Probleme mit den Quarks im Schulunterricht

Pedro Waloschek
DESY, Hamburg

46. MNU-Tagung
Bremerhaven, 16. Nov. 1999

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Literatur:

Als Grundlage dieses Vortrages, meine beiden Büchlein:

"Neuere Teilchenphysik - einfach dargestellt“

AULIS Praxis-Reihe "Physik" #47, 1991,
110 S., DM 19,80.

"Besuch im Teilchenzoo - vom Kristall zum Quark“

rororo-science Taschenbuch, 1996,
278 S., z.Zt. vergriffen,
Restexemplare für Lehrer beim Autor!

Alle A4-Folien dieses Vortrages (im PDF-Format)
findet man auf meiner HomePage:

www.waloschek.de

frei zur Benutzung im Unterricht und
für wissenschaftliche Veröffentlichung

Fragen zum Thema: **walo@desy.de**

Und zum Nachschlagen, s. auch mein
dtv - Wörterbuch Physik
5500 Stichwörter, 586 Seiten,
mit Englisch-Deutsch-Verweisregister, DM 26,90

um 1930

Molekül
Atom
Atomkern

Urteilchen:

Elektron
(Neutrino)
Proton
Neutron

Urkräfte:

Kernkraft
el.magn. Kraft
(schw. Kraft)
Gravitation

...
1930: Neutrino
1932: Antimat.
1945: QED
1947: Pion
1948: Lambda
1964: u-d-s
~1967: GWS
1968: Partonen
~1970: QCD
1974: J/psi
1978: Ypsilon
1985: W, Z
1995: t
...

heute

Molekül
Atom
Atomkern

Urteilchen:

Elektron
Neutrino
u-Quark
d-Quark

Urkräfte:

Quarkkraft
el.magn. +
schw. Kraft
Gravitation

Auflösung **tausendmal** besser!

„Wechselwirkungen“ statt „Kräfte“!

Standardmodell!

Teil 1: Zum „Aufbau“ der Materie

1. Materie aus
   Elektronen, Protonen und Neutronen
   (Atom- und Kernphysik)

2. Materie aus
   Elektronen, u-Quarks und d-Quarks
   (einfachste Darstellung!)

3. Erweiterung:
   Der ganze Teilchenzoo

Teil 2: Die „Wechselwirkungen“

1. Die Kräfte oder „Wechselwirkungen“:

!

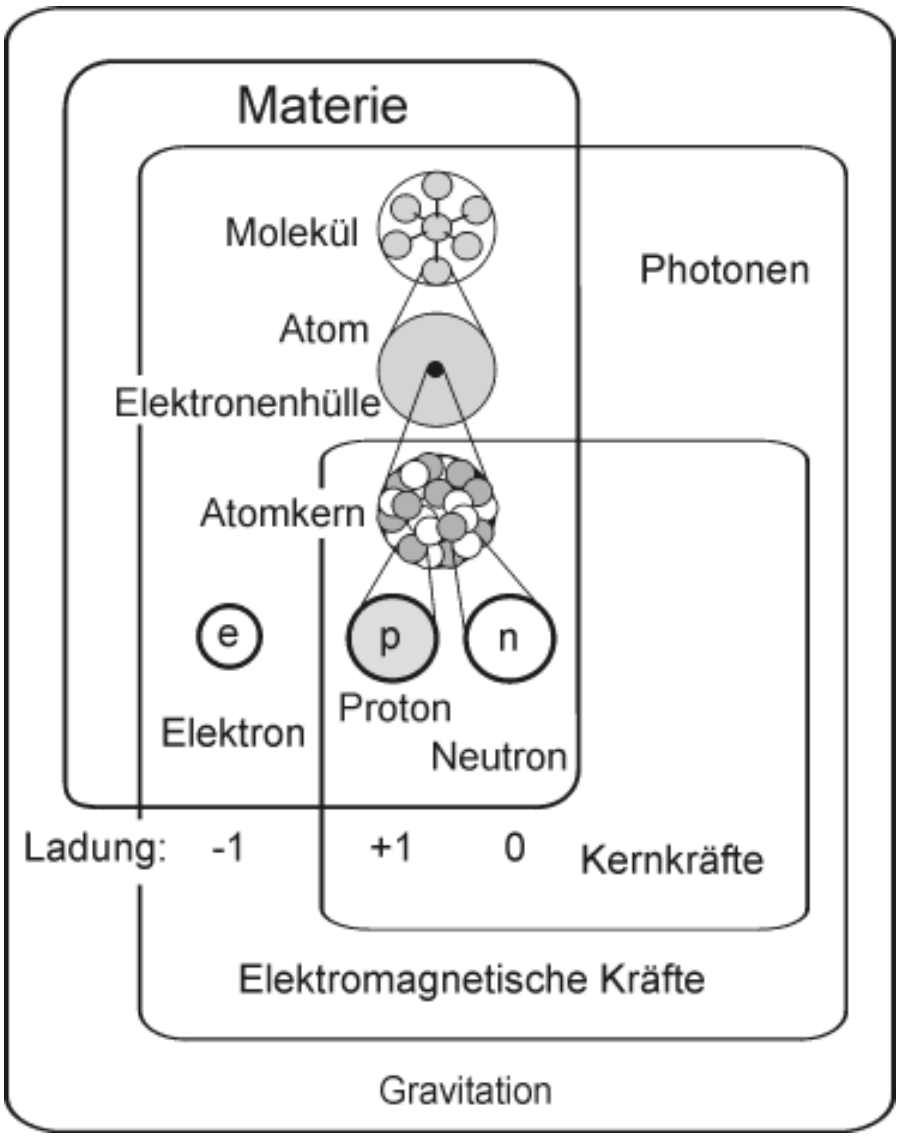
Der neue Begriff „Kraft“
Die Austauschteilchen, Heisenberg
Feynman, QED!!! QCD!

Statische Welt: Elektromagnetismus und starke Kraft

2. Die Umwandlungen:
   Fermi und die **W-Teilchen**
   GWS-Theorie und das **Z-Teilchen**
   Das erfolgreiche **„Standardmodell“**
   Das komplette Schema!

3. **Was noch fehlt!**

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65



vdi-97-x-4.gif

J. J. Thomson

Millikan

Perl

Rutherford

Pauli

Elektrische Ladungen, Kräfte
Das Elektron: Thomson...
Das Millikan-Experiment!
Atomphysik
Kernphysik, Proton, Neutron,
Das Pauli-Prinzip!
Die „Kernkräfte“
(Alles im Physik-Lehrbuch!)

Zweig

Gell-Mann

1964

Vorschlag der „Quarks“

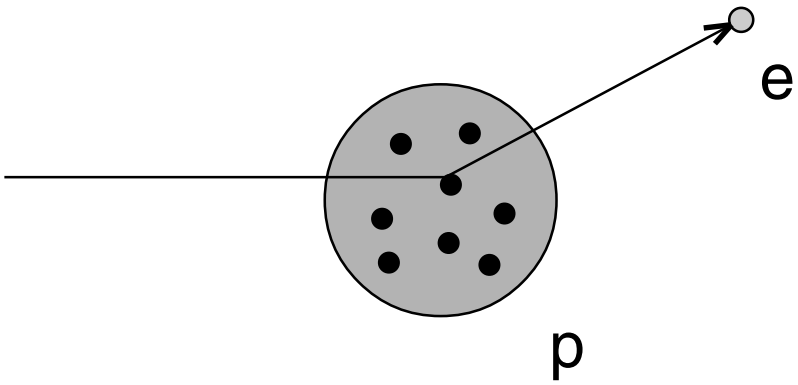
aufgrund der Regelmäßigkeiten
bei den damals beobachteten Teilchen

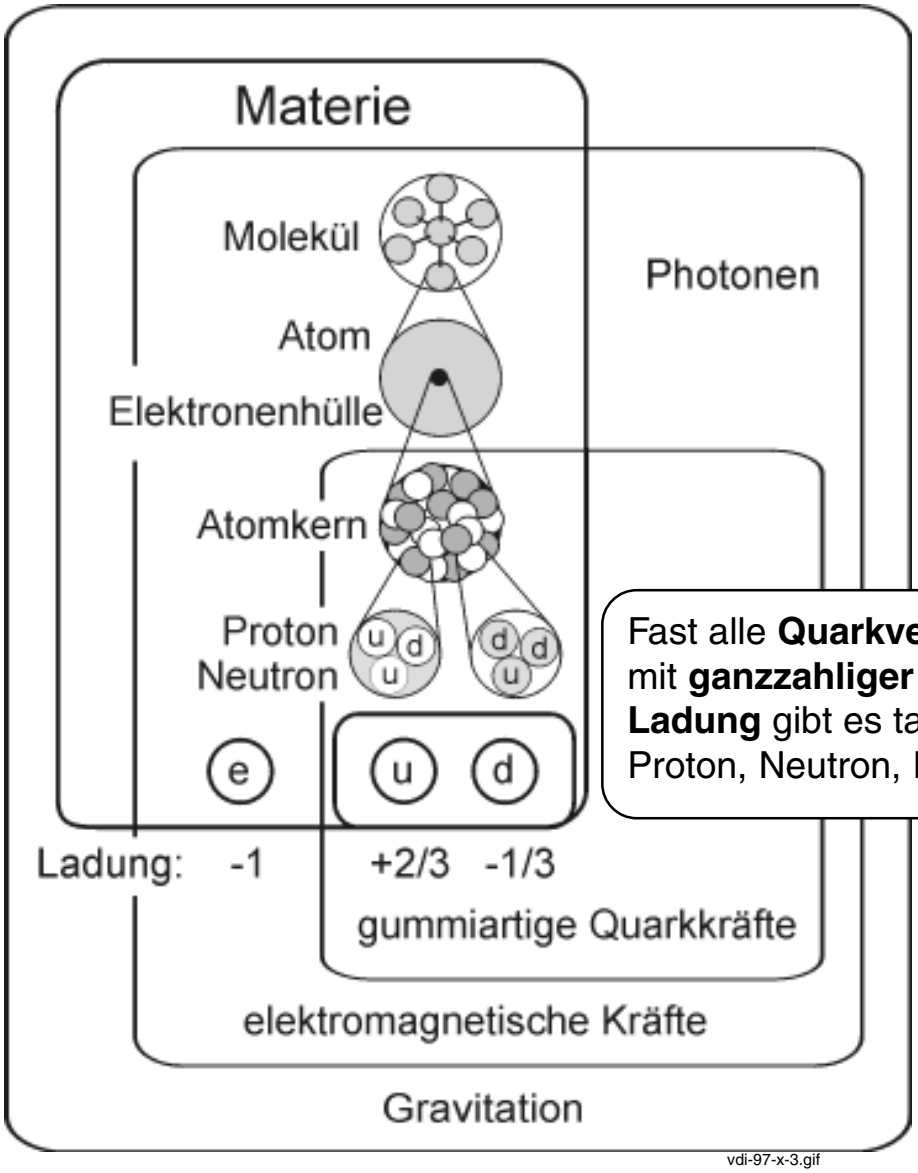
1968

Quarks („Partonen“) im Proton

beim Beschuß von Protonen
mit hochenergetischen Elektronen

(SLAC/MIT, wie Rutherford 1911!)



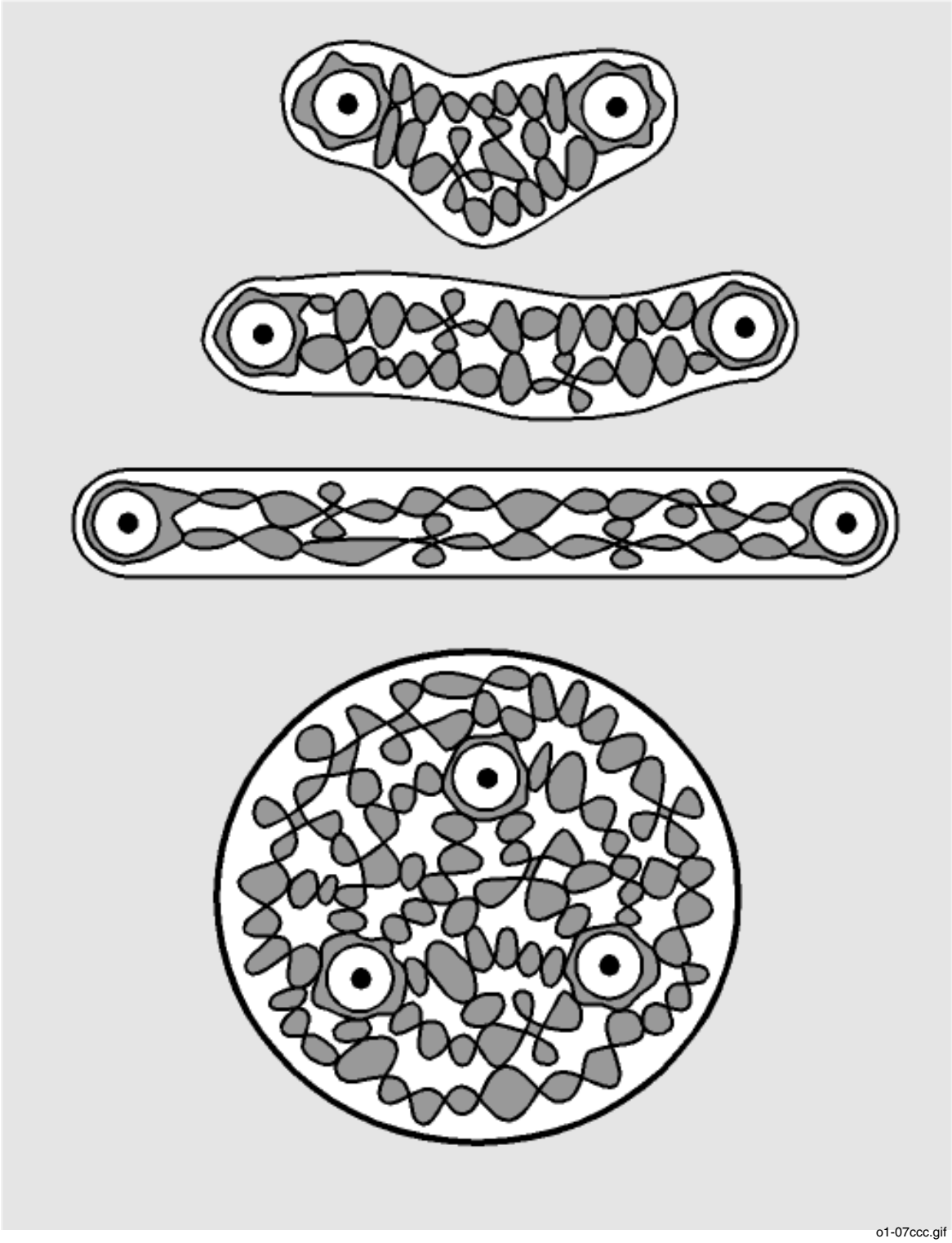


Fast alle **Quarkverbindungen** mit **ganzzahliger elektrischer Ladung** gibt es tatsächlich! Proton, Neutron, Deltas

Einführung der **Quarks**

„Quarkkräfte“ wie „Gummibänder“
Nukleon wie „Gummiblase“

==>



o1-07ccc.gif

Gummibänder - Gummiblase

(Modellvorstellungen)

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

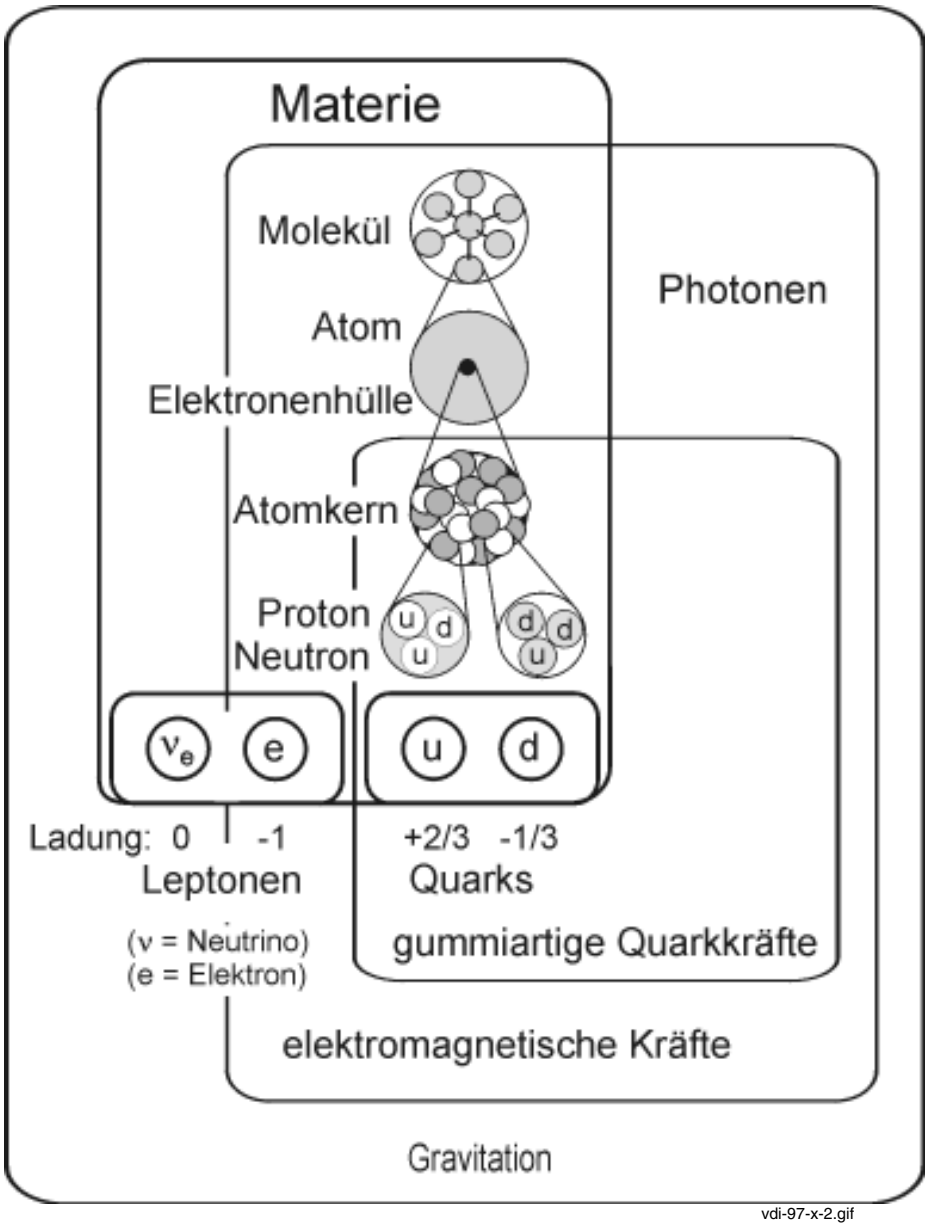
Betazerfall:
Neutron => Proton + Elektron
+ ?
Energie? Impuls?
Drehimpuls?

Neutrino! 1930

Poltergeist,1956

10 Milliarden Neutrinos aus der Sonne durchdringen unseren Kopf jede Sekunde!

Es gibt „Neutrinostrahlen“
an Reaktoren und Beschleunigern!



vdi-97-x-2.gif

Die „stabile Materie“,

die man sehen und fühlen kann.

1928

Aus der relativistischen Quantentheorie:
„Das Elektron hat einen Partner mit entgegengesetzter elektrischer Ladung!“

Dirac

Es wurde

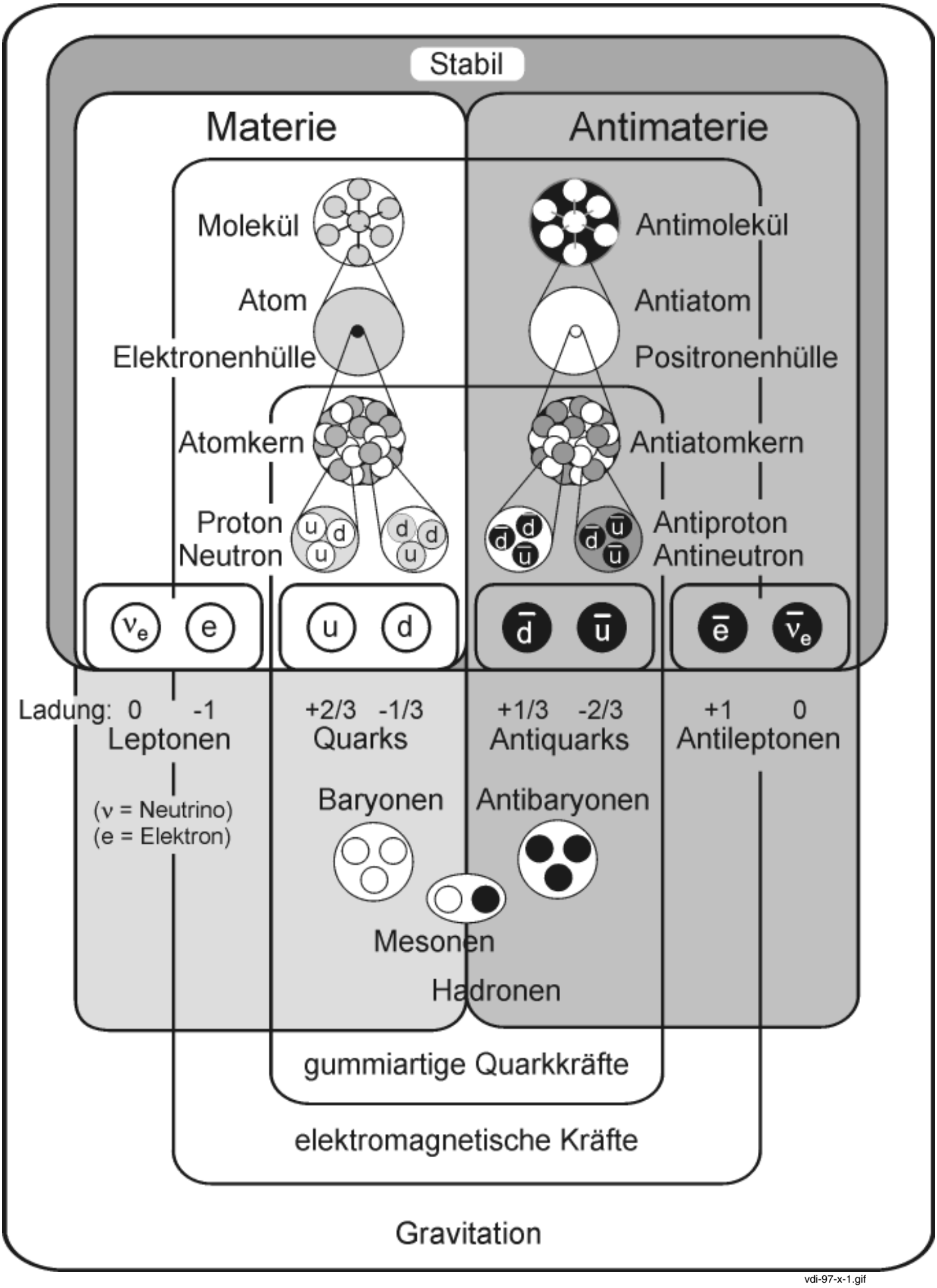
1932

in der Höhenstrahlung beobachtet!

Anderson

Alle Teilchen haben Antiteilchen!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65



vdi-97-x-1.gif

Definition der „Hadronen“, „Baryonen“ und „Mesonen“!

Schön,
wenn es hier zu Ende wäre!

Aber,

der Satz von Urteilchen
erscheint in der Natur

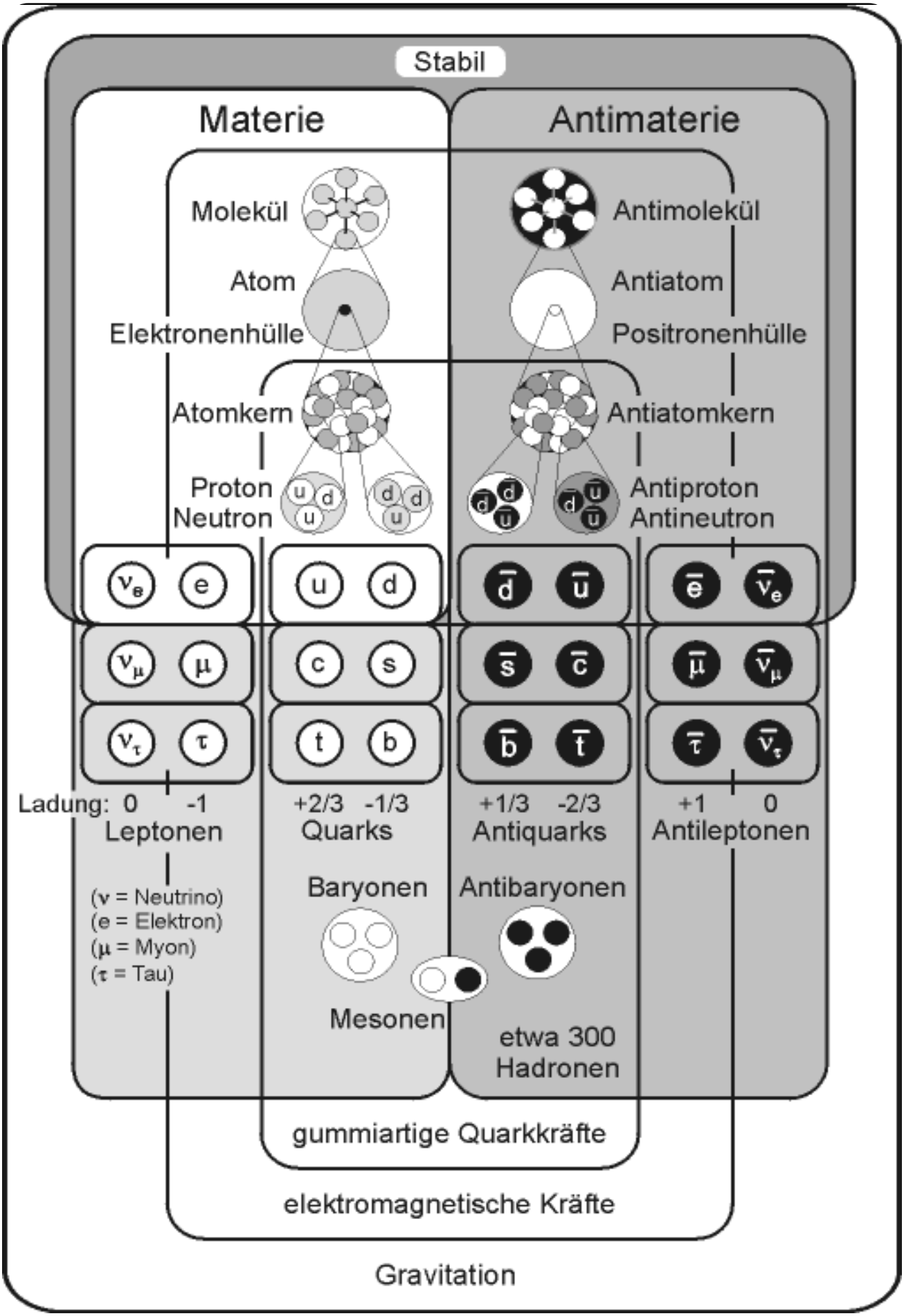
noch drei Mal,

mit jeweils höheren Massen,

und aus Gründen,
die heute noch
nicht bekannt sind!

Diese Urteilchen bilden nur einen
sehr kleinen Teil unserer Materie
und sie
verschwinden i.a. sehr schnell!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65



vdi-97-x.gif

Der komplette Teilchenzoo

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Warum verbinden sich Teilchen miteinander?

Wieso verschwindet ein großer Teil des „Teilchenzoos“?

Zwischen den Teilchen wirken bestimmte Kräfte, die sie zusammenhalten und sie ineinander umwandeln. Man nennt dies treffend

„Wechselwirkungen“

Diese müssen wir allerdings neu definieren!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Quarks und Elektronen
werden durch drei

Urkräfte

zusammengehalten:

die elektromagnetische Kraft

zwischen elektrisch geladenen Teilchen

die starke Kraft

zwischen den Quarks

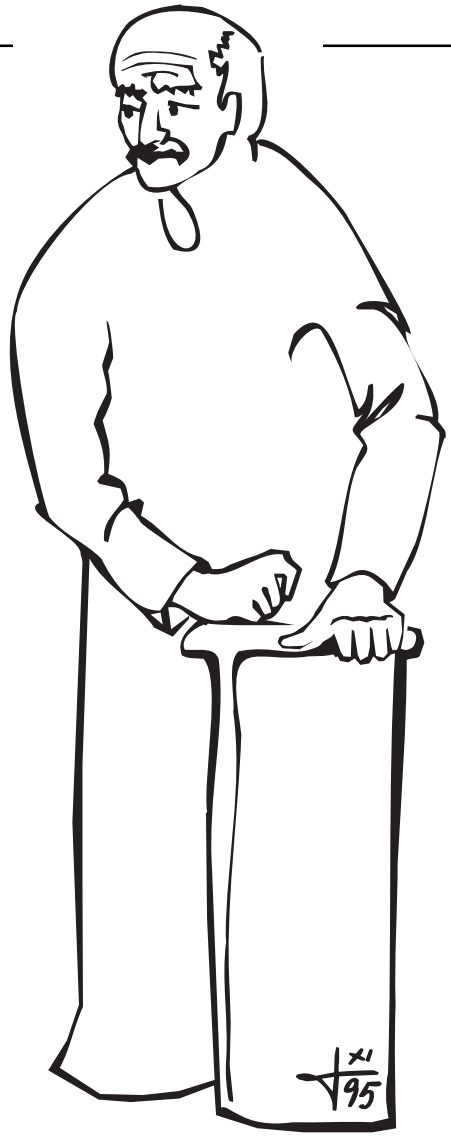
und

die Gravitationskraft

zwischen Teilchen mit Masse

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Quanten-theorie



Planck, 1900
Wirkungsquant!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Quantentheorie: Ein neuer Begriff
„Wechselwirkung“
wird jetzt eingeführt!

Alle Kräfte der Natur
wirken zwischen bestimmten
Ladungen
und werden durch besondere
Bindeteilchen
übertragen.

Die Kraftfelder sind also „quantisiert“,
sie sind in kleine Portionen zerhackt,
so wie die Materie auch.

Die entsprechenden Theorien gehören
zu den schon länger bekannten **„Eichtheorien“**.

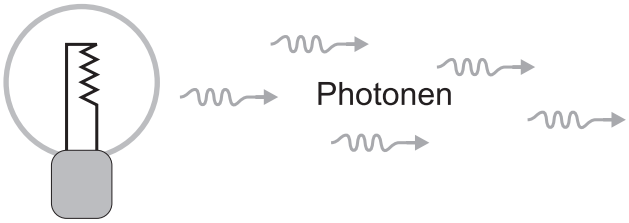
Bindeteilchen = Austauschteilchen = Kräfteträger

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Zwei wichtige Bemerkungen:

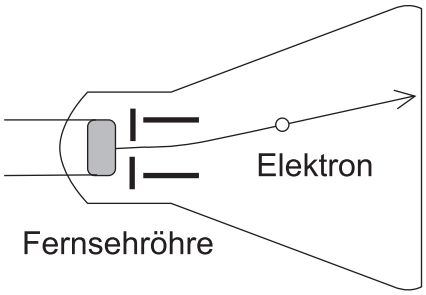
Alle Bindeteilchen sind „Bosonen“

sie können in beliebiger Zahl abgestrahlt und eingefangen (absorbiert) werden. Beispiel:



Alle Urteilchen sind „Fermionen“

(s. Kernphysik, Pauli-Prinzip...) Beispiel:



Man kann keine einzelnen Elektronen (oder etwa elektrische Ladungen) „erzeugen“, sondern nur „Paare“: ein negatives und ein positives!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Die Abstrahlung eines Kräfteträgers:

(a) a → b + K

Die Absorption eines Kräfteträgers:

(b) a + K → b

Die Vernichtung von zwei Teilchen, die sich in einen Kräfteträger verwandeln:

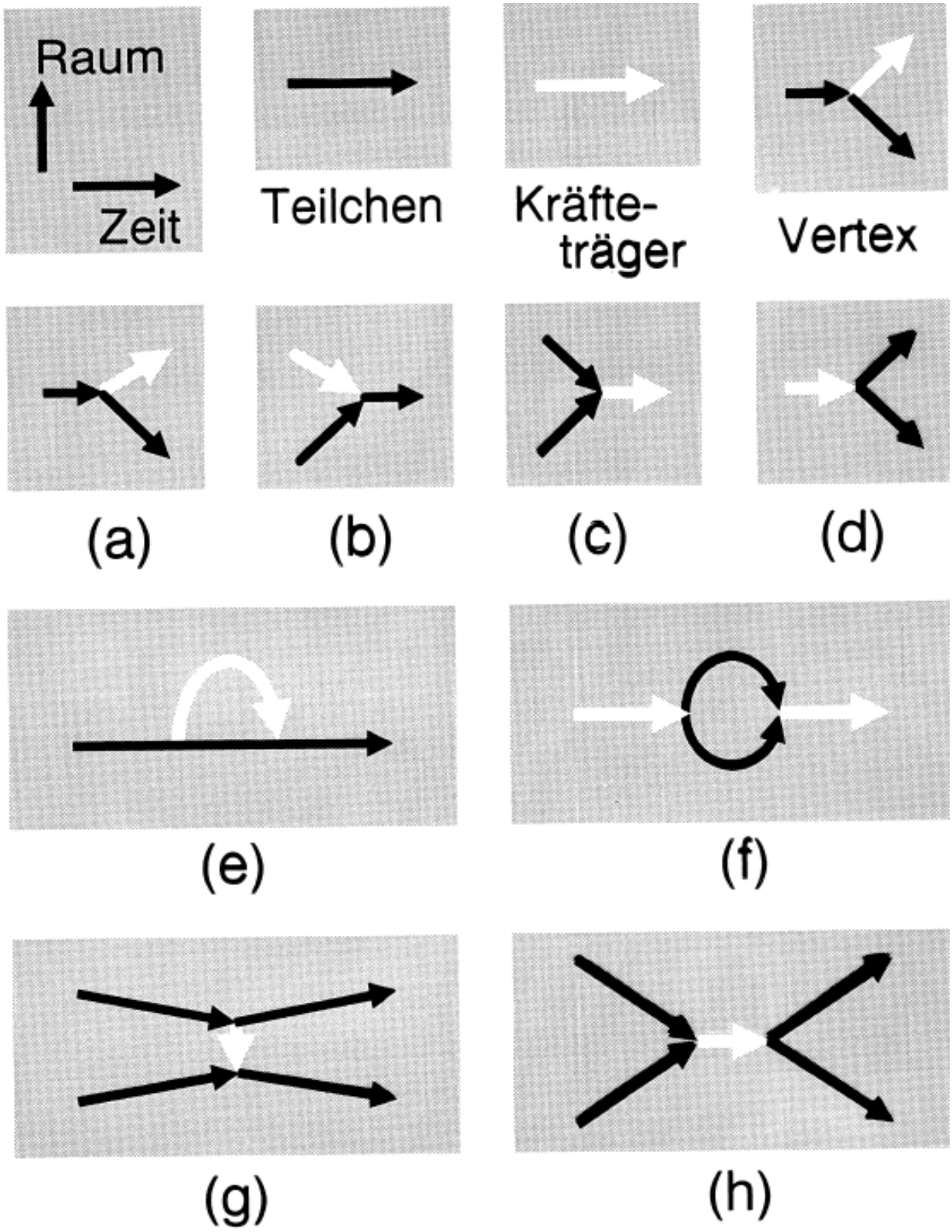
(c) a + b → K

Die Entstehung eines Teilchenpaares aus einem Kräfteträger:

(d) K → a + b

Die wichtigsten „Urvorgänge“

Aus: "Neuere Teilchenphysik - einfach dargestellt" von P. Waloschek, 4. Auflage, Dez. 1991, © Aulis Deubner



Ihre Darstellung als Feynman-Graphen

Aus: "Neuere Teilchenphysik - einfach dargestellt" von P. Waloschek, 4. Auflage, Dez. 1991, © Aulis Deubner

Die sehr sonderbaren "Bindeteilchen"

Wenn ein ruhendes Elektron
ein Photon abstrahlt
und dabei aber weiterhin Elektron bleibt,
hat das System danach
mehr Energie als vorher!

ⓔ <===> ⓔ + Photon

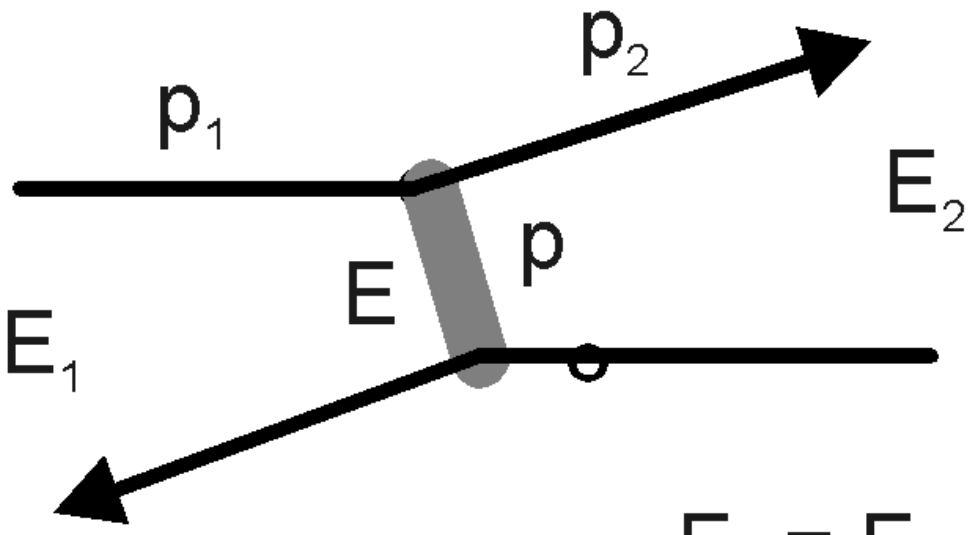
Entsprechend umgekehrt gilt es
bei der Absorption eines Photons
durch ein Elektron.

Wenn sich ein Elektron-Positron-Paar
(Im Schwerpunktsystem des Paares)
in ein Photon verwandelt:

Elektron + Positron <===> Photon

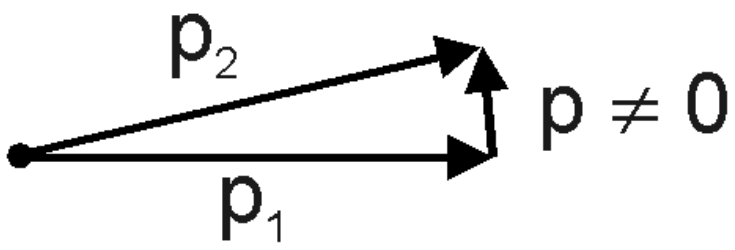
kann das „Photon“
keinen Impuls (Wellenlänge) haben (?)
(Umgekehrt bei der Paarezeugung)

Elastische Streuung
(im Schwerpunktsystem)



$$E_1 = E_2$$

$$E = E_2 - E_1 = 0$$



Das "Austauschteilchen" hat:

$$(m \cdot c^2)^2 = E^2 - (p \cdot c)^2 < 0 \quad \text{und}$$

$$ß = p \cdot c / E = \infty \quad !!!!$$

Die „Bindeteilchen“ sind sehr anschaulich,
solange man nicht versucht
ihre „Bewegung“ zu berechnen.

Mechanische Undinge!

Mit Ausnahme der Licht-Photonen
kann man bei
praktisch allen Bindeteilchen
keine „Bahnen“ berechnen
oder sie „direkt“ beobachten
und sie werden als

„virtuell“

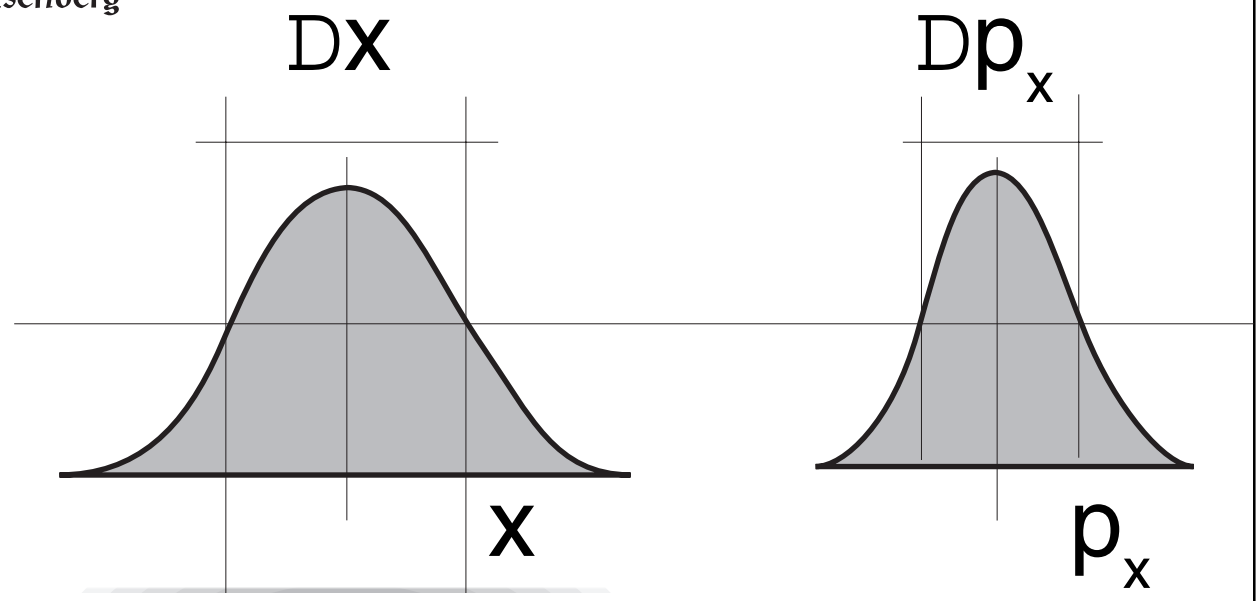
bezeichnet,
obwohl sie sehr wohl „existieren“!

Dies kann **NUR** im Rahmen der
Unbestimmtheitsbeziehungen
vestanden werden! ===>

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

$$\Delta E \times \Delta t \geq h/2\pi$$

$$\Delta p_x \times \Delta x \geq h/2\pi$$

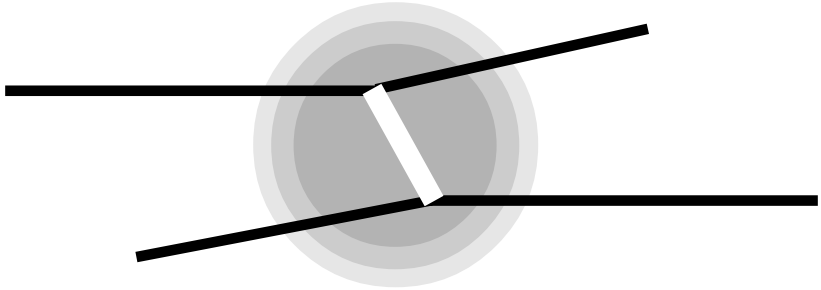


(Das Gleichzeichen gilt nur für Gaußverteilungen)

Beispiele:

Atome (Elektronen, Kern)
Atomkern (Nukleonen)
Proton (Quarks, Gluonen)

Wechselwirkungen!



1944-1948

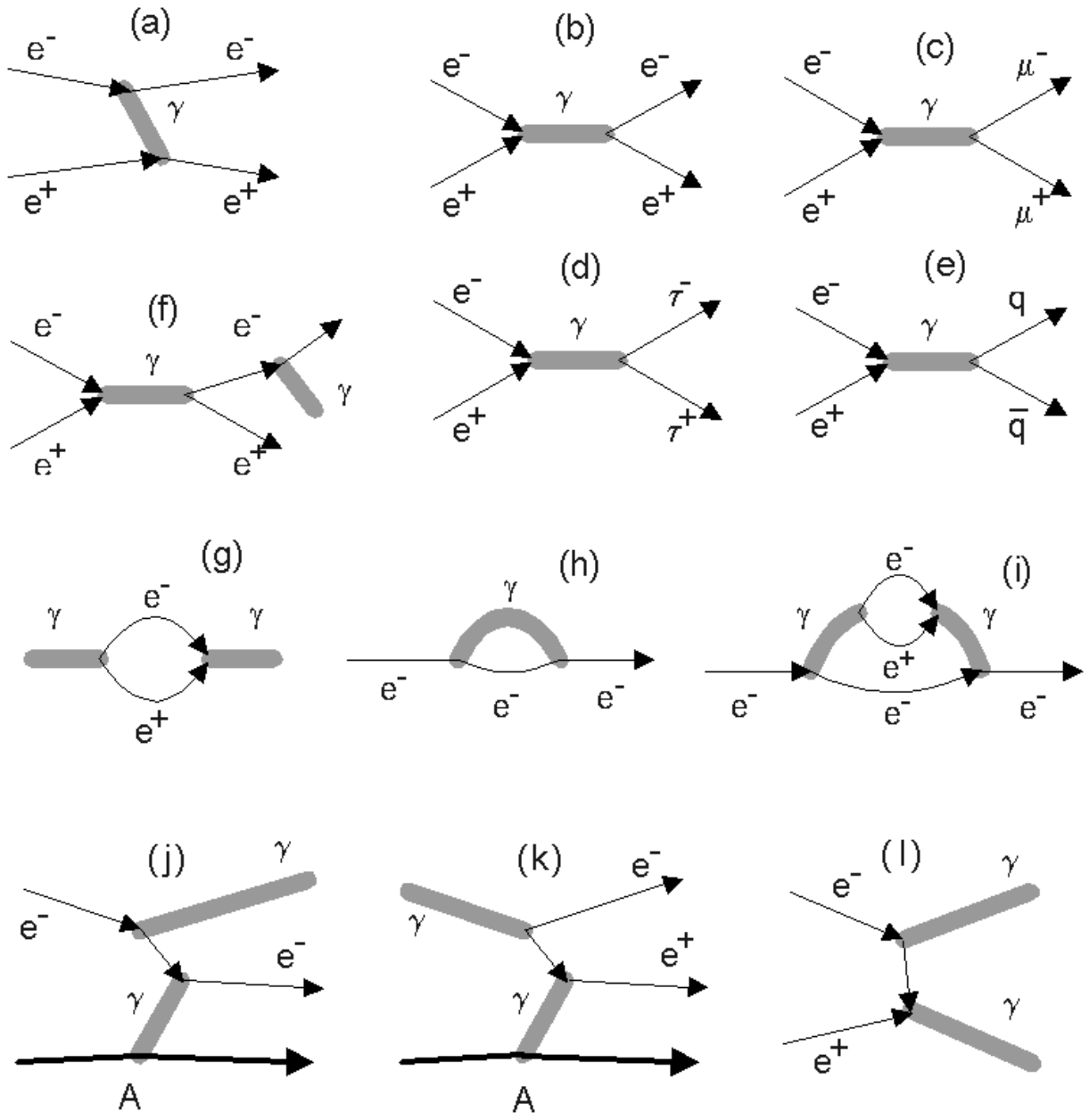
QED

„Quantenelektrodynamik“

Wesentliche Verbesserung der quantentheoretischen Berechungen elektromagnetischer Vorgänge!

(Magnetisches Moment des Elektrons!)

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65



Einige Feynman-Graphen der

QED

Die Stärke der QED
liegt in der Schwäche der
elektromagnetischen Kraft,
also in der "Kleinheit" der
elektrischen Ladung, was mit der
dimensionslosen **„Kopplungskonstante“**

$$\boxed{1/137}$$

ausgedrückt wird.
(Anschauliche Deutung: "Photos")

Ein Vorgang wird i.a. als **Überlagerung**
mehrerer Feynman-Graphen berechnet.
Schon das **Hauptdiagramm** liefert
i.a. eine gute Näherung.

Die Beiträge komplizierterer Graphen
nimmt schnell ab. Man spricht von
„perturbativen Berechnungen“

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Lobeshymne auf die

QED

Genaueste je von Menschen aufgestellte Theorie

(Allg. Relativität?)

Grundlage aller elektromagnetischen Vorgänge,

u.a. das Verständnis der
Atome und Moleküle (Chemie),
die Theorie der elektrischen Leitung
(Metalle, Halbleiter...),
Magnetismus, Supraleitung,
Elektromagnetische Strahlung,
Optik (Quantenoptik, Laser, CDs),
sehr viel der heutigen Technologie usw.

Muster und Vorbild für die nachfolgenden Theorien!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Im Sinne der QED
wurde für die Kräfte
zwischen den Quarks die

QCD

oder

„Quantenchromodynamik“

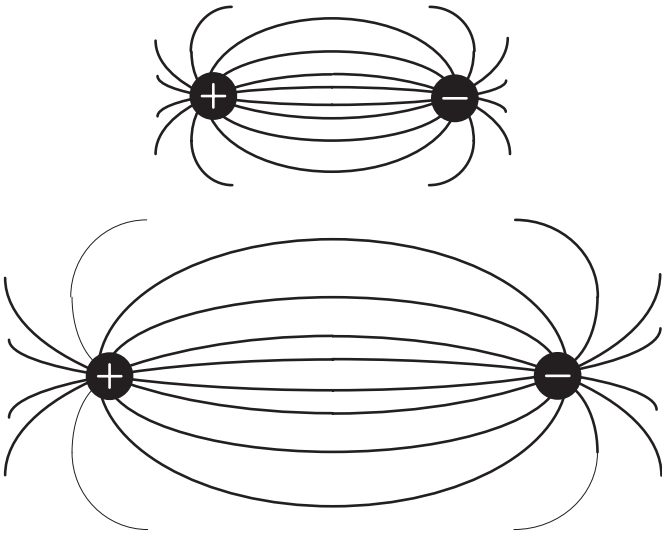
entwickelt.

Statt elektrischen Ladungen,
Farbladungen

Statt Photonen,
Gluonen

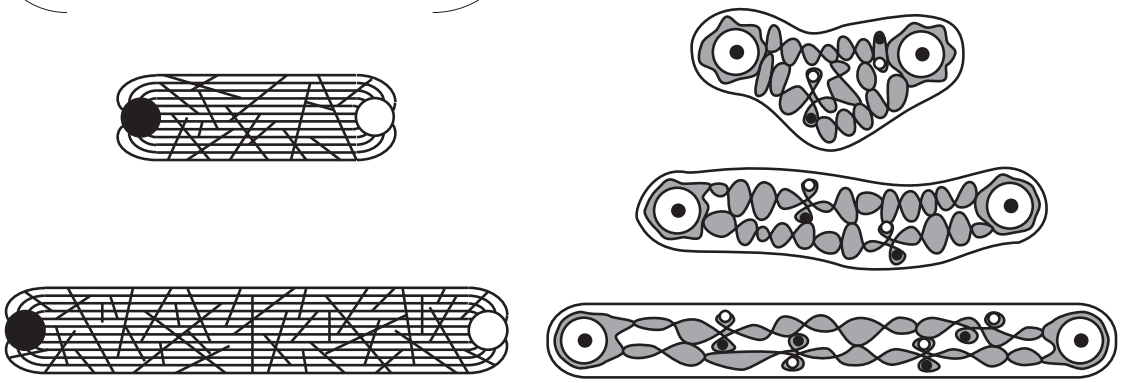
© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

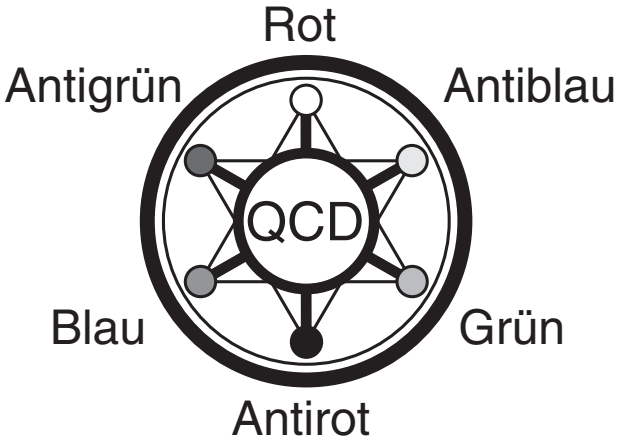
Gluonen und Farbkräfte

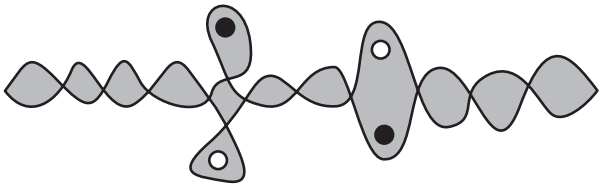


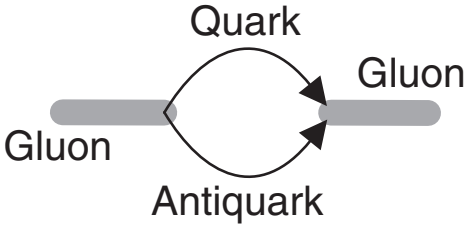
QCD

Quanten-
Chromo-
Dynamik







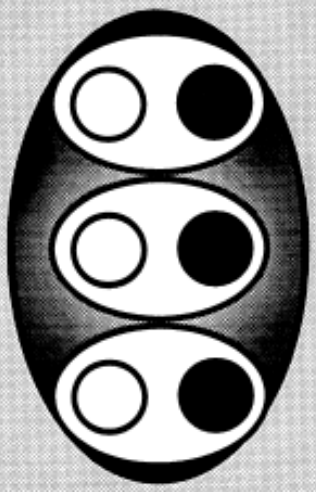


© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Die drei Farbladungen ergeben zusammen eine farbneutrale Verbindung

Die drei Antifarbladungen ergeben zusammen eine farbneutrale Verbindung

Farbladungen und ihre Antifarbladungen neutralisieren sich gegenseitig

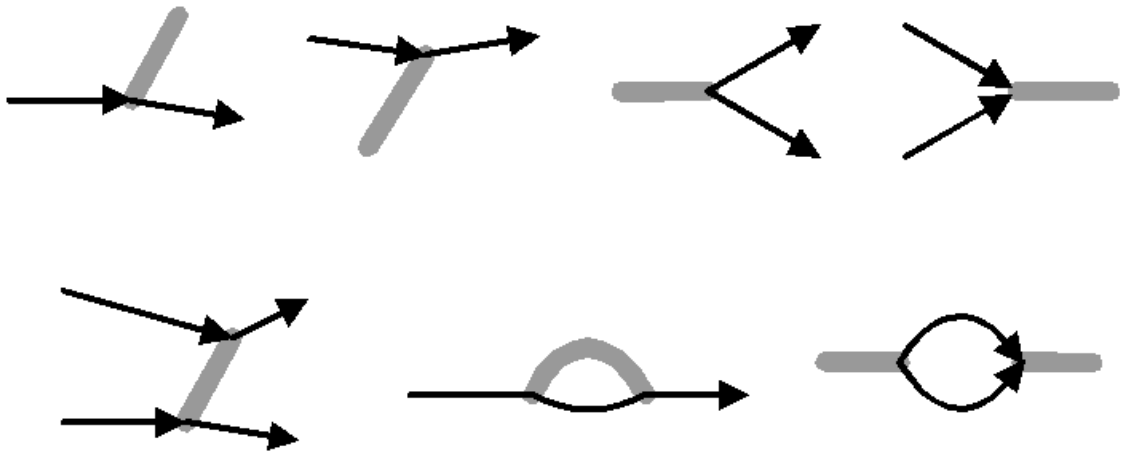


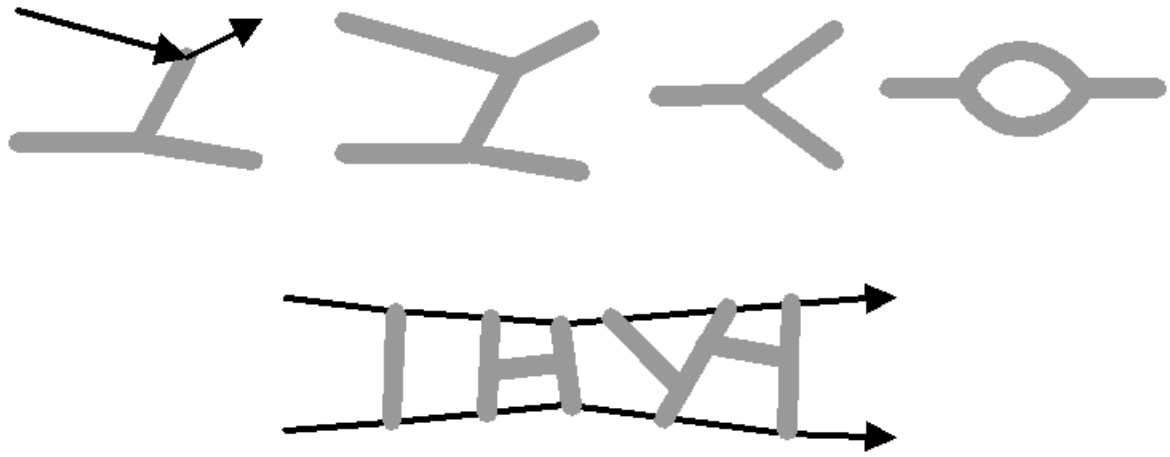
Frei erscheinen in der Natur nur farbneutrale Teilchen

Die Grundregeln der Farbkombination

Aus: "Neuere Teilchenphysik - einfach dargestellt" von P. Waloschek, 4. Auflage, Dez. 1991, © Aulis Deubner

Die Gluonen haben auch Farbladungen!





Die besonderen Gluonen-Graphen der

QCD

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Die Schwäche der QCD
liegt in der Stärke der Farbkräfte.

Die dimensionslose
Kopplungskonstante ist von der
Größenordnung

$$\boxed{1/5}$$

wodurch Graphen mit mehr Vertices
grosse Beiträge liefern!
Die "Reihenentwicklung" konvergiert
schlecht oder gar nicht. Keine
„perturbativen Rechnungen“ möglich!

Berechnungen
sind nur numerisch möglich!

Die größten Computer der Welt
werden für QCD-Rechnungen eingesetzt,
auch für Probleme der Kernphysik.

Kassensturz!

Wir wissen jetzt,
„was die Welt
im Innersten zusammenhält“:

QED & **QCD**

el. Ladungen	Farbladungen
Photonen	Gluonen
1/137	1/5

Proton, Neutron, Baryon, Meson,
Kernkraft, Atom, Molekül, Materie,
Technik usw.

Bemerkungen:
Bei allen Wechselwirkungen (Vertices)
der QED und QCD bleibt, neben der
elektrischen Ladung und der Farbladung,
auch die „Generation“ **genau erhalten**.

Heisenbergs **Unschärfe** gilt dagegen für
Energie, Impuls und Drehimpuls,
auch in den Wechselwirkungsgegenden.

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Offene Fragen:

Warum und wie zerfällt der Teilchenzoo?

und

Warum leben wir? (Sonnenenergie)

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Mit **QED** und **QCD**
haben wir eine **statische Welt**
aufgebaut!

Außer bestimmten Vorgängen, wie z.B.
die Erzeugung und Vernichtung von
Teilchen-Antiteilchen-Paaren,
können wir keinerlei
Umwandlungen
von Urteilchen ineinander beschreiben!

Die elektrisch neutralen
Photonen und **Gluonen**
können solche Umwandlungen
NICHT verursachen,
wie man aus der
nach Ladung geordneter
Urteilchenliste
leicht entnehmen kann! ==>

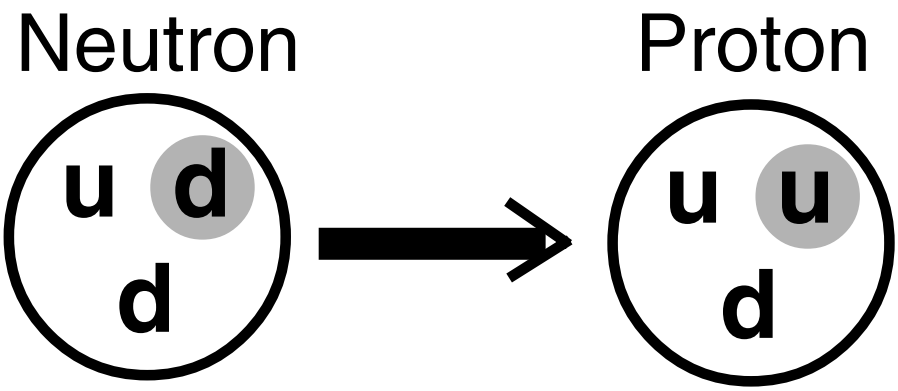
Generation:

1.	2.	3.	Ladung
e^+	μ^+	τ^+	+1
u	c	t	+2/3
$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$	+1/3
ν_e	ν_μ	ν_τ	0
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	0
d	s	b	-1/3
$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$	-2/3
e^-	μ^-	τ^-	-1

Die Urteilchen, nach ihrer elektrischen Ladung geordnet

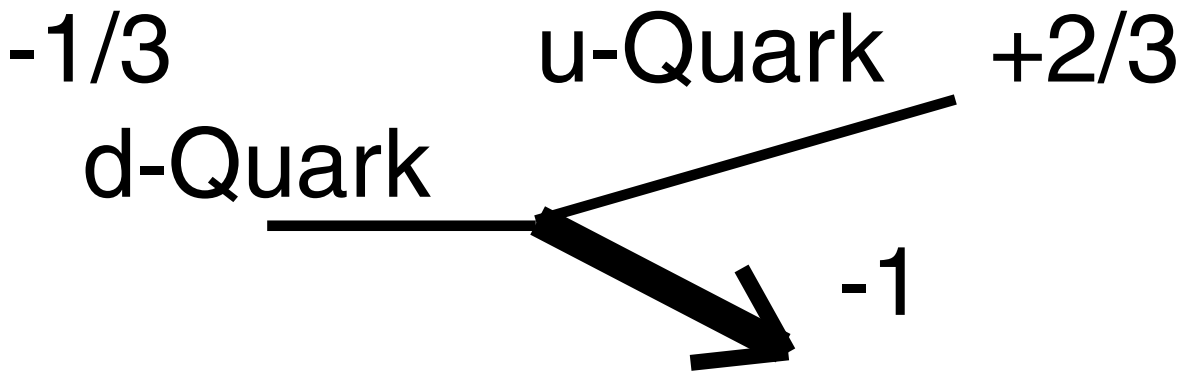
Aus: "Neuere Teilchenphysik - einfach dargestellt" von P. Waloschek, 4. Auflage, Dez. 1991, © Aulis Deubner

Beta-Zerfall



1934

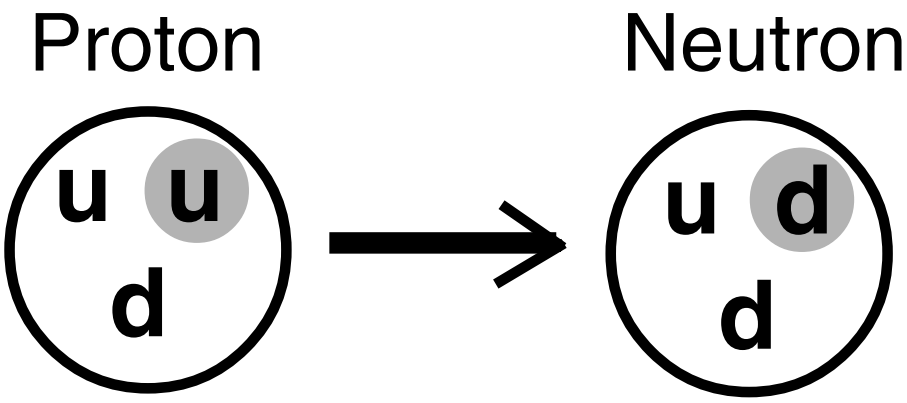
Ein **d-Quark** (Ladung -1/3)
verwandelt sich in
ein **u-Quark** (Ladung +2/3)



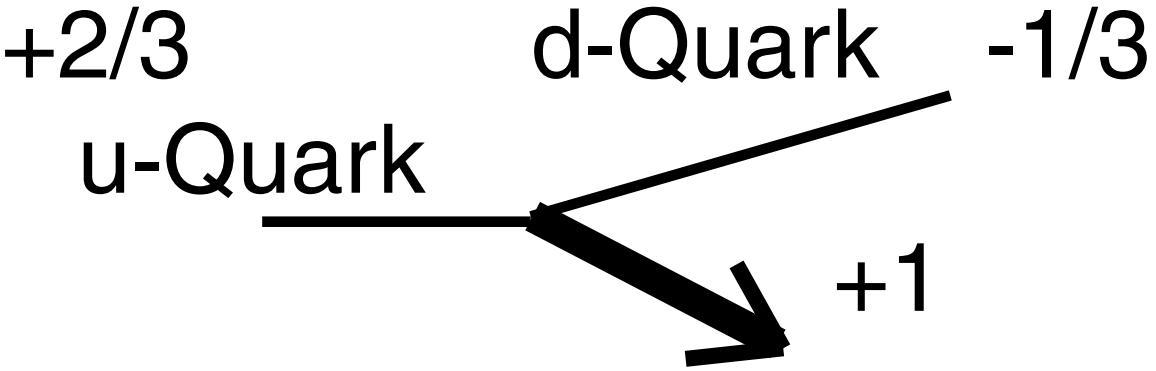
Ein Austauschteilchen mit
Ladung -1 ist nötig:
das W^--Teilchen.
Eine neue Kraftart!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Im Zentrum der Sonne:



Ein **u-Quark** (Ladung +2/3)
verwandelt sich in
ein **d-Quark** (Ladung -1/3)



Ein Austauschteilchen mit
Ladung +1 ist nötig:
das W^+-Teilchen.
Eine neue Kraftart!

Es gibt also eine weitere

Urkraft

mit sehr schweren Austauschteilchen, die man

W-Teilchen

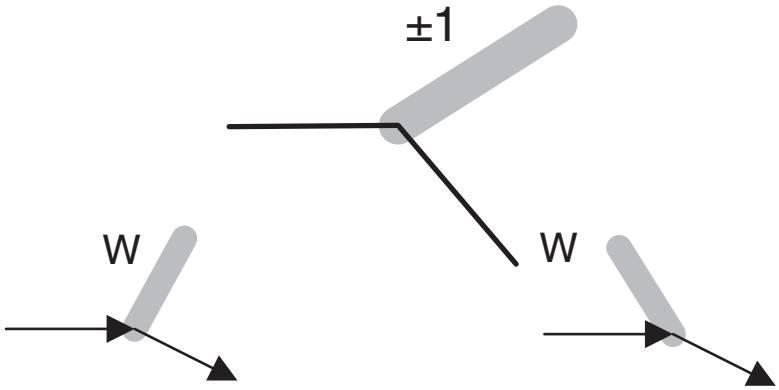
oder „Weakonen“ genannt hat, die

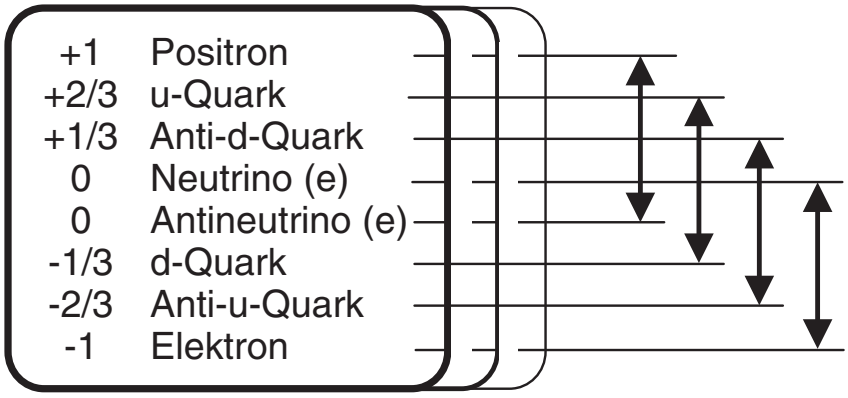
elektrisch geladen

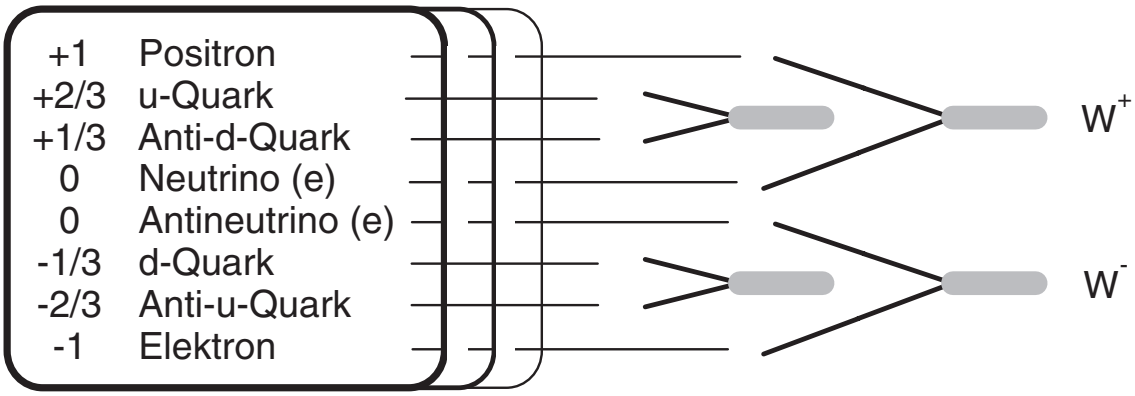
sind!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Die W-Bindeteilchen







Neue Paarbildungen!

W^+ <——> e^+ + Neutrino

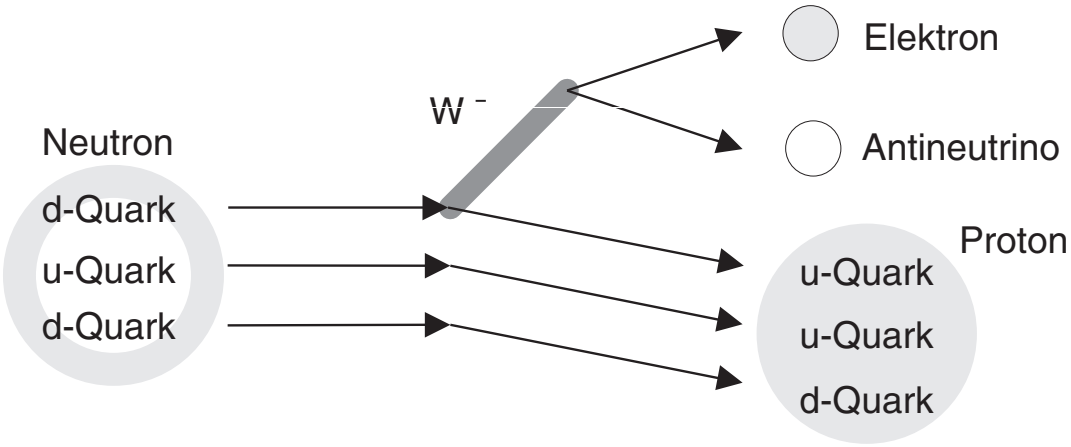
W^+ <——> u-Quark + Anti-d-Quark

W^- <——> e^- + Anti-Neutrino

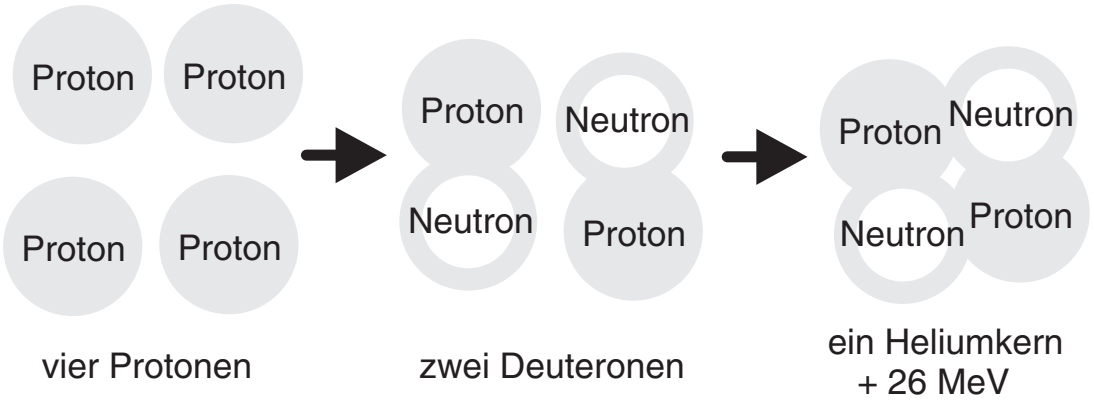
W^- <——> d-Quark + Anti-u-Quark

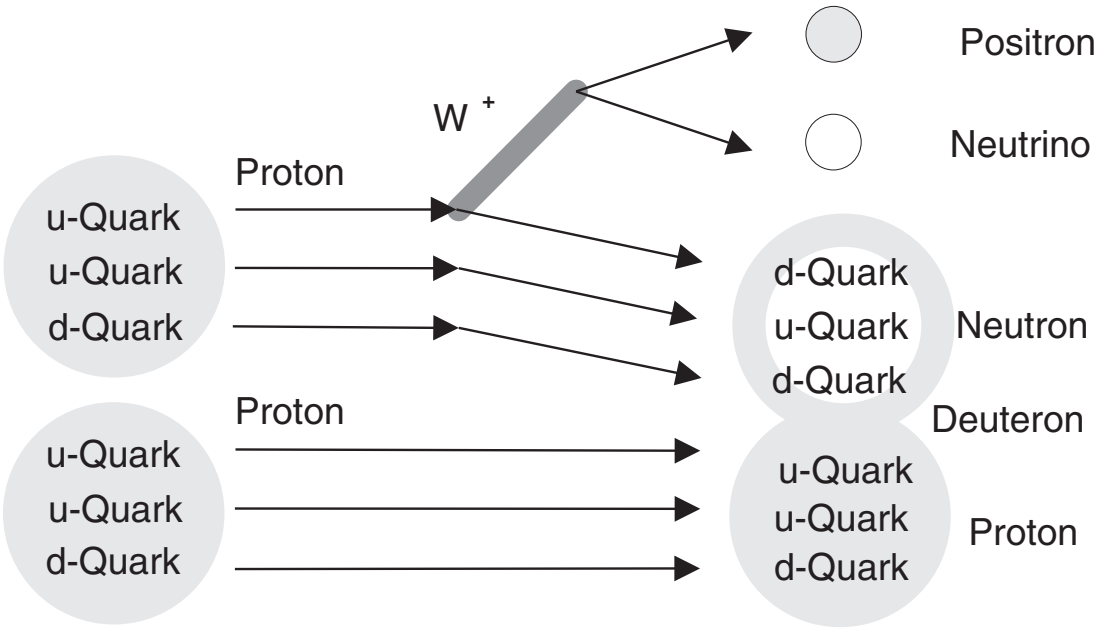
© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Betazerfall

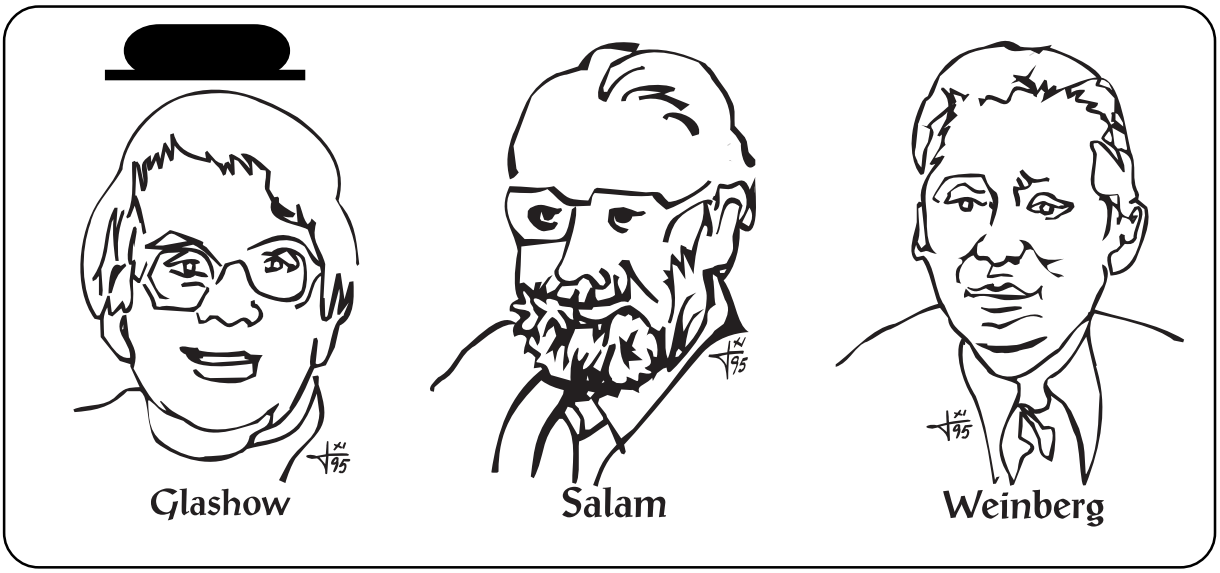


Sonnenenergie





© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65



GSW

1967-1968: Theorie der elektroschwachen Kräfte

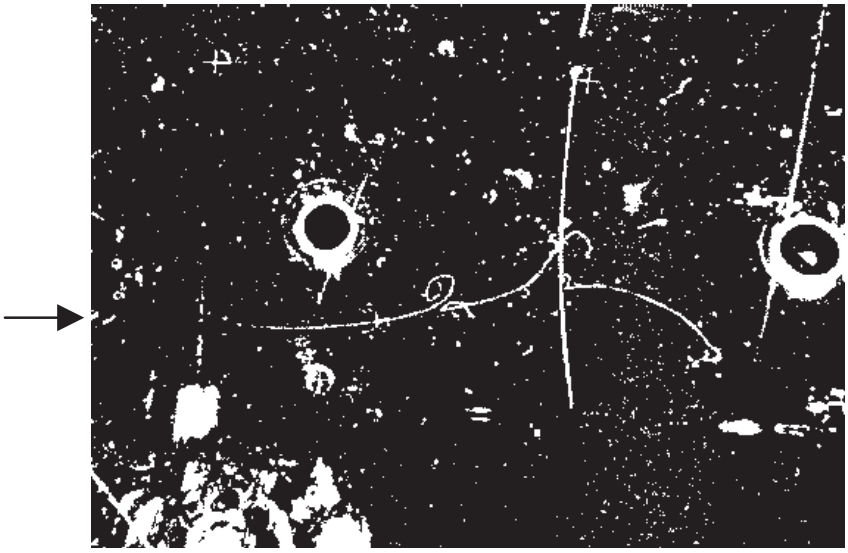
El.-magn. Kraft:	**Photon** (m = 0)
Schwache Kraft:	**W-Plus**-Teilchen
	W-Minus-Teilchen
neu dazu:	**Z-Null-**Teilchen **(???)**

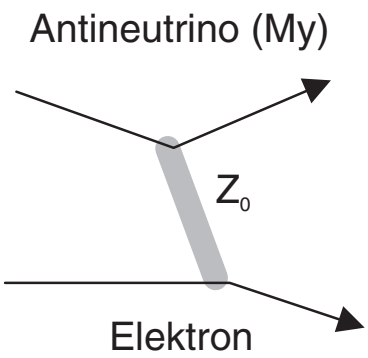
W und Z sind schwerer als Eisenkerne!

Bem.: Einige besondere Regeln:
Leptonenzahlerhaltung!
Generationswechsel nur mit W!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

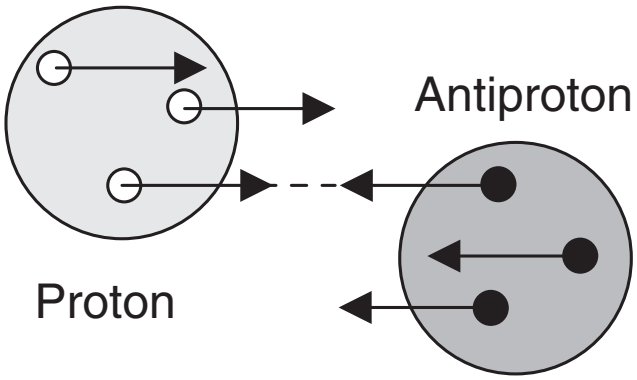
Die Träger der schwachen Kräfte





1973

u + Anti-u —> Z_0
d + Anti-d —> Z_0
u + Anti-d —> W^+
d + Anti-u —> W^-



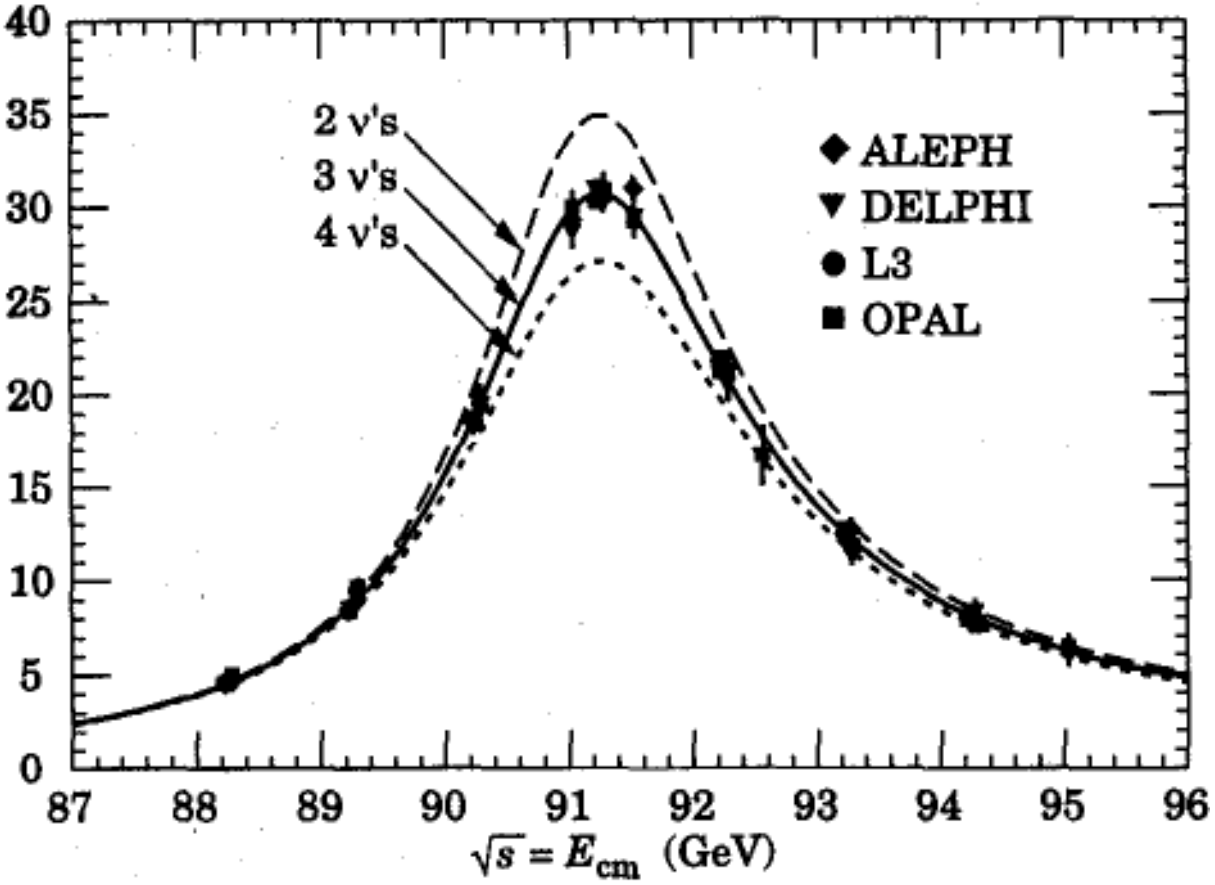
1983

W^+ —> Positron + Neutrino
W^+ —> Antimuon + Neutrino
W^- —> Elektron + Antineutrino
W^- —> Muon + Antineutrino
Z_0 —> Elektron + Positron
Z_0 —> Muon + Antimuon

Die Masse des Z-Teilchens

und die Zahl der „Generationen“

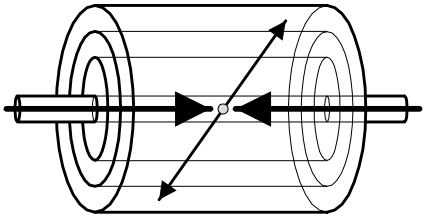
Elektron-Positron totaler
Wirkungsquerschnitt (in Nanobarn)
gemessen am LEP, CERN (Genf)



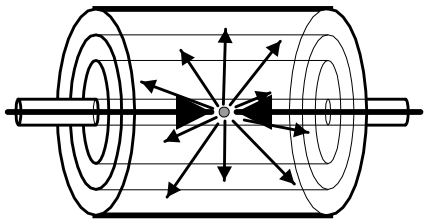
Aus: **„Review of Particle Physics“**
Particle Data Group
Eur. Phys. J. C 3, 1-794 (1998), S. 203
und: **http://pdg.lbl.gov**

Das „Quark-Zählen“

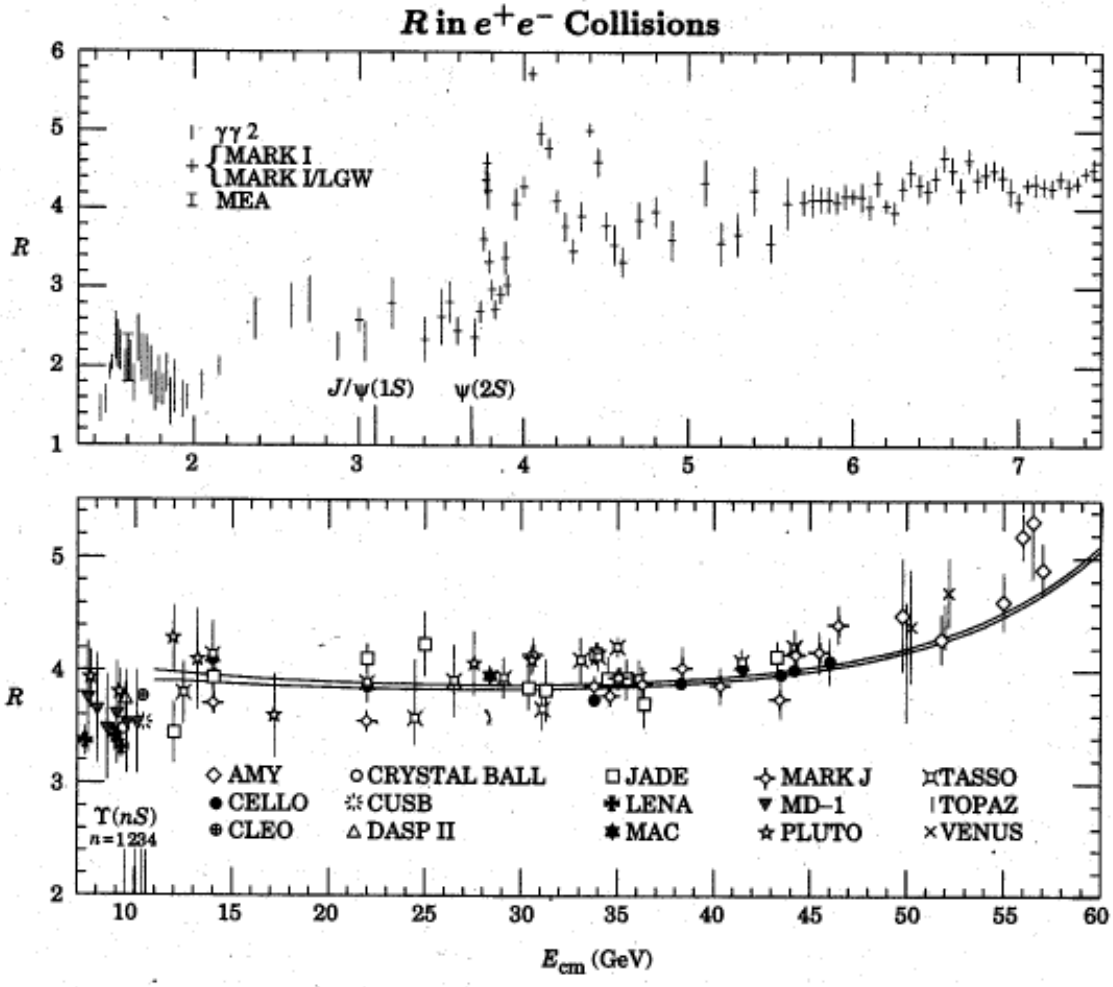
Der „R-Wert“:
Wirkungsquerschnitt
für Hadronenerzeugung
bezogen auf die
Myonenerzeugung



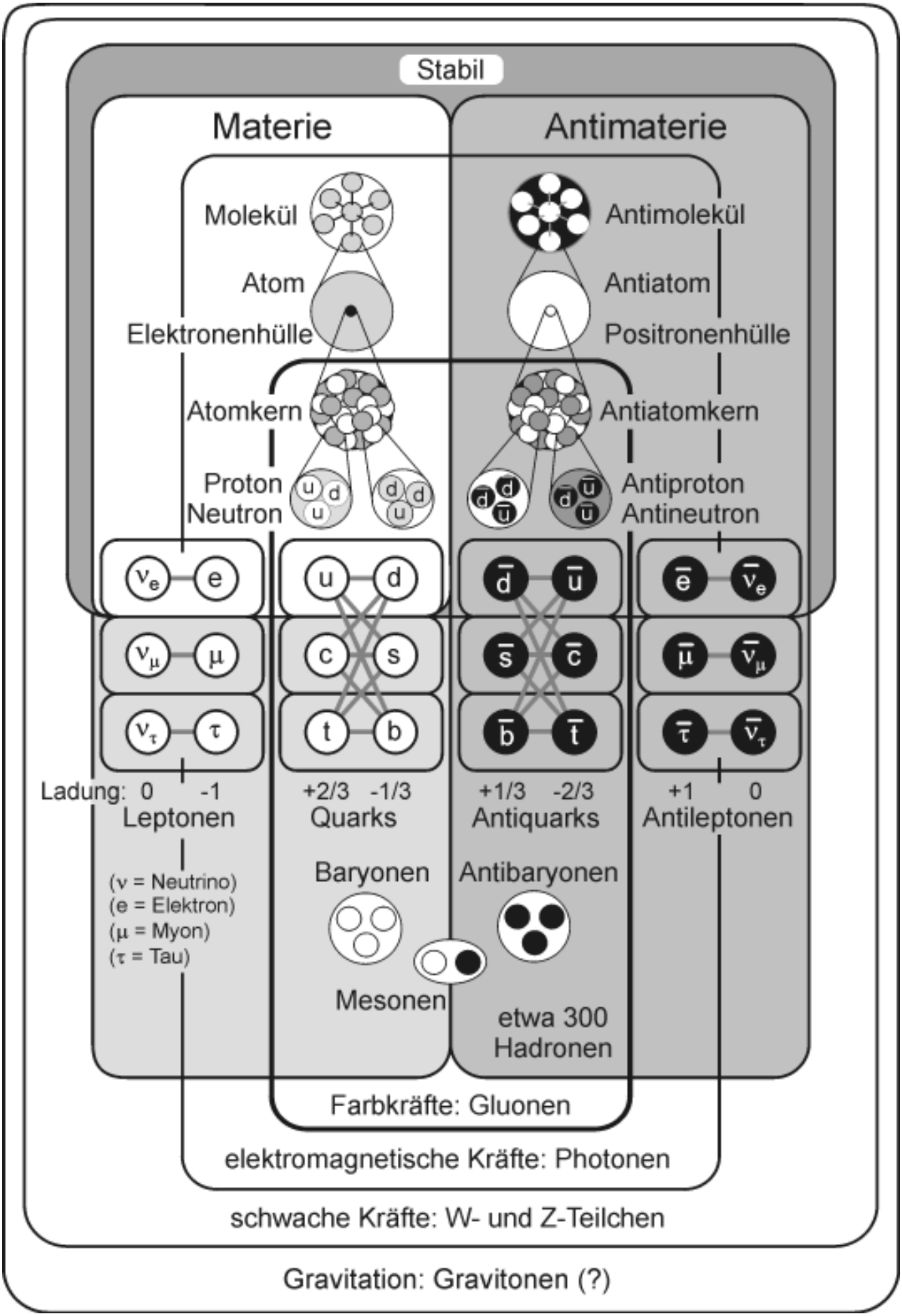
Elektron + Positron ==> Myonenpaar



Elektron + Positron ==> Hadronen



Aus: **„Review of Particle Physics“,** Particle Data Group
Eur. Phys. J. C 3, 1-794 (1998), S. 204 und: **http://pdg.lbl.gov**



vdi-97-x-alles.gif

Die drei Generationen von

Urteilchen

und die Theorien der

Urkräfte

zusammen mit den
physikalischen Grundlagen, wie
zum Beispiel die Erhaltungssätze,
Quantentheorie, Relativität usw,
bilden das heutige
und seit etwa 1970 gültige

Standardmodell

der Struktur der Materie.

Es beschreibt die Ergebnisse
aller bis jetzt durchgeführten
Experimente der Teilchenphysik,
steht mit keinem in Widerspruch,
obwohl intensiv nach
Widersprüchen gefahndet wird!

© Pedro Waloschek (1999), datei: mnu-99.p65

Noch offene Fragen:

Die Masse der Teilchen (Higgs)
Der Spin der Quarkverbindungen
Elektrische Ladung e/p
Sind Quarks und Leptonen elementar?
Quantengravitation???
Dunkle Materie im All
Masse der Neutrinos
Zu viele Naturkonstanten (22)
Warum gibt es 3 Generationen?
usw

Endziel:
Eine vereinigte Theorie aller Teilchen und Wechselwirkungen

Schlussbemerkung zum
Thema dieses Vortrags:

Die
Bindeteilchen

(oder Feldquanten),
ihre Eigenschaften
und ihre Eigenarten,
sind ein unentbehrlicher
Bestandteil
der heutigen Darstellung
der materiellen Welt.

Man kann sie aber nur
im Rahmen der
Unbestimmtheit

(Heisenberg)
halbwegs korrekt in den
Schulunterricht einbinden.