

FAKULTÄT FÜR PHYSIK  
PHYSIK AM SAMSTAG

**RELATIVITÄT und QUANTEN**

*Konzepte der Teilchenphysik*

J. H. KÜHN

<http://www-ttp.physik.uni-karlsruhe.de/Slides>

# PHYSIK

Reduktion der Beobachtungen auf einfache Naturgesetze

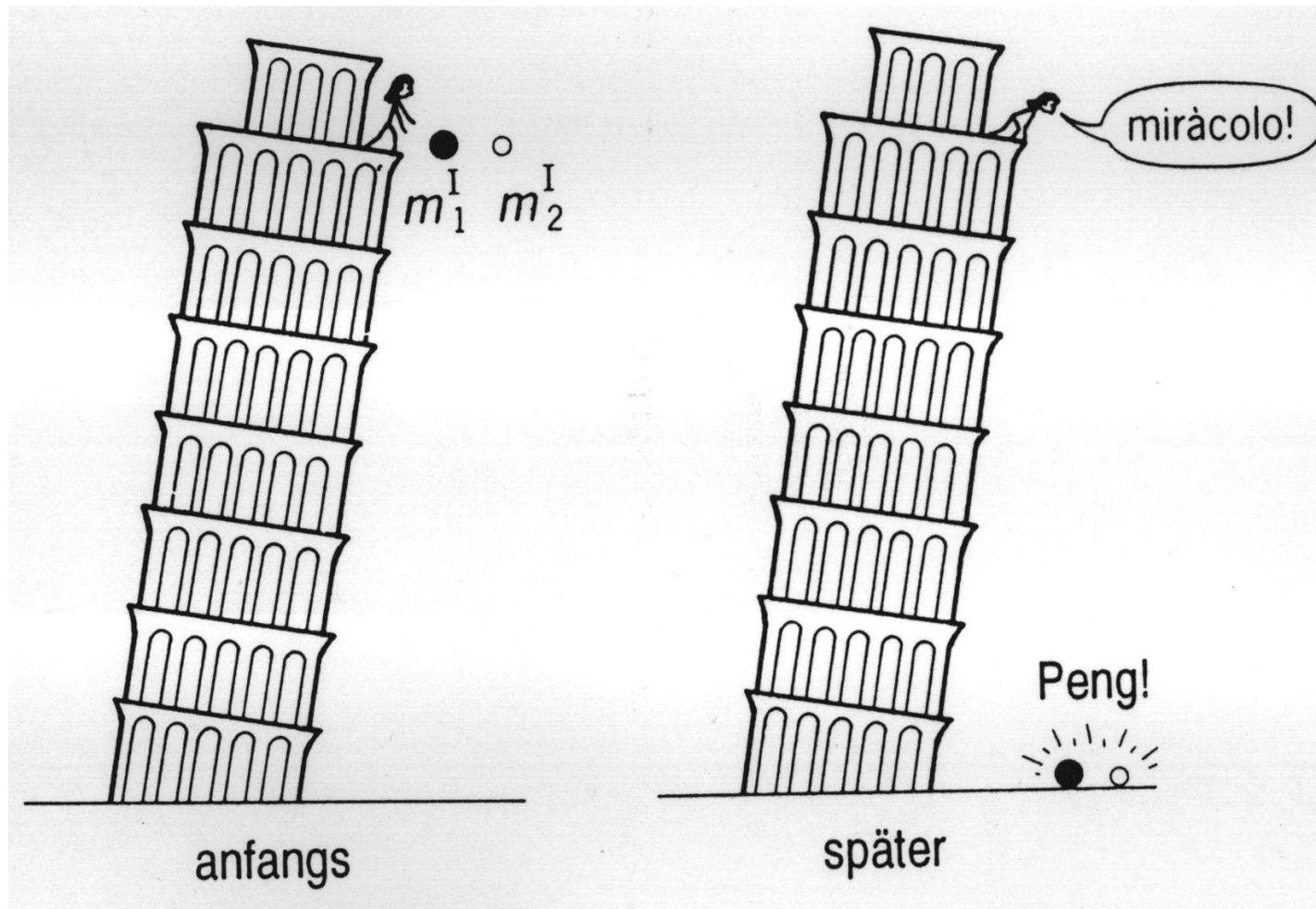
wenige, fundamentale Prinzipien

z.B. Relativitätsprinzip:

Naturgesetze haben die gleiche Form für gleichförmig bewegte Beobachter  
Elektrodynamik  $\implies$  spezielle Relativitätstheorie

z.B. Symmetrie-Prinzipien

# mathematische Formulierung, universelle Gültigkeit



Galilei'sches Fallgesetz:

$$h = \frac{1}{2} g t^2$$

(h: Höhe, g: Naturkonstante, t: Falldauer)

universelle Gültigkeit (Blei vs. Federn)

# Eleganz und Einfachheit

(subjektiv? vgl. Musik)

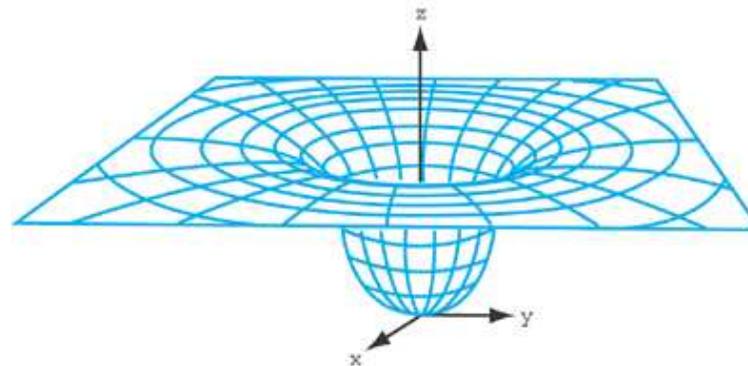
## Allgemeine Relativitätstheorie

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

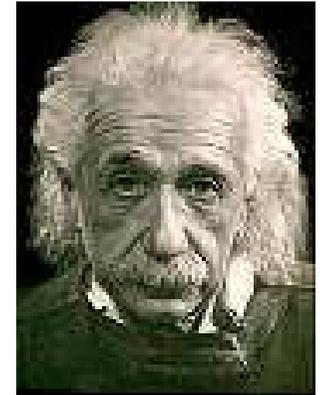
Krümmung des Raumes

Natur-  
konstanten

Materie  
(Dichte, Druck,...)



⇓ Gewicht

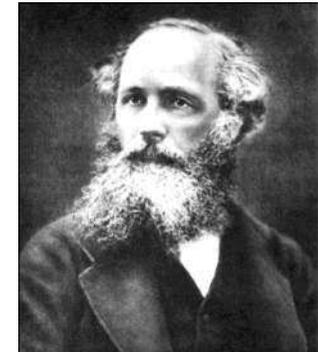


Einstein

# Elektrodynamik

$$\partial_{\mu} F^{\mu\nu} = j^{\nu}$$

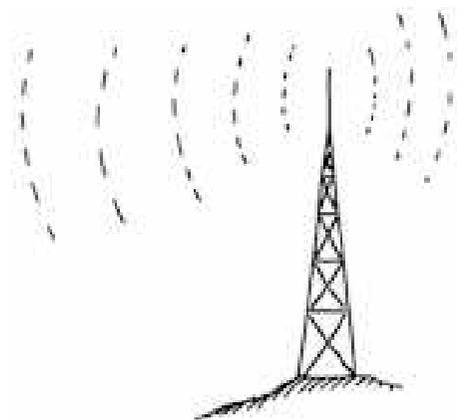
$$\partial_{\mu} \tilde{F}^{\mu\nu} = 0$$



Maxwell

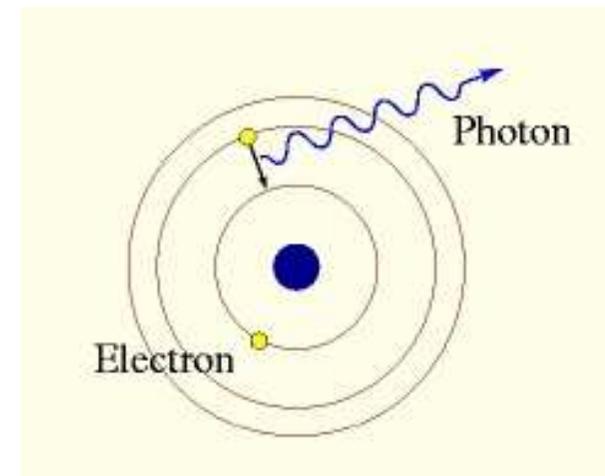
Felder                      Ladungen und Ströme

Wellen



Antenne (Ladungen und Ströme)

Atom



# Dirac-Gleichung

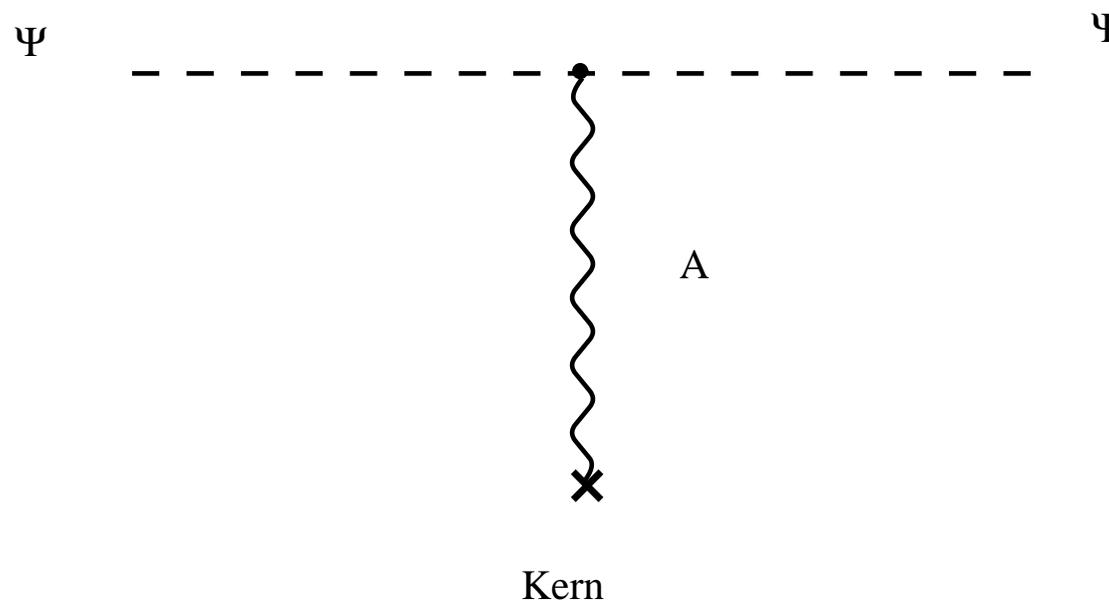
(relativistische Quantenfeldtheorie)

$$(i \not{\partial} - e \not{A}) \Psi = 0$$

e: Ladung, A: Photonfeld,  $\Psi$ : Elektronfeld



Dirac



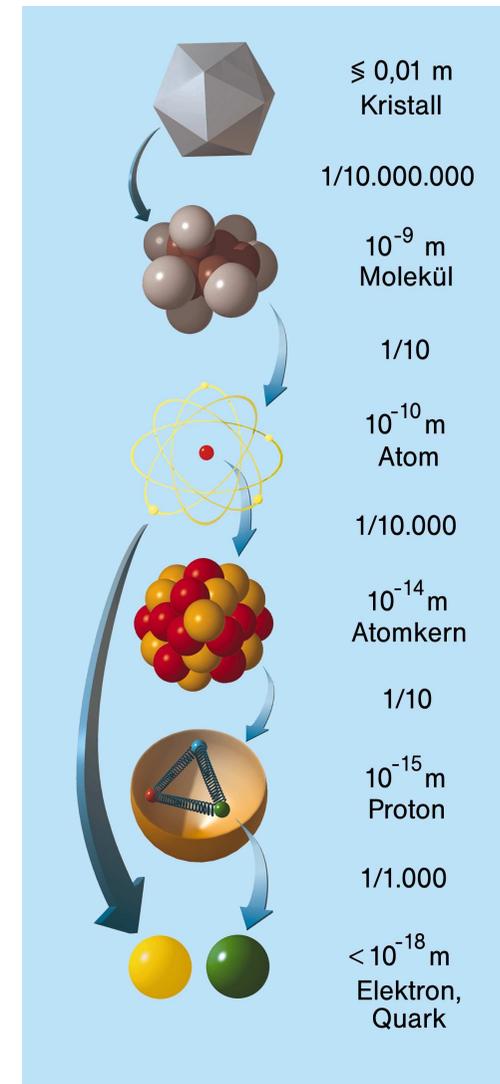
# Wenige Parameter (Naturkonstanten)

$$(\hbar, c, G; \quad e, m_p, m_n, \dots)$$

aber: Periodensystem der 92 (stabilen) Elemente

Kern  $\Rightarrow$  Proton + Neutron

Reduktion auf einfachere(?) Bausteine ?





# NEUE KONZEPTE ?



weit entfernt von der Anschauung !



tiefere Einsichten !  
experimentell verifizierbar !

## I Quanten

Unschärfe, Atome, Beschleuniger

## II Relativität

$E = m c^2$ ; Antiteilchen; Erzeugung und Vernichtung

## III Symmetrien und Wechselwirkungen

## IV Offene Fragen – Wilde Spekulationen

# I Quanten

## Strahlungsformel (1900)

Energie der Oszillatoren „gequantelt“

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

$\nu$ : Frequenz

$\omega$ : Kreisfrequenz

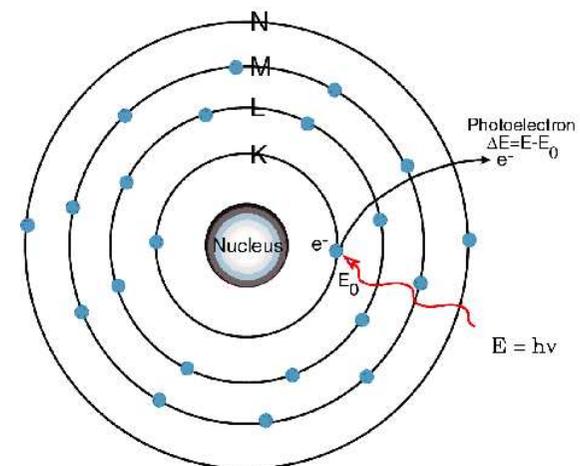


Planck

## Photoelektrischer Effekt (1905) Einstein

„Photon“ bei Stoß wie Teilchen

aber Ausbreitung wie Welle



## Quantisierungsbedingung (1913)

nur diskrete Energieniveaus

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}; \quad E_0 = 13.6 \text{ eV}$$

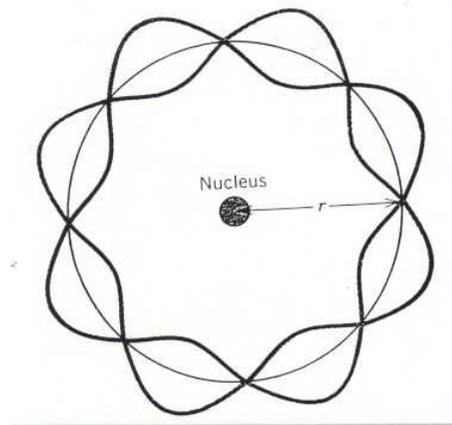
Photonen:  $E_\gamma = E_n - E_m$

nur diskrete Energien

Atome sind stabil; Spektren immer gleich

## Elektronen breiten sich aus wie Wellen (1924)

(Teilchen  $\Leftrightarrow$  Welle)



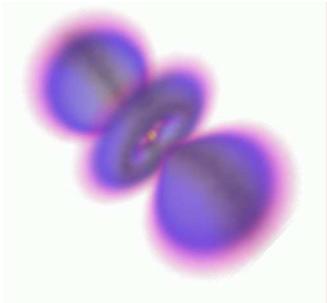
Bohr



de Broglie

# Schrödingergleichung (1925-1927)

Energieniveaus  $\hat{=}$  Schwingungszustände



Schrödinger



Heisenberg

# Heisenbergsche Unschärferelation (1927)

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

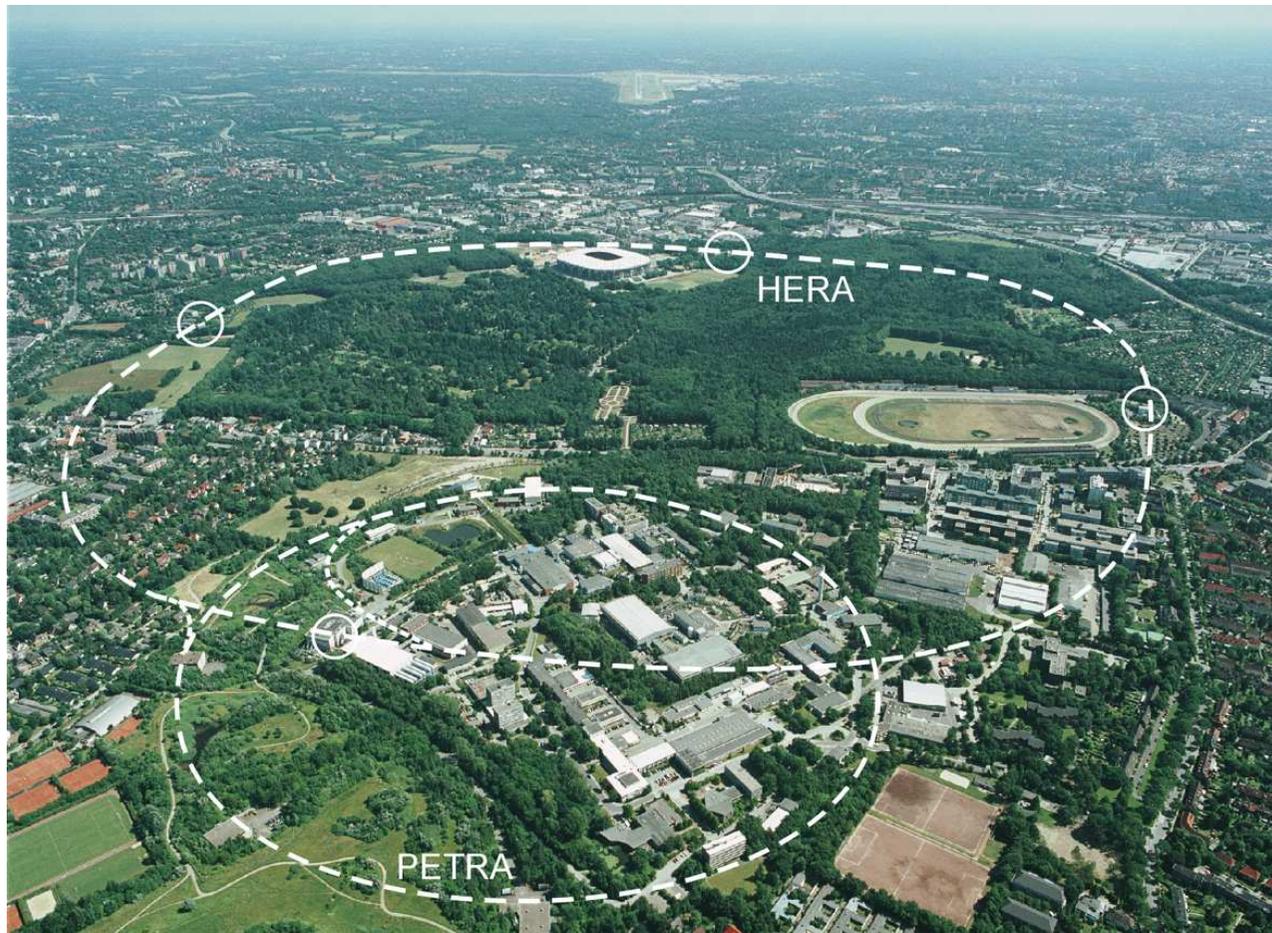
gute Ortsauflösung  $\hat{=}$  kleines  $\Delta x \hat{=}$  kleiner Wellenlänge  $\hat{=}$  großem Impuls

gute Zeitauflösung ( $\Delta t$ )  $\hat{=}$  große Frequenz  $\hat{=}$  hohe Energie

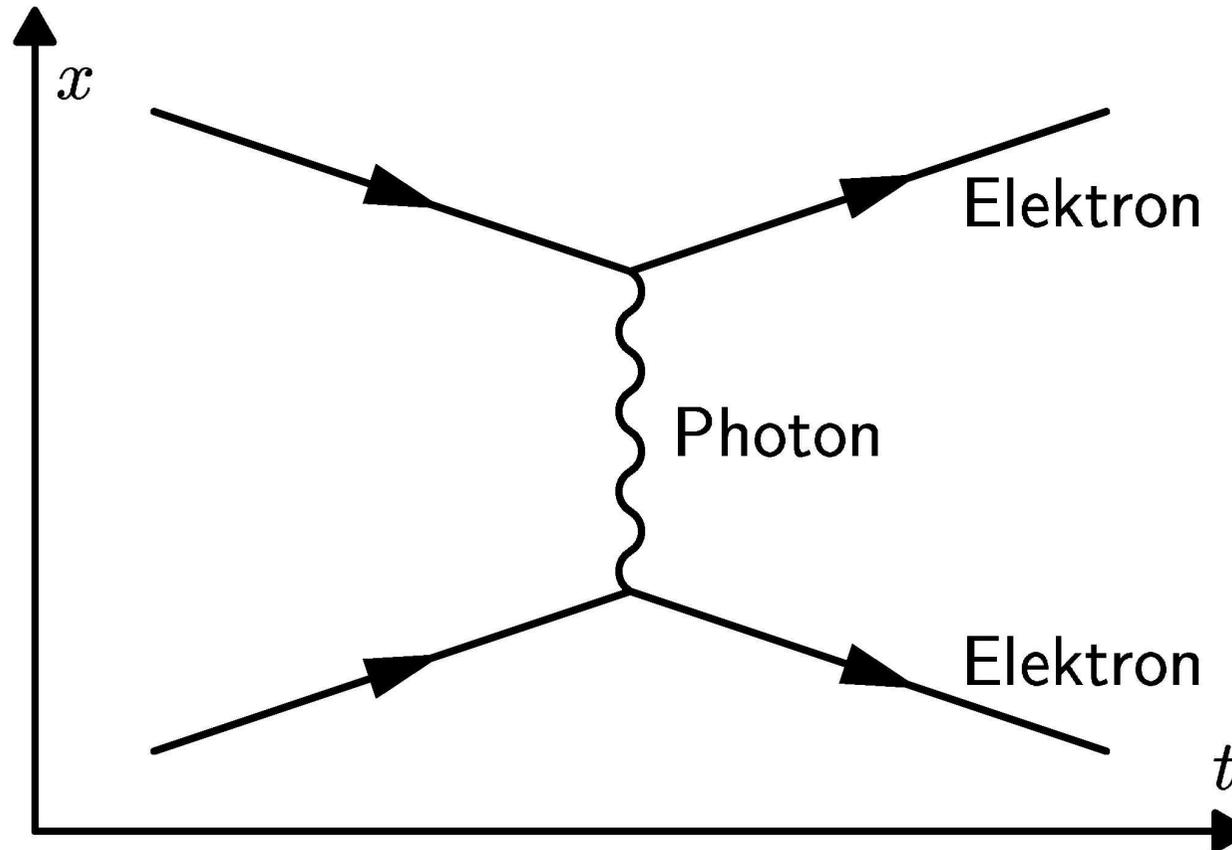
# Konsequenz

bessere Auflösung  $\Rightarrow$  kleinere Wellenlänge  $\Rightarrow$  größere Frequenz  $\Rightarrow$  höhere Energie

z.B. Protondurchmesser/1000  $\Rightarrow$  100 000 000 000 eV = 100 GeV



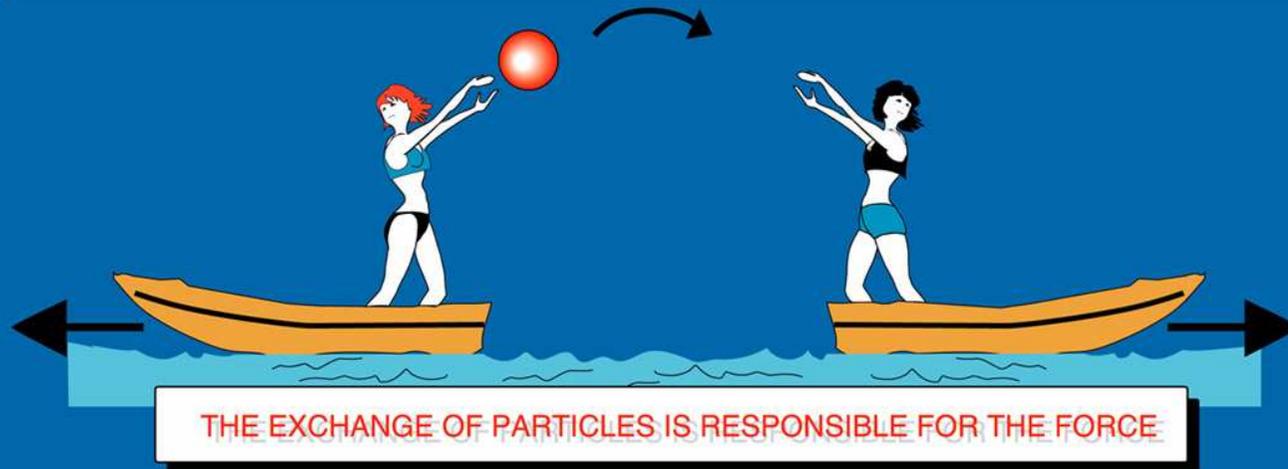
# Bild der elektromagnetischen Wechselwirkung



Streuprozess:  $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$   
Austausch eines „virtuellen“ Photons

# The forces in Nature

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



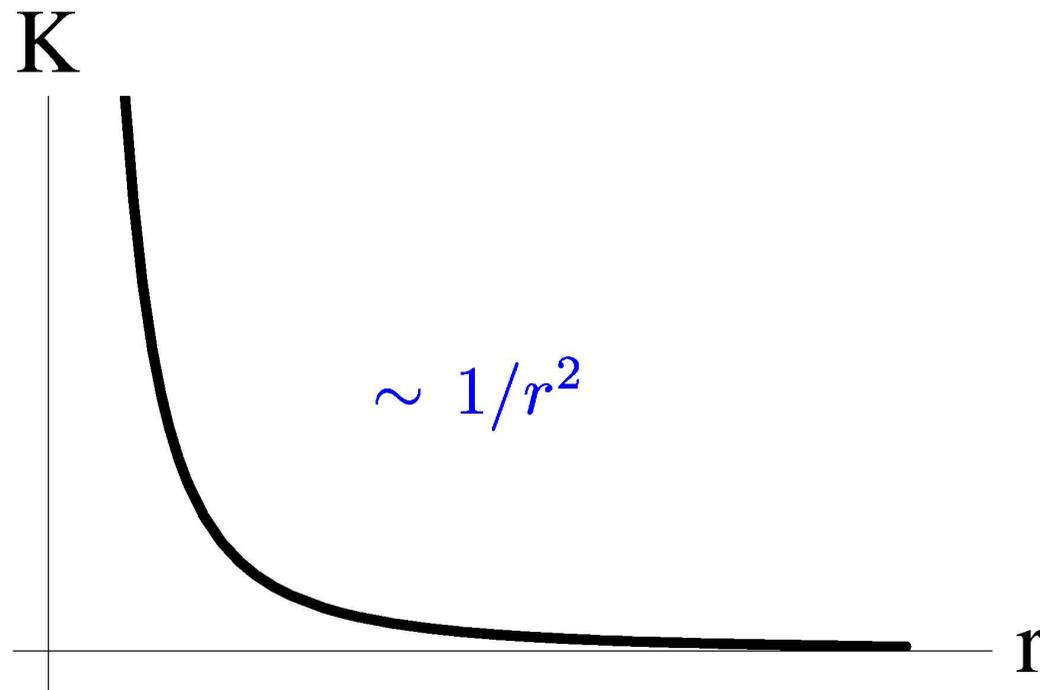
kurzzeitig ist die Energieerhaltung verletzt:

$$\Delta t \propto \hbar/E$$

Prozess spielt sich ab bei Distanzen  $D$  bzw. Impulsübertrag  $p$ :

$$D \propto \hbar/p$$

Kraft-Gesetz

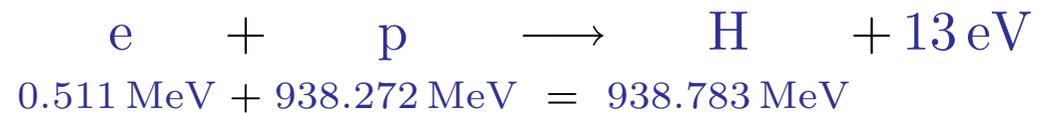


Coulomb Gesetz: „lange Reichweite“

## II Relativitätstheorie (Einstein 1905)

$$E = m c^2$$

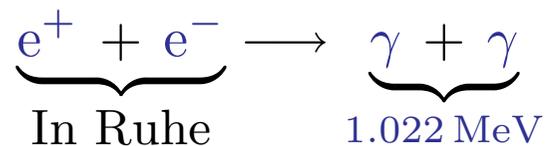
Massendefekt:



$$E_{\text{Bind}}/m c^2 \approx 1/100\,000\,000$$



$$E_{\text{Bind}}/m c^2 \approx 1\%$$



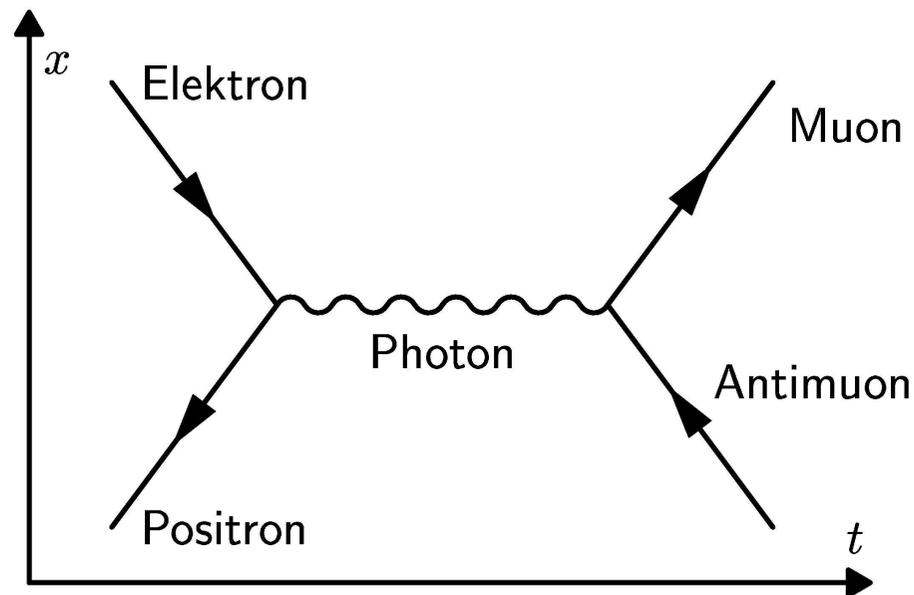
$$\text{Massendefekt} = 100\%$$

$$E = \pm \sqrt{(m c^2)^2 + p^2 c^2} = \pm m c^2 \text{ (für } p = 0 \text{)}$$

Dirac: Positron !

Teilchen  $\Leftrightarrow$  Antiteilchen (gleiche Masse)

Beliebige Teilchen und Antiteilchen können im Labor erzeugt werden, wenn die Energie groß genug ist.



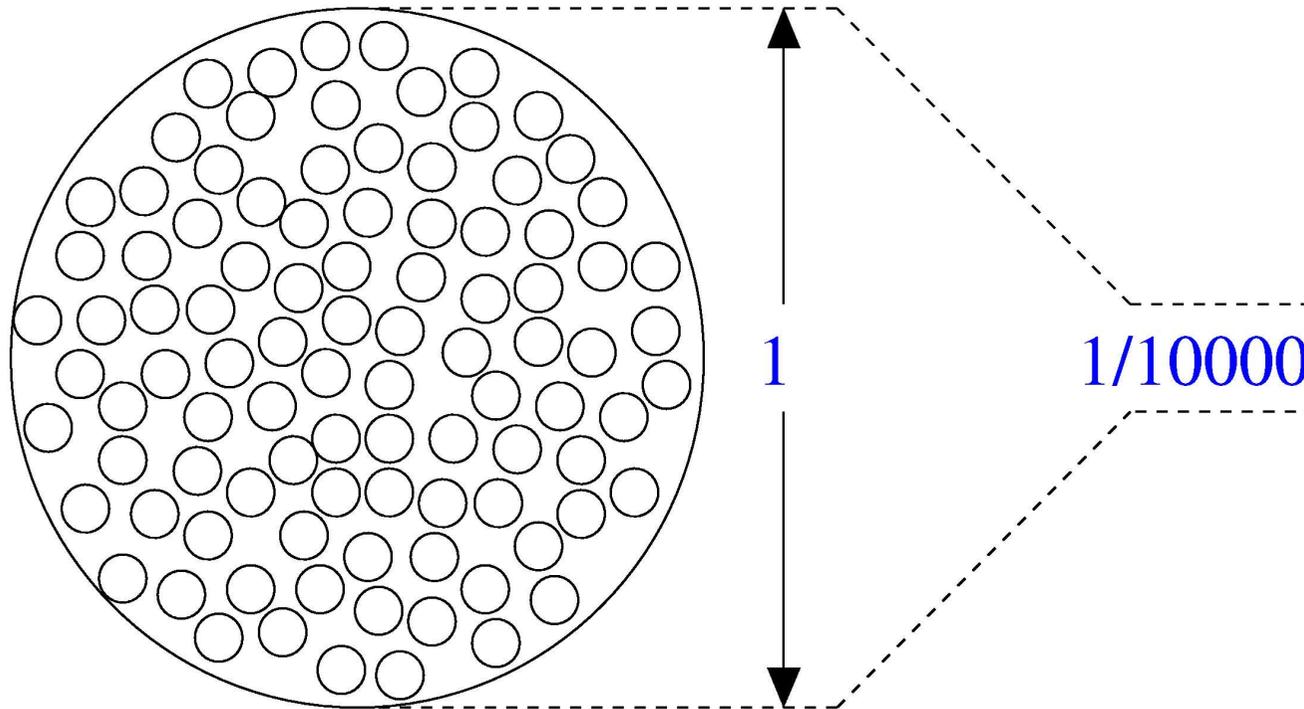
$e^+ e^- \longrightarrow$  „virtuelles“ Photon  $\longrightarrow \mu^+ \mu^-$   
 reine Feldenergie

Muon = schwerer Partner des Elektrons,  $m_\mu \approx 200 m_e$

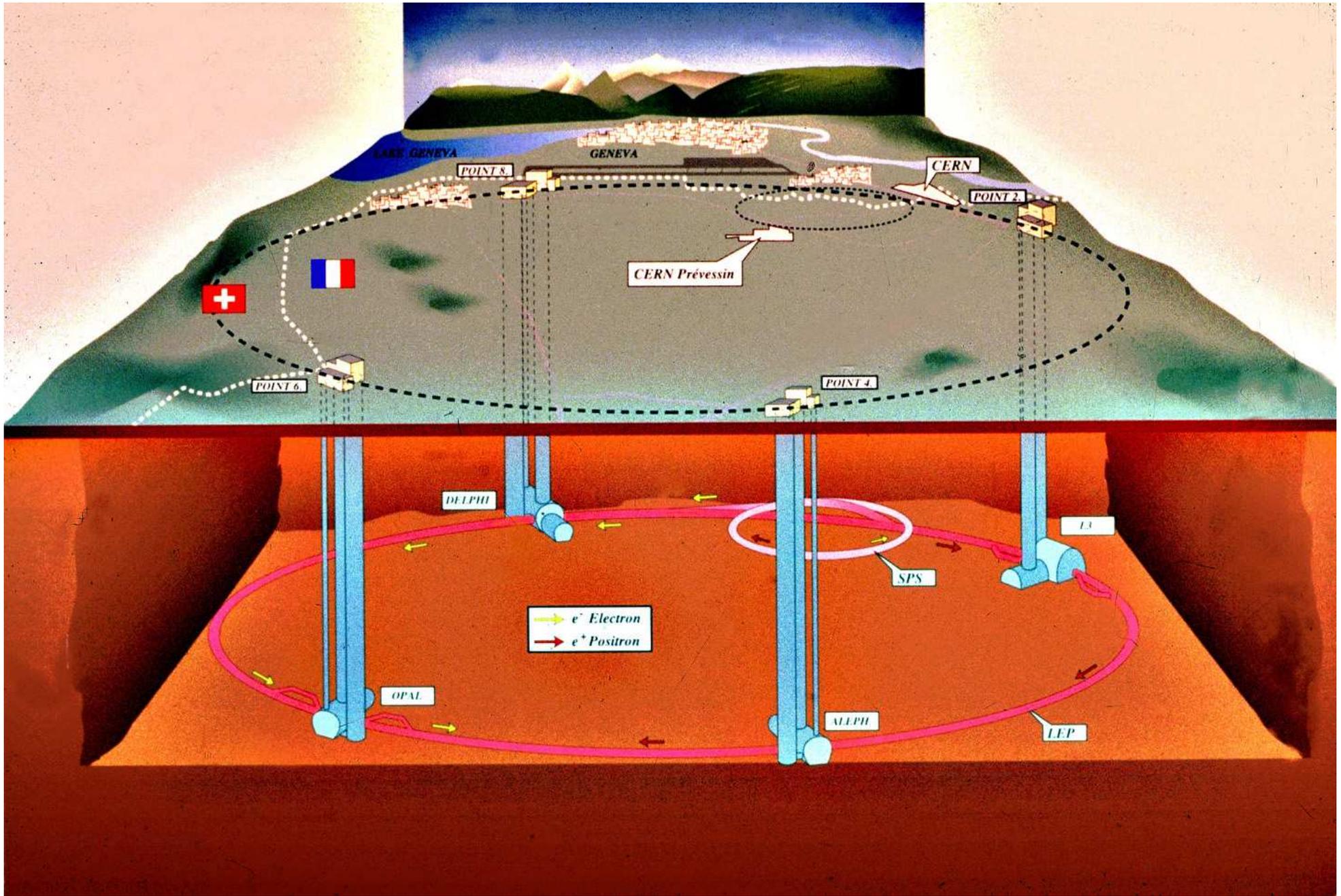
LEP: Large Electron Positron Collider:  $E \approx 200 \text{ GeV}$

(Elektronen durchlaufen Potentialdifferenzen von  $2 \times 10^{10}$  Volt)

Energie-Äquivalent eines Bleikerns



reine Feld-Energie, konzentriert in  $10^{-3} \text{ fm}$





# III Symmetrien und Wechselwirkung

Proton **p** :  $m = 938 \text{ MeV}$  ; Ladung = 1  
Spin =  $\frac{1}{2}\hbar$  (Eigendrehimpuls; Kreisel)  
 $\hookrightarrow$  Zwei Einstellmöglichkeiten:  $\uparrow$  oder  $\downarrow$

Neutron **n** :  $m = 939 \text{ MeV}$  ; Ladung = 0  
Spin =  $\frac{1}{2}\hbar$

Ähnlichkeit: Symmetrie

**p** und **n** verknüpft durch „Drehung“ in abstraktem Raum:

*„Isospin“*

Heisenberg

# Multipletts

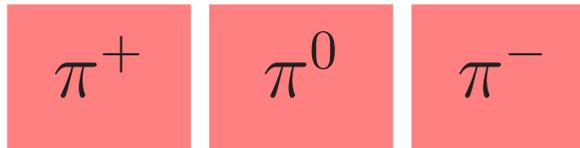
$$\text{Spin} = \frac{1}{2}$$



*Nukleonen*

$$\text{Isospin} = \frac{1}{2}$$

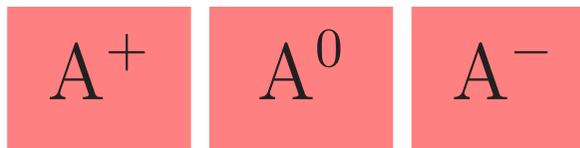
$$\text{Spin} = 0$$



*Pionen*

$$\text{Isospin} = 1$$

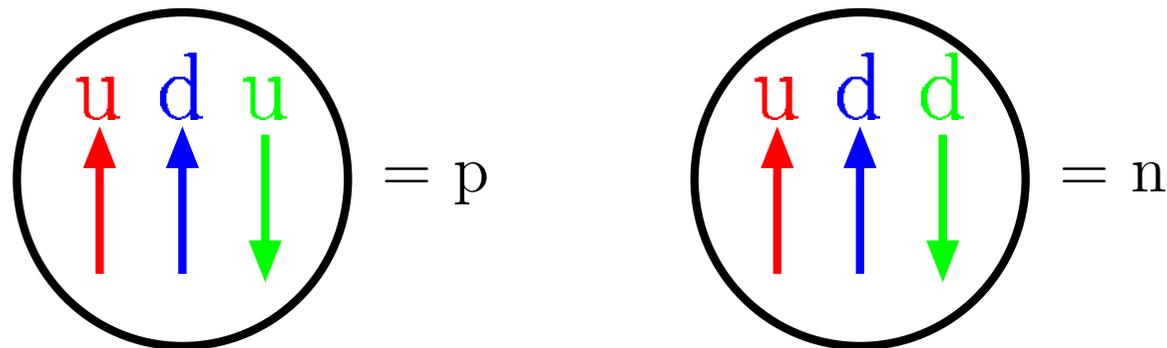
$$\text{Spin} = 1$$



*Yang-Mills-Bosonen*

$$\text{Isospin} = 1$$

## mikroskopisch

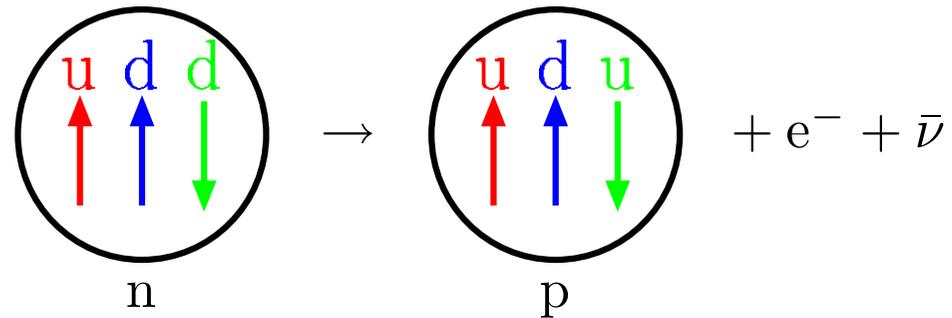


*u- und d-Quark sind Isospin-Partner*

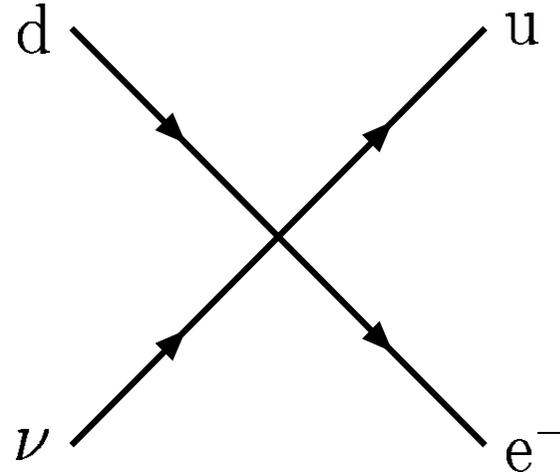
2 Einstellmöglichkeiten  $\Rightarrow$  Isospin  $\frac{1}{2}$

# Vom Ordnungsschema zur Dynamik

## Zerfall des Neutrons



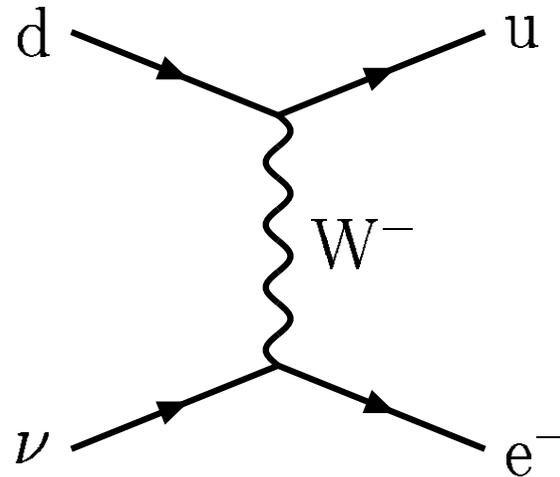
mikroskopisch:



Wechselwirkung von 4 Fermionen an einem Punkt

Spekulation:

Analogie zur elektromagnetischen Wechselwirkung



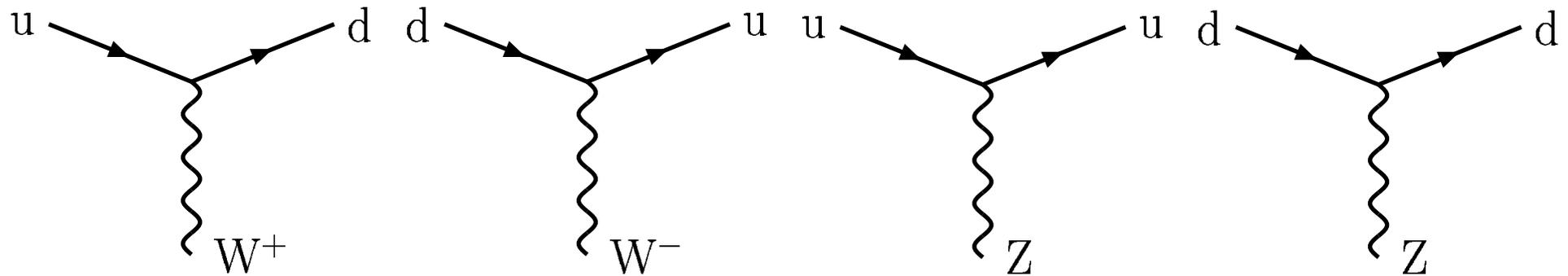
massives, geladenes **W**-Boson :  $M_W = 80 \text{ GeV}/c^2$

Reichweite der Wechselwirkung:  $D \sim \frac{\hbar}{M_W \cdot c}$  ( $\approx$  Protonradius/1000)

$\left. \begin{array}{l} u \text{ und } d \text{ wandeln sich ineinander um} \\ \nu \text{ und } e \text{ wandeln sich ineinander um} \end{array} \right\} \Rightarrow \textit{Wechselwirkung}$

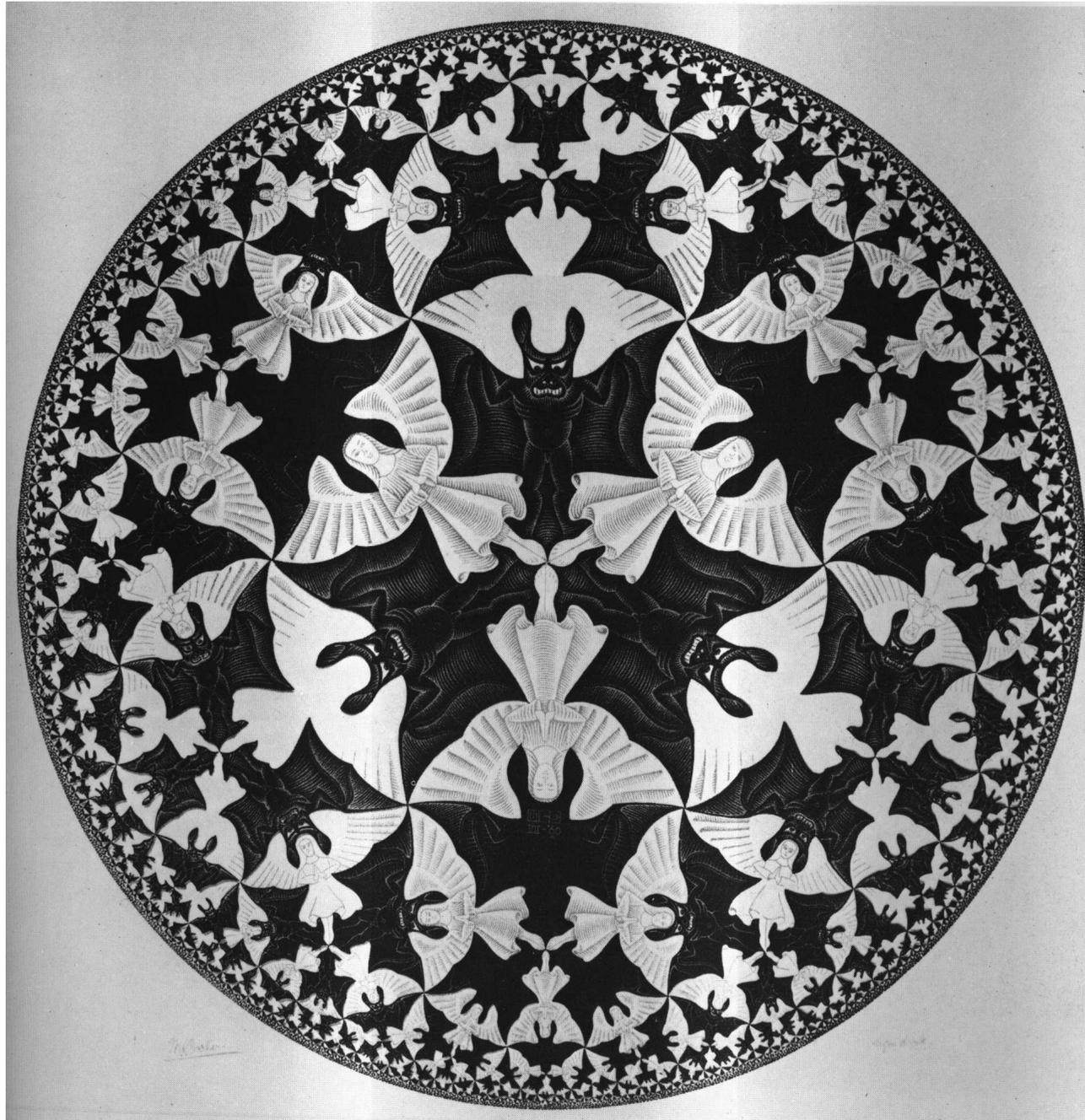
Neuer Aspekt:

Verschiedene Arten der Umwandlung



3 Eichbosonen  $\begin{pmatrix} W^+ \\ W^- \\ Z \end{pmatrix}$

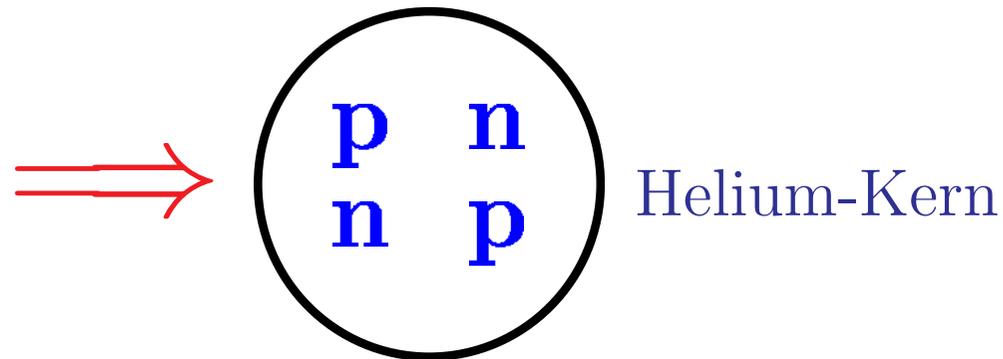
Symmetrie verknüpft Massen und Kopplungsstärke.



# Starke Wechselwirkung

„Kernkraft“

Kraft zwischen Proton und Neutron:

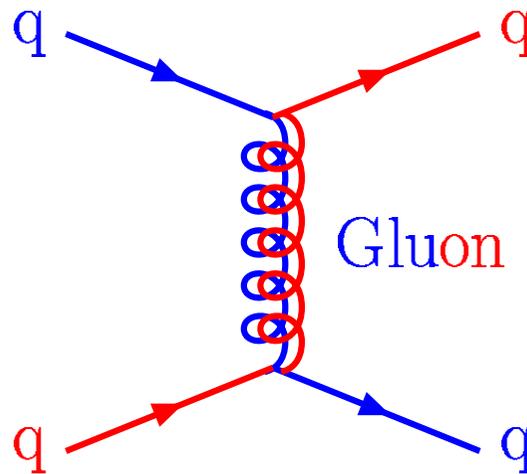


Moderne Erklärung?

experimentelle Beobachtung: Quarks gibt es in 3 Farben:

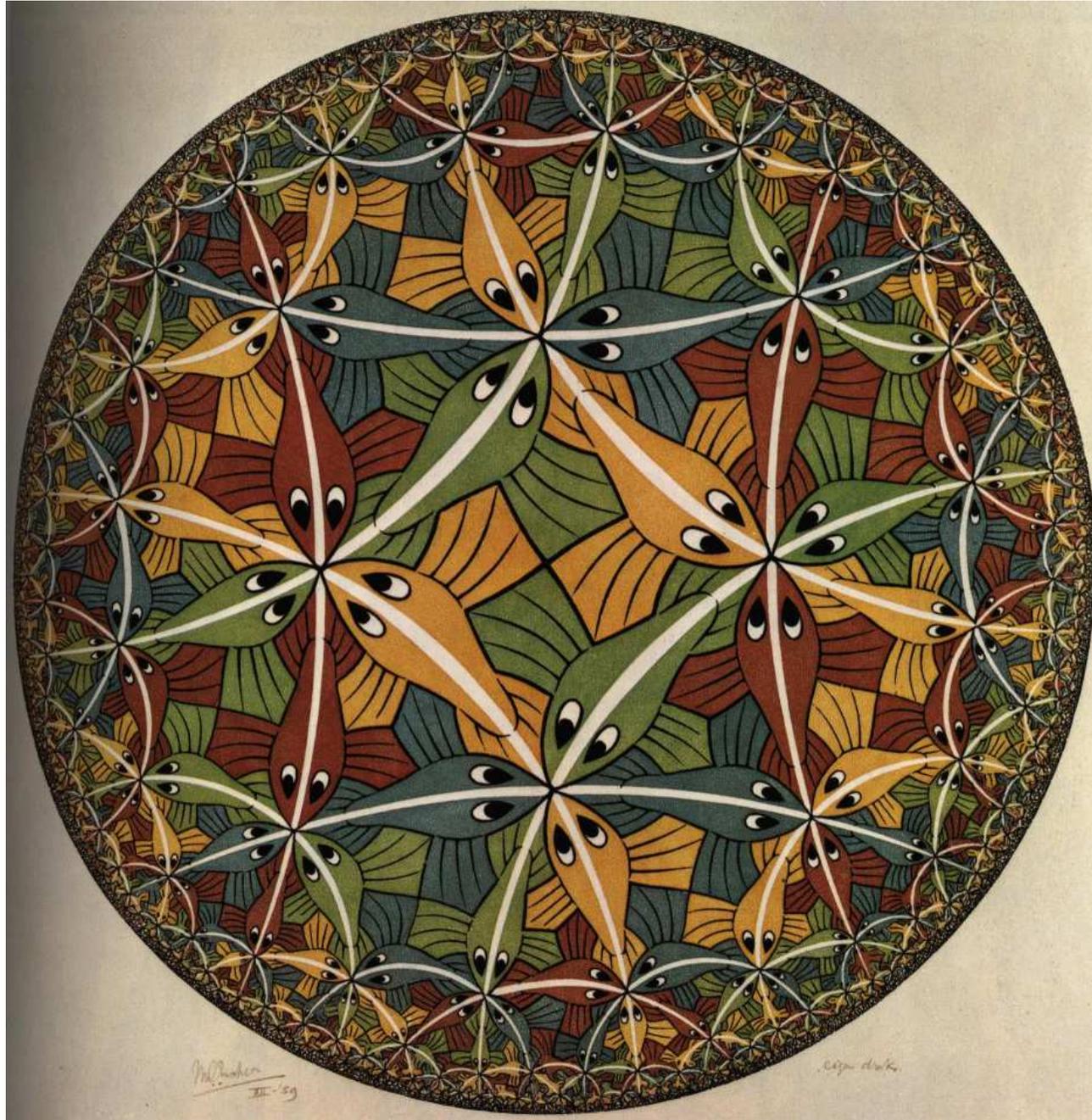
u u u  
d d d

Umwandlung zwischen Quarks verschiedener Farben:



ausgetauschte Teilchen: „Gluon“; Masse = 0  
(wie Photon, lange Reichweite)

Verstärkung der Kraft bei großen Abständen.

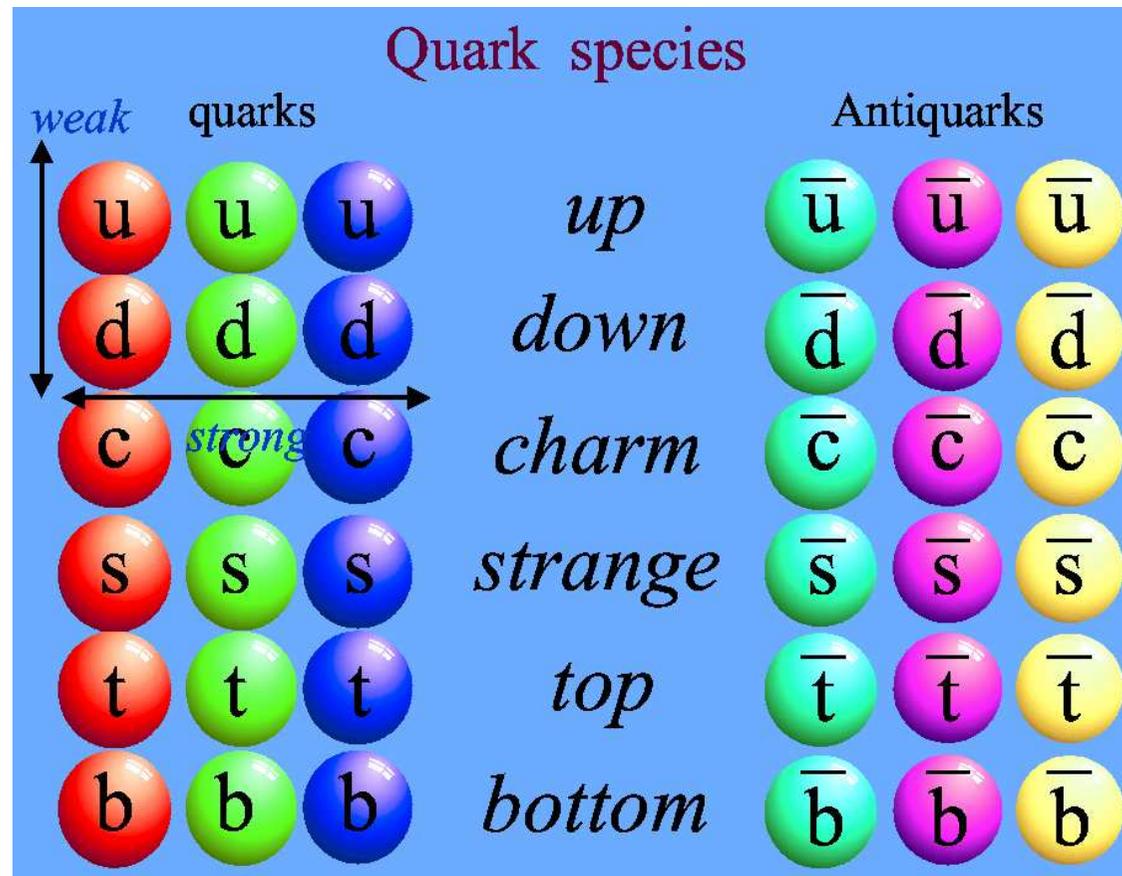


außerdem: neben u- und d-Quark schwere Quarks:

$$(c,s), (t,b)$$

Entdeckung erst möglich mit Hochenergiebeschleunigern.

( $m_q$  zwischen 0.1 GeV und 175 GeV)



## Einheitliche Theorie

$3 \times 2 \times 3$  Quarks ;  $3 \times 2$  Leptonen

Kräfte  $\implies$  Austausch von Photonen, ( $W^{\pm}$ , Z - Bosonen), Gluonen

gleiches Konzept für

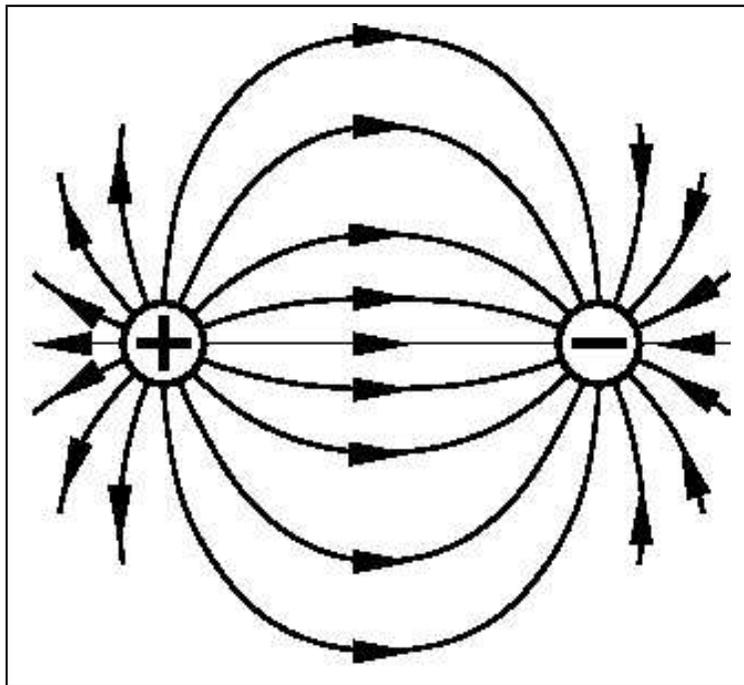
elektromagnetische

schwache

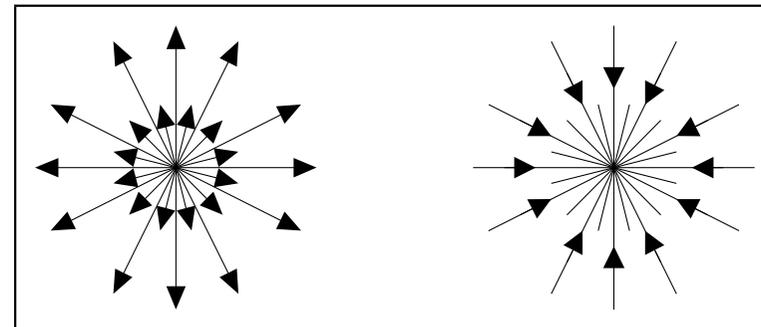
starke

} Wechselwirkung

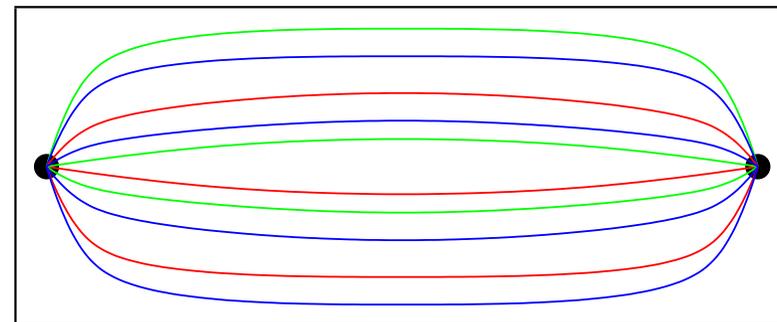
# Feldkonfigurationen



elektromagnetische WW

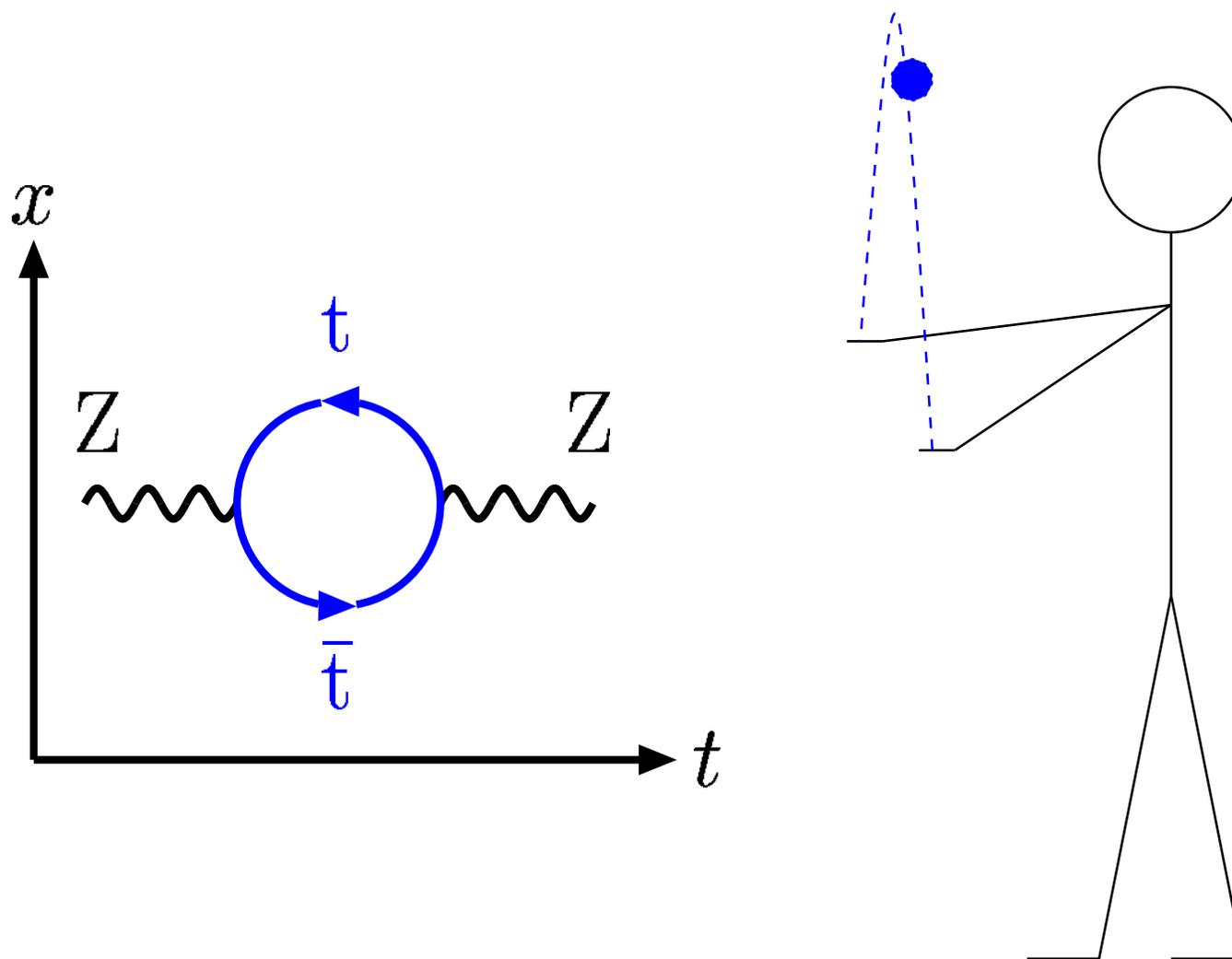


schwache  
WW

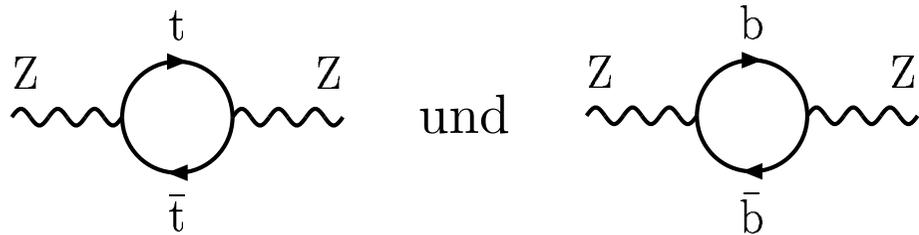


starke  
WW

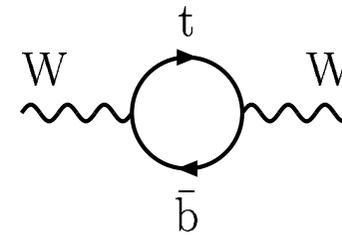
# Virtuelle Beiträge, Quantenfluktuationen



Z koppelt an  $t\bar{t}$ - und  $b\bar{b}$ -Fluktuationen



W koppelt an  $t\bar{b}$ -Fluktuationen

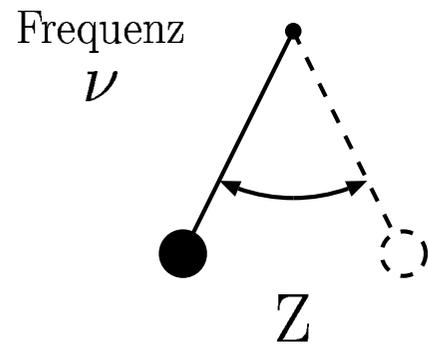
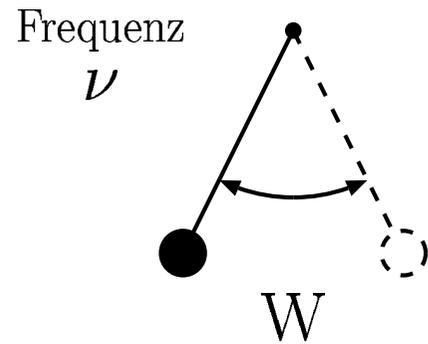


$\Rightarrow$  relative Verschiebung der Massen, je größer der t-b-Massenunterschied

$\Rightarrow$  (Zer-)Störung der Symmetrie

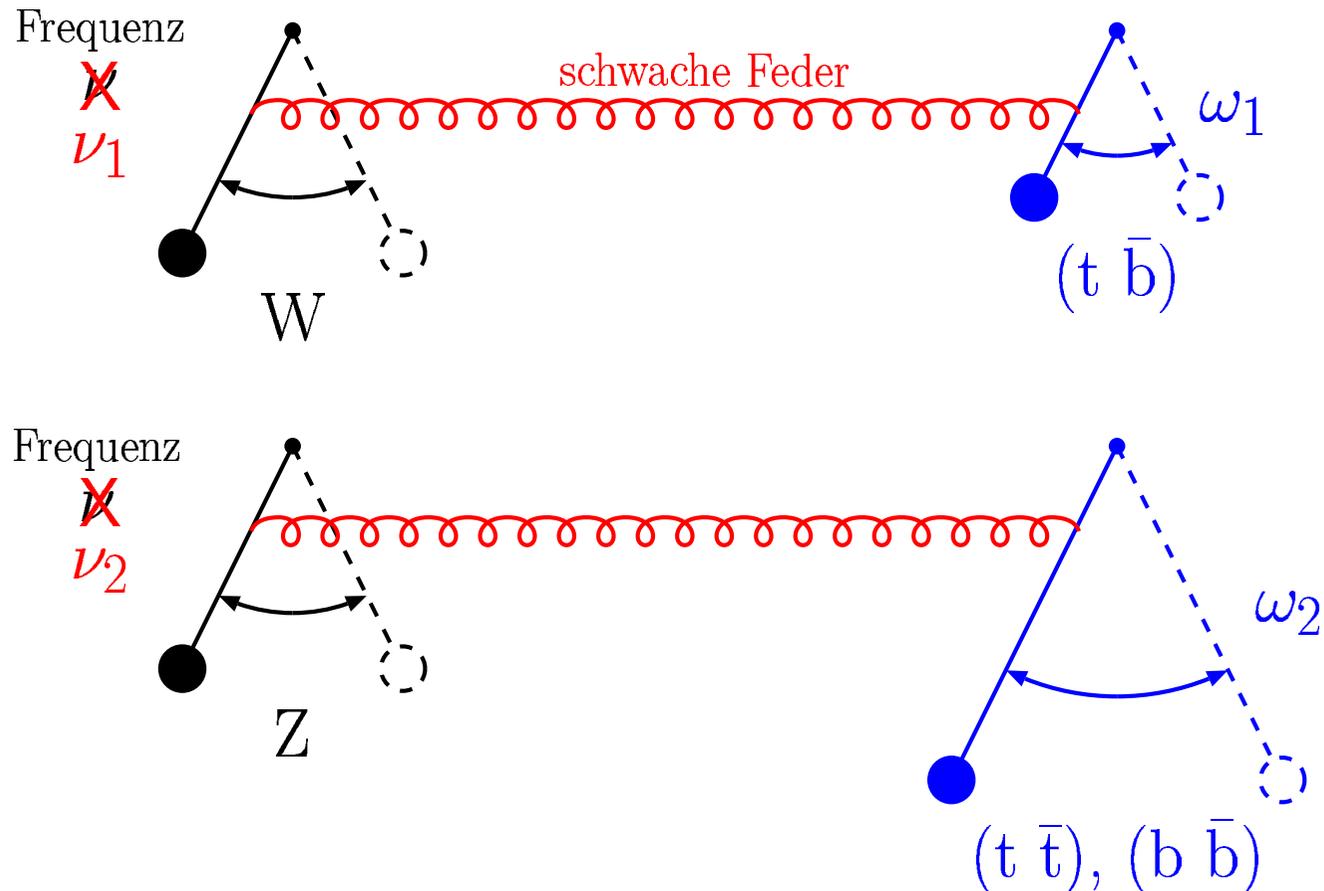
⇒ Indirekte Bestimmung der Top-Masse durch Quantenkorrekturen

Analogie: *schwach gekoppelte Pendel*



⇒ Indirekte Bestimmung der Top-Masse durch Quantenkorrekturen

Analogie: *schwach gekoppelte Pendel*



Aus dem Unterschied zw.  $\nu_1$  und  $\nu_2$  findet man den Unterschied zw.  $\omega_1$  und  $\omega_2$ .

## Resultat für die Top-Masse

indirekte Beobachtung (LEP, 1995):

$$m_t = 176 \pm 10^{+17}_{-19} \text{ GeV}$$

konsistent mit direkter Beobachtung (TEVATRON):

$$m_t = 176 \pm 5 \text{ GeV}$$

⇒ *Evidenz für Quantenkorrekturen*

# Zusammenfassung

QUANTENMECHANIK + RELATIVITÄTSTHEORIE + SYMMETRIE

⇒ **KONSISTENTE THEORIE**

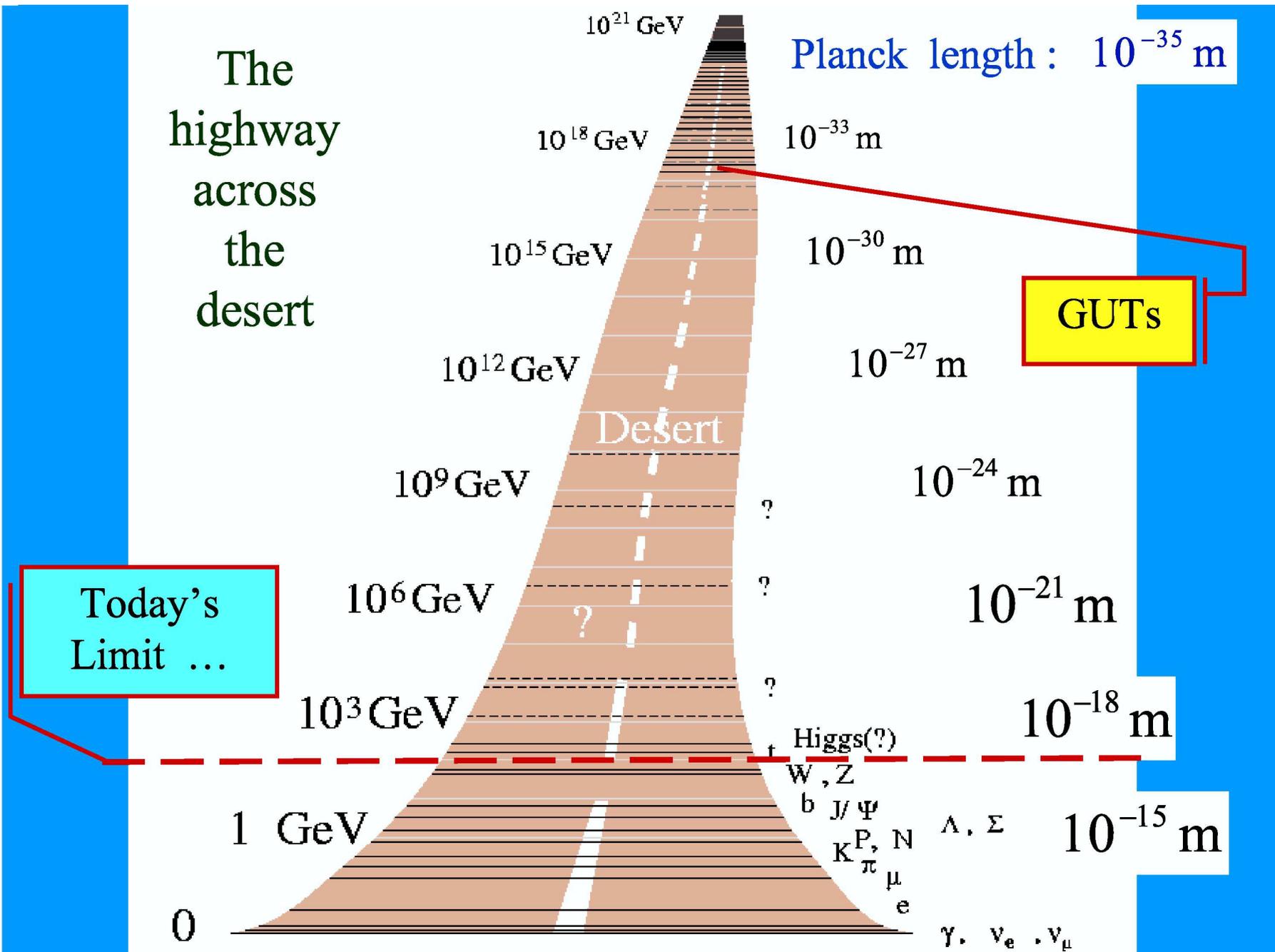
der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung

QUANTENFLUKTUATIONEN

⇒ indirekte Information über **TOP QUARKS**

# Offene Fragen

- Mechanismus der Massenerzeugung, „Higgs“ (LHC ab 2007)
- Quarks und Leptonen in einem Multiplett ?  
(Große Vereinheitlichte Theorie, GUT, Nur eine Art der Wechselwirkung)  
⇒ Übergänge zwischen Quarks und Leptonen  
⇒ Proton-Zerfall: Protonen + Elektronen  $\longrightarrow \pi^0 + e^+ + e^- \longrightarrow 4$  Photonen  
(weniger als 1 aus  $10^{33}$  Protonen ( $\hat{=}$  1000 Tonnen) pro Jahr)



- neue hypothetische Teilchen: „**dunkle Materie**“
- Supersymmetrische Teilchen
- weshalb (**e,  $\nu$ , u, d**) pro Familie; weshalb 3 Familien
- Quantengravitation, Struktur der Raum-Zeit
- mehr als 3 + 1 Raum-Zeit-Dimensionen ?

*There are difficulties; there are certainly difficulties ....  
Have you any alternative theory which will meet the facts?*

Sherlock Homes: The Sign of Four – A.C. Doyle

Dank an Bernd Feucht und Christian Sturm