



MASTERCCLASS

Das Standardmodell und
die offenen Fragen der Teilchenphysik

Andrea Knue, 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

										13 14 15 16 17											
										5 6 7 8 9 10 11 12											
1	2																18				
1	H Wasserstoff 1.01															2 He Helium 4.00					
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01															10 Ne Neon 20.18				
3	11 Na Natrium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31															18 Ar Argon 39.95				
4	19 K Kalium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titan 47.88	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chrom 52.00	25 Mn Mangan 54.94	26 Fe Eisen 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.70	29 Cu Kupfer 63.55	30 Zn Zink 65.41	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsen 74.92	34 Se Selen 78.96	35 Br Brom 79.90	36 Kr Krypton 83.80			
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirkon 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdän 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silber 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Zinn 118.71	51 Sb Antimon 121.76	52 Te Tellur 127.60	53 I Iod 126.90	54 Xe Xenon 131.29			
6	55 Cs Cäsium 132.91	56 Ba Barium 137.33	La-Lu	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantal 180.95	74 W Wolfram 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platin 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Quecksilber 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Blei 207.2	83 Bi Bismut 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astat (210)	86 Rn Radon (222)			
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	Ac-Lr	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (262)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (272)										

Ordnungszahl — 6
 Elementsymbol — C
 Elementname — Kohlenstoff
 Rel. Atommasse — 12.01

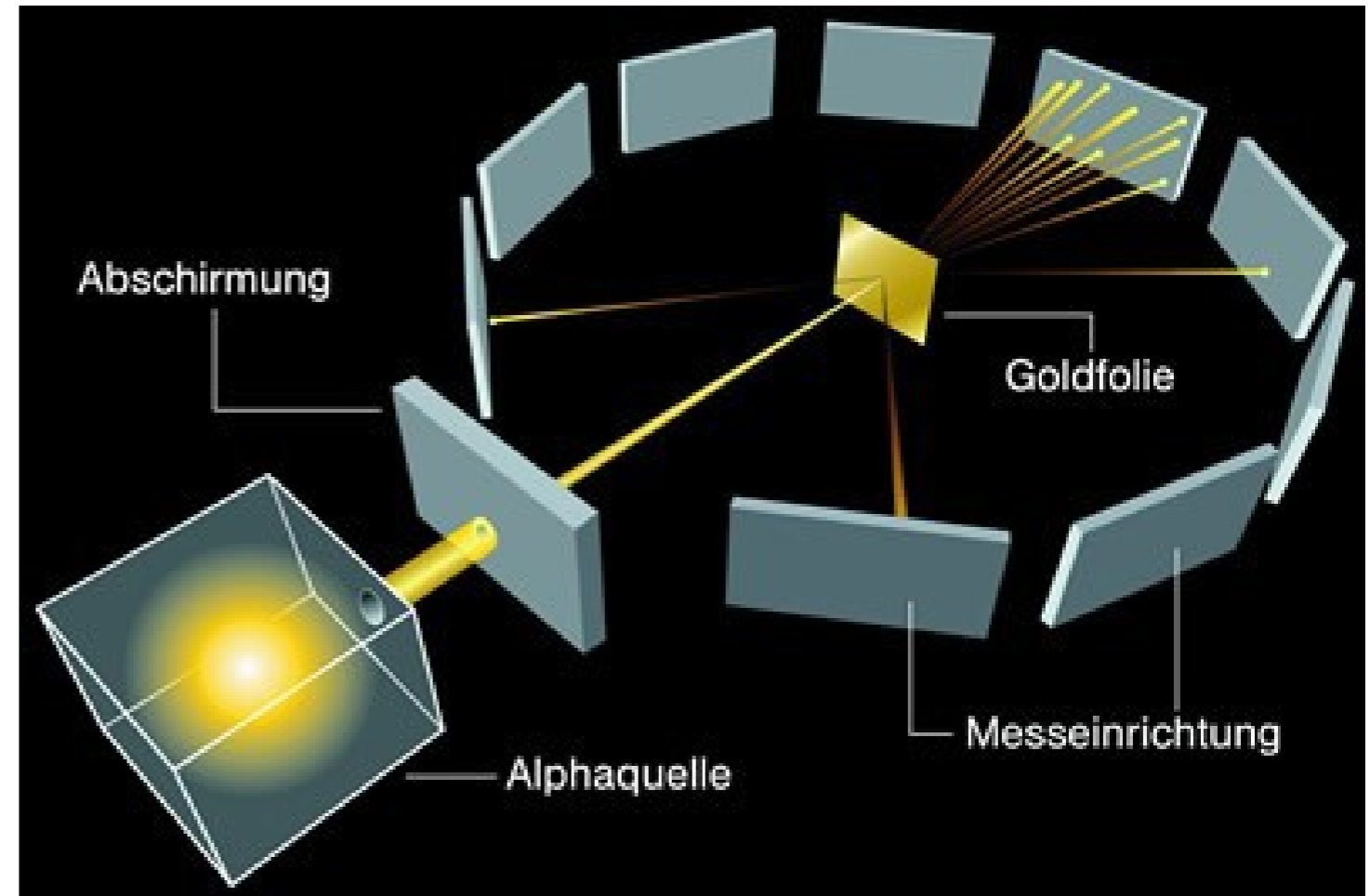
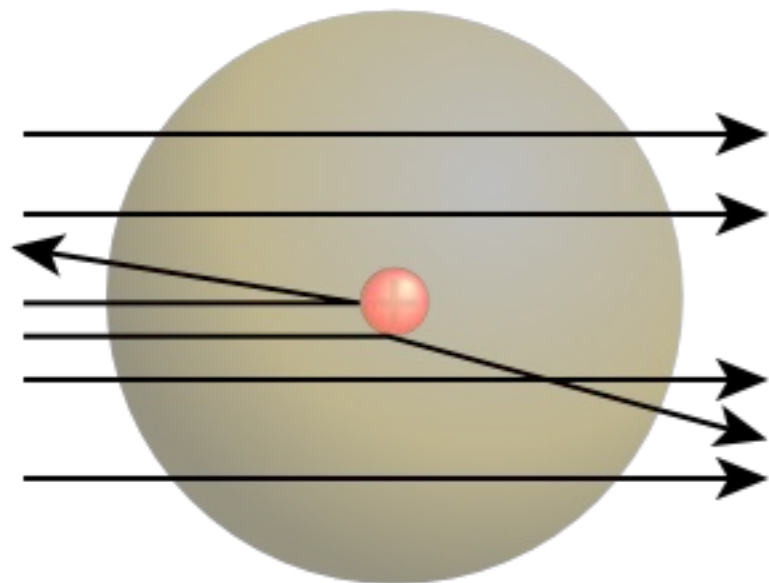
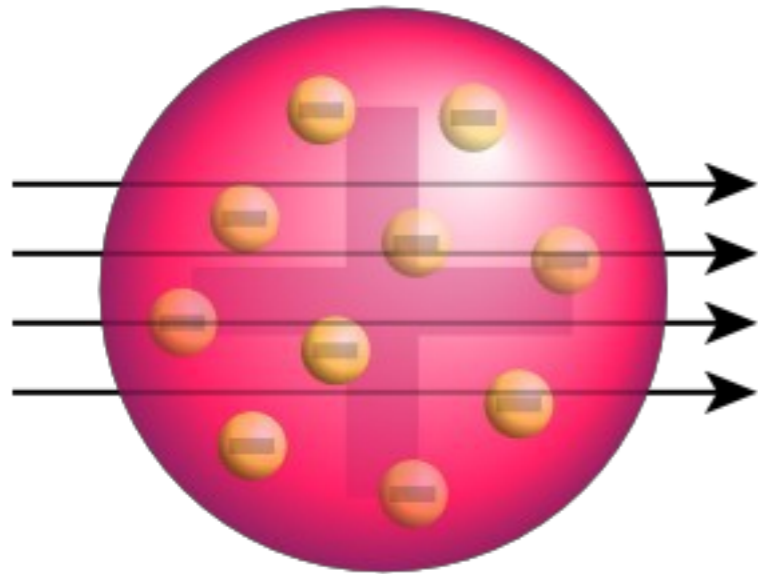
Fe — Feste Elemente
 O — Gasförmige Elemente
 Hg — Flüssige Elemente (20°C)
 Tc — Radioaktive Elemente

© Peter Wich - Experimentalchemie.de - Chemie erleben!

57 La Lanthan 138.91	58 Ce Cer 140.12	59 Pr Praseodym 140.91	60 Nd Neodym 144.24	61 Pm Promethium (147)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.97	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.97
89 Ac Actinium 227.03	90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uran 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

WIE UNTERSUCHT MAN SEHR KLEINE TEILCHEN?

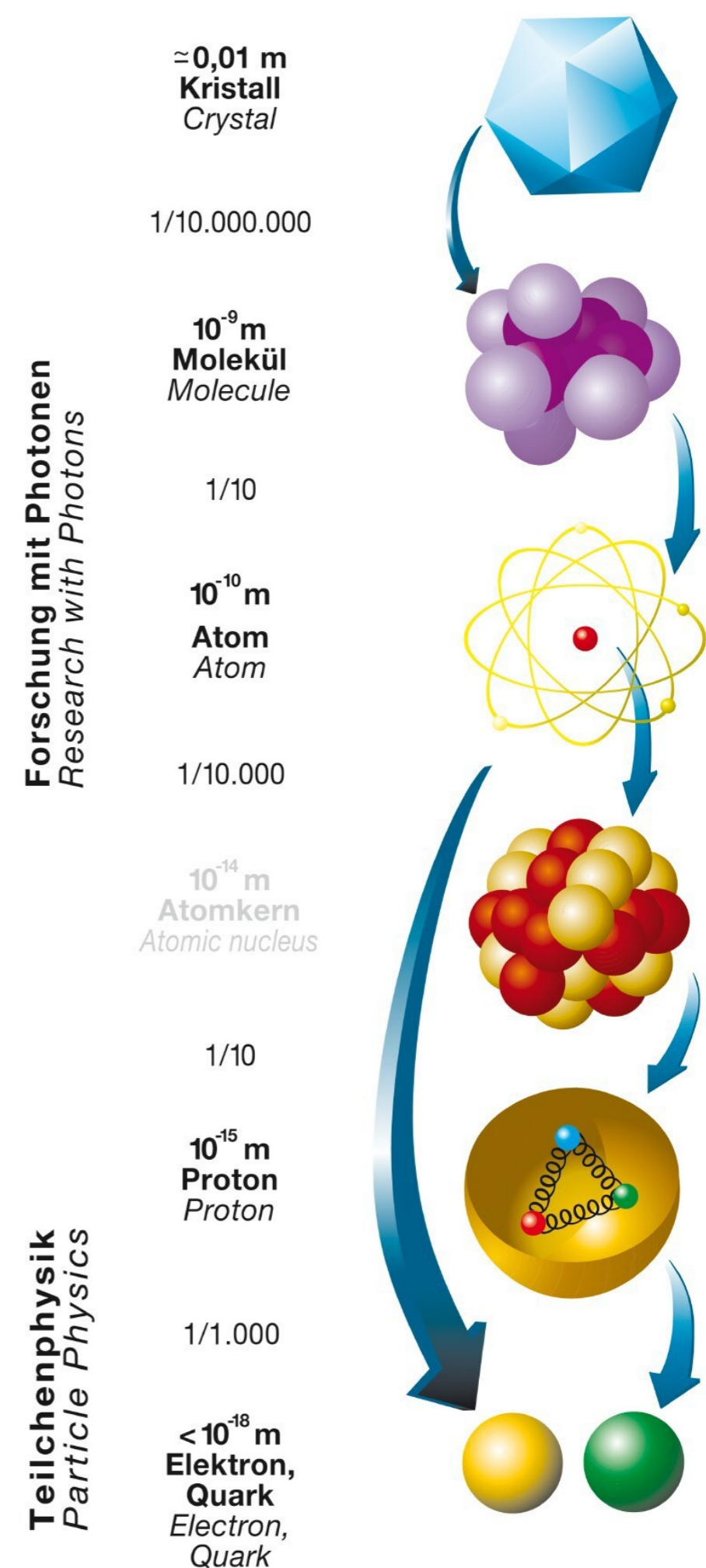
- Durch Streuexperimente!
- Rutherford 1910: Beschuss von Goldfolie mit α -Teilchen



- **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!

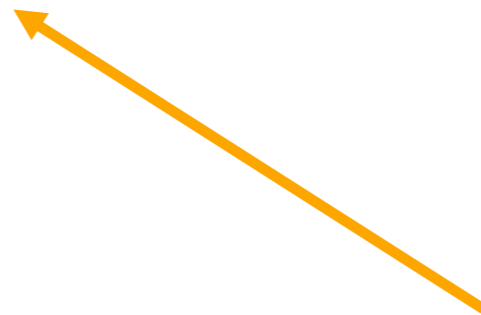
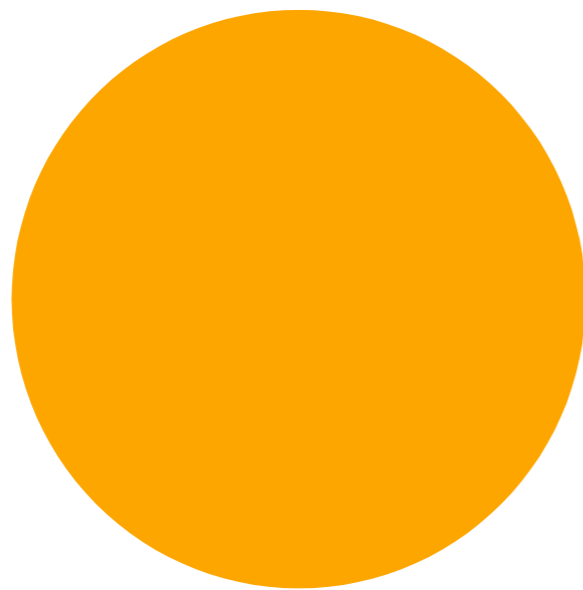
- Chemie: Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- Atomphysik: Aufbau der Atome (Atomkern, Elektron)
- Kernphysik: Aufbau der Atomkerne (Proton, Neutron, Elektron)
- Teilchenphysik: Aufbau Proton, Neutron (Quarks, Elektron)



DAS PROTON

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

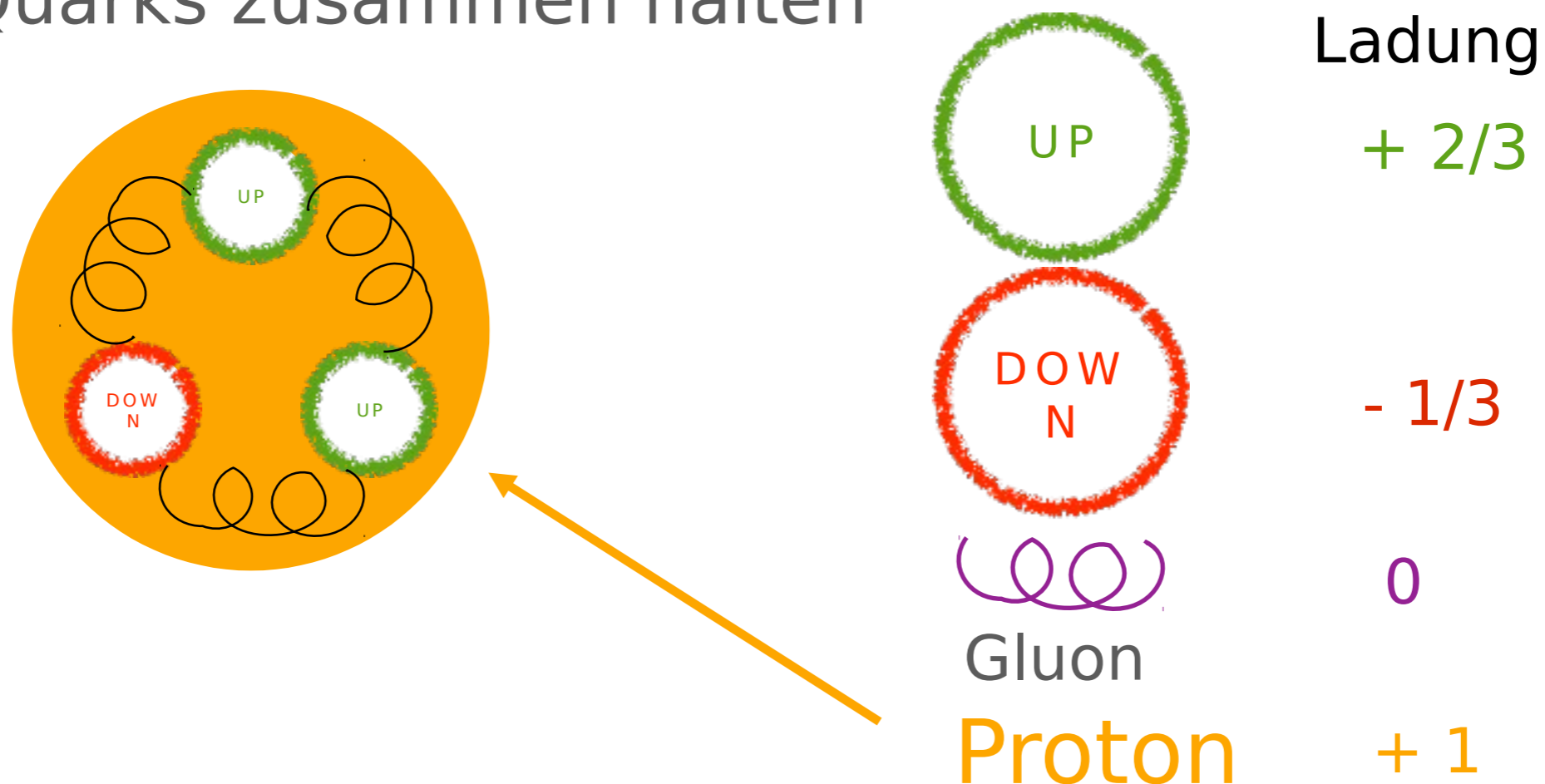
Ladung



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





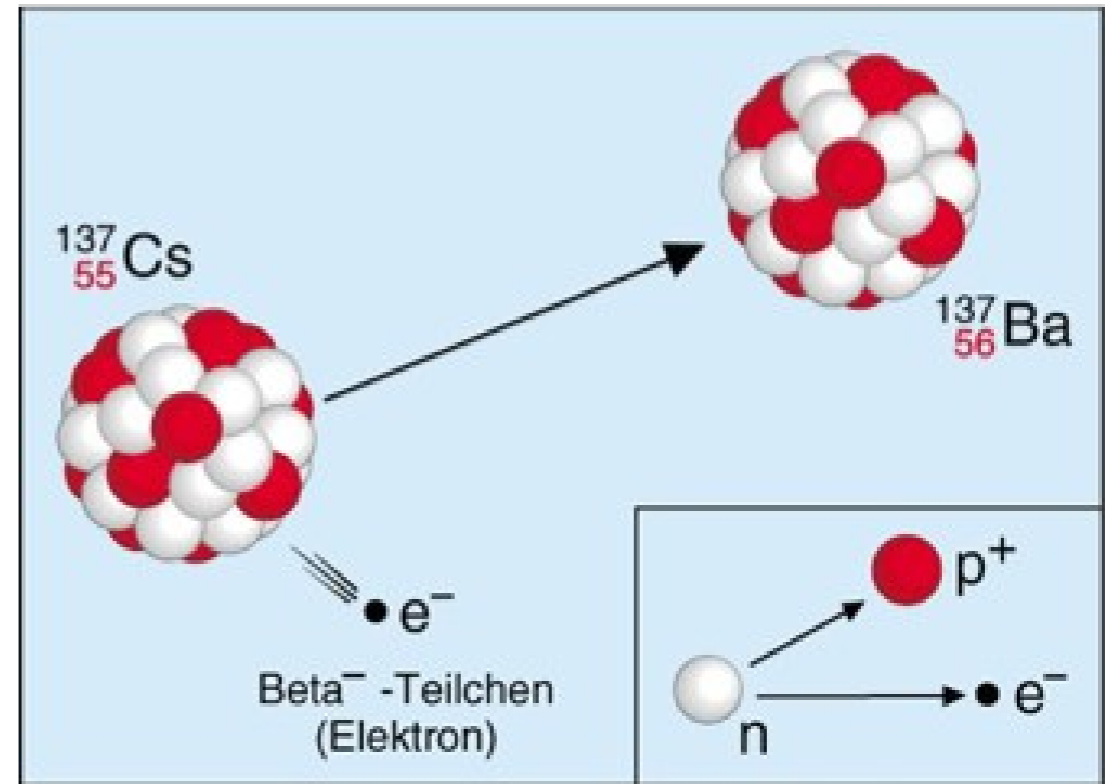
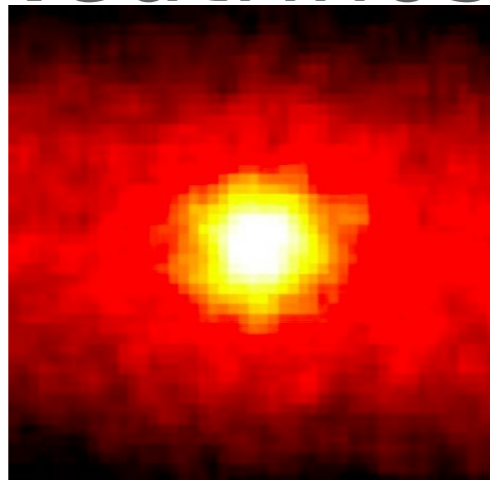
GIBT ES NOCH WEITERE ELEMENTARTEILCHEN?

- 1930 postulierte Pauli ein weiteres Teilchen um den β -Zerfall von Atomkernen zu erklären
- 64 Milliarden Sonnenneutrinos/
/sec

Optisch:



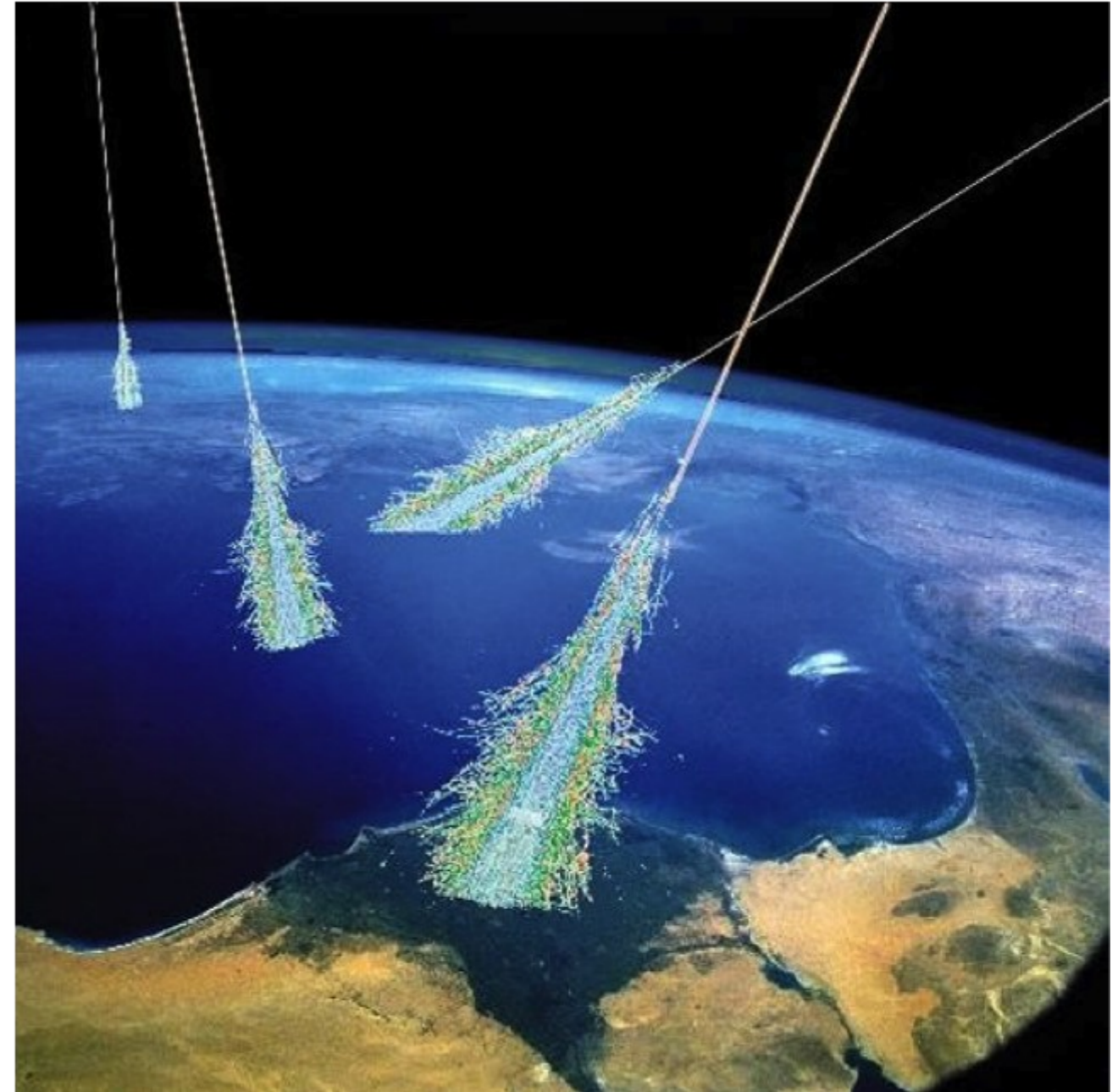
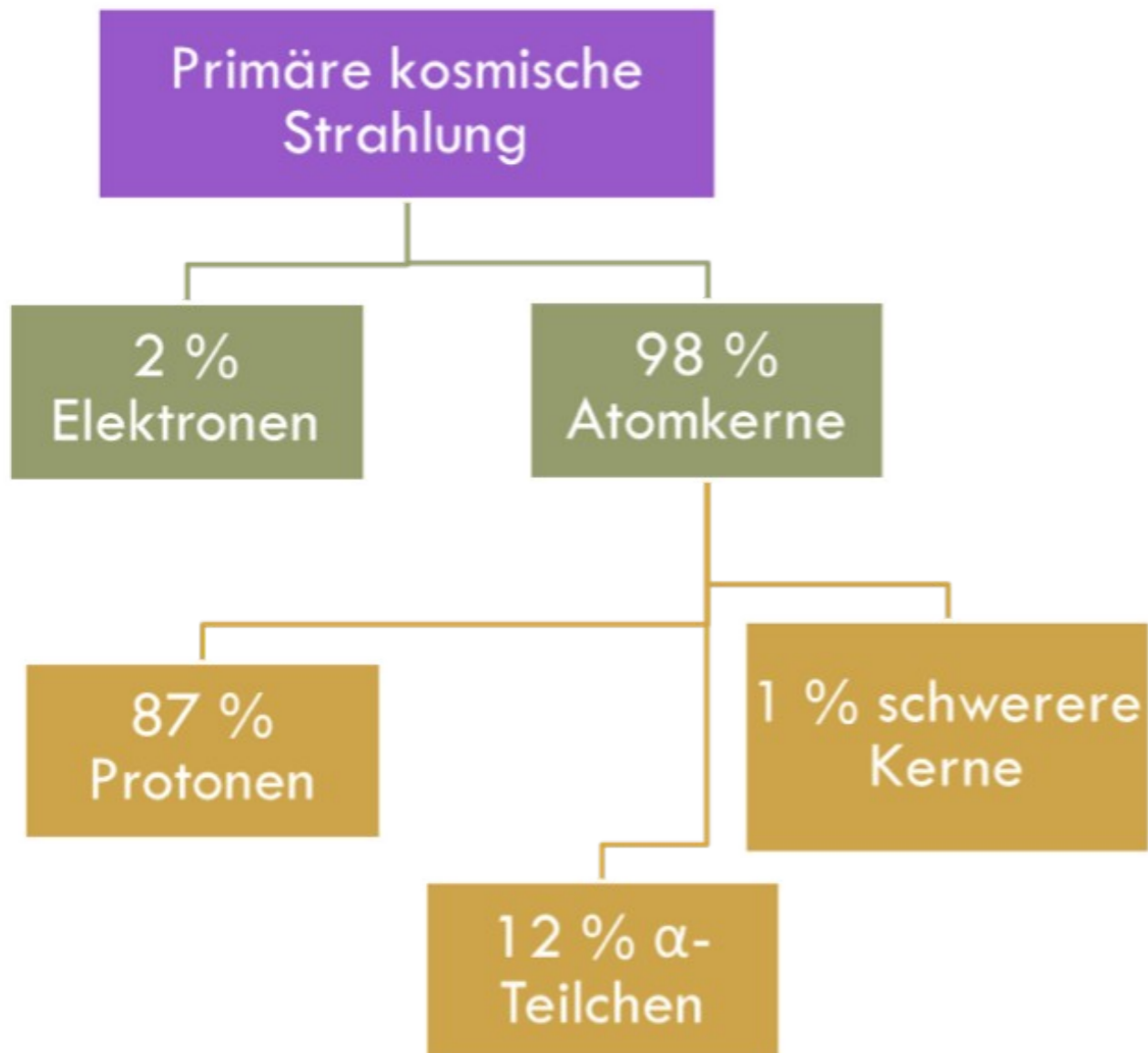
Neutrinos:



Neutrino

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

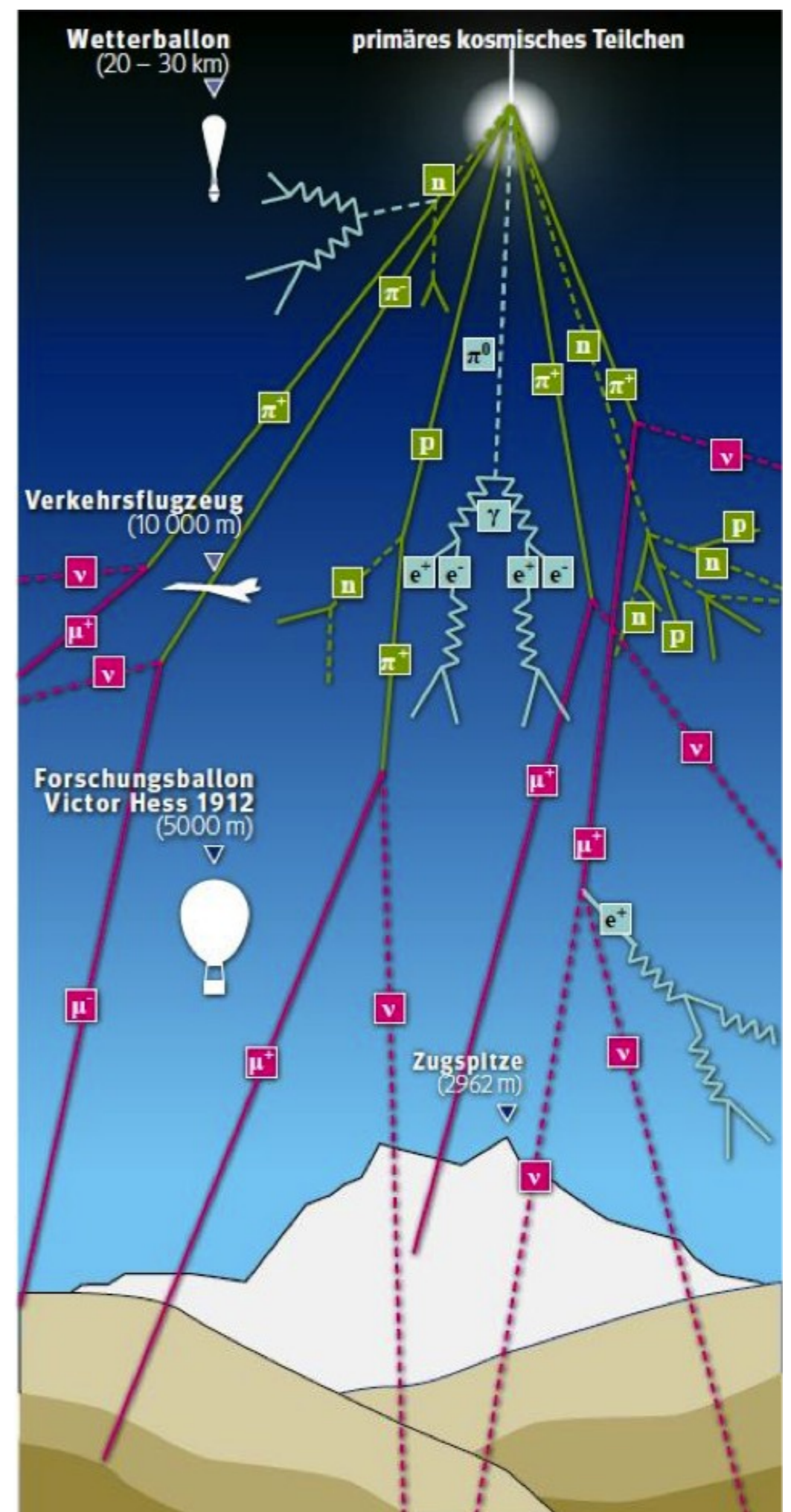
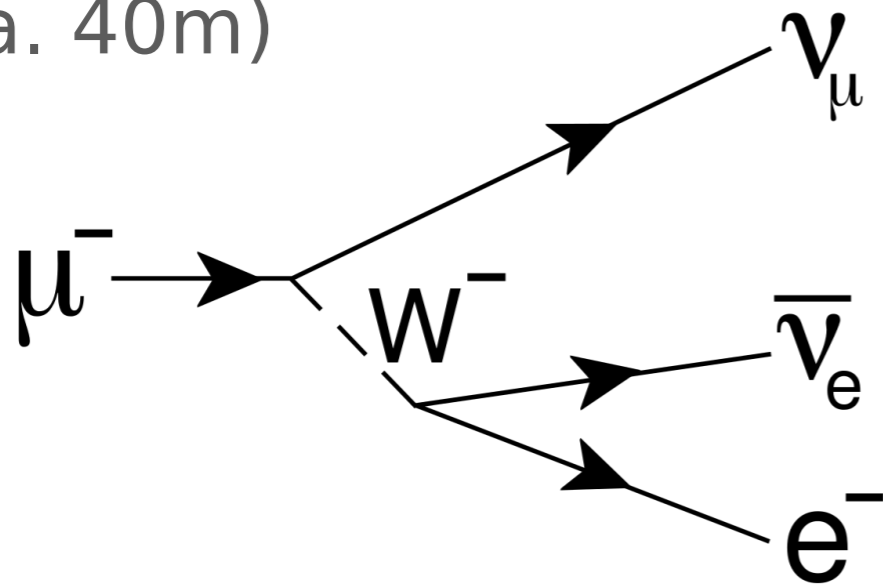
KOSMISCHE TEILCHEN



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

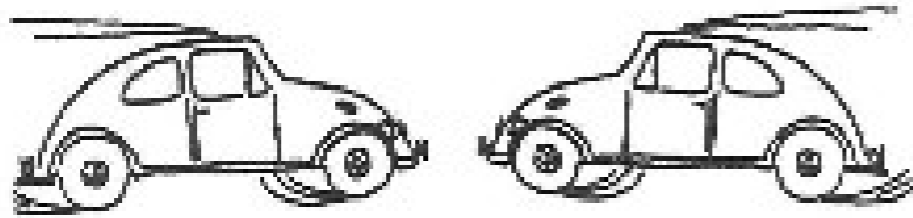
Unser „Periodensystem“

	I	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

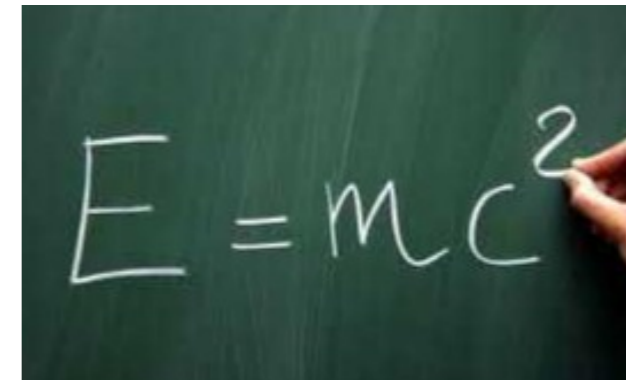
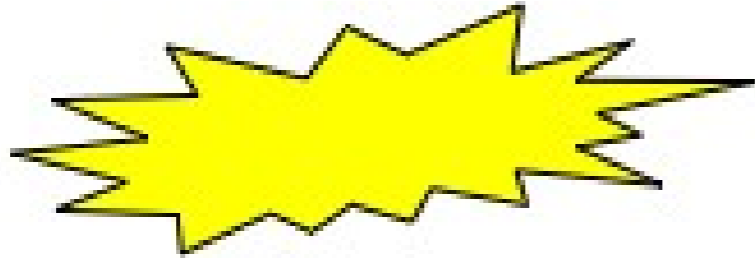
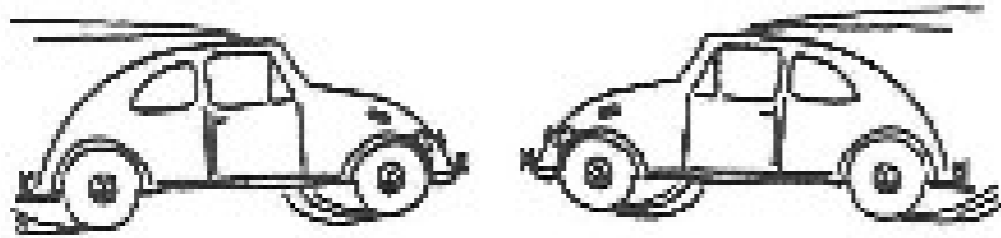
- Nach und nach wurden noch mehr kleinste Teilchen an entdeckt
- Unsere **stabile Materie** besteht nur aus der ersten Spalte
- Die zweite und dritte Spalte sind schwerere Kopien der Teilchen in der ersten Spalte!

stabile Materie

WENN TEILCHEN KOLLIDIEREN...



... ENTSTEHEN NEUE TEILCHEN



mehr Energie



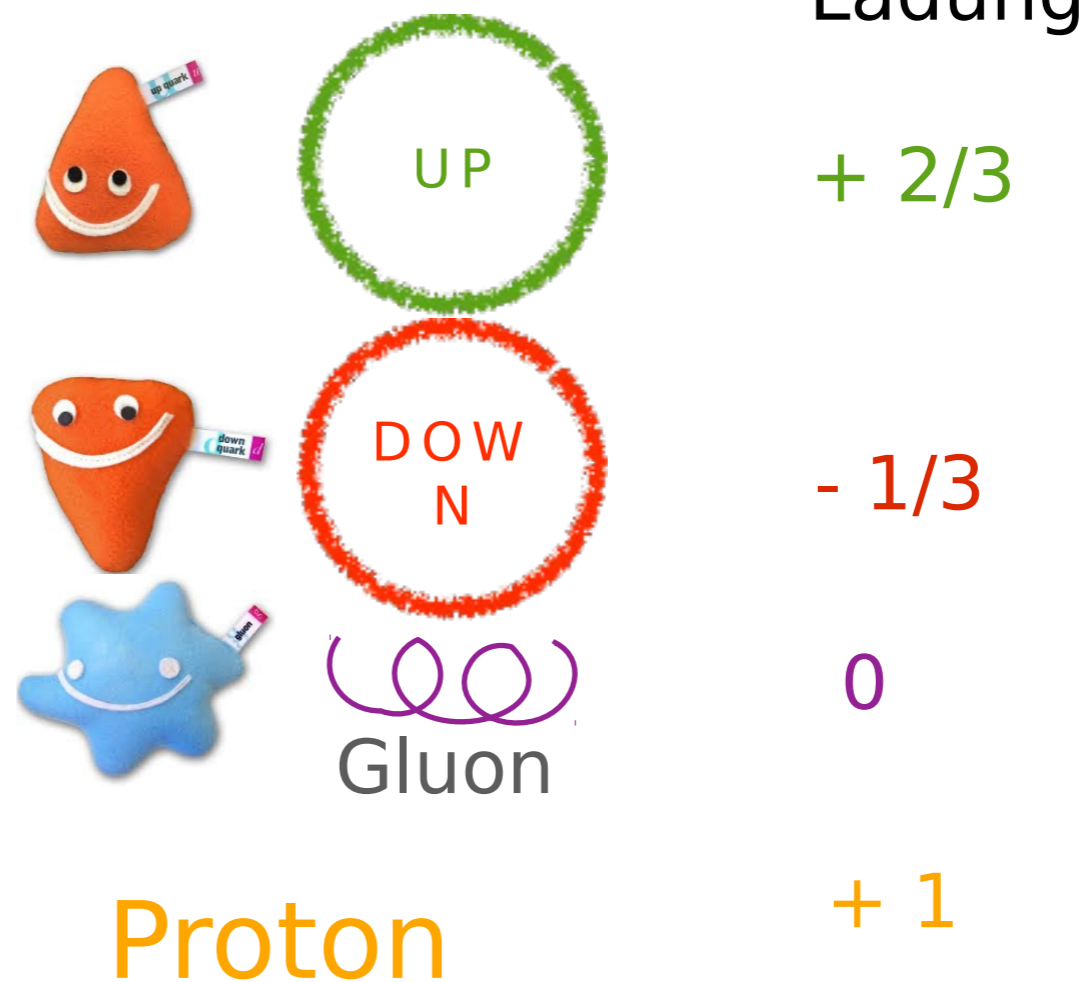
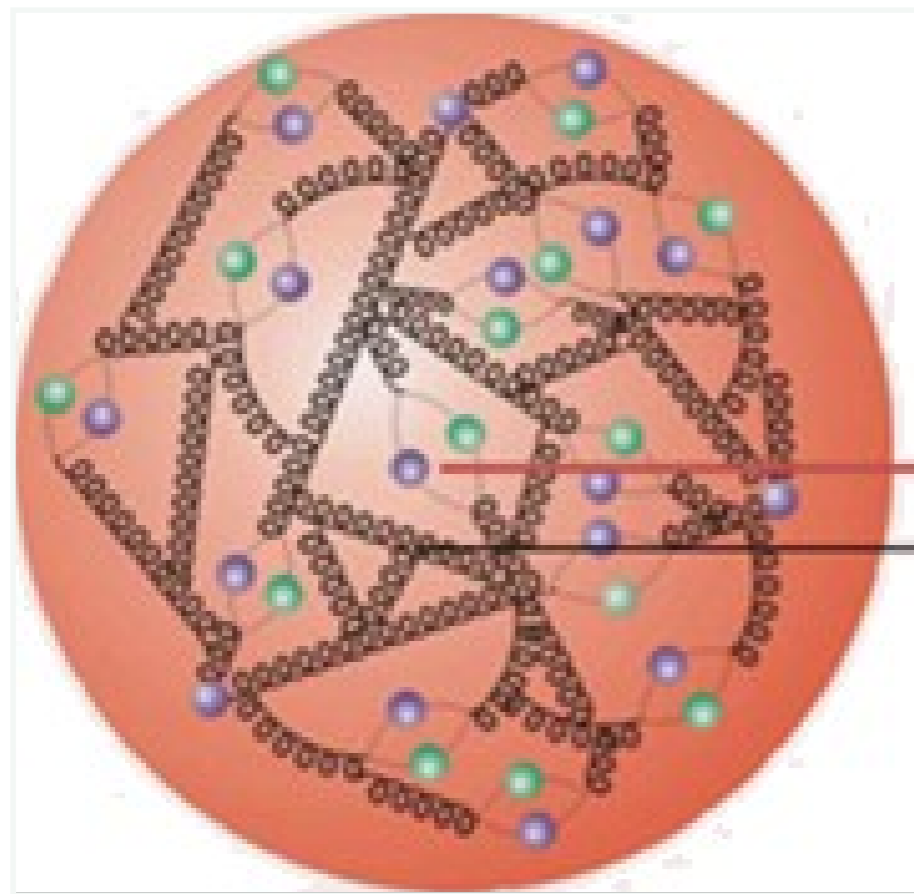
mehr/schwerere
Teilchen



DAS PROTON



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



DAS STANDARDMODELL - ORDNUNG IM SYSTEM

		FERMIONS		
		I	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	

→
Masse

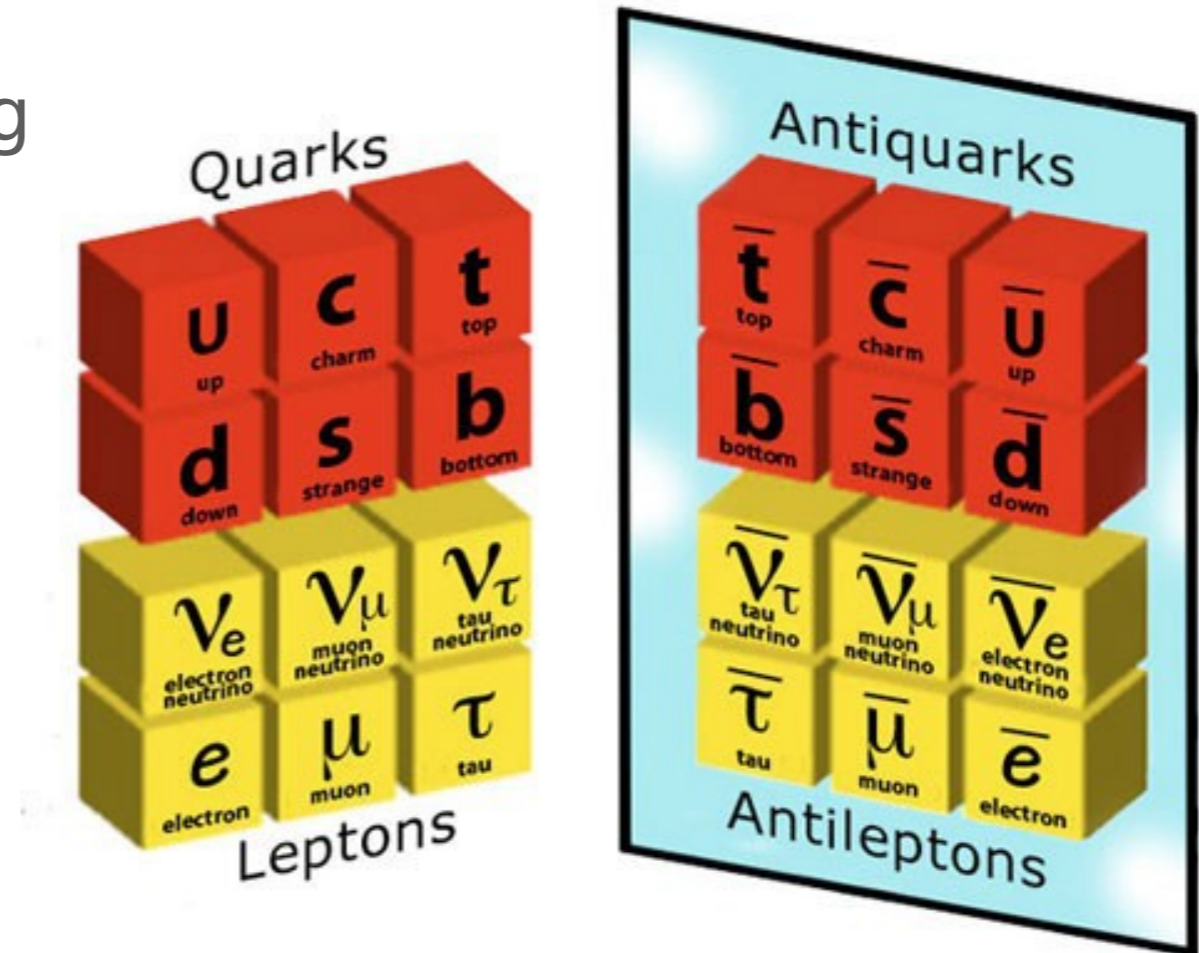
Ladung

$2/3$

$-1/3$

0

-1



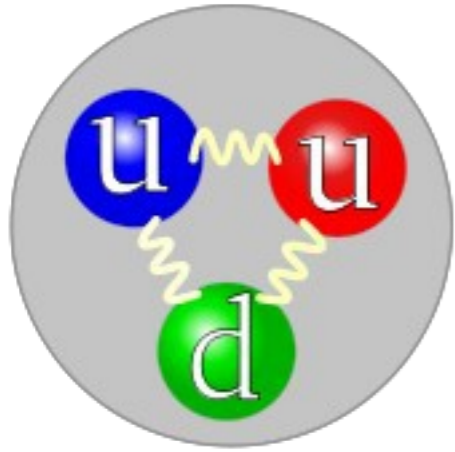
- Weitere Kopien dieser Teilchen mit entgegengesetzter Ladung: Antimaterie
- Aber was hält die Teilchen zusammen?

DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

- Starke Kraft
- Elektromagnetische Kraft
- Schwache Kraft
- Gravitation

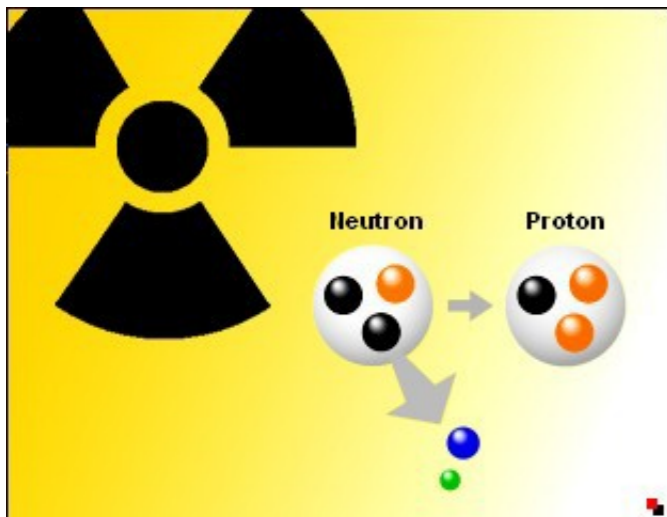
DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE



- 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



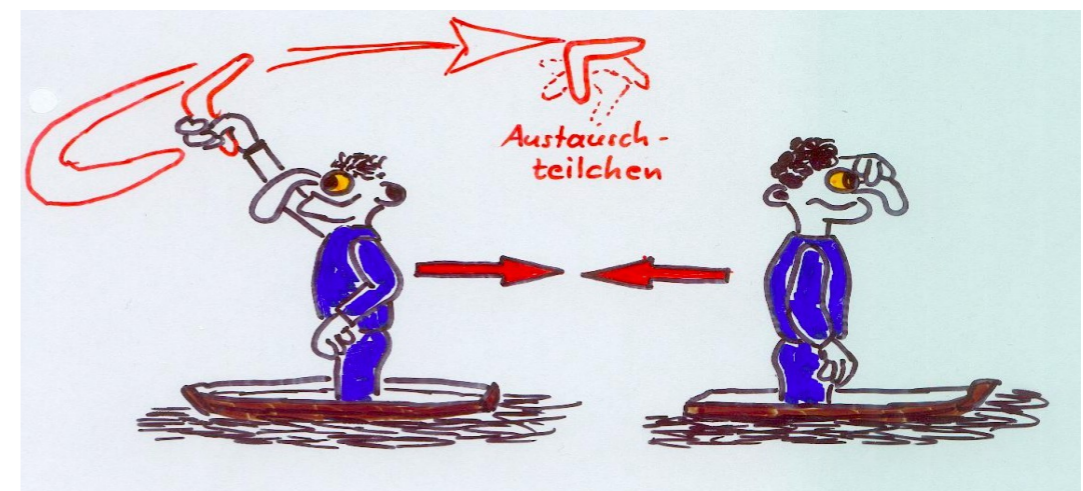
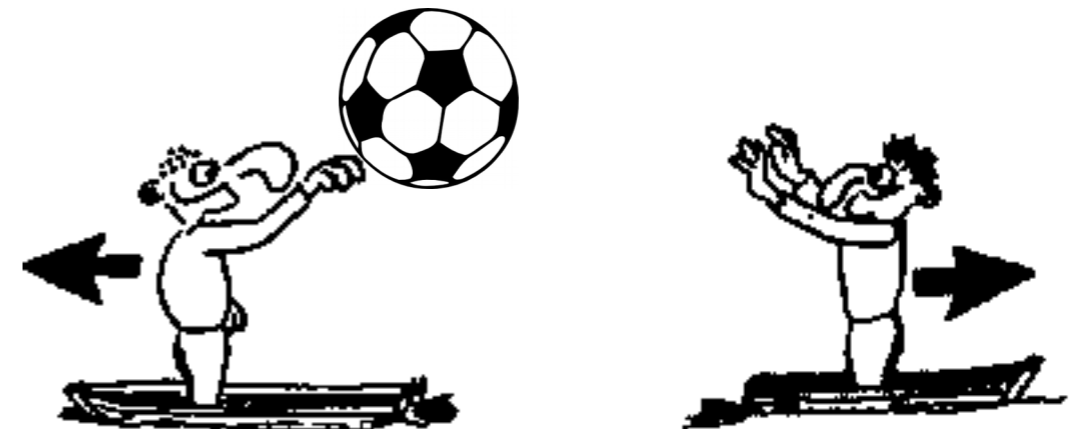
- Schwache Kraft: verantwortlich für radioaktive Zerfälle von Atomkernen (wandelt Quarks oder Leptonen ineinander um);
Austauschteilchen: W,Z Bosonen



DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN

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

	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



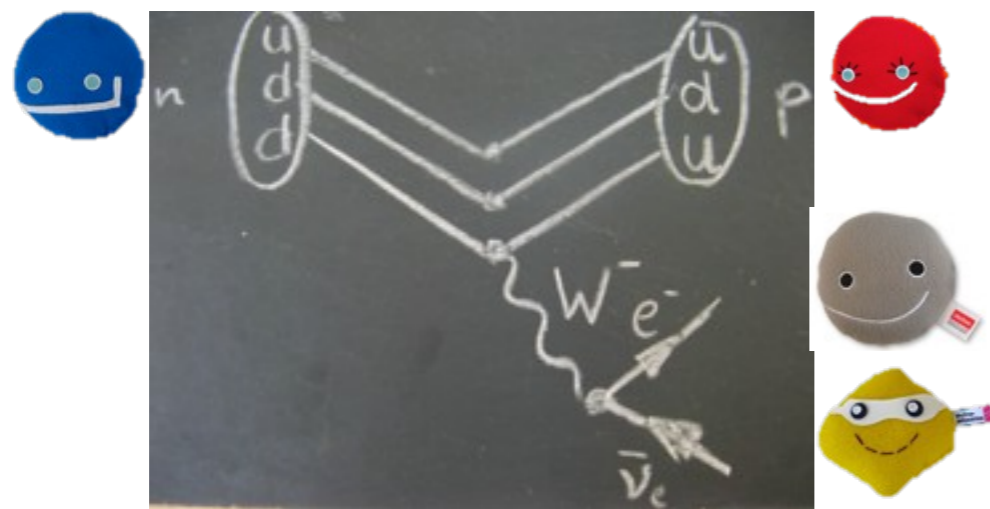
DAS W-BOSON



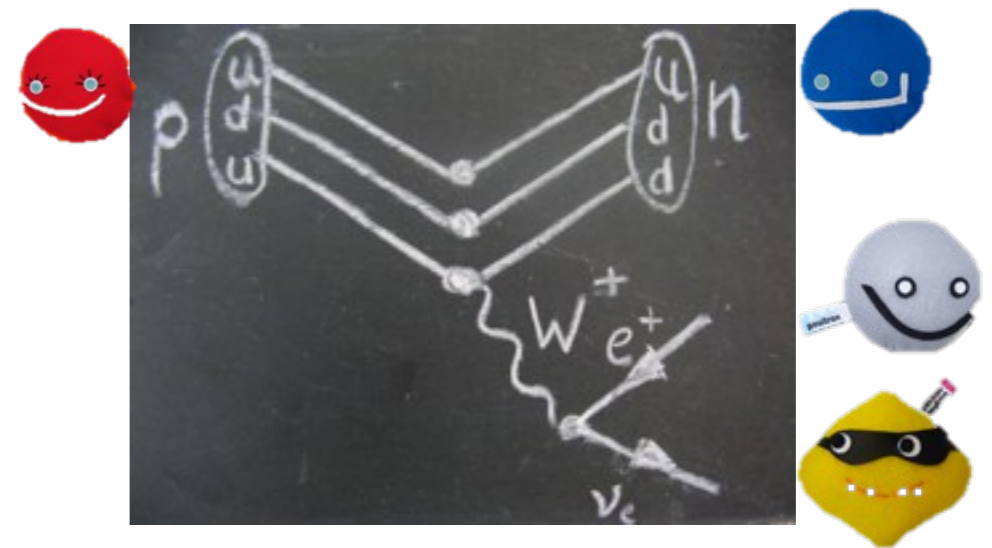
Das **W-Boson**

DER BETA-ZERFALL & DAS W-BOSON

Beta-Minuszerfall (W-)

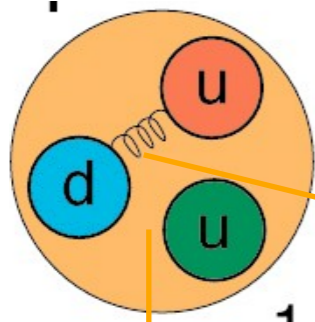


Beta-Pluszerfall (W+)

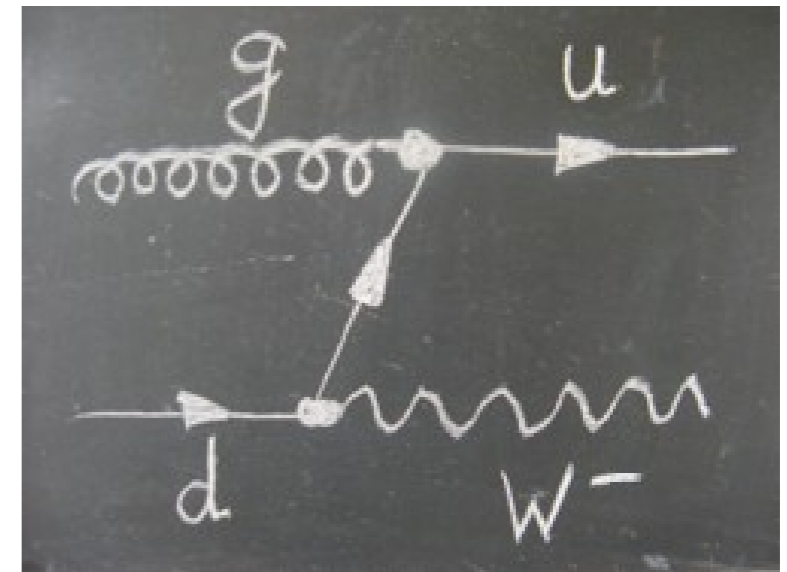
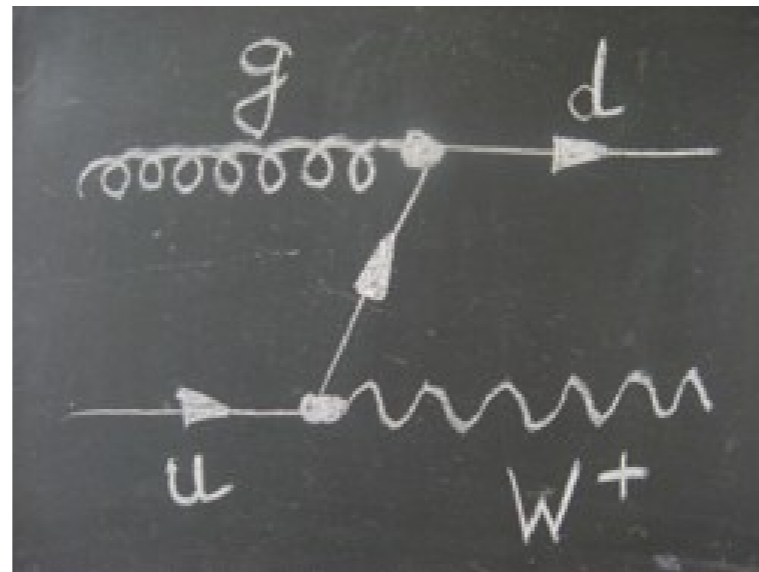


PRODUKTION DER W-BOSONEN AM LHC

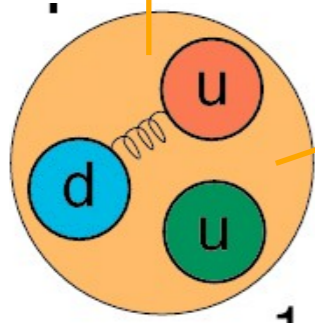
P1



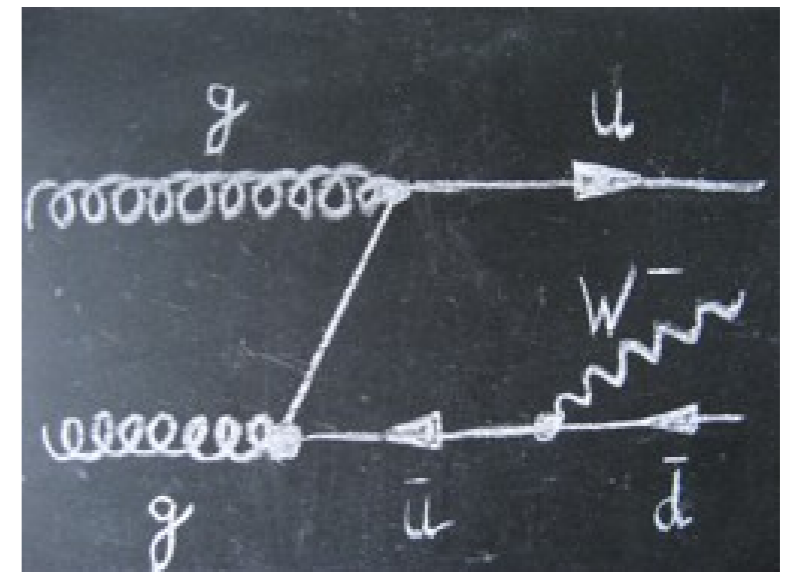
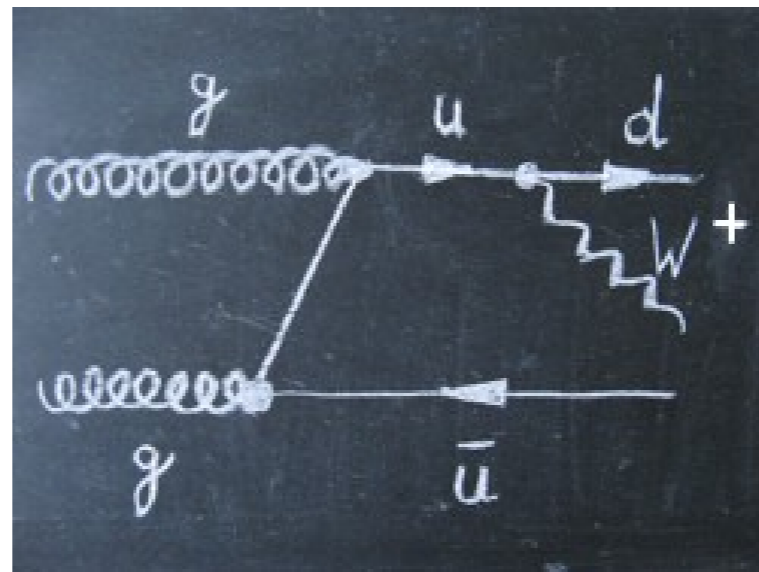
60%



P2



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} ?

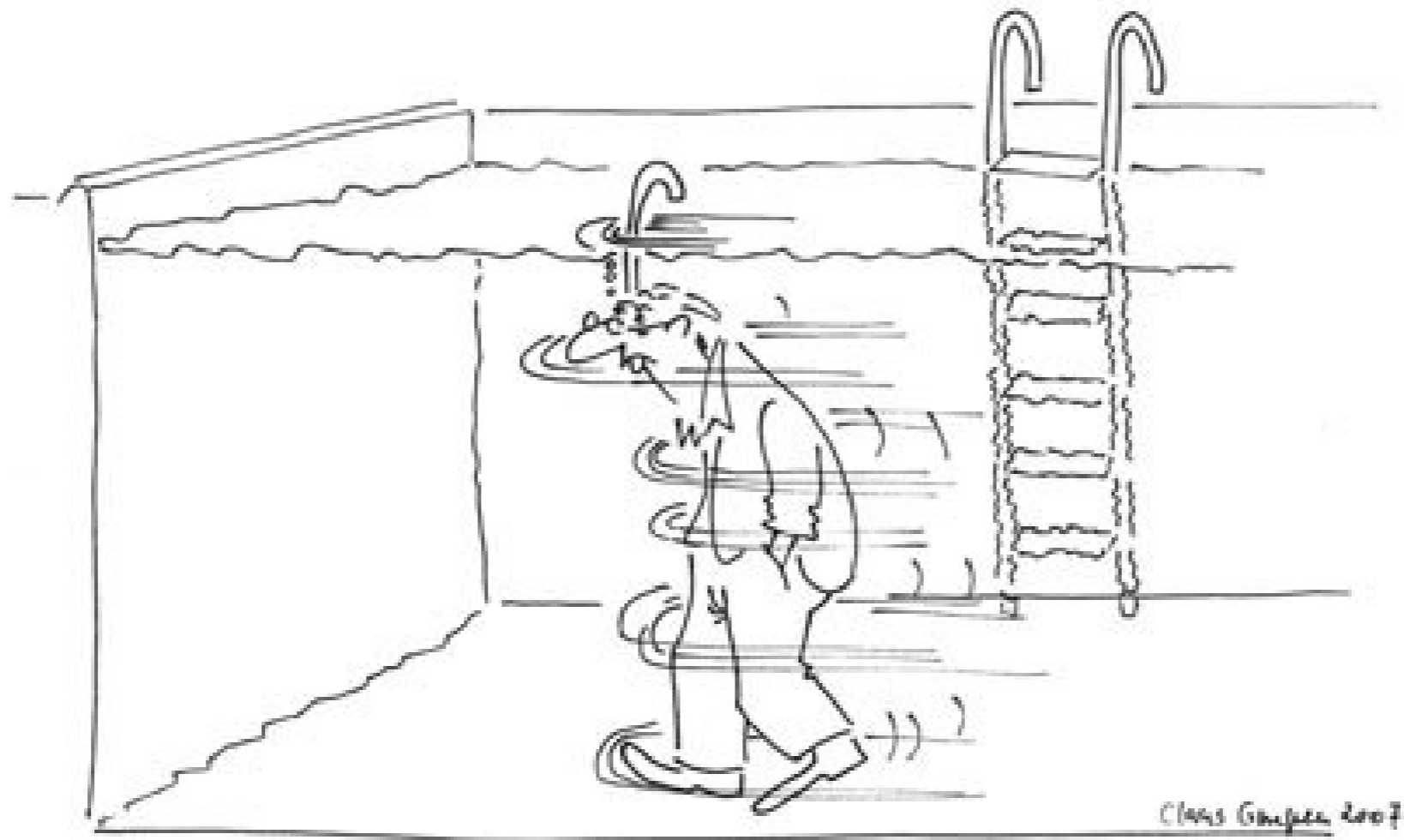
DAS STANDARDMODELL UND DAS HIGGS TEILCHEN

- 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, dass 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



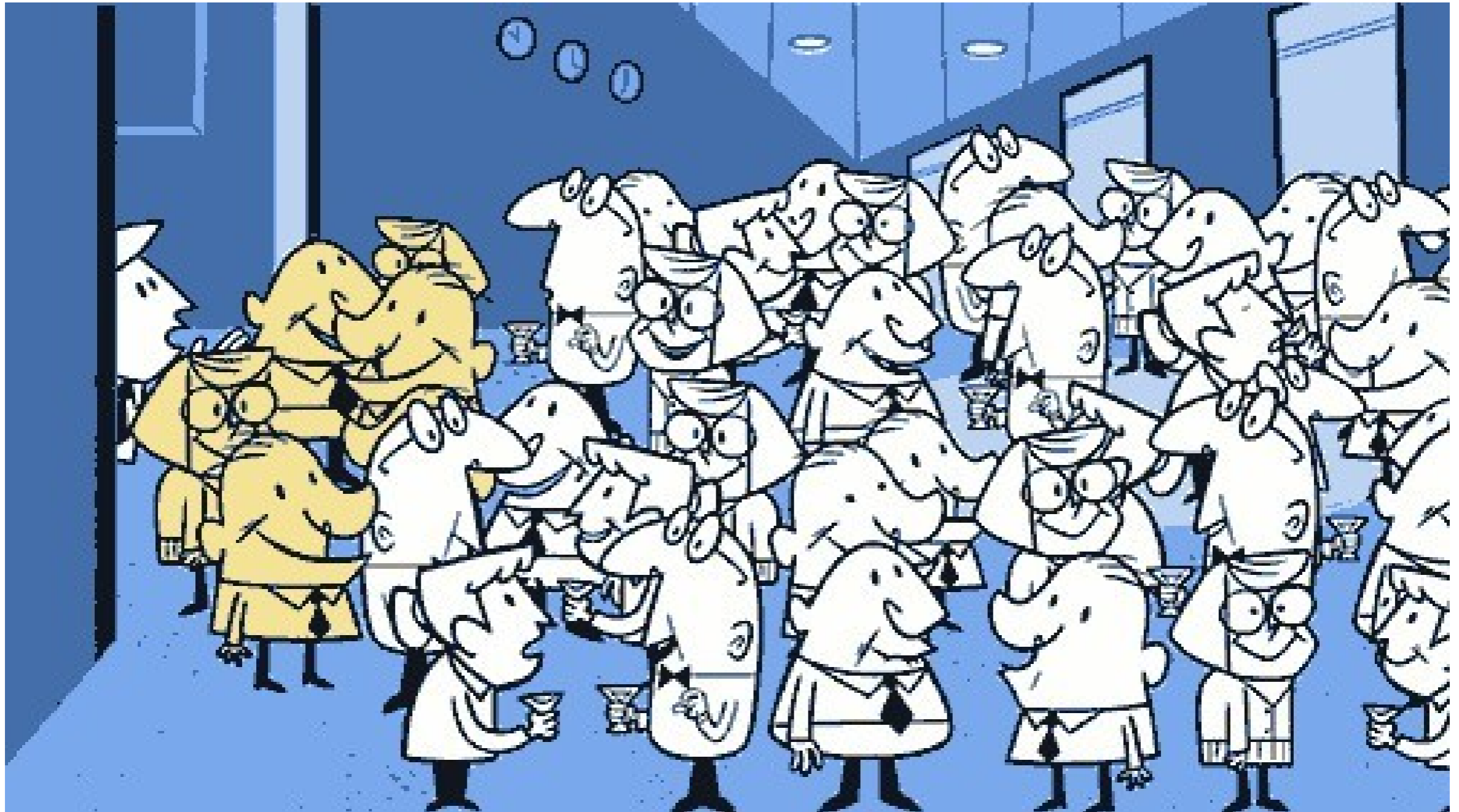
- ▶ Eine bekannte Person betritt den Raum

DER HIGGS-MECHANISMUS



- ▶ Eine Kellner (=Photon) betritt den Raum

DAS HIGGS-BOSON...



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

WIE OFT ENTSTEHT EIN HIGGS BOSON?



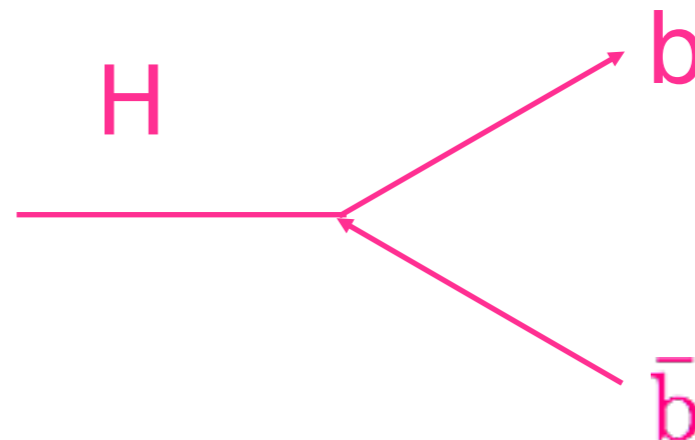
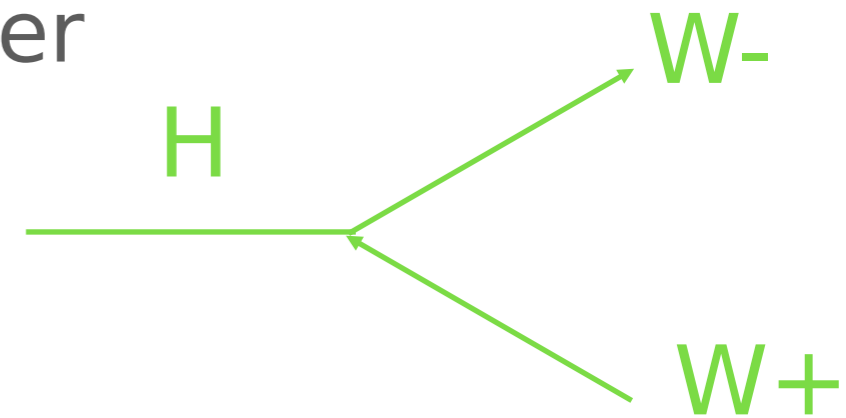
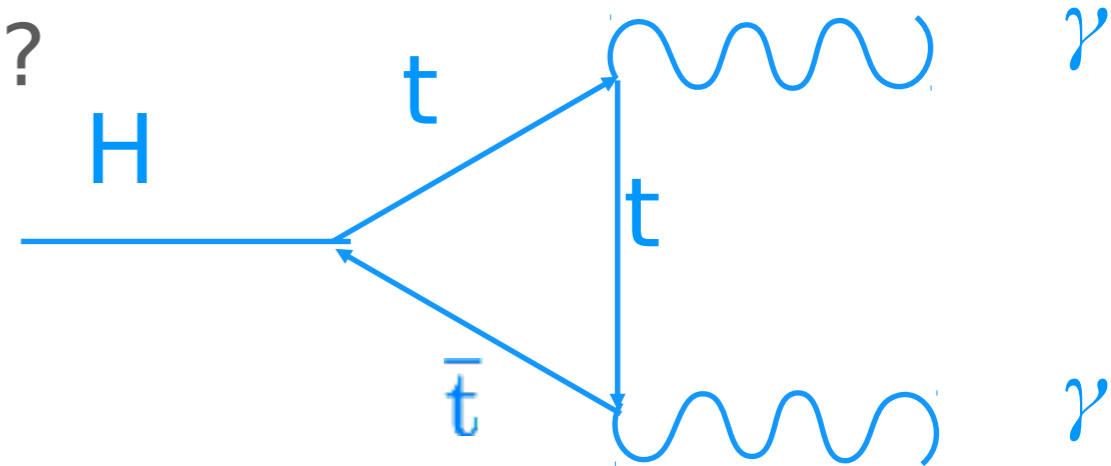
... etwa alle 10 Milliarde Ereignisse 1x ...

WIE FINDET MAN DAS HIGGS?

Was sagt die Theorie über das Higgs?

-> Das Higgs zerfällt sofort wieder

- in 2 Photonen oder
- in 2 W-Bosonen (die zerfallen wieder) oder
- in 2 Z-Bosonen (die zerfallen auch) oder
- in 2 b-Quarks
- und so weiter

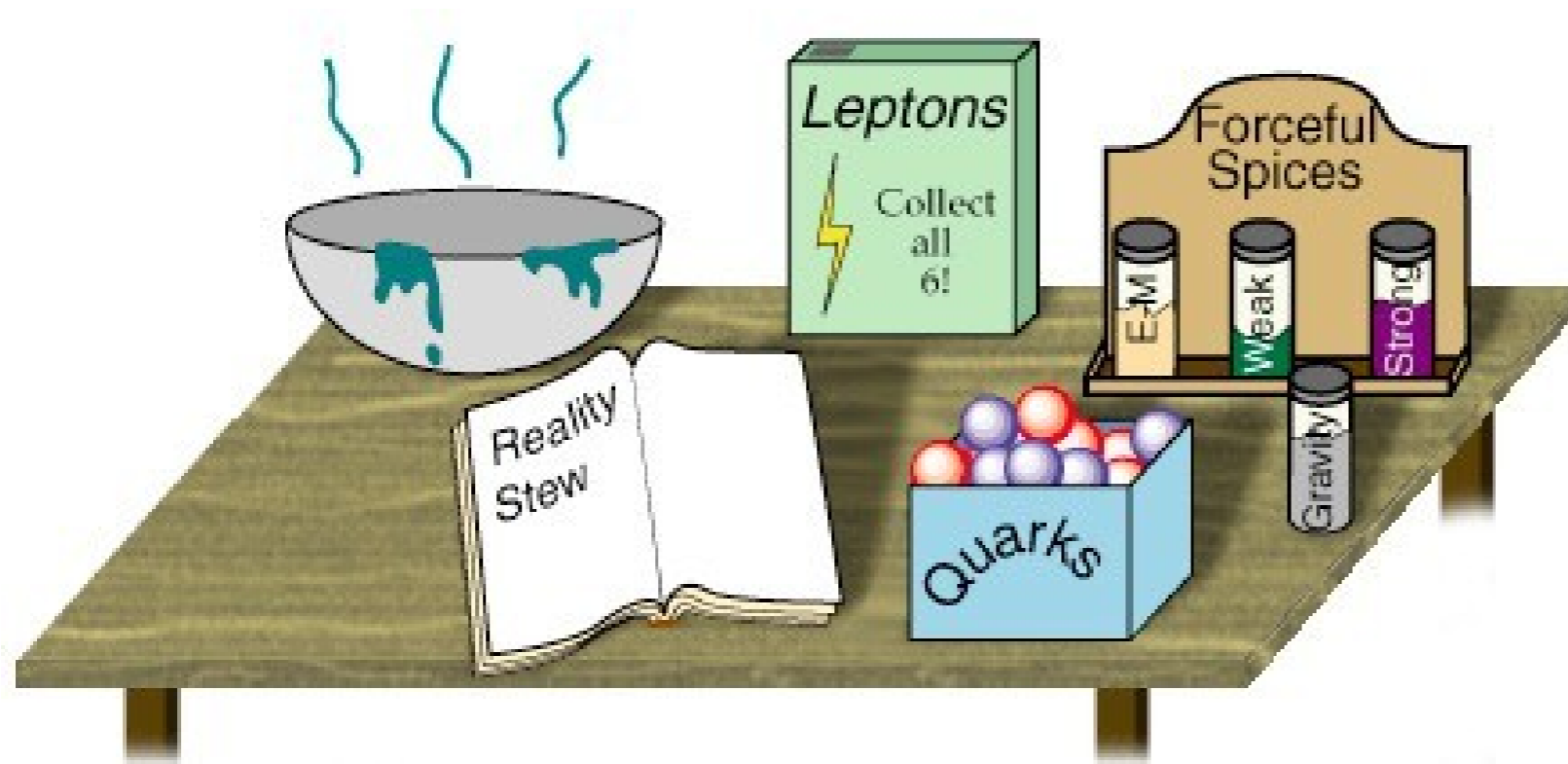


DAS STANDARDMODELL - ALLES KLAR?

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



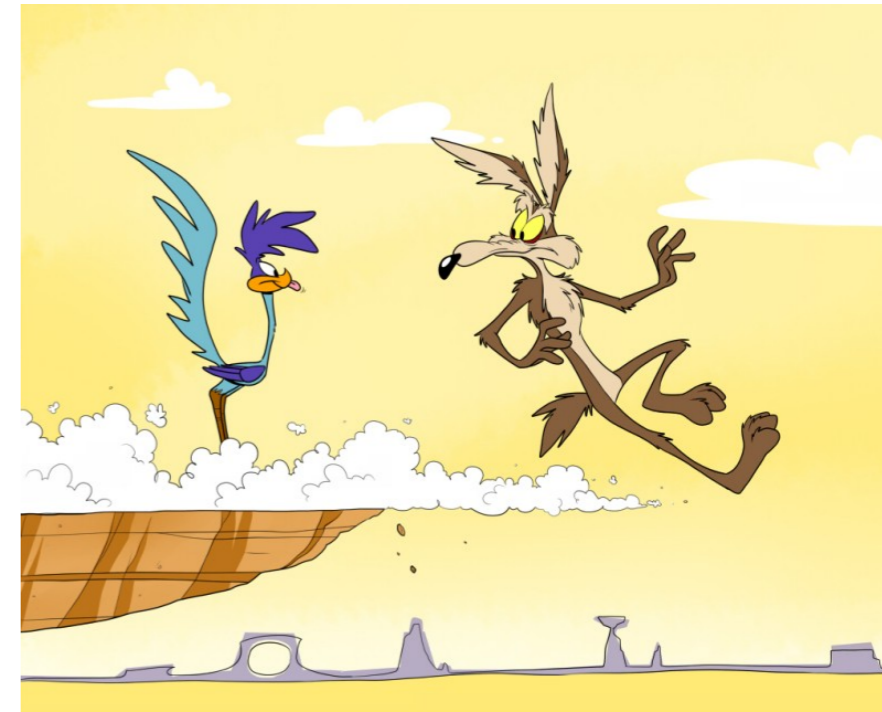
Das Standardmodell - alles klar?



Noch lange nicht!!!

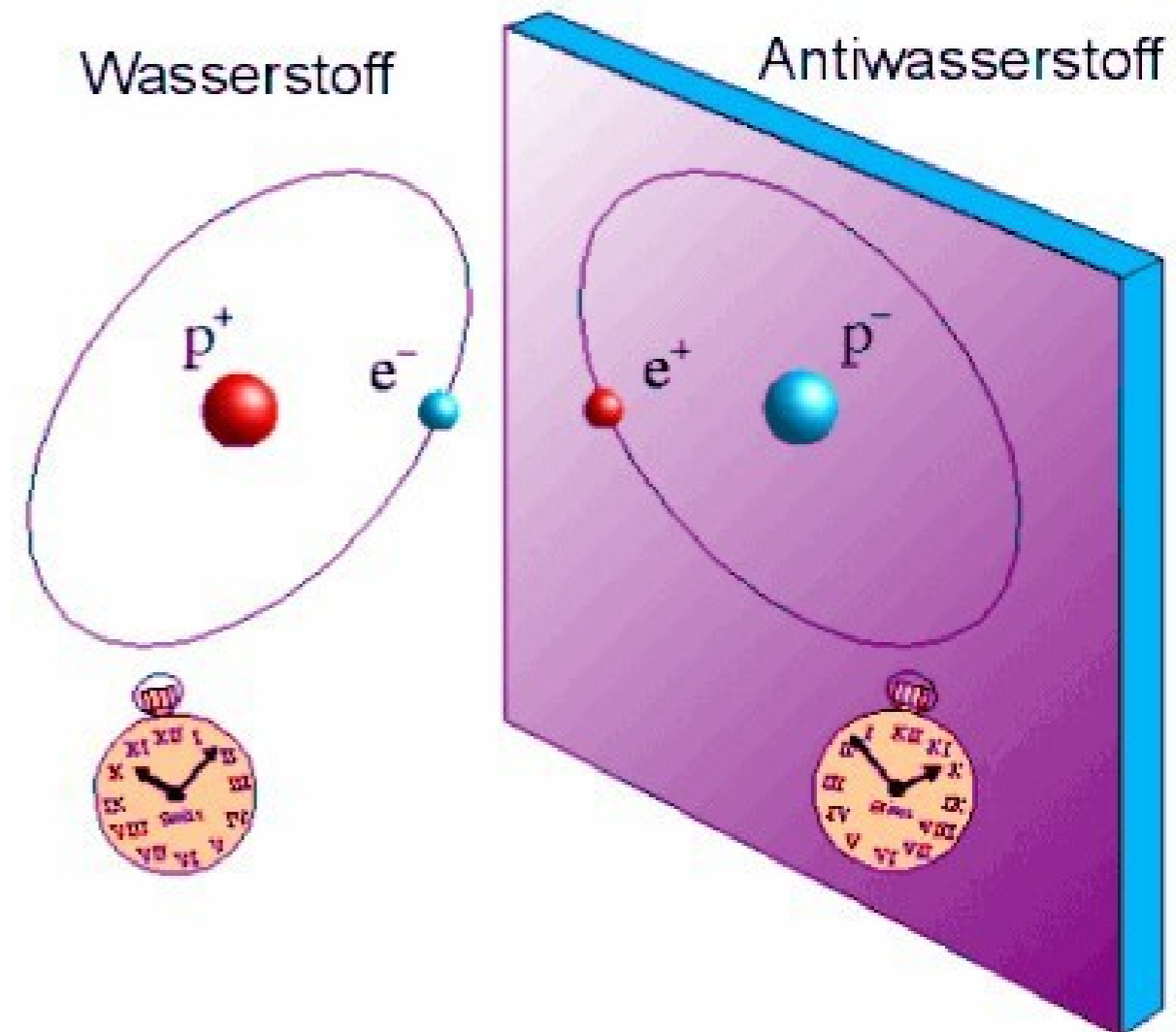
GRAVITATION

- 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



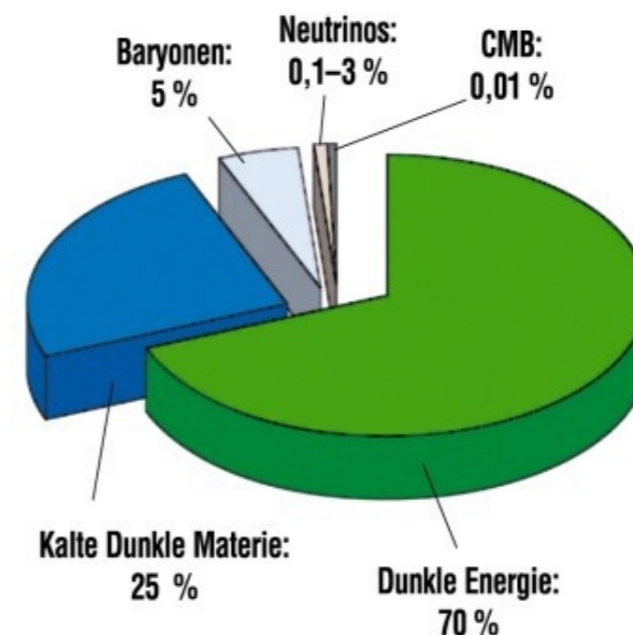
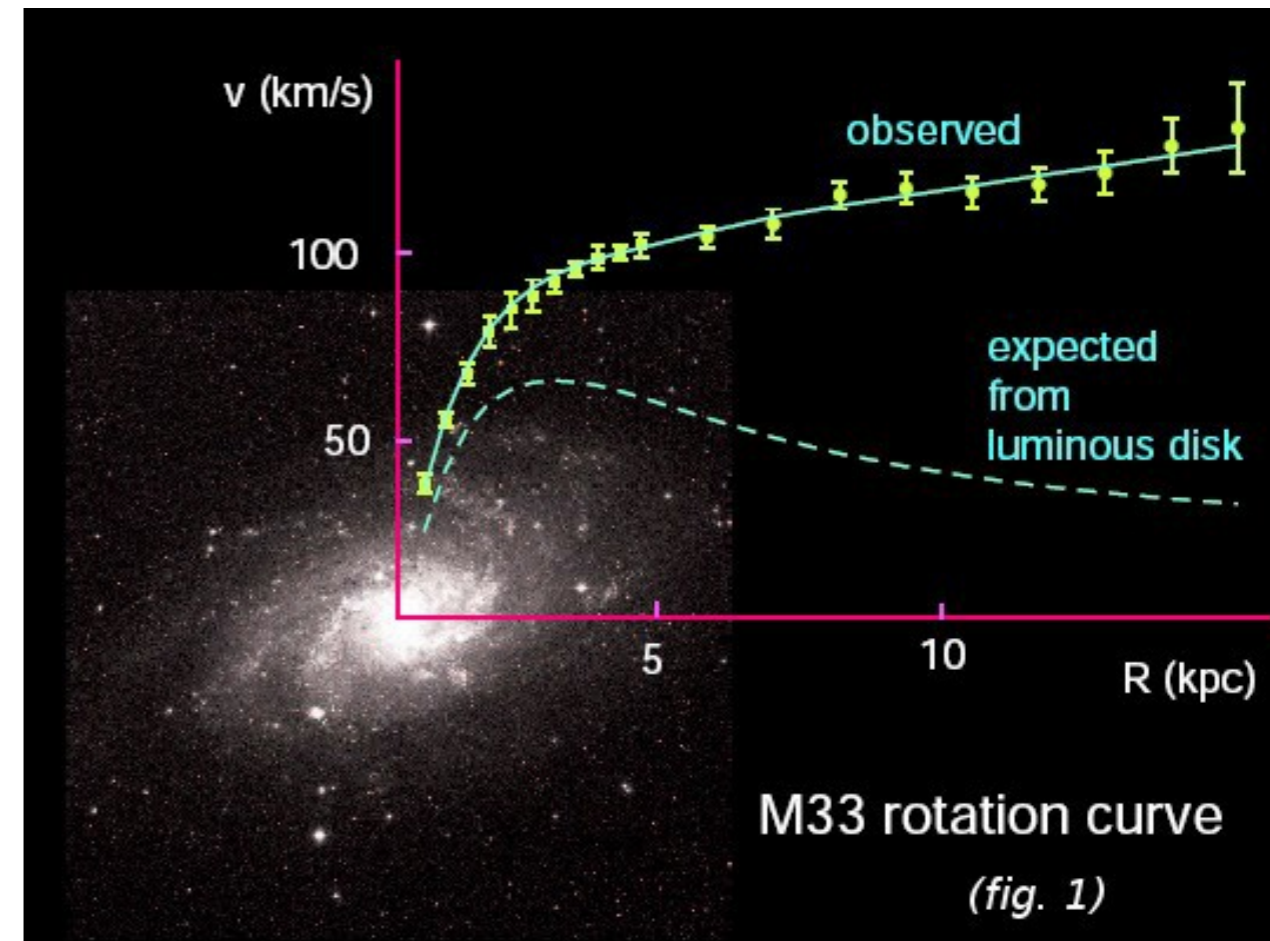
WARUM GIBT ES DAS UNIVERSUM ÜBERHAUPT?

- 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!

The **PARTICLEZOO** Sewing the fabric of spacetime

ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

	FERMIONS			BOSONS		
	I	II	III			
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

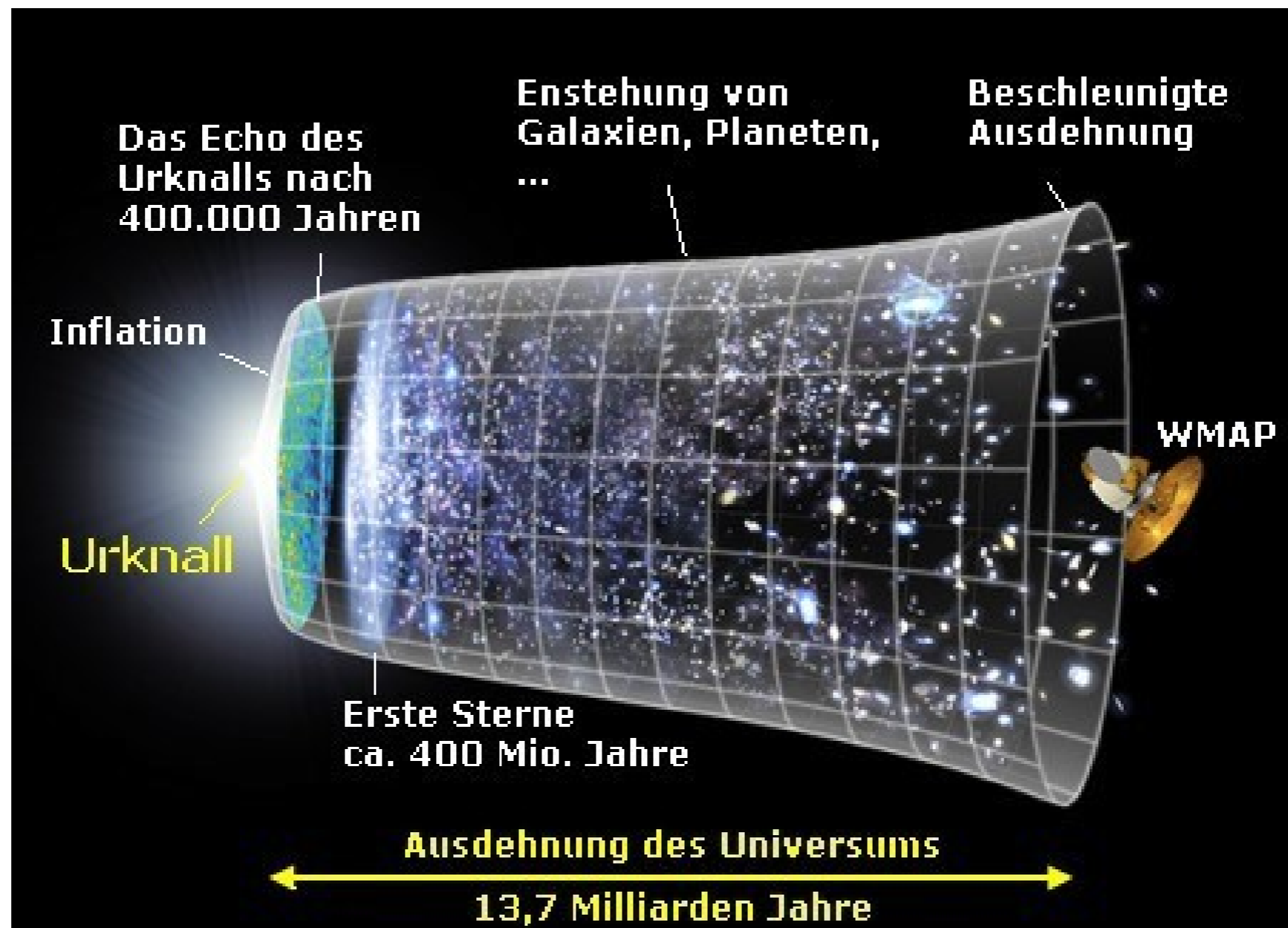
BEYOND THE STANDARD MODEL:

HYPOTHETICALS	 T TACHYON	 G GRAVITON	THEORETICALS	 $?$ DARK MATTER	 H HIGGS BOSON
---------------	---	--	--------------	---	--

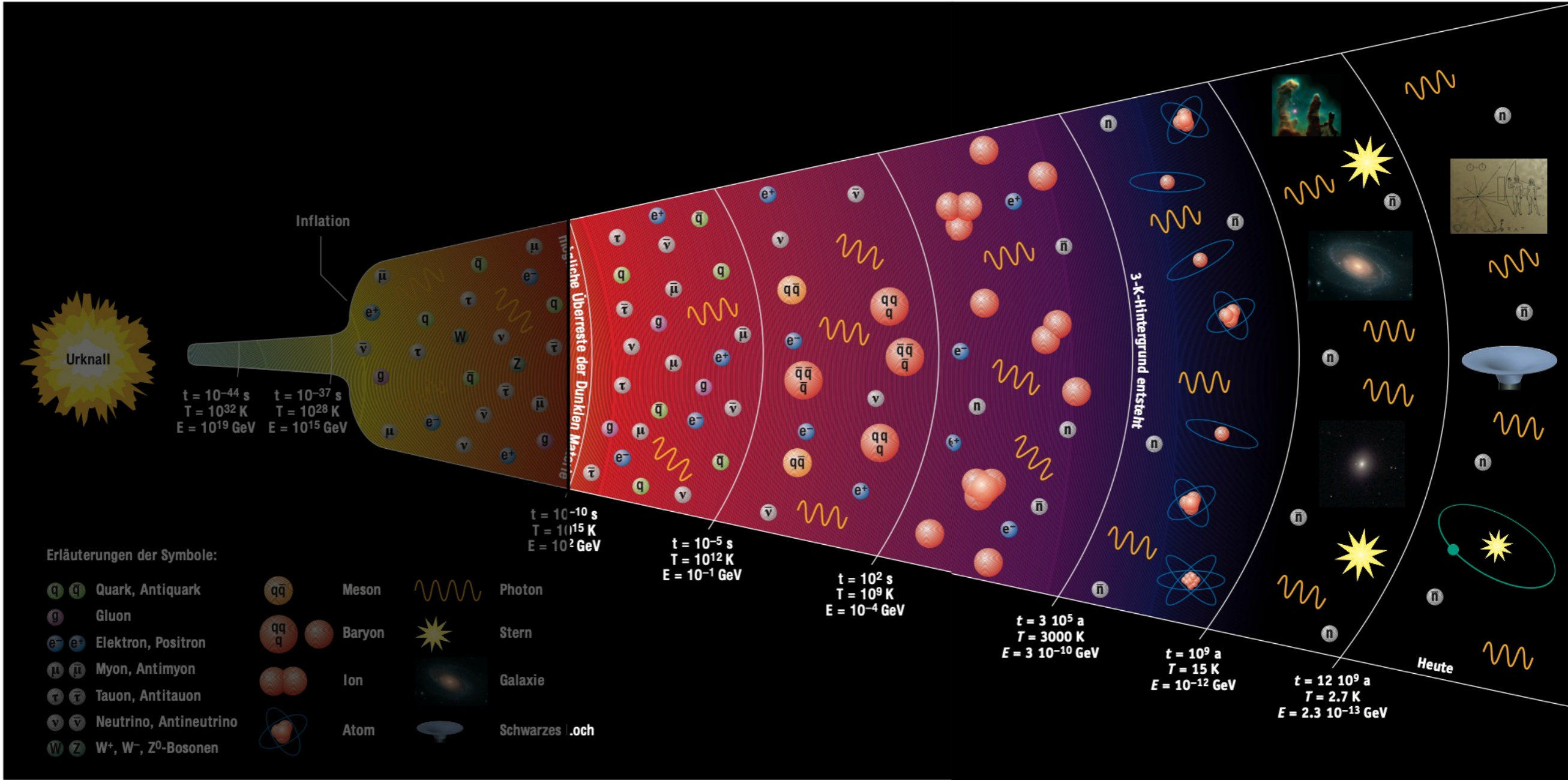
- Wie können wir die Gravitation mit unserem SM vereinen?
- Wieso ist die Materie-Antimaterie Symmetrie gebrochen?
- Aus welchen Teilchen besteht dunkle Materie?
- Wie können wir solche Fragen beantworten?

VERBINDUNG ZWISCHEN TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

- Beobachtung des Weltraums um herauszufinden wie das Universum entstanden ist



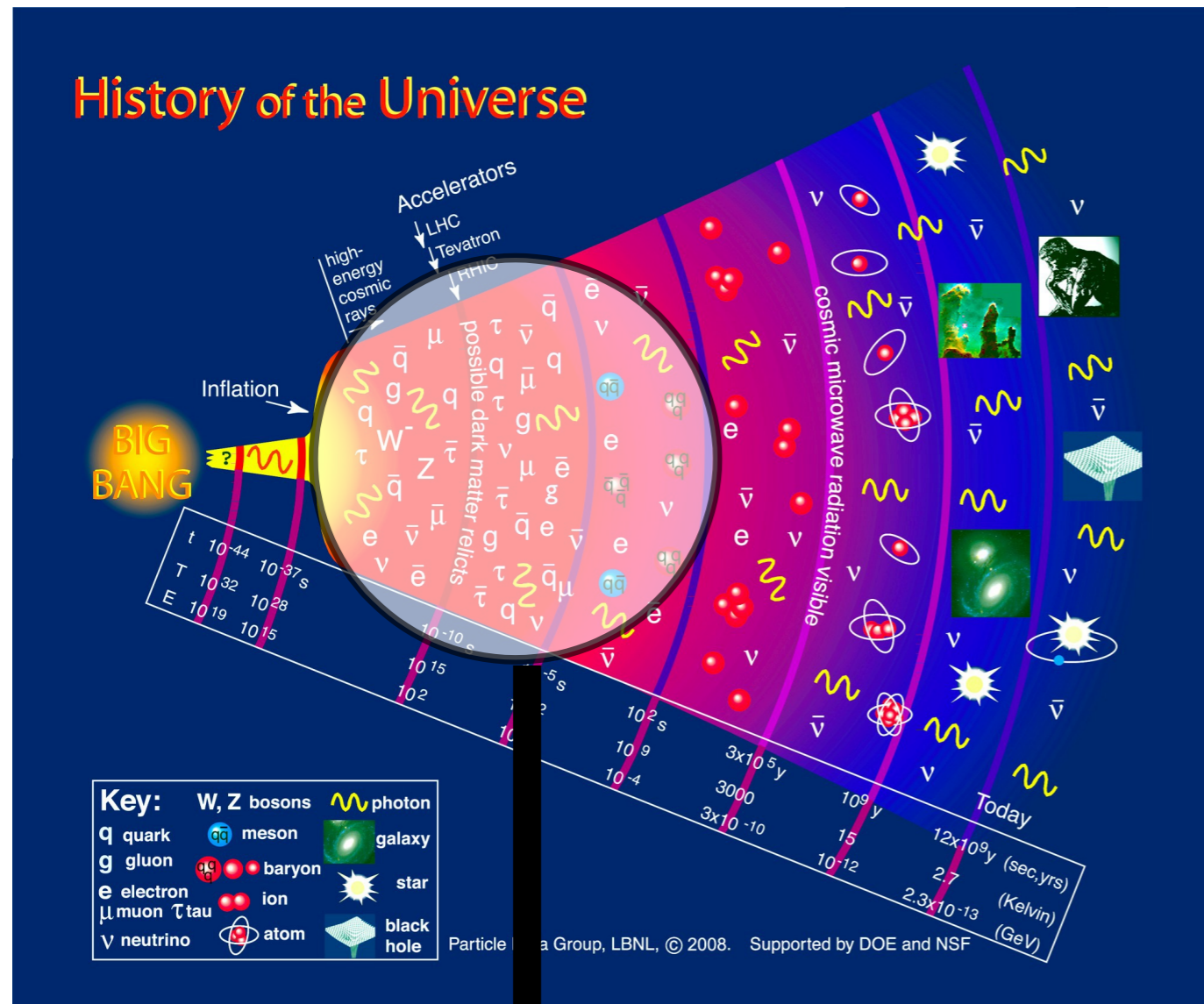
GESCHICHTE DES UNIVERSUMS



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 → heute Nachmittag!

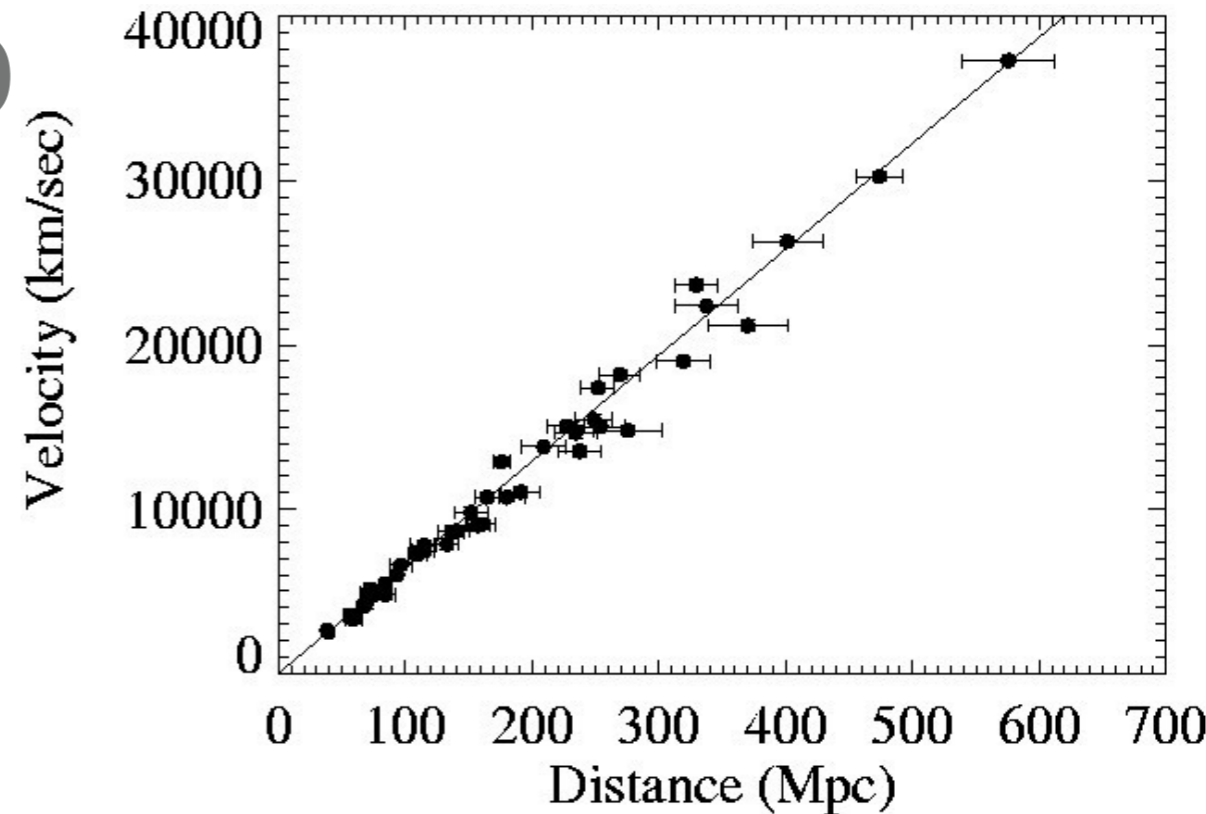
BACKUP

VERBINDUNG ZWISCHEN TEILCHENPHYSIK UND

- 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

