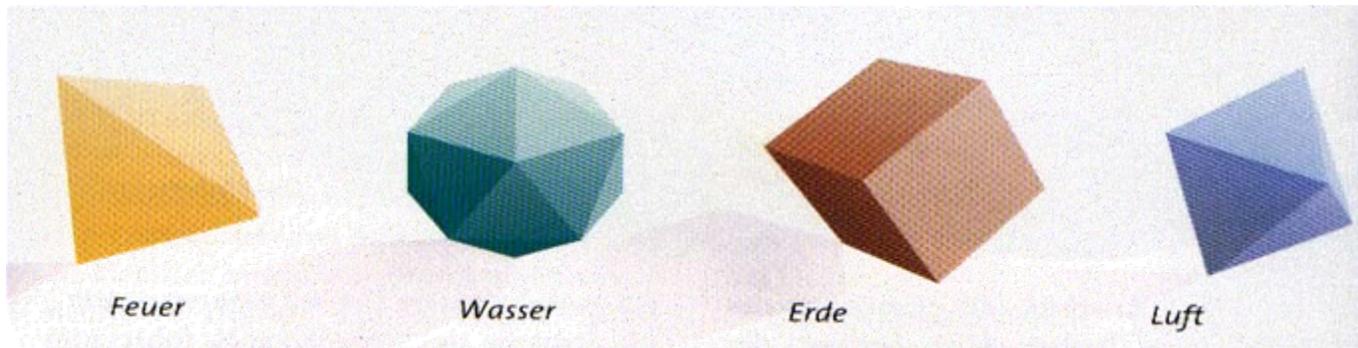


Griechische Philosophie

- **Elemente und Kräfte: 500-430 v.Chr. Empedokles**
 - **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
 - **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß \Leftrightarrow Mischung , Trennung
- **Symmetrien: 427-347 v.Chr. Platon**
 - **Symmetrische Körper:** Schönheit der Gesetze



- **Kleinste Bausteine: 460-371 v.Chr. Demokrit**
 - **Atome:** verschiedene Formen und Gewichte
 - **Leere:** Verbindung und Bewegung im Nichts

Der Baukasten unserer Welt

- **Inhalt: 4 stabile elementare Bausteine**
 - **u** „Up-Quark“
 - **d** „Down-Quark“
 - **ν_e** „Elektron-Neutrino“
 - **e** „Elektron“
- **Inhalt: 4 Urkräfte („Wechselwirkungen“)**
 - Starke Kraft
 - Schwache Kraft
 - Elektromagnetische Kraft
 - Schwerkraft
- **Symmetrien**
 - Grundlage des Verständnisses von Kräften



Fragen zum Baukasten

■ Wie ist die Bauanleitung?

- Was kann man aus welchen Bausteinen bauen?
(Proton, Neutron, Atome,...)
- Wie verbindet man die Bausteine?
(starke Kraft, elektromagnetische Kraft, ...)

■ Wie ist der Baukasten selbst hergestellt?

- Warum gerade diese Bausteine?
- Warum gerade diese Kräfte?

- ## ■ ***Frage nach dem Grundprinzip der „Firma Natur“***
- Gibt es eine gemeinsame Beschreibung von aller Materie und ihren Wechselwirkungen, eine einzige ***Weltformel ?***

Entdeckung der Leptonen (die „Leichten“)

■ Das Elektron e

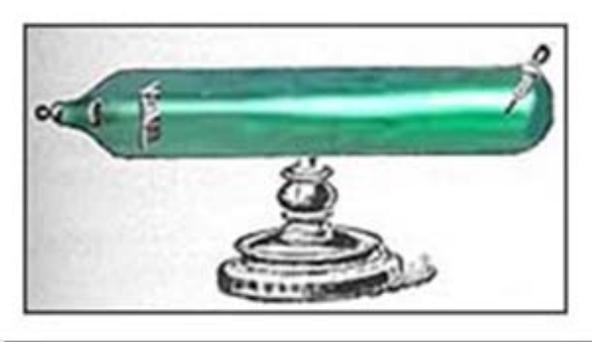
– TH 1892 H.A. Lorentz

emagn. Strahlung entsteht durch vibrierende Ladungsteilchen

– EXP 1897 J.J.Thomson

Kathodenstrahlen sind leichte, elektrisch geladene Teilchen

→ **Entdeckung des Elektrons:
Geburtsstunde der Teilchenphysik**



■ Das Neutrino ν

– TH 1931 W.Pauli (ad hoc)

Rettung von Energie- u. Impulserhaltung n

– TH 1934 E.Fermi

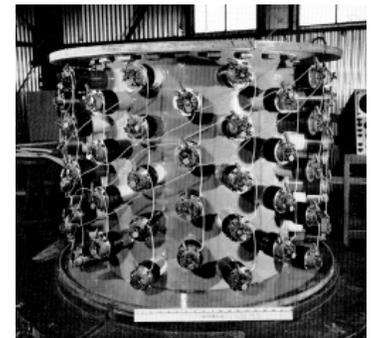
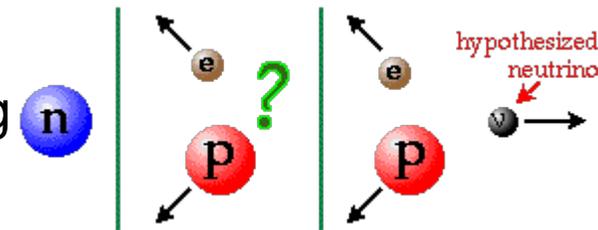
Theorie der „Schwachen Kraft“: ν kaum nachweisbar

– EXP 1956 C.Cowan, F.Reines

Kernreaktor: 10^{12} ν /mm² / Sekunde

Detektor: 10 t Wasser mit Cadmiumchlorid

Nachweis: 3 ν / Stunde



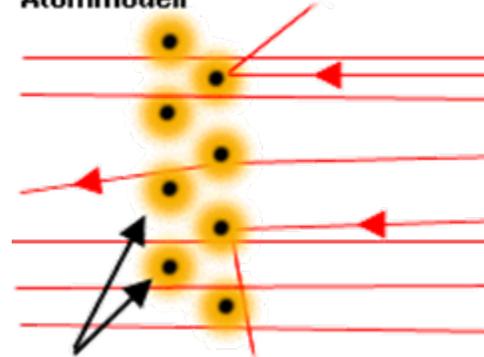
Die Entdeckung der Quarks

■ Streuexperimente mit α Strahlen

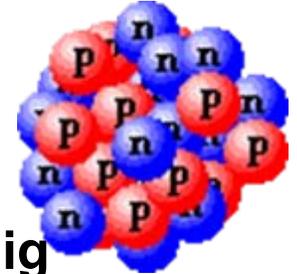
- EXP 1911 E.Rutherford: Atomkern
- EXP 1919 E.Rutherford: Proton p
- TH 1920 E.Rutherford: $n = p + e$?
- EXP 1932 J.Chadwick: Neutron n

Atomkern aus Protonen und Neutronen

Streu-Experiment im neuen Atommodell



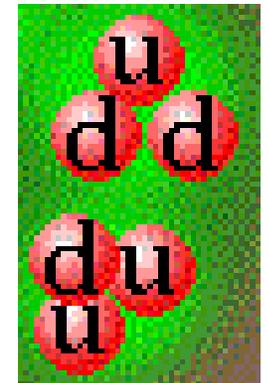
Goldatome mit harten Kernen



■ Streuexperimente mit Elektronen

- EXP 1956 R.Hofstadter: p ist nicht punktförmig
- TH 1964 M.Gell-Mann, G.Zweig: Quarks, gebunden durch „Starke Kraft“
- EXP 1968 Friedman, Kendall, Taylor: große Streuwinkel $e + p \rightarrow e + p$

Neutron: 1 up-Quark + 2 down-Quarks
Proton: 2 up-Quarks + 1 down-Quark

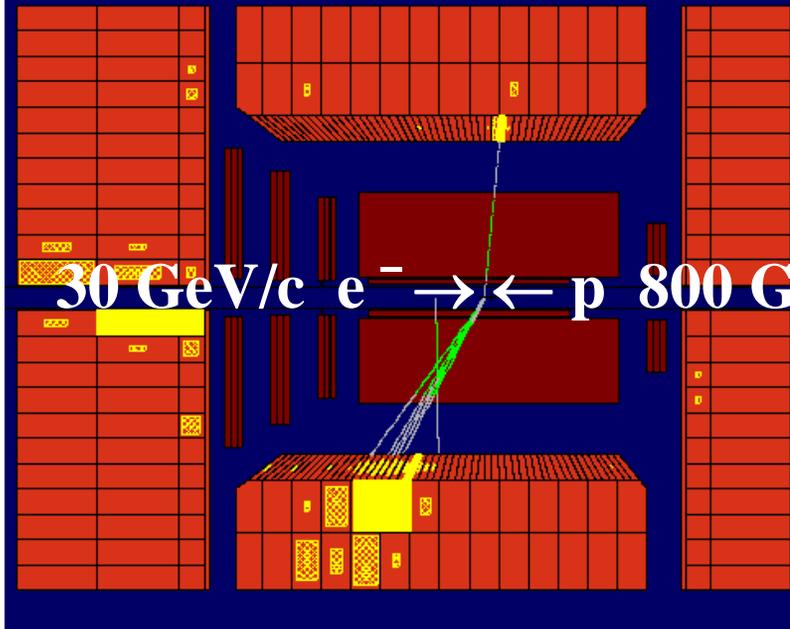
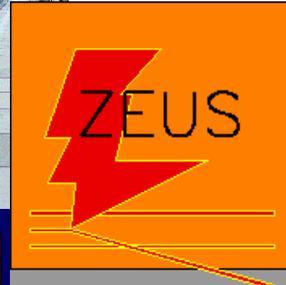
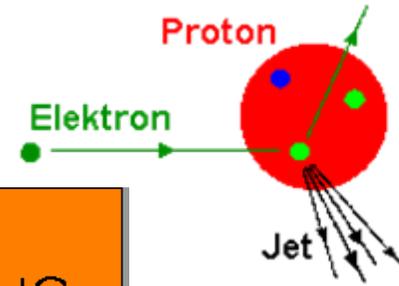


n

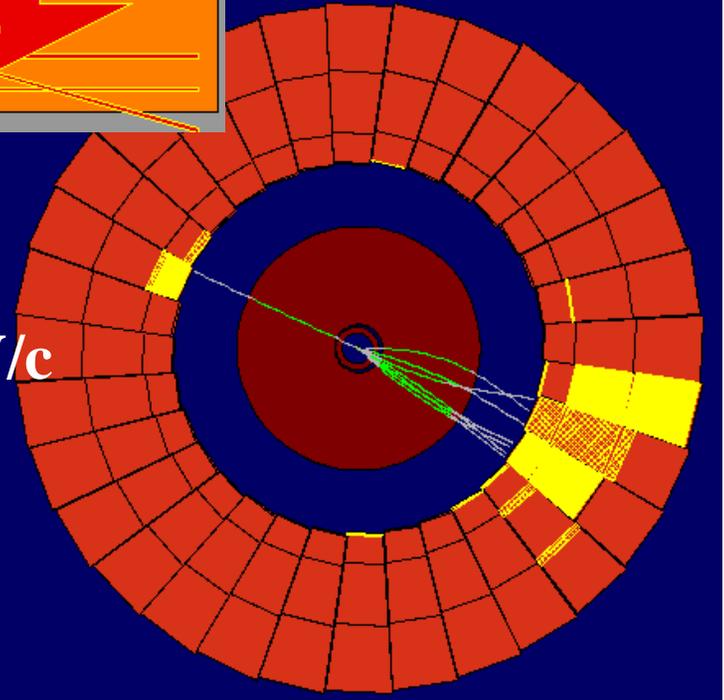
p

Protonstruktur Heute

■ e-p Kollisionen bei HERA am DESY



30 GeV/c $e^- \rightarrow \leftarrow p$ 800 GeV/c



Konzept einer Weltformel

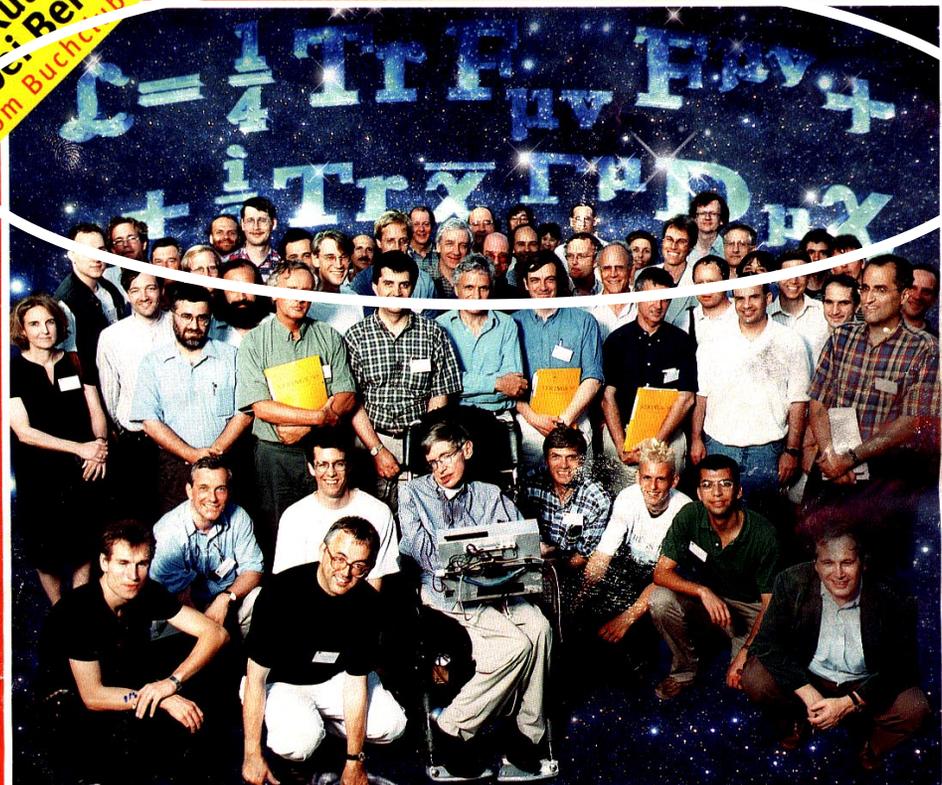
- **Erster Schritt: Elektromagnetismus**
 - 1864 J.C.Maxwell: 4 Grundgleichungen
 - Elektrizität und Magnetismus haben dieselbe Ursache
- **Gescheiterte Versuche:**
 - 1921-1926 Kaluza und Klein (*zu früh*)
 - Elektromagnetismus und Gravitation in 5 Dimensionen
 - 1929-1955 A.Einstein (*zu voreingenommen*)
 - keine Quantenmechanik: Starke und Schwache Kraft ignoriert
 - 1958-1976 W.Heisenberg (*zu ambitiös*)
 - **Ein** Symmetrieprinzip soll alle Teilchen **und** Kräfte vorhersagen
- **Derzeitige „Weltformel für fast alles“**
 - 1961-1974 Standardmodell der Teilchenphysik
 - Elementare Bausteine vorgegeben
 - Verständnis aller Wechselwirkungen (außer Gravitation)

DEUTSCHER SPIEGEL

Nr. 30/26.7.99 - 5,00 DM



**Kulturkampf
bei Bertelsmann**
Vom Buchclub zum Internet



Gesucht:

Die Weltformel

Die klügsten Köpfe der Gegenwart enträtseln, was das Universum im Innersten zusammenhält

Verleger: Bertelsmann, Postfach 10 15 53, D-33001 Bielefeld
Redaktion: Bertelsmann, Postfach 10 15 53, D-33001 Bielefeld
Telefon: (0521) 200-2000, Telefax: (0521) 200-2001
E-Mail: ds@bertelsmann.com
Abonnenten-Service: Bertelsmann, Postfach 10 15 53, D-33001 Bielefeld
Telefon: (0521) 200-2000, Telefax: (0521) 200-2001
E-Mail: ds@bertelsmann.com
Druck: Bertelsmann, Postfach 10 15 53, D-33001 Bielefeld
Vertrieb: Bertelsmann, Postfach 10 15 53, D-33001 Bielefeld
ISSN 0944-0158
P 01



Die Weltformel

$$L = T - V$$

- ***L***: Lagrange Funktion
(Joseph L. Lagrange, 1736-1814, Mathematiker)
- ***T***: Bewegungsenergie
- ***V***: Potentielle Energie (z.B. Lageenergie)
- ***Aufgaben:***
 - ***Finden von T und V*** für das gegebene Problem
 - ***Anwenden*** von Mathematik

Prinzip der minimalen Wirkung

- Grundprinzip von Maureau de Maupertuis

*Jede Bewegung erfolgt so,
daß der Mittelwert von $L=T-V$
so klein wie möglich ist*

- (Euler, Lagrange: Variationsrechnung)

Qualitatives Beispiel: Freier Fall



$T = 0, V$ groß
 $\Rightarrow T-V$ klein
GUT!



T groß, $V = 0$
 $\Rightarrow T-V$ groß
SCHLECHT!



*minimales $T-V \Rightarrow$
oben lange (langsam)
unten kurz (schnell)*

Quantitativ

$$V = mgh$$

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

Euler-Lagrange Variationsrechnung:
minimales $T-V$

$F = mg$
Newton'sche Bewegungsgleichung



Übertragung auf Elementarteilchen

- Auch in der *Quantenmechanik*:

$L = T - V$ minimal bleibt gültig,
und Euler-Lagrange Mathematik ist anwendbar

- Aber was ist für ein Elementarteilchen

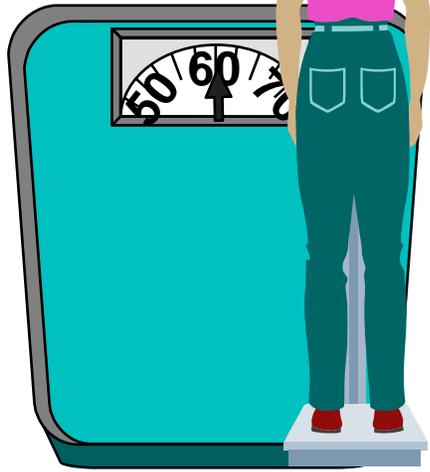
- Bewegungsenergie **T** ?
- Potentielle Energie **V** ?

- Theoretische und experimentelle Erkenntnis 1945-1974:

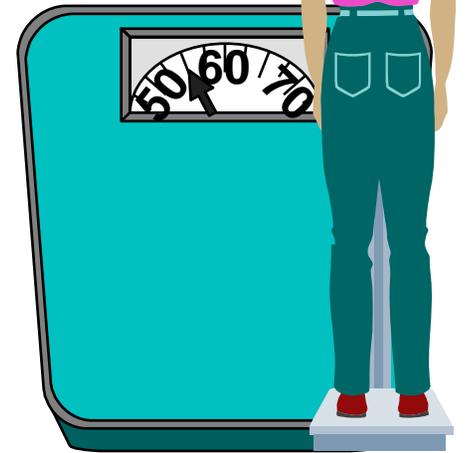
T und **V** können durch fundamentale
Symmetrieprinzipien festgelegt werden!
(**Grundprinzip der „Firma Natur“** bei der
Herstellung des Baukastens der Elementarteilchen)

Lokale Umeichungen

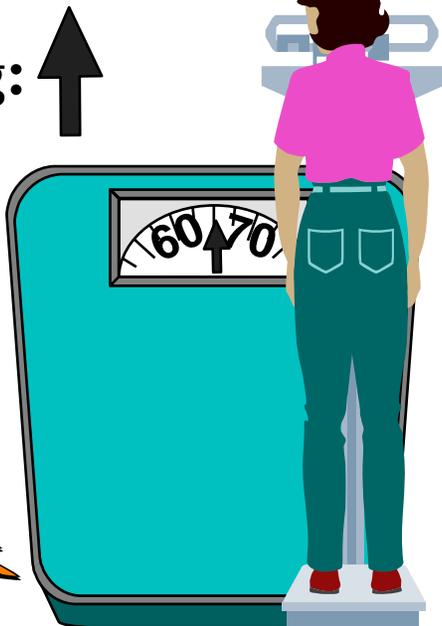
Irgendwo



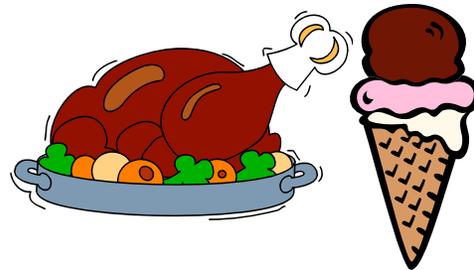
Woanders



Eichung: ↑

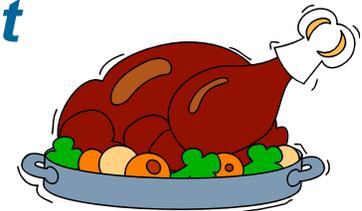


Eichung: ↑



Eichinvarianz

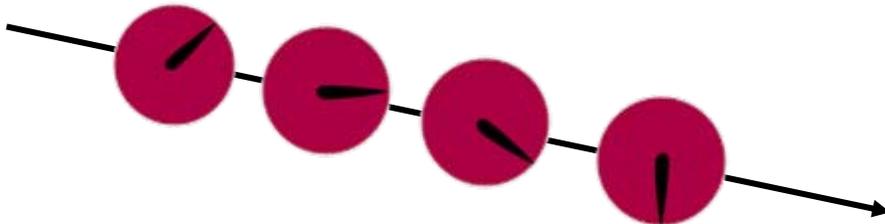
- Bestreben des *Menschen*
 - keine Änderung des **Gewichtswerts** bei lokaler Änderung der Eichung
- Zunahme und Abnahme von **Gewicht**
 - in Form von **Nahrung**
- Menge der Aufnahme und Abgabe
 - bestimmt durch **Skala**
- Häufigkeit der Umeichungen
 - bestimmt durch **Hersteller**



Beschreibung Von Elementarteilchen

■ Bild eines Elementarteilchens

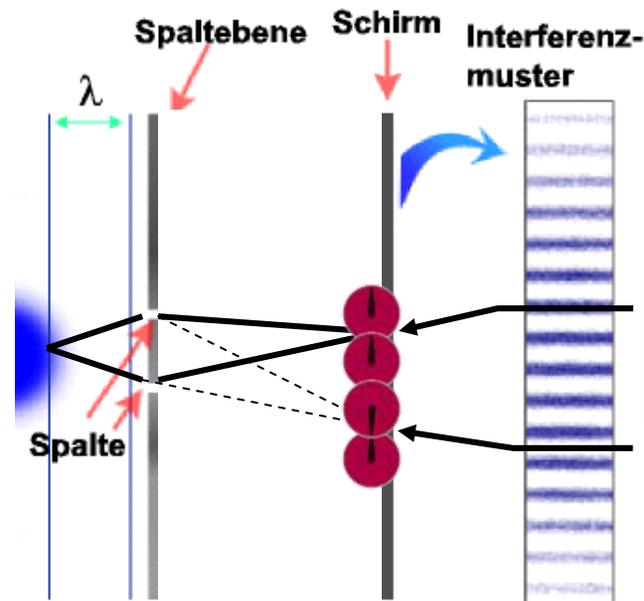
Massenpunkt mit sich drehendem Zeiger („Phase“)



■ Aufenthaltswahrscheinlichkeit

(Summe aller Zeigerstellungen aller möglichen Wege)²

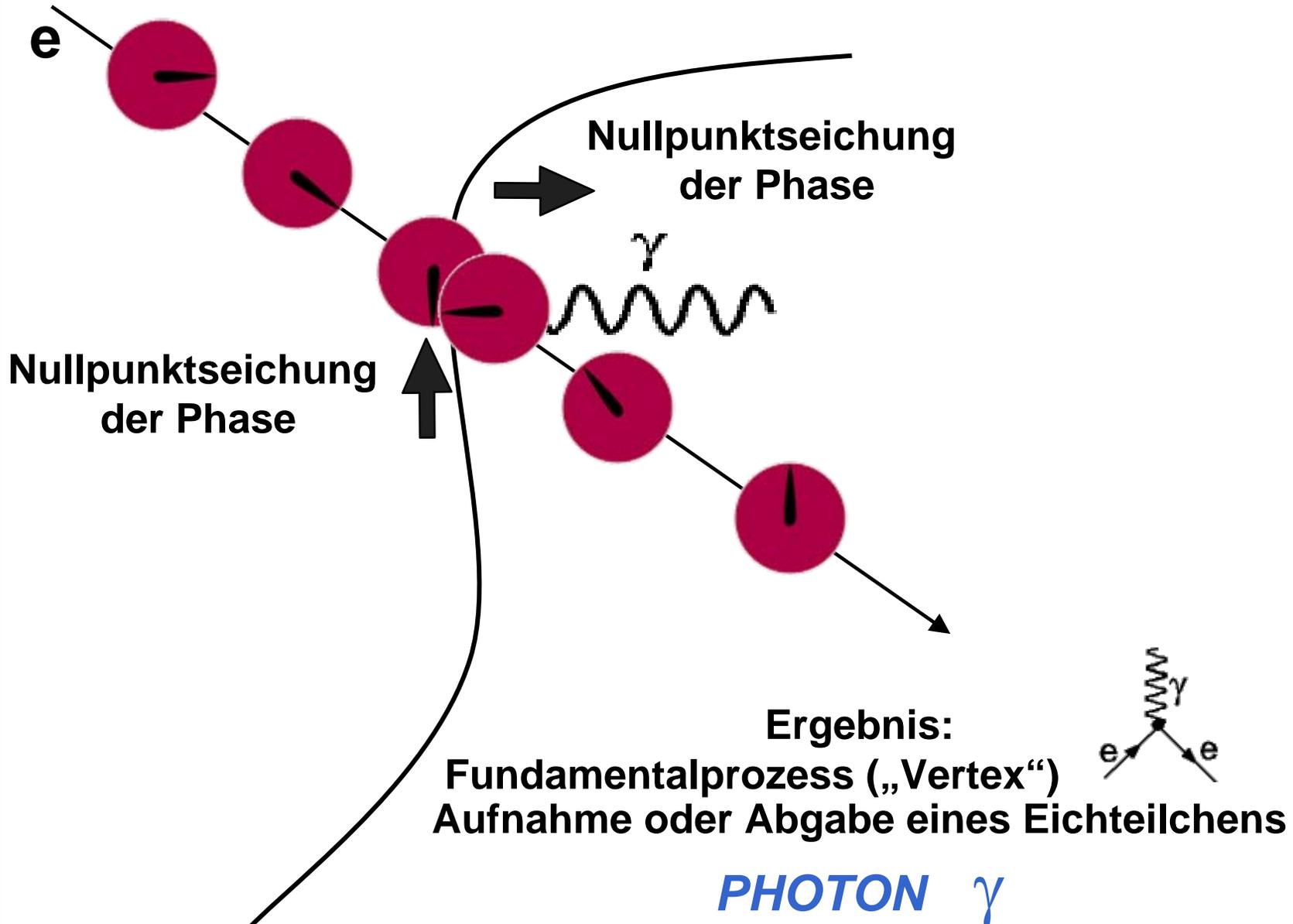
- wellenähnliche Eigenschaften
- Verlust des Determinismus



Parallele Zeiger addieren sich

Antiparallel löscht aus

Umeichung im Elektromagnetismus



Elektromagnetische Eichsymmetrie

■ Symmetrieforderung

$L = T - V$ soll sich durch lokale (örtliche und zeitliche) Umeichungen der Phase nicht ändern

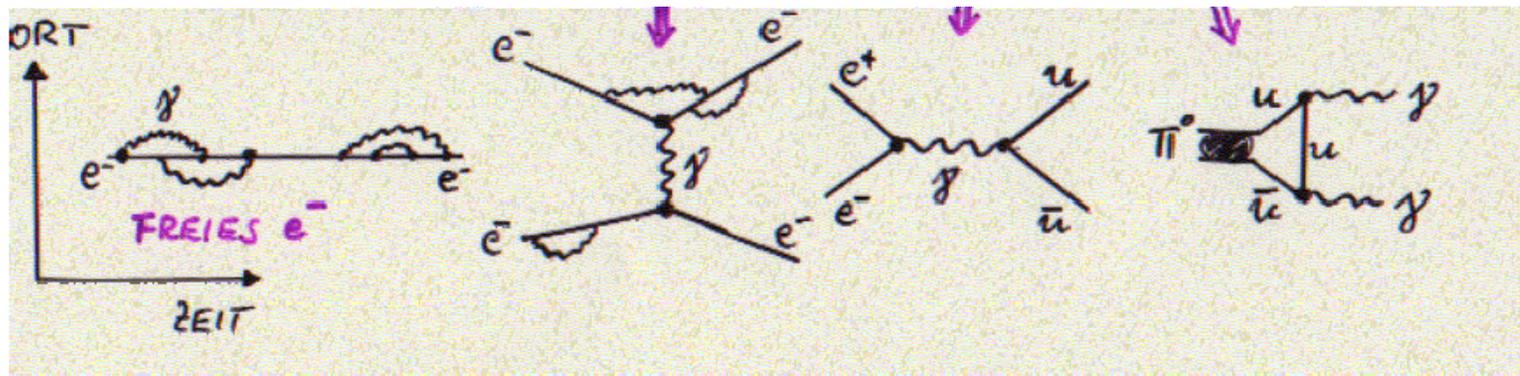
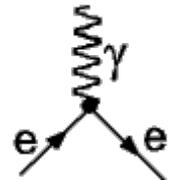
■ Ergibt Vorschrift zur Erstellung von T und V (Vorschrift für die „Bausteinfabrik Natur“)

■ $L = T - V$ für Elektronen oder Quarks

beschreibt dann auch die Aussendung oder Aufnahme eines „Eichteilchens“, des Photons

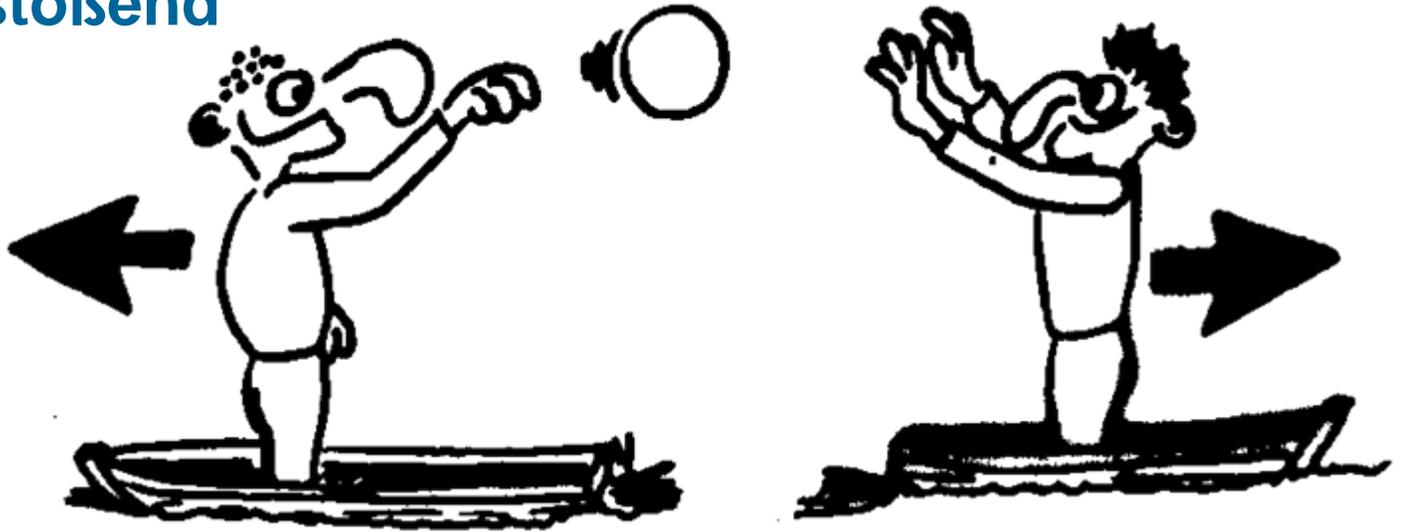
■ Es entsteht ein fundamentaler „Vertex“

verantwortlich für alle elektromagnetischen Wechselwirkungen (Kräfte, Produktion, Zerfall)

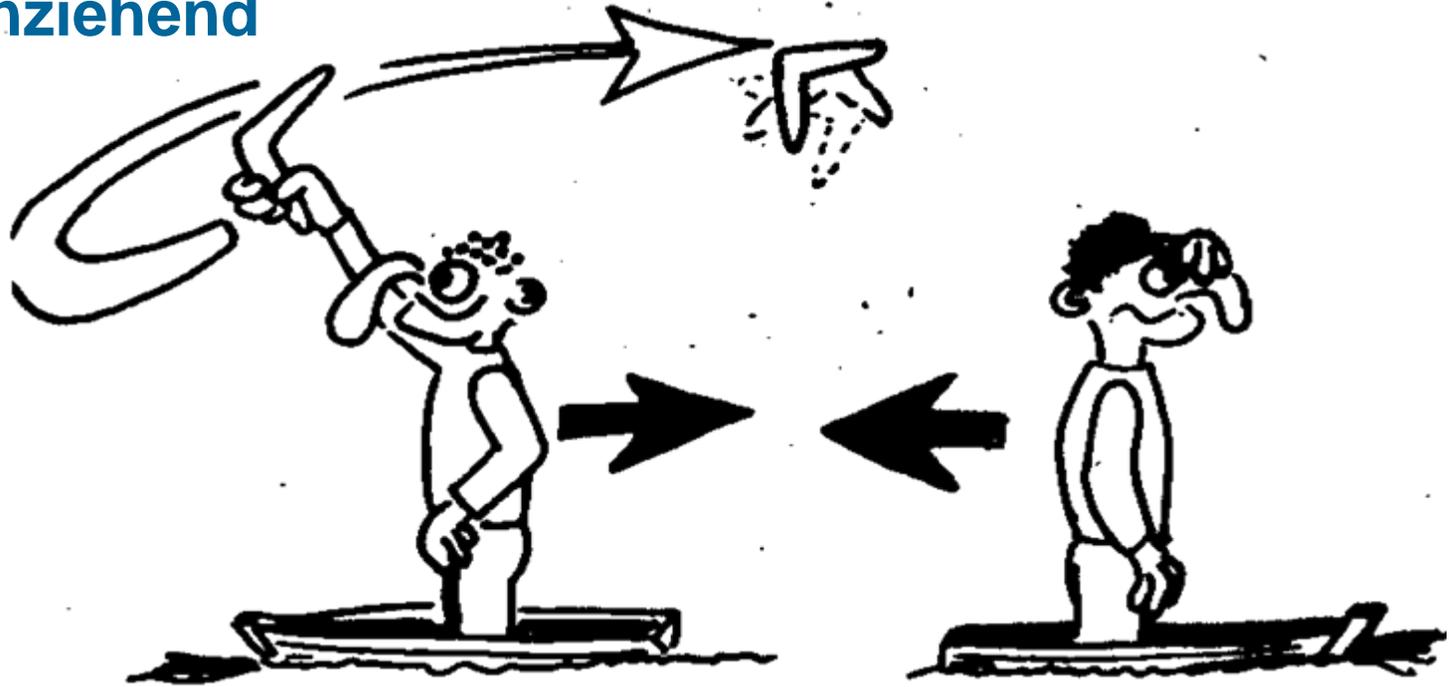


Kraftwirkung durch Teilchenaustausch

■ Abstoßend



■ Anziehend



Eichinvarianz (Teilchen)

- **Bestreben des Menschen (Teilchens):**
 - keine Änderung des **Wertes** des Gewichts (Phase) bei lokaler Änderung der Eichung
- **Aufnahme und Abgabe von Gewicht (Phase)**
 - in Form von **Nahrung** (Eichteilchen: Photonen)
- **Menge der Aufnahme und Abgabe**
 - bestimmt durch **Meßskala** (elektrische Ladung Q)
- **Häufigkeit der Umeichungen (Stärke e)**
 - bestimmt durch **Hersteller** (Naturkonstante)

Umeichungen ernst genommen

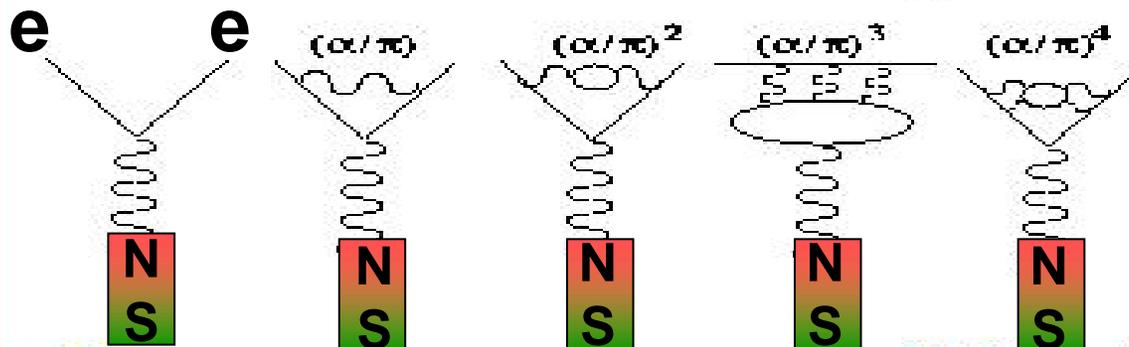
- Ursache von **Wechselwirkungen** sind lokale **Umeichungen**
 - Elektromagnetismus: Umeichungen der Phase
- Ihre **Stärke** ist eine fundamentale **Zahl**, die man als **Häufigkeit** der Umeichungen auffassen kann
 - Elektromagnetismus: $e / \sqrt{\epsilon_0 \hbar c} = 0.3$
- Unterschiedliche **Ladungen** jedes Teilchens bestimmen die **Auswirkung** der Umeichung
 - elektrische Ladung Q (Zahl) bestimmt Phasenänderung
 - u $Q = +2/3$
 - d $Q = -1/3$
 - ν_e $Q = 0$
 - e $Q = -1$
- **Antiteilchen** haben **umgekehrtes Ladungsvorzeichen**
- **Eichteilchen** stellen Eichsymmetrie her und übertragen dabei u.a. Energie und Impuls

Experimenteller Test

Das anomale magnetische Moment $(g - 2)_e$

- Magnetisches Moment des Elektrons

$$\vec{\mu} = g\mu_B\vec{s}; \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$



Jahr	Resultat	N
1927 Dirac	$g = 2$	1
1948 Schwinger	$+ 0.5 \frac{\alpha}{\pi}$	1
1957 Sommerfield, Petern.	$- 0.3285 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2$	7
1966 Elend	$+ 5.197 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2$	$\mu\mu$
-1996 Jegerlehner	$+ (3.49 \pm 0.08) \cdot 10^{-7} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2$	Had.
1974 Cvitanovic, Kinoshita (num.)		
1996 Remiddi et al. (anal.)	$+ 1.1812 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3$	72
1988-1995 Kinoshita (num.)	$+ (1.56 \pm 0.07) \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4$	891

- Präzision der Vorhersage

2×10^{-12} auf g

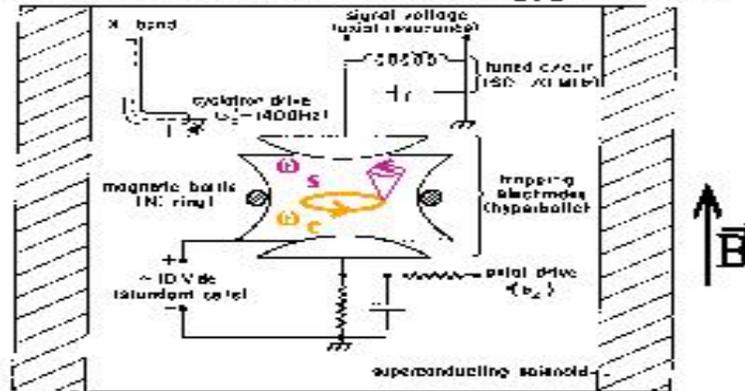
2×10^{-9} auf die QED Korrektur $(g-2)$

Resultat

Die Messung von $(g - 2)e$

DEHMELT 1958: $\Delta g/g = 3 \times 10^{-5}$

DEHMELT, V. DYCK, SCHWINBERG 1987: $\Delta g/g = 4 \times 10^{-12}$



- Penning Trap

- statische elektrische (10 V) und magnetische (5 T) Felder
- halte **einzelnes** Elektron über **mehrere Monate** fest

- Messe das Verhältnis von

- Spin Präzession: $\hbar\omega_s = g\mu_B B$
- Zyklotron Umlauf: $\hbar\omega_c = 2\mu_B B$

$$\frac{\omega_s - \omega_c}{\omega_c} = \frac{g - 2}{2}$$

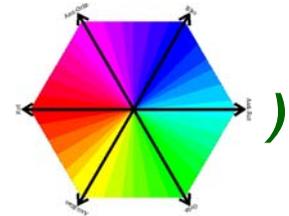
Experiment (1956 - 1987): $g/2 = 1.001159652188(\pm 04)$

Theorie (1948 - 1996): $g/2 = 1.001159652174(\pm 28)$

Genauigkeit entspricht Dicke eines Haares
im Vergleich zum Erddurchmesser

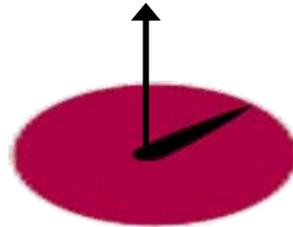
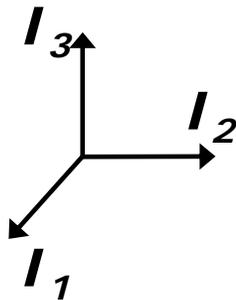
Ist das Konzept übertragbar?

- **Elektromagnetische Kraft:**
neue Interpretation von „Ladung“ Q_e !
 - Art der Umeichung: Drehungen um 1 Achse
 - Häufigkeit: $e/\sqrt{\epsilon_0 \hbar c} = 0.3$
 - Empfindlichkeit (elektrische Ladung): Q (reine Zahl)
- **Schwache Kraft ?**
 - Art der Umeichung: Drehungen um 3 Achsen
 - Häufigkeit: $g_w = 0.6$
 - Empfindlichkeit (schwache Ladung): I (hat Richtung $\uparrow \rightarrow \downarrow$)
- **Starke Kraft ?**
 - Art der Umeichung: Drehungen um 8 Achsen
 - Häufigkeit: $g_s = 1.2$
 - Empfindlichkeit: (starke Ladung): λ („Farbe“)
- **Schwerkraft ???**
 - Umeichung: ????
 - Häufigkeit: 10^{-36} ?
 - ???

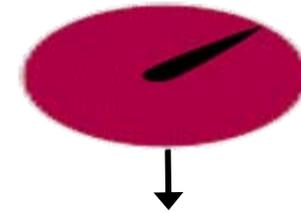


Die schwache Eichsymmetrie

- 1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung



Neutrino: $I_3 = 1/2$

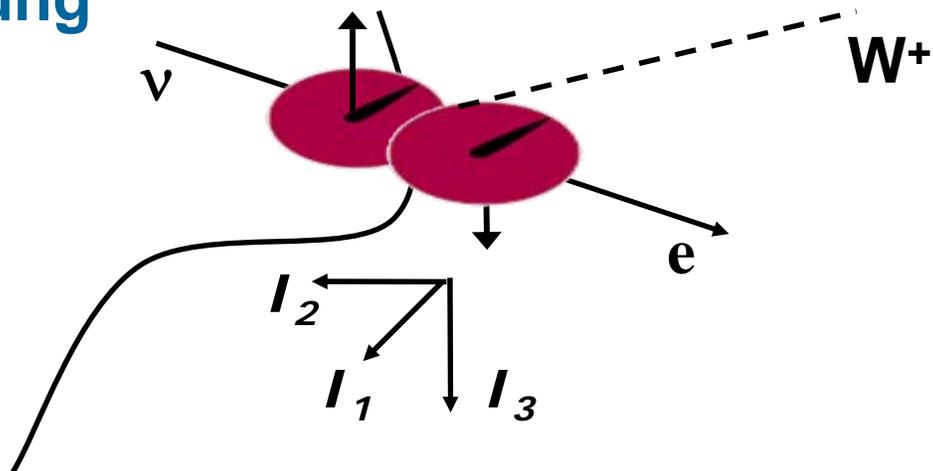
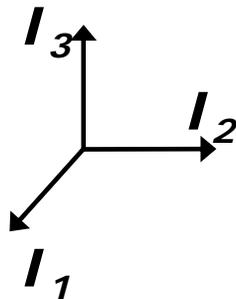


Elektron: $I_3 = -1/2$

Up-Quark: $I_3 = 1/2$ Down-Quark: $I_3 = -1/2$

Idee: (ν , e) und (u , d) unterscheiden sich *nur* durch die „Richtung“ eines Pfeils (schwache Ladung I)

- lokale Umeichung



Besonderheiten

(Unterschiede zum Elektromagnetismus)

- **Notwendigkeit für 3 Eichteilchen W^+, W^-, W_3**
jeweils eins für jede mögliche Drehachse
- **Eichteilchen tragen selber Schwache Ladung $I(\uparrow \rightarrow \downarrow) = 1$**
gesamte Schwache Ladung ist „erhalten“
- **Eichteilchen sind sehr schwer (ca. 100 Protonmassen)**
Neutron-Zerfall um Faktor 10^{24} langsamer als nach $g_w = 0.6 > e = 0.3$ zu erwarten wäre
- **Rechts-Links Spiegelsymmetrie verletzt (ad hoc):**
Schwache Ladung tragen nur
 - Teilchen mit „linkshändiger“ Eigendrehung
 - Antiteilchen mit „rechtshändiger“ Eigendrehung

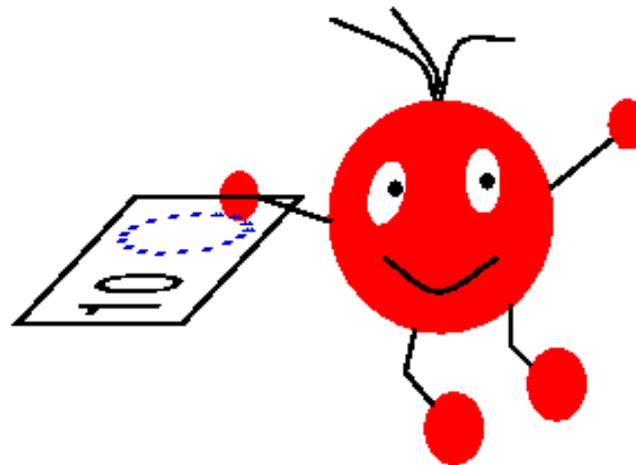
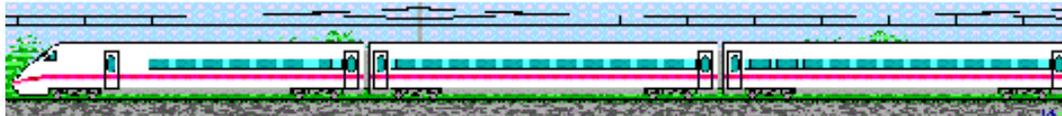
Ein Reisender in Raum und Zeit

Raum:



Zeit:

nach 1999

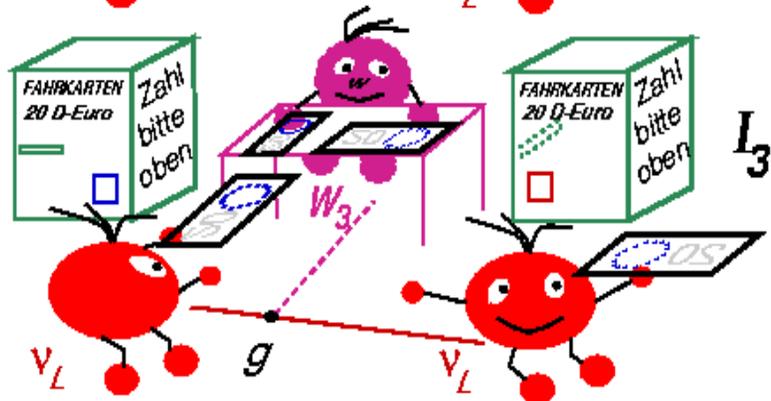
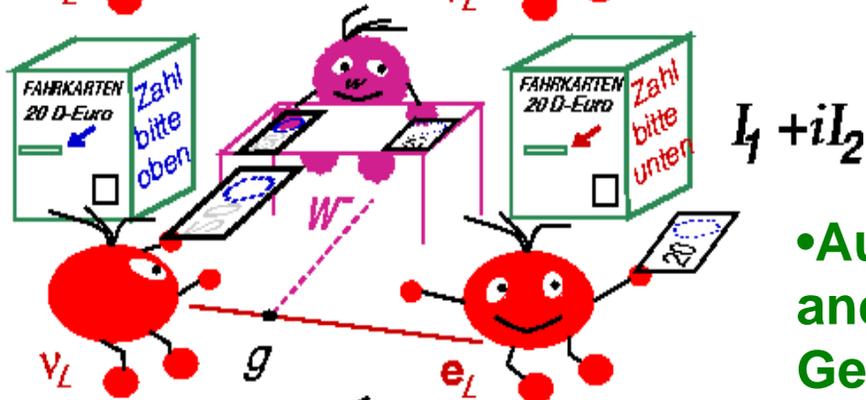
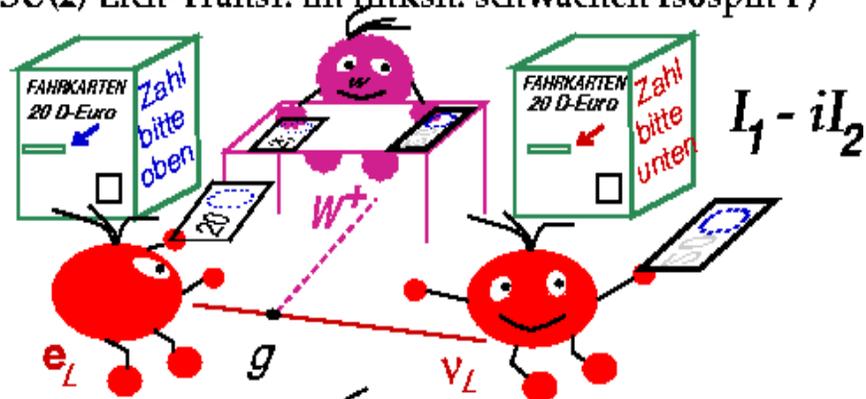


Für
Rechtshänder:
Überall dieselbe
Währung und
die gleichen
Automaten

Die Schwache Wechselwirkung

*Fahrkartenautomaten funktionieren überall anders,
aber nur für Linkshänder!*

(SU(2) Eich-Transf. im linksh. schwachen Isospin I)



Für Linkshänder:

e : Zahl oben

ν : Zahl unten

• Automaten haben überall andere Ausrichtungen des Geldeinzugs

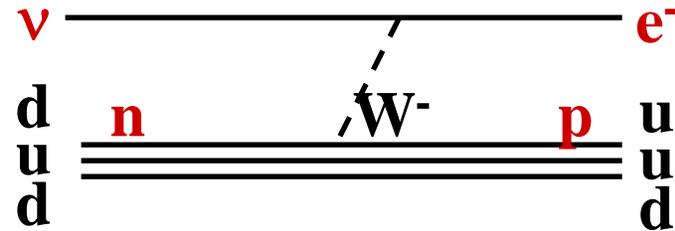
• Helfer sorgen für Beibehaltung der ursprünglichen Orientierung des Geldscheins (in bezug auf Vorschriftenrichtung)

Einfaches Bild

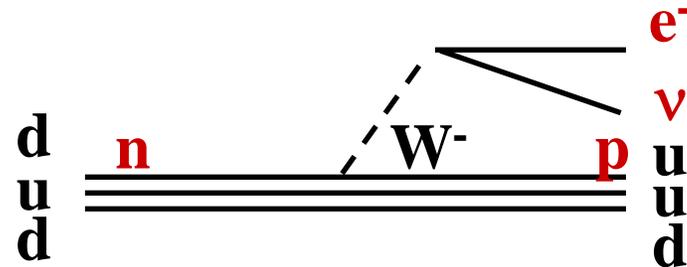
- Nur für *Linkshänder* (*linkshändige Eigendrehung*)
- Bestreben des *Reisenden* (*Teilchens*)
 - Behalte **Richtung** des *Geldscheins* (*Ladungspfeil*) bzgl. der **Vorschriftsrichtung** (*Koordinatenachsen*) bei lokaler Änderung der **Automaten** (*Eichung*) bei
- Änderung der **Richtung** (*Ladung*)
 - durch einen **Helfer** (*Eichteilchen: W^+, W^-, W_3*)
- **Häufigkeit** der **Umeichungen** (*Stärke g_w*)
 - bestimmt durch **Automatenfirmen** (*Naturkonstante*)

Erklärungen und Vorhersagen

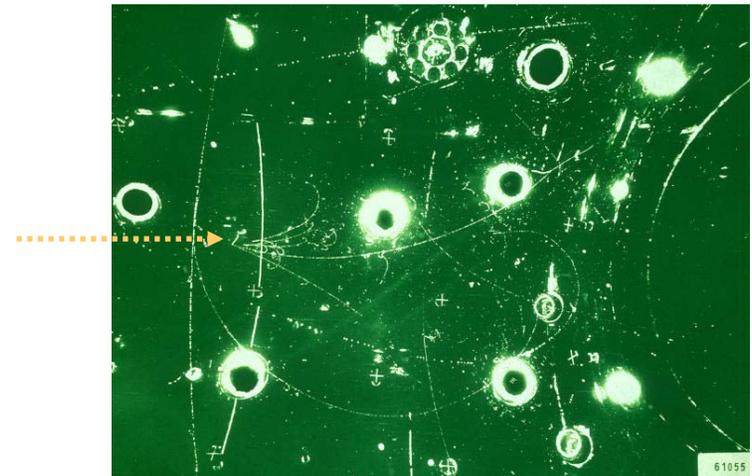
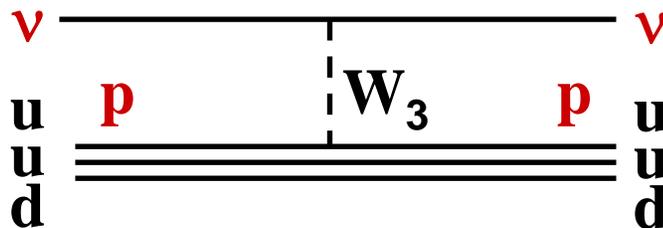
- Neutrino Wechselwirkungen:



- Der β -Zerfall des Neutrons:
- Der Sonnenzyklus



- Vorhersage: neutrale Neutrino Wechselwirkungen entdeckt 1973 am CERN



Die Elektroschwache Vereinigung

■ 1968 A.Salam und S.Weinberg

- noch eine Umeichung der Phase mit Häufigkeit g_Y
- Ladung $Y = Q - I_3$, Eichteilchen B

■ „Arbeitsteilung“ von B und W_3

- ergibt neue Eichteilchen γ und Z

- γ „koppelt an“ Q mit Stärke e
→ **Elektromagnetismus**

- Z „koppelt an“ $I_3 - (e/g_w)^2 Q$ mit Stärke $g_w / \sqrt{1 - (e/g_w)^2}$

■ Vorhersage („Higgs Mechanismus“)

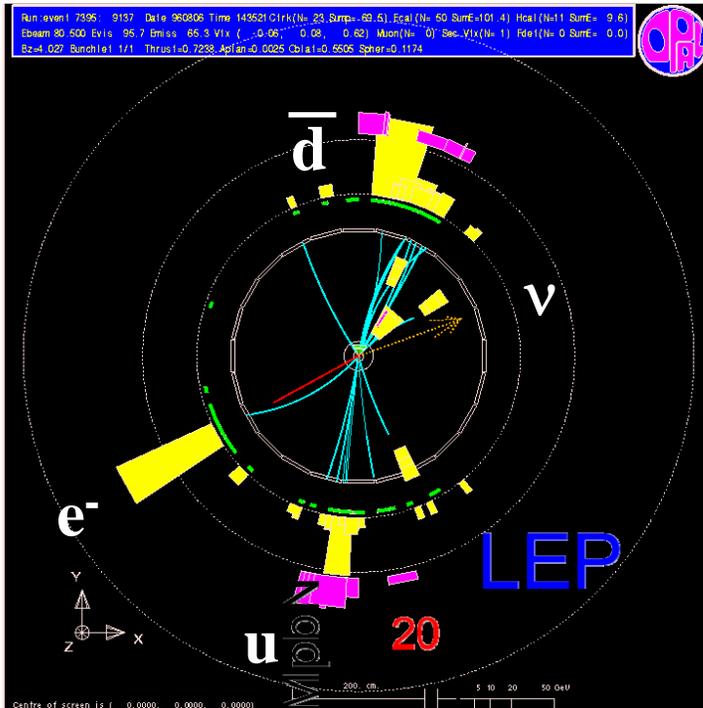
- (Masse des W) = (Masse des Z) * $\sqrt{1 - (e/g_w)^2}$

Theorie: $M_W = 80.38 \pm 0.03 \text{ GeV}$

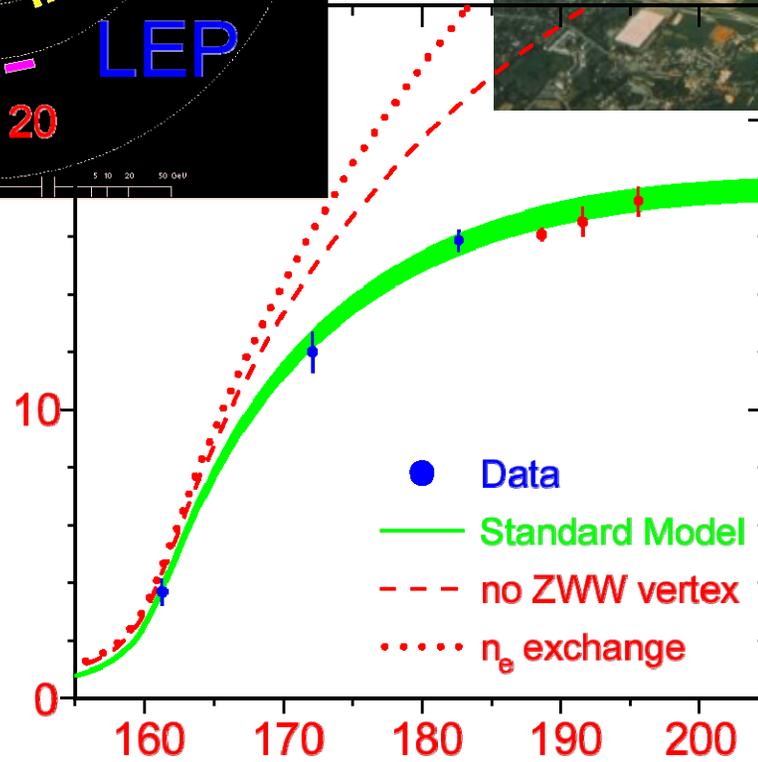
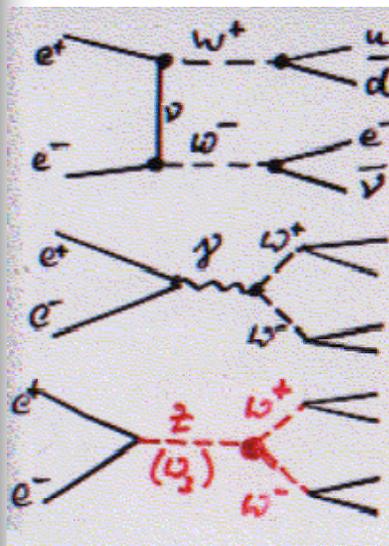
Exper.: $M_W = 80.39 \pm 0.04 \text{ GeV}$ (CERN und Tevatron)

stimmt auf 1/2 Promill genau

W^+W^- -Erzeugung am CERN



189 GeV: preliminary



Test der Schwachen W-Ladung auf wenige Prozent

Was haben wir erreicht?

- Wir kennen den Grundbaukasten der Materie
- Wir kennen die Bauanleitung
- Wir haben erste Antworten über das **Herstellungsprinzip** des Baukastens:
 - Wechselwirkungen entsprechen Umeichungen
 - Eichsymmetrien ergeben Vorschrift für die „Bausteinfabrik“ Natur → **Eichteilchen**
 - Eichteilchen sichern Symmetrie und erzeugen die jeweiligen Wechselwirkungen
- Experimentelle Bestätigungen sind eindrucksvoll
- **$L = T - V$** ist eine „**Weltformel für fast alles**“

Offene Fragen

- Vorhersage der Stärke der Wechselwirkungen?
- Warum diese Eichungen?
- Warum diese Bausteine?
- Warum gibt es noch zwei „Erweiterungsbaukästen“?
- Woher kommen die Teilchenmassen?
- Gibt es das Higgs Teilchen?
- Woher kommt die Verletzung der Spiegelsymmetrien?
- Was ist mit der Gravitation?
- Gibt es die ***Weltformel für alle Materie und alle Wechselwirkungen?***

