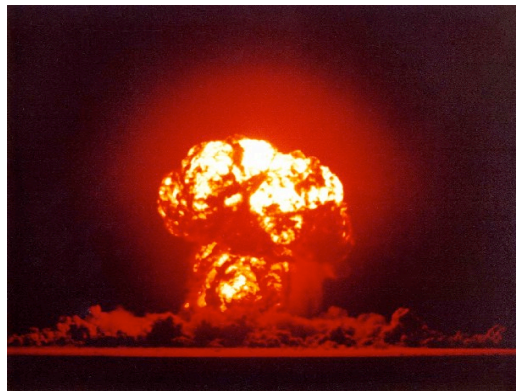
elektromagnetische
Wechselwirkung



schwache
Wechselwirkung



starke
Wechselwirkung



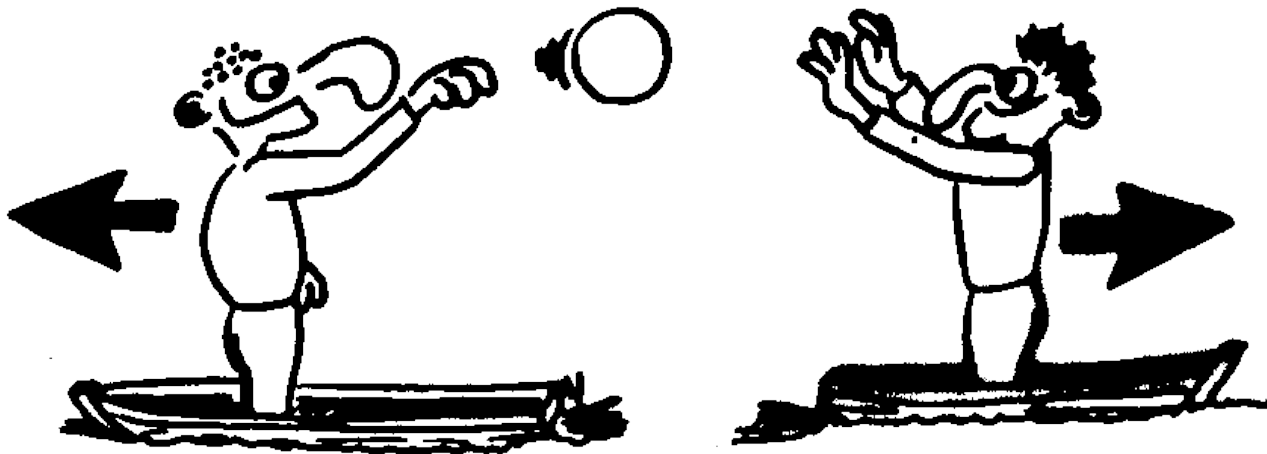
Gravitation



Prinzip von Wechselwirkungen (Kräften)



Zu jeder **Wechselwirkung** gehört eine **Ladung**
Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
Wechselwirkung erfolgt über Austausch von **Botenteilchen**



Abstoßend
Anziehend



Was ist eigentlich eine Ladung?

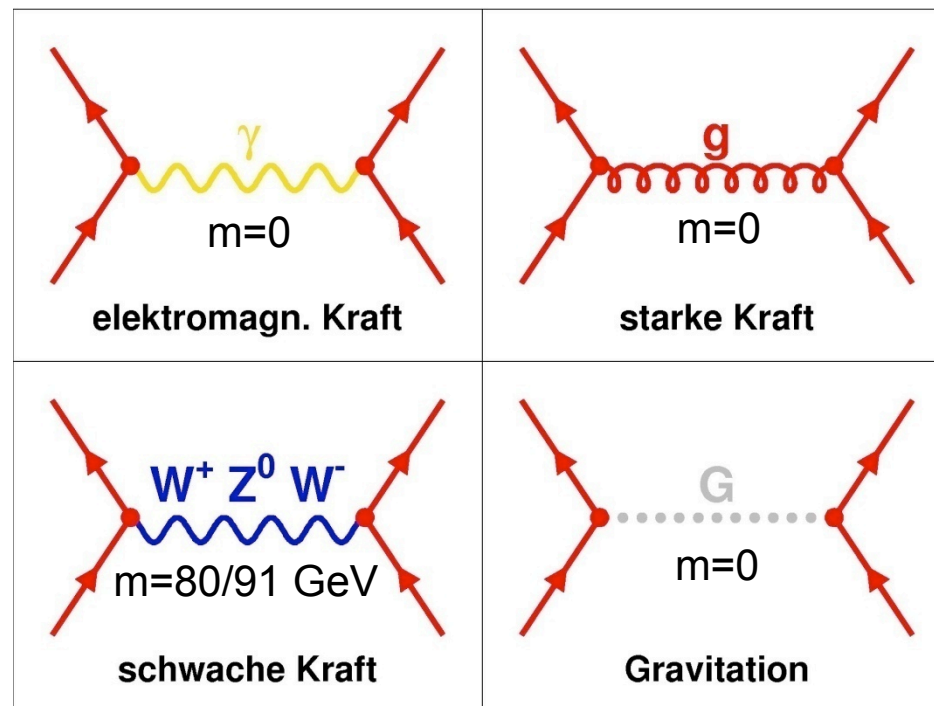
- Eine **Fundamentale Eigenschaft** eines Teilchens
- Ladungen sind **Additiv**:
 $\text{Ladung}(A+B) = \text{Ladung}(A) + \text{Ladung}(B)$
- Ladungen kommen nur in Vielfachen einer **kleinsten Ladungsmenge** vor
- Ladung ist **erhalten**,
d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren



Mehr wissen wir (noch) nicht

Die vier Grundkräfte

Grafische Darstellung: Feynman Diagramme, Rechenregeln



- Unterschiedliche Stärke der verschiedenen Wechselwirkungen
- Austauschpartikel der schwachen Wechselwirkung massiv!
- Gravitation extrem schwach, spielt für Teilchen praktisch keine Rolle



Die elektromagnetische Kraft

- *Ladung*: elektrische Ladung Q
- *Arten*: 1 Ladungsart: „Zahl“, positiv oder negativ
- *Botenteilchen*: Photon
- *Eigenschaften*: elektrisch neutral: $Q=0$
masselos : $m=0$

Teilchen	Up	Down	Neutrino	Elektron
Ladung	+2/3	-1/3	0	-1

- Besonderheiten:
 - Unendliche Reichweite
 - Makroskopisch beobachtbar
 - Magnetfelder lenken elektrisch geladene Teilchen ab, umso weniger je höher deren Energie ist



Die starke Kraft

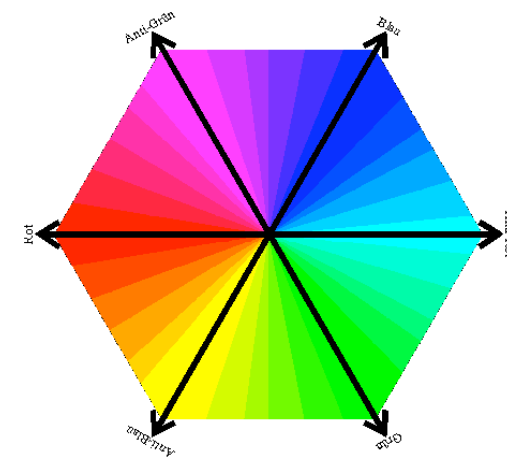
- *Ladung*: starke Ladung
- *Arten*: 3 Ladungsarten: „Farbe“, plus jeweilige Antifarbe
- *Botenteilchen*: 8 Gluonen
- *Eigenschaften*: tragen selber je 1 Farbe und Antifarbe
masselos : $m=0$

Teilchen	Up	Down	Neutrino	Elektron
----------	----	------	----------	----------

Ladung	r, b, g	r, b, g	-	-
--------	---------	---------	---	---

Besonderheiten:

- Endliche Reichweite ca. 1 fm
- Hält p, n und Atomkern zusammen
- Makroskopisch nicht beobachtbar, außer radioaktiver Zerfall





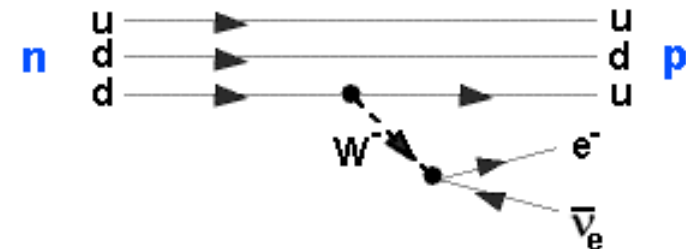
Die schwache Kraft

- *Ladung*: schwache Ladung (I_1, I_2, I_3)
- *Arten*: 1 Ladungsart: „schwacher Isospin“
- *Botenteilchen*: W^-, Z^0, W^+
- *Eigenschaften*: tragen selber schwache Ladung: $I_3 = -1, 0, 1$
Masse : $m = 80 - 90 \text{ GeV}$

Teilchen	Up	Down	Neutrino	Elektron
I_3	+1/2	-1/2	+1/2	-1/2

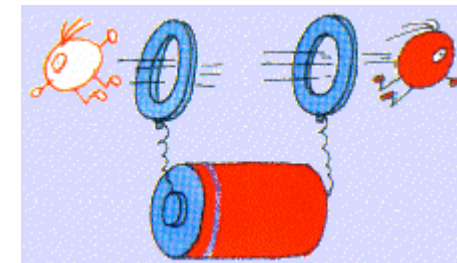
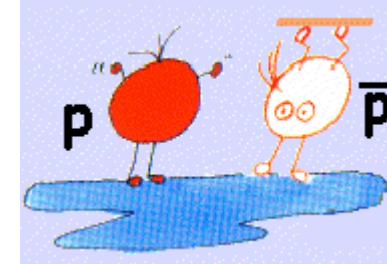
Besonderheiten:

- Endliche Reichweite ca. 0.0025 fm
- Makroskopisch nicht beobachtbar, außer
 - Brennen der Sonne
 - Radioaktiver Zerfall des Neutrons
 - Analog: Zerfall des Myons $\mu \rightarrow e \nu$

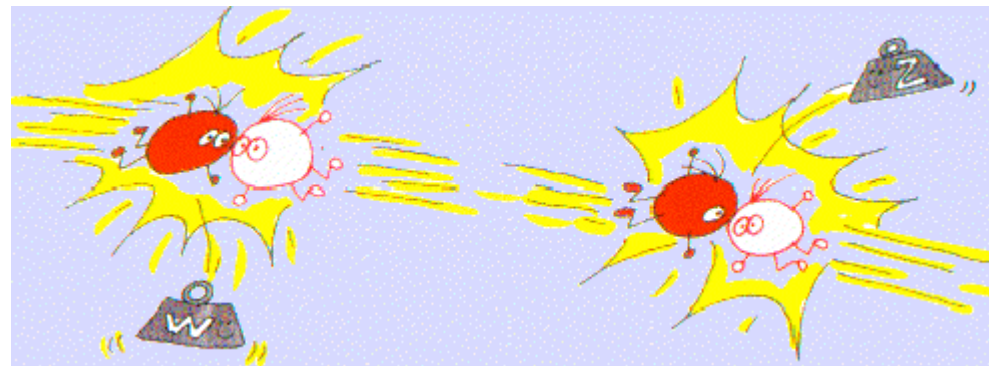


Antimaterie

- Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein **Antiteilchen** mit **umgekehrten** Ladungsvorzeichen
- Sonst sind alle Eigenschaften (Masse, Lebensdauer) **gleich**
- Aus Botenteilchen können **paarweise** Materie- und Antimaterieteilchen entstehen
- Umgekehrt können sich diese wieder zu Botenteilchen (Energie) **vernichten**



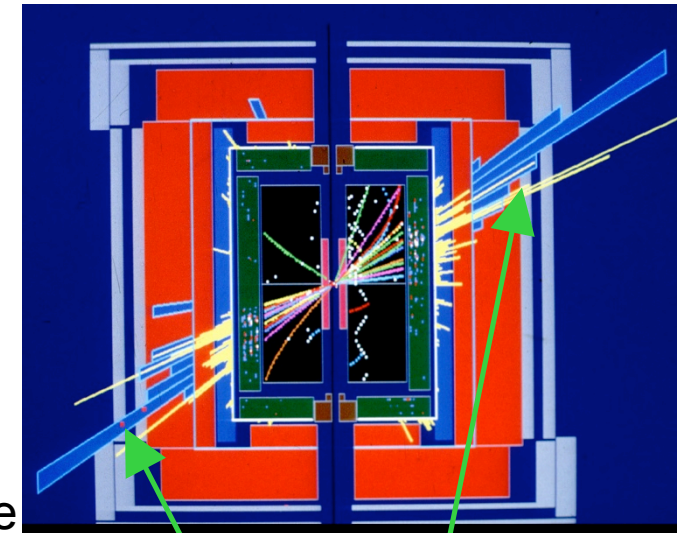
$$E=mc^2$$





Teilchenjets

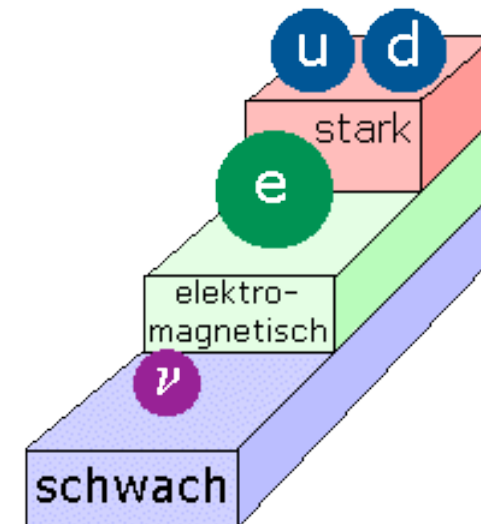
- Zuerst im Labor bei e^+e^- Kollisionen beobachtet, bei denen ein Quark-Antiquark Paar im Endzustand produziert wurde
- Starke Wechselwirkung wird bei grossen Abständen stärker
- Bewegen sich das Quark-Antiquark Paar voneinander weg, wird mehr Energie im Feld gespeichert, so dass wiederum Quark-Antiquark Paare produziert werden können
- Im Detektor wird nicht eine Teilchenspur gesehen, sondern „Cluster“ von Teilchen, die sich in eine bestimmte Richtung bewegen. Diese werden **Jets** genannt.



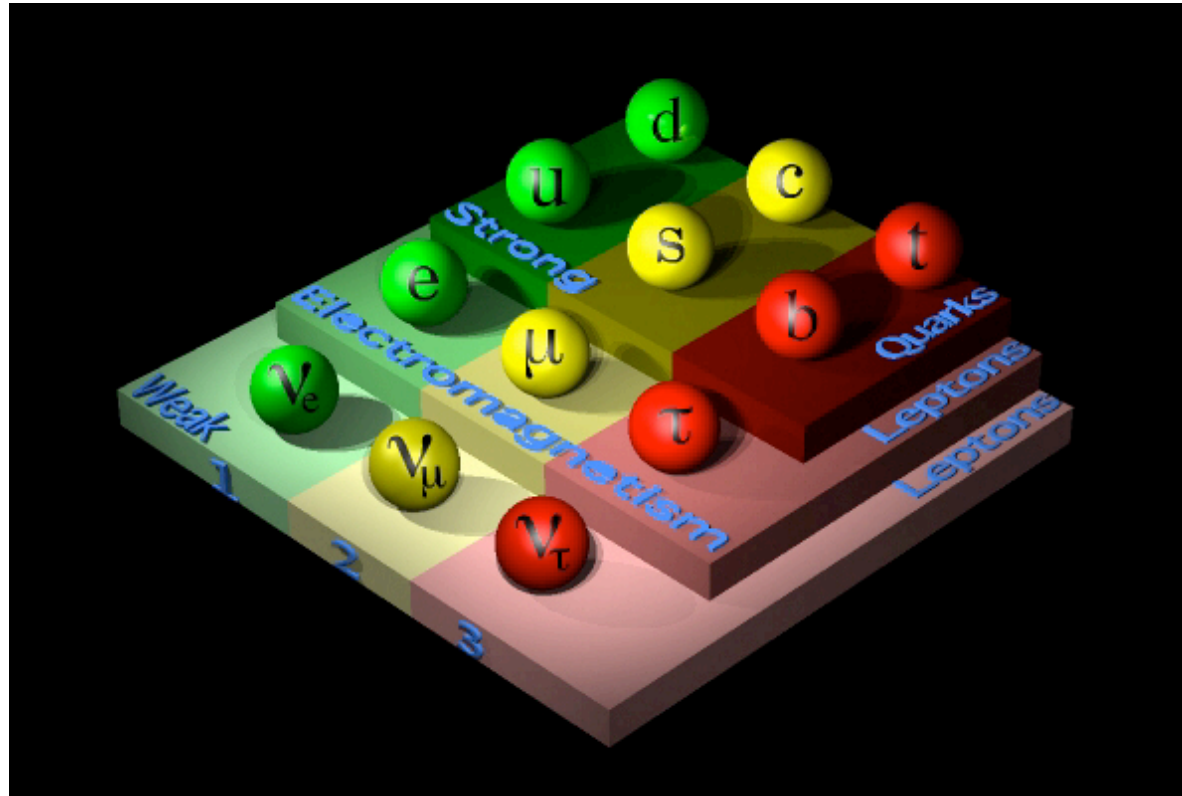
Hadronische Jets

Zusammenfassung: Kräfte

- Die unterschiedlichen **Ladungen** bewirken unterschiedliche **Kräfte** zwischen Teilchen
- Sie erklären auch das unterschiedliche Verhalten in den **Detektoren**
- Sowie die Bildung von **Teilchenjets** aus Quarks



Der vollständige Teilchensatz



„Normale“ Materie besteht aus up-Quarks, down-Quarks und Elektronen, zusammen mit dem Neutrino bilden diese die **erste Teilchengeneration**. Dieses Schema **wiederholt** sich nach heutigem Wissen **zwei Mal**



Das Standardmodell der Teilchenphysik

- mehr als “nur” ein Baukasten von Materieteilchen und Wechselwirkungsteilchen
- **Rechenregeln** für quantitative Vorhersagen

klassisch: $F = ma$

- (relativistische) Quantentheorie: **Dirac-Gleichung**

$$(iD_{\mu}\gamma^{\mu} - m)\Psi = 0$$

- Rechenregeln können allein aus Symmetrieprinzipien hergeleitet” werden
 - ➔ Lorentzinvarianz + (lokale) Erhaltung der Ladungen
- Extrem gut überprüft, bisher keine Abweichungen gefunden.
- Hat einen Haken: dürfte eigentlich nur für **masselose Teilchen** funktionieren!

Exp. Überprüfung des Standardmodells am Bsp. des Z-Bosons

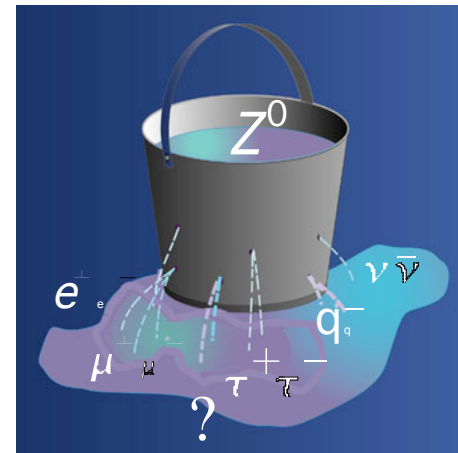


- Theoretisch ist das Z-Boson
 - eines der drei Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung
 - elektrisch neutral

- kann zerfallen in:

$$e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$$

- Quark-Antiquark-Paare (im Detektor als zwei Jets sichtbar)
- Neutrino-Antineutrino-Paare: $\nu\bar{\nu}$
- unbekannte Teilchen? (leichter als die halbe Z-Masse)



Zerfälle des Z-Bosons I

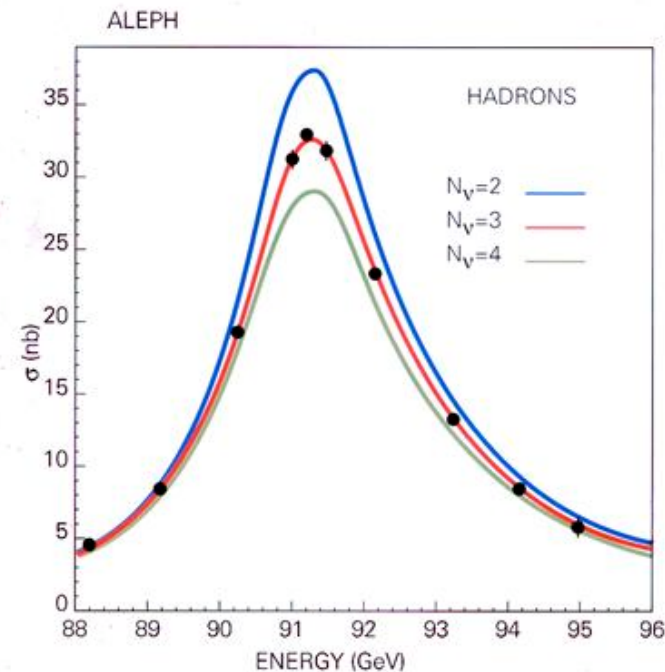
- Was ist eine Zerfallsbreite?

Heisenberg'sche Unschärferelation:

- jedes instabile Teilchen hat eine Energieunschärfe, die sich als Massenunschärfe bemerkbar macht

- Beispiel: Z-Boson

- Punkte: Daten
- farbige Linien: theoretische Vorhersagen



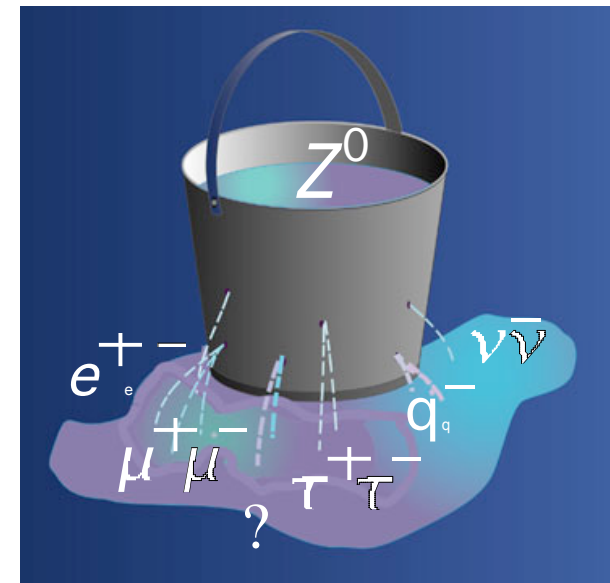
Zerfälle des Z-Bosons II

Z-Boson:

- Zerfallsbreite 2.5 GeV
- Lebensdauer 10^{-25} s

Analogie Wassereimer:

- je mehr Löcher der Eimer hat, desto schneller ist er leer
- je größer ein Loch ist, desto mehr Wasser fließt dadurch hinaus
- Löcher entsprechen „Zerfallskanälen“

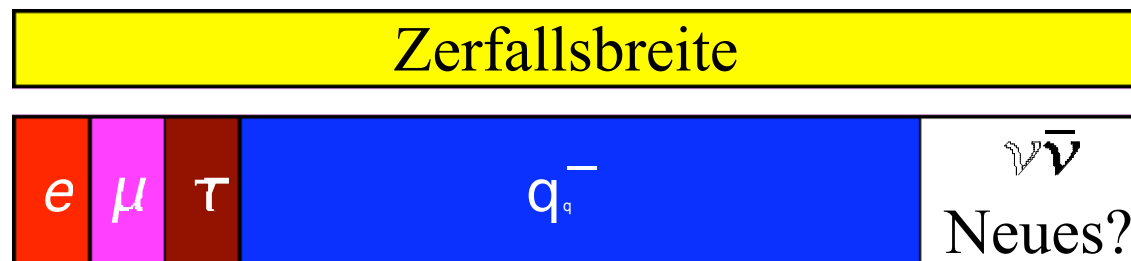


Zerfälle des Z-Bosons III



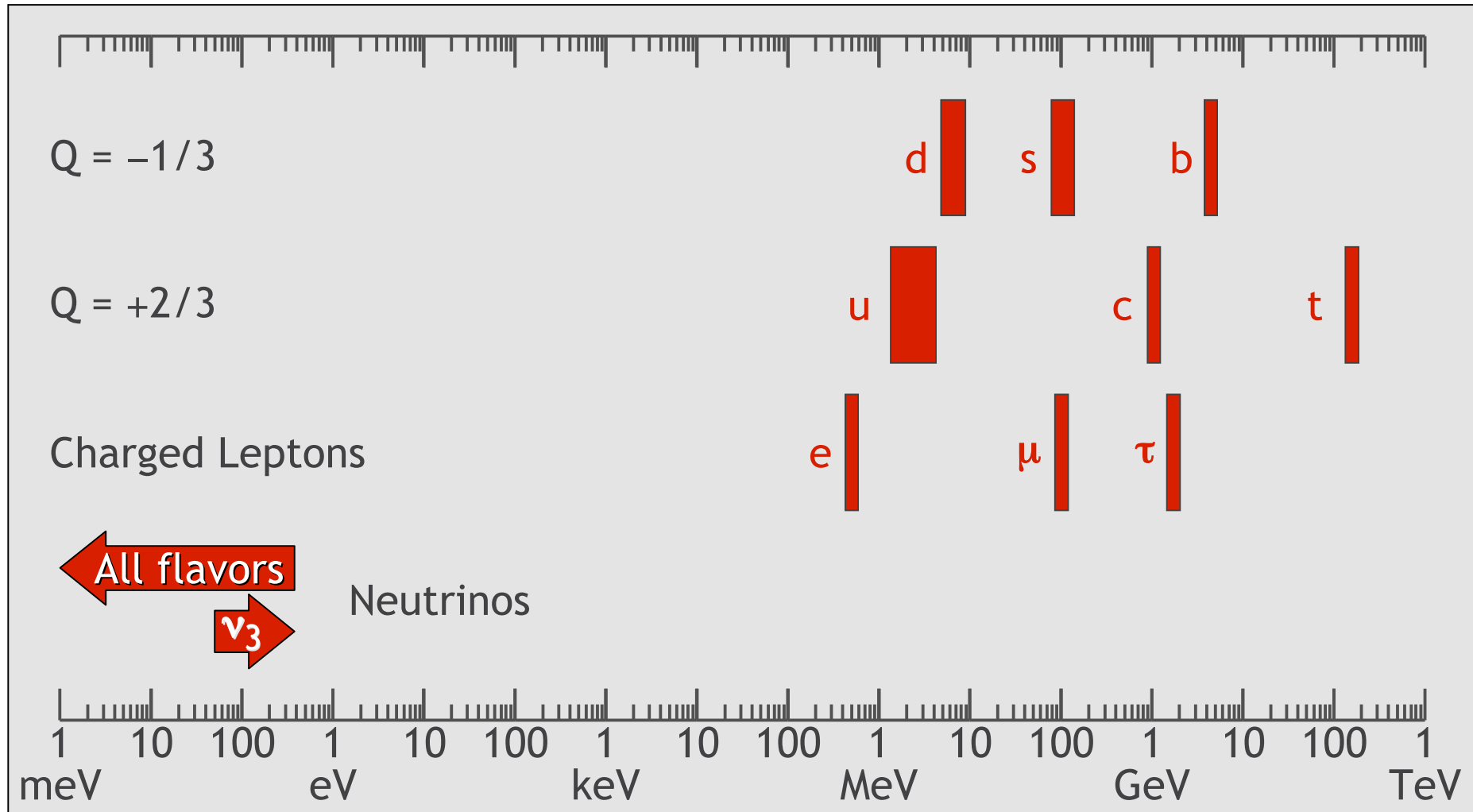
Vorhersagen der Theorie:

- Zerfall in $e^+e^- \mu^+\mu^- \tau^+\tau^-$ gleich wahrscheinlich
(„Leptonuniversalität“ = Myonen und Taus verhalten sich wie Elektronen)
- Zerfall in $q\bar{q}$ viel wahrscheinlicher als Zerfall in geladene Leptonen
- Verhältnis $\nu\bar{\nu}$ zu $\mu^+\mu^-$
- Summe aller Zerfälle ergibt Zerfallsbreite





Massen der elementaren Bausteine





Der Higgs-Mechanismus

Das Standardmodell sieht **masselose** Teilchen vor

ABER: Nur **Photon + Gluon** masselos, $m(W,Z) = 80-90 \text{ GeV}$!

Postulat (Peter Higgs, 1964(!)):

Die Masse der Teilchen ist keine **Teilcheneigenschaft** sondern das Resultat einer ständigen (ungerichteten) **Kraftwirkung auf die Teilchen**

→ alle Teilchen sind an sich masselos

→ Teilchen haben eine scheinbare Masse, wenn man die Kraftwirkung ignoriert

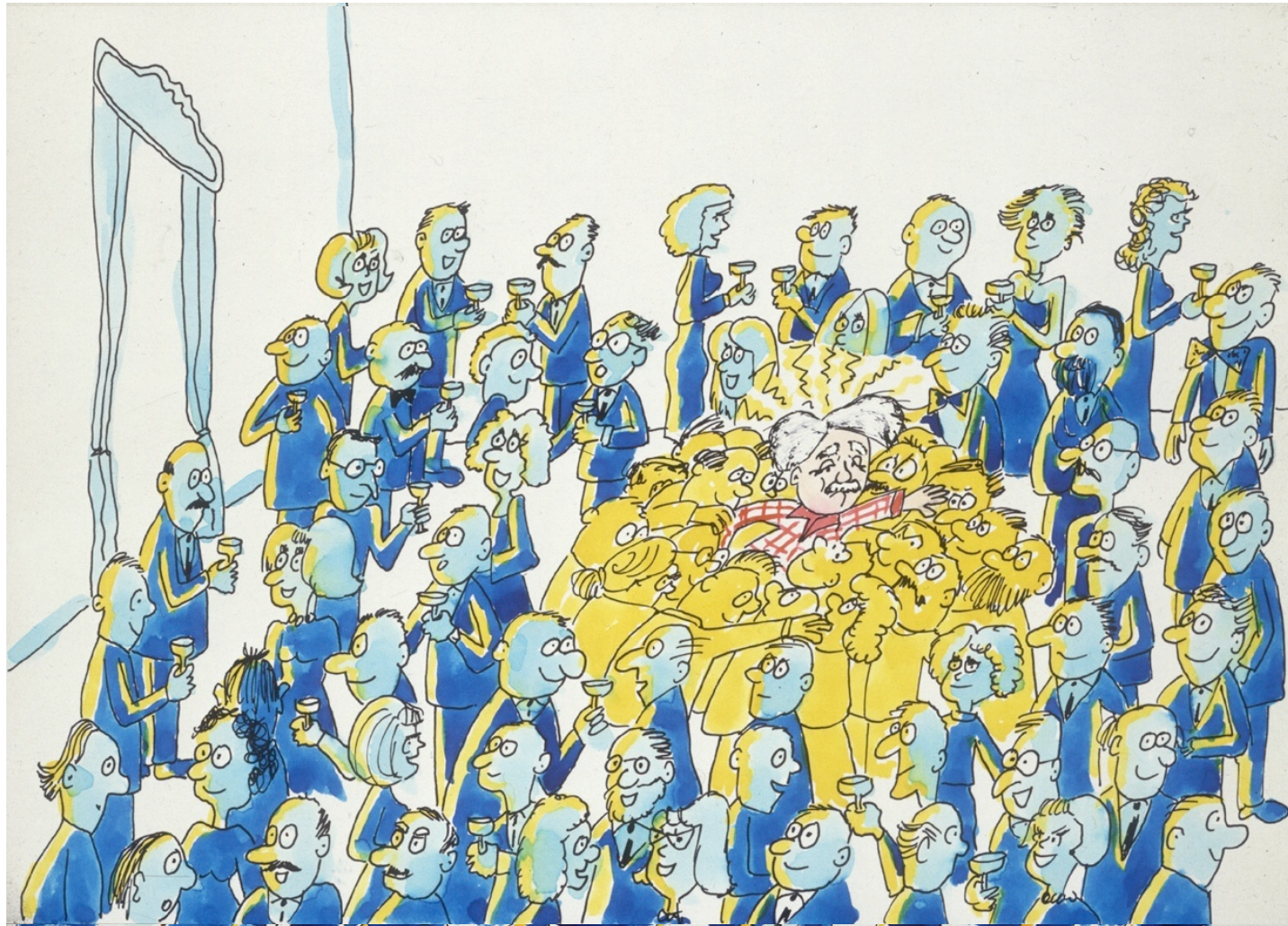
Preis der Hypothese: es muss ein neues Teilchen geben, das

Higgs-Teilchen

Bisher noch nicht entdeckt!

Eine der Hauptaufgaben für den

LHC-Beschleuniger am CERN ab Herbst 2009 (???)





Was wir alles nicht wissen ...

Das Standardmodell lässt viele Fragen offen:

Warum gibt es drei Generationen ?

Warum gibt es vier verschiedene Wechselwirkungen ?

Warum gibt es so viele (19) Naturkonstanten ?

Was ist mit der Gravitation ?

Gibt es eine Vereinheitlichung (Urkraft) ?

Warum sind die Massen der Teilchen so verschieden ?

Warum besteht das Universum aus Materie und nicht aus Antimaterie ?

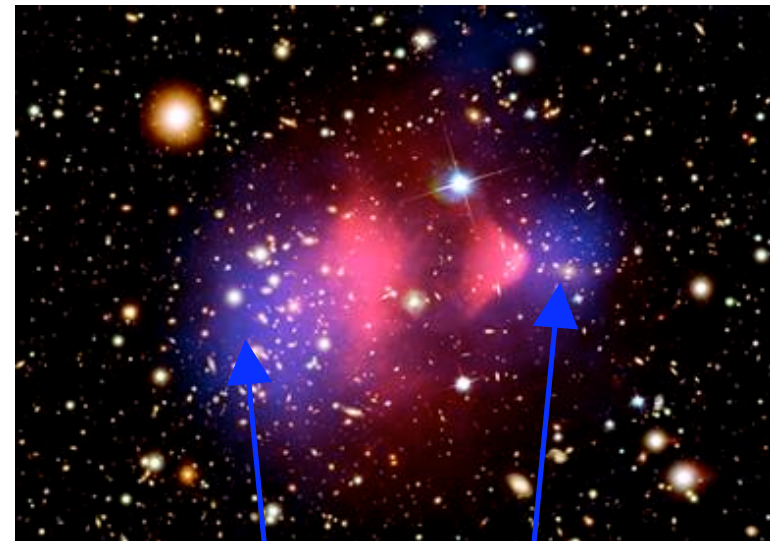
Was ist die dunkle Materie/Energie im Universum ?

Teilchenphysik ist (immer noch) spannend!

Dunkle Materie?

- Astronomische Beobachtungen von Bewegungen von Galaxien ergeben Abweichungen von Vorhersagen der Gravitation
- Es ex. mehr Masse im Universum als angenommen
- Erklärungsversuche jenseits des Standardmodells, z.B. neue Teilchen, die nur schwach wechselwirken
- Ausführlichere Diskussion im Vortrag von **S. Arrenberg**

Bullet Cluster



Dunkle Materie

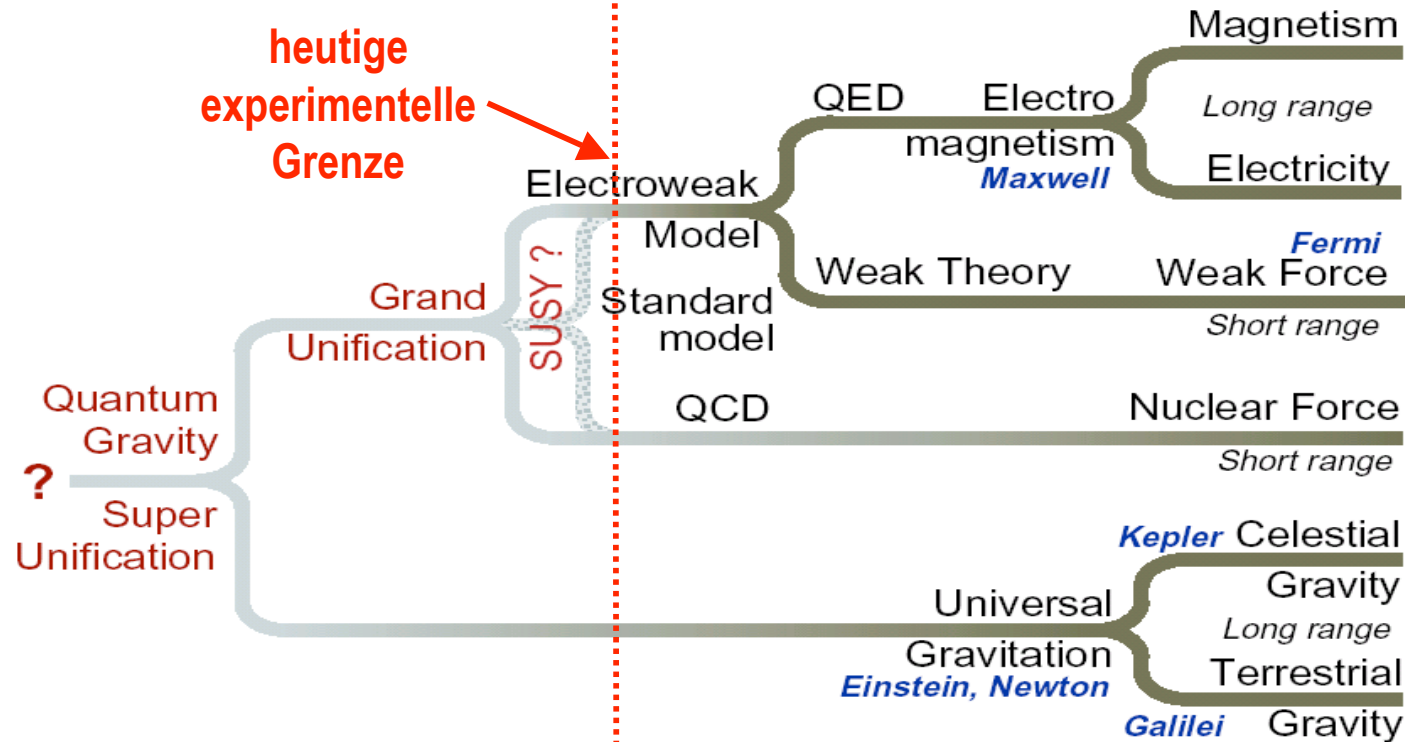
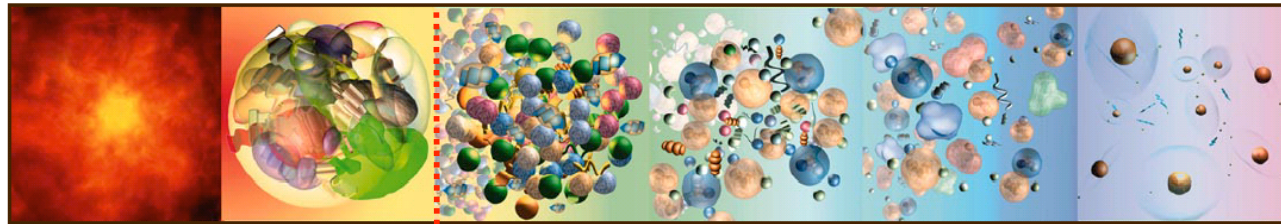
Auf der Suche nach der „Weltformel“



Universität Zürich



10⁻⁴³ sec 10⁻³² sec 10⁻¹⁰ sec 10⁻⁴ sec 100 sec 30000 years



Schlussübersicht

