

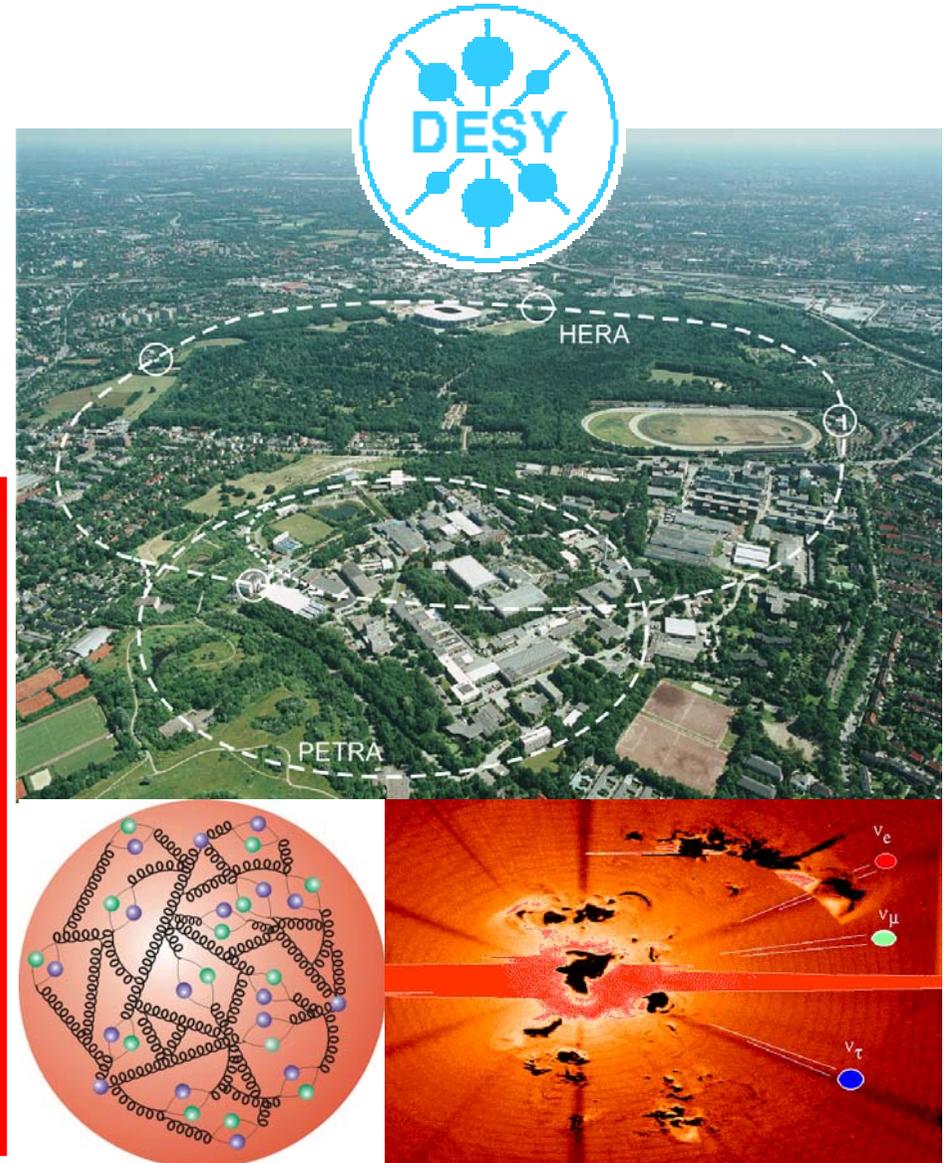
Was bedeutet Masse?

Ausgewählte Kapitel aus Teilchenphysik und Kosmologie

Achim Geiser, DESY + Uni HH

Vorlesung SS 09

- **Spezialvorlesung zu konventioneller Physik mit unkonventionellem Blickwinkel**
 - „Was Sie (vielleicht) schon immer wissen wollten, aber Ihnen (fast) niemand zu sagen wagte“



Vorlesung: Was bedeutet Masse?

Ausgewählte Kapitel aus Teilchenphysik und Kosmologie

A. Geiser

■ Beispiele behandelter Fragestellungen:

- Was ist Masse überhaupt? Wie ist sie in verschiedenem Kontext definiert? Woraus besteht sie?
- Wie groß ist die Masse des Universums? Woraus besteht sie?
- Wie kann man aus (fast) masselosen Konstituenten massive Teilchen „bauen“? Beispiel: Proton-Masse
- Wie tragen Felder aufgrund von Ladungen zur Masse von Teilchen bei? Wie funktioniert Renormierung? Was bedeutet sie? Beispiel: Elektron-Masse
- Wie funktioniert der Higgs-Mechanismus? Warum brauchen wir ihn? Warum glauben wir, dass er die Teilchenmassen erklären kann? Inwieweit stimmt das überhaupt? Beispiele: W-Masse, Top-Masse, Higgs-Masse
- Warum sind die Massen von Teilchen und Antiteilchen gleich?
- Was ist der Unterschied zwischen Massen- und Flavoureigenzuständen?
- Warum sind Neutrinos nicht masselos? Woher wissen wir das?
- Was ist der Unterschied zwischen Dirac- und Majorana-Masse?
- Das anthropische Prinzip: Um wieviel dürften die bekannten Teilchenmassen variieren, ohne unsere Existenz zu gefährden?

Vorlesung: Was bedeutet Masse?

Ausgewählte Kapitel aus Teilchenphysik und Kosmologie

A. Geiser

- **Ziel der Vorlesung:** Darlegung des derzeitigen Kenntnisstandes unter Betonung offener Fragen
- **Zeit und Ort der Vorlesung:**
Freitag 14h00-15h30 (V2), Hoersaal III, Jungiusstraße
- **Beginn:** 17. 4.
- **Vorkenntnisse:** Physik I-V, wird vorausgesetzt
Einführung in die Teilchenphysik,
hilfreich, aber nicht absolut notwendig
- **Literatur:** wird jeweils bekanntgegeben
- **Empfohlene ergänzende/komplementäre Vorlesungen (je nach Interesse):**
 - Teilchenphysik f. Fortgeschrittene (C. Hagner, A. Geiser)
 - Neutrino-physik (C. Hagner)
 - Theorievorlesungen (Quantenmechanik, Quantenfeldtheorie, Relativitätstheorie) wie angekündigt

Veranstalter

- Dr. Achim Geiser
- Studium in Aachen und Urbana/IL, Sommerstudent CERN
- Diplomarbeit (1987) und Dissertation (1992) an der RWTH Aachen/am UA1-Experiment am CERN
 - Zwei-Myon-Produktion
 - Beauty-Produktion in Proton-Antiproton-Kollisionen (QCD)
- CERN-Fellow + Staff (1992-98)
 - Suche nach Neutrinooszillationen mit dem NOMAD-Experiment am CERN
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter Uni Hamburg (1999/2000)
 - Vorbereitung der MONOLITH- und OPERA-Neutrinoexperimente
- Wissenschaftlicher Angestellter am DESY (seit 2001)
 - Beauty-Produktion in ep-Kollisionen bei HERA/ZEUS
 - Top- und Higgs-Produktion bei LHC/CMS
 - (Sommer)Studenten- und Diplomanden/Doktorandenbetreuung
- Privatdozent Uni Hamburg (seit 2006)
 - derzeit 6 Doktorand(inn)en, auch Bachelor/Diplomarbeiten möglich



Vorbemerkungen



- Vorlesung ist für Sie!
- -> bitte Rückmeldung, wenn die Behandlung eines Themas zu schnell, zu unvollständig oder zu langatmig ist
- bitte jederzeit unterbrechen, wenn etwas nicht klar ist, und fragen, fragen, fragen!

0. Einführung



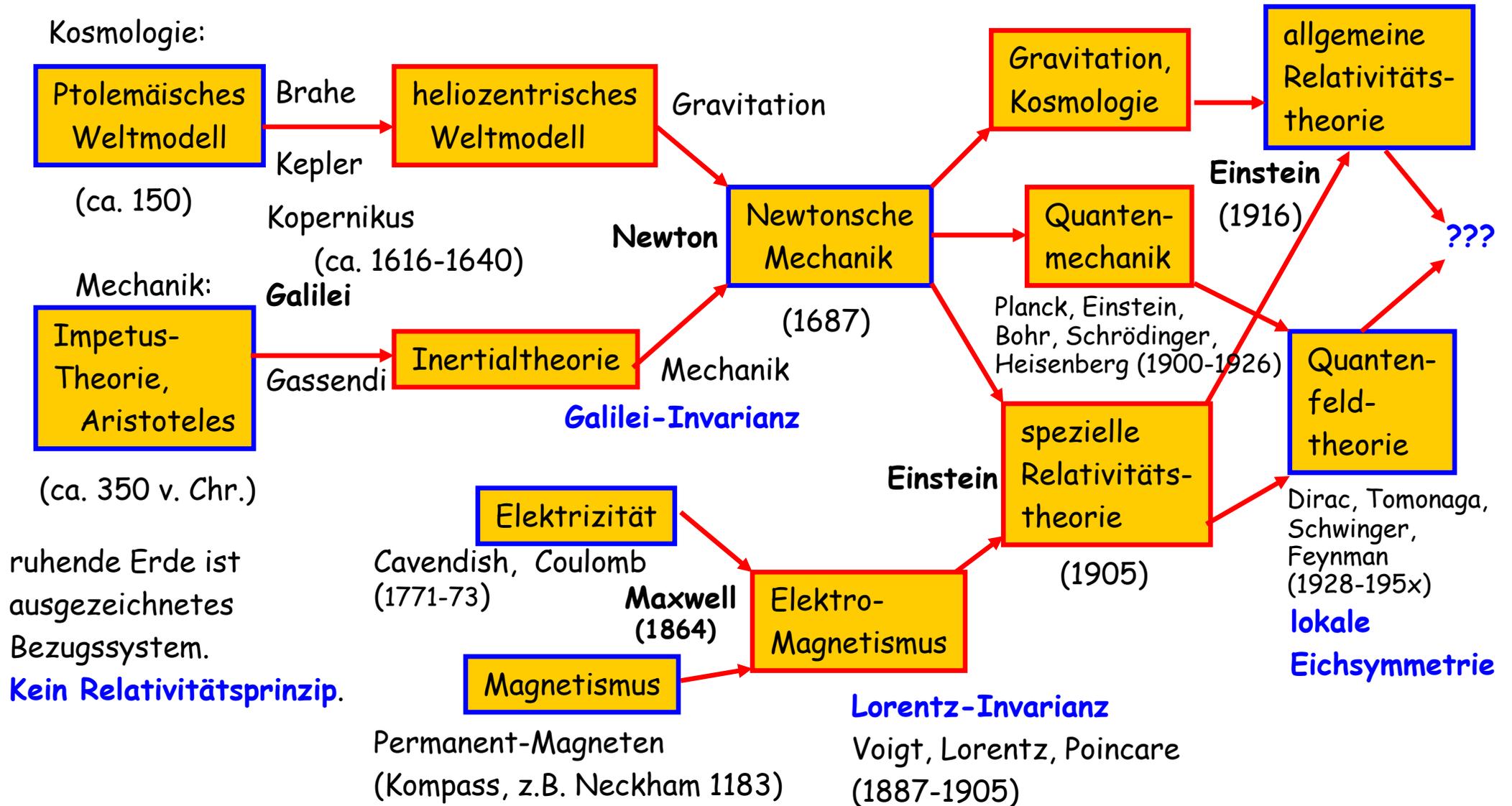
Einige interessante Aspekte der in der Zielsetzung genannten Fragestellungen.
"Appetithappen" -> Viele der Antworten später in der Vorlesung.

Folien teilweise auf Englisch (aus Sommerstudentenvorlesung ausgeliehen)
-> sorry.

Mündlich auf Deutsch.

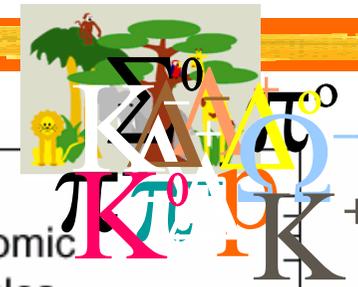
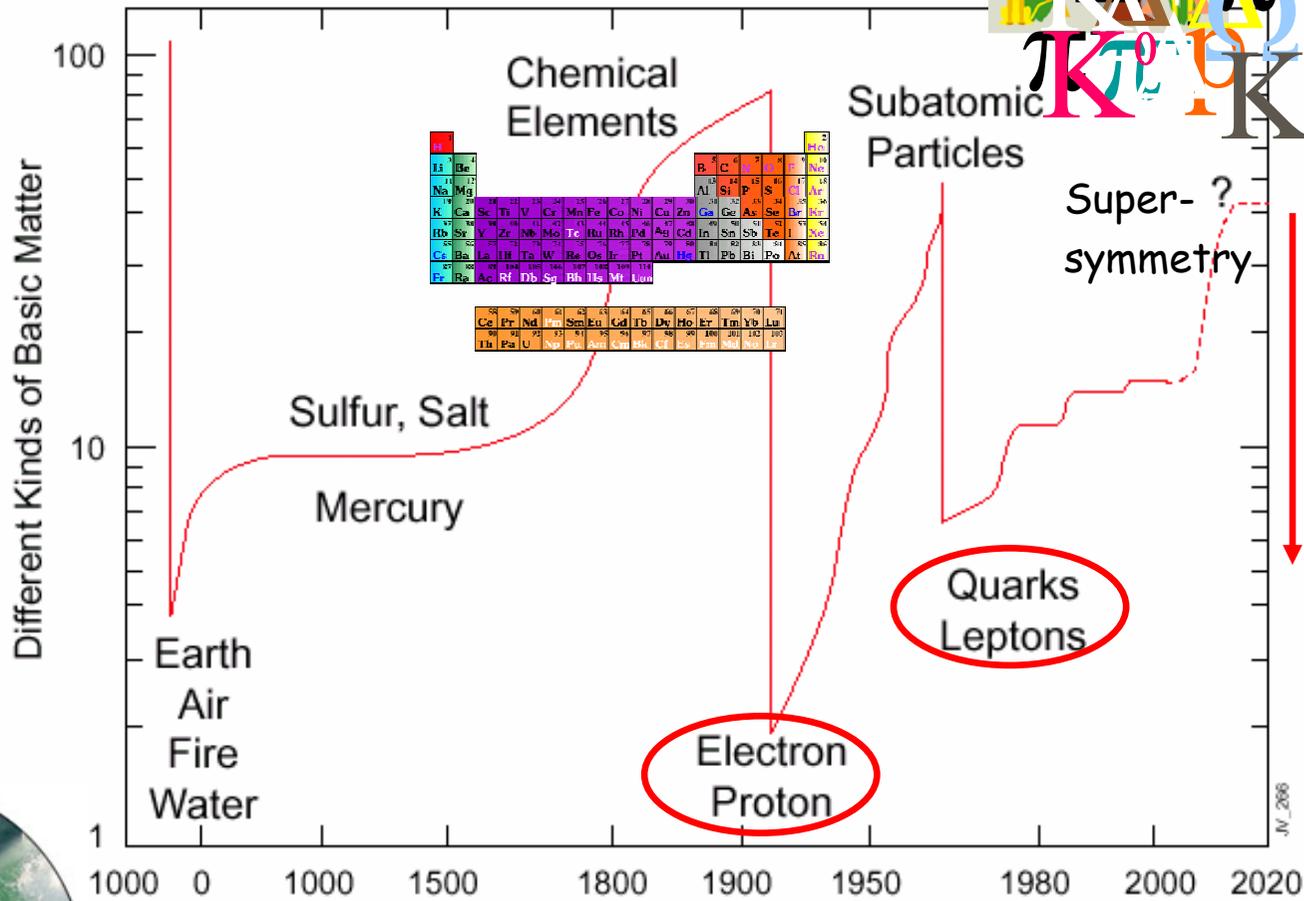
Weitere Teile der Vorlesung auf Deutsch.

Raum-Zeit-Symmetrien und die Vereinheitlichung der Kräfte



Geschichte der Grundbausteine der Materie

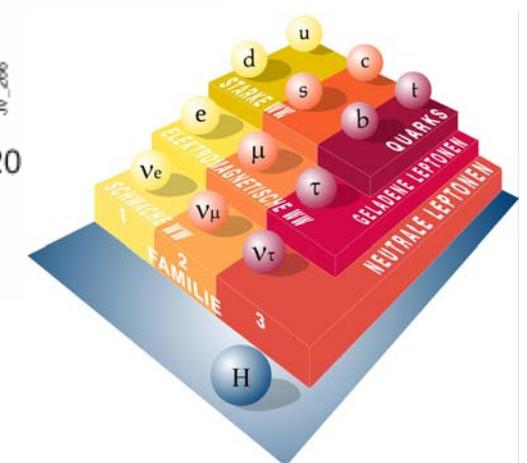
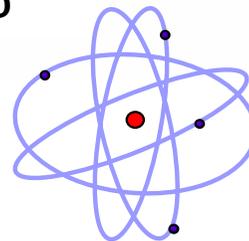
Motivation:
finde
kleinste
mögliche
Anzahl



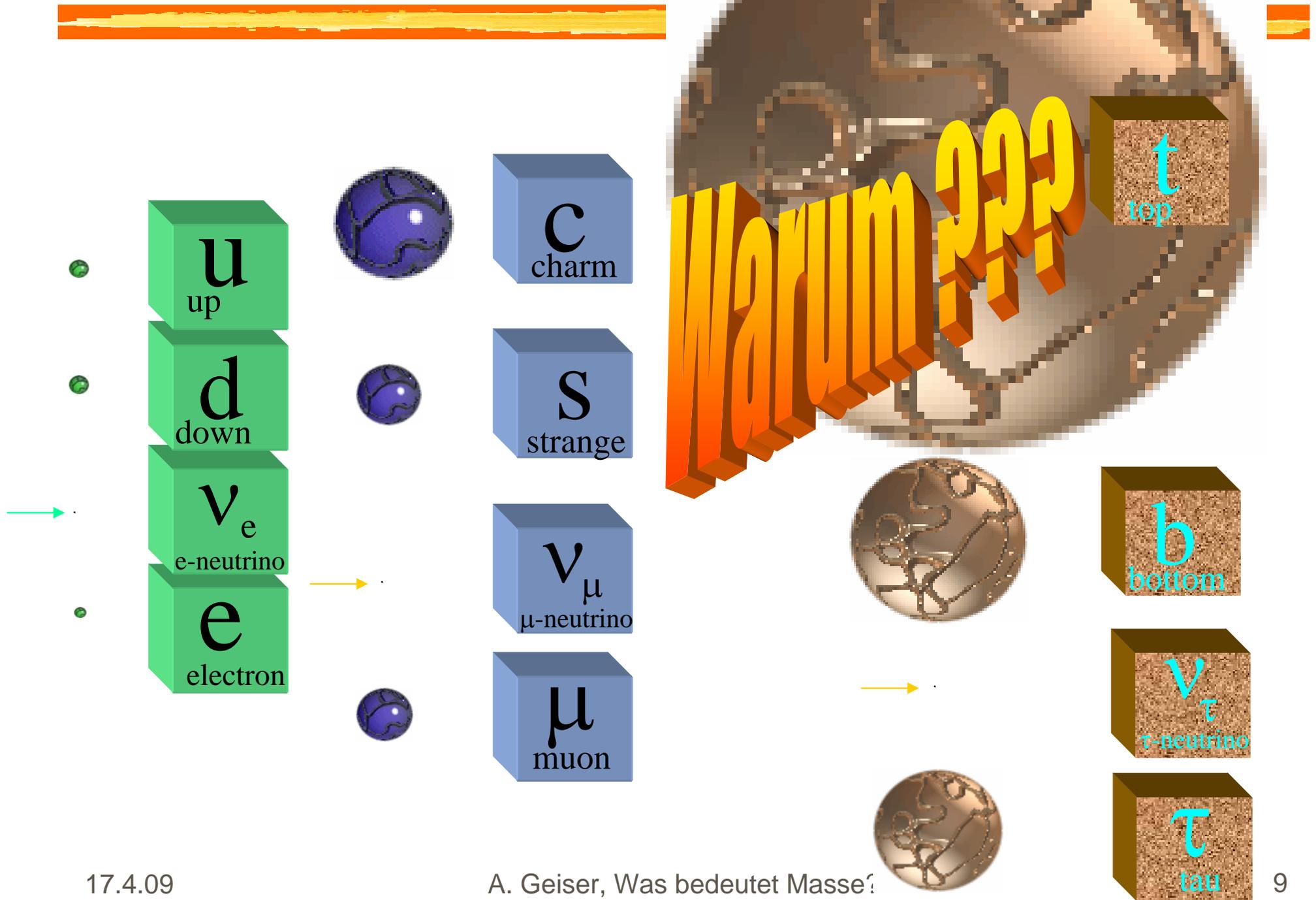
**Quark and
Lepton
substructure??**



(c) Andy Brice 1998



Das Rätsel der Masse



Fermion-Massen vom Higgs-Feld?

genialer Wissenschaftler (Fermion)
arbeitet mit Lichtgeschwindigkeit!

-> "masselos"



Raum = Vakuum

Leute = Higgs-Vakuumerwartungswert



Fermion-Massen vom Higgs-Feld?

Wissenschaftler wird berühmt!
betritt Raum mit Leuten



Fermion-Massen vom Higgs-Feld?

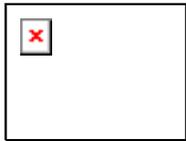
Die Leute sammeln sich um ihn,
behindern seine Bewegung/Arbeitsgeschwindigkeit
→ er wird "massiv"!

**Warum sind einige
Fermionen so viel
bevorzugter als andere?**



Quantenzahlen und Masse

- 1948: Entdeckung des Myons
- selbe Quantenzahlen wie Elektron, **ausser Masse**



I.I. Rabi
(Nobel 1944)



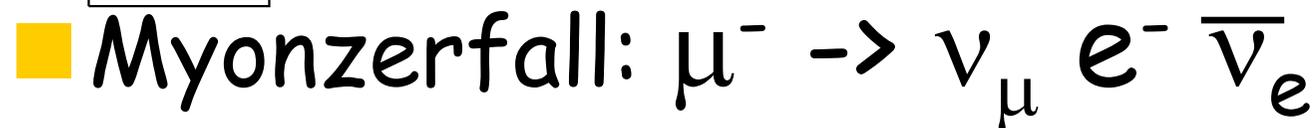
(Nobel 1988)



Leon M.
Ledermann

Melvin
Schwartz

Jack
Steinberger



Erhaltung von

- | | | | | |
|------------------------|----|---|----|----|
| ■ elektrischer Ladung: | -1 | 0 | -1 | 0 |
| ■ Leptonzahl: | 1 | 1 | 1 | -1 |
| ■ „Myon-zahl“: | 1 | 1 | 0 | 0 |

$\nu \neq \bar{\nu}$ (1955)

$\nu_\mu \neq \nu_e$ (1962)

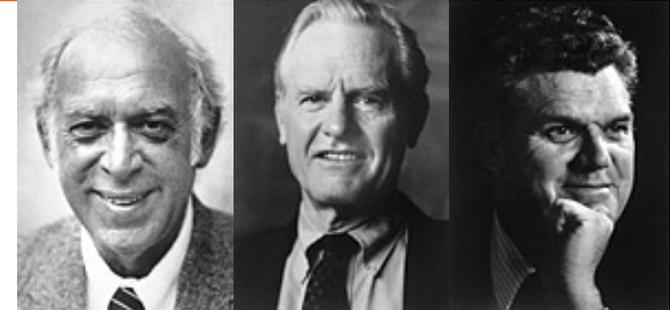
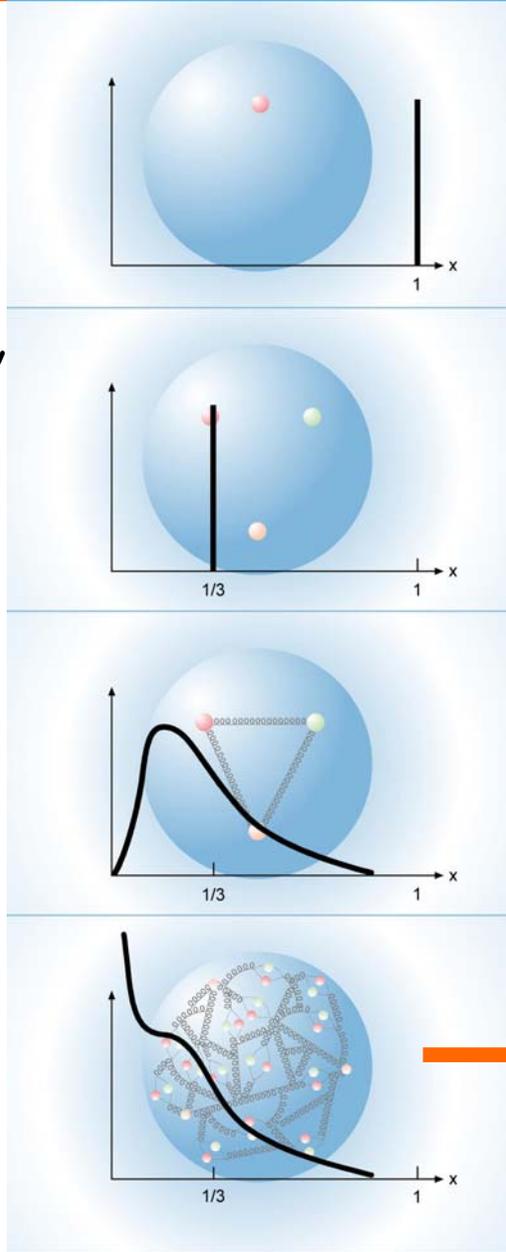
Warum ???

Leptonzahl ist erhalten

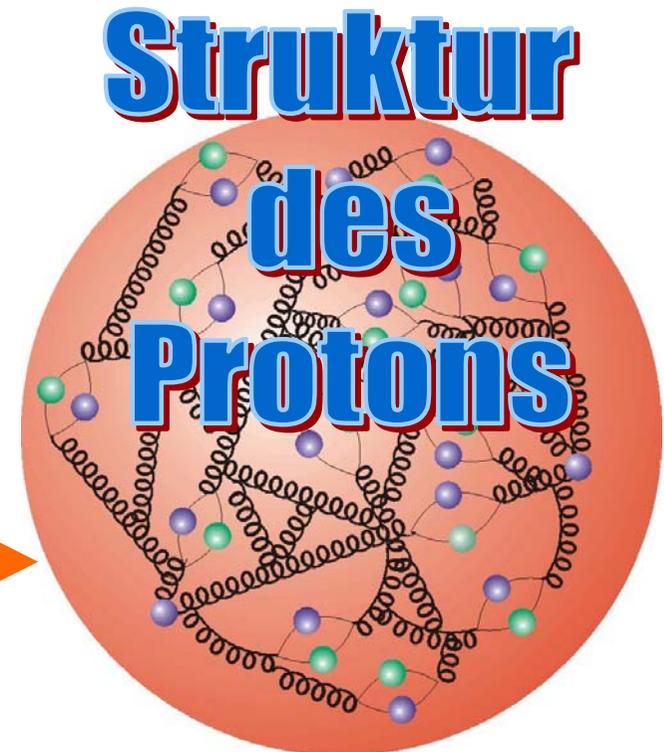
Es gibt eine Neutrinosorte für jedes geladene Lepton

Masse und Struktur des Protons

- $E \sim \text{MeV}$
sehe Proton als Ganzes
- statisches Quarkmodell,
Valenzquarks
($m \sim 350 \text{ MeV}$)
- $E \sim m_p \sim 1 \text{ GeV}$
sehe Valenzquarks
und ihre Bewegung
- $E \gg 1 \text{ GeV}$
Quark- und Gluon-"See"
wird sichtbar

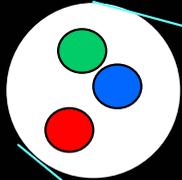
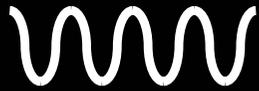


Jerome I. Friedman Henry W. Kendall Richard E. Taylor
(Nobel 1990)

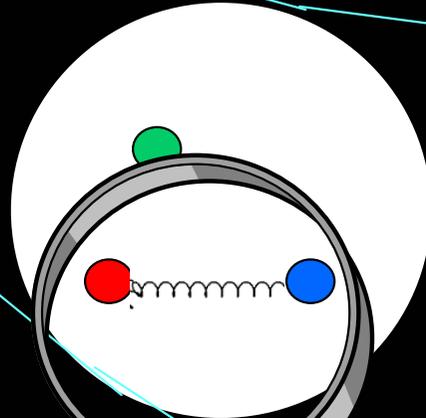
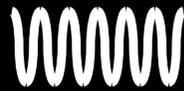


Im Proton

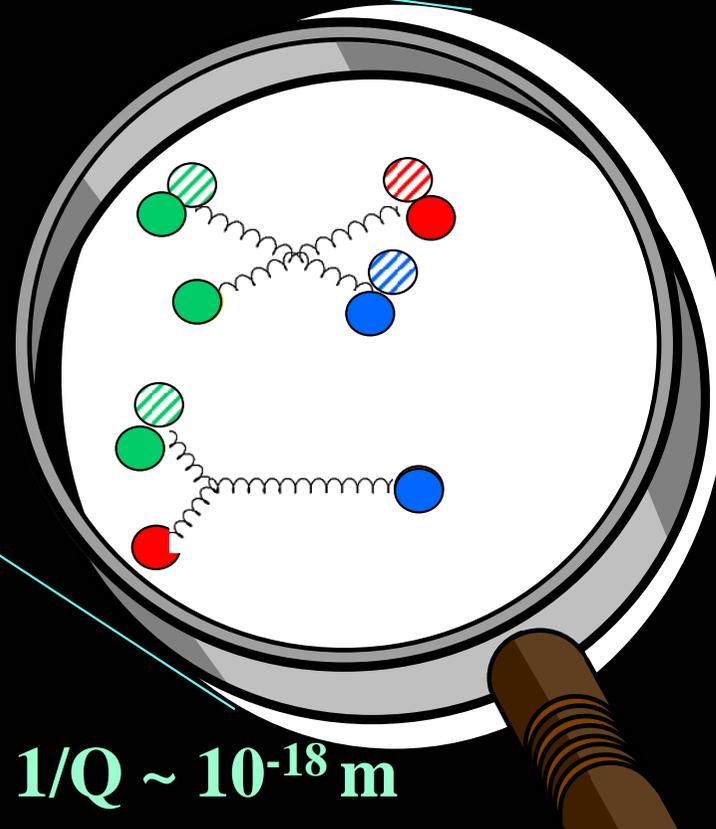
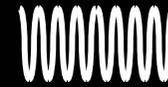
kleines Q^2 (λ gross)



mittleres Q^2 (mittleres λ)



grosses Q^2 (λ klein)



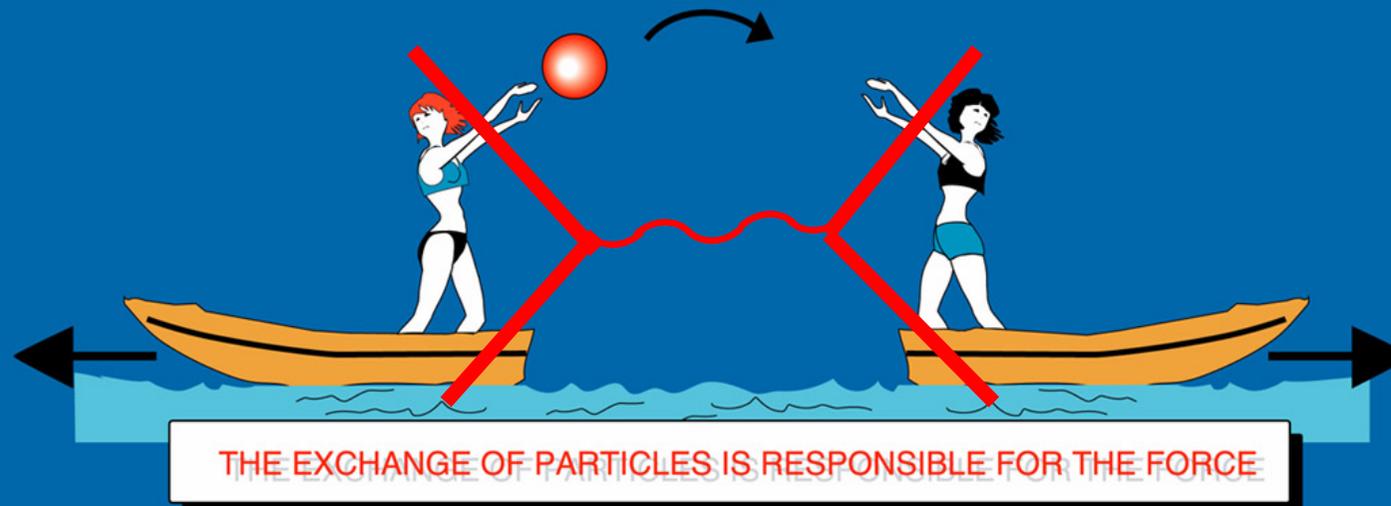
Heisenberg'sche Unschärferelation erlaubt Erzeugung von Gluonen und $q\bar{q}$ -Paaren für kurze Zeit.

Bei immer größerer Auflösung emittieren die quarks Gluonen, die wieder Gluonen emittieren, die Quarks emittieren, die

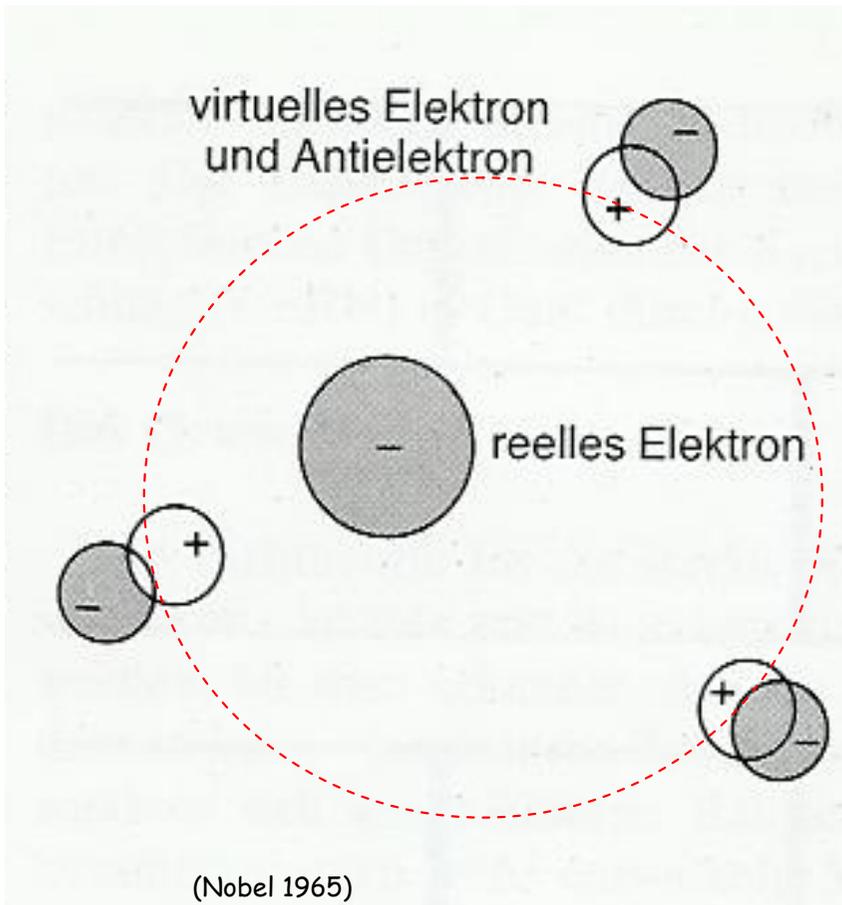
bei höchstem Q^2 , $\lambda \sim 1/Q \sim 10^{-18}$ m

Die vier Grundkräfte

TYPE	at $\sim 1 \text{ GeV}$ INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES



Screening of Electric Charge and Mass

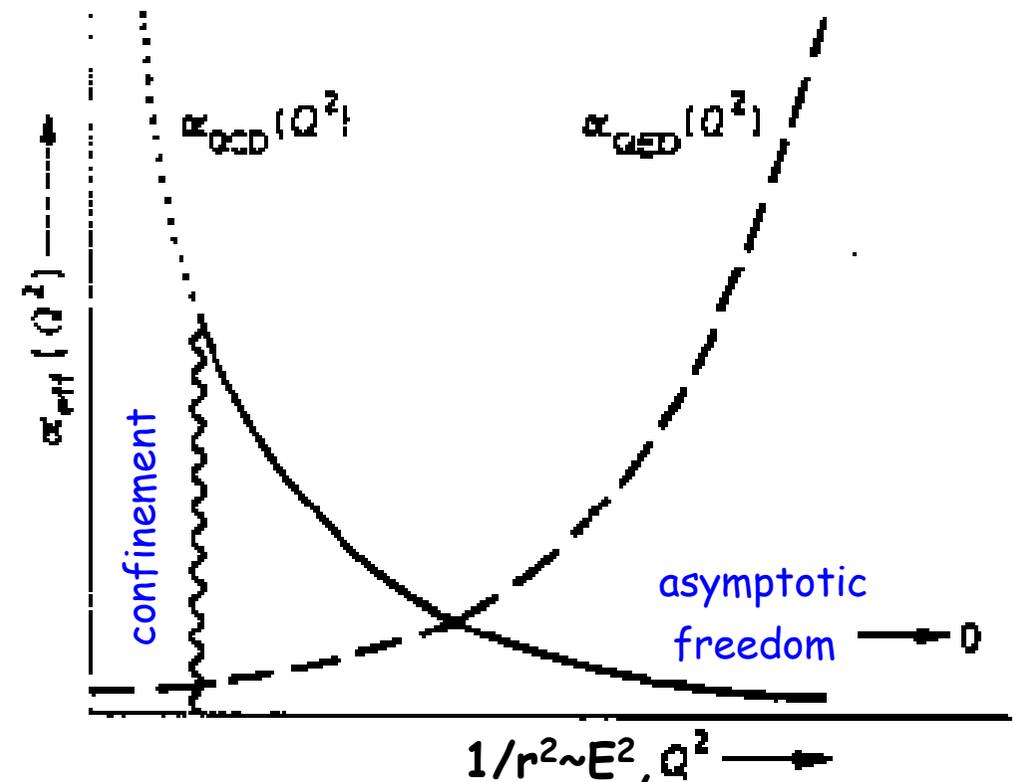
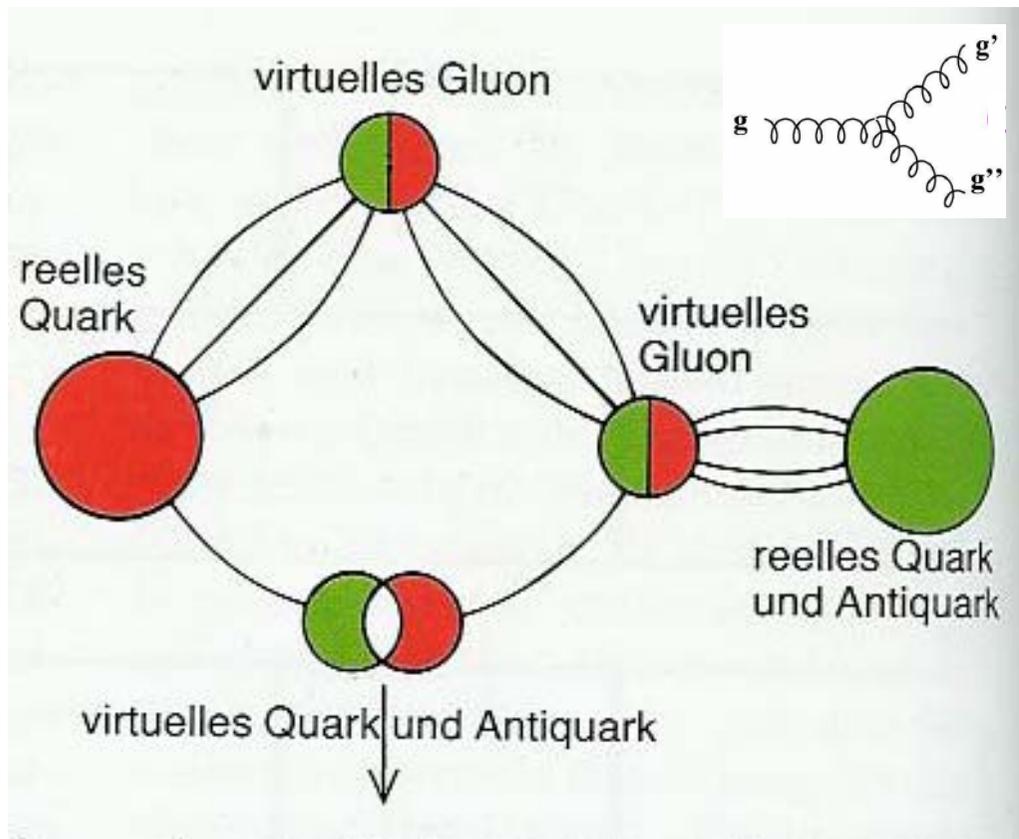


17.4.09
Sin-Itoro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman

- electric charge polarises vacuum \rightarrow virtual electron positron pairs
- virtual pairs partially screen electron charge **and mass**
- effective charge/force/mass
 - decreases at large distances/low energy (screening)
 - increases at small distance/large energy

Anti-Screening of Colour Charge/Mass!

- quark-antiquark pairs \rightarrow screening
- gluons carry colour \rightarrow gg pairs \rightarrow anti-screening!



The power of symmetries: Parity

Parity = Mirror Symmetry



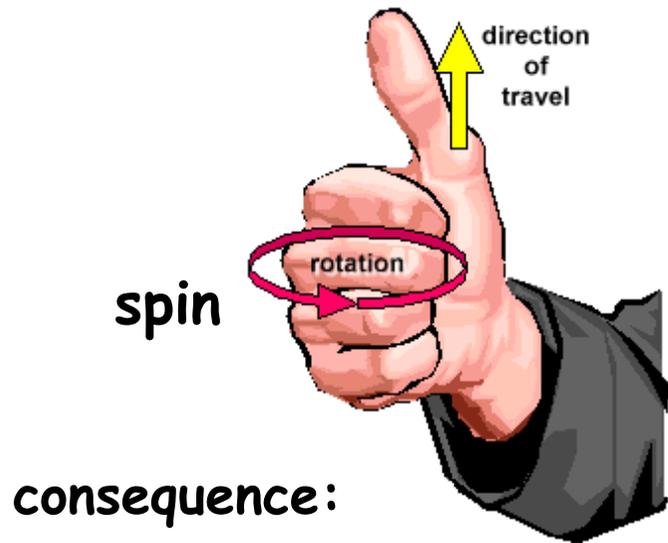
- Will physical processes look the same when viewed through a mirror?
- In everyday day life:
violation of parity symmetry is common
 - „natural“: our heart is on the left
 - „spontaneous“: cars drive on the right
(on the continent)
- What about basic interactions?
- Electromagnetic and strong interactions conserve parity!



Eugene
Wigner
(Nobel 1963)

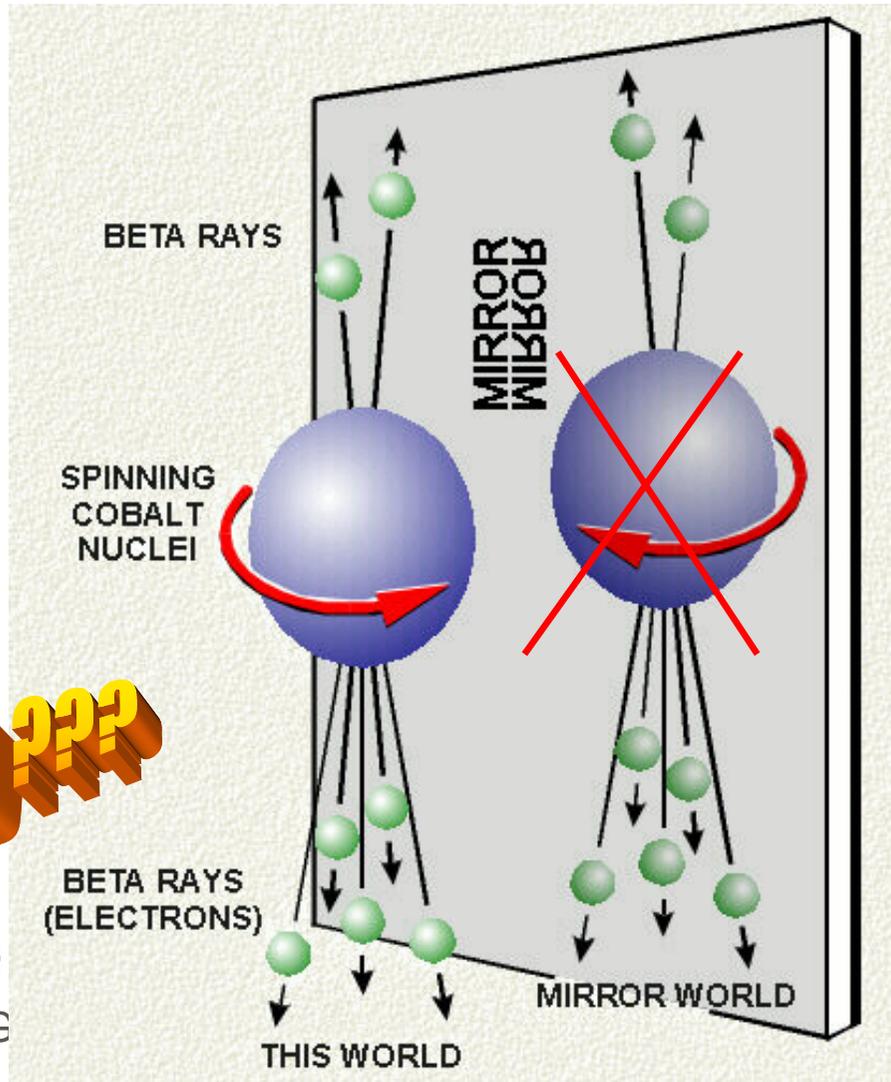
The power of symmetries: Parity

Lee & Yang 1956: **weak interactions violate Parity**
experimentally verified by Wu et al. 1957:



consequence:
**neutrinos are
always
lefthanded !**
(antineutrinos righthanded)

Why???



Chen
Ning
Yang

(Nobel
1957)

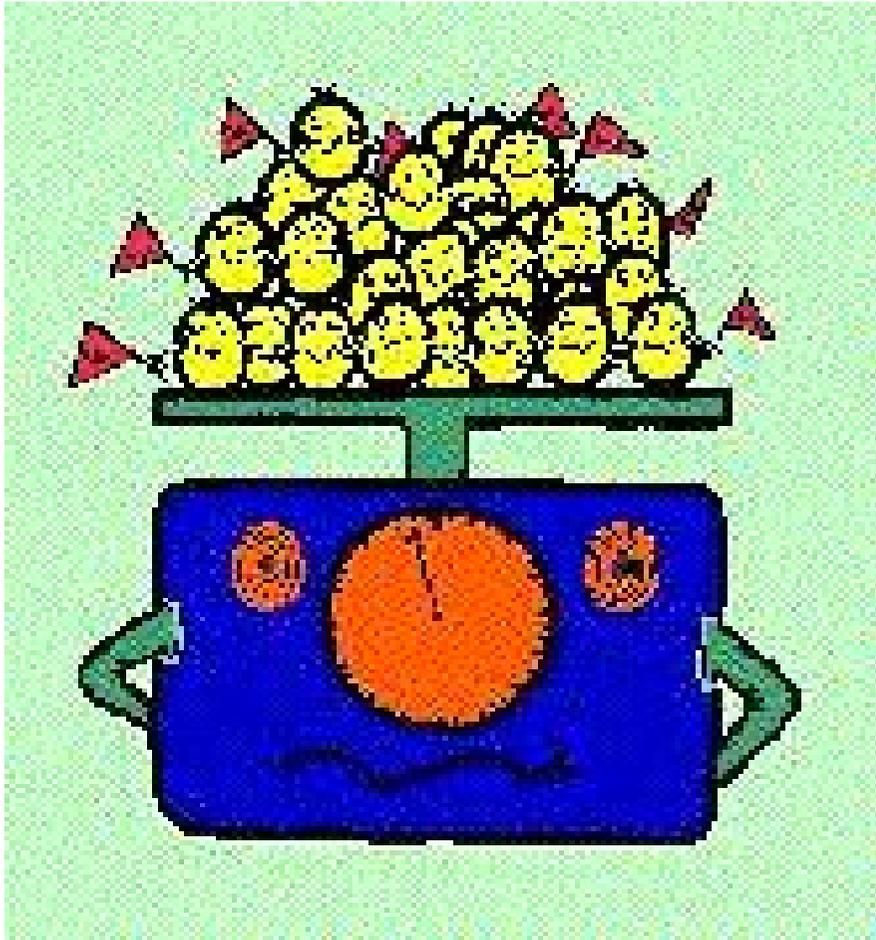


Tsung
-Dao
Lee



Chieng
Shiung
Wu

How much do Neutrinos weigh?



Standard Model has $m_\nu = 0$

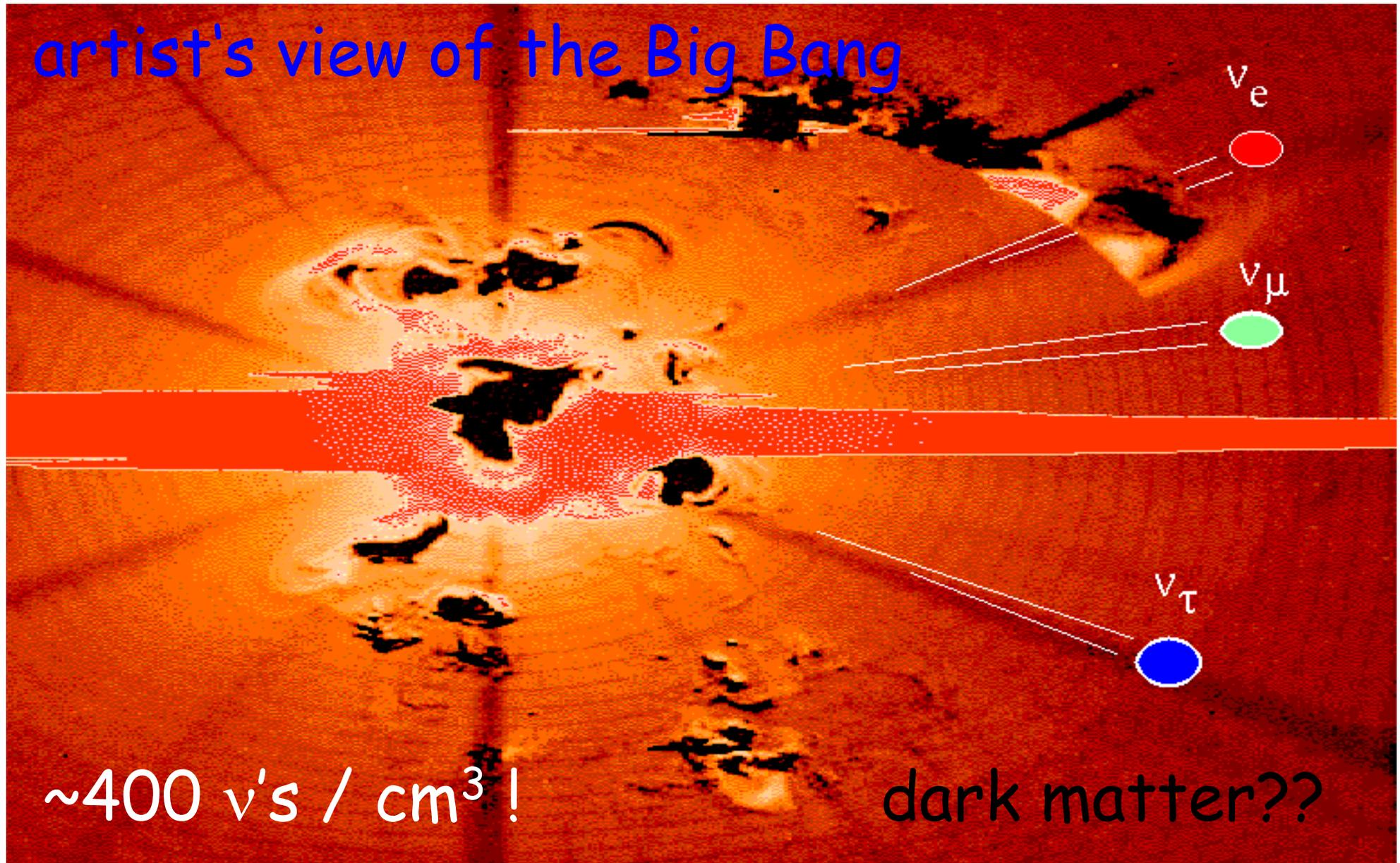
-> evidence for $m_\nu \neq 0$

+ parity violation forces

**extension of
Standard Model**

nothing? or almost nothing?

Neutrinos in Cosmology



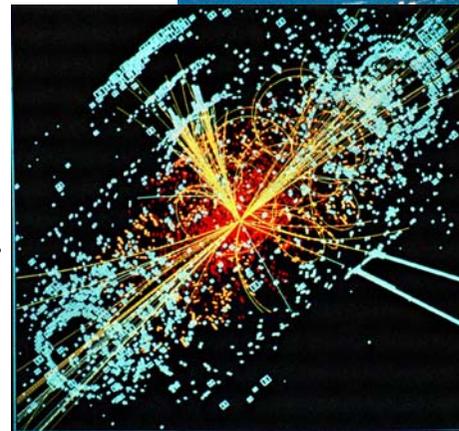
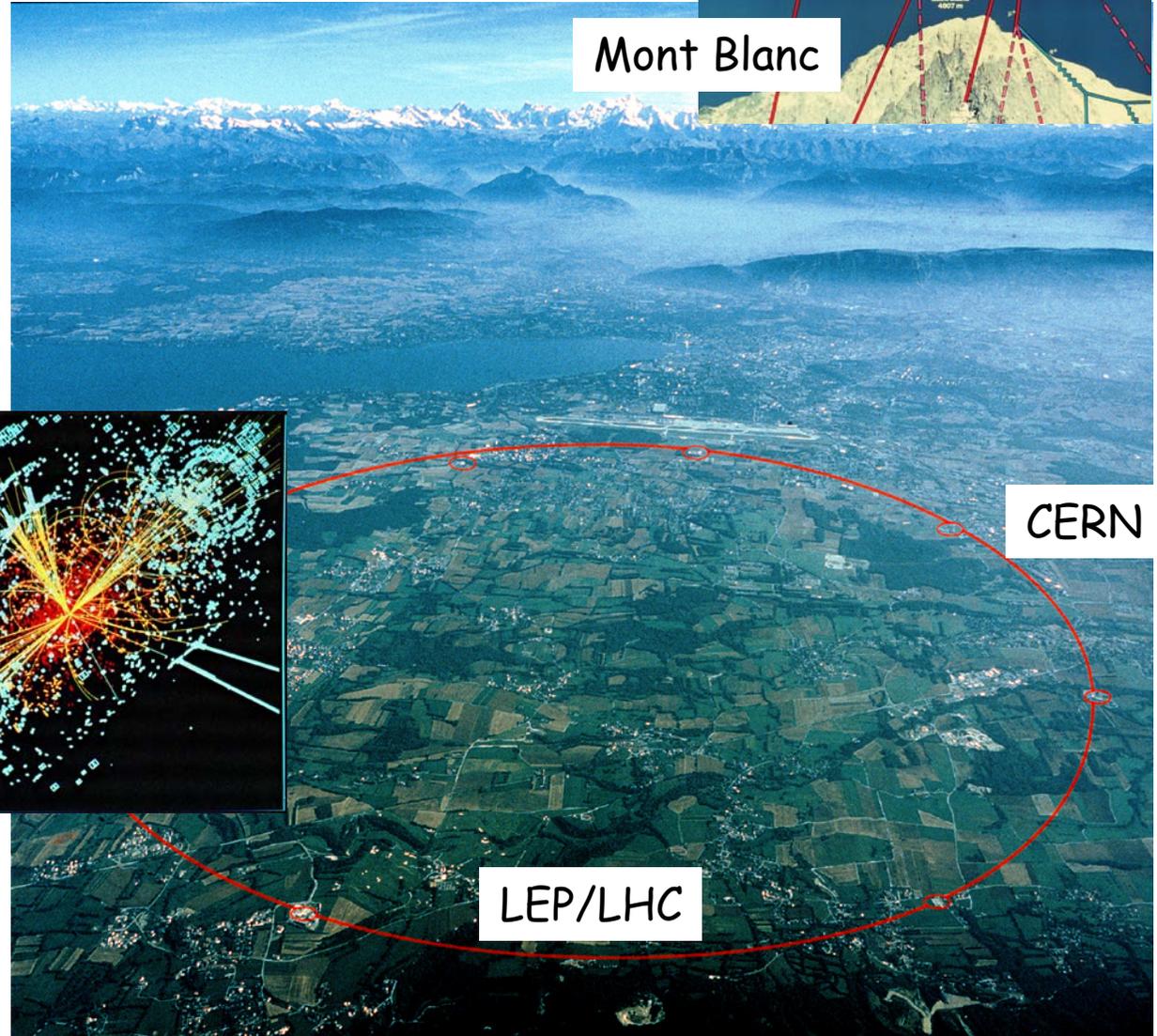
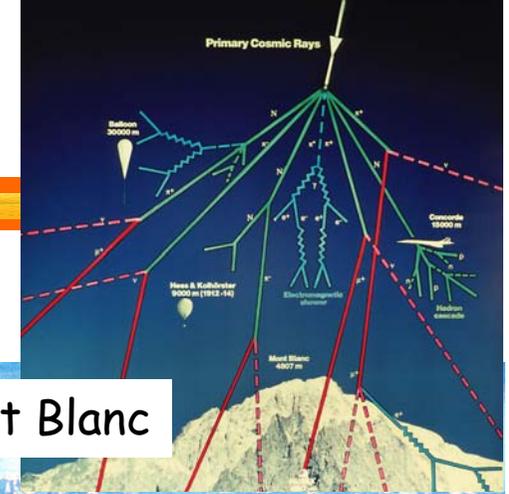
Why do we need colliders?

- early discoveries in cosmic rays, but
- need controlled conditions

- $$m = \frac{E}{c^2}$$

need high energy to discover new heavy particles

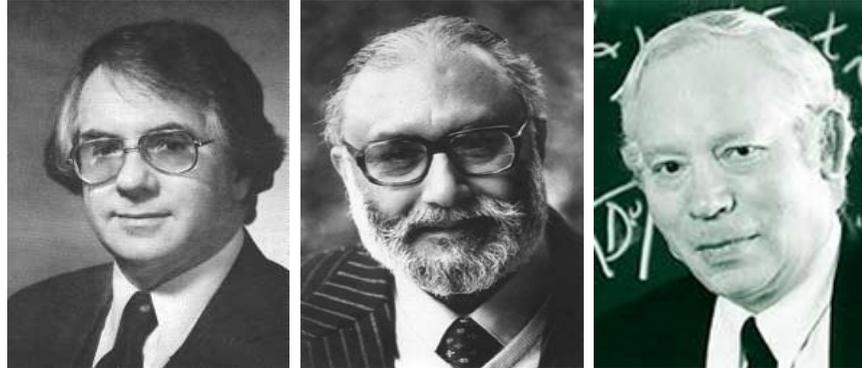
- colliders = microscopes



Weak Interactions

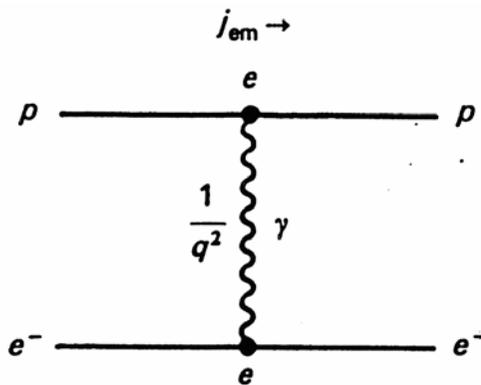
The Theory of GLASHOW, SALAM and WEINBERG

~ 1959-1968

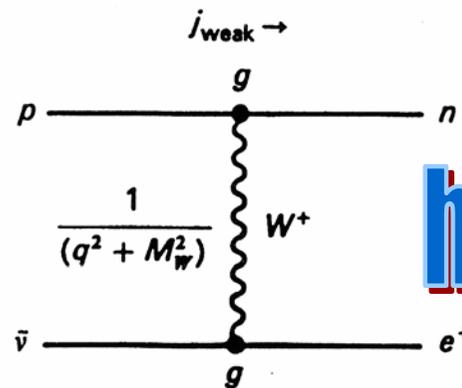


(Nobel 1979)

Theory of the unified weak and electromagnetic interaction, transmitted by exchange of "intermediate vector bosons"

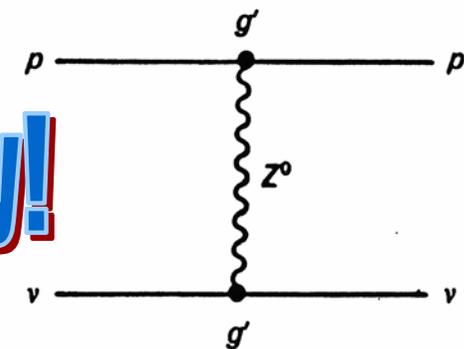


(a) Electromagnetic scattering



(b) Weak scattering (charged current)

heavy!



(c) Weak scattering (neutral current)

Discovery of the W and Z (1983)

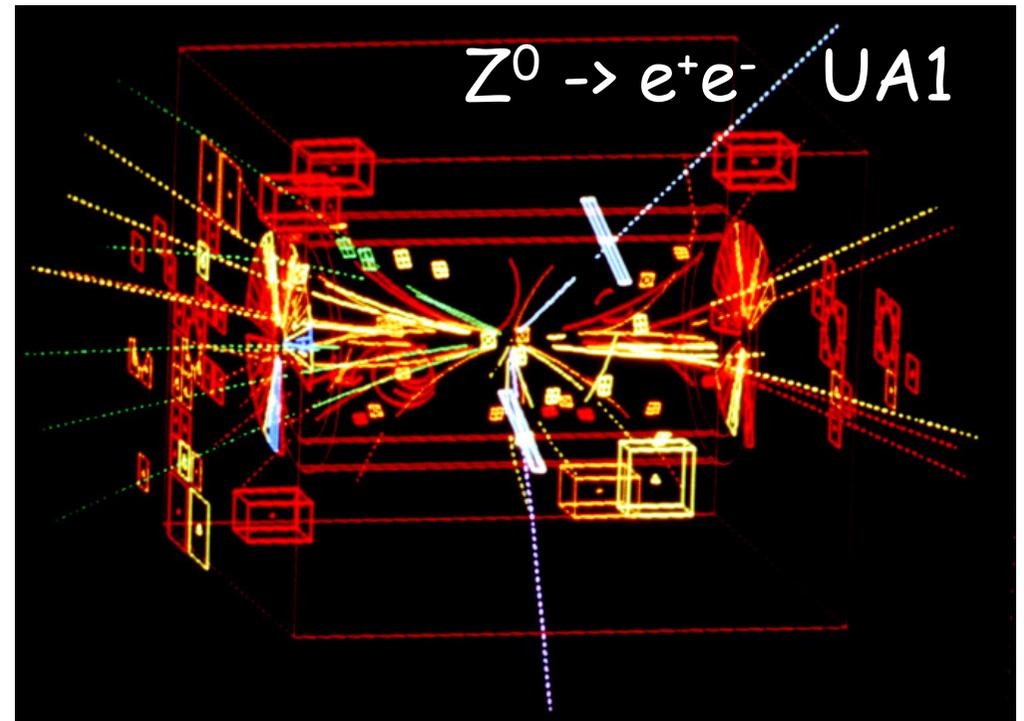
- To produce the heavy W and Z bosons ($m \sim 80\text{-}90 \text{ GeV}$) need high energy collider!
- 1978-80: conversion of SPS proton accelerator at CERN into proton-antiproton collider
challenge: make antiproton beam!
- success!
-> first W and Z produced
1982/83

(Nobel 1984)

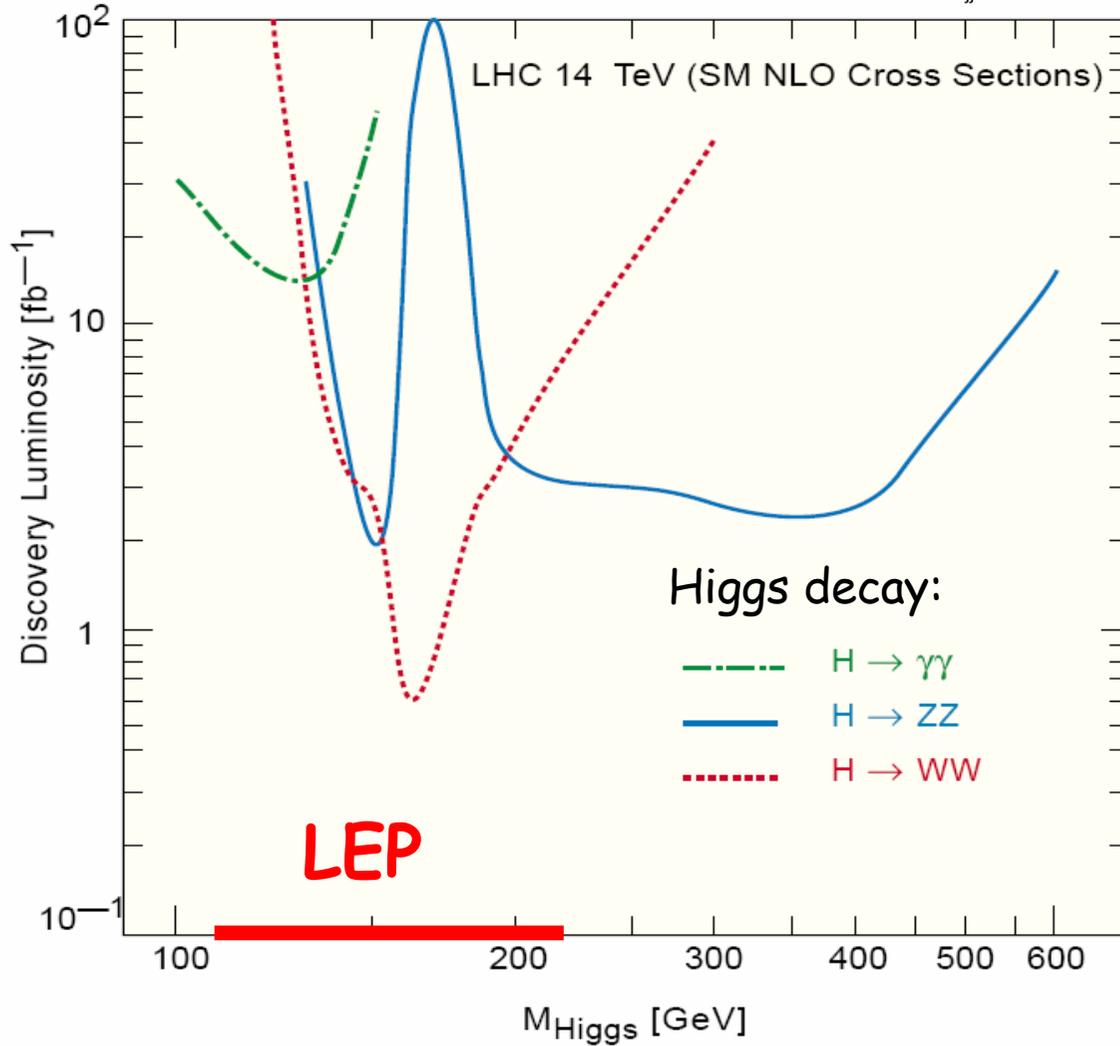
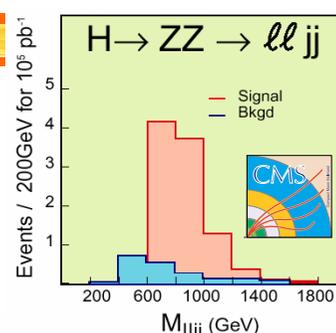
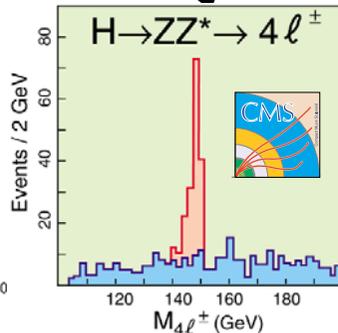
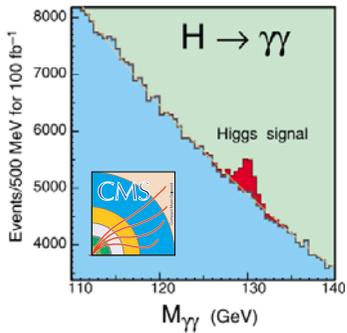
Carlo
Rubbia



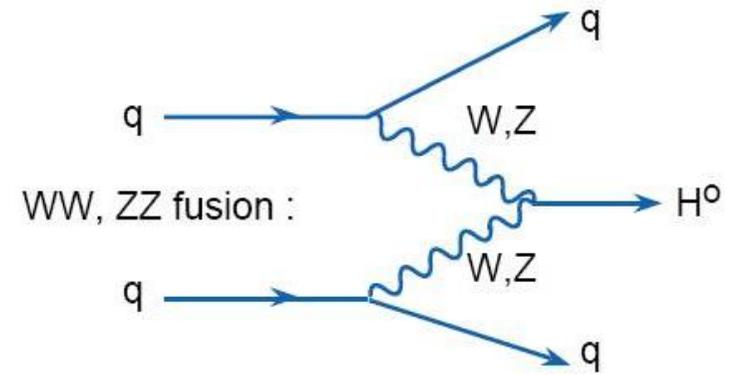
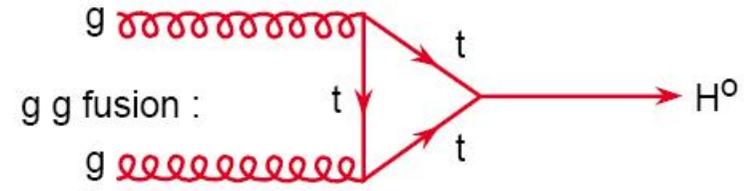
Simon
van der
Meer



The Quest for the Higgs at LHC



Higgs production:

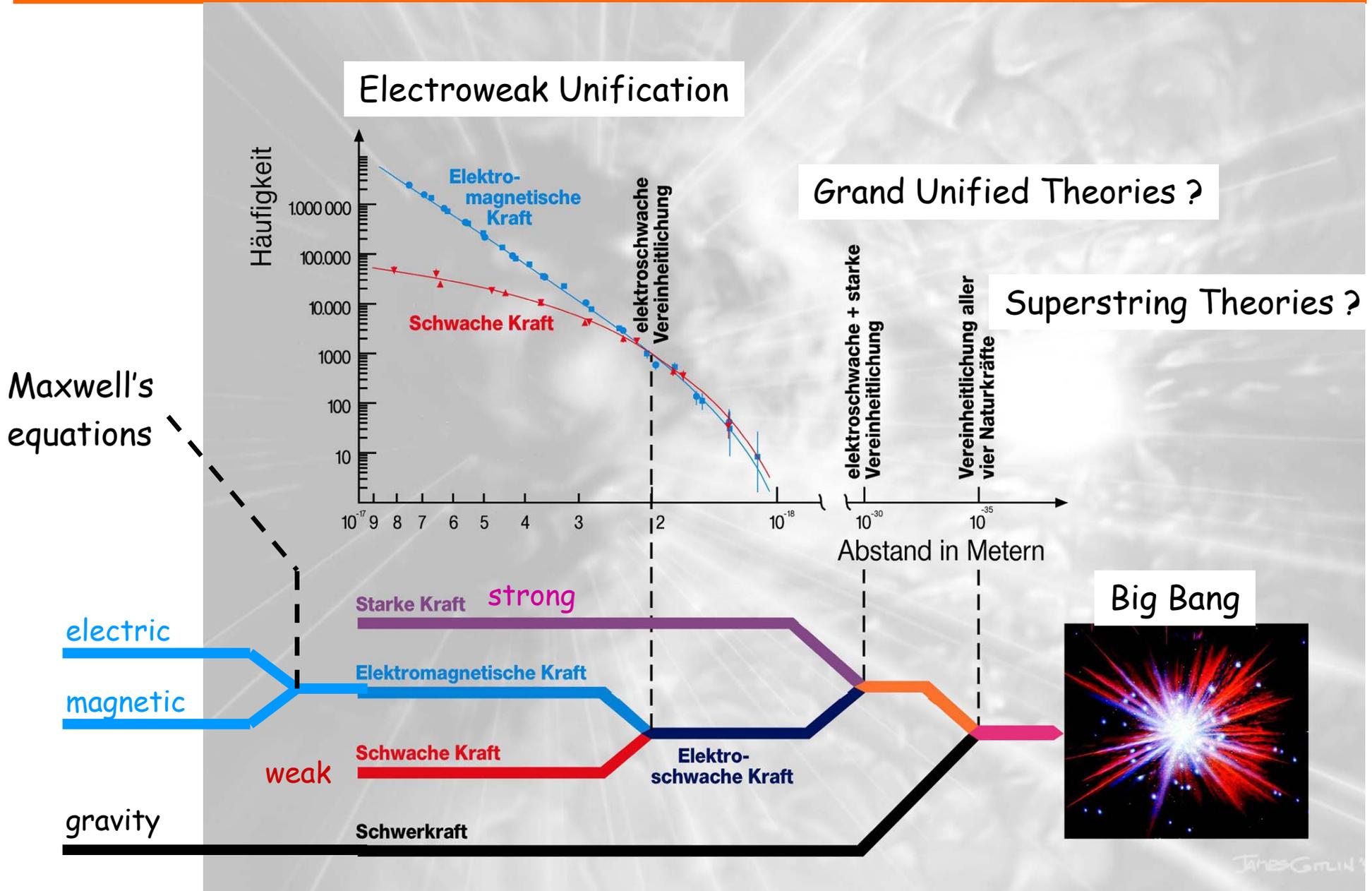


Higgs decay:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow ZZ$
- $H \rightarrow WW$

depending on mass,
Higgs might be found
within first year of
LHC physics operation!

The Quest for Unification of Forces



Cosmology

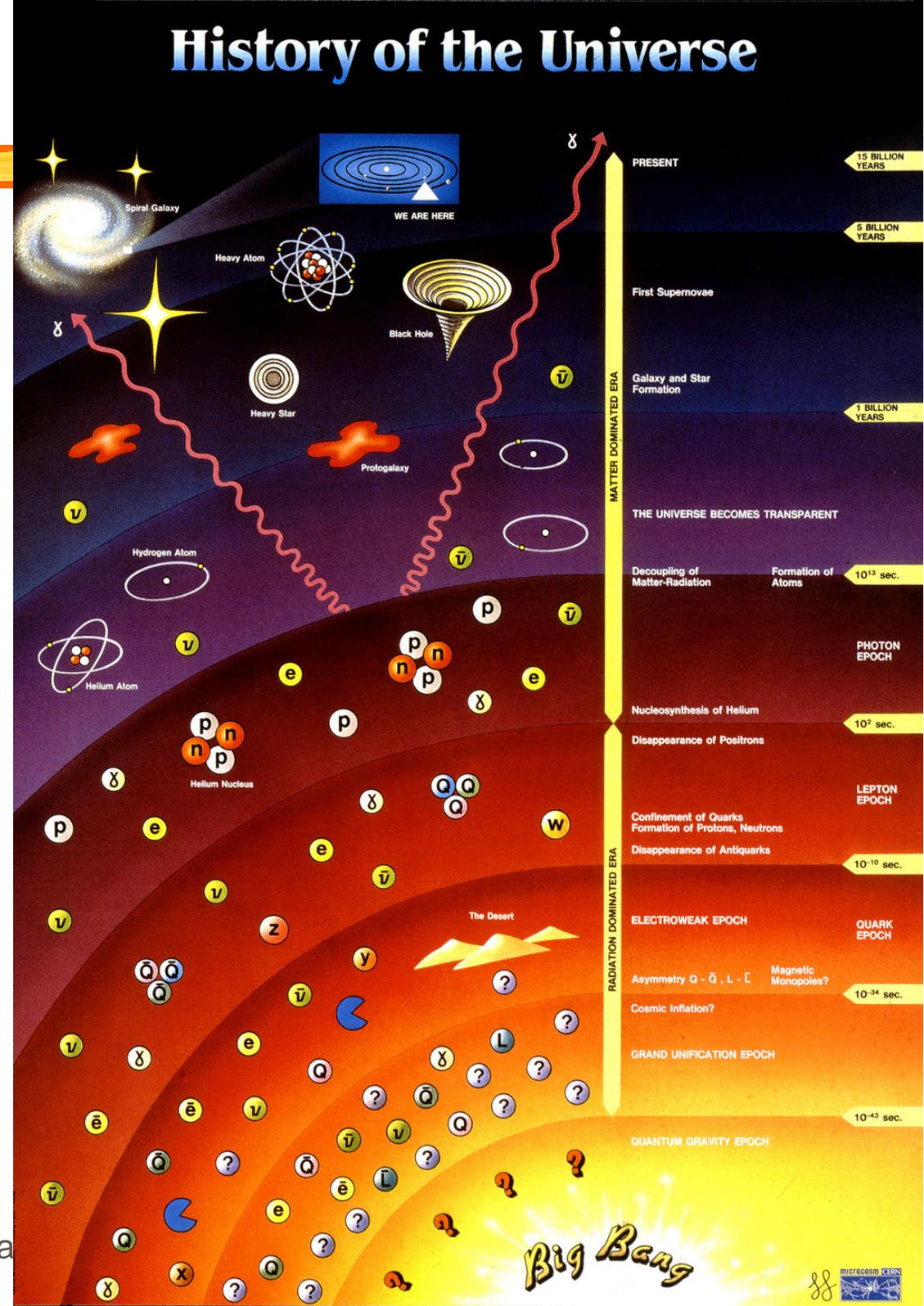
Direct link between Particle Physics and Cosmology

increasing energy

-> going further backwards in time in the universe

-> getting closer to the **Big Bang**

What do we know about the "Mass of the Universe"?



1. Vorlesung

0. Einführung

1. Masse in der klassischen Mechanik

Literatur: beliebiges Lehrbuch klassische Mechanik
z.B. Leisi, Klassische Physik, Band I

- Masse in der nichtrelativistischen Mechanik
 - Newtonsche Gesetze
 - Träge Masse, schwere Masse, Massenerhaltung

- Masse in der relativistischen Mechanik
 - Äquivalenz von Masse und Energie
 - Aufgabe: Masse eines zusammengesetzten Körpers

Was ist schwere Masse?

- Intuitiv klar: Maß für den Kraftaufwand, der nötig ist, um der Erdbeschleunigung entgegenzuwirken
- $\vec{F} = -m \times \vec{g}$ (3. Newtonsches Gesetz: Actio = Reactio)



Was ist träge Masse?

- Intuitiv klar: Maß für den „Widerstand“ (Trägheit), der einer Beschleunigung entgegenwirkt
- 2. Newtonsches Gesetz: $\vec{F} = m \times \vec{a}$



kleine Masse

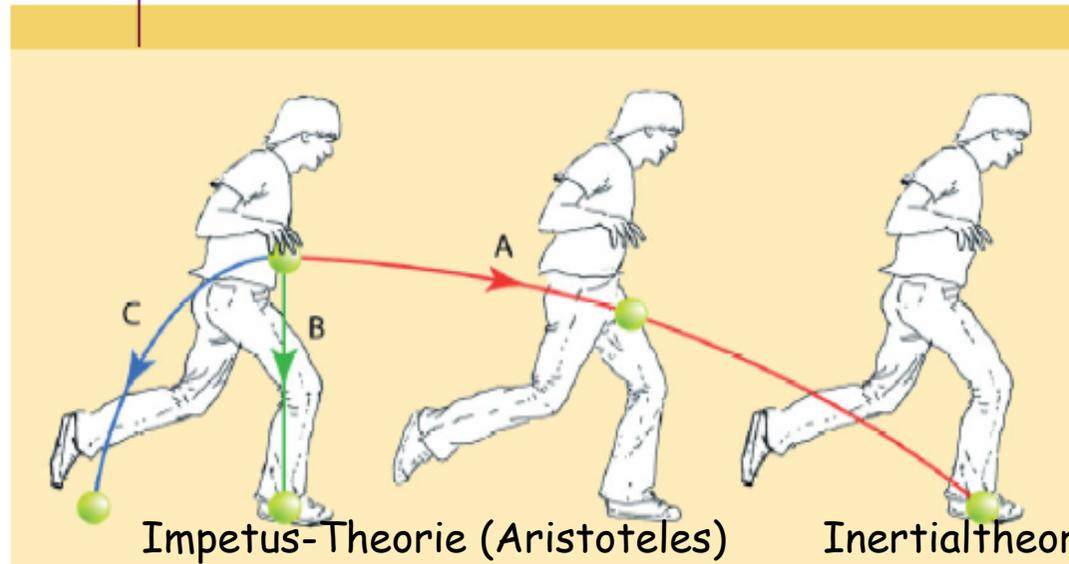


große Masse

Vielleicht doch nicht so intuitiv?

- Frage an Studenten: (nicht Physik)
Was ist richtig: A, B, oder C?

ABB. 5 | INTUITIVE PHYSIK



Impetus-Theorie (Aristoteles)

Inertialtheorie (Galilei, Gassendi)

Frage zur intuitiven Physik: Die Mehrzahl befragter Studenten nimmt nach dem Loslassen Wege (C) oder (B) an (Grafik: R. Wengenmayr).

252 | Phys. Unserer Zeit | 5/2007 (38)

www.phiu.de

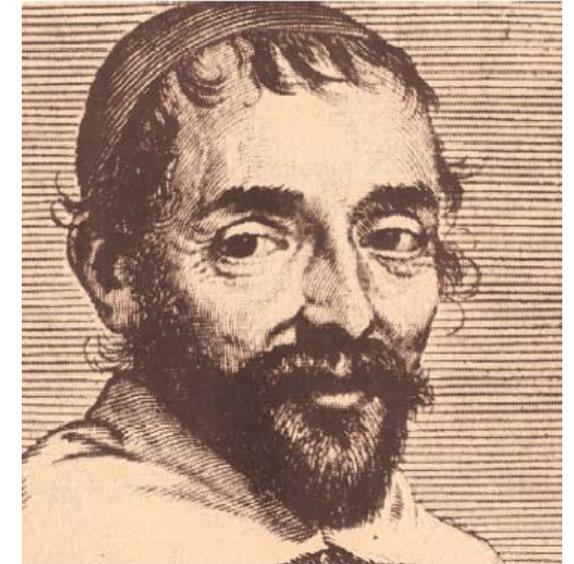
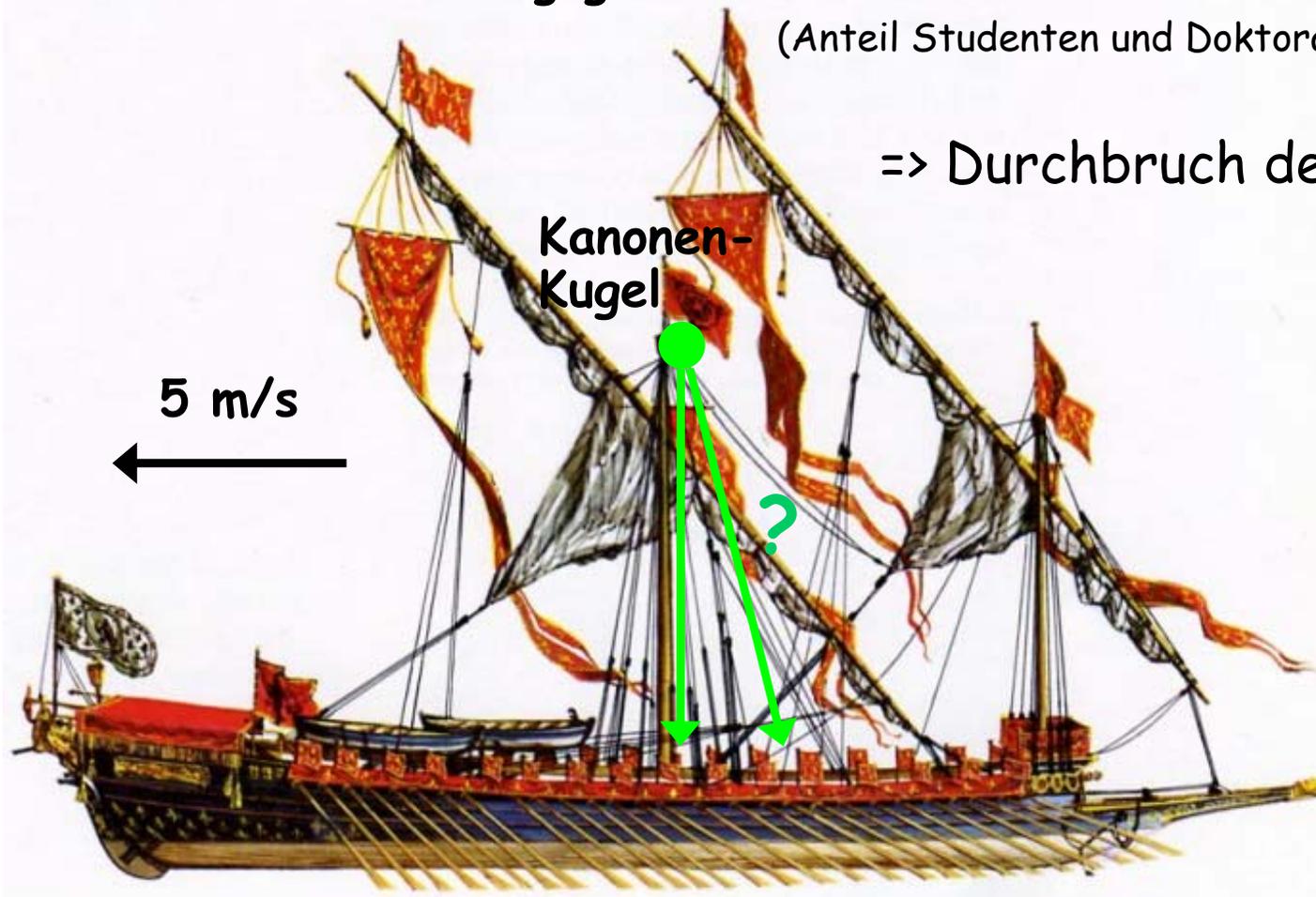
Mehrzahl sagt B oder C!

Gassendi-Experiment 1640

erstes Großexperiment der Geschichte:

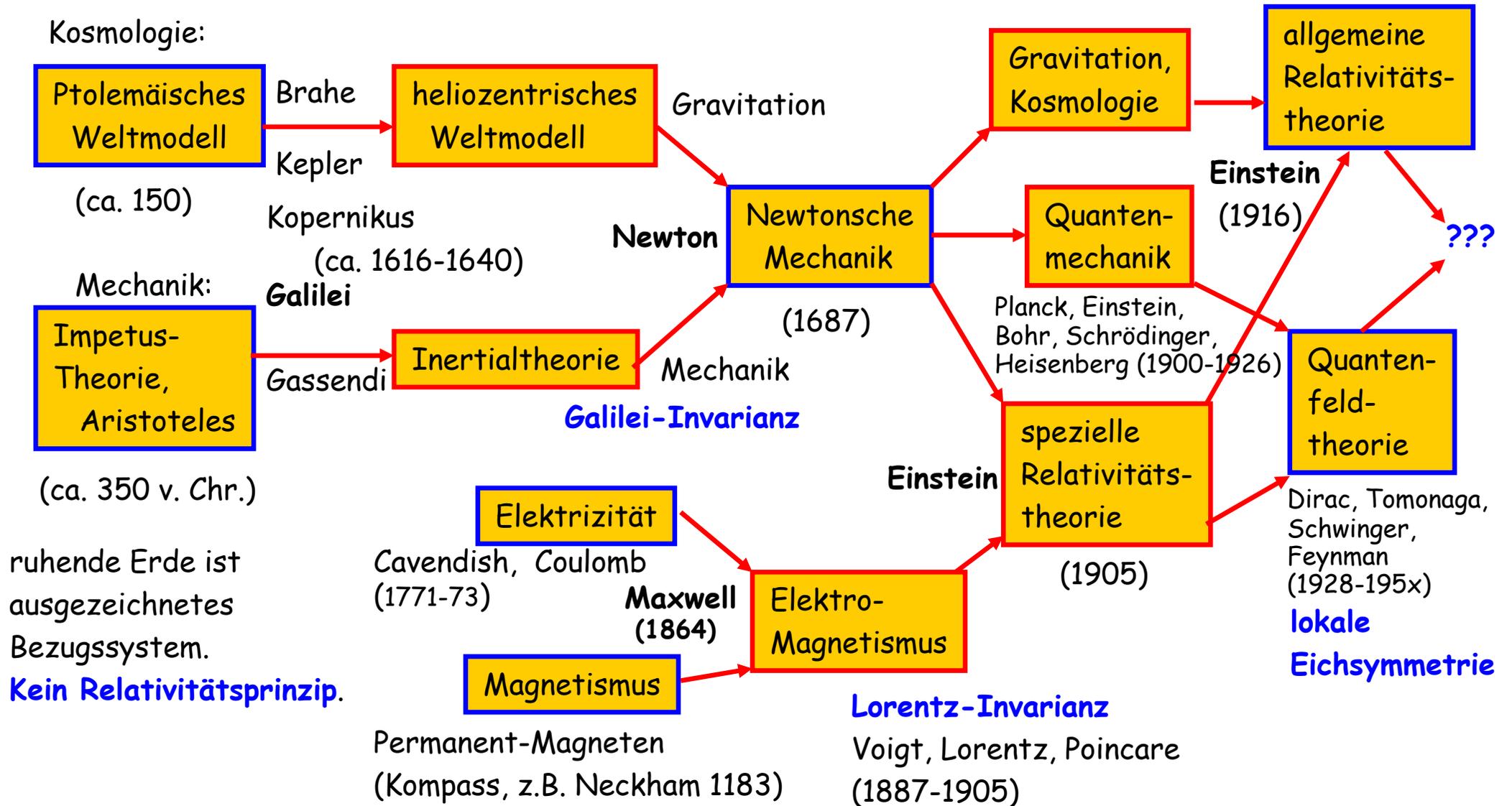
- Vorschlag von Galilei 1632 in "Dialog über die Weltsysteme"
- Umsetzung von Pierre Gassendi 1640 als internationales Großexperiment:
Französische Kriegsgaleere mit ca. 100 Mann internationaler Besatzung
(Anteil Studenten und Doktoranden nicht überliefert ☺)

=> Durchbruch der Inertialtheorie



Pierre Gassendi (1592 – 1655).

Raum-Zeit-Symmetrien und die Vereinheitlichung der Kräfte



Träge Masse = schwere Masse?

- Ja!
- **Äquivalenzprinzip:** Die schwere Masse eines beliebigen Körpers ist proportional zu seiner trägen Masse

- Konvention seit Newton (1687):

Setze Proportionalitätsfaktor = 1

(„Vereinheitlichung“ von schwerer und träger Masse)

intuitiv nicht selbstverständlich: Amerikaner bezeichnen noch heute Höhen in Fuß und Abstände in Meilen/Yards



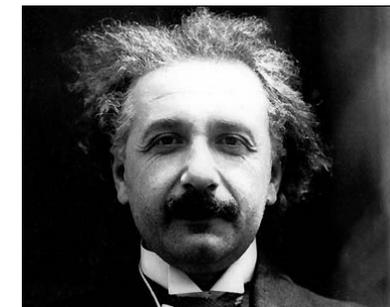
Isaac
Newton

- Konsequente Weiterverfolgung des Prinzips
=> **Allgemeine Relativitätstheorie** (Einstein 1915)
=> **siehe Vorlesung W. Buchmüller**

In dieser Vorlesung nicht weiter behandelt.

ab jetzt: **keine Unterscheidung zwischen träger und schwerer Masse**

Problem wird am Ende der Vorlesung noch einmal aufgegriffen!



Albert
Einstein

Massenerhaltung?

- Klassische Newtonsche Mechanik: **Massenerhaltung!**
Summe aller Massen vor und nach einer Reaktion ist gleich

z.B. 1. chemisches Grundgesetz (Lavoisier 1758)



Antoine
Lavoisier

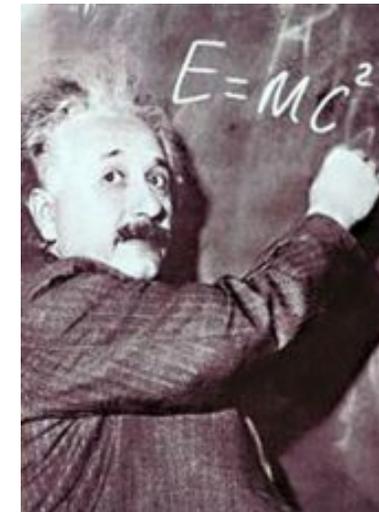
- Spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905):
Unterscheide bewegte Masse m und Ruhemasse m_0
bewegte Masse ist proportional zur Energie,
berühmte **Einstein-Gleichung: $E=mc^2$**

Konvention in der Teilchenphysik:

Setze Proportionalitätsfaktor $c=1$

(„Vereinheitlichung“ von Raum und Zeit)

intuitiv auch heute nicht selbstverständlich: Unterscheidung von Meter und Sekunde immer noch Standard (außer in Teilen der Teilchenphysik)!



Albert
Einstein

- **Ruhemasse m_0 , „Betrag“ eines Vierervektors, ist NICHT erhalten!**

Masse in der speziellen Relativitätstheorie

- Einstein-Gleichung: $E=mc^2$

Masse ist Energie, und Energie ist Masse!

ab jetzt: keine Notwendigkeit der Unterscheidung mehr zwischen Energie und bewegter Masse, Umdefinition:

=> der Terminus „Masse“ (m) bezeichnet ab jetzt die Ruhemasse m_0 eines Teilchens = Energie des Teilchens im Ruhesystem ($v=0$)

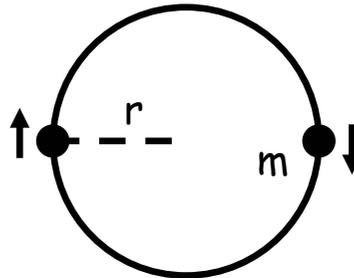
- Einige relevante Gleichungen mit der neuen Definition:

$$E = \gamma m c^2, \quad \vec{p} = \gamma m \vec{v}, \quad \vec{v} = \vec{p}/E, \quad \gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$$

- Vertrautheit mit Vierervektoren, Lorentztransformationen etc. wird im Folgenden vorausgesetzt (hier keine Wiederholung).
Falls „eingerostet“: bitte nacharbeiten (beliebiges Lehrbuch)

Aufgabe 1: Masse eines zusammengesetzten mechanischen Systems

Betrachten Sie ein System von zwei gleichartigen punktförmigen Körpern der Ruhemasse m , die von einer gegenseitigen Anziehungskraft auf einer Kreisbahn mit Radius r gehalten werden.



- Wie groß ist die Ruhemasse M des Gesamtsystems als Funktion der Winkelgeschwindigkeit ω ? Betrachten Sie sowohl den relativistischen Fall als auch den nichtrelativistischen Grenzfall.
- Untersuchen Sie den ultrarelativistischen Grenzfall ($v \rightarrow c$), wobei die Gesamtmasse M endlich bleiben soll.

Was muss dann für die Masse m gelten?

Wie groß sind Winkelgeschwindigkeit und Gesamtdrehimpuls als Funktion von M ?

Ist ein solches System in der Praxis realisierbar?

- Betrachten Sie stattdessen ein System von zwei nichtwechselwirkenden Photonen der Energie E_γ , Gesamtimpuls 0 und Bahndrehimpuls $1\hbar$.

Verifizieren Sie, dass sich dieses System unter Lorentz-Transformationen verhält wie ein Objekt der Masse $M=2E_\gamma$.

- Versuchen Sie, eine Relation zwischen den Fällen b. und c. herzustellen. Wie groß wäre der äquivalente „Radius“?