



MASTERCLASS

Das Standardmodell und
die offenen Fragen der Teilchenphysik





1. TEIL - WIE FUNKTIONIERT TEILCHENPHYSIK?

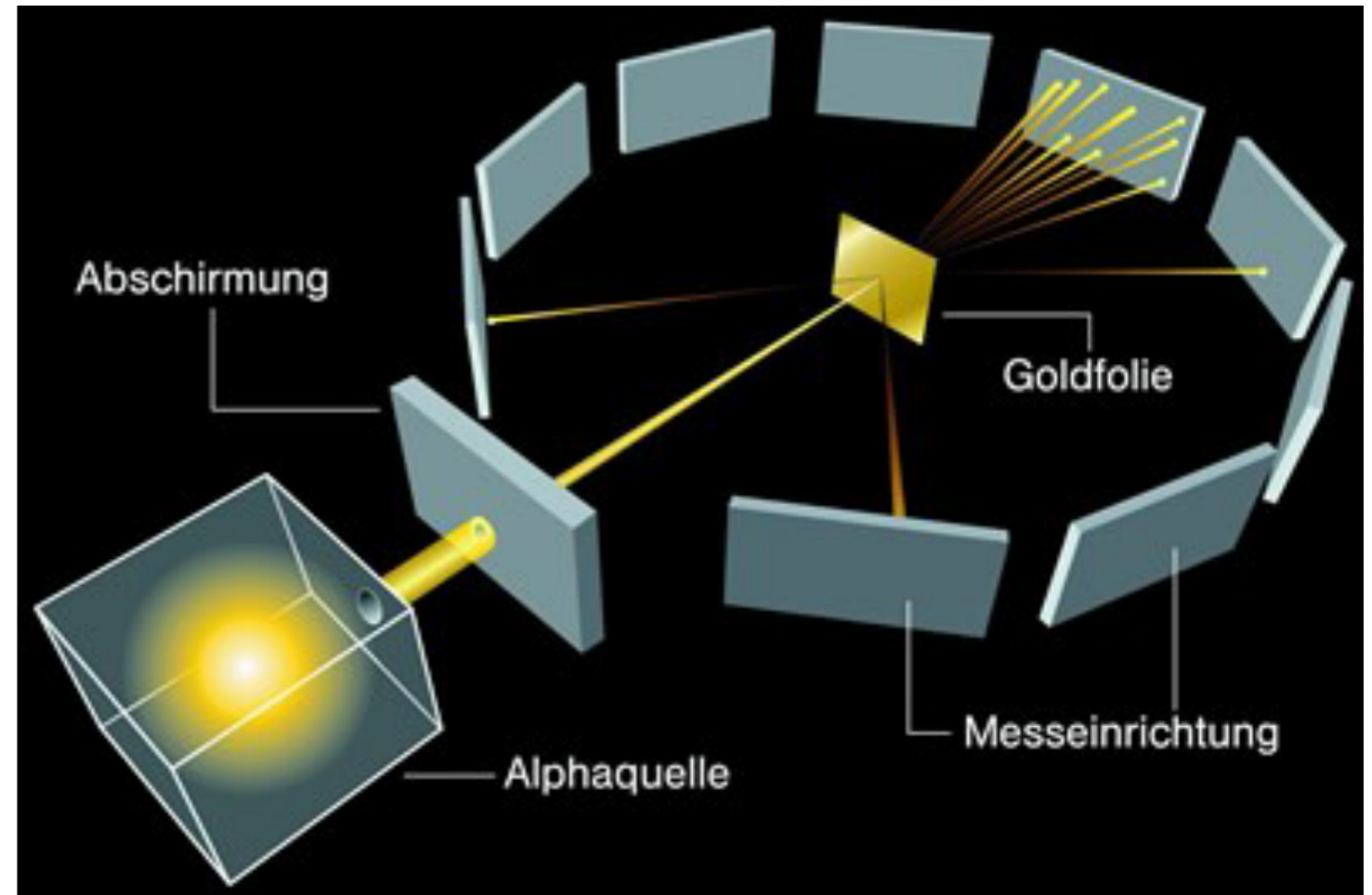
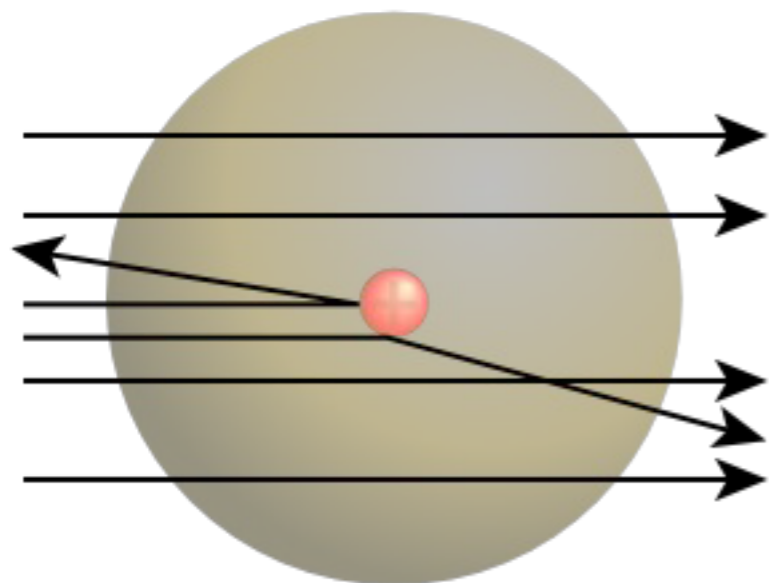
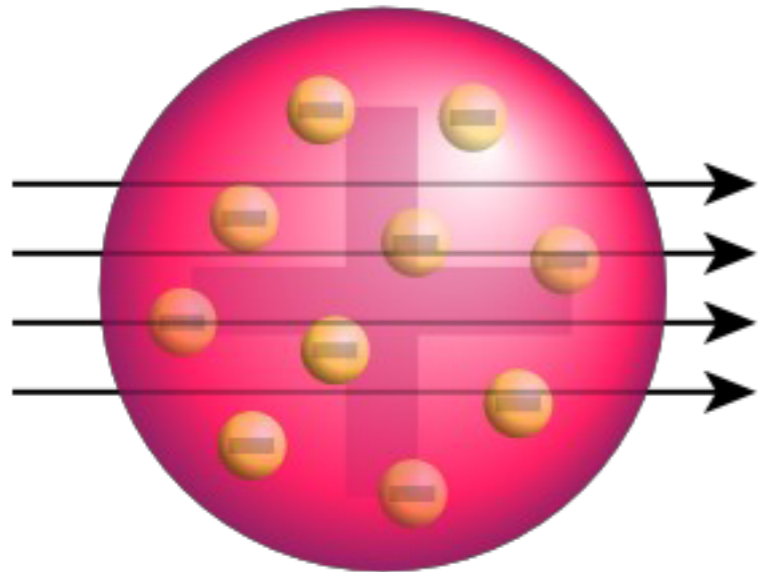
DAS STANDARD MODELL DER TEILCHENPHYSIK

Oder

„Was die Welt im Innersten zusammenhält“

WIE UNTERSUCHT MAN SEHR KLEINE TEILCHEN?

- Durch Streuexperimente!
- Rutherford 1910: Beschuss von Goldfolie mit α -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

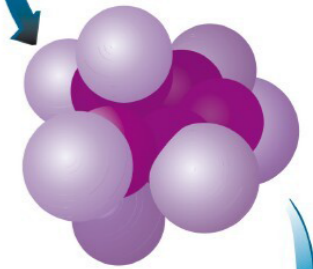
Teilchenphysik
Particle Physics

≈ 0,01 m
Kristall
Crystal



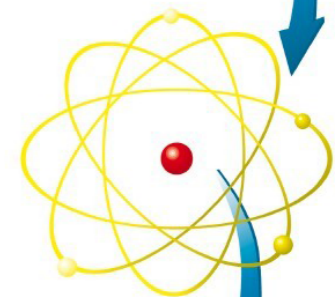
1/10.000.000

10⁻⁹ m
Molekül
Molecule



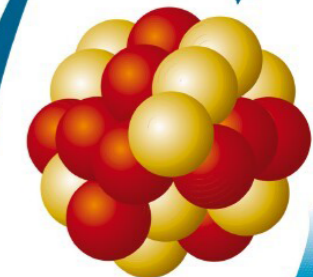
1/10

10⁻¹⁰ m
Atom
Atom



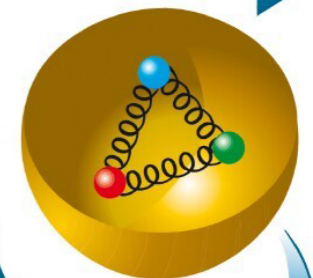
1/10.000

10⁻¹⁴ m
Atomkern
Atomic nucleus



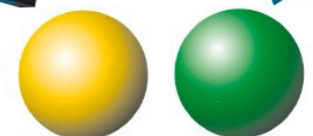
1/10

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

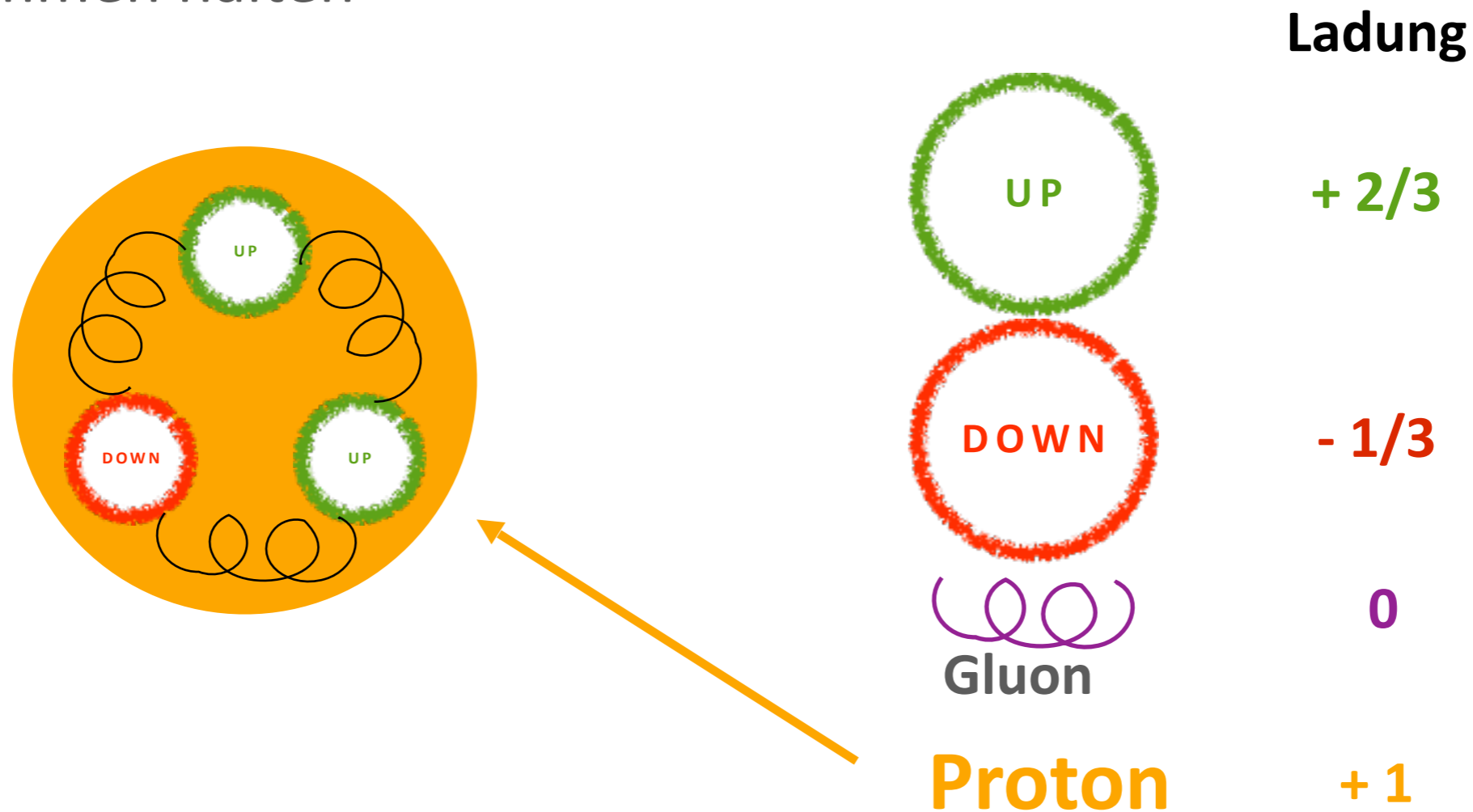


Proton



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?

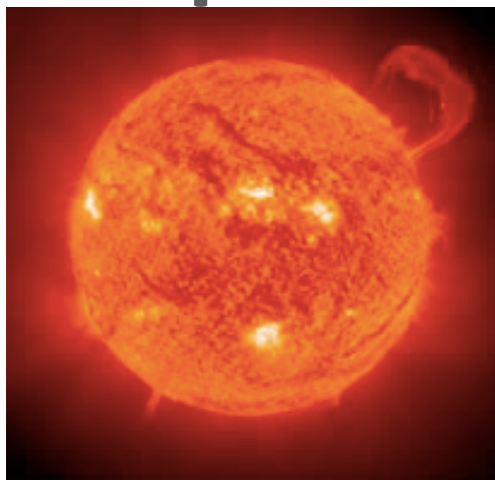
GIBT ES NOCH WEITERE ELEMENTARTEILCHEN.



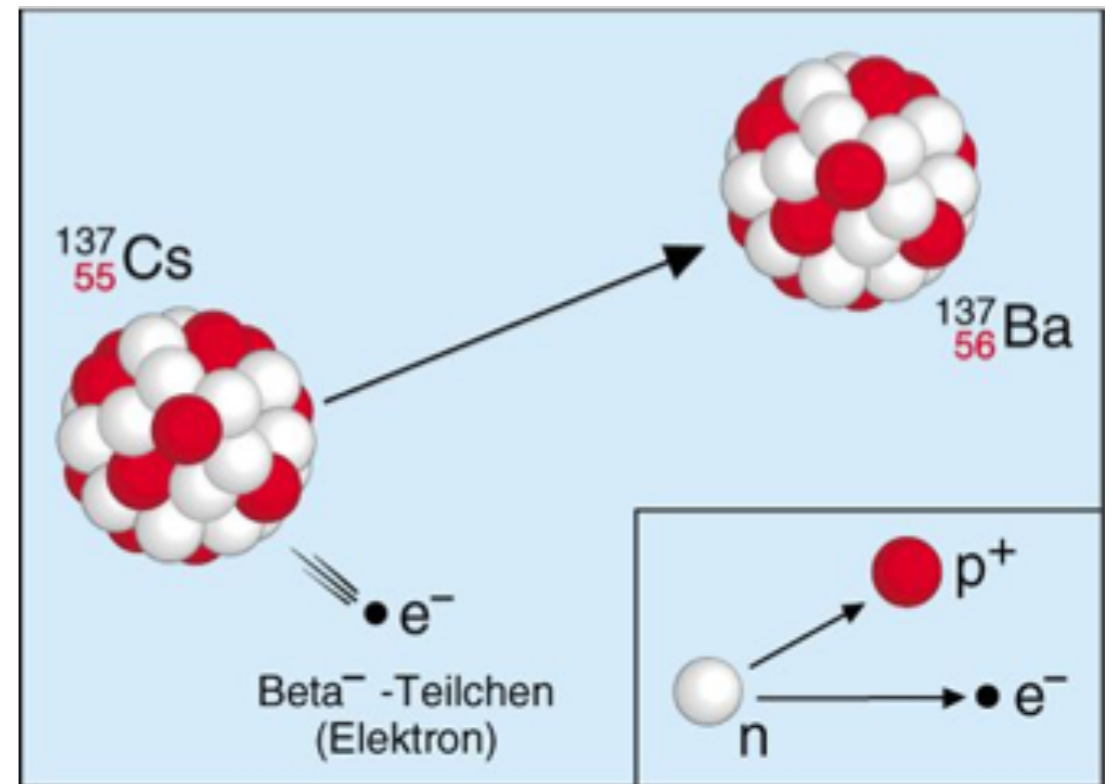
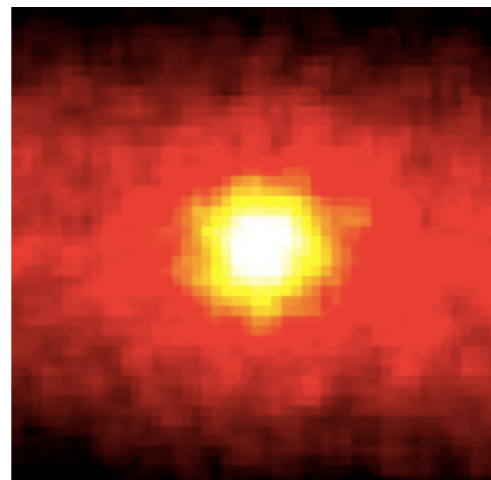
- 1930 postulierte Pauli ein weiteres Teilchen um den β -Zerfall von Atomkernen zu erklären

- 64 Milliarden Sonnenneutrinos/ cm^2 sec

Optisch:



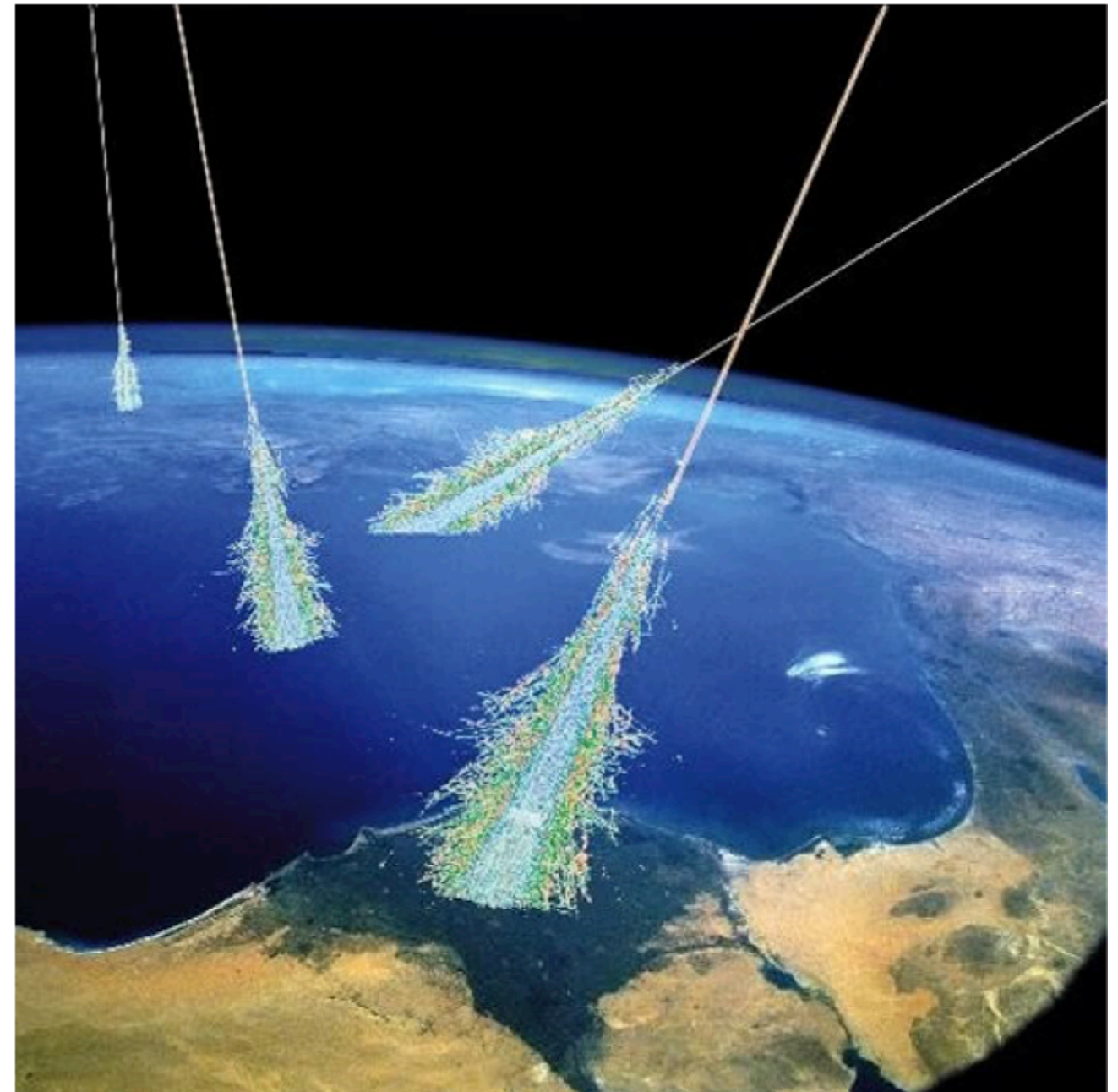
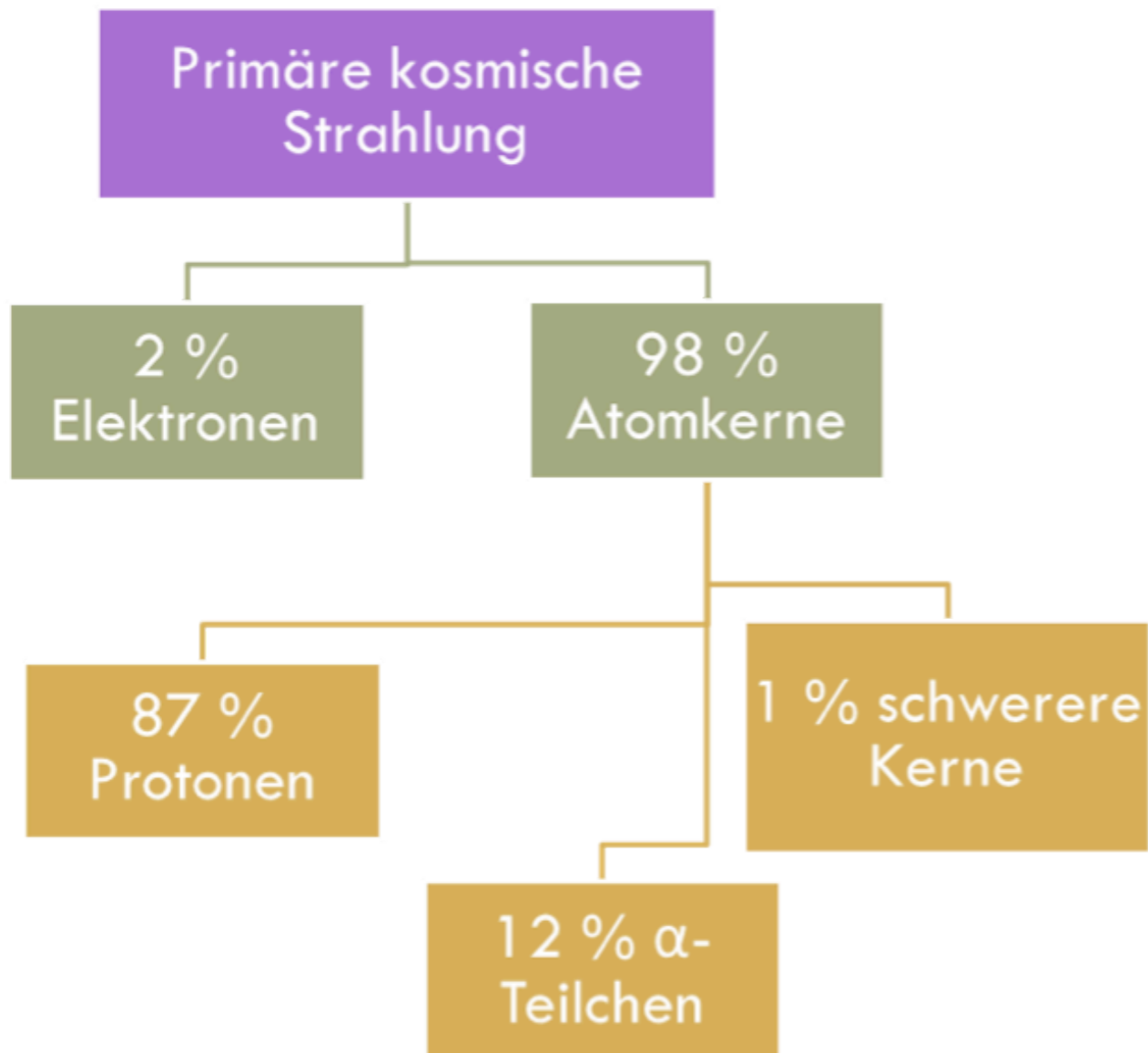
Neutrinos:



Neutrino

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

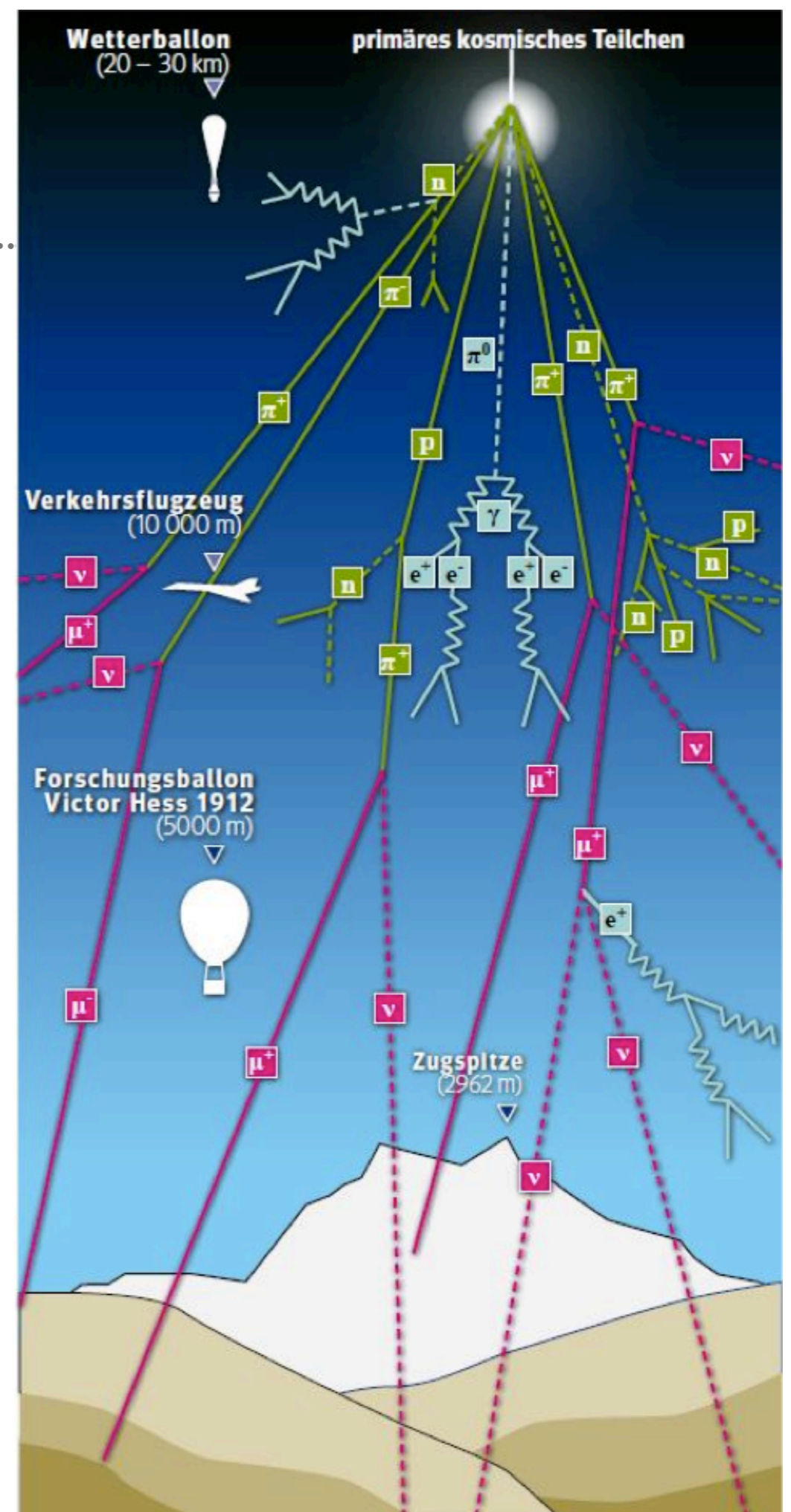
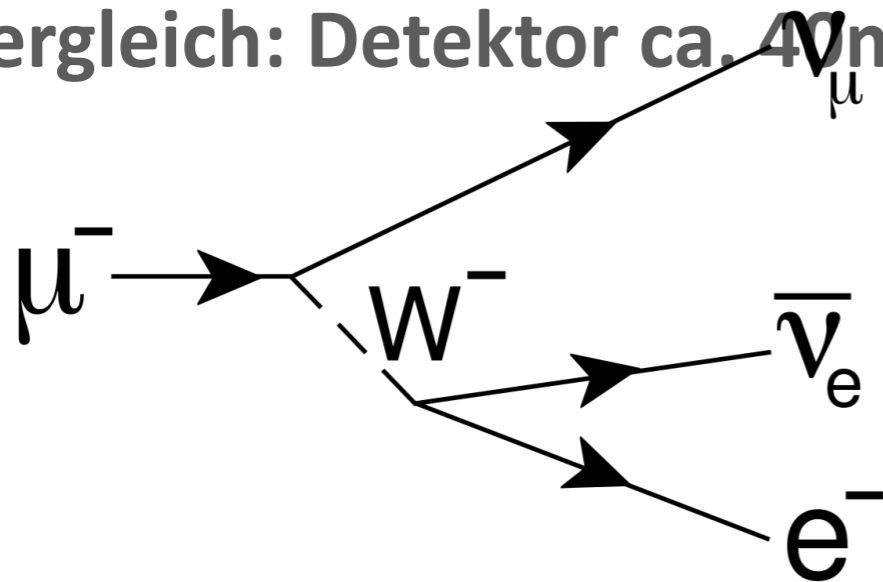
KOSMISCHE TEILCHEN



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. 40m)



DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

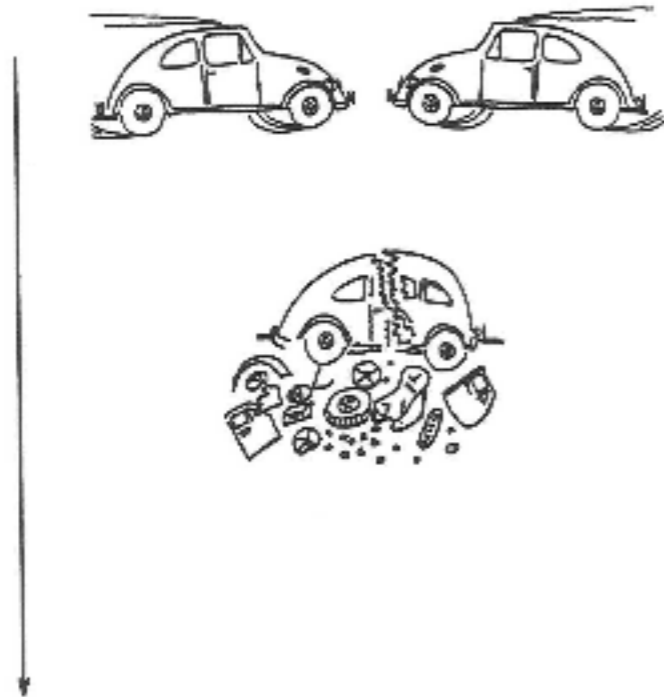
Unser „Periodensystem“

	I	FERMIONS II	III
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ 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

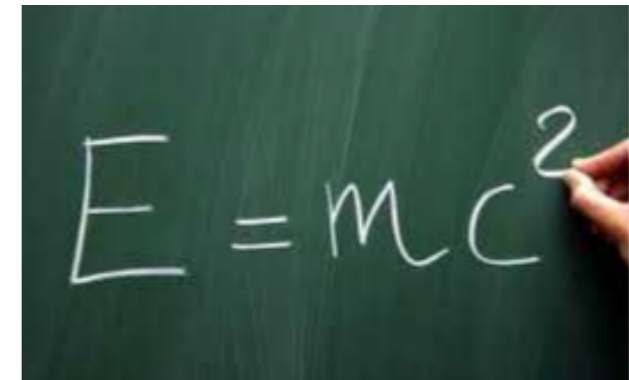
WENN TEILCHEN KOLLIDIEREN...



... ENTSTEHEN NEUE TEILCHEN



© Claus Grupen



mehr Energie



mehr/schwerere Teilchen



DAS STANDARDMODELL - ORDNUNG IM SYSTEM

	I	II	III
FERMIONS	QUARKS		
	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK
	LEPTONS		
	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU

Ladung

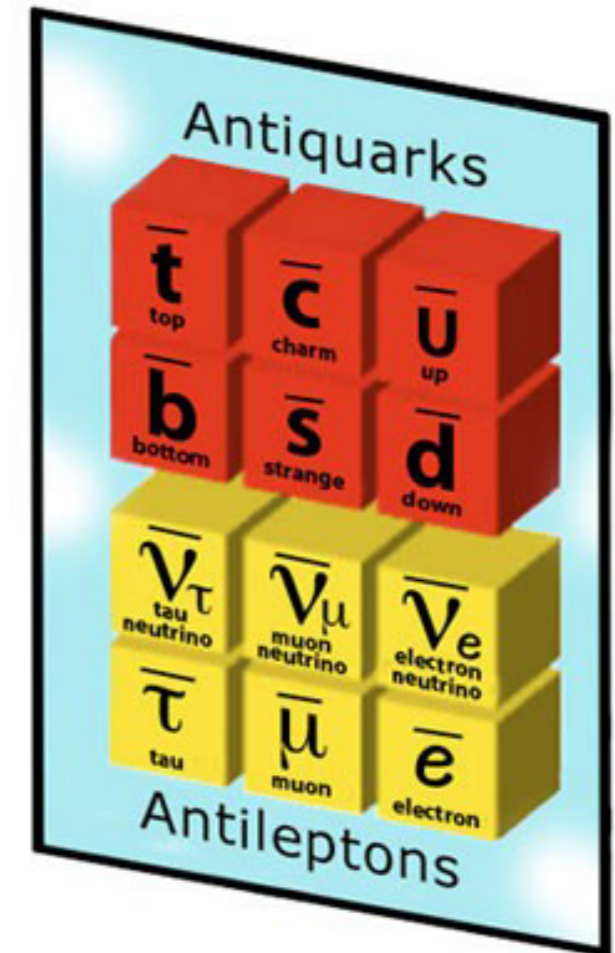
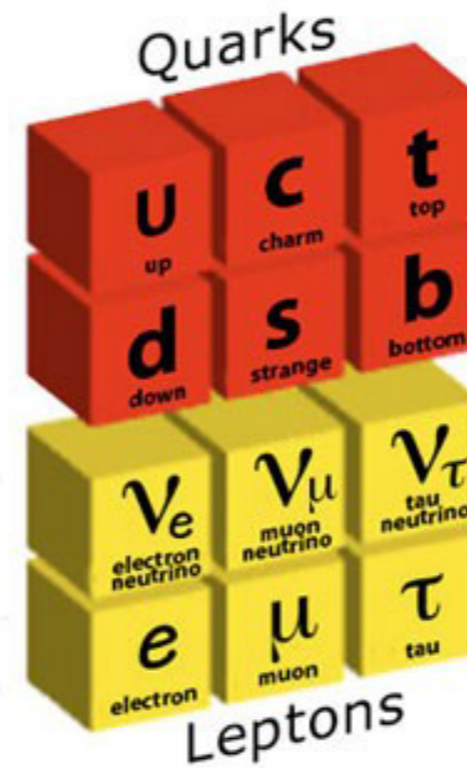
$2/3$

$-1/3$

0

-1

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



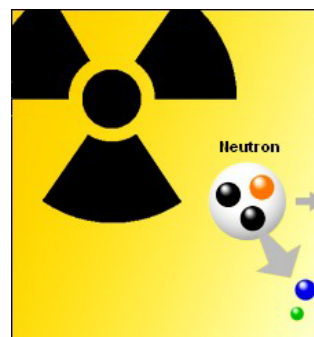
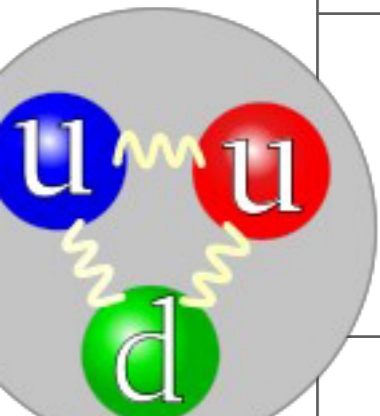
Masse

DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

Kraft	Austauschteilchen	Wirkung
?	?	?
Ihr	Seid	Dran!

DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

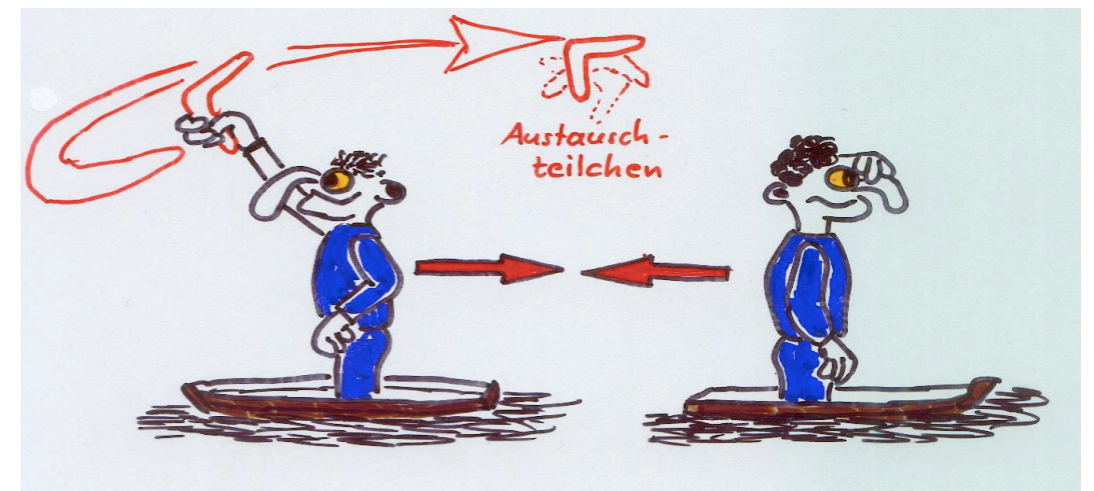
Kraft	Austauschteilchen	Wirkung
Starke Kraft	Gluon	Hält den Atomkern zusammen/bindet Quarks aneinander
Elektromagnetische Kraft	Photon	Hält Atome und Moleküle zusammen
Schwache Kraft	W/Z-Boson	Radioaktive Zerfälle (wandelt Quarks und Leptonen ineinander um)
Gravitation	Graviton	Masse zieht sich an



DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN

	I	II	III	BOSONS	
QUARKS	 u UP QUARK	 c CHARM QUARK	 t TOP QUARK	 γ PHOTON	FORCE CARRIERS
 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK	 g GLUON		
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO	 Z Z BOSON	
 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU	 W W BOSON		

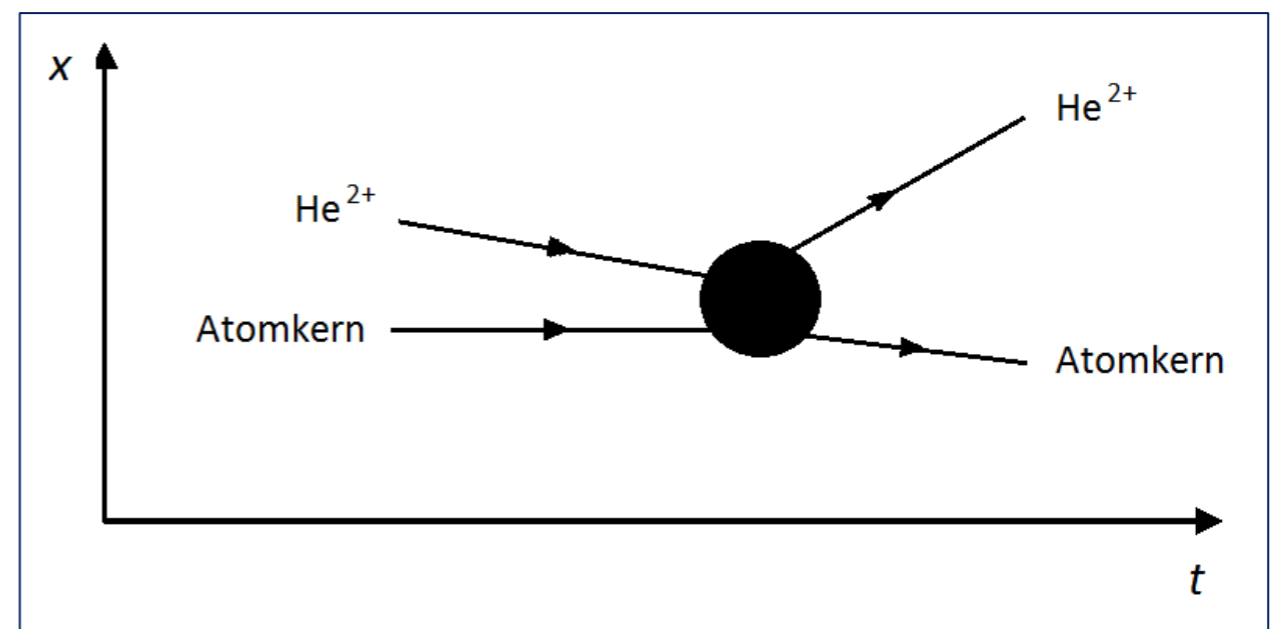
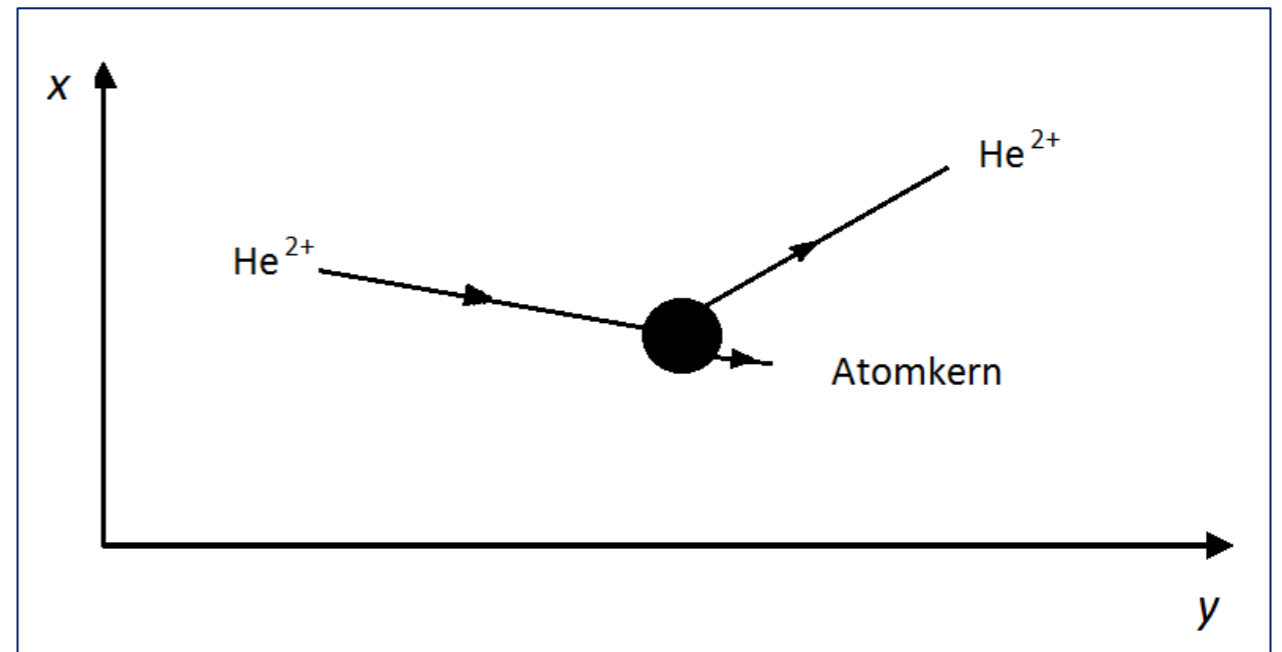
- Kräfte zwischen den Teilchen werden durch spezielle Vermittler-Teilchen übertragen



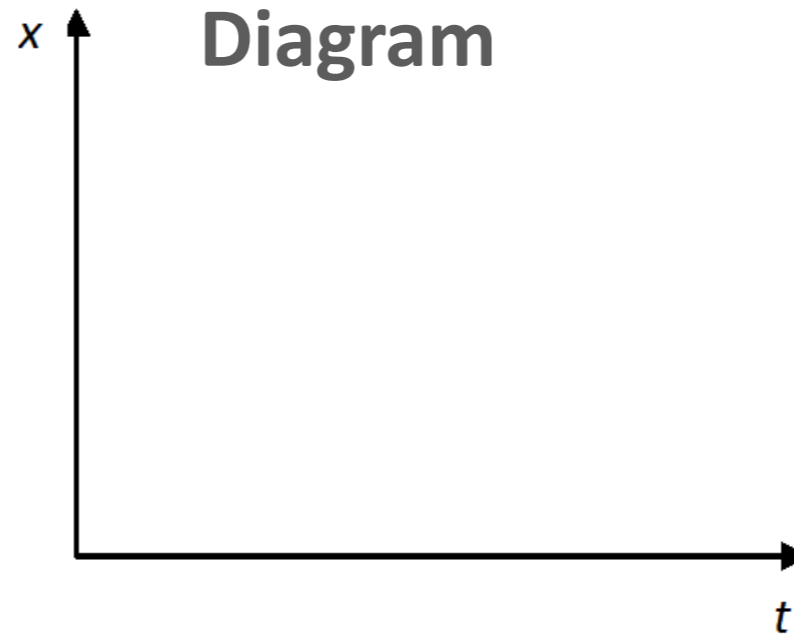
FEYNMAN-DIAGRAMM - WAS IST DAS EIGENTLICH?

Darstellung von Wechselwirkungen

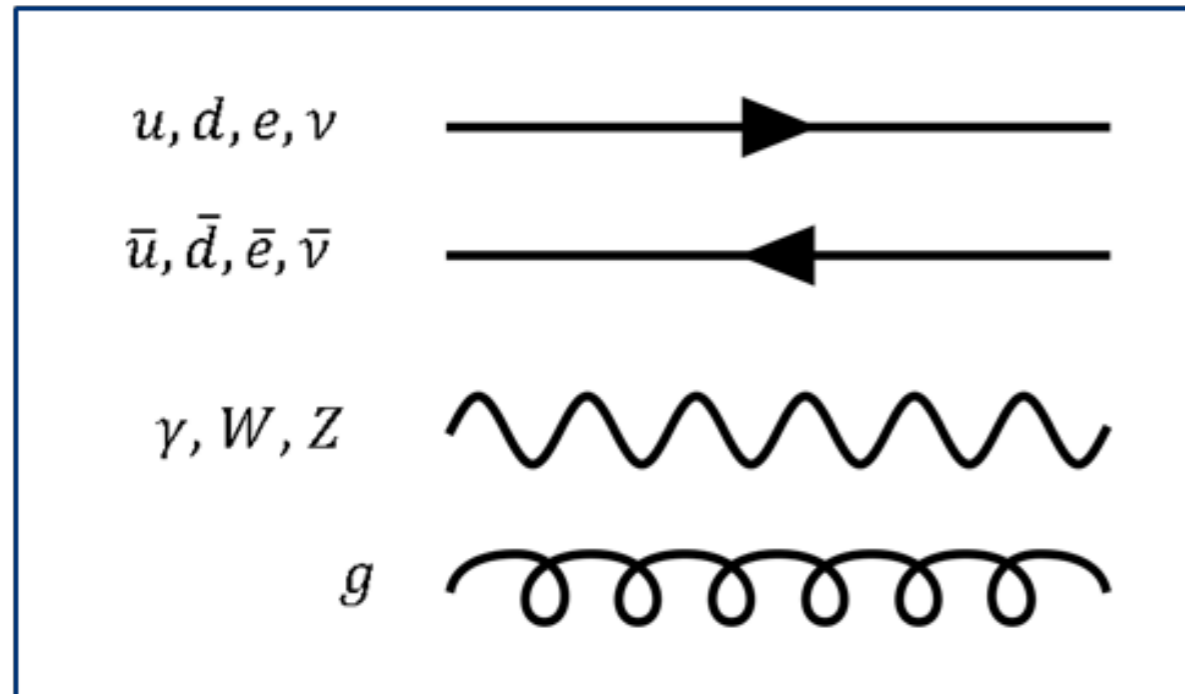
- Analogie: Austausch eines Austauschteilchens
- Anstelle von Feldlinie kann die Wechselwirkung durch den Austausch eines Botenteilchens dargestellt werden
- Eine Vorstufe des Feynman-Diagramms ist das x-y-Diagramm
- Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)



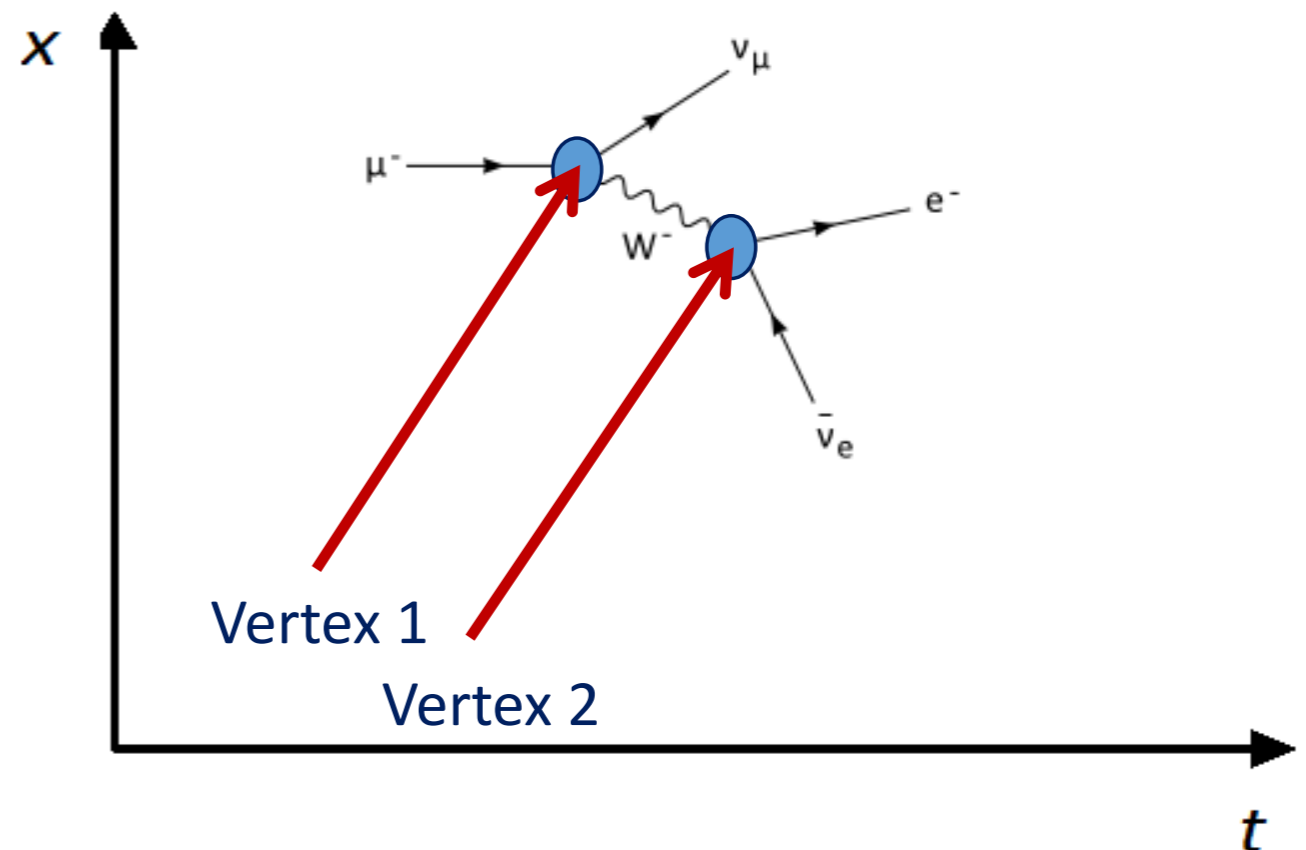
FEYNMAN-DIAGRAMM - REGELN



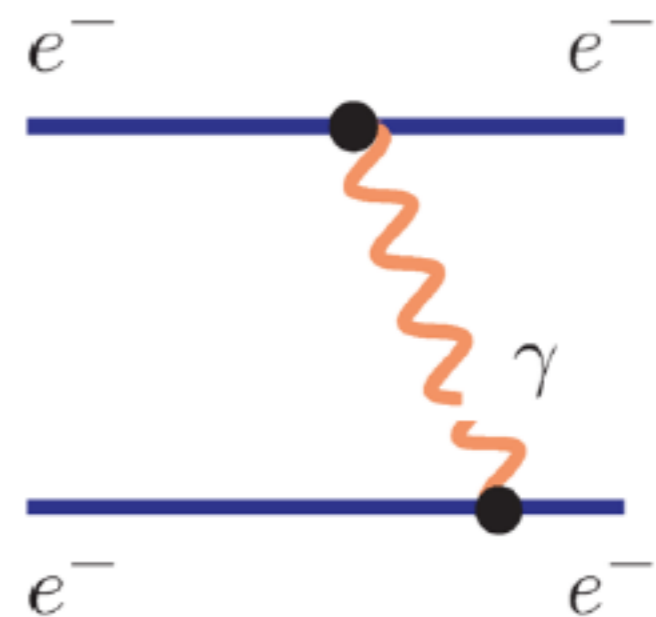
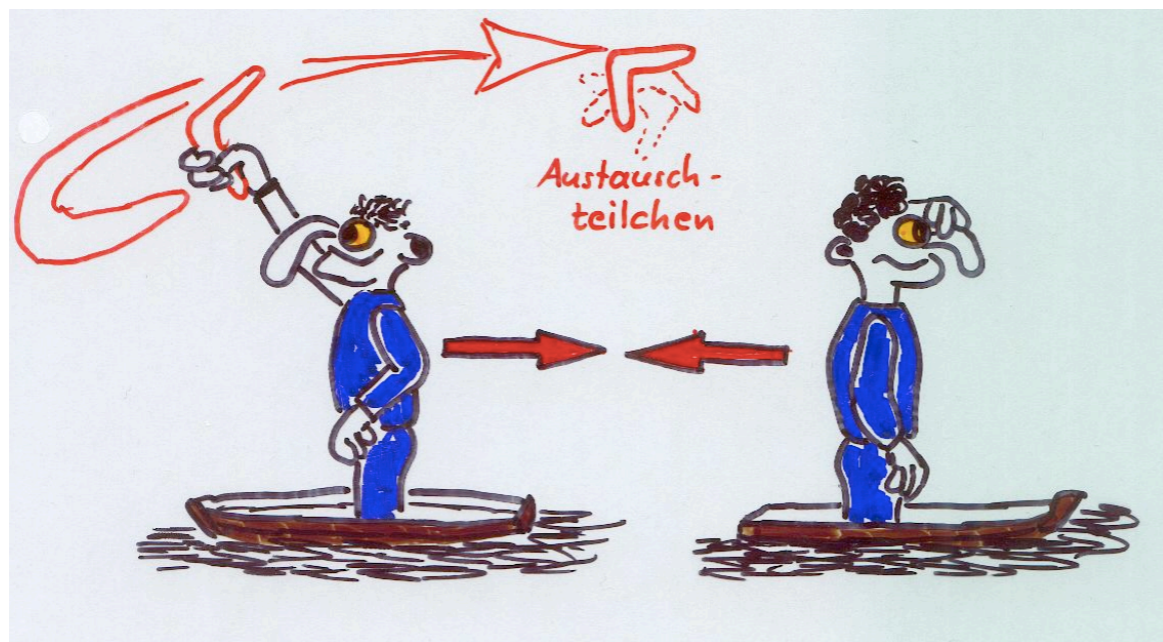
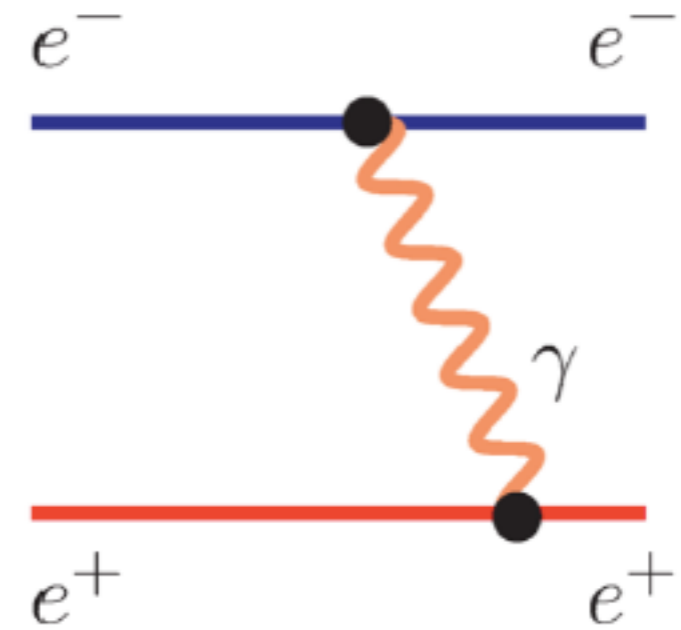
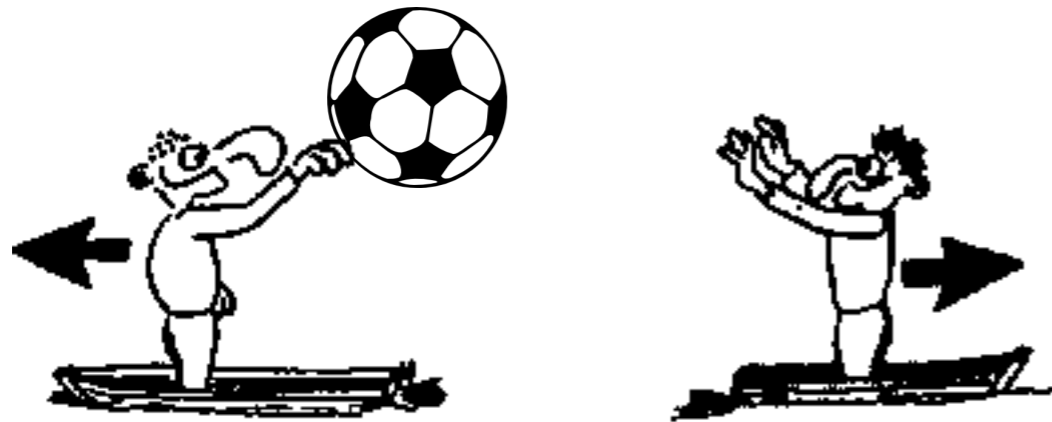
Teilchen



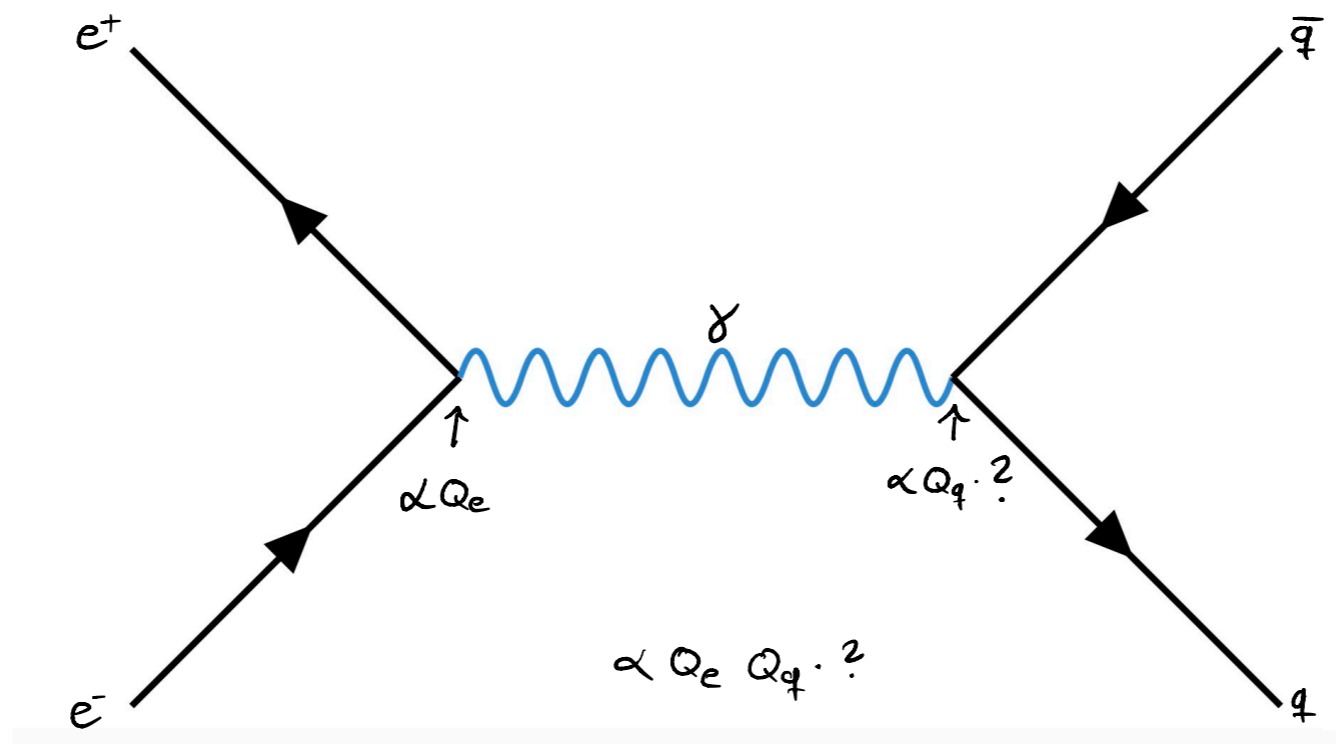
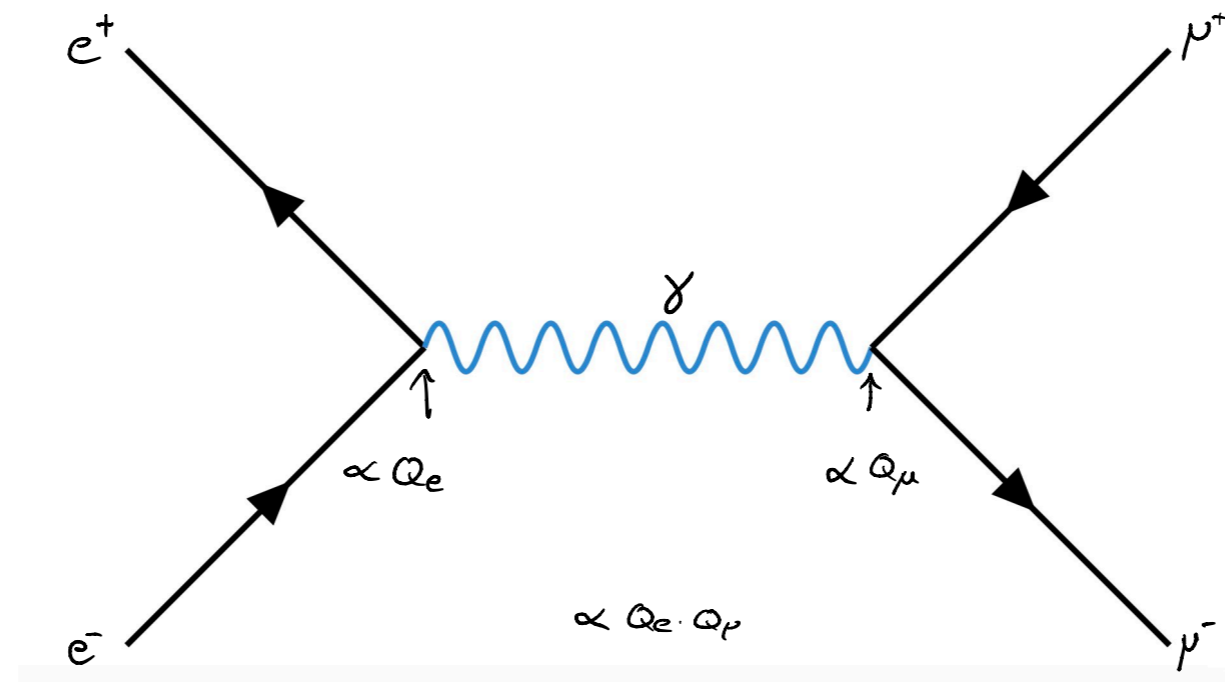
Wechselwirkung

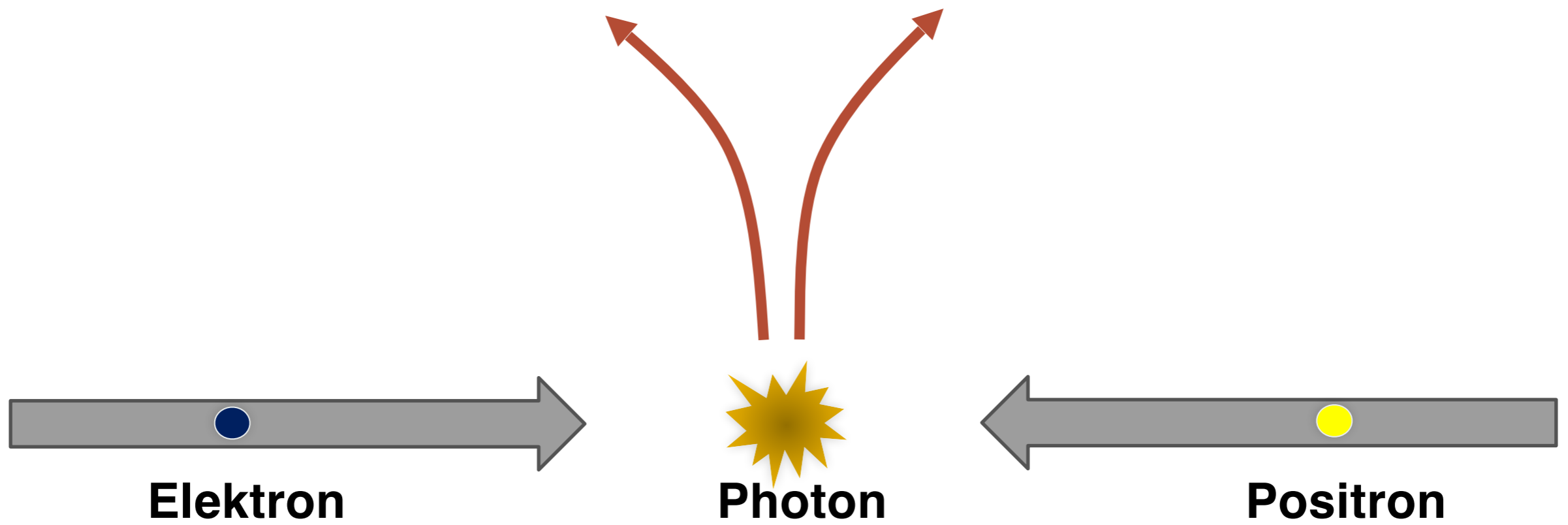
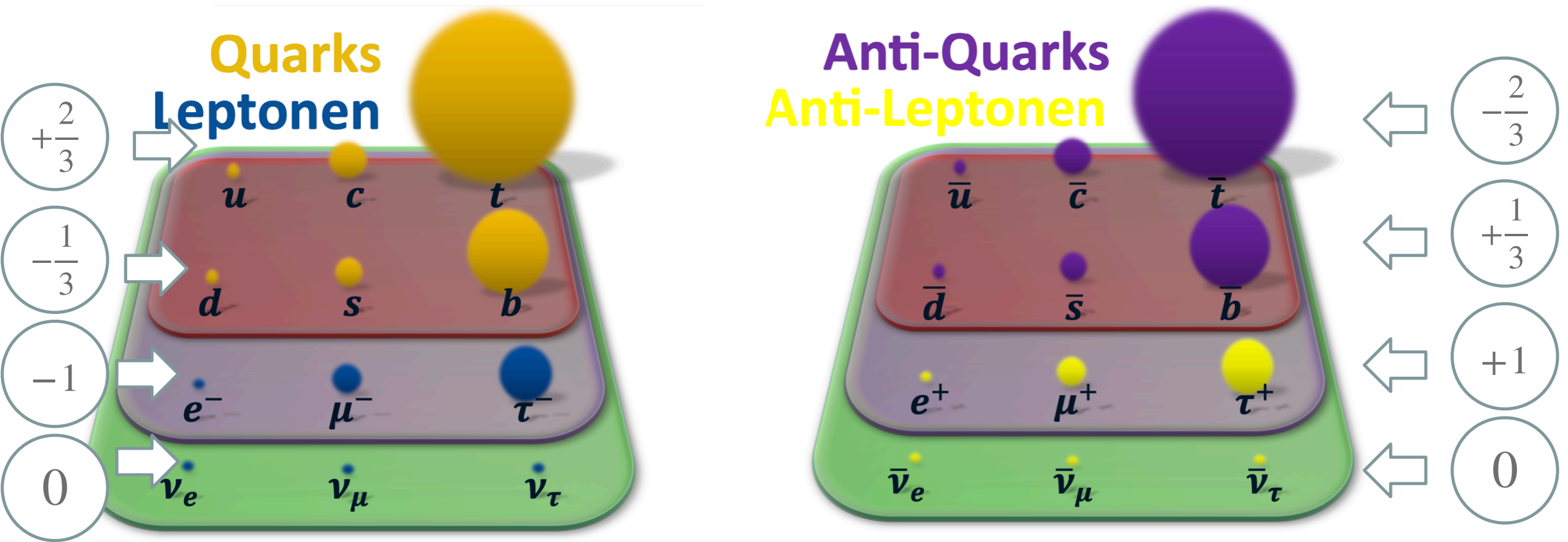


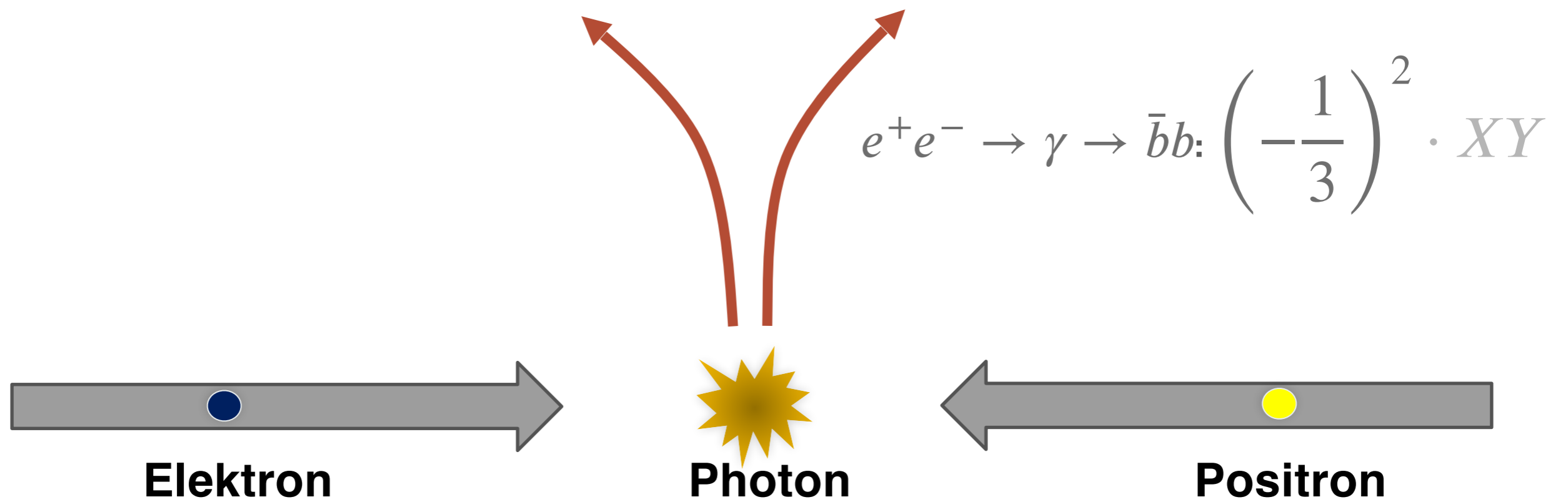
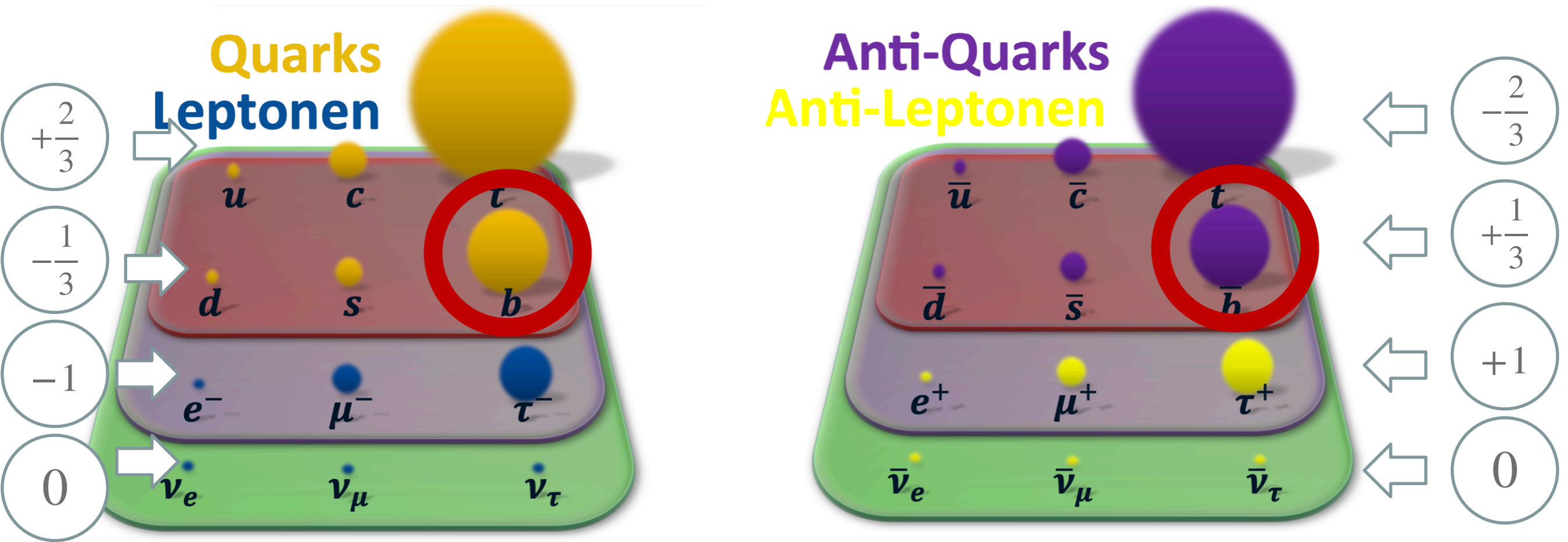
DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN

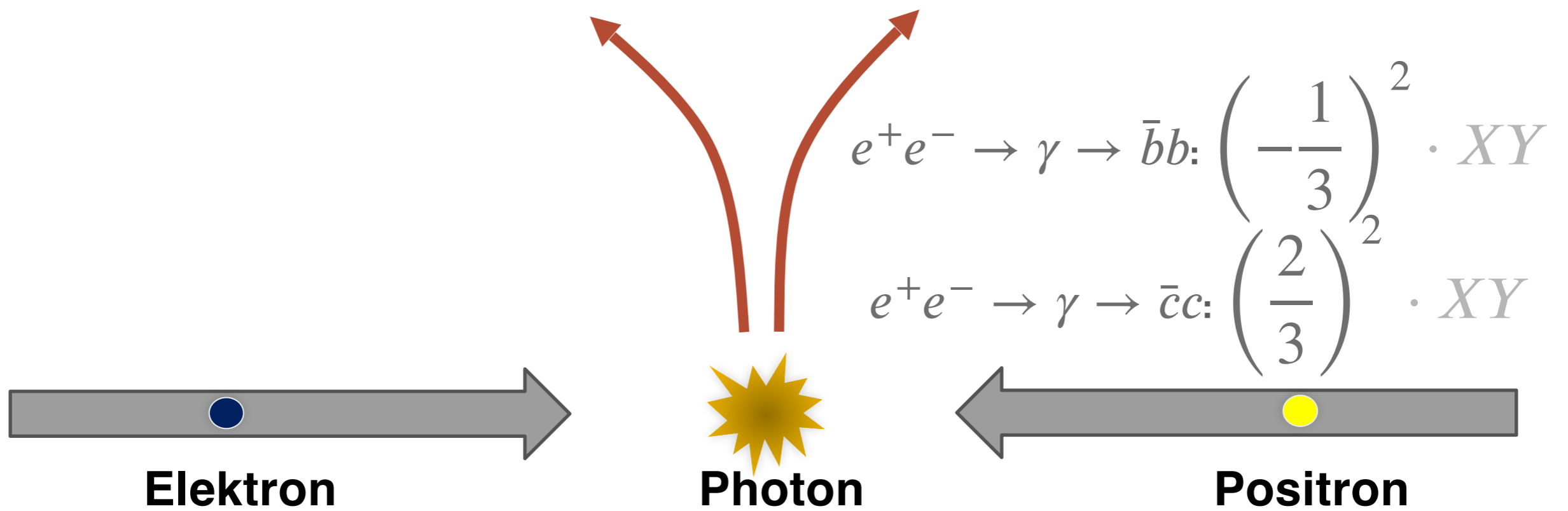
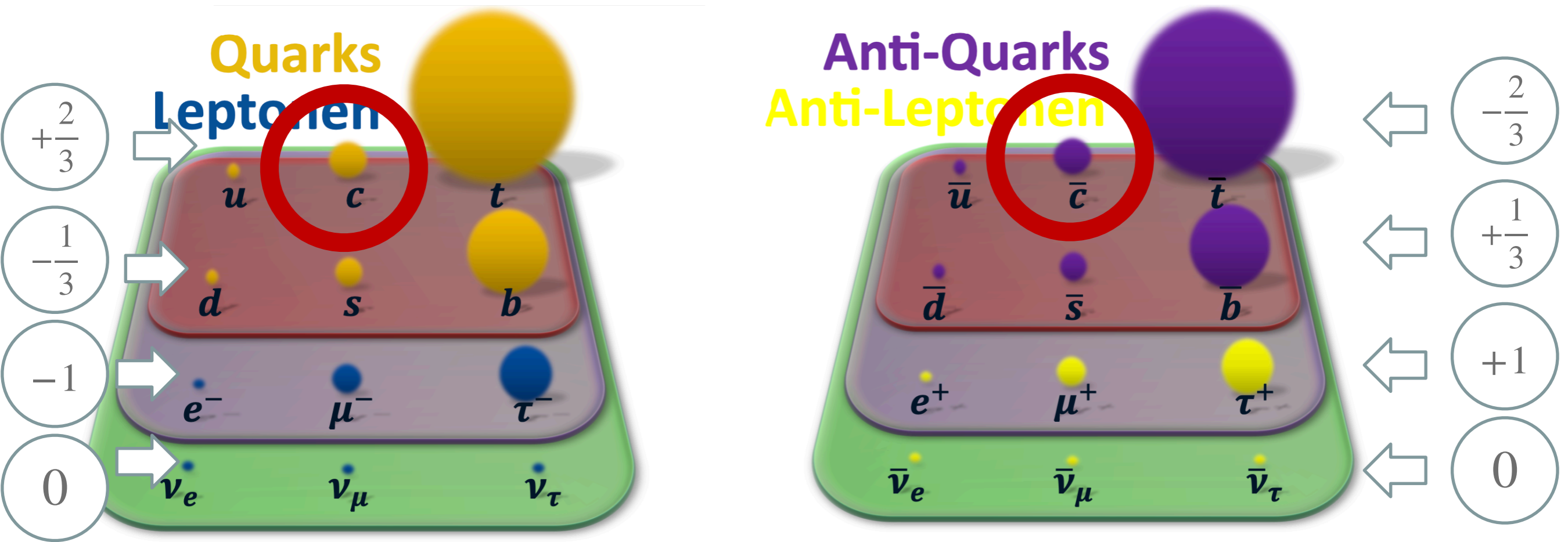


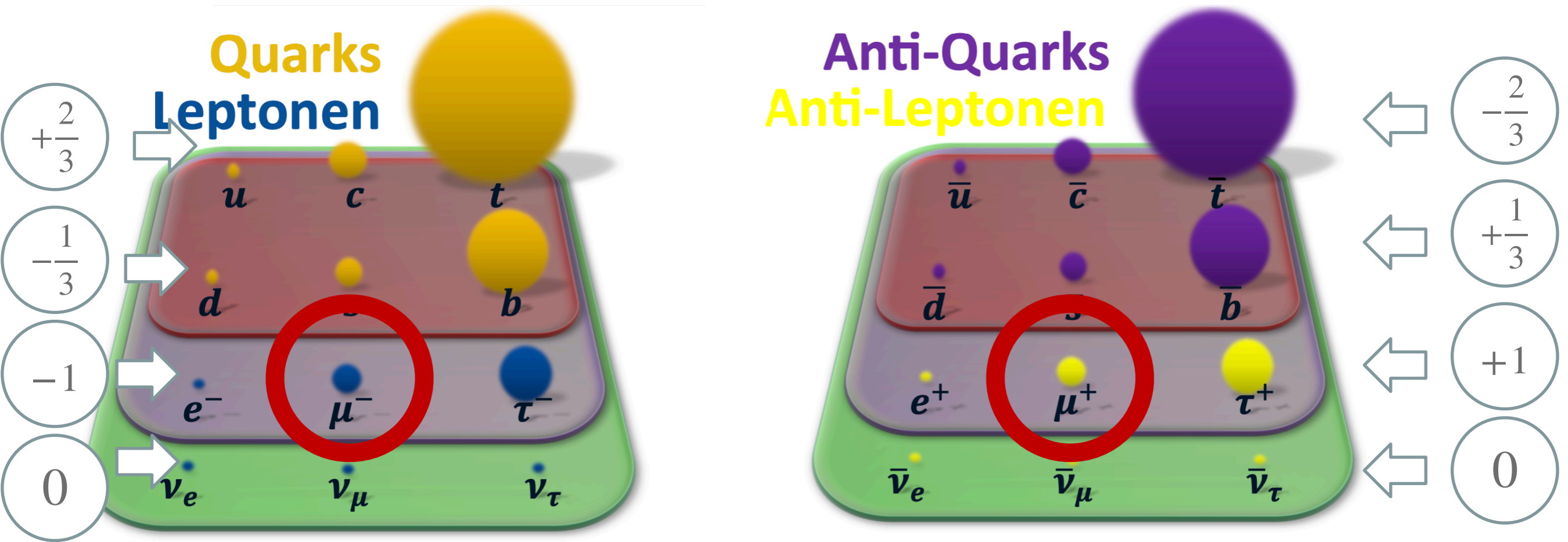
FEYNMAN-DIAGRAMM - R-WERT











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

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

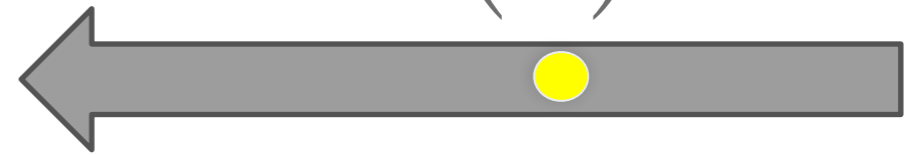
$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{c}c: \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot XY$$



Elektron



Photon



Positron

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

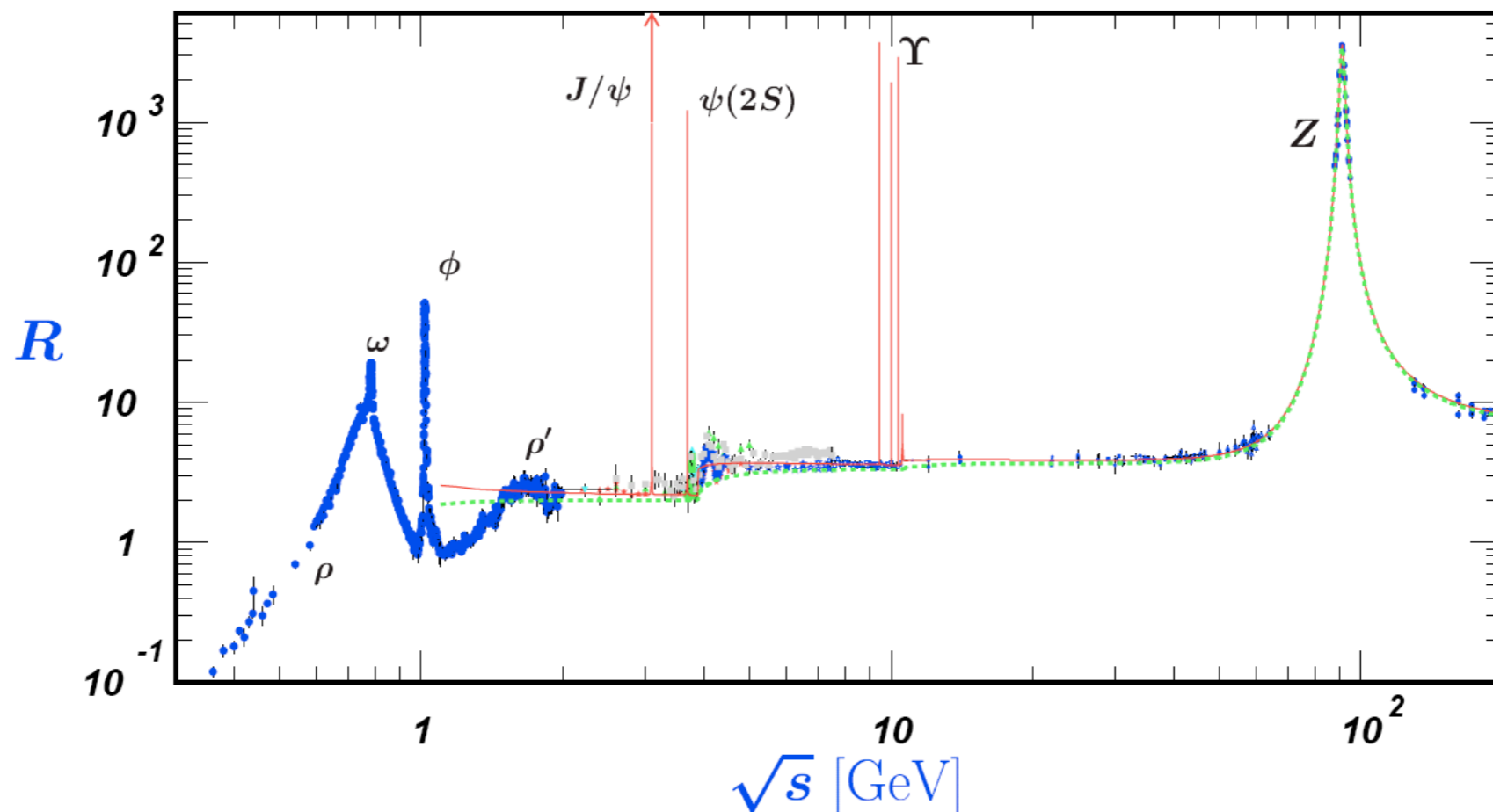
Ihr seid dran!

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)



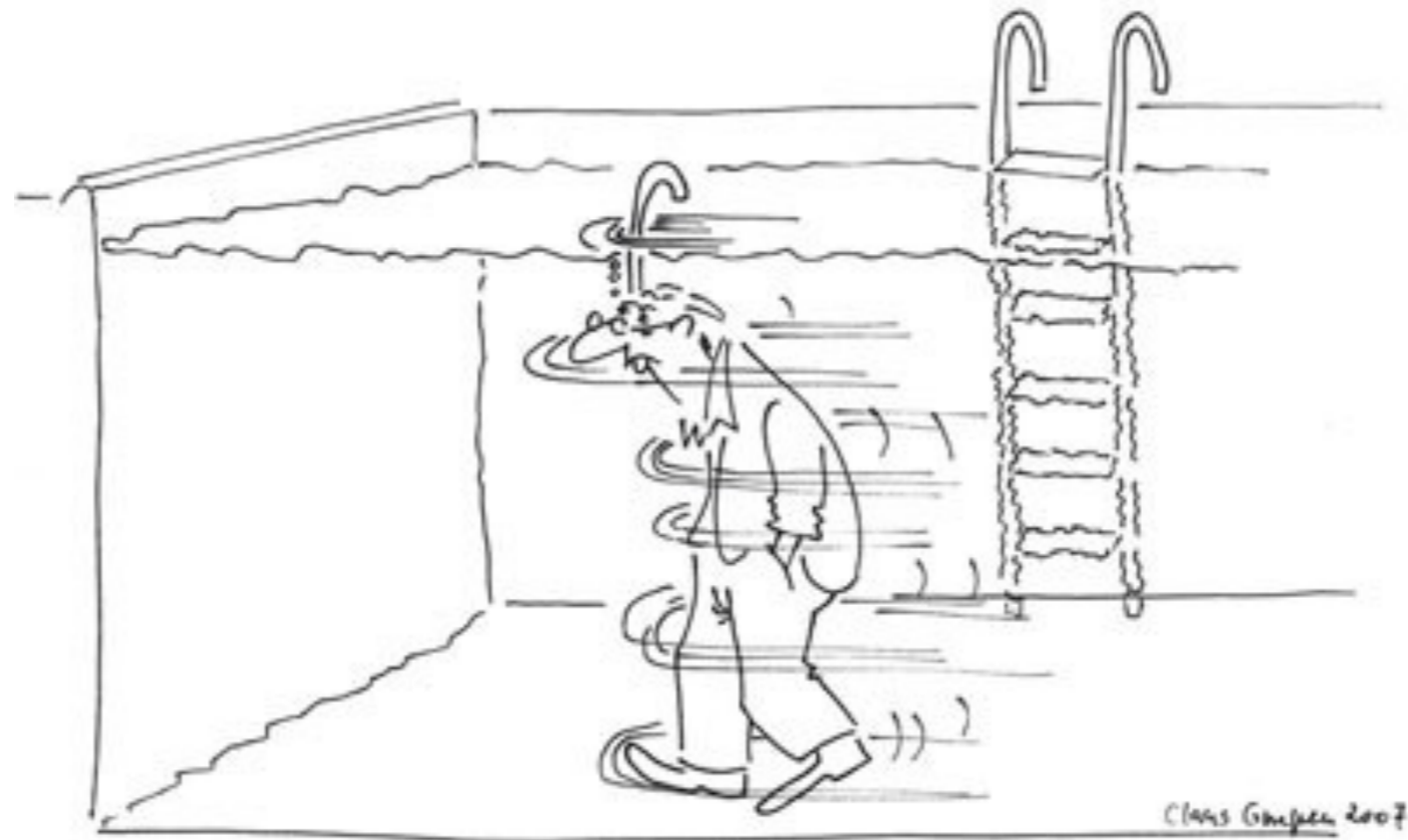
DAS STANDARDMODELL UND DAS HIGGS TEILCHEN

- 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



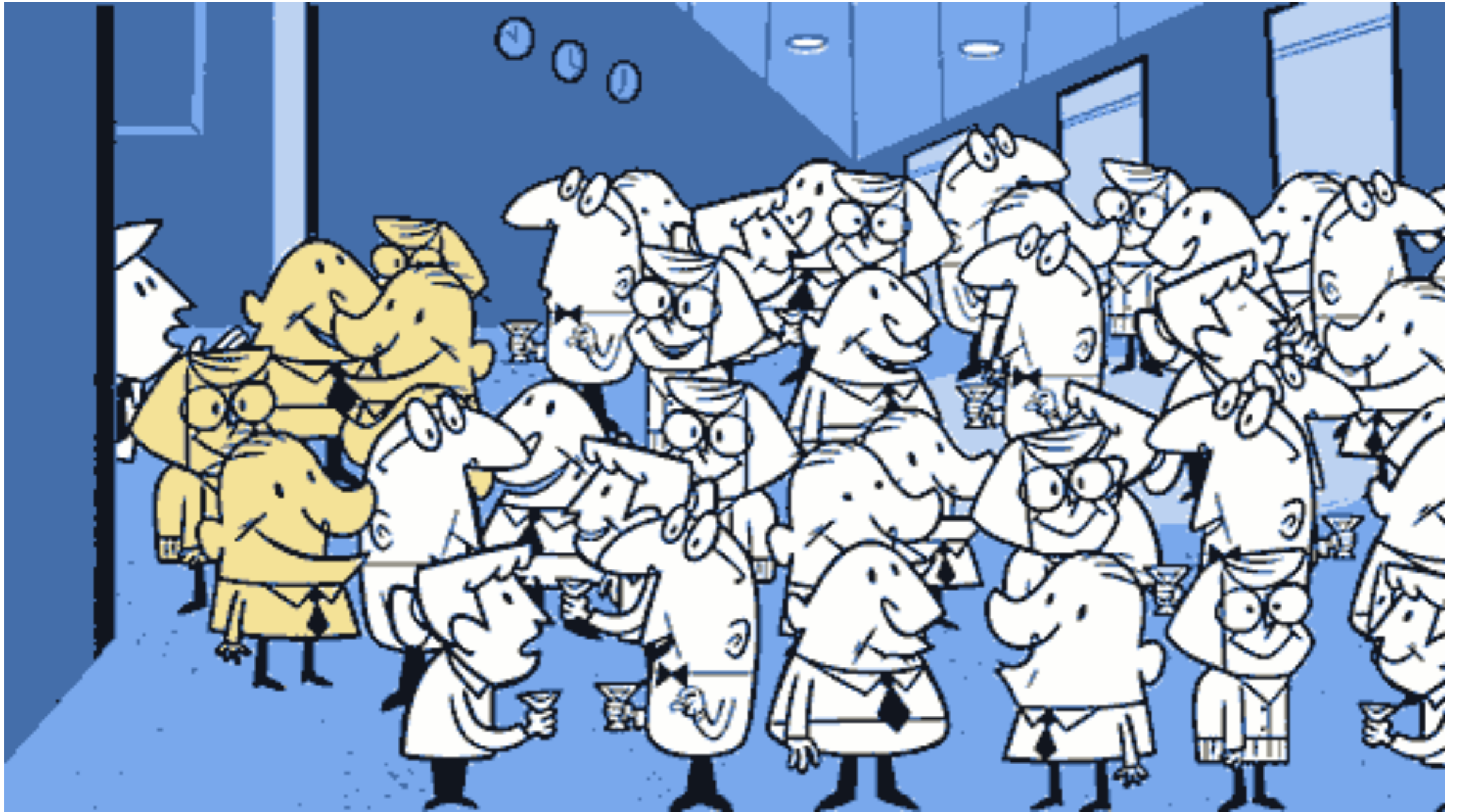
- Eine bekannte Person betritt den Raum
- Je größer die Masse (Bekanntheit), umso langsamer die Bewegung und umgekehrt

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	 γ PHOTON
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK	 g GLUON
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO	 Z Z BOSON
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ 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	 γ PHOTON
	 d DOWN QUARK	 s STRANGE QUARK	 b BOTTOM QUARK	 g GLUON
LEPTONS	 ν_e ELECTRON-NEUTRINO	 ν_μ MUON-NEUTRINO	 ν_τ TAU-NEUTRINO	 Z Z BOSON
	 e^- ELECTRON	 μ MUON	 τ TAU	 W W BOSON

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



Noch lange nicht!!!

GRAVITATION

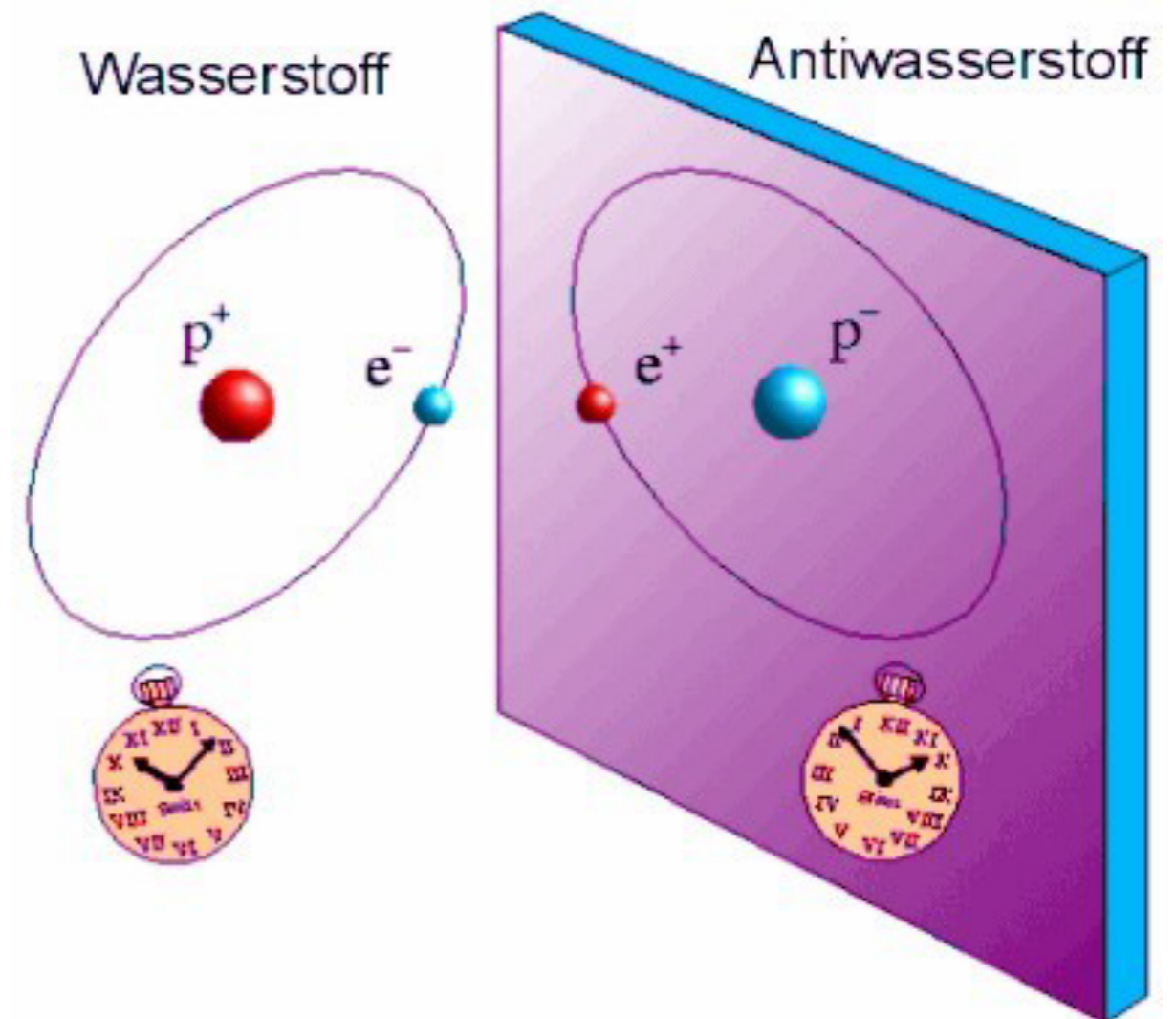
- Anziehung von massiven Objekten
Schwerkraft
- Die Gravitation ist viel schwächer als die anderen fundamentalen WW
- Makroskopisch: Gravitation viel stärker
→ Gravitation wird nicht abgeschirmt!
- Schwerkraft wird beschrieben durch Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ (1915)
- Bis heute keine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



WARUM GIBT ES DAS UNIVERSUM ÜBERHAUPT?

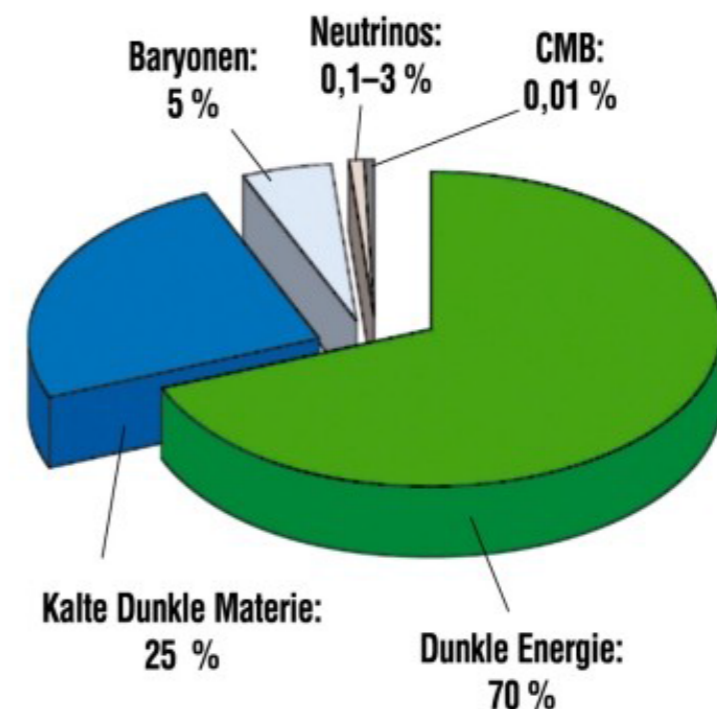
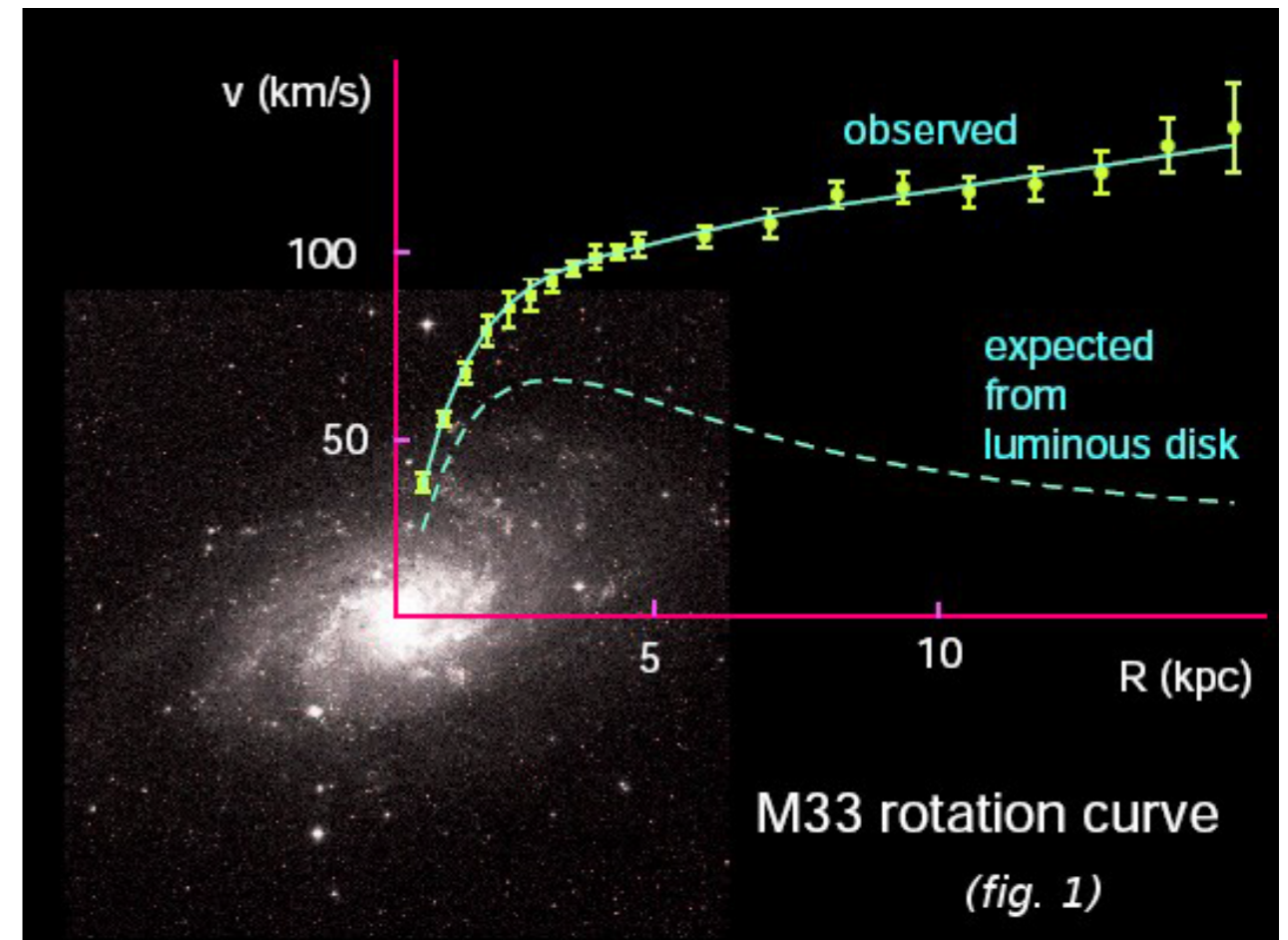
- Unser Universum besteht aus Materie
- Materie kann nur mit Antimaterie zusammen erzeugt werden
- Eigentlich wollte es genauso viel Antimaterie wie Materie geben (exakte Symmetrie)

- 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)!

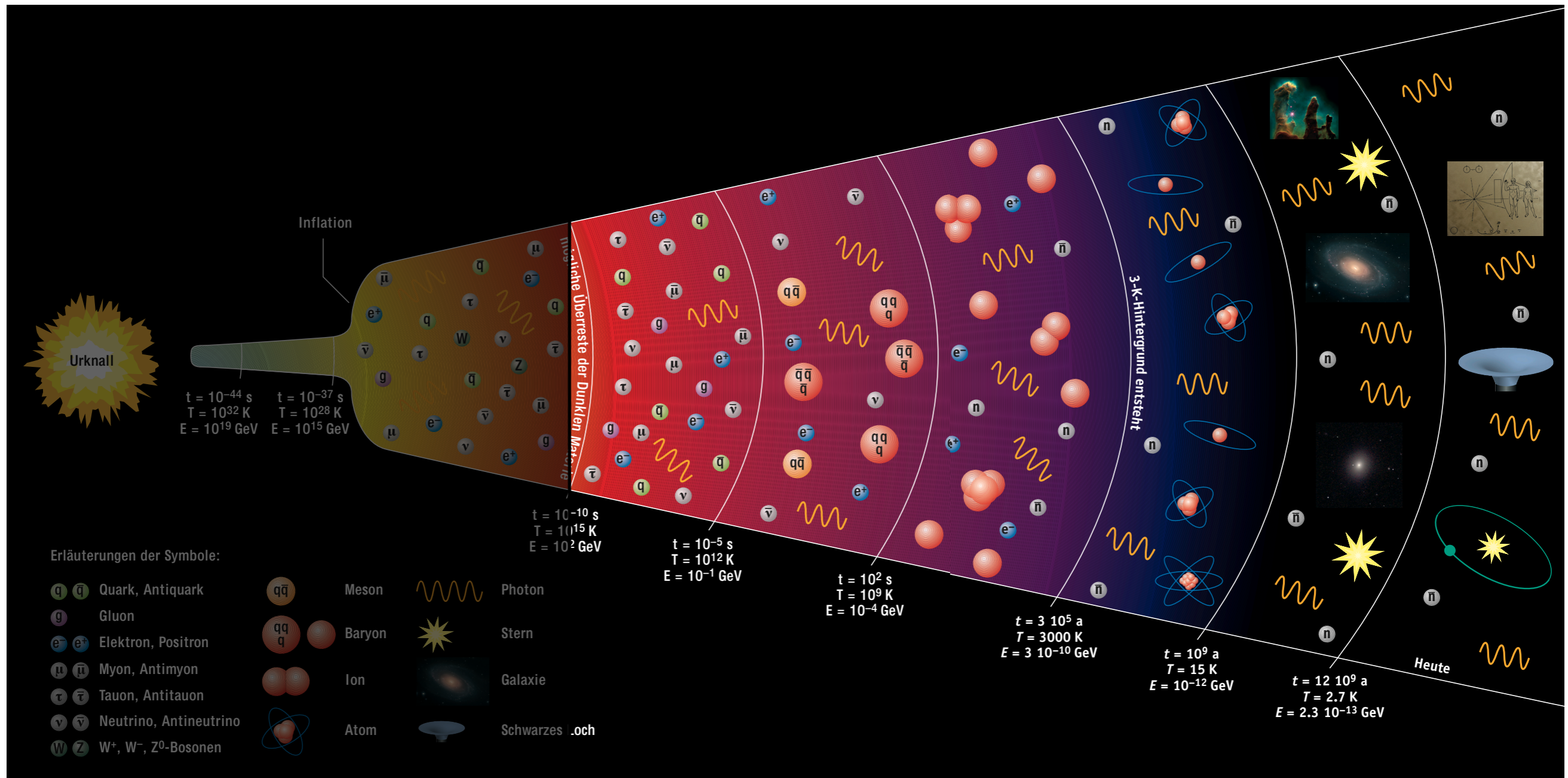


DAS STANDARDMODELL - NOCH LÄNGST NICHT ALLES KLAR!



- 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?

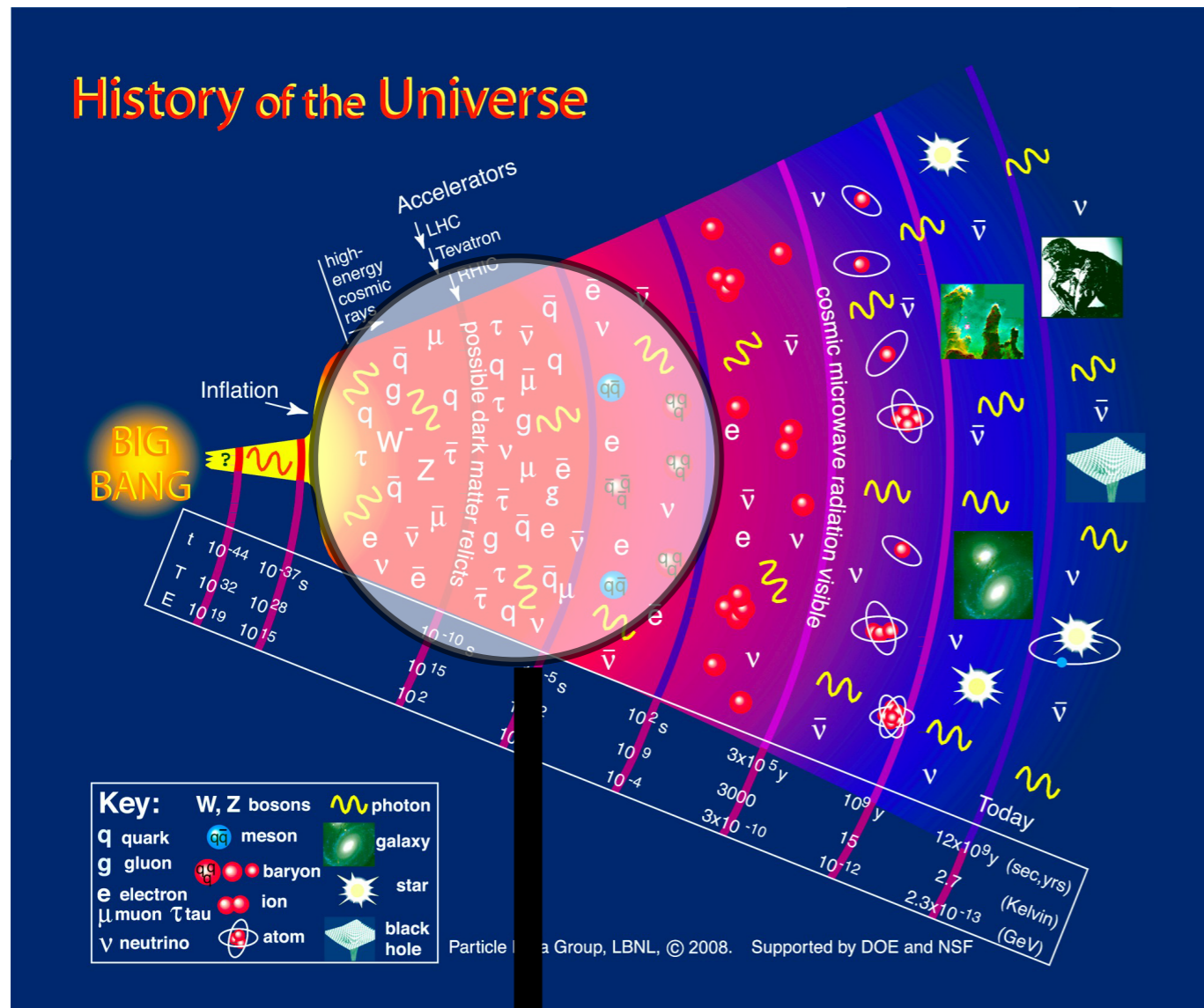
GESCHICHTE DES UNIVERSUMS



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

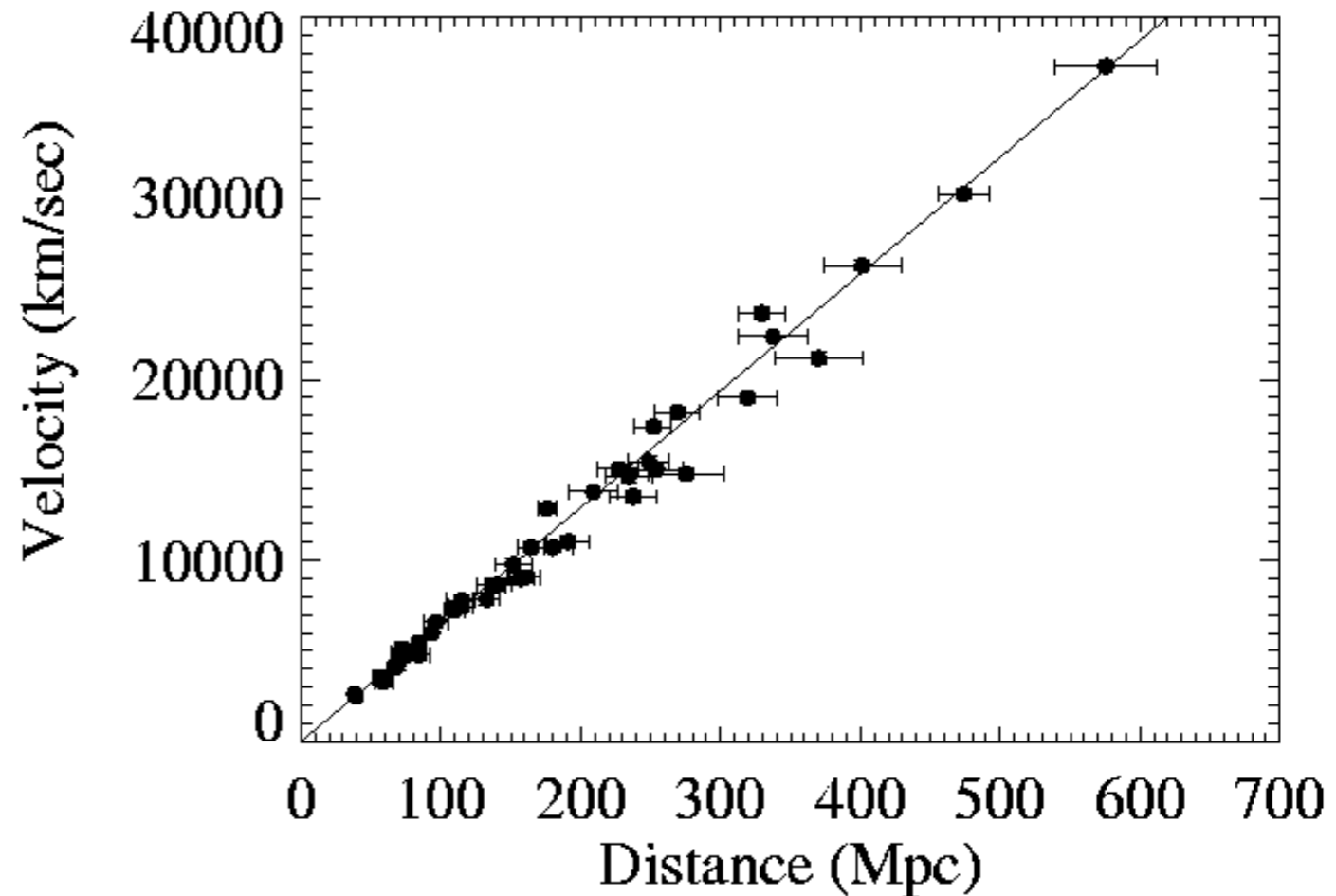
- Das “Standardmodell” beschreibt bisherige Experimente mit hervorragender Genauigkeit: 3 Familien von Quarks und Leptonen. Sie lassen sich aufgrund ihrer Eigenschaften in einem System anordnen.
- Kräfte zwischen Teilchen werden durch Austauschteilchen übertragen. Diese Austauschteilchen sind ebenfalls 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

