

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Florian Kirfel



Woraus ist Materie aufgebaut?



NETZWERK
TEILCHENWELT

Woraus ist Materie aufgebaut?



Vier-Elemente-Lehre
Empodekles
(5. Jahrh. v. Chr.)



NETZWERK
TEILCHENWELT

Woraus ist Materie aufgebaut?

Alle uns bekannten
Stoffe sind aus 118
Elementen
aufgebaut

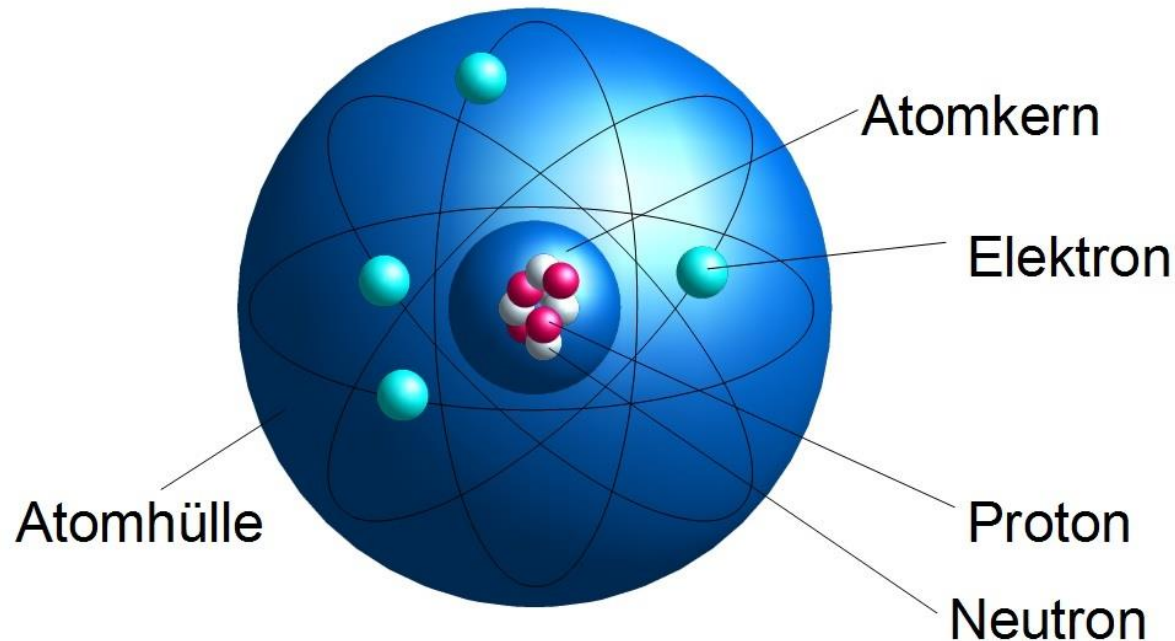
Periodensystem der Elemente

	1		Alkalimetalle	Hallmetalle														18			
1	1 H Wasserstoff	2			Edelmetalle	Nichtmetalle												2 He Helium			
	3,0																				
2			4 Li Lithium	6 Be Beryllium														10 Ne Neon			
					Übergangsmetalle	Lanthanoide	Actinoide	Metalle													
3	11 Na Natrium	12 Mg Magnesium			4	5	6	7	8	9	10	11	12								
4	19 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Eisen	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton			
5	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirkonium	41 Nb Niob	42 Mo Molybdän	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Platin	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Jod	54 Xe Xenon			
6	55 Cs Cäsium	56 Ba Barium	57 La Lanthan	58 Ce Cer	59 Pr Praseodym	60 Nd Neodym	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium				
7	87 Fr Francium	88 Ra Radium	**	101 Db Dubnium	102 Sg Seaborgium	103 Bohrium	104 Hs Hassium	105 Me Meitnerium	106 Ds Darmstadtium	107 Ts Tennessium	108 Og Oganesson	109 Uue Ununseptium	110 Uu Ununseptium	111 Uup Ununseptium	112 Lv Unbinetium	113 Nh Untrium	114 Fl Unquadrum	115 Mc Unpentium	116 Ds Unsextium	117 Ts Unseptium	118 Og Unoktium

kleinstmögliche Menge = Atom

chemisch nicht weiter teilbar!

Woraus ist Materie aufgebaut?



Bohrsches Atommodell (1913):
Elektronen umkreisen positiven
Atomkern



NETZWERK
TEILCHENWELT

Woraus ist Materie aufgebaut?

- Streuung an Atomkernen lässt auf Substruktur schließen
- Beschleunigerexperimente entdecken "Teilchenzoo"

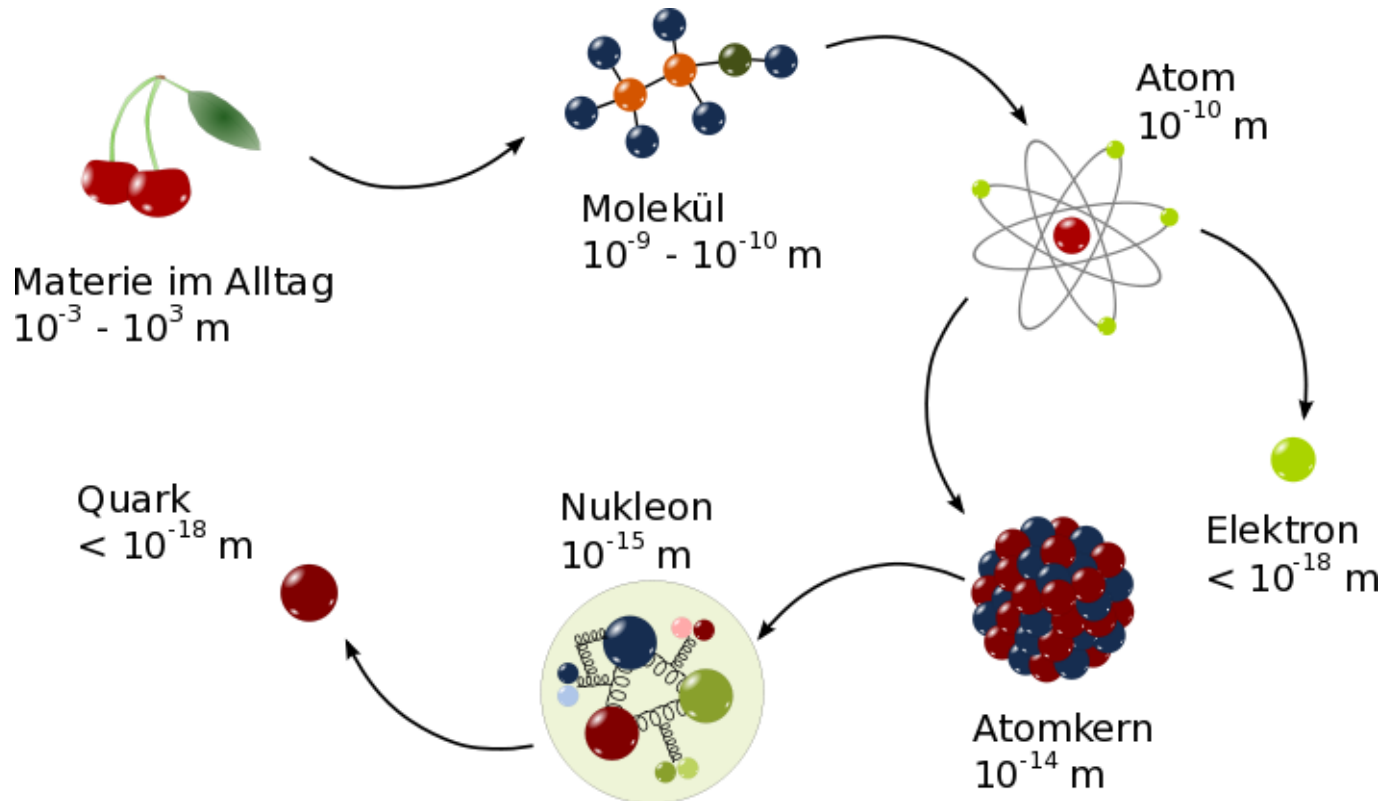


Drei-Quark Modell von
Gell-Mann und Zweig
(1964)

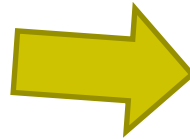


NETZWERK
TEILCHENWELT

Woraus ist Materie aufgebaut?



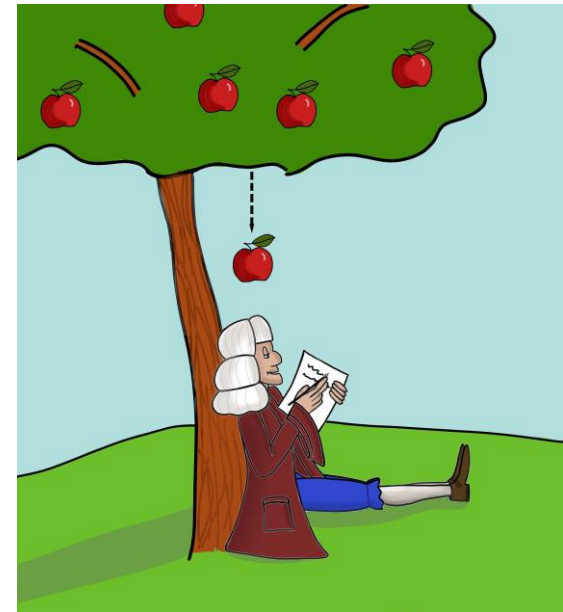
Welche Kräfte halten Materie zusammen?



NETZWERK
TEILCHENWELT

Welche Kräfte halten Materie zusammen?

- Schwerkraft
- Mondumlaufbahn
- Erdumlaufbahn
- Gezeiten
- ...



Newton'sches
Gravitationsgesetz

Welche Kräfte halten Materie zusammen?

- Elektrizität
- Magnetismus



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

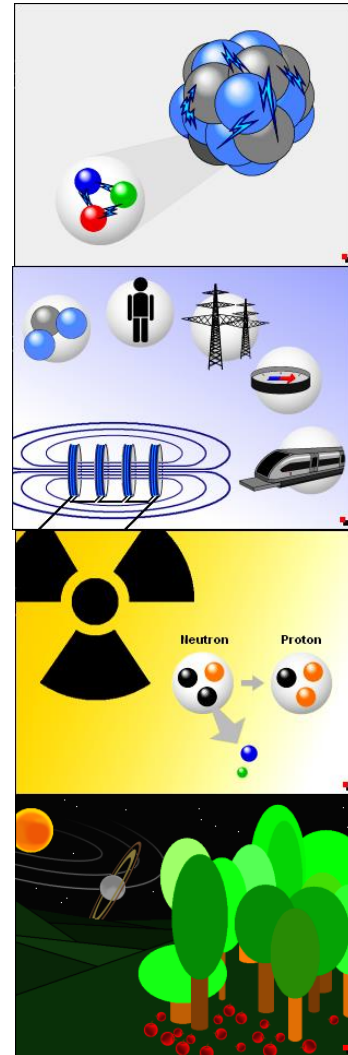
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Maxwell Gleichungen:
Elektromagnetismus

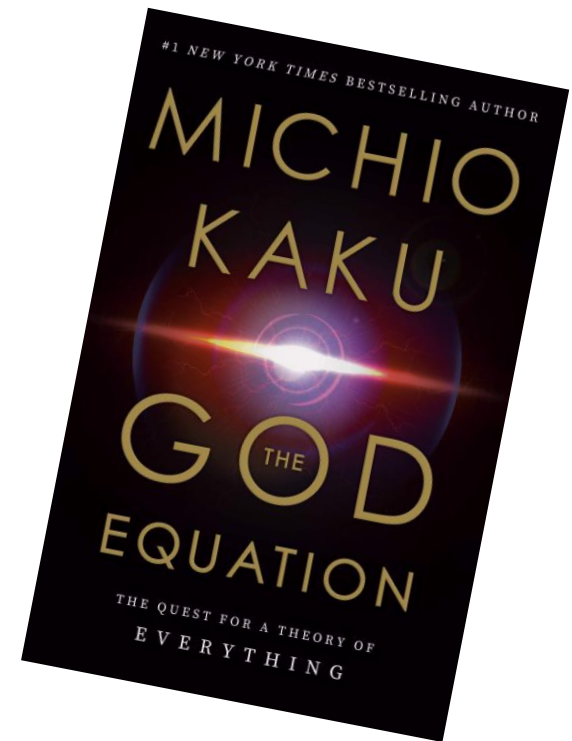
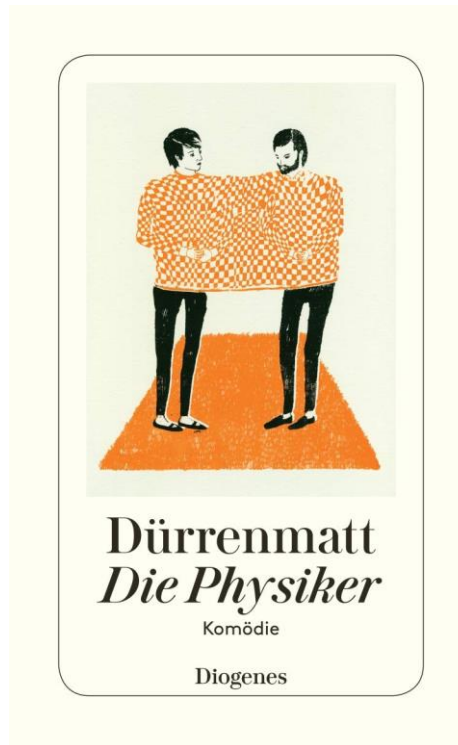


Welche Kräfte halten Materie zusammen?

- ▶ Starke Wechselwirkung
- ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung
- ▶ Schwache Wechselwirkung
- ▶ Gravitation



Gibt es eine "Theory of everything"?



NETZWERK
TEILCHENWELT

Das Standardmodell

- Beinhaltet alle Elementarteilchen
- Beschreibt alle Wechselwirkungen (mit Ausnahme der Gravitation)

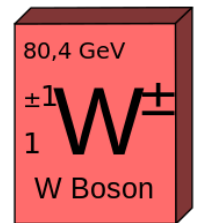
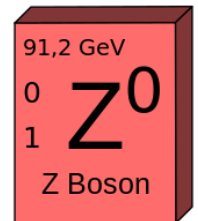
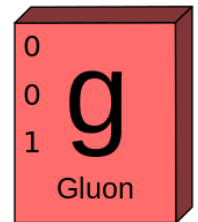
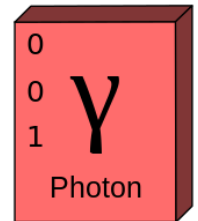
Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ±1 1 W[±] W Boson	
Leptonen				Eichbosonen	

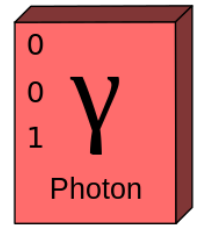


Die Wechselwirkungen

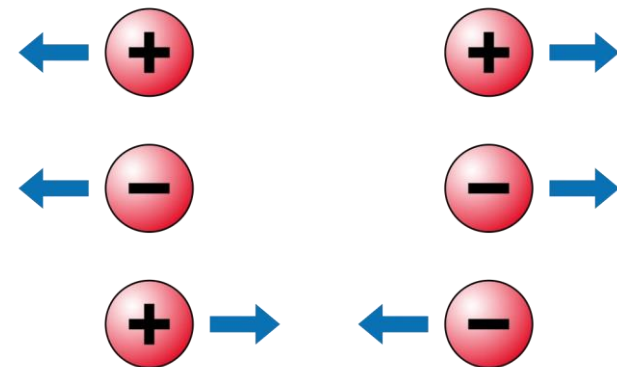
- fundamentale Kräfte werden im Standardmodell durch Eichbosonen beschrieben
- Wechselwirkungen zwischen Teilchen = Austausch eines Eichbosons



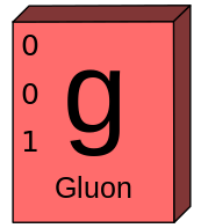
Elektromagnetische Wechselwirkung



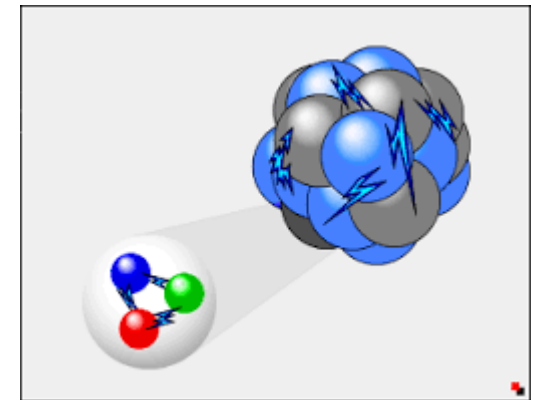
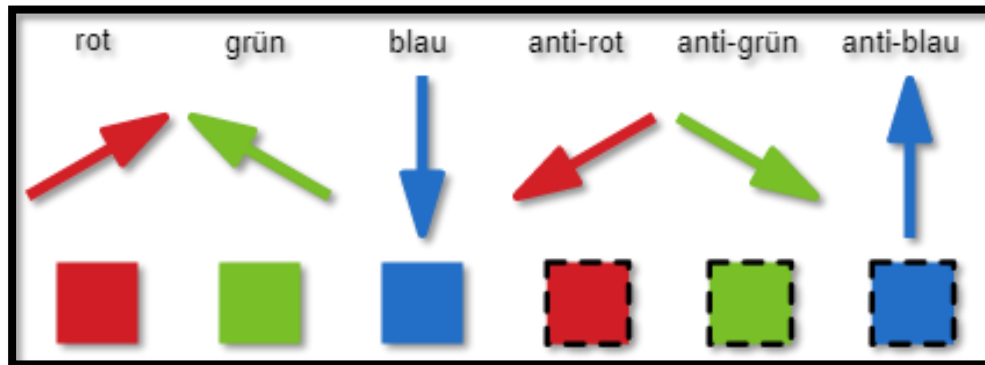
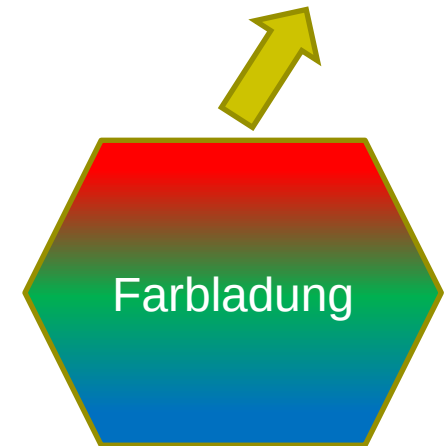
- wirkt auf alle **elektrisch geladenen** Teilchen
- z.B. verantwortlich für den Aufbau der Atomhüllen Orbitale



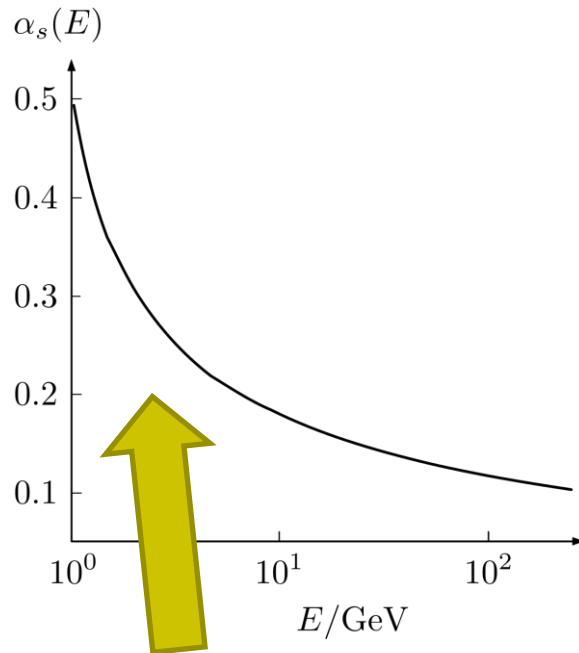
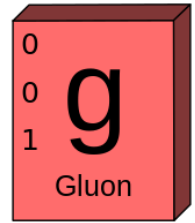
Starke Wechselwirkung



- wirkt auf Teilchen mit **Farbladung**
- Zusammenhalt des Atomkerns / Bindung der Quarks

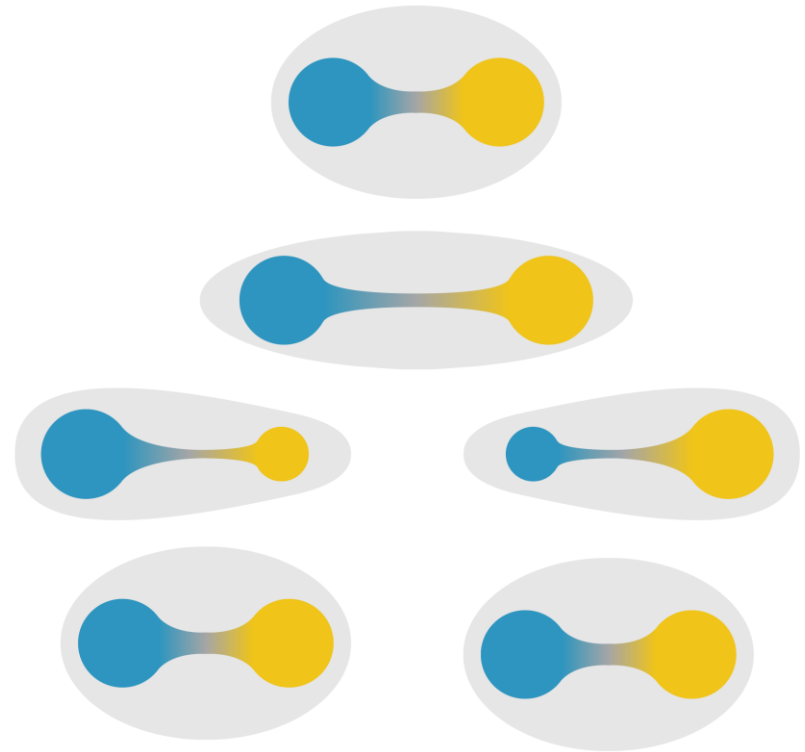


Starke Wechselwirkung



Kopplungsstärke steigt mit
Abstand!

$$E = mc^2$$



farbgeladene Teilchen können nicht
isoliert existieren

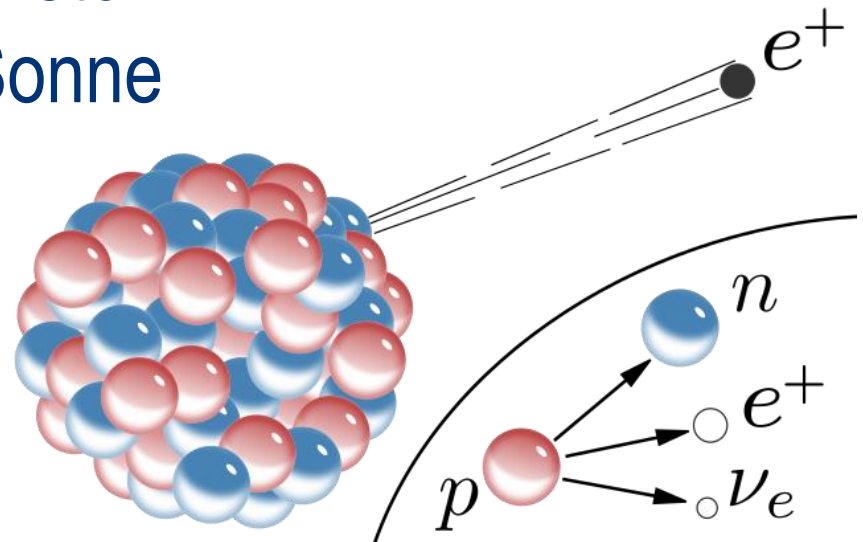
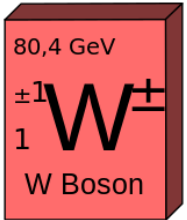
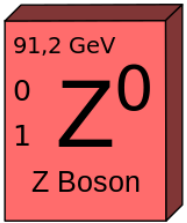


NETZWERK
TEILCHENWELT

Schwache Wechselwirkung

- Beta Zerfall in Atomkernen
- Fusion von Wasserstoff zu Helium in der Sonne

Schwache
Ladung



Elementarteilchen

- in drei Generationen angeordnet
- jedes Teilchen besitzt ein Antiteilchen mit komplementärer Ladung ($q \rightarrow \bar{q}$ bzw. $e^- \rightarrow e^+$)

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name →	u up	c charm	t top
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau

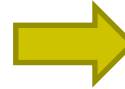


Quarks

2,4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom



Elektrische
Ladung



Farbladung



Schwache
Ladung



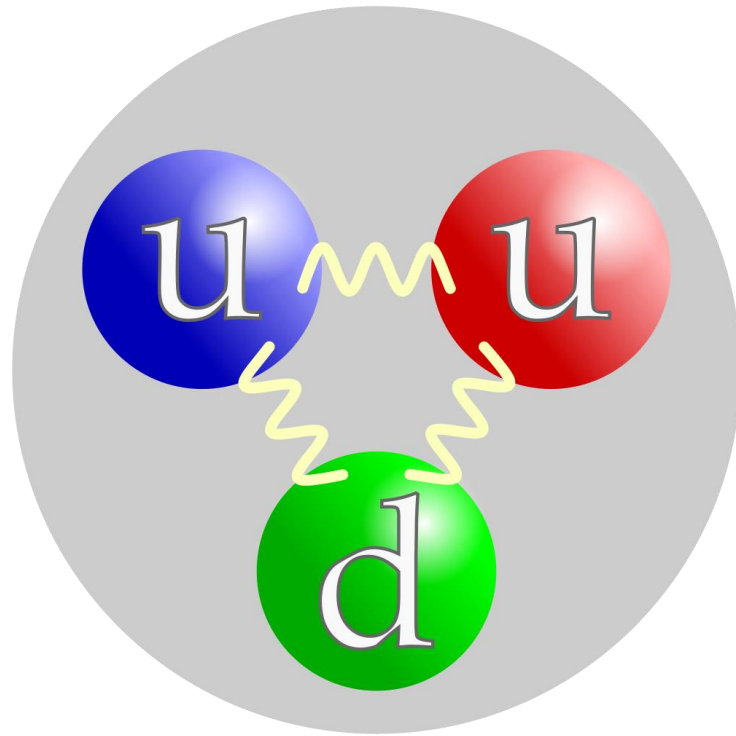
NETZWERK
TEILCHENWELT

Wie entstehen Protonen aus Quarks?

Masse →	2,4 MeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$
Name →	u up

4,8 MeV
$-\frac{1}{3}$
$\frac{1}{2}$
d down

Quarks

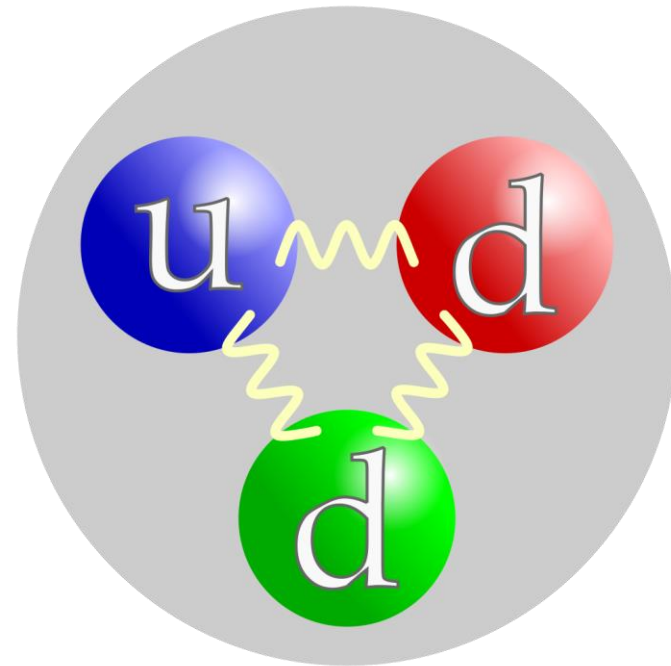


Wie entstehen Neutronen aus Quarks?

Masse →	2,4 MeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$
Spin →	$\frac{1}{2}$
Name →	u up

4,8 MeV
$-\frac{1}{3}$
$\frac{1}{2}$
d down

Quarks

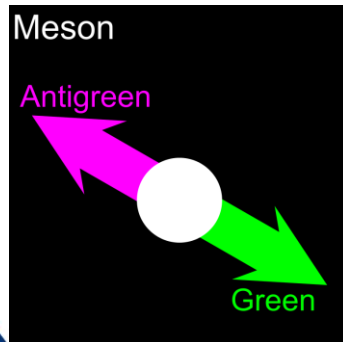


Der Teilchenzoo

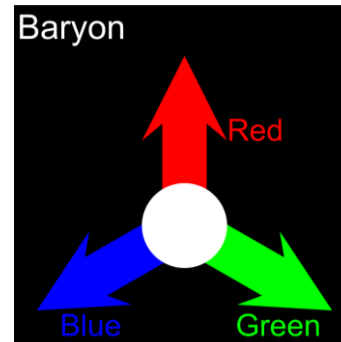
Hadronen
(stark wechselwirkende Teilchen)



Mesonen:
Quark und
Antiquark Paare



Baryonen:
Drei Quarks oder
drei Antiquarks



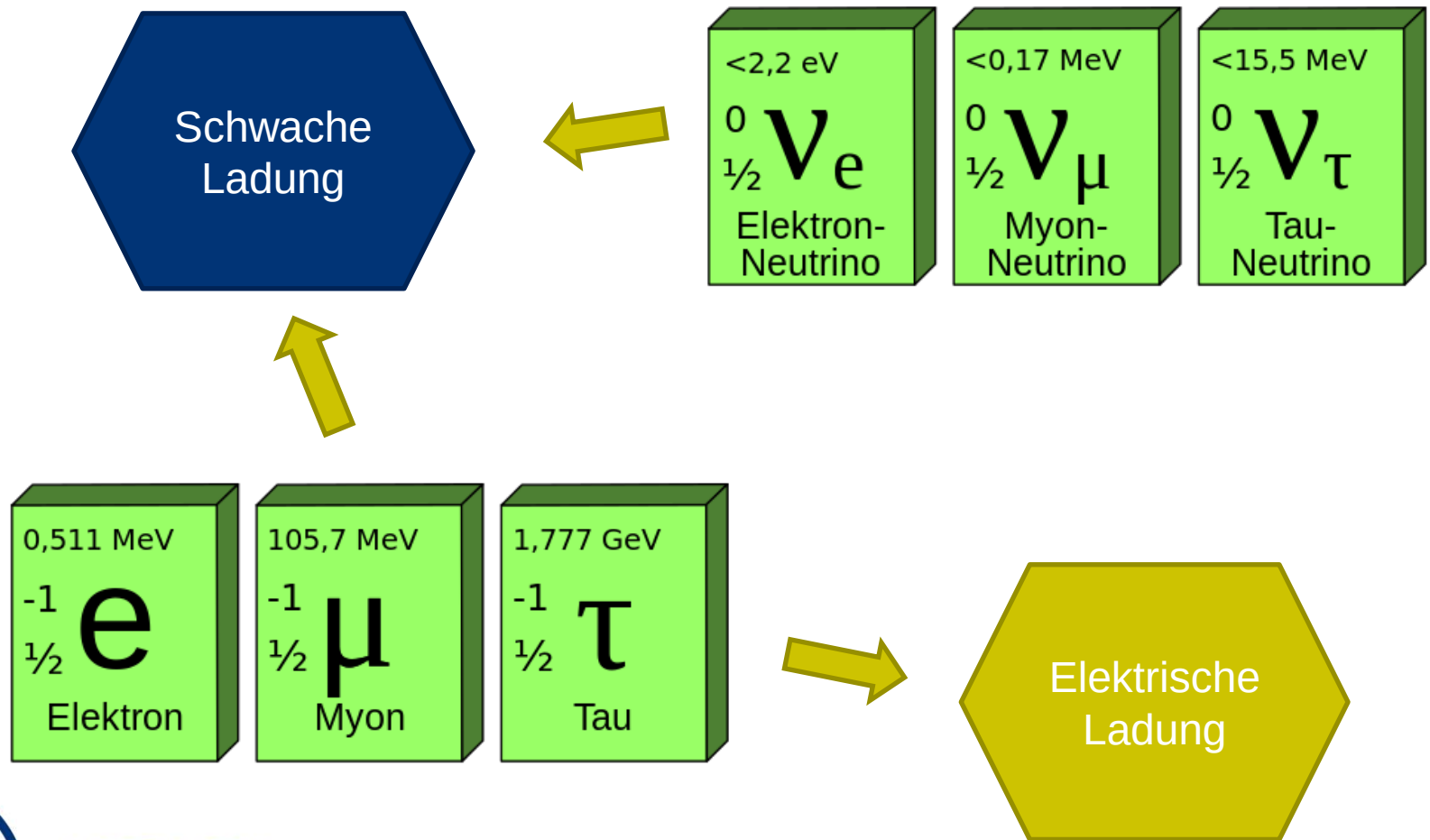
2,4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom



NETZWERK
TEILCHENWELT

PDG
particle data group

Leptonen



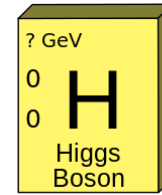
Das Standardmodell

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ±1 1 W[±] W Boson	
Leptonen					Eichbosonen



Das Higgs Boson

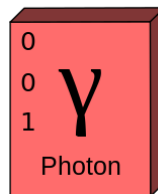
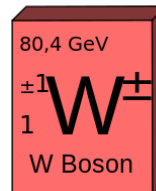
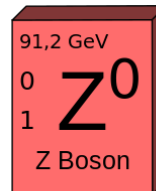


Schwache
Wechselwirkung

Elektromagnetische
Wechselwirkung

Elektroschwache
Wechselwirkung

elektroschwache Theorie
→ vier masselose
Eichbosonen



Masse kann durch den
Higgs Mechanismus
erklärt werden!



NETZWERK
TEILCHENWELT

Ein perfektes Modell?

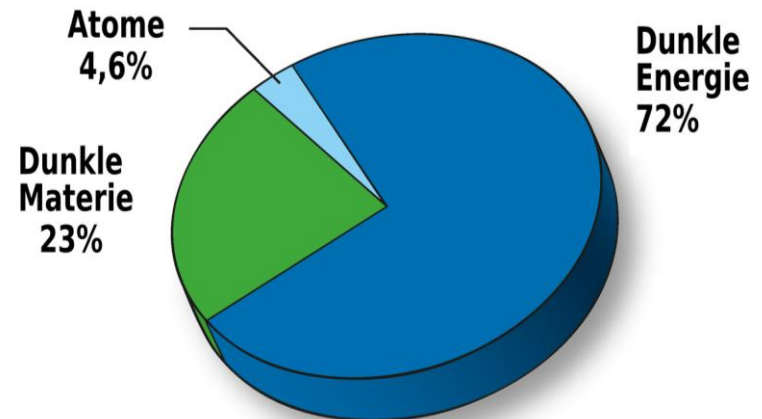
Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron- Neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon- Neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 $W^\pm$ W Boson	Eichbosonen



Offene Fragen des Modells

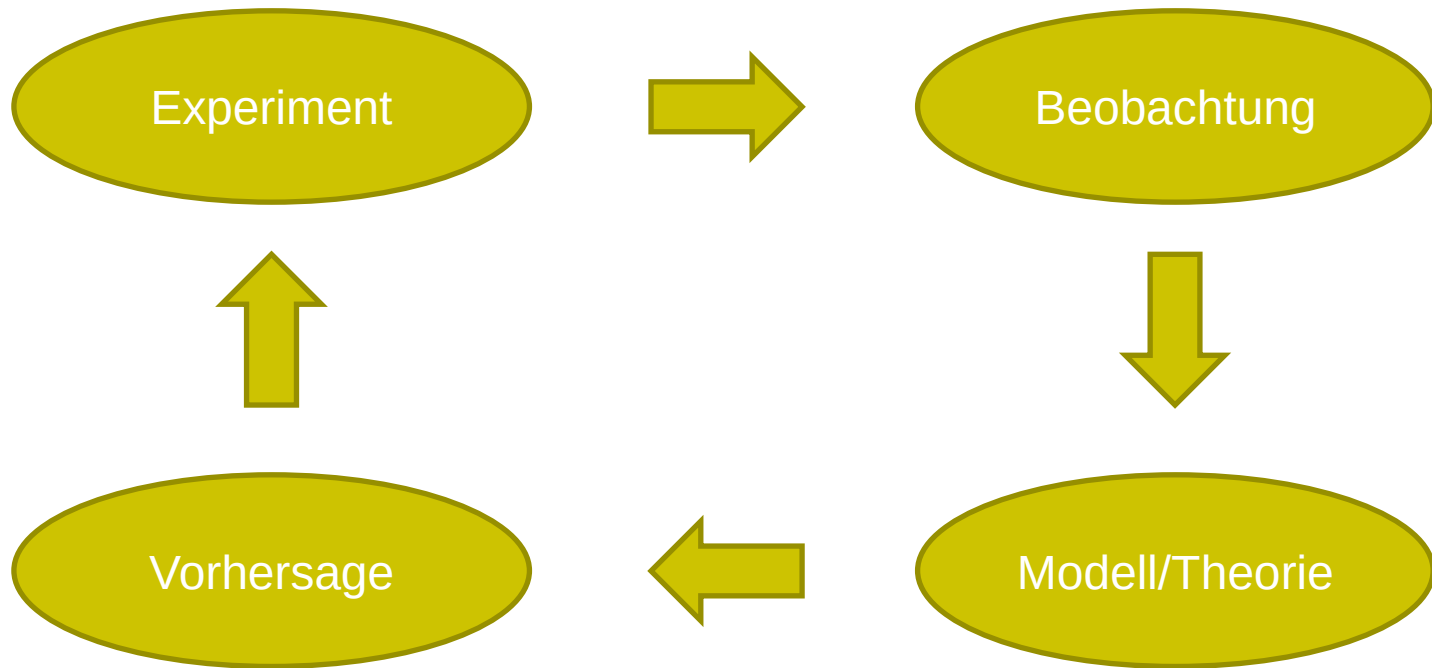
- Warum gibt es genau drei Generationen?
- Wie kann man die freien Parameter (Massen etc.) des Standardmodells theoretisch bestimmen?
- Was ist dunkle Materie/Energie?
- Wie kann die Gravitation im Modell aufgenommen werden?
- Warum haben Neutrinos von Null verschiedene Massen?
- ...



**Ist das Standardmodell
also ein schlechtes
Modell?**



Zusammenspiel aus Theorie und Experiment





Der W Boson Pfad

Was ist heute für uns relevant?



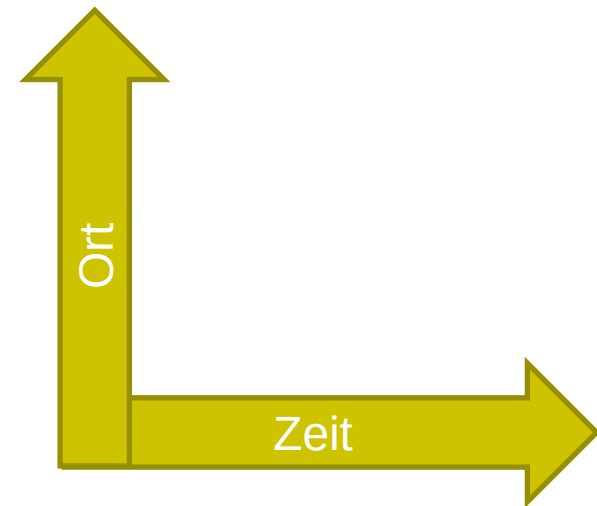
NETZWERK
TEILCHENWELT

Feynman Diagramme

Bildliche Darstellung der Wechselwirkungen

„Zeit – Ort“ Diagramm:

- Wo passiert etwas?
- Wann passiert etwas?



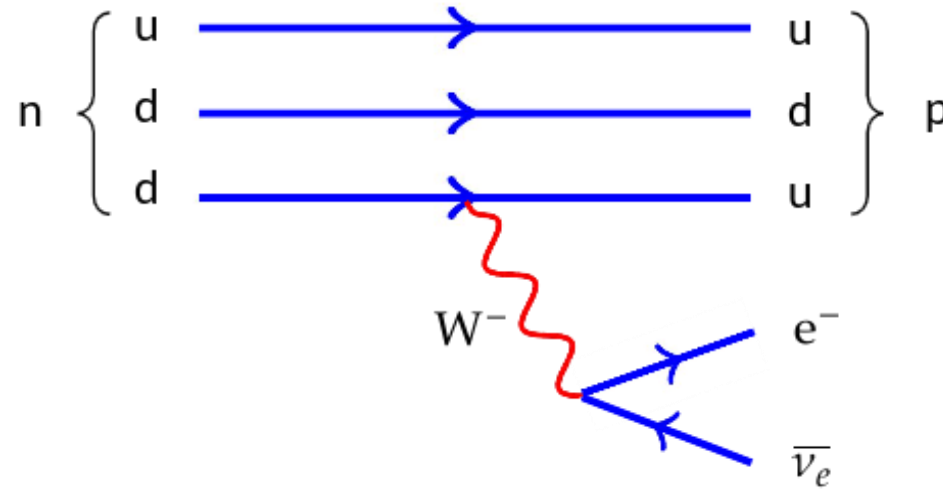
Bausteine:

- Materieteilchen 
- Anti-Teilchen 
- Botenteilchen  

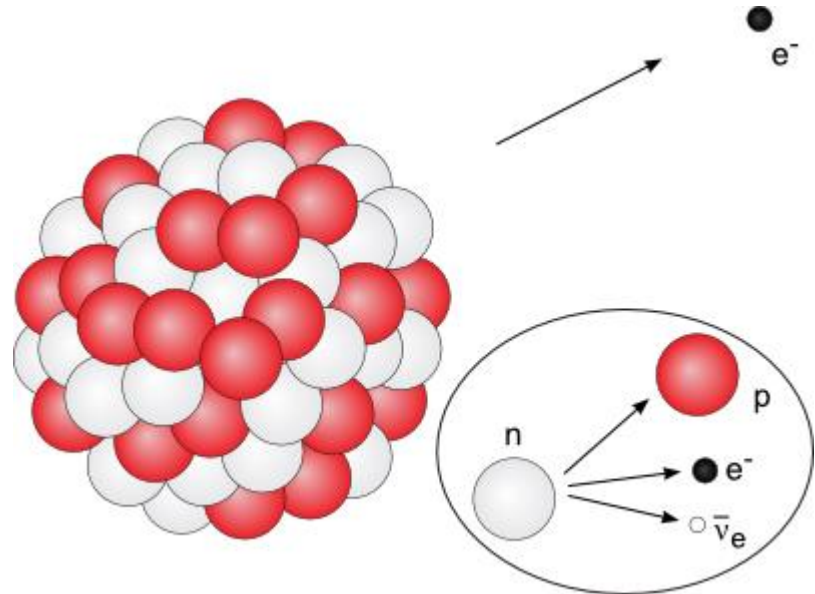


NETZWERK
TEILCHENWELT

Feynman Diagramme

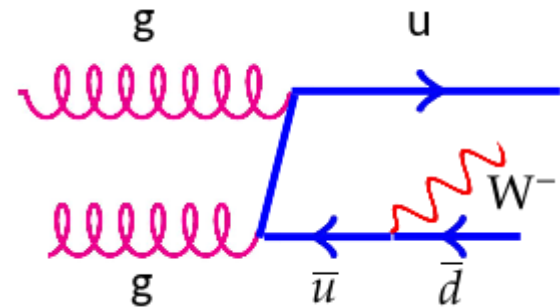
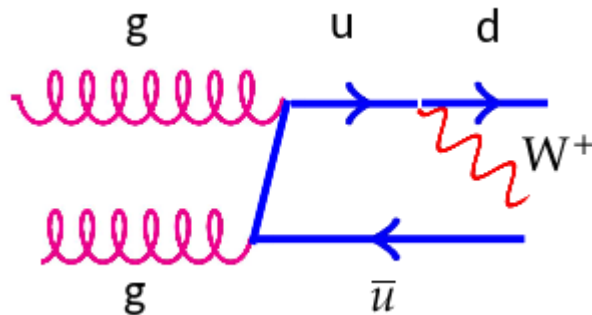
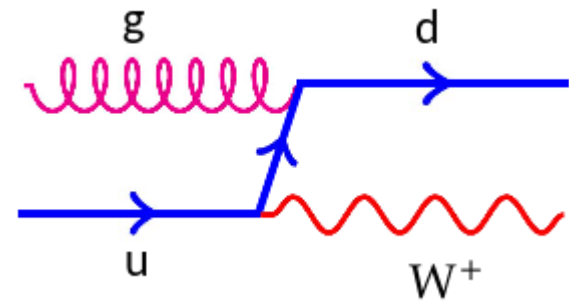
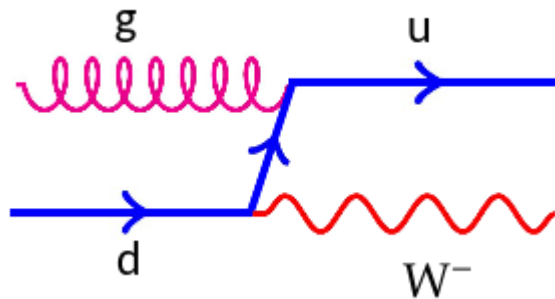
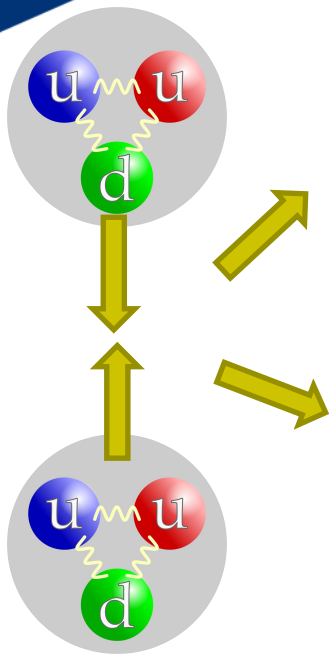


Beta Zerfall



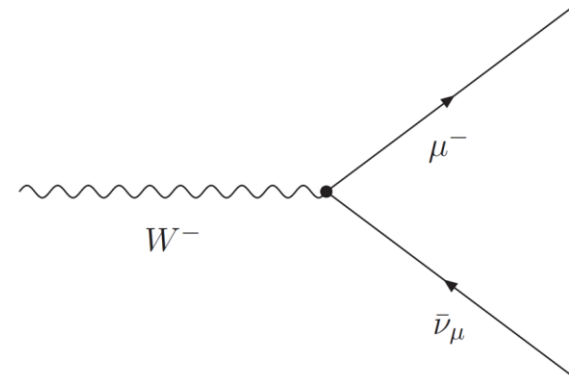
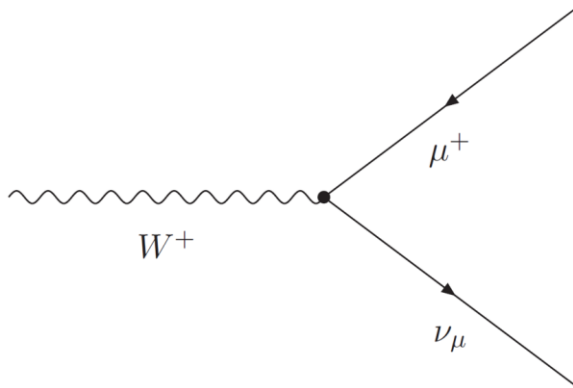
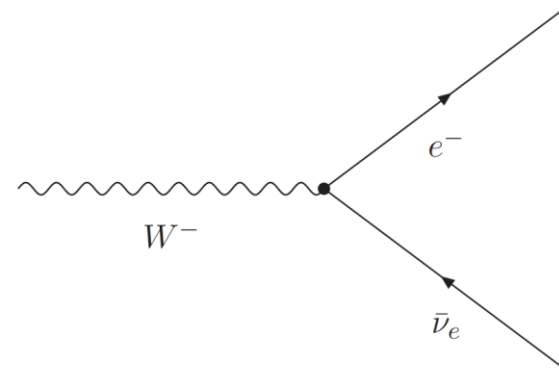
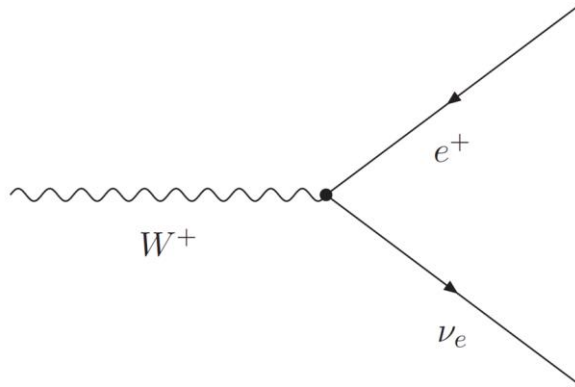
NETZWERK
TEILCHENWELT

W-Boson Produktion am LHC

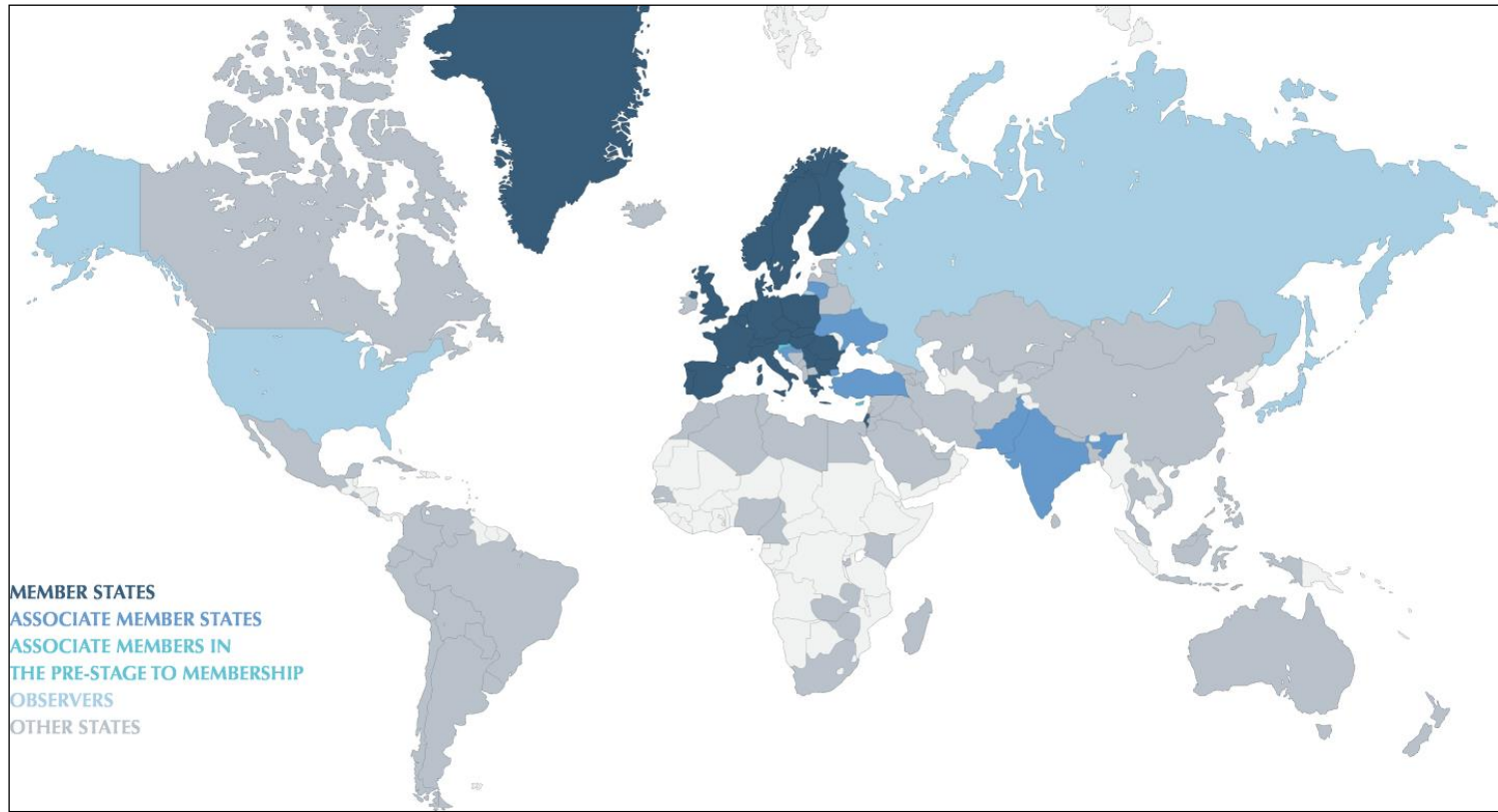


NETZWERK
TEILCHENWELT

W-Boson Zerfälle

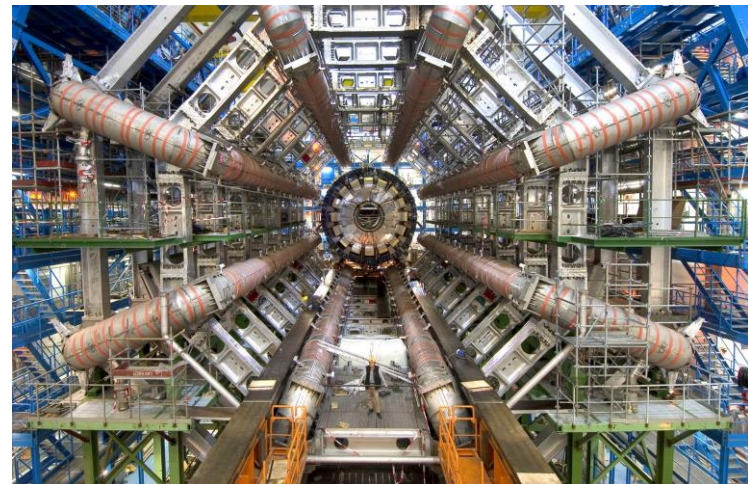
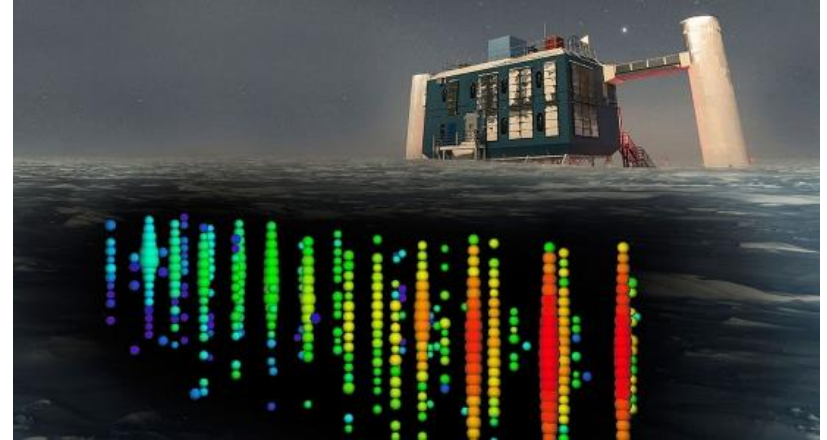
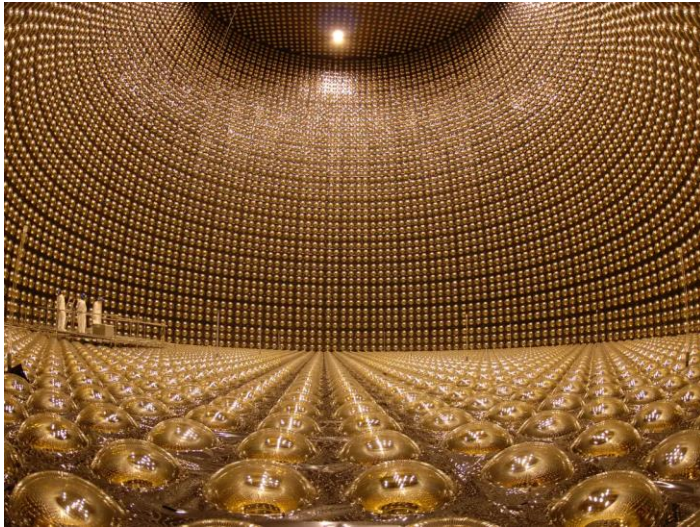


Was macht ein Teilchenphysiker?



NETZWERK
TEILCHENWELT

Was macht ein Teilchenphysiker?



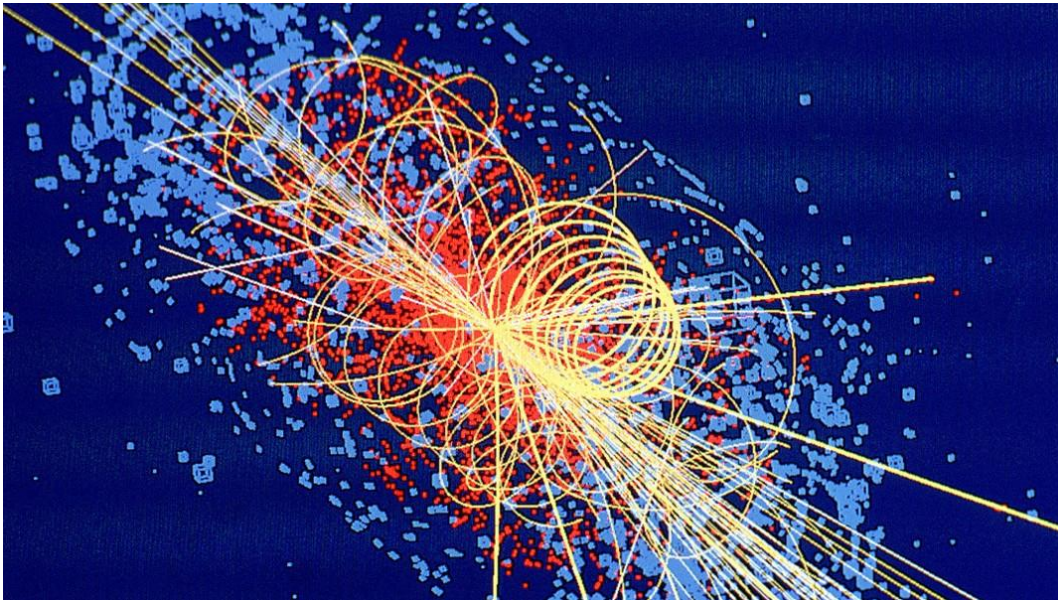
NETZWERK
TEILCHENWELT

Was macht ein Teilchenphysiker?

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$



Was macht ein Teilchenphysiker?



NETZWERK
TEILCHENWELT

Zusammenfassung

- das Standardmodell beschreibt alle bekannten Elementarteilchen
- drei der vier Wechselwirkungen können im Modell über den Austausch von Eichbosonen dargestellt werden
- dennoch verbleiben viele ungelöste Probleme

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z⁰ Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] W Boson	
					Eichbosonen

Fragen?



NETZWERK
TEILCHENWELT