

Die Entdeckung des Atoms: Ein historischer Rückblick

Ferienakademie „Kernspaltei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher

Department of Physics and Astronomy

Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se



Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



UPPSALA
UNIVERSITET

Die Entdeckung des Atoms: Ein historischer Rückblick

Ferienakademie „Kernspaltei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher

Department of Physics and Astronomy

Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se



Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



UPPSALA
UNIVERSITET

Von der Kuh zum Quark

Ferienakademie „Kernspaltei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher

Department of Physics and Astronomy

Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se



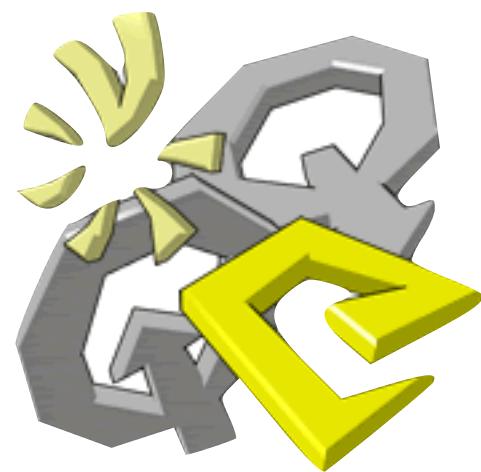
Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



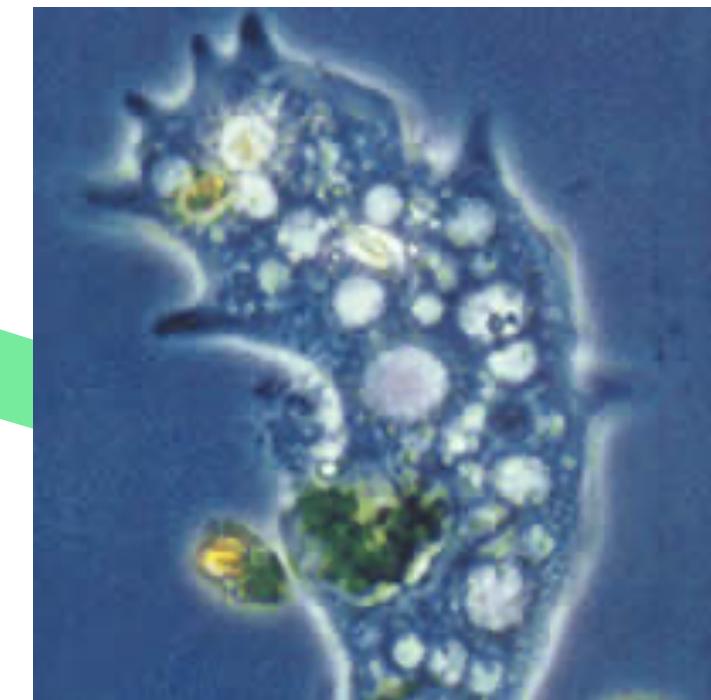
UPPSALA
UNIVERSITET



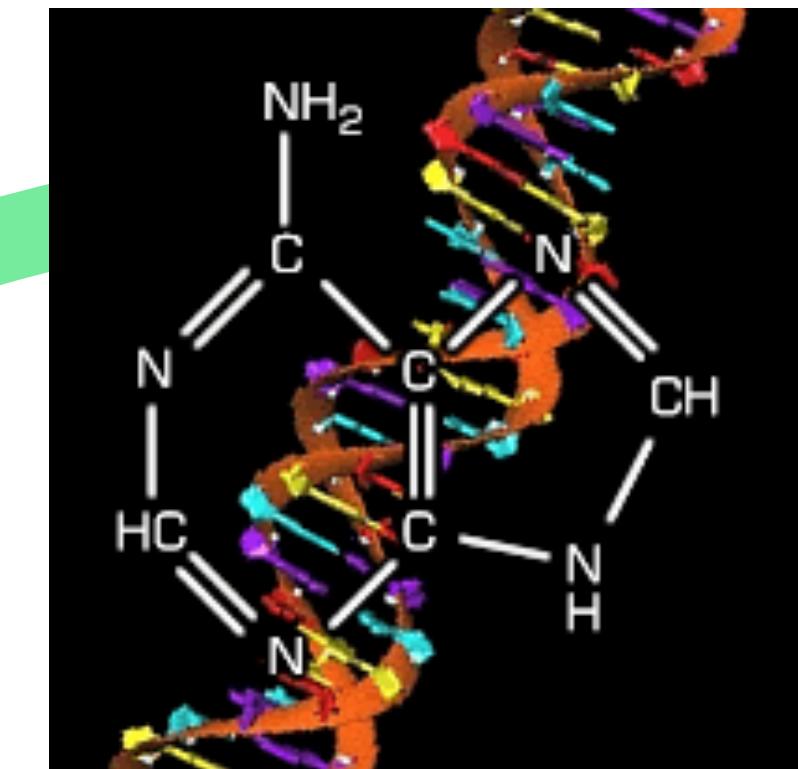
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



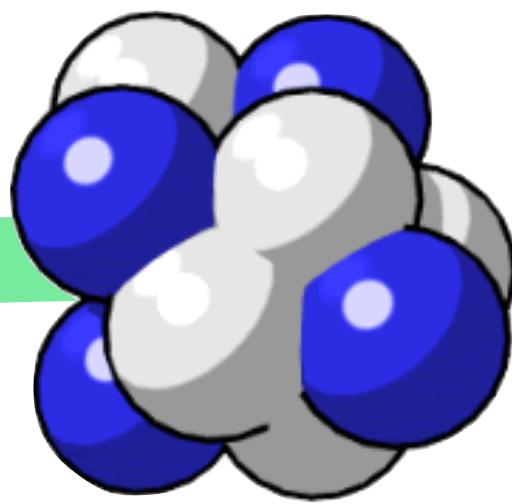
**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



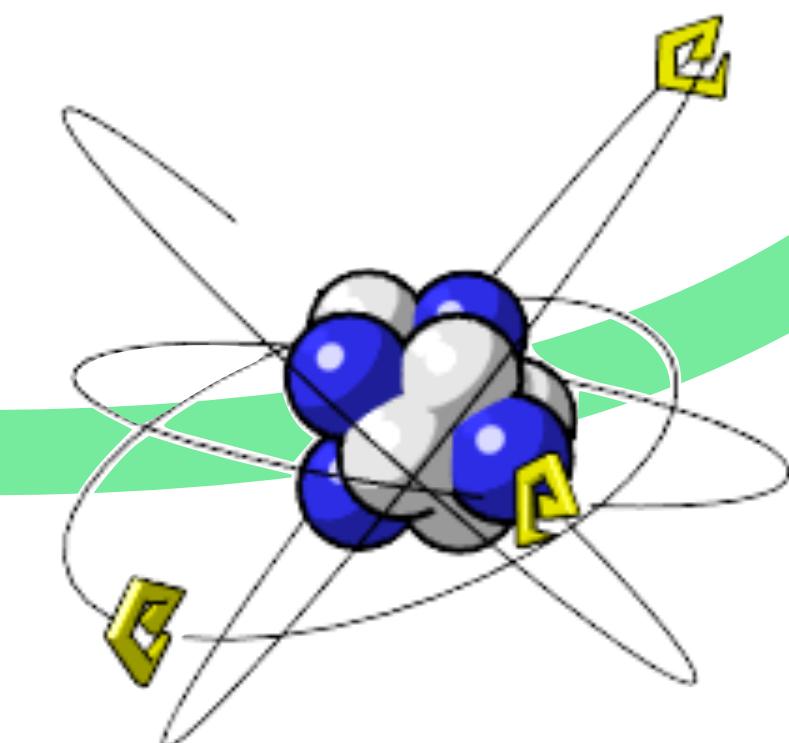
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**

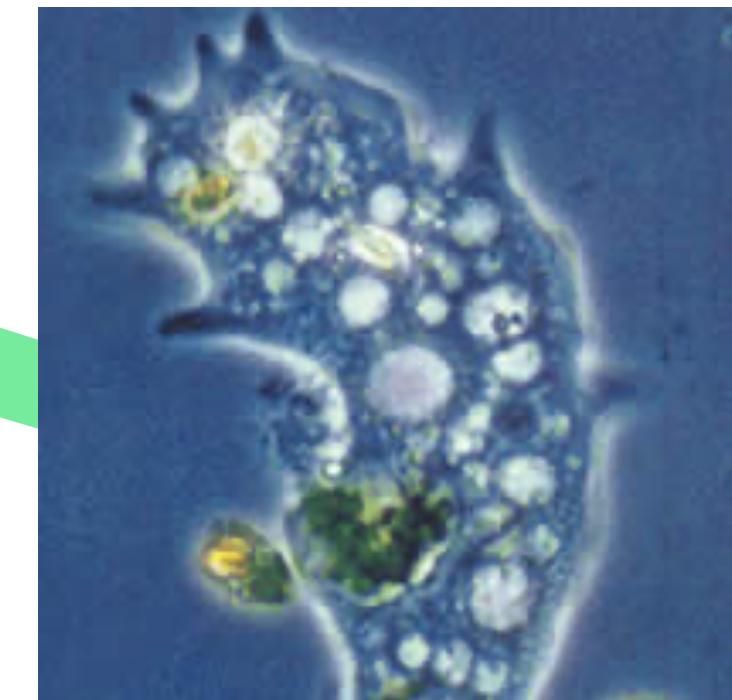


**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

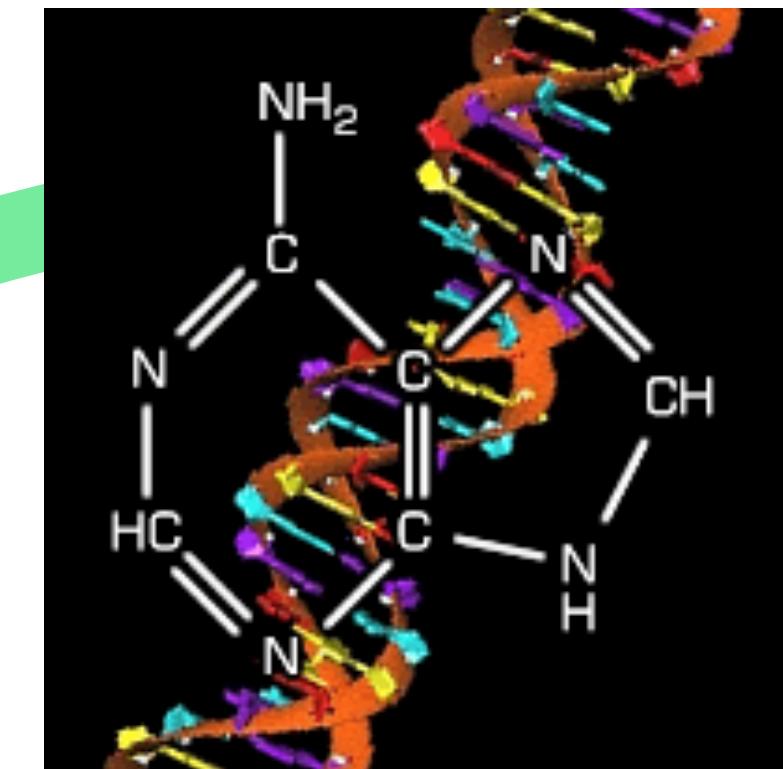




**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



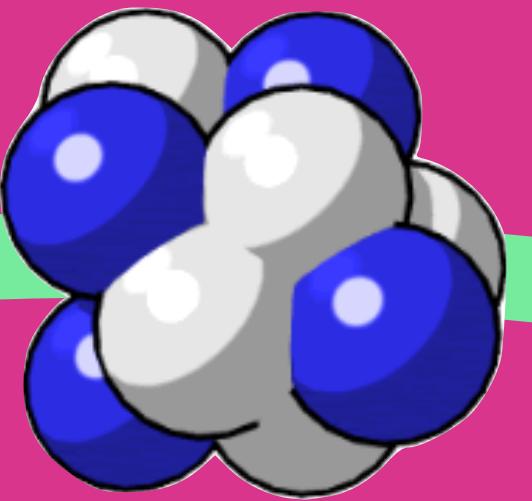
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



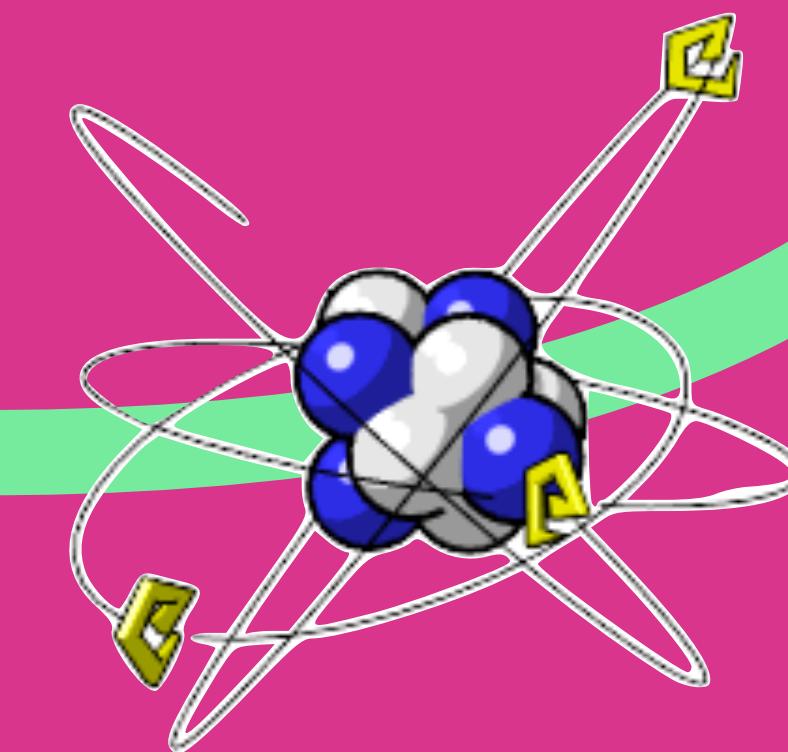
**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**



**Das Atom der Chemie:
Das Atom**



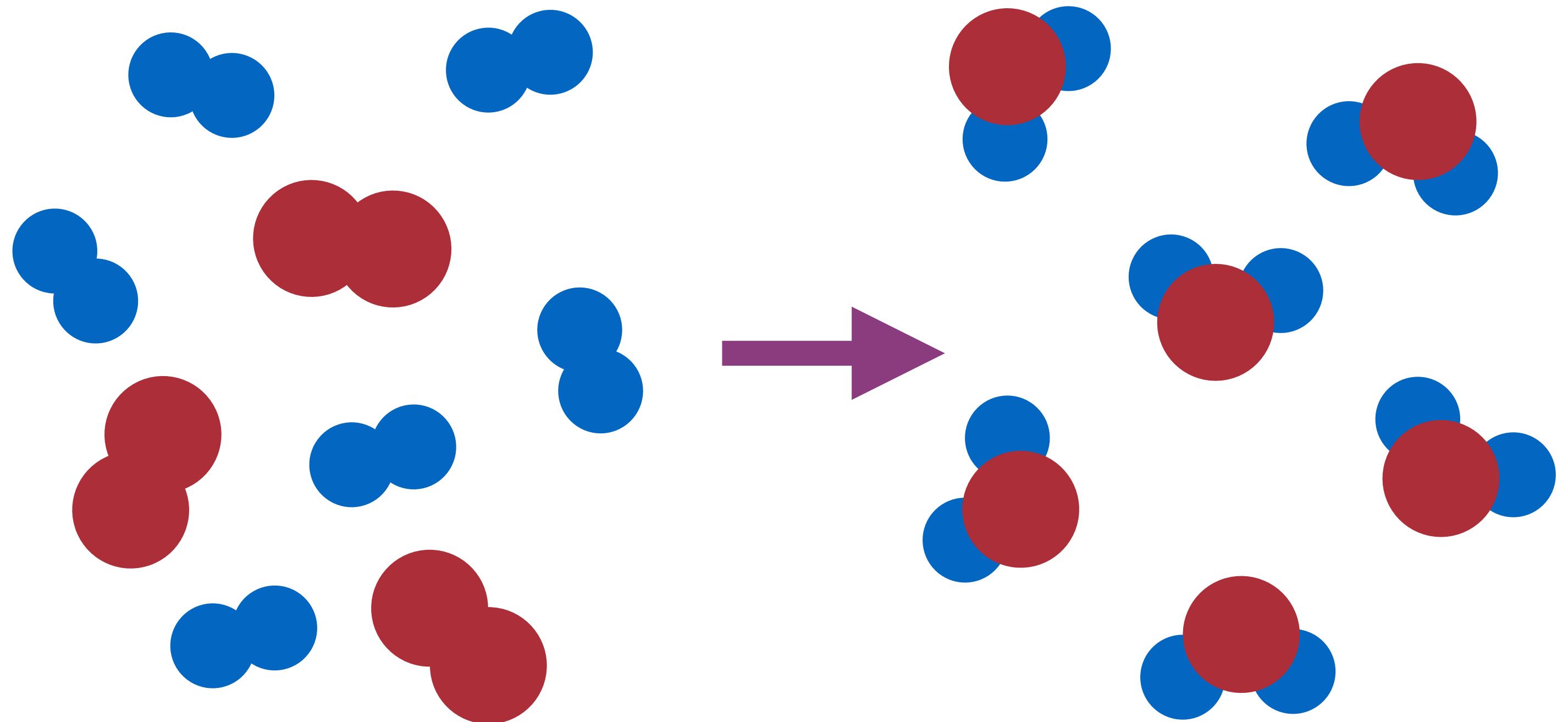
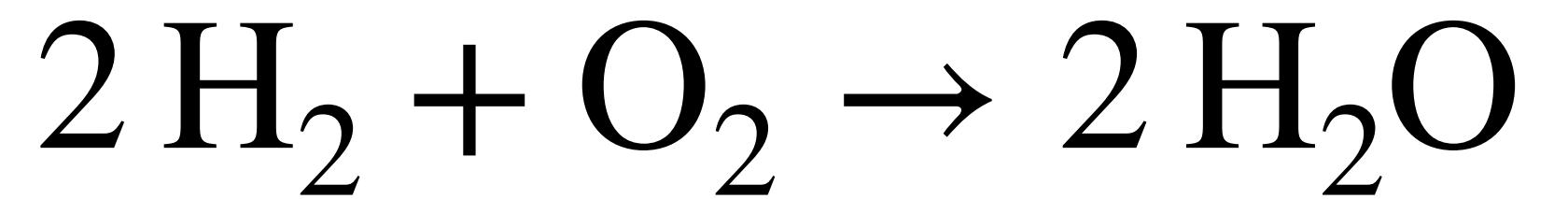
400 v. Chr. irgendwo im antiken Griechenland



"Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter, in Wirklichkeit gibt es nur Atome im leeren Raum."



John Dalton und die ersten Belege der Atomidee (1802-1808)



Gemisch aus 1 g **Wasserstoff**
und 8 g **Sauerstoff**

Durch **Knallgasreaktion**
entstehen 9 g Wasser

„Die Massen der Elemente stehen
zueinander im Verhältnis kleiner
ganzer Zahlen!“

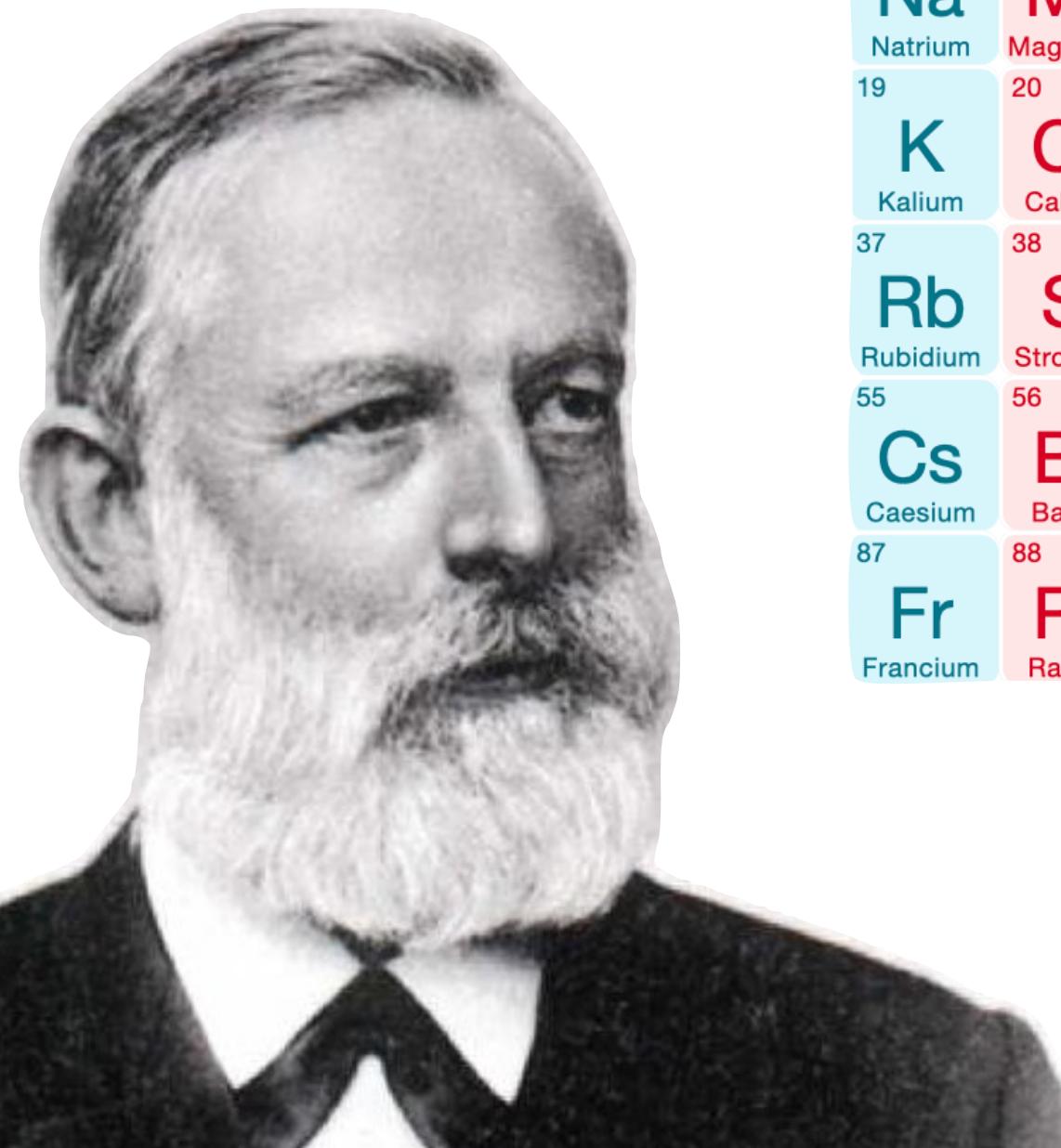


John Dalton



Das Periodensystem der Elemente, Mendelejew und Meyer 1869

Julius Lothar Meyer



1	H	2	He
3	Li	4	Be
11	Na	12	Mg
19	K	20	Ca
37	Rb	38	Sr
55	Cs	56	Ba
87	Fr	88	Ra
		89	Ac
		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	Xe
		38	
		39	
		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	
		56	
		57	
		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	
		88	
		89	
		104	Rf
		105	Db
		106	Sg
		107	Bh
		108	Hs
		109	Mt
		110	Ds
		111	Rg
		112	Cn
		113	Nh
		114	Fl
		115	Mc
		116	Lv
		117	Ts
		118	Og
			Oganes...

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
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

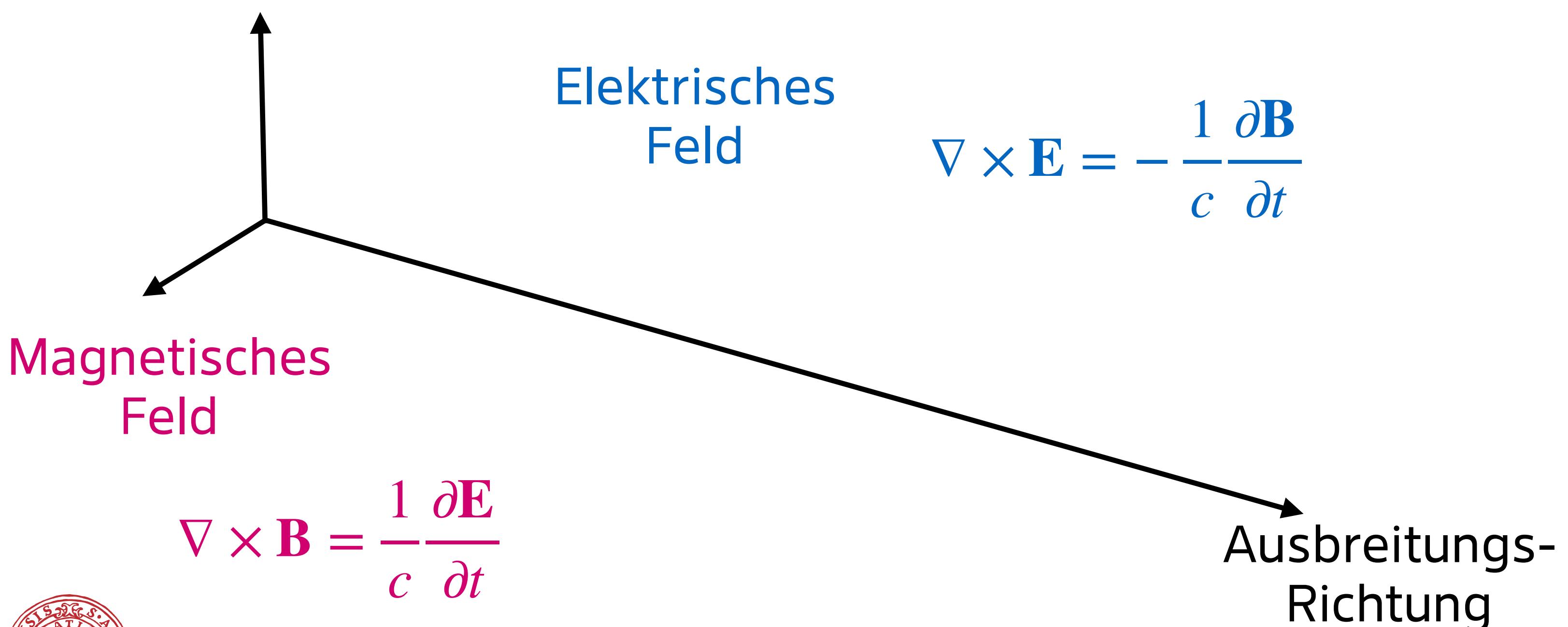
"Die Elemente weisen, wenn sie nach ihrem Atomgewicht angeordnet werden, eine deutliche Periodizität ihrer Eigenschaften auf."

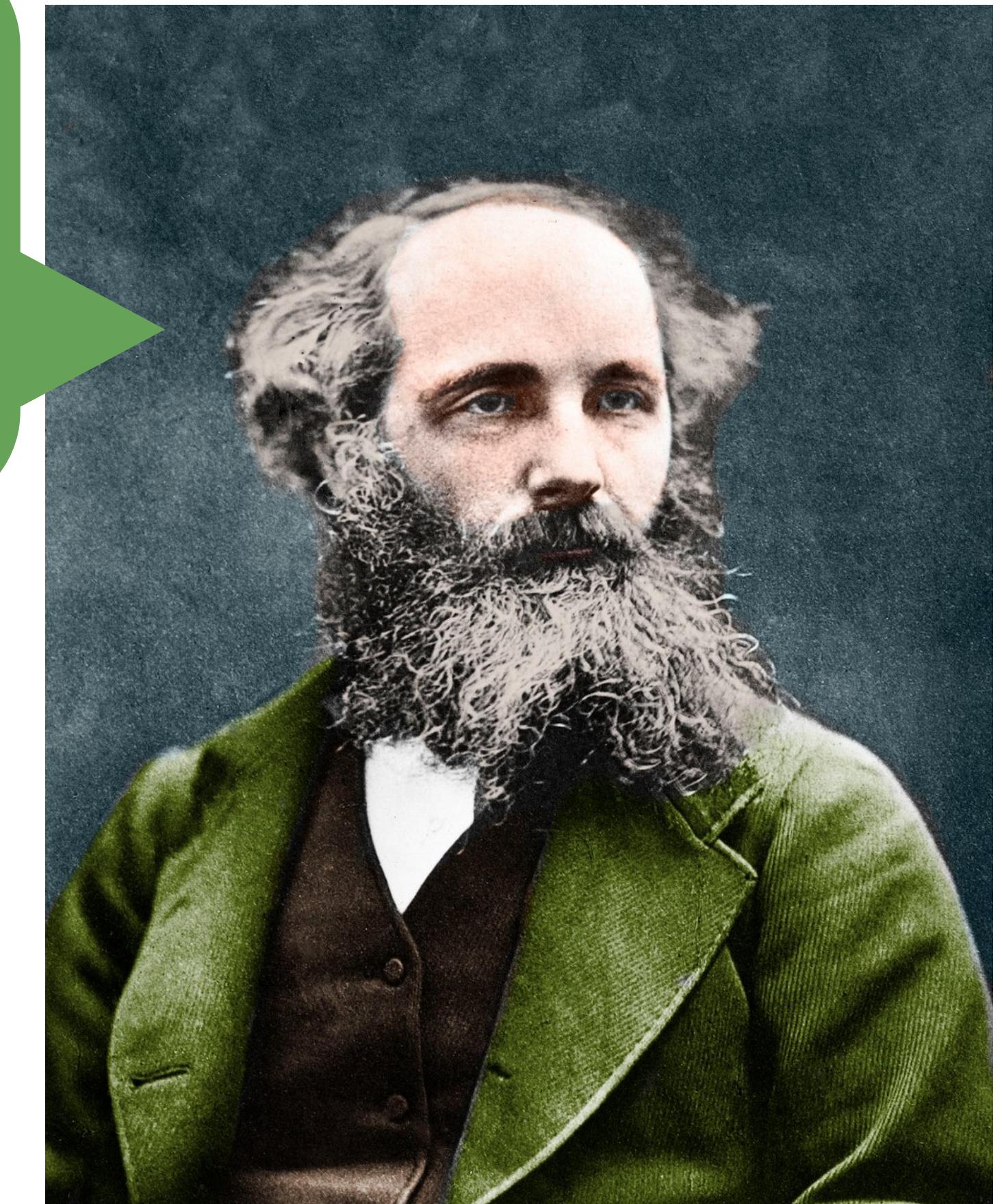
Dmitrij Mendelejew



Elektromagnetismus und Lichtwellen, Maxwell 1894

„..., dass wir starken Grund zu dem Schluss haben, dass das **Licht selbst** einschließlich der Wärmestrahlung sowie möglicher anderer Strahlung **eine elektromagnetische Störung** ist, die sich entsprechend der elektromagnetischen Gesetze in Form von Wellen **im elektromagnetischen Feld fortpflanzt.**“


$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

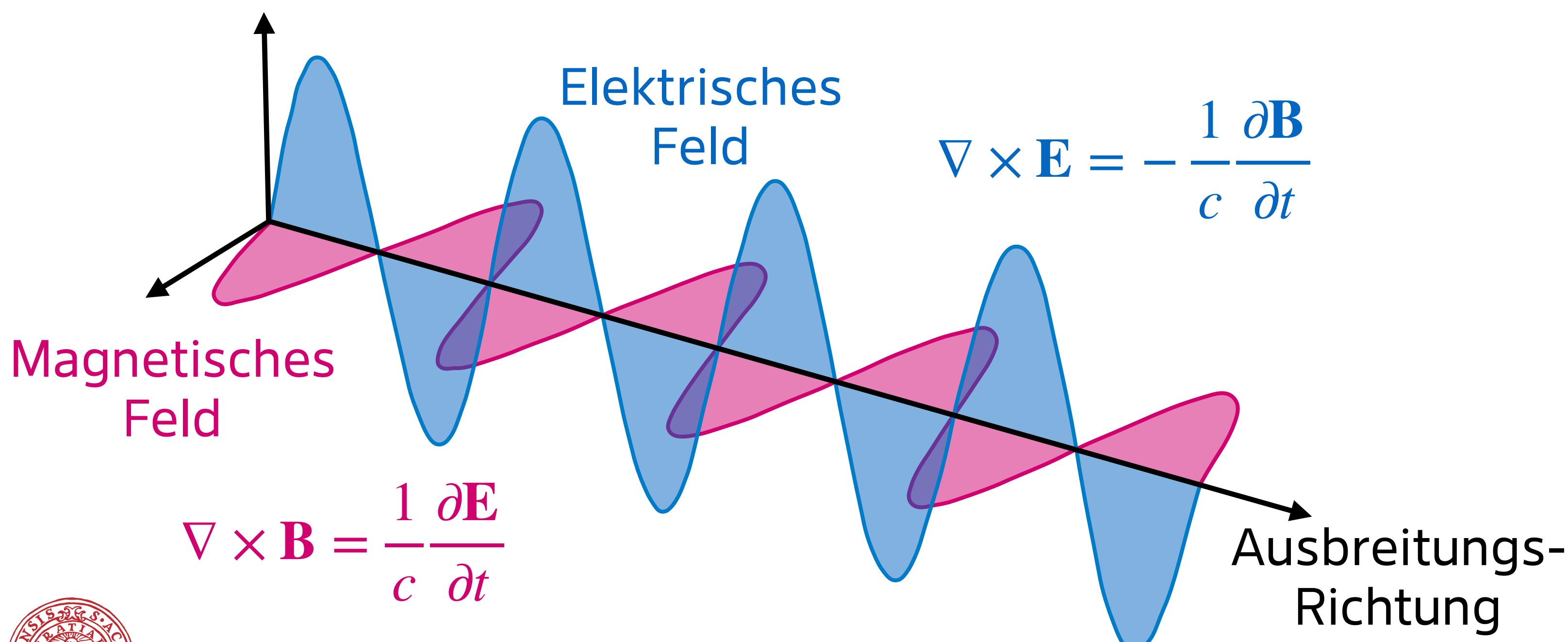


James Clerk
Maxwell

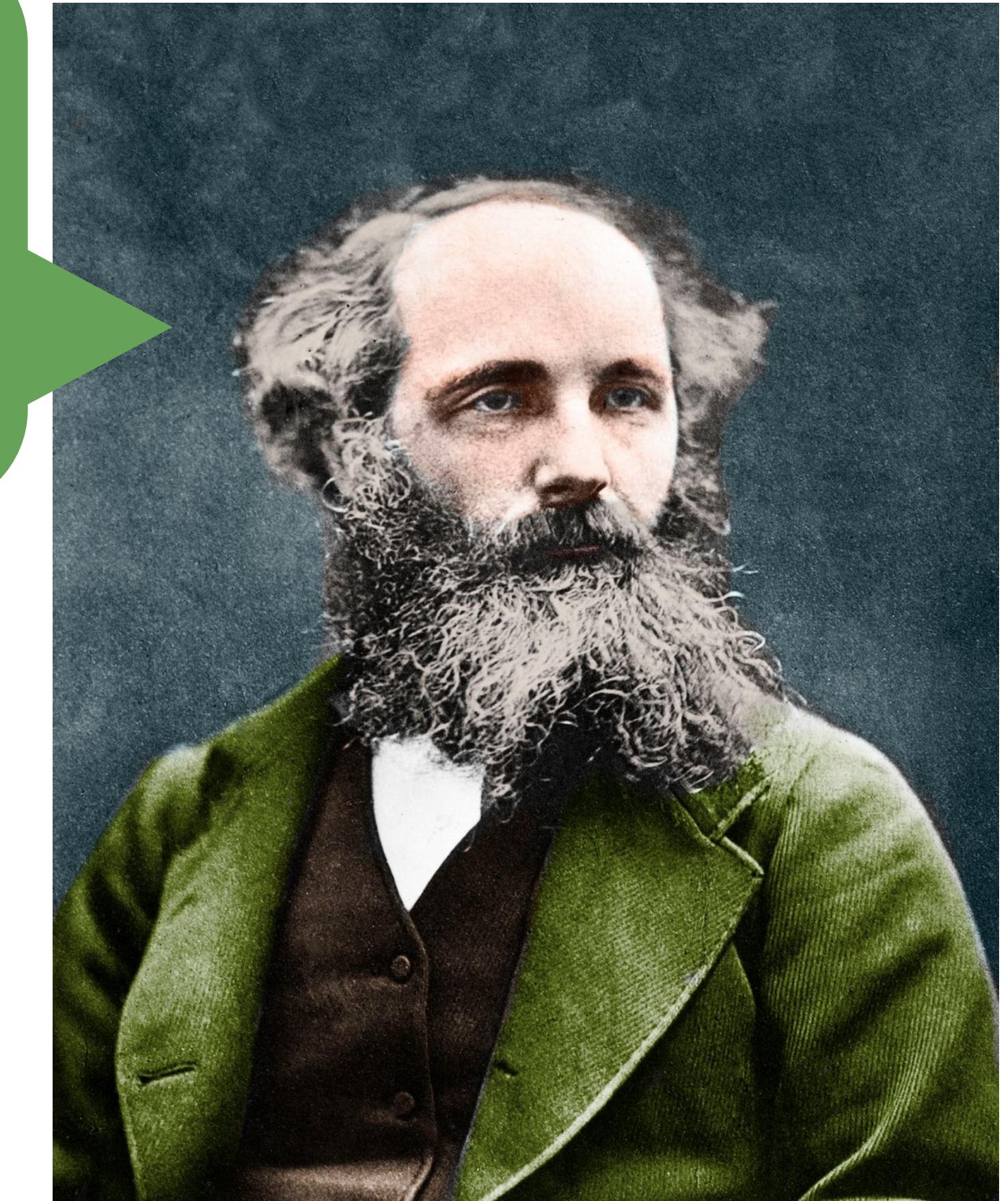


Elektromagnetismus und Lichtwellen, Maxwell 1894

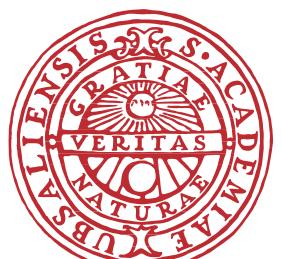
„..., dass wir starken Grund zu dem Schluss haben, dass das **Licht selbst** einschließlich der Wärmestrahlung sowie möglicher anderer Strahlung **eine elektromagnetische Störung** ist, die sich entsprechend der elektromagnetischen Gesetze in Form von Wellen **im elektromagnetischen Feld fortpflanzt.**“



Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark

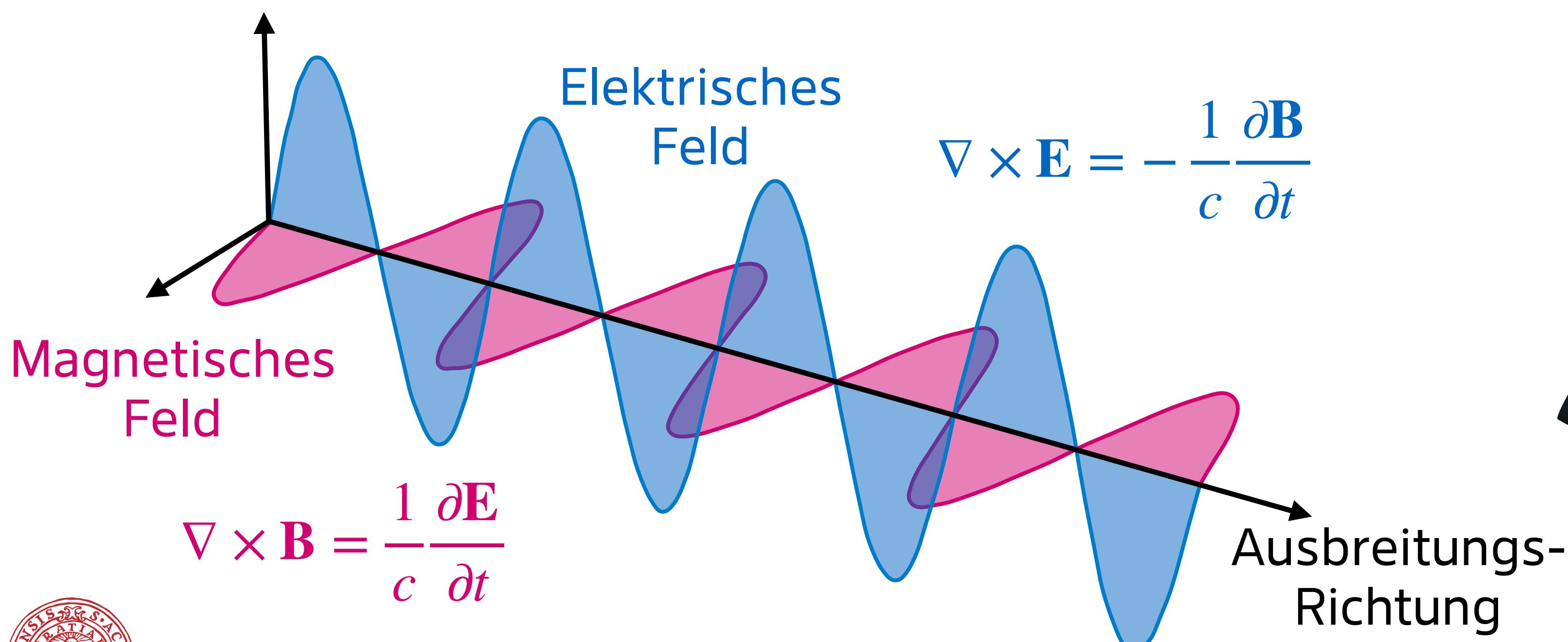


James Clerk Maxwell

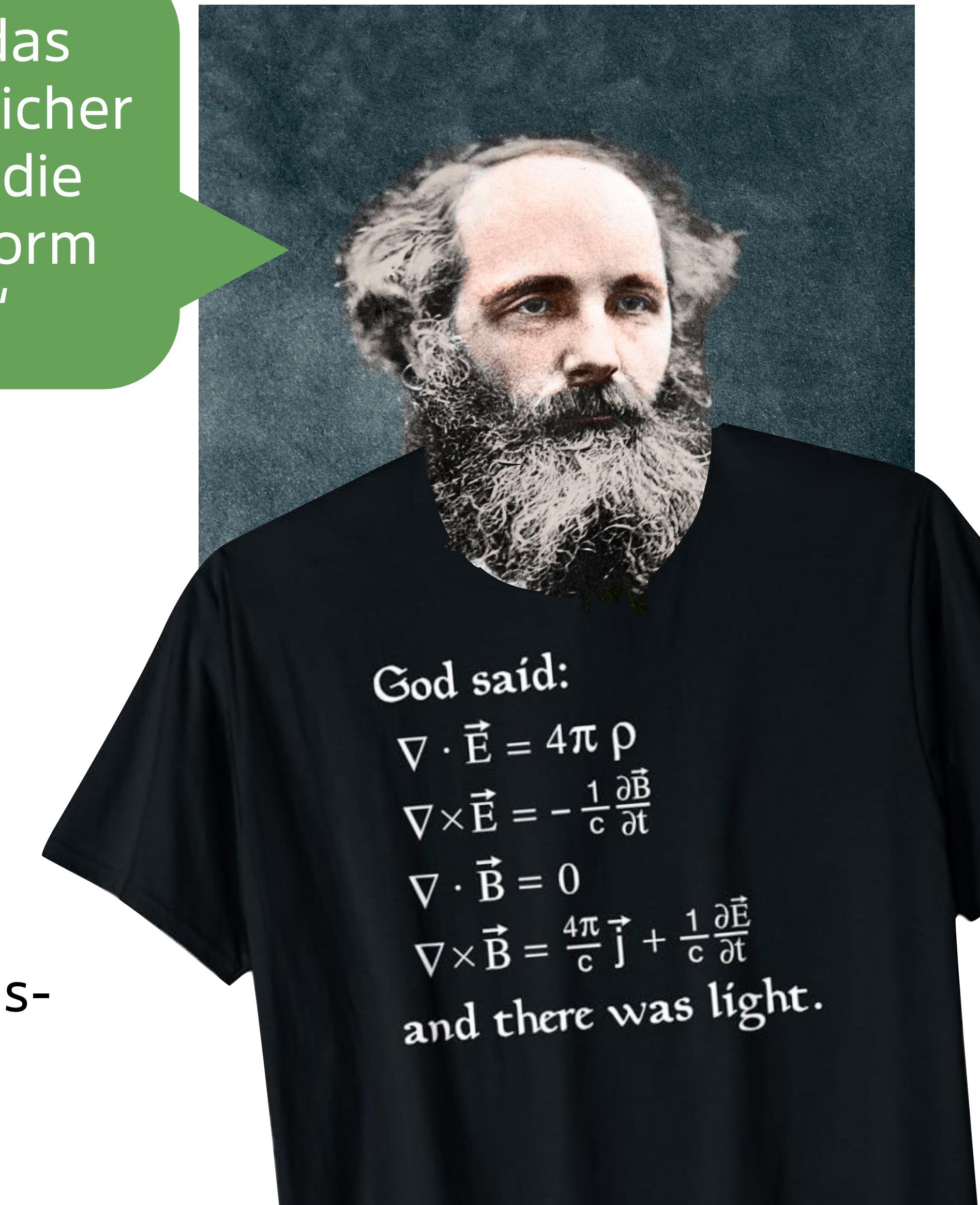


Elektromagnetismus und Lichtwellen, Maxwell 1894

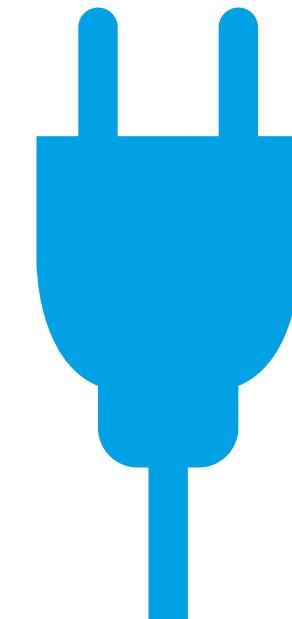
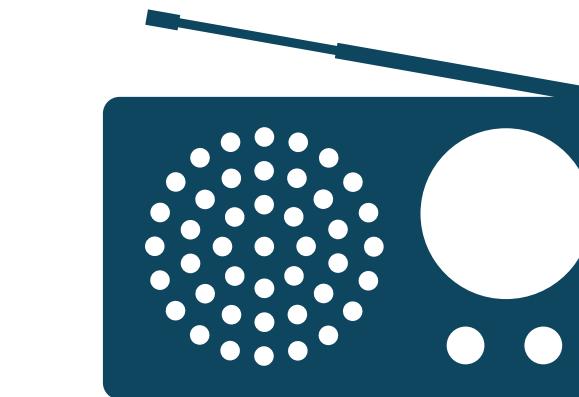
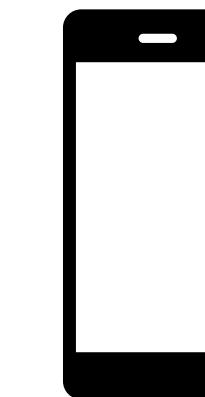
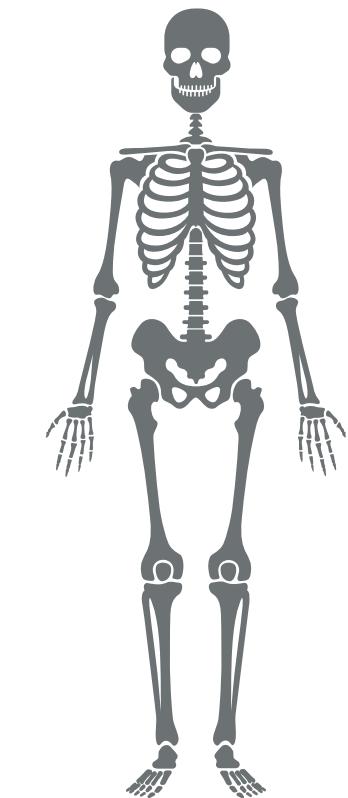
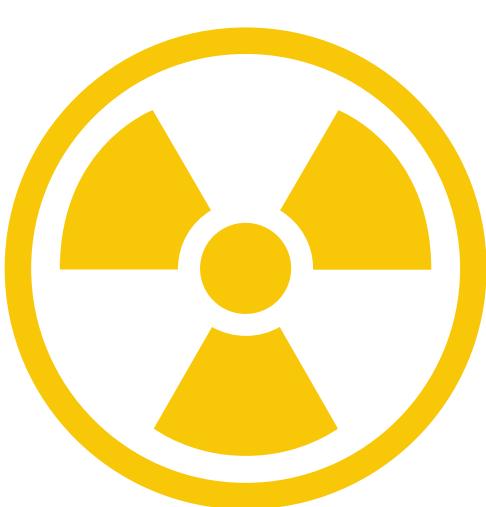
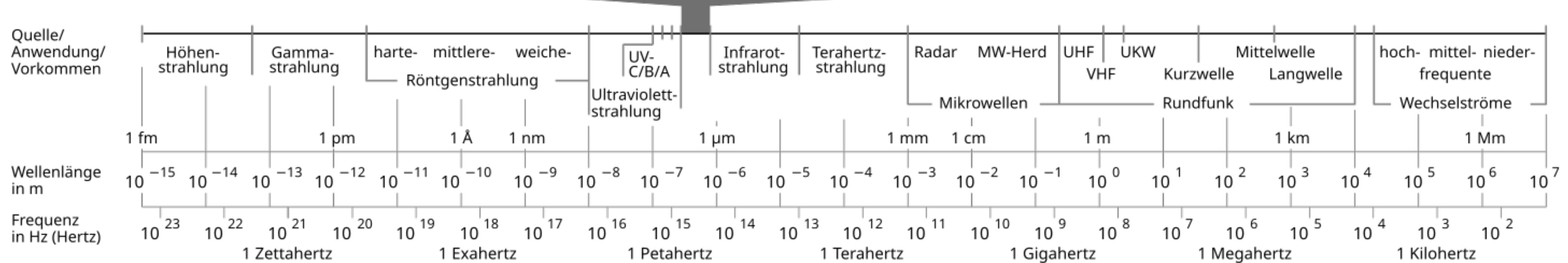
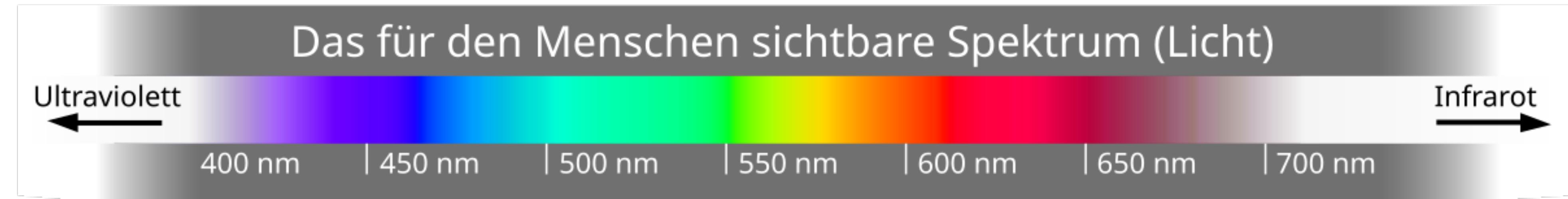
„..., dass wir starken Grund zu dem Schluss haben, dass das **Licht selbst** einschließlich der Wärmestrahlung sowie möglicher anderer Strahlung **eine elektromagnetische Störung** ist, die sich entsprechend der elektromagnetischen Gesetze in Form von Wellen **im elektromagnetischen Feld fortpflanzt.**“



Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark



Das Elektromagnetische Spektrum



Entdeckung der „X-Strahlung“ durch Röntgen (1895)

Schirm

Hand von
Bertha Röntgen

Heizkathode

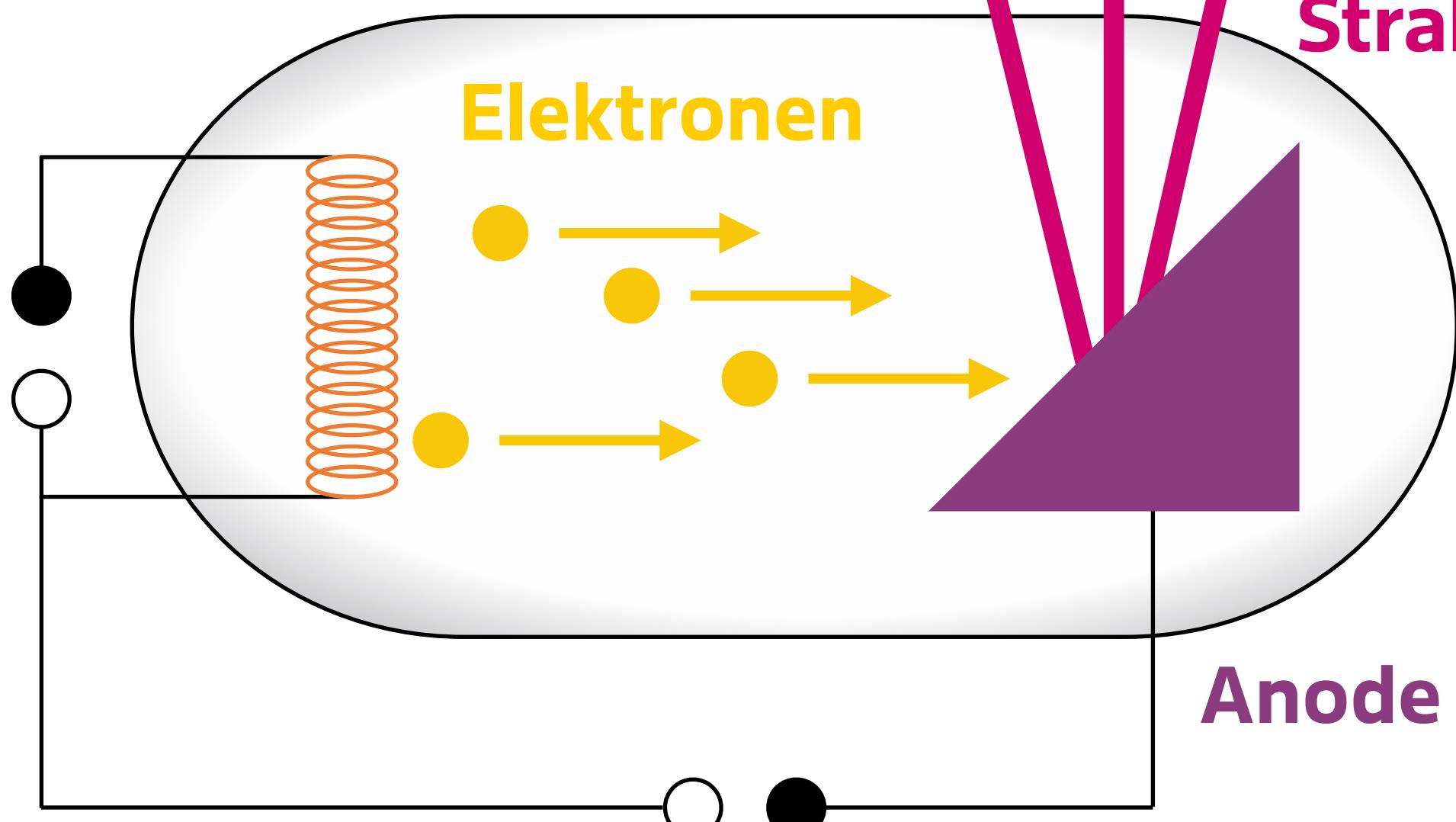
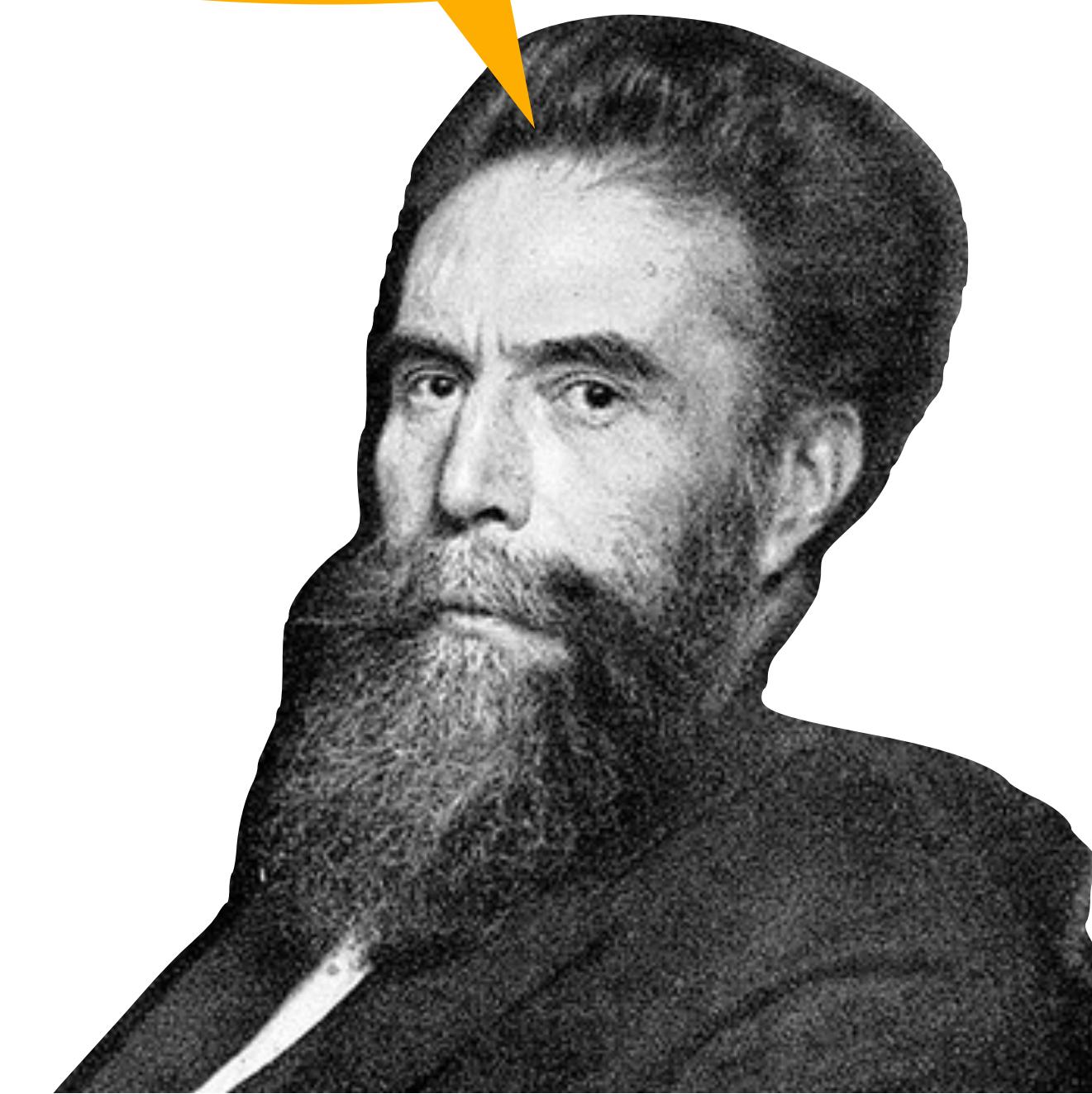
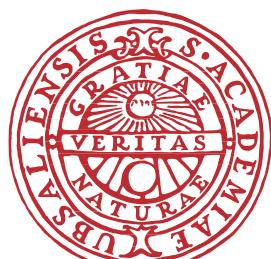


Bild auf dem Schirm

„[...] meiner Frau teilte ich mit, dass ich etwas mache, von dem die Leute, wenn sie es erfahren, sagen würden, der Röntgen ist wohl verrückt geworden“



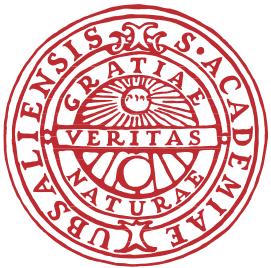
Wilhelm Conrad Röntgen



Zeit für ein Quiz: Wie heißt dieses Gebäude und wo steht es?



Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark



Zeit für ein Quiz: Wie heißt dieses Gebäude und wo steht es?



Zeit für ein Quiz: Wie heißt dieses Gebäude und wo steht es?



Nächste Frage: Was ist ein Ångström?



Zeit für ein Quiz: Wie heißt dieses Gebäude und wo steht es?



Nächste Frage: Was ist ein Ångström?

$$1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$$

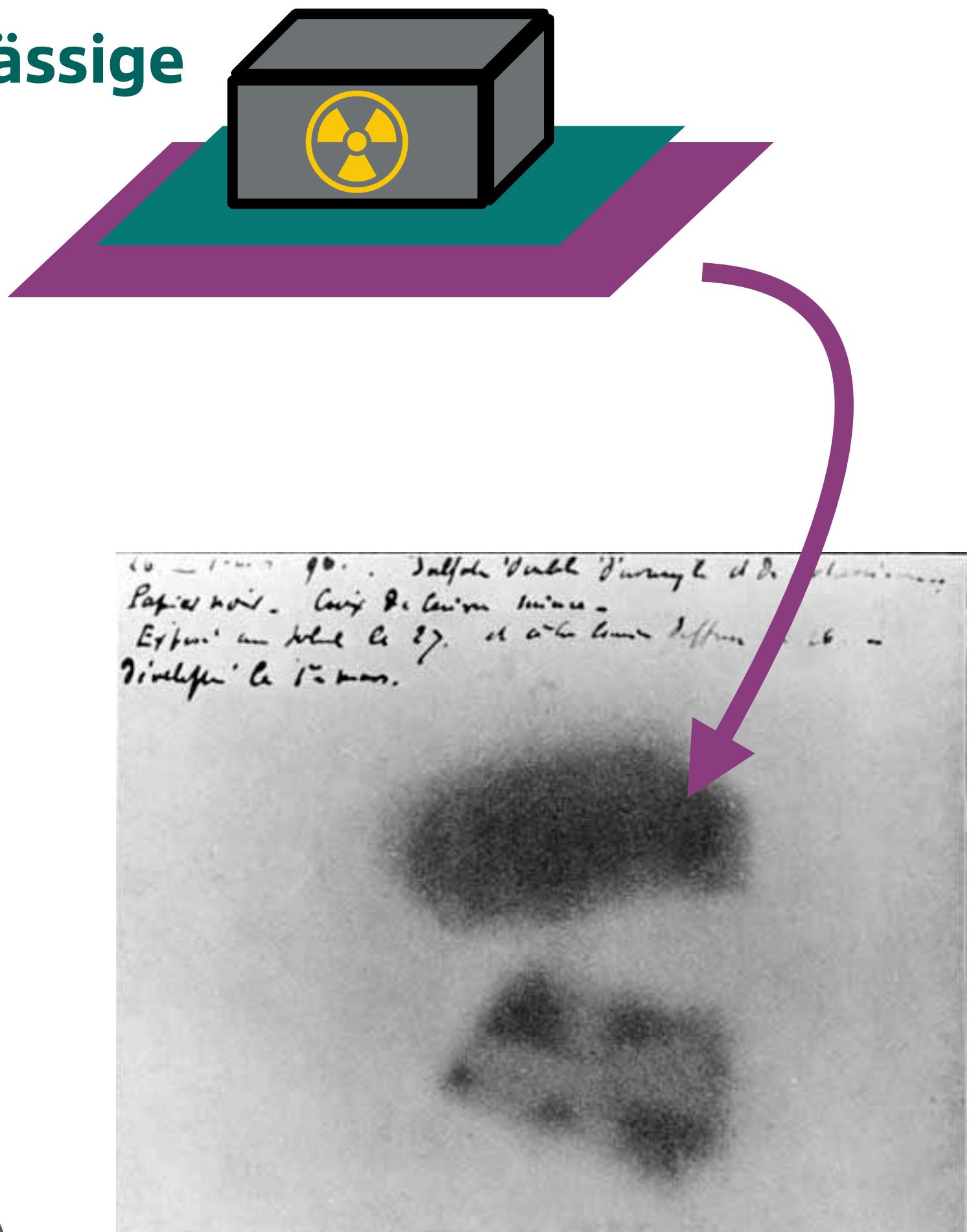
Ein Ångström ist ein
zehn-milliardstel Meter



Entdeckung der Radioaktivität, Becquerel 1896 & Curie 1898

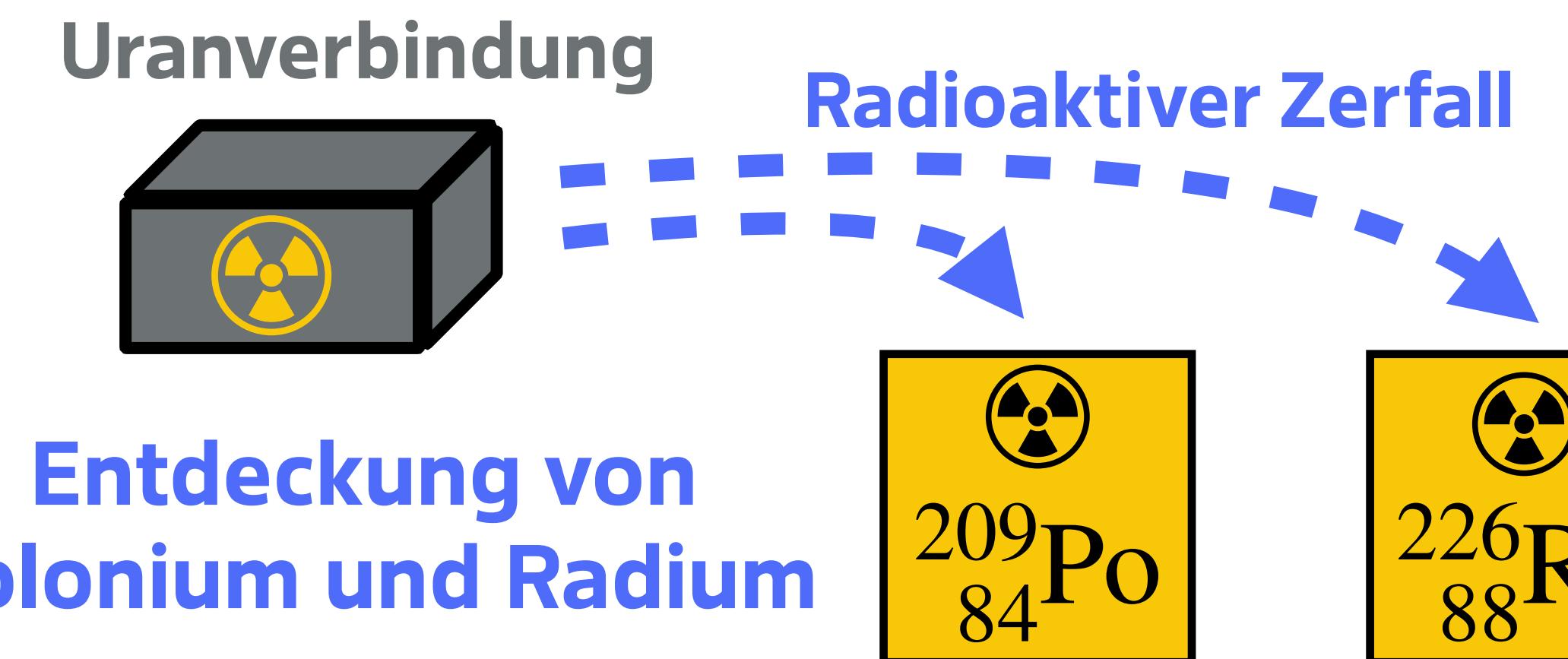
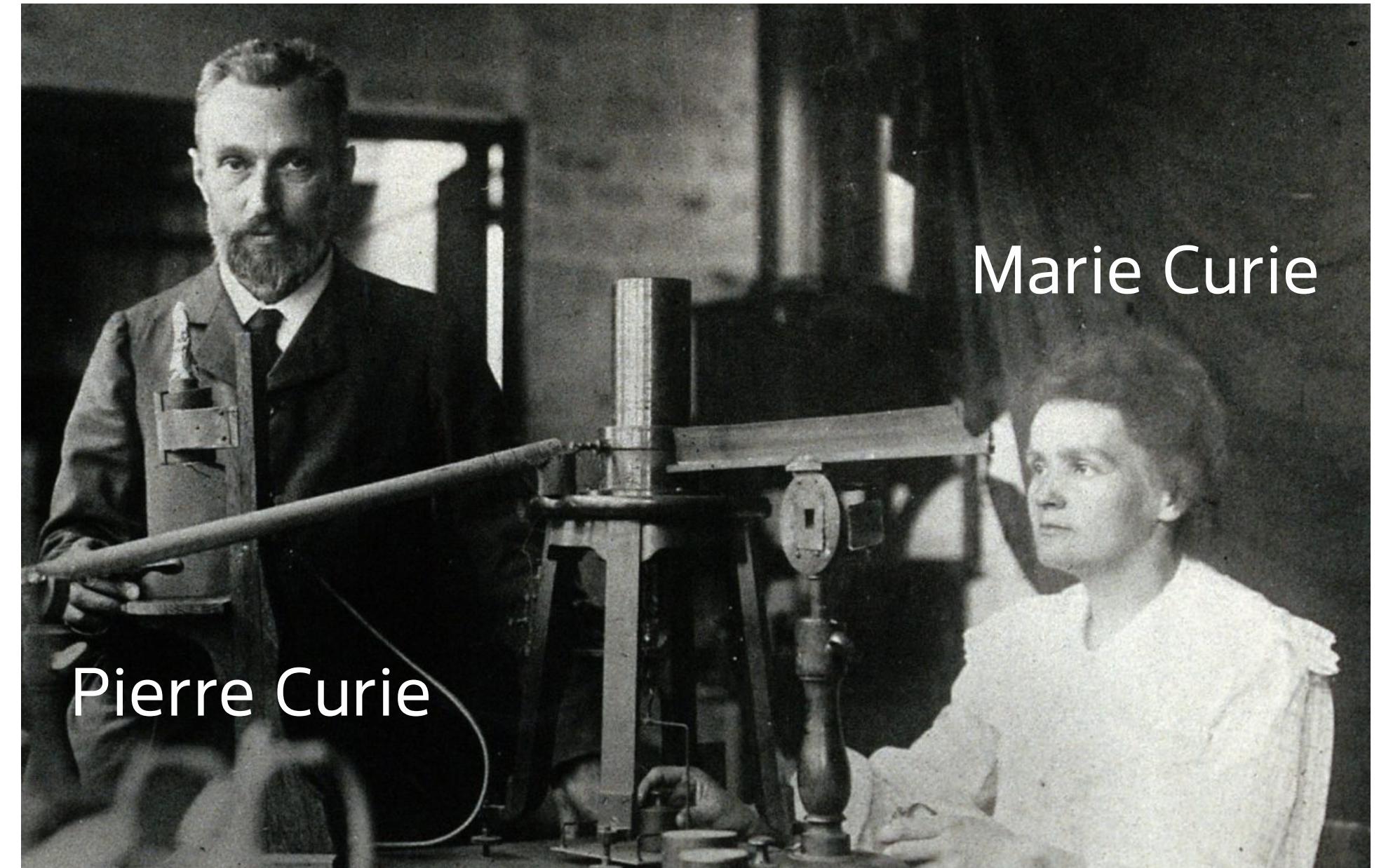


Uranverbindung
Licht-undurchlässige
Platte
Fotoplatte



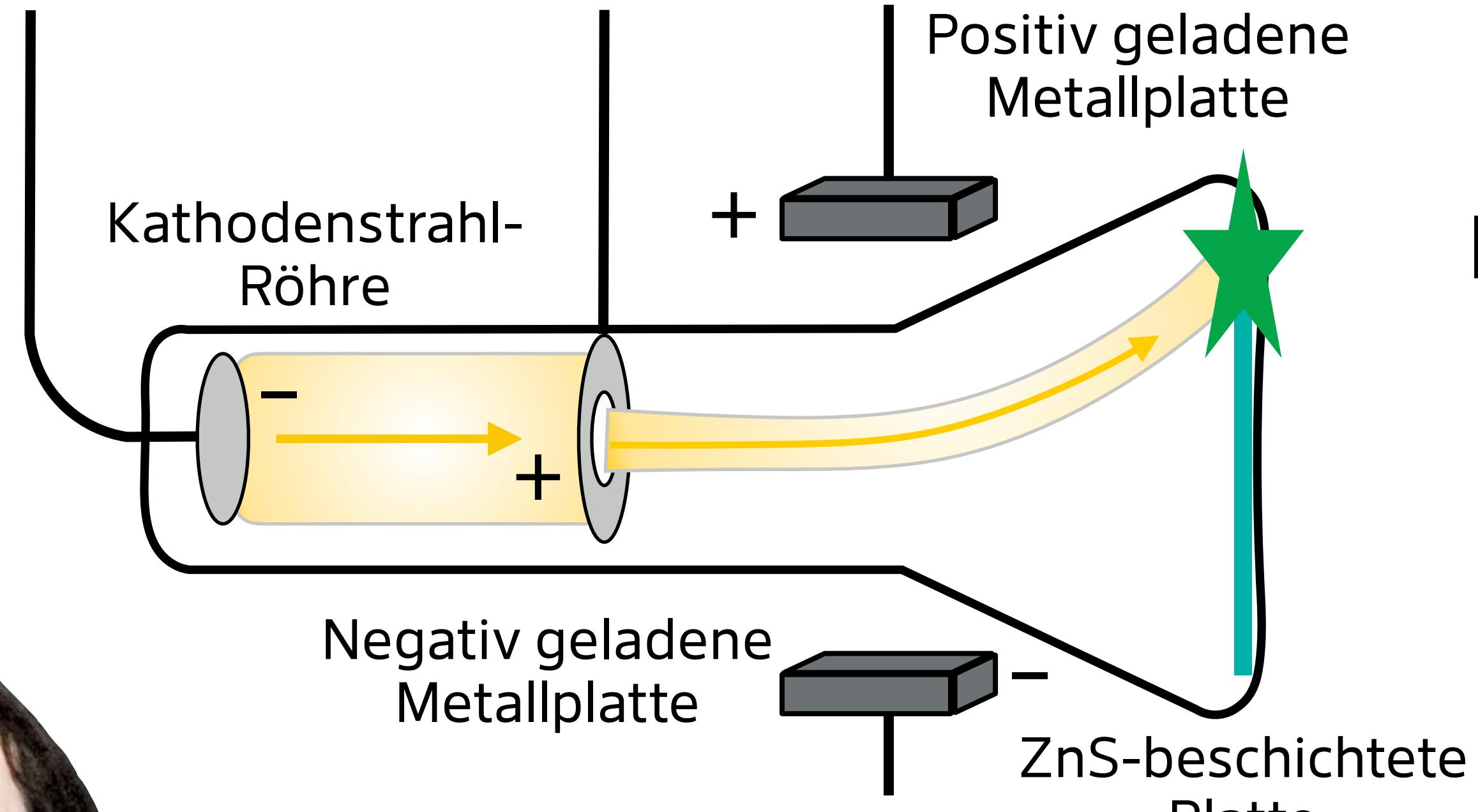
Henri
Becquerel

Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark



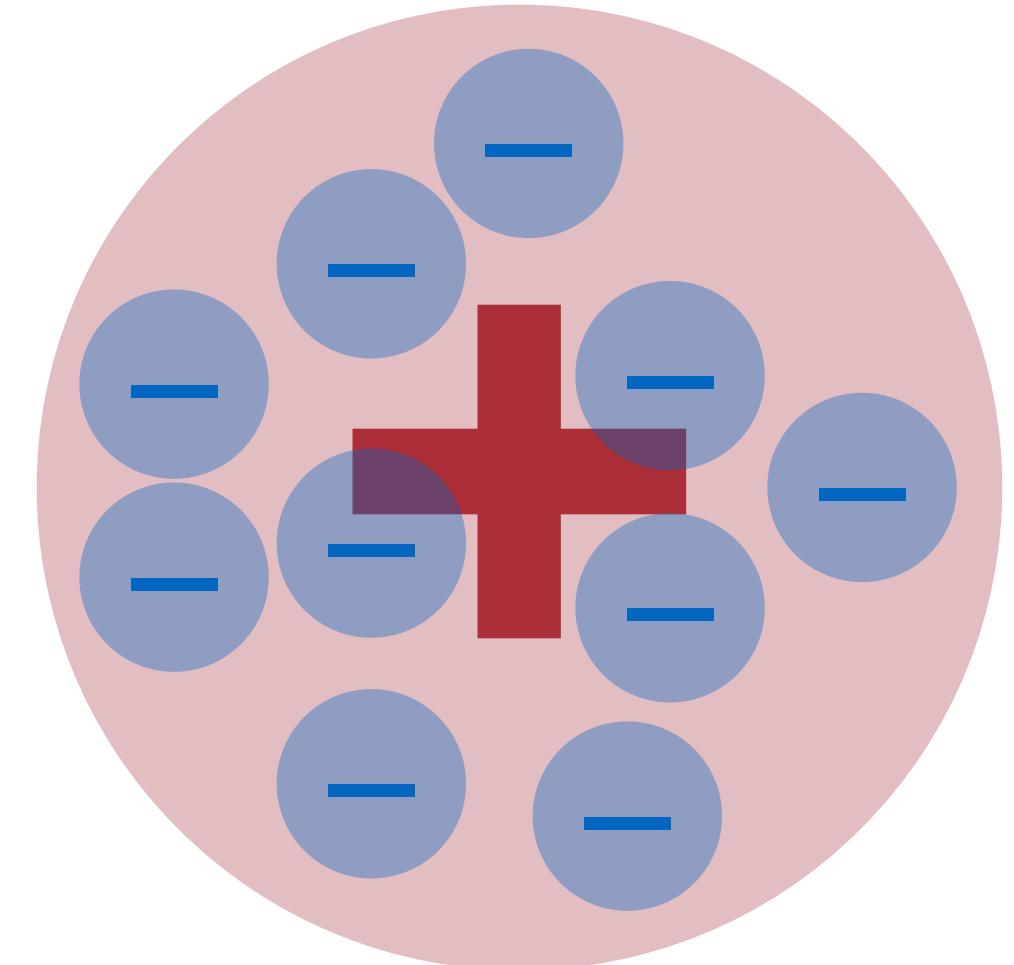
Entdeckung von
Polonium und Radium

Entdeckung des Elektrons und Plum pudding-Model, Thomson 1896



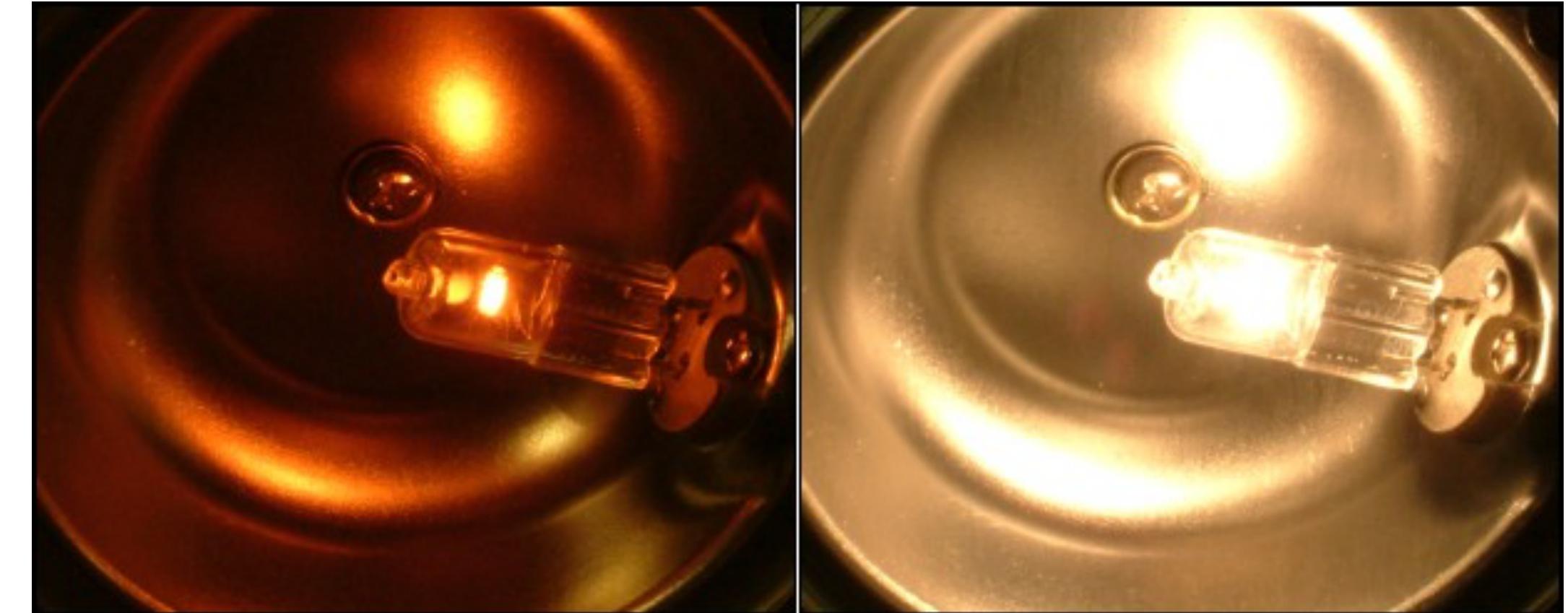
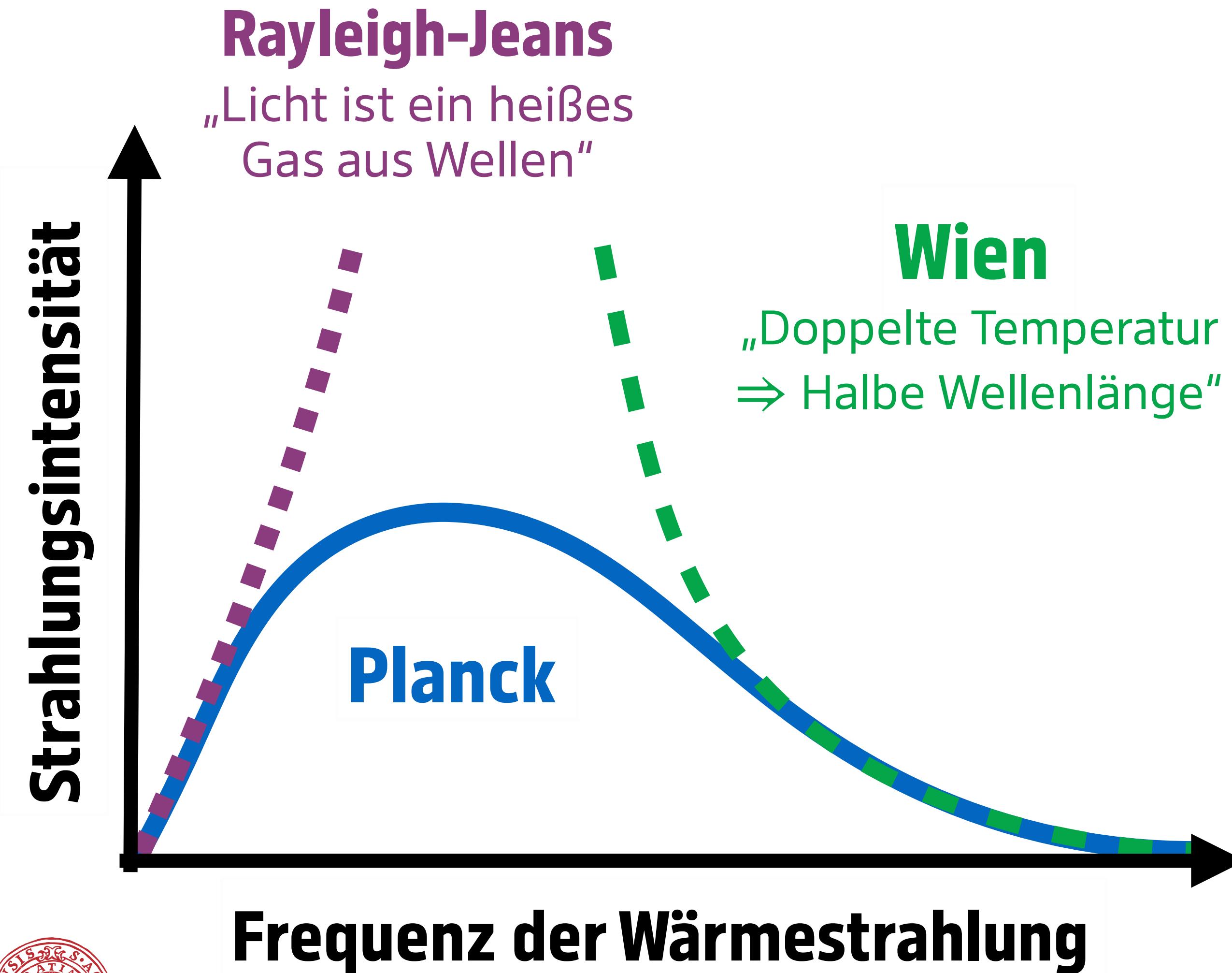
Erster Nachweis des Elektrons und Messung seines Ladung/Masse-Verhältnis

Ein Wasserstoffatom besteht aus ca. 1.800 Elektronen und einer massenlosen positiven Ladungsverteilung

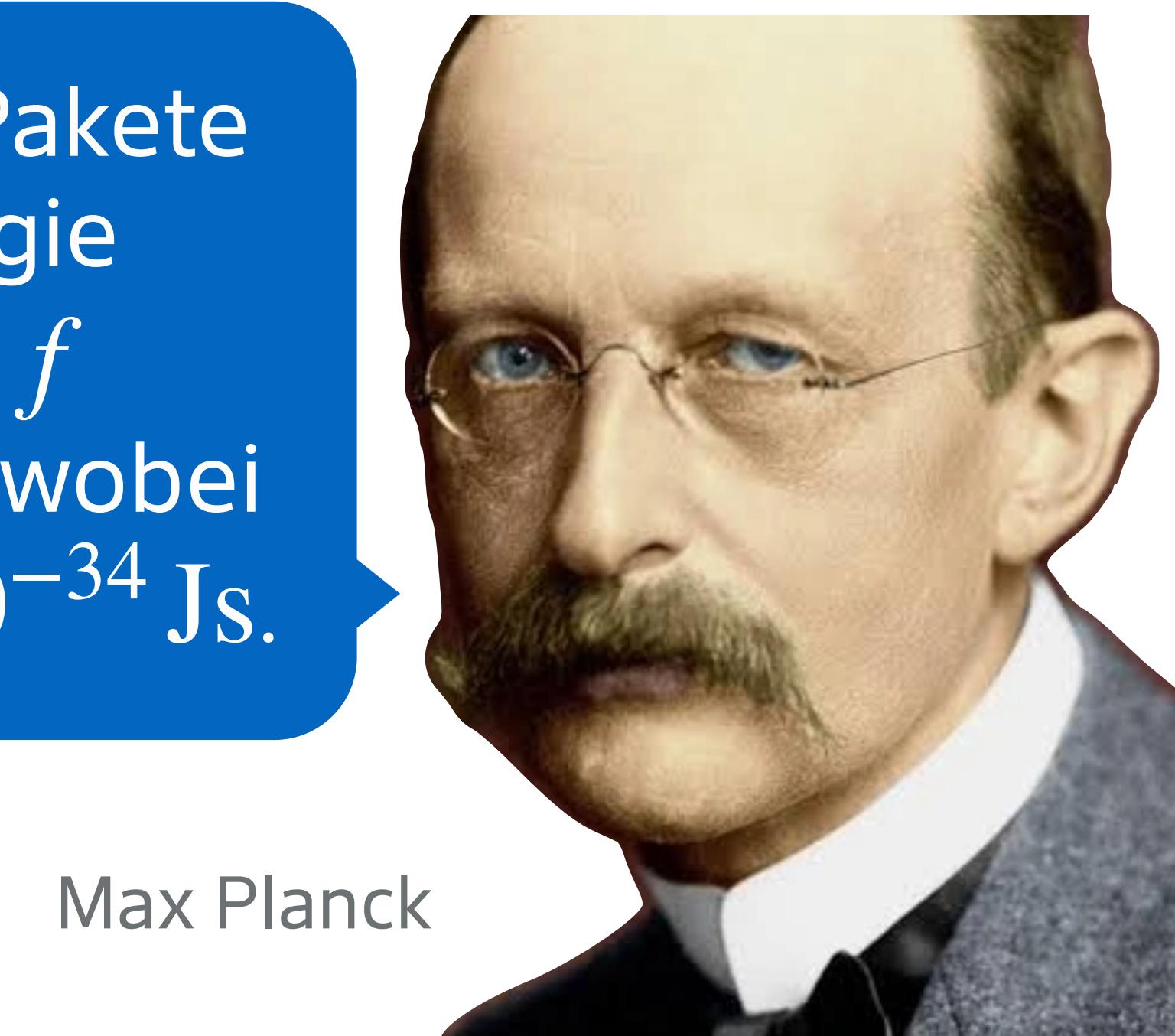


Joseph John Thomson

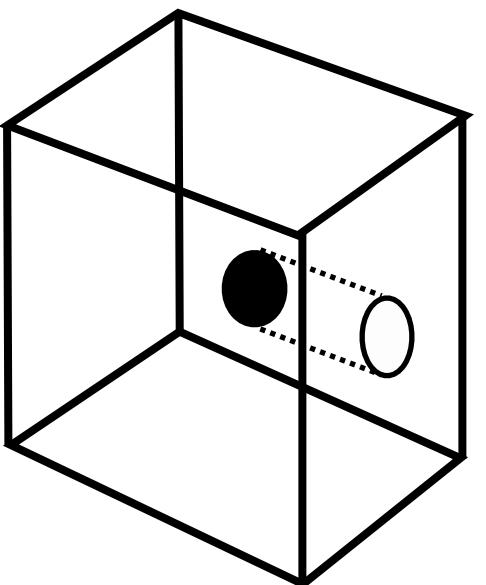
Die Geburtsstunde der Quantenmechanik, Planck 1900



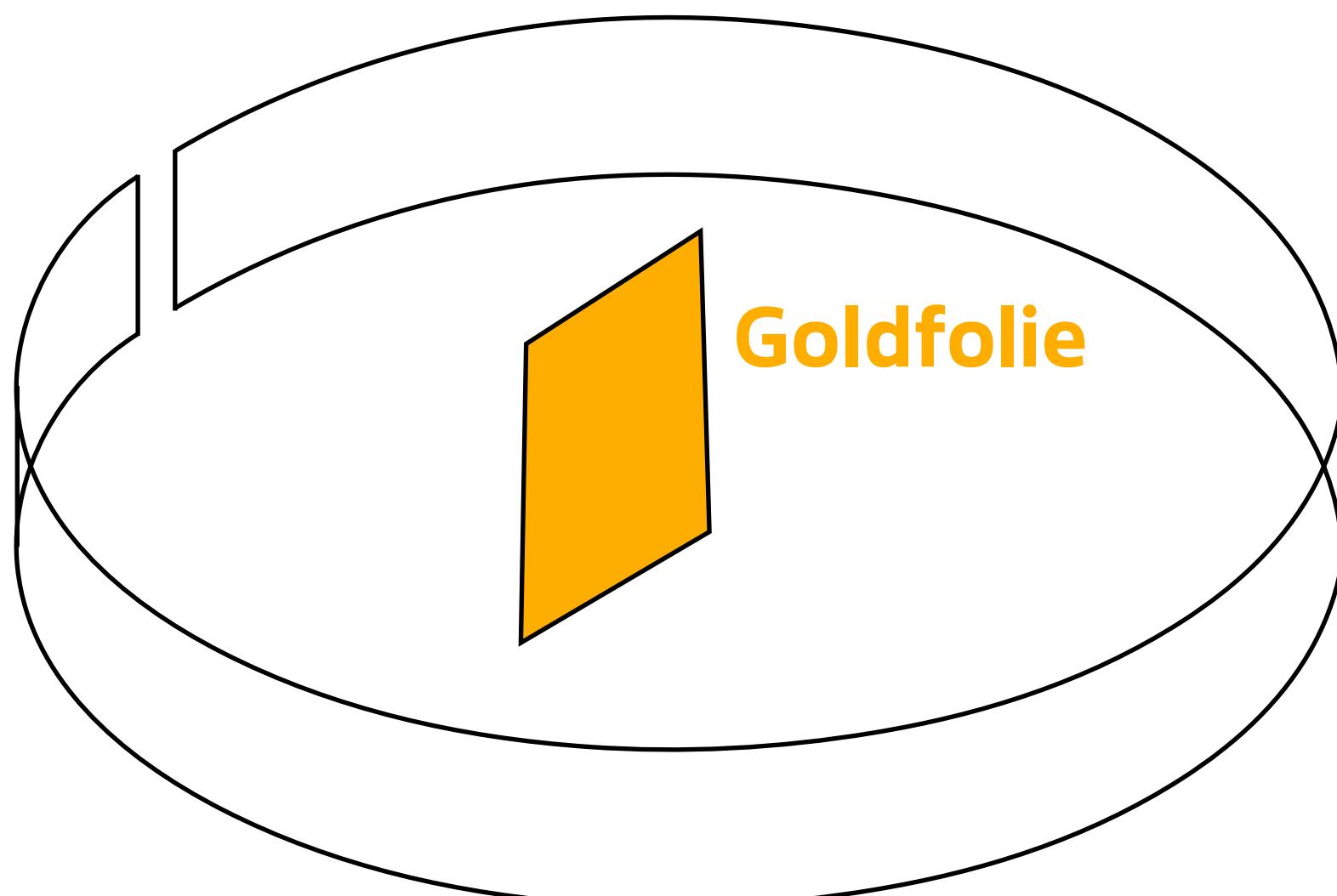
Licht ist in Pakete der Energie
 $E = h \cdot f$
quantisiert, wobei
 $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js.



Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909



**Radioaktives Radium mit
Bleimantel zur Abschirmung**

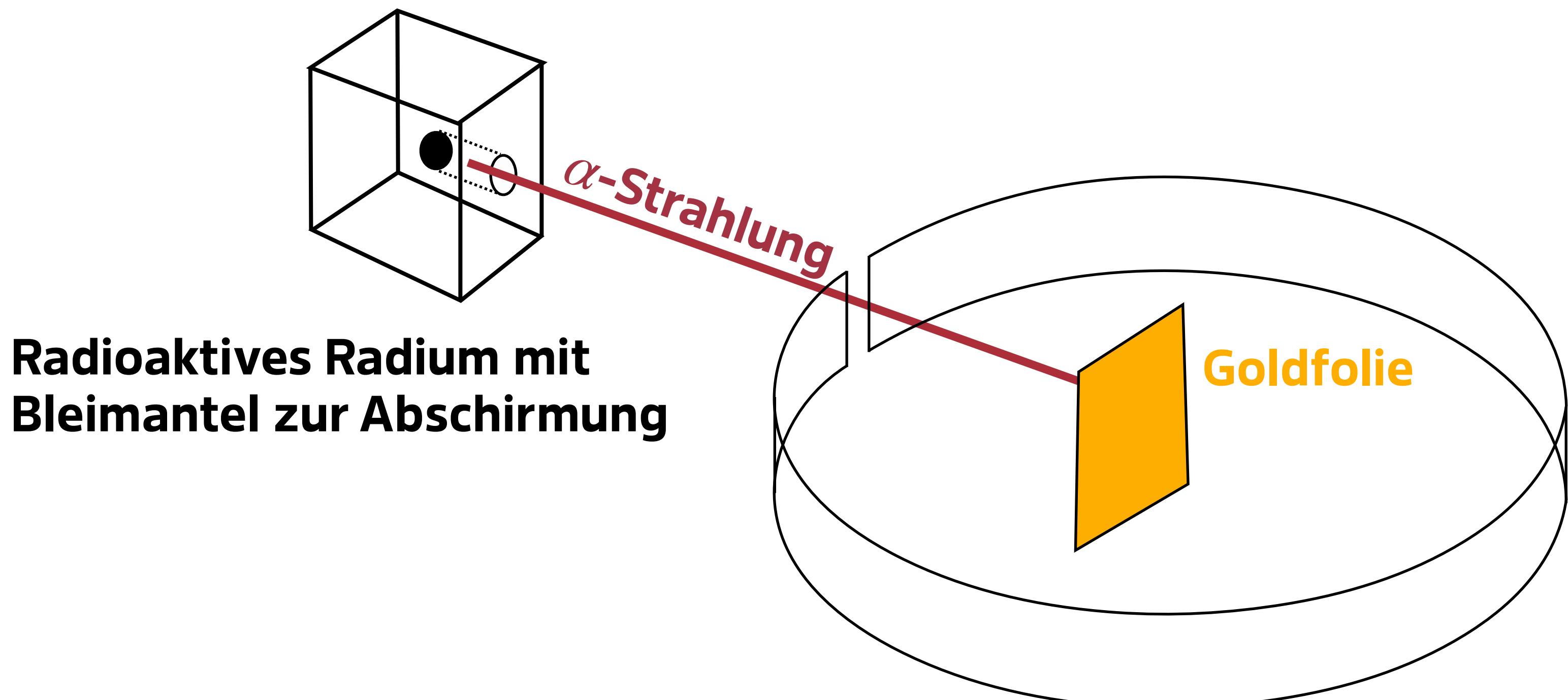


Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark



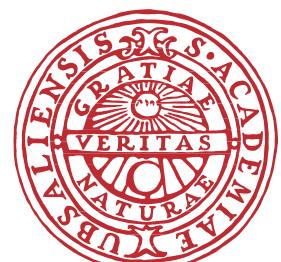
Ernest Rutherford 15

Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909

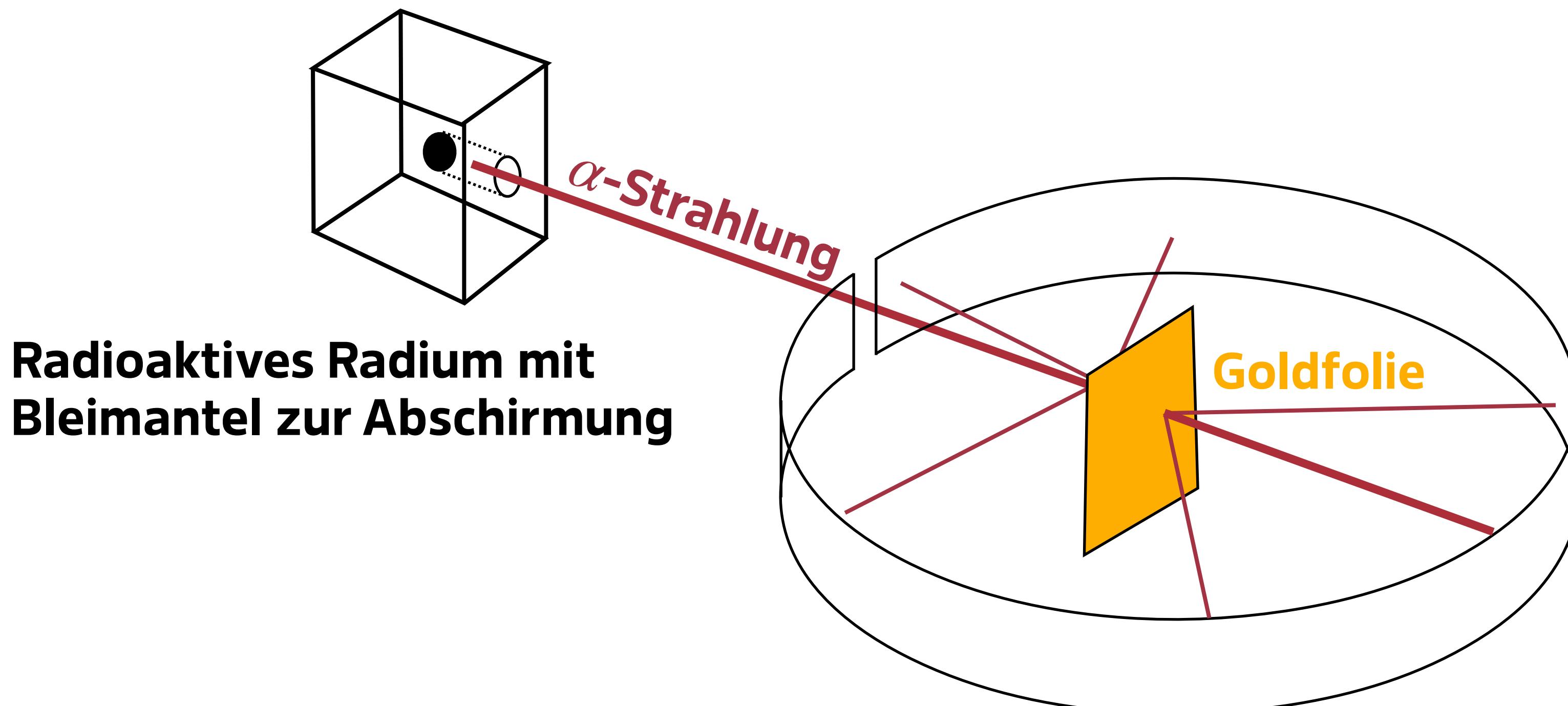


Radioaktives Radium mit
Bleimantel zur Abschirmung

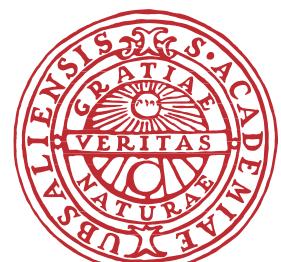
Goldfolie



Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909

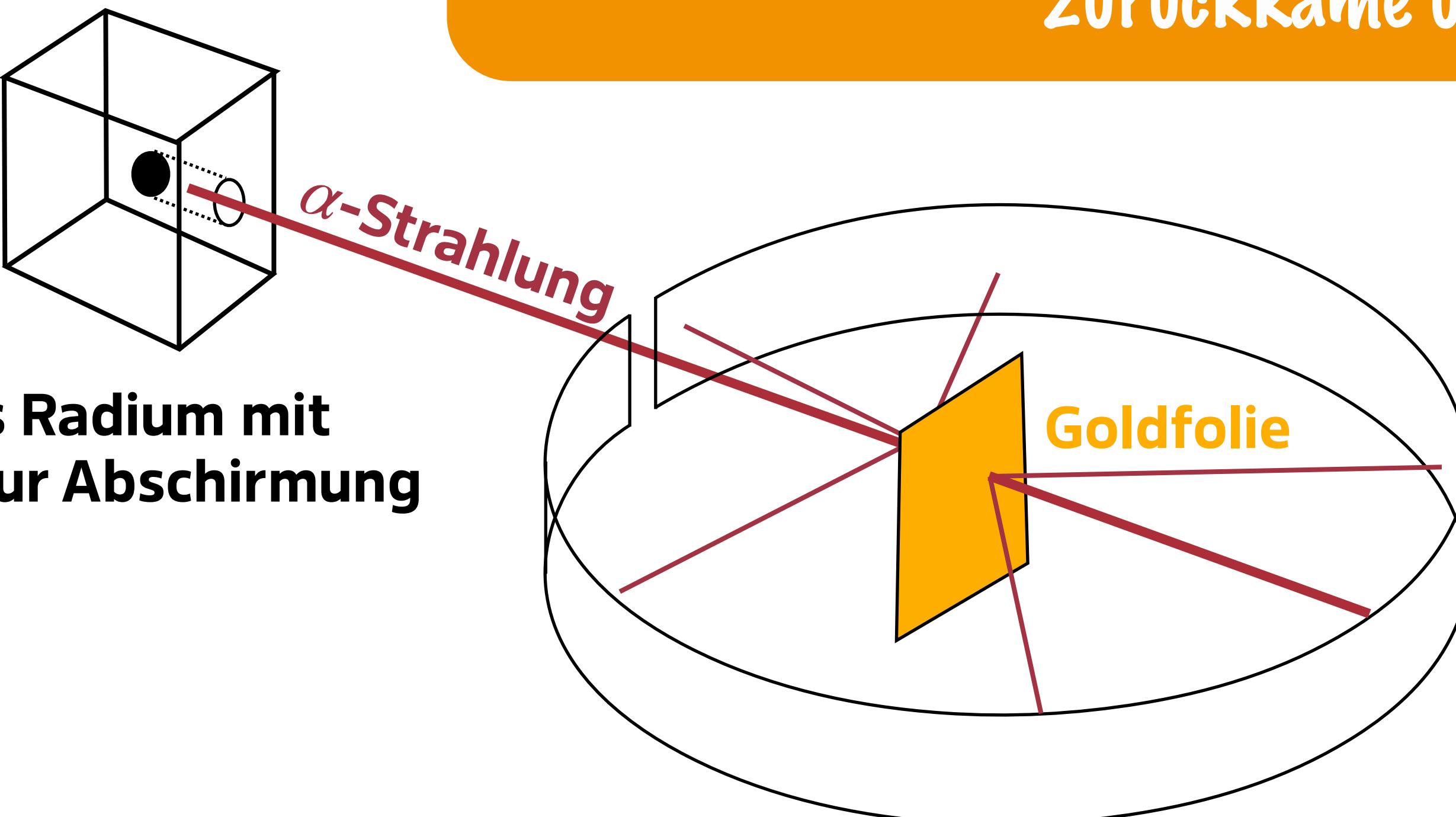


Radioaktives Radium mit
Bleimantel zur Abschirmung

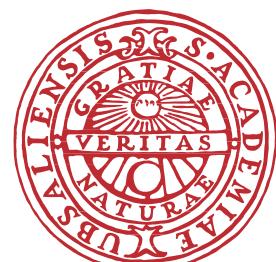


Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909

„Das unglaublichste Ereignis meines Lebens, [...] als ob man eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier schösse und sie zurückkäme und einen träfe“

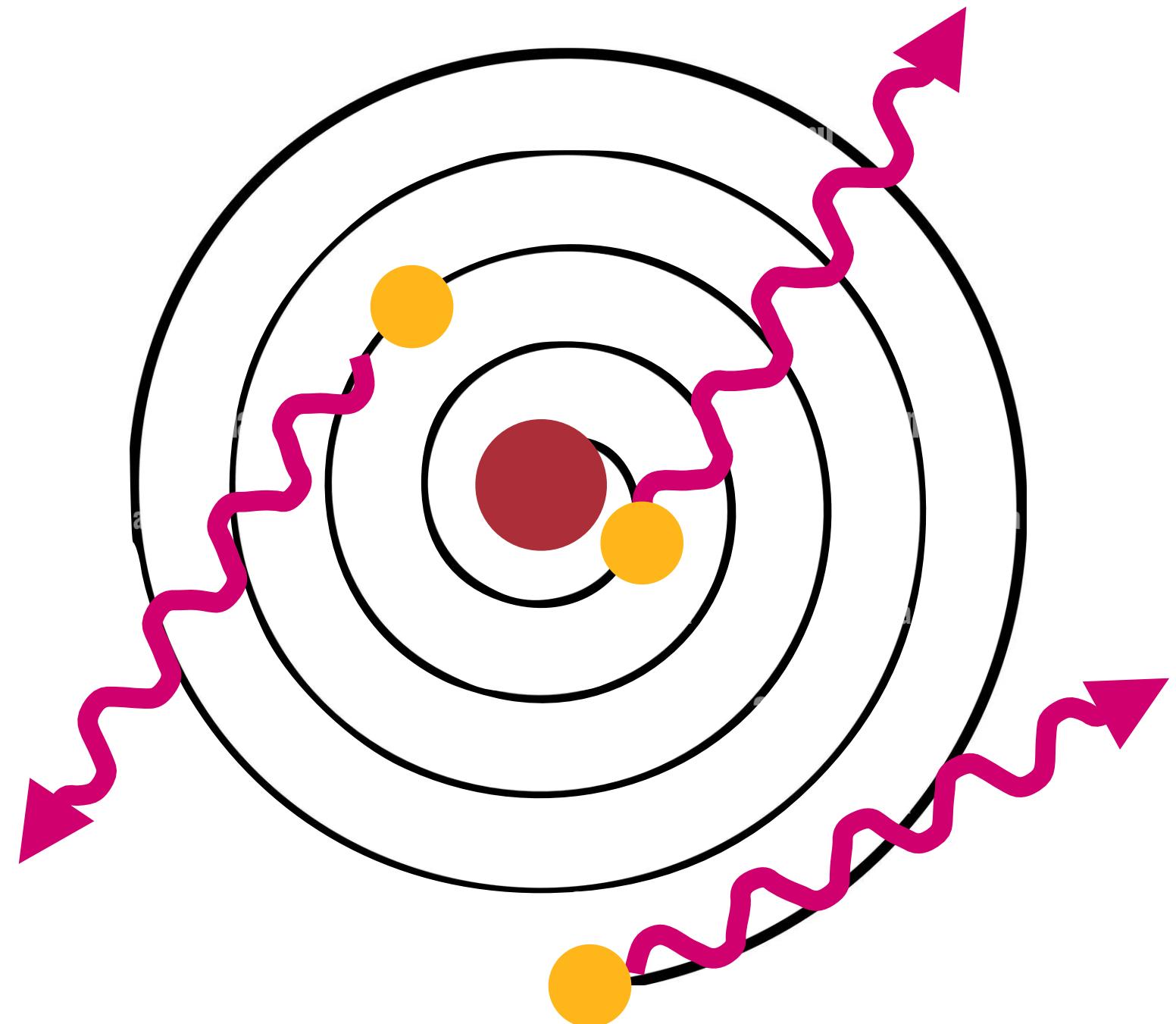


**Atome haben einen positiven Kern,
hunderttausendmal kleiner als ihr Radius!**



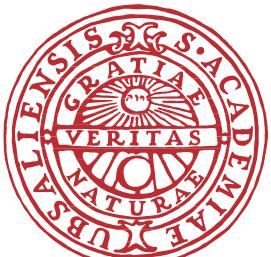
Zeit für ein Experiment

Wenn die klassische Physik und das Rutherford'sche Atommodell stimmen...

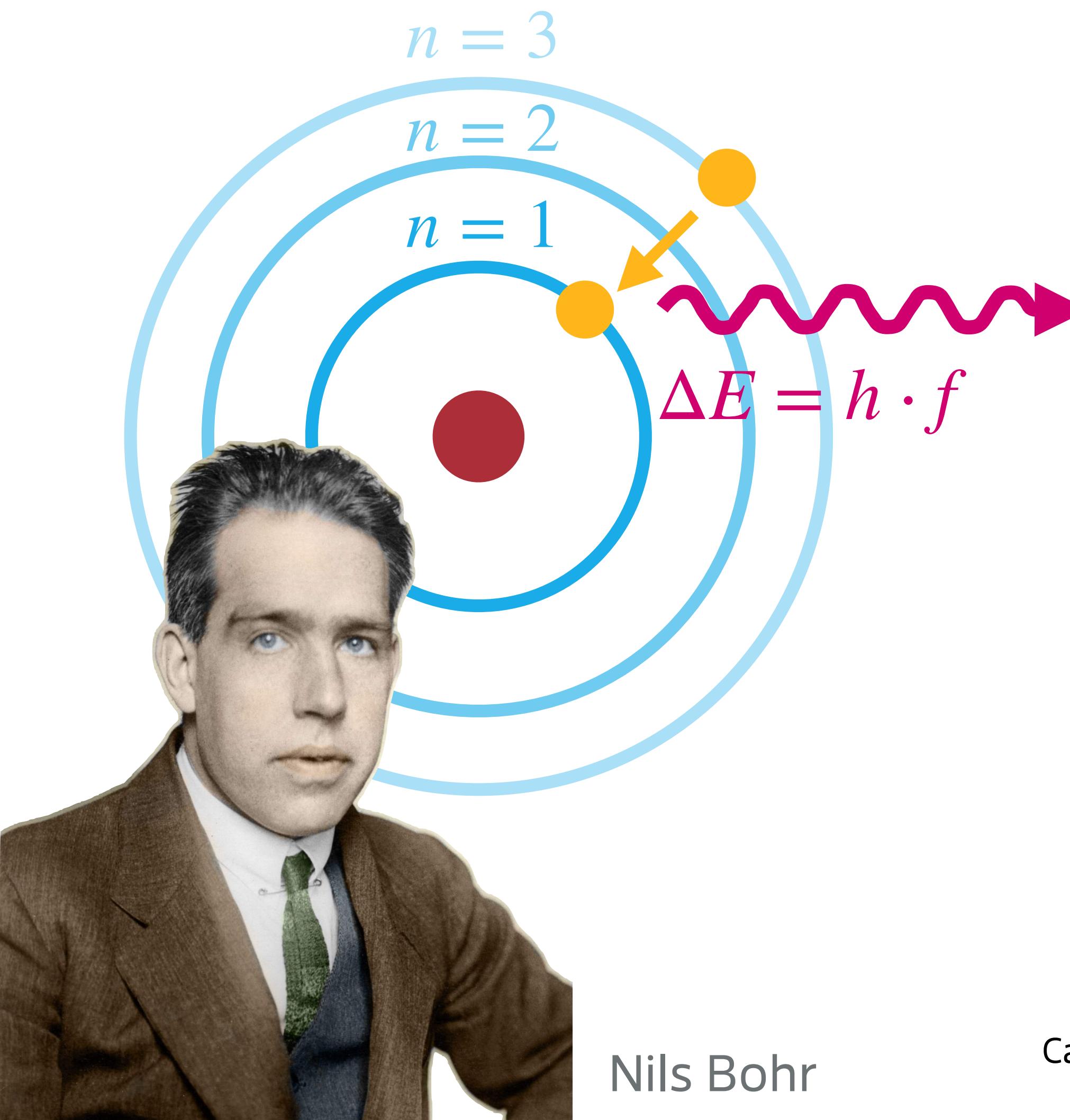


... sollten alle Atome
eigentlich innerhalb von
 $\tau = 10^{-16}$ s zerstrahlen*!

* Das war auch schon J.J. Thomson bei Formulierung seines Rosinenkuchen-Models klar, ihm aber egal.



Das Bohr'sche Atommodell, 1913



Sichtbare Emissionslinien des Wasserstoffs

Postulate:

- (1) Elektronen bewegen sich verlustfrei auf diskreten Kreisbahnen mit Energie E_n .
- (2) Beim Übergang wird ein Photon der Energie $h \cdot f = \Delta E_n$ emittiert.
- (3) Die Energie-Niveaus E_n sind proportional zu $-1/n^2$.

Das Bohr'sche Atommodell, 1913



Sichtbare Emissionslinien des Wasserstoffs

Postulates

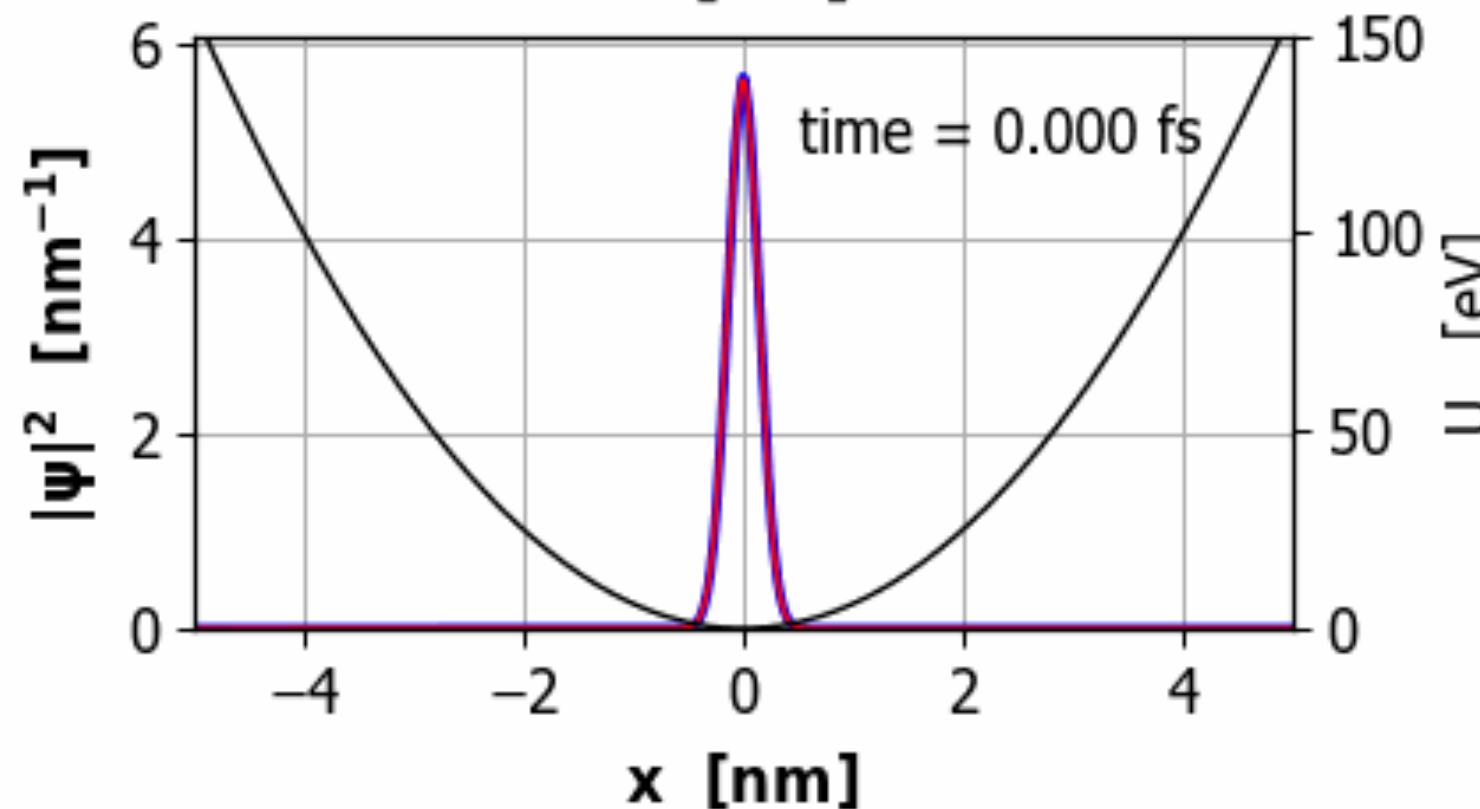
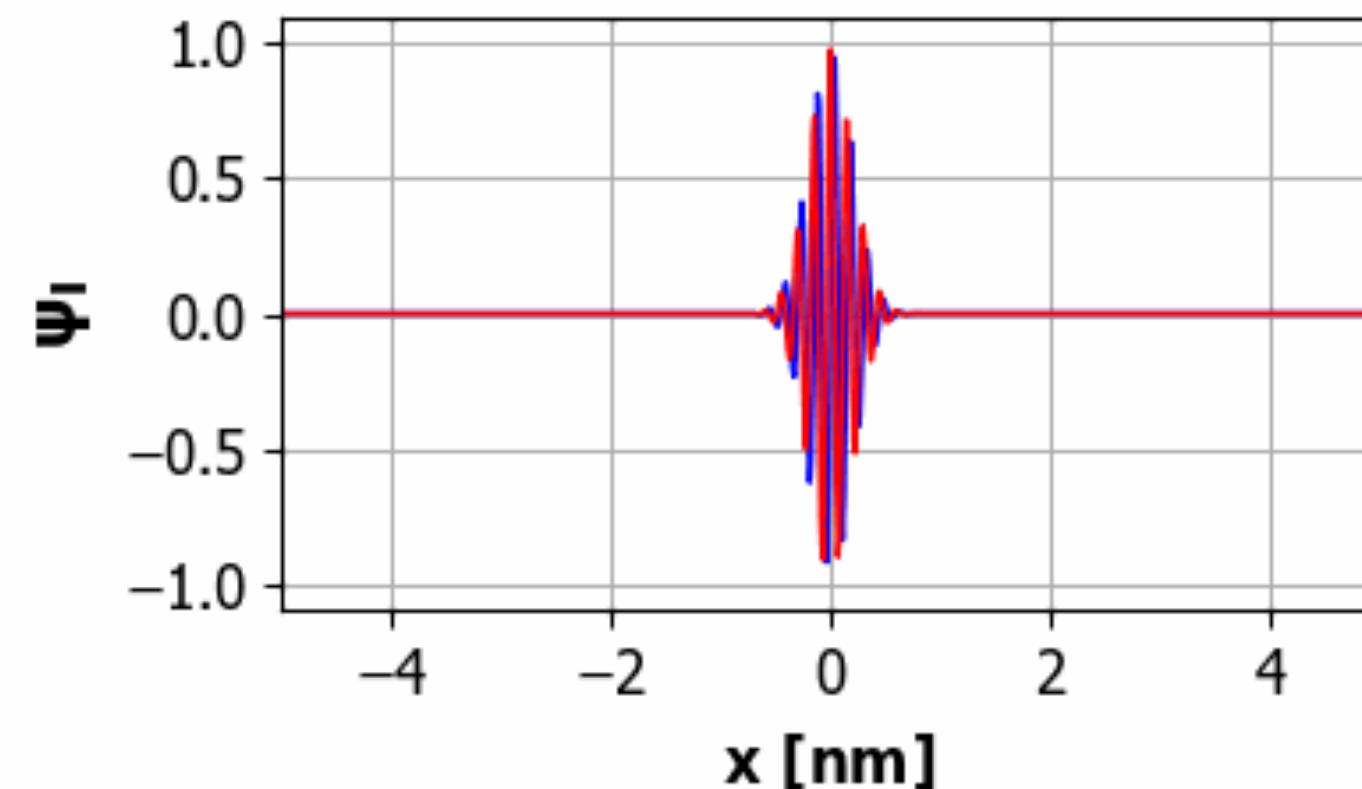
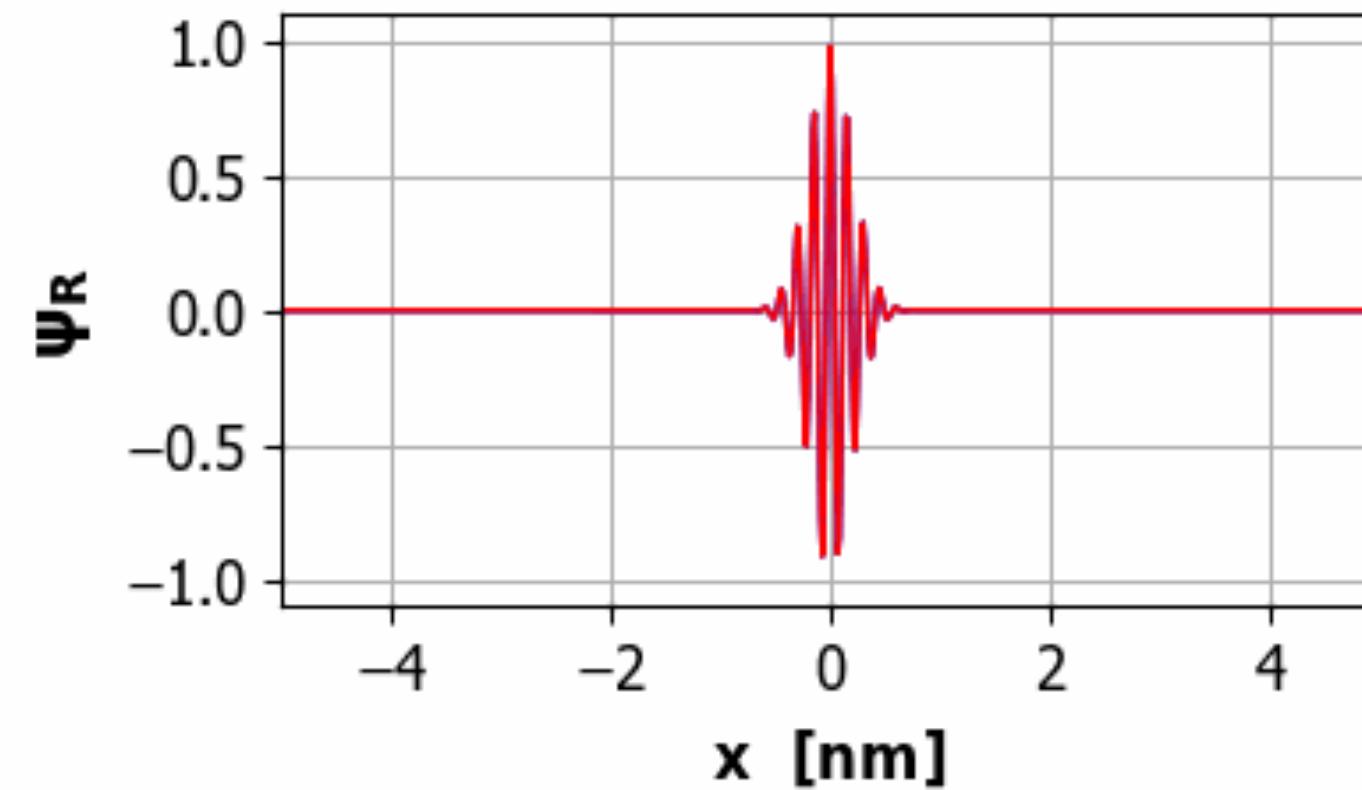
Wie lassen sich diese scheinbar willkürlichen Postulate begründen?

(3) Die Energie-Niveaus proportional zu $-1/n^2$.



Nils Bohr

Die Schrödinger-Gleichung, 1926



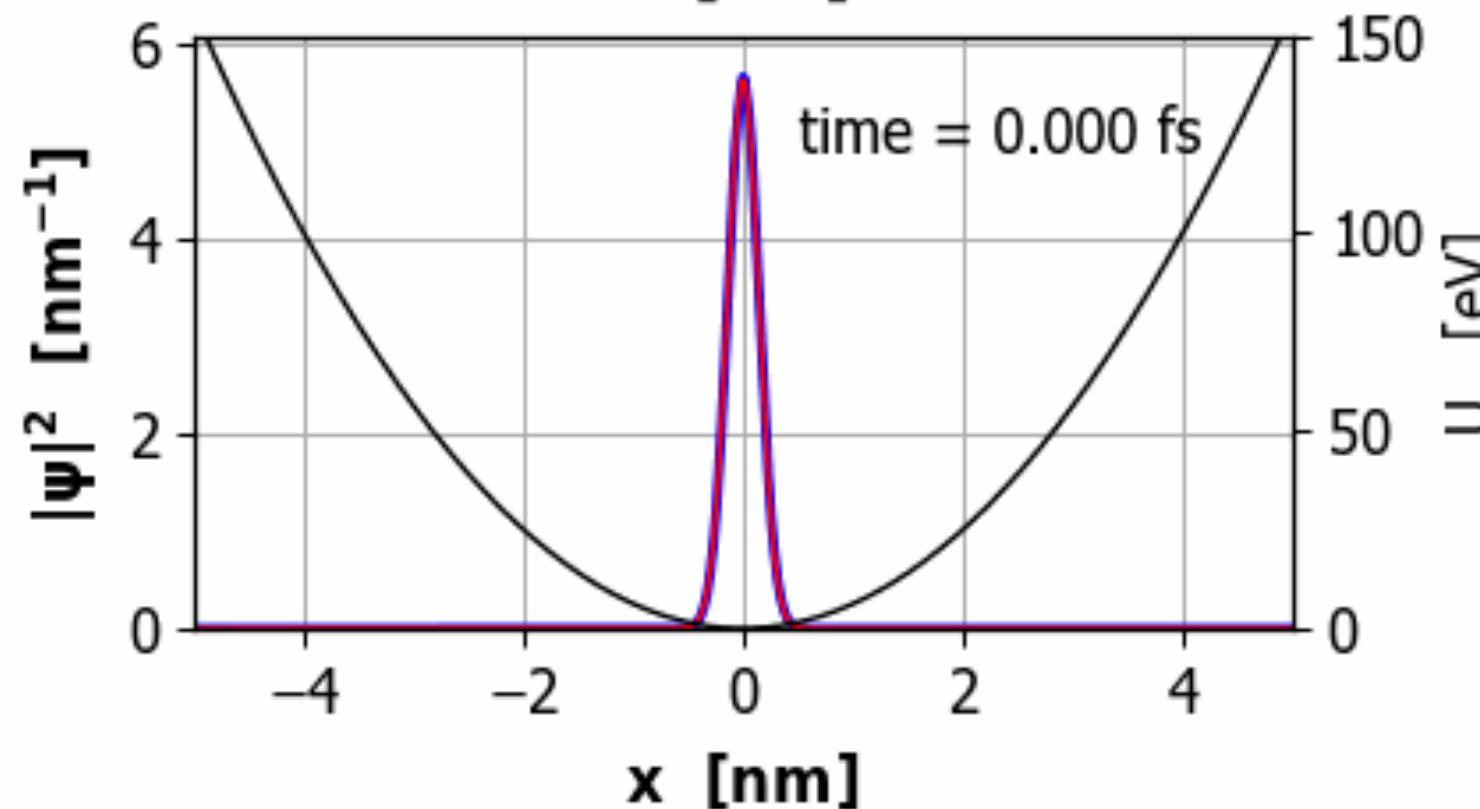
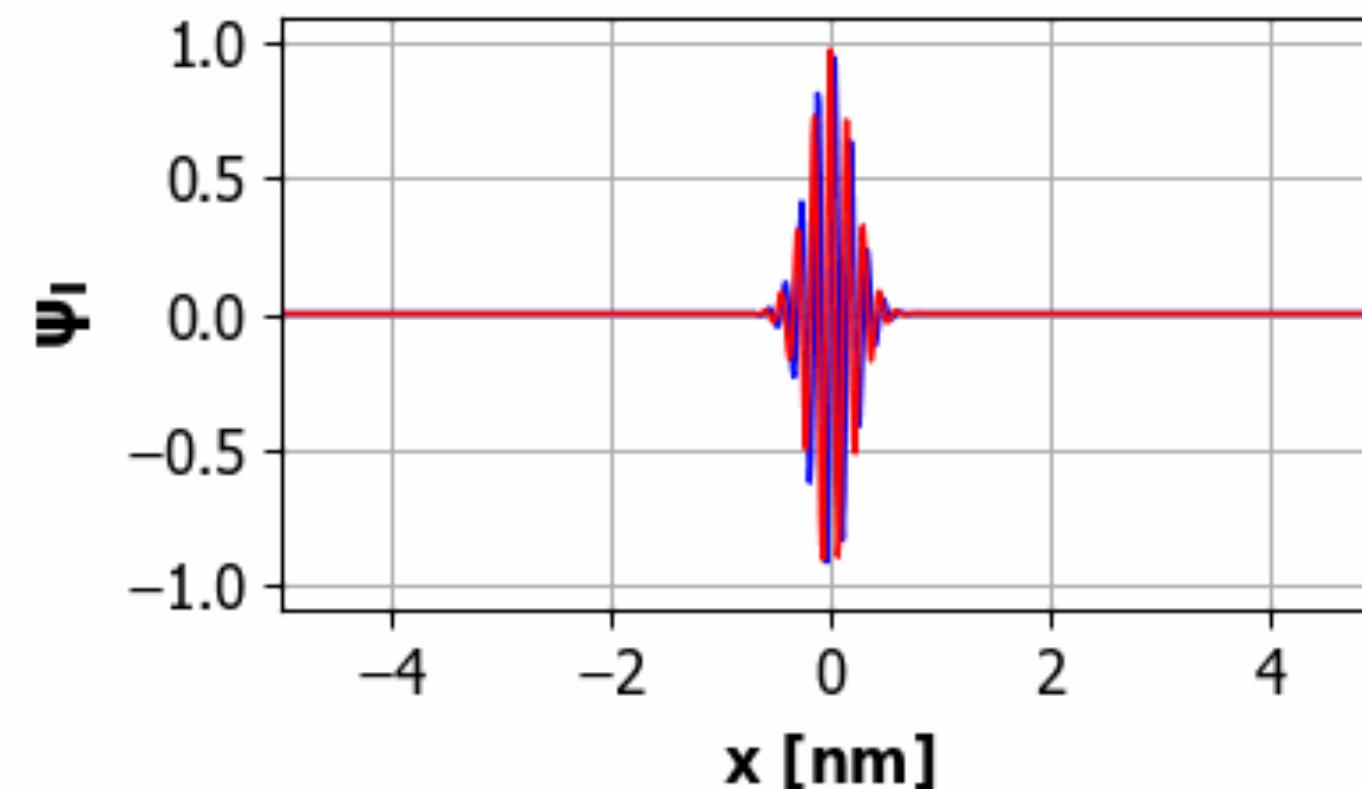
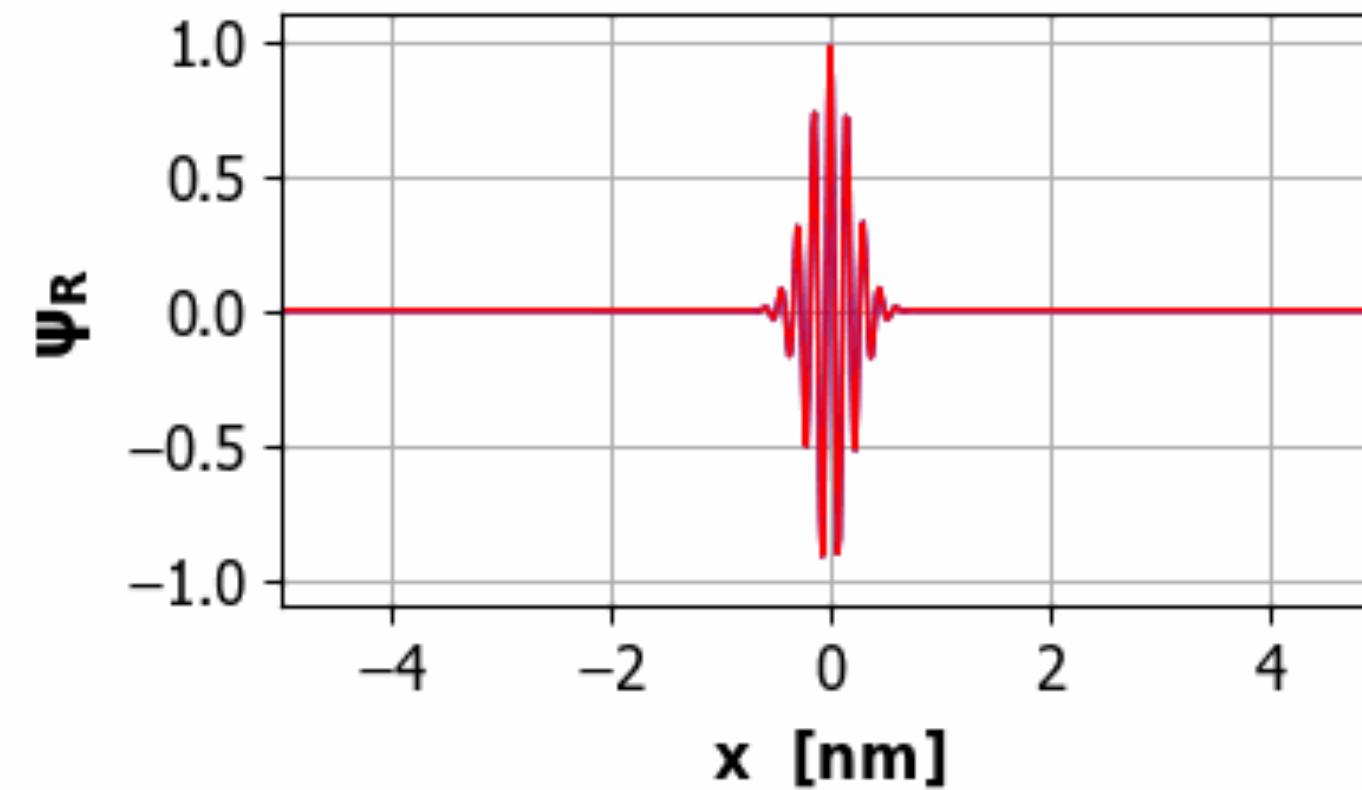
$$\hat{H} |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$



Erwin
Schrödinger

Die Schrödingergleichung beschreibt die **deterministische Zeitentwicklung der Wellenfunktion** („des Zustands“) ψ . Gegeben ein Zustand ψ zu einer bestimmten Zeit, kann berechnet werden, wie ψ in der Zukunft aussehen wird oder in der Vergangenheit aussah.

Die Schrödinger-Gleichung, 1926



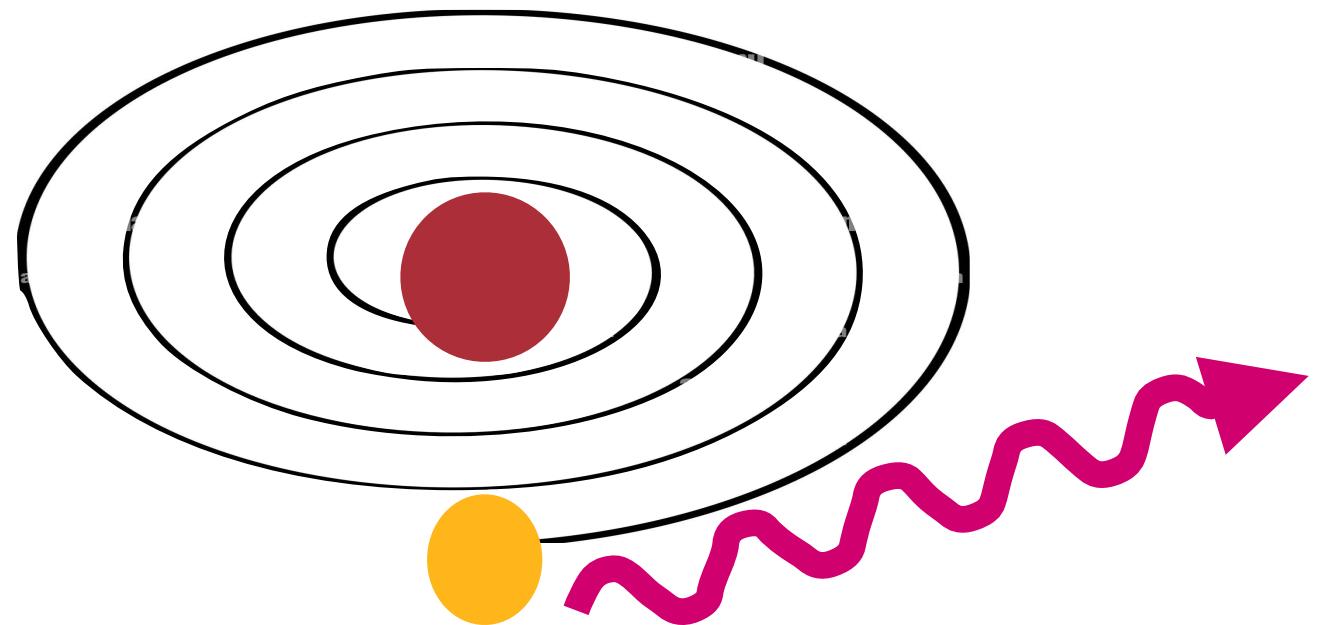
$$\hat{H}|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt}|\psi(t)\rangle$$



Die Schrödingergleichung beschreibt die **deterministische Zeitentwicklung der Wellenfunktion** („des Zustands“) ψ . Gegeben ein Zustand ψ zu einer bestimmten Zeit, kann berechnet werden, wie ψ in der Zukunft aussehen wird oder in der Vergangenheit aussah.

Warum stürzen die Elektronen nicht in den Atomkern?

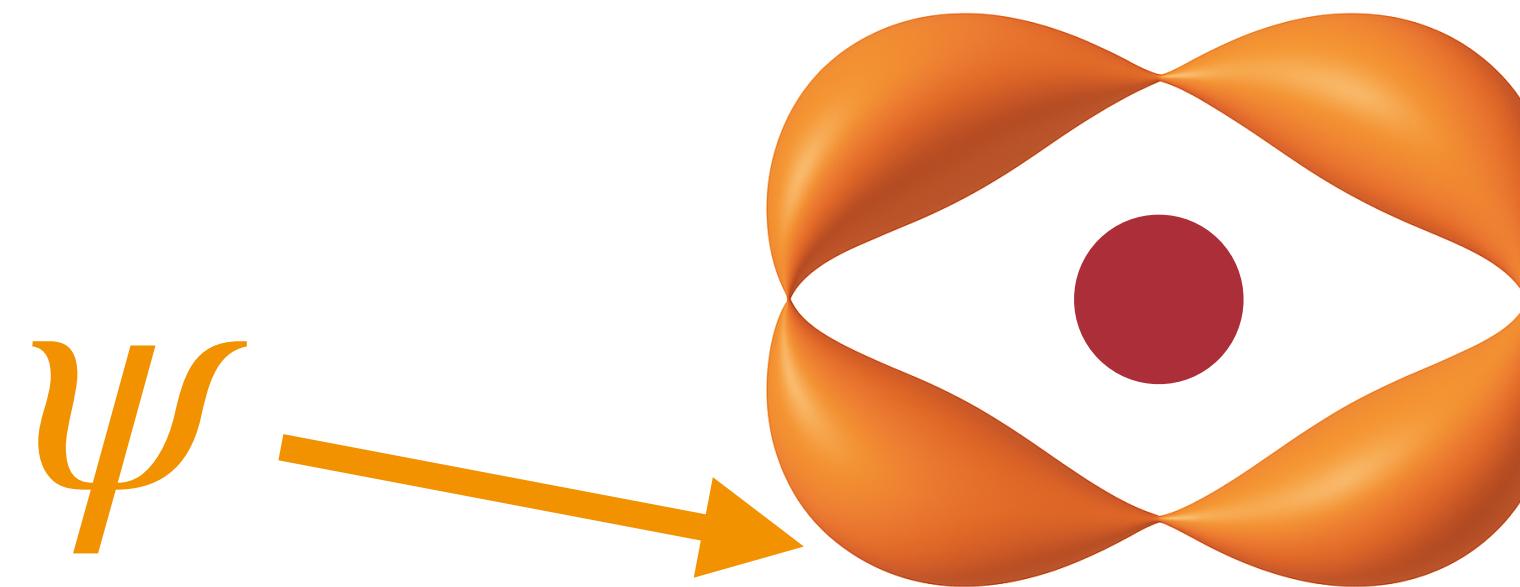
Klassisch:



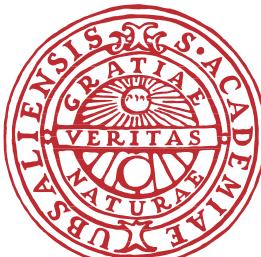
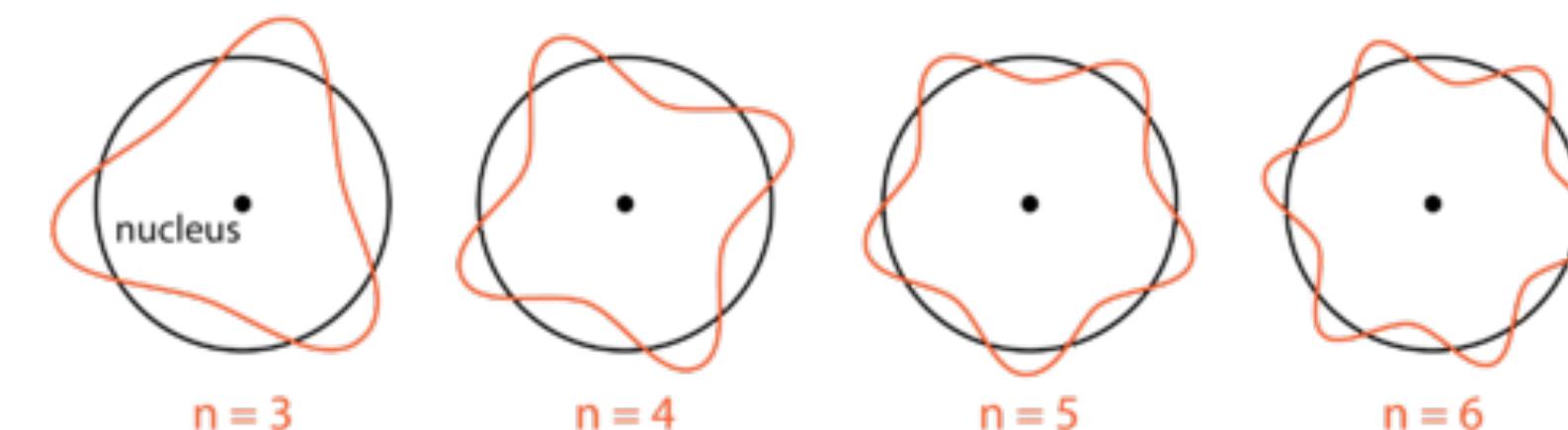
Das **Elektron** umkreist als Teilchen den **Kern**. Das Elektron stürzt nach Sekundenbruchteilen in den Kern, weil es Energie durch **Strahlung** verliert.

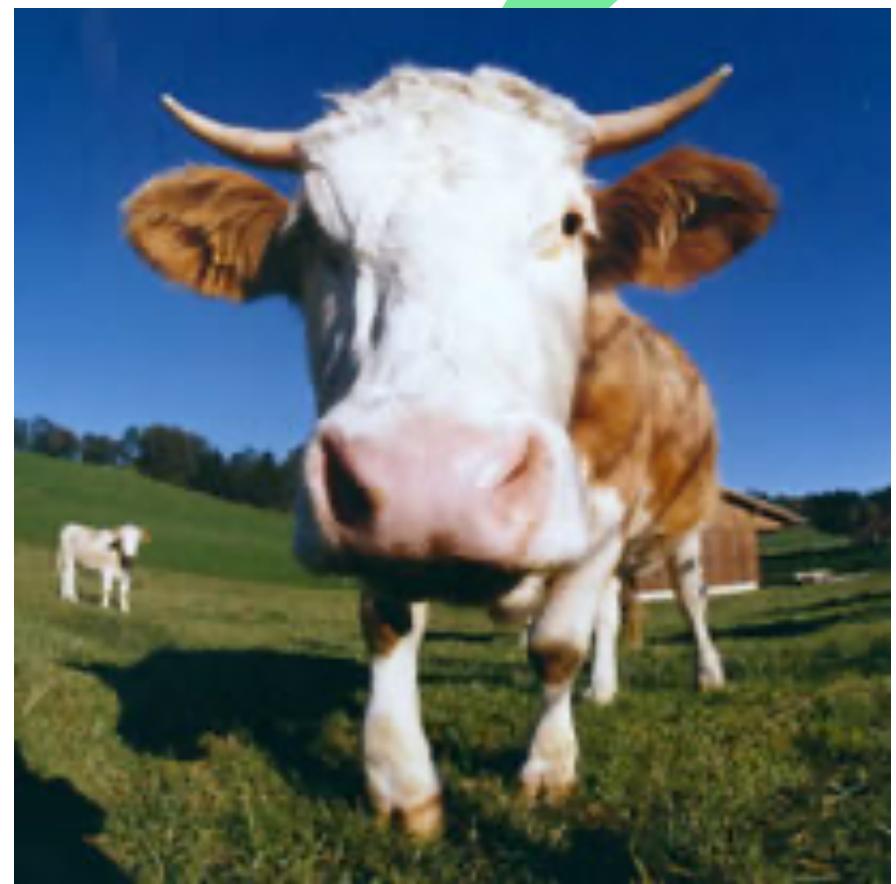


Quantenmechanisch:



Die **Wellenfunktion** des Elektrons formt eine **stehende Welle** um den **Kern**. Es wird keine Strahlung emittiert, da sich keine Ladungen bewegen.

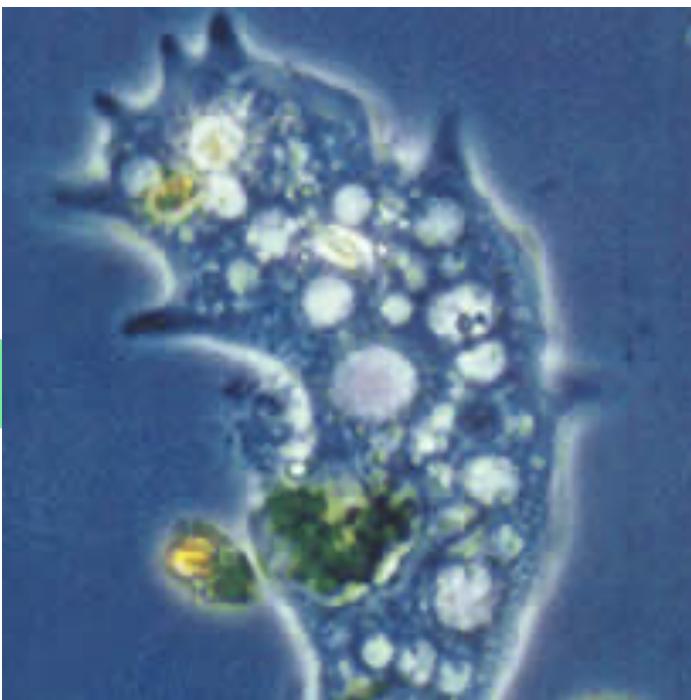
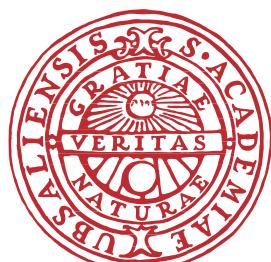




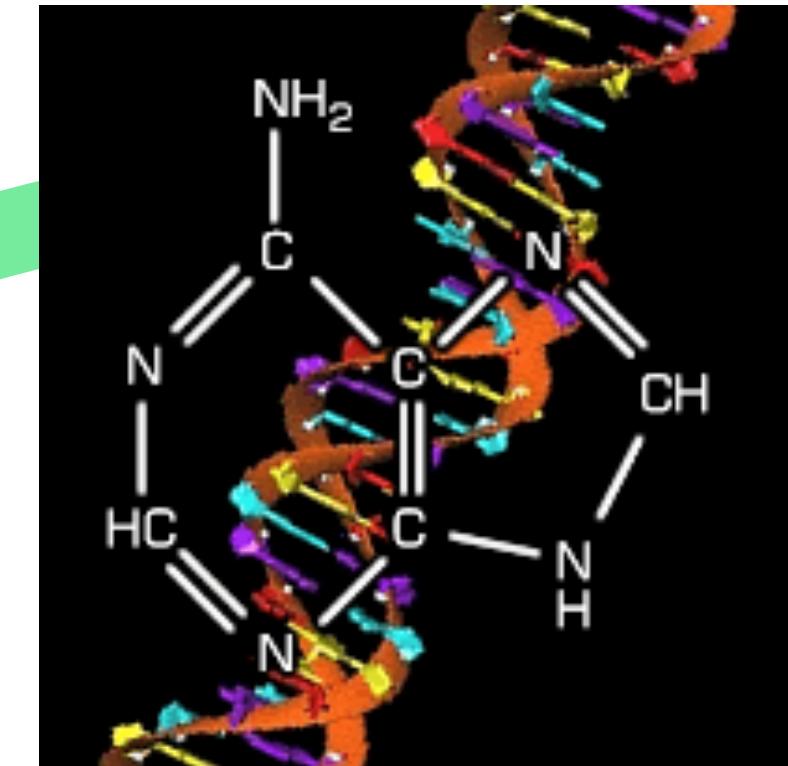
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



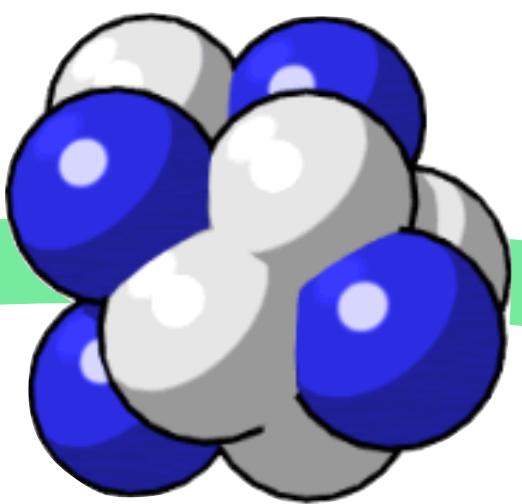
**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



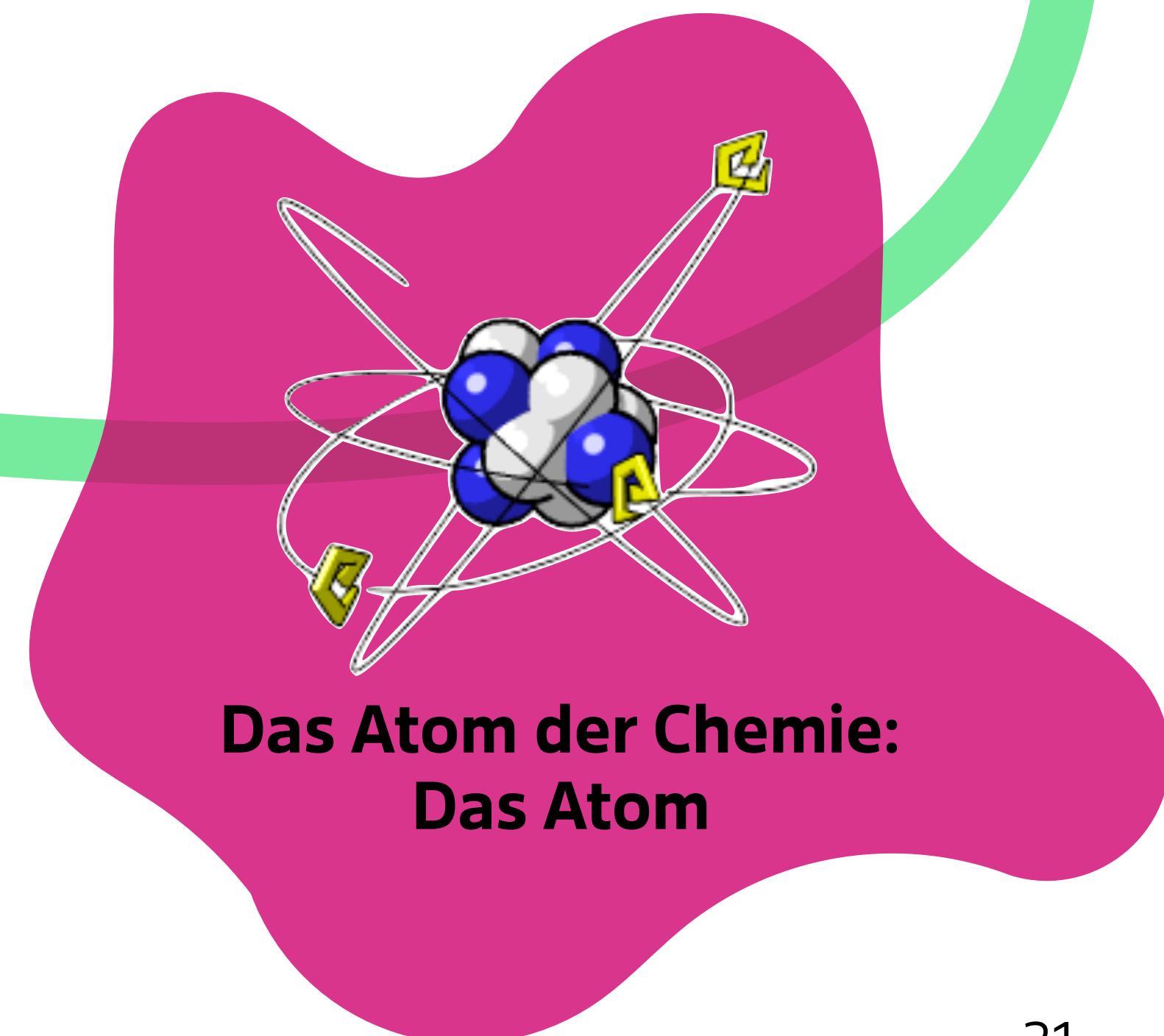
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



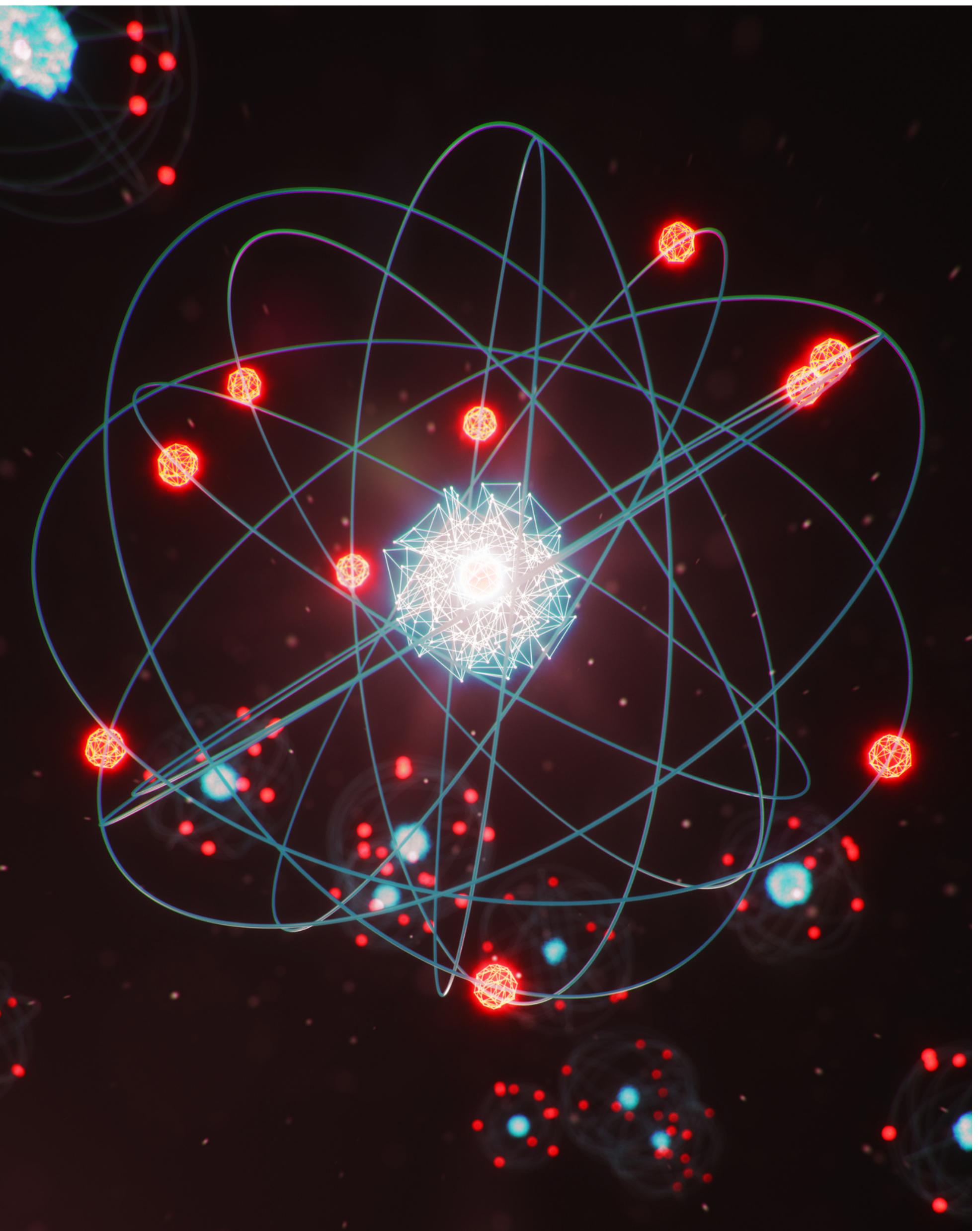
**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**



**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

Zusammenfassung (erster Block)

- Atome sind aus **schweren Kernen** und einer **Elektronenhülle** aufgebaut.
- Ohne die Quantenmechanik würden unsere Atome sofort zerstrahlen.
- Die Grundlage der Quantenmechanik waren eine Reihe von **Experimenten zwischen dem 19. und 20. Jahrhundert**.
- Das **Bohr'sche Atommodell** benötigt die Quantenmechanik als Legitimation seiner Postulate.



Von der Kuh zum Quark

Ferienakademie „Kernspaltei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher

Department of Physics and Astronomy

Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se

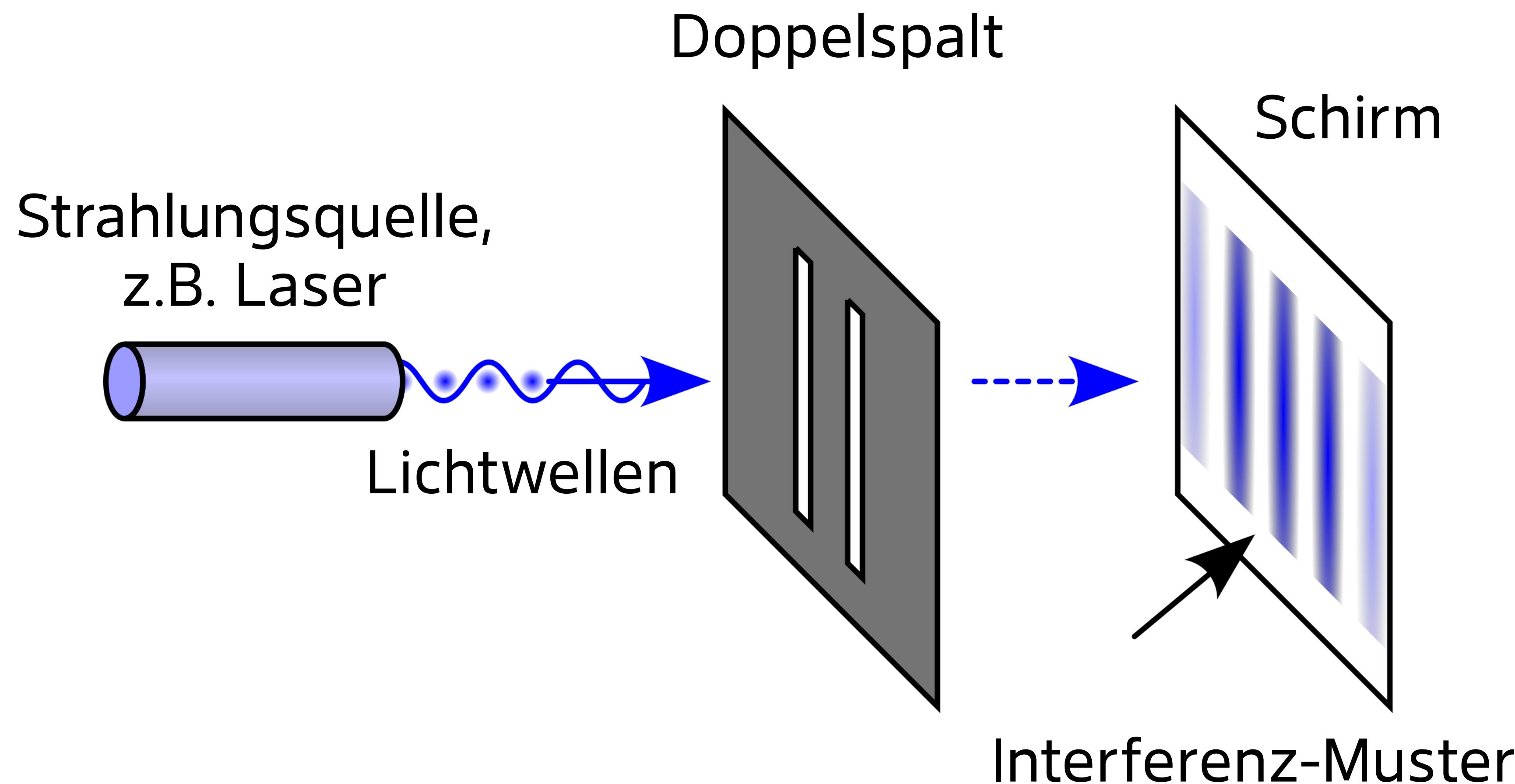


Alexander von
HUMBOLDT
STIFTUNG



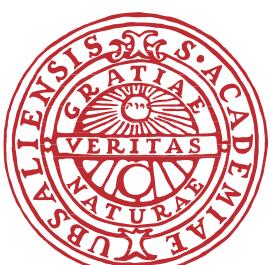
UPPSALA
UNIVERSITET

Doppelspalt-Experiment, Young 1801

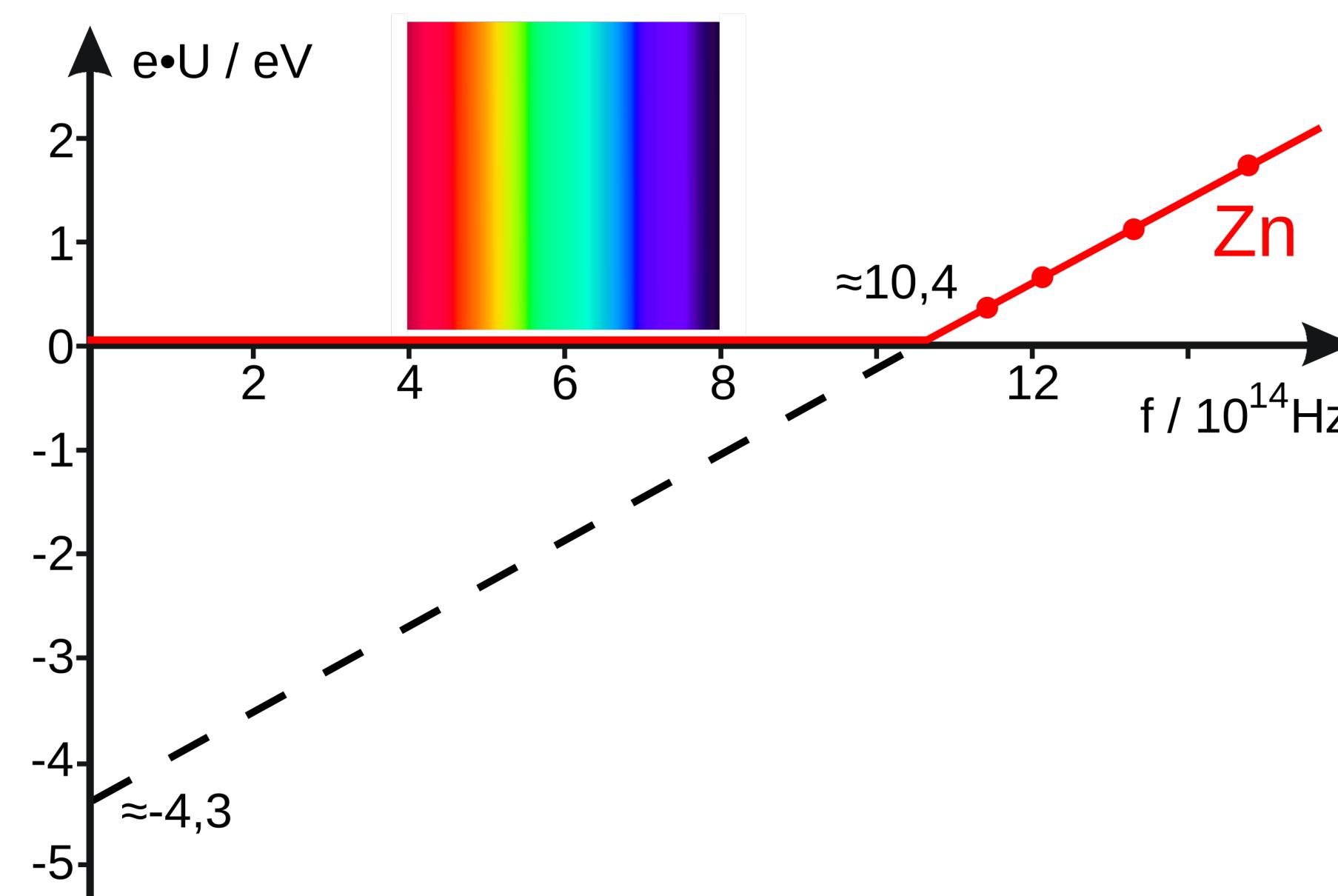
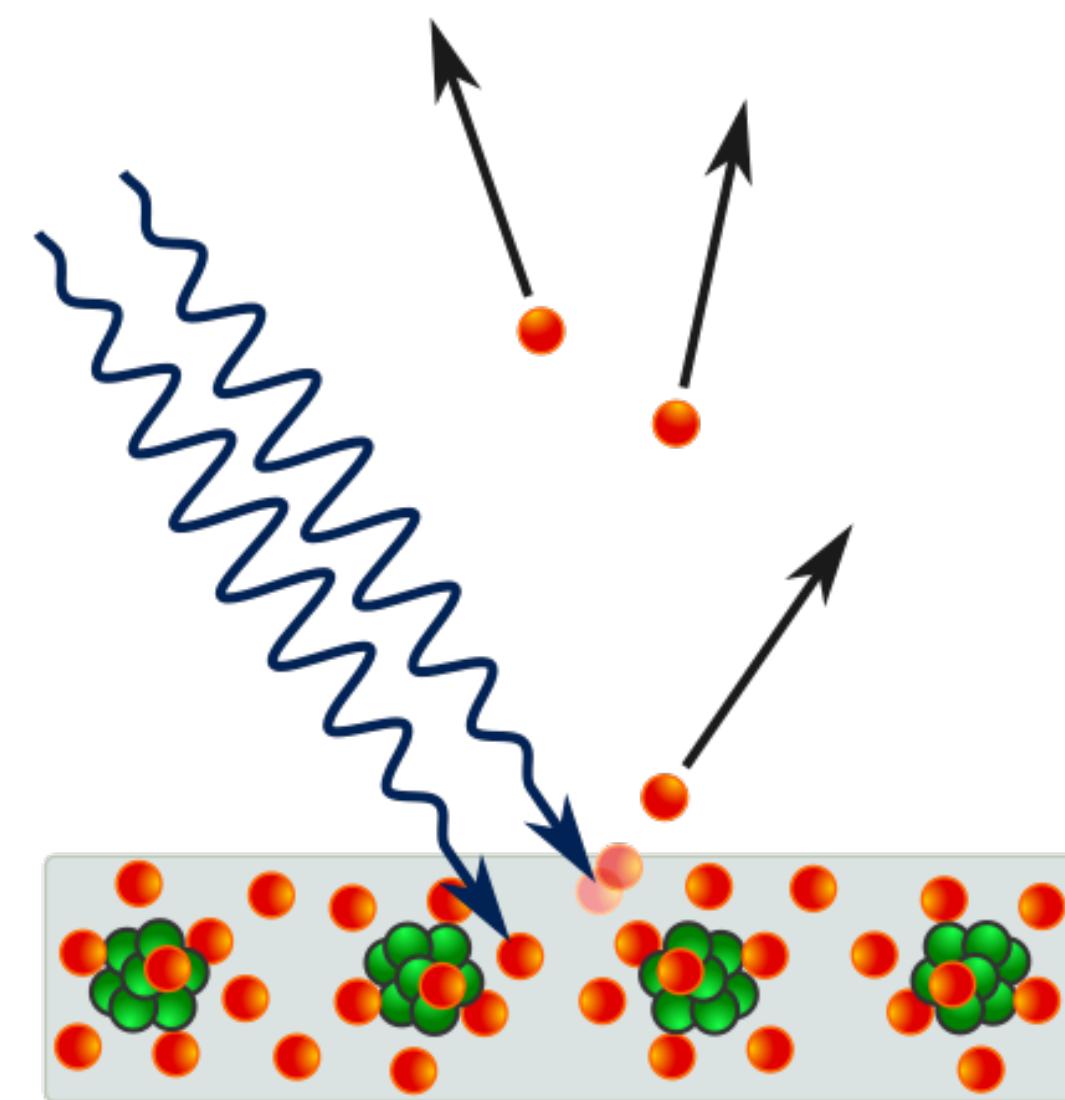


<https://www.falstad.com/ripple/>

Licht ist also eine Welle, die mit sich selbst interferieren kann.

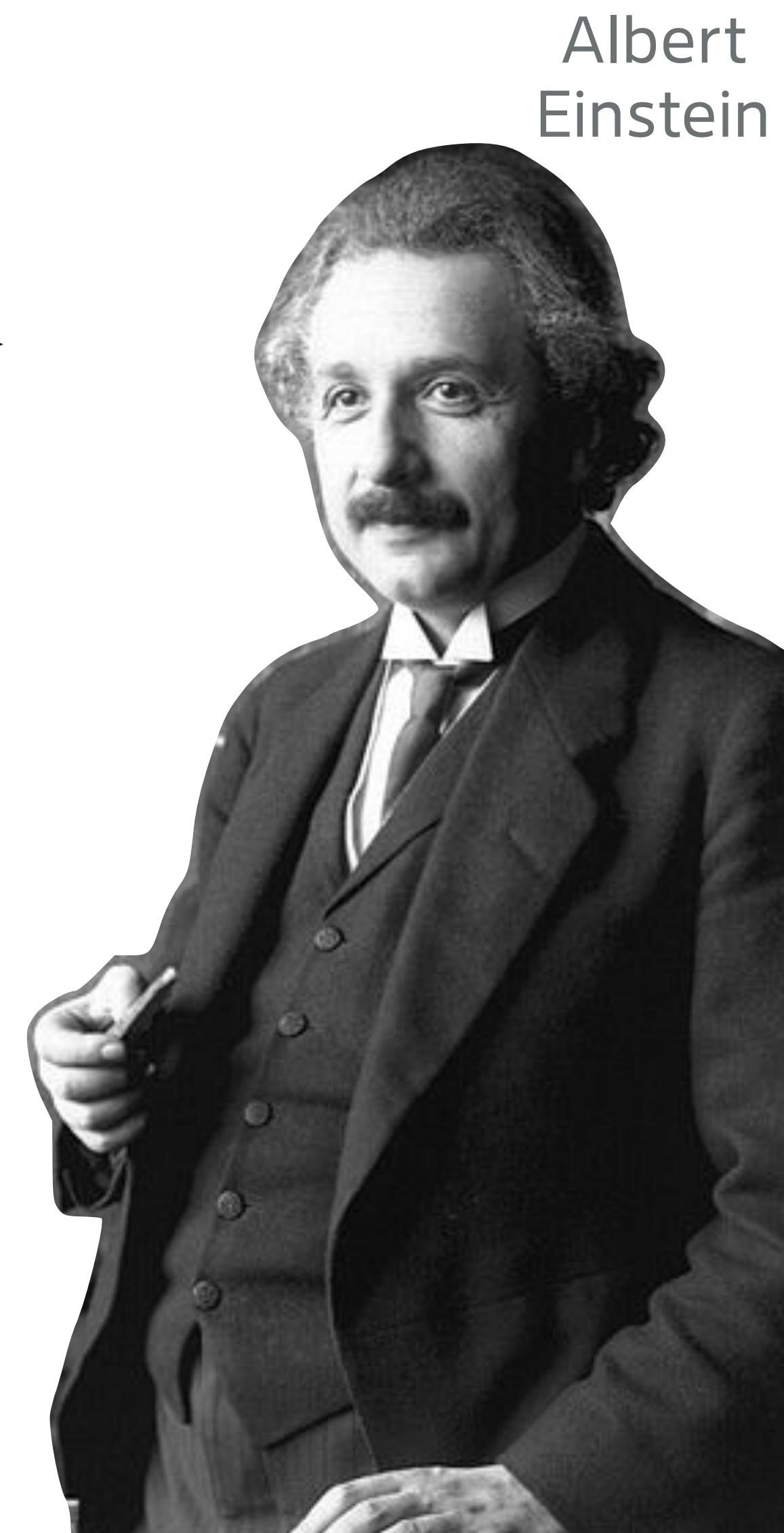


Erklärung des photoelektrischen Effekts, Einstein 1905



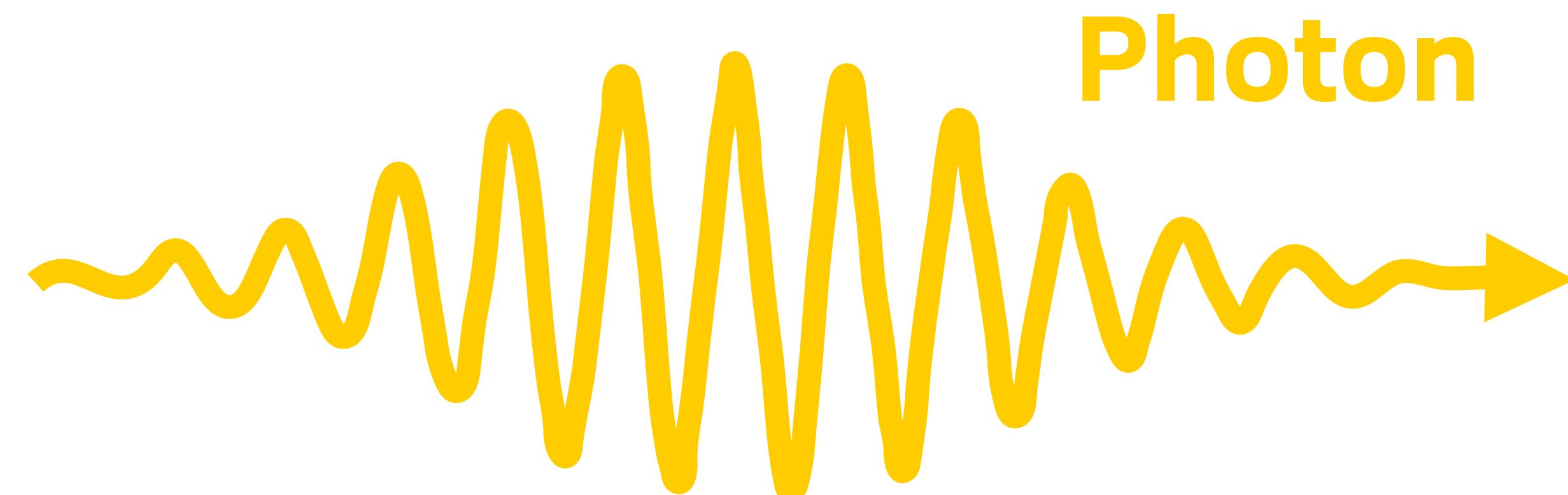
Trifft UV-Licht auf Zink, lösen sich Elektronen einer bestimmten kinetischen Energie aus dem Metall. Je größer die Frequenz des Lichts, desto größer die Energie der Elektronen. Ist die Frequenz des Lichts zu klein, werden keine Elektronen herausgelöst.

Licht ist also ein Teilchen der Energie $E = h \cdot f$.



Welle-Teilchen-Dualismus

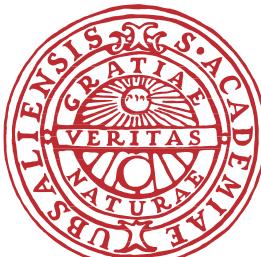
Das Licht wird in einzelnen Quanten (Photonen, „Lichtteilchen“) emittiert, die eine feste Energie $E = h \cdot f$ haben, die beim Stoß auf Elektronen übertragen werden kann. Dennoch, hat das Licht auch Welleneigenschaften.



Lichtwelle:
Elektromagnetische Wellen
⇒ Interferenzen

Dualismus

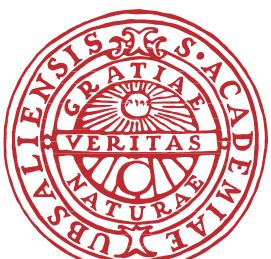
Lichtteilchen:
Photonen
⇒ Photoelektrischer Effekt



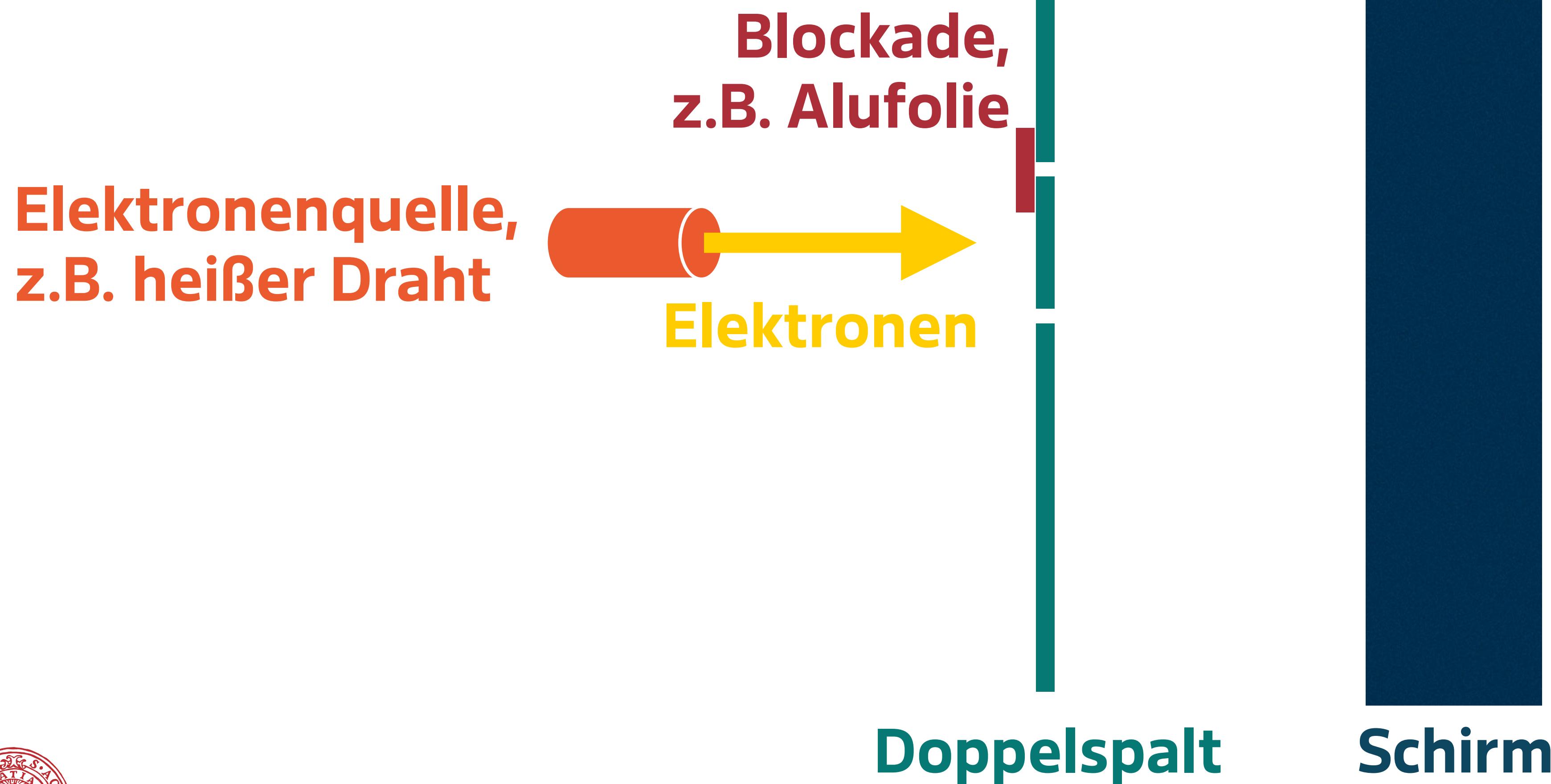
Welle-Teilchen-Dualismus

Das Licht wird in einzelnen Quanten (Photonen, „Lichtteilchen“) emittiert, die eine feste Energie $E = h \cdot f$ haben, die beim Stoß auf Elektronen übertragen wird. *Was ist das?* Noch hat das Licht auch Welleneigenschaften.

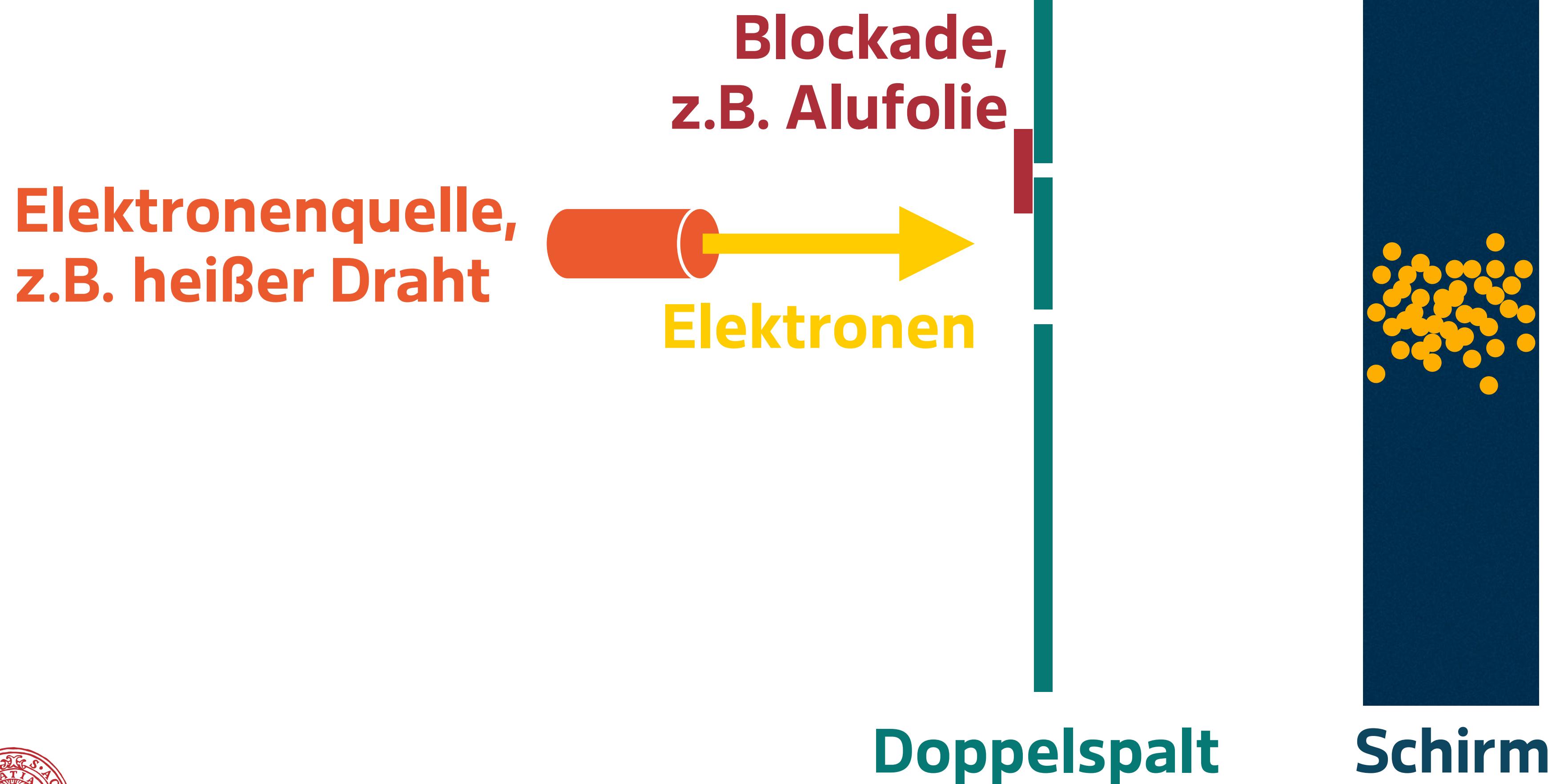
Das ist natürlich noch keine Erklärung sondern nur ein neues Wort. Es wird aber sogar noch schlimmer... 😞



Doppelspalt mit Elektronen



Doppelspalt mit Elektronen



Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



Elektronen

Blockade,
z.B. Alufolie



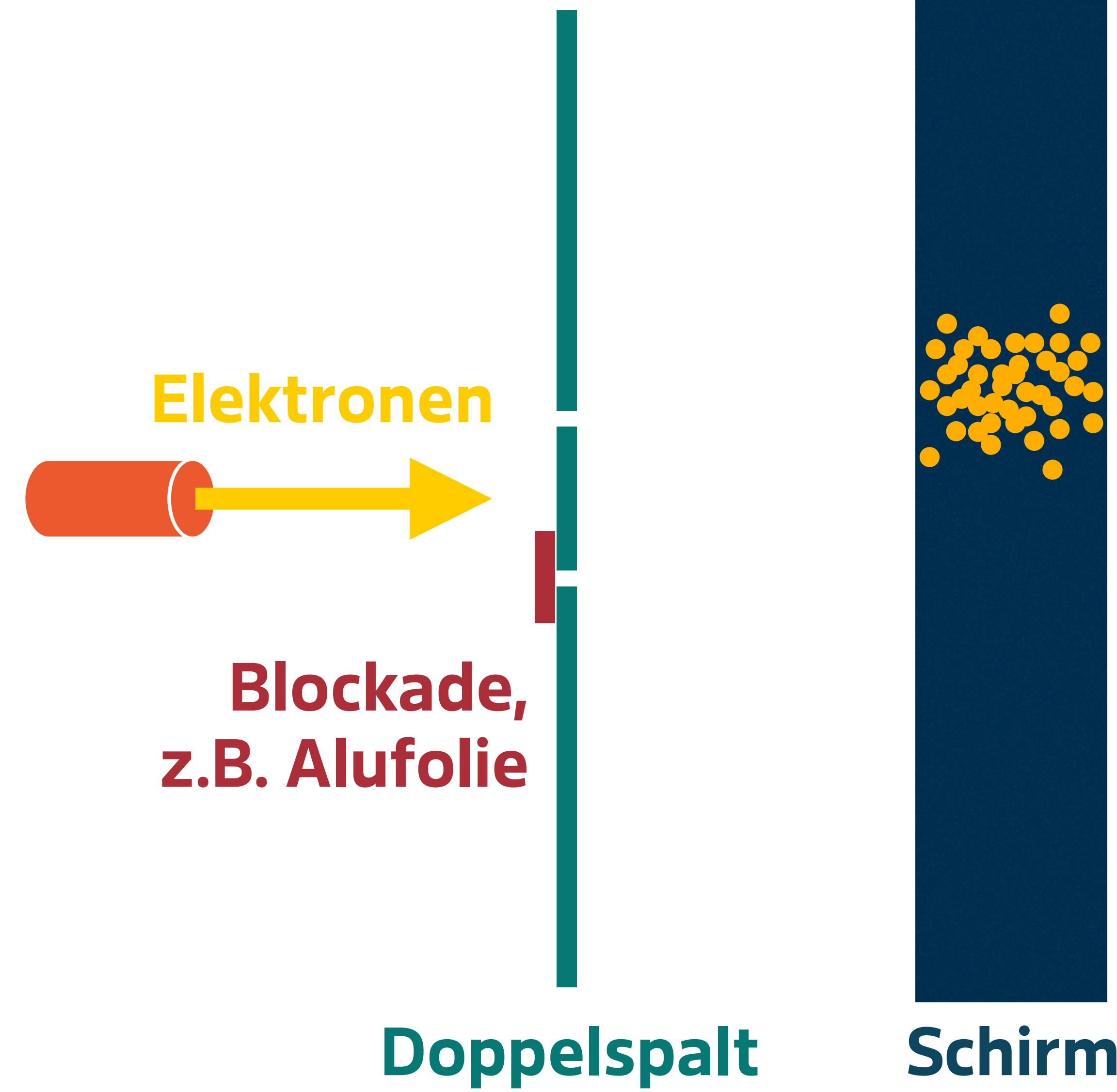
Doppelspalt

Schirm



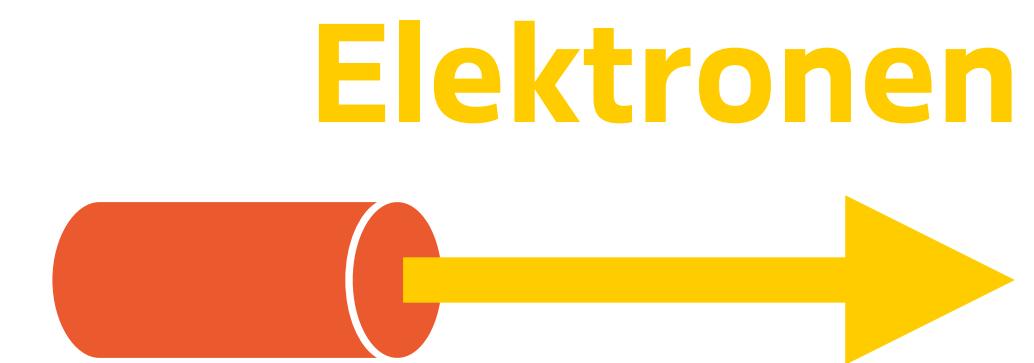
Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



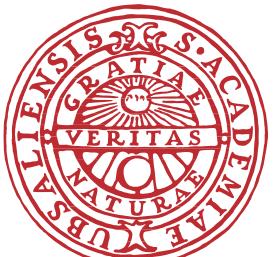
Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



Doppelspalt

Schirm

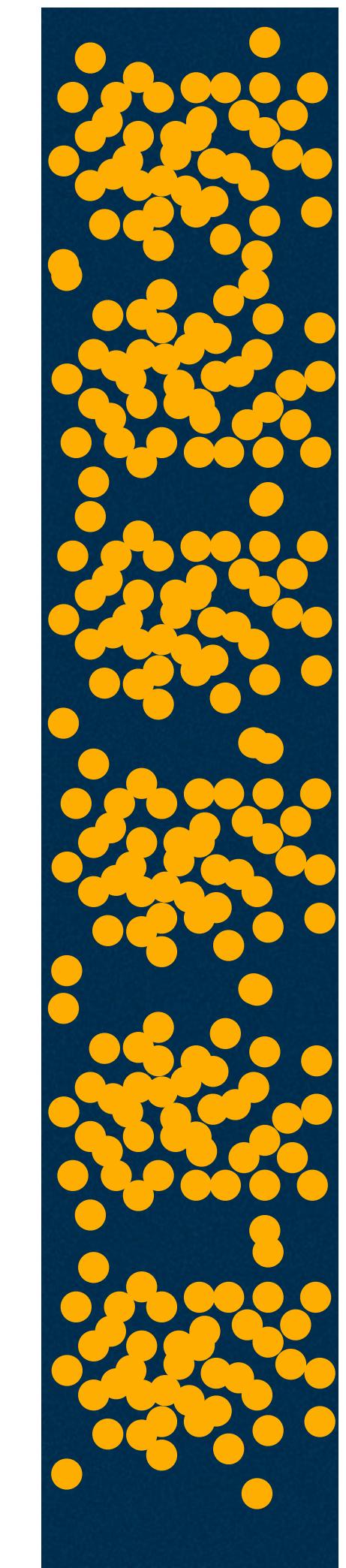


Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



Doppelspalt

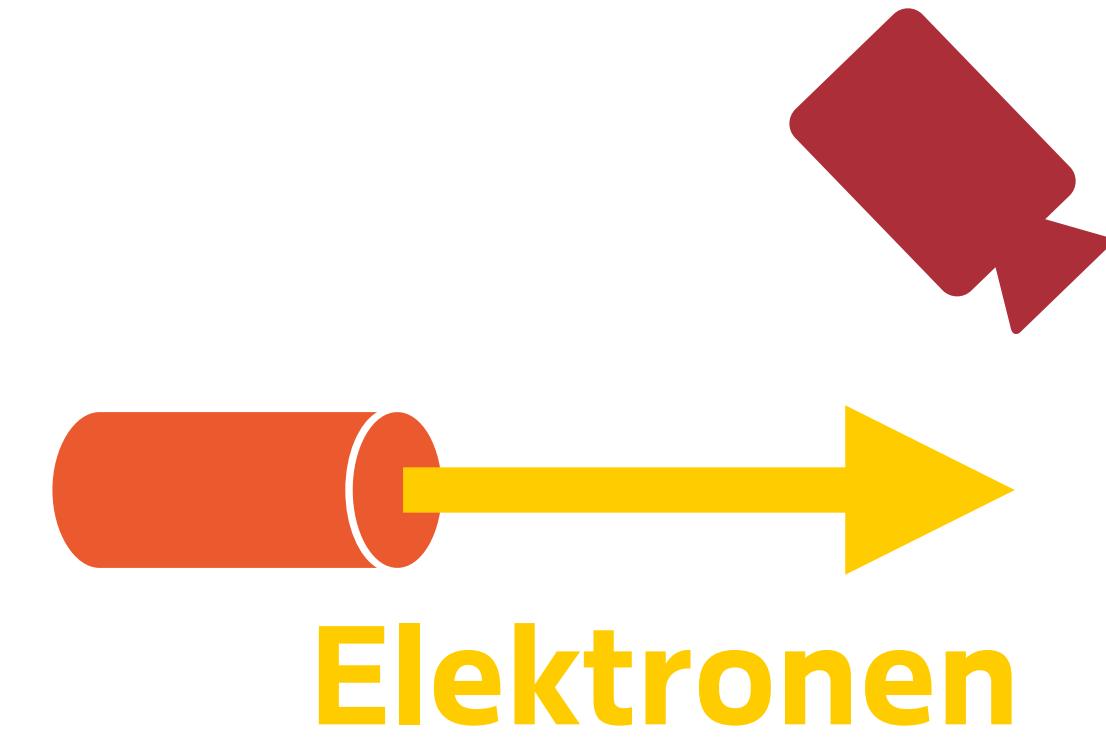


Schirm



Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



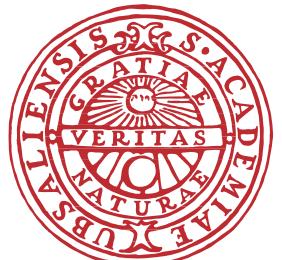
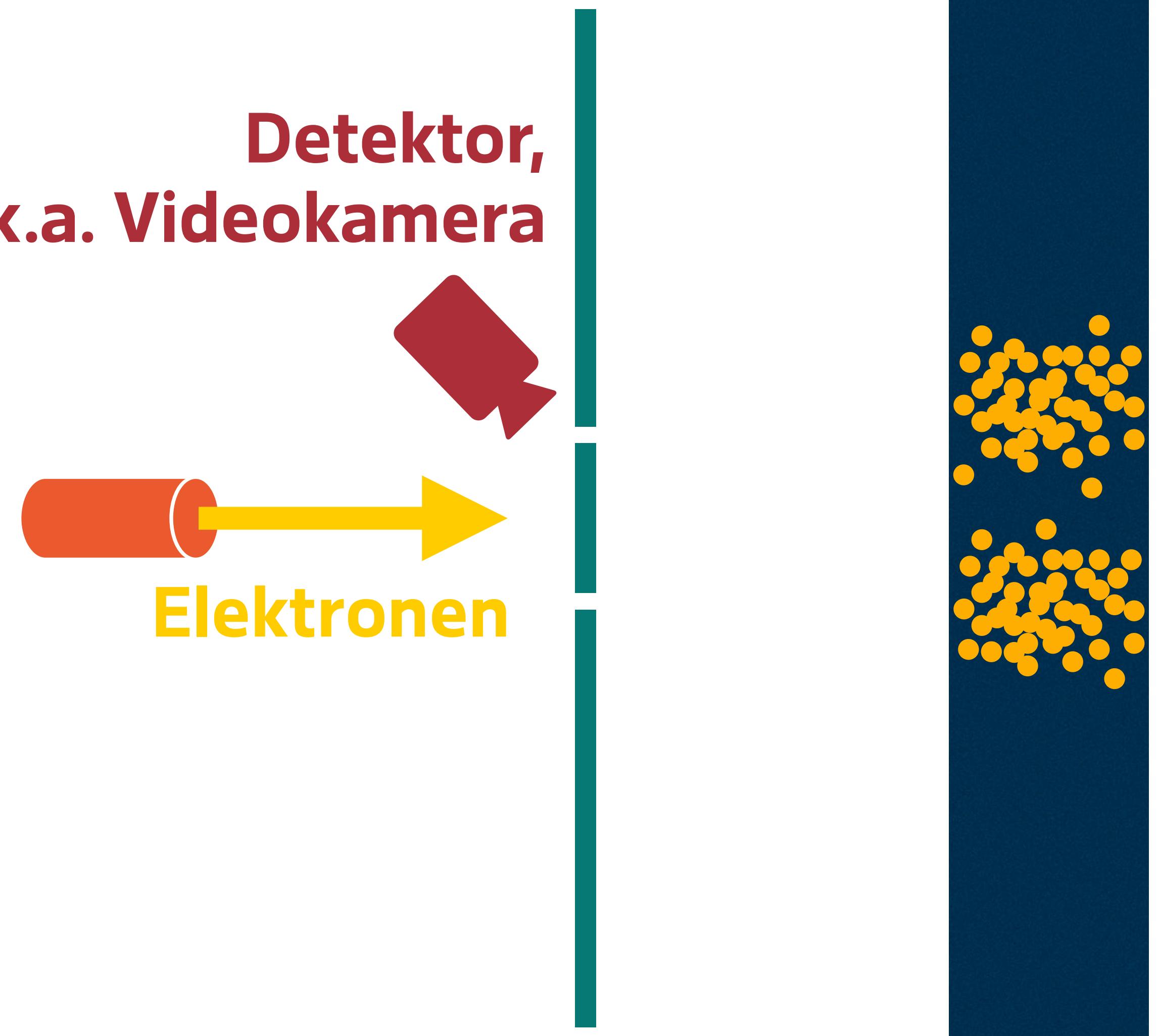
Detektor,
a.k.a. Videokamera

Doppelspalt

Schirm

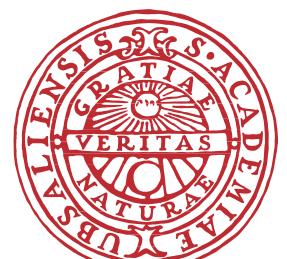
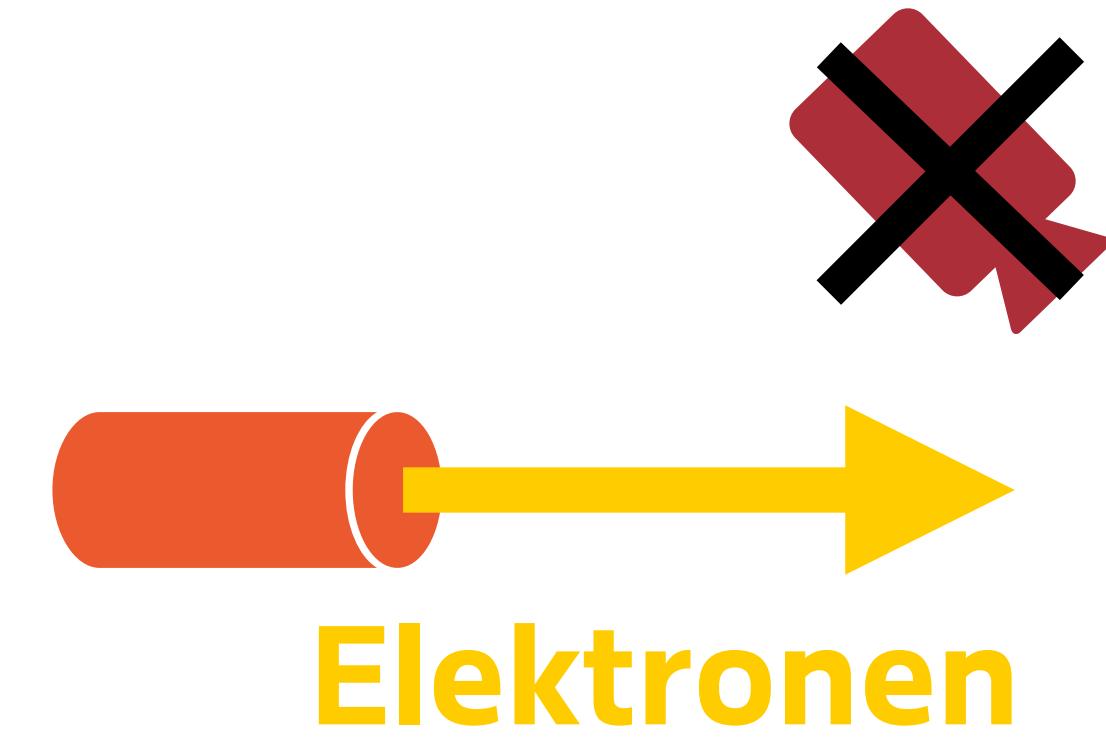
Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



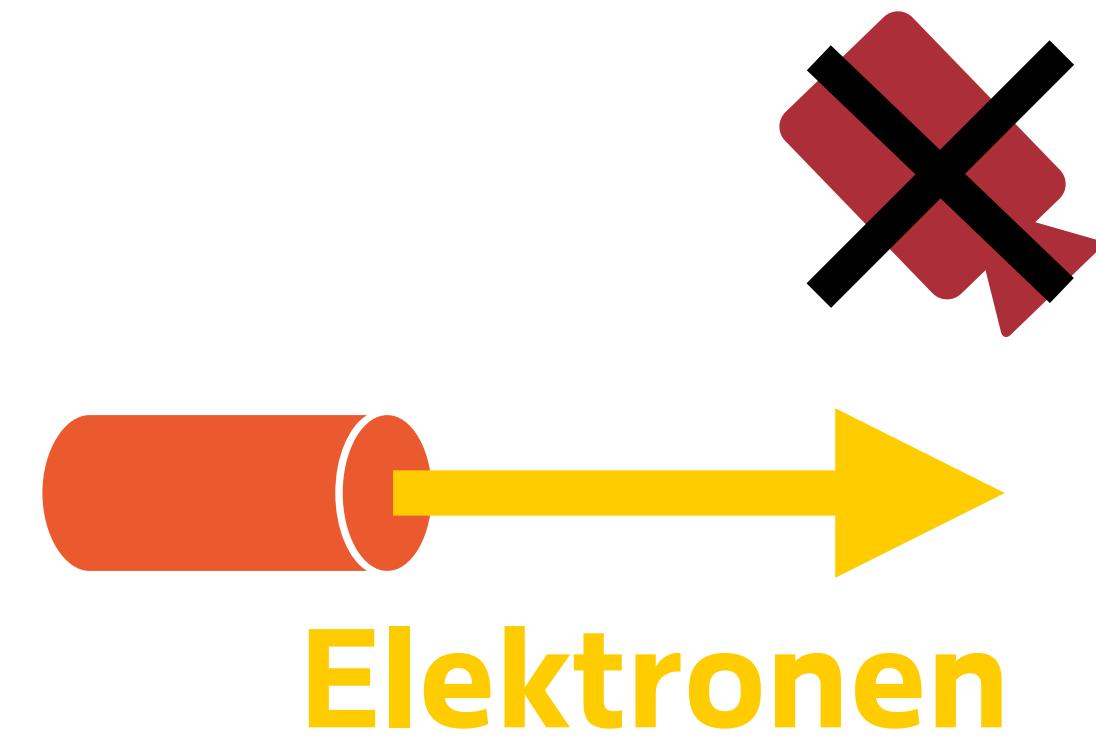
Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht

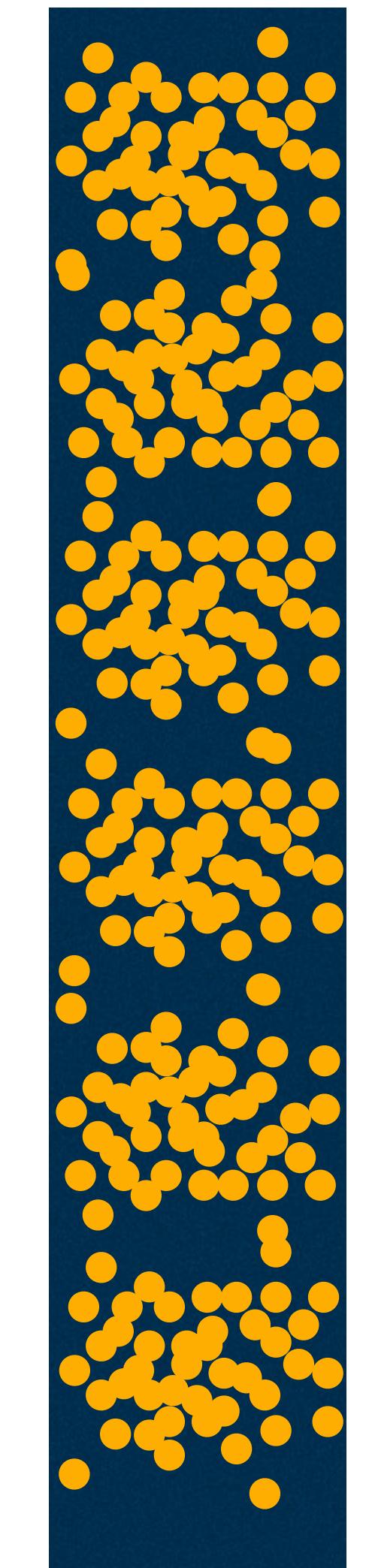


Doppelspalt mit Elektronen

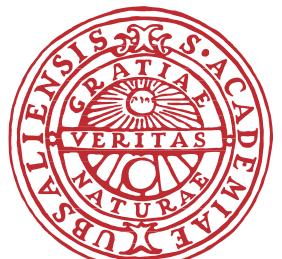
Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



Doppelspalt



Schirm



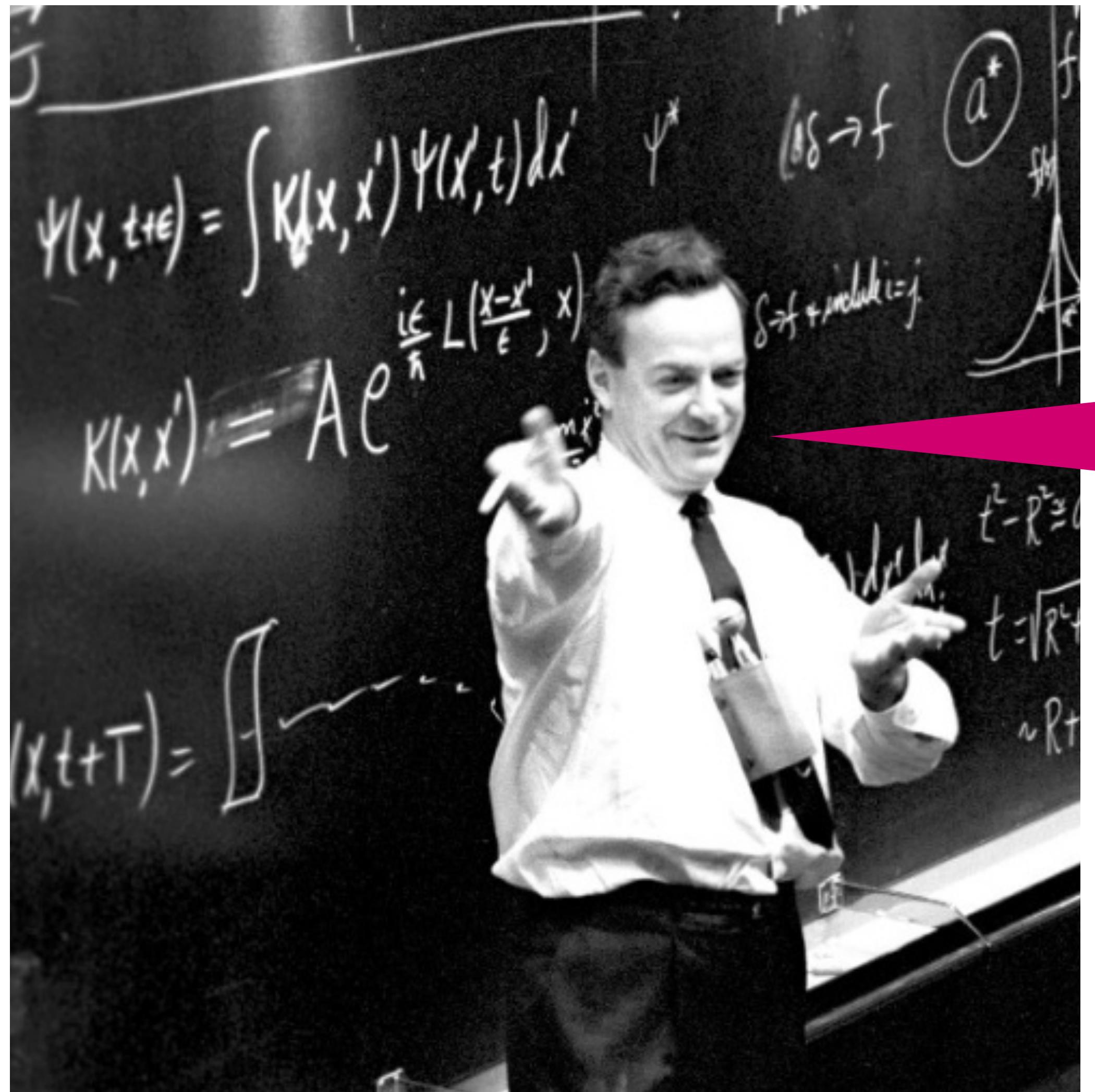
Äsops Parabel vom Fuchs und den Trauben



„Vom Hunger getrieben machte sich auf der Höhe eines Weinbergs ein Fuchs an Trauben heran, indem er mit aller Kraft nach ihnen sprang. Da er sie aber nicht erreichen konnte, sagte er im Weggehen: „Sie sind noch nicht reif; und sauer will ich sie nicht pflücken.“ Wer das, wozu er nicht in der Lage ist, mit Worten herunterspielt, der sollte sich dieses Beispiel zu Herzen nehmen.“



Wie soll das denn Sinn ergeben?

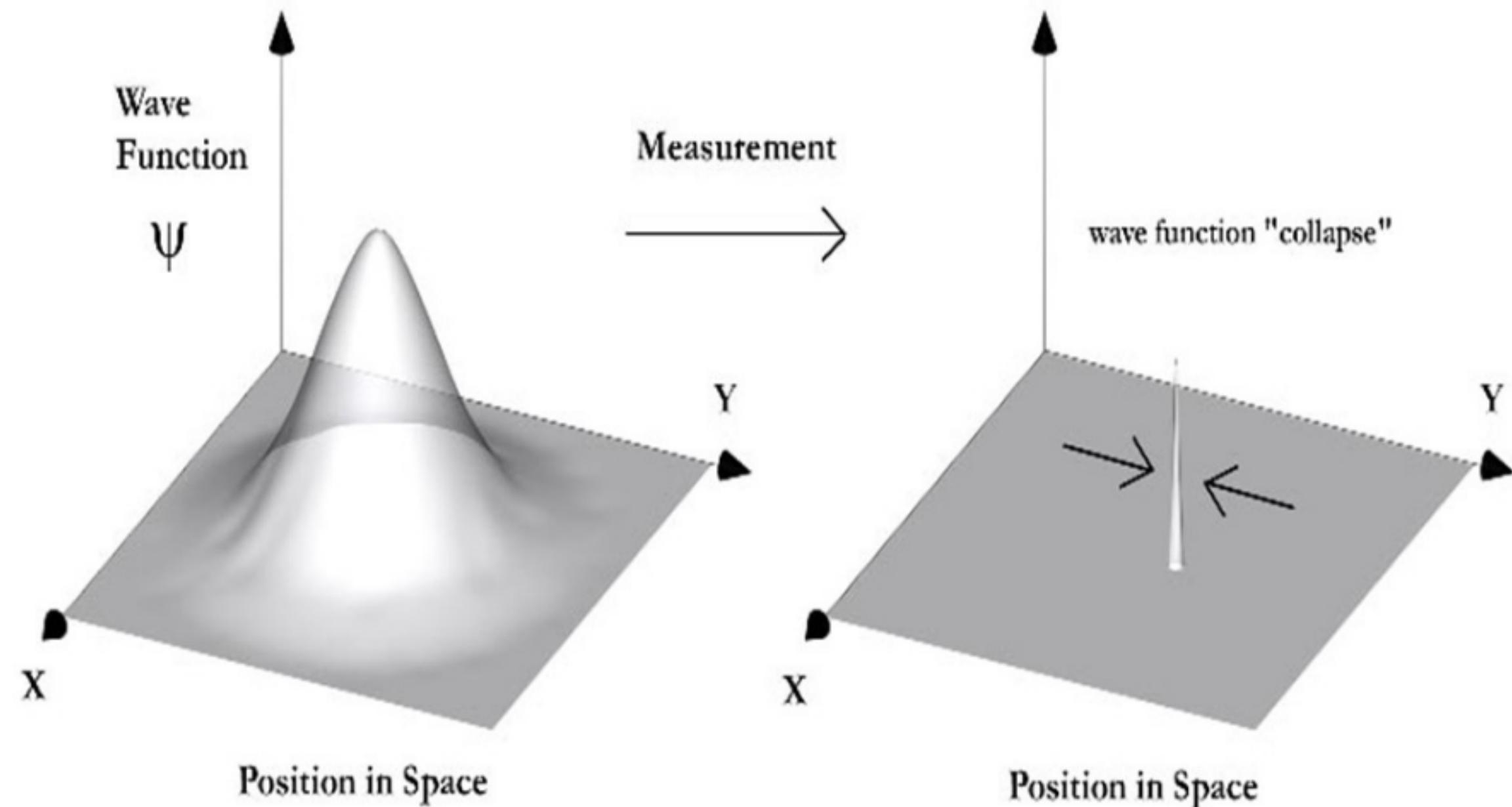


„I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.“

**Richard Feynman,
Entdecker der Quantenelektrodynamik**
(in der der Dualismus dann tatsächlich
erklärt und nicht nur akzeptiert wird)



Die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik



Sobald eine Messung stattfindet, **kollabiert die Wellenfunktion auf einen zufälligen Wert**. Danach ist z.B. die Position eines Teilchens zu 100% Gewissheit festgelegt ist. Die Zeitentwicklung durch die Schrödinger-Gleichung gilt nur für nicht-beobachtete Quantenobjekte.



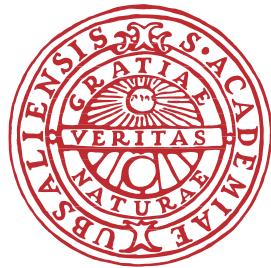
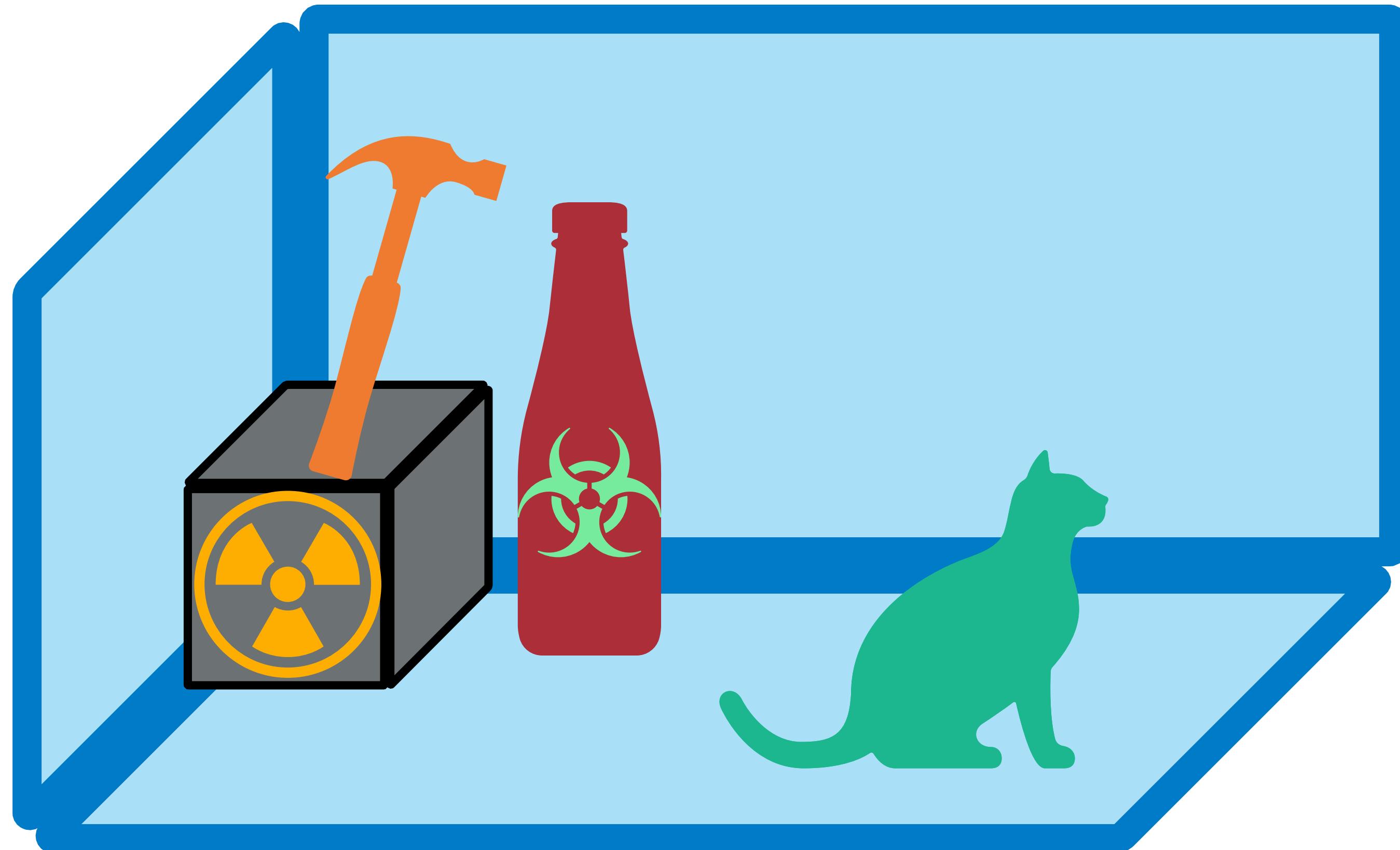
**Erklärung des
Messeffekts am
Doppelspalt**



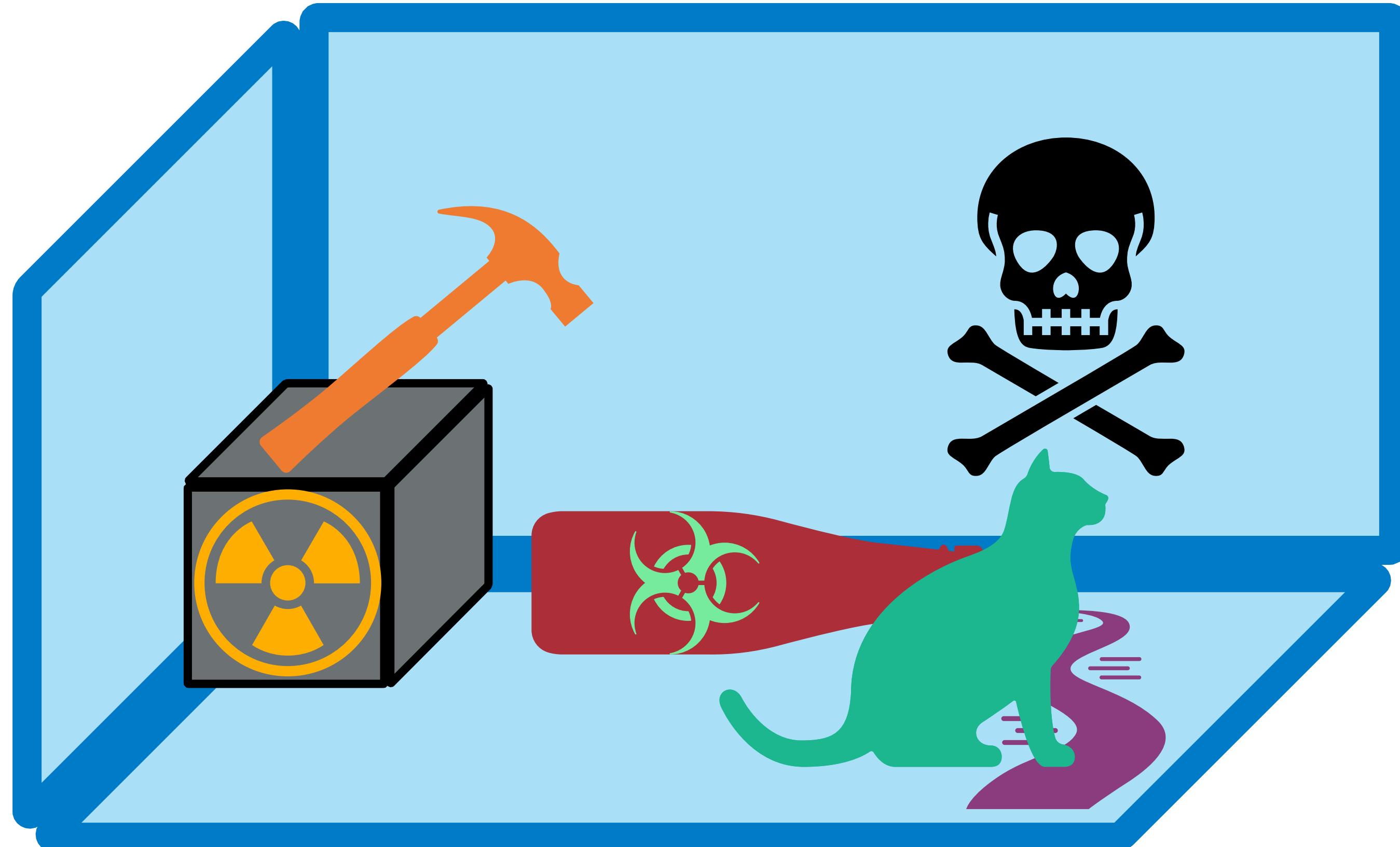
Das ungelöste Messproblem:
„Misst“ das Universum sich selbst?
Was ist $\Psi_{\text{Universum}}$? Determinismus?



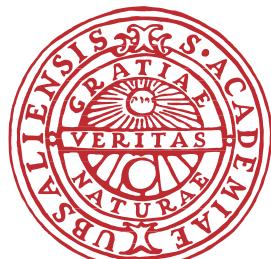
Schrödinger's Katze



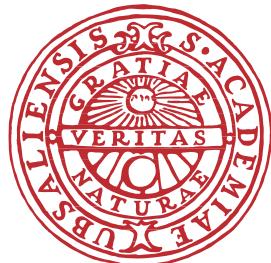
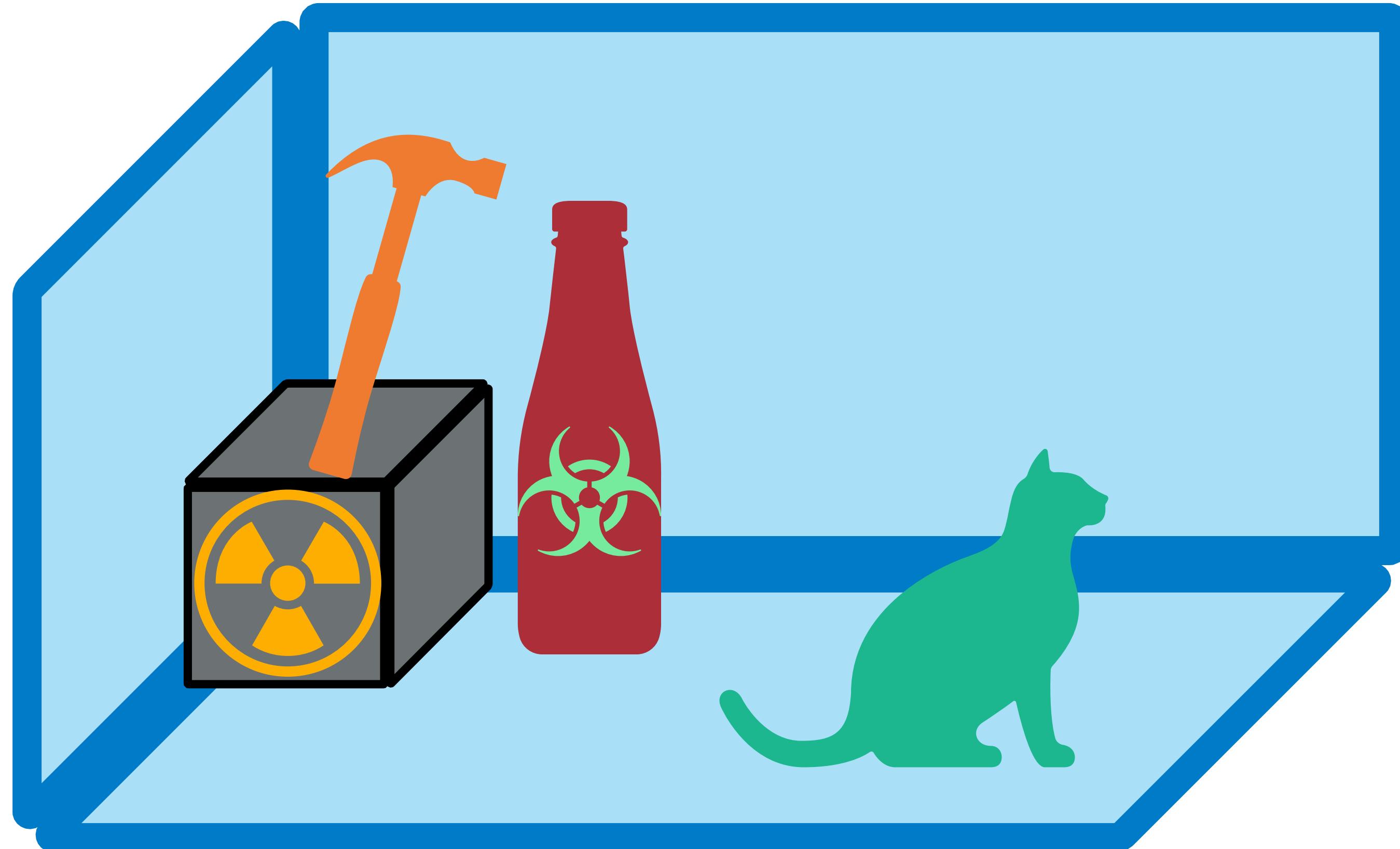
Schrödinger's Katze



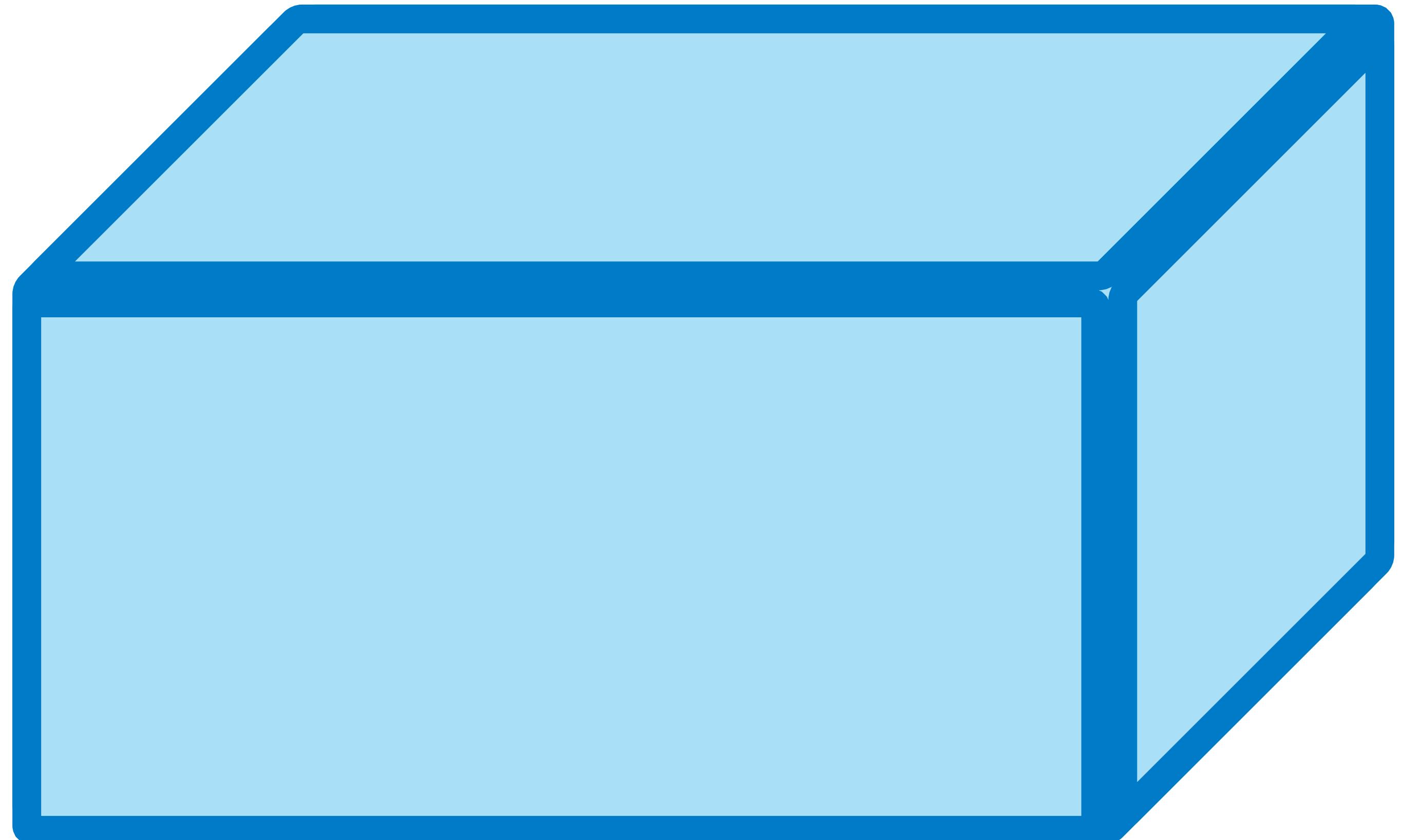
**Sobald das radioaktive
Präparat zerfällt, ist die
Katze sicher tot.**



Schrödinger's Katze

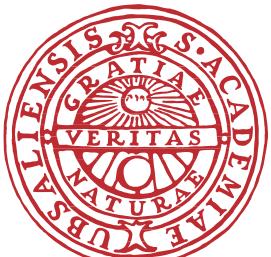


Schrödinger's Katze

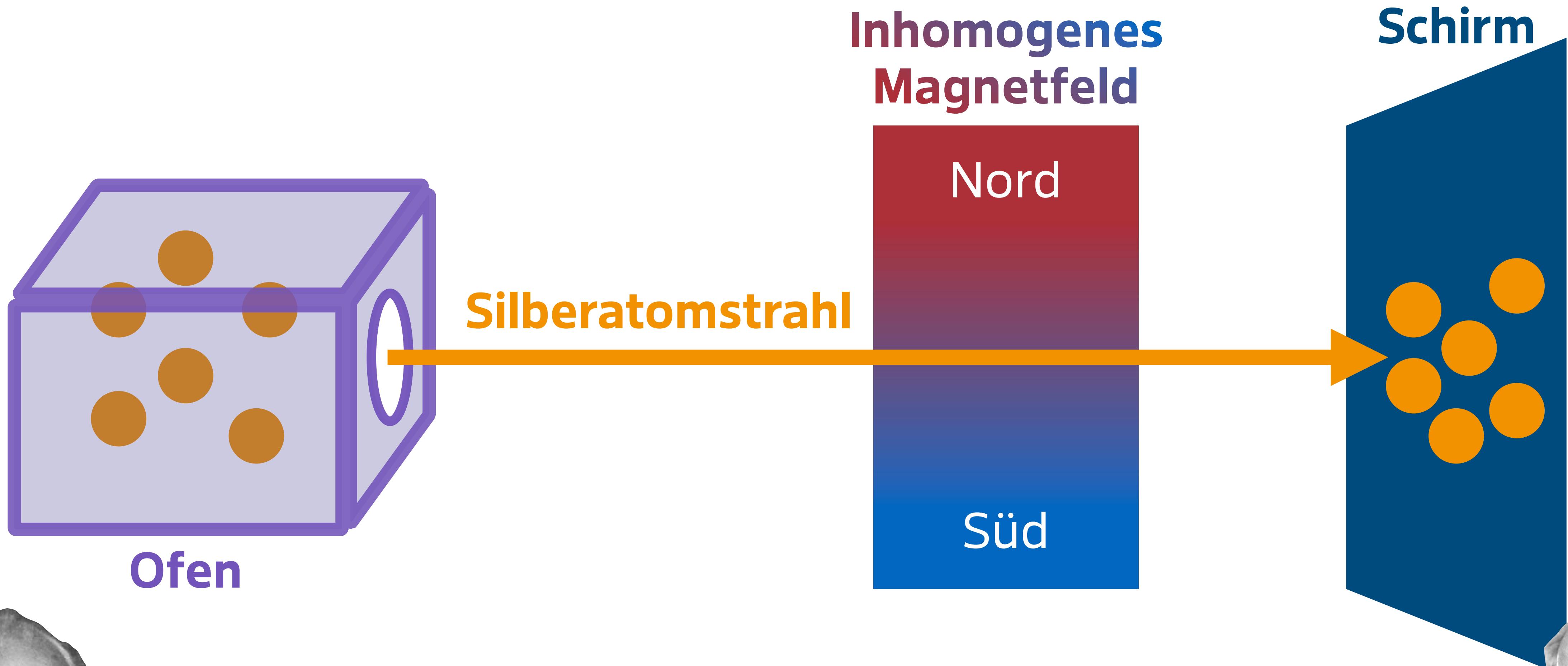


Sobald die Kiste geschlossen ist, ist der Zustand der Katze durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben. Erst bei Öffnung der Kiste entscheidet sich, ob die Katze tot oder lebendig ist — so wie auch ein Elektron unbeobachtet sowohl durch den linken als auch den rechten Spalt geht:

$$| \text{Katze} \rangle = | \text{tot} \rangle + | \text{lebendig} \rangle$$

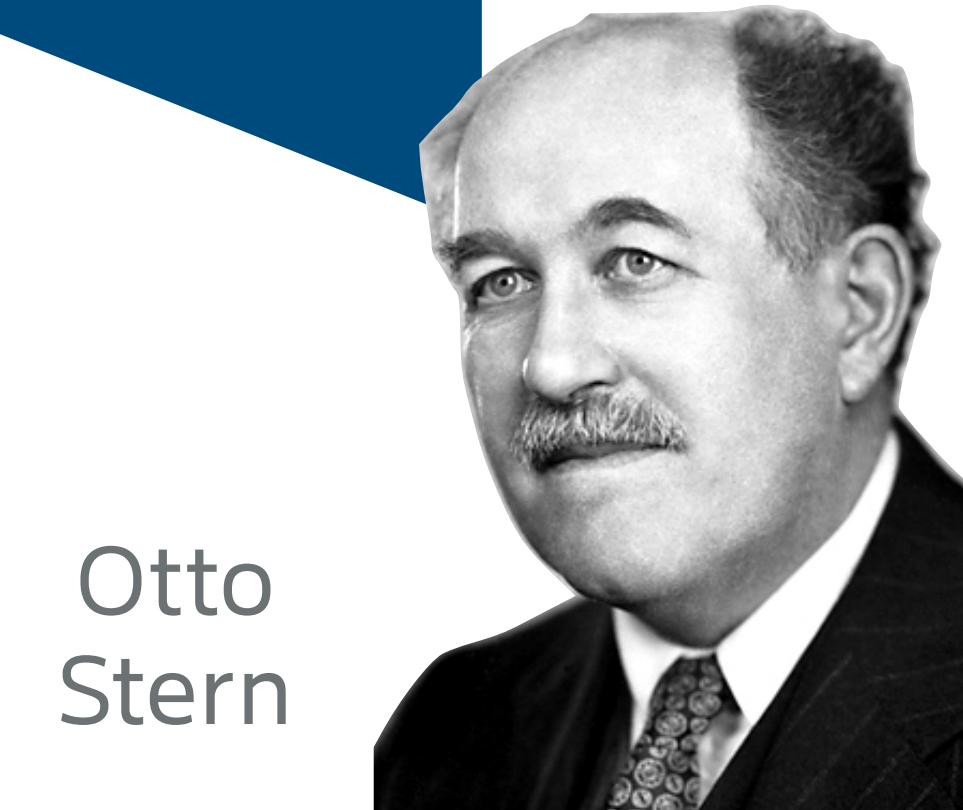


Der Stern-Gerlach-Versuch, 1922: Erwartung



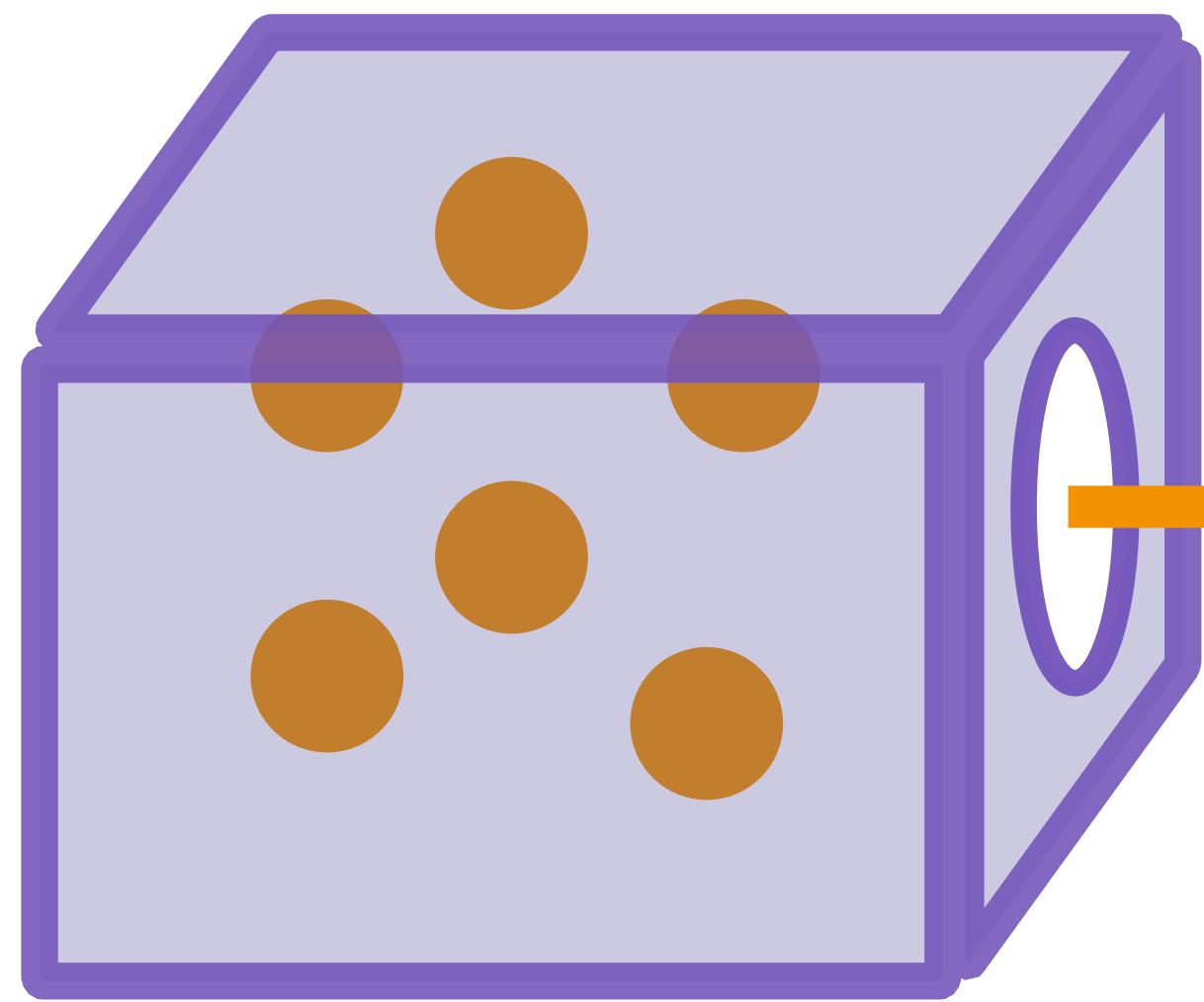
Walther
Gerlach

Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark



Otto
Stern

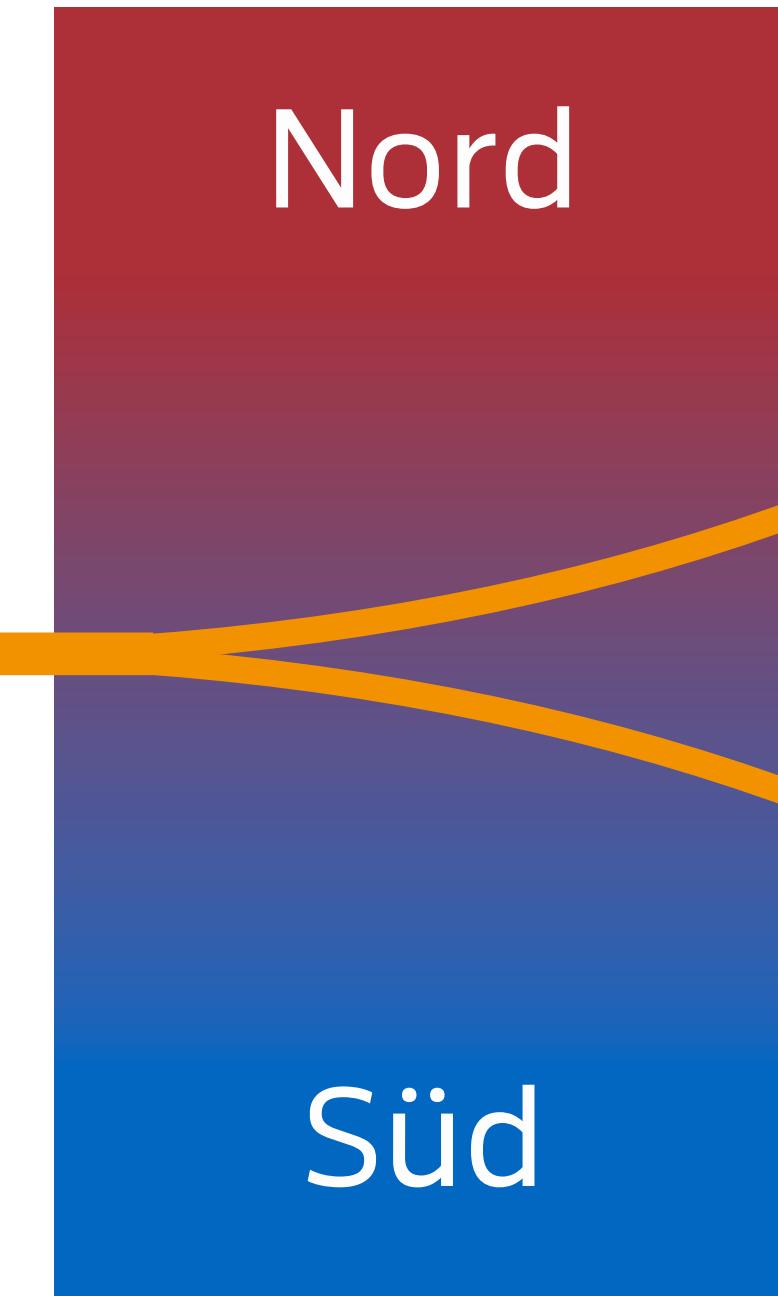
Der Stern-Gerlach-Versuch, 1922: Messung



Ofen

Silberatomstrahl

Inhomogenes
Magnetfeld



Schirm

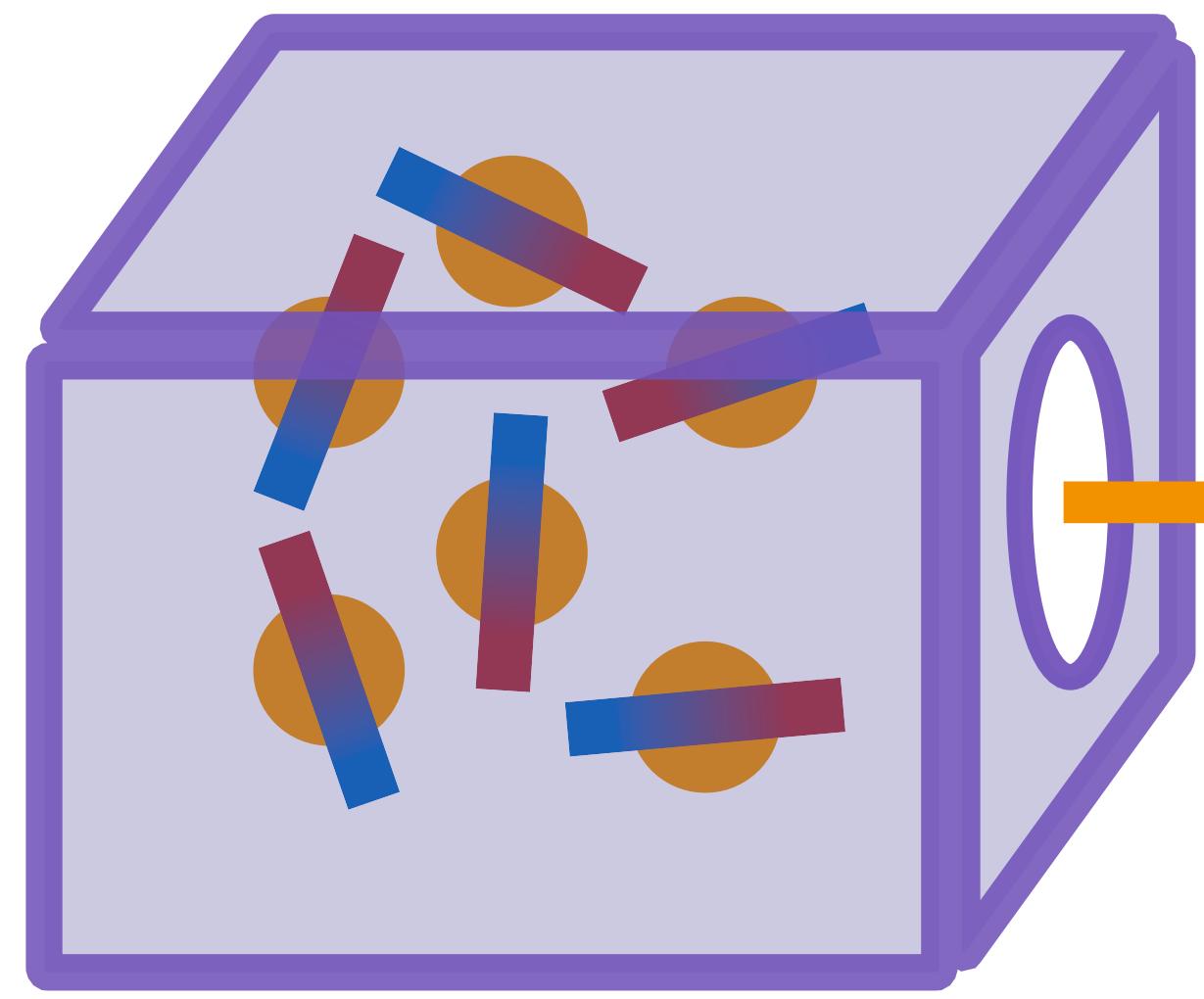


Walther
Gerlach



Otto
Stern

Der Stern-Gerlach-Versuch, 1922: Erklärung



Inhomogenes
Magnetfeld

Nord

Süd

Silberatomstrahl

Ofen

Schirm

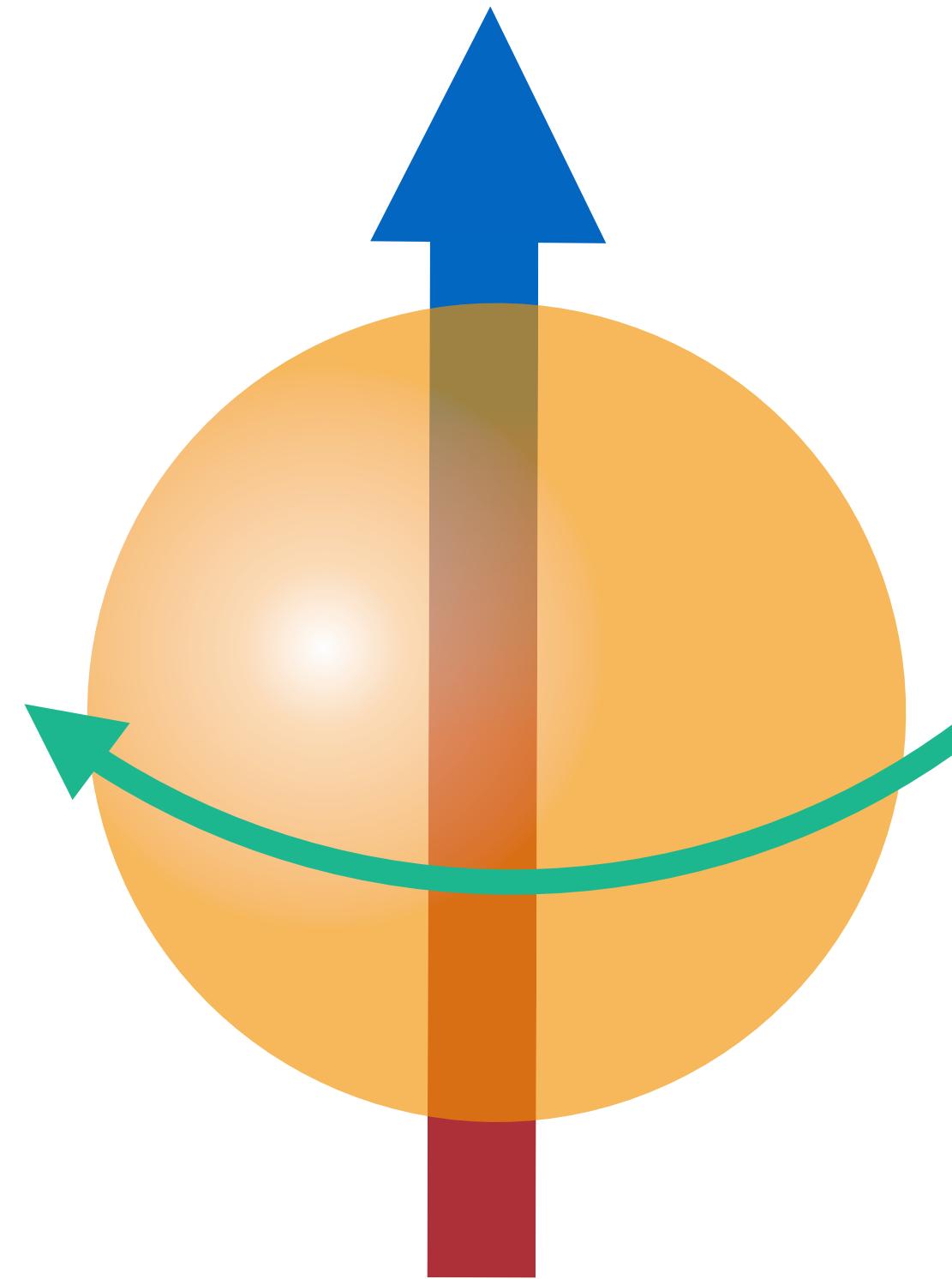
Die Silberatome tragen ein magnetisches Moment, welches nur quantenmechanisch durch die Teilcheneigenschaft „Spin“ erklärt werden kann.

Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark

Walther
Gerlach

Otto
Stern

Was ist ein Spin?



Nach der klassischen Elektrodynamik bewirkt ein Kreisstrom (z.B. eine sich drehende, elektrisch geladene Kugel) ein **magnetisches Dipolmoment**.



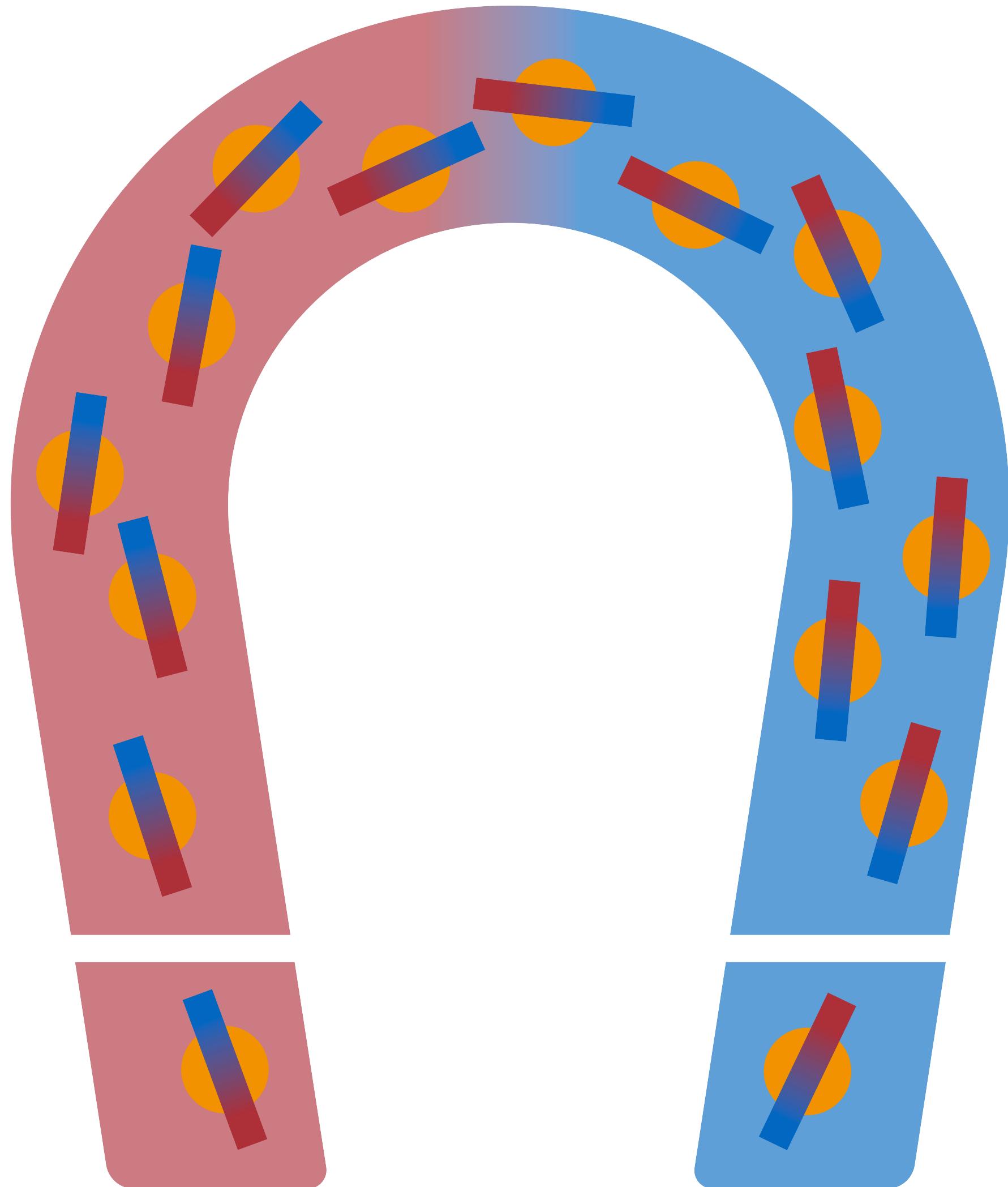
Der **Spin** bewirkt das gleiche, aber **auch für Punktteilchen**. Anders als in der klassischen Mechanik kann der Spin aber **nur diskrete Werte** annehmen: daher die zwei diskreten Auftreffpunkte der Silberatome:

$$\begin{array}{c} \text{blue} \\ \text{orange} \end{array} \quad \text{oder} \quad \begin{array}{c} \text{orange} \\ \text{blue} \end{array} \quad \Leftrightarrow \quad |\text{Spin}\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$

Spin und Magnetismus

Ferromagnetismus (wie bei Eisen, Kobalt, Nickel) entsteht durch die Ausrichtung der Spins vieler Elektronen in einem Material.

Magnetismus ist also ein **quantenmechanisches Phänomen**.

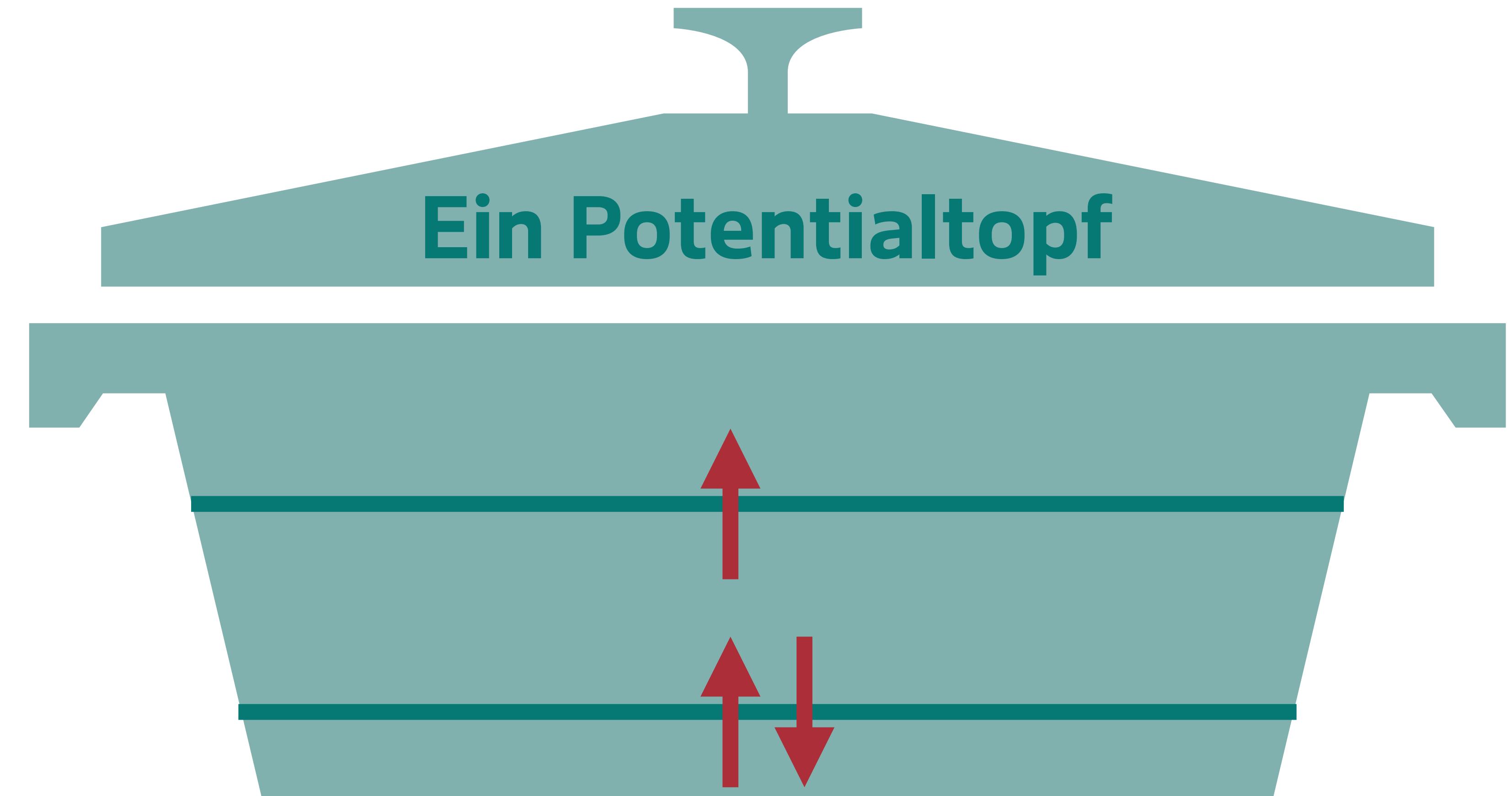


Pauli-Ausschlussprinzip

Zwei Elektronen
dürfen nie im gleichen
Zustand — also zur
gleichen Zeit am
gleichen Ort — sein!



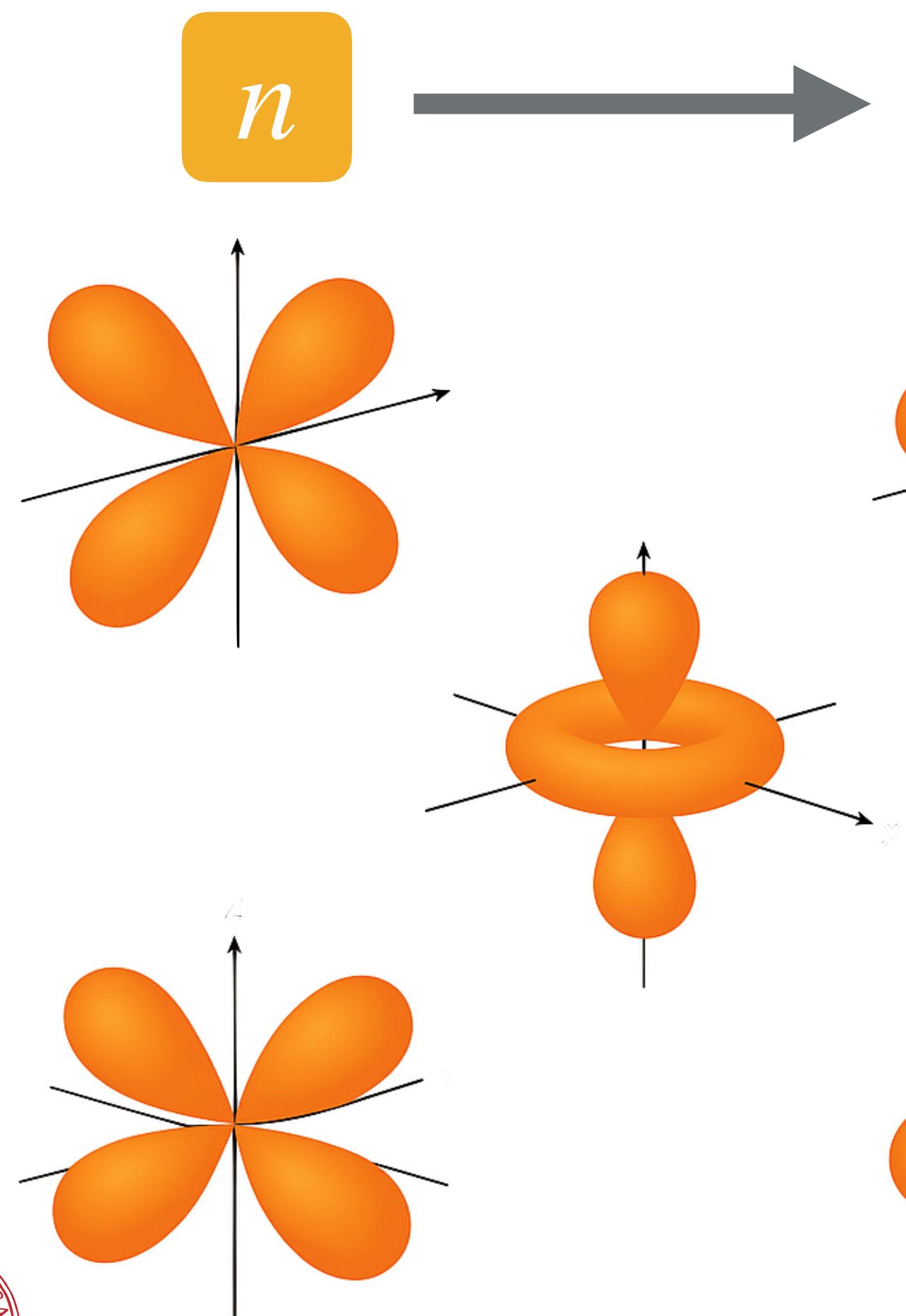
Wolfgang
Pauli



⇒ Je ein Spin-up und ein Spin-down Elektron
können eine „Schale“ im Atom füllen.

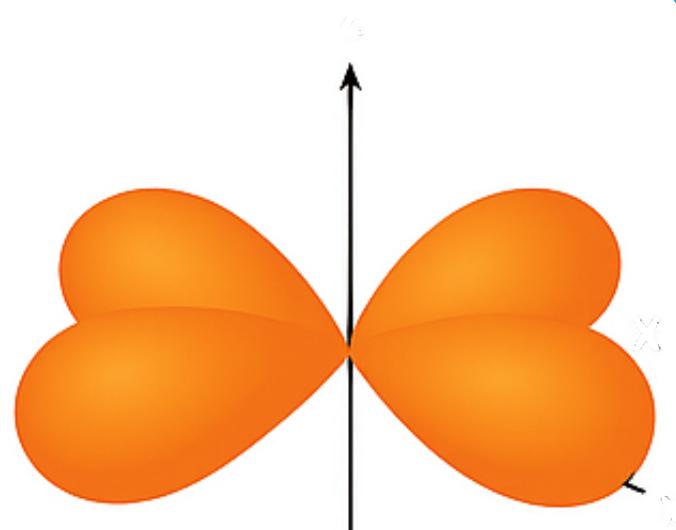
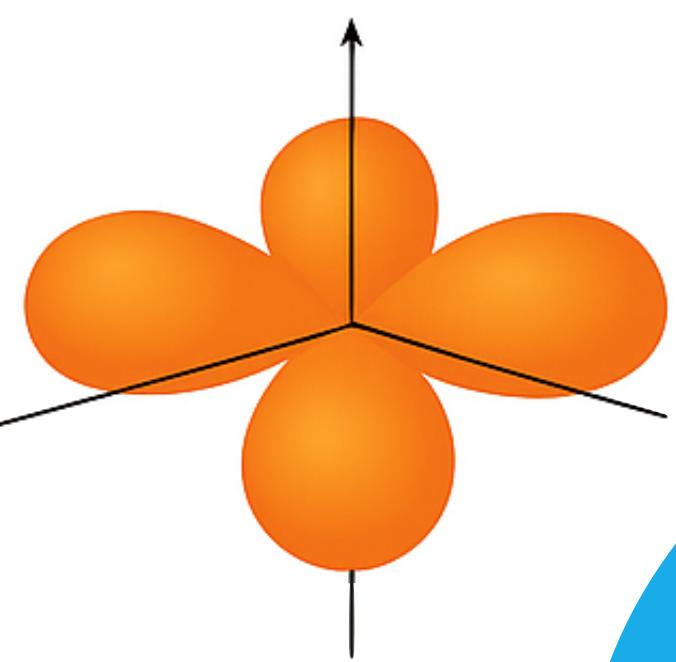
Sommerfeld-Erweiterung (1916) und Orbitalmodell heute

Bohr



Sommerfeld

n, ℓ, m

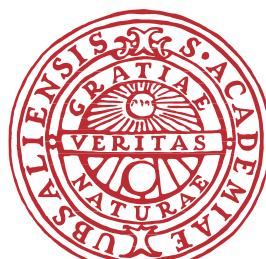


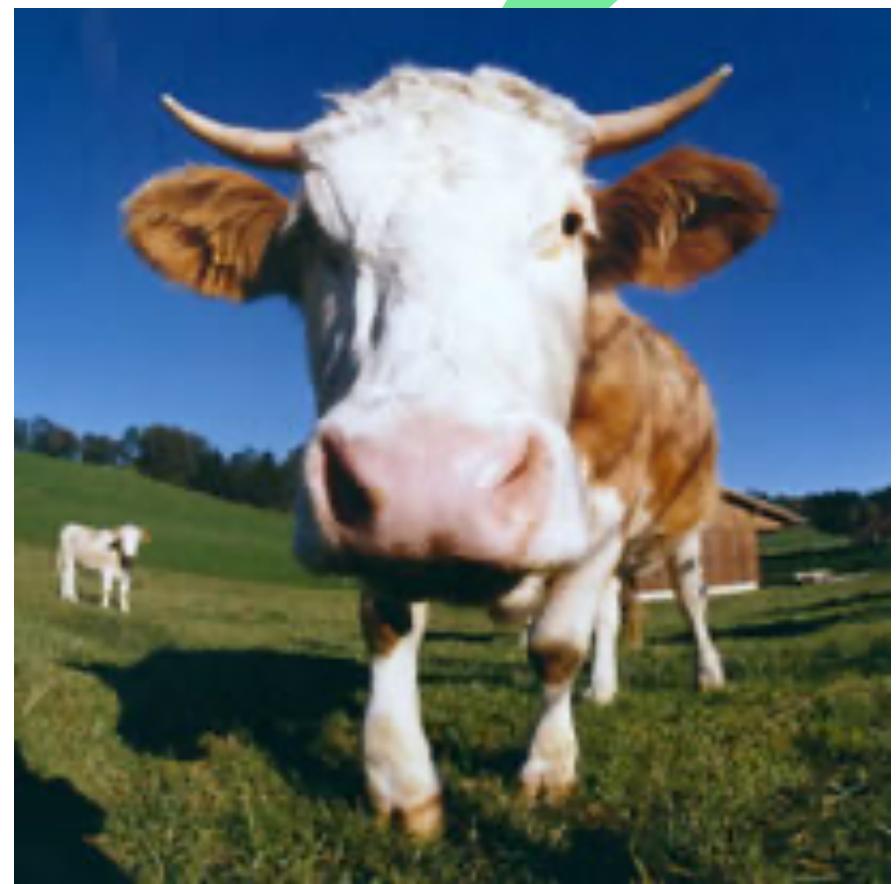
Orbitalmodell

n, ℓ, m, s

„Die Quantentheorie
ist das geheimnisvolle
Organon, auf dem die Natur die
Spektralmusik spielt und nach
dessen Rhythmus sie den Bau der
Atome und der Kerne regelt.“

Arnold
Sommerfeld

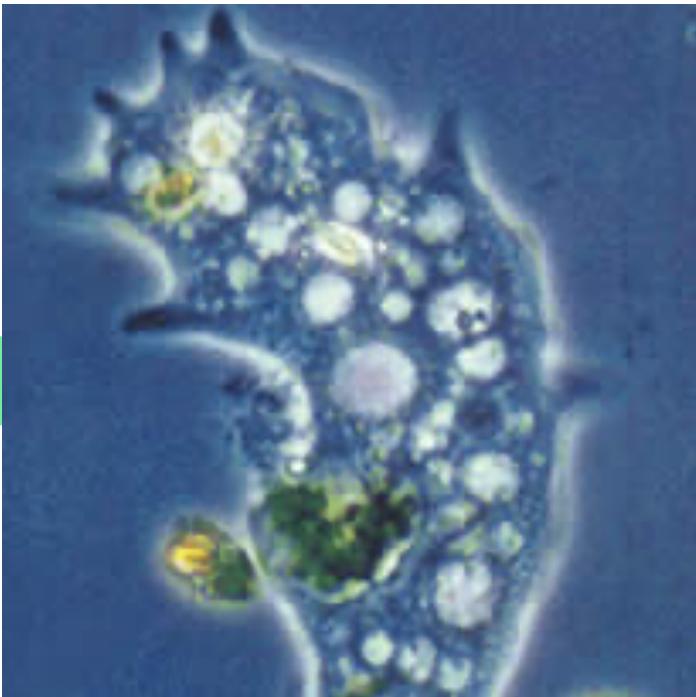




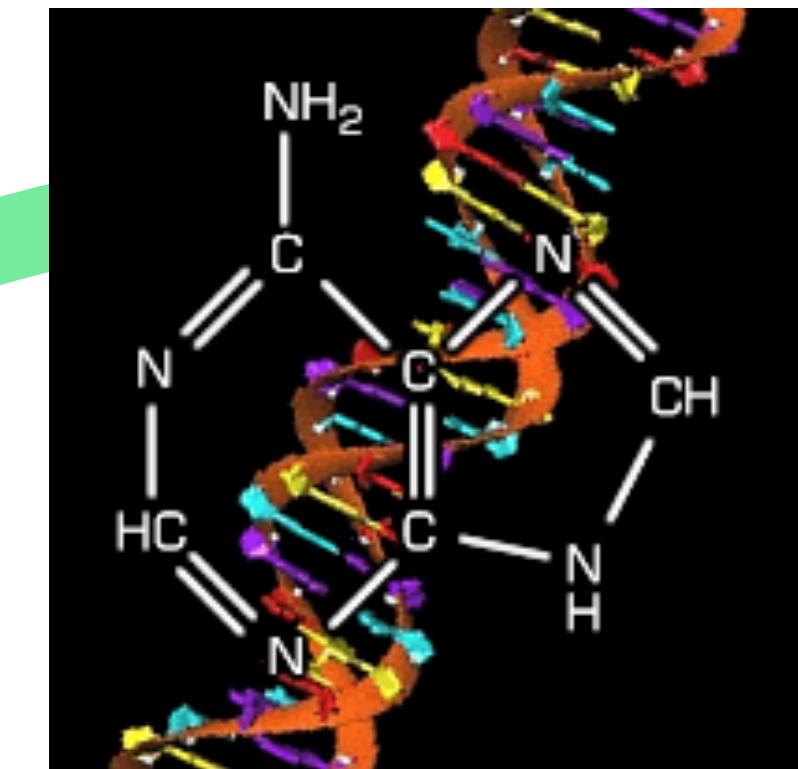
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



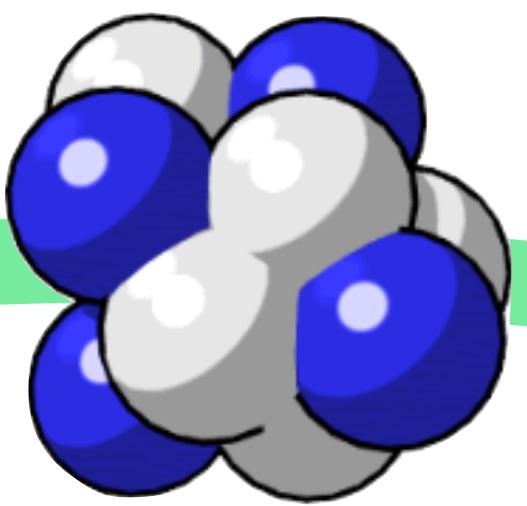
**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



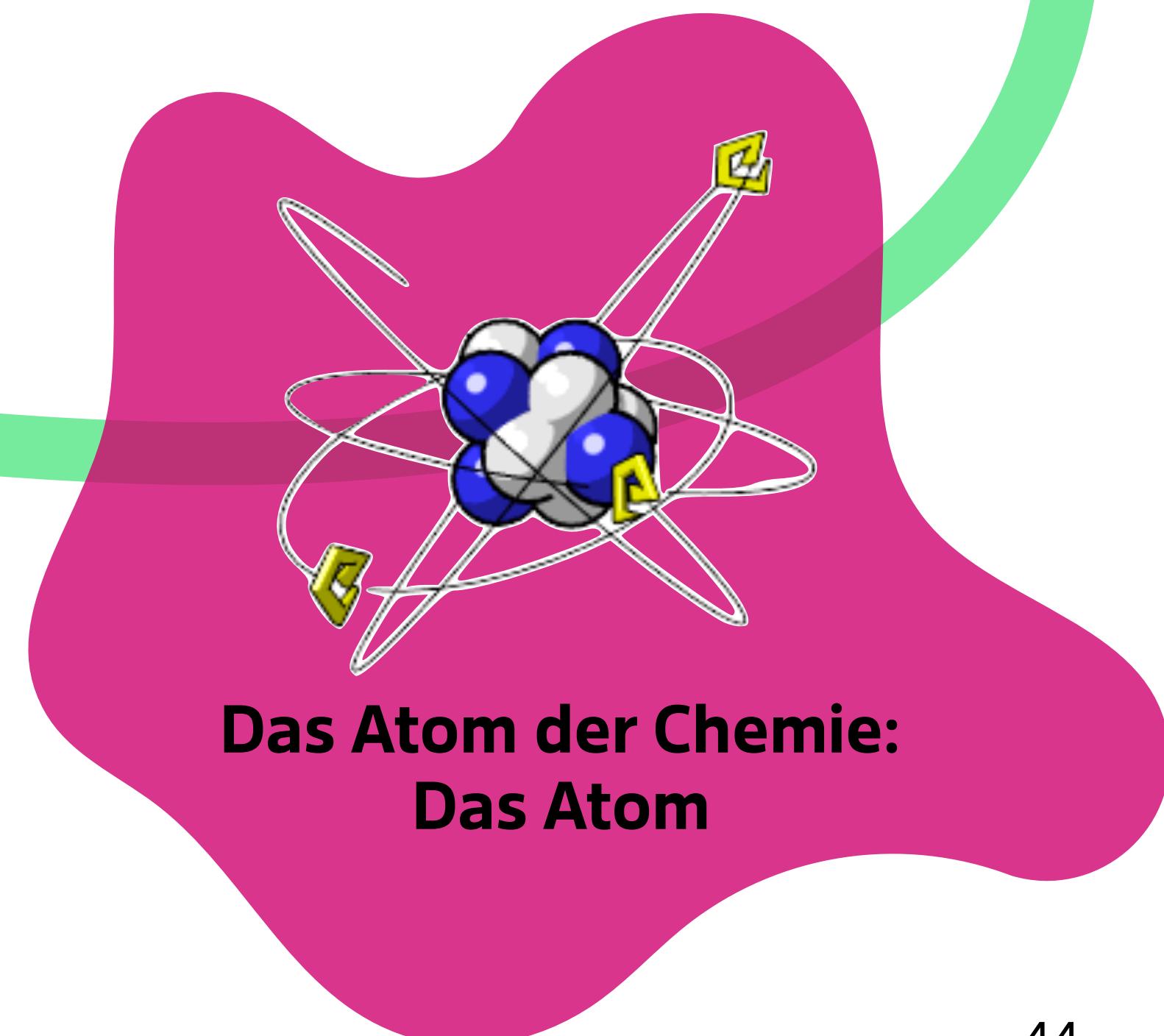
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



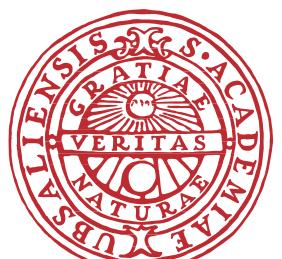
**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**



**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

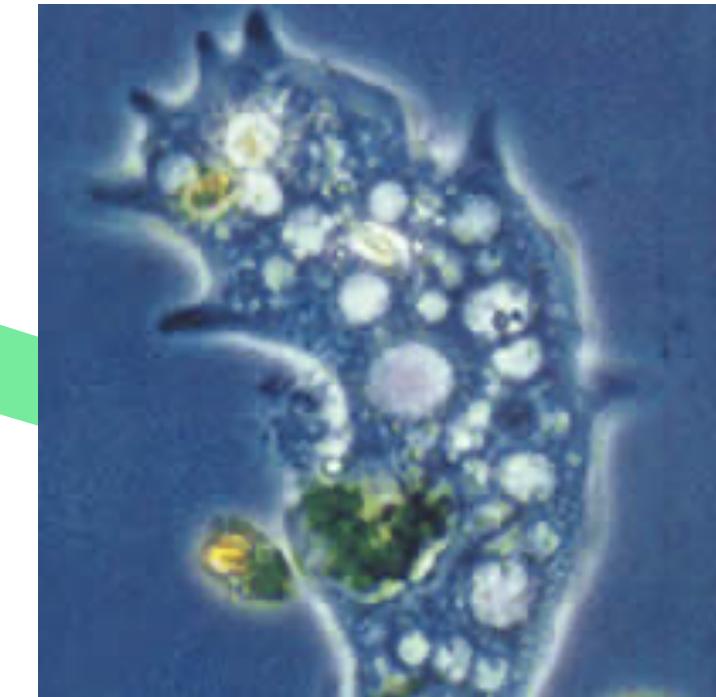
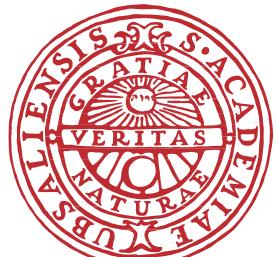




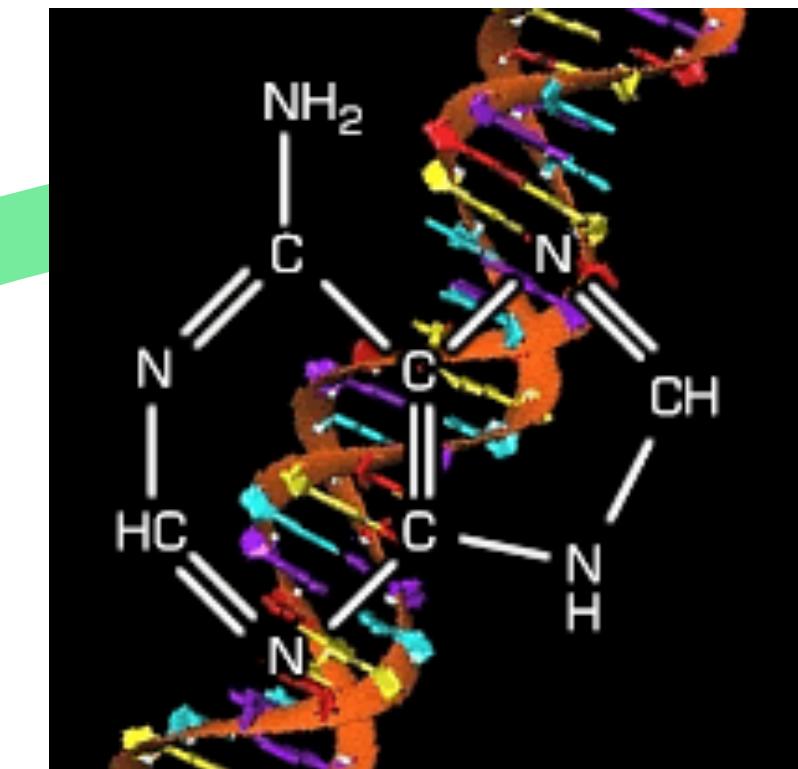
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



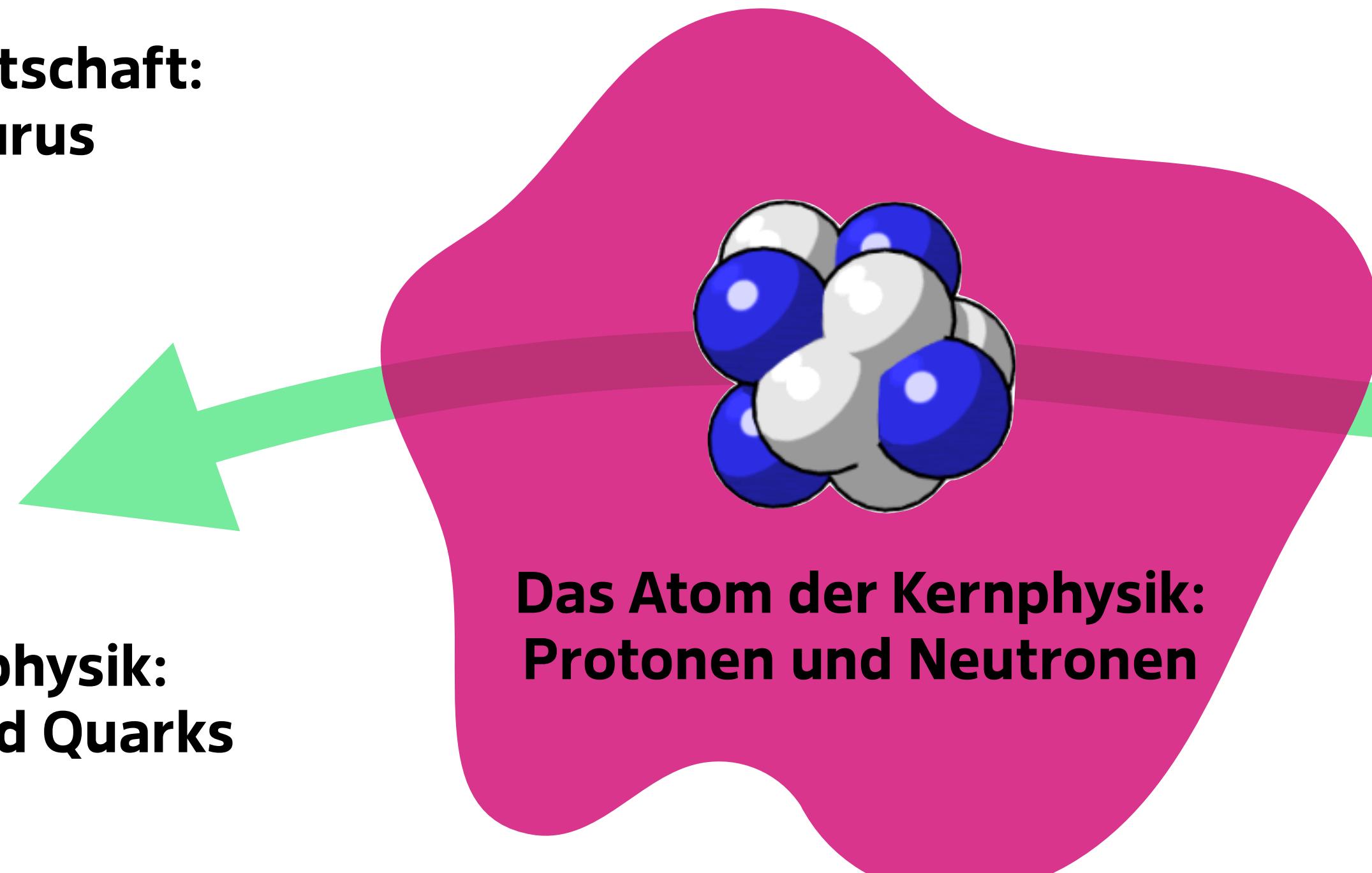
**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



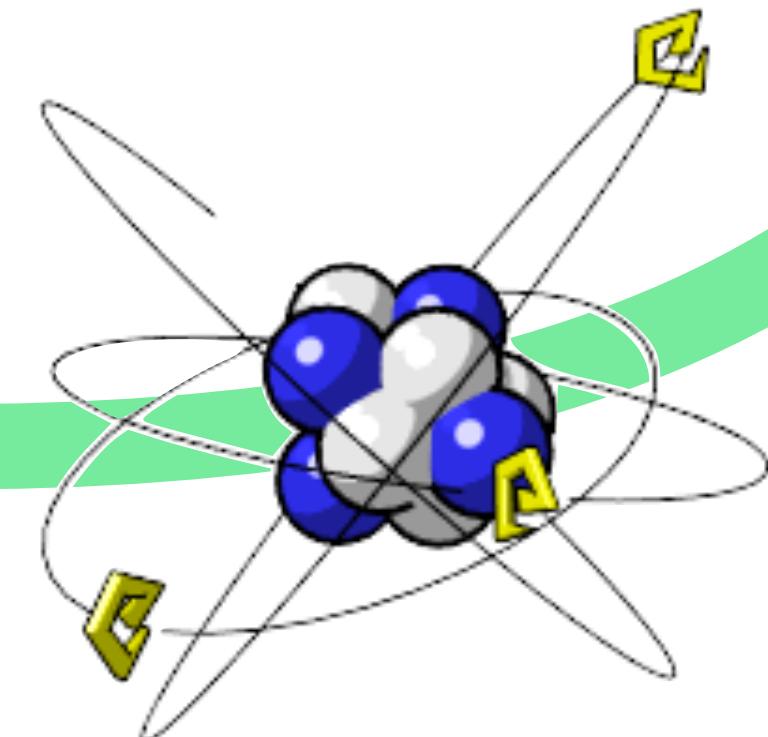
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**

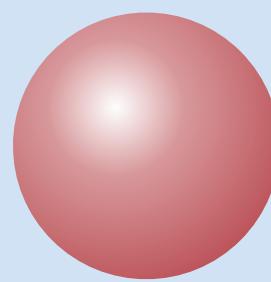


**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark

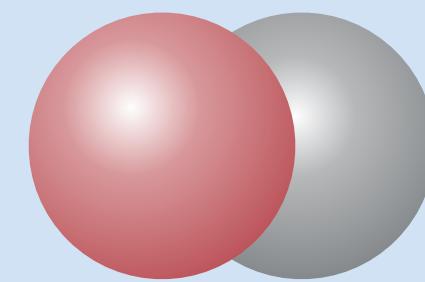
Der Aufbau der Atomkerne

^1_1H



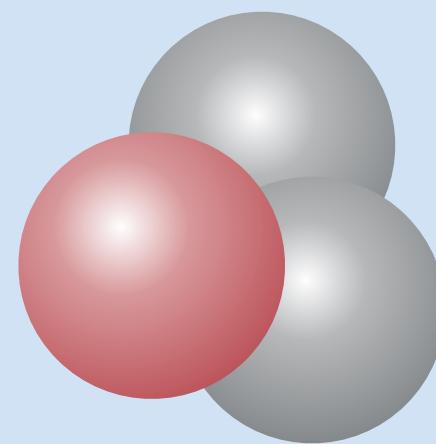
Wasserstoff-Kern

^2_1H



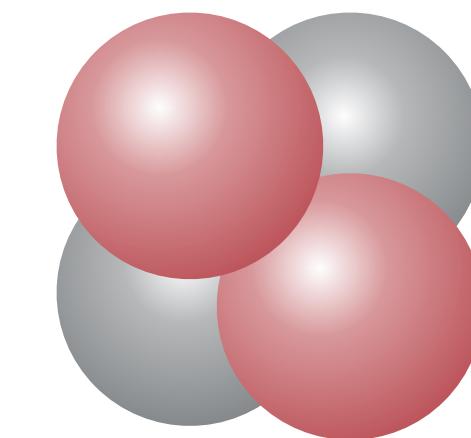
Deuterium-Kern

^3_1H



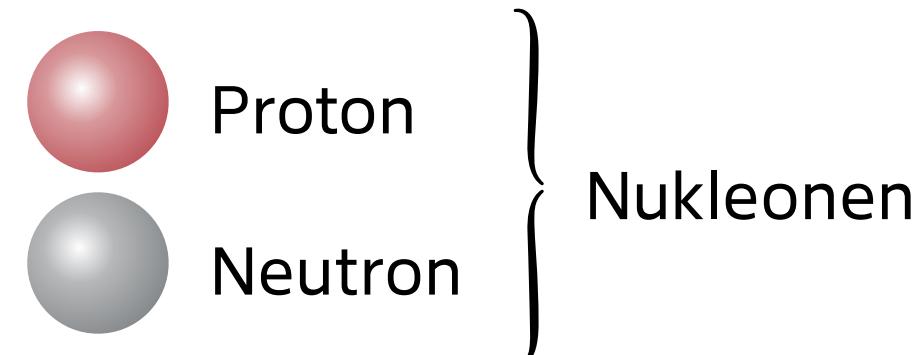
Tritium-Kern

^4_2He



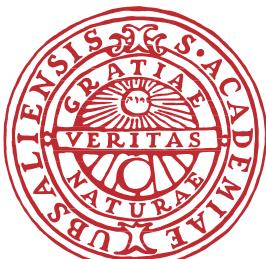
Helium-Kern

Isotope des Wasserstoffs

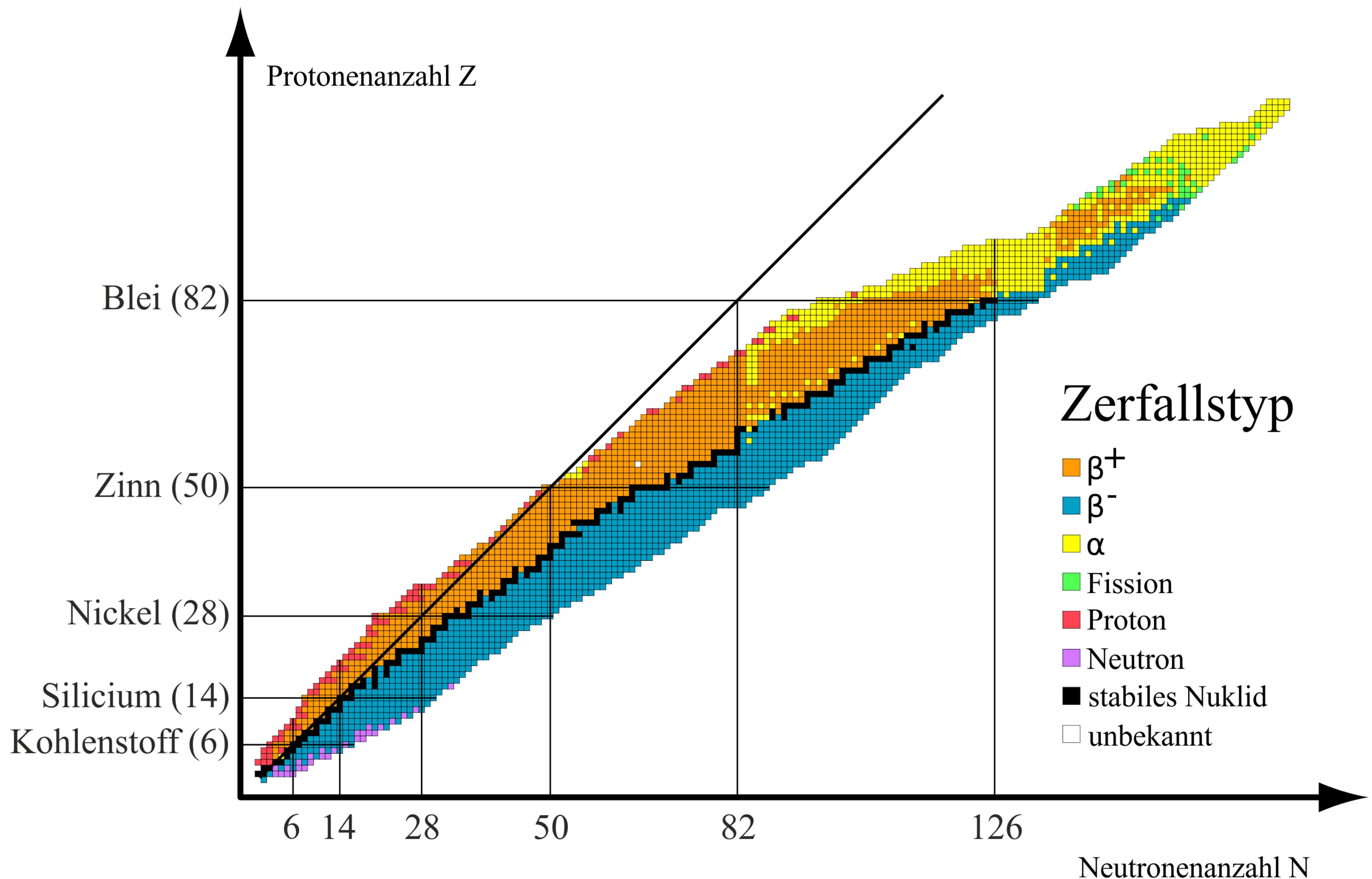


^A_ZX = Massenzahl Ordnungszahl Elementsymbol

Für kleine Kerne gilt $A \approx Z + N$,
wobei N die Anzahl von Neutronen
und Z die Anzahl von Protonen ist.



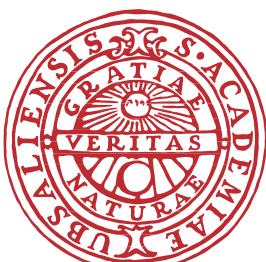
Nuklidkarte



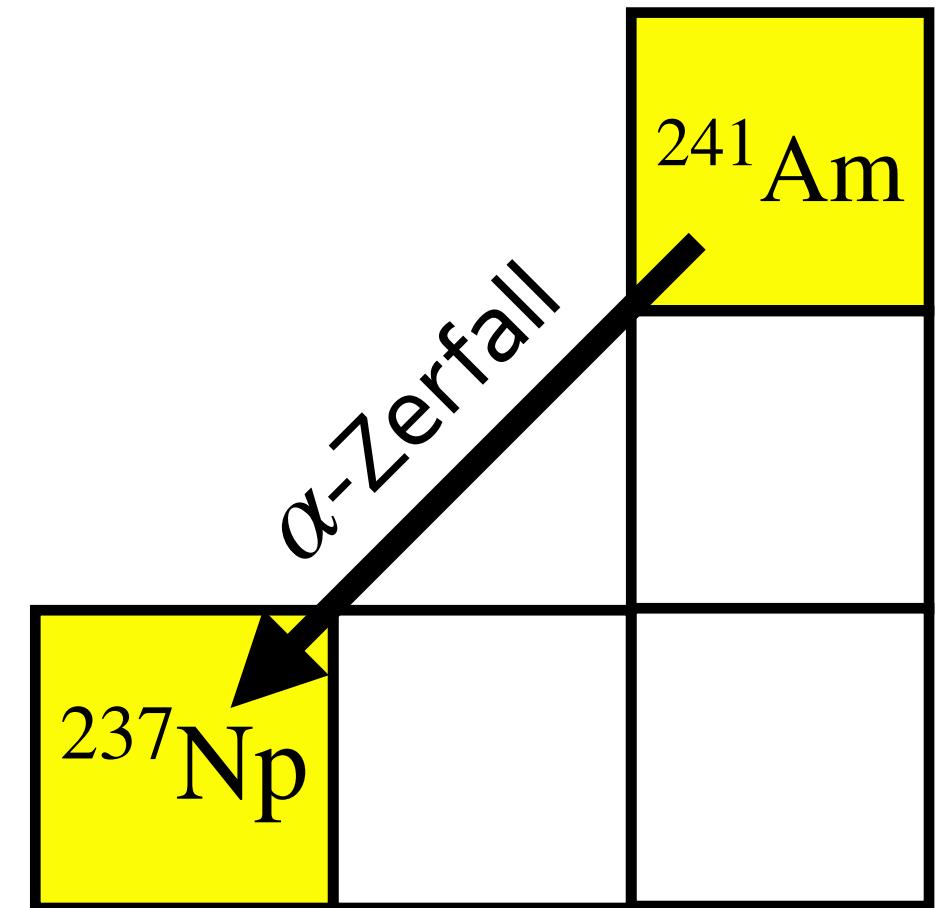
Element: Stoff, der chemisch nicht weiter zerlegt werden kann. Jedes Z hat ein Element-Symbol.

Nuklid: Eine Sorte Atome, charakterisiert durch N und Z

Isotope: Varianten eines Elements „am gleichen Ort Z “. Ähnliche chemische Eigenschaften.



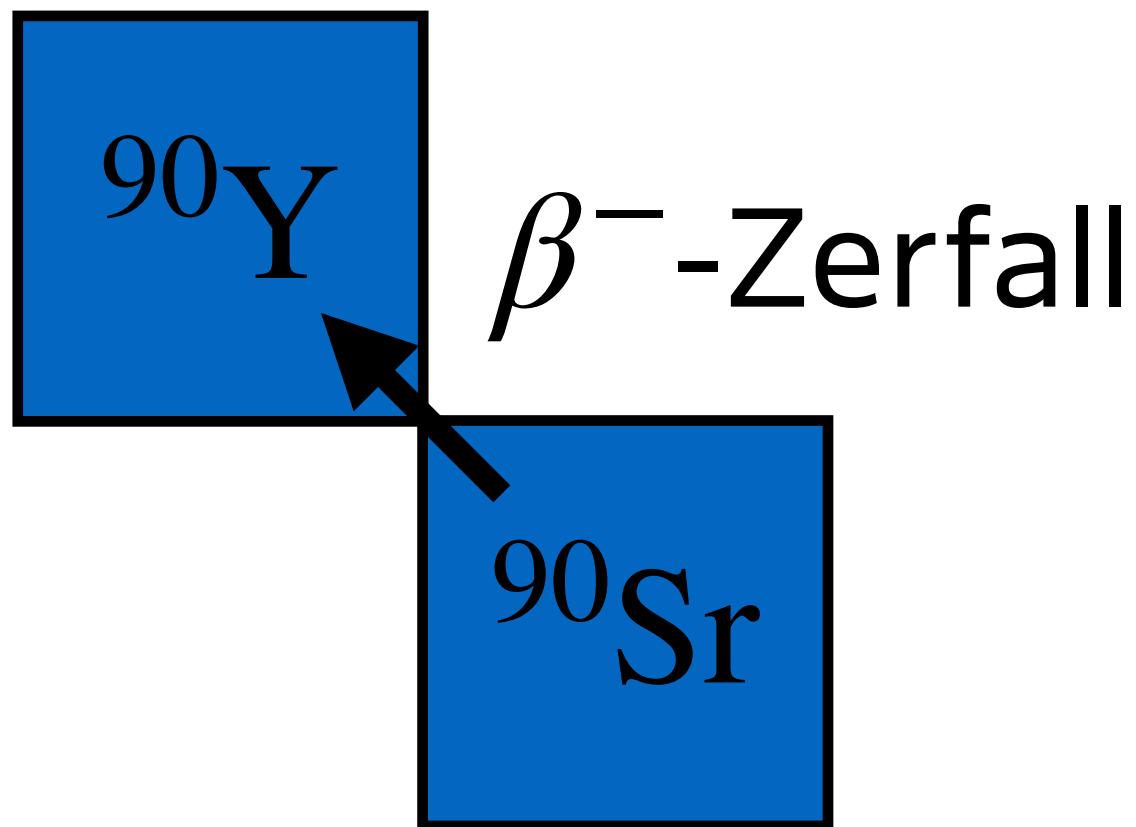
Kernzerfälle



Beim α -Zerfall:

- Sinkt Z um 2
- Sinkt N um 2
- Sinkt A um 4

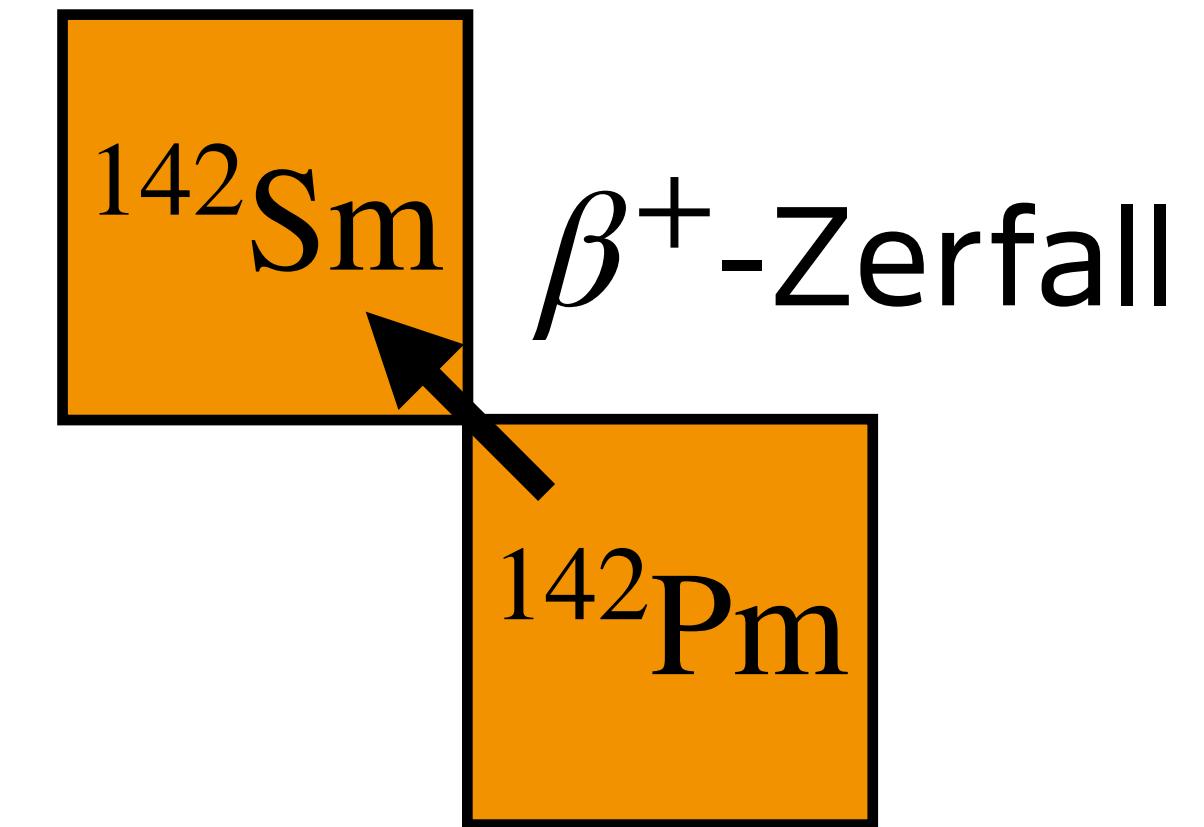
Durch Emission eines
 $^{4}_{2}\text{He}$ -Kerns



Beim β^{-} -Zerfall:

- Sinkt Z um 1
- Steigt N um 1
- Bleibt A gleich

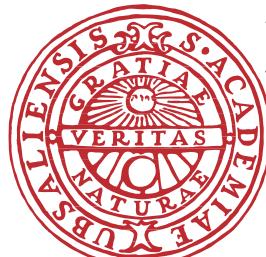
$$p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$$

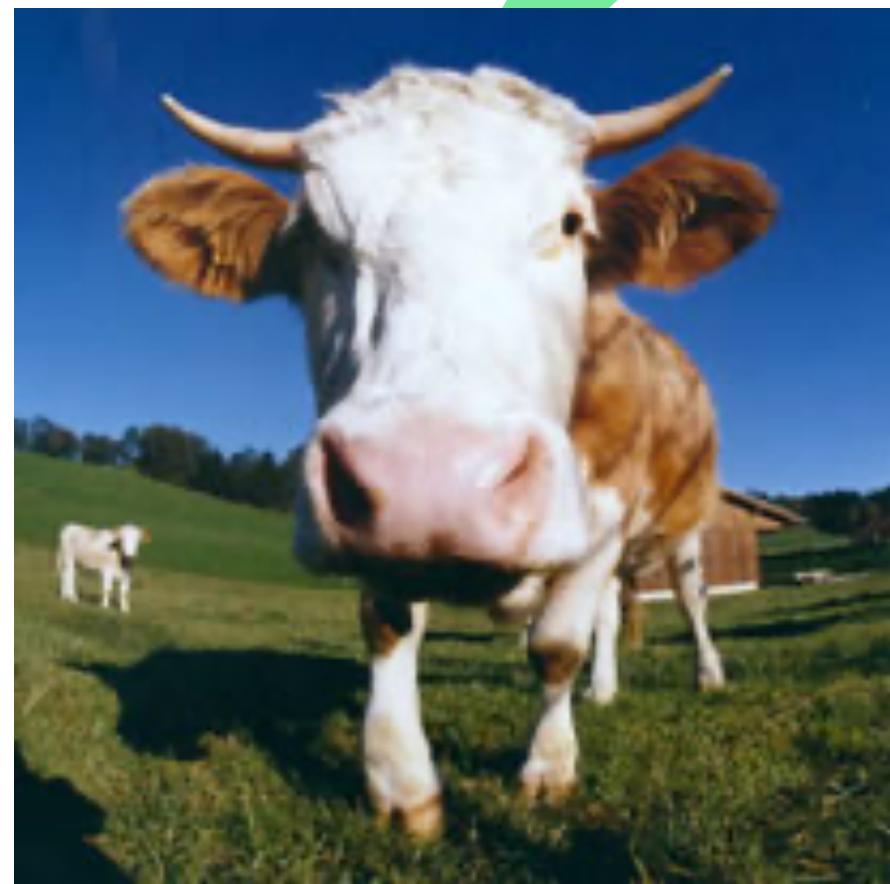


Beim β^{+} -Zerfall:

- Steigt Z um 1
- Sinkt N um 1
- Bleibt A gleich

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

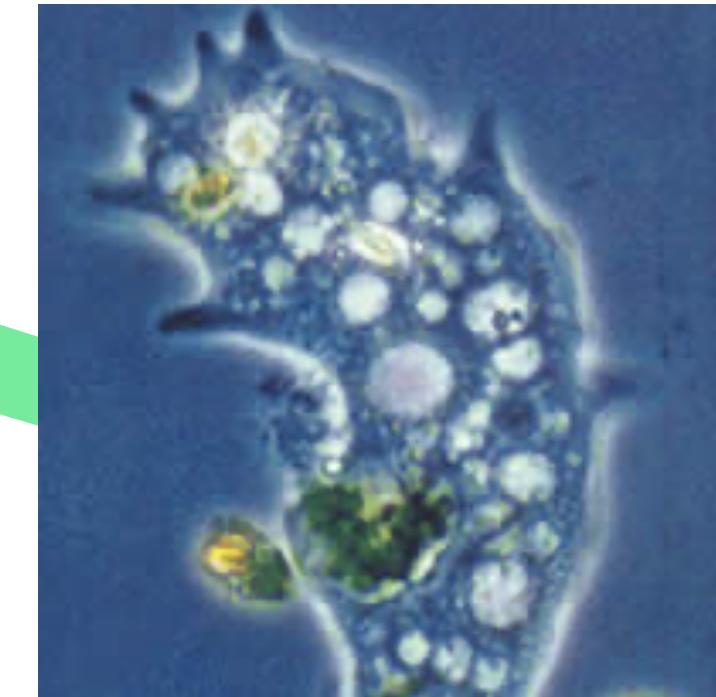




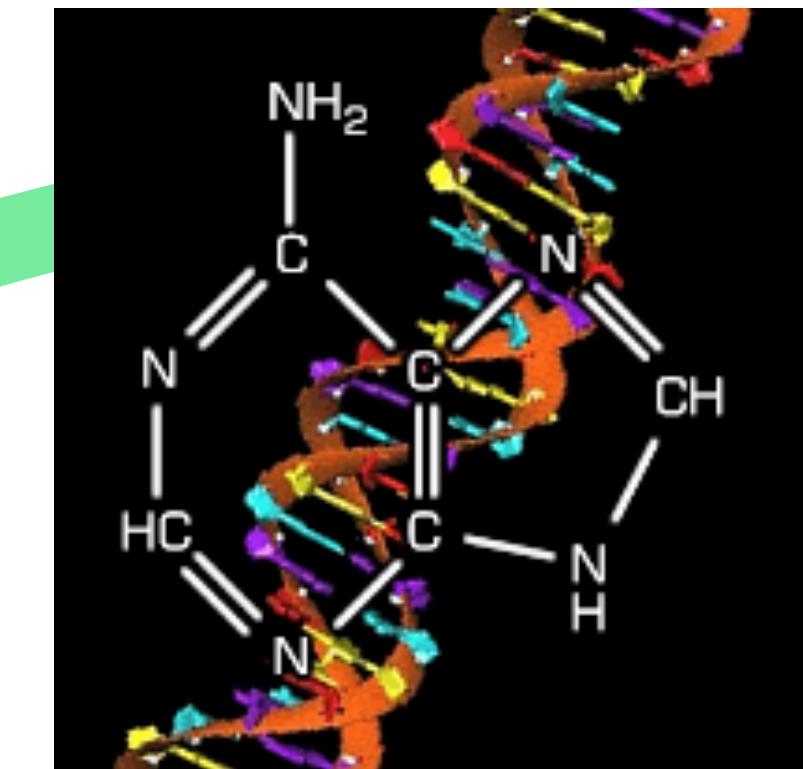
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



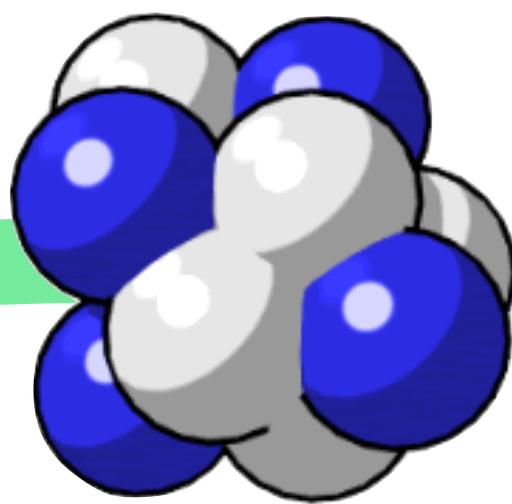
**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



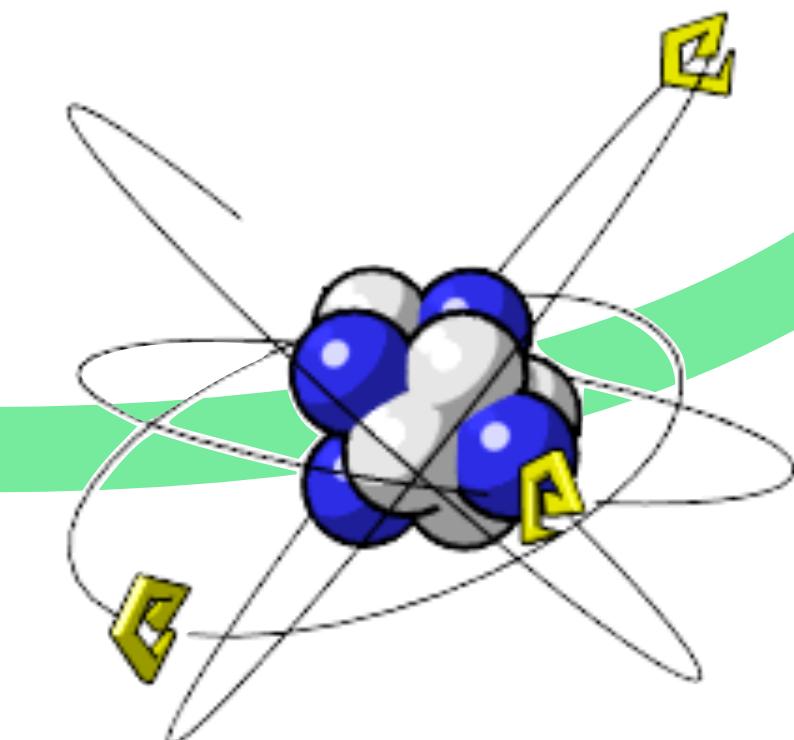
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**



**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

Vorhersage der Antimaterie (Dirac, 1930) & Nachweis (Anderson, 1932)

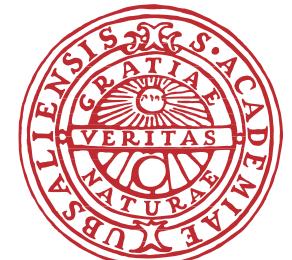


“It seems clear that the present quantum mechanics is not in its final form.”

Paul Dirac

Die Schrödinger-Gleichung beschreibt keine Teilchen mit Spin... 😕

$$\hat{H}|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt}|\psi(t)\rangle$$

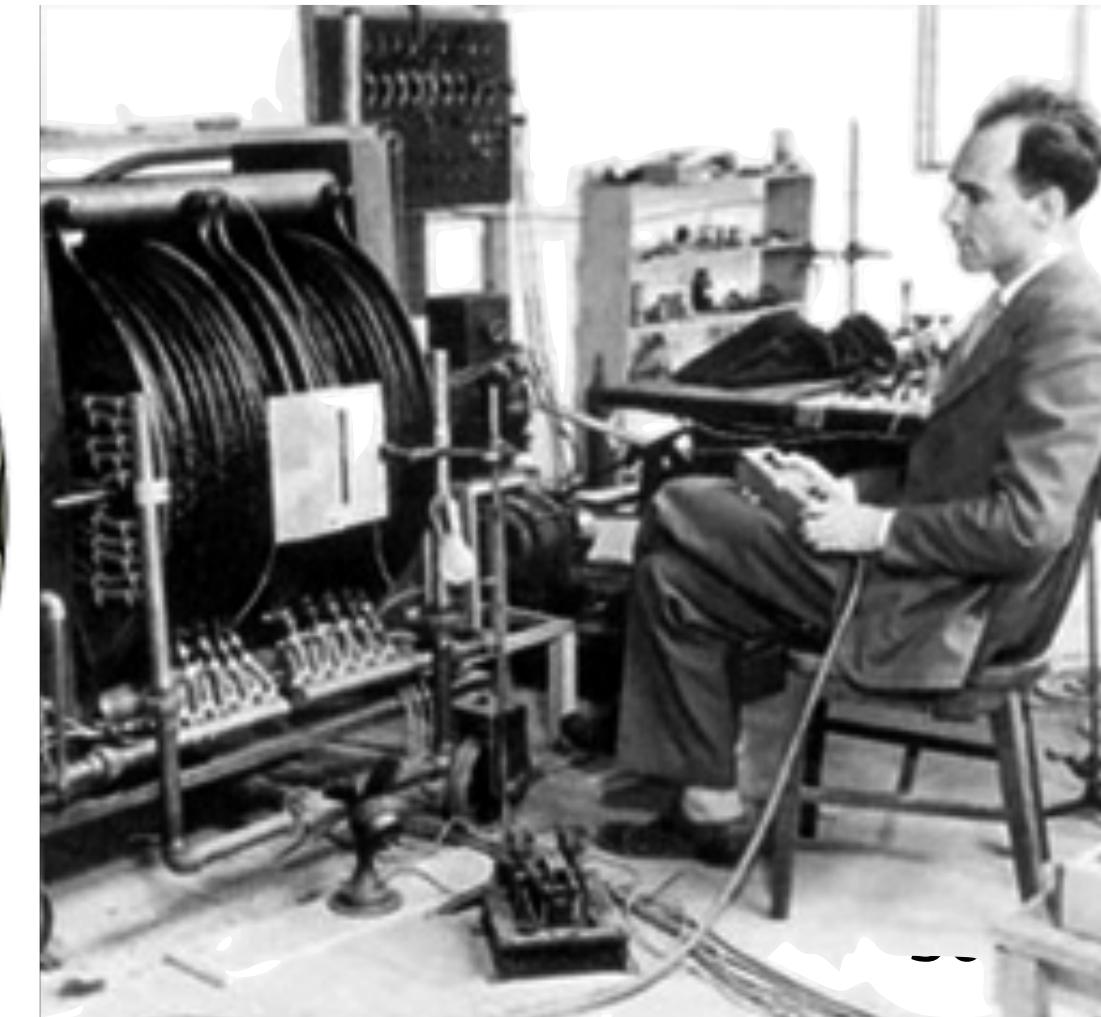
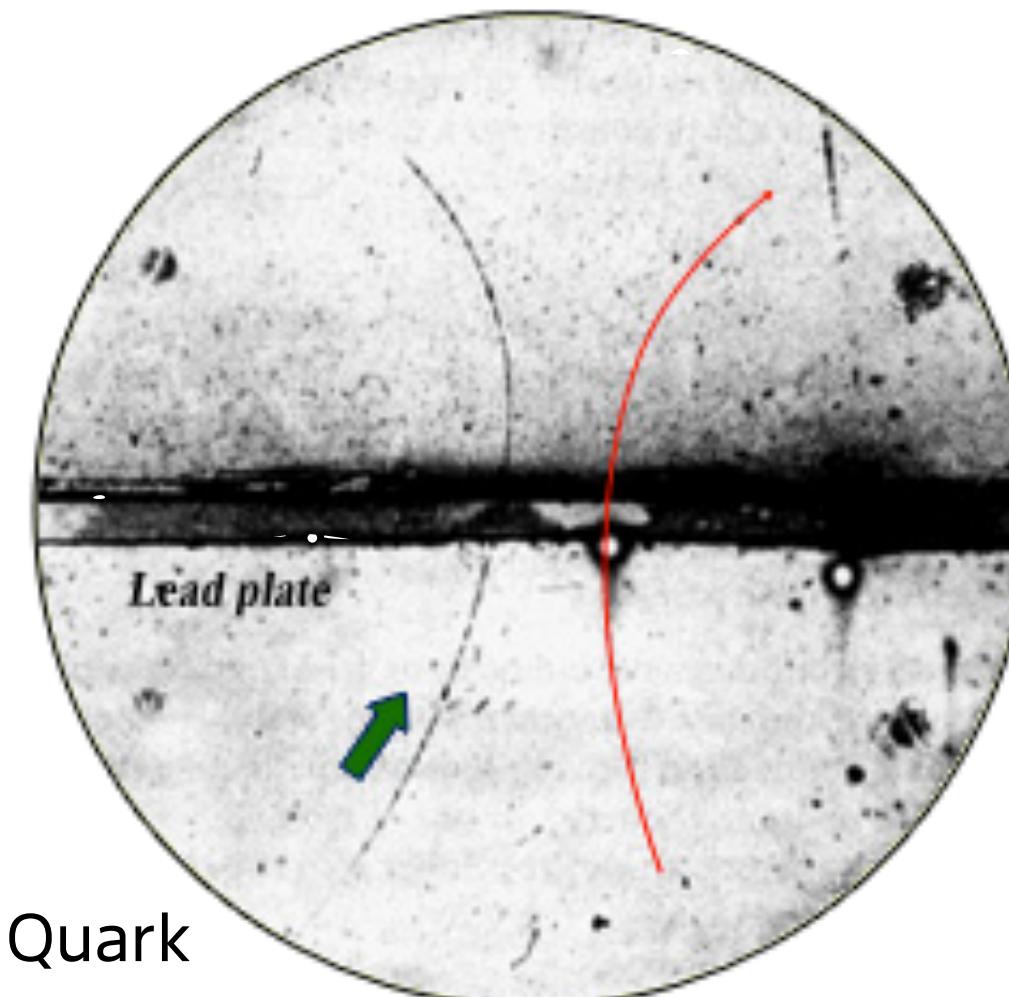


Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark

$$(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0$$

Die Dirac-Gleichung schon!
Und sie sagt die Existenz von Antimaterie voraus.

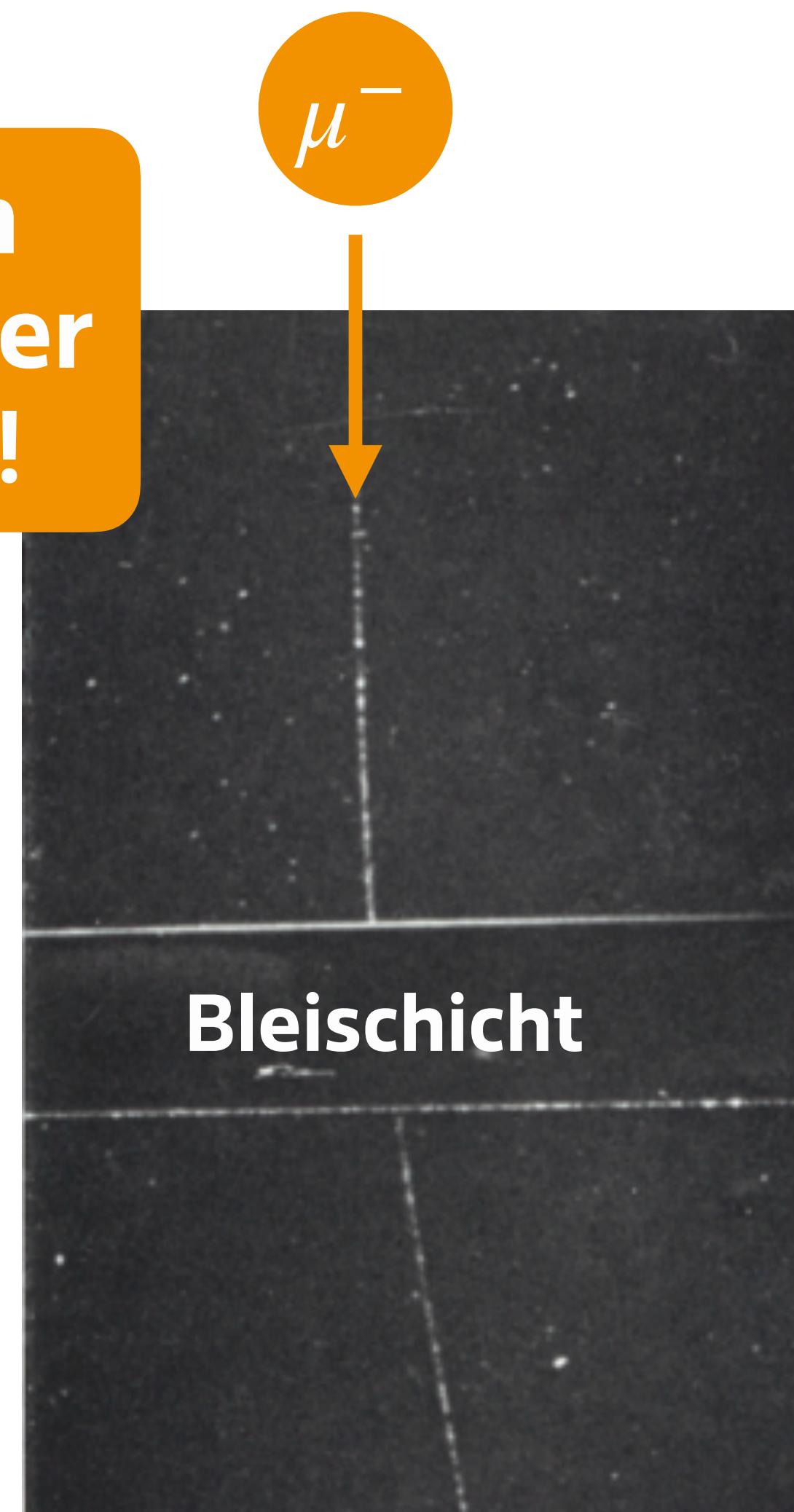
Carl David Anderson



Entdeckung des Myons, Anderson (1936)



Gleiches Verhalten
wie ein Elektron, aber
200-mal schwerer!



Carl D.
Anderson

Entdeckung des Myons, Anderson (1936)



Carl D.
Anderson



Gleiches Verhalten
wie ein Elektron, aber
200-mal schwerer!



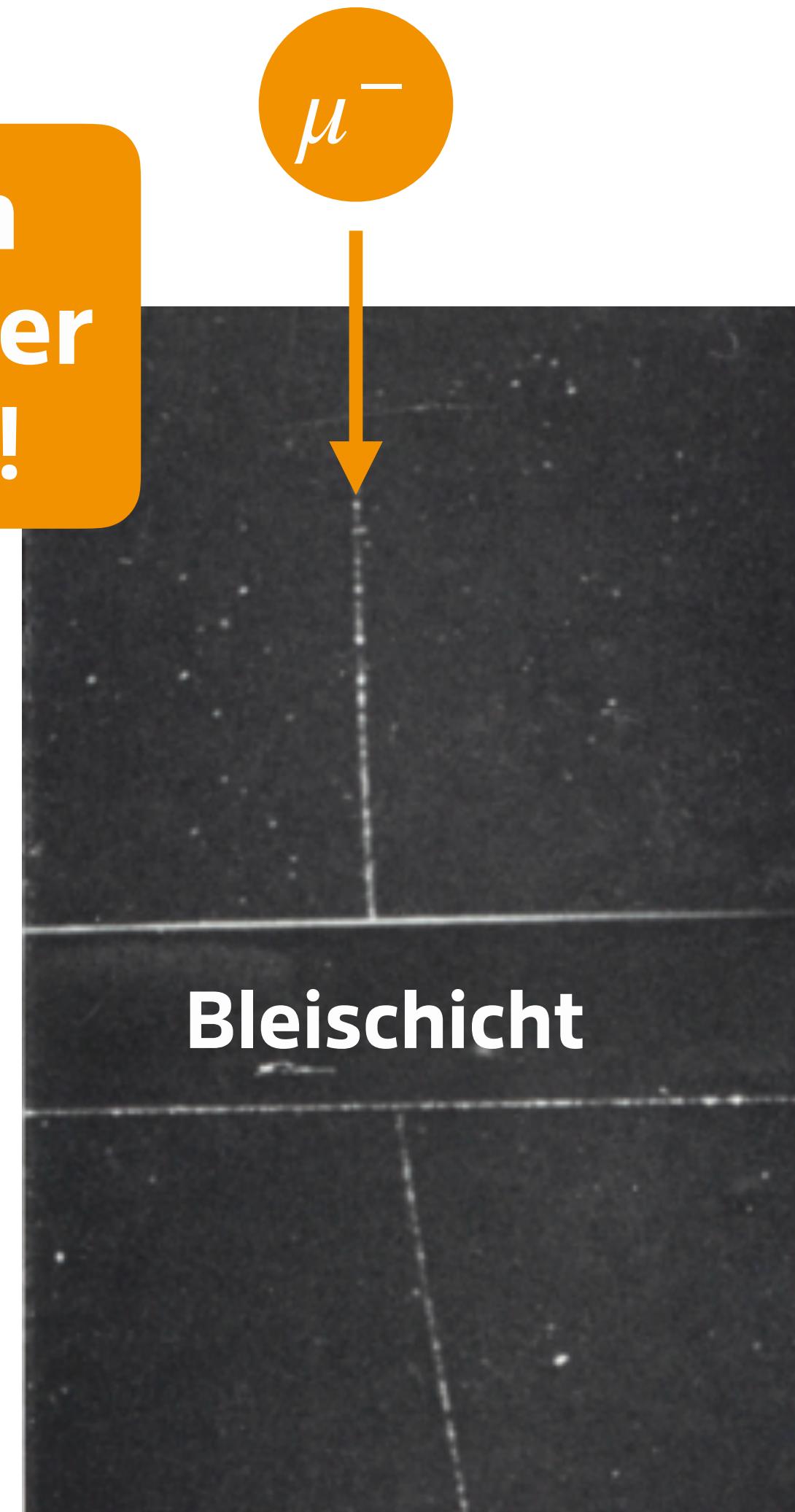
Isidor I.
Rabi

„Wer hat das
bestellt?!“

Entdeckung des Myons, Anderson (1936)



Carl D.
Anderson



Gleiches Verhalten
wie ein Elektron, aber
200-mal schwerer!



Isidor I.
Rabi

„Wer hat das
bestellt?!“

Willis E.
Lamb



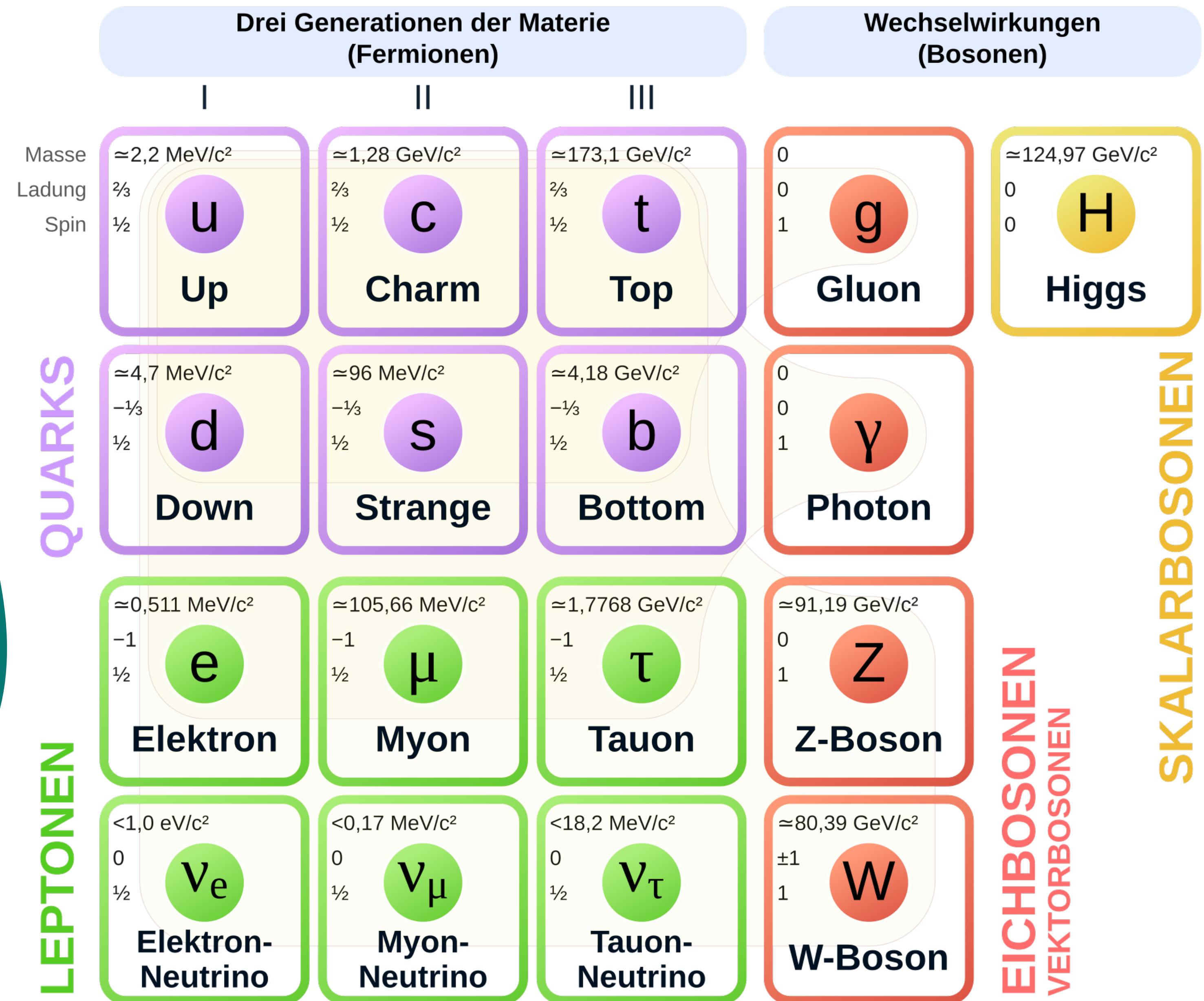
„Früher wurde der
Entdecker eines neuen
Elementarteilchens mit dem
Nobelpreis belohnt, aber heute sollte
eine solche Entdeckung mit einer
Geldstrafe von 10.000 Dollar
geahndet werden!“

Das Standardmodell

Seither wurden viele andere fundamentale Teilchen gefunden und nach ihren Eigenschaften geordnet. Diese Teilchen erklären die gesamte* uns bekannte Materie und all** ihre Wechselwirkungen.

* bis auf die Dunkle Materie

** bis auf die Gravitation



Die uns bekannten Naturgesetze

$\approx 2,2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ U Up	$\approx 1,28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ C Charm	$\approx 173,1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t Top	$\approx 4,7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d Down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ S Strange	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b Bottom	$\approx 2,2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ g Gluon	$\approx 124,97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs
$\approx 0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	$\approx 105,66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	$\approx 1,7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ Tauon	$\approx 80,39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W-Boson	$\approx 91,19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z-Boson	$<1,0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	$<18,2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tauon-Neutrino
$\approx 2,2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ U Up	$\approx 1,28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ C Charm	$\approx 173,1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t Top	$\approx 4,7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d Down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ S Strange	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b Bottom	$\approx 2,2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ g Gluon	$\approx 124,97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs
$\approx 0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	$\approx 105,66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	$\approx 1,7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ Tauon	$\approx 80,39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W-Boson	$\approx 91,19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z-Boson	$<1,0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	$<18,2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tauon-Neutrino

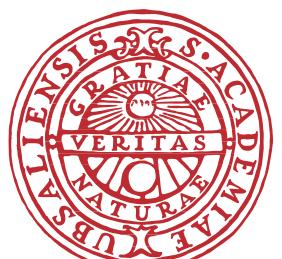
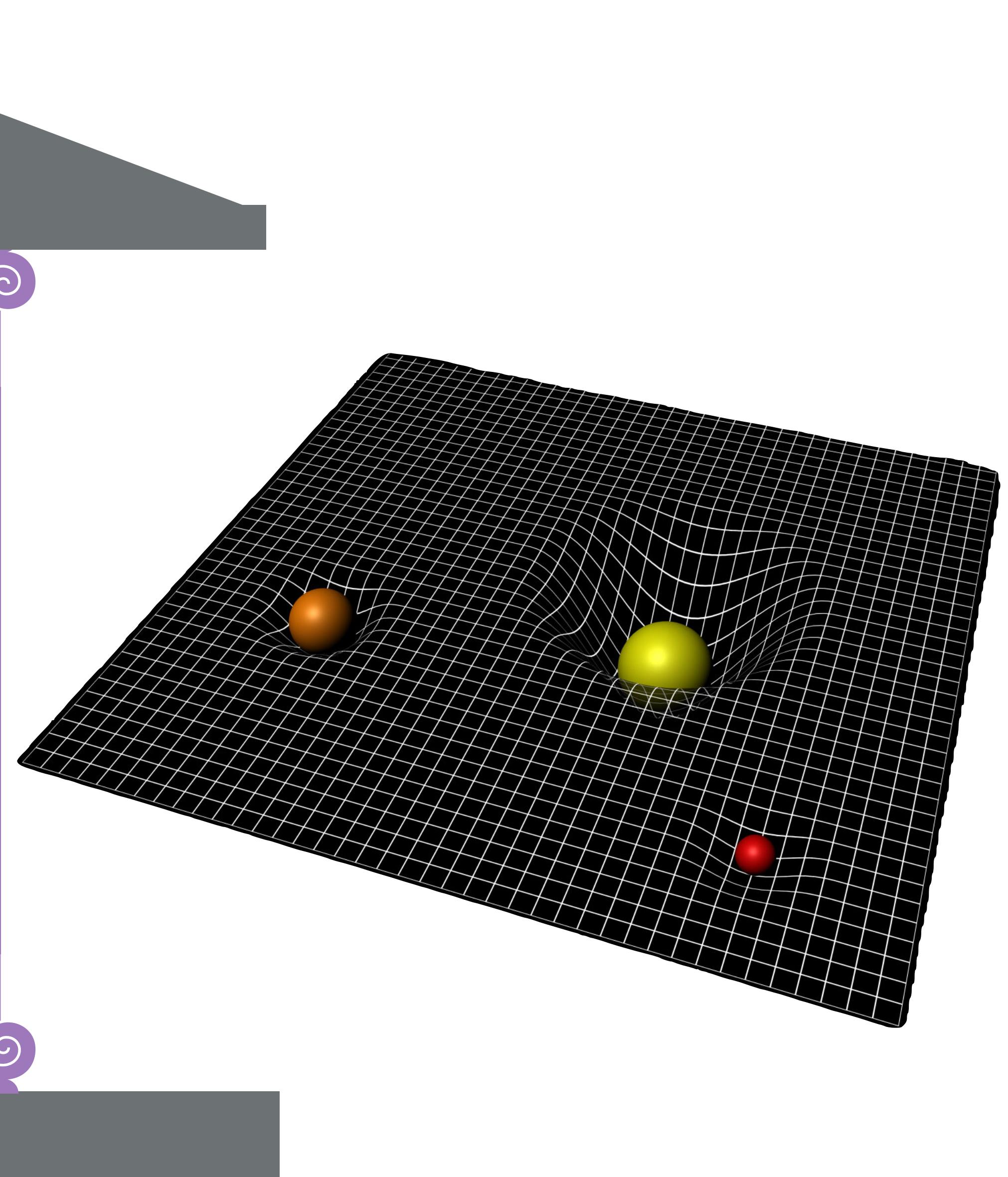
Naturgesetze

Quantenfeldtheorie

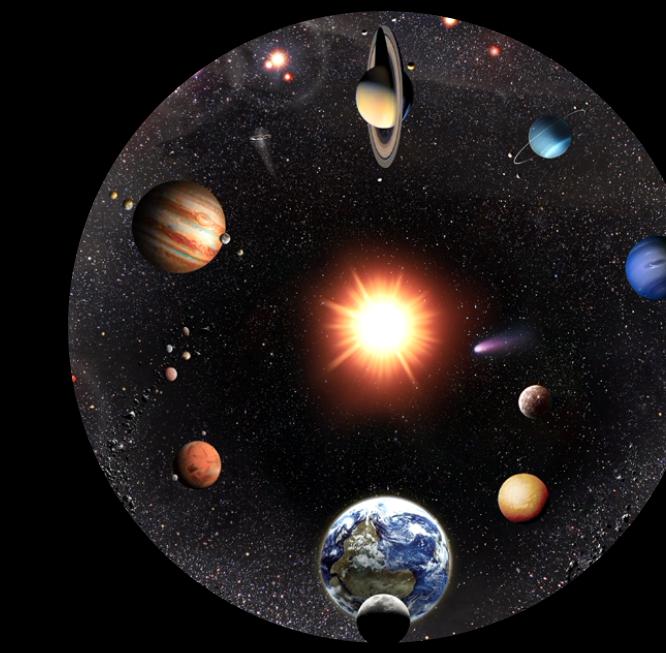
EICHBOSONEN
VEKTORBOSONEN

Allg. Relativitätstheorie

SKALARBOSONEN



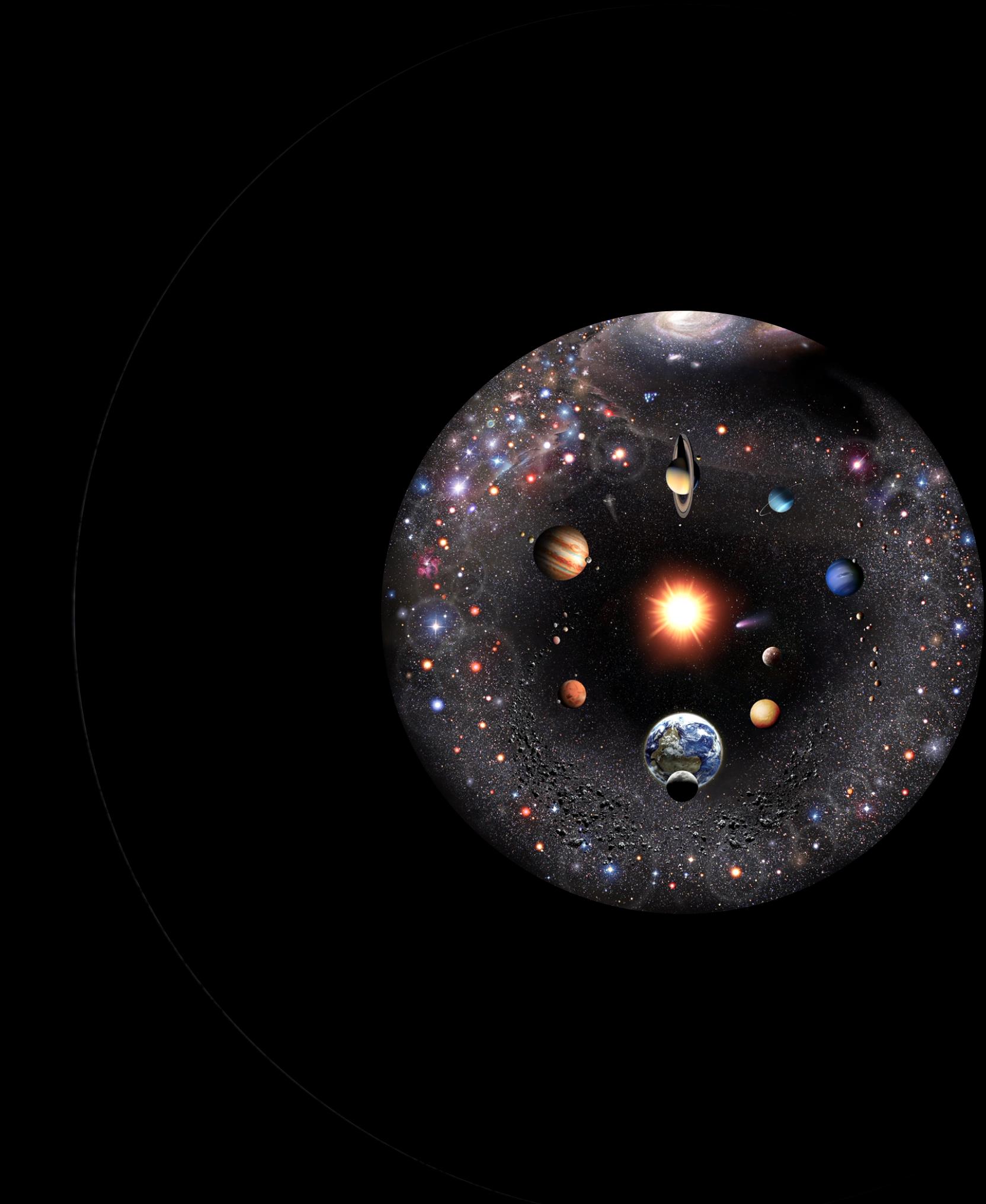
Das beobachtbare Universum



Unser Sonnensystem

PABLO
CARLOS
BUDASSI

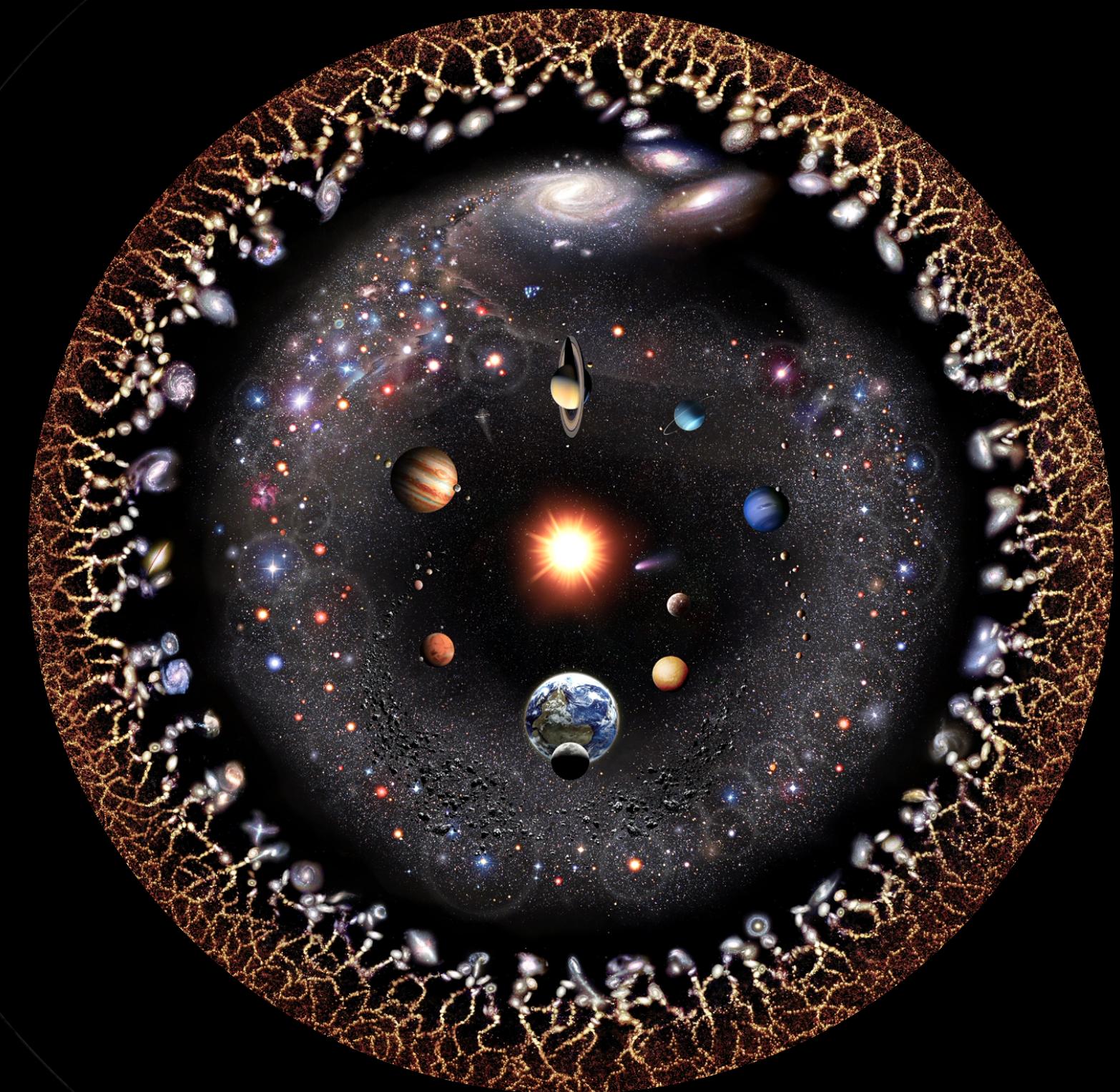
Das beobachtbare Universum



Die Milchstraße

PABLO
CARLOS
BUDASSI

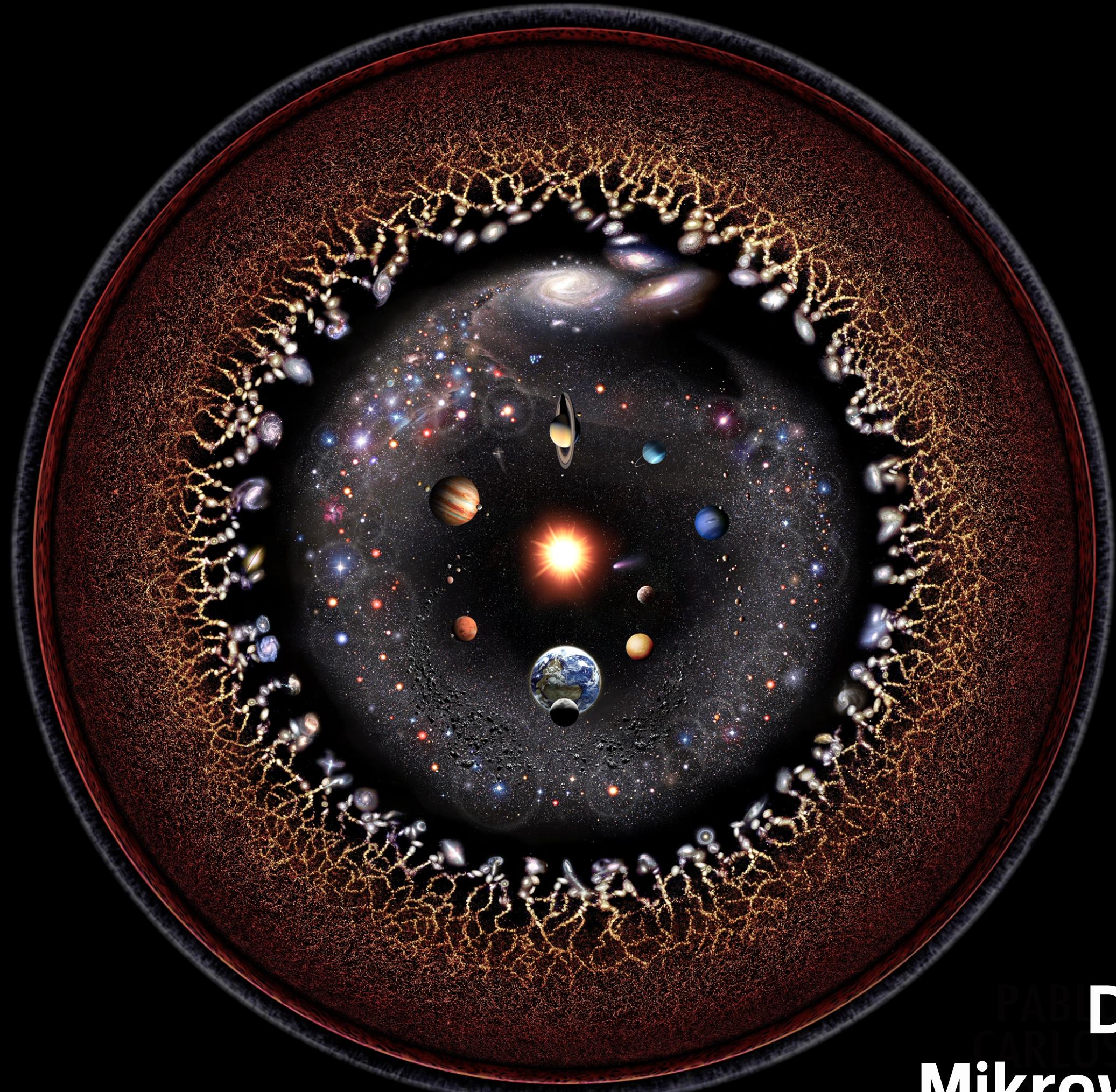
Das beobachtbare Universum



Andere Galaxien

PABLO
CARLOS
BUDASSI

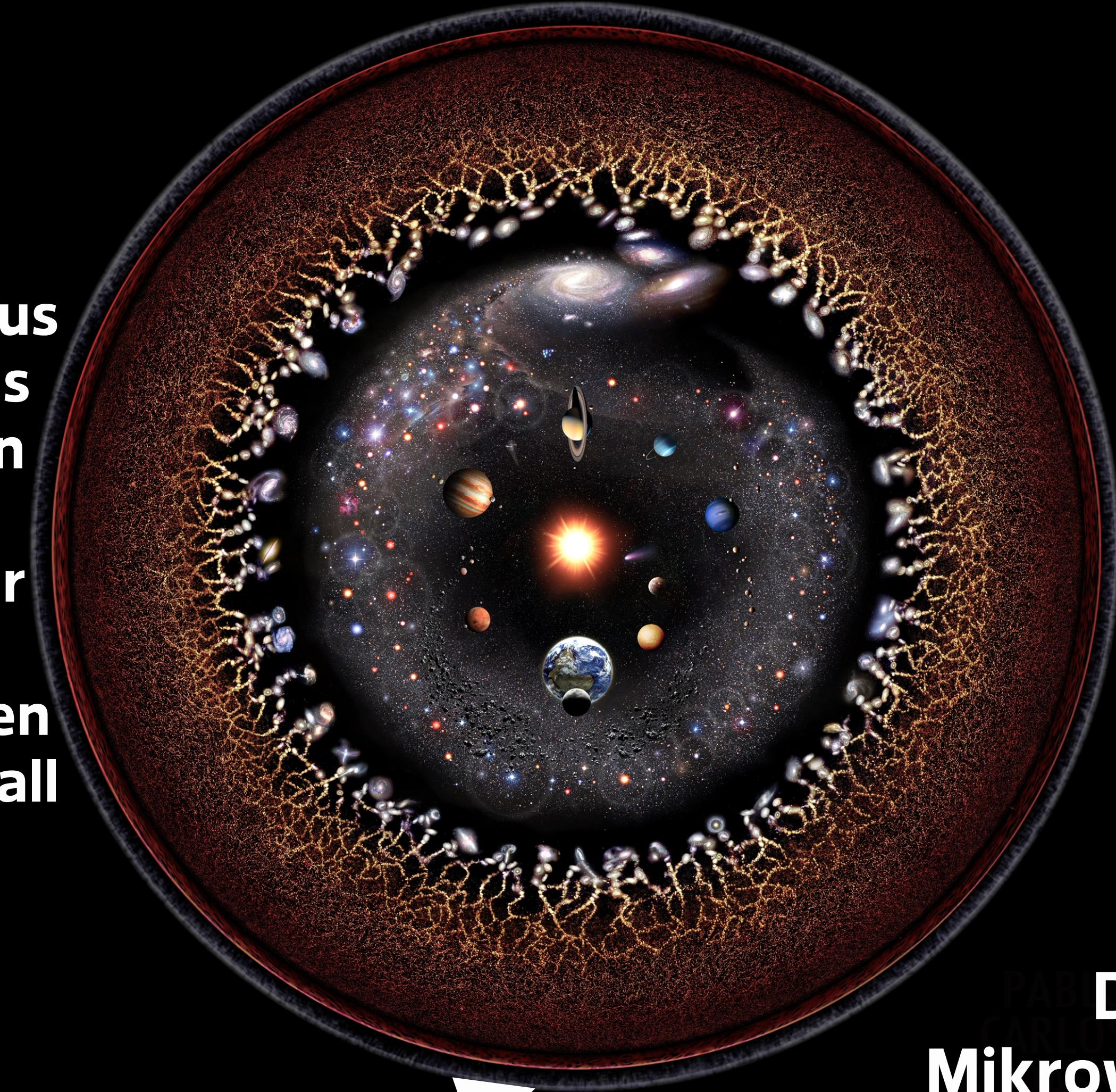
Das beobachtbare Universum



PAB **Der kosmische
Mikrowellen-Hintergrund**

Das beobachtbare Universum

Zu diesem Zeitpunkt bestand des Universum aus einem heißen Plasma aus Elementarteilchen. Wenn wir die Teilchenphysik verstehen, verstehen wir also auch das frühe Universum. Aktuell können wir bis 1s nach dem Urknall zurückrechnen.

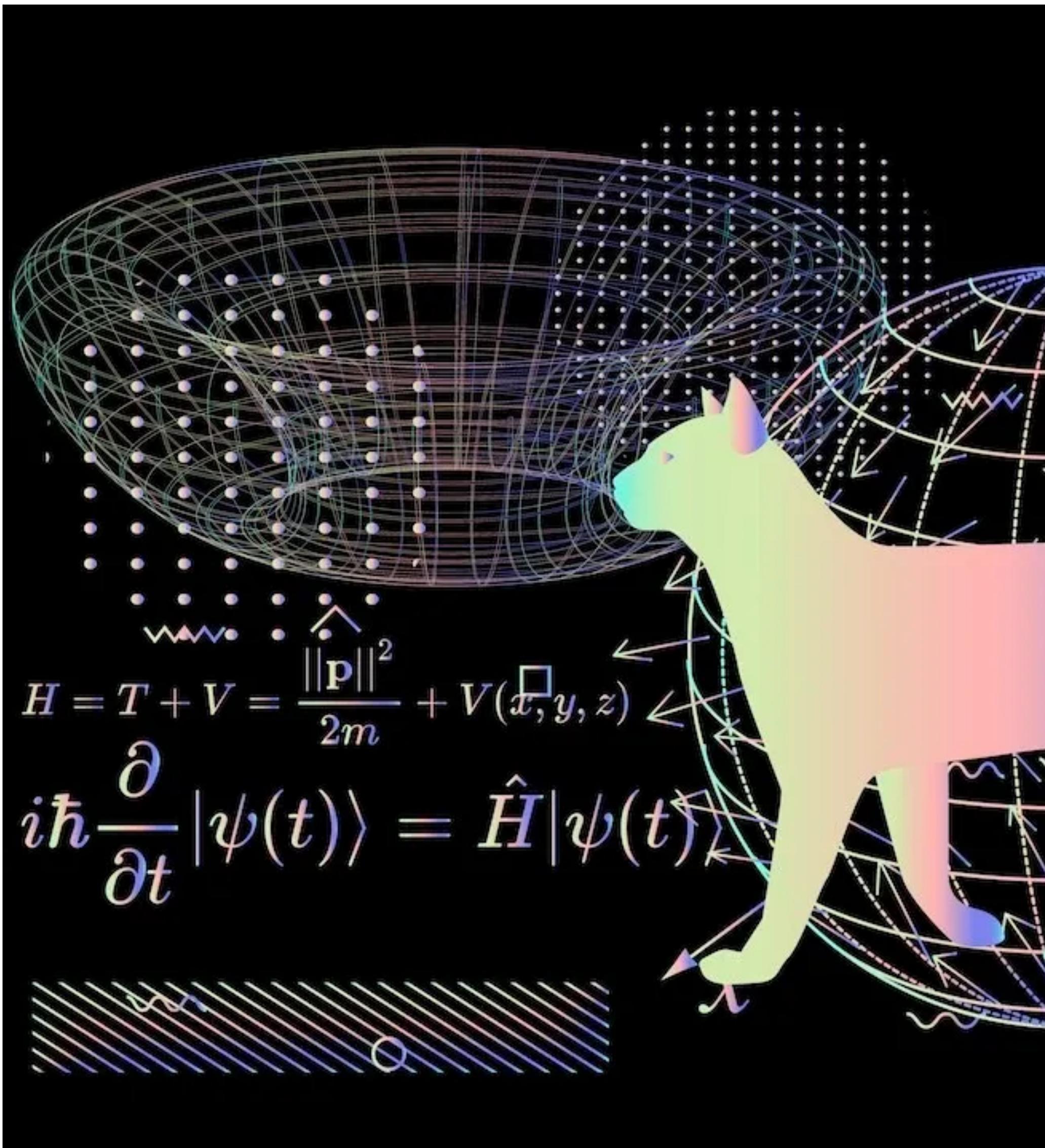


PAB **Der kosmische
Mikrowellen-Hintergrund**

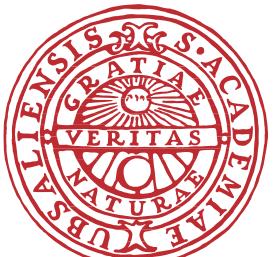
Es gibt ein neues Signal aus dem frühen
Universum! Vielleicht verrät es uns ja etwas
über die Lücken des Standardmodells... 😊

Zusammenfassung

- Die **Quantenmechanik** ist die Basis unseres physikalischen Weltbilds
- Seit Anfang des 20. Jahrhunderts werden **immer wieder neue Teilchen** beobachtet, die klassifiziert werden müssen
- Die Teilchen, aus denen wir aufgebaut sind heißen **Quarks**.
- Die **Interpretation der Quantenmechanik** gibt uns immer noch Rätsel auf.
- Wir verstehen die Prozesse in unserem Universum ab einem Alter von einer Sekunde. **Jedes neues Teilchen lässt uns weiter in die Vergangenheit blicken.**



Es ist schön, dem Cusanuswerk verbunden zu bleiben!



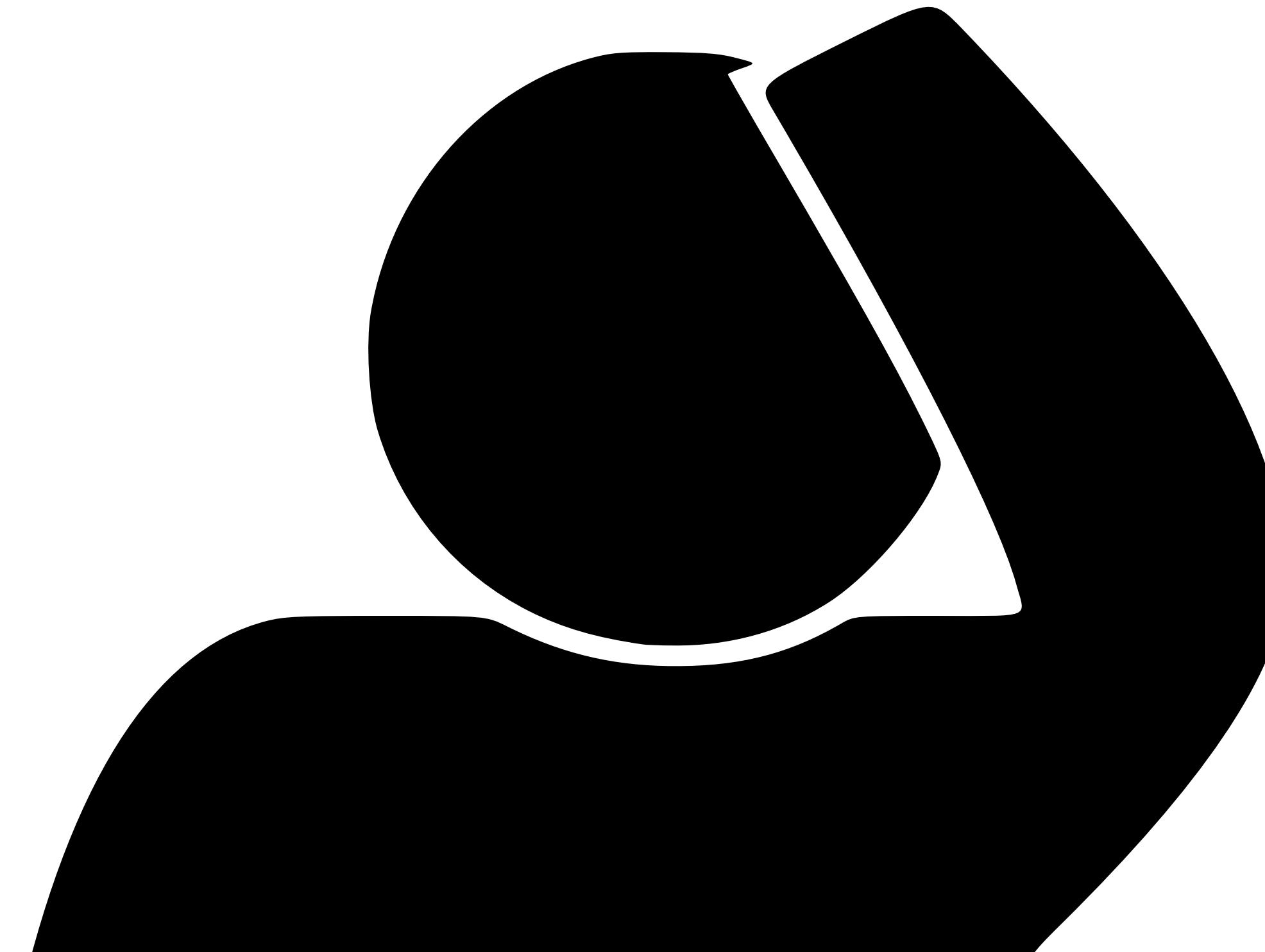
Dankeschön für eure
Aufmerksamkeit!

Gibt es Fragen?



„I think I can safely say that
nobody understands quantum
mechanics.“

Richard
Feynman



Alternative Interpretation der Quantenmechanik: Die Viele-Welten-Theorie



The screenshot shows a dark-themed web application. At the top, the URL [FreeUniverseSplitter.com](https://freeuniversesplitter.com) is visible. Below it, a green banner displays the text: "Enter two alternatives below. Universe will be split." and "Which universe you find yourself in is random, depending on the weights you enter." There are two input fields for "Alternatives" with the placeholder "Nach rechts springen" and "Nach links springen". To the right of these fields are two sliders labeled "Weight" with values "1" and "1". A "Next" button is located at the bottom right of the input area. The background features a faint image of a magic 8-ball.

<https://freeuniversesplitter.com>

Die Kopenhagener Deutung wird oft [...] dahingehend missdeutet, als behauptet sie, **was nicht beobachtet werden kann, das existiere nicht. Diese Darstellung ist logisch ungenau.** Die Kopenhagener Auffassung verwendet nur die schwächere Aussage: „*Was beobachtet worden ist, existiert gewiss; bezüglich dessen, was nicht beobachtet worden ist, haben wir jedoch die Freiheit, Annahmen über dessen Existenz oder Nichtexistenz einzuführen.*“

— Carl Friedrich von Weizsäcker

Die Viele-Welten-Theorie ist konsistent mit allem, was wir wissen.

