

# Mit dem Allerkleinsten das Allergrößte erklären



Kira Abeling

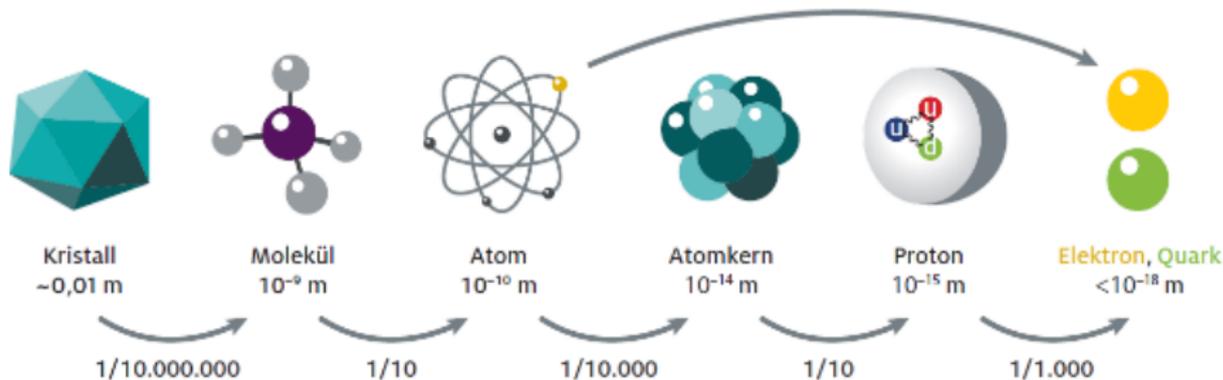
II. Physikalisches Institut Göttingen

02. November 2020

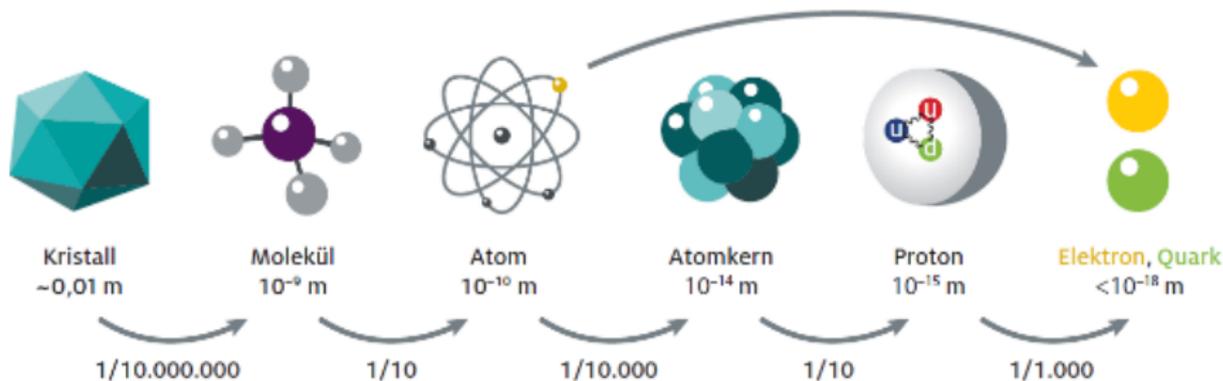


NETZWERK  
TEILCHENWELT

Alles im Universum ist zusammengesetzt aus kleineren Bausteinen.  
Die nicht mehr teilbaren Bausteine nennen wir **Elementarteilchen**.



Alles im Universum ist zusammengesetzt aus kleineren Bausteinen.  
Die nicht mehr teilbaren Bausteine nennen wir **Elementarteilchen**.



## Massen

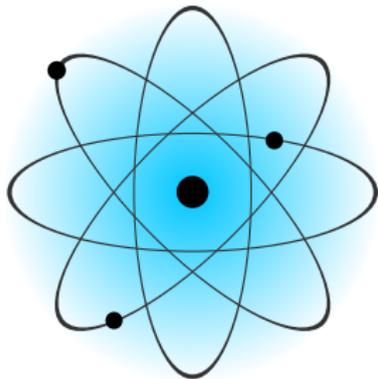
- Größenordnung:  $10^{-30} - 10^{-25}$  kg  $\rightarrow$  unpraktisch
- statt kg:  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$   $\rightarrow$  Größenordnung: 1 – 100.000  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$

# Welche Elementarteilchen

setzen das Universum zusammen?



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



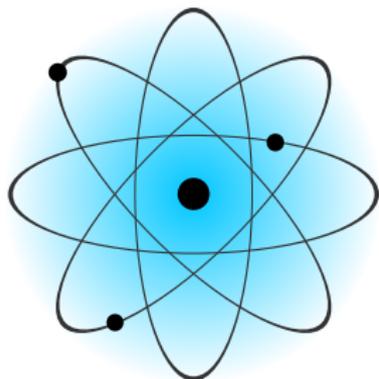
19. Jh. Chemische Elemente bestehen aus Atomen (griechisch: unteilbar)

# Welche Elementarteilchen

setzen das Universum zusammen?



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



elektron

19. Jh. Chemische Elemente bestehen aus Atomen (griechisch: unteilbar)

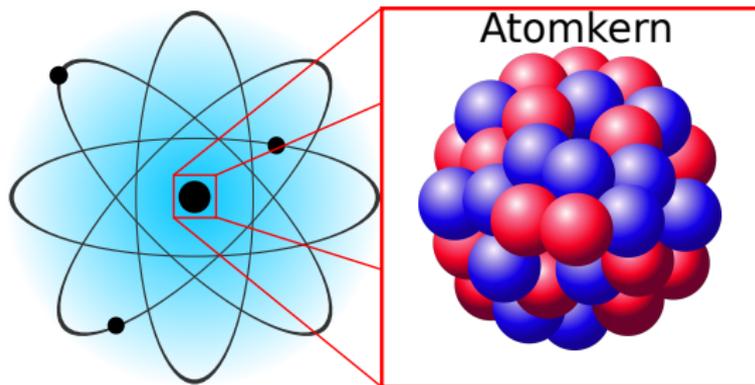
1908 Atome haben einen Kern und eine Hülle aus **Elektronen**

# Welche Elementarteilchen

setzen das Universum zusammen?



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



elektron

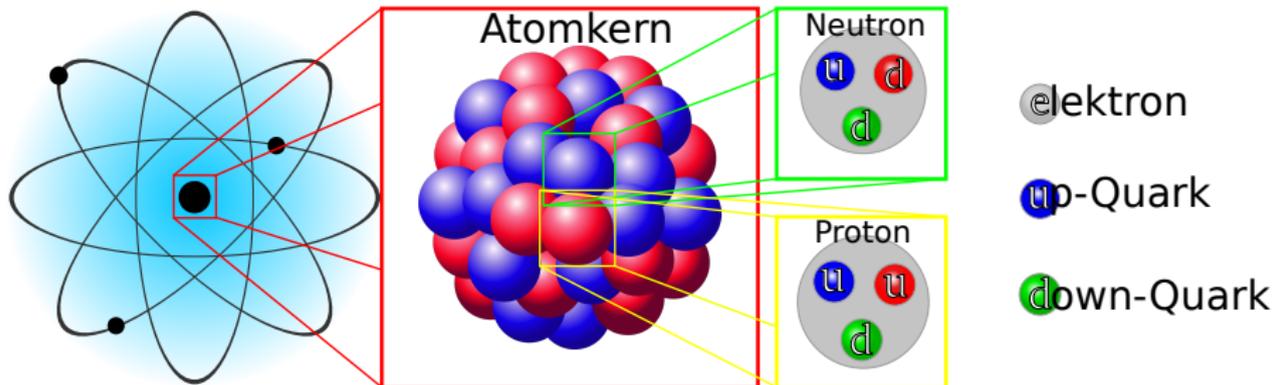
- 19. Jh. Chemische Elemente bestehen aus Atomen (griechisch: unteilbar)
- 1908 Atome haben einen Kern und eine Hülle aus **Elektronen**
- 1932 Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen.

# Welche Elementarteilchen

setzen das Universum zusammen?



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



19. Jh. Chemische Elemente bestehen aus Atomen (griechisch: unteilbar)

1908 Atome haben einen Kern und eine Hülle aus **Elektronen**

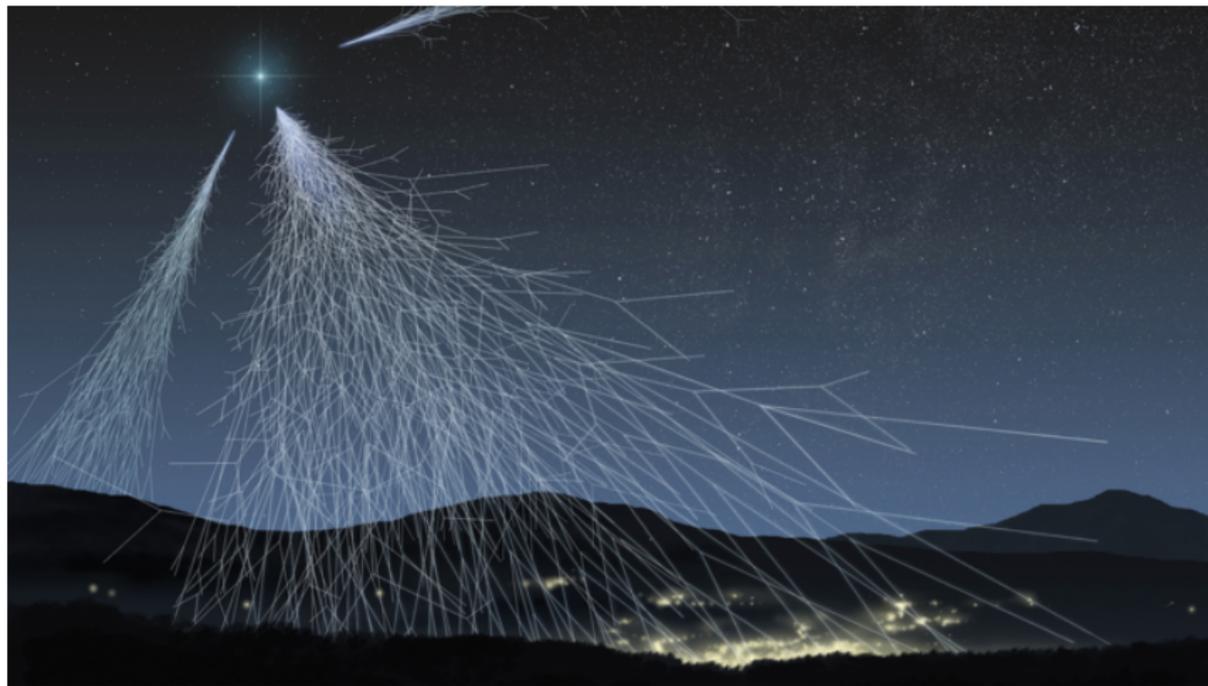
1932 Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen.

1969 Protonen und Neutronen setzen sich aus **up-Quarks** und **down-Quarks** zusammen

# Der Teilchenzoo im Himmel



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



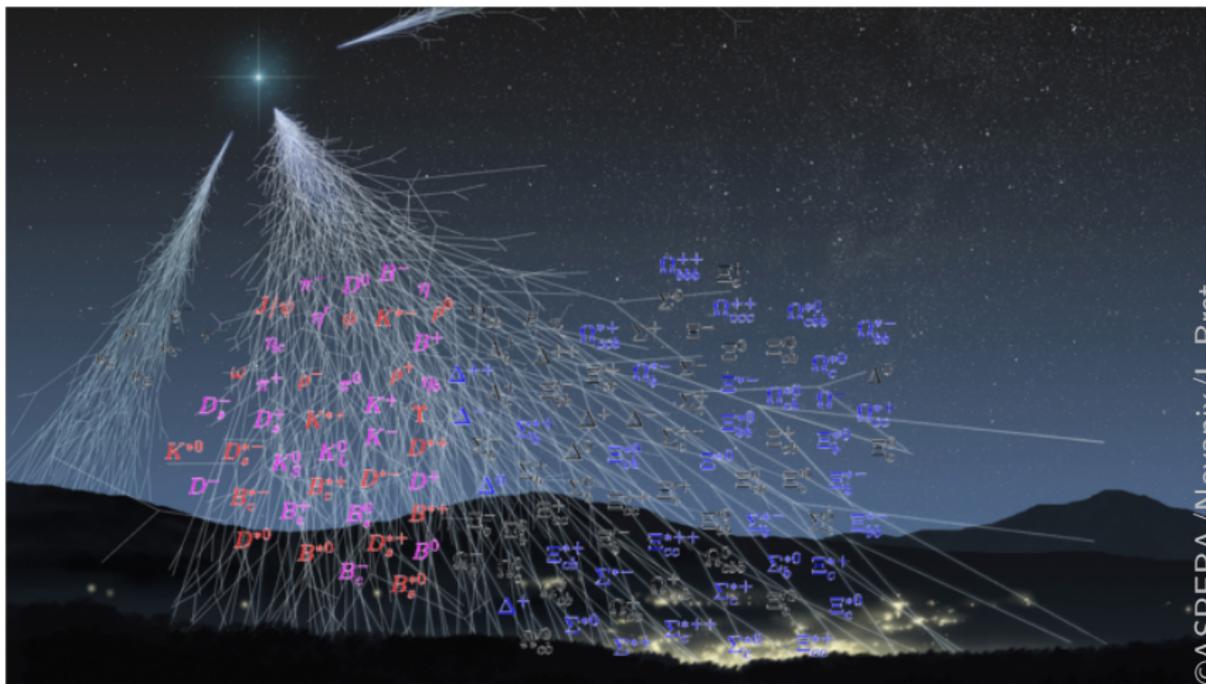
©ASPERA/Novapix/L. Bret



# Der Teilchenzoo im Himmel



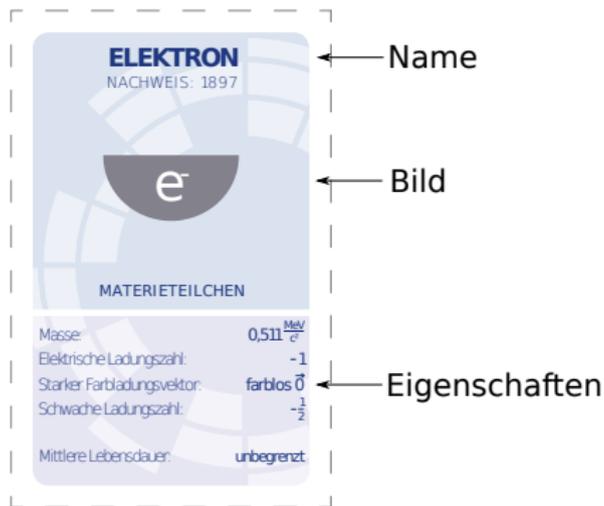
GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



©ASPERA/Novapix/L.Bret

Sind das alles Elementarteilchen?

Tatsächlich gibt es gar nicht so viele Elementarteilchen!  
Sortiert die Elementarteilchen. Welche Kriterien habt ihr gewählt?



The card is titled "ELEKTRON" with the discovery year "NACHWEIS: 1897". It features a central image of an electron, represented by a dark semi-circle with a white "e" inside. Below the image, it is labeled "MATERIETEILCHEN". The card lists several properties:

Masse:	$0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
Elektrische Ladungszahl:	-1
Starker Farbladungsvektor:	farblos $\vec{0}$
Schwache Ladungszahl:	$-\frac{1}{2}$
Mittlere Lebensdauer:	unbegrenzt

Arrows point from the labels "Name", "Bild", and "Eigenschaften" to their respective parts of the card.

Tatsächlich gibt es gar nicht so viele Elementarteilchen!  
Sortiert die Elementarteilchen. Welche Kriterien habt ihr gewählt?

Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,09 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
	<b>Quarks</b>				
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	
	<b>Leptonen</b>				
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron- Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon- Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau- Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> 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	
	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson	<b>Eichbosonen</b>

Tatsächlich gibt es gar nicht so viele Elementarteilchen!  
Sortiert die Elementarteilchen. Welche Kriterien habt ihr gewählt?

Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,09 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
	<b>Quarks</b>				
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	
	<b>Leptonen</b>				
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron- Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon- Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau- Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> 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	
	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson	<b>Eichbosonen</b>

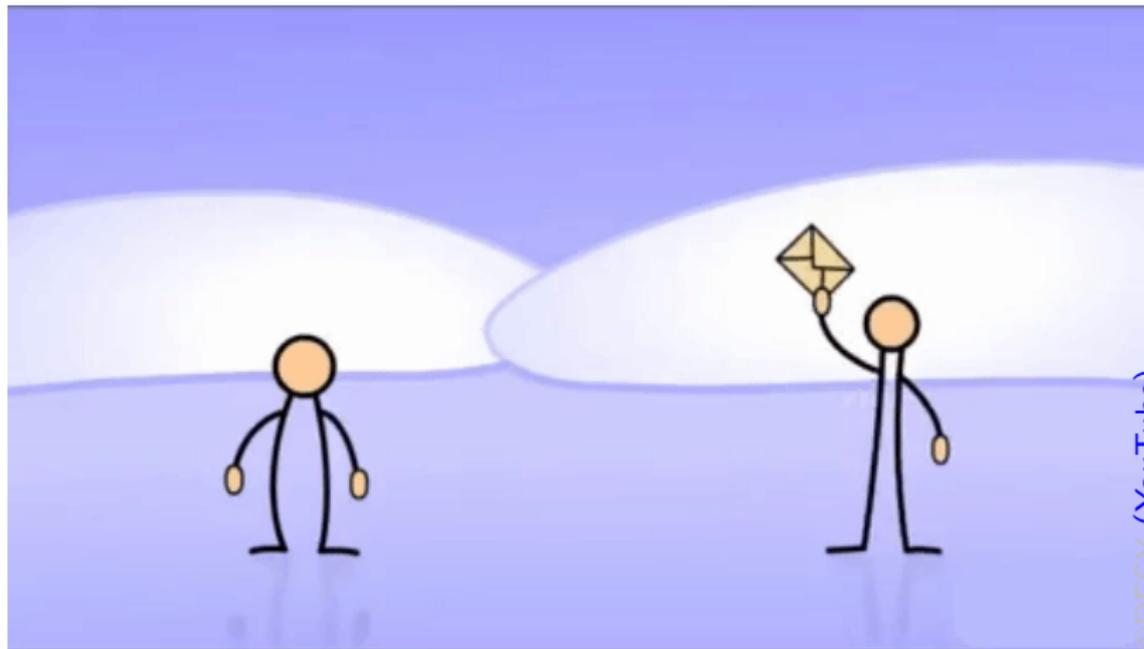
Wie bilden sich aus Teilchen Atome?

# Treffen sich zwei Teilchen

... und wechselwirken



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



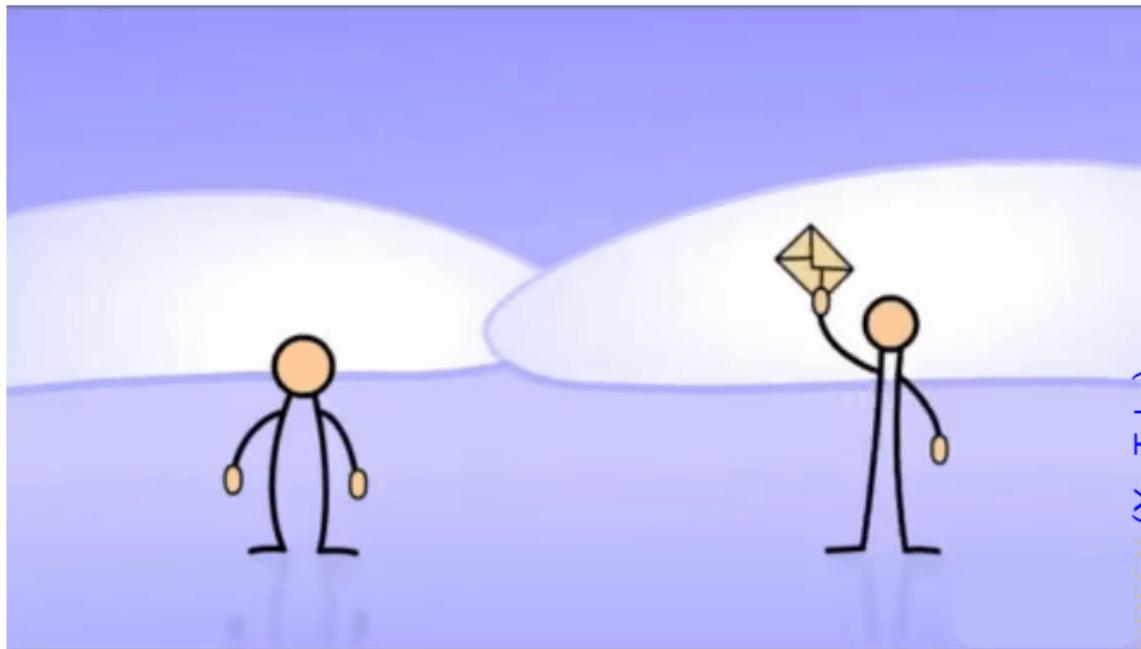
©DESY (YouTube)

# Treffen sich zwei Teilchen

... und wechselwirken



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



©DESY (YouTube)

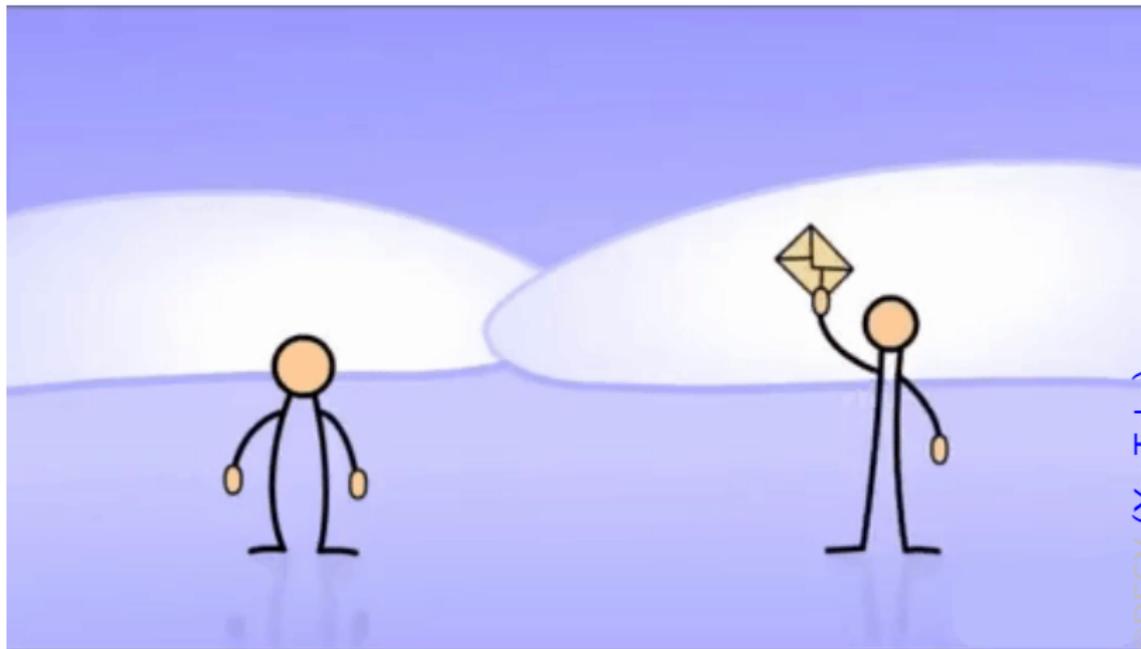
→ eine Kraft wirkt auf die Teilchen

# Treffen sich zwei Teilchen

... und wechselwirken



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



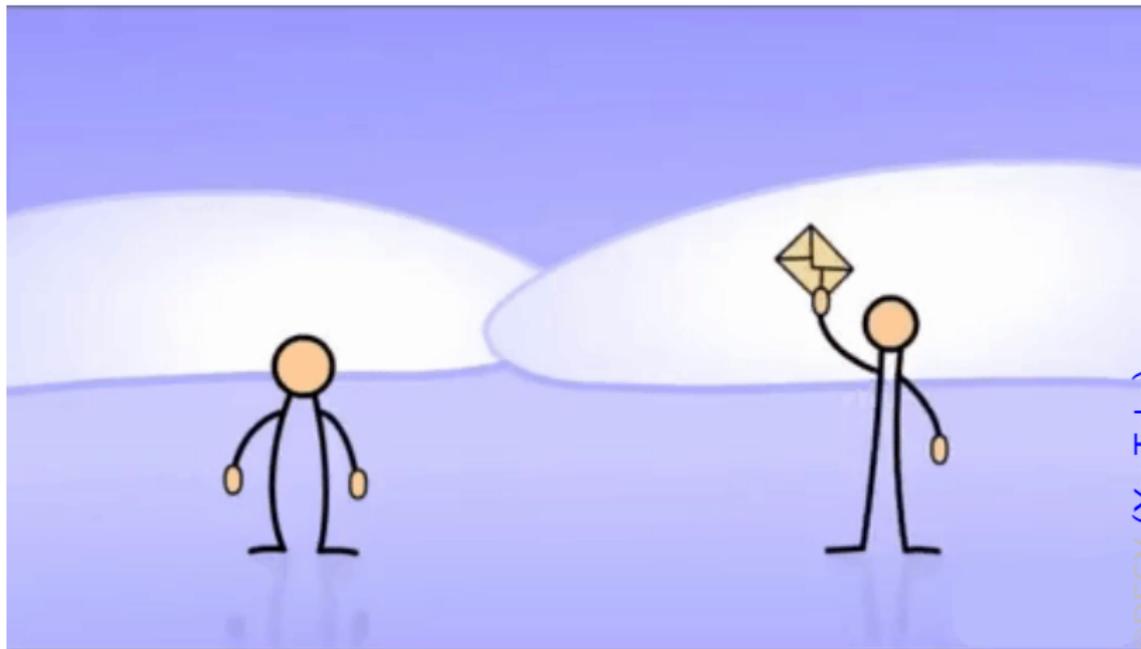
- eine Kraft wirkt auf die Teilchen
- die Kraft wird durch ein Botenteilchen vermittelt

# Treffen sich zwei Teilchen

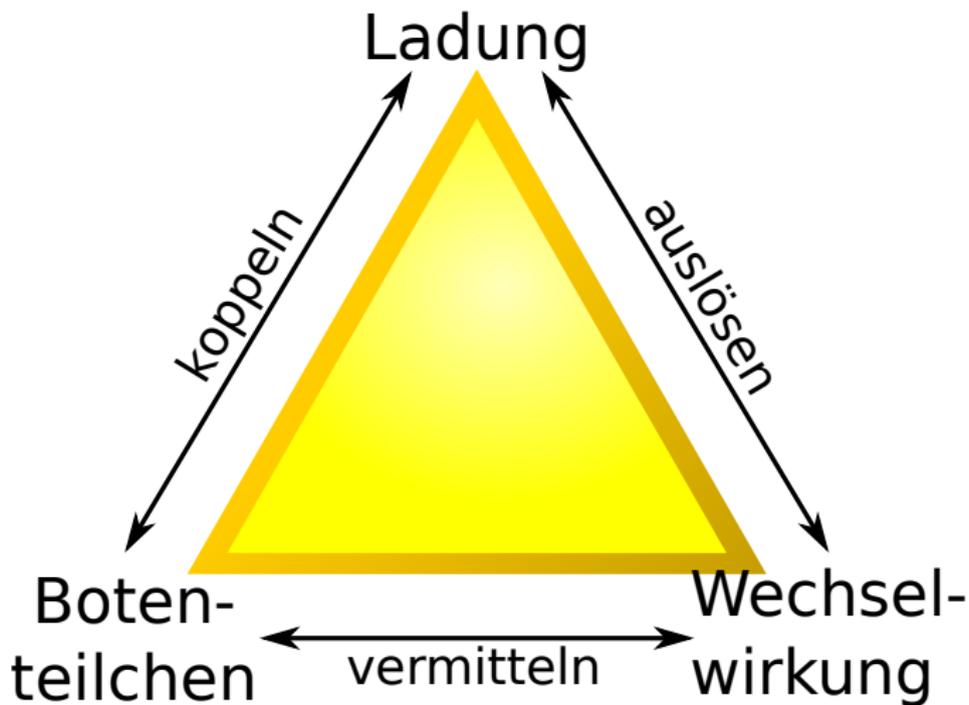
... und wechselwirken



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN

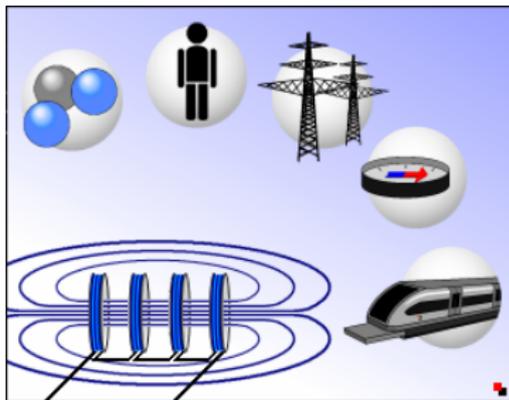
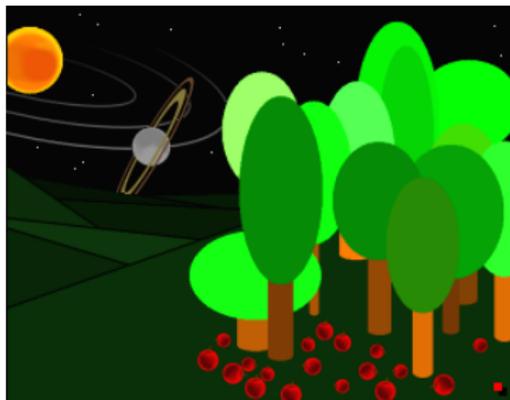


- eine Kraft wirkt auf die Teilchen
- die Kraft wird durch ein Botenteilchen vermittelt
- Teilchen brauchen „Hände“, um Informationen zu empfangen



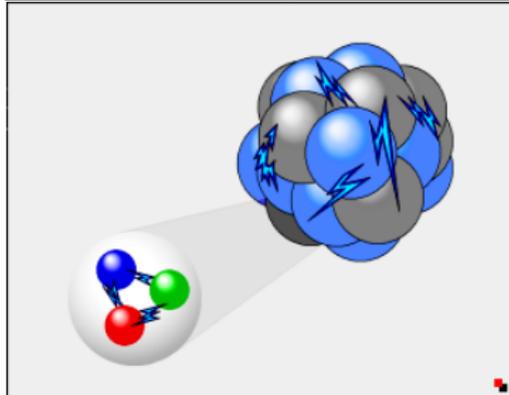
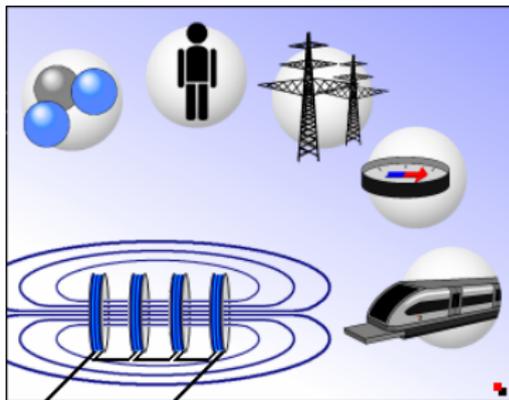


# Die 4 Elemente Kräfte

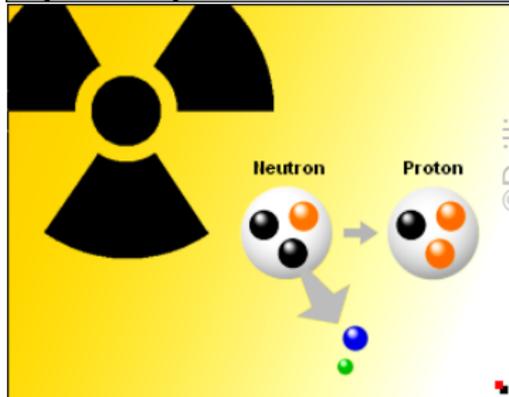
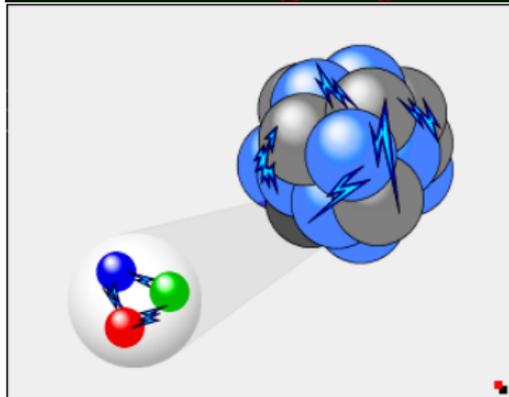
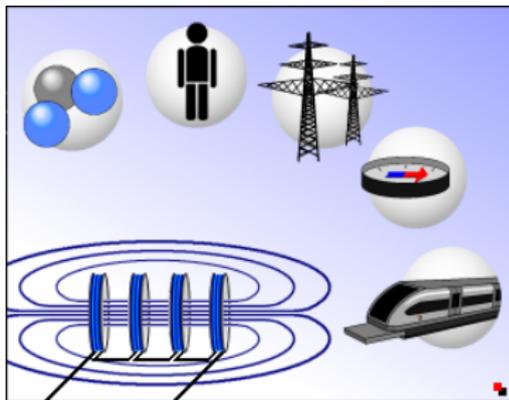
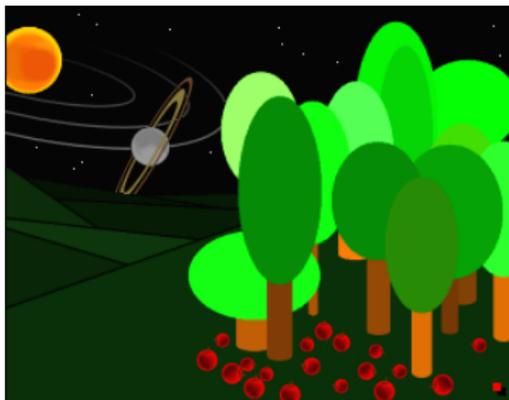


©Drillingsraum

# Die 4 Elemente Kräfte

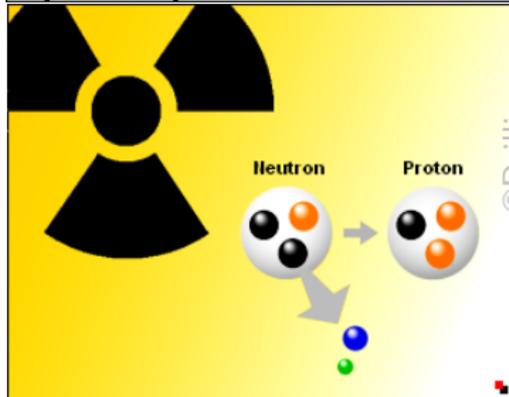
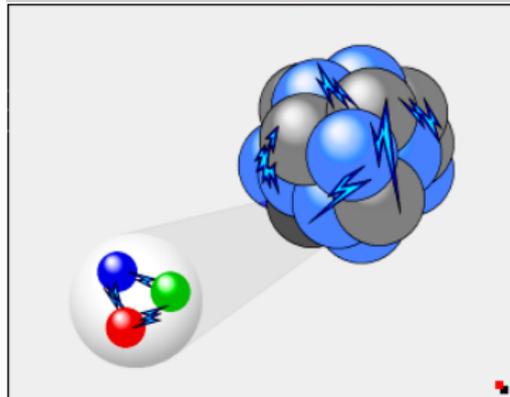
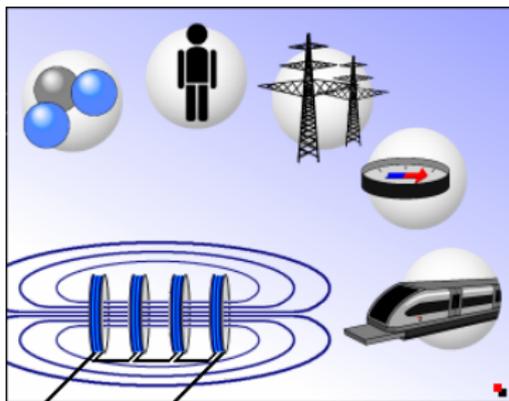
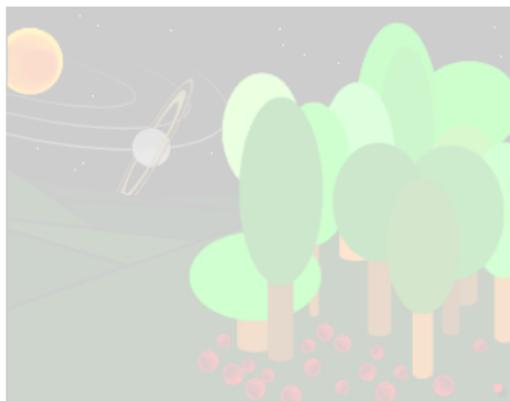


©Drillingsraum

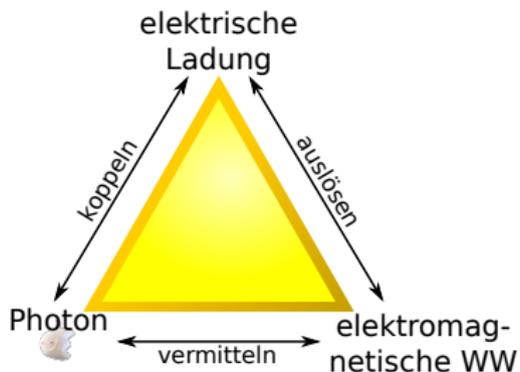


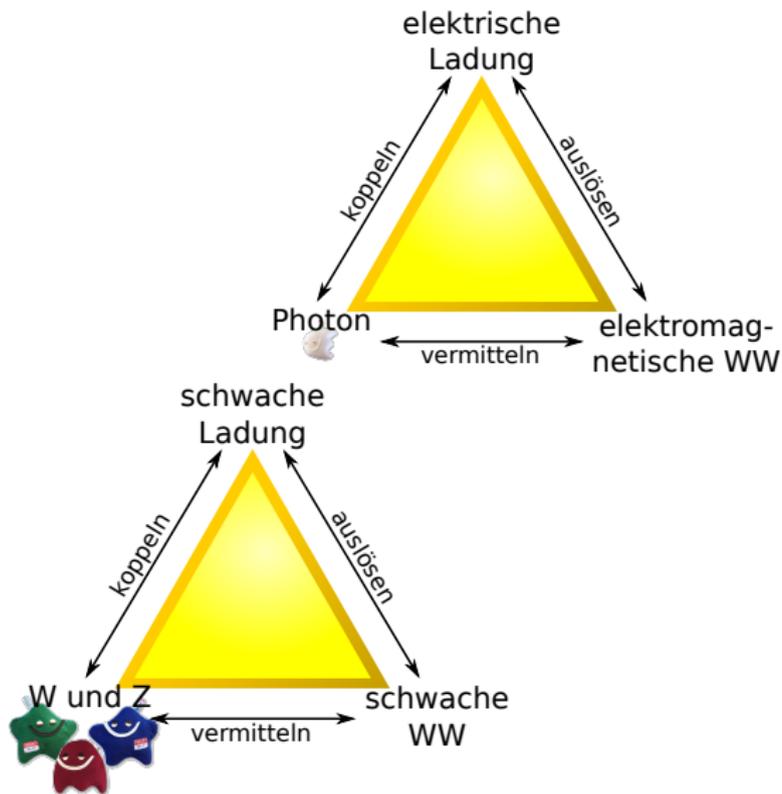
©Drillingstrahl

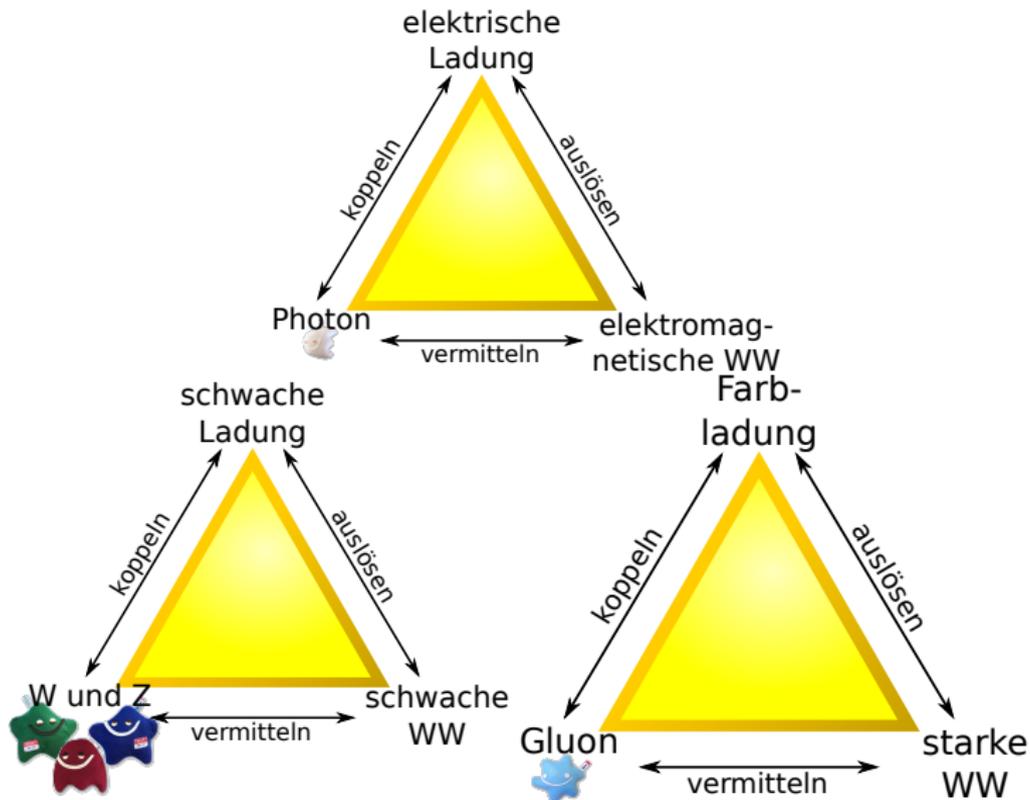
# Die 4 ~~Elemente~~ Kräfte



©Drillingstrahl





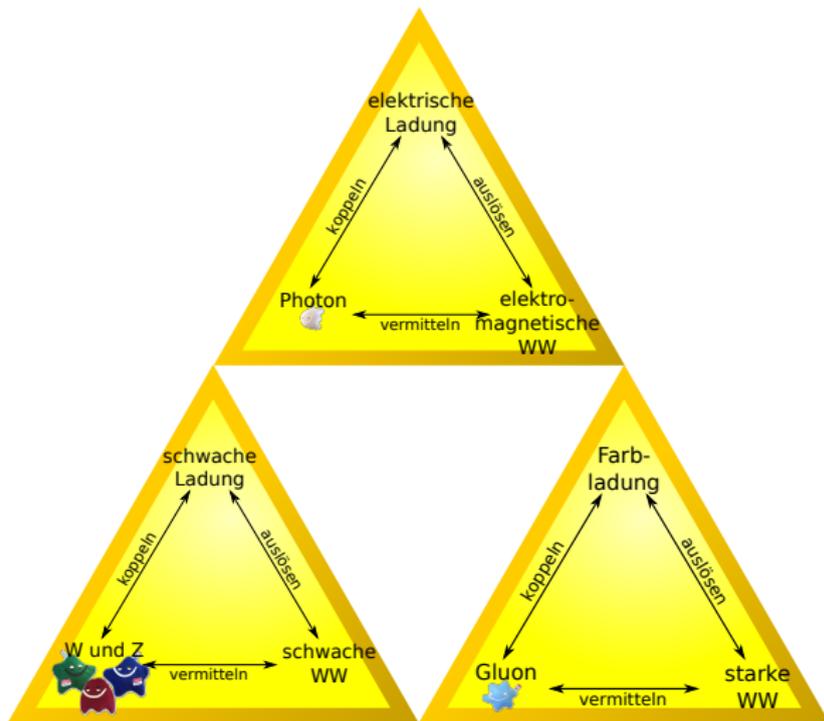


# (Teilchenphysik-)Triforce

ein göttliches Artefakt unendlicher Macht



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



# Das Gott(verdammt)e Teilchen



Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,09 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
	<b>Quarks</b>				
	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	
	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron- Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon- Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau- Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> 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	
	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson	
	<b>Leptonen</b>			<b>Eichbosonen</b>	

# Das Gott(verdammt)e Teilchen



Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,09 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
					???
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	0 0 0 1 <b>g</b> Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> Tau	80,4 GeV ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W Boson	Eichbosonen
	Materie			Boten- teilchen	

## Steckbrief Higgs-Teilchen

Masse	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	125,09 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	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
					???
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 0 1 <b>g</b> Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> Tau	80,4 GeV ± 1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W Boson	Eichbosonen
	Materie			Boten- teilchen	

## Steckbrief Higgs-Teilchen

- „jüngstes“ Teilchen im Standardmodell  
→ erst 2012 entdeckt!



©New York Times

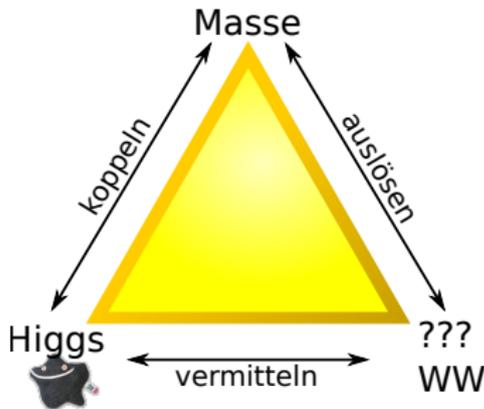
	Masse	Ladung	Spin	Name
Quarks	2,3 MeV	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>u</b> up
	1,275 GeV	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>c</b> charm
	173,07 GeV	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>t</b> top
	0	0	1	<b>γ</b> Photon
	125,09 GeV	0	0	<b>H</b> Higgs Boson
	0	0	1	<b>g</b> Gluon
Leptonen	4,8 MeV	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>d</b> down
	95 MeV	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>s</b> strange
	4,18 GeV	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	<b>b</b> bottom
	<2 eV	0	$\frac{1}{2}$	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino
	<0,19 MeV	0	$\frac{1}{2}$	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino
	<18,2 MeV	0	$\frac{1}{2}$	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino
Eichbosonen	91,2 GeV	0	1	<b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson
	0,511 MeV	-1	$\frac{1}{2}$	<b>e</b> Elektron
	105,7 MeV	-1	$\frac{1}{2}$	<b>μ</b> Myon
	1,777 GeV	-1	$\frac{1}{2}$	<b>τ</b> Tau
80,4 GeV	$\pm 1$	1	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson	

{ **u, c, t, d, s, b** } **Quarks**  
{ **ν<sub>e</sub>, ν<sub>μ</sub>, ν<sub>τ</sub>, e, μ, τ** } **Leptonen**  
{ **γ, g, Z<sup>0</sup>, W<sup>±</sup>** } **Eichbosonen**

{ **u, c, t, d, s, b, ν<sub>e</sub>, ν<sub>μ</sub>, ν<sub>τ</sub>, e, μ, τ** } **Materie**  
{ **γ, g, Z<sup>0</sup>, W<sup>±</sup>** } **Boten-  
teilchen**

## Steckbrief Higgs-Teilchen

- „jüngstes“ Teilchen im Standardmodell  
→ erst 2012 entdeckt!
- wurde aber bereits 1960 vorhergesagt  
→ sollte das Rätsel der Masse von Teilchen lösen

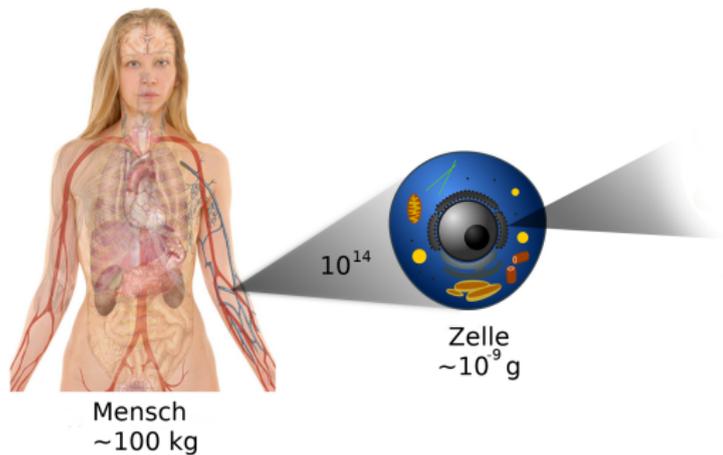


# Masse

als Teilcheneigenschaft



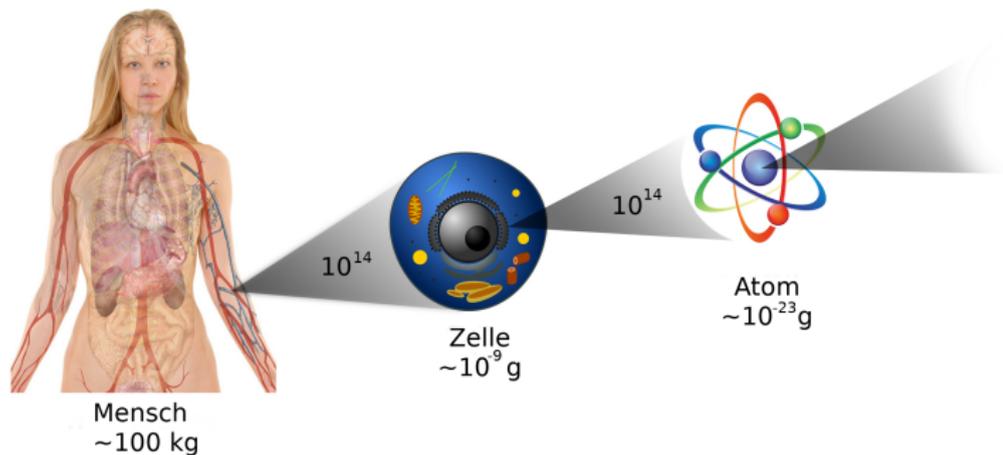
Mensch  
~100 kg



→ Masse setzt sich aus kleineren Massen zusammen

# Masse

als Teilcheneigenschaft

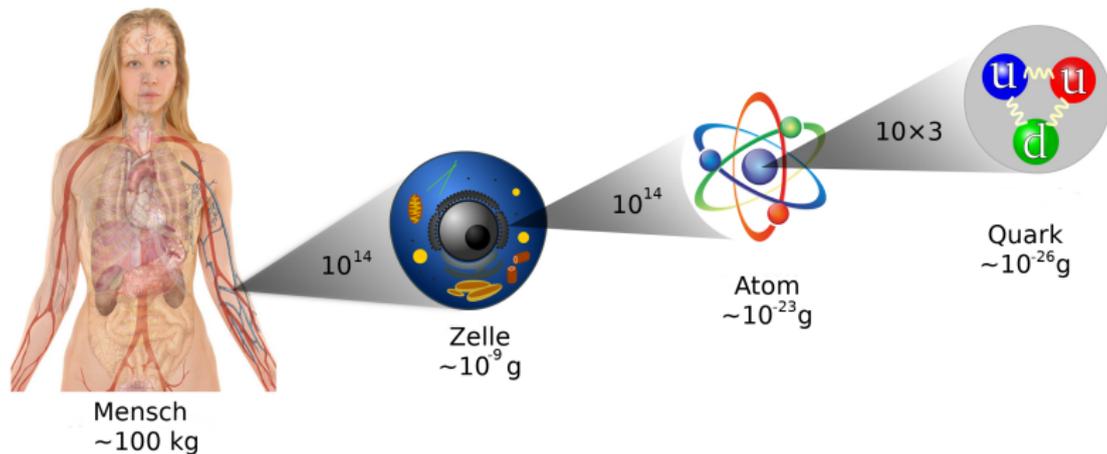


©wikimedia

→ Masse setzt sich aus kleineren Massen zusammen

# Masse

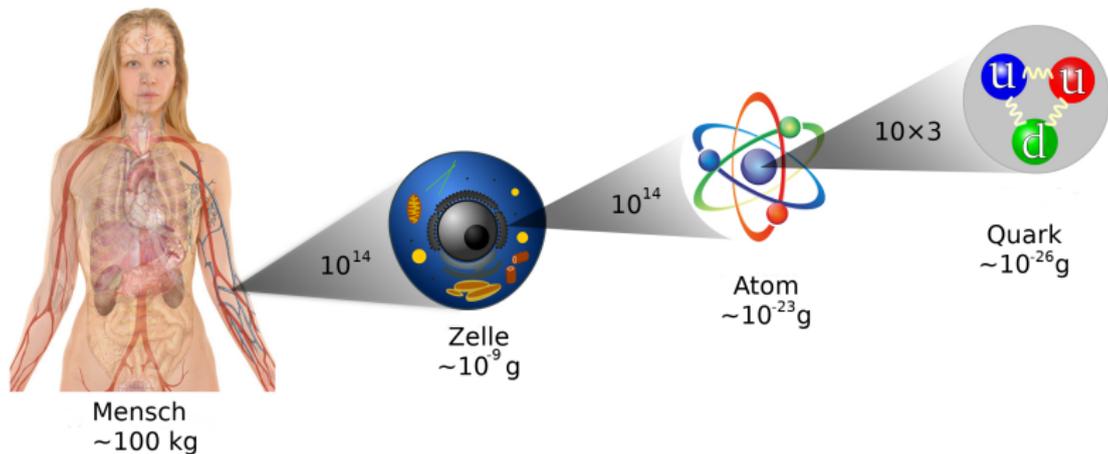
als Teilcheneigenschaft



- Masse setzt sich aus kleineren Massen zusammen
- Protonenmasse  $\gg$  Quarkmassen?!

# Masse

als Teilcheneigenschaft



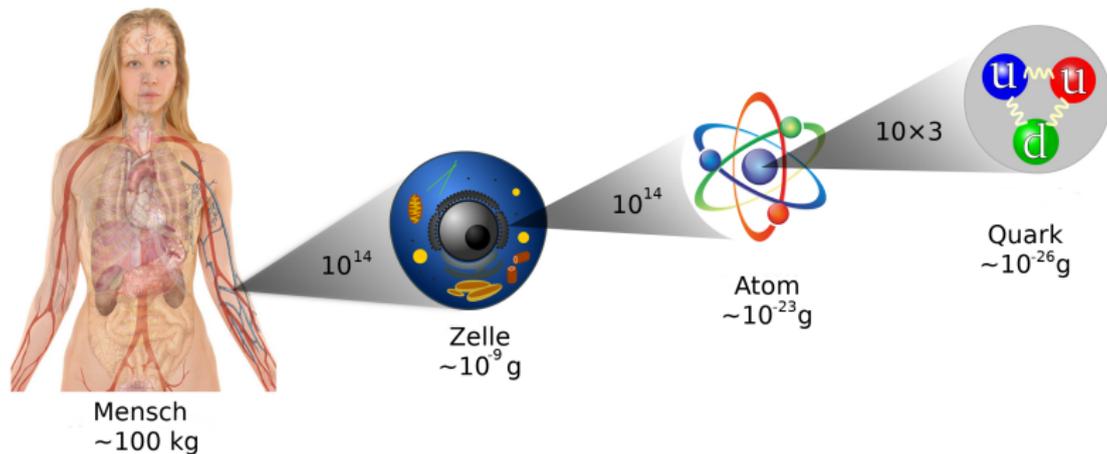
©wikimedia

- Masse setzt sich aus kleineren Massen zusammen
- Protonmasse  $\gg$  Quarkmassen?!



# Masse

als Teilcheneigenschaft



- Masse setzt sich aus kleineren Massen zusammen
- Protonenmasse  $\gg$  Quarkmassen?!
- Quarkmasse?



# Higgs Mechanismus

## DIE Party Analogie



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



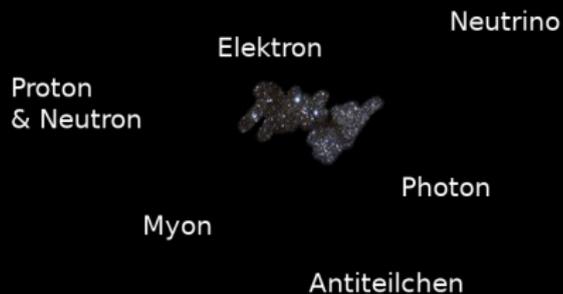
©CERN

Besser erklärt, animiert und kostenlos – TED Ed Talk



Universum für Teilchenphysiker vor 1900

Universum für Teilchenphysiker um 1960



Universum für Teilchenphysiker um 1980



Universum für Teilchenphysiker um 2000

Alle Wechselwirkungen  
bis auf Gravitation

Alle vorhergesagten  
Teilchen außer Higgs

"Teilchenphysik ist quasi fertig.  
Such dir lieber ein anderes Fach zum Studieren."

Universum für Teilchenphysiker um 2020

Neutrinos haben Masse  
jenseits des  
Higgs-Mechanismus?

Gibt es noch  
mehr Teilchen?

5% ist sichtbare Materie

95% unbekannt

Dunkle Materie?  
Dunkle Energie?

Gravitation immer  
noch nicht erklärt