



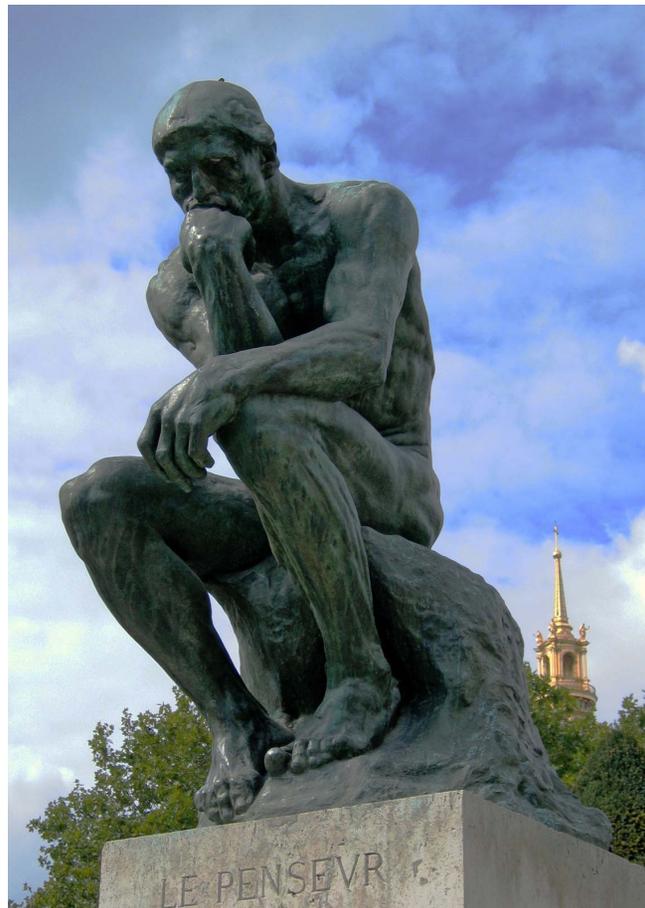
# MASTERCLASS

---

Was ist überhaupt Teilchenphysik und warum macht man das?

# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN

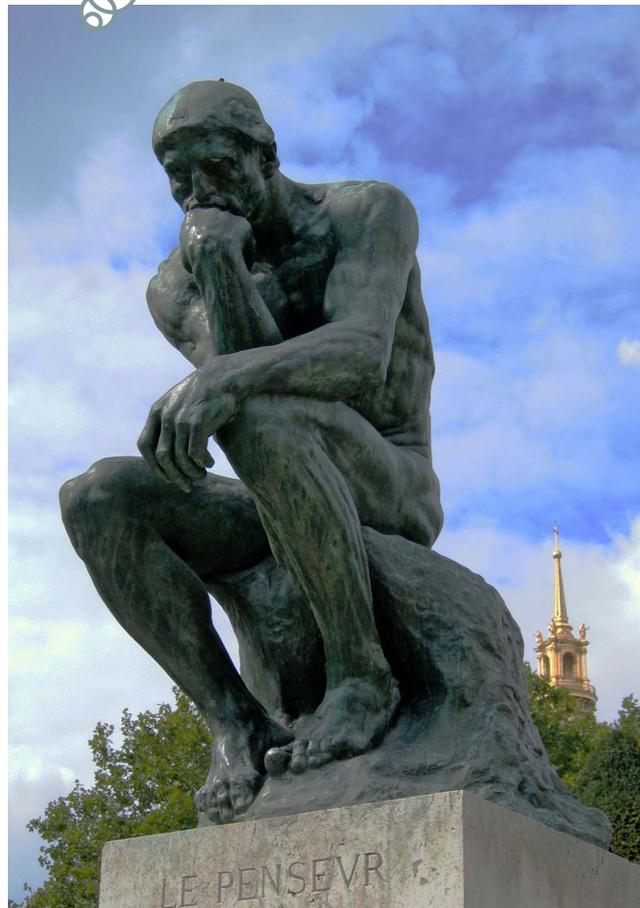
---



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN

---

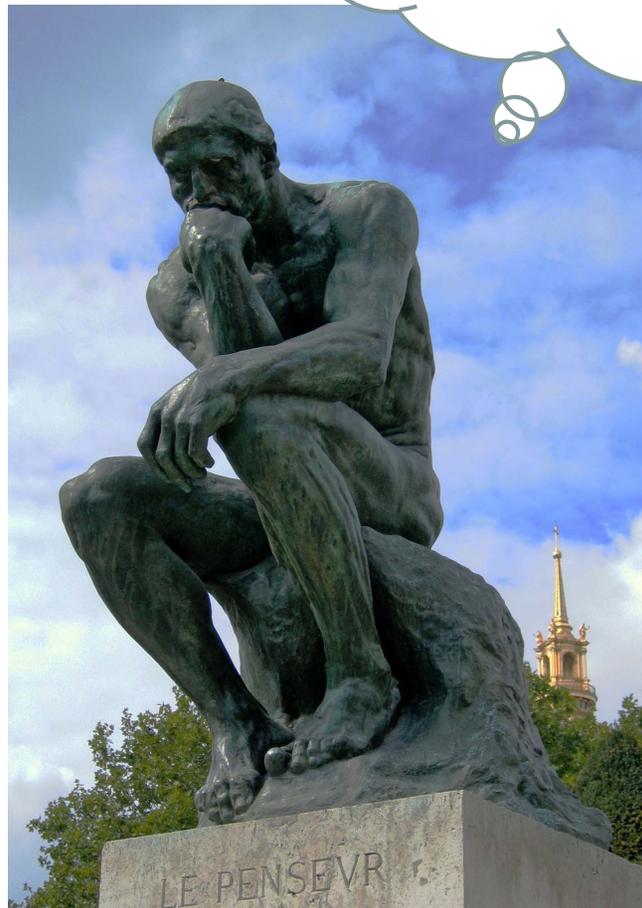
Ich habe  
Hunger, wo gibt  
es Essen?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN

---

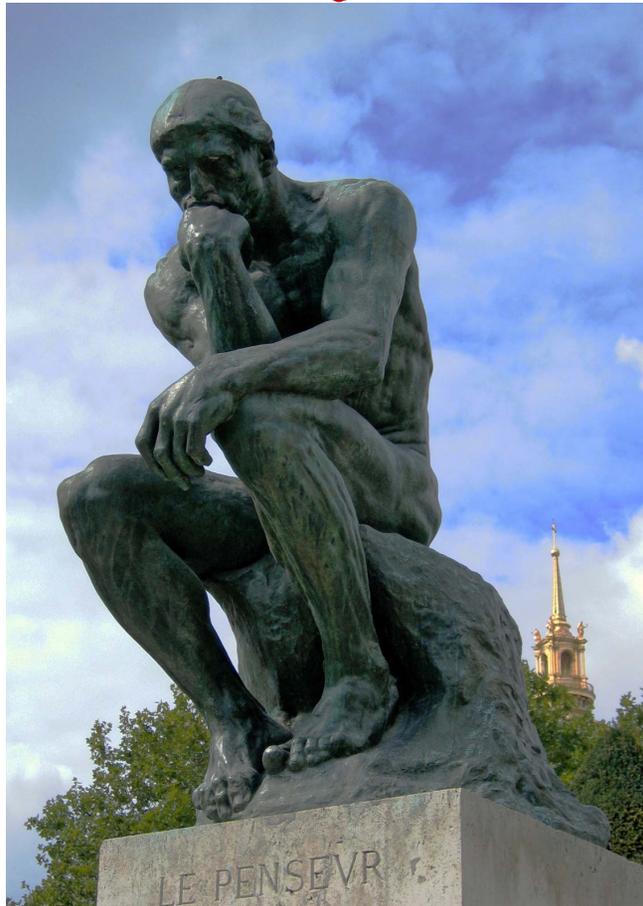
Ich bin satt und mir ist  
langweilig – was in  
mir denkt überhaupt?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

---

Woraus  
bestehe ich  
eigentlich?

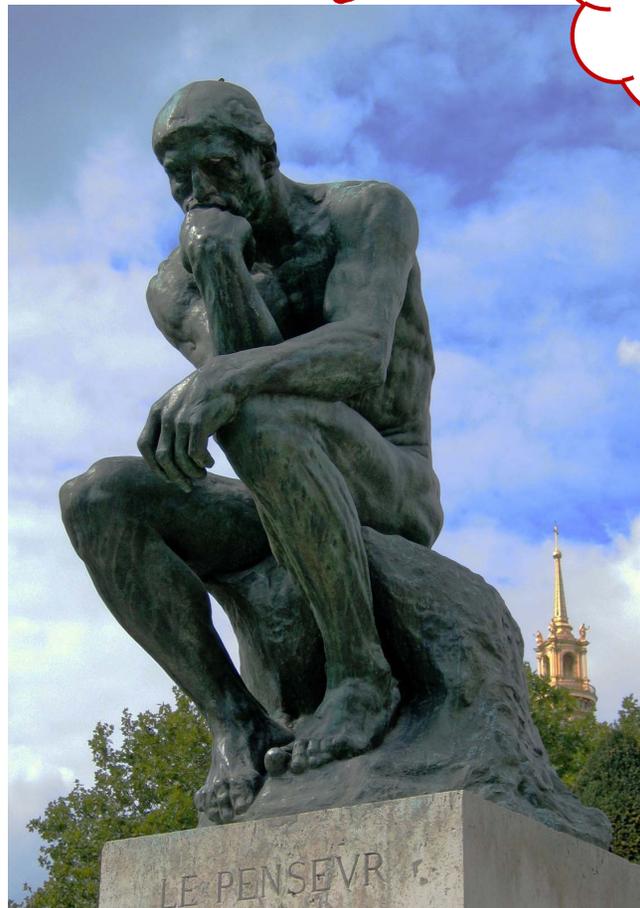


# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

---

Woraus  
bestehe ich  
eigentlich?

Und woraus  
besteht das  
Universum?



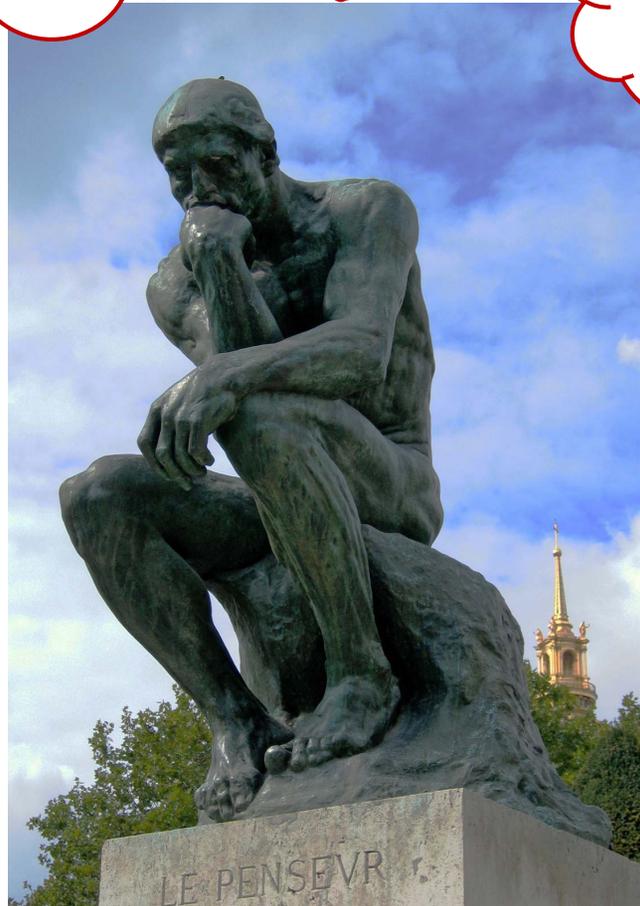
# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

---

Was ist  
überhaupt das  
Universum?

Woraus  
bestehe ich  
eigentlich?

Und woraus  
besteht das  
Universum?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

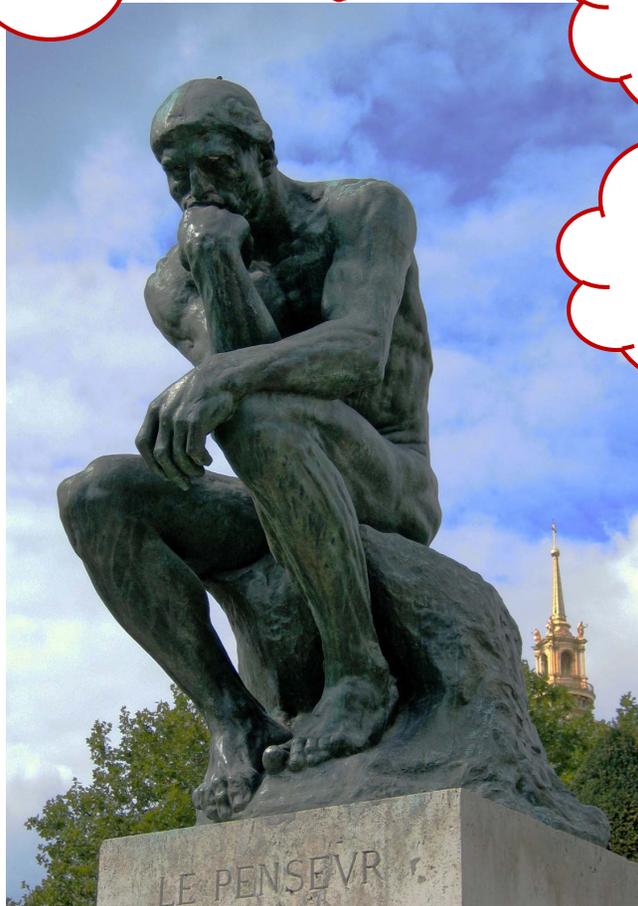
---

Was ist  
überhaupt das  
Universum?

Woraus  
bestehe ich  
eigentlich?

Und woraus  
besteht das  
Universum?

Und wie ist  
das alles  
entstanden?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

---

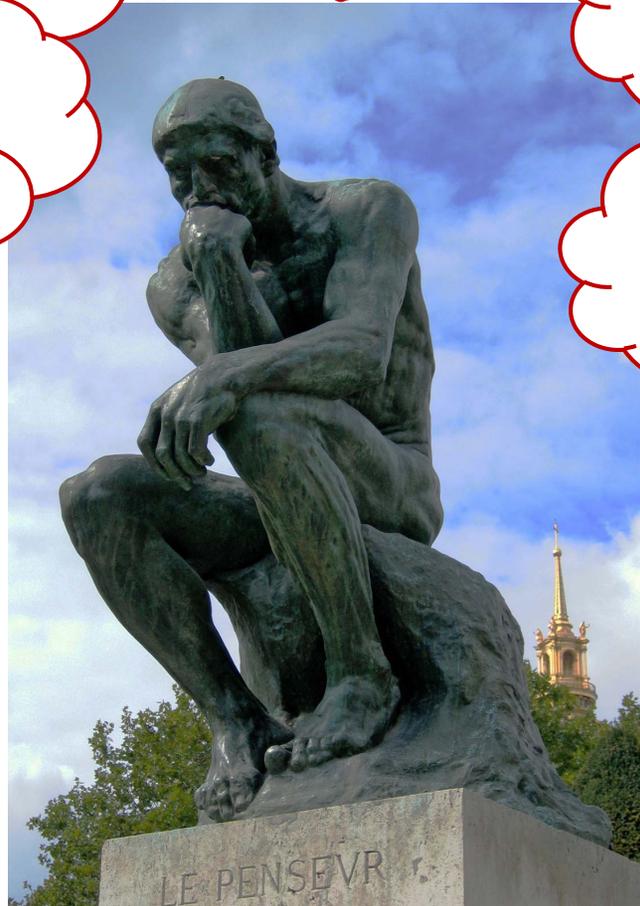
Was ist  
überhaupt das  
Universum?

Woraus  
bestehe ich  
eigentlich?

Und woraus  
besteht das  
Universum?

Warum und wie  
funktioniert es?

Und wie ist  
das alles  
entstanden?

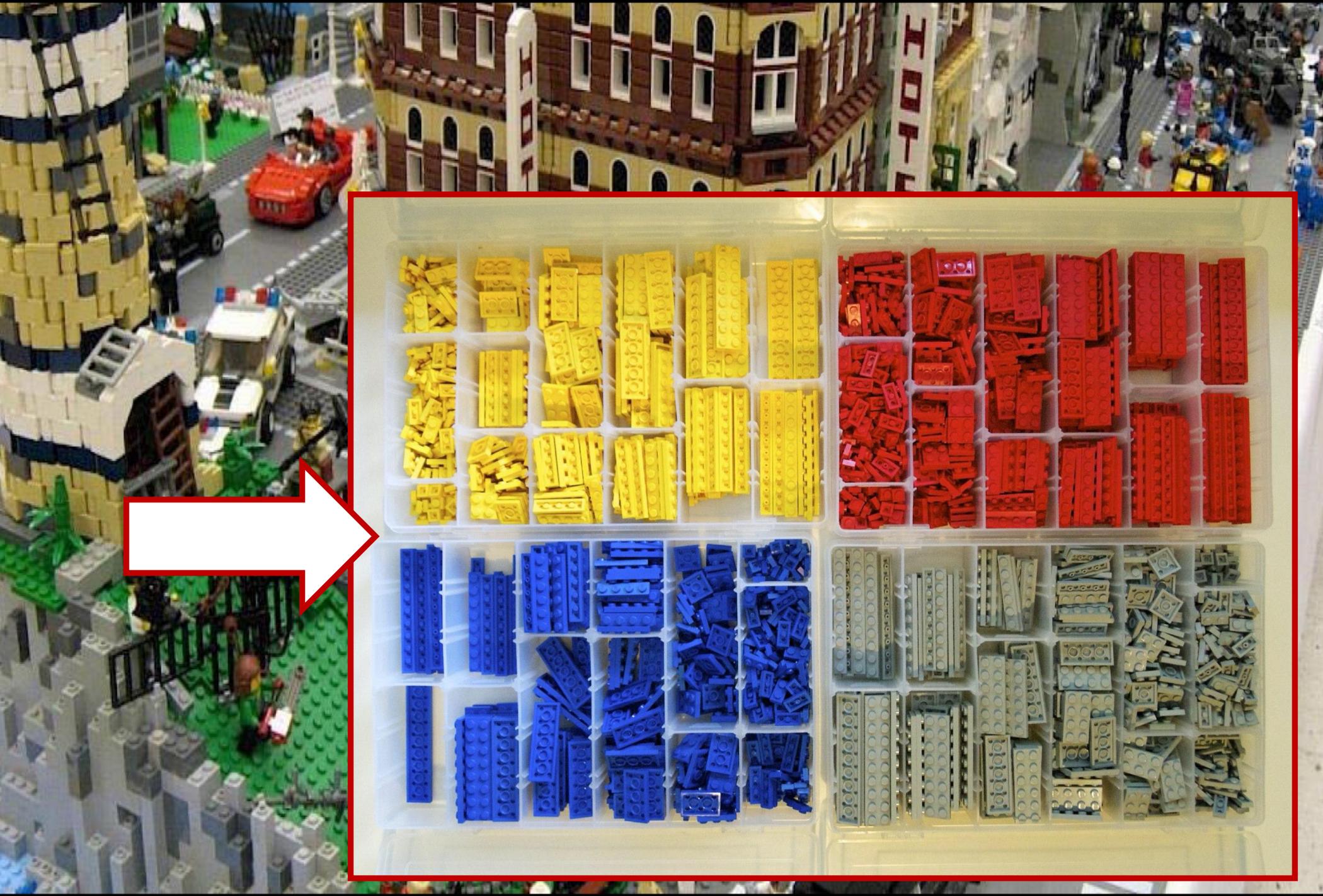


# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

---

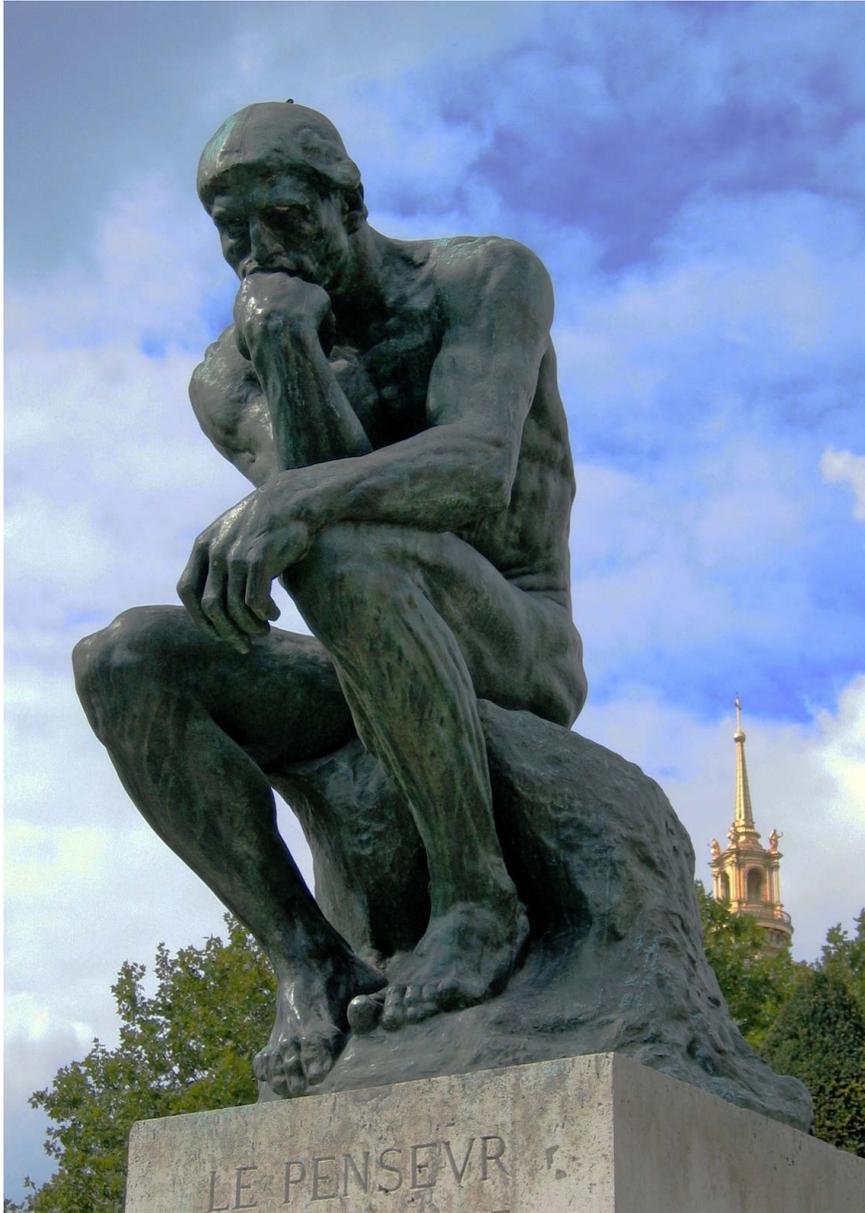






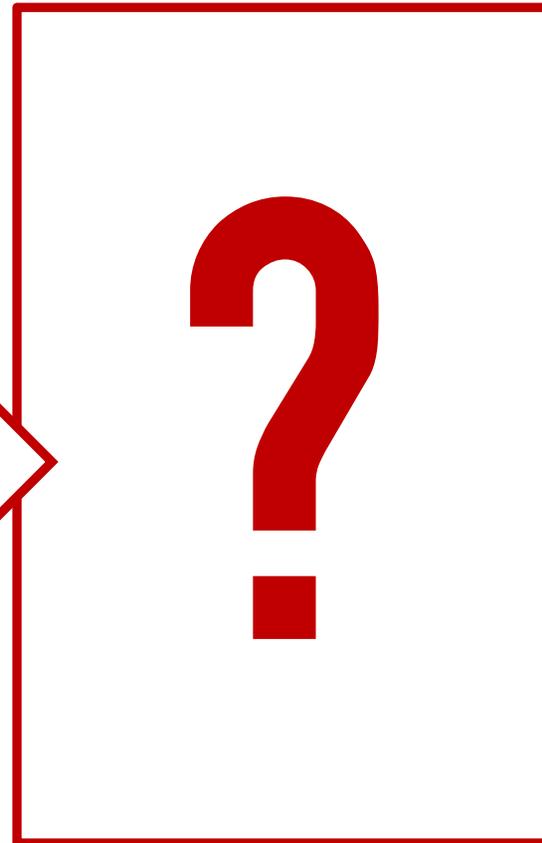
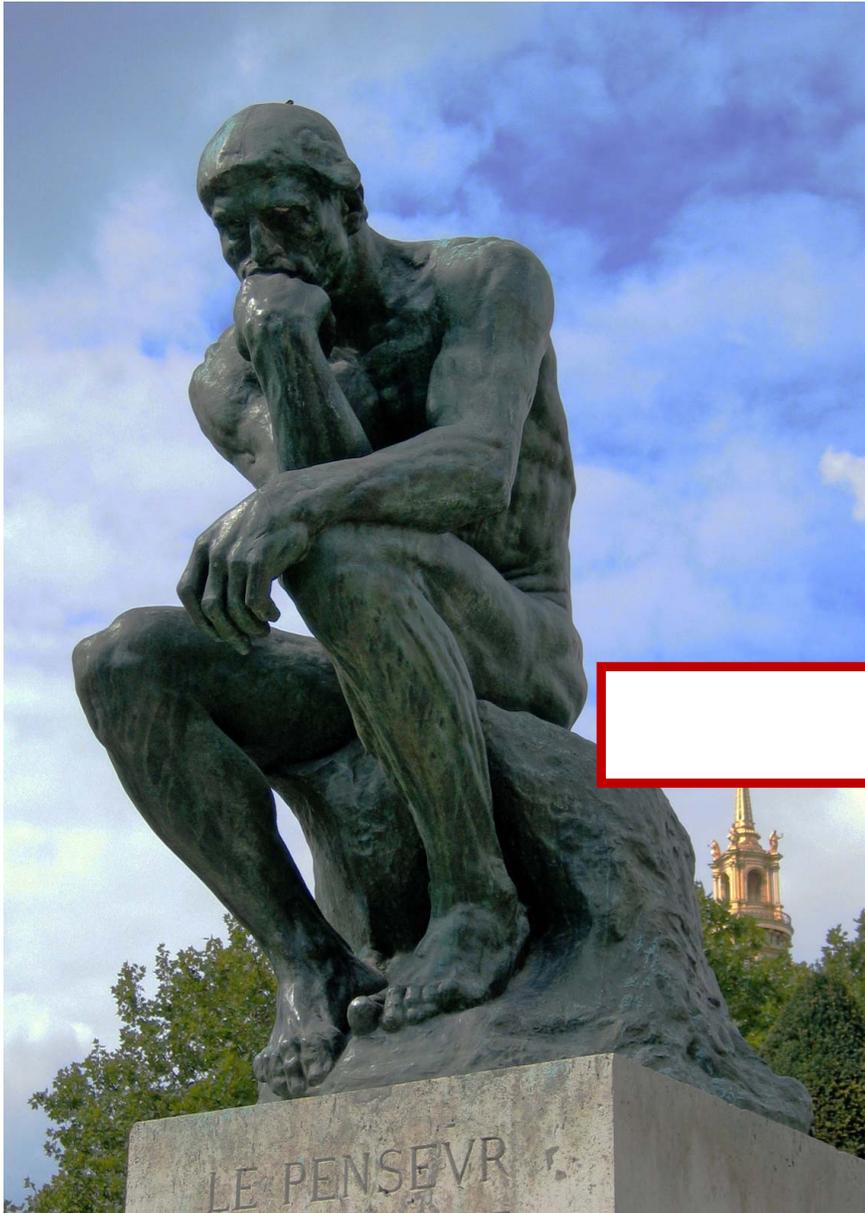
# GRUNDBAUSTEINE

---



# GRUNDBAUSTEINE

---



# GRUNDBAUSTEINE

---

≈0,01 m  
**Kristall**  
*Crystal*



# GRUNDBAUSTEINE

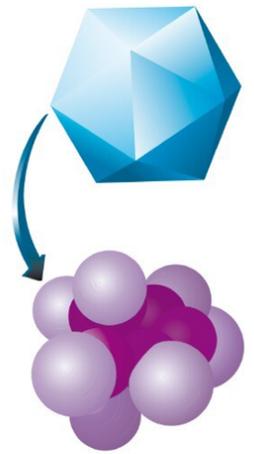
---

**Forschung mit Photonen**  
*Research with Photons*

≈ 0,01 m  
**Kristall**  
*Crystal*

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
**Molekül**  
*Molecule*



# GRUNDBAUSTEINE

---

- **Chemie: Aufbau**  
Kristalle/Moleküle (kleinste  
Einheit = Atom)

**Forschung mit Photonen**  
*Research with Photons*

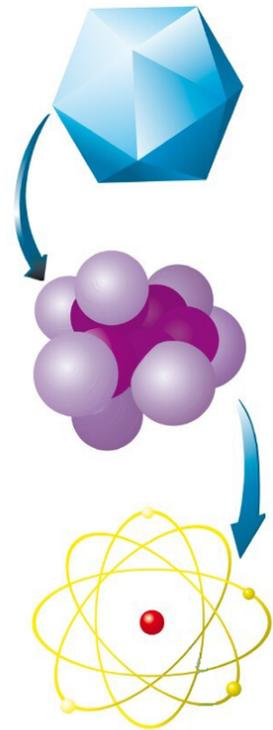
≈ 0,01 m  
**Kristall**  
*Crystal*

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
**Molekül**  
*Molecule*

1/10

$10^{-10}$  m  
**Atom**  
*Atom*



# 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																	2		
1	H																	He	
	Wasserstoff																	Helium	
	1.01																	4.00	
2	3	4											5	6	7	8	9	10	
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
	Lithium	Beryllium											Bor	Kohlenstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Fluor	Neon	
	6.94	9.01											10.81	12.01	14.01	15.999	18.998	20.18	
3	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											
	Natrium	Magnesium	Aluminium	Silizium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Argon											
	22.99	24.31	26.98	28.09	30.97	32.07	35.45	39.95											
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	Kalium	Calcium	Scandium	Titan	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Cobalt	Nickel	Kupfer	Zink	Gallium	Germanium	Arsen	Selen	Brom	Krypton	
	39.10	40.08	44.96	47.88	50.94	52.00	54.94	55.85	58.93	58.70	63.55	65.41	69.72	72.64	74.92	78.96	79.90	83.80	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirkon	Niobium	Molybdän	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silber	Kadmium	Indium	Zinn	Antimon	Tellur	Jod	Xenon	
	85.47	87.62	88.91	91.22	92.91	95.94	(98)	101.07	102.91	106.42	107.87	112.41	114.82	118.71	121.76	127.60	126.90	131.29	
6	55	56	La-Lu		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba			Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
	Cäsium	Barium			Hafnium	Tantal	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksilber	Thallium	Blei	Bismut	Polonium	Astat	Radon
	132.91	137.33			178.49	180.95	183.84	186.21	190.23	192.22	195.08	196.97	200.59	204.38	207.2	208.98	(209)	(210)	(222)
7	87	88	Ac-Lr		104	105	106	107	108	109	110	111							
	Fr	Ra			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							
	Francium	Radium			Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Mitnорийm	Darmstadtium	Röntgenium							
	(223)	(226)			(261)	(262)	(263)	(262)	(265)	(266)	(281)	(272)							

© Peter Wich - Experimentchemie.de - Chemie erleben!

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

# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

---

- ▶ **Chemie:** Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- ▶ **Atomphysik:** Aufbau der Atome (Atomkern, Elektron)

Forschung mit Photonen  
Research with Photons

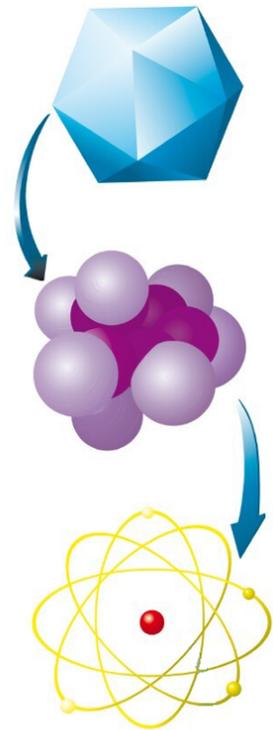
≈ 0,01 m  
**Kristall**  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
**Molekül**  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
**Atom**  
Atom

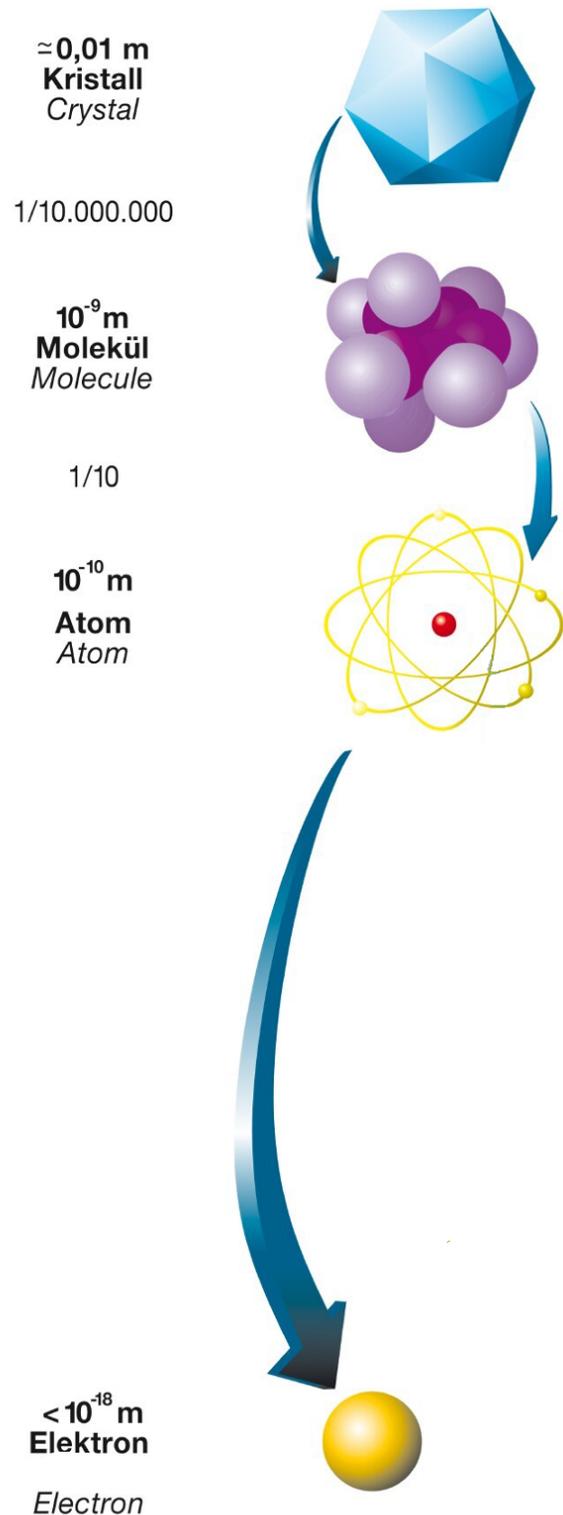


# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

---

- **Chemie:** Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- **Atomphysik:** Aufbau der Atome (Atomkern, Elektron)

Forschung mit Photonen  
Research with Photons



# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

- **Chemie:** Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- **Atomphysik:** Aufbau der Atome (Atomkern, Elektron)



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

≈ 0,01 m  
Kristall  
Crystal

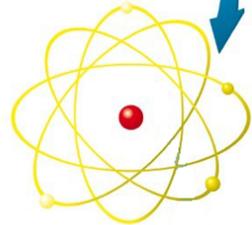
1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

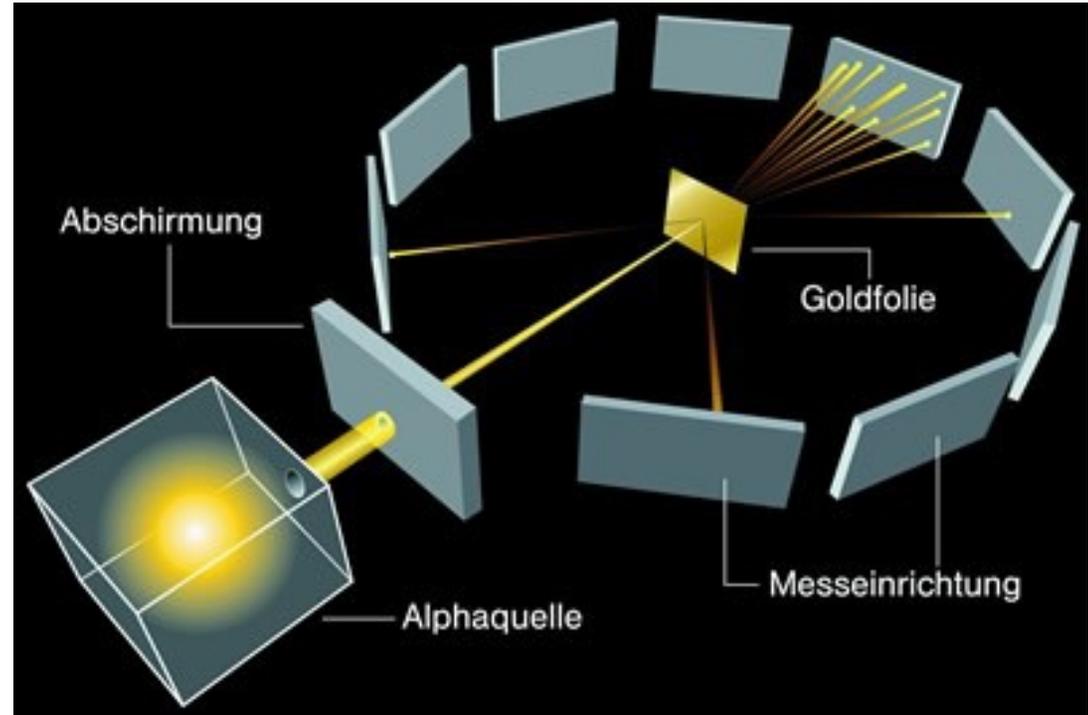
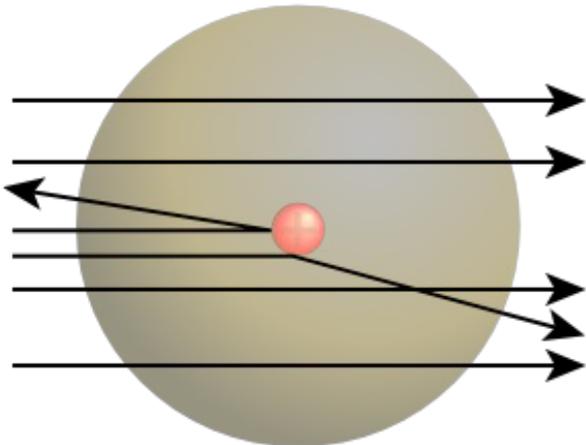
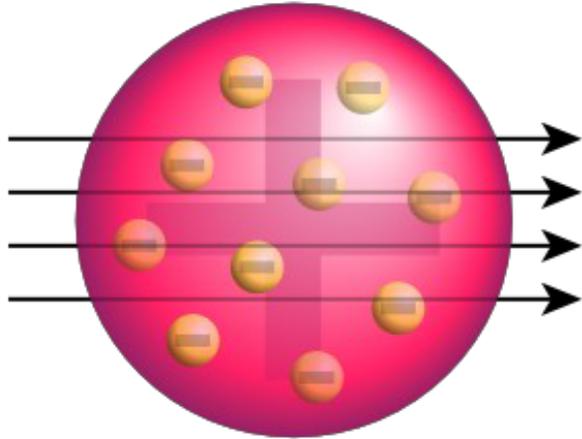
$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

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



# 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

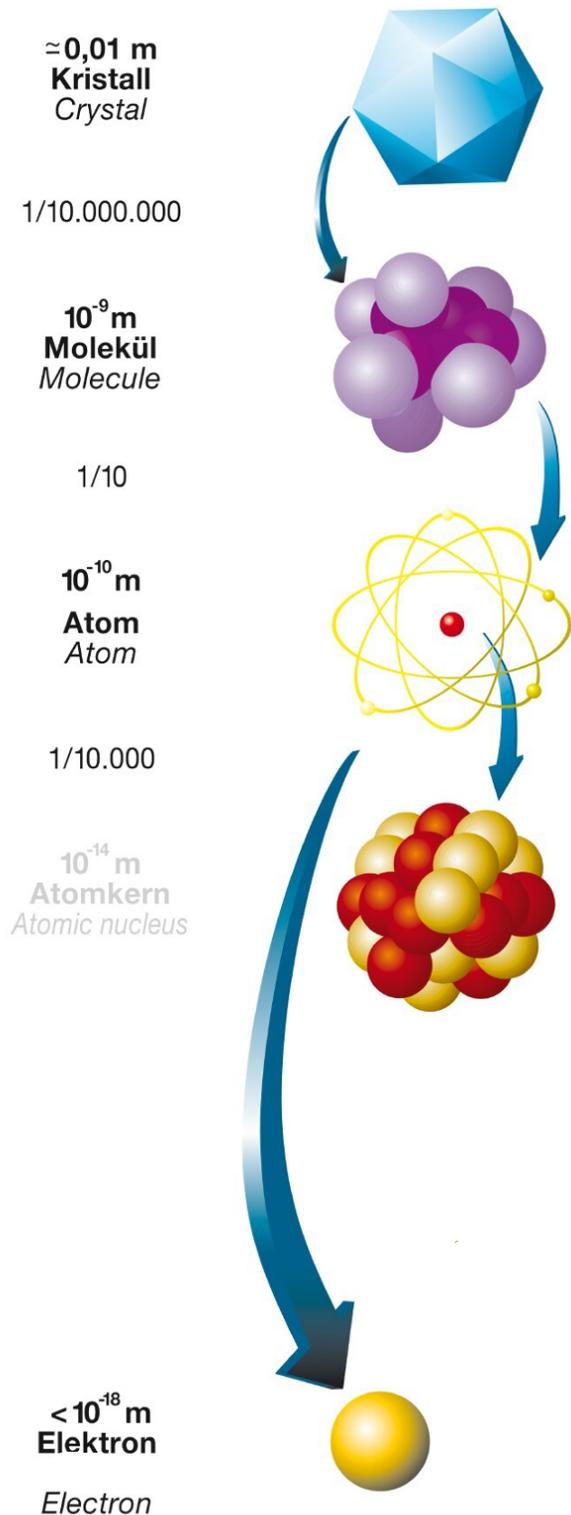
# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

- ▶ **Chemie:** Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- ▶ **Atomphysik:** Aufbau der Atome (Atomkern, Elektron)



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

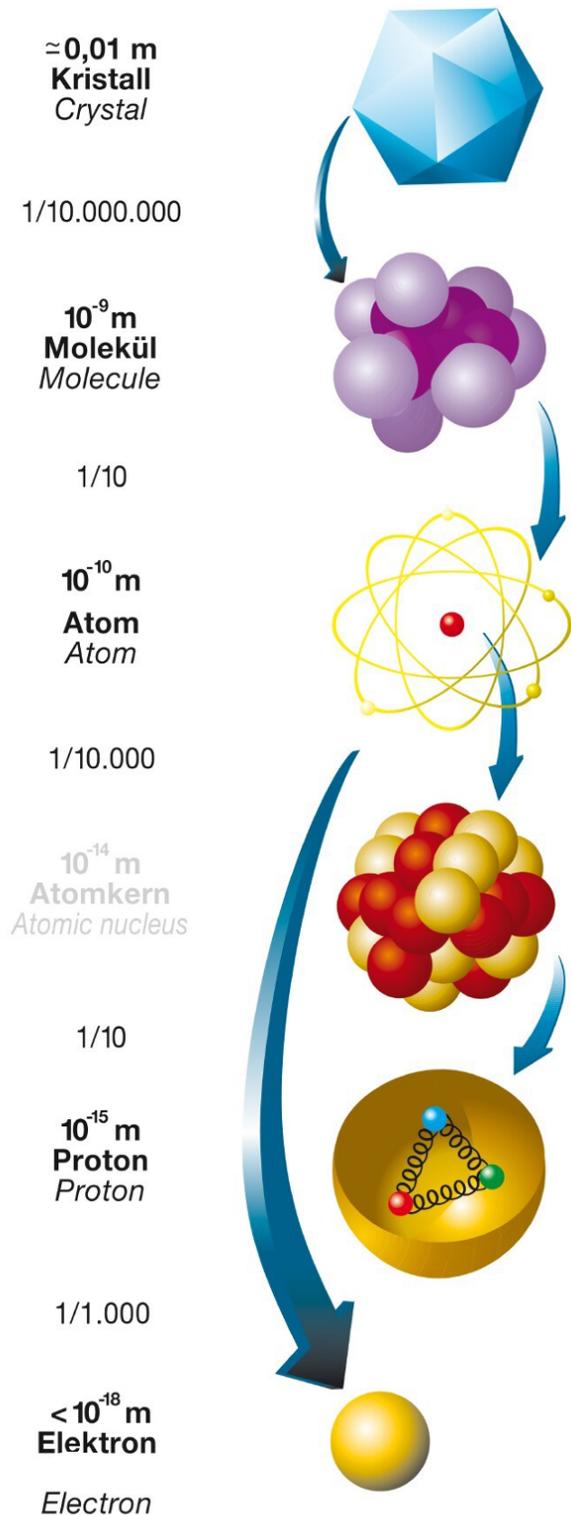


# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

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

Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics



# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

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

Elektron

Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

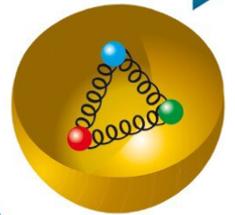
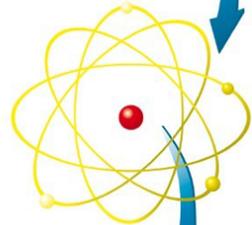
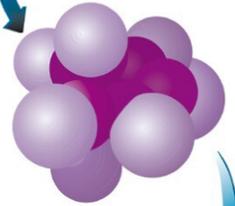
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

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



# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD NOCH KLEINER!

- Chemie: Aufbau Kristalle/Moleküle (kleinste Einheit = Atom)
- Atomphysik: Aufbau der Atome **Nukleonen**



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

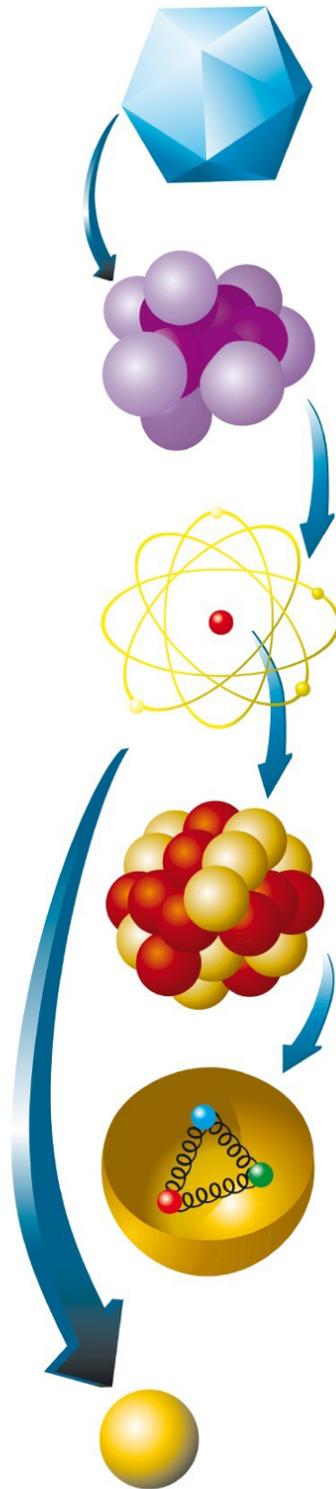
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

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



# GRUNDBAUSTEINE – ES WIRD 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; Elementarteilchen, z.B. Elektron

Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

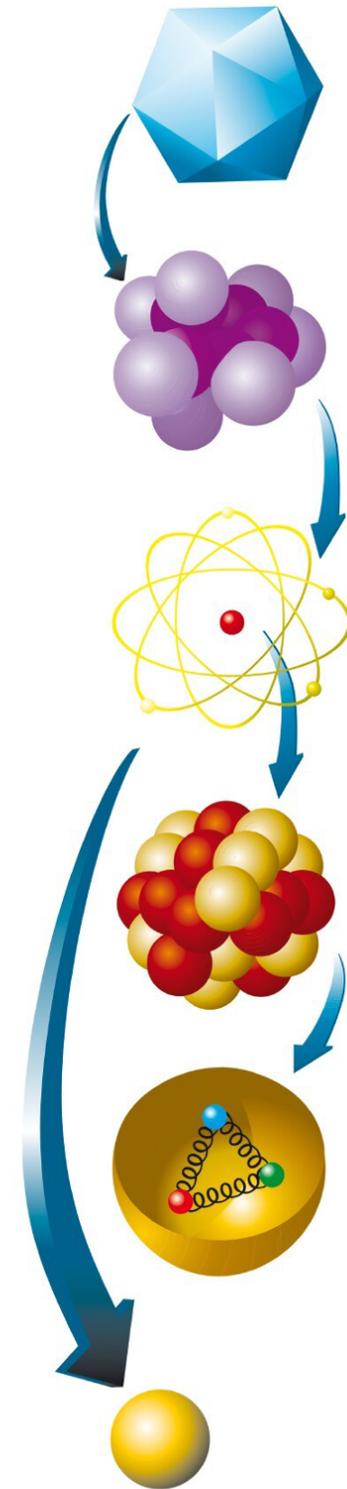
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

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



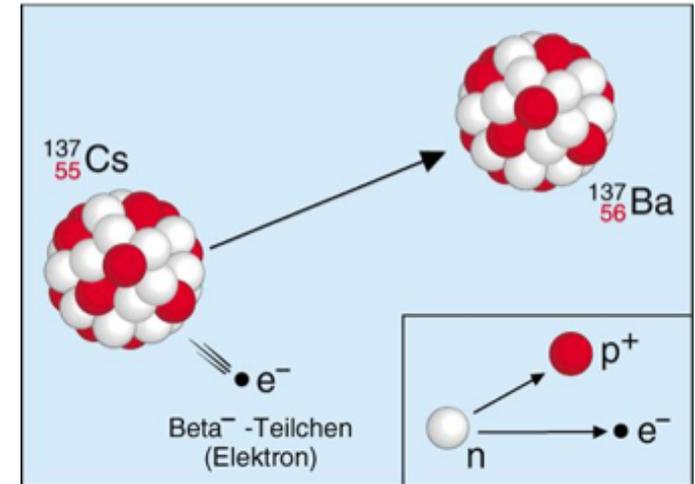
# GIBT ES NOCH WEITERE ELEMENTARTEILCHEN?

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

Neutrino



- Ladung: 0
- kaum Interaktion



# GIBT ES NOCH WEITERE ELEMENTARTEILCHEN?

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

Neutrino

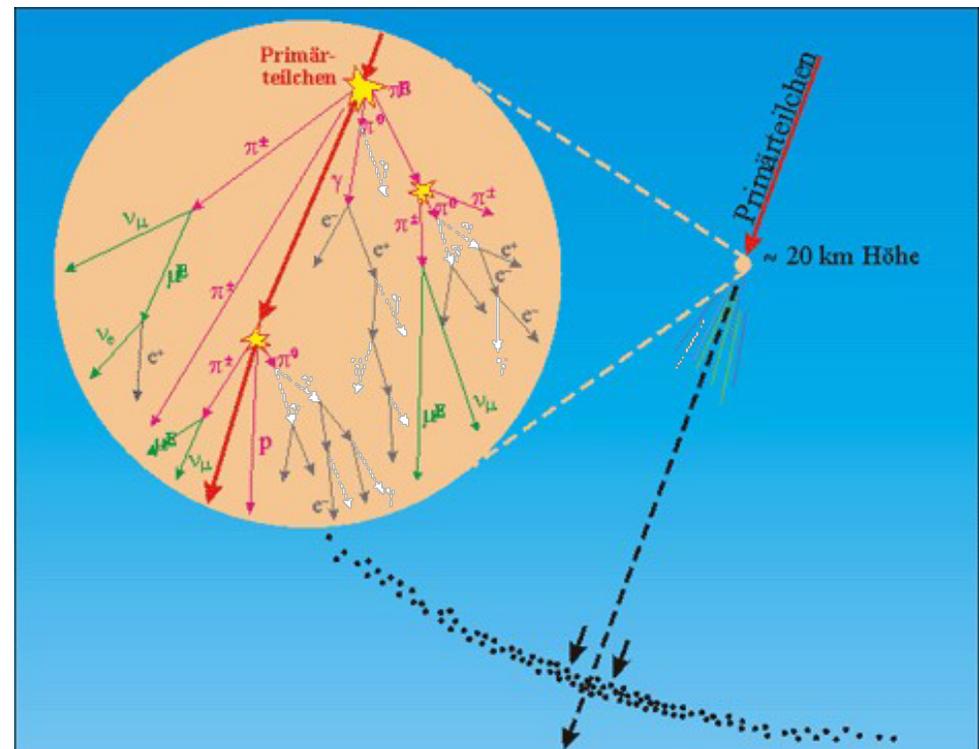
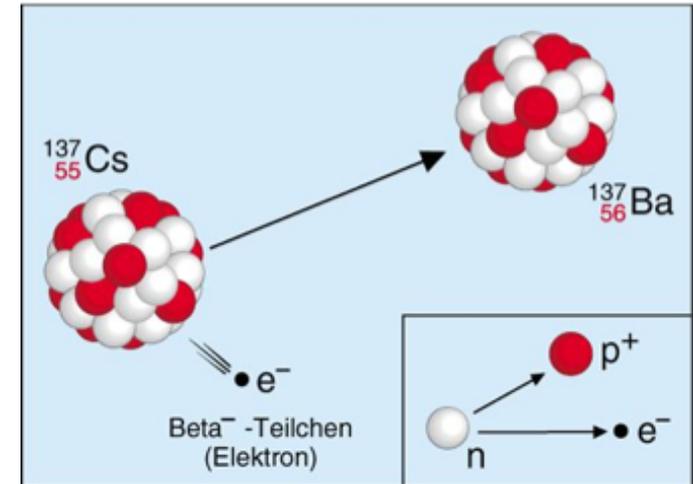


- 1936 Entdeckt Andersen ein neues Teilchen in der Höhenstrahlung:

Myon



- Ladung: -1
- Myonen zerfallen nach  $0,0000022\text{s}$  ( $=2,2\mu\text{s}$ )



# DAS STANDARD-MODELL DER TEILCHENPHYSIK

Oder

„Was die Welt im Innersten zusammenhält“

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

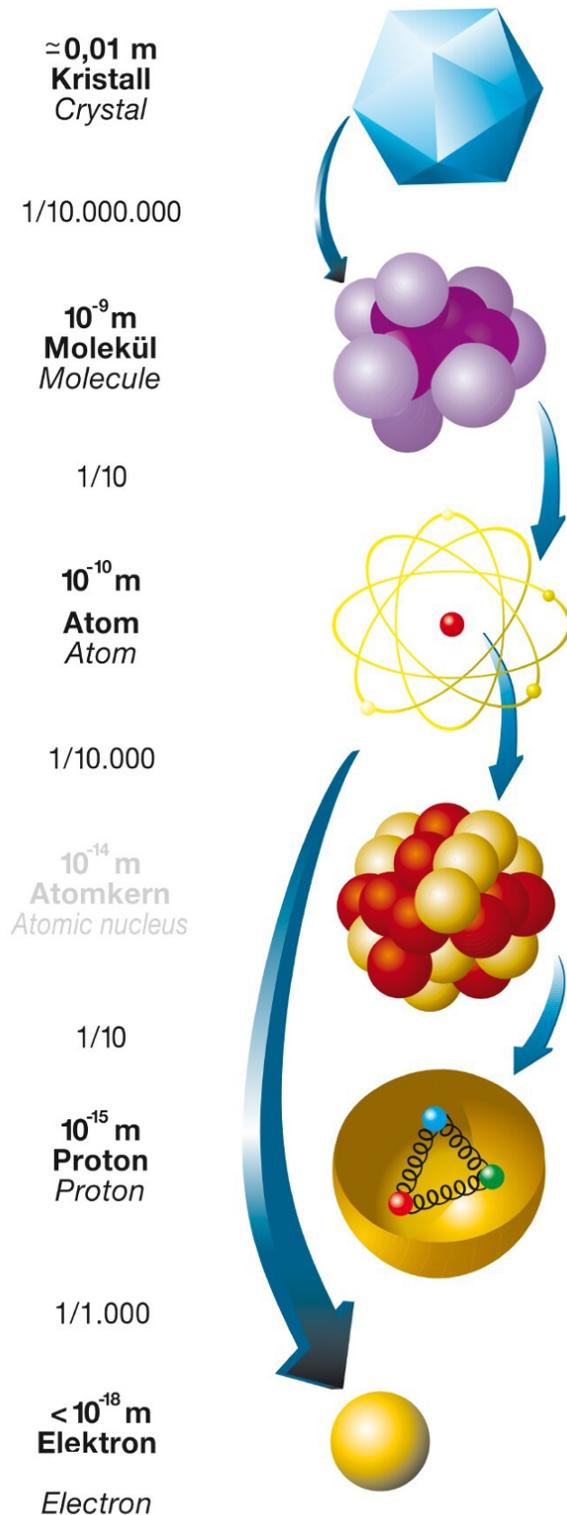
Unser „Periodensystem“

## Nukleonen



Forschung mit Photons  
Research with Photons

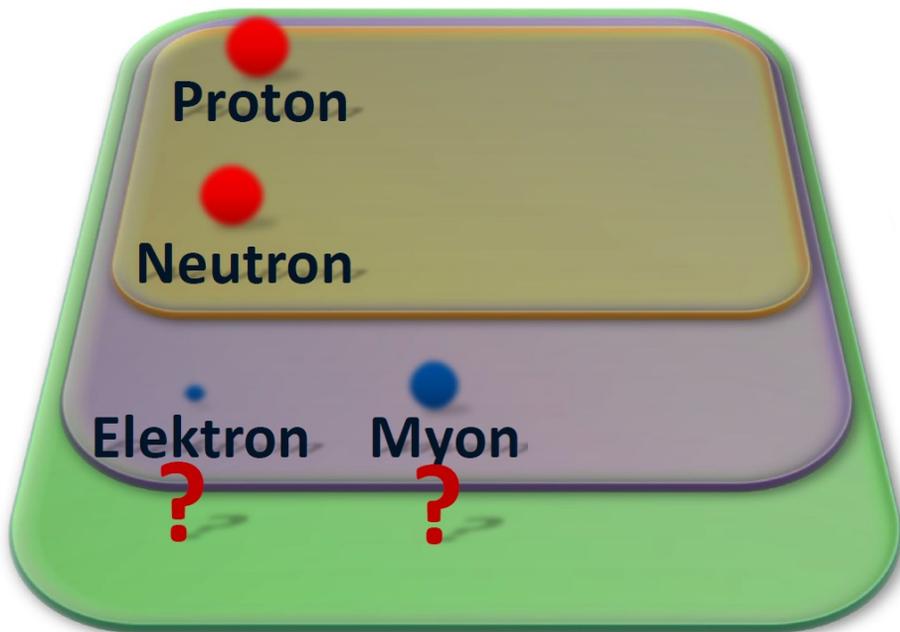
Teilchenphysik  
Particle Physics



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**Nukleonen**  
**Leptonen**



Forschung mit Photons  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

$1/10.000.000$

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

$1/10$

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

$1/10.000$

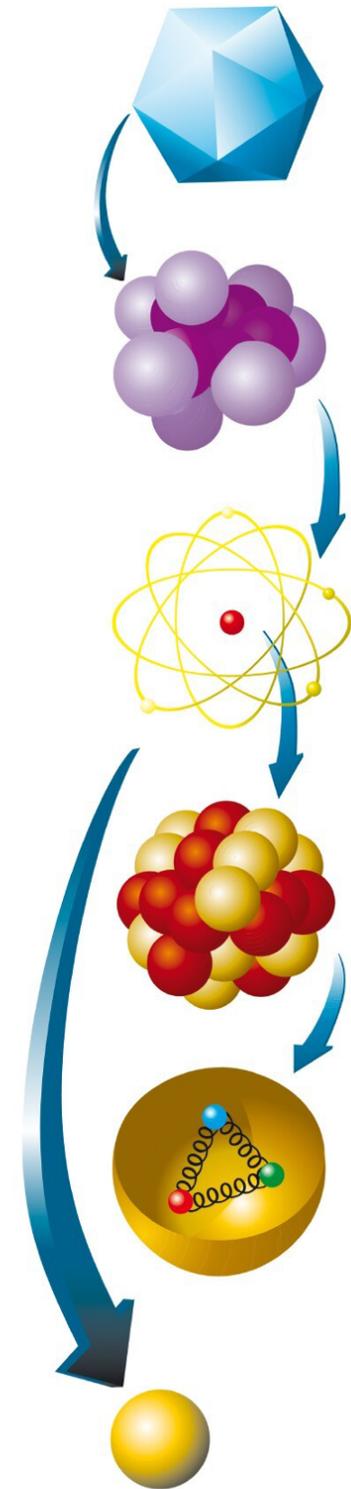
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

$1/10$

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

$1/1.000$

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



**Blau:** Elektronen/Positronen

**Cyan:** Photonen

**Rot:** Neutronen

**Orange:** Protonen

**Grau:** Mesonen

**Grün:** Myonen

**1000 Teilchen pro m<sup>2</sup>  
pro Sekunde!**



**Blau:** Elektronen/Positronen

**Cyan:** Photonen

**Rot:** Neutronen

**Orange:** Protonen

**Grau:** Mesonen

**Grün:** Myonen



**Blau: Elektronen/Positronen**

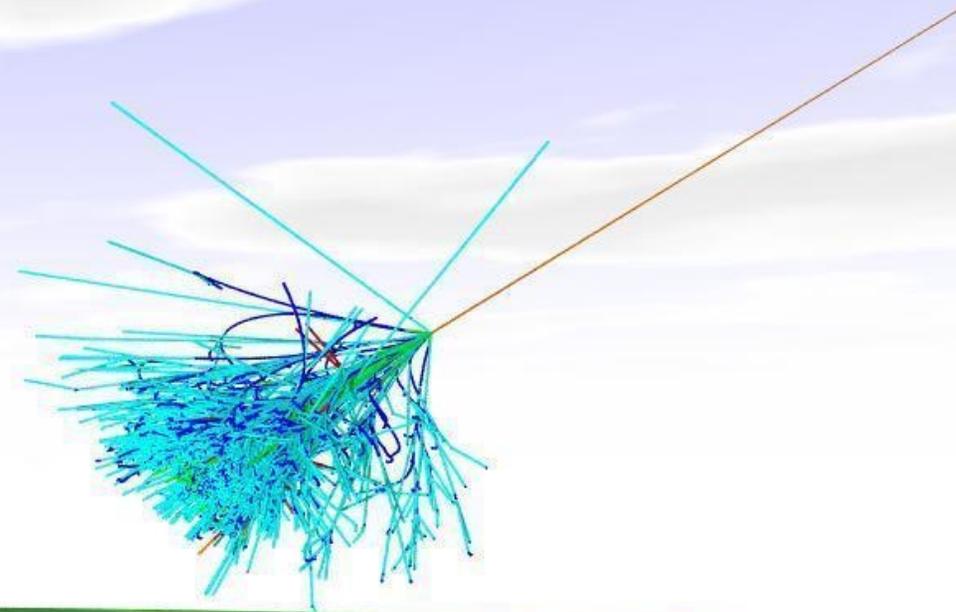
**Cyan: Photonen**

**Rot: Neutronen**

**Orange: Protonen**

**Grau: Mesonen**

**Grün: Myonen**



**Blau:** Elektronen/Positronen

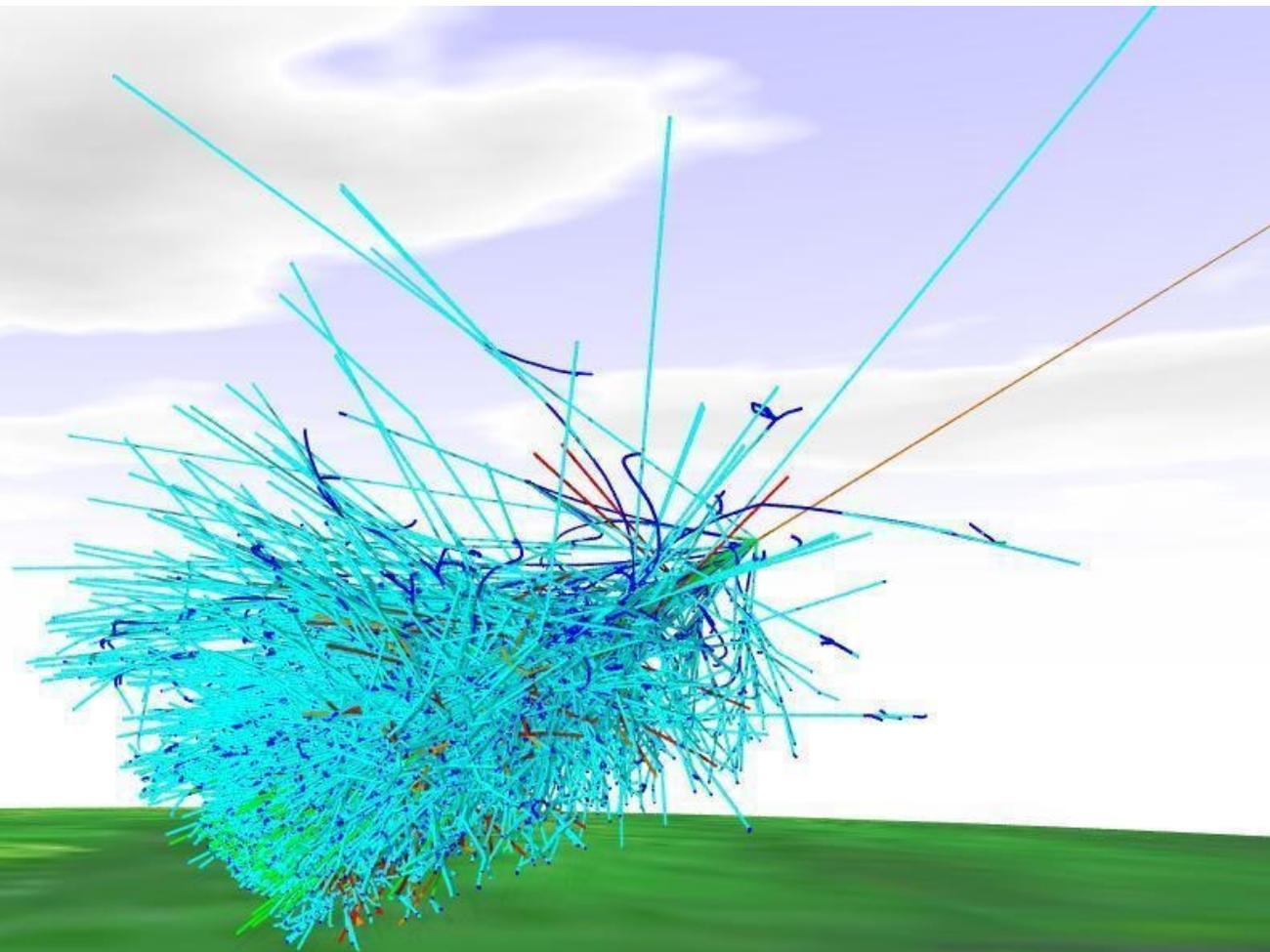
**Cyan:** Photonen

**Rot:** Neutronen

**Orange:** Protonen

**Grau:** Mesonen

**Grün:** Myonen



**Blau:** Elektronen/Positronen

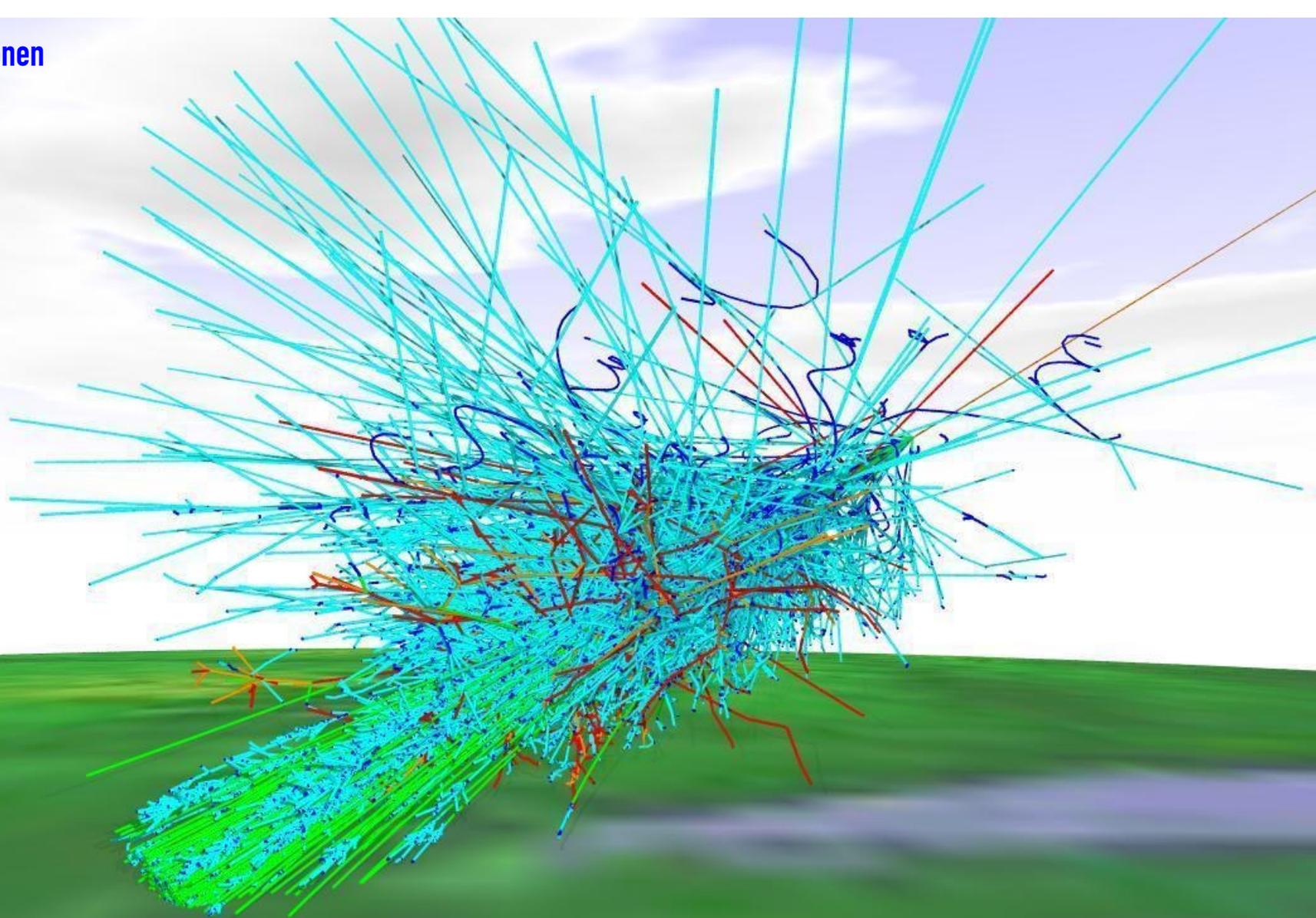
**Cyan:** Photonen

**Rot:** Neutronen

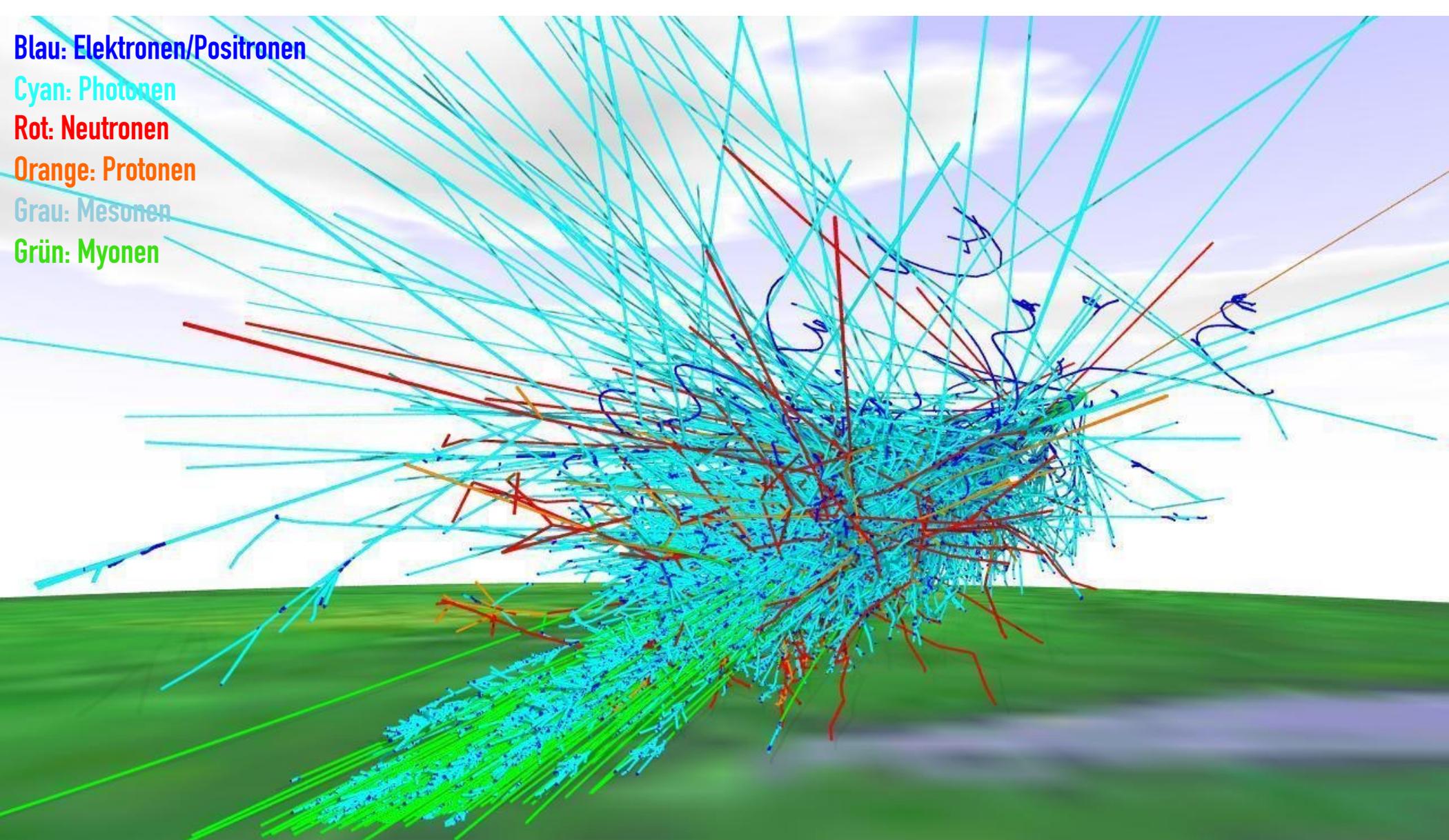
**Orange:** Protonen

**Grau:** Mesonen

**Grün:** Myonen



Blau: Elektronen/Positronen  
Cyan: Photonen  
Rot: Neutronen  
Orange: Protonen  
Grau: Mesonen  
Grün: Myonen

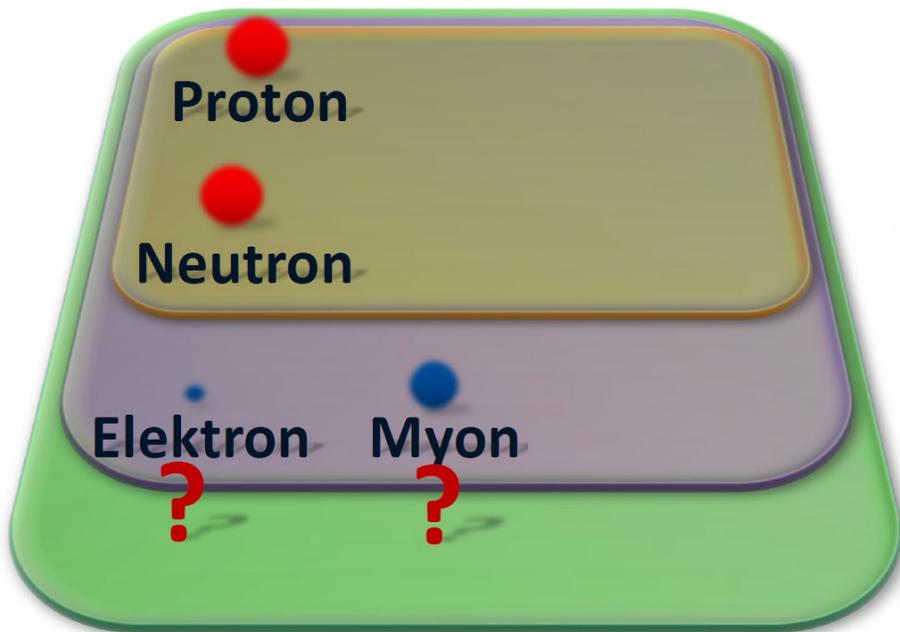


200 Myonen pro  $m^2$   
pro Sekunde!

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**Nukleonen**  
**Leptonen**



Forschung mit Photons  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

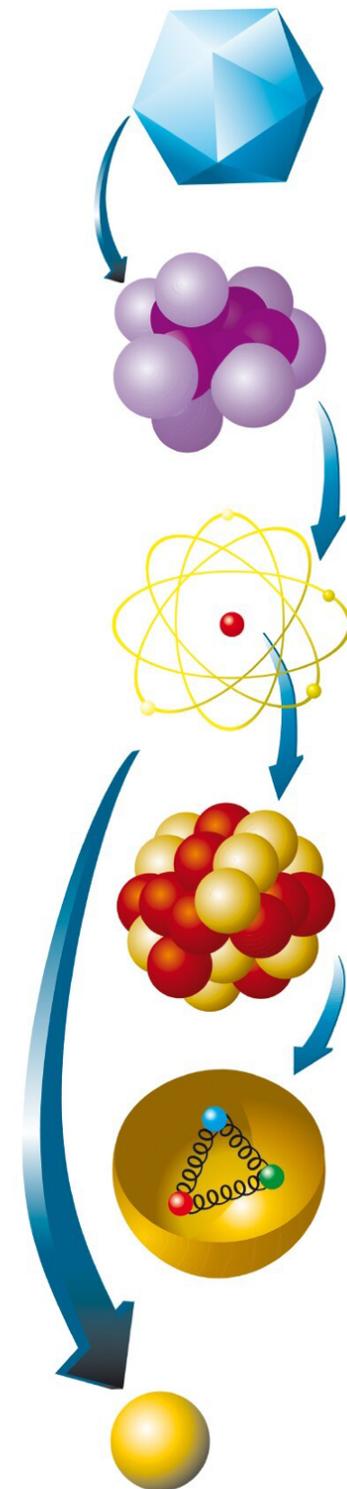
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

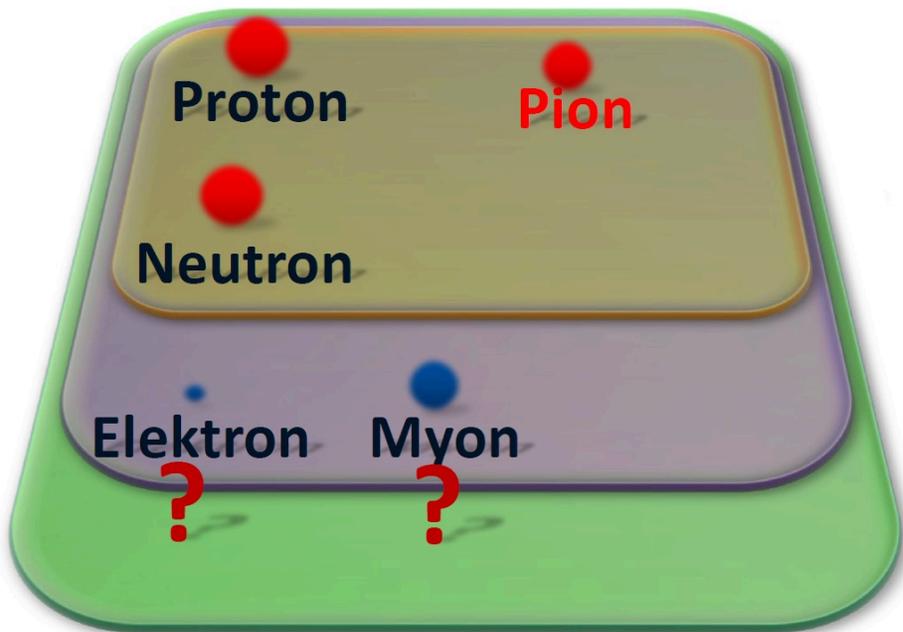
$< 10^{-18}$  m  
Elektron  
Electron



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

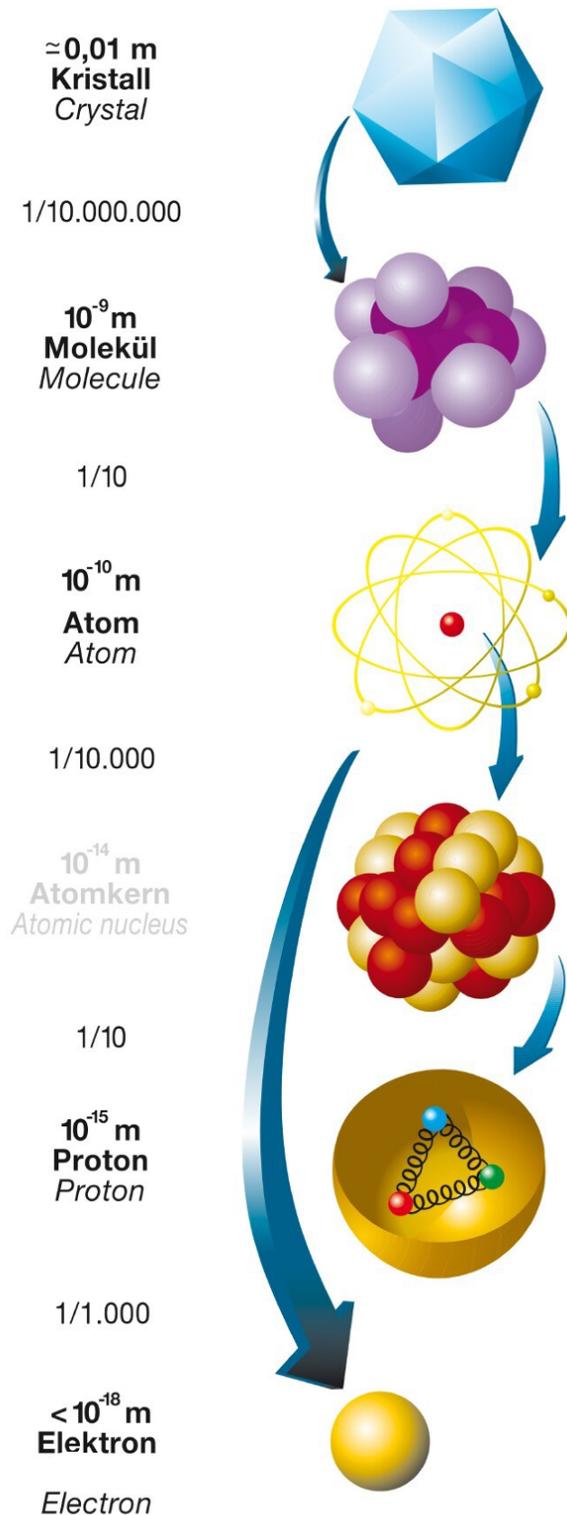
Unser „Periodensystem“

**Baryonen, Mesonen**  
**Leptonen**



Forschung mit Photons  
Research with Photons

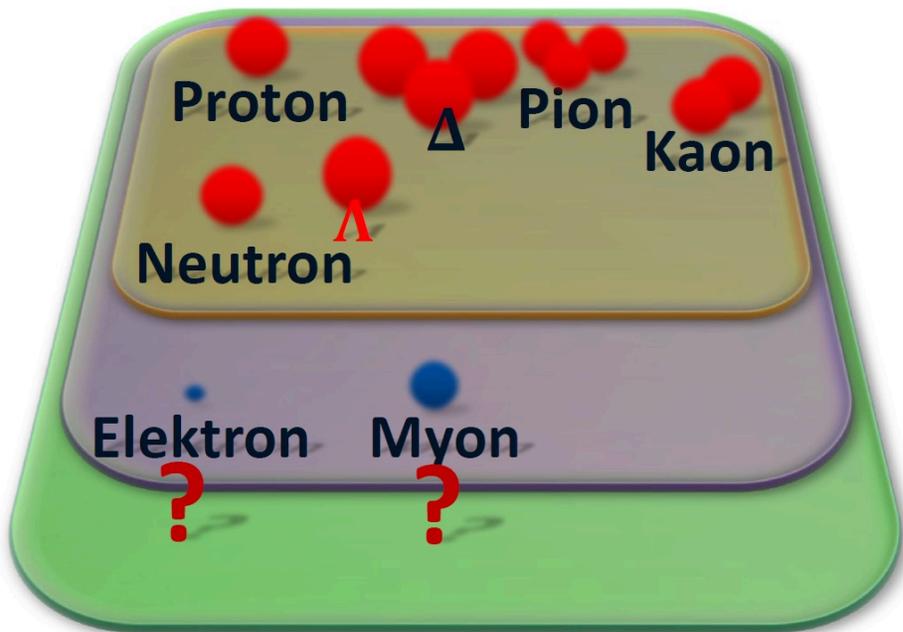
Teilchenphysik  
Particle Physics



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**Baryonen, Mesonen**  
**Leptonen**



Forschung mit Photons  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

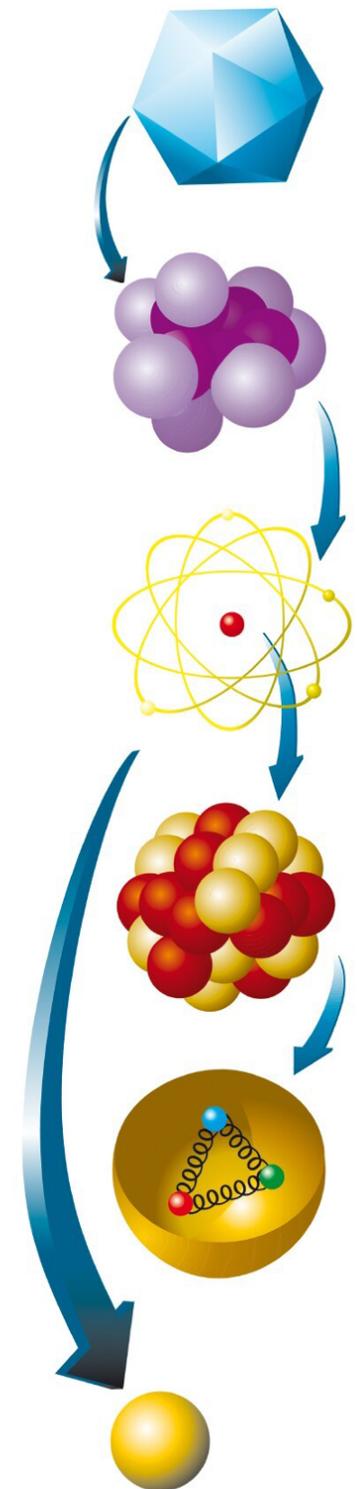
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

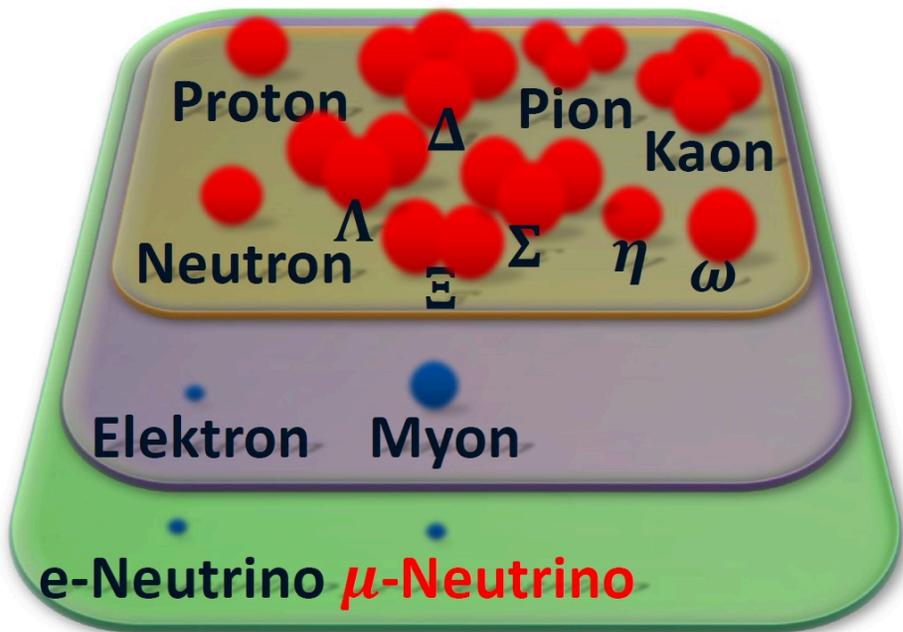
$< 10^{-18}$  m  
Elektron  
Electron



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

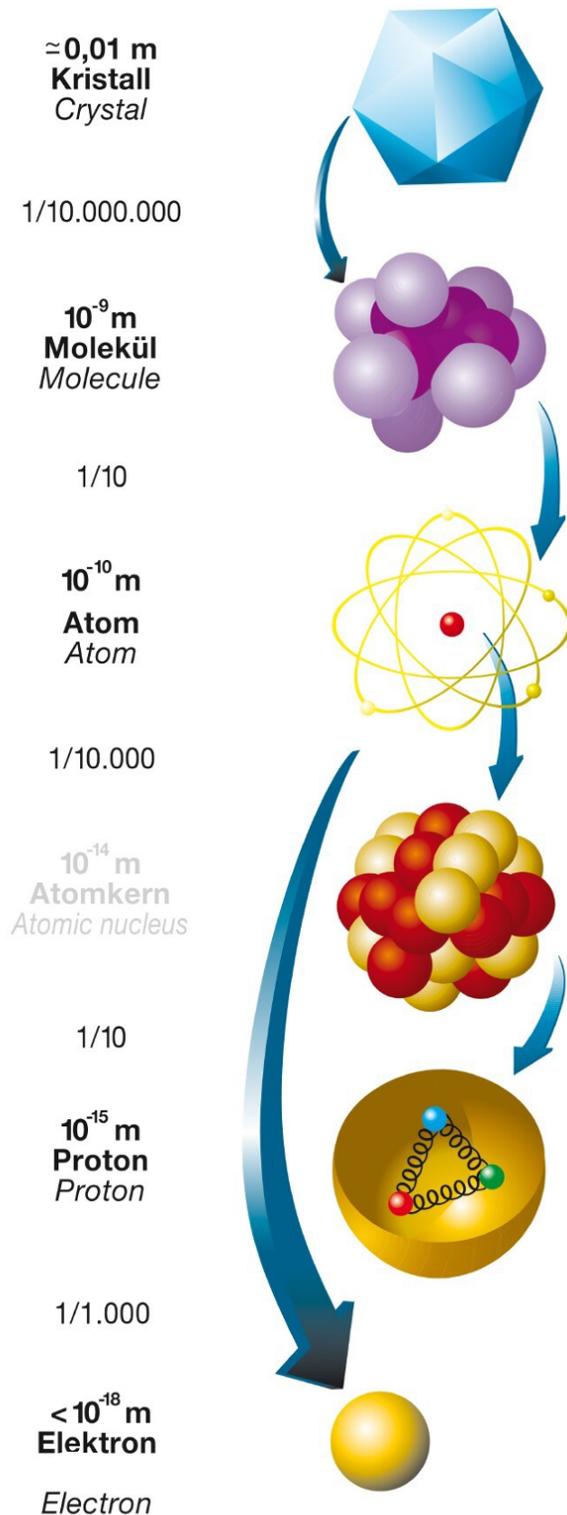
Unser „Periodensystem“

**Baryonen, Mesonen**  
**Leptonen**



Forschung mit Photons  
Research with Photons

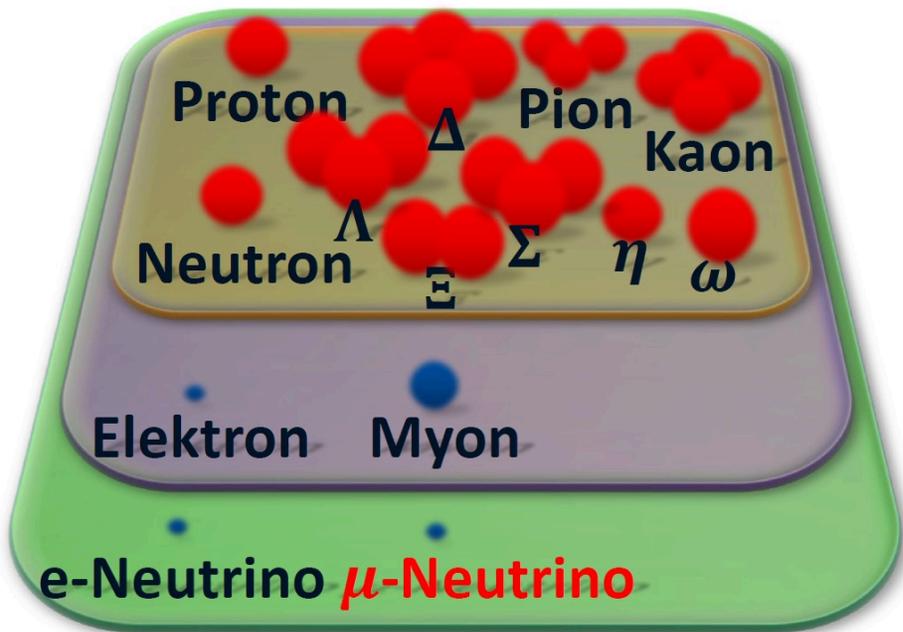
Teilchenphysik  
Particle Physics



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**Baryonen, Mesonen**  
**Leptonen**



Forschung mit Photons  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

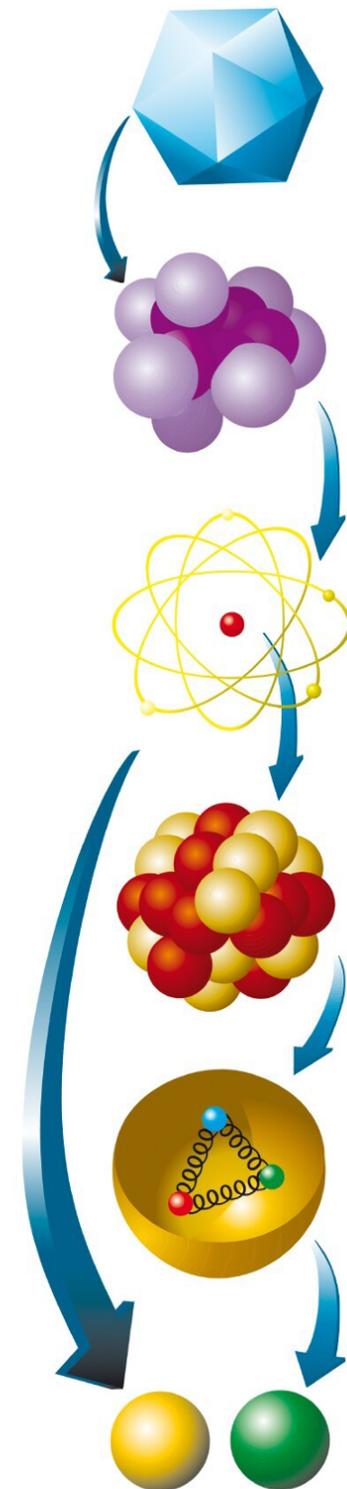
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

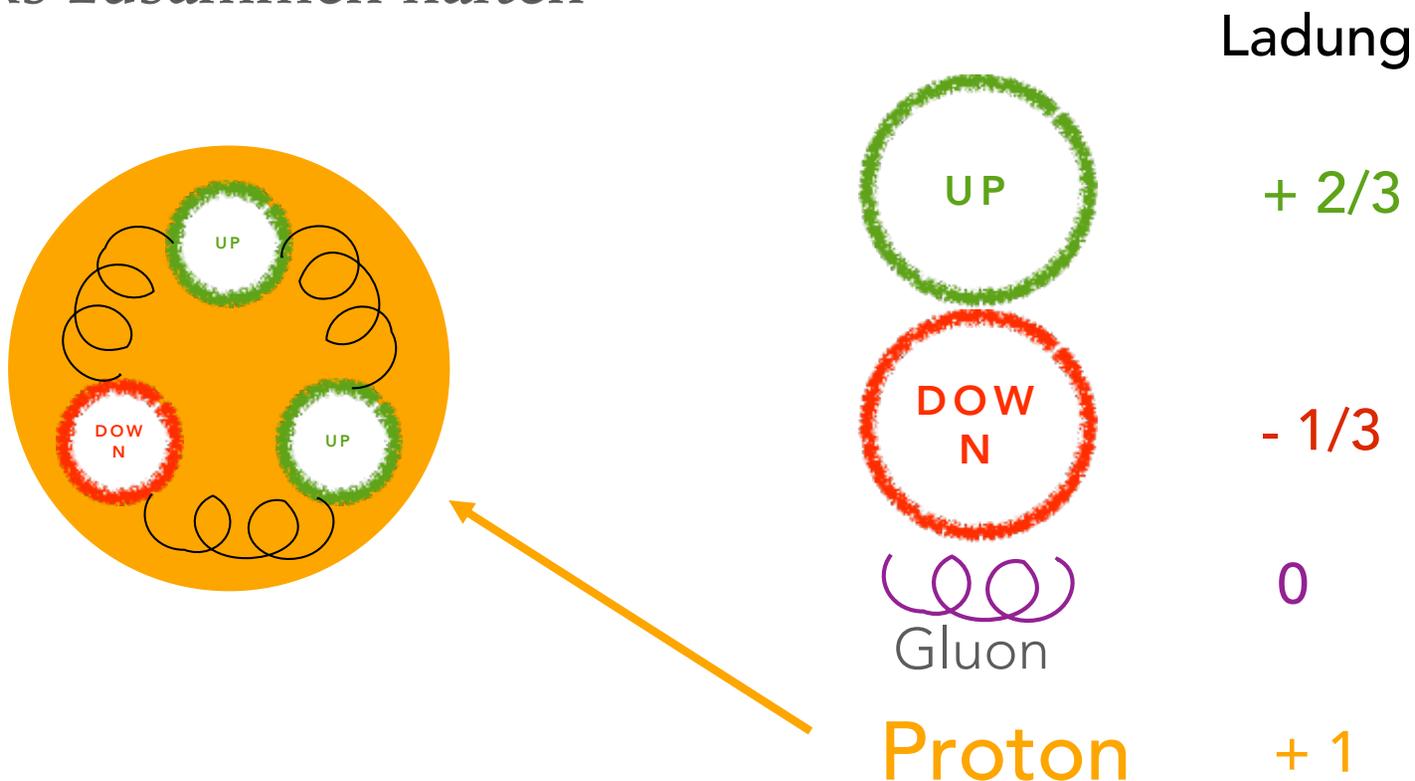
$< 10^{-18}$  m  
Elektron,  
Quark  
Electron,  
Quark



# DAS PROTON

---

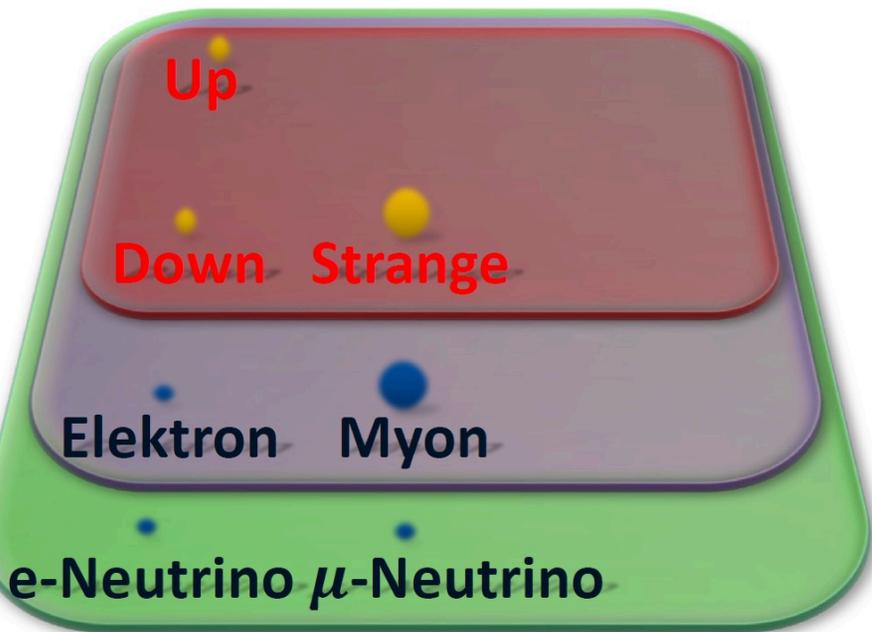
- ▶ Das Proton besteht aus 3 (Valenz-)quarks, die die Eigenschaften des Protons ausmachen, z. B. die Ladung
- ▶ Außerdem besteht das Proton noch aus Gluonen, die die Quarks zusammen halten



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**Quarks**  
**Leptonen**



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

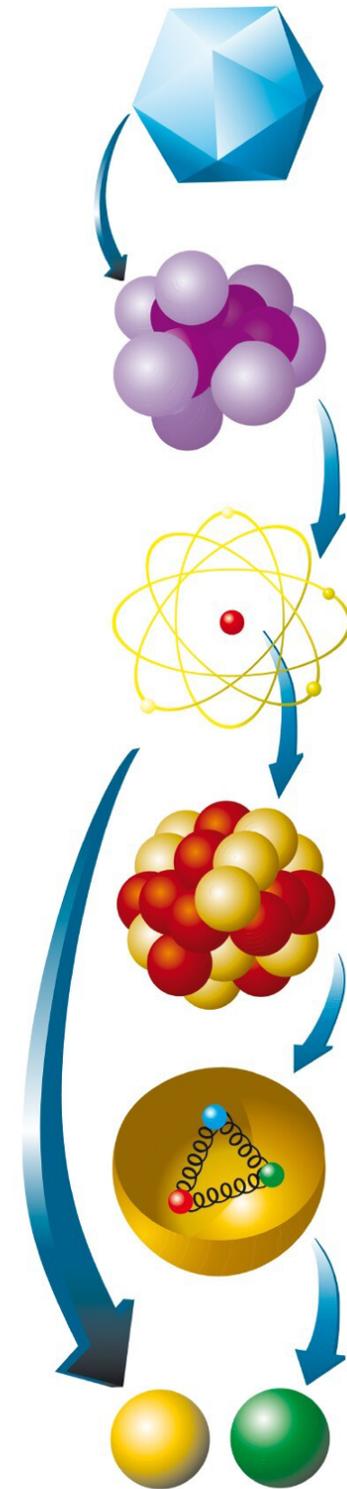
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

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



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

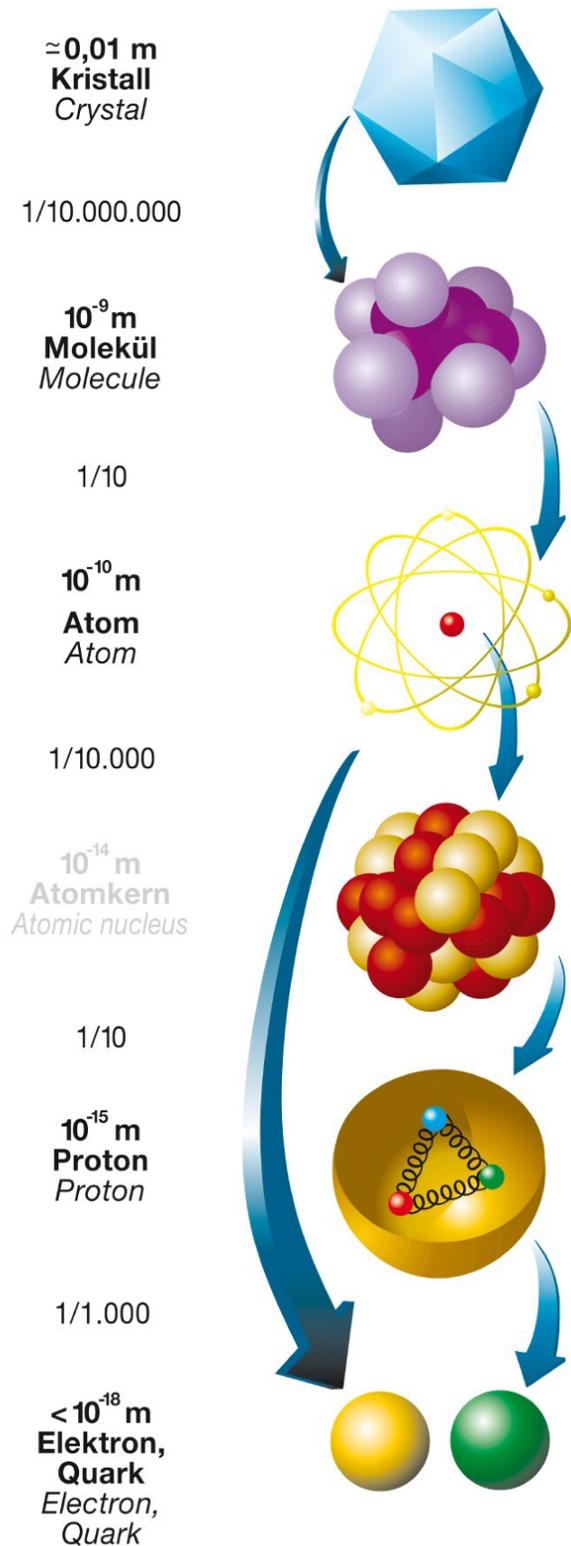
Unser „Periodensystem“

## Quarks Leptonen



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

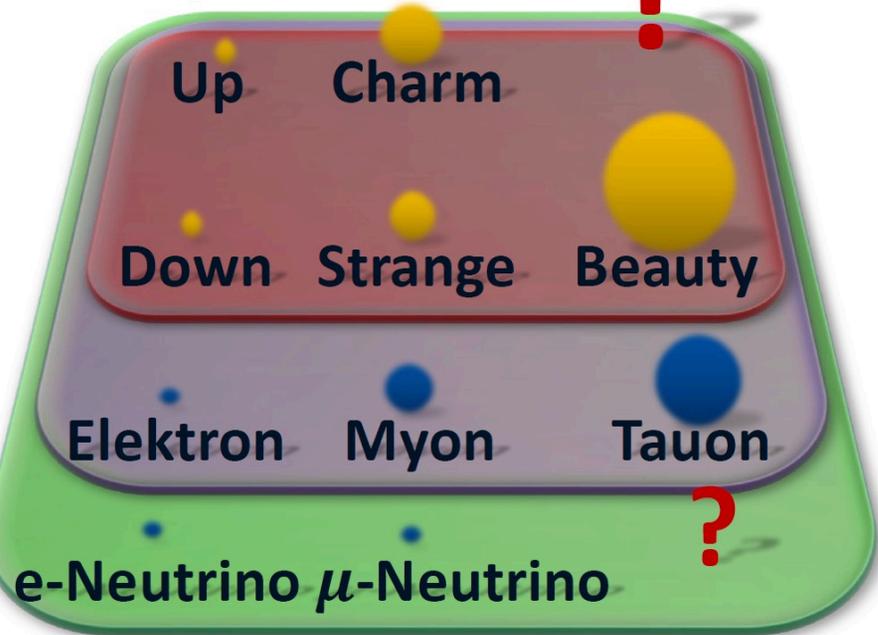
Teilchenphysik  
Particle Physics



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

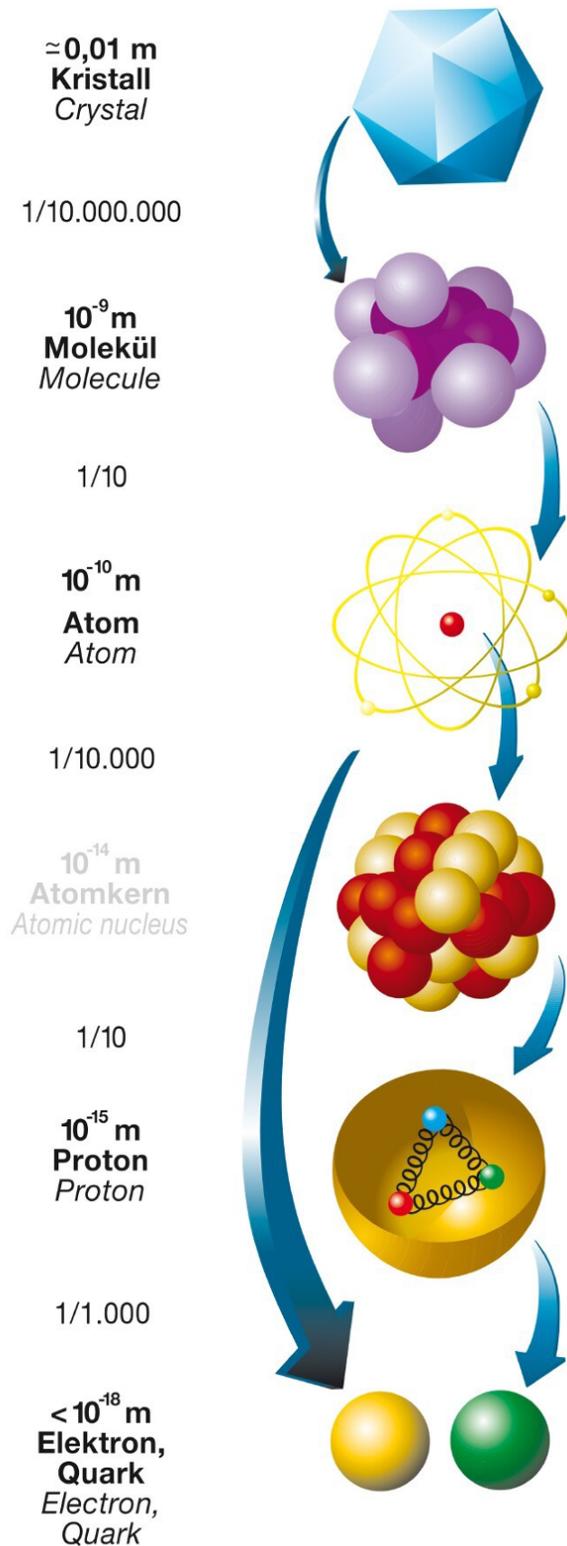
Unser „Periodensystem“

## Quarks Leptonen



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

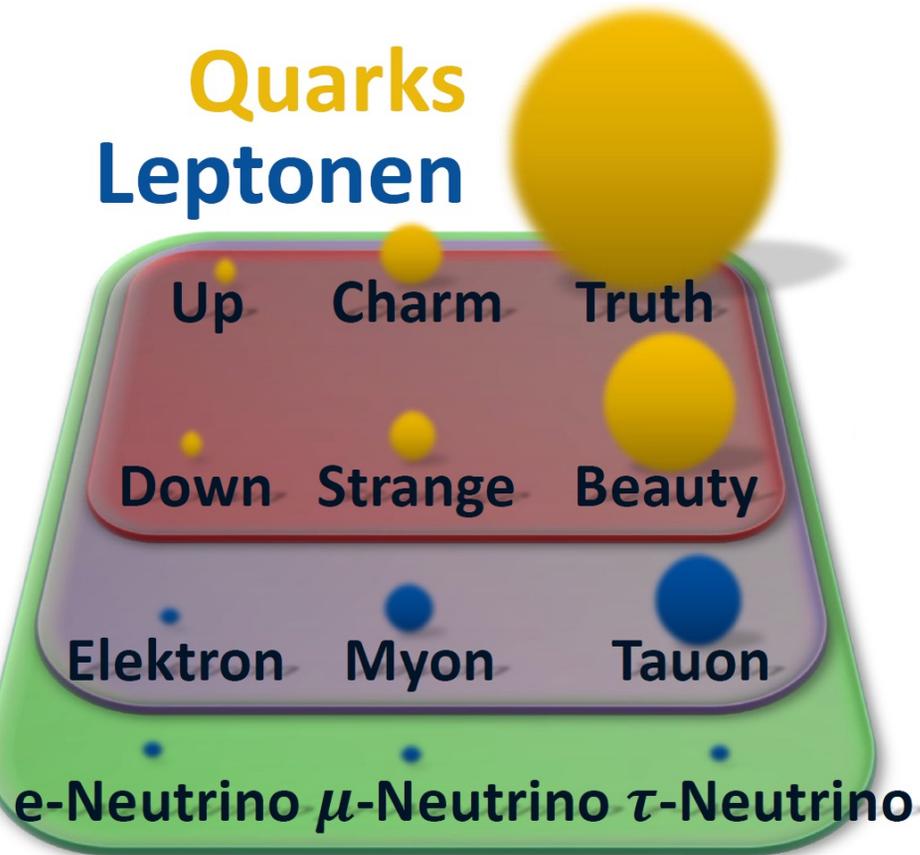
Teilchenphysik  
Particle Physics



# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

## Quarks Leptonen



Forschung mit Photonen  
Research with Photons

Teilchenphysik  
Particle Physics

$\approx 0,01$  m  
Kristall  
Crystal

1/10.000.000

$10^{-9}$  m  
Molekül  
Molecule

1/10

$10^{-10}$  m  
Atom  
Atom

1/10.000

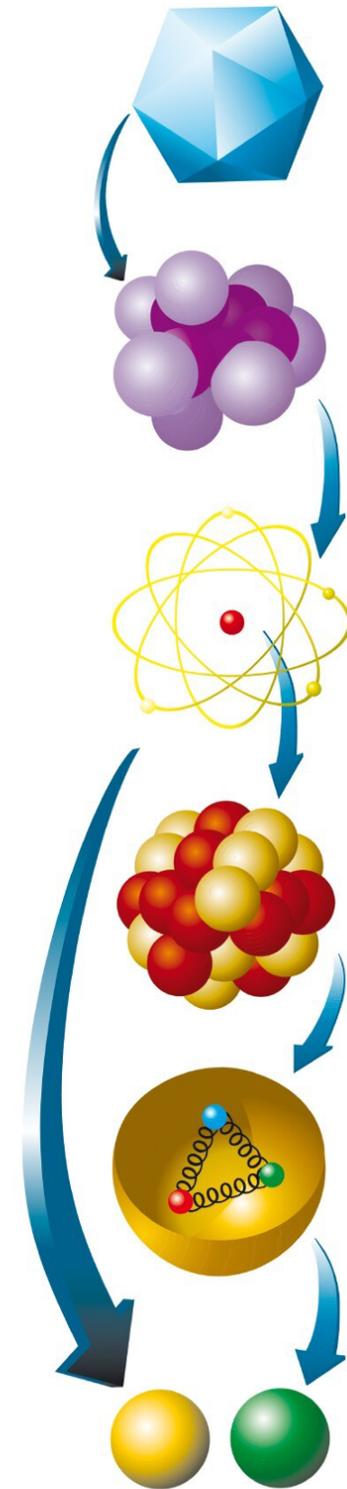
$10^{-14}$  m  
Atomkern  
Atomic nucleus

1/10

$10^{-15}$  m  
Proton  
Proton

1/1.000

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

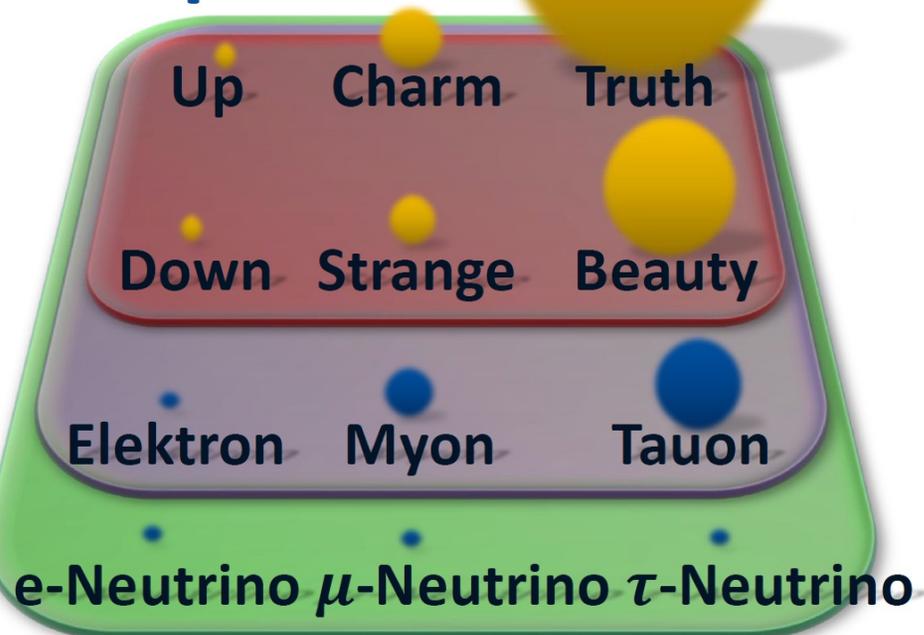


# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

---

Unser „Periodensystem“

## Quarks Leptonen



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

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

Quasi alles stabile  
im Universum

**Quarks**  
**Leptonen**

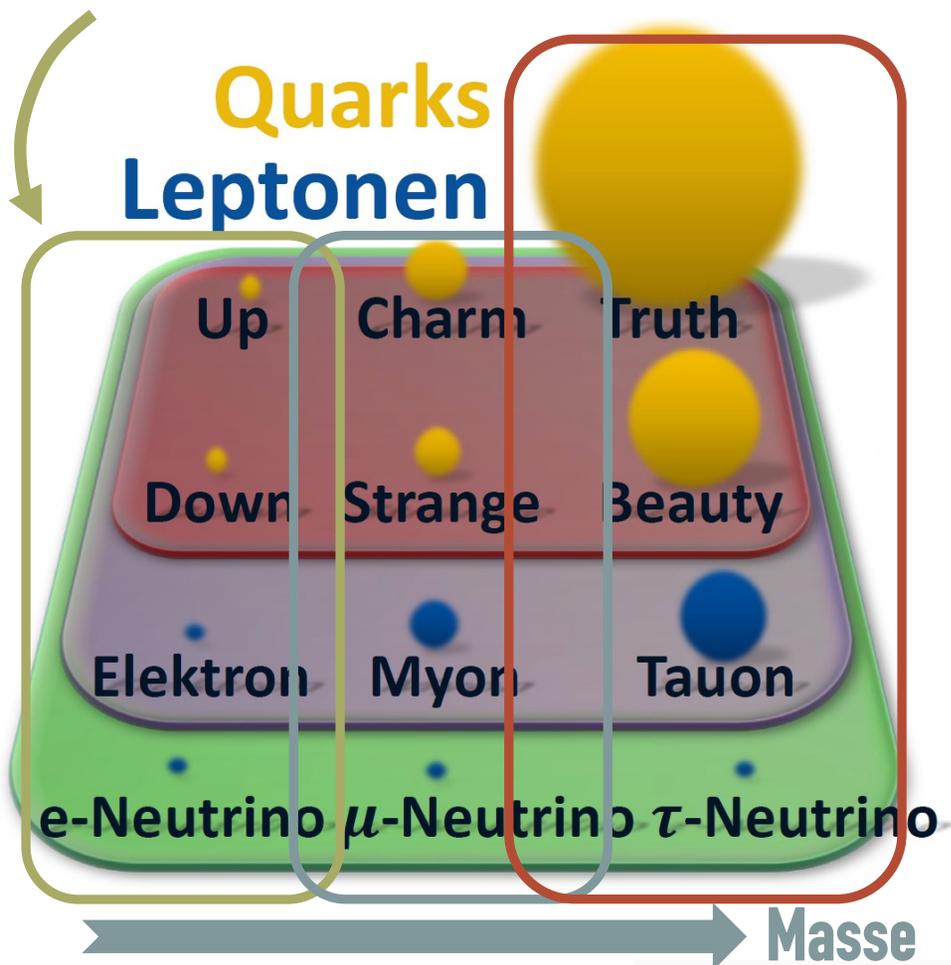


- Nach und nach wurden noch mehr kleinste Teilchen entdeckt
- Unsere **stabile Materie** besteht nur aus der **ersten Spalte**
- Die zweite und dritte Spalte sind schwerere Kopien der Teilchen in der ersten Spalte!

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

Quasi alles stabile  
im Universum

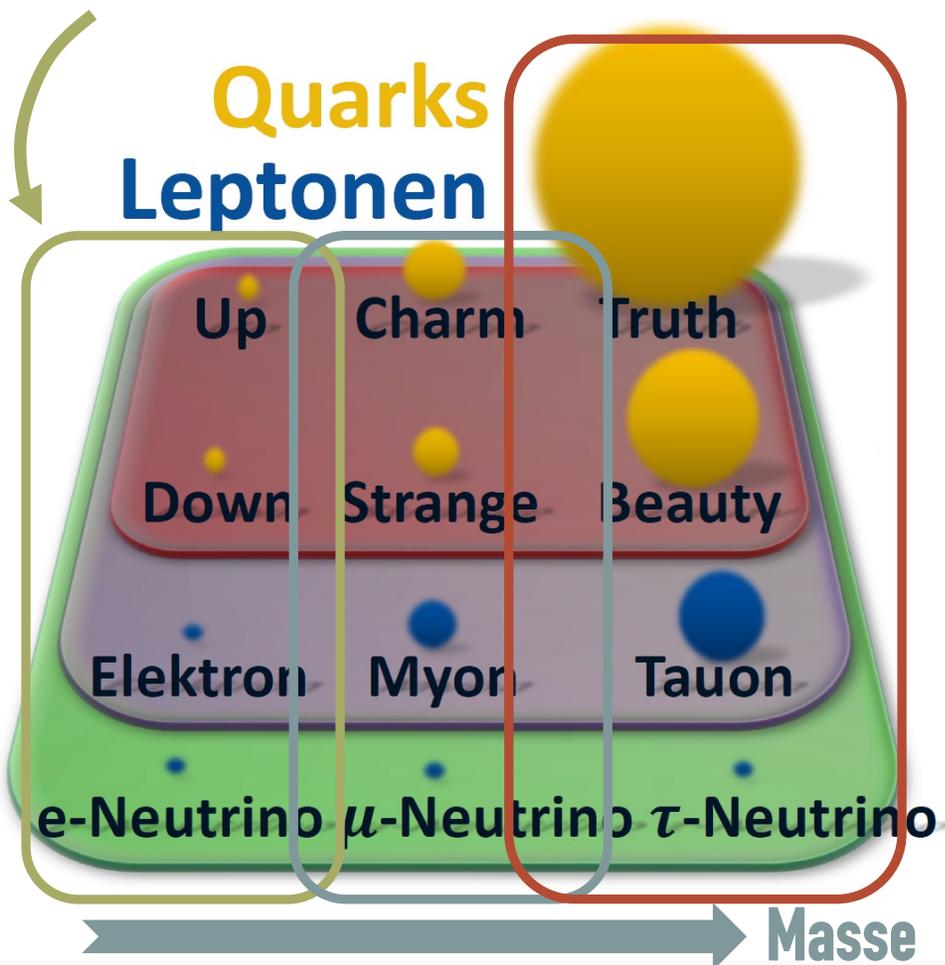


- Nach und nach wurden noch mehr kleinste Teilchen entdeckt
- Unsere **stabile Materie** besteht nur aus der **ersten Spalte**
- Die **zweite** und **dritte Spalte** sind schwerere Kopien der Teilchen in der ersten Spalte!

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

Quasi alles stabile  
im Universum



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

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**elektrische  
Ladung:**

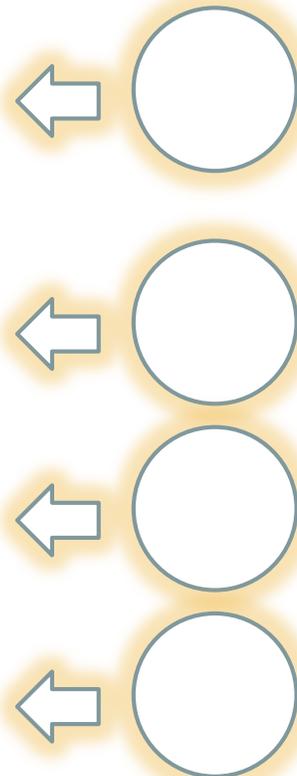
**Quarks**  
**Leptonen**

Up Charm Truth

Down Strange Beauty

Elektron Myon Tauon

e-Neutrino  $\mu$ -Neutrino  $\tau$ -Neutrino



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

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**elektrische  
Ladung:**

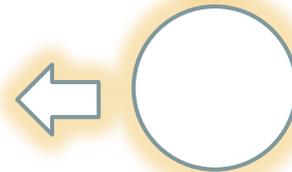
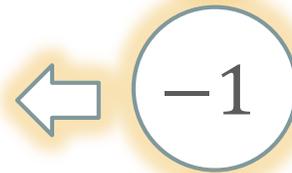
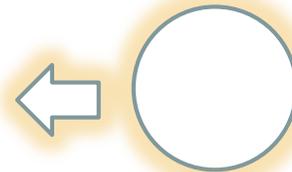
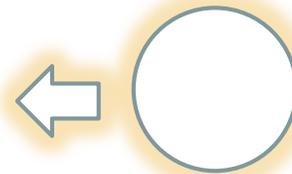
**Quarks**  
**Leptonen**

Up Charm Truth

Down Strange Beauty

Elektron Myon Tauon

e-Neutrino  $\mu$ -Neutrino  $\tau$ -Neutrino



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

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

## Quarks Leptonen

Up Charm Truth

Down Strange Beauty

Elektron Myon Tauon

e-Neutrino  $\mu$ -Neutrino  $\tau$ -Neutrino

elektrische  
Ladung:

←  $+\frac{2}{3}$

←  $0$

←  $-1$

←  $0$

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

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**elektrische  
Ladung:**

**Quarks**  
**Leptonen**

Up Charm Truth

Down Strange Beauty

Elektron Myon Tauon

e-Neutrino  $\mu$ -Neutrino  $\tau$ -Neutrino

←  $+\frac{2}{3}$

←  $-\frac{1}{3}$

←  $-1$

←  $0$

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

# DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Unser „Periodensystem“

**elektrische  
Ladung:**

**Quarks**  
**Leptonen**

Up Charm Truth

Down Strange Beauty

Elektron Myon Tauon

e-Neutrino  $\mu$ -Neutrino  $\tau$ -Neutrino

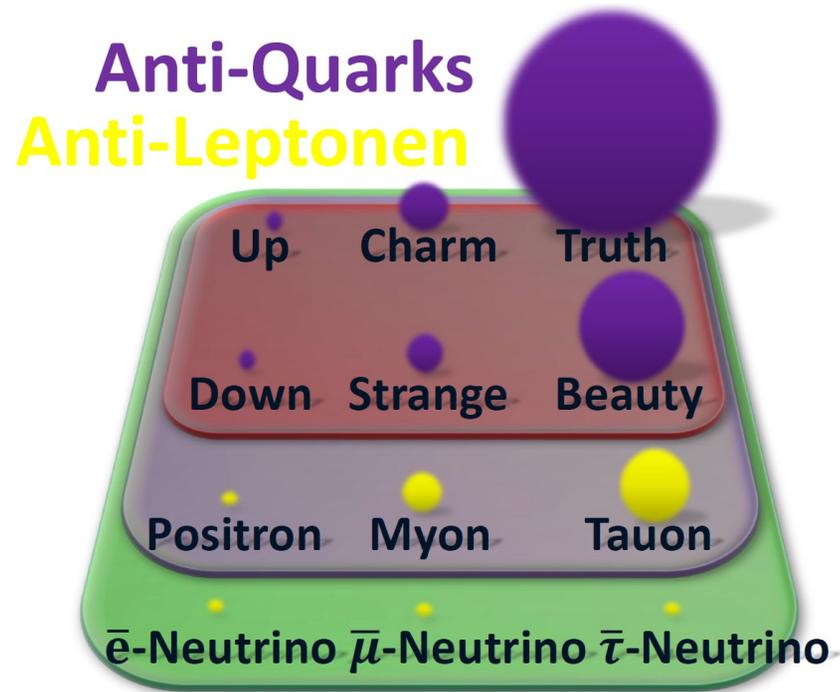
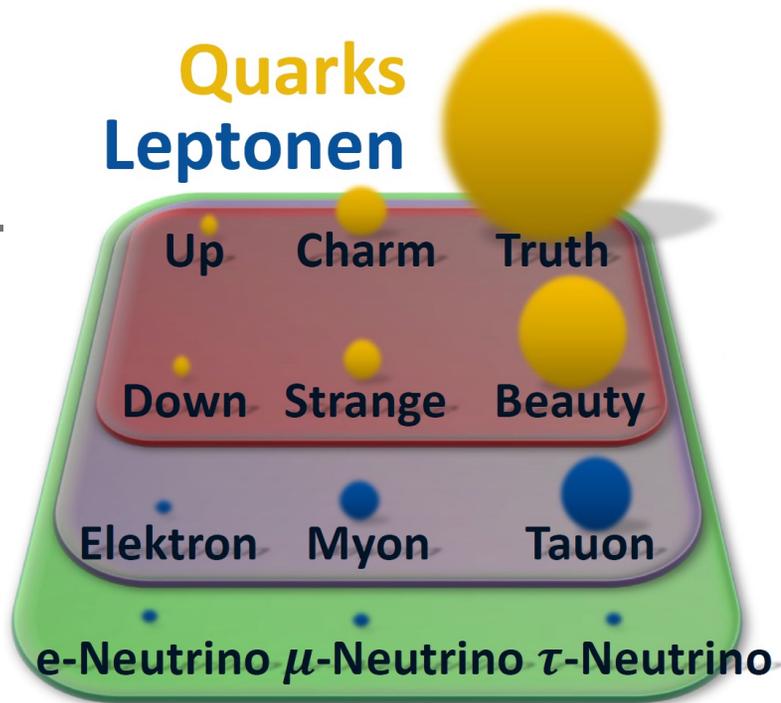
←  $+\frac{2}{3}$

←  $-\frac{1}{3}$

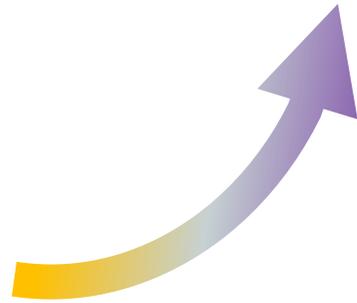
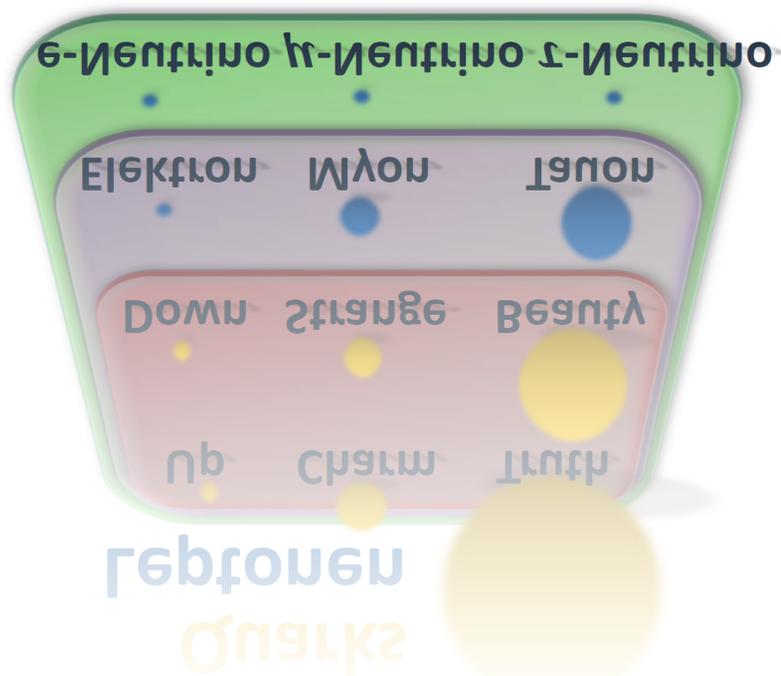
←  $-1$

←  $0$

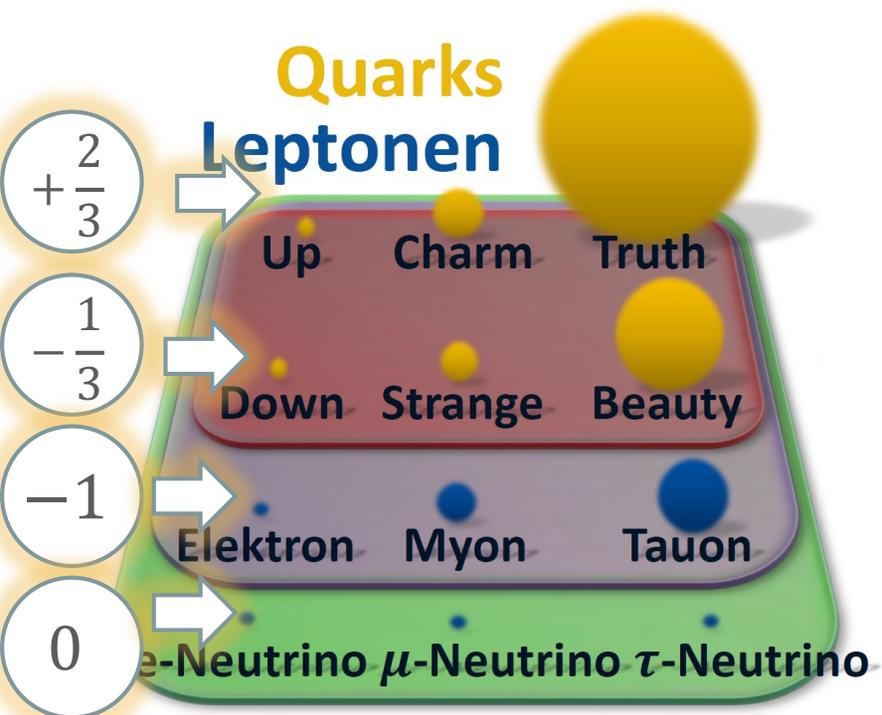
- Nach und nach wurden noch mehr kleinste Teilchen entdeckt
- Unsere **stabile Materie** besteht nur aus der **ersten Spalte**
- Die **zweite** und **dritte Spalte** sind schwerere Kopien der Teilchen in der ersten Spalte!
- Teilchen in jeder **Zeile** haben die gleiche Ladung!



**TERIE**  
—

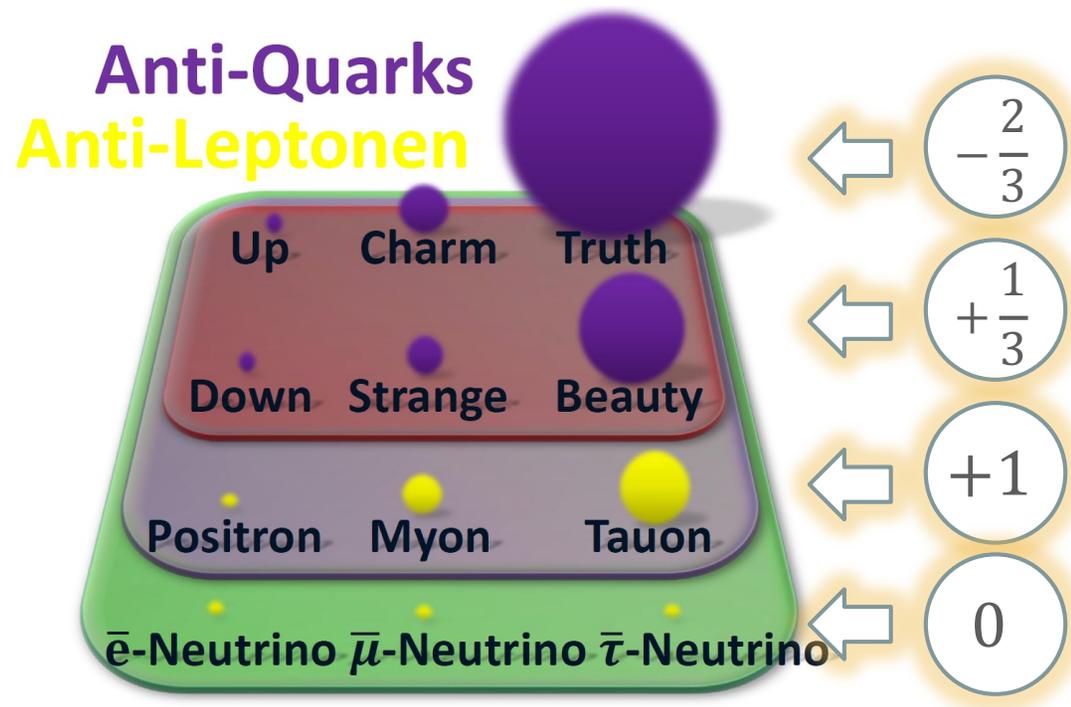


- Jedes Materieteilchen hat ein „Spiegelbild“:
- Antimaterie mit genau gleichen Eigenschaften aber entgegengesetzter **Ladung**



MATERIE

UND



ANTIMATERIE

- Jedes Materieteilchen hat ein „Spiegelbild“:
- Antimaterie mit genau gleichen Eigenschaften aber entgegengesetzter **Ladung**

# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → **TEILCHENPHYSIK-FRAGEN**

---



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

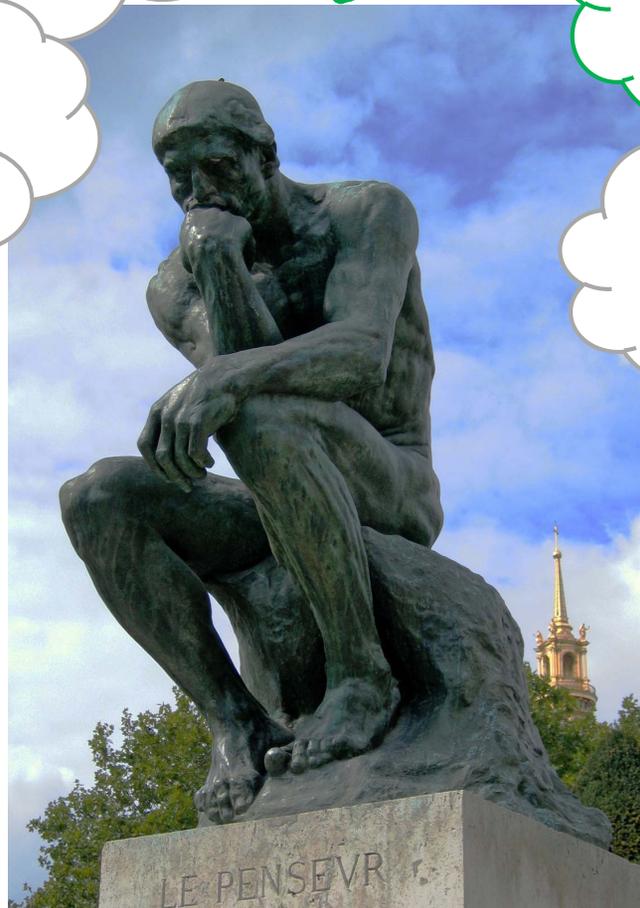
Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

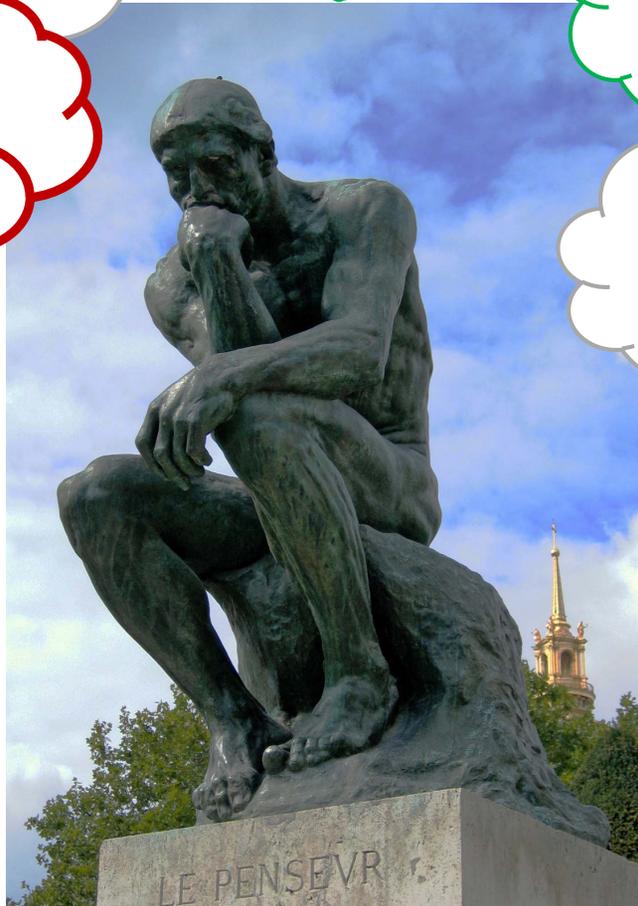
Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?



# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

---

# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

---

▶ Starke Kraft



▶ Elektromagnetische Kraft



▶ Schwache Kraft

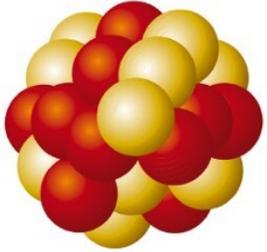


▶ Gravitation



# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

---



▶ Starke Kraft: Hält den Atomkern zusammen (bindet Quarks aneinander)



▶ Elektromagnetische Kraft



▶ Schwache Kraft

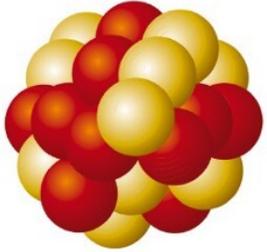


▶ Gravitation



# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

---



- ▶ Starke Kraft: Hält den Atomkern zusammen (bindet Quarks aneinander)



- ▶ Elektromagnetische Kraft: hält Atome und Moleküle zusammen (wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen)



- ▶ Schwache Kraft

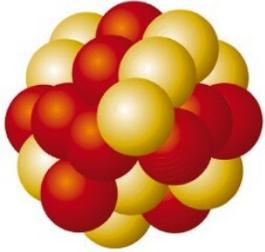


- ▶ Gravitation



# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

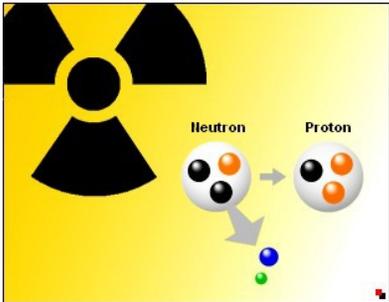
---



- ▶ Starke Kraft: Hält den Atomkern zusammen (bindet Quarks aneinander)



- ▶ Elektromagnetische Kraft: hält Atome und Moleküle zusammen (wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen)



- ▶ Schwache Kraft: verantwortlich für radioaktive Zerfälle von Atomkernen (wandelt Quarks oder Leptonen ineinander um)

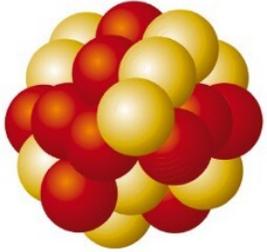


- ▶ Gravitation



# DAS STANDARDMODELL - KRÄFTE

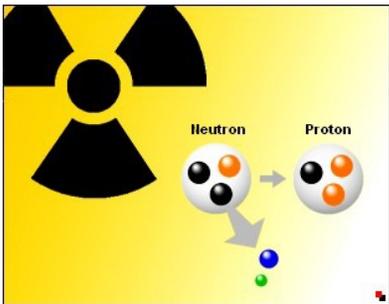
---



- ▶ Starke Kraft: Hält den Atomkern zusammen (bindet Quarks aneinander)



- ▶ Elektromagnetische Kraft: hält Atome und Moleküle zusammen (wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen)



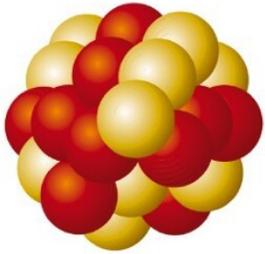
- ▶ Schwache Kraft: verantwortlich für radioaktive Zerfälle von Atomkernen (wandelt Quarks oder Leptonen ineinander um)



- ▶ Gravitation: Hält Planeten und Galaxien zusammen



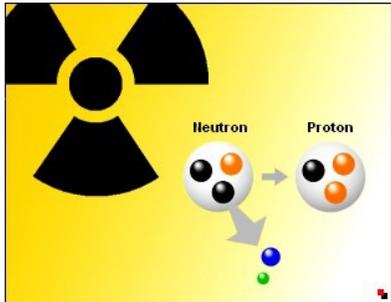
# DAS STANDARDMODELL – KRÄFTE



- ▶ Starke Kraft: Hält den Atomkern zusammen (bindet Quarks aneinander); Austauschteilchen: **Gluonen**



- ▶ Elektromagnetische Kraft: hält Atome und Moleküle zusammen (wirkt zwischen elektrisch geladenen Teilchen); Austauschteilchen: **Photonen**



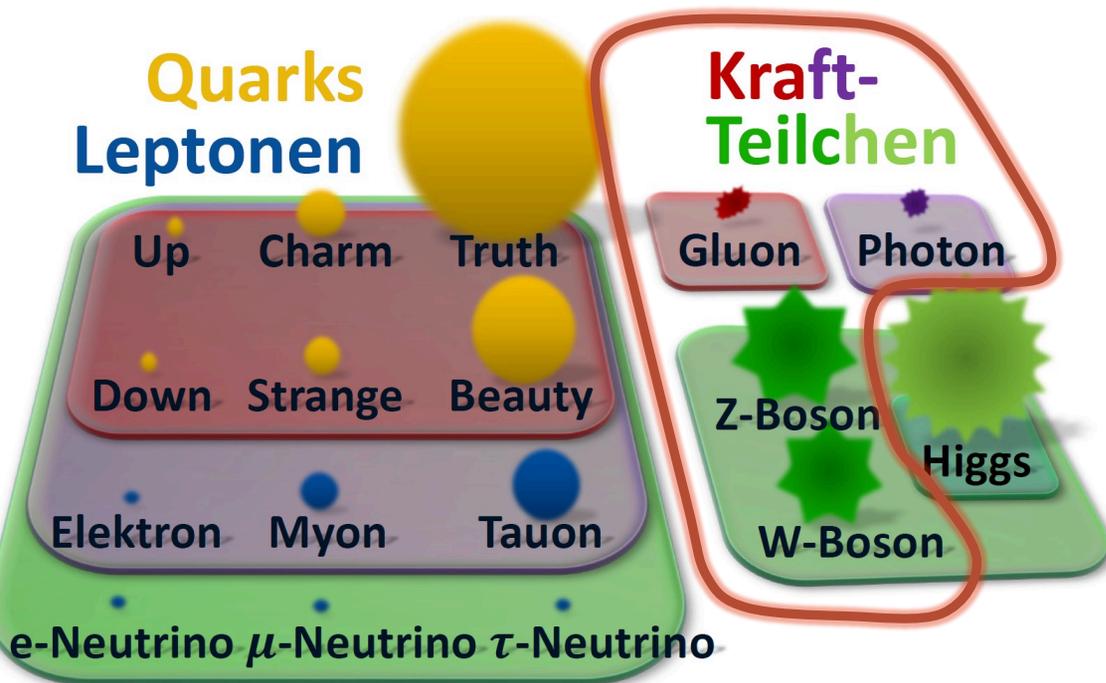
- ▶ Schwache Kraft: verantwortlich für radioaktive Zerfälle von Atomkernen (wandelt Quarks oder Leptonen ineinander um); Austauschteilchen: **W- und Z-Bosonen**



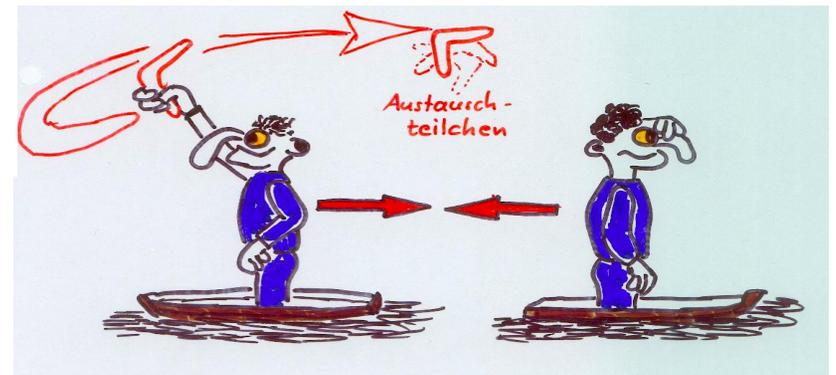
- ▶ Gravitation: Hält Planeten und Galaxien zusammen



# DAS STANDARDMODELL – KRÄFTE ZWISCHEN DEN TEILCHEN



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



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

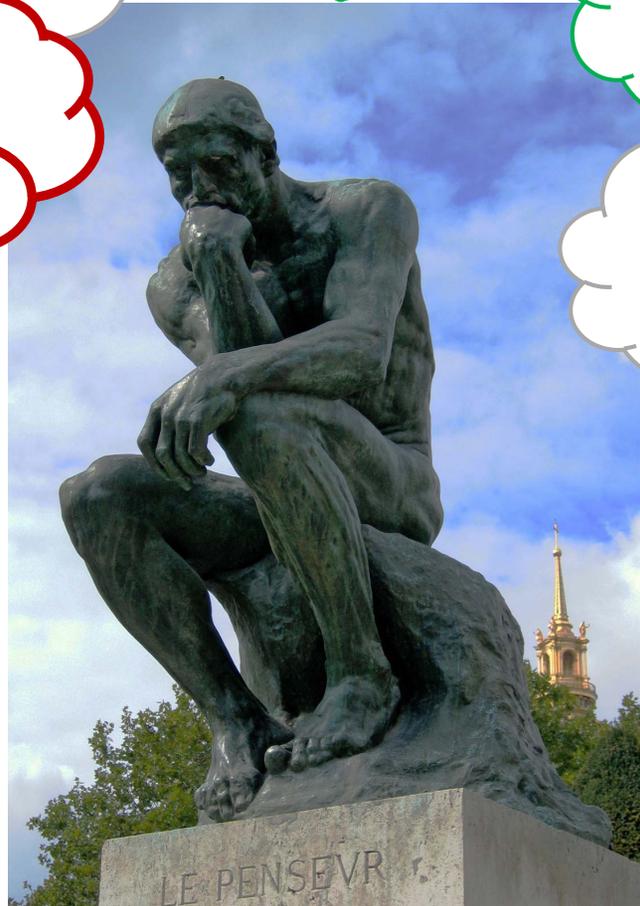
Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

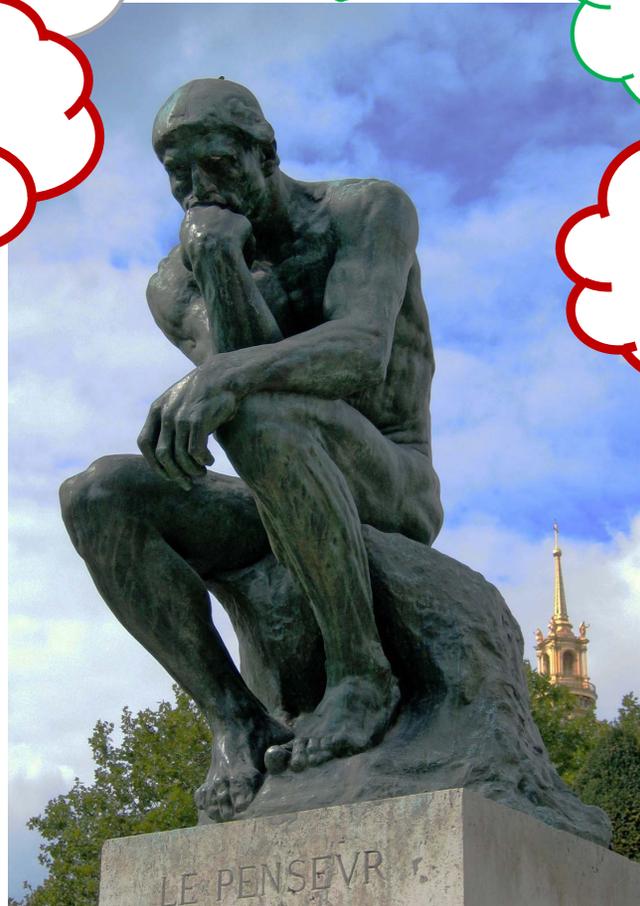
Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?

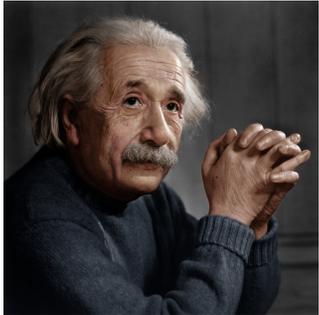


# WAS KANN MAN MIT ENERGIE EIGENTLICH SO MACHEN?

---



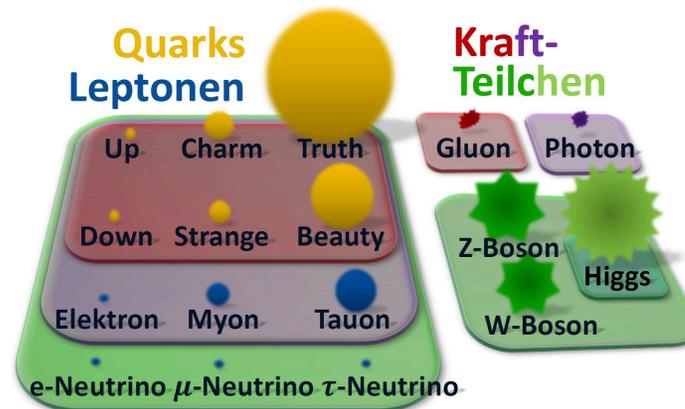
# WAS KANN MAN MIT ENERGIE EIGENTLICH SO MACHEN?



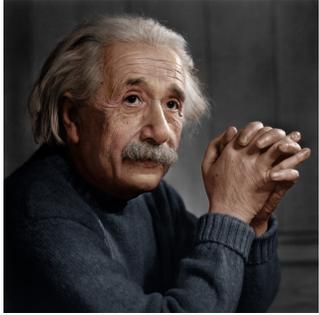
$$E = mc^2$$

Energie      Masse      Konstante

Alles!



# SCHRITT FÜR SCHRITT: WIE KRIEGET MAN ÜBERHAUPT ENERGIE?

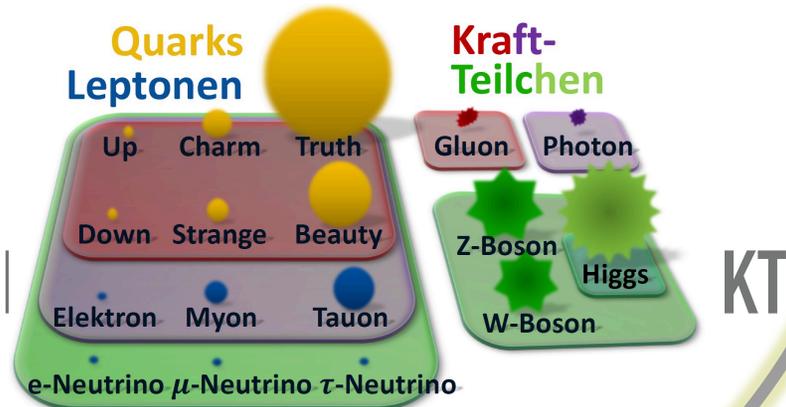


$$E = mc^2$$

Energie      Masse      Konstante

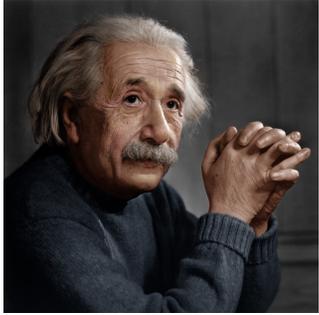
Alles!

TEILCHENBESCHLEUNIGER: VIEL



# SCHRITT FÜR SCHRITT: WIE KRIEGT MAN ÜBERHAUPT ENERGIE?

---



$$E = mc^2$$

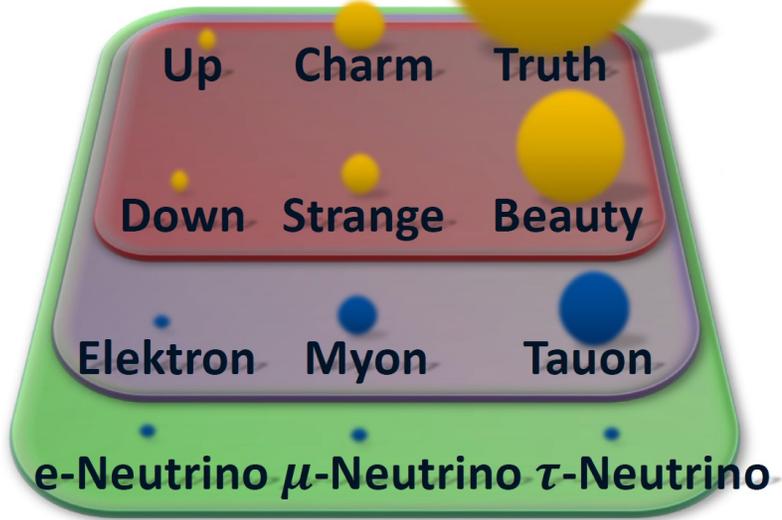
Energie                      Masse                      Konstante

The equation  $E = mc^2$  is displayed in a large, bold, italicized font. Below the equation, three labels are positioned: 'Energie' under the 'E', 'Masse' under the 'm', and 'Konstante' under the 'c^2'. Curved arrows point from each label to its corresponding part of the equation: from 'Energie' to 'E', from 'Masse' to 'm', and from 'Konstante' to 'c^2'.

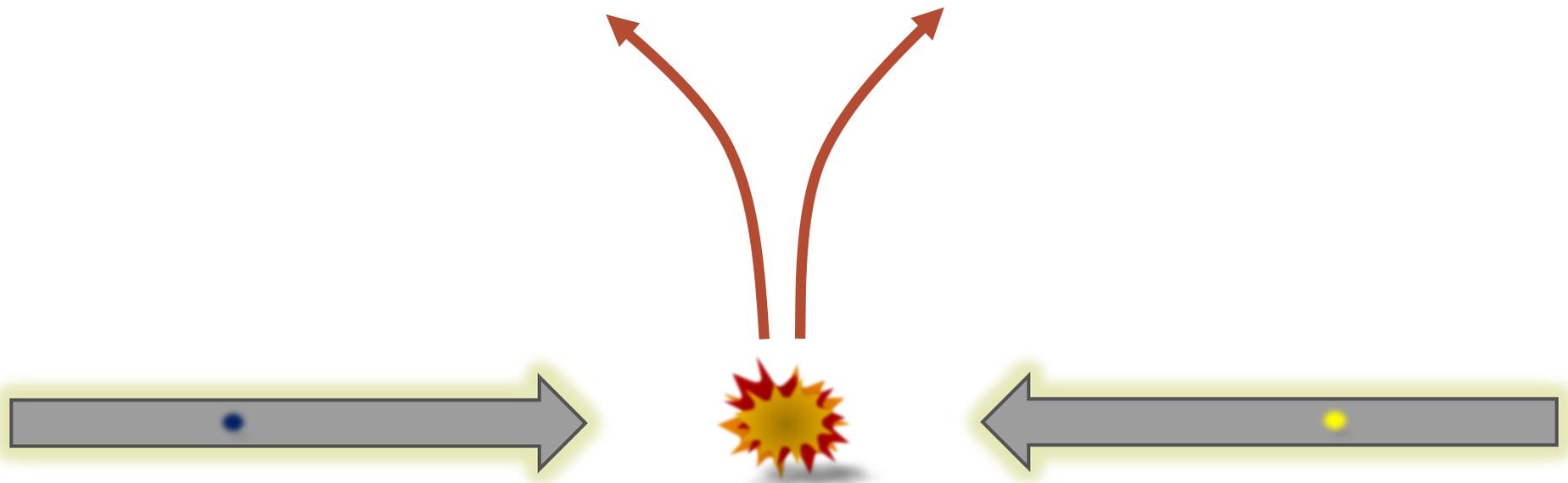
TEILCHENBESCHLEUNIGER: VIEL ENERGIE AUF EINEM PUNKT

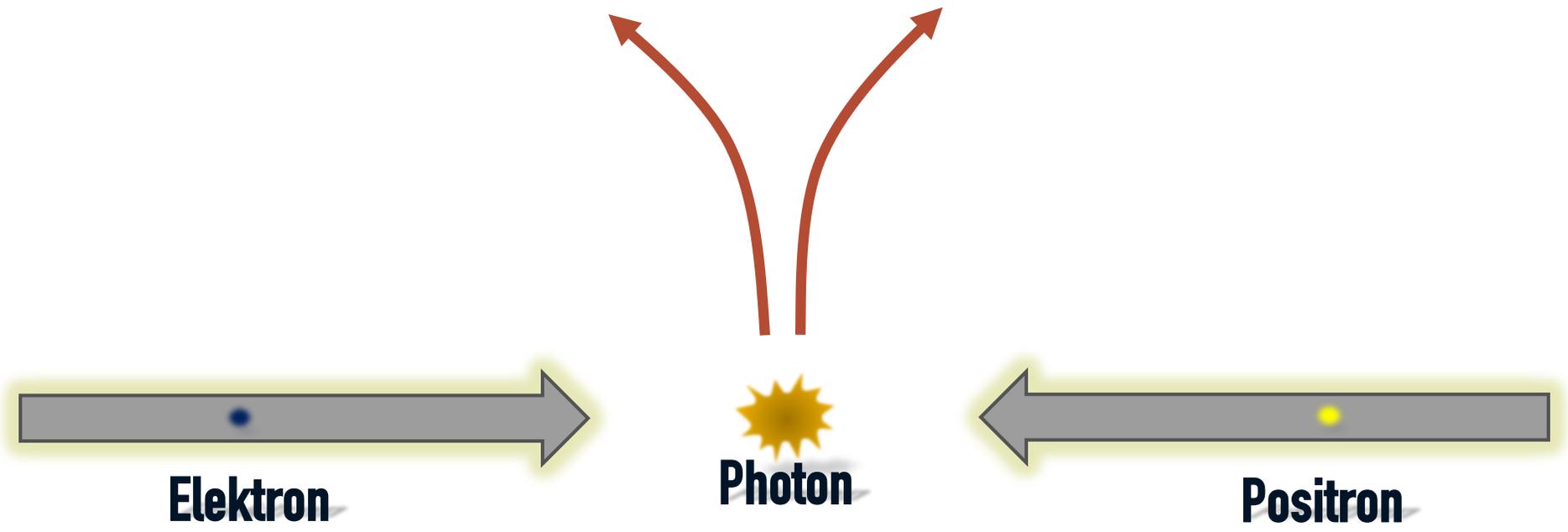
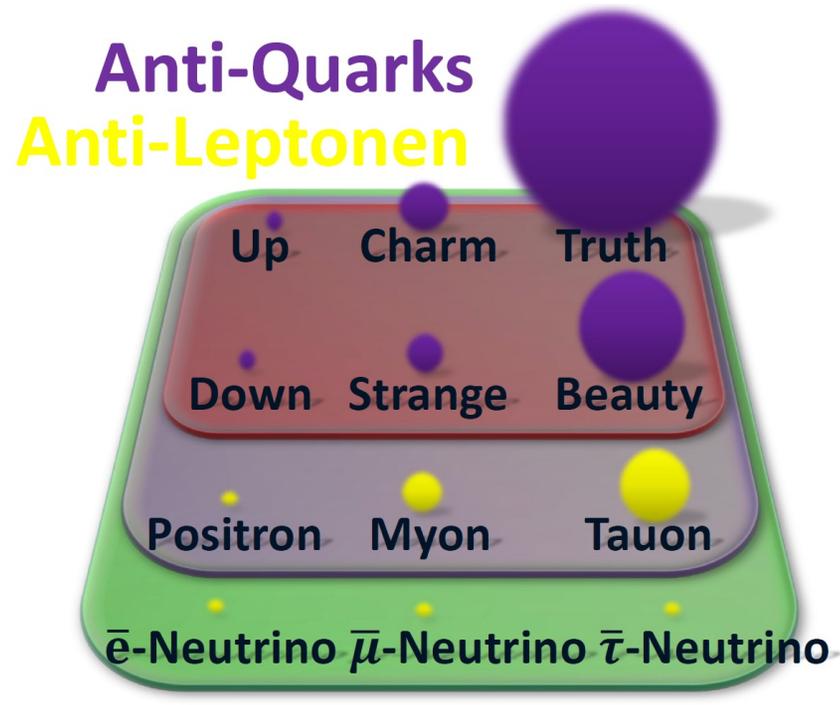
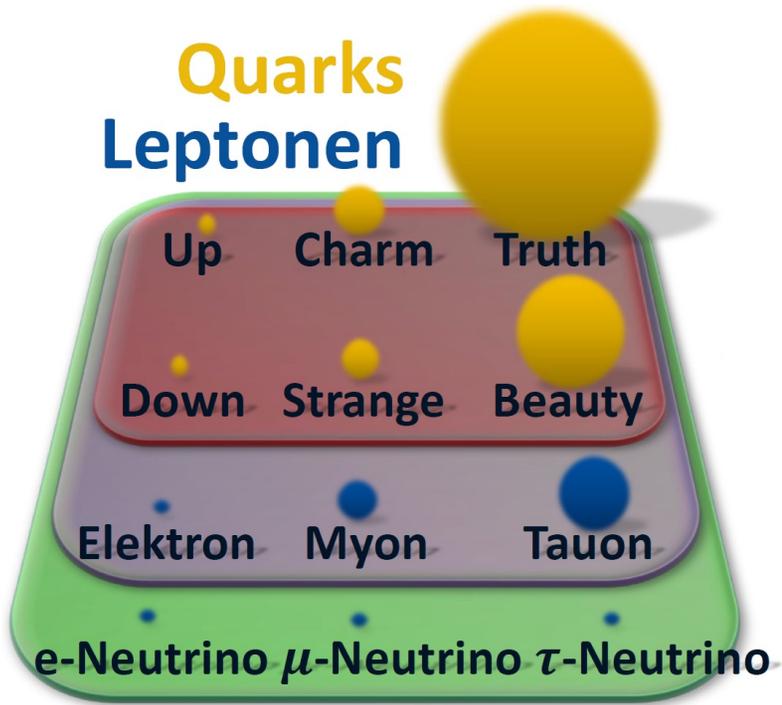


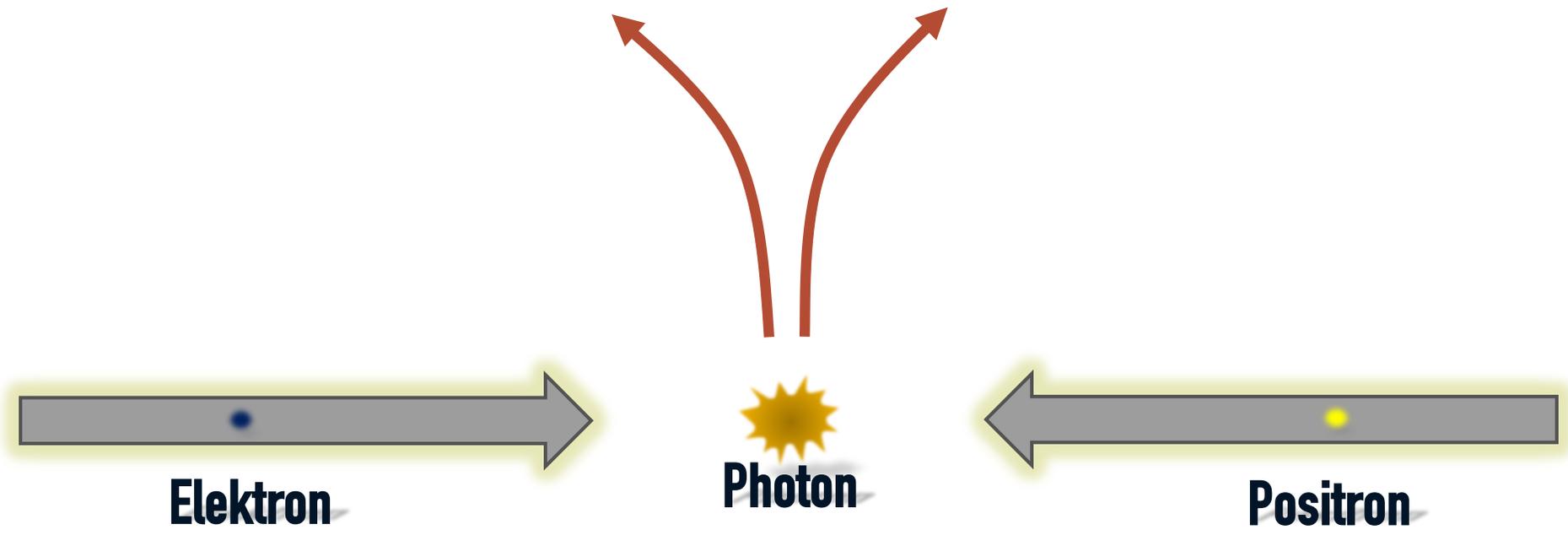
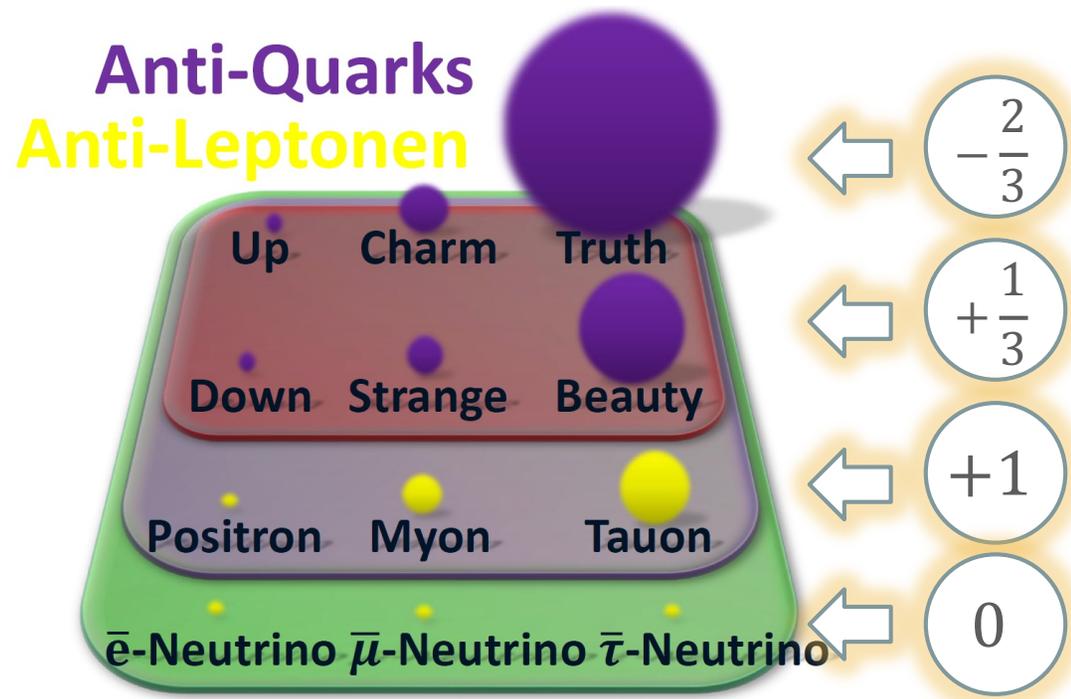
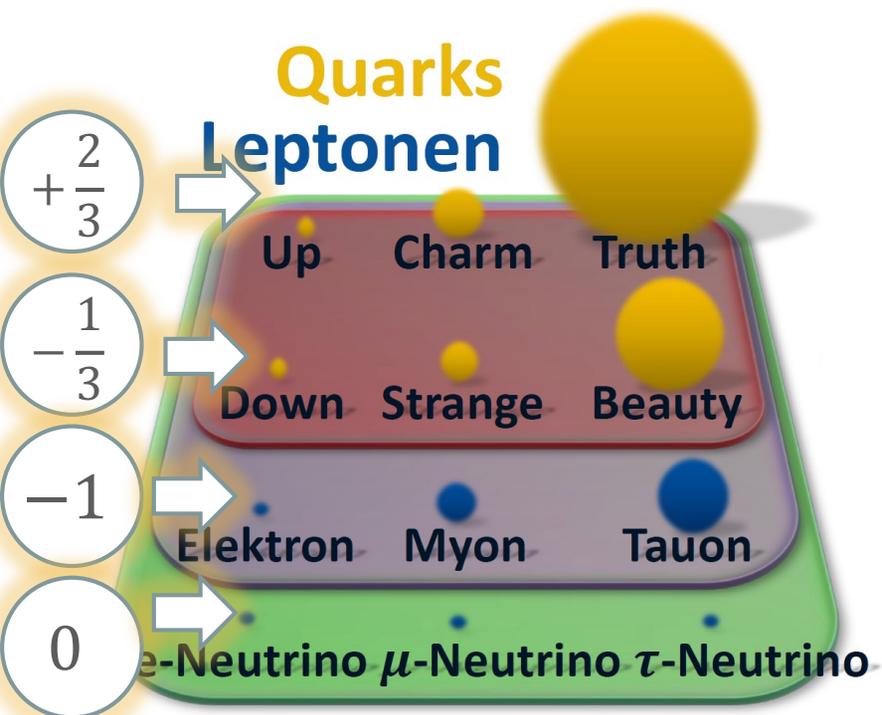
# Quarks Leptonen

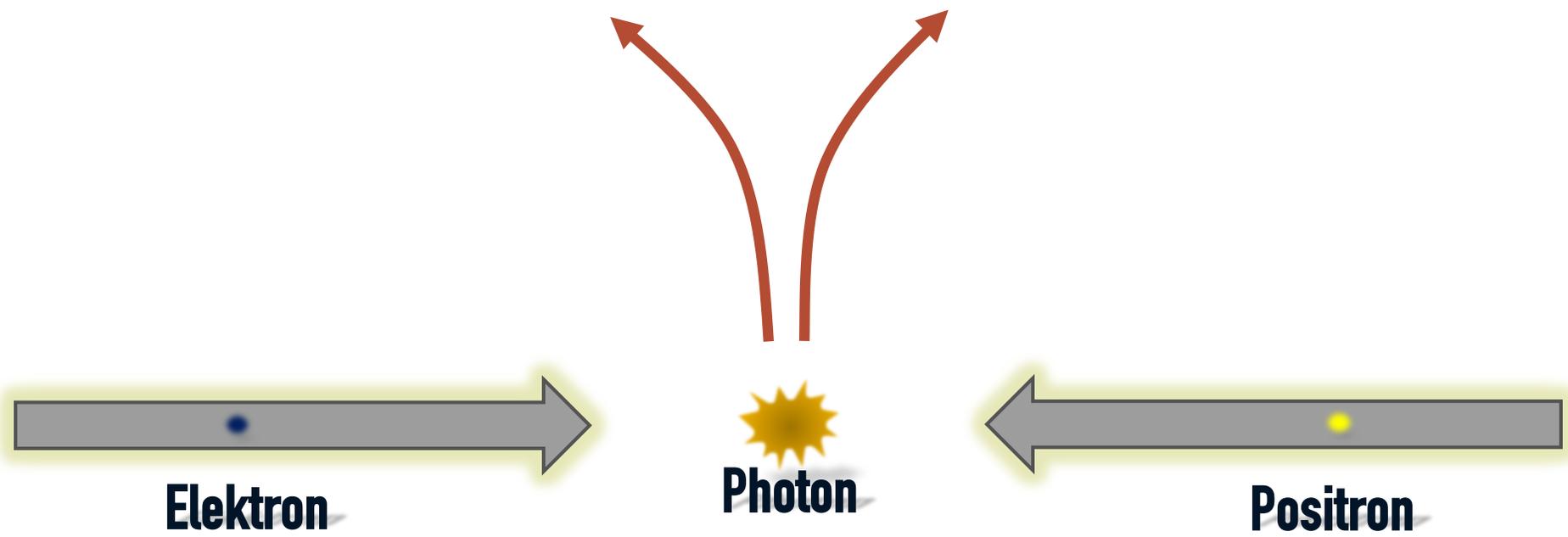
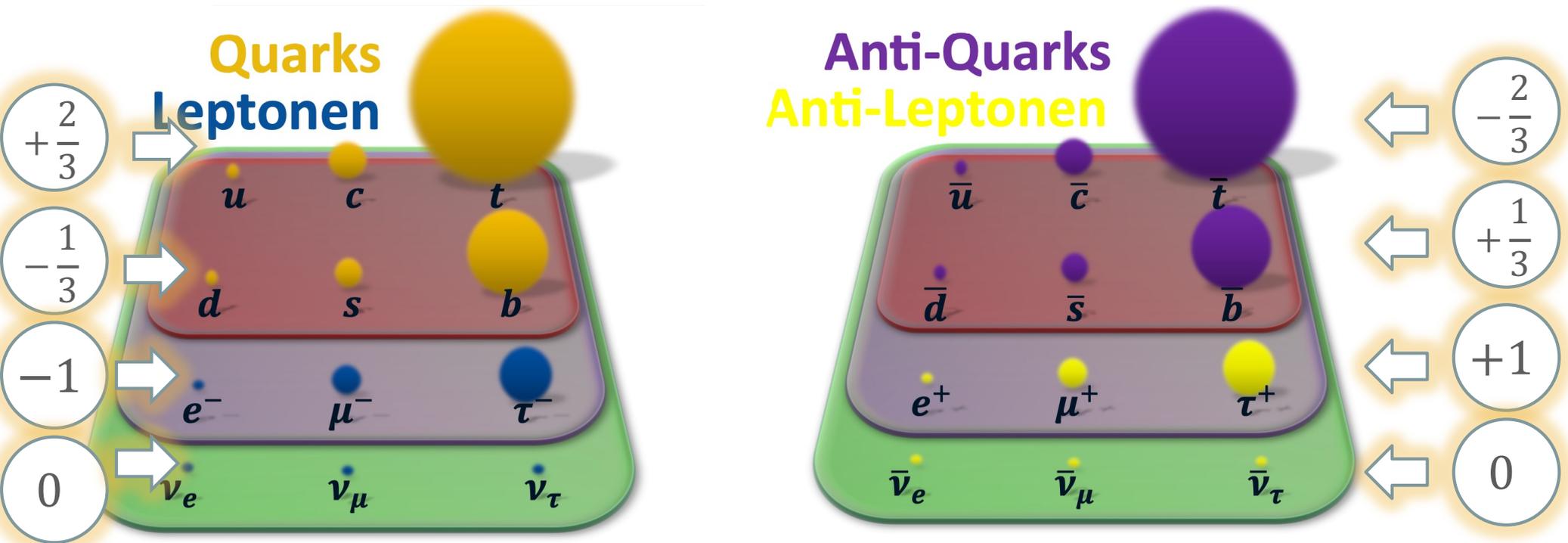


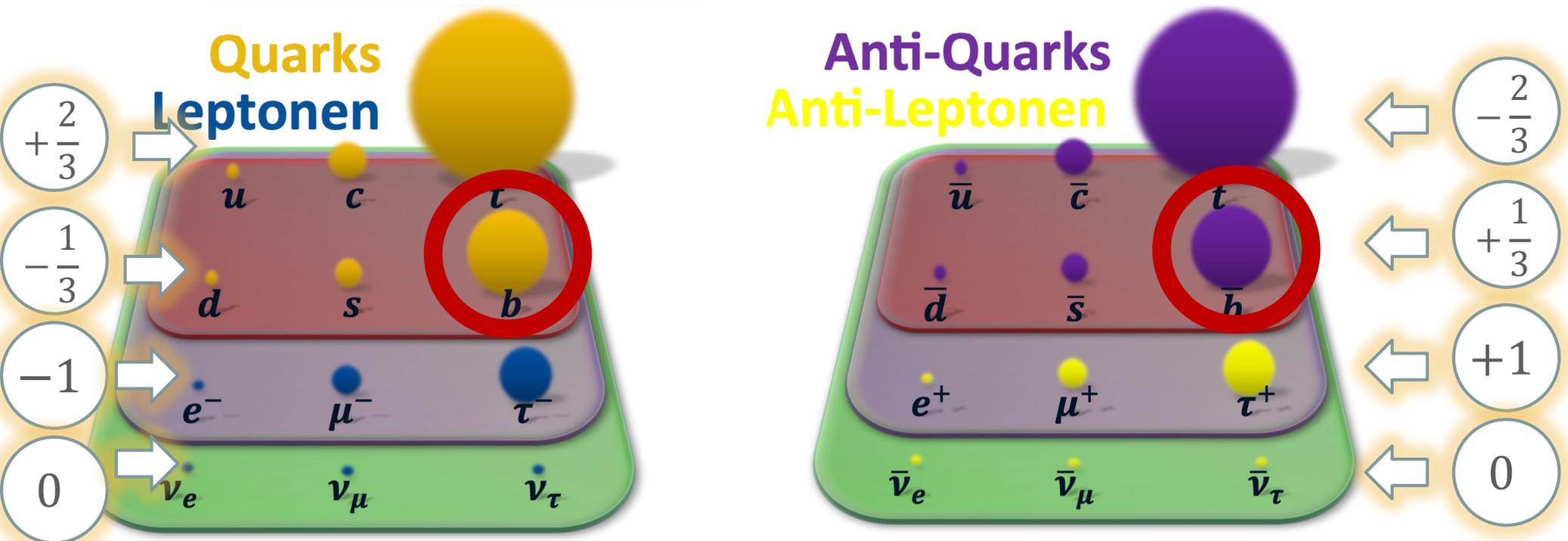
# Anti-Quarks Anti-Leptonen





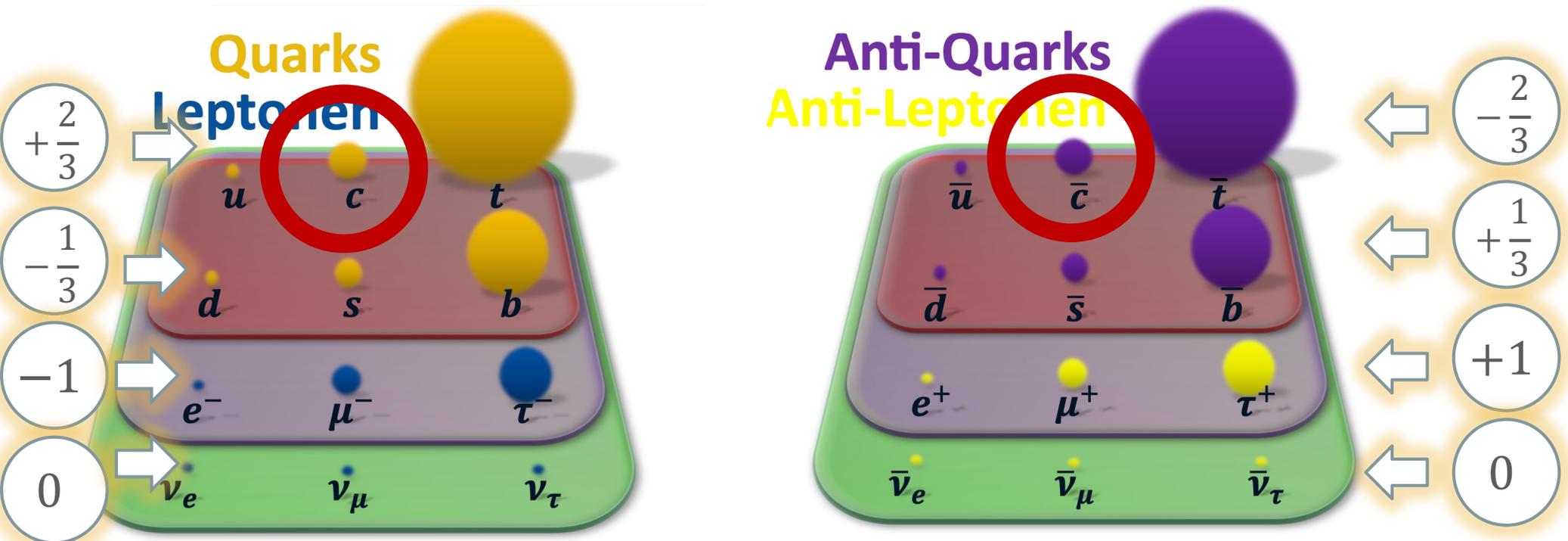






$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{b} b: \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \cdot XY$$

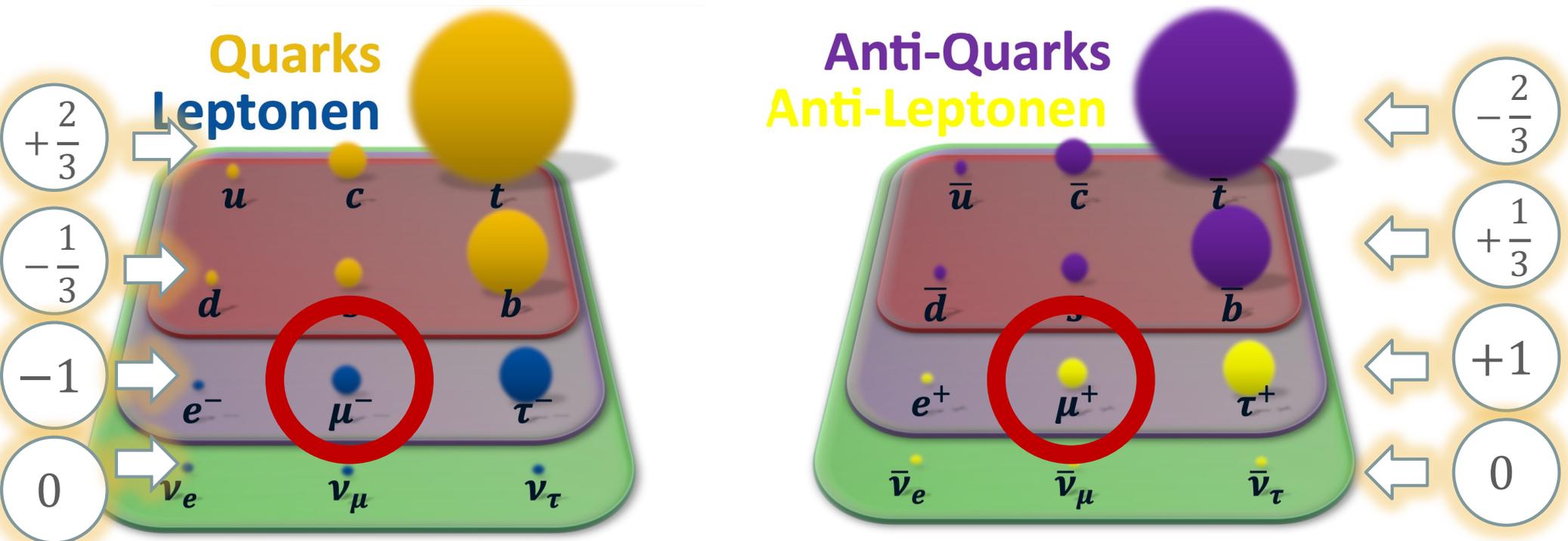




$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{b} b: \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \cdot XY$$

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





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

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

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



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

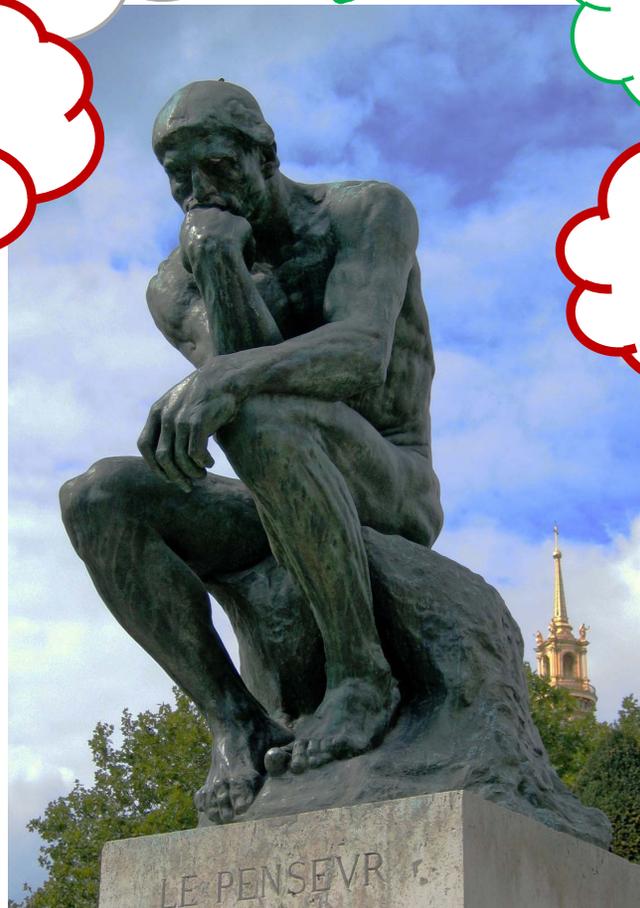
Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

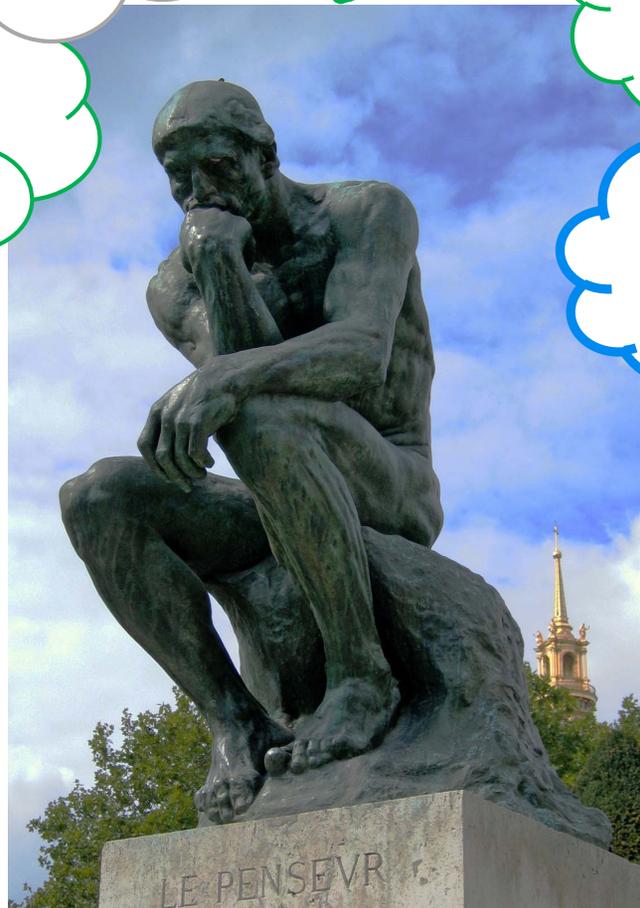
Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?



# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

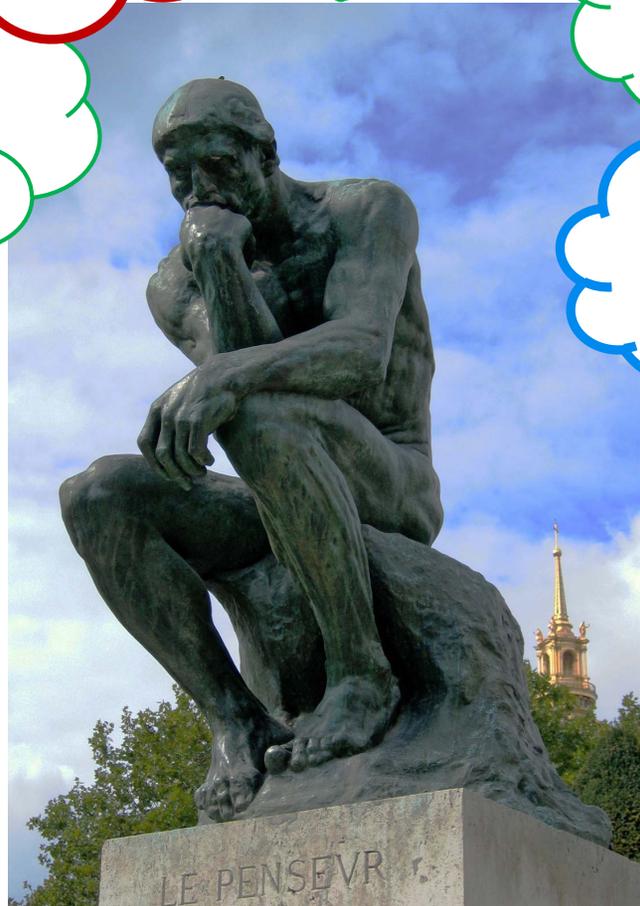
Was ist  
überhaupt das  
Universum?

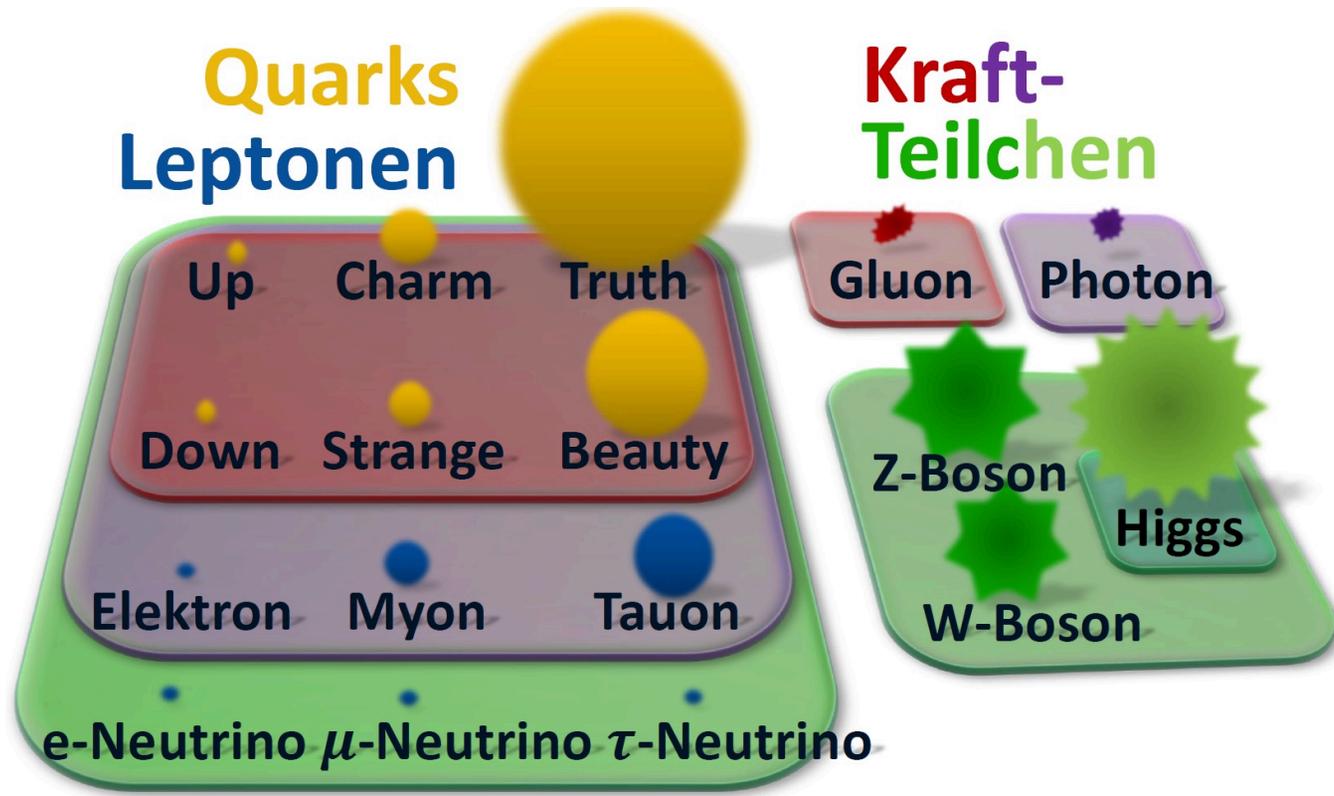
Woraus  
bestehe ich  
eigentlich?

Und woraus  
besteht das  
Universum?

Warum und wie  
funktioniert es?

Und wie ist  
das alles  
entstanden?





## DAS STANDARDMODELL – ALLES KLAR?

---

- ▶ Alle vorhergesagten Teilchen des Modells wurden gefunden, es scheint komplett.
- ▶ Unser Modell beschreibt alle experimentellen Teilchenphysik-Ergebnisse extrem genau
- ▶ **Noch lange nicht alles klar!**

# 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

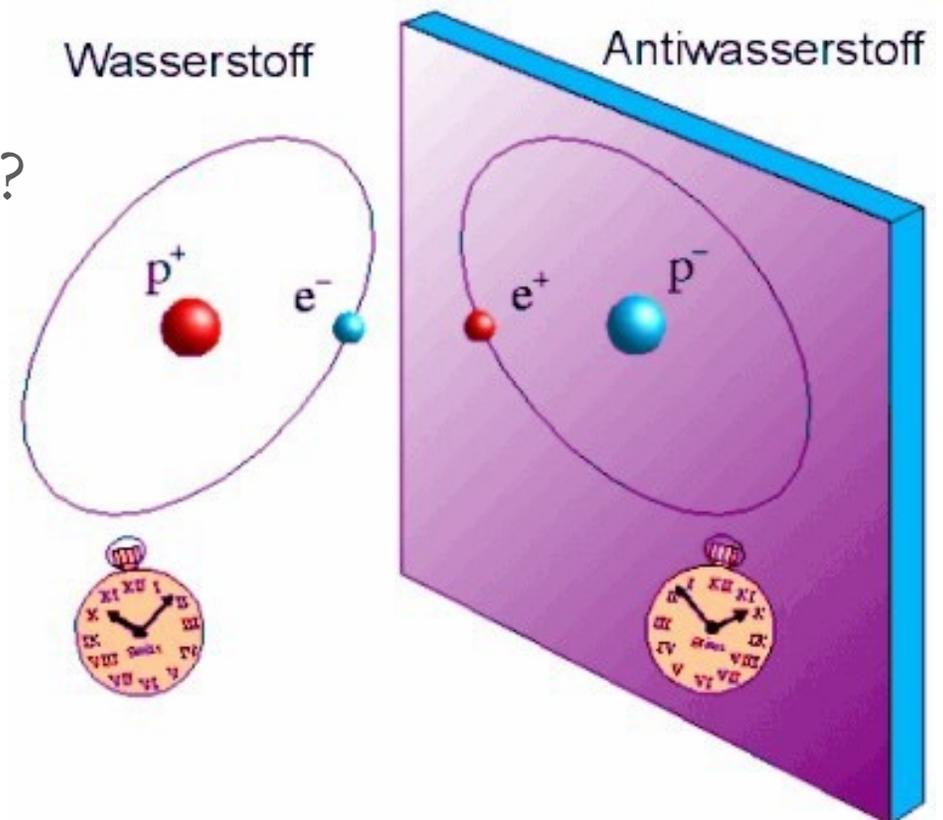


# WARUM GIBT ES DAS UNIVERSUM ÜBERHAUPT?

---

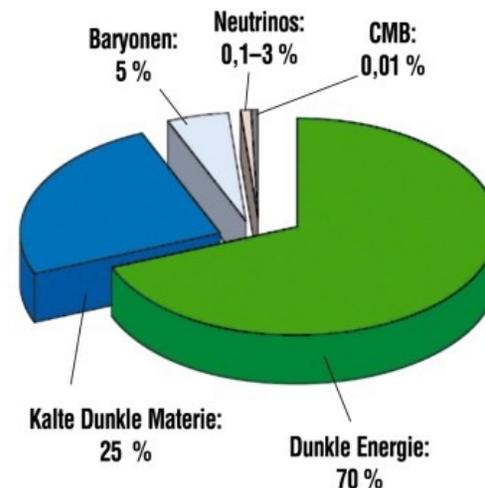
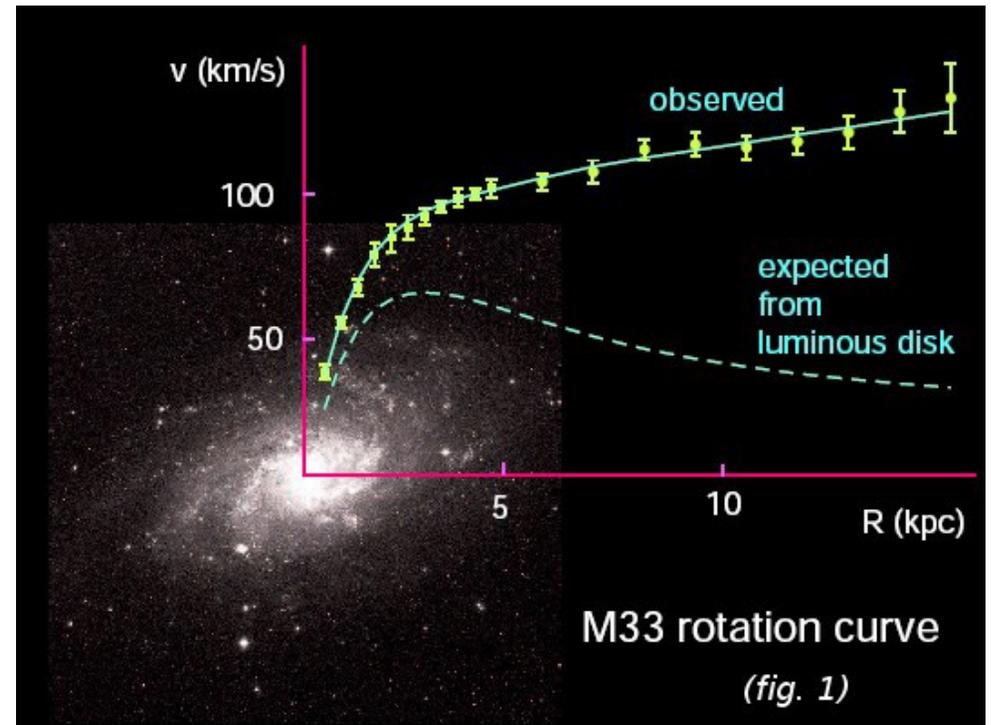
- Unser Universum besteht aus Materie
- Materie kann nur mit Antimaterie zusammen erzeugt werden
- Eigentlich wollte es genauso viel Antimaterie wie Materie geben (exakte Symmetrie)

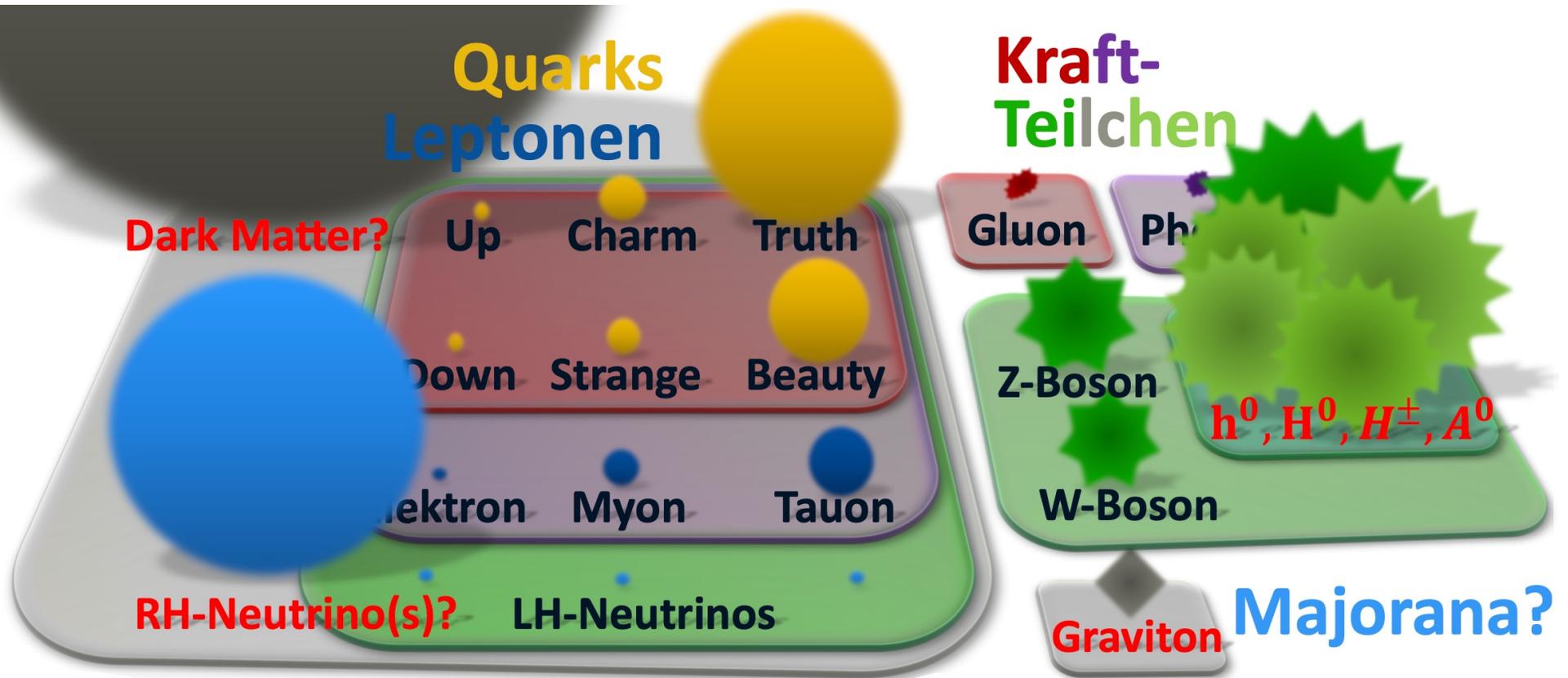
- Aber wo ist die Antimaterie hin?
- Ist die Symmetrie gebrochen?



# 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)!



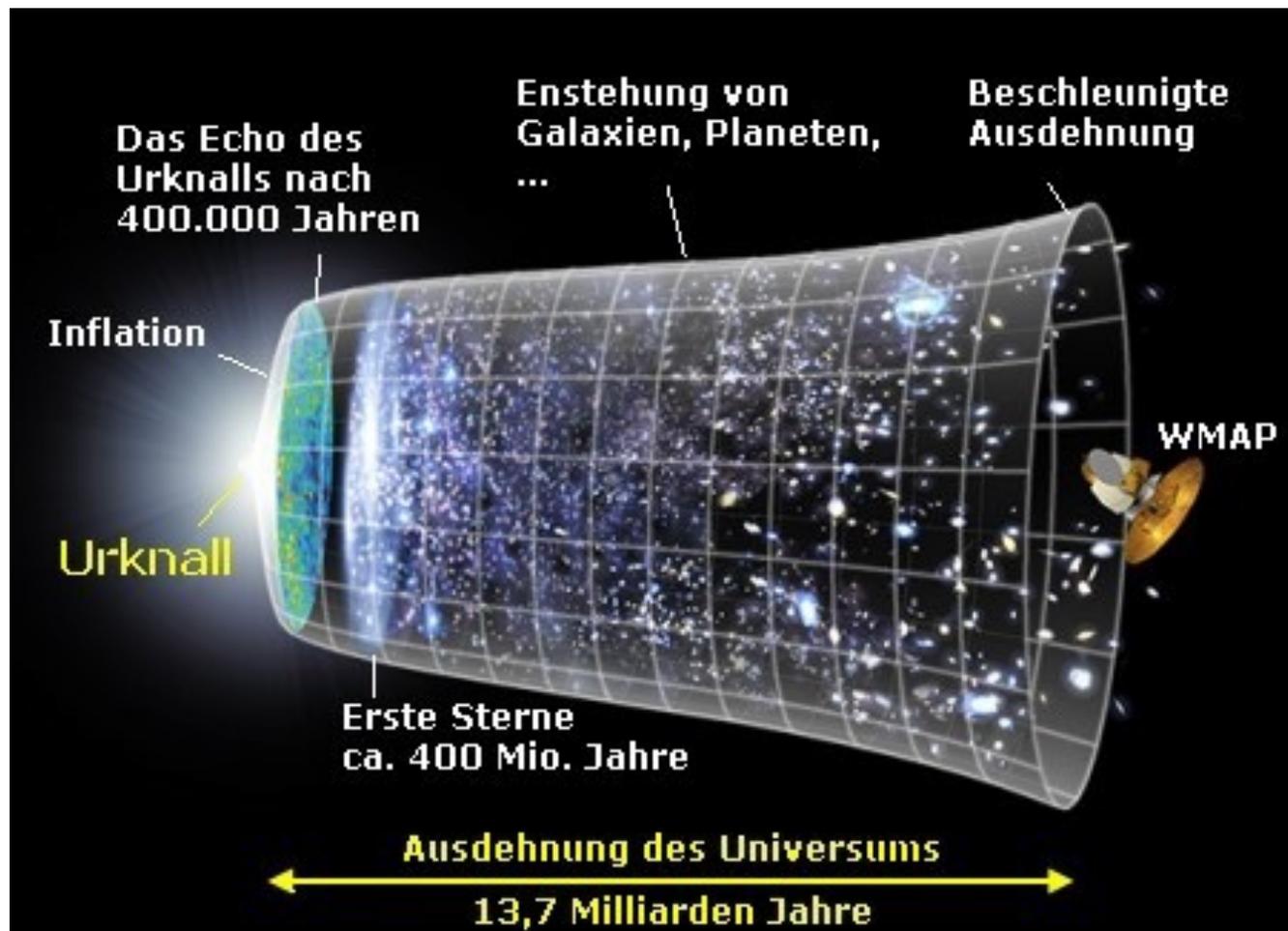


## DAS STANDARDMODELL – NOCH LÄNGST NICHT ALLES KLAR!

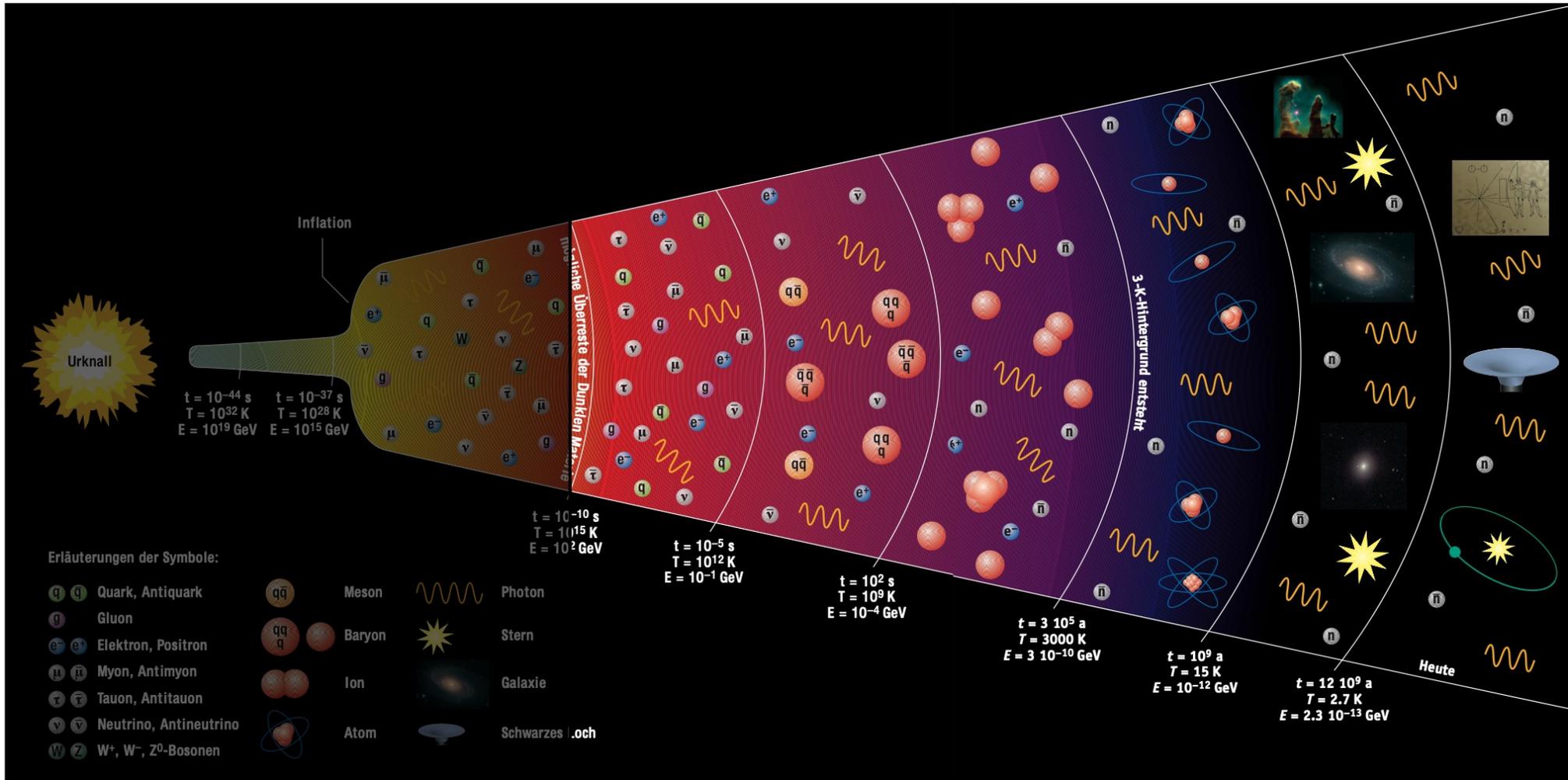
- Wie können wir die **Gravitation** mit unserem SM vereinen?
- Wieso ist die **Materie-Antimaterie Symmetrie** gebrochen?
- Aus welchen Teilchen besteht **dunkle Materie**?
- **Wie können wir solche Fragen beantworten?**

# VERBINDUNG ZWISCHEN TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

- Beobachtung des Weltraums um herauszufinden wie das Universum entstanden ist



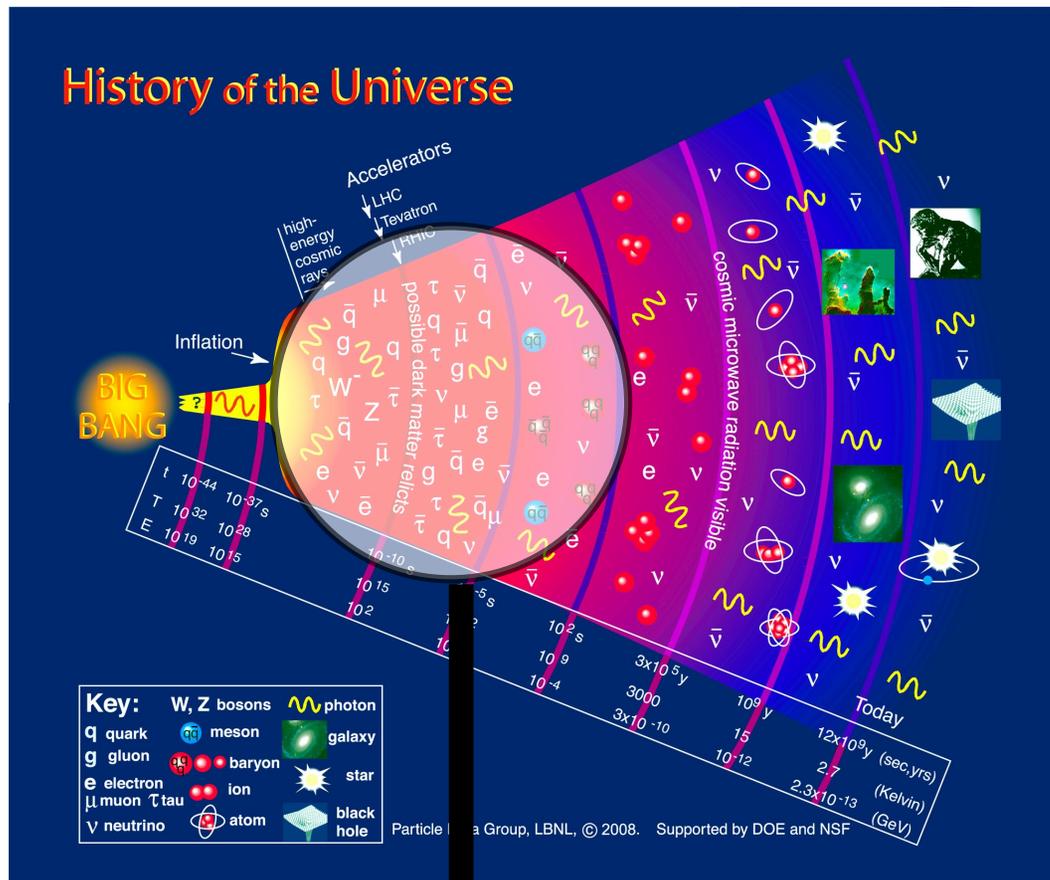
# GESCHICHTE DES UNIVERSUMS



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?
  - ▶ Usw..

# „ALLTÄGLICHE“ FRAGEN → TEILCHENPHYSIK-FRAGEN

---

Was ist überhaupt das Universum?

Woraus bestehe ich eigentlich?

Und woraus besteht das Universum?

Warum und wie funktioniert es?

Und wie ist das alles entstanden?

