

Die etwas andere Welt der Teilchenphysik:

Begriffs- und Vorstellungsänderungen
auf der Reise in den Mikrokosmos

Michael Kobel
TU Dresden
Netzwerk Teilchenwelt



I. Grundsatzbetrachtungen

II. Teilchenphysik-Konzepte für die Schule

II.1. Welle+Teilchen -> Quantenobjekt

II.2. Wechselwirkungen:

Potenziale und Kräfte

II.3. Ladungen und Kopplungsparameter

III. Feynmandiagramme

IV. Ausblick



I. Grundsätzliche Betrachtungen

- **Stärken der Astro-/Teilchenphysik**
 - Faszination der fundamentalen Fragen
 - Faszination der Begriffe (Urknall, Antimaterie)
 - Faszination der experimentellen Aufbauten (CERN)
 - Grundlagenforschung als Kulturgut und intellektueller Gewinn
- **Herausforderungen**
 - Teilchenphysik in Schulcurricula wenig vertreten
 - Suche nach Antworten auf noch nie selbst gestellte Fragen
 - Große Zahl neuer Begriffe in kürzester Zeit
 - Viele neue Konzepte und Vorstellungen
 - Herstellung des Bezugs zur Erfahrungswelt

Wie vorgehen?

- Historisch?
 - Meilensteine der Theorie:
 - unzählige Experimente...
 - Schafft man nicht mal an der Uni !

- 1917: NOETHER: Symmetrietheorem
- 1927-1930: DIRAC, JORDAN, WIGNER, HEISENBERG, PAULI, FERMI: Quantenelektrodynamik QED
- 1932: FERMI: Fermi-Theorie der schwachen Wechselwirkung
- 1933: YUKAWA: Mesonentheorie zur starken Wechselwirkung
- 1941: PAULI Eichtheorie der QED
- 1949: FEYNMAN, TOMONAGA, SCHWINGER Renormierung und Feynman-Diagramme
- 1961: GLASHOW Elektroschwache Mischung und Eichtheorie
- 1964: GELL-MANN, ZWEIG Quarks
- 1965: HAN, NAMBU, GREENBERG starke Farbladung
- 1964-1967 HIGGS, BROUT, ENGLERT, KIBBLE, HAGEN, GURALNIK Spontane Symmetriebrechung zur Massenerzeugung
- 1967-1968 SALAM, WEINBERG Standardmodell der Elektroschwachen Wechselwirkung: QFD
- 1971 'T HOOFT, VELTMAN Beweis der Renormierbarkeit des Standardmodells
- 1973 GROSS, POLITZER, WILCZEK, FRITZSCH, WEINBERG Standardmodell der Starken Wechselwirkung: QCD

- Einstiegsvorschlag: Kosmologie

1. Konkretes Beispiel, Anknüpfen an Bekanntes: Elektron
2. Das große Bild der Kosmologie
3. Wissenschaftliche Ziele

I.1. Das Elektron und die Kosmologie



View Online: <http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn>

Download: : www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen

- Massen von Elementarteilchen bestimmen den Ablauf der Kosmologie
- Wissenschaftler wollen zunächst verstehen, was Masse ist, um danach versuchen, die Werte zu verstehen

Bedeutung der Elektronenmasse (bekanntes Teilchen!)

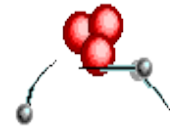
- ④ Gelegenheit zur Diskussion mit Jugendlichen (was wäre wenn?)
- ④ Elektron: Einfluss auf Größen- und Energieskala der Atome (Moleküle, Festkörper, Lebewesen, ...)

Elektronenmasse (und Stärke $a_{em} = \frac{1}{137,0359991\dots}$ der elektromagnetischen Wechselwirkung)
regieren atomare **Energien** und **Radialen**

- ④ Bindungsenergie steigt mit m_e

$$E_0(m_e) = -\frac{1}{2} Z^2 a_{em}^2 m_e c^2$$

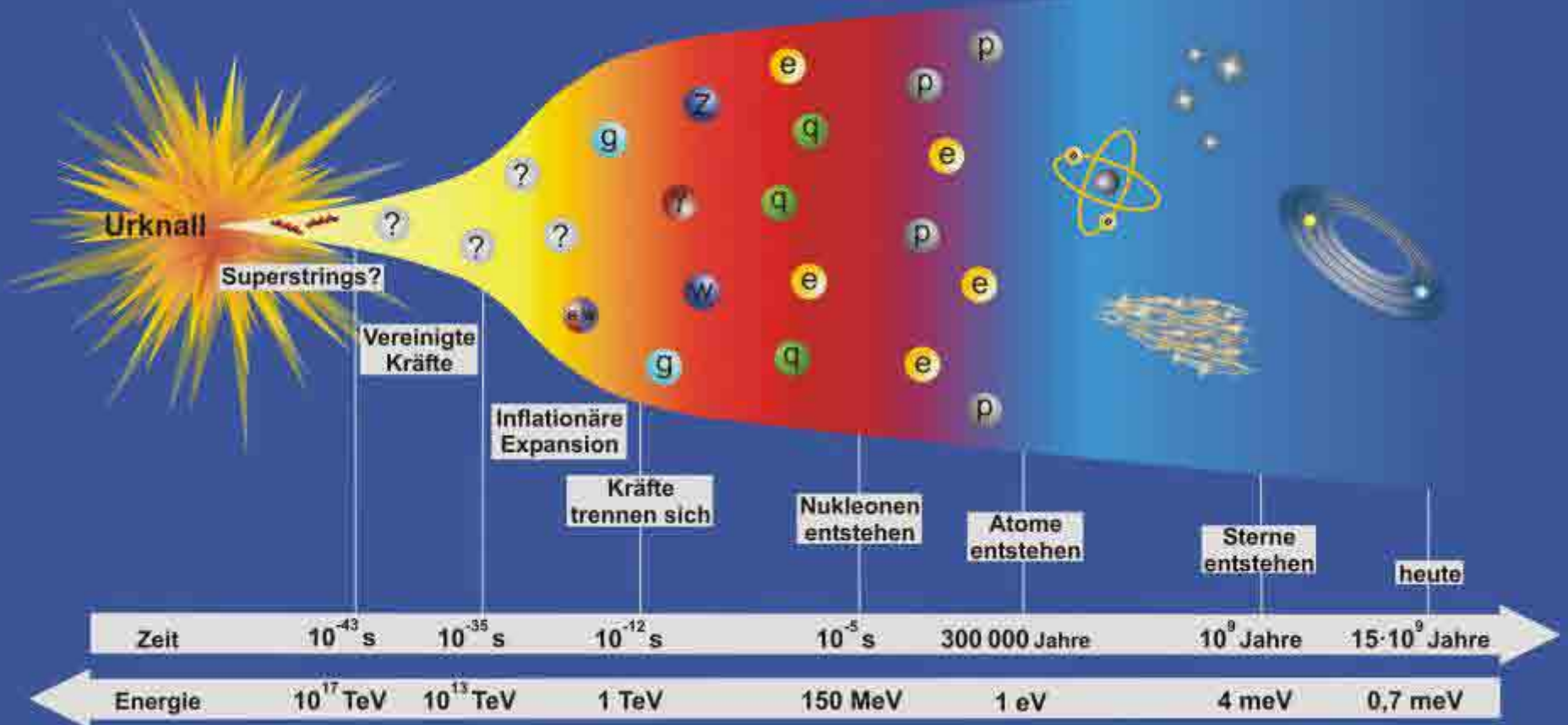
$$\text{H-Atom: } -\frac{1}{2} a_{em}^2 m_e c^2 = 13,6 \text{ eV}$$



- ④ Größe der Atomhülle fällt mit $1 / m_e$

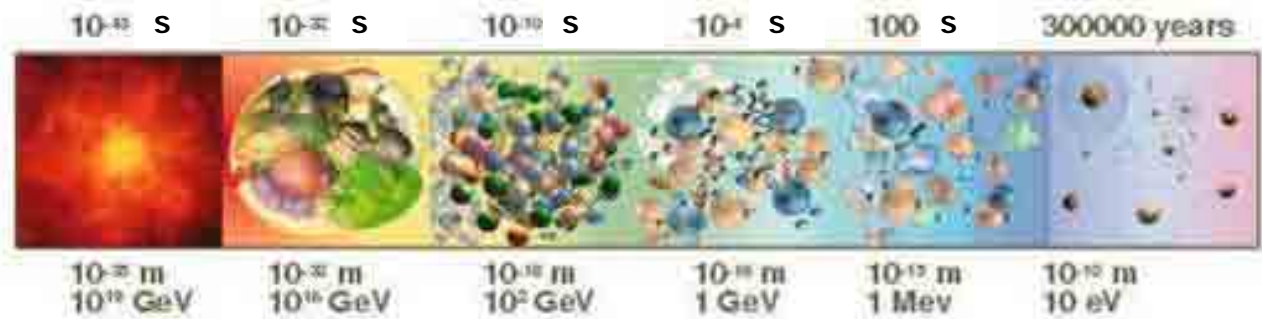
$$r_0(m_e) = \frac{h}{Z a_{em} m_e c}$$

I.2. Teilchenphysik und Kosmologie (Energie <-?-> Zeit)



Was ist die Verbindung <-?-> : TEMPERATUR ! (Kompression = Erwärmung)

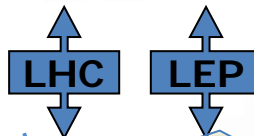
Suche nach der Grundidee des Universums („Weltformel“)



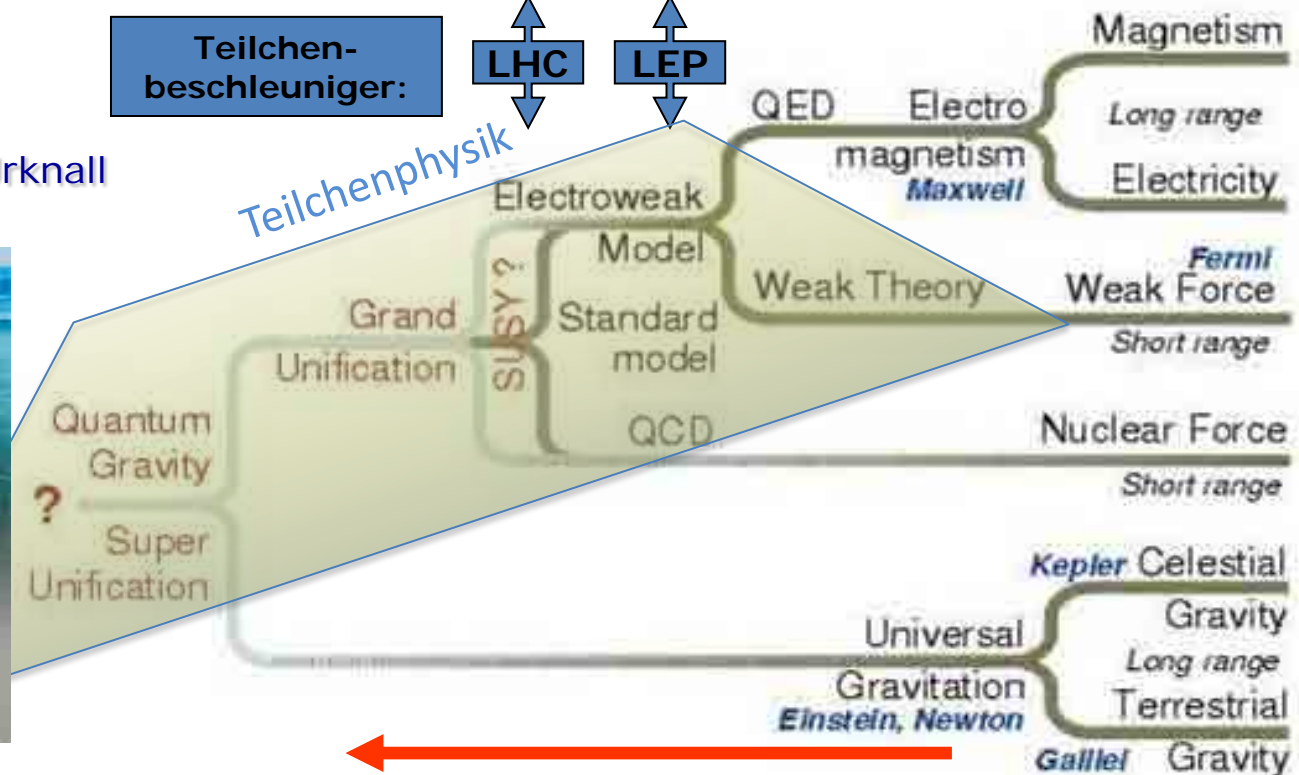
LHC:

Nachstellen der Prozesse zwischen Elementarteilchen 10⁻¹² s nach dem Urknall

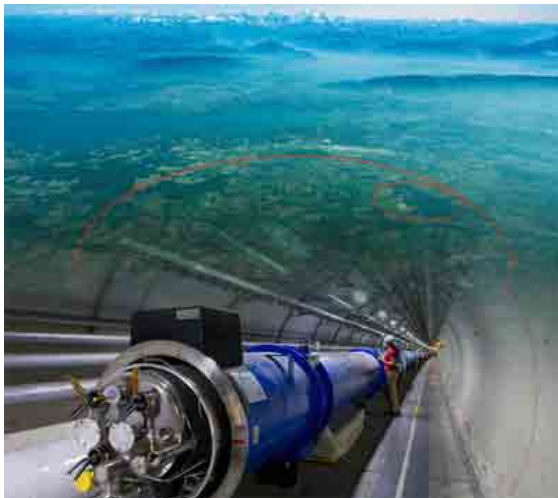
Teilchenbeschleuniger:



Teilchenphysik

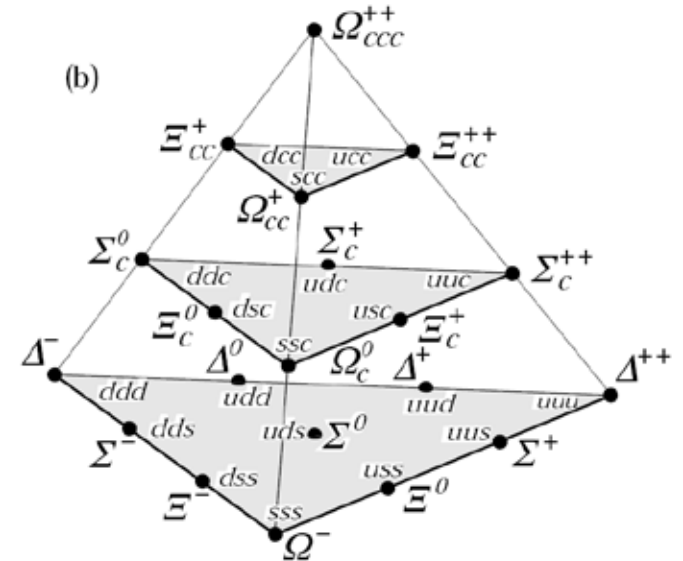
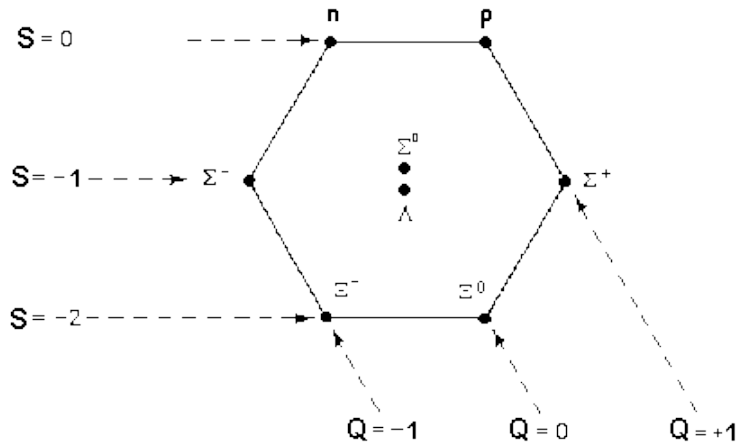


Geschichte der Physik
Zurück zum Urknall



II.1 Das Theoriegebäude

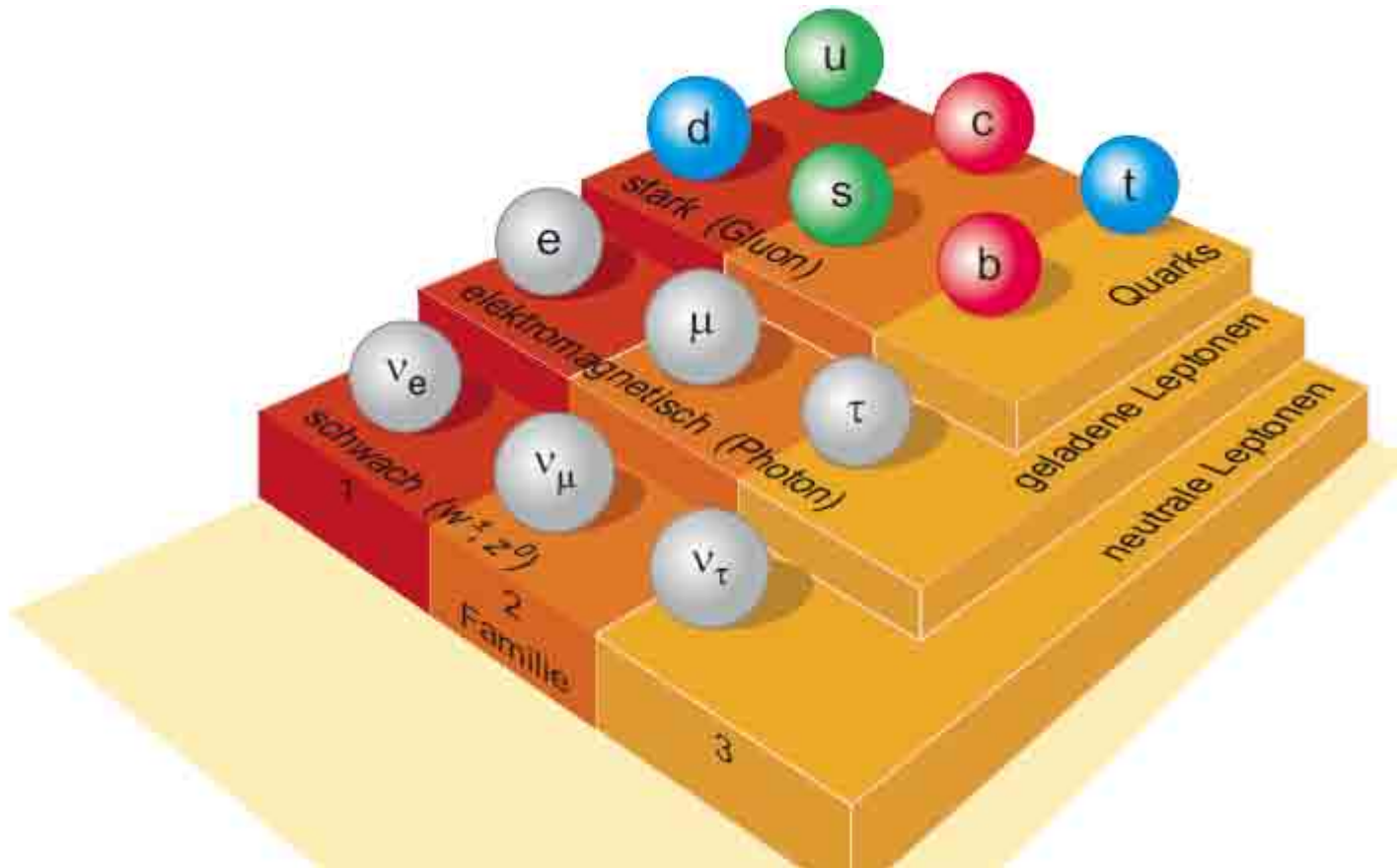
- Theorie = „Standardmodell der Teilchenphysik“
- Was es sicher nicht ist:



Sogar der große Enrico Fermi sagte einmal zu seinem Studenten (und zukünftigen Nobelpreisträger) Leon Lederman, "Junger Mann, wenn ich mich an all die Namen dieser Teilchen erinnern könnte, wäre ich besser Botaniker geworden!"



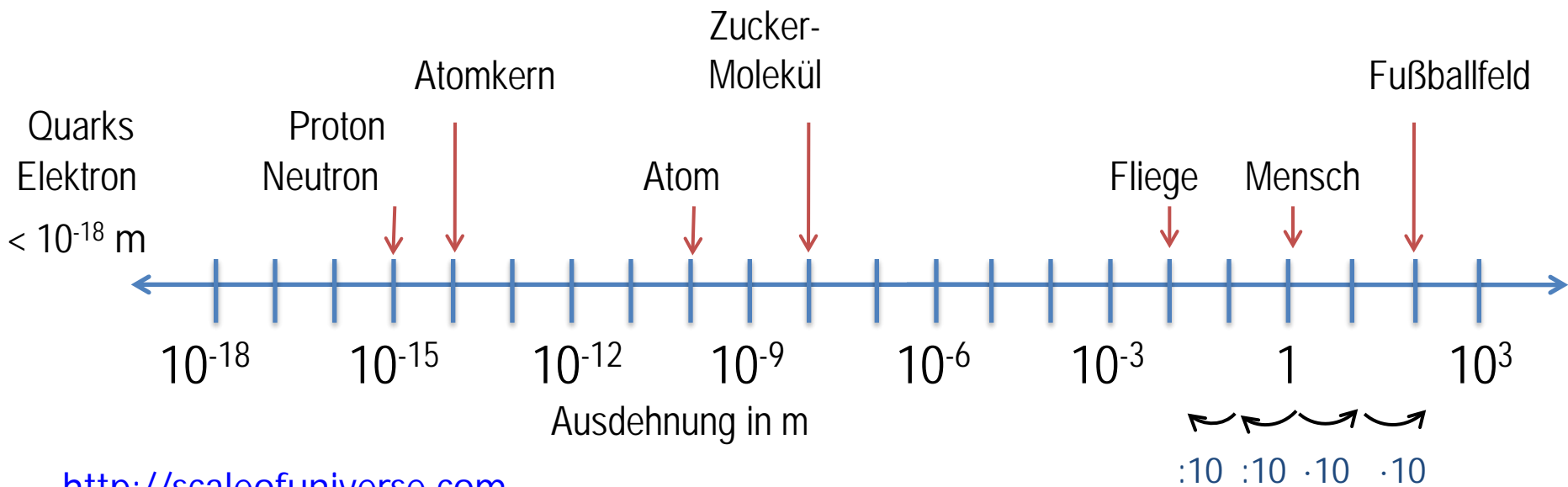
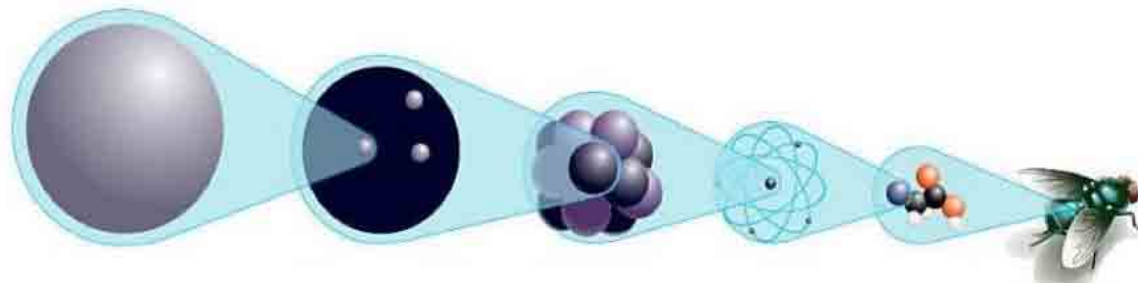
Standardmodell = Elementare Bausteine ?



1. Elementare Bausteine sind eine **herausragende experimentelle Erkenntnis**
x eine weitere Substruktur ist „so gut wie“ ausgeschlossen !
2. Aber: sind **nicht die theoretische Grundidee** des Standardmodells
x Anordnung weder vorhergesagt, noch bisher nachträglich verstanden !
3. Bergen außerdem Gefahr des reines Auswendiglernens
4. Die Elementarteilchen sind die „Spieler“ in einer Welt, in der sich die „Spielregeln“ = Wechselwirkungen aus Symmetrien herleiten lassen



Trotzdem wichtig: "Skalen"diskussion Wie klein sind Elementarteilchen?



<http://scaleofuniverse.com>

II.1. Welle/Teilchen -> Quanten

- Heisenberg'sche Unschärfe

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

- Praktischer: $\Delta x \Delta p c \geq \hbar c = 0,2 \text{ GeV fm}$
- **0,2 GeV fm = 200 eV nm setzt alle Skalen von Festkörper -> Atom -> Teilchenphysik**
- Drei nützliche Aspekte dieser Beziehung
 1. begrenzt Meßgenauigkeit für Ort und Impuls
 2. beschreibt Aufenthaltsgebiet („Orbital“) von Teilchen mit Impulskomponente $p_x = 0 \dots \Delta p_x$
 3. Beschreibt „Treffgenauigkeit“ $\Delta x =$ Auflösungsvermögen bei Impulsübertrag Δp in Streuprozessen
 - à Untersuchung der „Punktförmigkeit“ = Strukturlosigkeit von Quantenobjekten wie Elektronen, Myonen, Quarks,

Quantenobjekte

- Analogie zu makroskopischen Wellen?
 - Mathematisch tatsächlich vorhanden über die Phase der „Wellenfunktion“
 - Oft missverstanden als Eigenschaft der Quanten („Das Elektron ist (manchmal) eine Welle“)
 - Wellenartig ist (z.B. beim Elektron) aber nur die örtliche/zeitliche Nachweiswahrscheinlichkeit als „punktförmiges“ = Strukturloses Teilchen.
 - **Der Welle/Teilchen Dualismus ist ein sehr gefährliches irreführendes und m.E. heute bedeutungsloses Bild**
 - möglicherweise als historische Episode nützlich
- Die heutige Teilchenphysik beschreibt alle Quantenobjekte einheitlich und ohne Dualismus
 - à z.B. Feynmandiagramme

Skalen der Teilchenphysik

- **50/60er Jahre: pc ~ 0,1 - 1 GeV**
 - : $\Delta x \Delta p \geq \hbar c = 0,2 \text{ GeV fm} \rightarrow \Delta x \geq 0,2 - 2 \text{ fm}$
 - \rightarrow Ladungsverteilung von Kernen
 - \rightarrow Ladungsverteilung und nicht-punktförmigkeit des Protons (Hofstadter, 1956)
- **70/90er Jahre: pc ~ 10 – 100 GeV**
 - $\Delta x \geq 0,02 - 0,002 \text{ fm}$
 - Quarks als strukturlose Objekte im Proton (SLAC, 1970, HERA am DESY 1985-2007)
- **2010/20er Jahre: pc ~ 100 – 1000 GeV**
 - $\Delta x \geq 0,002 - 0,000.2 \text{ fm} (= 0,2 \text{ Attometer})$

Heisenberg und Teilchenphysik

- Seit ~ 1970 ist die experimentelle Ortsunschärfe $\Delta x \ll \text{fm} !!$
 - Irrelevant für Messungen von Reaktionen / Umwandlungen (typ. Ortsauflösungen in Detektoren: $\mu\text{m}!$)
 - keine „orbitalartigen“ Effekte
 - -> Dies rechtfertigt den Begriff „Teilchenphysik“
NB: nicht im Sinne von Welle/Teilchen, sondern im Sinne von Quantenobjekten, denn
 - Interferenzen sind weiterhin möglich: man muss zur Berechnung von Prozessen
 1. Komplexe Amplituden ($\hat{=}$ Feynmandiagramme) addieren
 2. Summen quadrieren

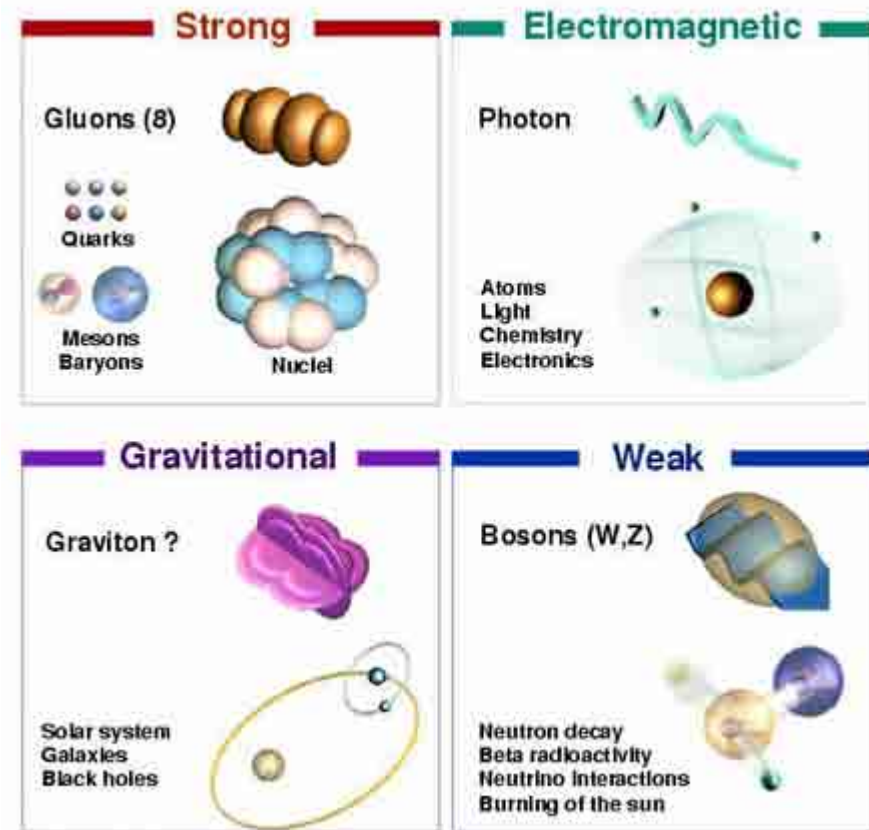
II.2. Zentraler Begriff: Wechselwirkung

- Pierers Universallexikon:
 - **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier ~~gleichzeitig vorhandener~~ Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.
- In der Teilchenphysik sogar mehr als das
 - Alle(!) Vorgänge in der Natur lassen sich zurückführen auf nur **4 Fundamentale Wechselwirkungen**
 - 3 dieser Wechselwirkungen werden im Standardmodell erklärt
 - Diese vereinigen die Phänomene „Entstehung“, „Kraft“ u. „Zerfall“



Einteilung (Aufgabe für Jugendliche)

- Welche „Kräfte“ gehören zu welcher fundamentalen Wechselwirkung?
 - Schwerkraft
 - Kernkraft
 - Coulomb-Kraft
 - Reibungskraft
 - Muskelkraft
 - Motorkraft
 - ...
- Woran könnte es liegen, dass wir von manchen Wechselwirkungen nichts „merken“? Von welchen?
- Welche können wir direkt spüren?
 - Gravitation
 - Elektromagnetismus
- Welche der beiden ist stärker?







The particle drawings are simple artistic representations

Ordne die Stärke der Wechselwirkungen !

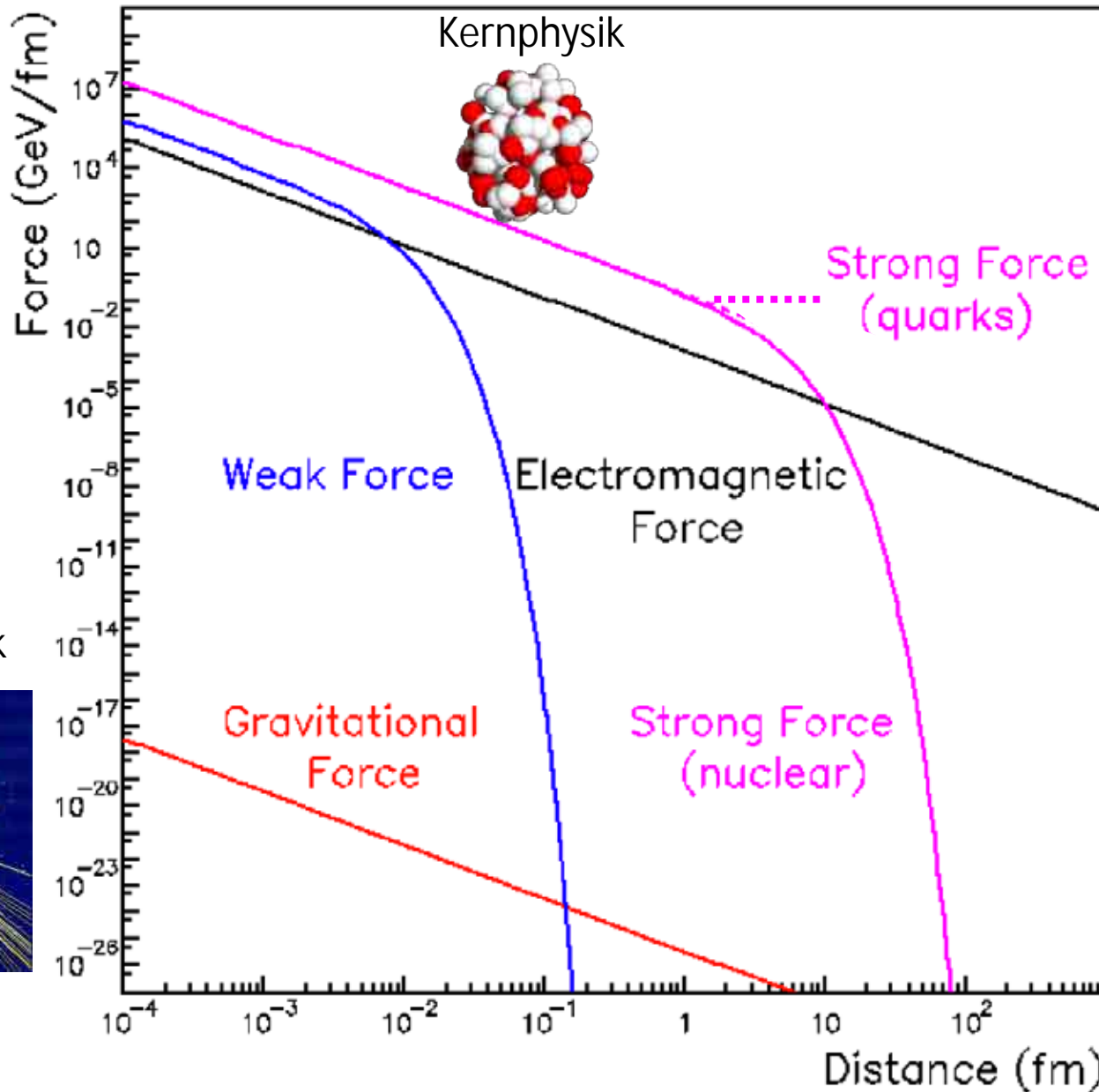
- Verbreiteter Fehler:

z.B. www.drillingsraum.de/4_grundkraefte_physik/4_grundkraefte_physik.html
(keine der schlechtesten Physikseiten...!)

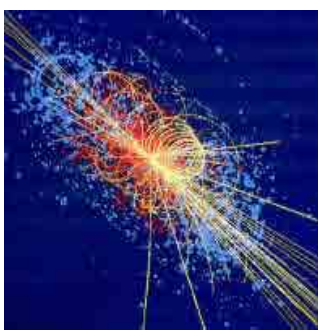
Kraft	relative Stärke	Bosonen	Masse [GeV/c ²]	Reichweite [Meter]
Stark 	1	8 Gluonen	0	$2,5 \times 10^{-15}$
E.M. 	10^{-2}	Photon	0	∞
Schwach 	10^{-6}	W^-, W^+, Z^0	80,80,91	10^{-18}
Gravitation 	10^{-38}	Graviton?	0	∞

- Dies geht nicht eindeutig!

Die Ordnung der WW-Stärke hängt vom Abstand ab!



Teilchenphysik



„Wir“



www.schmunze.mal.de

TAFEL: Reichweiten, Potenzielle Energien, Kopplungen

Wirkung	Quanten	Reichweite	Potenziale	Kopplungen
<p>Gravitation</p> <p>Gravitation</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \frac{hc}{m_0 c^2} = \frac{h}{m_0 c}$ <p>Potential E_{pot}</p>	<p>Photon</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \infty$ <p>Potential E_{pot}</p> $E_{pot} \propto \frac{1}{r}$	<p>Photon</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \frac{0.197 \text{ GeV fm}}{0.511 \text{ MeV}} = 118 \text{ fm}$	<p>Photon</p> <p>Potential E_{pot}</p> $E_{pot} \propto \frac{1}{r}$	<p>Photon</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \frac{0.197 \text{ GeV fm}}{137 \text{ MeV}} = 1.43 \text{ fm}$
<p>Wirkung</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \frac{hc}{m_0 c^2} = \frac{h}{m_0 c}$ <p>Potential E_{pot}</p>	<p>Photon</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \infty$ <p>Potential E_{pot}</p> $E_{pot} \propto \frac{1}{r}$	<p>Photon</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \frac{0.197 \text{ GeV fm}}{0.511 \text{ MeV}} = 118 \text{ fm}$	<p>Photon</p> <p>Potential E_{pot}</p> $E_{pot} \propto \frac{1}{r}$	<p>Photon</p> <p>Reichweite λ</p> $\lambda = \frac{0.197 \text{ GeV fm}}{137 \text{ MeV}} = 1.43 \text{ fm}$

$\psi \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$

$\psi \bar{\psi} \gamma^\mu T^a \psi$

$\psi \bar{\psi} \gamma^\mu (g_V - g_A \gamma^5) \psi$

$\psi \bar{\psi} \psi \psi$

Einphoton

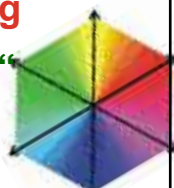

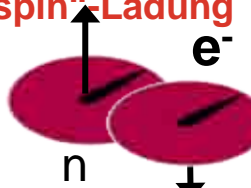


der Vert

Talka

ausgeteilt

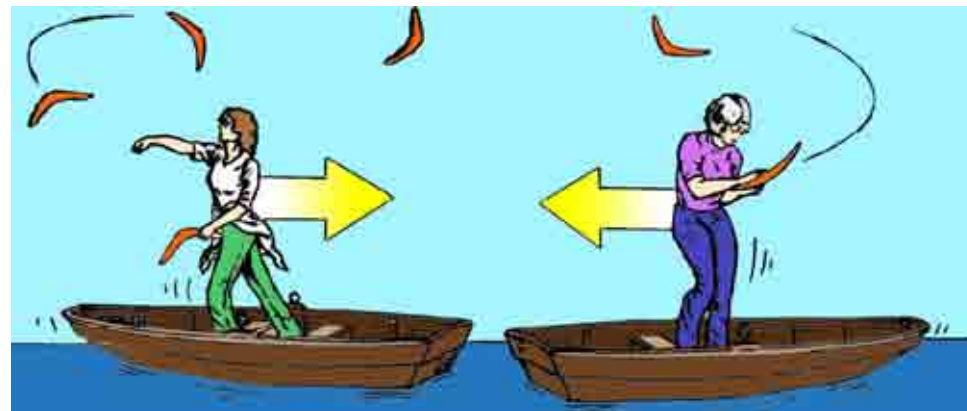
Wechselwirkung- Ladung - Kopplung

- Jede Wechselwirkung hat eigene **Botenteilchen**
- **Botenteilchen koppeln** nur an Teilchen mit entsprechender **Ladung**

	Ladung der Materieteilchen	Botenteilchen	Kopplung der Botenteilchen (bei 100 GeV)	Kopplungsparameter
Starke Wechselwirkung	Starke „Farb“-Ladung „Rot“, „Blau“, „Grün“ 	Gluonen g 	$g_s = 1.2$	$a_s = \frac{g_s^2}{4p}$
Schwache Wechselwirkung	Schwache „Isospin“-Ladung $I_3^W = \begin{matrix} \uparrow & 1/2 & \text{ö} \\ \text{u} & & \\ \downarrow & -1/2 & \text{ö} \\ \text{d} & & \end{matrix}$ 	„Weakonen“ (W^+, W^-, Z) 	$g_w = 0.6$	$a_w = \frac{g_w^2}{4p}$
Elektromagnetismus	Elektrische Ladung $Q = -1, +2/3, -1/3, \dots$	Photonen g 	$g_e = e = 0.3$ SI: $g_e = \frac{e}{\sqrt{\epsilon_0 hc}}$	$a = \frac{g_e^2}{4p}$
Gravitation	Supersymmetrie???	Gravitonen ?	?	G_N

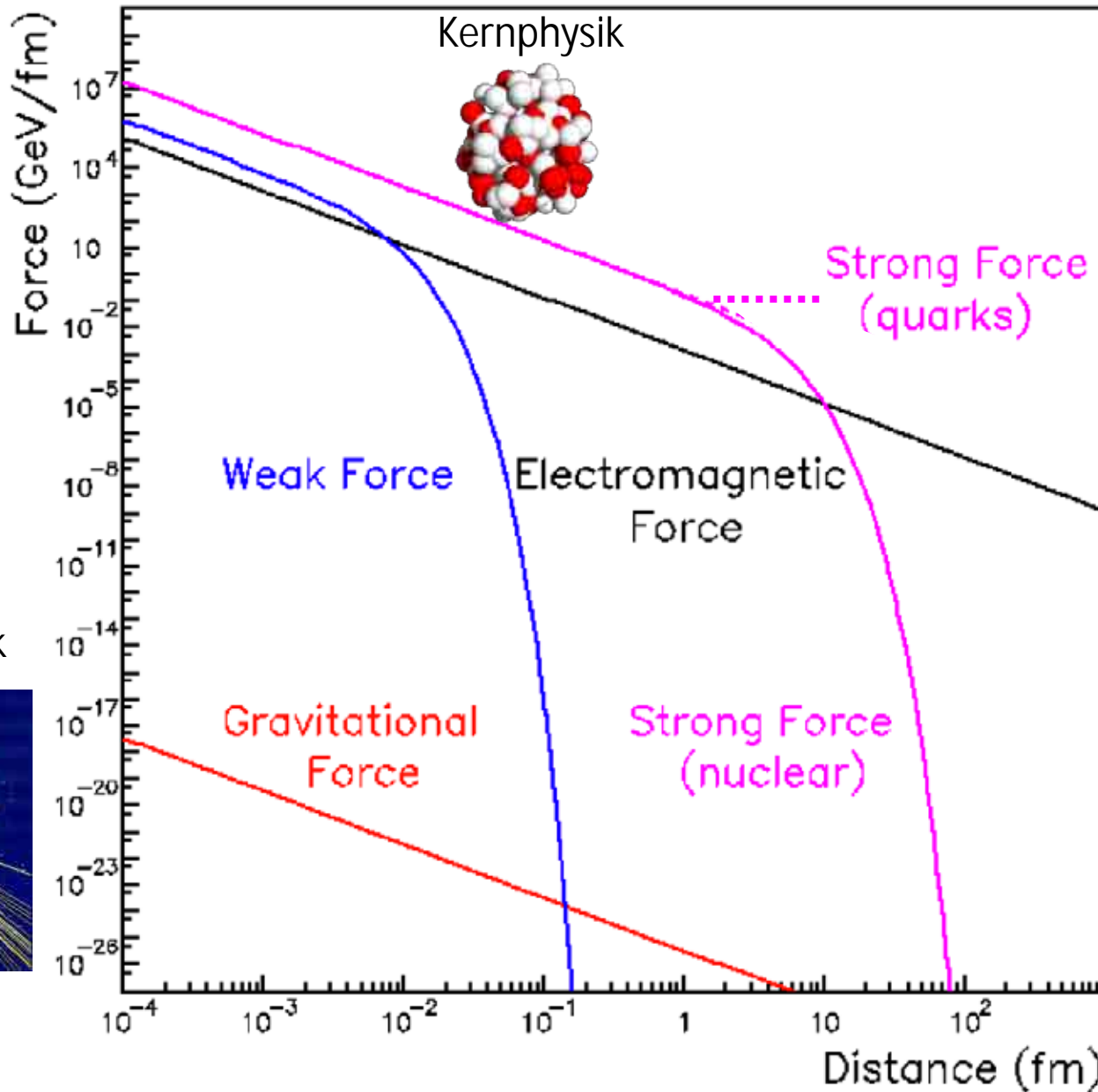
Grundlegende Erkenntnis des „Standardmodells“

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



http://www.fnal.gov/pub/today/archive/archive_2013

Die Ordnung der WW-Stärke hängt vom Abstand ab!



Kernphysik



Strong Force (quarks)

Weak Force

Electromagnetic Force

Gravitational Force

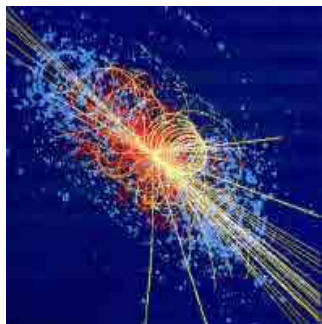
Strong Force (nuclear)

„Wir“



www.schmunze.mal.de

Teilchenphysik



II.3: Ladung

Ladung ...

- ... ist *kein Stoff* !
- ... beschreibt die *Sensitivität* von Teilchen *bezüglich der jeweiligen Wechselwirkung*

Eigenschaften:

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

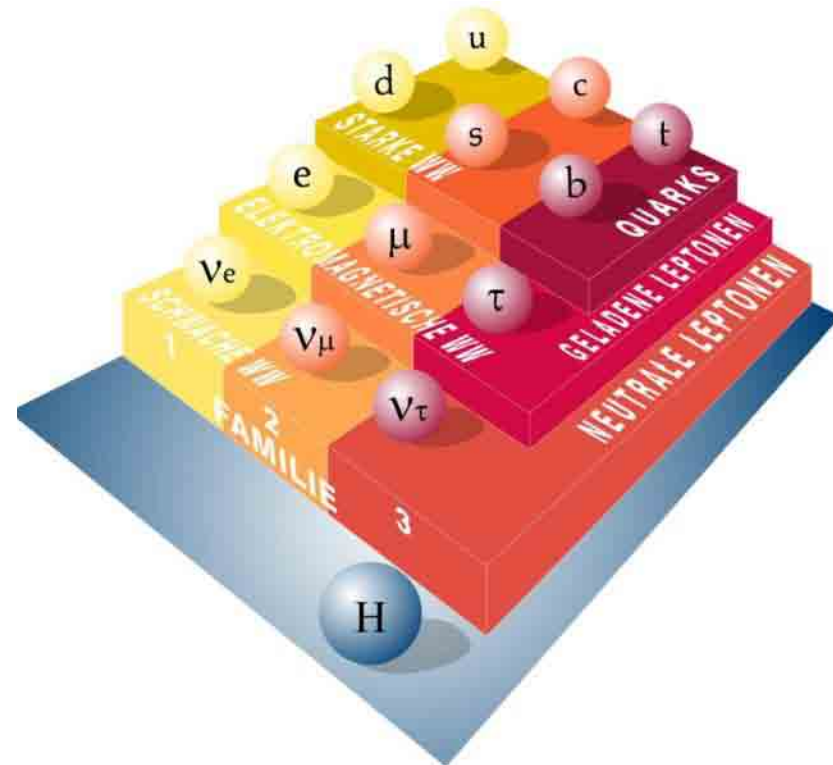
Neues über Ladung

- Es gibt 3 völlig verschiedene Ladungen (für jede WW des Standardmodells eine)
- Diese können Vektorcharakter haben (!)
- Die Teilchen ordnen sich bezüglich dieser Ladungen in „Multipletts“
 - Warum genau diese Anordnung im „Periodensystem der Teilchen“? → immernoch unverstanden!

Elektrische Ladung Q	Schwache Ladung I^W_3	Starke Ladung	Blau Grün Rot	
$+2/3$	$+1/2$	u	c	t
$-1/3$	$-1/2$	d	s	b
0	$+1/2$	ν_e	ν_μ	ν_τ
-1	$-1/2$	e	μ	τ
		1.	2.	3.
		Familie		

Quarks

Leptonen



Materialien des Netzwerk Teilchenwelt



- „Steckbriefe“ der Teilchen (hier: Materieteilchen)
 - Gelegenheit zu eigenen Aktivitäten
 - ordnen, diskutieren, vertraut werden

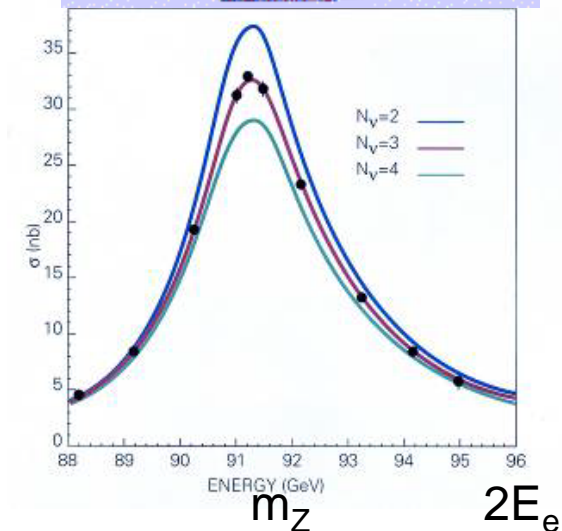
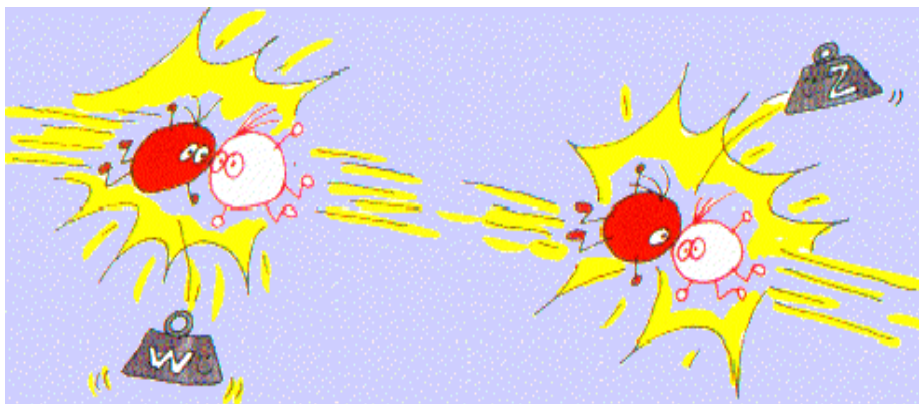
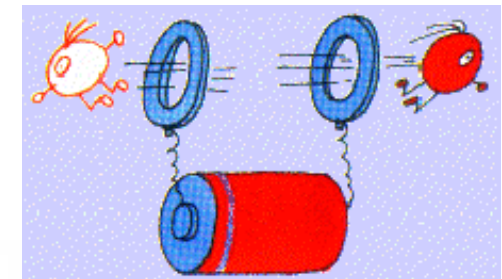
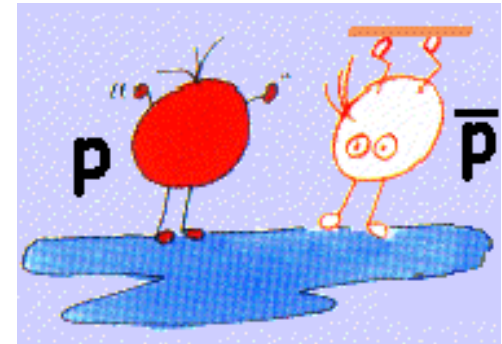
	QUARKS		LEPTONEN		
3 GENERATIONEN	1.	UP-QUARKS $m = 2 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	DOWN-QUARKS $m = 5 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	ELEKTRON $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	ELEKTRON-NEUTRINO $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
	2.	CHARM-QUARKS $m = 1300 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	STRANGE-QUARKS $m = 100 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	MYON $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	MYON-NEUTRINO $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
	3.	TOP-QUARKS $m = 173\ 000 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	BOTTOM-QUARKS $m = 4200 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	TAUON $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	TAU-NEUTRINO $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

Stabile Materie in unserer Umgebung besteht nur aus Teilchen der ersten Generation: Elektronen, Up- und Down-Quarks.

Von ihnen gibt es je zwei massereichere, instabile „Kopien“ mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation).

Antimaterie

- Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit **umgekehrten Vorzeichen** von **allen** Ladungen
- Sonst sind **alle Eigenschaften** (Masse, Lebensdauer) **gleich**
- Aus Botenteilchen können **paarweise** Materie- und Antimaterieteilchen **entstehen**
- Umgekehrt können sie sich **paarweise** wieder zu Botenteilchen (nicht: „Energie“) **vernichten**





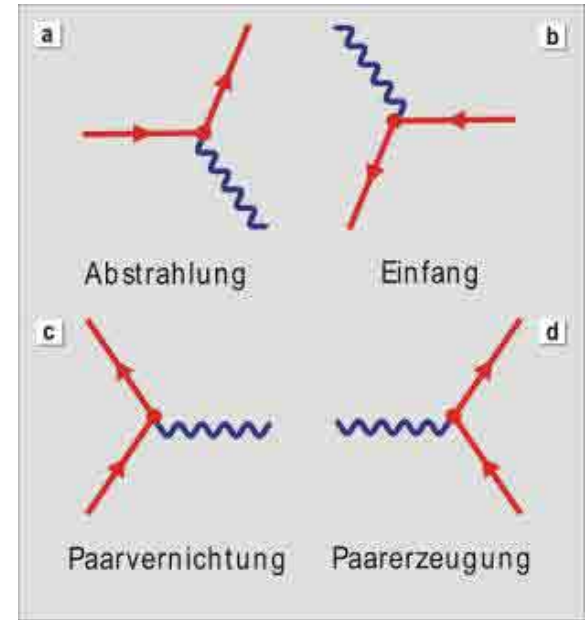
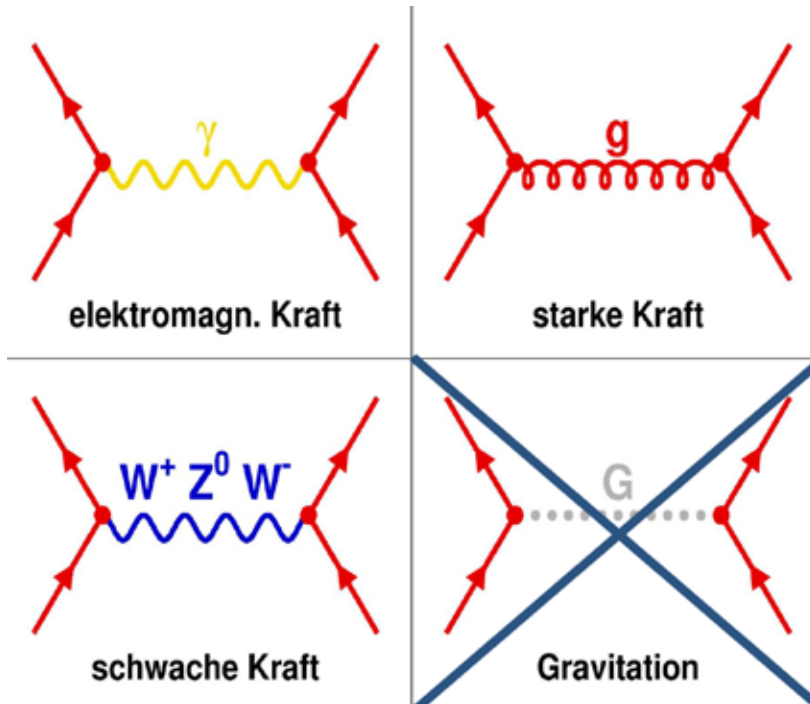
Antimaterie

	ANTIQUARKS		ANTILEPTONEN	
1.	UP-ANTIQUARKS $m = 2 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	DOWN-ANTIQUARKS $m = 5 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	POSITRON $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	ELEKTRON-ANTINEUTRINO $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
2.	CHARM-ANTIQUARKS $m = 1300 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	STRANGE-ANTIQUARKS $m = 100 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	ANTI-MYON $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	MYON-ANTINEUTRINO $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
3.	TOP-ANTIQUARKS $m = 173\ 000 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	BOTTOM-ANTIQUARKS $m = 4200 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	ANTI-TAUON $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	TAU-ANTINEUTRINO $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

Zu jeder Materieteilchensorte gibt es eine Antiteilchensorte mit gleicher Masse und entgegengesetzten Ladungen.

III. Feynmandiagramme

- Theorievorhersage:
 - Eindeutiges Set von fundamentalen "Vertices" für jede Wechselwirkung
 - Bilden Grundlage von Feynman-Diagrammen zur Beschreibung von Reaktionen, die auf Abständen \ll fm ablaufen
 - Alle Prozesse sind Kombination solch fundamentaler Vertices
 - Andere Prozesse können nicht stattfinden !



Zeit \rightarrow

- z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



Anm: Pfeilrichtung β symbolisiert Antiteilchen
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts

TAFEL: Feynmandiagramme, Ladungen und Kopplungen



$$k \cdot \alpha_{em} \left(\frac{Q_1 Q_2}{r} \right)$$

$$G \sim \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{137} \frac{1}{r}$$

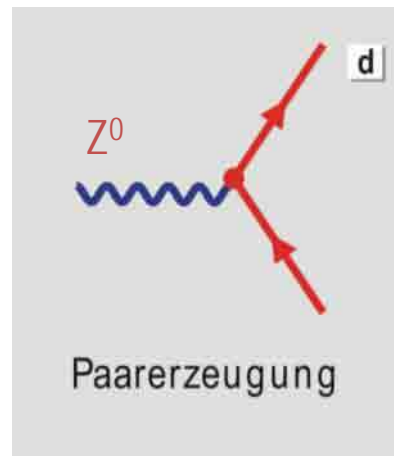
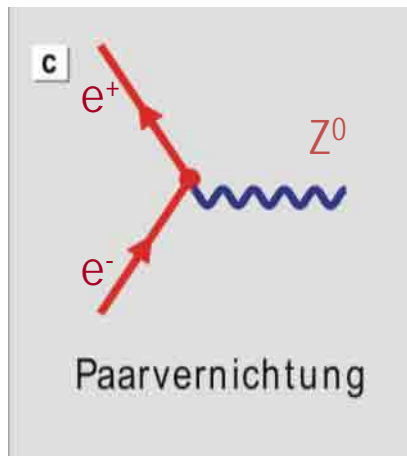
$$\text{mit } \alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$

$$= \frac{1}{137} \frac{1}{r} = \frac{1}{137} \frac{1}{r}$$

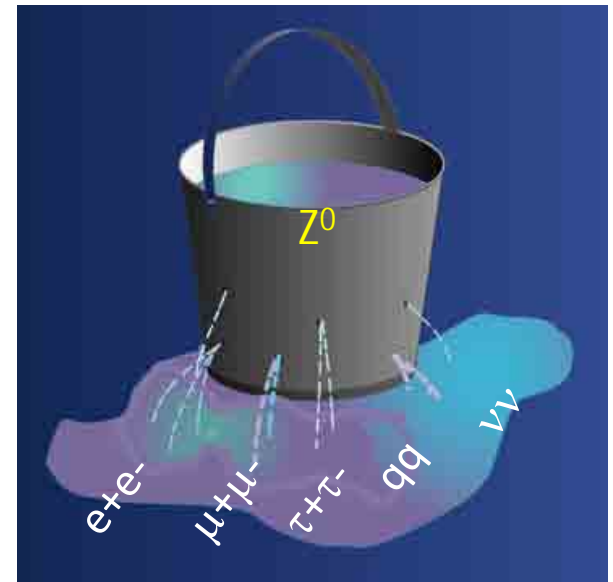
Equivalenz für Licht "Stärke"
 Teilchen äquivalent

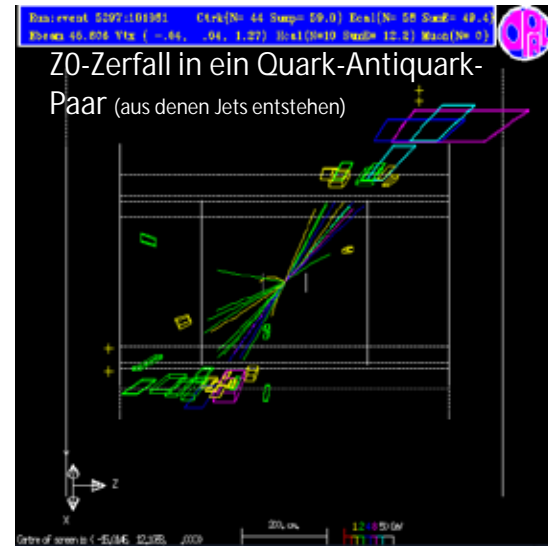
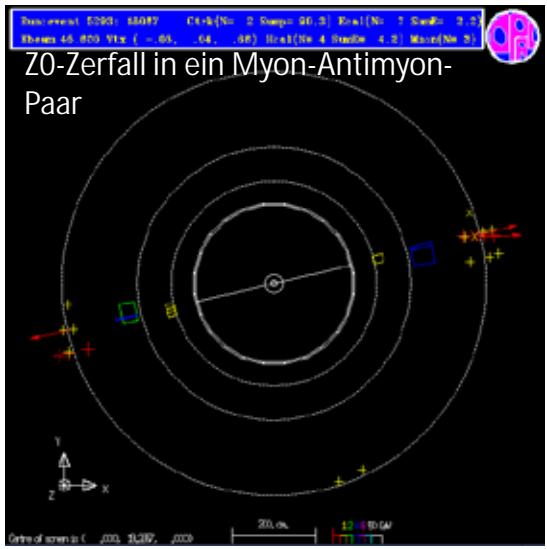
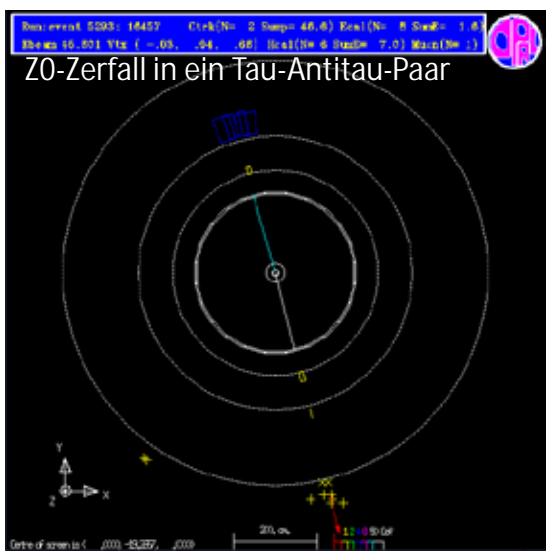
Beispiel: Messung der Z "Zerfälle"

- Das Z Teilchen ist nicht stabil
 - Wandelt sich nach 3×10^{-25} s in andere Teilchen um
- Produktion und Zerfall als Feynmandiagramm:



→
Zeit



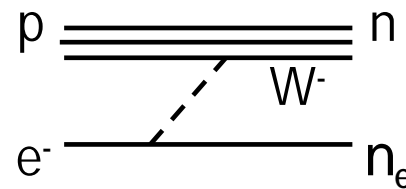
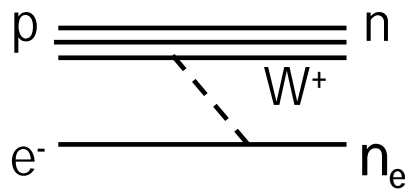


Ereignisbilder eines LEP-Experimentes

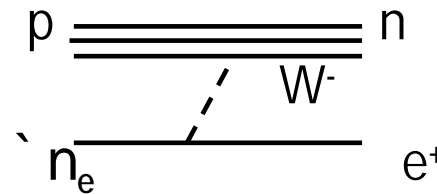
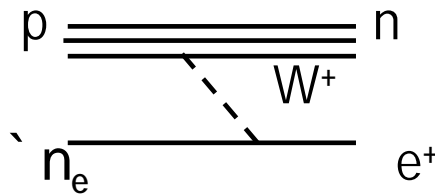
1000 solcher Ereignisse werden von Jugendlichen (100 je Gruppe) analysiert und kategorisiert

Feynmandiagramme und Wechselwirkungen

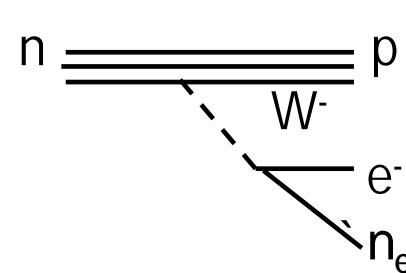
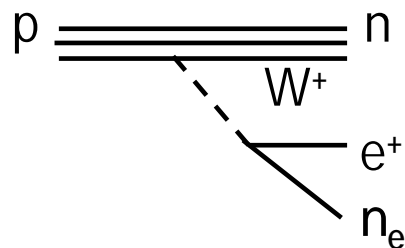
- Wechselwirkung: „Beide Gegenstände sind Ursache und Wirkung“ (à Einstein: „raumartige“ Ereignisse: beobachterabhängig)
- Umwandlung des Wasserstoff



- Erster Nachweis von Antineutrinos aus Kernkraftwerken



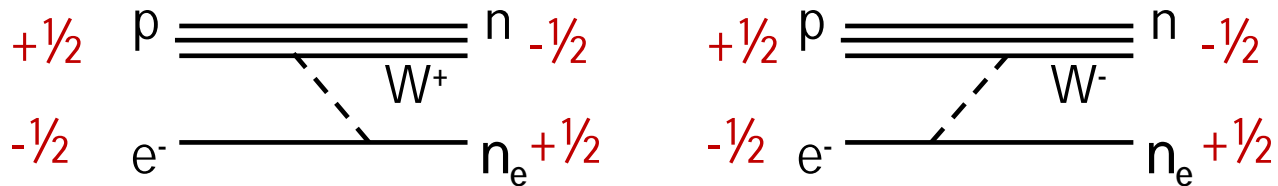
- b⁺ und b⁻ - Umwandlungen von Kernen



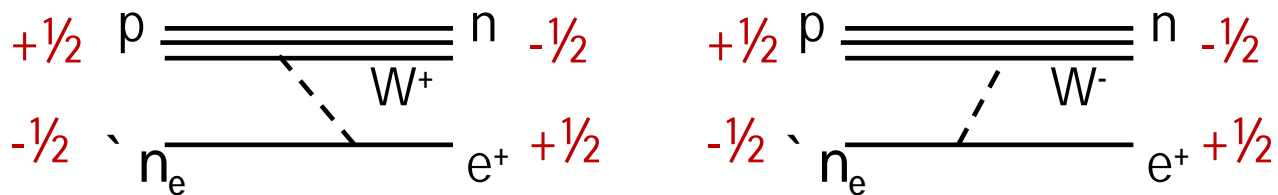
Ladungserhaltung

- Erhaltung der schwachen Ladung I_3^W bei wichtigen Prozessen: (der Vektorcharakter von I hier nicht wichtig, es genügt I_3^W)

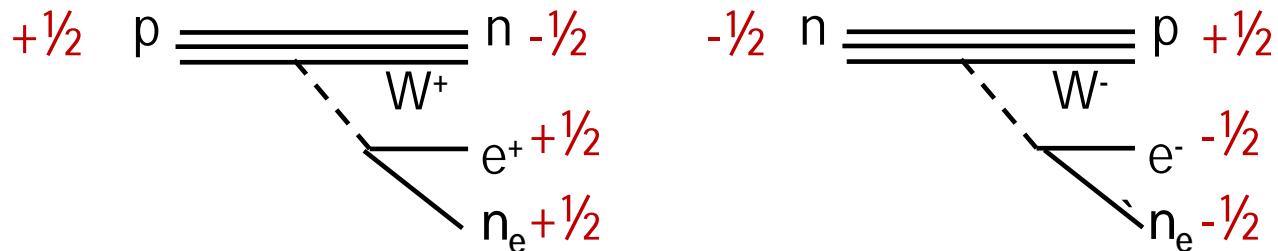
- K-Elektron Einfang in Atomen



- Erster Nachweis von Antineutrinos aus Kernkraftwerken

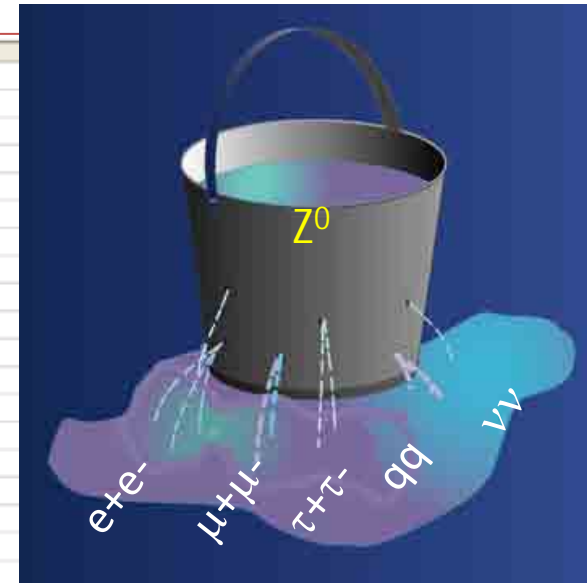


- b^+ und b^- - Umwandlungen von Kernen

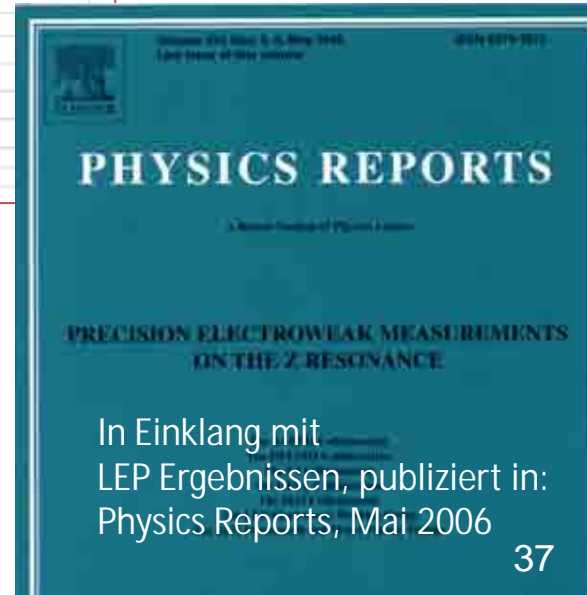


Messungen bis 2010: Z-Zerfälle bei LEP

	A	B	C	D	E	F
1	Group	Electrons	Myons	Taus	Quarks	
2	A (1-100)	4	6	4	86	
3	B (101-200)	2	2	2	94	
4	C (201-300)	3	3	3	91	
5	D (301-400)	2	7	4	87	
6	E (401-500)	3	5	4	88	
7	F (501-600)	3	10	7	80	
8	G (601 -700)	6	5	3	86	
9	H (701-800)	3	4	7	86	
10	I (801-900)	1	2	5	92	
11	J (901-1000)	4	0	4	92	
12						
13						
14	Sum all	Sum e	Sum μ	Sum τ	Sum q	
15	1000	31	44	43	882	
16	Sum corr	Sum e corr	Sum μ	Sum τ	Sum q	
17	1018,6	49,6	44,0	43,0	882,0	
18	Stat. Uncertainty	8,9	6,6	6,6	29,7	
19						
20	Fract. of Visible	e / all	μ / all	τ / all	q / alle	q / ((e+μ+τ)/3)
21		0,049	0,043	0,042	0,866	19,4
22	Stat. Uncertainty	0,009	0,006	0,006	0,011	2,1
23						
24						
25	Theory	0,04212	0,04212	0,04212	0,8736	20,74
26						
27	LEP Result	0,04200	0,04204	0,04208	0,8738	20,77
28	Uncertainty	0,00005	0,00008	0,00010	0,0012	0,03
29						
30						
31						



- Zugängliche Forschungsmethode:
 - Vergleich der Häufigkeiten
- Gemeinsame Diskussion:
 - e, μ , τ haben gleiche Eigenschaften
 - Quarks kommen 5x3 Mal „zu häufig“ vor
 - à 5 Quark-Sorten x 3 starke Farbladungen



In Einklang mit
LEP Ergebnissen, publiziert in:
Physics Reports, Mai 2006

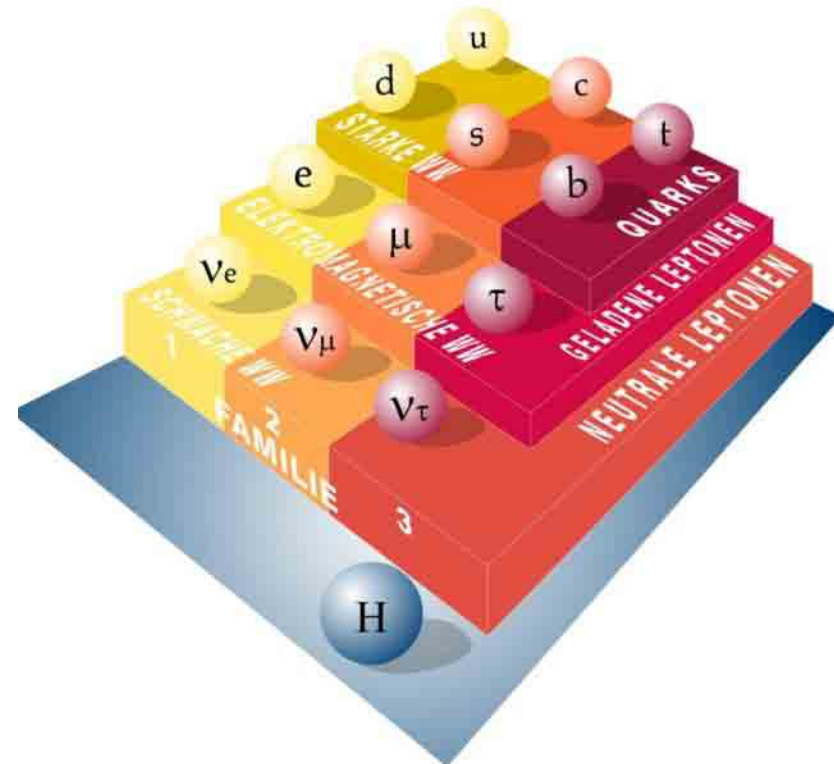
Rückschlüsse auf Ladungen

- Es gibt 3 völlig verschiedene Ladungen (eine für jede WW des Standardmodells)
- Die Teilchen ordnen sich bezüglich dieser Ladungen in „Multipletts“
- Gleiche Ladungen = Gleiche Reaktionsraten der zugehörigen Wechselwirkung
- Z-Zerfälle identisch in $e, \mu, \tau \rightarrow$ gleiche schwache Ladungen („Leptonuniversalität“)

Elektrische Ladung Q	Schwache Ladung I_3^W	Starke Ladung	Blau Grün Rot	
$+2/3$	$+1/2$	u	c	t
$-1/3$	$-1/2$	d	s	b
0	$+1/2$	ν_e	ν_μ	ν_τ
-1	$-1/2$	e	μ	τ
		1.	2.	3.
		Familie		

Quarks

Leptonen

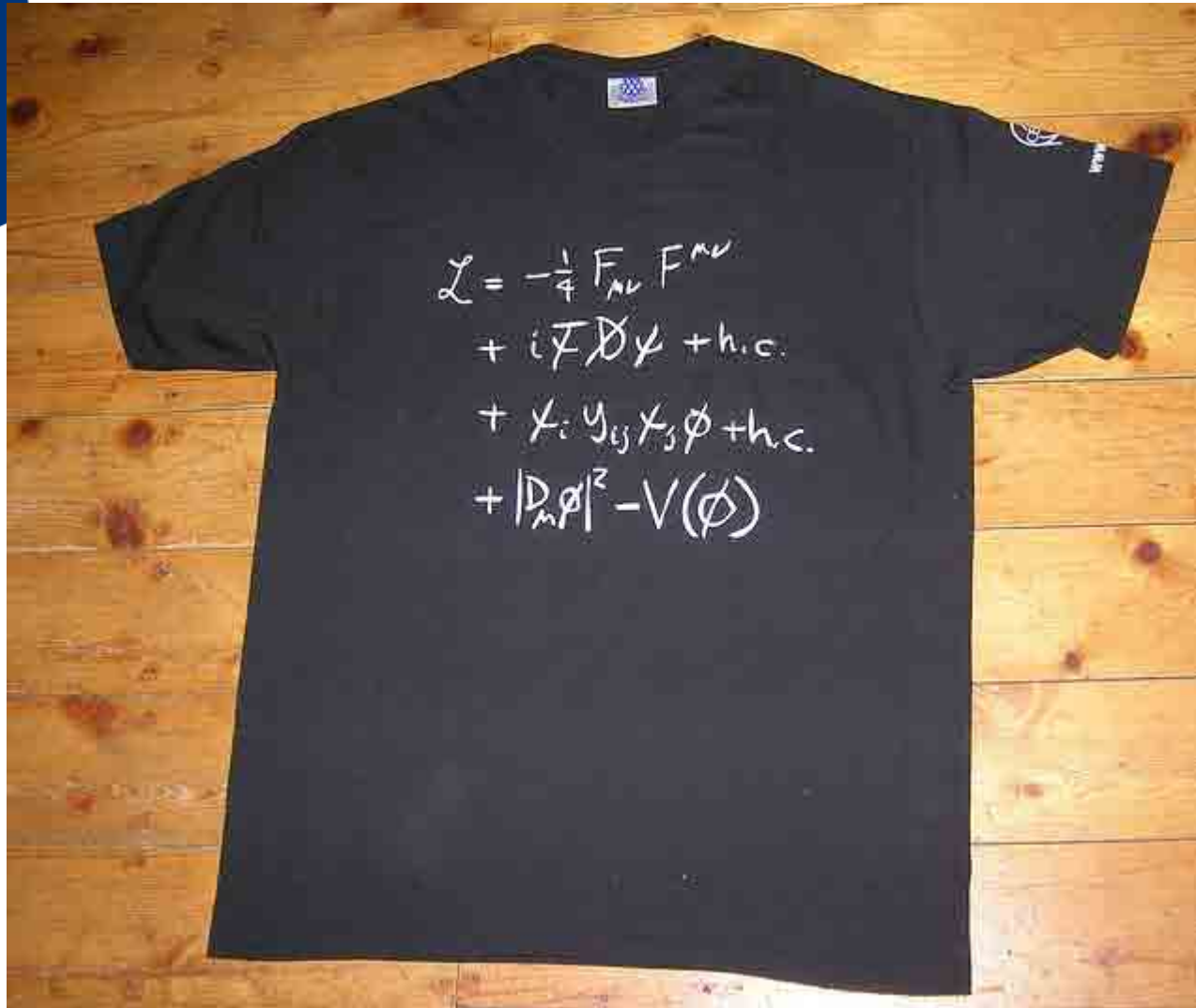


IV Ausblick: Gesamtes "Standardmodell" der Teilchenphysik "erfunden" von 1961-73, gültig bis heute

- **Fundamentale Wechselwirkungen zwischen Teilchen**
 - erfordern Botenteilchen (Austauschteilchen)
 - **sind aus Symmetrien ableitbar !!**
- **Bausteine der Welt**
 - Träger von Ladungen
 - Spielen nach Regeln der entsprechenden Wechselwirkungen
- **Massenmechanismus**
 - **Symmetrien verbieten Teilchenmassen !!**
 - Herkunft der Teilchenmassen noch unbekannt
 - Hypothese: "Higgsmechanismus", Nachweis: Higgs-Teilchen
- **Errungenschaft des Standardmodells**
 - **beschreibt *alle* bekannten Prozesse**
 - **Ist (derzeit) DIE grundlegende Theorie der Physik**

Lagrangedichte des Standardmodells = derzeitige „Weltformel“:

- Dies ist eigentlich nur eine in spezieller Form geschriebene Energiedichte !



Michael Kobel

- auf CERN
T-shirt, Tasse und
Mouse Pad

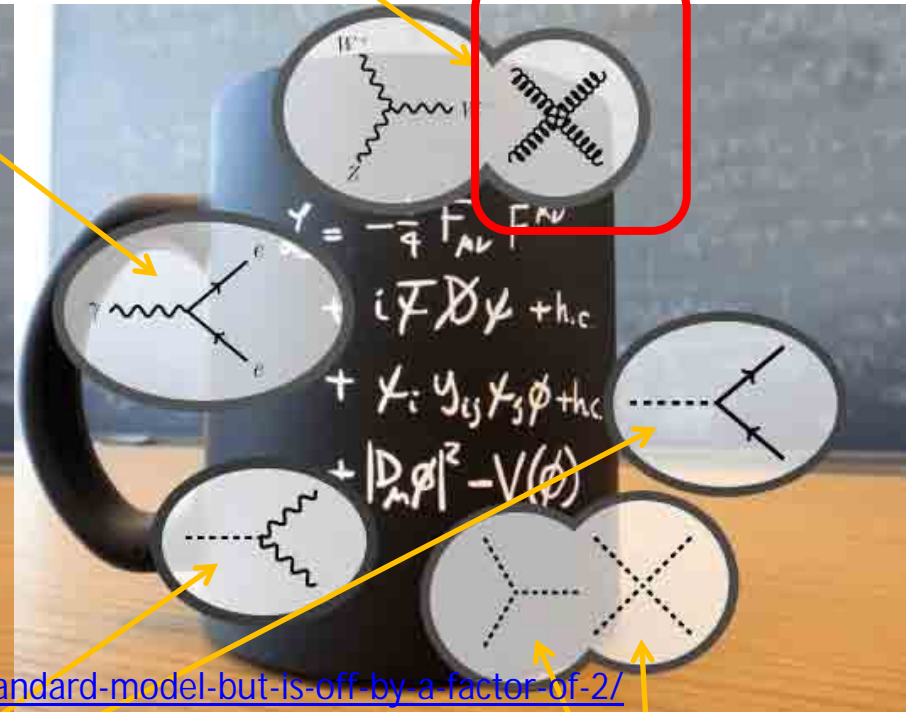
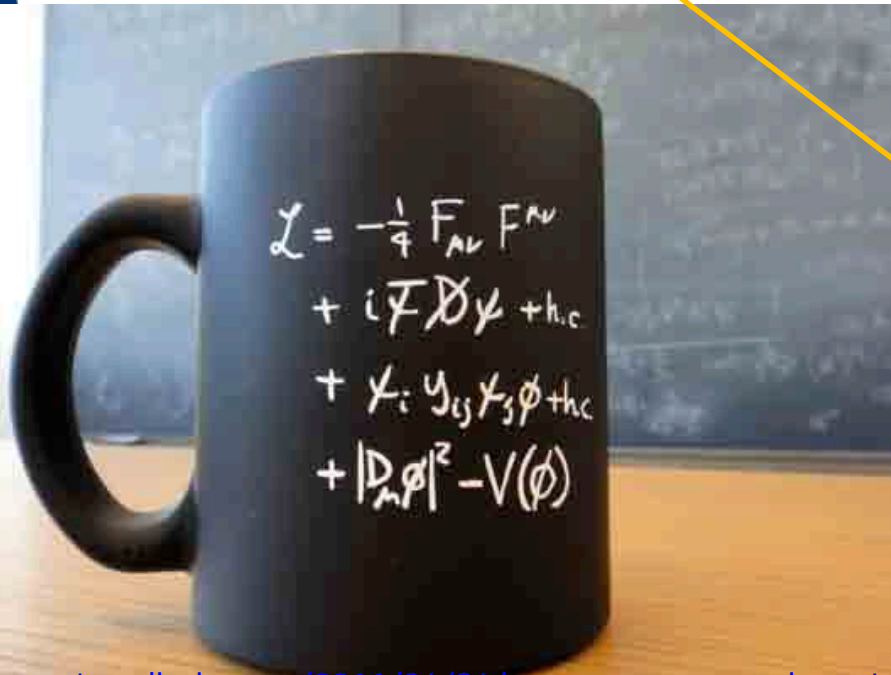


Von der Lagrangedichte zu den Vertices

Forschung in Dresden

Wechselwirkungen zwischen
Boten und Bausteinen
-> am Besten verstanden

Botenteilchen unter sich:
à emag Wellen, Selbstkopplung



www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/

Higgs mit Bausteinen und Boten
Massen der Bausteine und Botenteilchen
Erzeugung und Zerfälle des Higgs Teilchens

Higgsteilchen unter sich
noch nicht beobachtet
-> nächster Beschleuniger

Bedeutung

- Aufstellung der Terme dieser „Weltformel“:
 - Natur verlangt Invarianz unter 3 Symmetrien („lokalen Umeichungen“)
 - Terme, die die Symmetrie nicht erfüllen, sind verboten
 - **Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungen erfüllen**
-> lokale Eichsymmetrie ist „Ursache“ der Wechselwirkungen
- Erläuterung der Formel:
 - Jedem Term entspricht in dieser Reihenfolge
 - à elektromagnetische Wellen und Wechselw. zw. Botenteilchen
 - à Wechselwirkung zwischen Baustein- und Botenteilchen
 - à Massen der Bausteinteilchen und WW mit BEHiggs-Feld
 - à WW der Botenteilchen BEHiggs-Feld und Higgs-Teilchen
 - **Alle Prozesse lassen sich mit Hilfe dieser Formel vorhersagen**
(Maxwell-Gleichungen: Licht, Magnetismus, Elektromotor, Radiowellen,
Kernphysik: **a,b,g**- Zerfälle, Brennen von Sternen...)

Why are all the interactions so similar in their structure?

There are a number of possibilities:

- *The first is the limited imagination of physicists:
When we see a new phenomenon, we try to fit it in the framework we already have – until we have made enough experiments we don't know that it doesn't work...
It's because physicists have only been able to think of the same damn thing, over and over again.*
- *Another possibility is that it is the same damn thing over and over again – **that Nature has only one way of doing things, and She repeats her story from time to time.***
- *A third possibility is that things look similar because they are aspects of the same thing – **some larger picture underneath...***

Richard. P. Feynman, "The strange theory of light and matter"
Princeton University Press, 1985
"Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie"
Piper Taschenbuch, 9,95€

Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

Ich hoffe, manche Anregungen waren nützlich, denn:

