



# MASTERCLASS

---

Das Standardmodell und  
die offenen Fragen der Teilchenphysik

Dominik Köhler





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

# DAS STANDARD MODELL DER TEILCHENPHYSIK

Oder

„Was die Welt im Innersten zusammenhält“

# DAS MODELL DER CHEMIE

- Wir und alles um uns herum bestehen aus **Atomen**
- Diese lassen sich in einem **Periodensystem** anordnen
  - Zeilen und Spalten geben **Eigenschaften der Elemente** an
- Atome **verbinden sich zu Molekülen** und größeren Strukturen
- Verbindungen werden durch **Kräfte** zusammengehalten

*Periodensystem der Elemente*

1										18																									
1	H											2	He																						
3	Li	4	Be											10	Ne																				
11	Na	12	Mg											18	Ar																				
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	La-Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	
87	Fr	88	Ra	Ac-Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg															

Ordnungszahl — **6** Fe — Feste Elemente  
 Elementsymbol — **C** O — Gasförmige Elemente  
 Elementname — **Kohlenstoff** Hg — Flüssige Elemente (20°C)  
 Rel. Atommasse — **12.01** Tc — Radioaktive Elemente

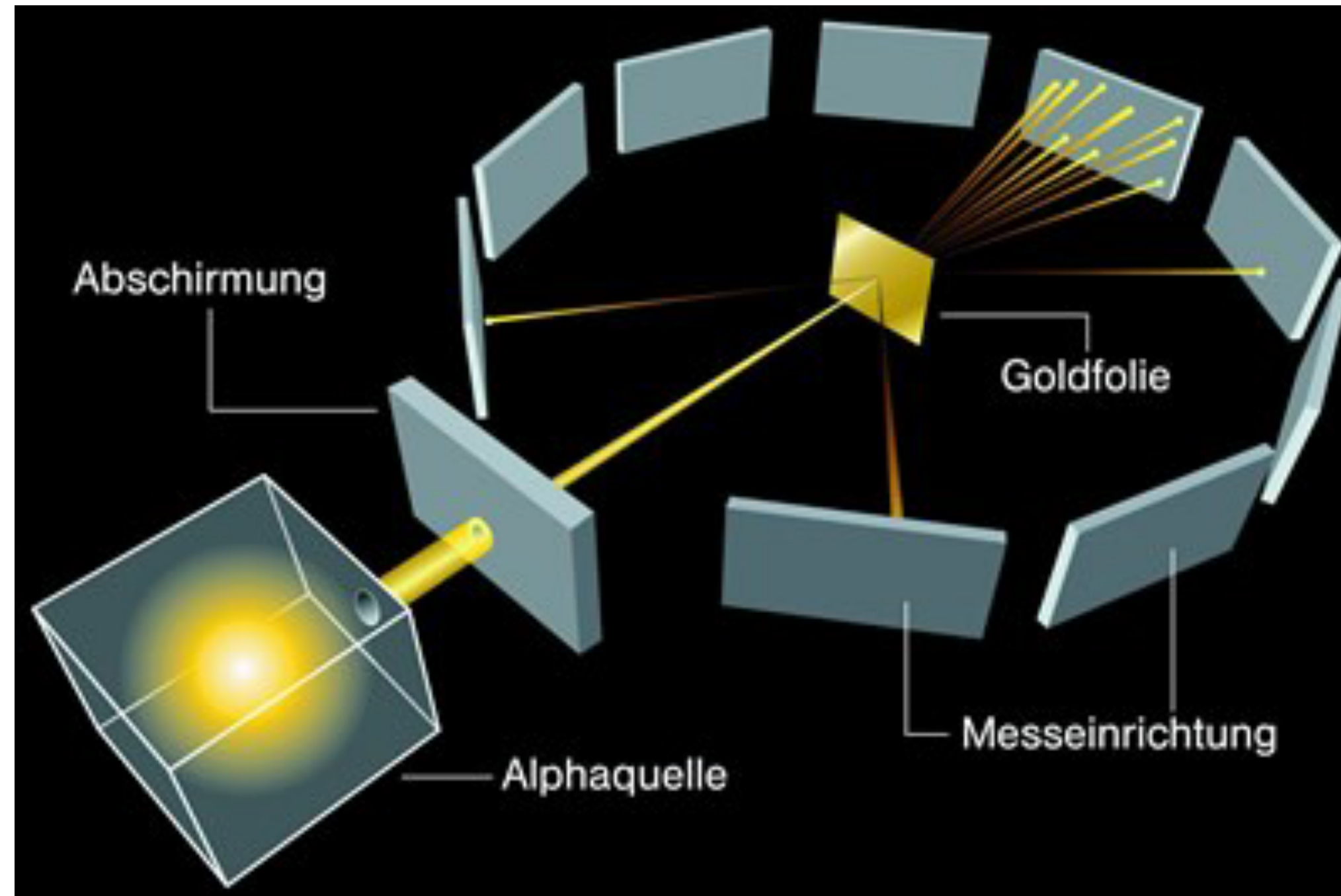
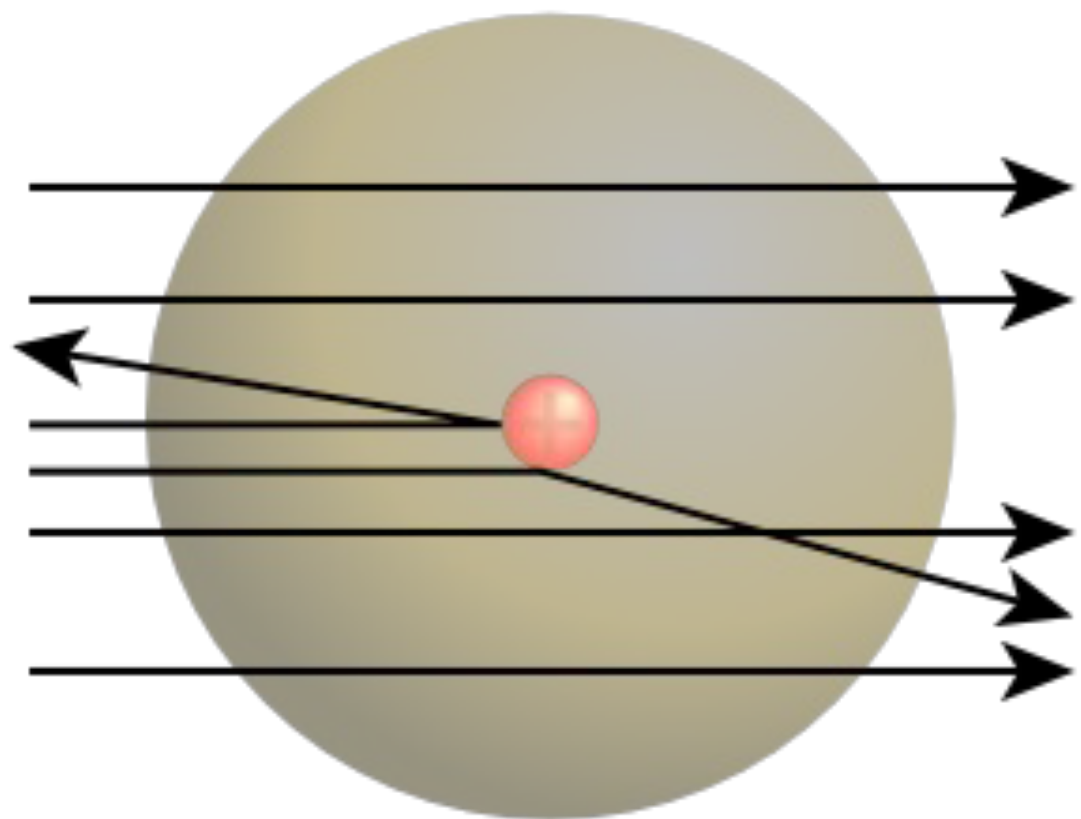
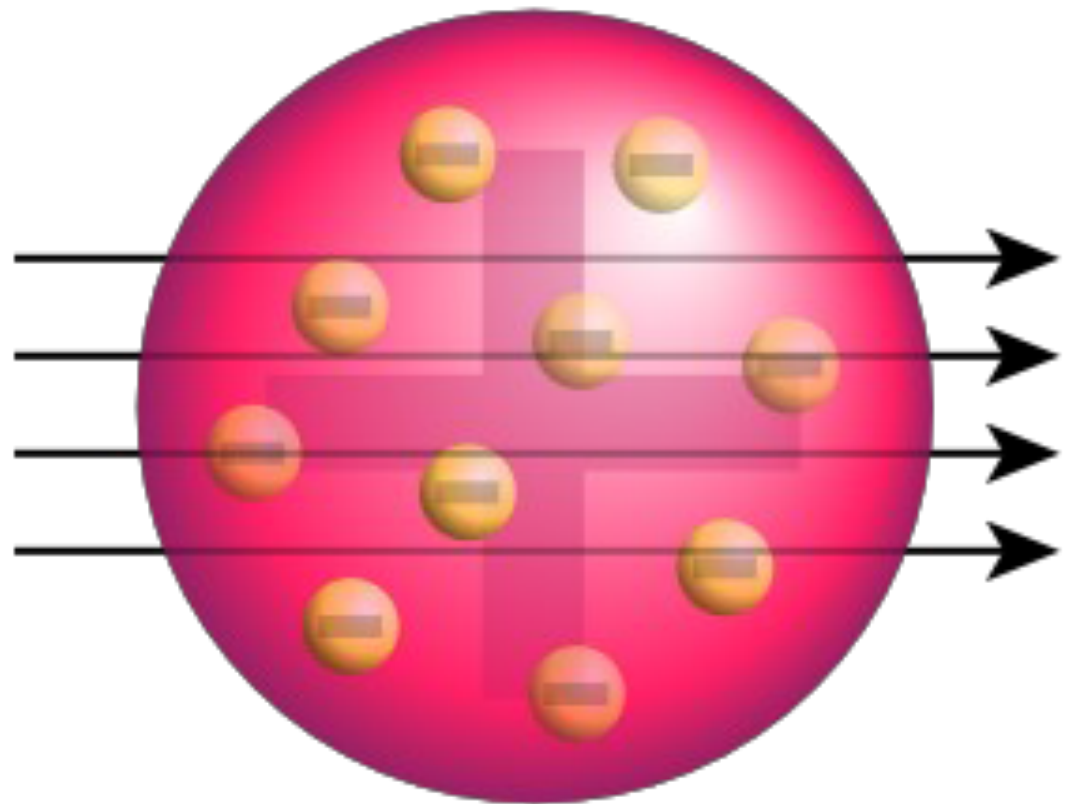
© Peter Wich - Experimentalchemie.de - Chemie erleben!

57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr

# WIE UNTERSUCHT MAN SEHR KLEINE TEILCHEN?

---

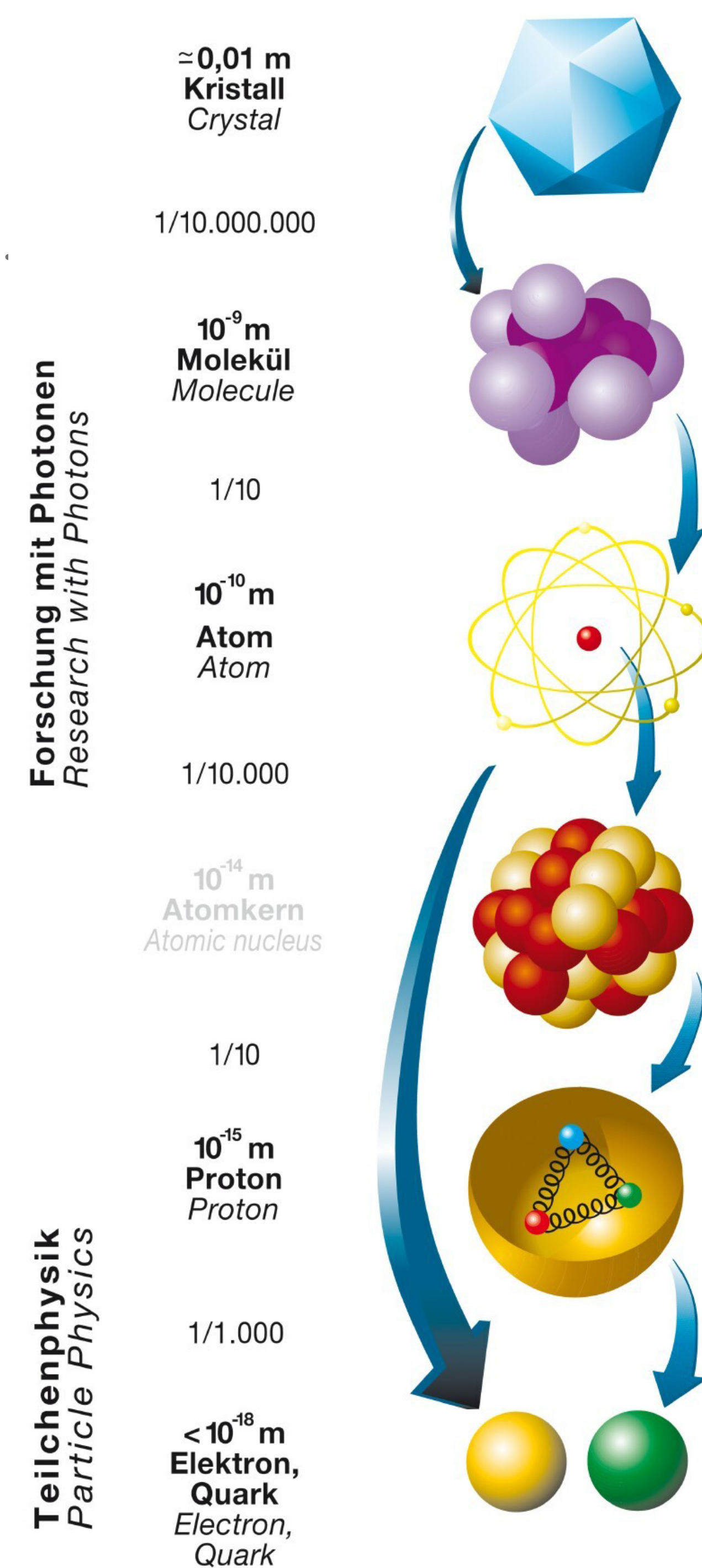
- Durch Streuexperimente!
- Rutherford 1910: Beschuss von Goldfolie mit  $\alpha$ -Teilchen



- **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)





# DAS PROTON

---

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

Ladung



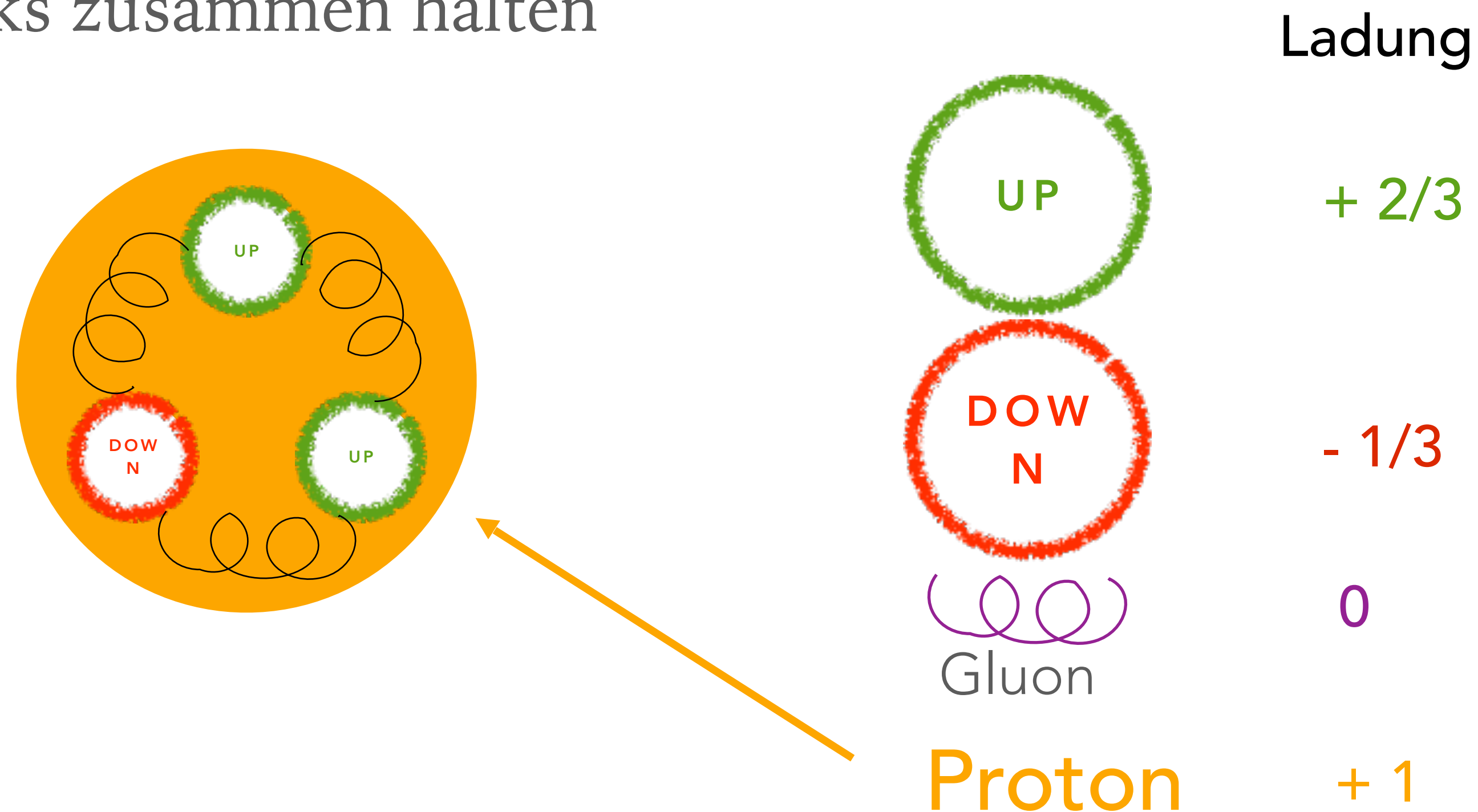
Proton



# 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

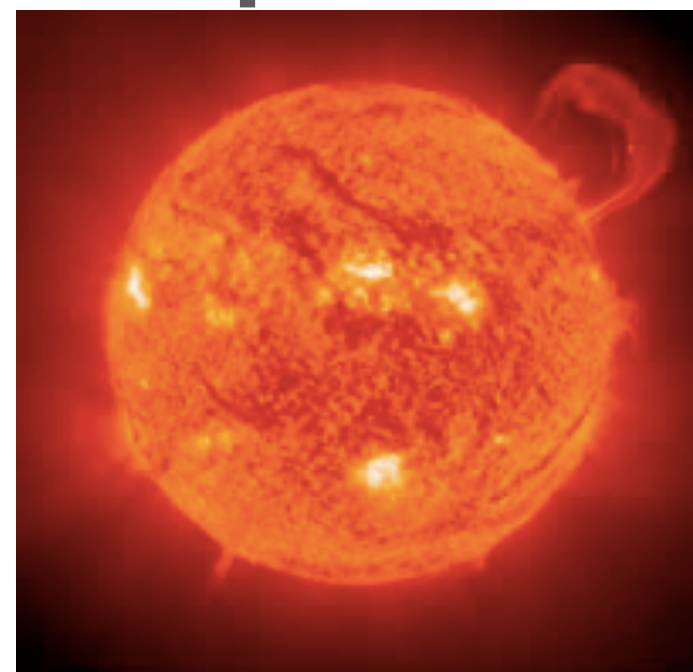


# GIBT ES NOCH WEITERE ELEMENTARTEILCHEN?

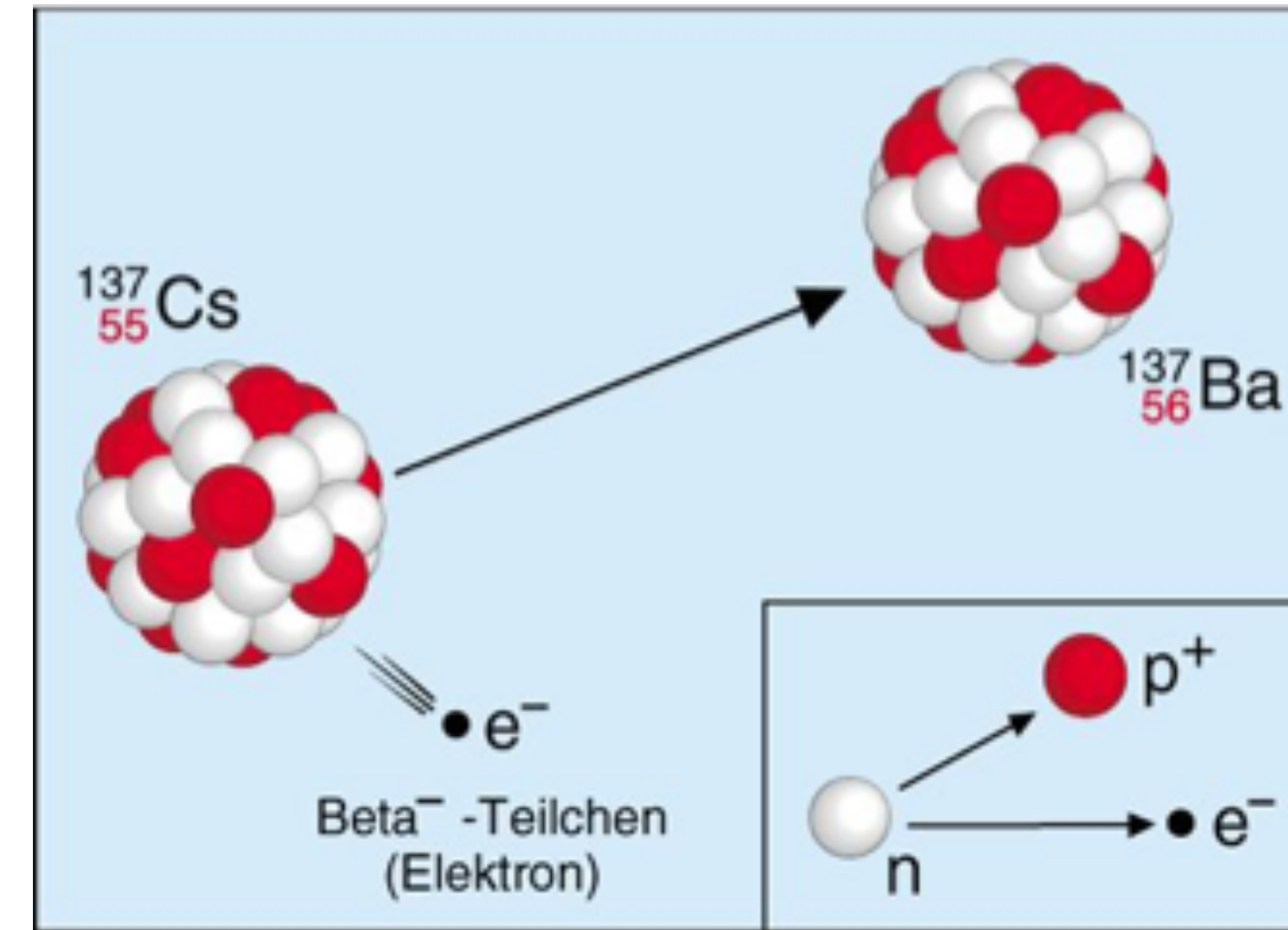
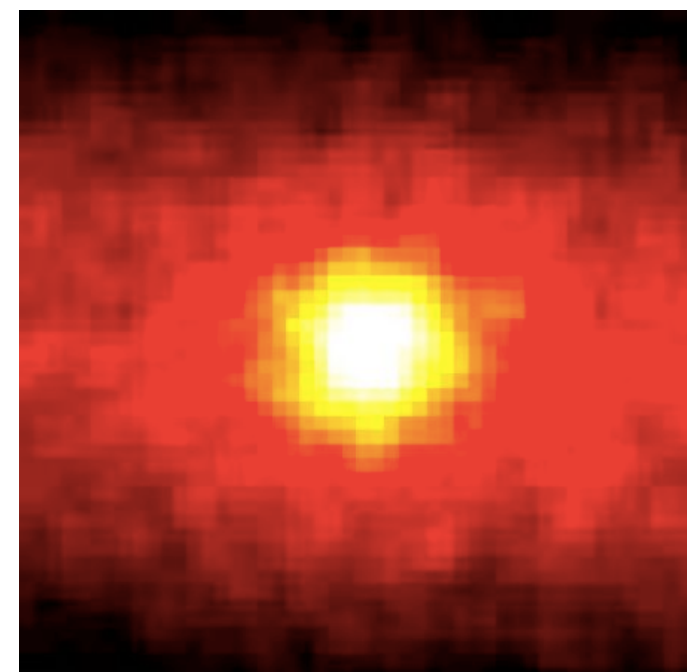


- 1930 postulierte Pauli ein weiteres Teilchen um den  $\beta$ -Zerfall von Atomkernen zu erklären
- 64 Milliarden Sonnenneutrinos/ $cm^2/sec$

**Optisch:**



**Neutrinos:**

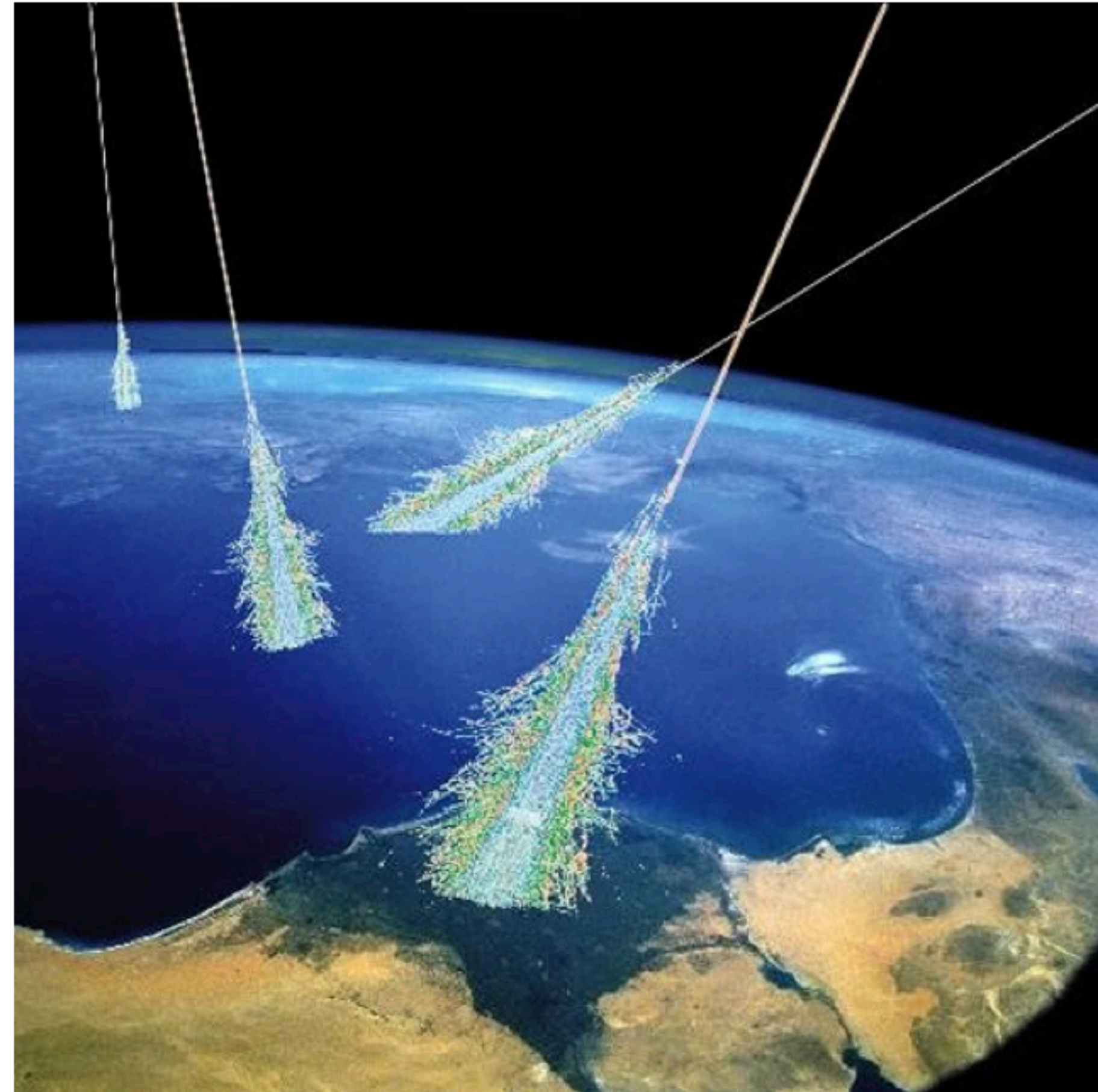
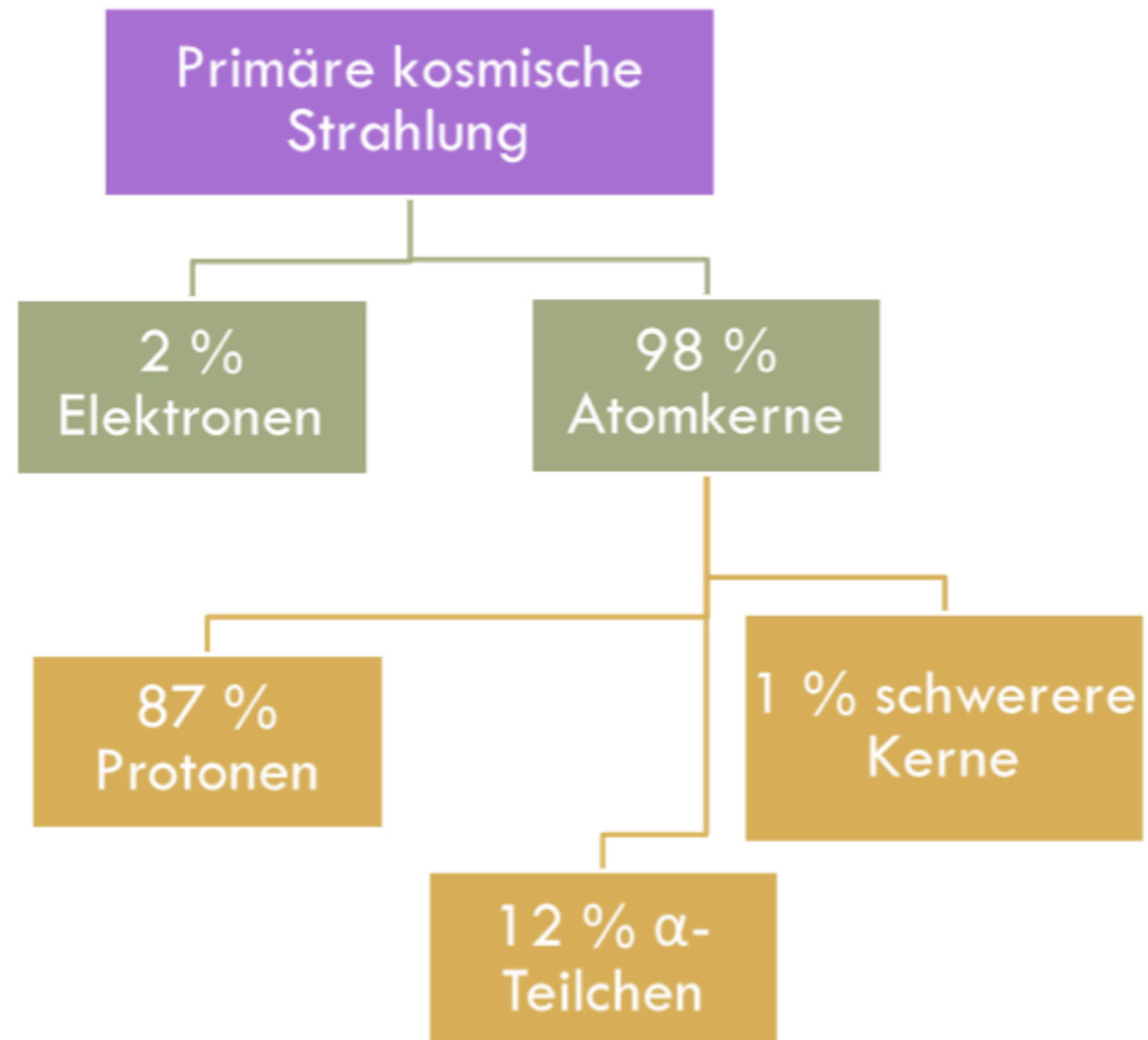


## Neutrino

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

# KOSMISCHE TEILCHEN

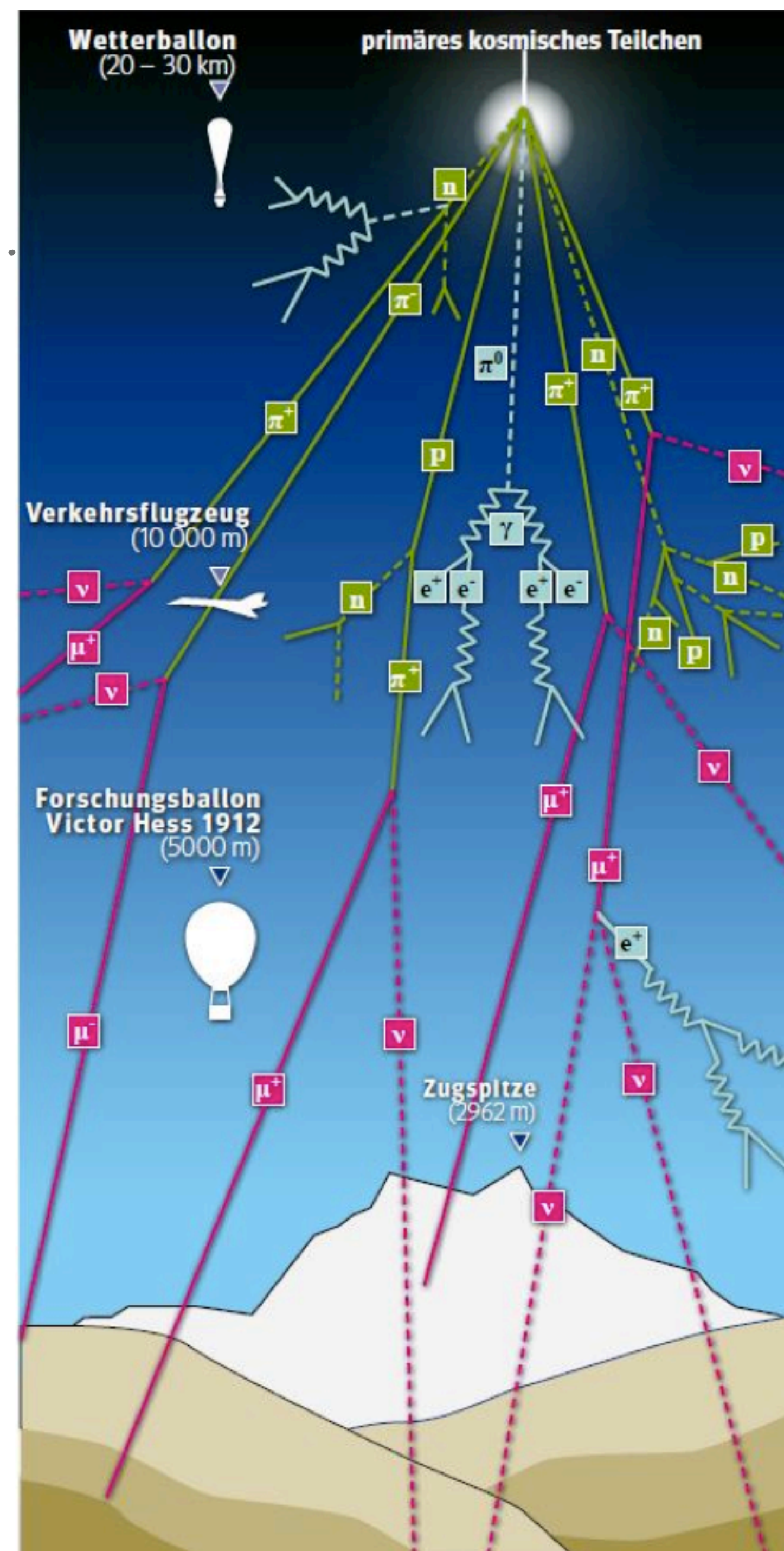
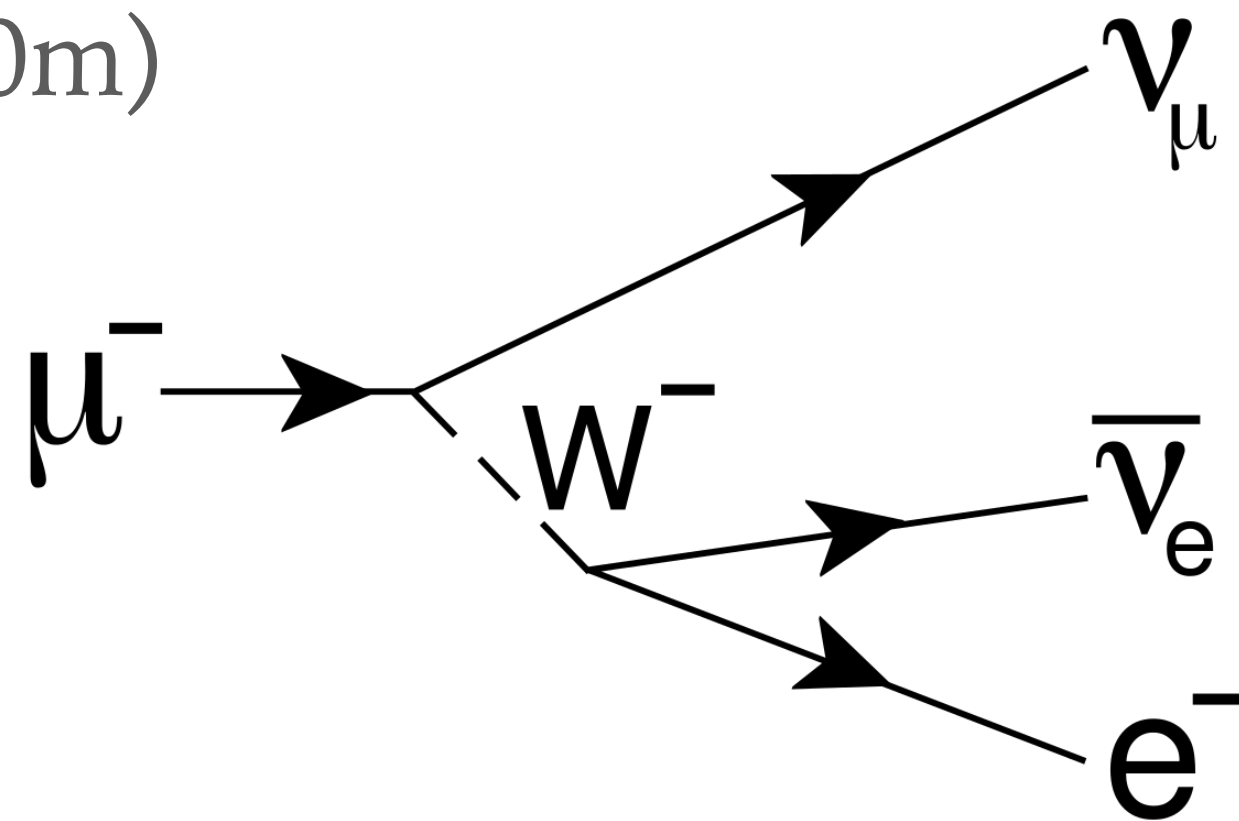
---



# KOSMISCHE TEILCHEN

## Muon

- Elementarteilchen
- Ladung: -1
- Myonen zerfallen nach  $0,0000022s (=2,2\mu s)$
- 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“

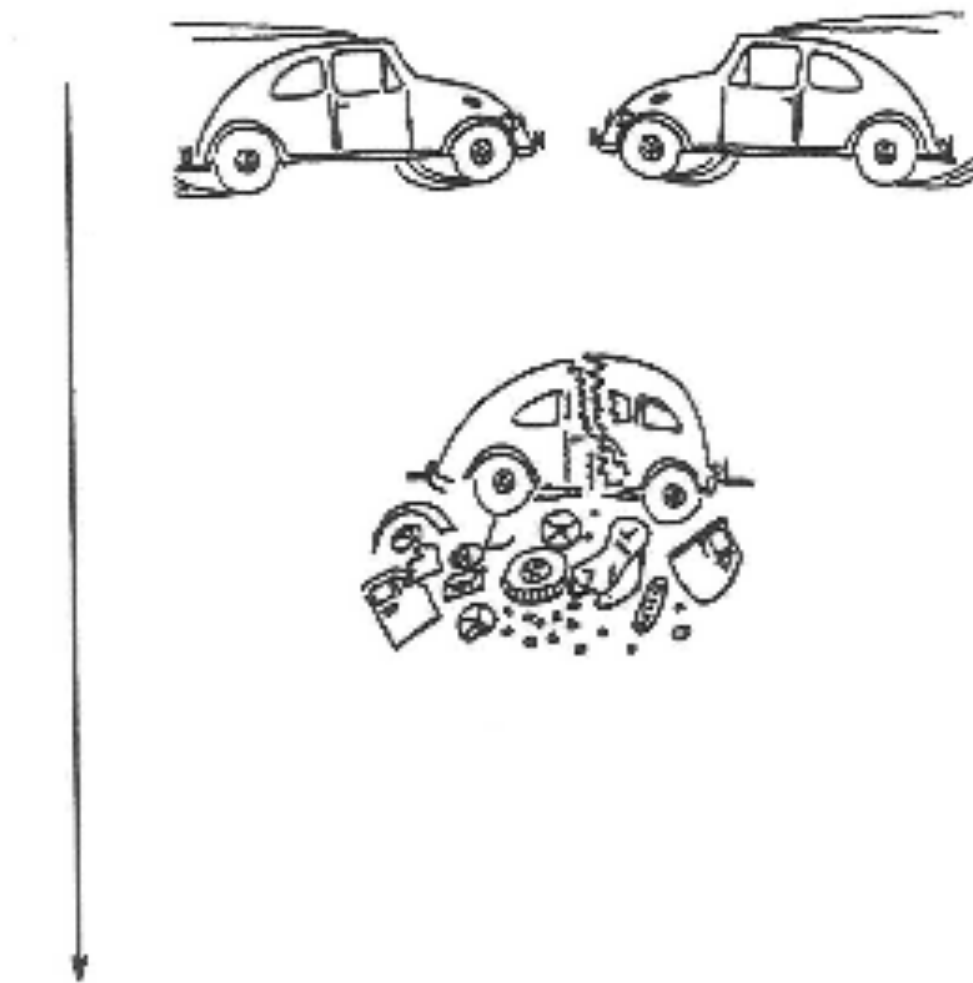
	I	II	III
QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK
	 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK
LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO
	 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU

stabile Materie

- 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!

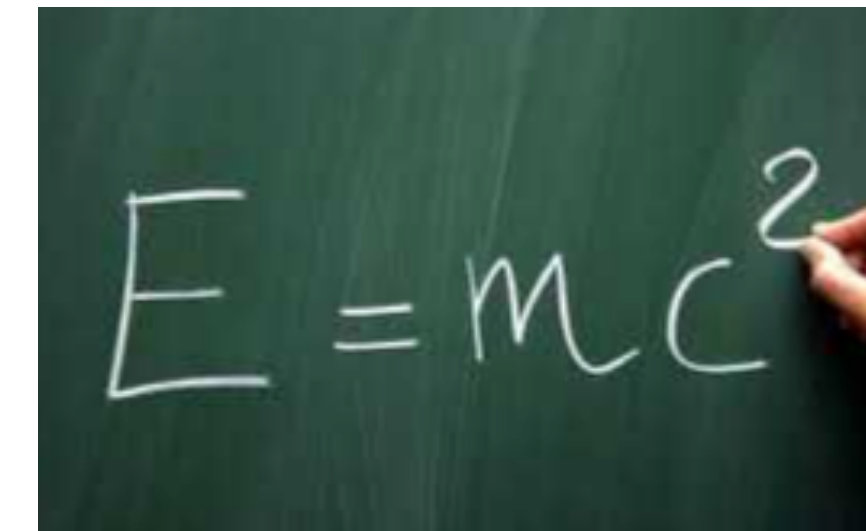
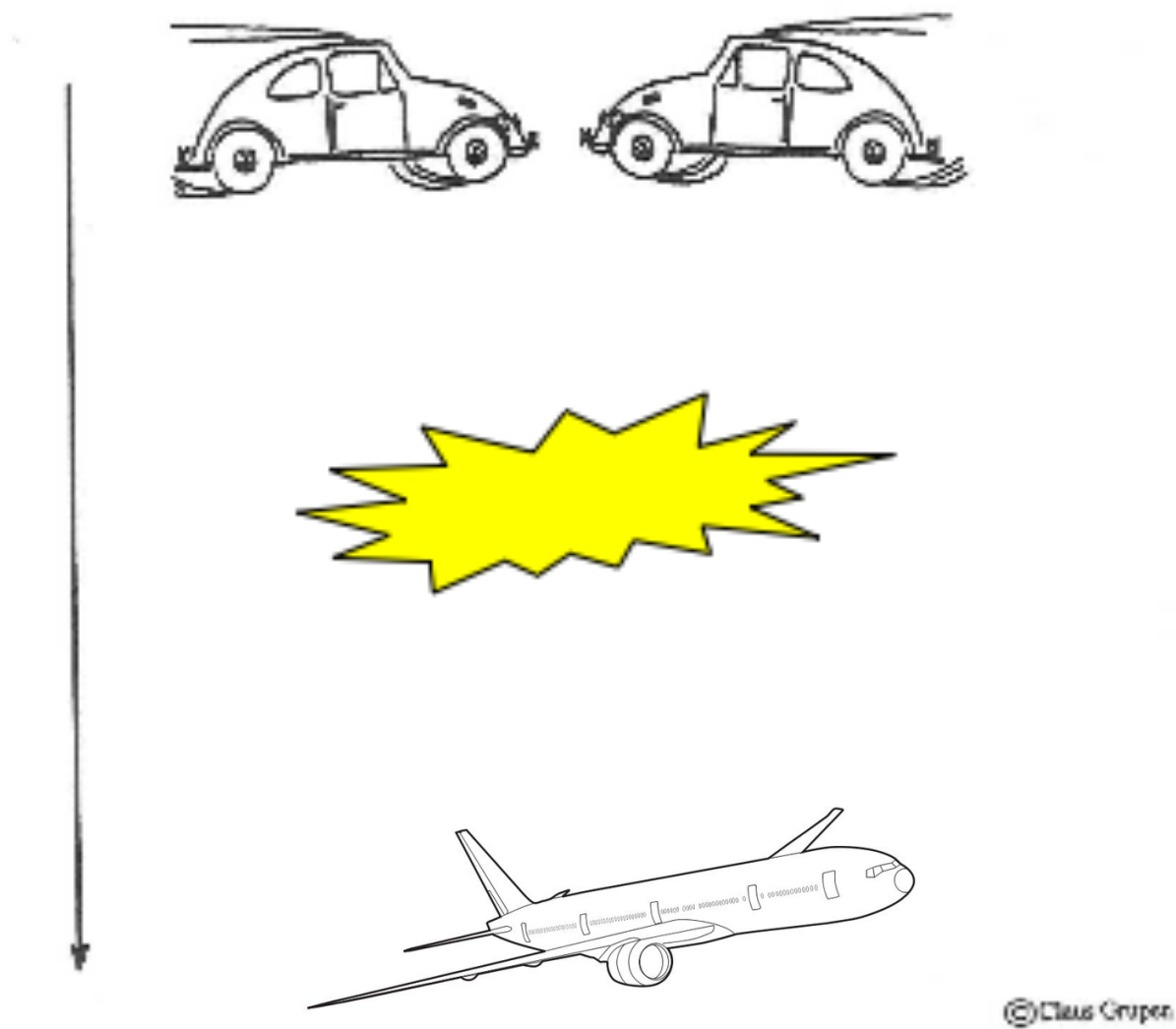
# WENN TEILCHEN KOLLIDIEREN...

---



# ... ENTSTEHEN NEUE TEILCHEN

---



mehr Energie

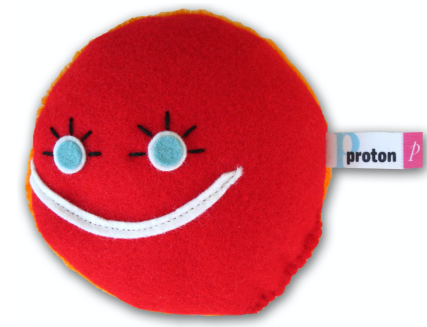


mehr/schwerere Teilchen

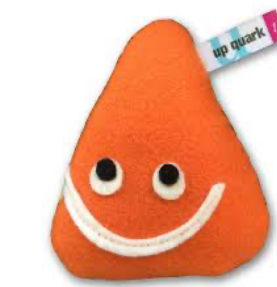
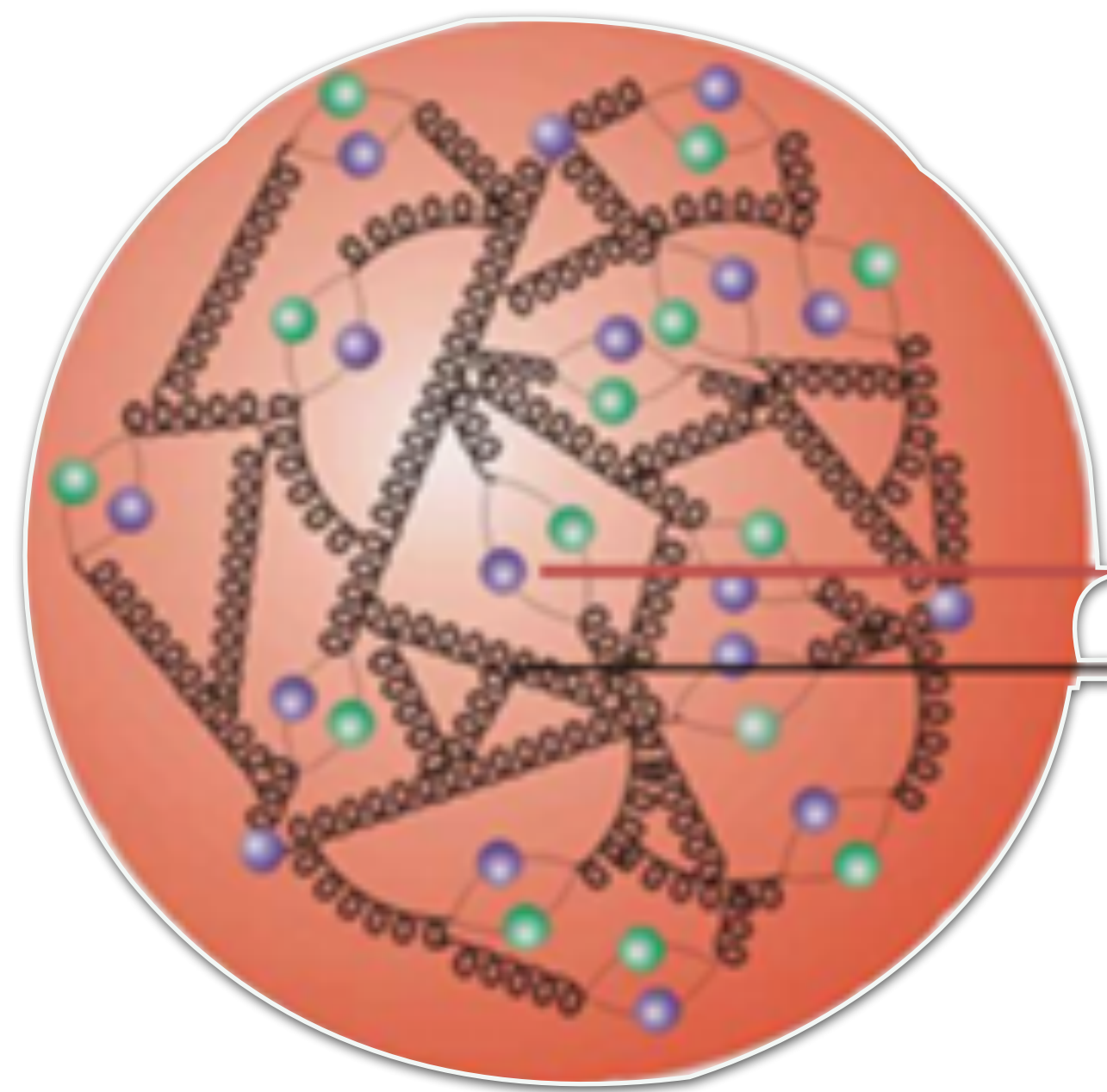




# DAS PROTON



- Und wenn wir genauer hinsehen, sind es noch viel mehr Quarks, die in Form von Quark-Antiquark Paaren enthalten sind (Seequarks)



Ladung

+ 2/3



- 1/3



0

Proton

+ 1

# DAS STANDARDMODELL – ORDNUNG IM SYSTEM



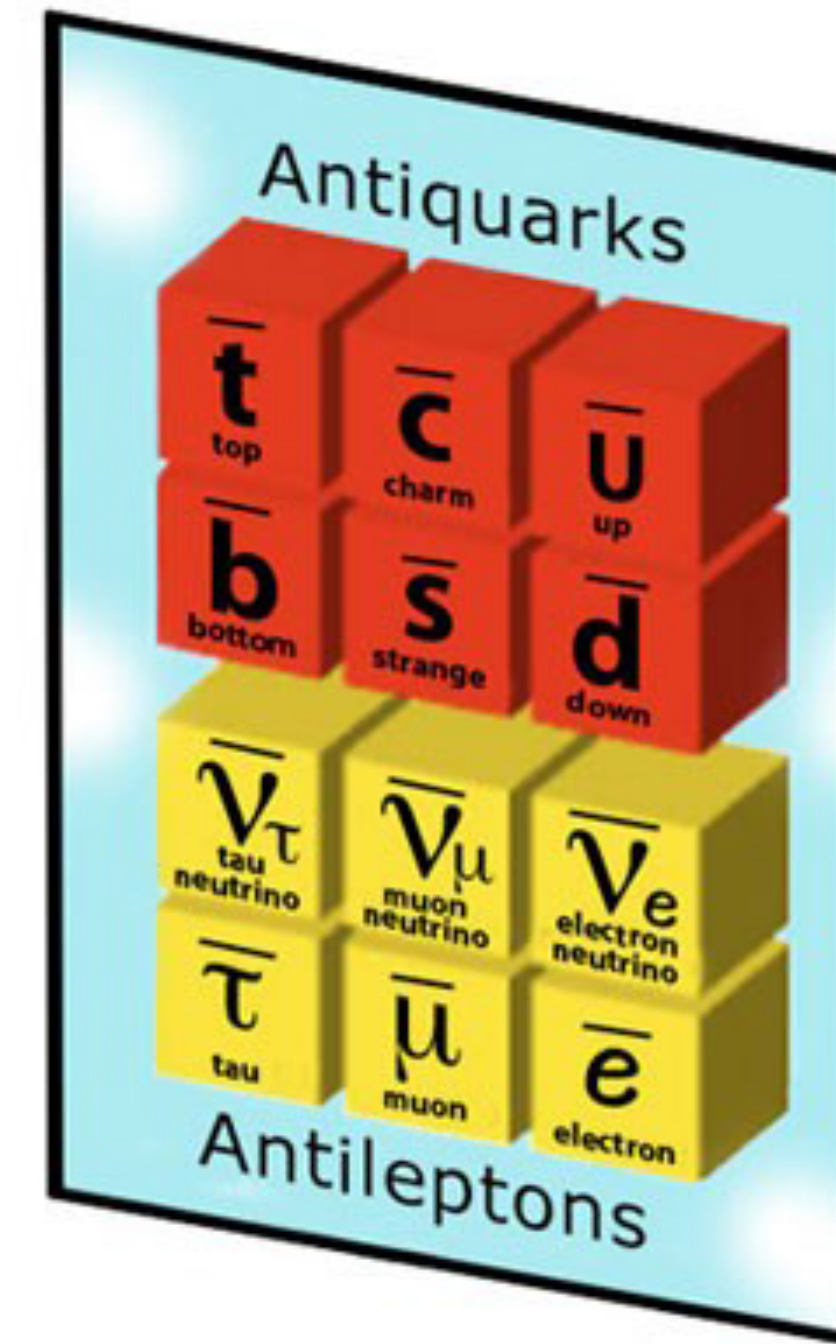
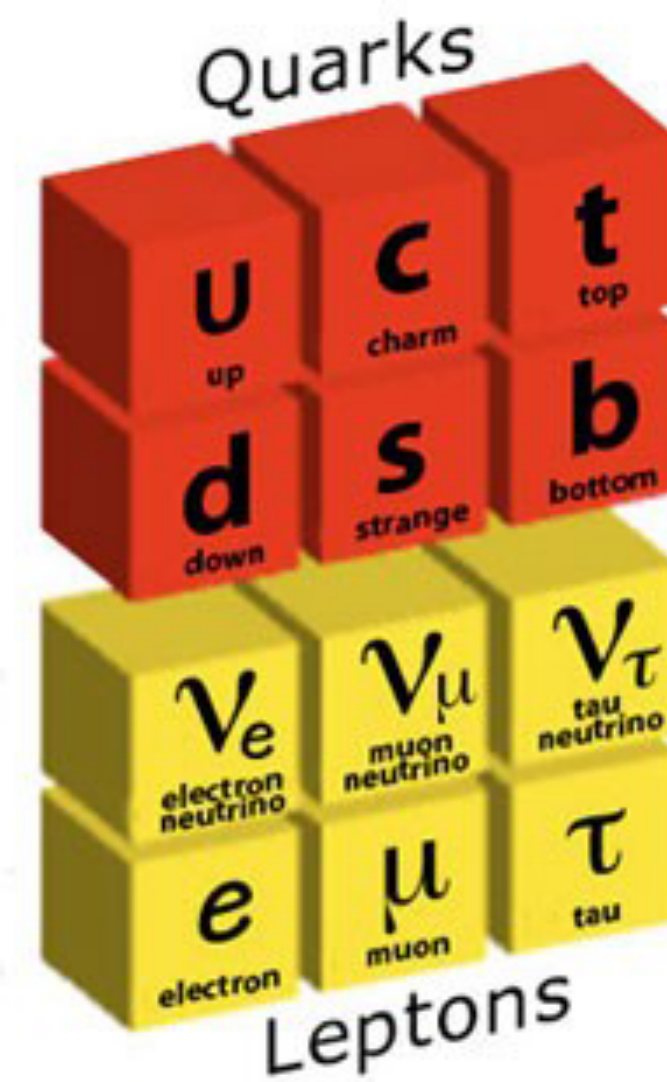
Ladung

$2/3$

$-1/3$

0

-1



→  
Masse

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

# DAS STANDARDMODELL – KRÄFTE

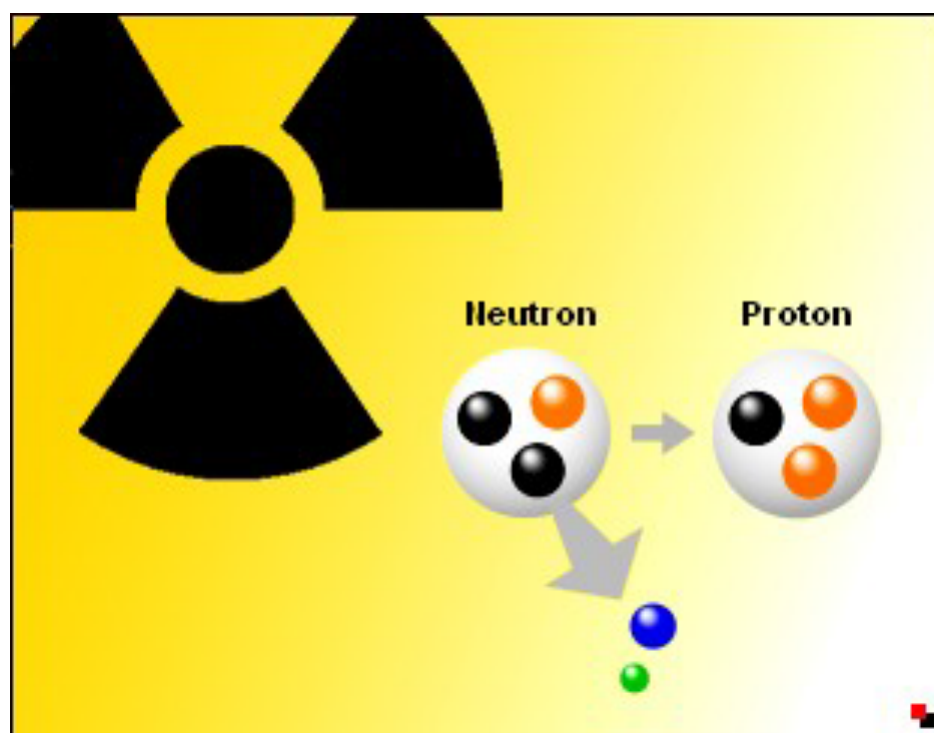
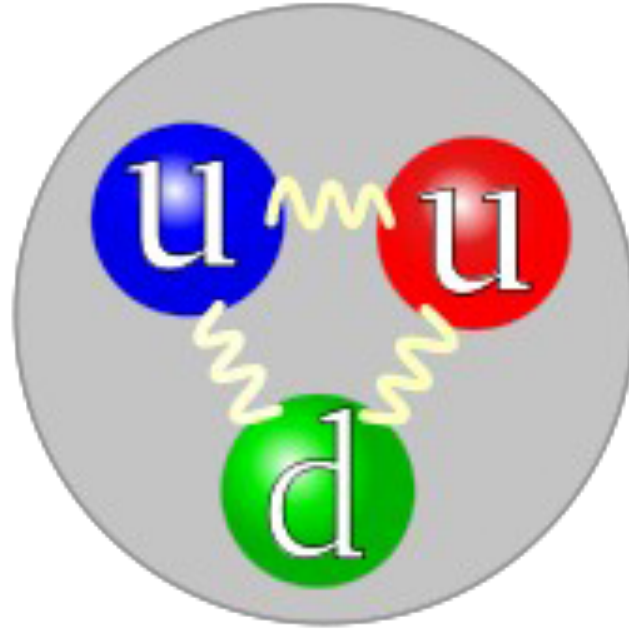
---

# DAS STANDARDMODELL – KRÄFTE

---

- Starke Kraft
- Elektromagnetische Kraft
- Schwache Kraft
- Gravitation






# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE



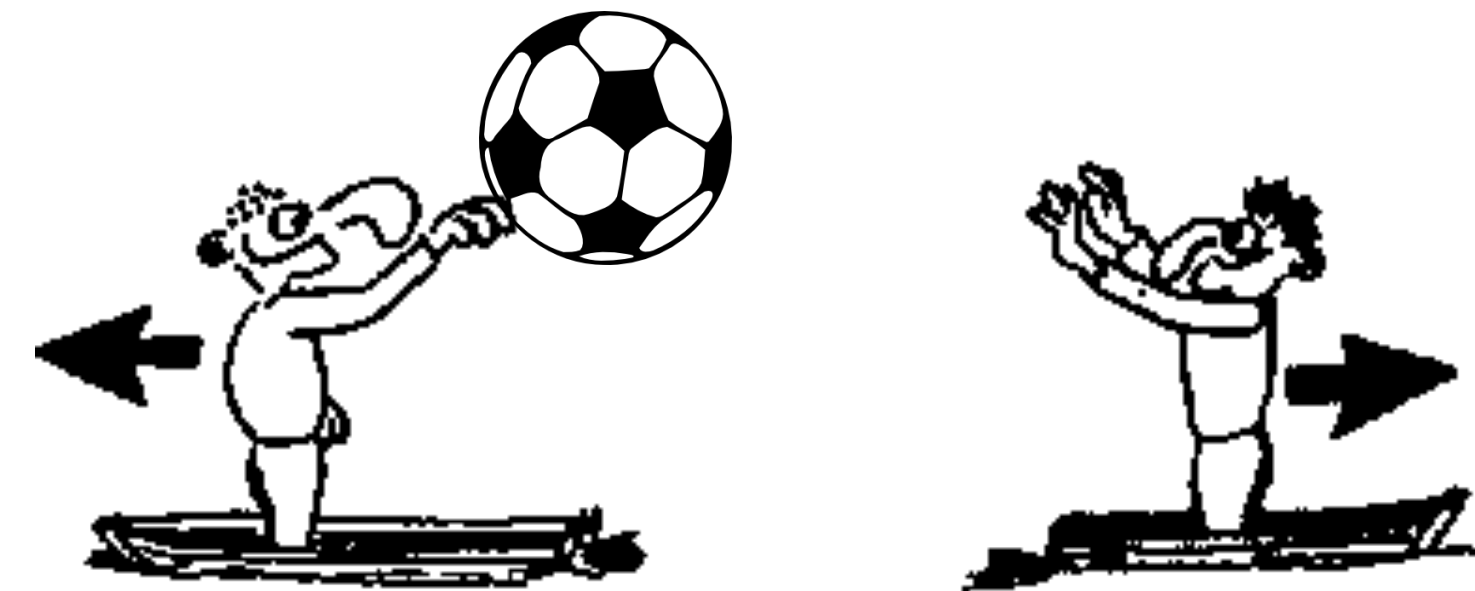
- Starke Kraft: Hält den Atomkern zusammen (bindet Quarks aneinander); Austauschteilchen: Gluonen
- Elektromagnetische Kraft: hält Atome und Moleküle zusammen (wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen); Austauschteilchen: Photon
- Schwache Kraft: verantwortlich für radioaktive Zerfälle von Atomkernen (wandelt Quarks oder Leptonen ineinander um); Austauschteilchen: W,Z Bosonen



# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN

	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		

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



# DAS W-BOSON

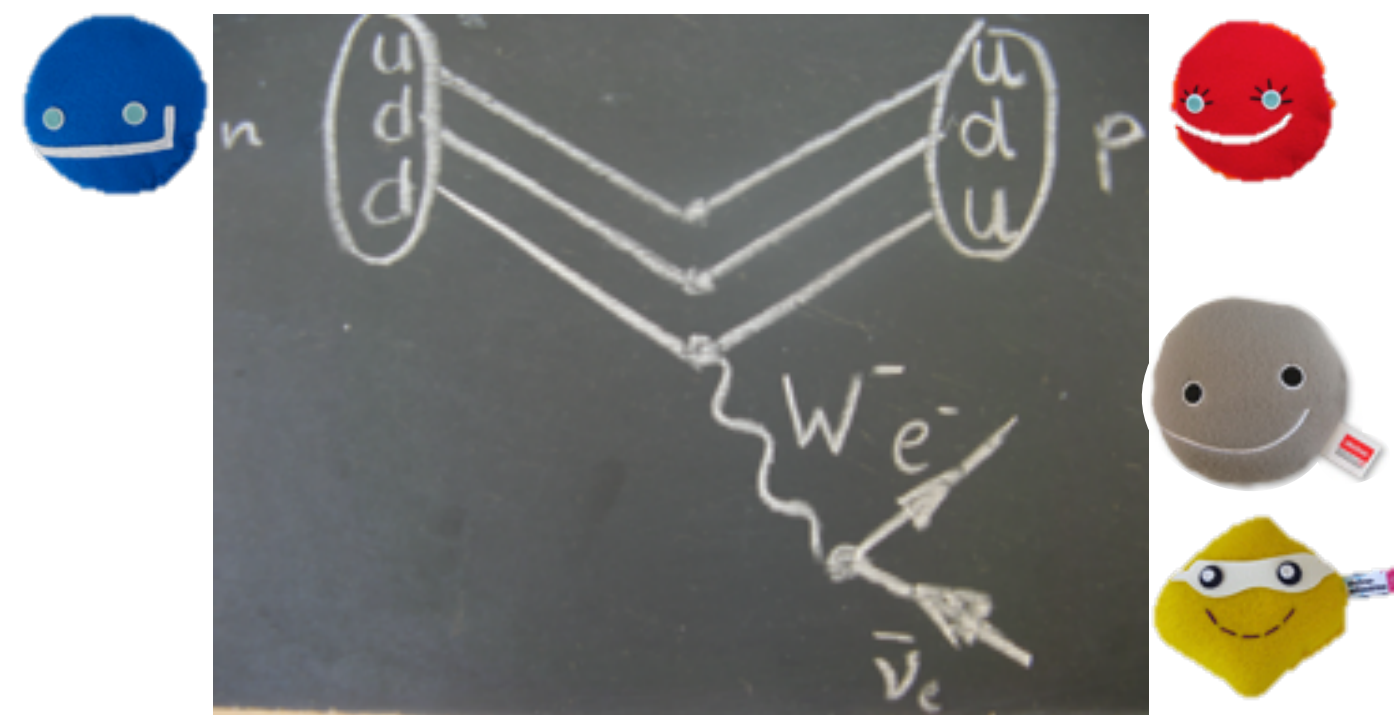
---



# DER BETA-ZERFALL & DAS W-BOSON

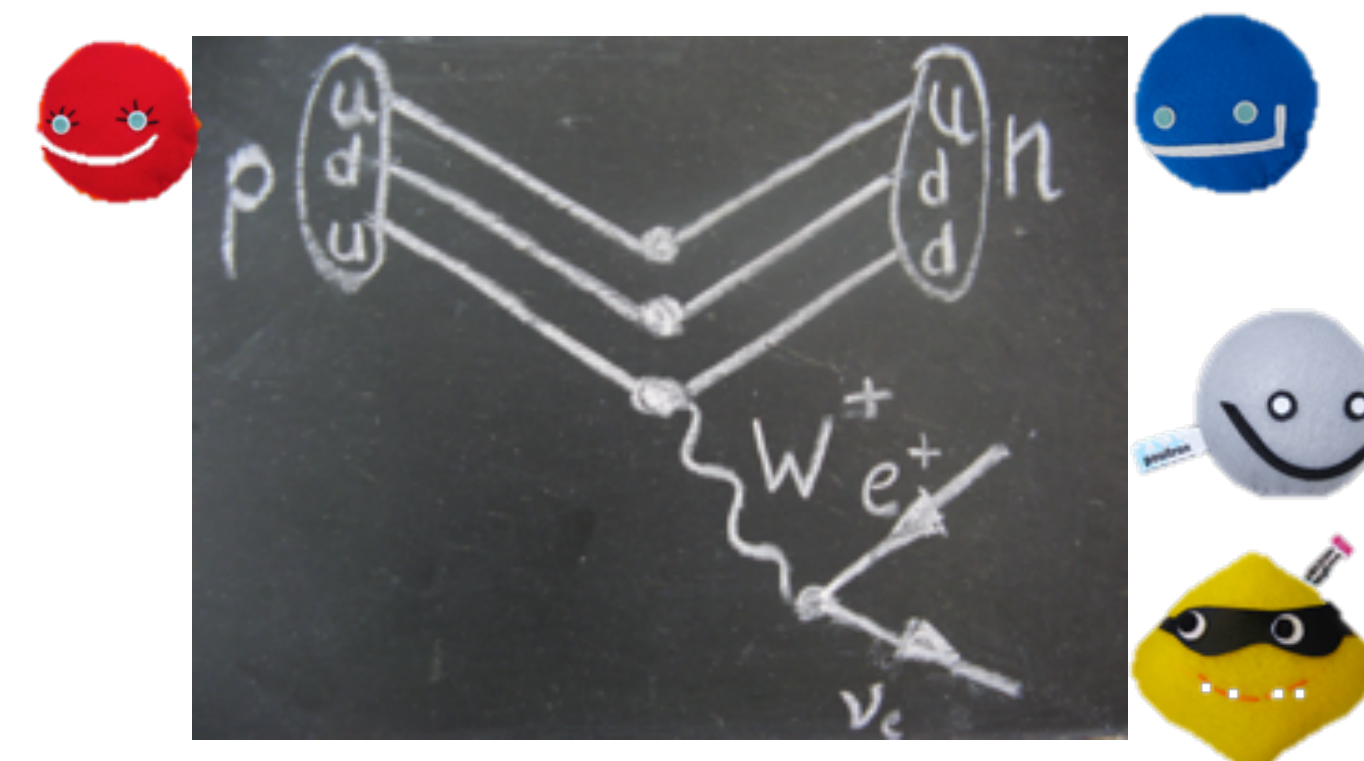
---

Beta-Minuszerfall (W<sup>-</sup>)



$$n \rightarrow p \quad e^- \quad \bar{\nu}_e$$

Beta-Pluszerfall (W<sup>+</sup>)

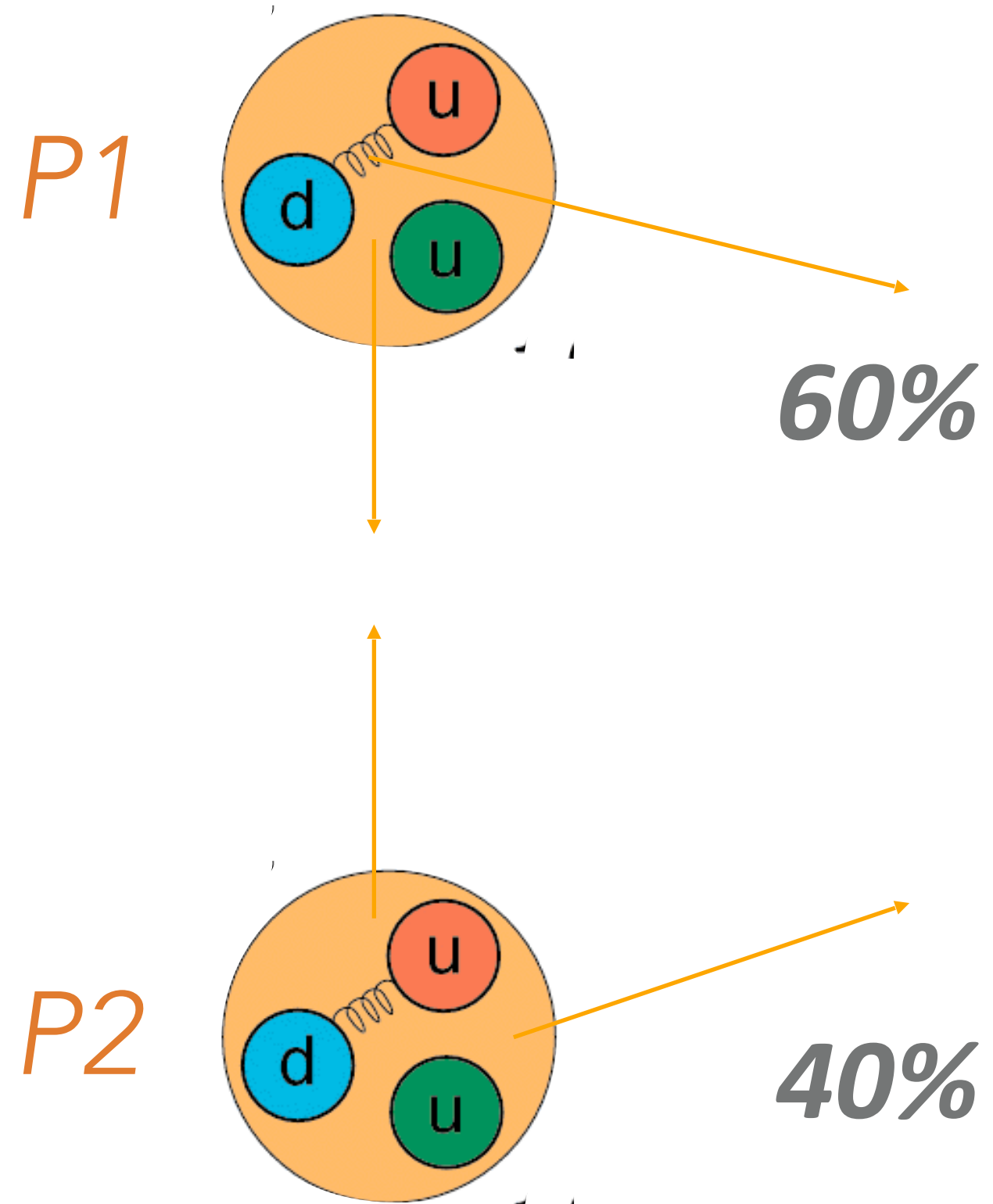


$$p \rightarrow n \quad e^+ \quad \nu_e$$



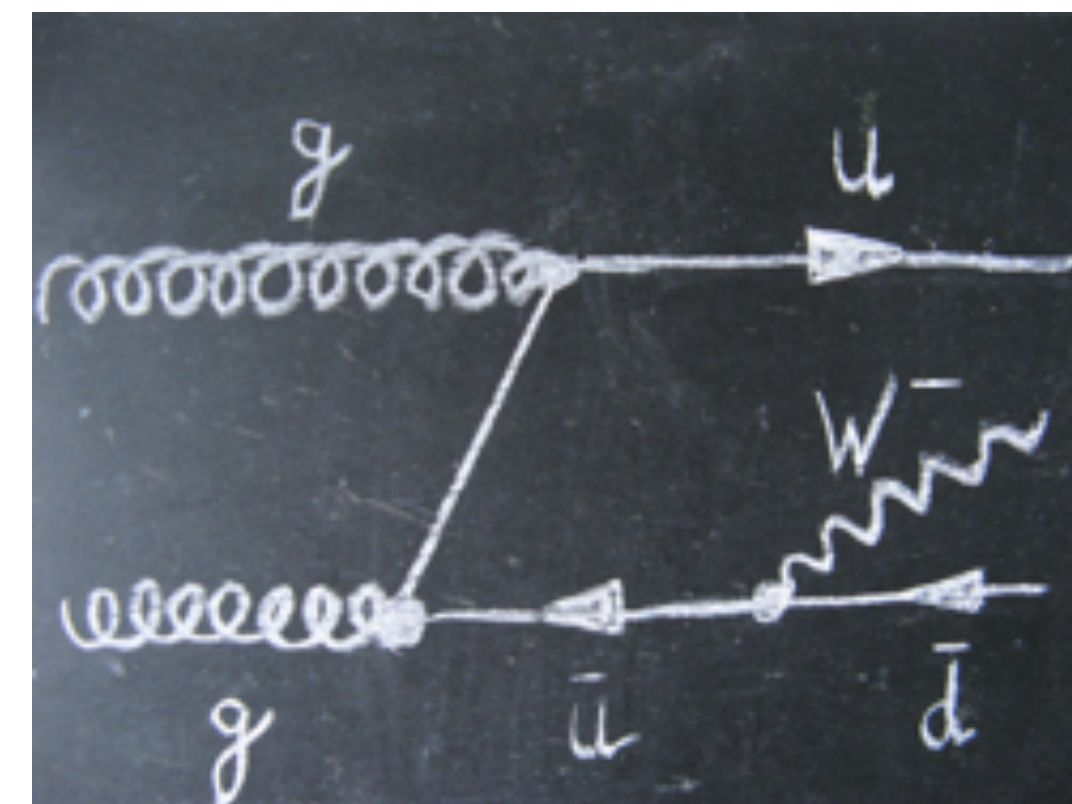
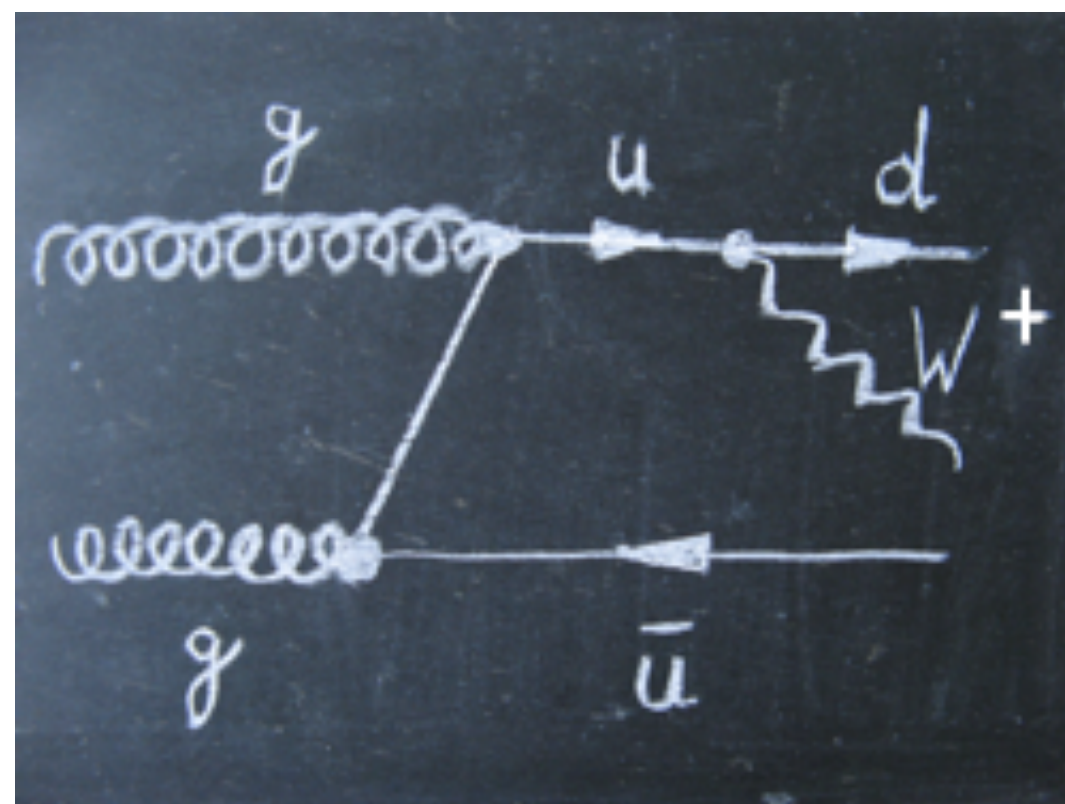
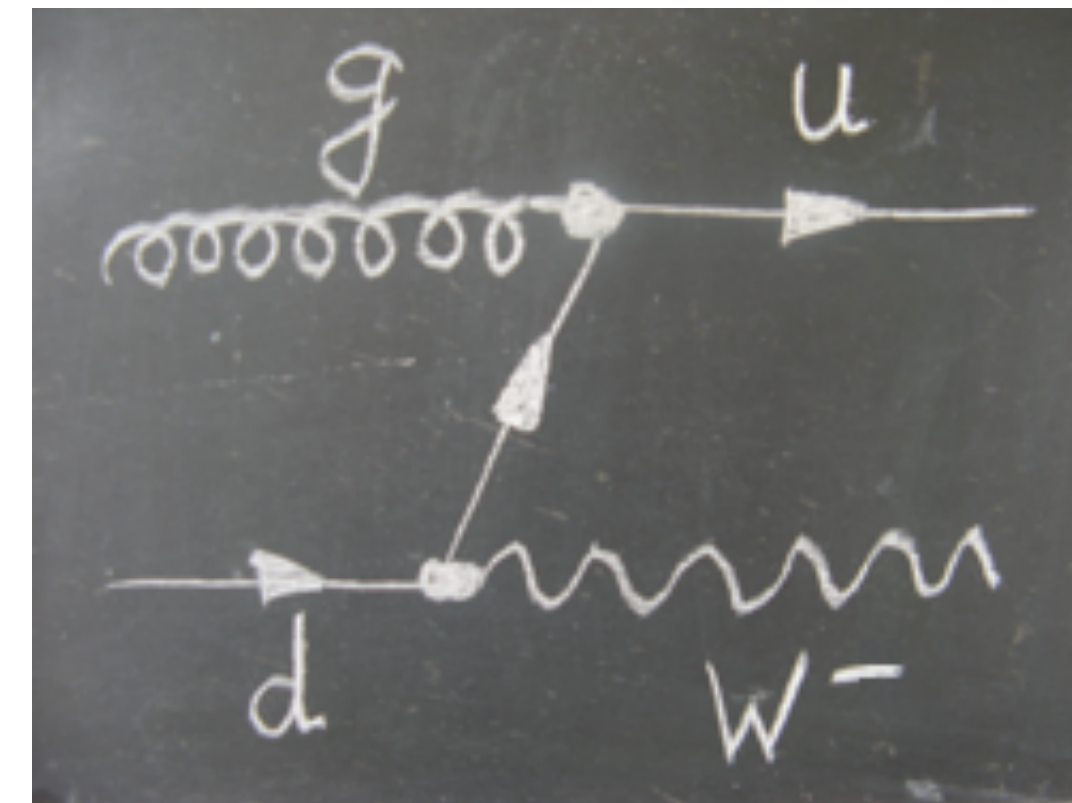
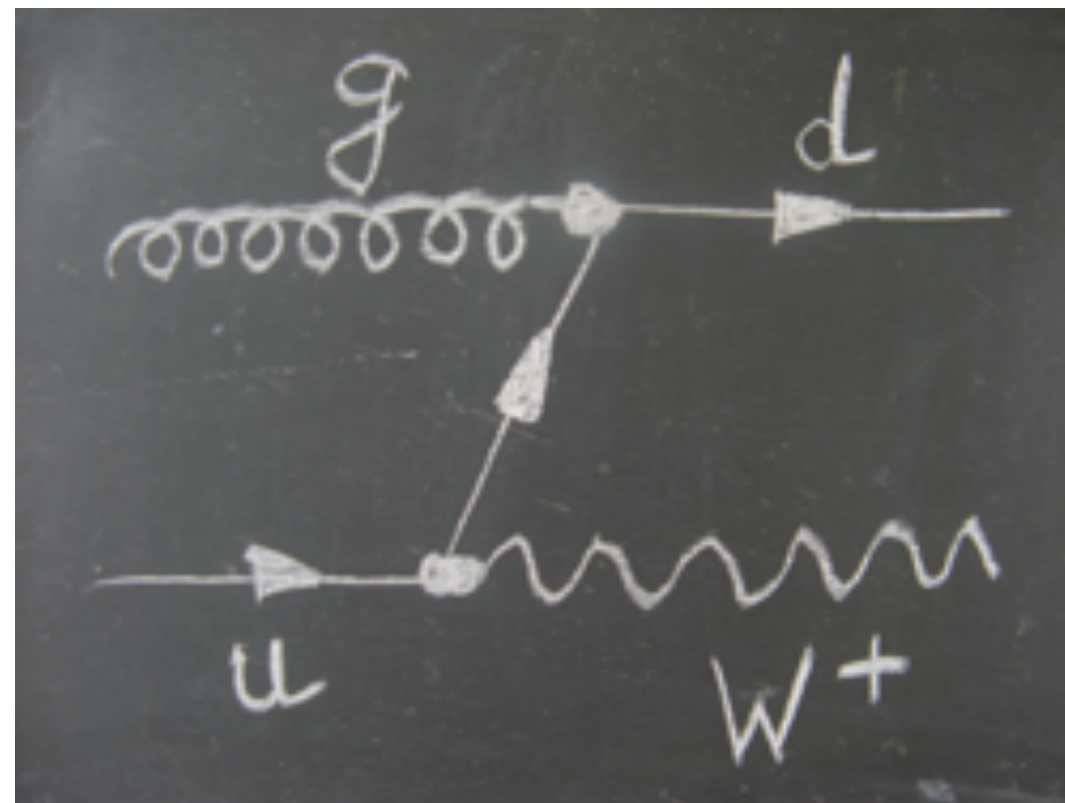
# PRODUKTION DER W-BOSONEN AM LHC

---



60%

40%



# 1. MESSUNG: $R_{\pm}$

---

1. Alle Ereignisse heraussuchen, in denen ein **W-Boson** erzeugt wurde
2. Elektrische **Ladung** des W-Boson ermitteln
3. **Verhältnis** der Anzahl  $W^{+}$ -Bosonen zur Anzahl  $W^{-}$ -Bosonen bestimmen ( $R_{\pm}$ )

Was erwartet ihr für  $R_{\pm}$ ?

# DAS STANDARDMODELL UND DAS HIGGS TEILCHEN

---

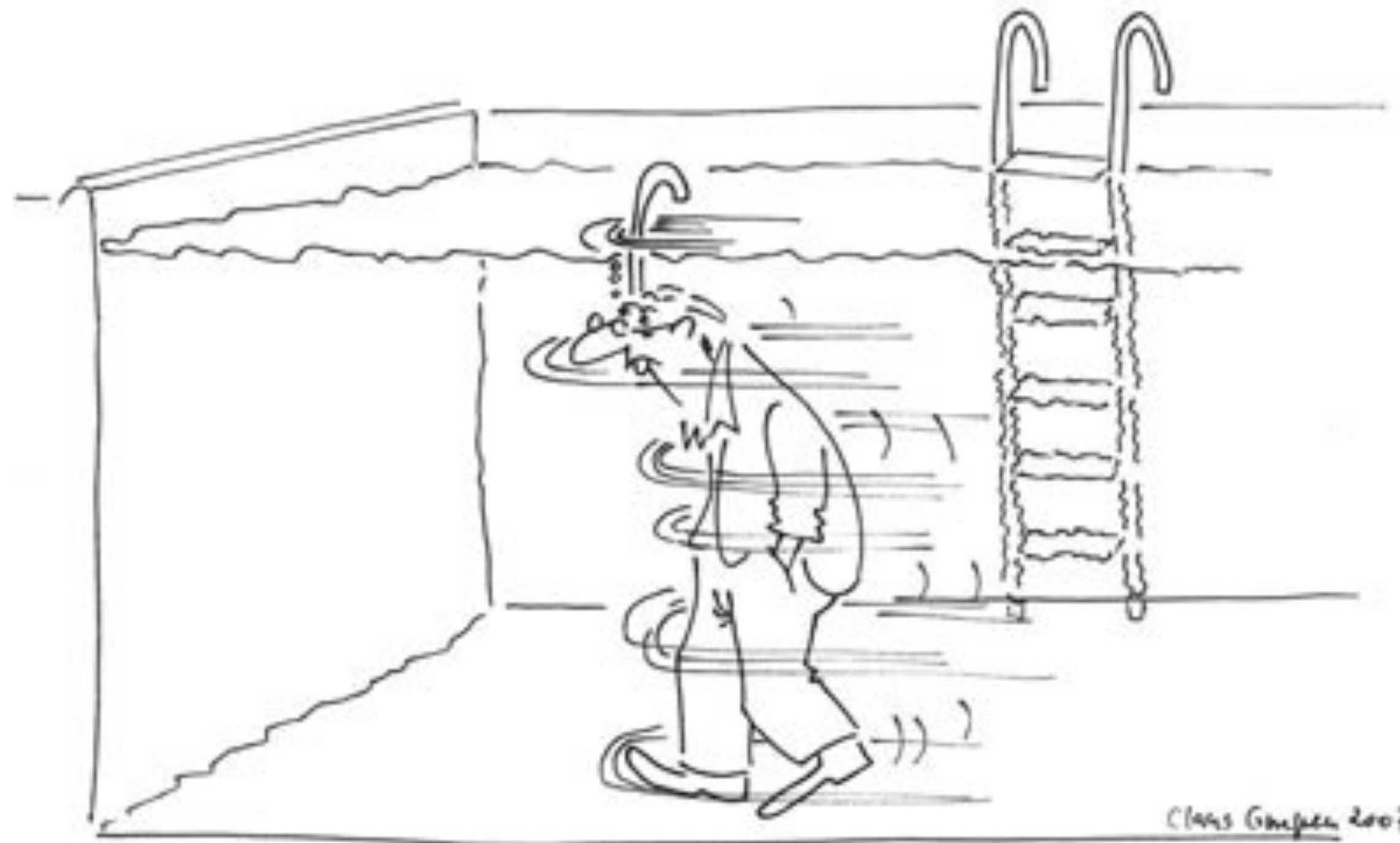
- Alle Berechnungen im Standardmodell funktionieren nur, wenn die Elementarteilchen masselos sind
- Das ist aber offensichtlich nicht der Fall!
- 1964 erweitern Theoretiker das SM mit einem mathematischen Trick, den man „spontane Symmetriebrechung“ nennt
- Higgs, Brout und Englert postulieren ein neues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



# DER HIGGS-MECHANISMUS

---

- 1964 Erweiterung des SM um ein allgegenwärtiges Kraftfeld, das die Teilchen abbremst
- Gleicher Effekt als hätten sie Masse:



# DER HIGGS-MECHANISMUS

---

- 1964 Erweiterung des SM um ein allgegenwärtiges Kraftfeld, das die Teilchen abbremst
- Gleicher Effekt als hätten sie Masse
- Je **größer** die Masse (Bekanntheit), umso **langsamer** die Bewegung und umgekehrt
- Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld → Masse

# DER HIGGS-MECHANISMUS

---



- Eine bekannte Person betritt den Raum

# DER HIGGS-MECHANISMUS

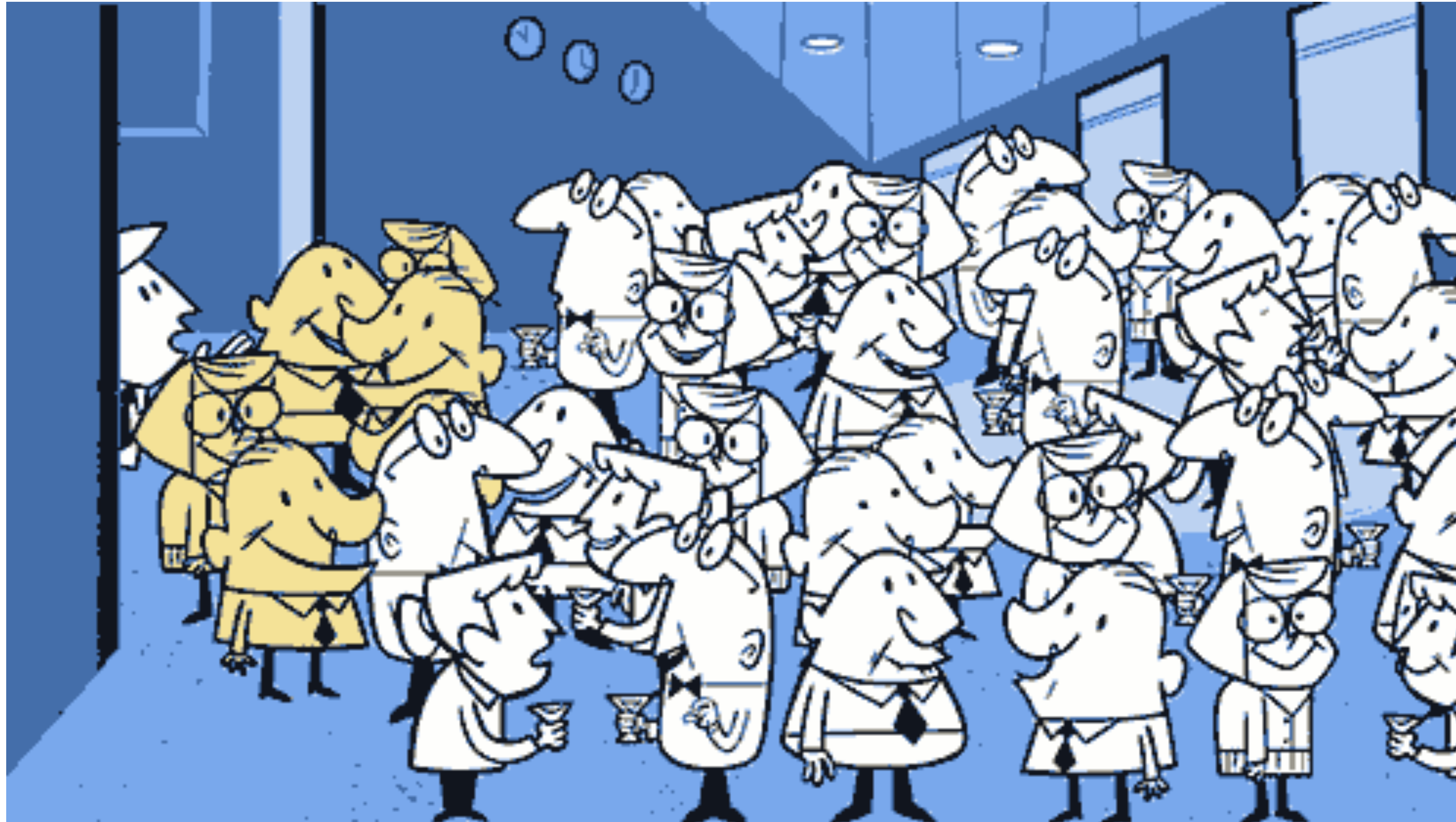
---



- Eine Kellner (=Photon) betritt den Raum

# 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?

---

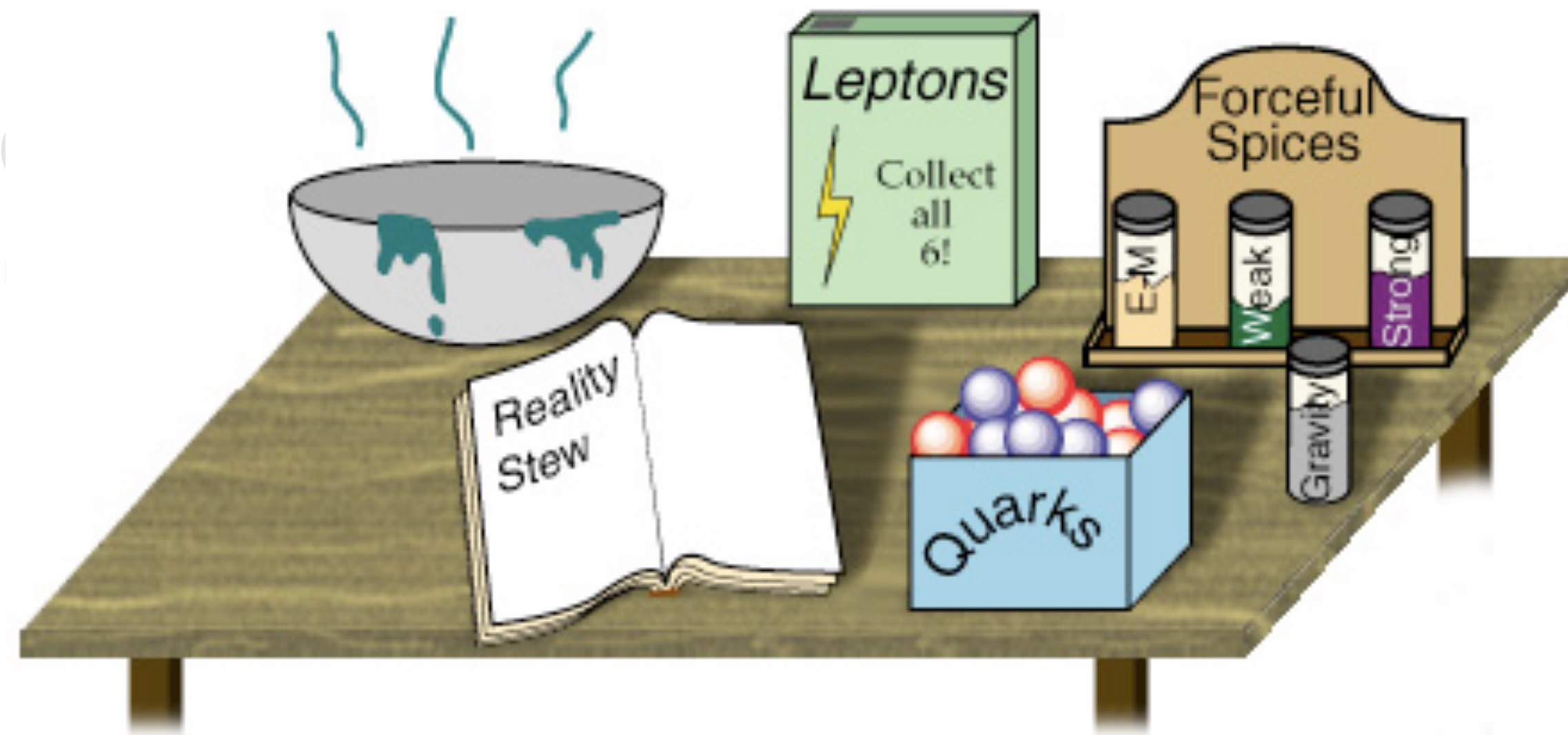
	FERMIONS			BOSONS
	I	II	III	
QUARKS	 $u$ UP QUARK	 $c$ CHARM QUARK	 $t$ TOP QUARK	 $\gamma$ PHOTON
	 $d$ DOWN QUARK	 $s$ STRANGE QUARK	 $b$ BOTTOM QUARK	 $g$ GLUON
LEPTONS	 $\nu_e$ ELECTRON-NEUTRINO	 $\nu_\mu$ MUON-NEUTRINO	 $\nu_\tau$ TAU-NEUTRINO	 $Z$ Z BOSON
	 $e^-$ ELECTRON	 $\mu$ MUON	 $\tau$ TAU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

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



# Das Standardmodell

- alles klar?

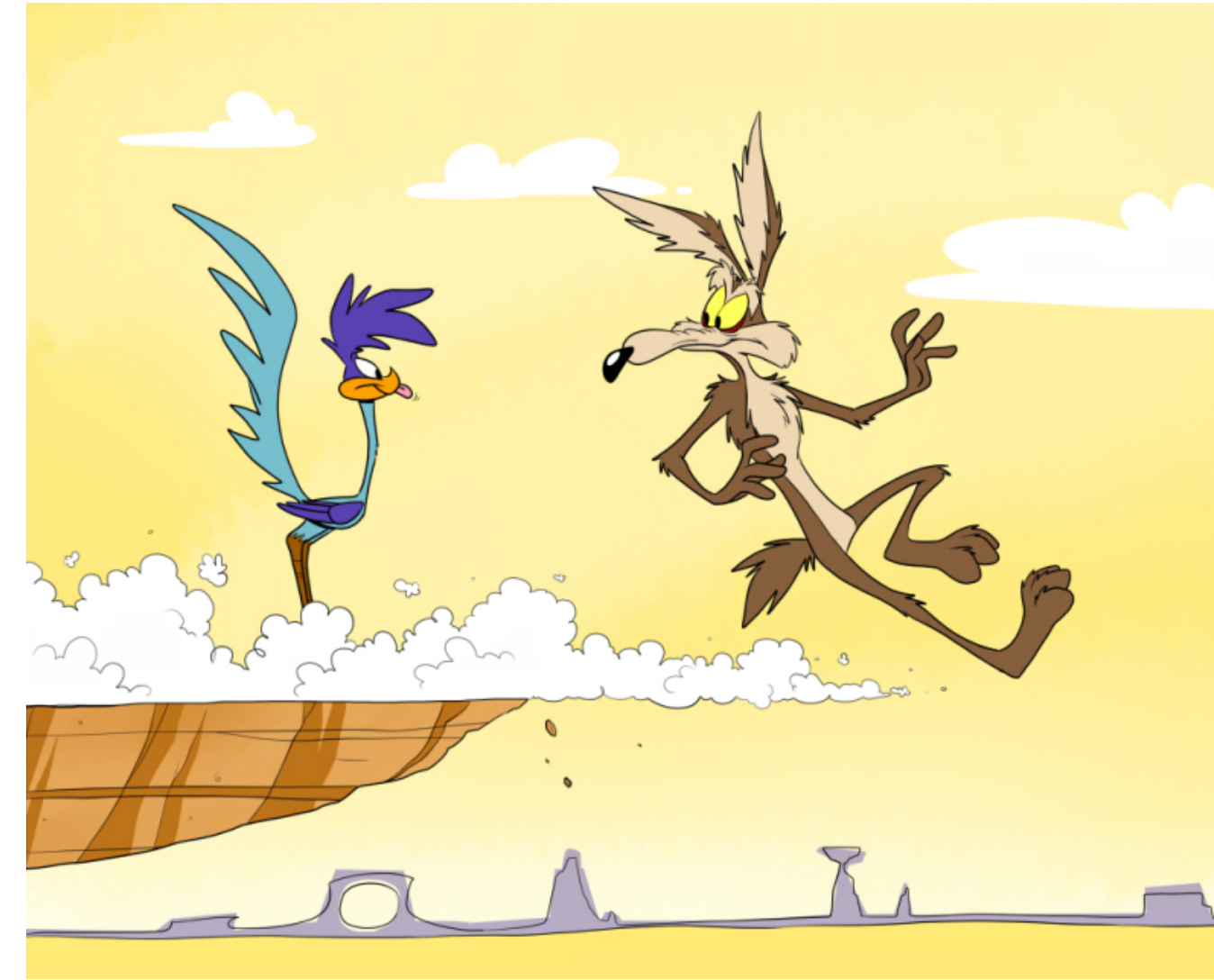


*Noch lange nicht!!!*

# GRAVITATION

---

- Anziehung von massiven Objekten  
Schwerkraft
- Die Gravitation ist viel schwächer  
als die anderen fundamentalen WW
- Makroskopisch: Gravitation viel stärker  
→ Gravitation wird nicht abgeschirmt!



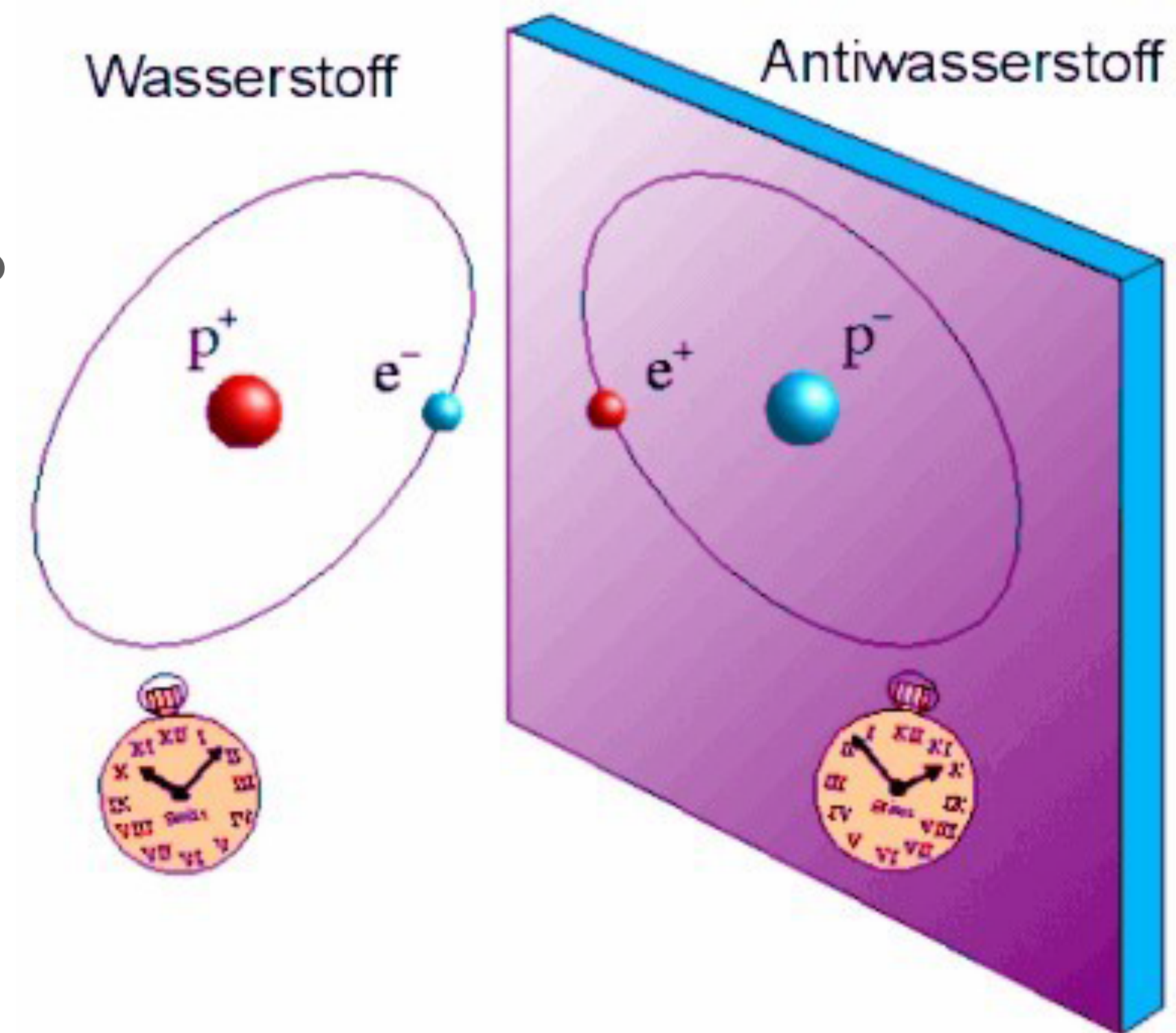
- Schwerkraft wird beschrieben durch Einsteins „Allgemeine Relativitätstheorie“ (1915)
- Bis heute keine konsistente Theorie der Quantengravitation

# WARUM GIBT ES DAS UNIVERSUM ÜBERHAUPT?

---

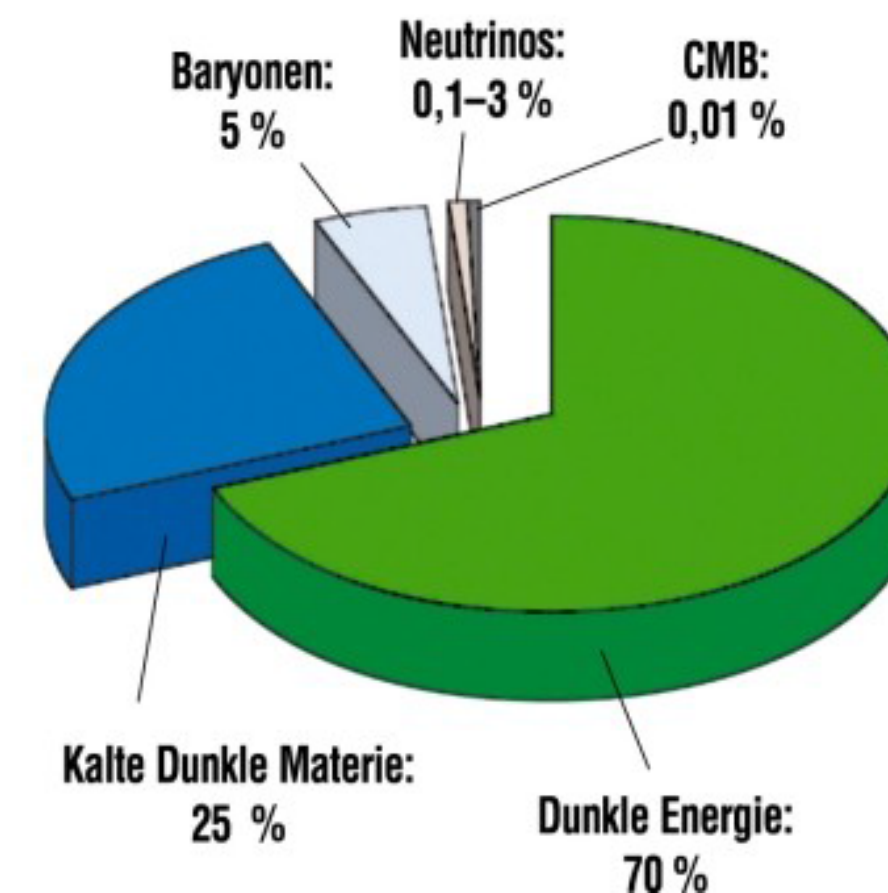
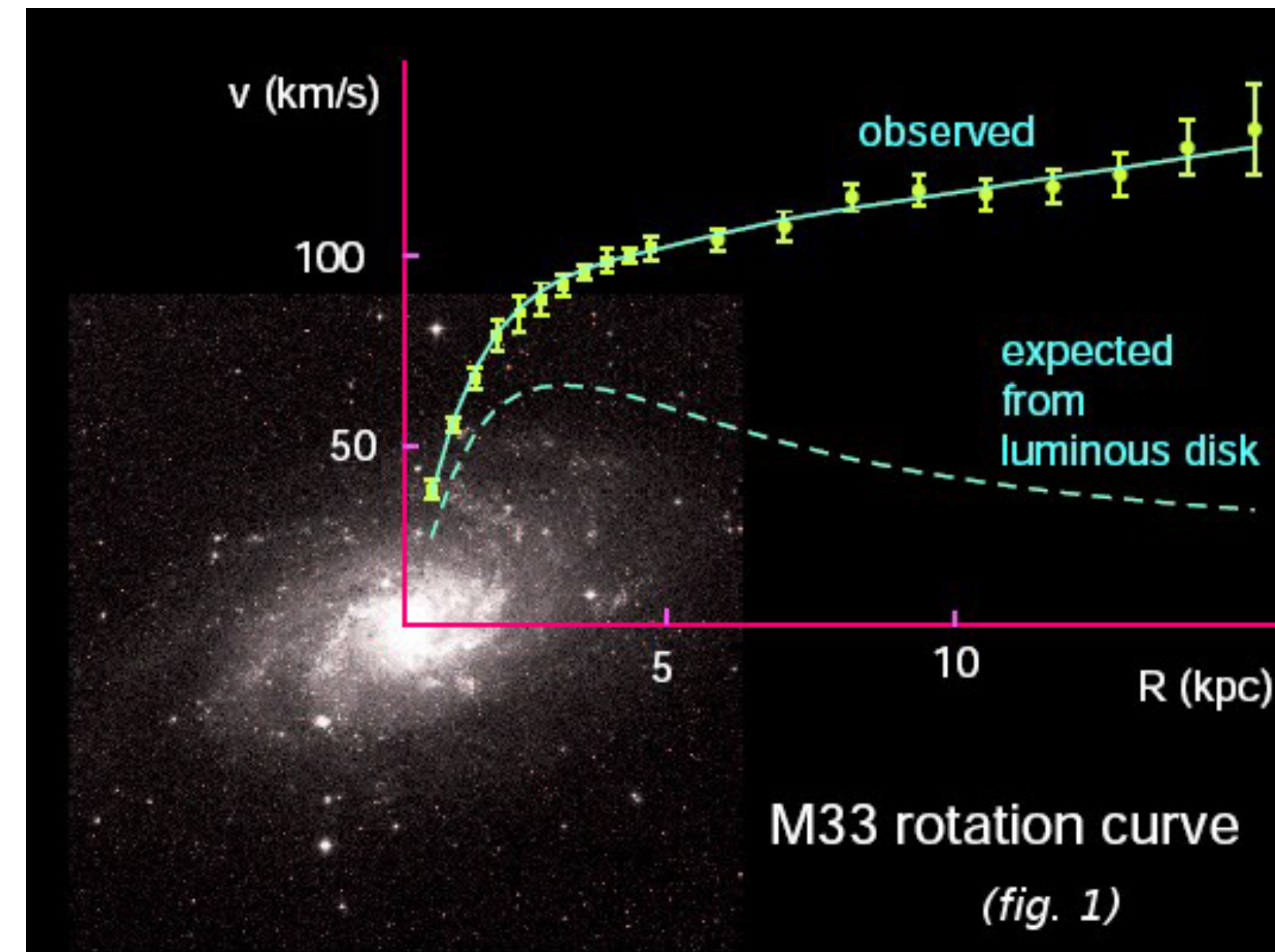
- Unser Universum besteht aus Materie
- Materie kann nur mit Antimaterie zusammen erzeugt werden
- Eigentlich wollte es genauso viel Antimaterie wie Materie geben (exakte Symmetrie)

- 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!

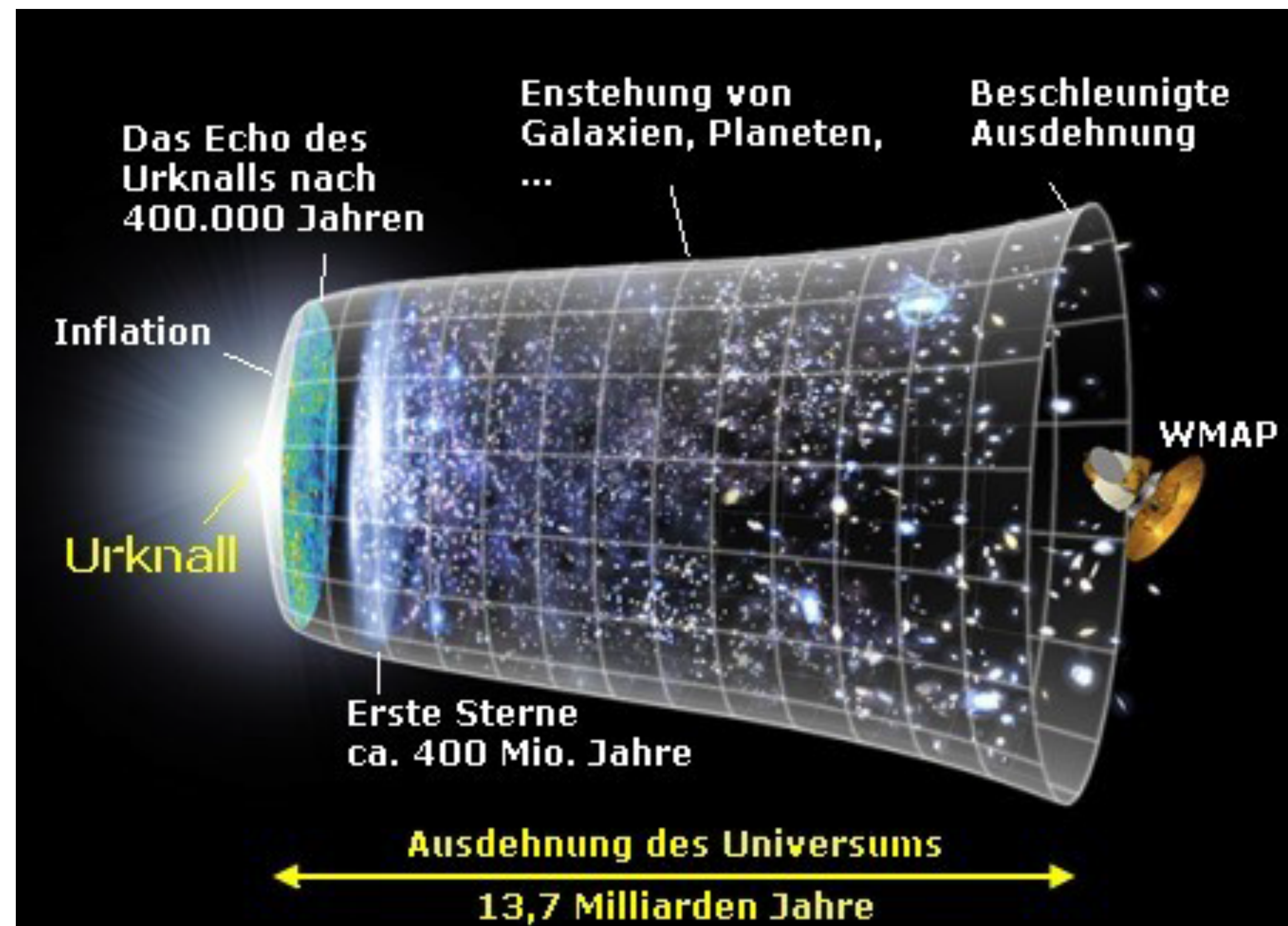


- Wie können wir die Gravitation mit unserem SM vereinen?
- Wieso ist die Materie-Antimaterie Symmetrie gebrochen?
- Aus welchen Teilchen besteht dunkle Materie?
- Wie können wir solche Fragen beantworten?

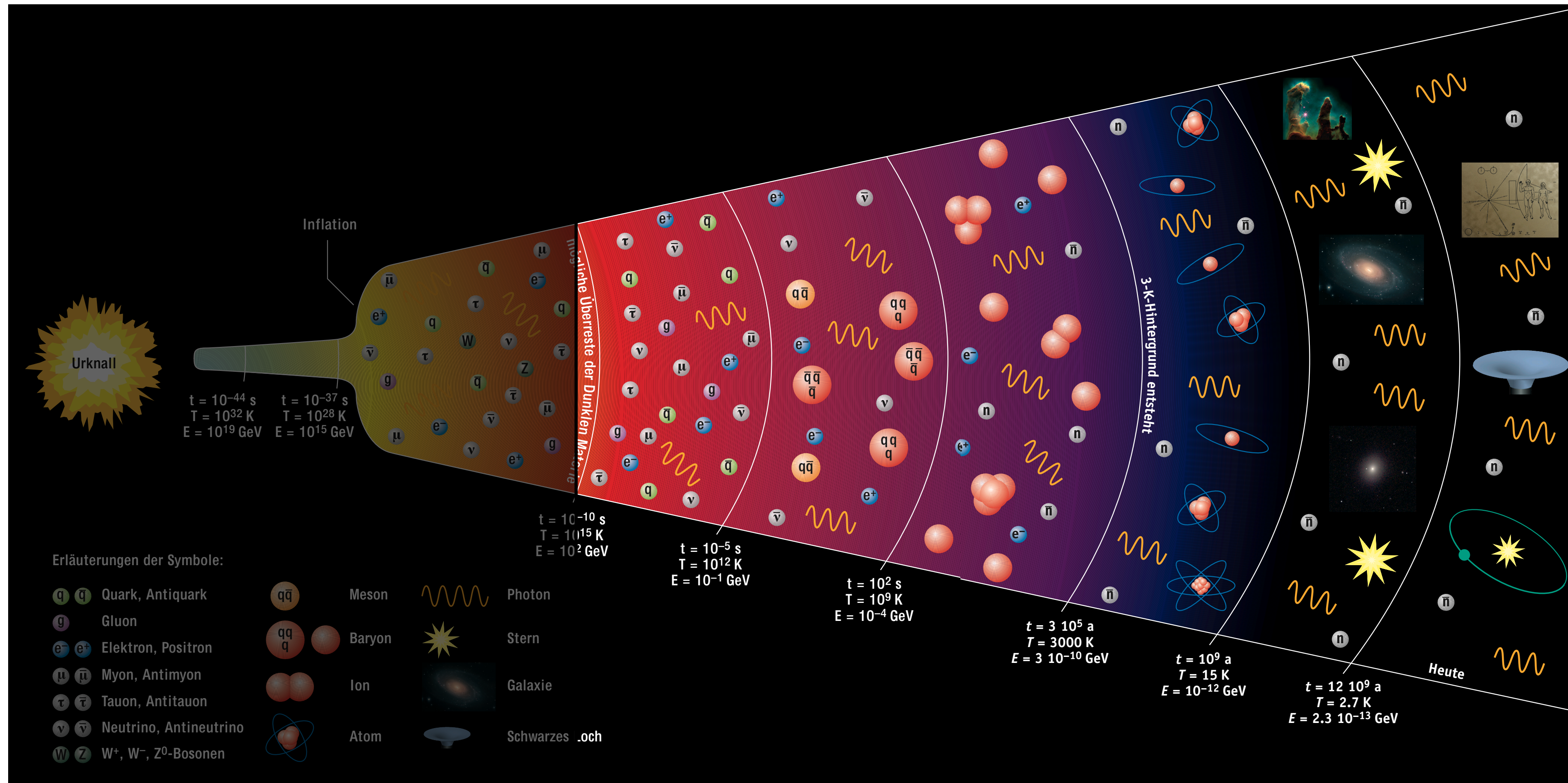
# VERBINDUNG ZWISCHEN TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

---

- Beobachtung des Weltraums um herauszufinden wie das Universum entstanden ist



# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

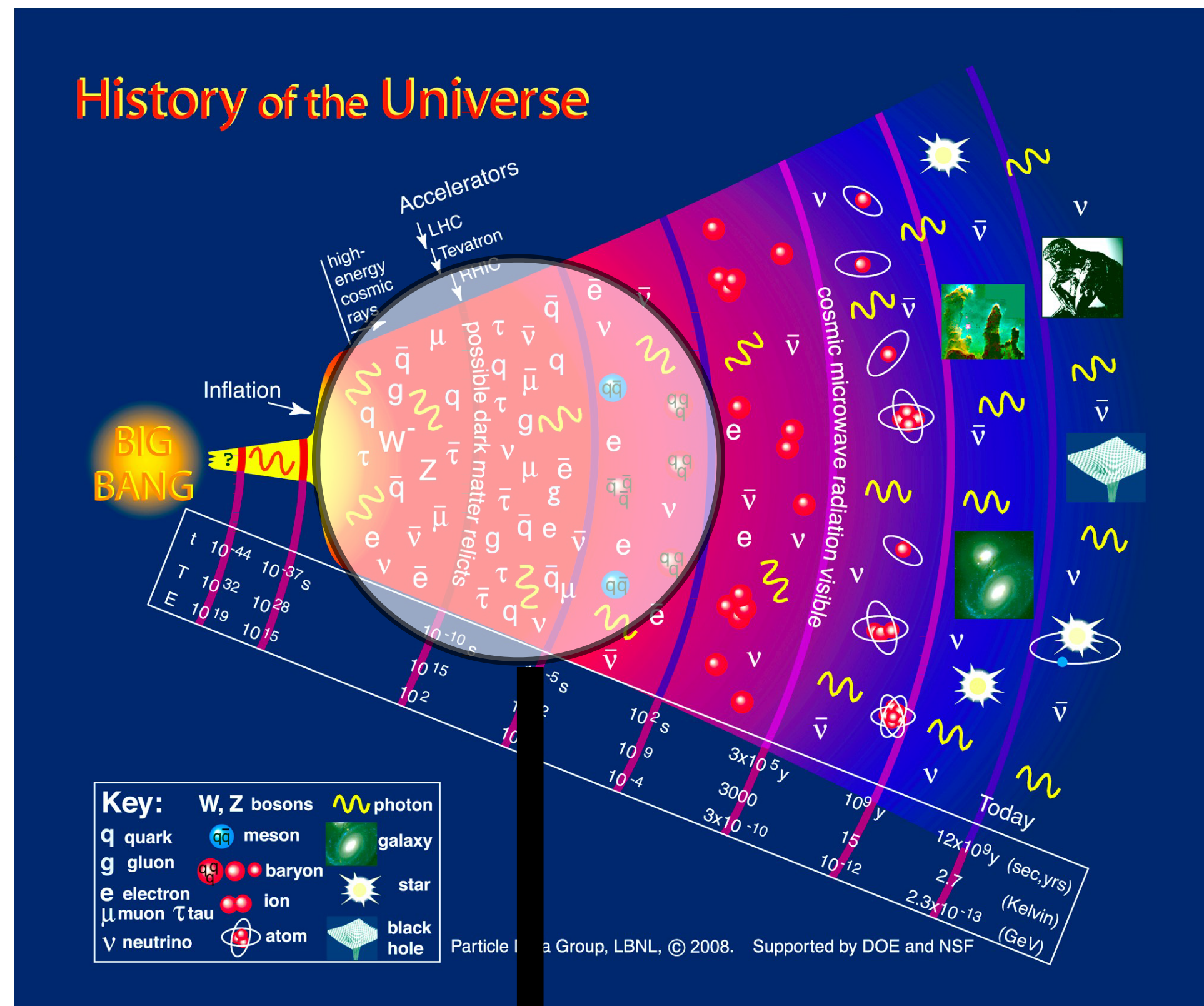


Theorie

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

---

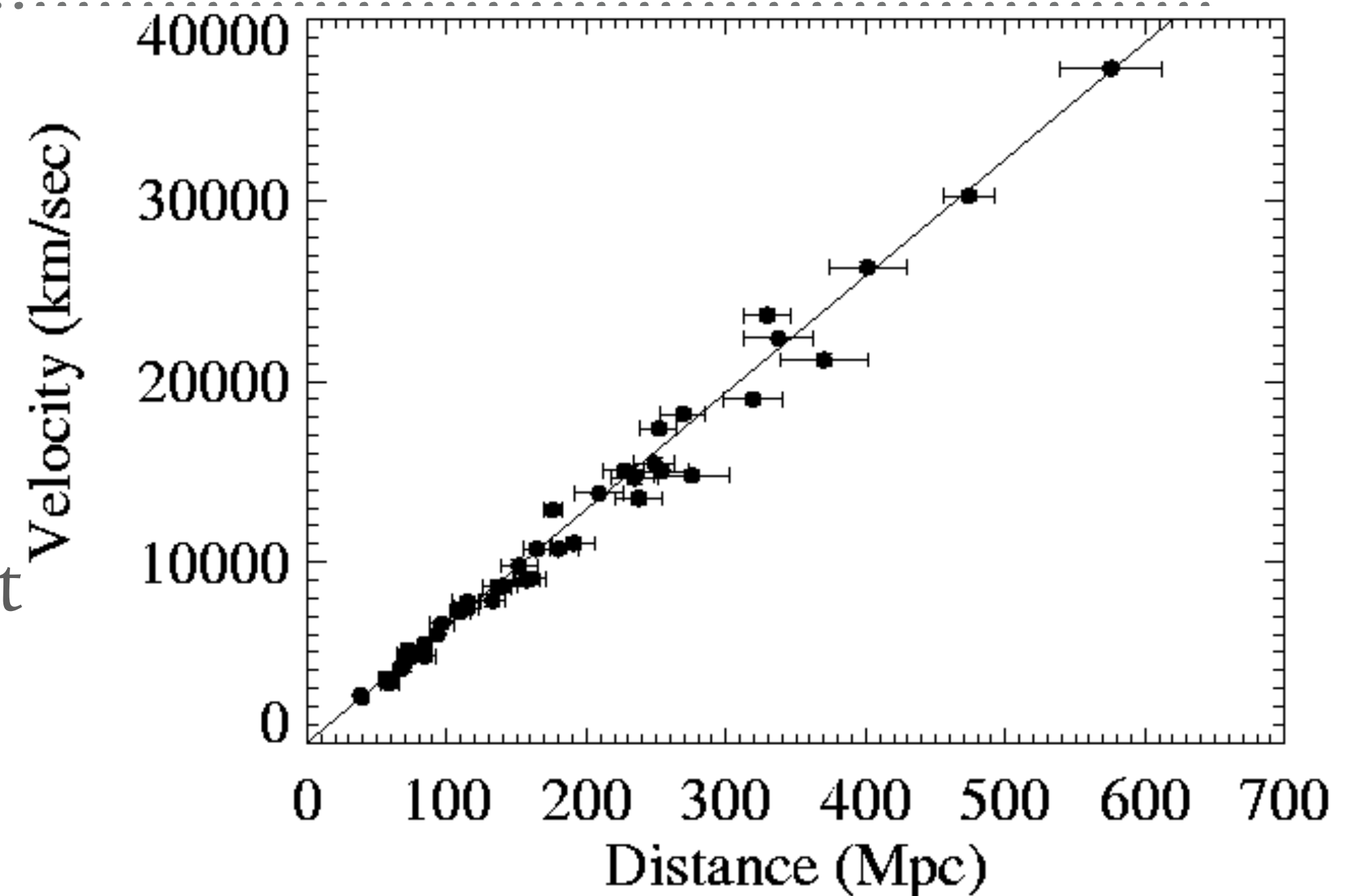
- Das “Standardmodell” beschreibt bisherige Experimente mit hervorragender Genauigkeit: 3 Familien von Quarks und Leptonen. Sie lassen sich aufgrund ihrer Eigenschaften in einem System anordnen.
- Kräfte zwischen Teilchen werden durch Austauschteilchen übertragen. Diese Austauschteilchen sind ebenfalls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

**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

