



# MASTERCLASS

---

Das Standardmodell und  
die offenen Fragen der Teilchenphysik





# **1. TEIL - WIE FUNKTIONIERT TEILCHENPHYSIK?**

# **DAS STANDARD MODELL DER TEILCHENPHYSIK**

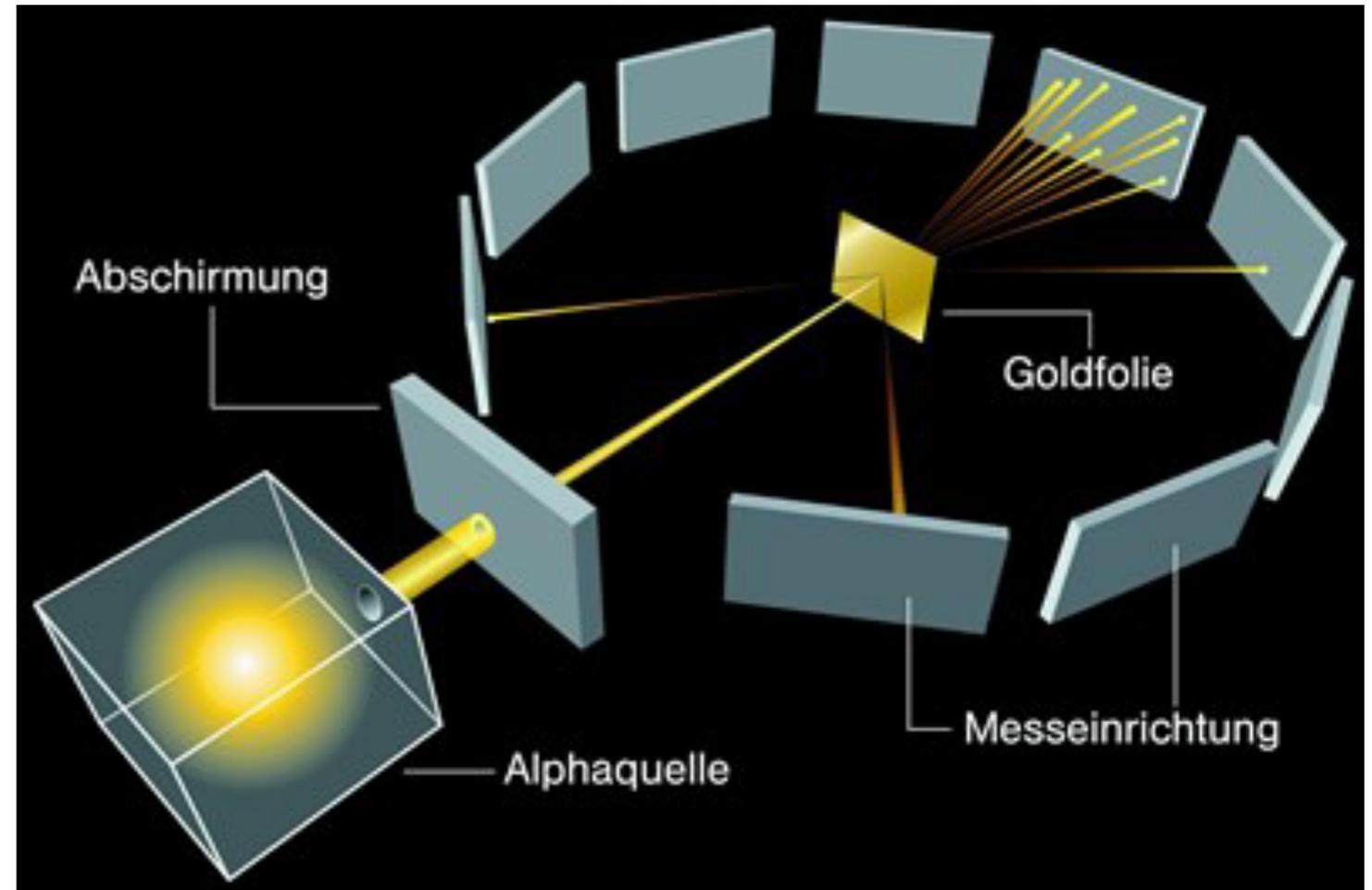
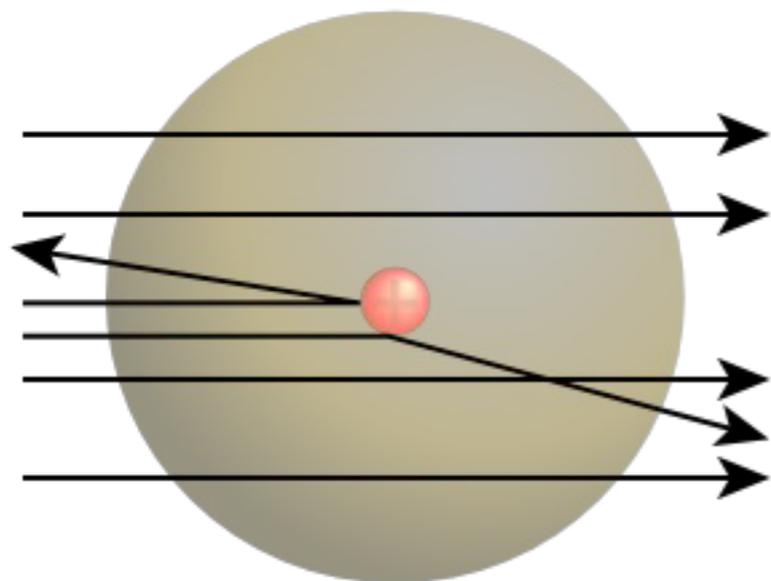
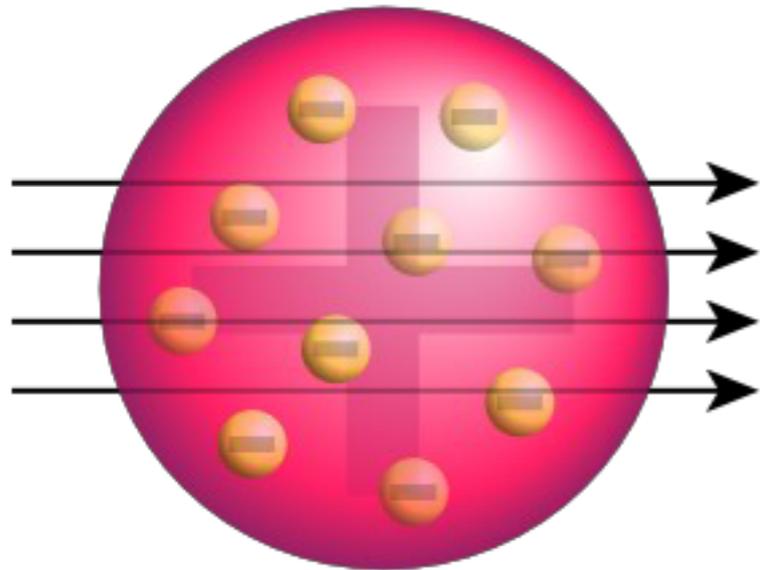
**Oder**

**„Was die Welt im Innersten zusammenhält“**

# WIE UNTERSUCHT MAN SEHR KLEINE TEILCHEN?

---

- Durch Streuexperimente!
- Rutherford 1910: Beschuss von Goldfolie mit  $\alpha$ -Teilchen



- **Atome sind nicht elementar** sondern haben eine innere Struktur
- Sie bestehen aus eine winzigen, schweren, positiv geladenen Kern und einer fast leeren Hülle mit Elektronen

# ES GEHT IMMER NOCH KLEINER

- Chemie: Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- Atomphysik: Aufbau der Atome (Atomkern, Elektron)
- Kernphysik: Aufbau der Atomkerne (Proton, Neutron, Elektron)
- Teilchenphysik: Aufbau Proton, Neutron (Quarks, Elektron)

Forschung mit Photonen  
Research with Photons

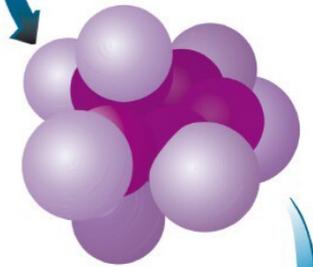
Teilchenphysik  
Particle Physics

≈ 0,01 m  
Kristall  
Crystal



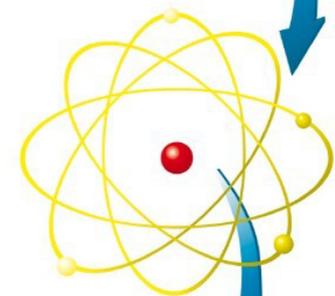
1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule



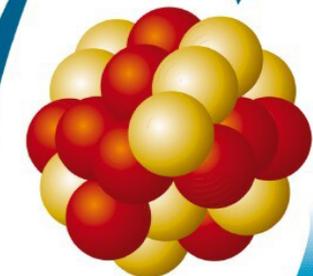
1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom



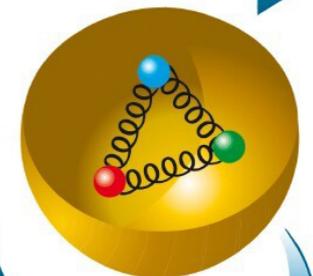
1/10.000

$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus



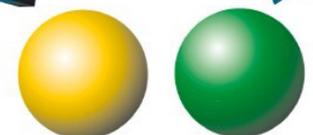
1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton



1/1.000

$< 10^{-18}$  m  
Elektron,  
Quark  
Electron,  
Quark

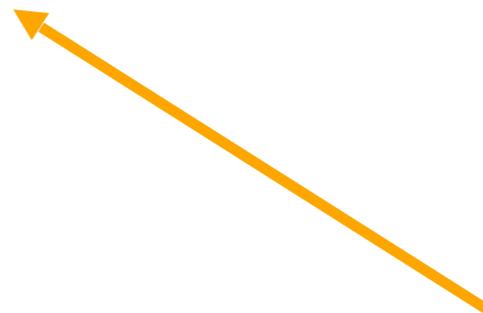


# DAS PROTON

---

- Das Proton besteht aus ..., die die Eigenschaften des Protons ausmachen, z. B. die Ladung
- Außerdem besteht das Proton noch aus ...?

**Ladung**



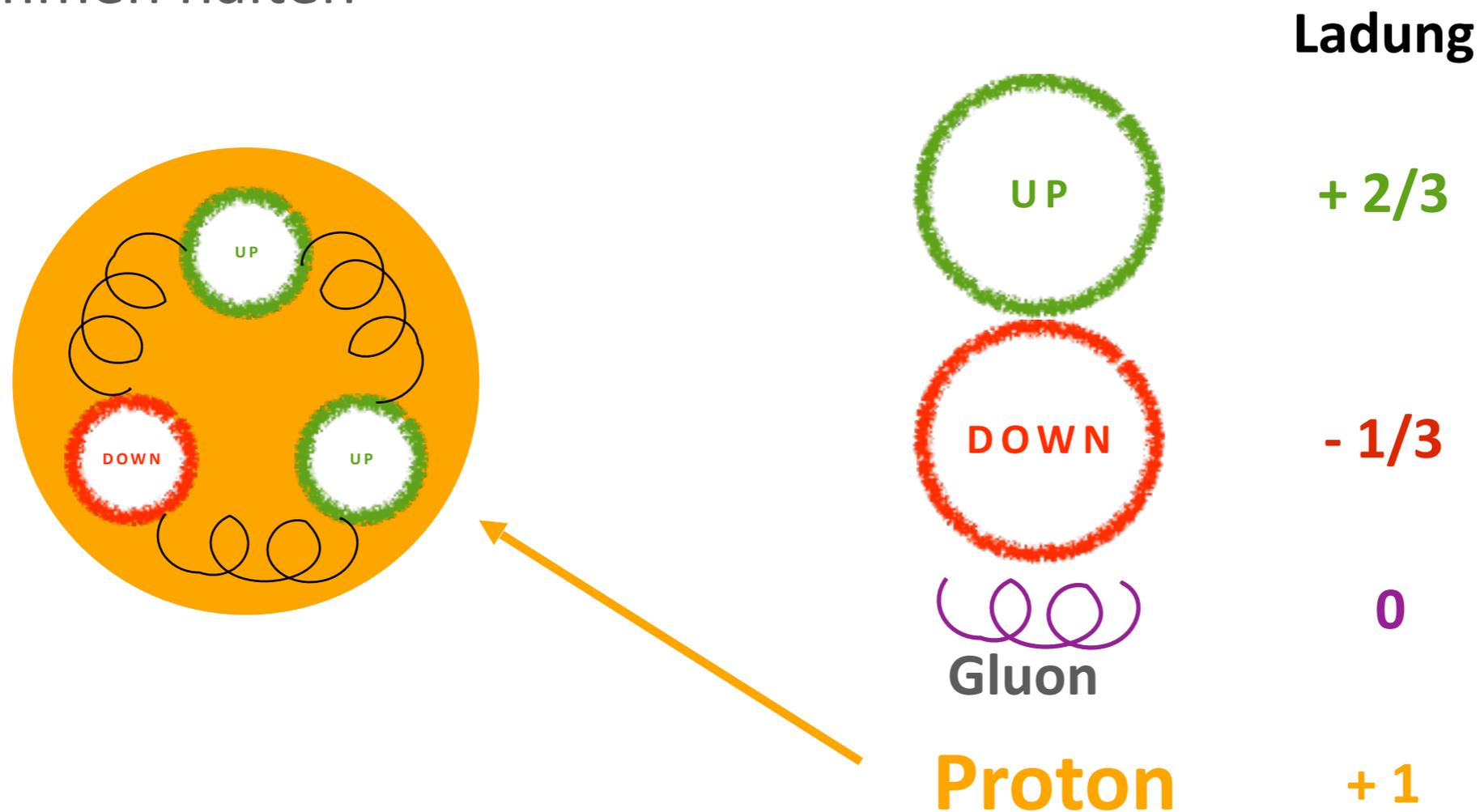
**Proton**



# DAS PROTON

---

- Das Proton besteht aus 3 (Valenz-)quarks, die die Eigenschaften des Protons ausmachen, z. B. die Ladung
- Außerdem besteht das Proton noch aus Gluonen, die die Quarks zusammen halten



# DIE TEILCHEN DES STANDARD-MODELLS

---

Welche Elementar-Teilchen kennt Ihr schon?

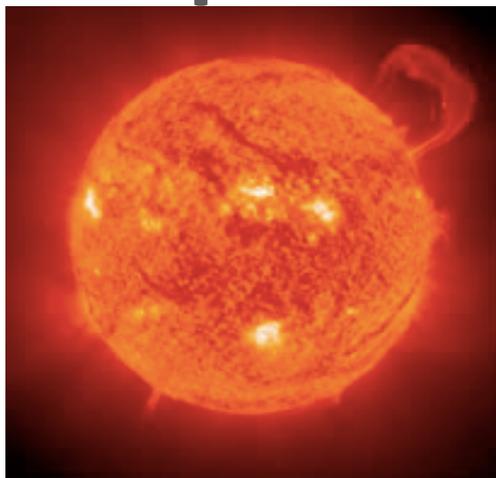
# GIBT ES NOCH WEITERE ELEMENTARTEILCHEN.



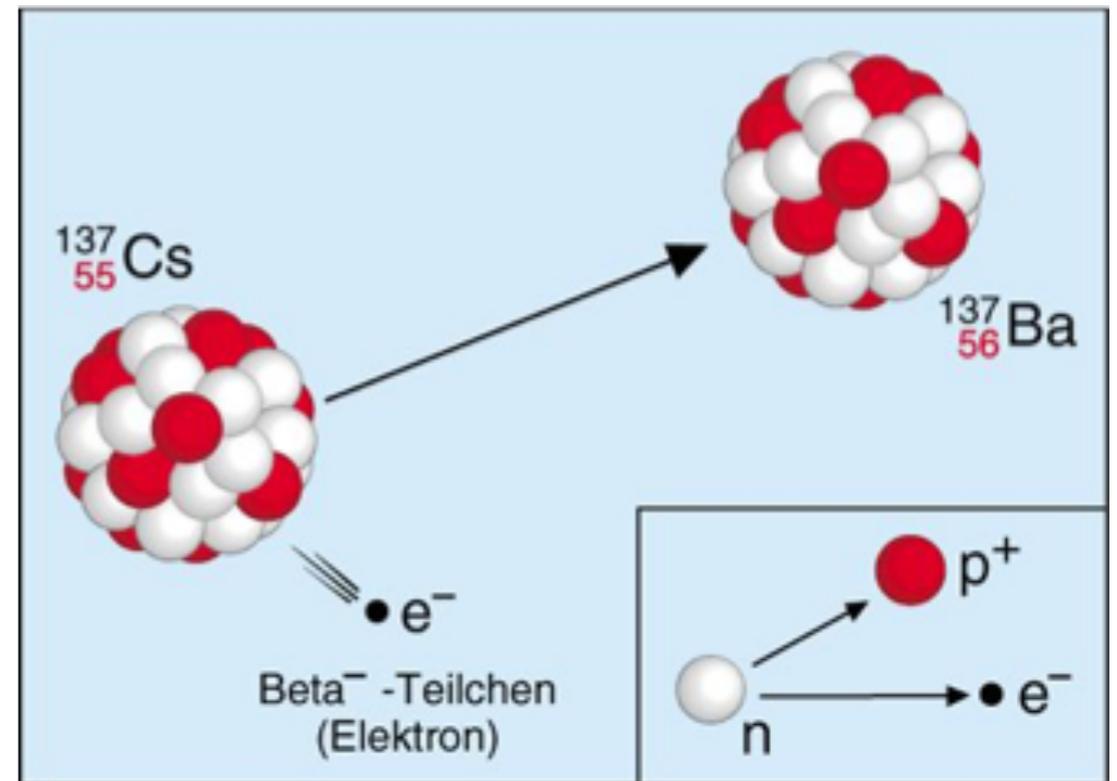
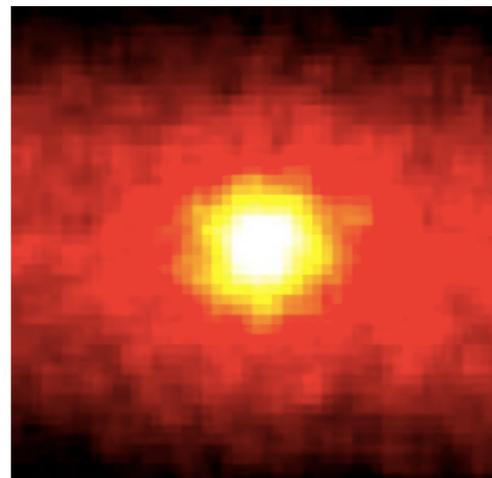
- 1930 postulierte Pauli ein weiteres Teilchen um den  $\beta$ -Zerfall von Atomkernen zu erklären

- 64 Milliarden Sonnenneutrinos/ $cm^2$ /sec

Optisch:



Neutrinos:

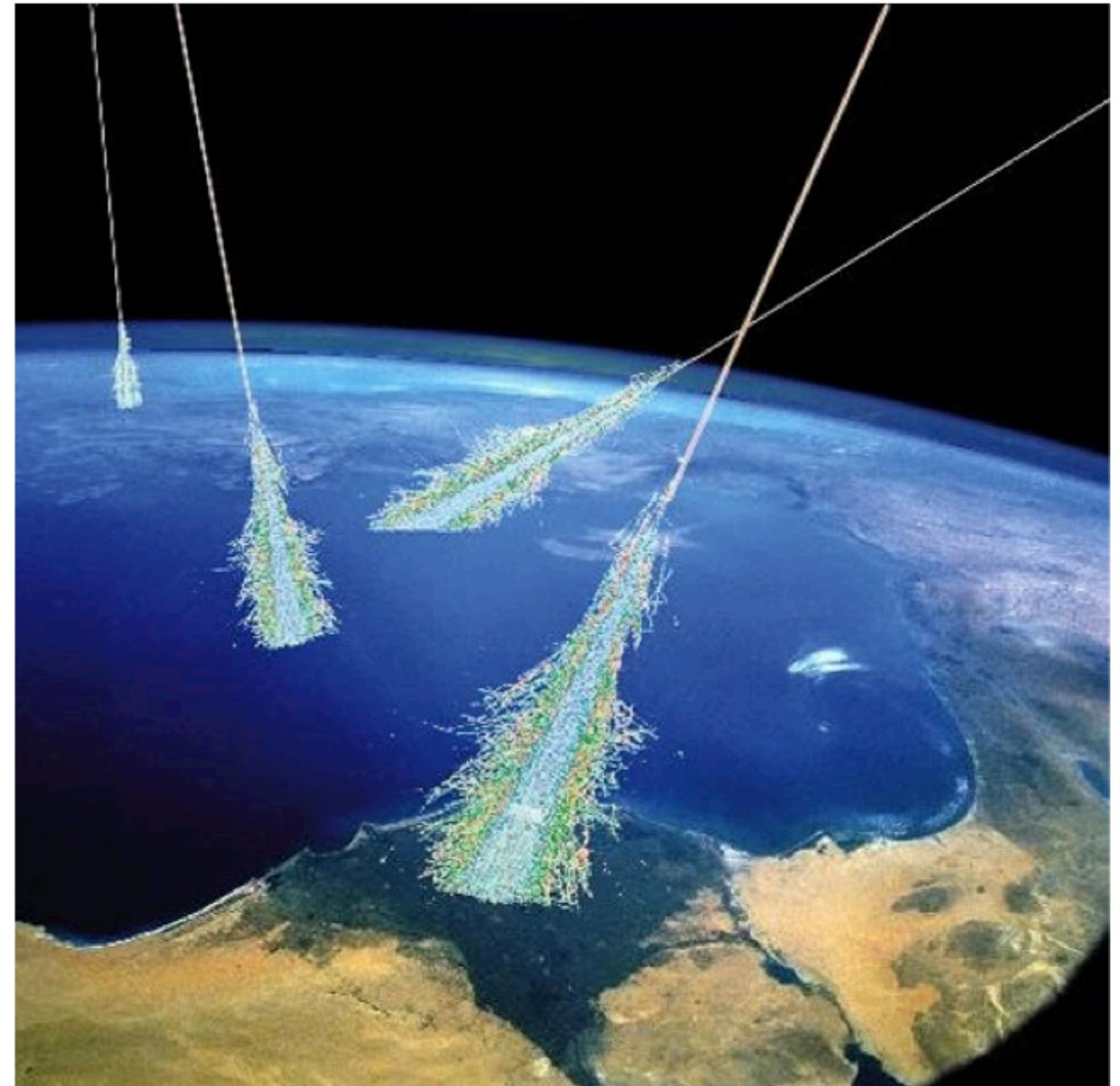
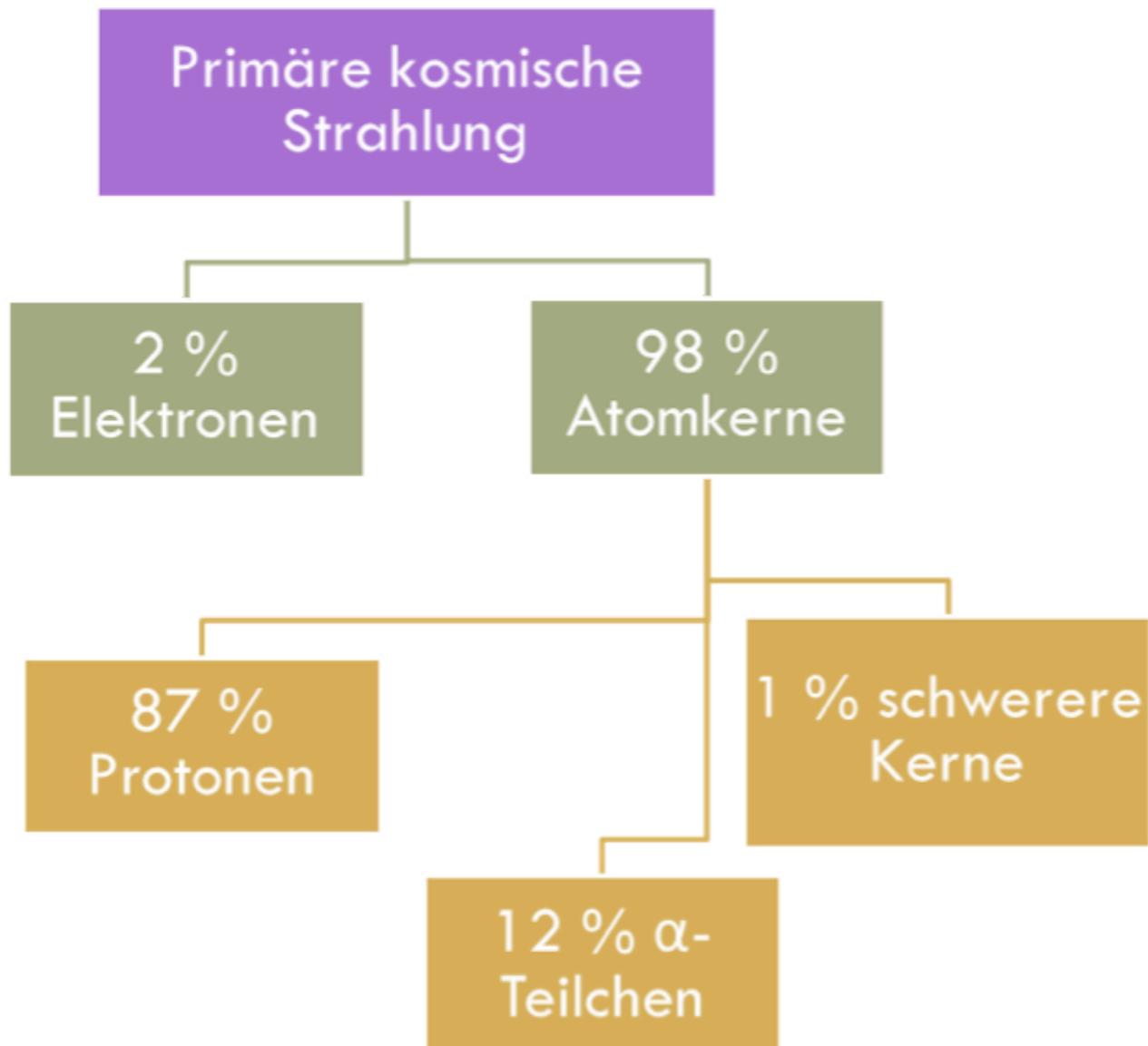


## Neutrino

- Elementarteilchen
- Ladung: 0
- Masse: sehr klein aber nicht 0
- Kaum Interaktion

# KOSMISCHE TEILCHEN

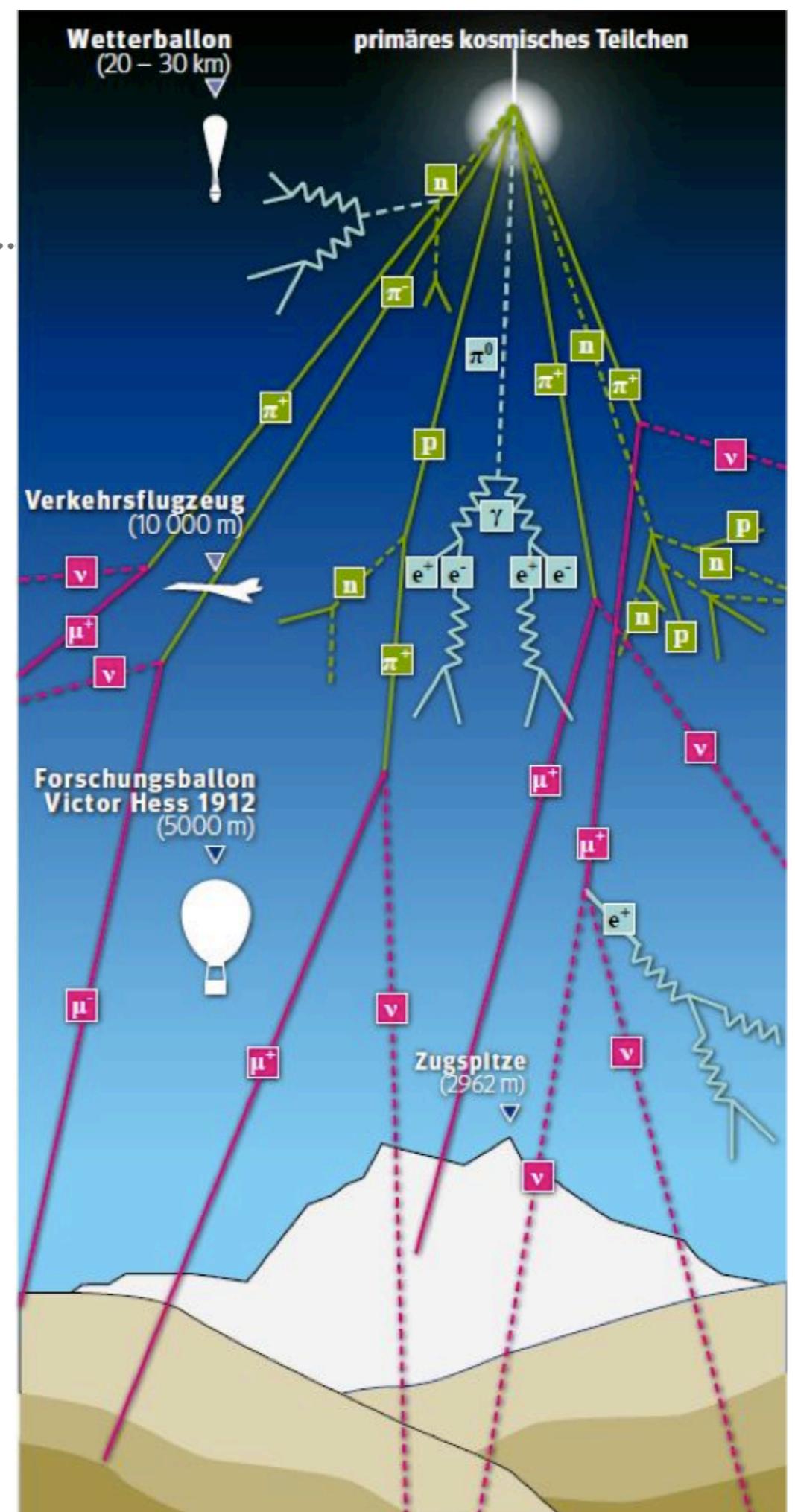
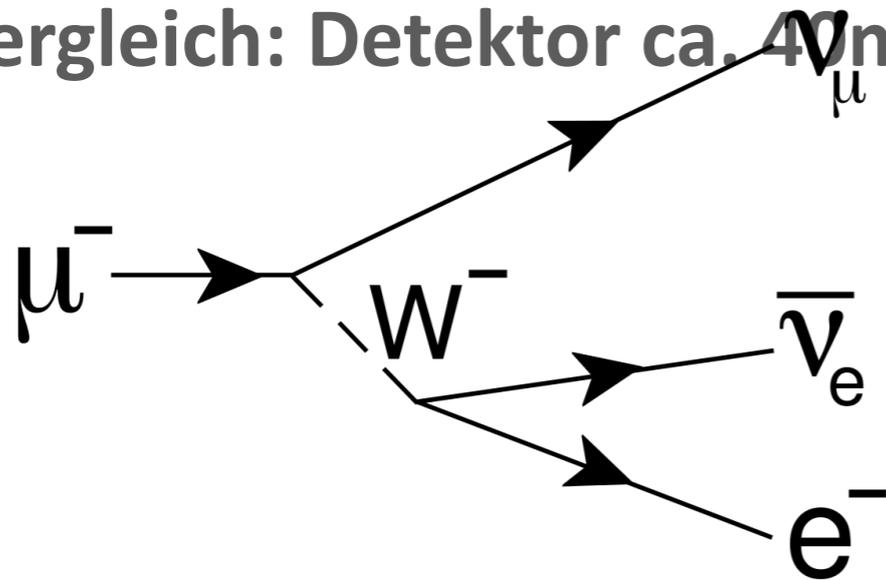
---



# KOSMISCHE TEILCHEN

## Muon

- Elementarteilchen
- Ladung: -1
- Myonen zerfallen nach  $0,0000022\text{s}$  ( $=2,2\mu\text{s}$ )
- Vor dem Zerfall fliegt ein Myon mit einer Geschwindigkeit von  $0,9c$  etwa  $s = V \cdot t / (1 - \beta) = 3\text{km}$  (zum Vergleich: Detektor ca.  $40\text{m}$ )



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

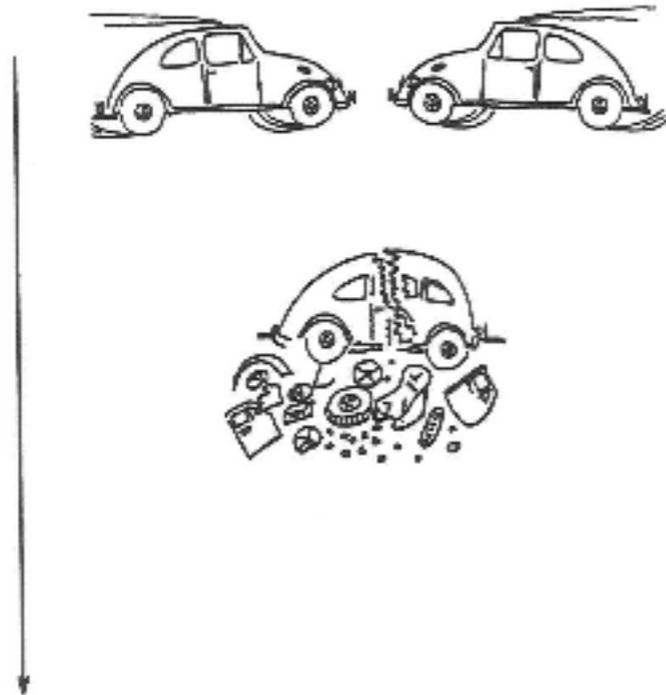
	I	FERMIONS II	III
QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK
	 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK
LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO
	 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU

- Nach und nach wurden noch mehr kleinste Teilchen an entdeckt
- Unsere **stabile Materie** besteht nur aus der ersten Spalte
- Die zweite und dritte Spalte sind schwerere Kopien der Teilchen in der ersten Spalte!

stabile Materie

# WENN TEILCHEN KOLLIDIEREN...

---

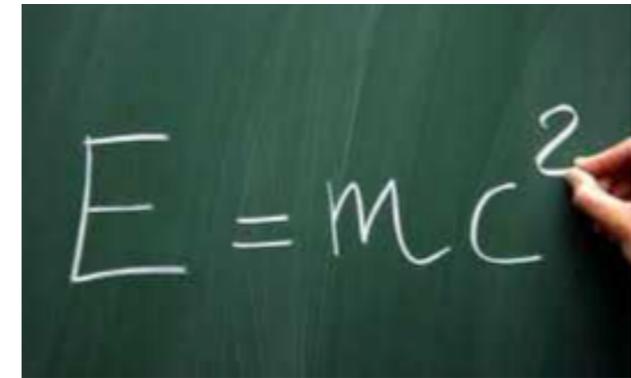


# ... ENTSTEHEN NEUE TEILCHEN

---



© Claus Grupen



mehr Energie



mehr/schwerere Teilchen



# DAS STANDARDMODELL - ORDNUNG IM SYSTEM

	I	II	III	
FERMIONS	I			
	II			
	III			
	QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK
		 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK
	LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO
	 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU	

Ladung

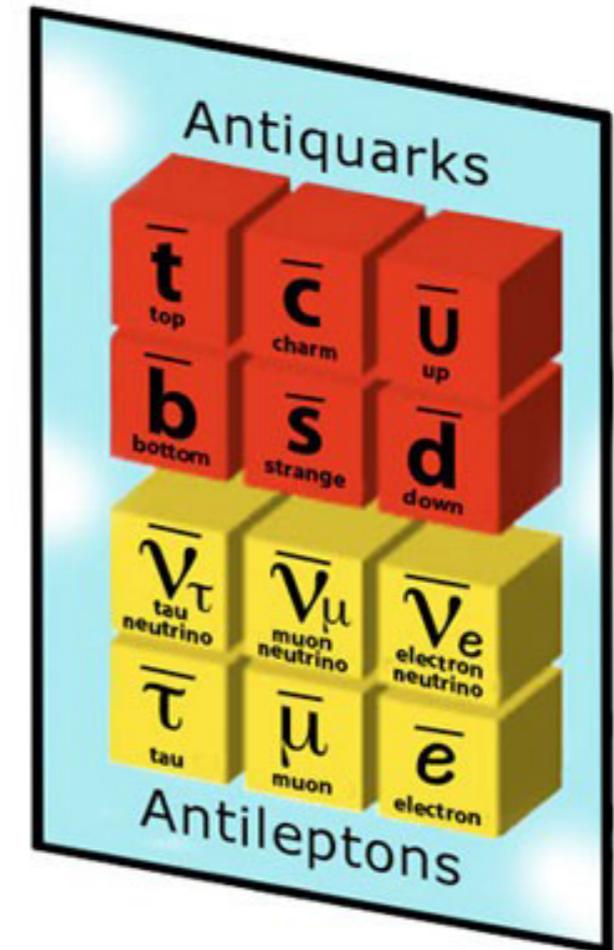
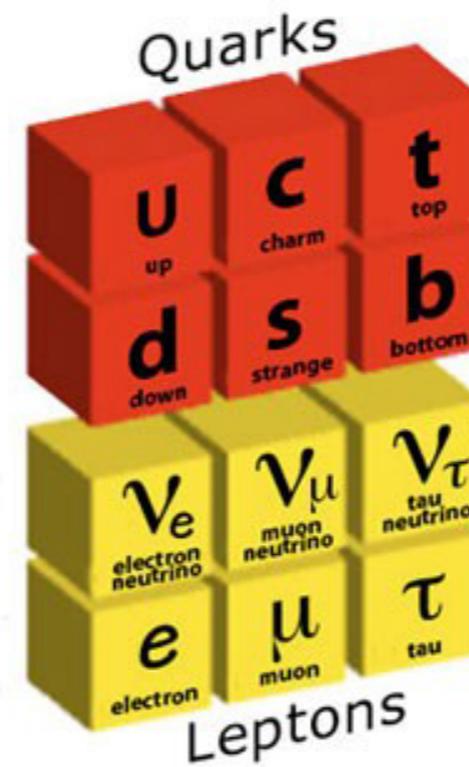
$2/3$

$-1/3$

0

$-1$

- Weitere Kopien dieser Teilchen mit entgegengesetzter Ladung: Antimaterie
- Aber was hält die Teilchen zusammen?



Masse

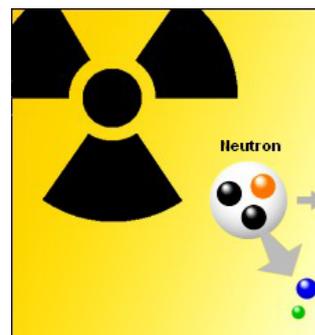
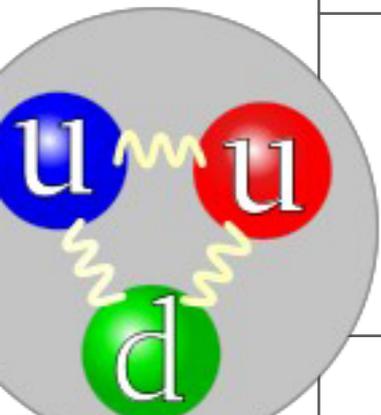
# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

---

Kraft	Austauschteilchen	Wirkung
?	?	?
Ihr	Seid	Dran!

# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

Kraft	Austauschteilchen	Wirkung
Starke Kraft	Gluon	Hält den Atomkern zusammen/bindet Quarks aneinander
Elektromagnetische Kraft	Photon	Hält Atome und Moleküle zusammen
Schwache Kraft	W/Z-Boson	Radioaktive Zerfälle (wandelt Quarks und Leptonen ineinander um)
Gravitation	Graviton	Masse zieht sich an



$\gamma$   
PHOTON



$g$   
GLUON



$Z$   
Z BOSON



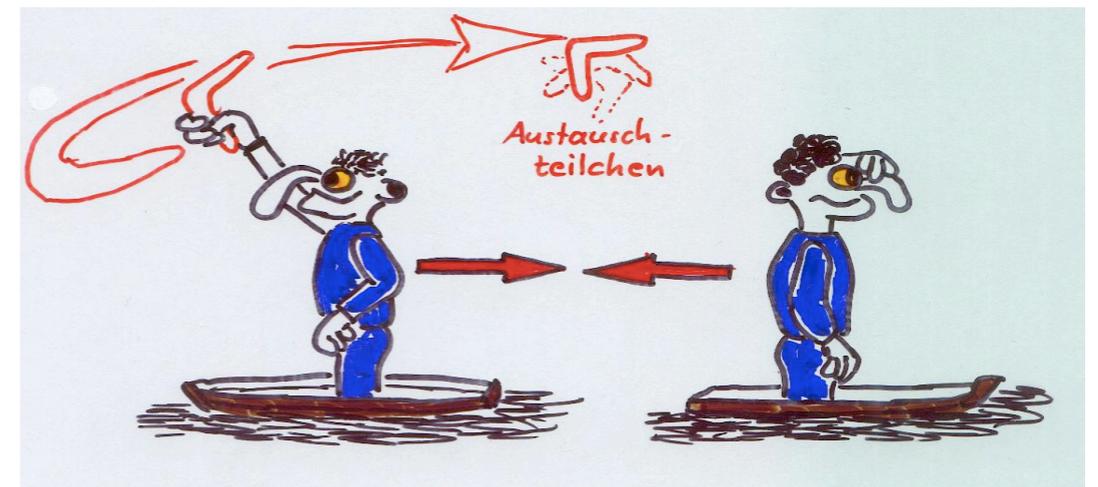
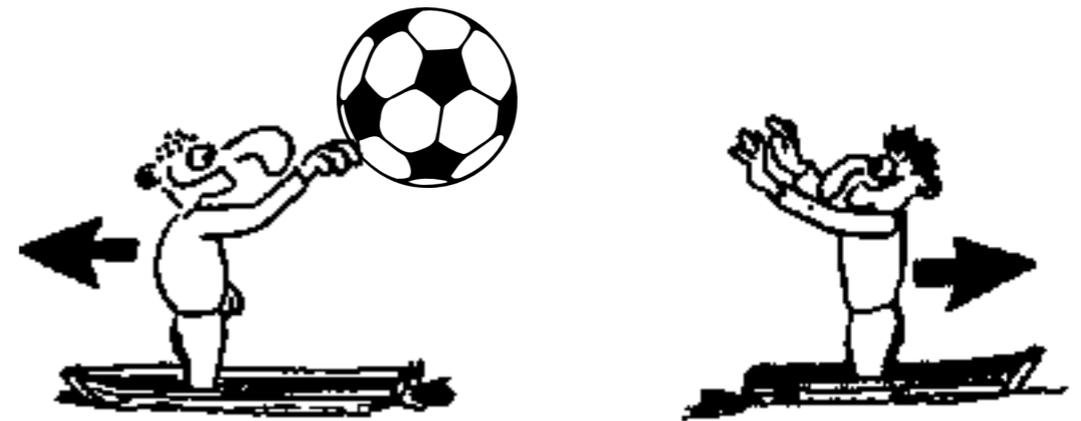
$W$   
W BOSON

FORCE CARRIERS

# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN

	I	II	III	BOSONS	
QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK	 $\gamma$ PHOTON	FORCE CARRIERS
 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK	 $g$ GLUON		
LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO	 $Z$ Z BOSON	
 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU	 $W$ W BOSON		

- Kräfte zwischen den Teilchen werden durch spezielle Vermittler-Teilchen übertragen

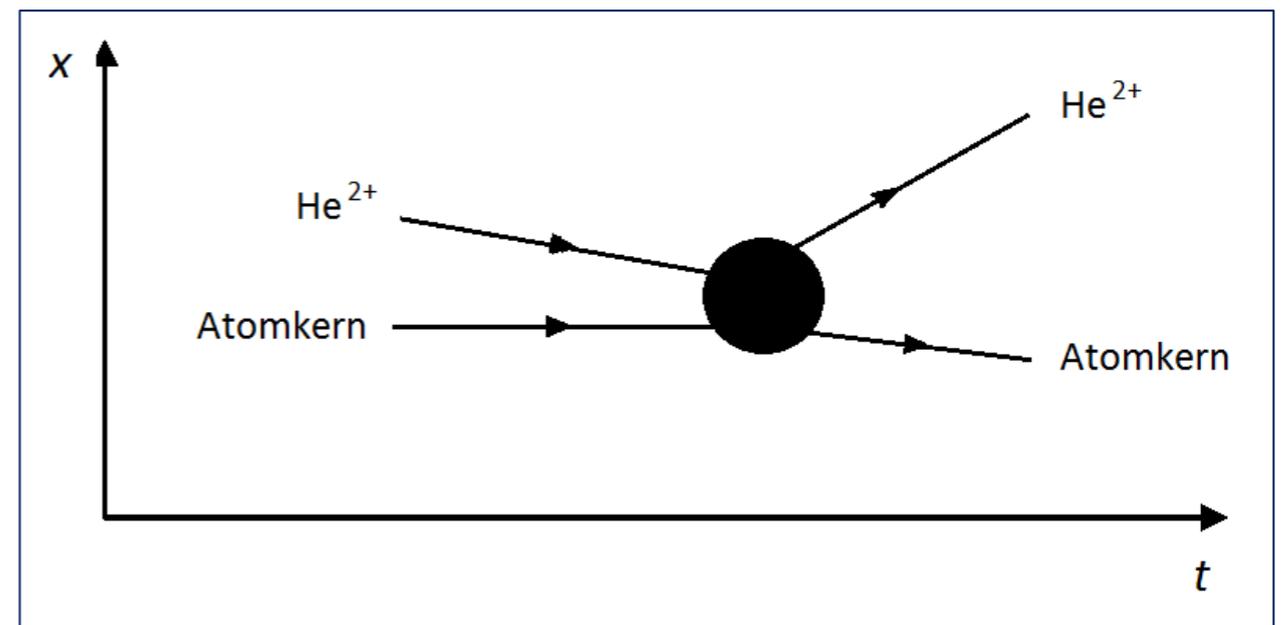
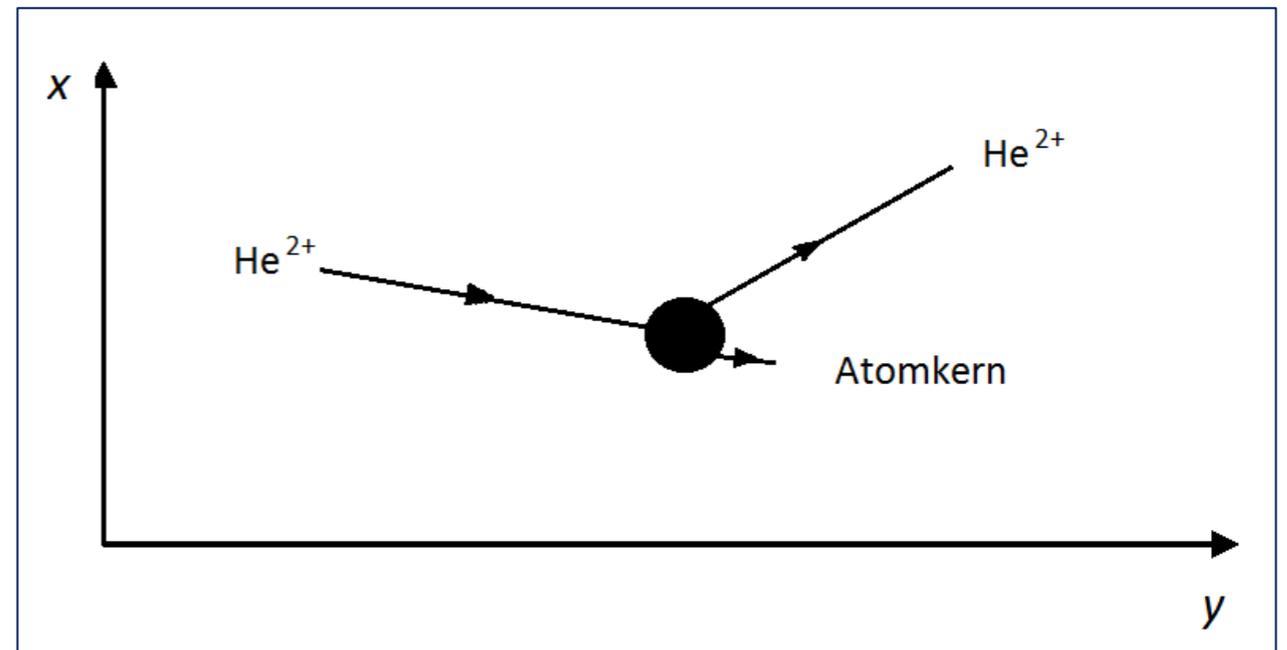


# FEYNMAN-DIAGRAMM - WAS IST DAS EIGENTLICH?

---

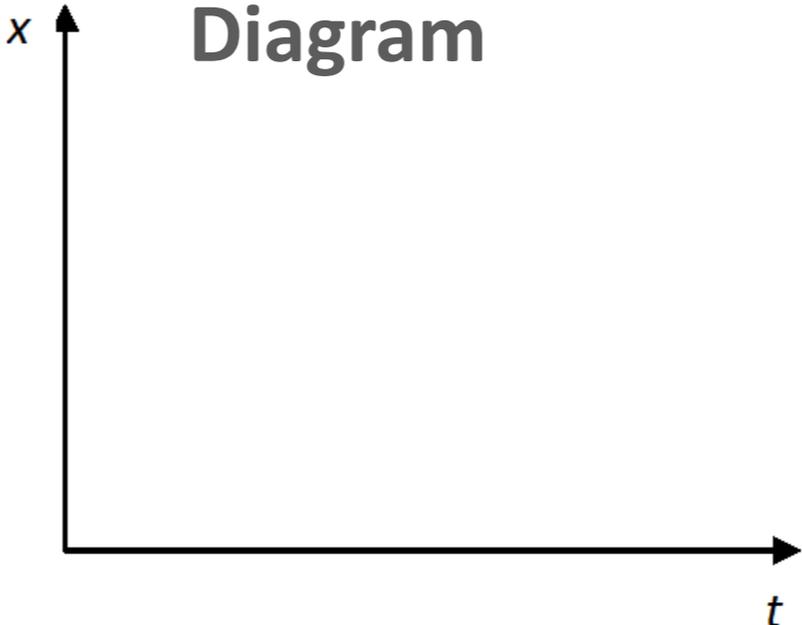
## Darstellung von Wechselwirkungen

- Analogie: Austausch eines Austauschteilchens
- Anstelle von Feldlinie kann die Wechselwirkung durch den Austausch eines Botenteilchens dargestellt werden
- Eine Vorstufe des Feynman-Diagramms ist das x-y-Diagramm
- Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)

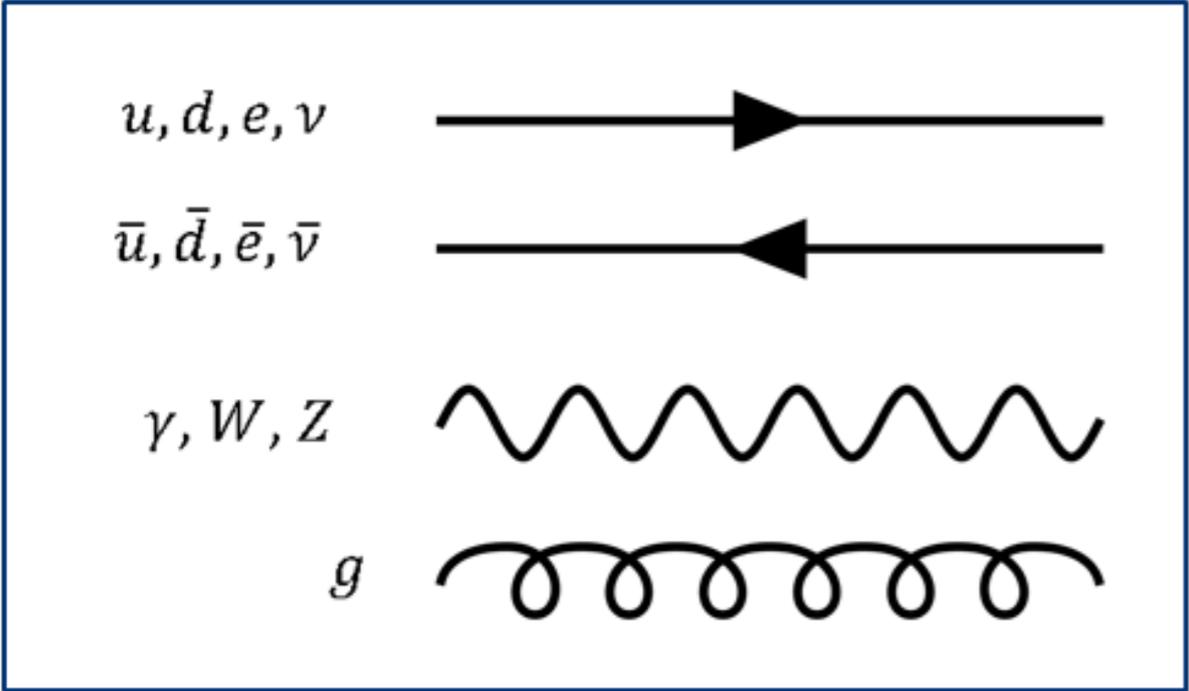


# FEYNMAN-DIAGRAMM - REGELN

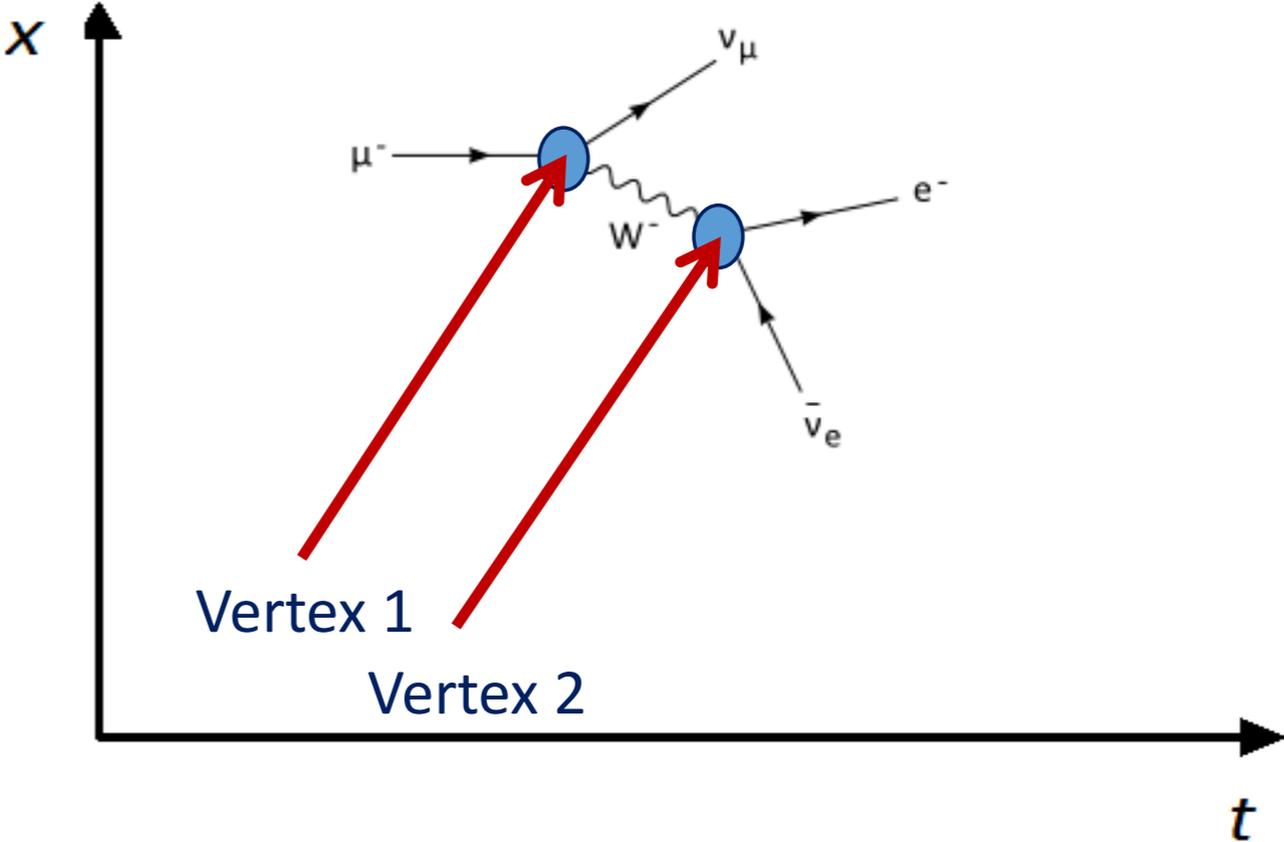
---



Teilchen

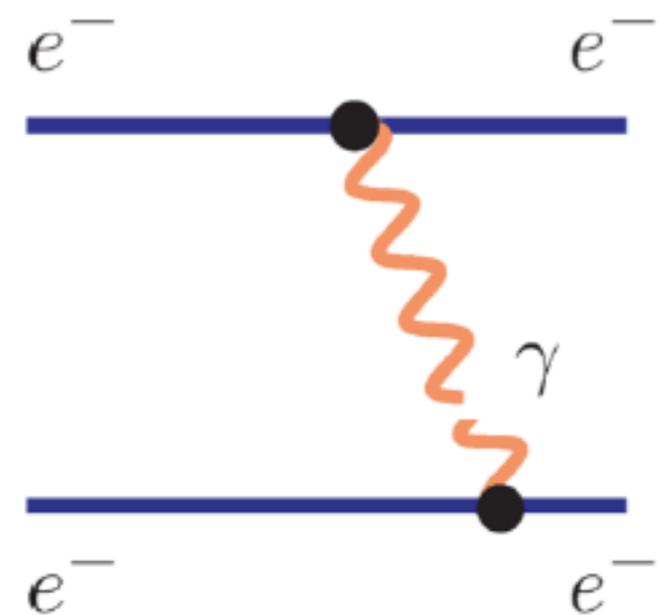
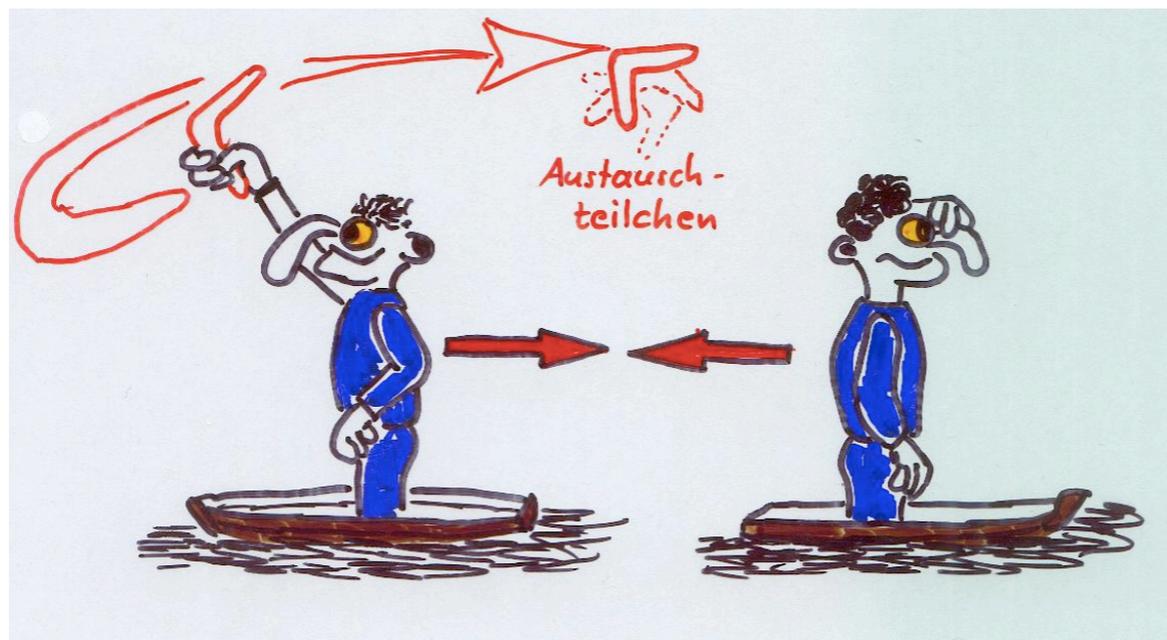
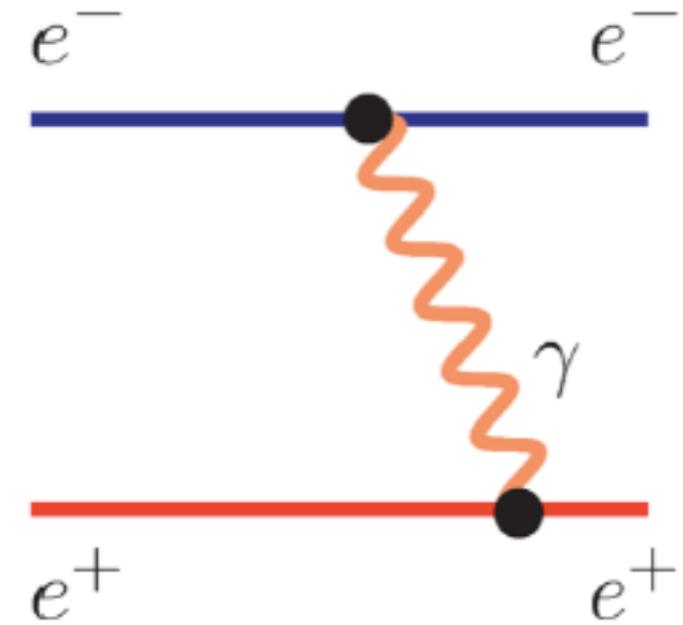
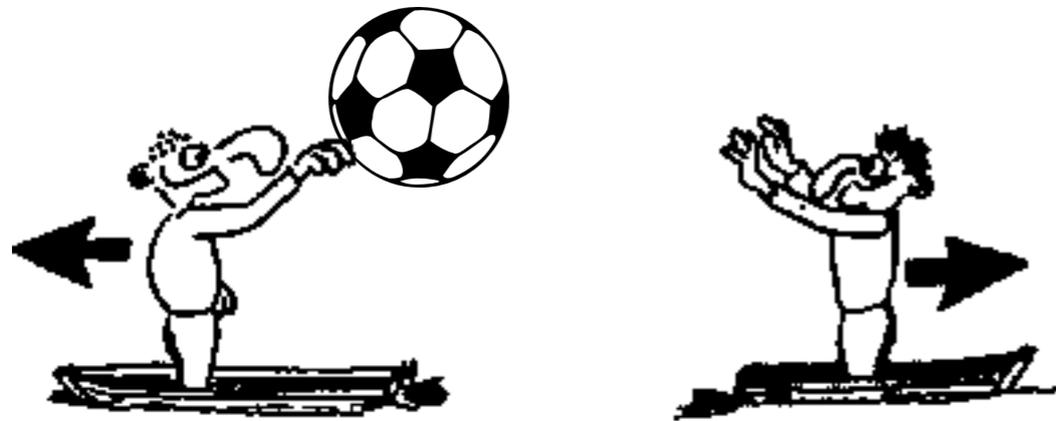


Wechselwirkung



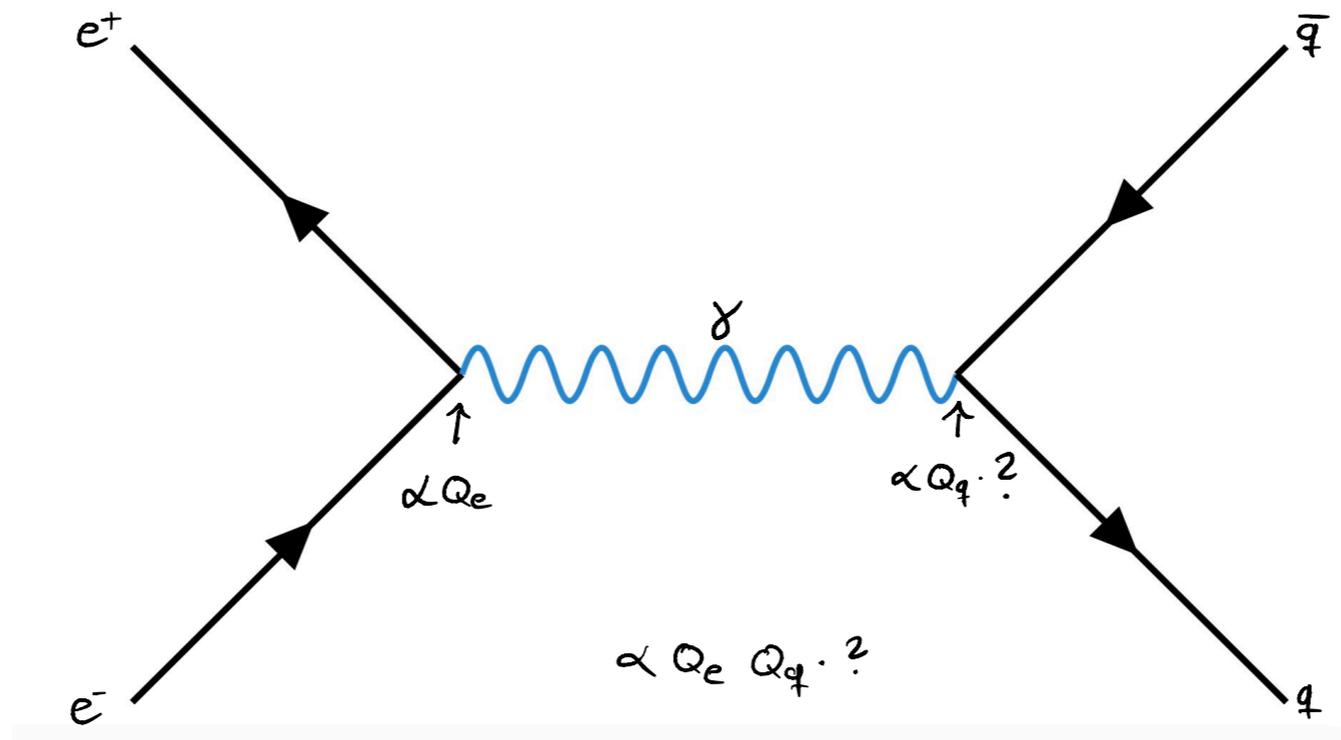
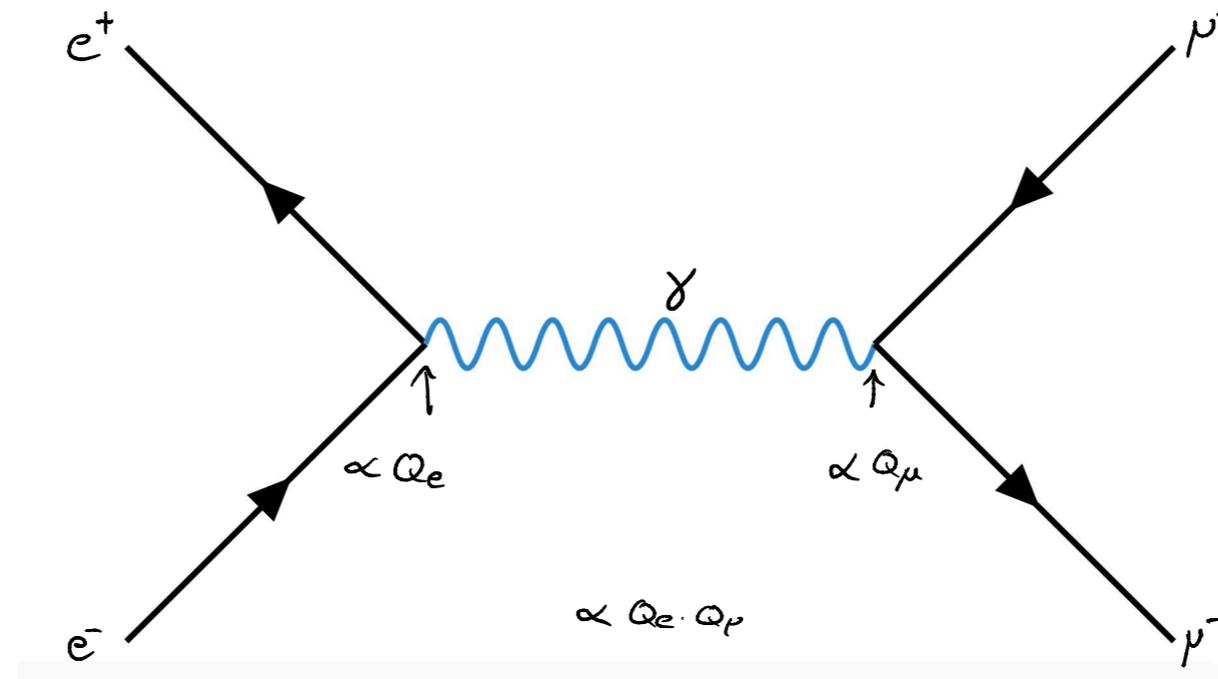
# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN

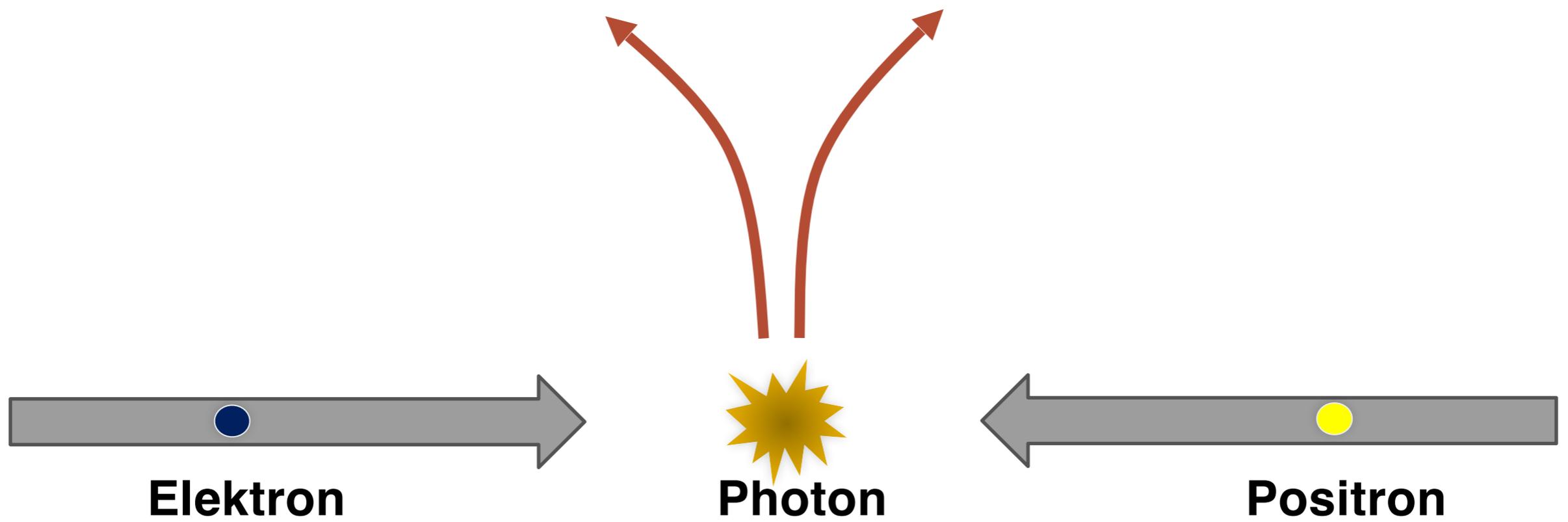
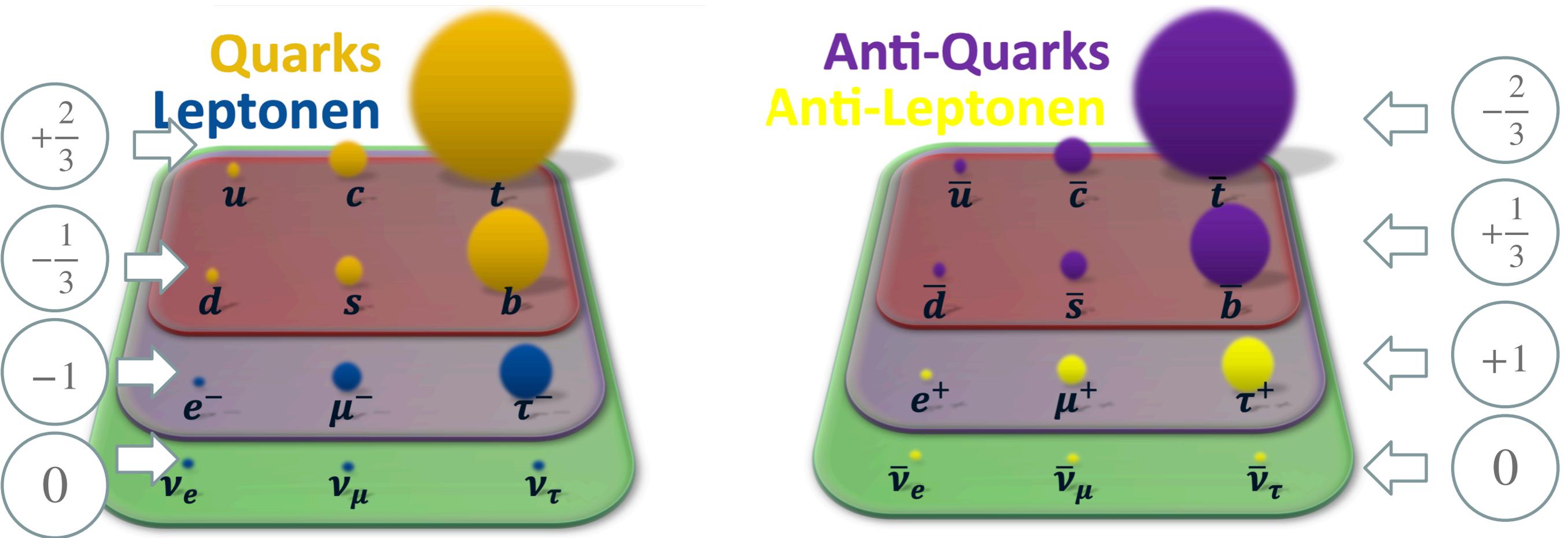
---

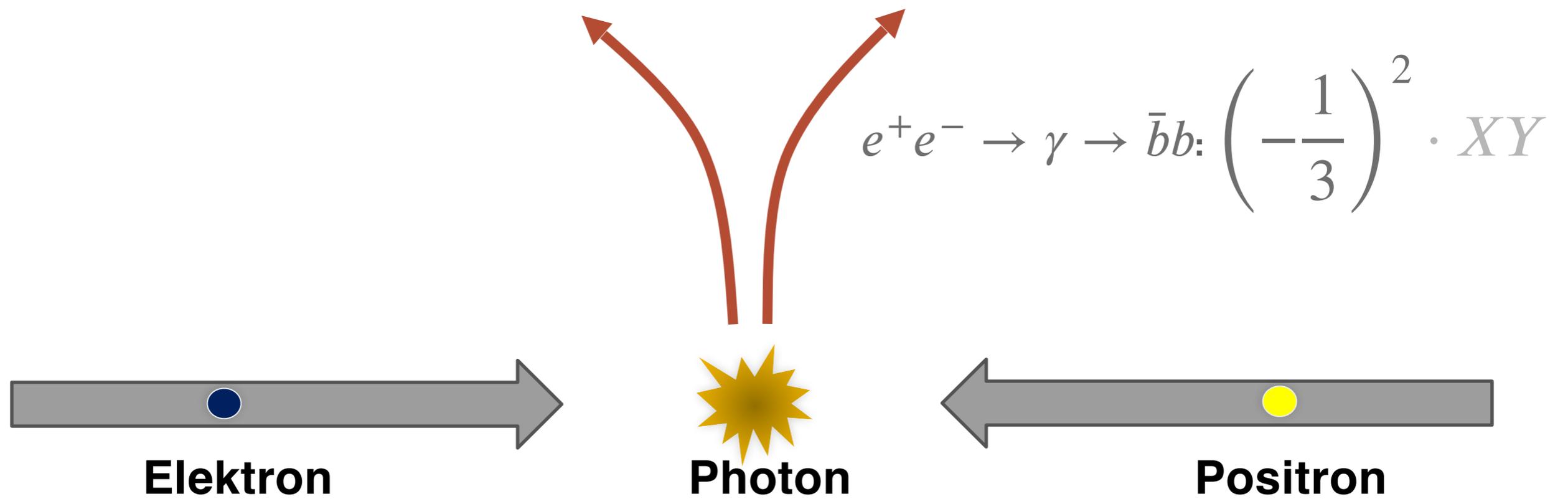
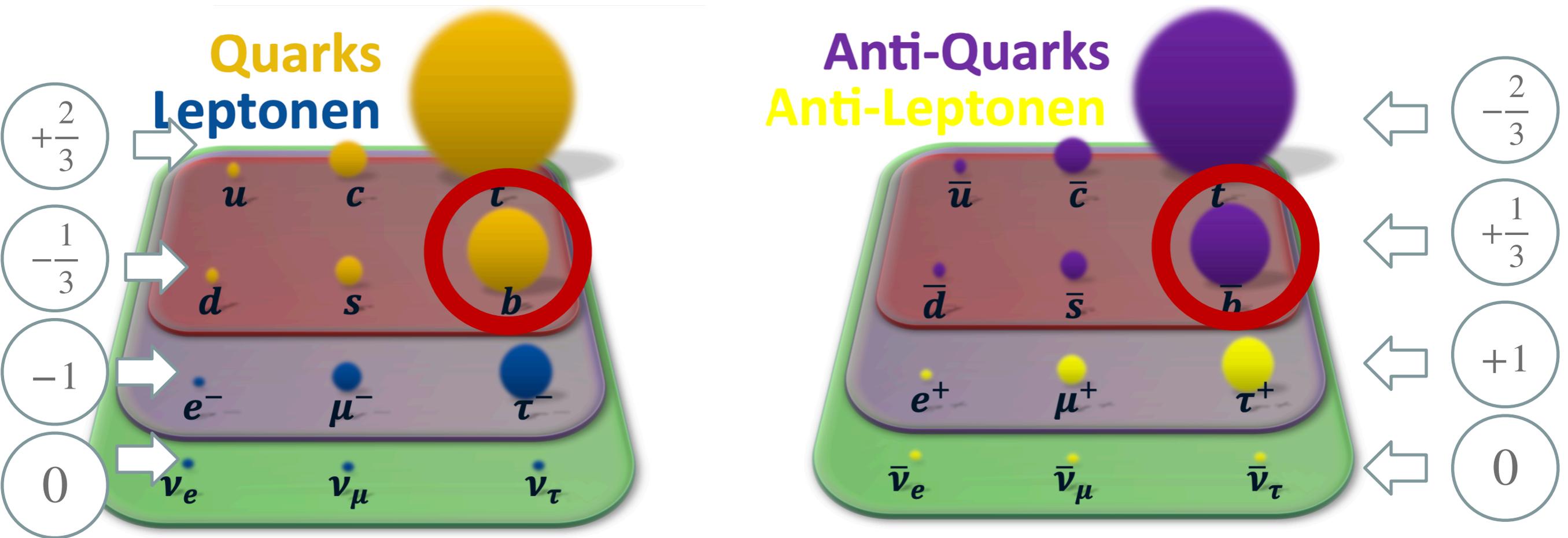


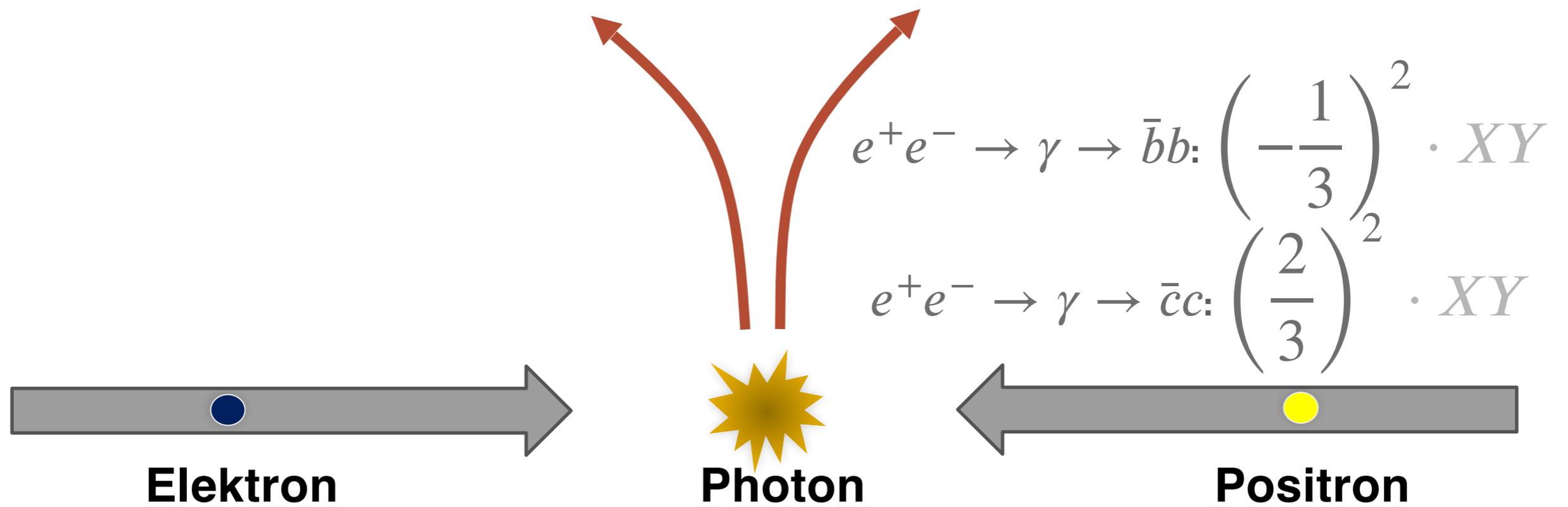
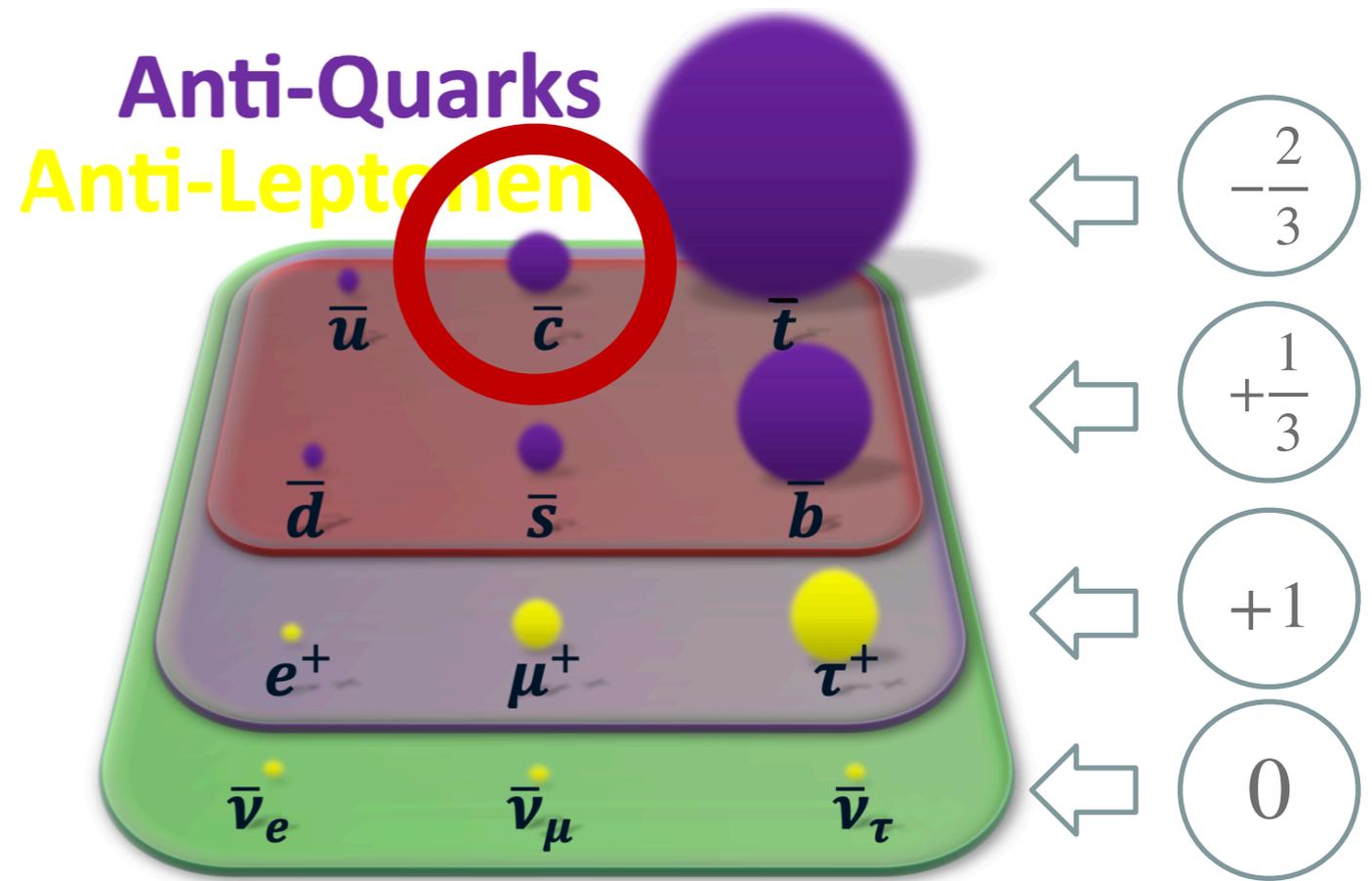
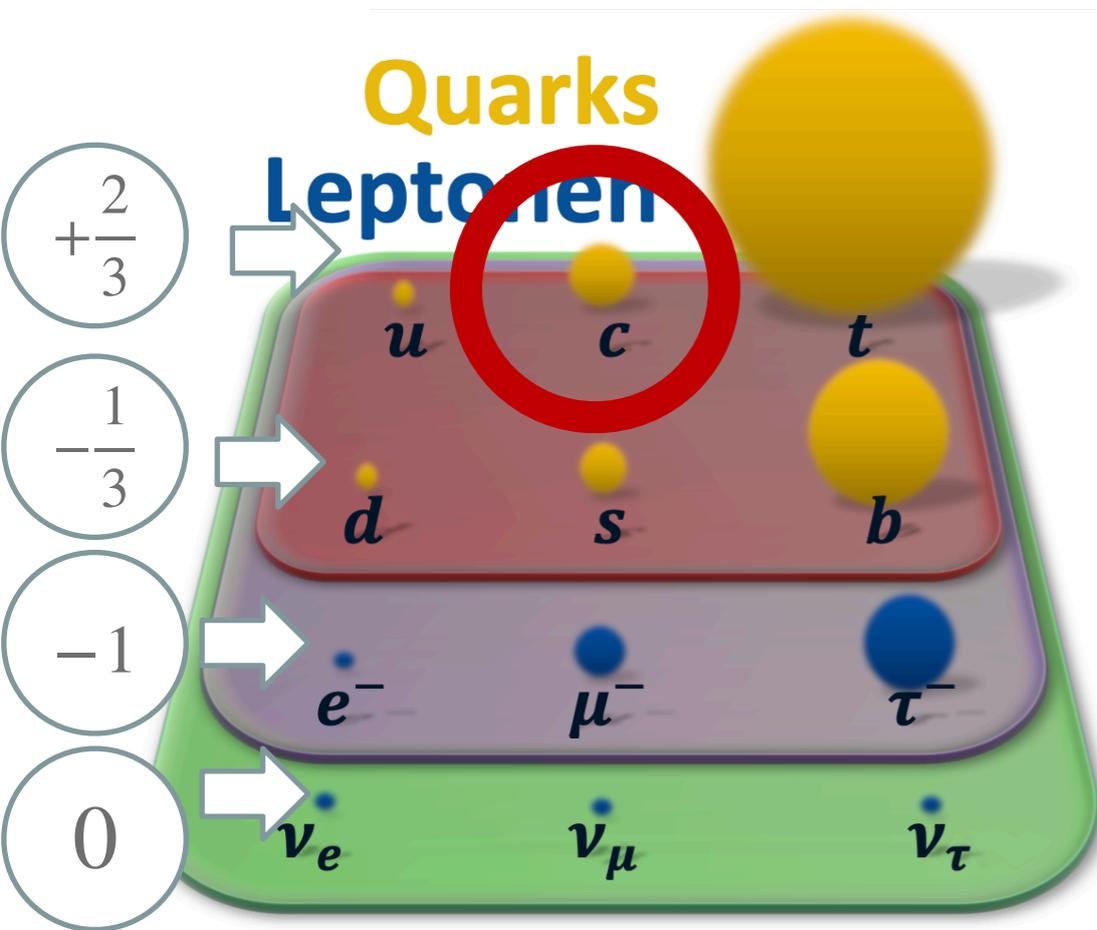
# FEYNMAN-DIAGRAMM - R-WERT

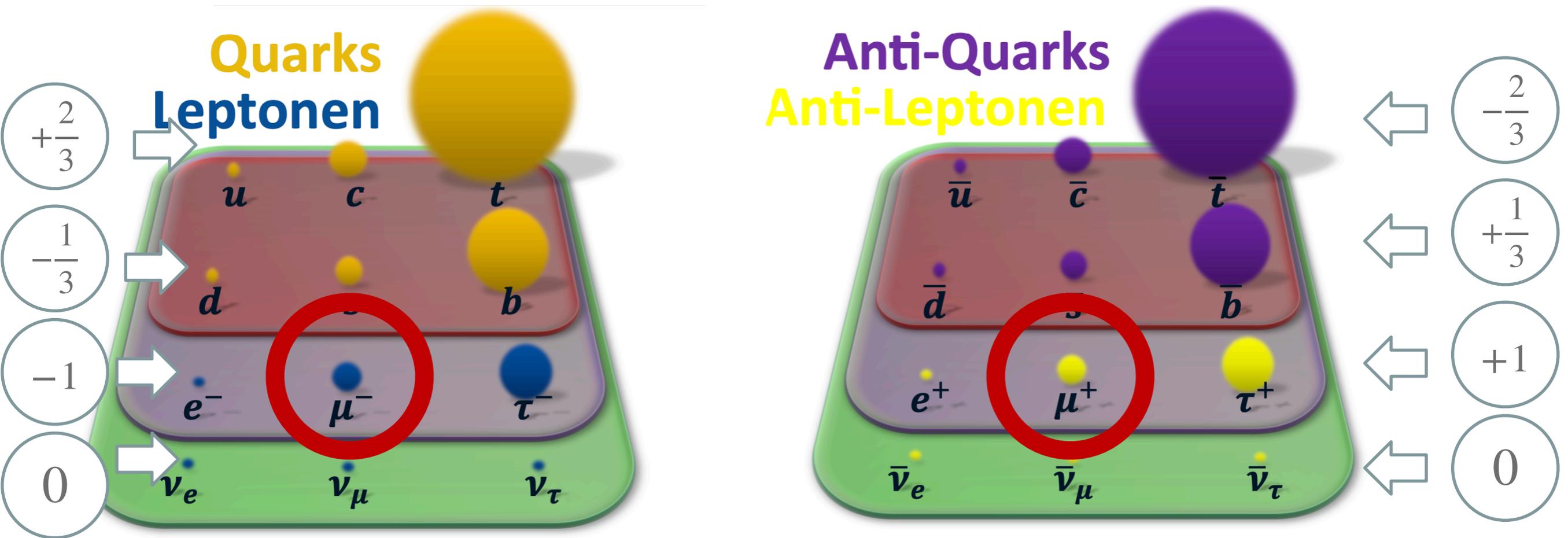
---











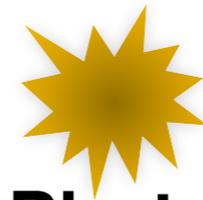
$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-: (-1)^2 \cdot XY$$

$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{b}b: \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \cdot XY$$

$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{c}c: \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot XY$$



**Elektron**



**Photon**



**Positron**

# ARBEITSBLATT: WAS PASSIERT BEI ELEKTRON/POSITRON-KOLLISIONEN?:

---

Ihr seid dran!

# ARBEITSBLATT: WAS PASSIERT BEI ELEKTRON/POSITRON-KOLLISIONEN?:

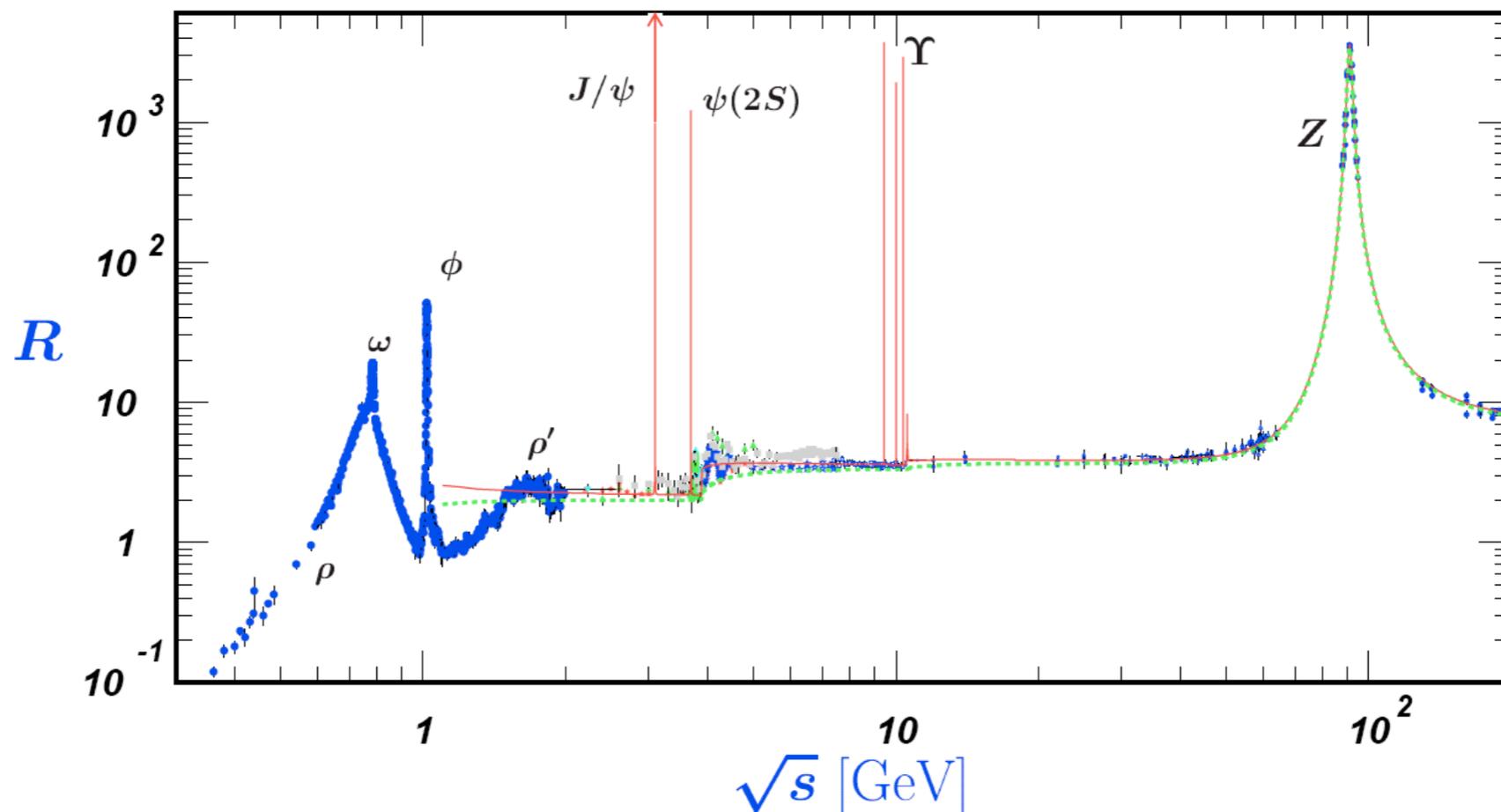
---

$$R = \frac{N(\text{Quarks})}{\frac{1}{2} \cdot [N(\text{Myonen}) + N(\text{Tauonen})]} = N_F \cdot 1.111\dots$$

# QUARKFLAVOUR UND DER R-WERT

---

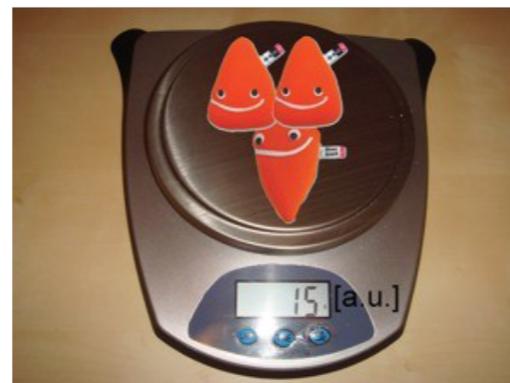
- Wir vernachlässigen Unterschiede im Phasenraum und der Hadronisierung bei der Bestimmung des R-Wertes
- R-Ratio hängt von der Anzahl der "verfügbaren" Quark Flavour ab
- Bei Grenzen tritt eine Resonanz aus zwei gebundenen Quarks ( $q\bar{q}$ ) auf
- Quarks werden als freie Teilchen betrachtet (asymptotic freedom)



# DAS STANDARDMODELL UND DAS HIGGS TEILCHEN

---

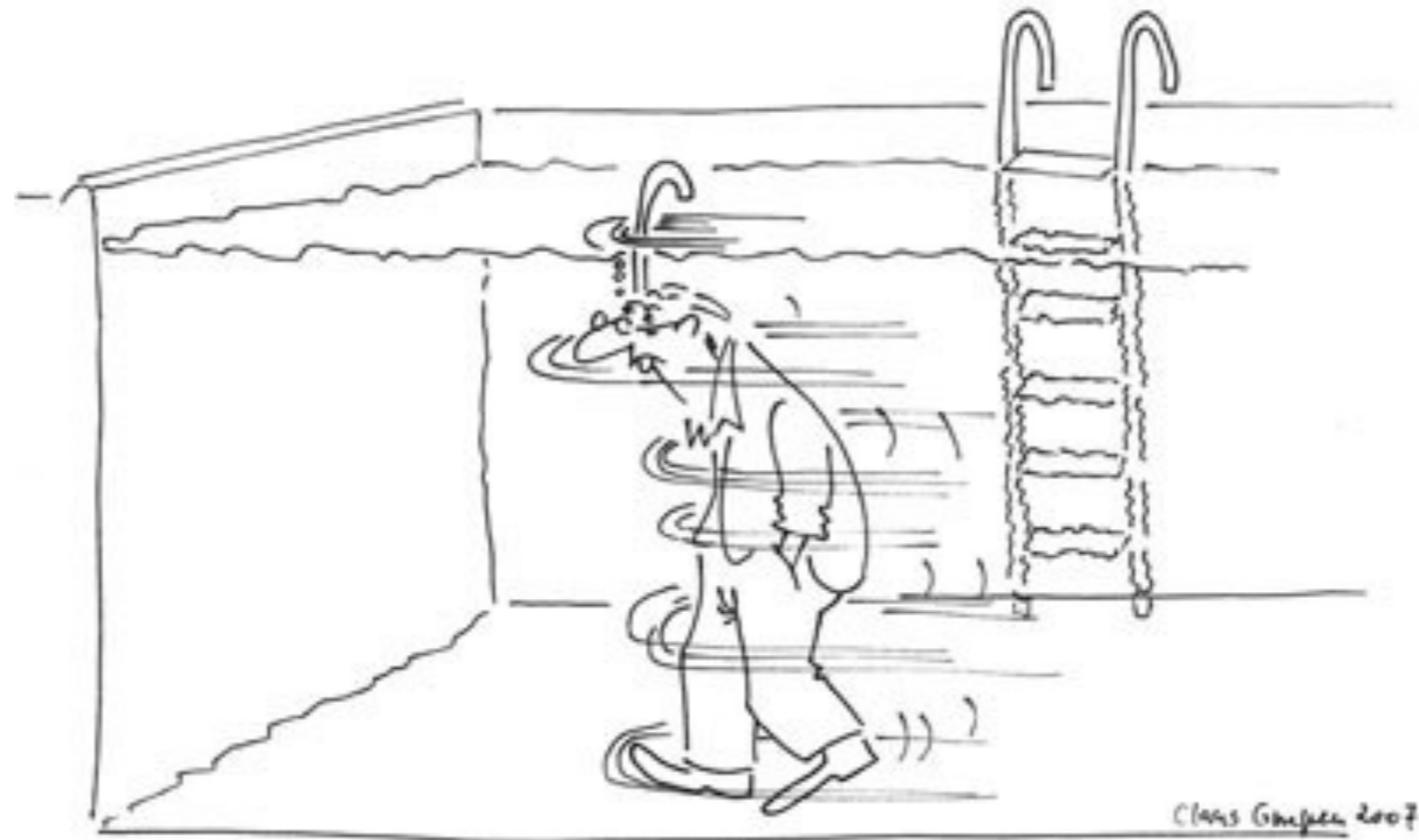
- Alle Berechnungen im Standardmodell funktionieren nur, wenn die Elementarteilchen masselos sind
- Das ist aber offensichtlich nicht der Fall!
- 1964 erweitern Theoretiker das SM mit einem mathematischen Trick, den man „spontane Symmetriebrechung“ nennt
- Higgs, Brout und Englert postulieren ein neues Teilchen als Nebenprodukt dieses Tricks, ohne funktioniert es nicht!
- Nach diesem Teilchen hat man bis 2012 gesucht!



# DER HIGGS-MECHANISMUS

---

- Alle Berechnungen im Standardmodell funktionieren nur, wenn die Elementarteilchen masselos sind
- 1964 Erweiterung des SM um ein allgegenwärtiges Kraftfeld, das die Teilchen abbremst
- Gleicher Effekt als hätten sie Masse:



# DER HIGGS-MECHANISMUS

---



- Eine bekannte Person betritt den Raum
- Je größer die Masse (Bekanntheit), umso langsamer die Bewegung und umgekehrt

# DER HIGGS-MECHANISMUS

---



- Eine Kellner (=Photon) betritt den Raum
- Keine Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld → Keine Masse

# DAS HIGGS-BOSON...

---



- ... ist das Austauscheteilchen des Higgs Feldes
- Das Higgs-Feld interagiert mit sich selbst → das sehen wir als Teilchen!

# DAS STANDARDMODELL - ALLES KLAR?

	FERMIONS			BOSONS
	I	II	III	
QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK	 $\gamma$ PHOTON
	 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK	 $g$ GLUON
LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO	 $Z$ Z BOSON
	 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU	 $W$ W BOSON

- Das fehlende Puzzlestück im Standardmodell wurde entdeckt
- Unser Modell beschreibt die experimentellen Ergebnisse sehr genau



# DAS STANDARDMODELL - ALLES KLAR?

	FERMIONS			BOSONS
	I	II	III	
QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK	 $\gamma$ PHOTON
	 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK	 $g$ GLUON
LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO	 $Z$ Z BOSON
	 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU	 $W$ W BOSON

- Das fehlende Puzzlestück im Standardmodell wurde entdeckt
- Unser Modell beschreibt die experimentellen Ergebnisse sehr genau



*Noch lange nicht!!!*

# GRAVITATION

---

- Anziehung von massiven Objekten  
Schwerkraft
- Die Gravitation ist viel schwächer als die anderen fundamentalen WW
- Makroskopisch: Gravitation viel stärker  
→ Gravitation wird nicht abgeschirmt!
- Schwerkraft wird beschrieben durch Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ (1915)
- Bis heute keine konsistente Theorie der Quantengravitation

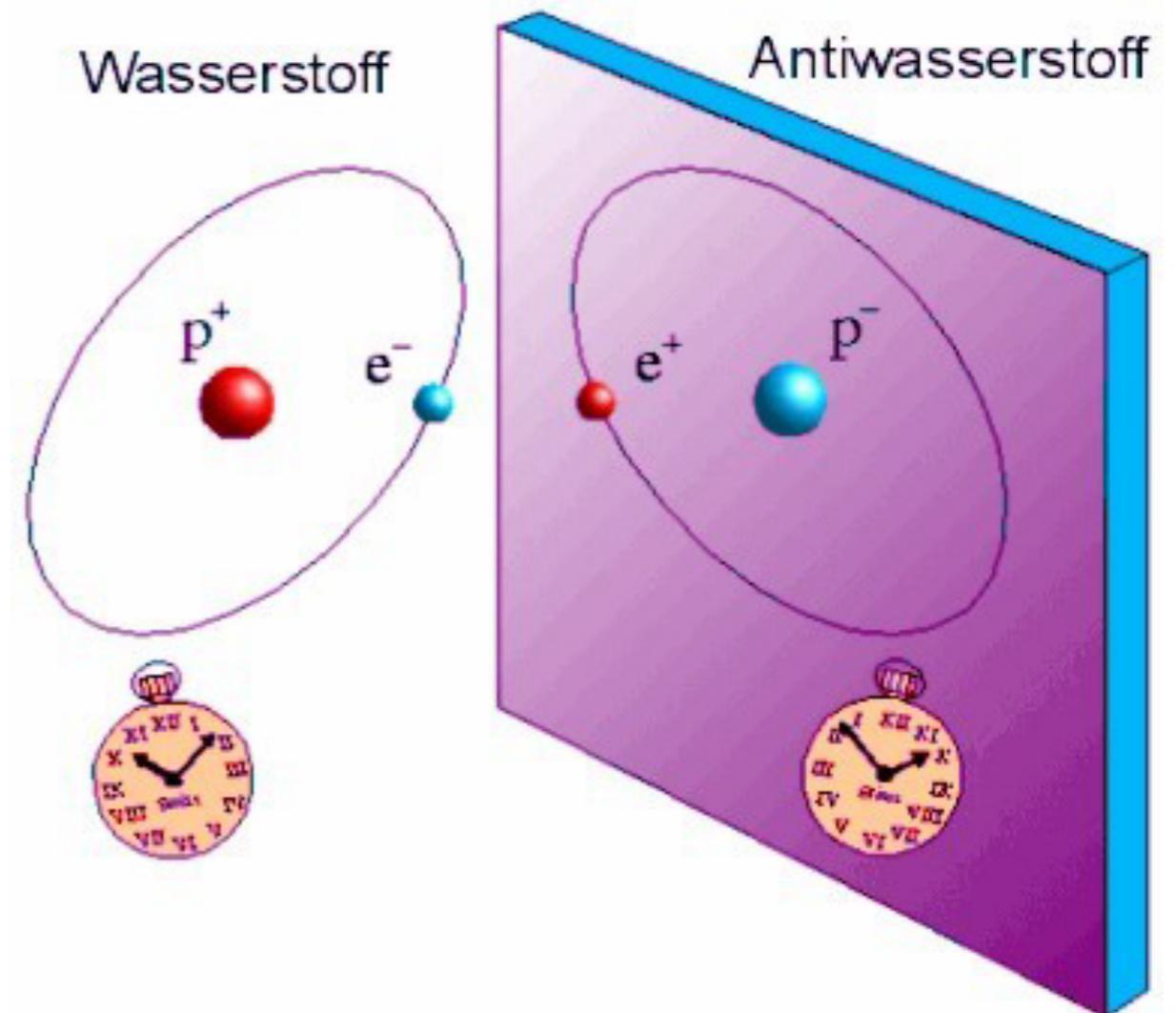


# WARUM GIBT ES DAS UNIVERSUM ÜBERHAUPT?

---

- Unser Universum besteht aus Materie
- Materie kann nur mit Antimaterie zusammen erzeugt werden
- Eigentlich wollte es genauso viel Antimaterie wie Materie geben (exakte Symmetrie)

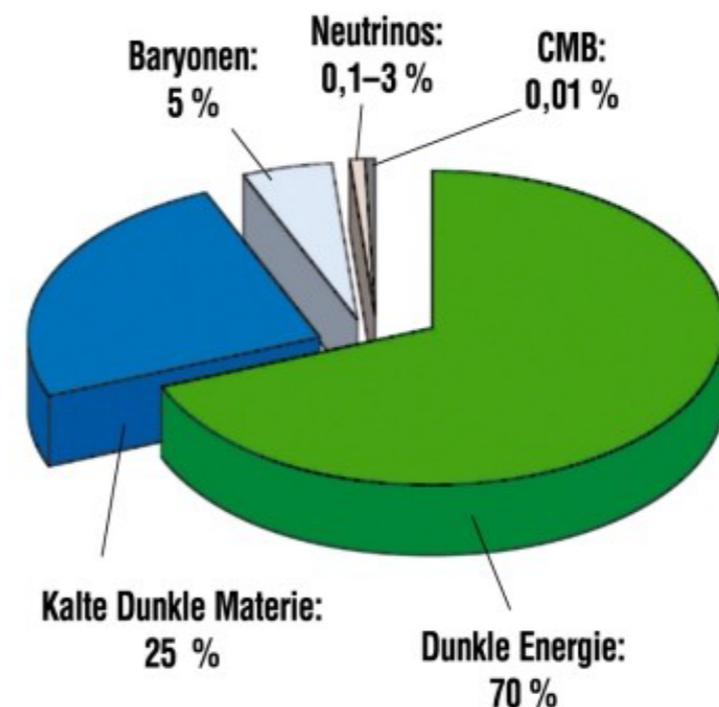
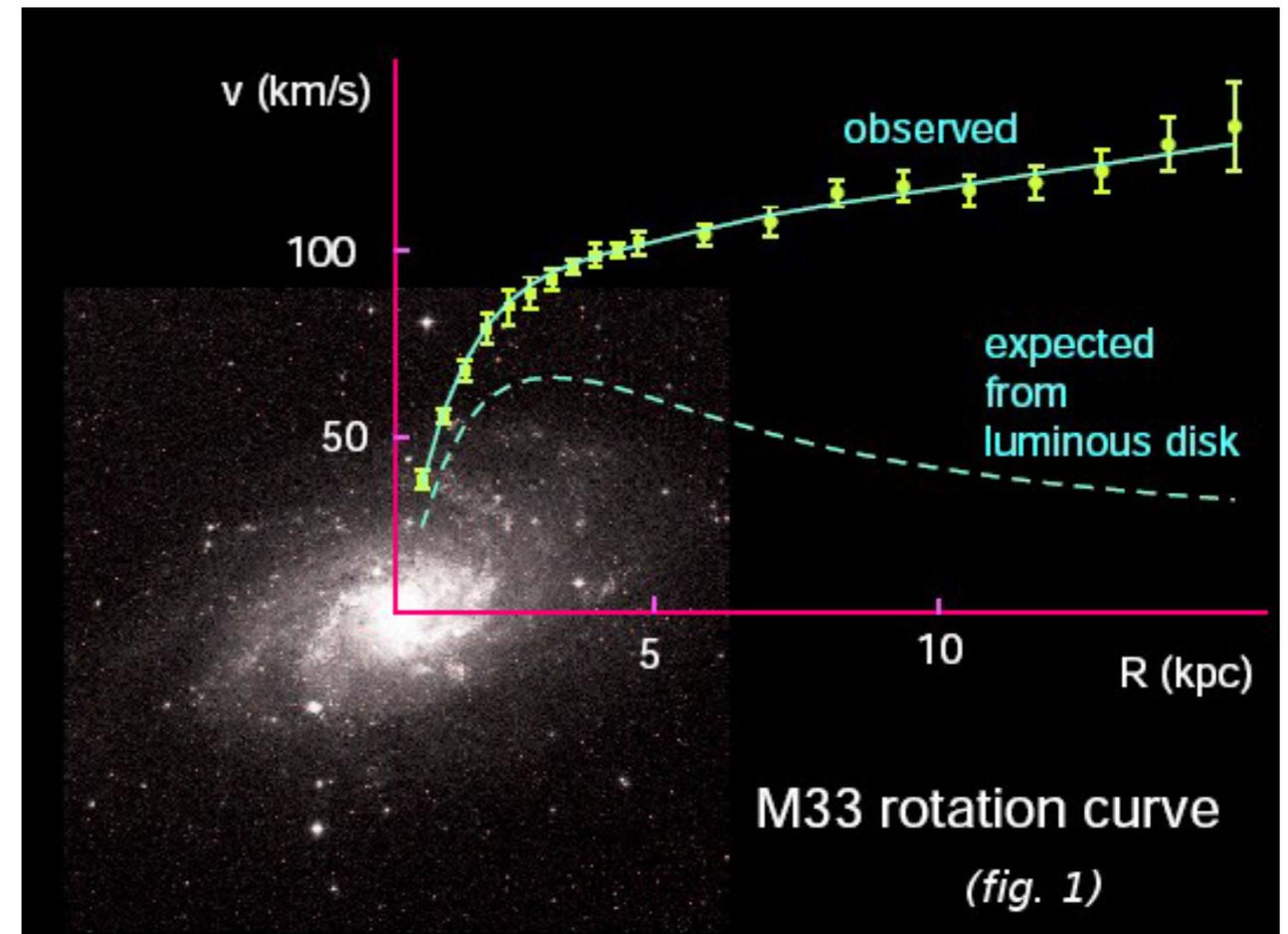
- Aber wo ist die Antimaterie hin?
- Ist die Symmetrie gebrochen?



# WAS IST DUNKLE MATERIE/ENERGIE?

---

- Galaxien rotieren schneller als aus ihren Leuchtkurven berechnet!
- Es muss zusätzliche unsichtbare Masse geben (Dunkle Materie)!
- Beschleunigte Ausdehnung des Universums!
- Es gibt eine unbekannte Kraft, die alles auseinander treibt (Dunkle Energie)!

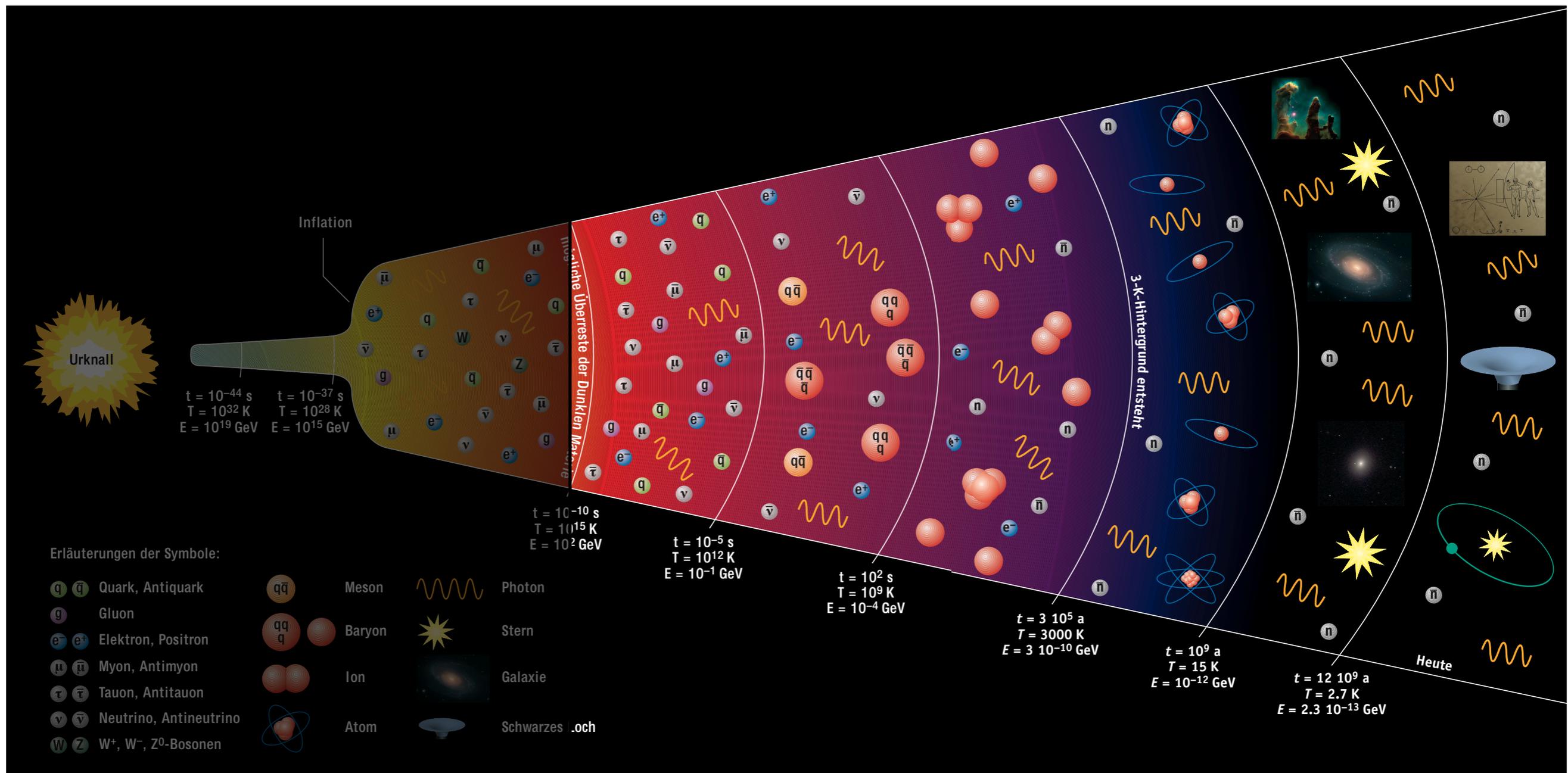


# DAS STANDARDMODELL - NOCH LÄNGST NICHT ALLES KLAR!



- Wie können wir die Gravitation mit unserem SM vereinen?
- Wieso ist die Materie-Antimaterie Symmetrie gebrochen?
- Aus welchen Teilchen besteht dunkle Materie?
- Wie können wir solche Fragen beantworten?

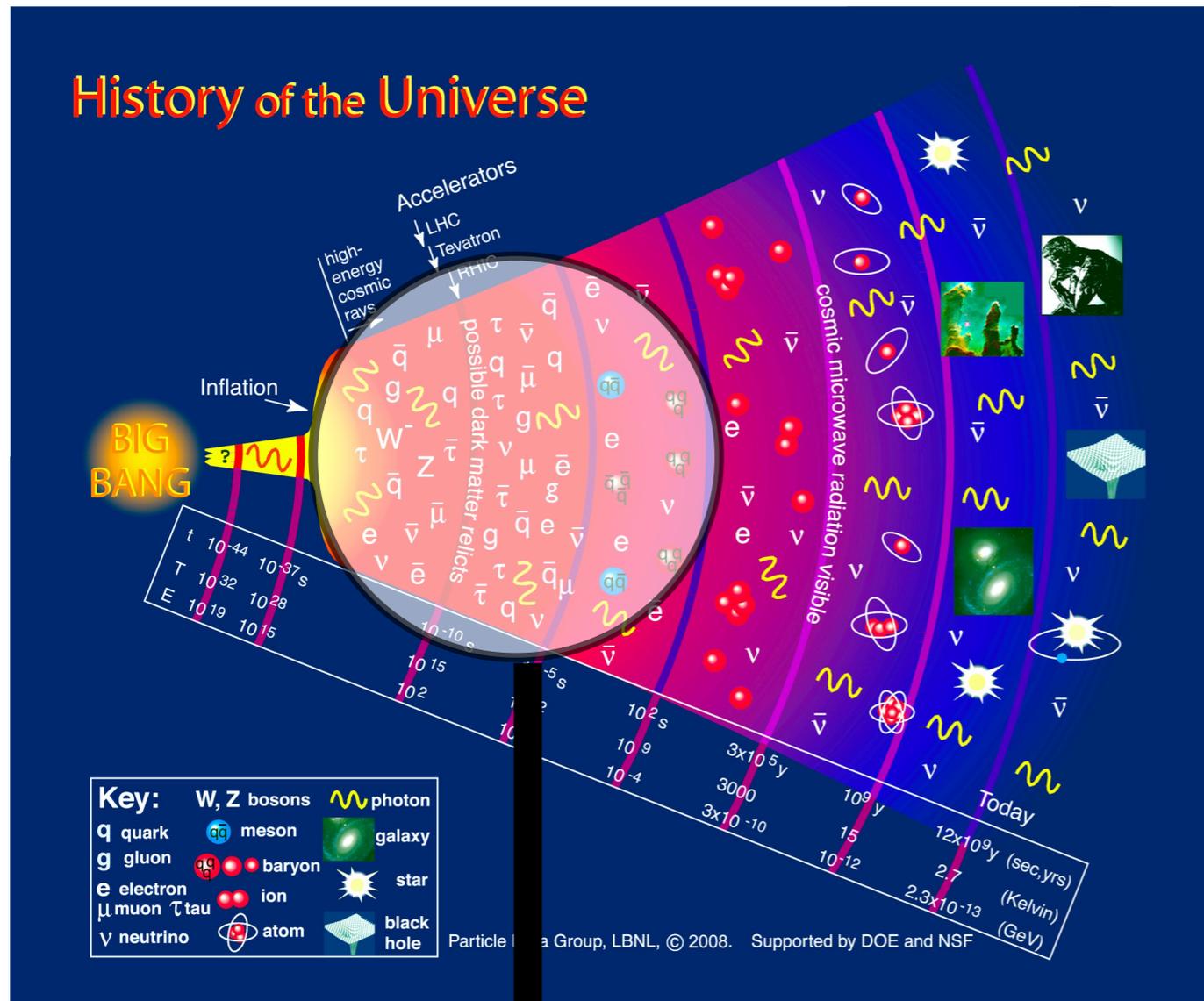
# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS



Theorie

Experiment

# WAS HAT DAS MIT TEILCHENPHYSIK ZU TUN?



## Teilchenphysik

- Mit starken Teilchenbeschleunigern erzeugen wir an einem winzigen Punkt für eine ganz kurze Zeit eine Umgebung, wie es sie im frühen Universum, kurz nach dem Urknall gab
- So wollen wir herausfinden „was die Welt im Innersten zusammenhält“

# ZUSAMMENFASSUNG 1. TEIL

---

- Das “Standardmodell” beschreibt bisherige Experimente mit hervorragender Genauigkeit: 3 Familien von Quarks und Leptonen. Sie lassen sich aufgrund ihrer Eigenschaften in einem System anordnen.
- Kräfte zwischen Teilchen werden durch Austauschteilchen übertragen. Diese Austauschteilchen sind ebenfalls Elementarteilchen.
- Offene Fragen bleiben:
  - Was ist dunkle Materie?
  - Was ist dunkle Energie?
  - Warum ist nach dem Urknall nur Materie übrig geblieben?
  - Ist das entdeckte Teilchen tatsächlich das lange gesuchte Higgs-Boson? usw...
- Für Antworten benötigen weitere Forschung → Später

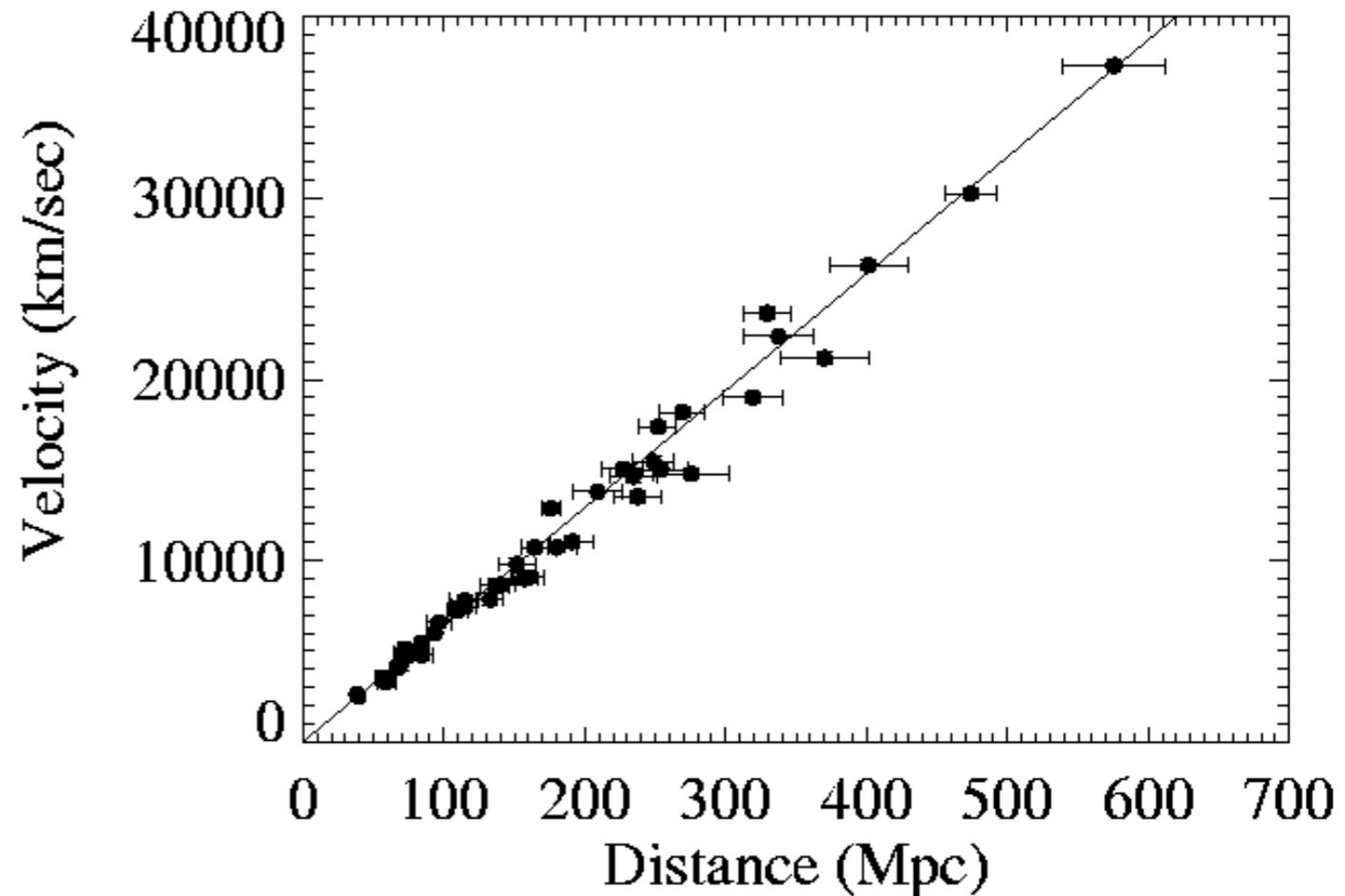
**BACKUP**

# VERBINDUNG ZWISCHEN TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

---

- Ausdehnung des Universums (Edwin Hubble, 1929)
- größere Entfernung entspricht größerer Fluchtgeschwindigkeit

$$v = H_0 \cdot d$$



- Das Universum hatte einen Anfang (Urknall, Big Bang)
- Kann das Alter des Universums abschätzen. Ca. 13 Mrd. Jahre
- Frühe Phase ist gekennzeichnet durch kleine Abstände und hohe Temperaturen, d.h. hohe Energien



**Ursuppe aus Elementarteilchen**

# SIND PROTONEN/NEUTRONEN ELEMENTAR?

---

- 1964 Gell-Mann und Zweig postulieren, dass Protonen und alle anderen Hadronen aus kleineren Teilchen, sog. Quarks zusammengesetzt sind
- SLAC(MIT) 1969: Beschieße Protonen mit Elektronen
- Nachweis der Substruktur des Protons

