

Die Entdeckung des Atoms: Ein historischer Rückblick

Ferienakademie „Kernspalterei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher
Department of Physics and Astronomy
Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se



UPPSALA
UNIVERSITET

Die Entdeckung des Atoms: Ein historischer Rückblick

Ferienakademie „Kernspalterei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher
Department of Physics and Astronomy
Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se



UPPSALA
UNIVERSITET

Von der Kuh zum Quark

Ferienakademie „Kernspalterei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

Postdoctoral researcher
Department of Physics and Astronomy
Uppsala University

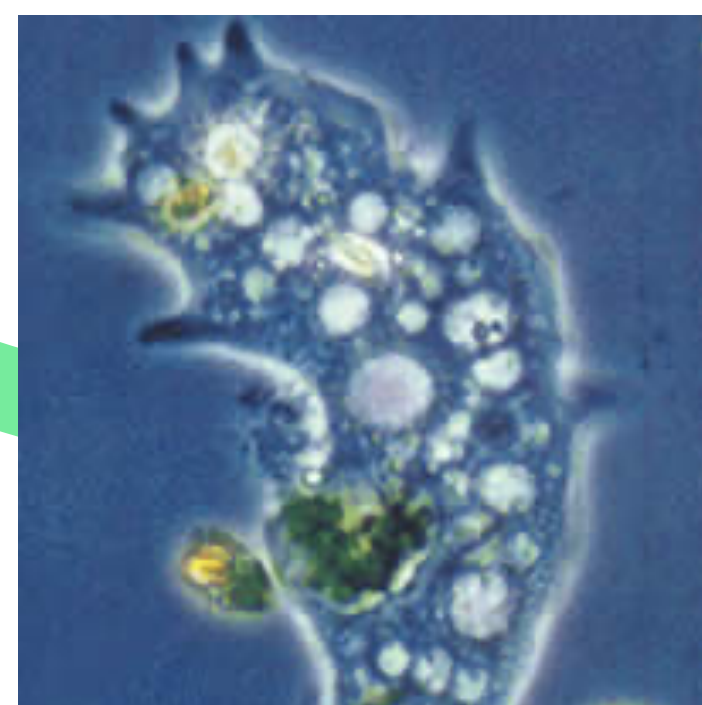
carlo.tasillo@physics.uu.se



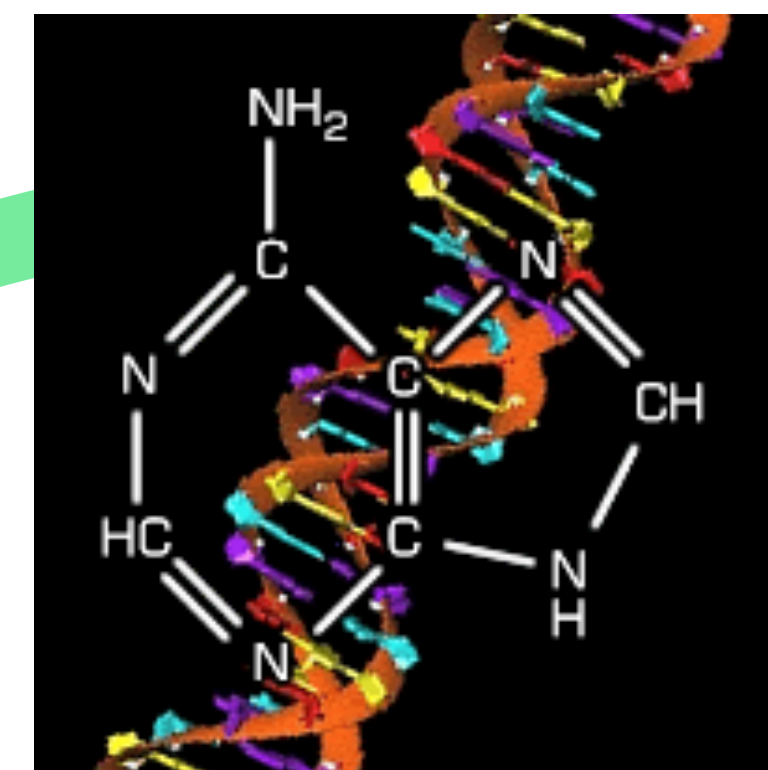
UPPSALA
UNIVERSITET



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



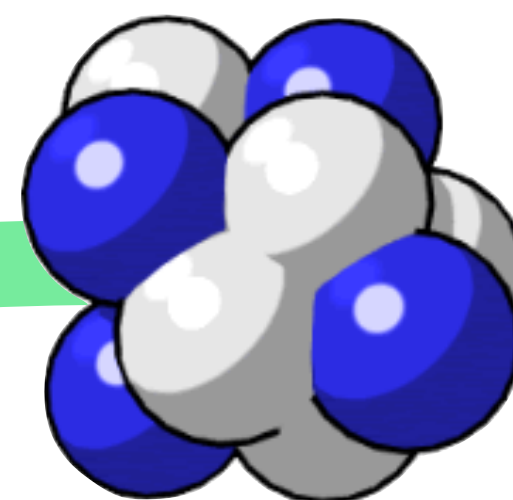
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



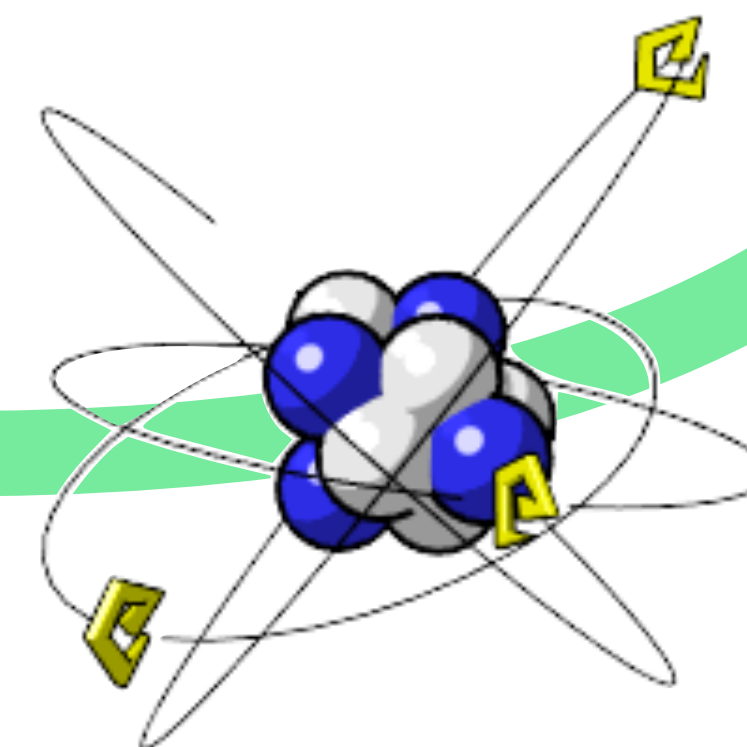
**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



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



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

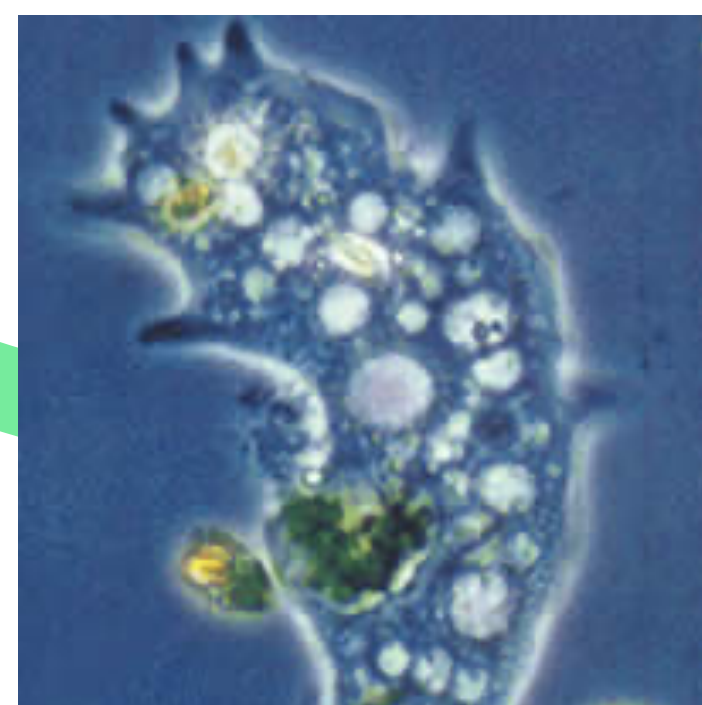


**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

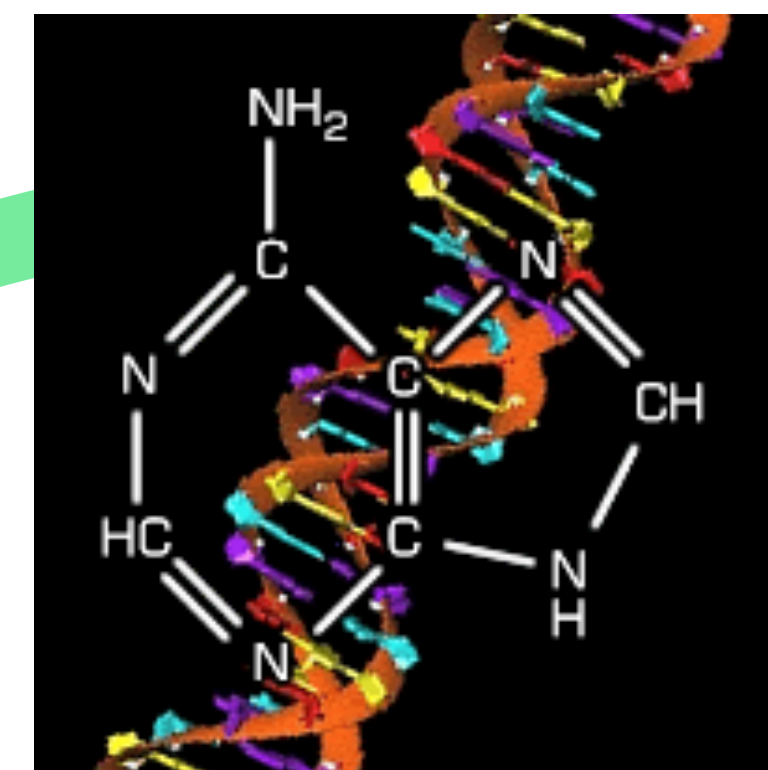




**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



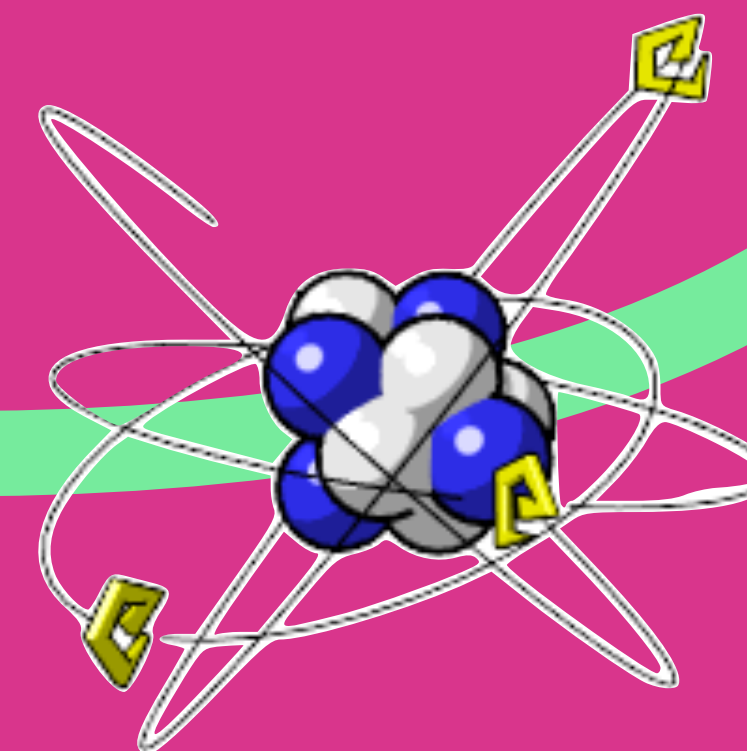
**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



**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



Leukipp

Demokrit

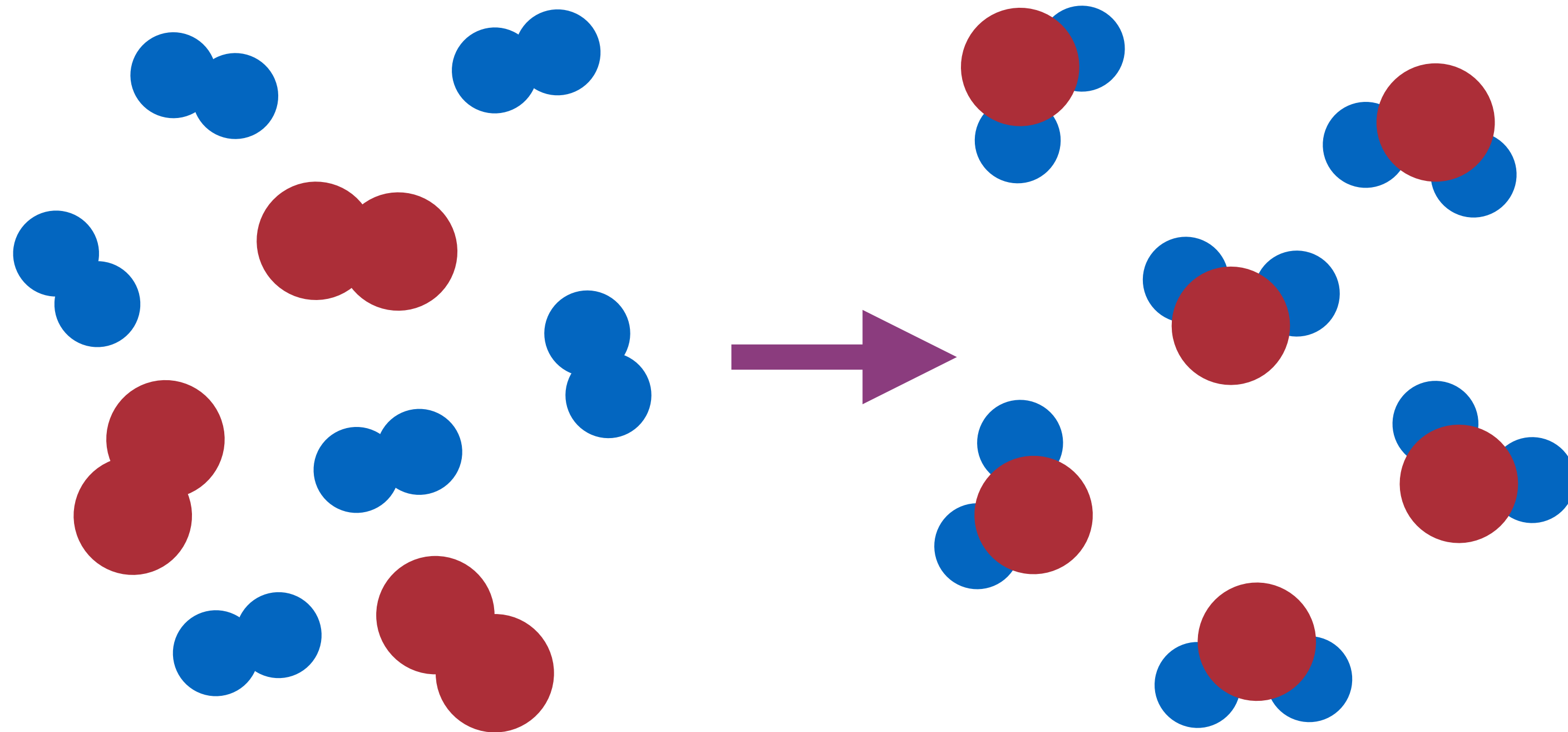
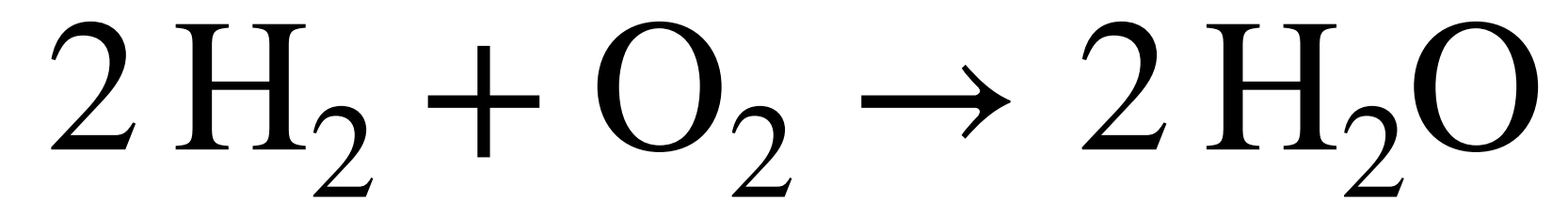
ατομος*!

*atomos = unteilbar

"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

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

Julius Lothar Meyer

1 H Wassers...		
3 Li Lithium	4 Be Beryllium	
11 Na Natrium	12 Mg Magnesi...	
19 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthan
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium

22 Ti Titan	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Eisen	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germani...	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
40 Zr Zirkonium	41 Nb Niob	42 Mo Molybdän	43 Tc Techneti...	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Iod	54 Xe Xenon
72 Hf Hafnium	73 Ta Tantal	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platin	79 Au Gold	80 Hg Quecksil...	81 Tl Thallium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
104 Rf Rutherfo...	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborg...	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitneri...	110 Ds Darmsta...	111 Rg Roentge...	112 Cn Coperni...	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovi...	116 Lv Livermo...	117 Ts Teness	118 Og Oganes...

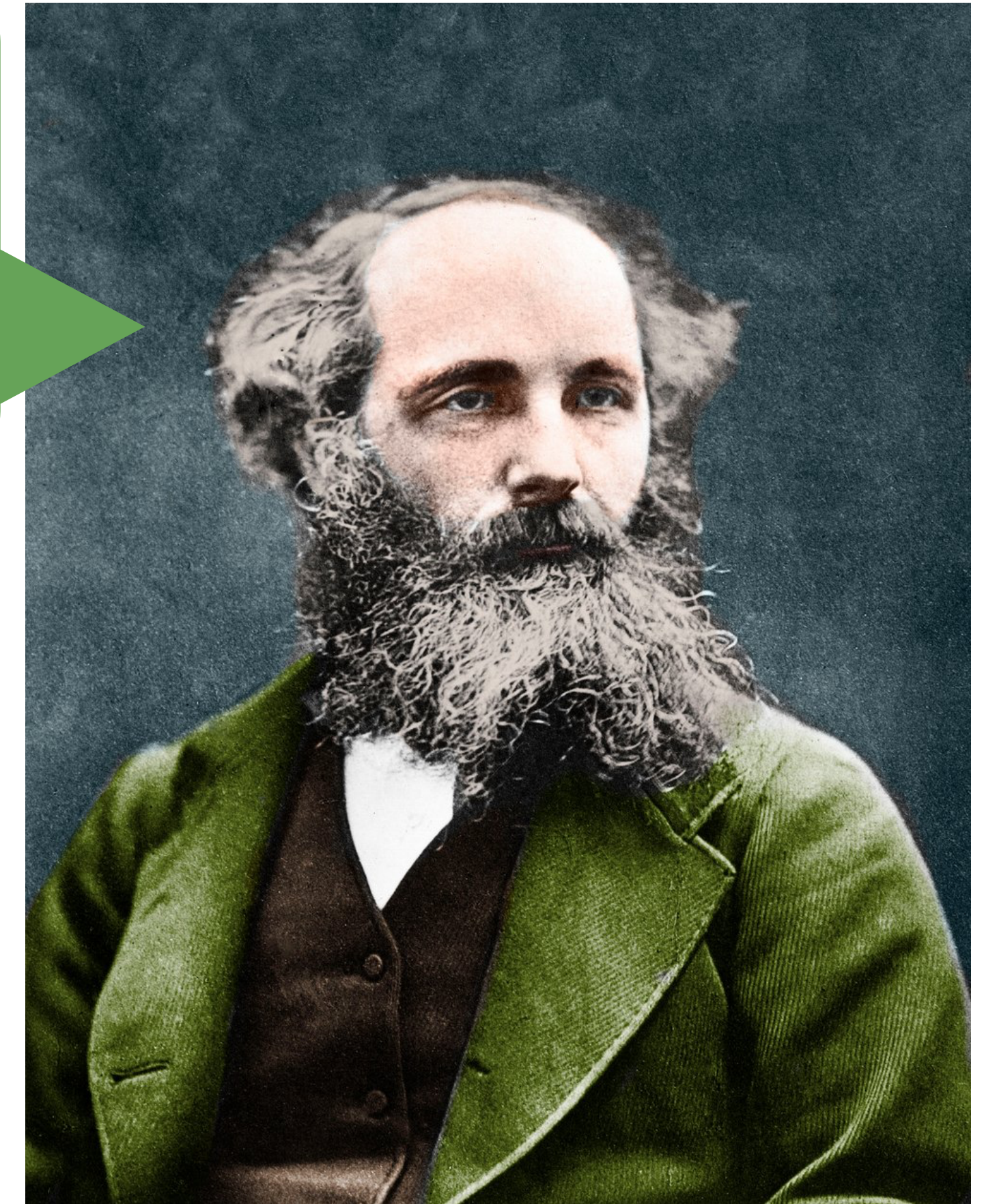
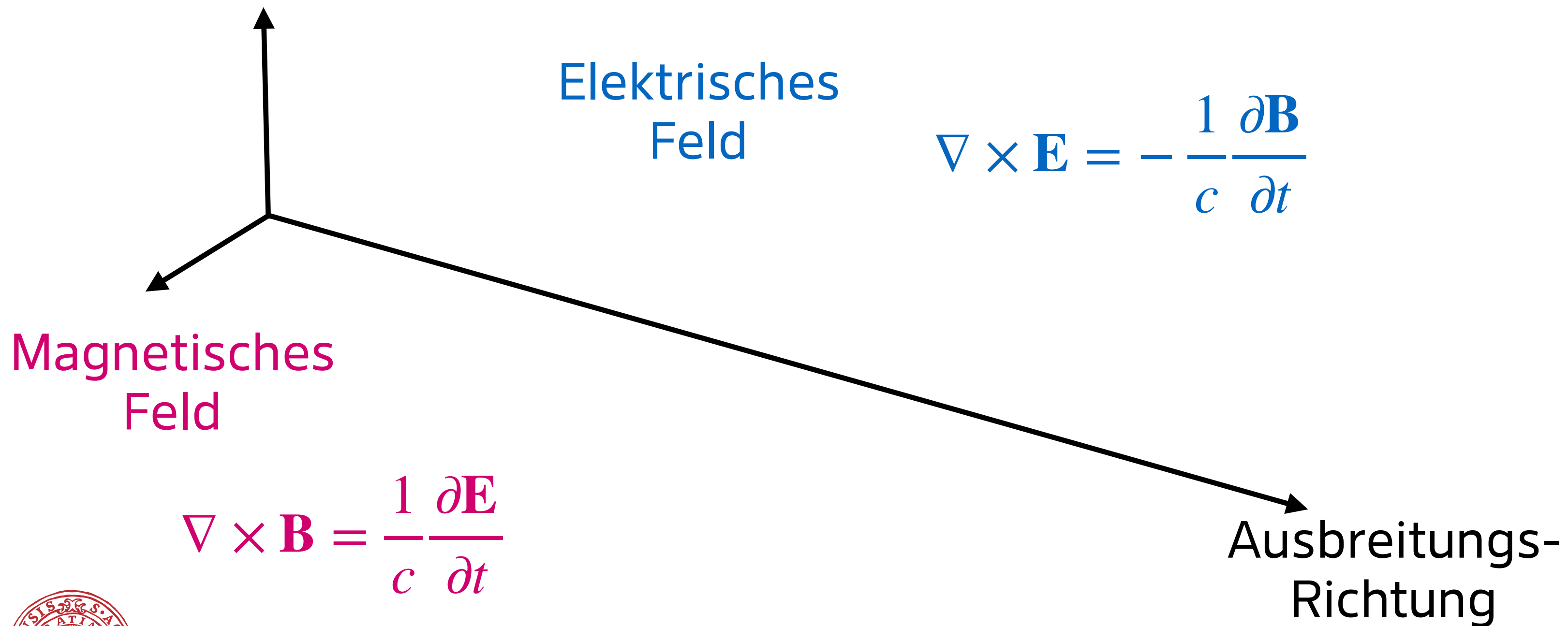
58 Ce Cer	59 Pr Praseod...	60 Nd Neodym	61 Pm Prometh...	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolini...	65 Tb Terbium	66 Dy Dyspros...	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
90 Th Thorium	91 Pa Protacti...	92 U Uran	93 Np Neptuni...	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californi...	99 Es Einsteini...	100 Fm Fermium	101 Md Mendele...	102 No Nobelium	103 Lr Lawrenc...

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.**“

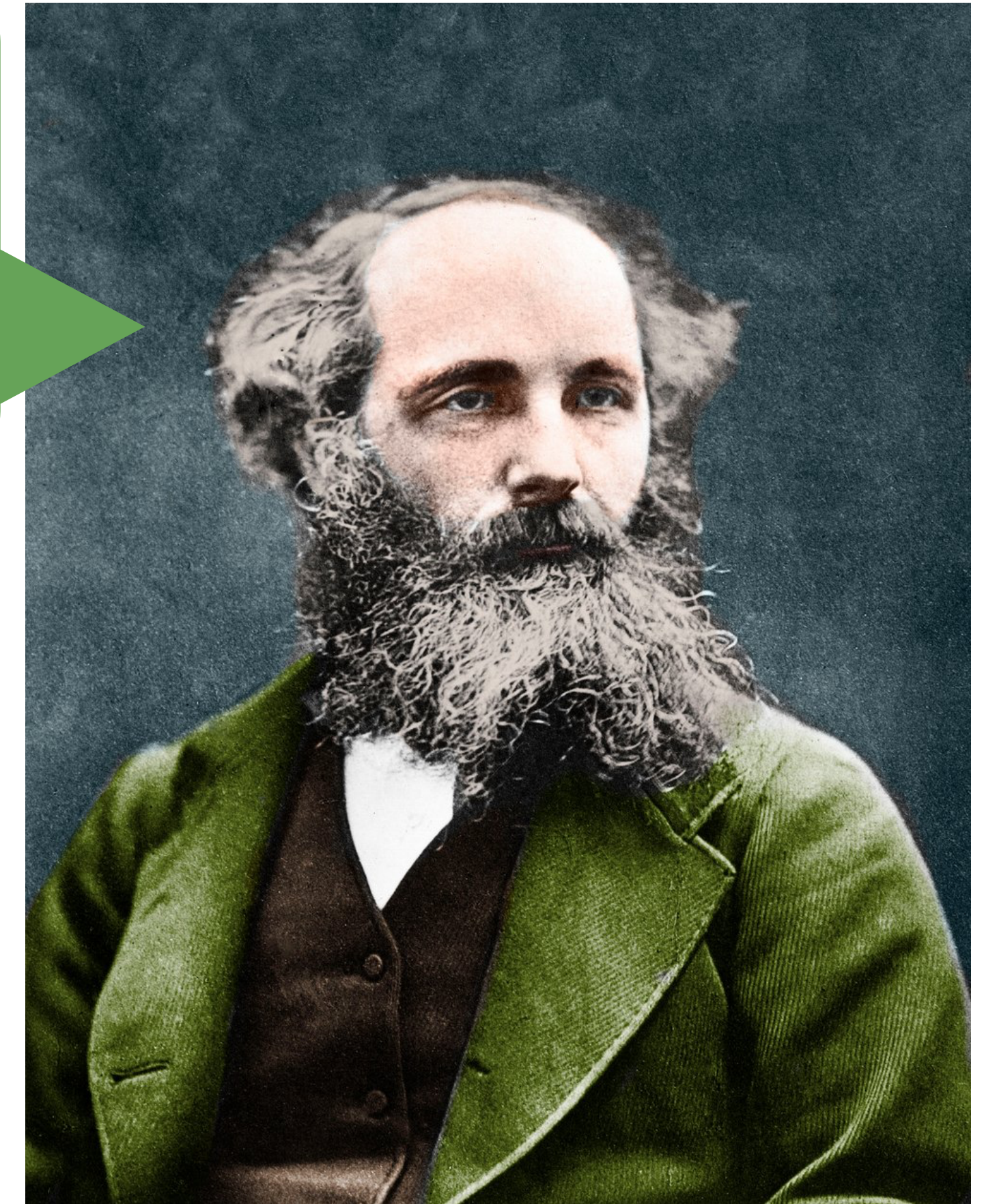
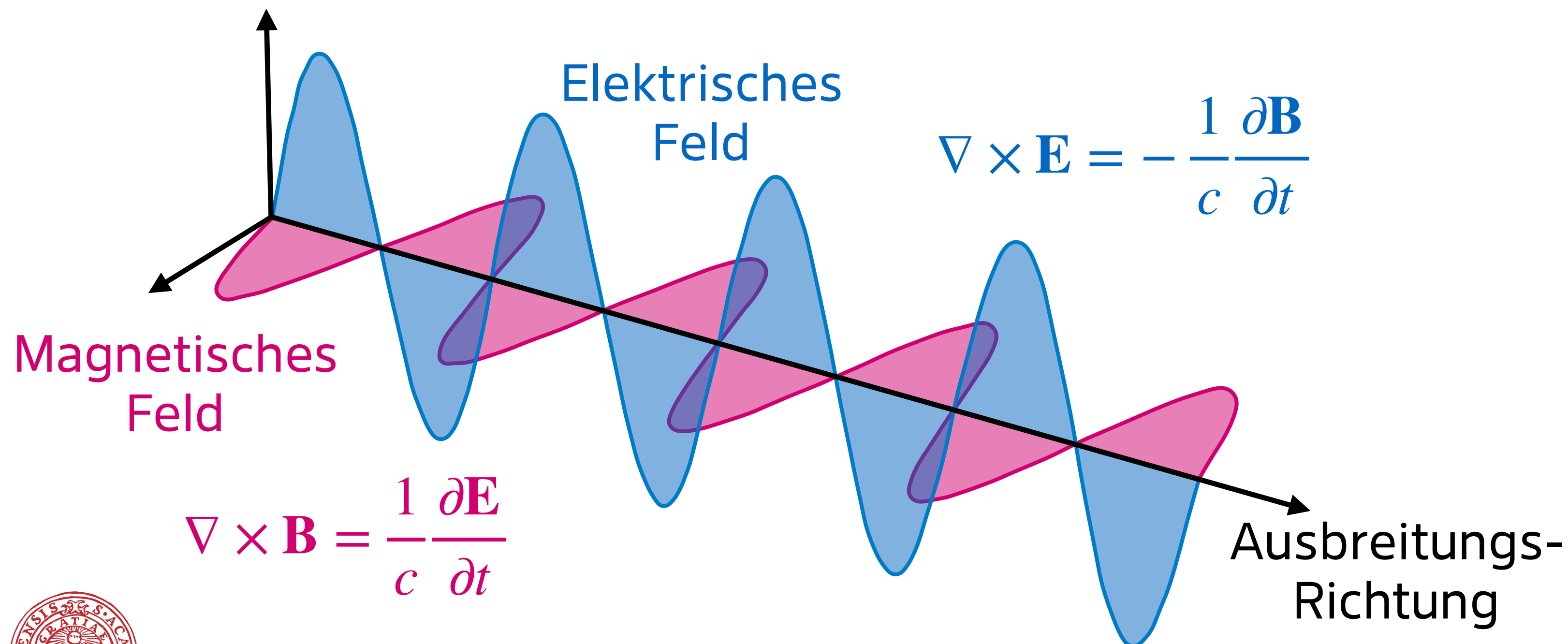


James Clerk
Maxwell



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.**“

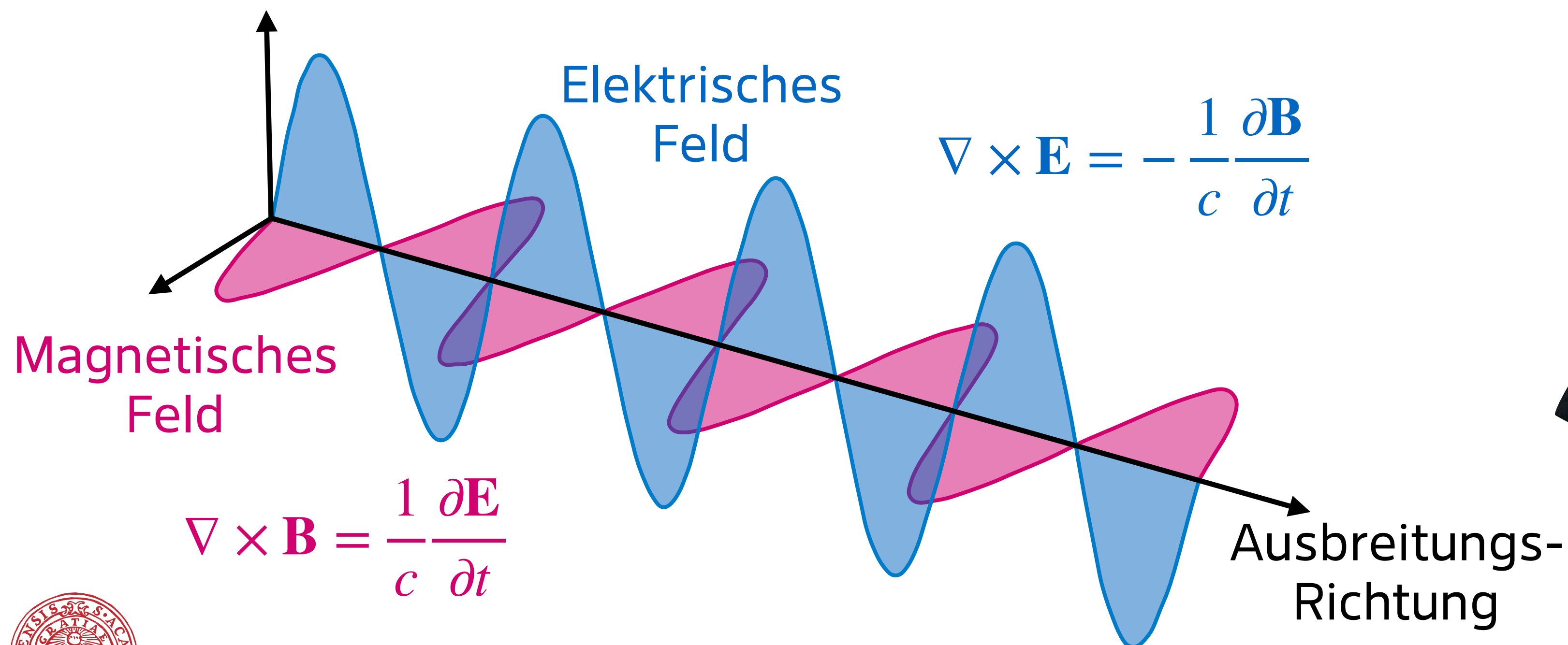


James Clerk
Maxwell

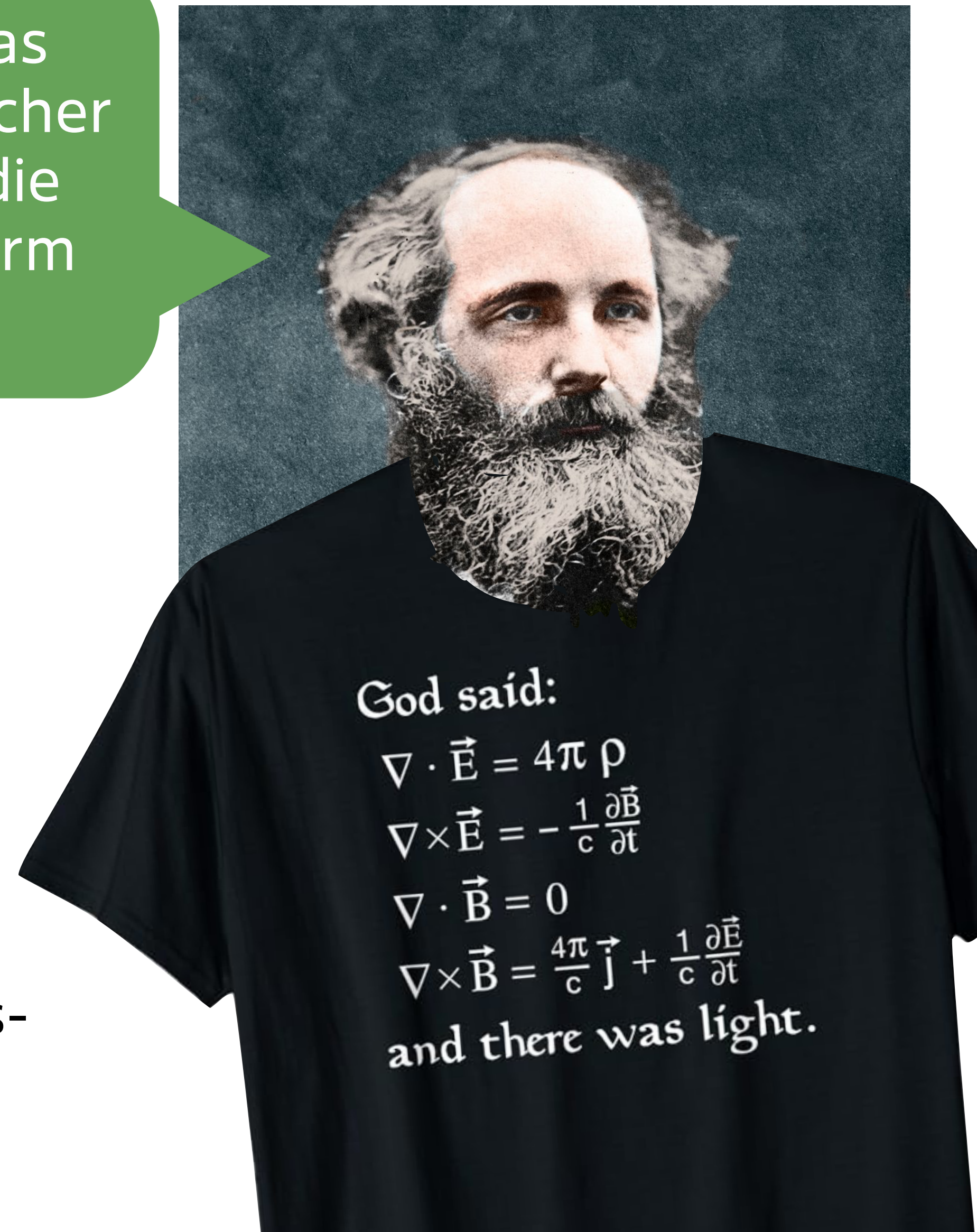


Elektromagnetismus und Lichtwellen, Maxwell 1894

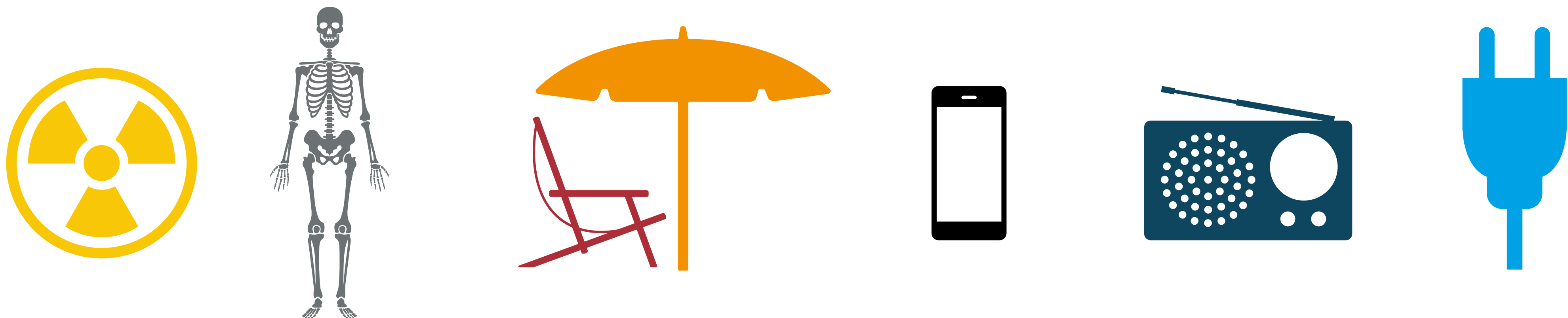
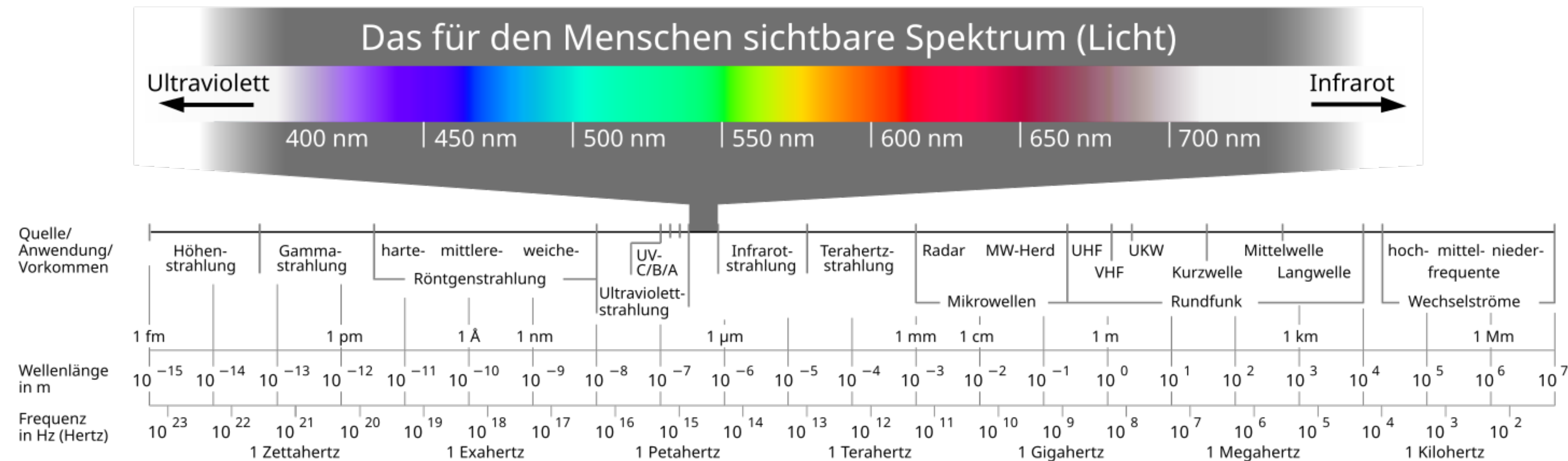
„..., dass wir starken Grund zu dem Schluss haben, dass das **Licht selbst** einschließlich der Wärmestrahlung sowie möglicher anderer Strahlung **eine elektromagnetische Störung** ist, die sich entsprechend der elektromagnetischen Gesetze in Form von Wellen **im elektromagnetischen Feld fortpflanzt.**“



Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark



Das Elektromagnetische Spektrum



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

Schirm

Hand von
Bertha Röntgen

Heizkathode

Elektronen

Röntgen-
Strahlung

Anode



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?



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?



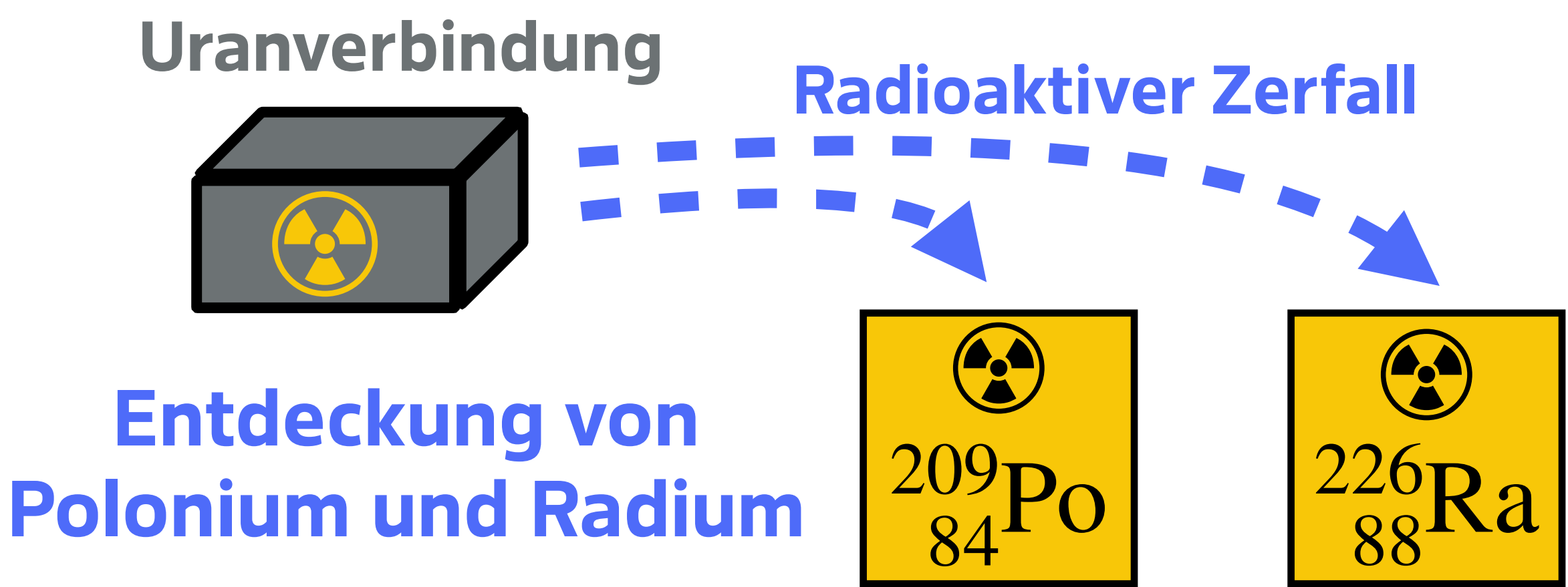
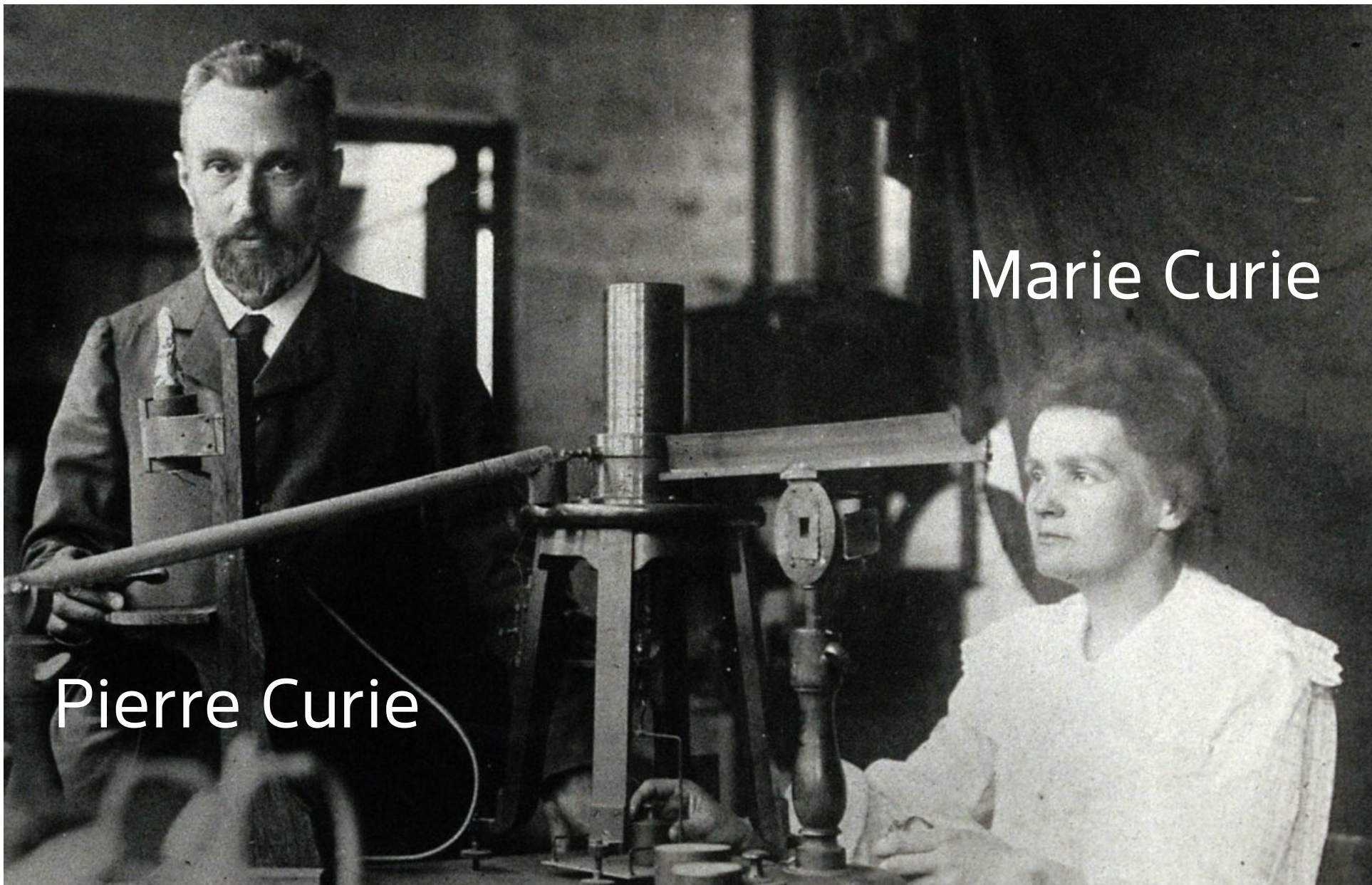
Nächste Frage: Was ist ein Ångström?

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

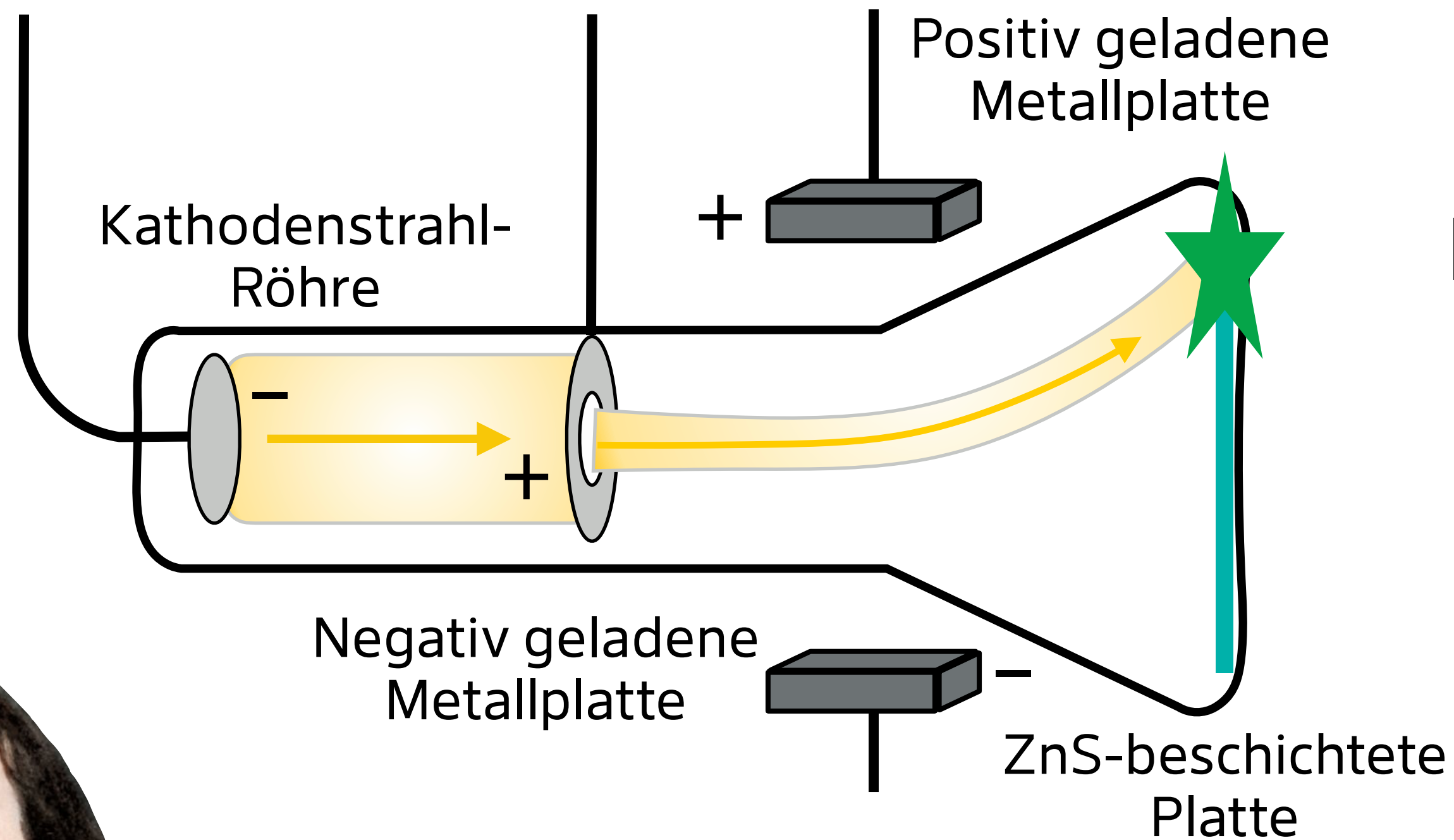
Ein Ångström ist ein
zehn-milliardstel Meter



Entdeckung der Radioaktivität, Becquerel 1896 & Curie 1898



Entdeckung des Elektrons und Plumpudding-Modell, Thomson 1896

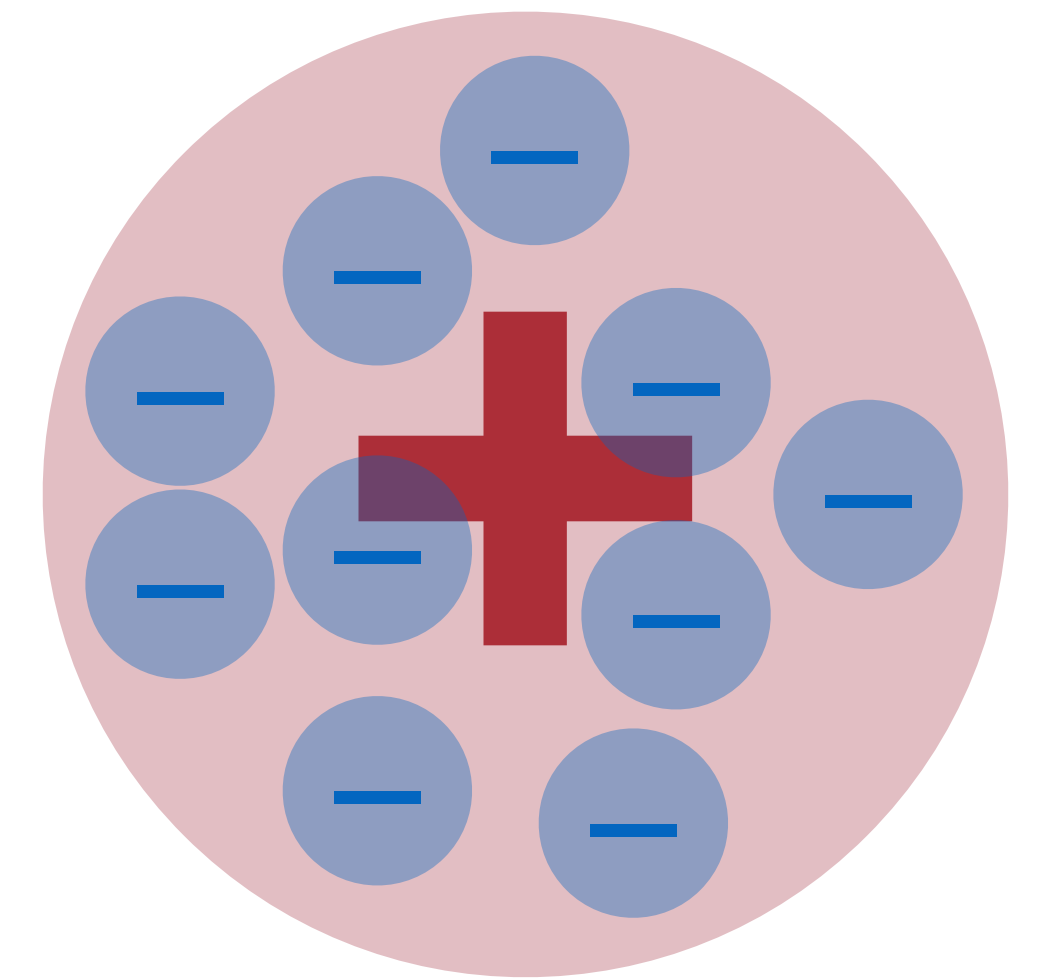


**Erster Nachweis des Elektrons
und Messung seines Ladung/
Masse-Verhältnis**

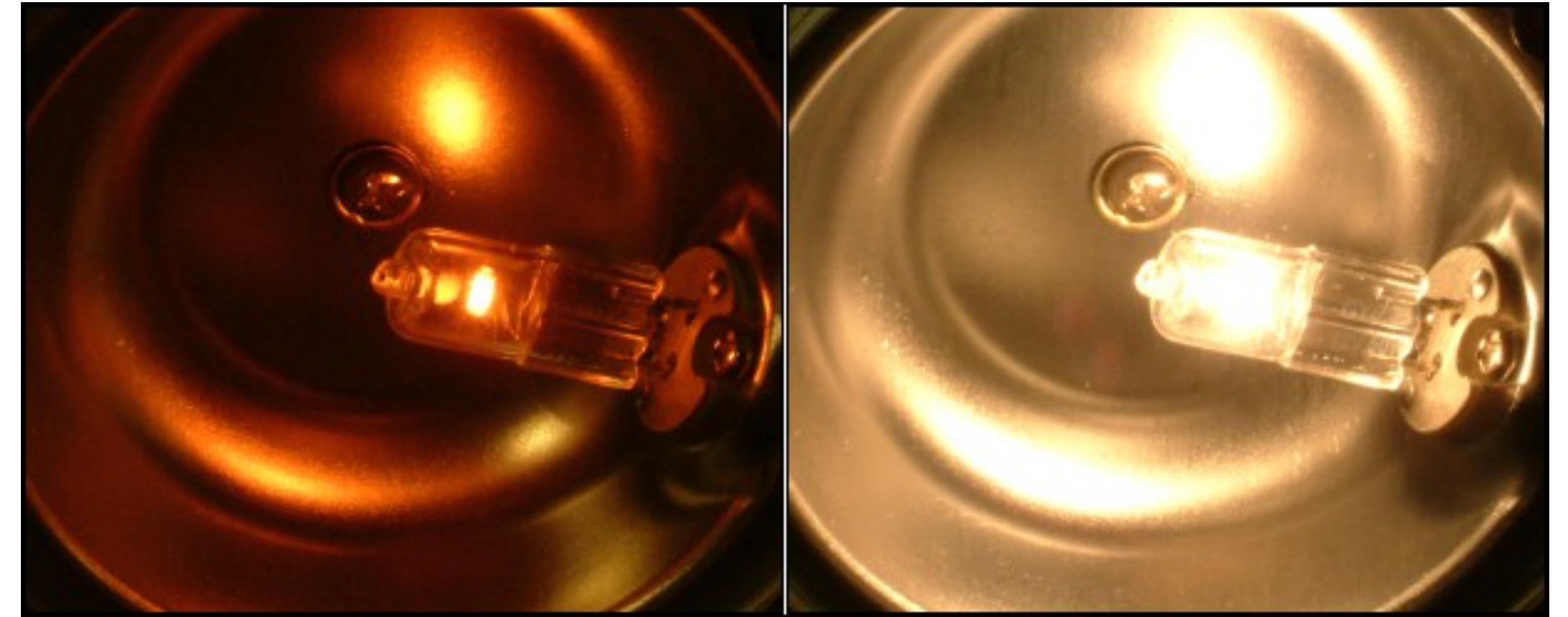
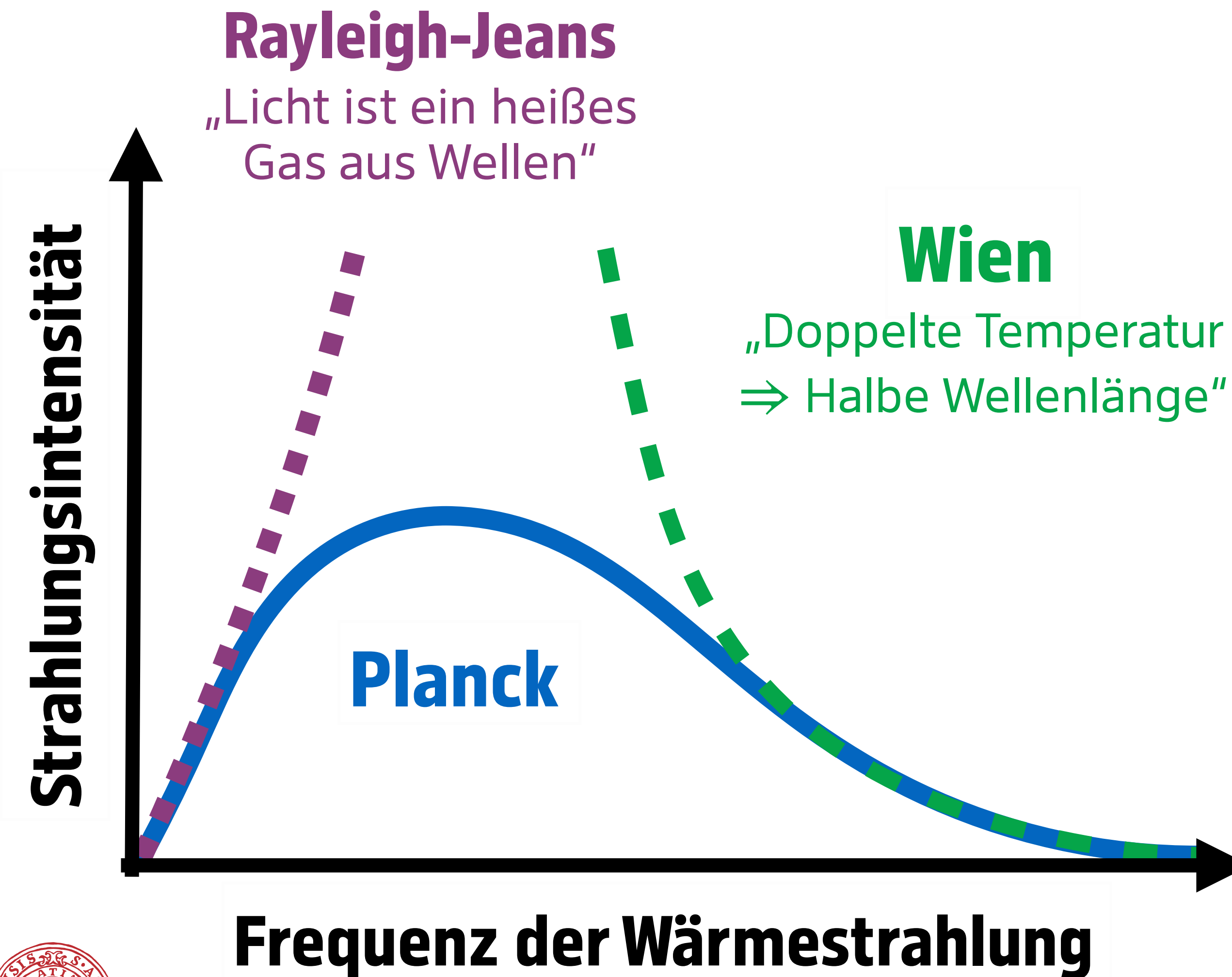


Joseph John
Thomson

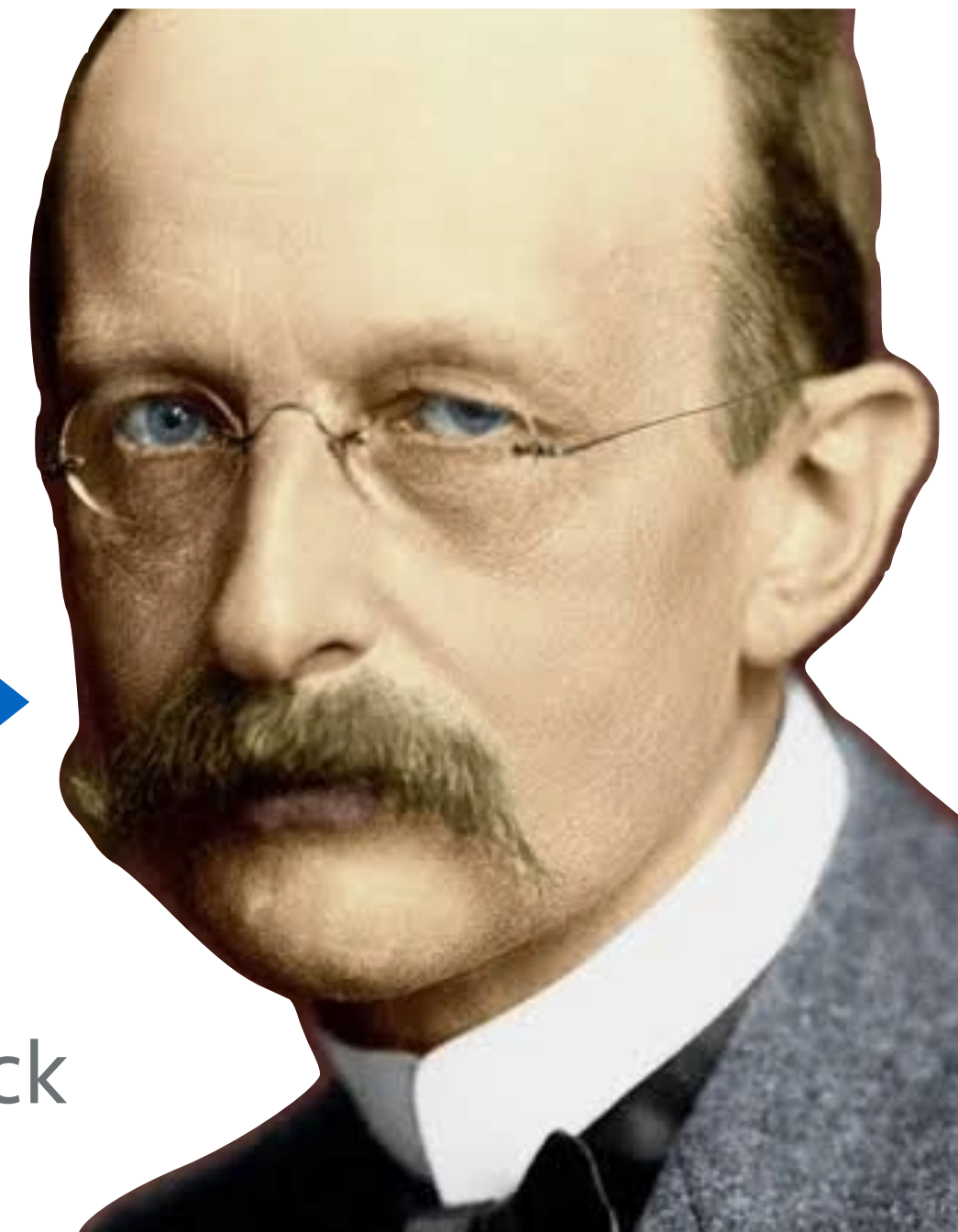
Ein Wasserstoffatom besteht aus ca.
1.800 Elektronen und einer masselosen
positiven Ladungsverteilung



Die Geburtsstunde der Quantenmechanik, Planck 1900



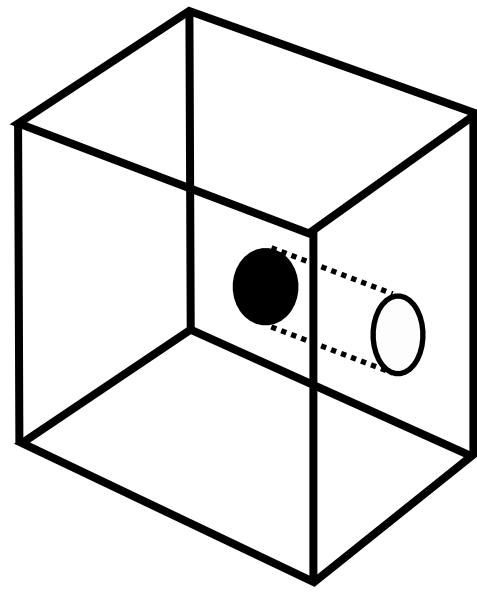
Licht ist in Pakete
der Energie
 $E = h \cdot f$
quantisiert, wobei
 $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js.}$



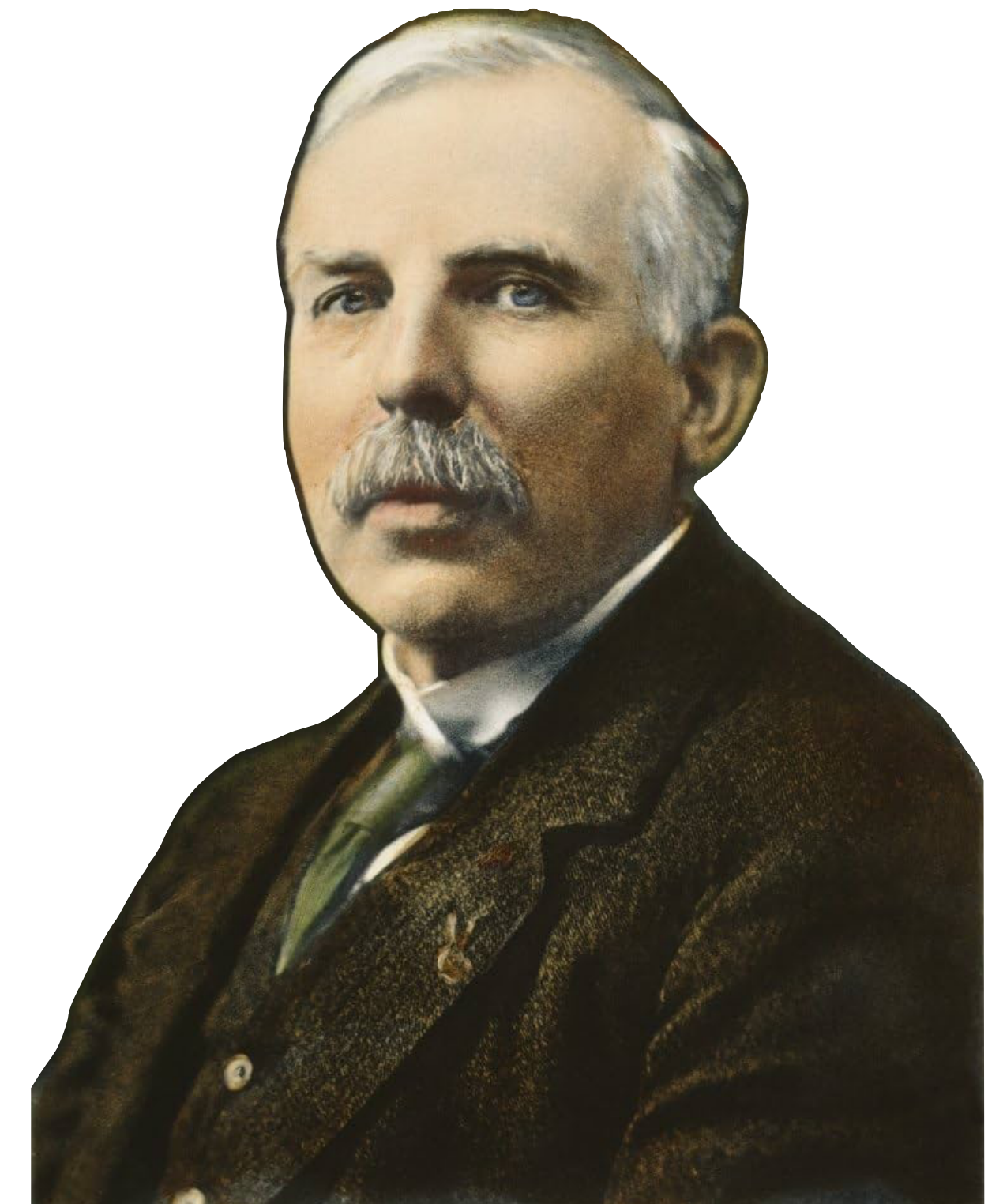
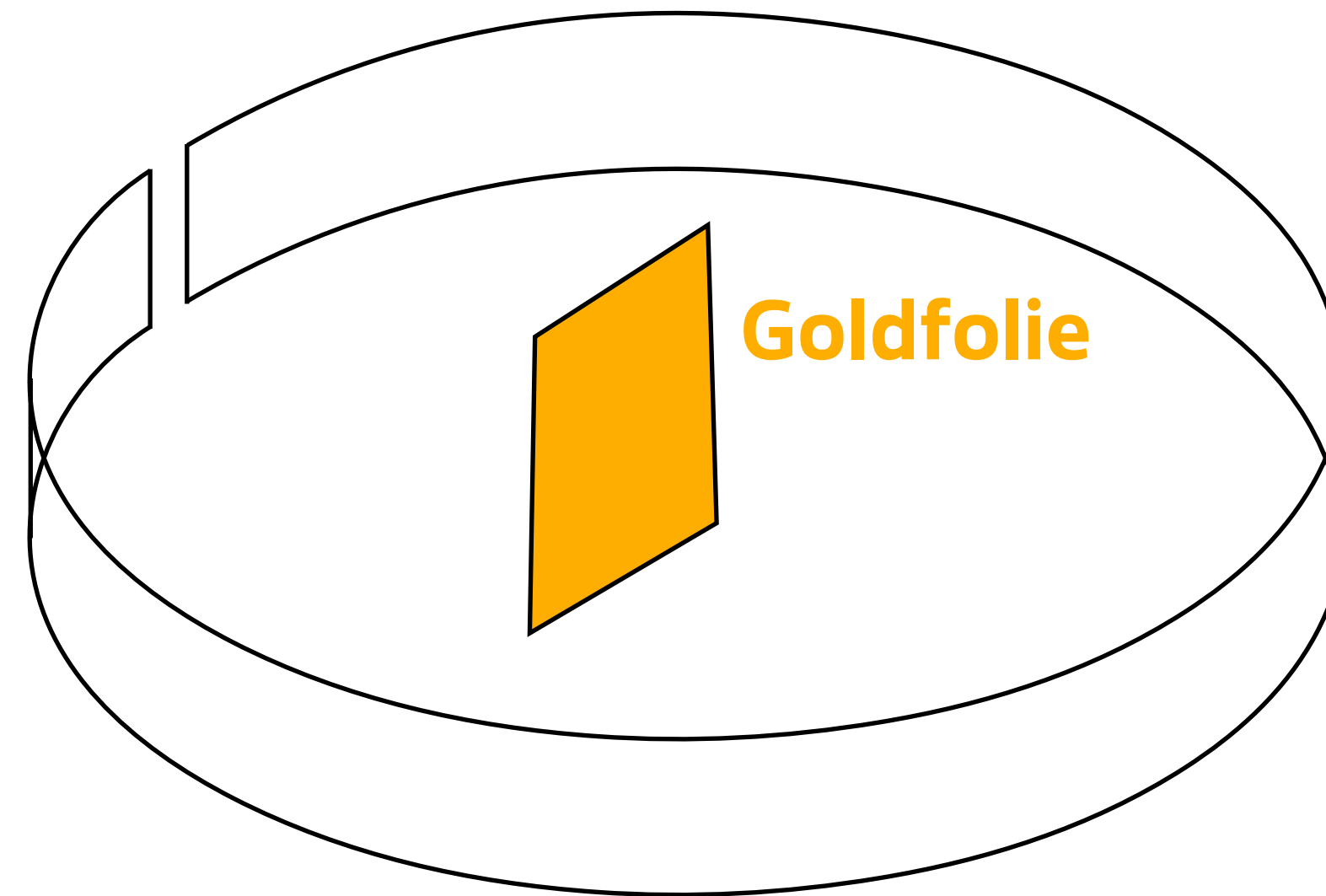
Max Planck



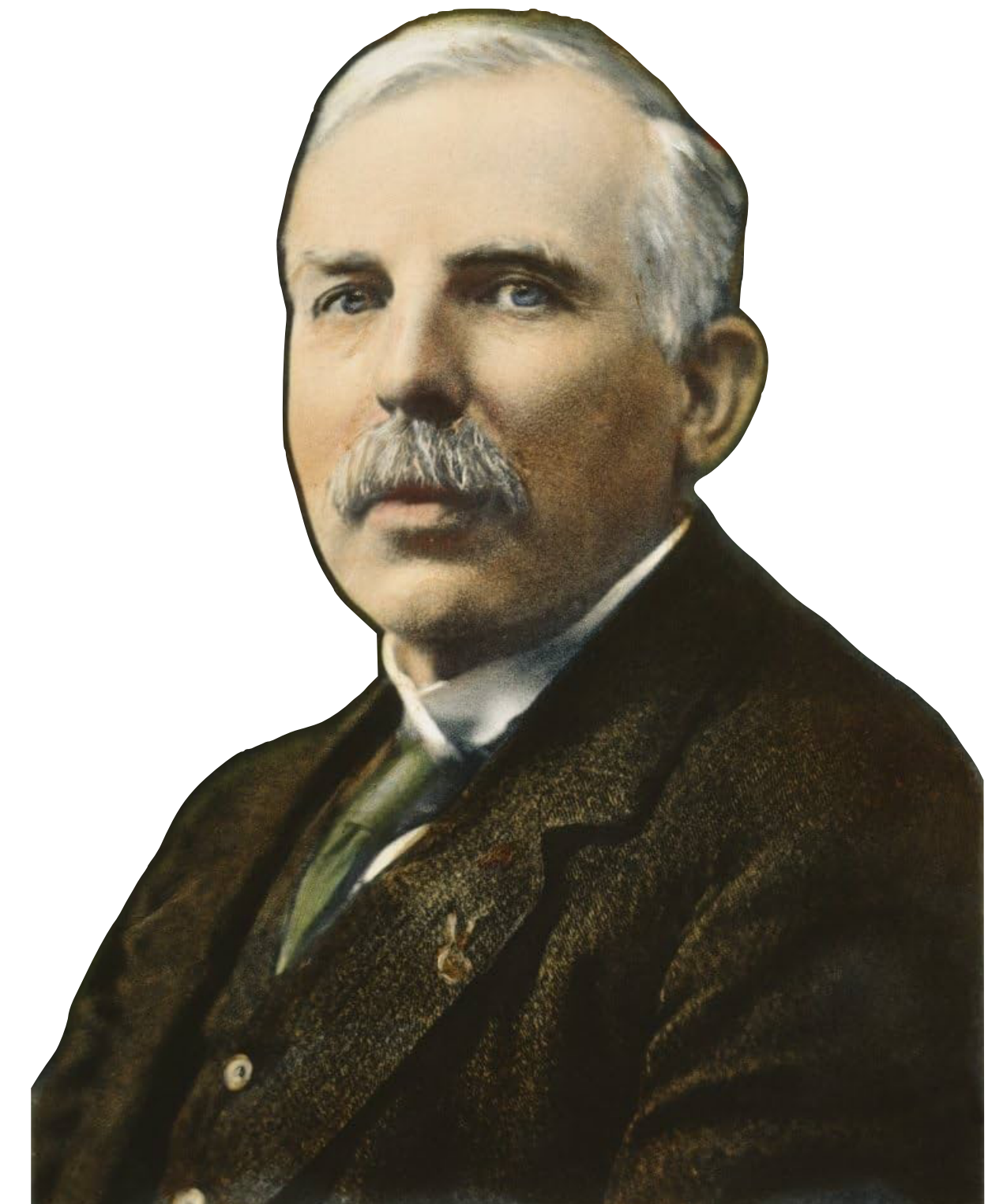
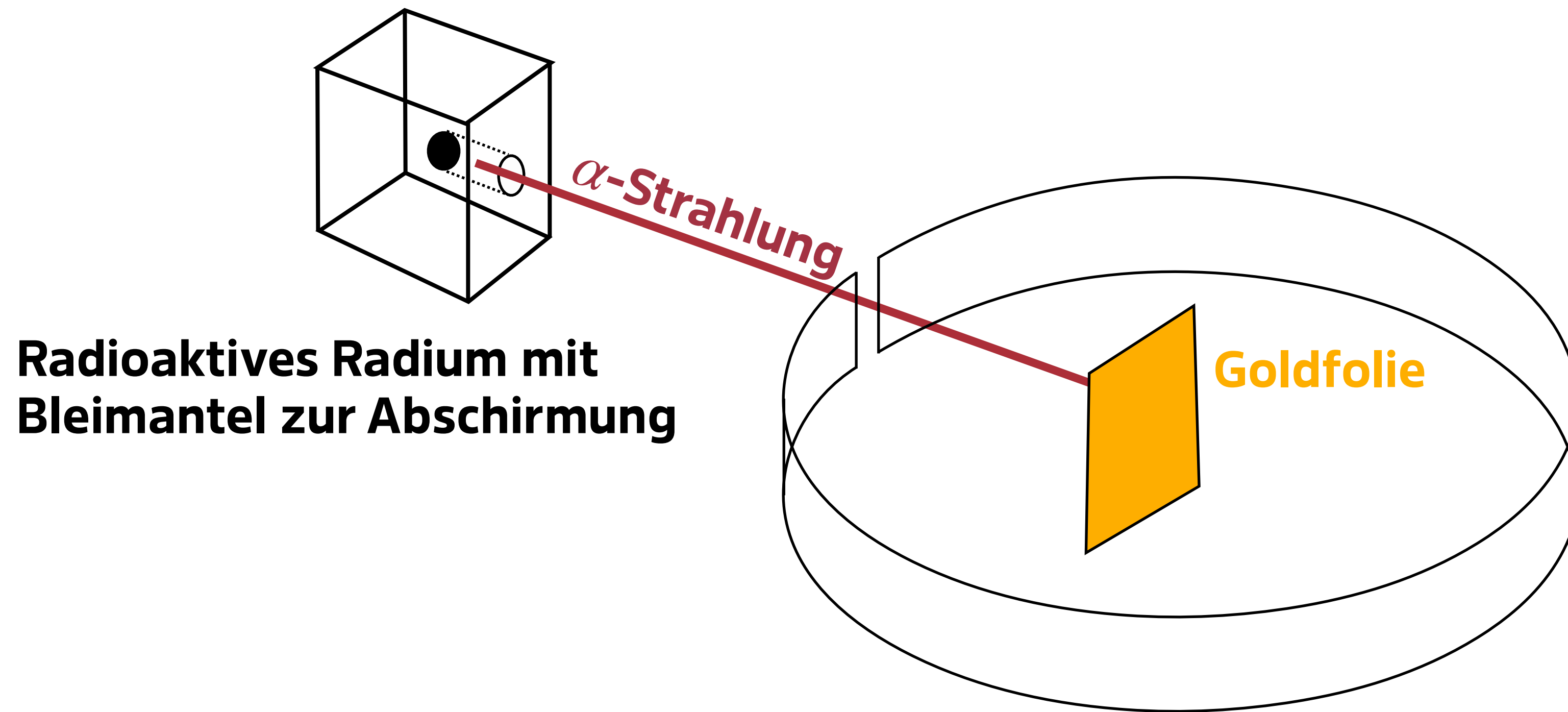
Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909



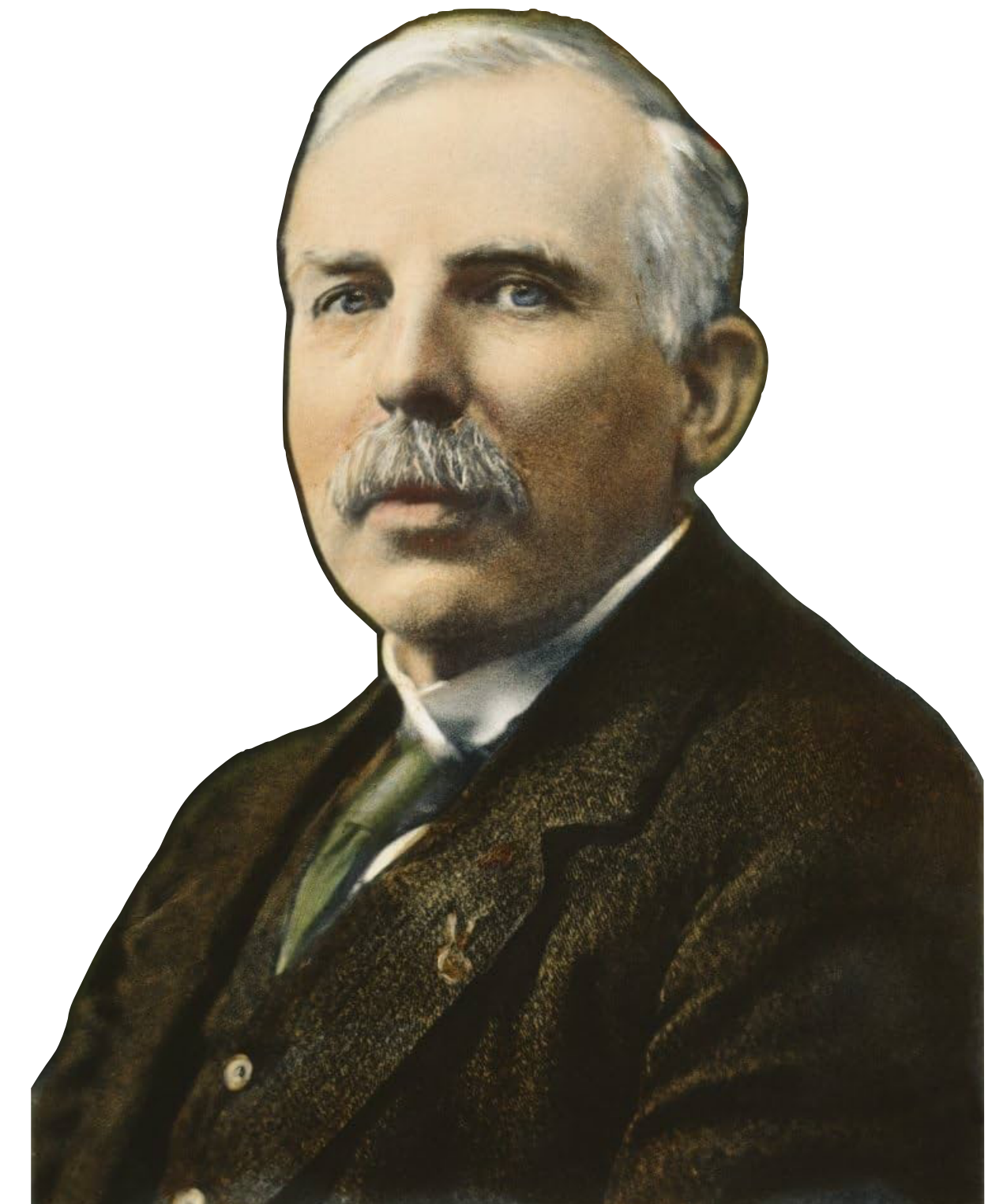
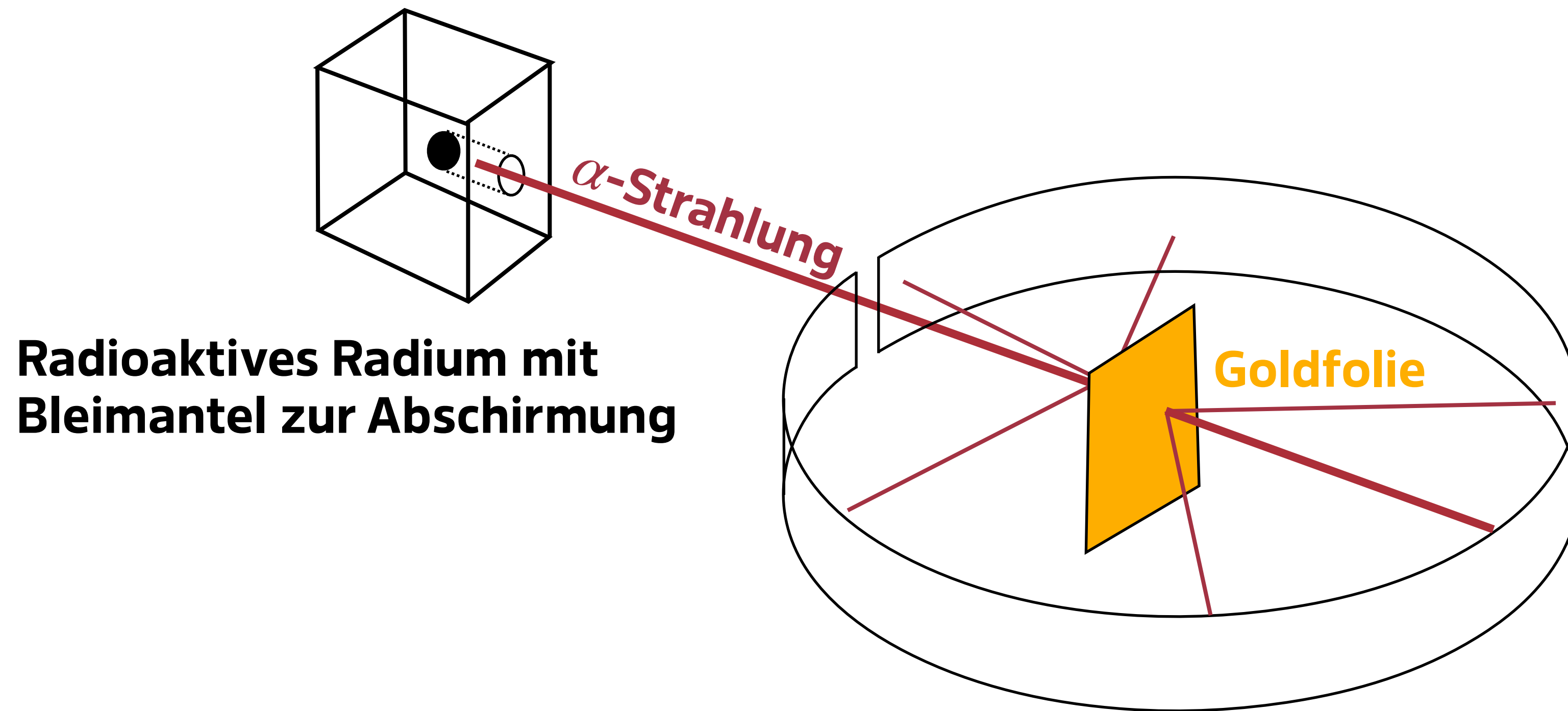
**Radioaktives Radium mit
Bleimantel zur Abschirmung**



Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909

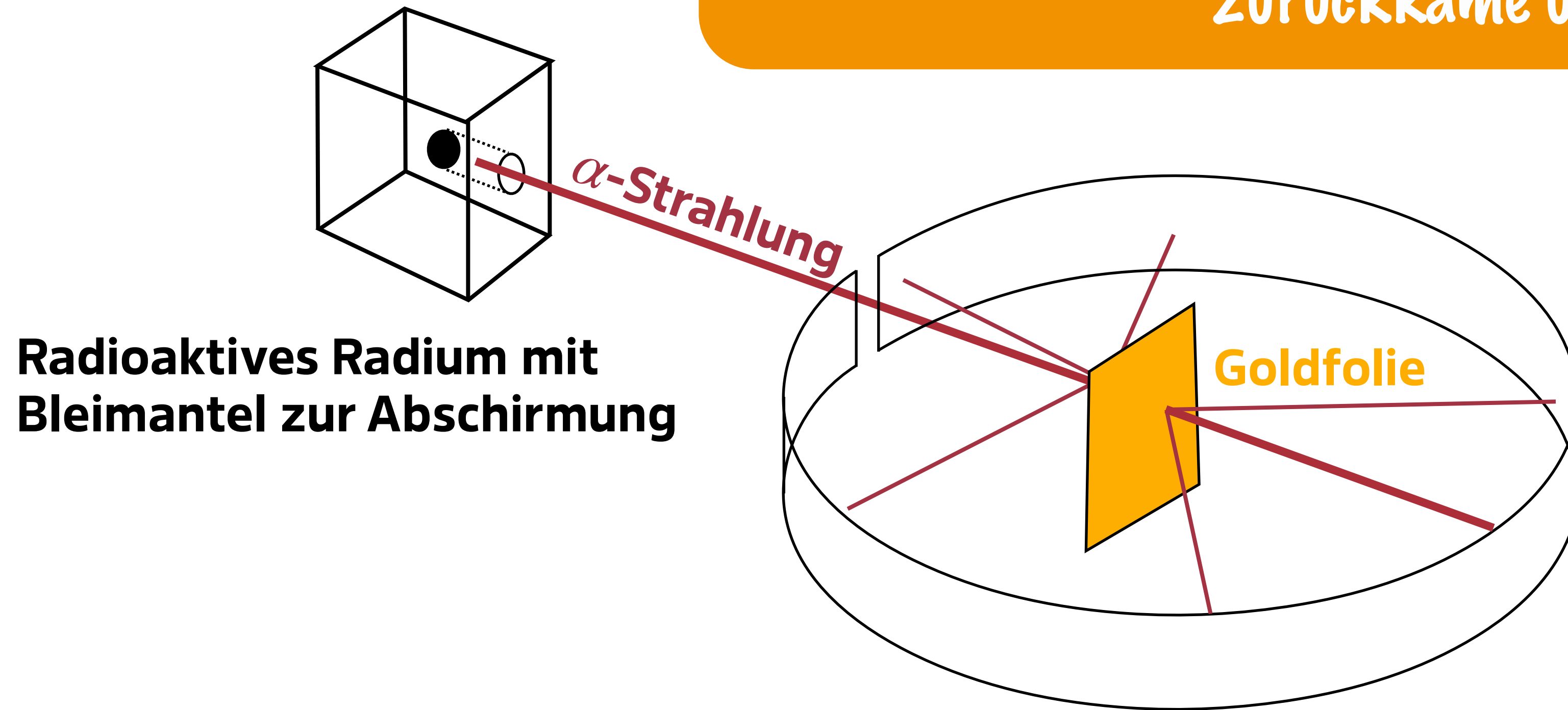


Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909



Entdeckung des Atomkerns, Rutherford 1909

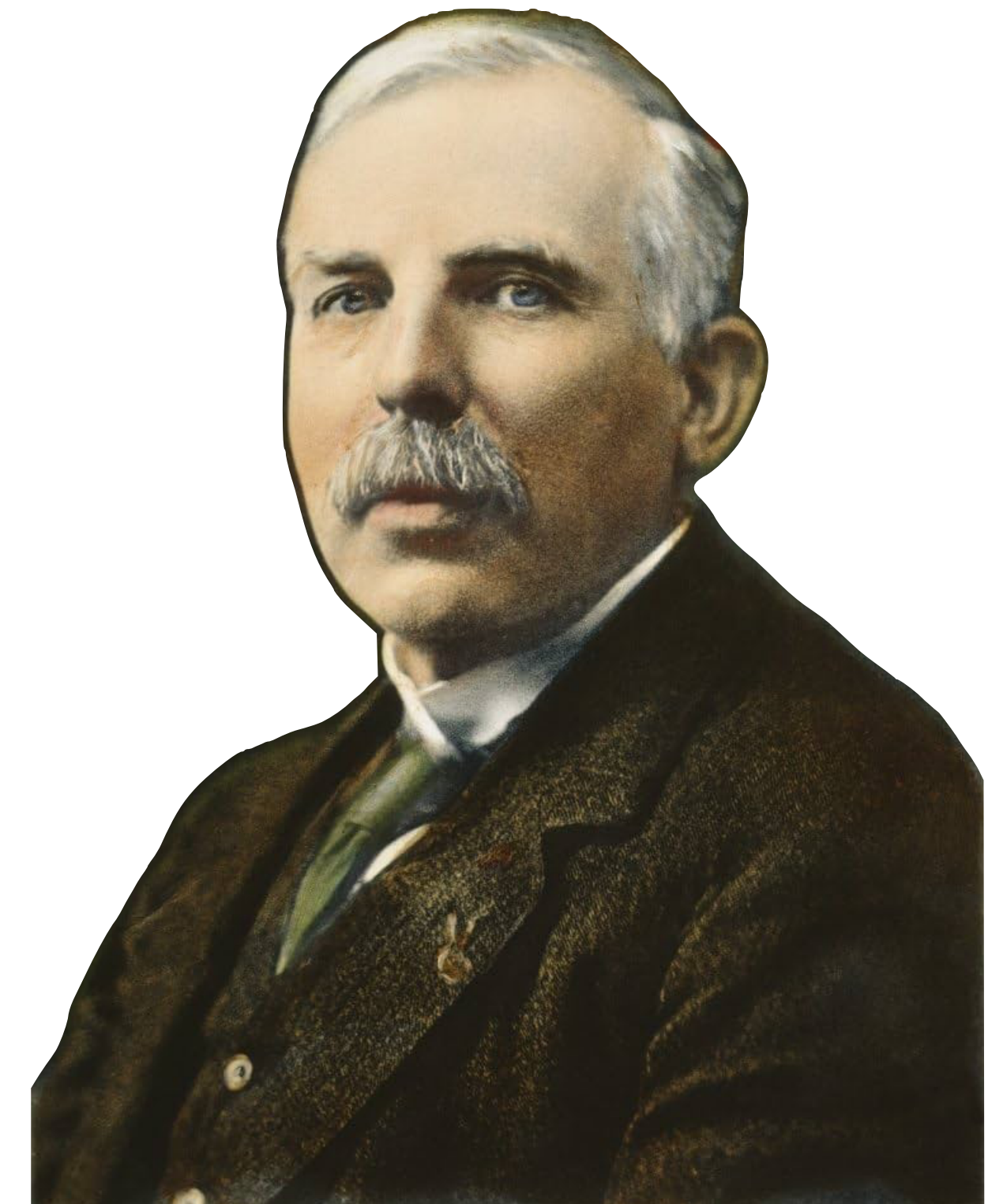
„Das unglaublichste Ereignis meines Lebens, [...] als ob man eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier schösse und sie zurückkäme und einen träfe“



Radioaktives Radium mit
Bleimantel zur Abschirmung

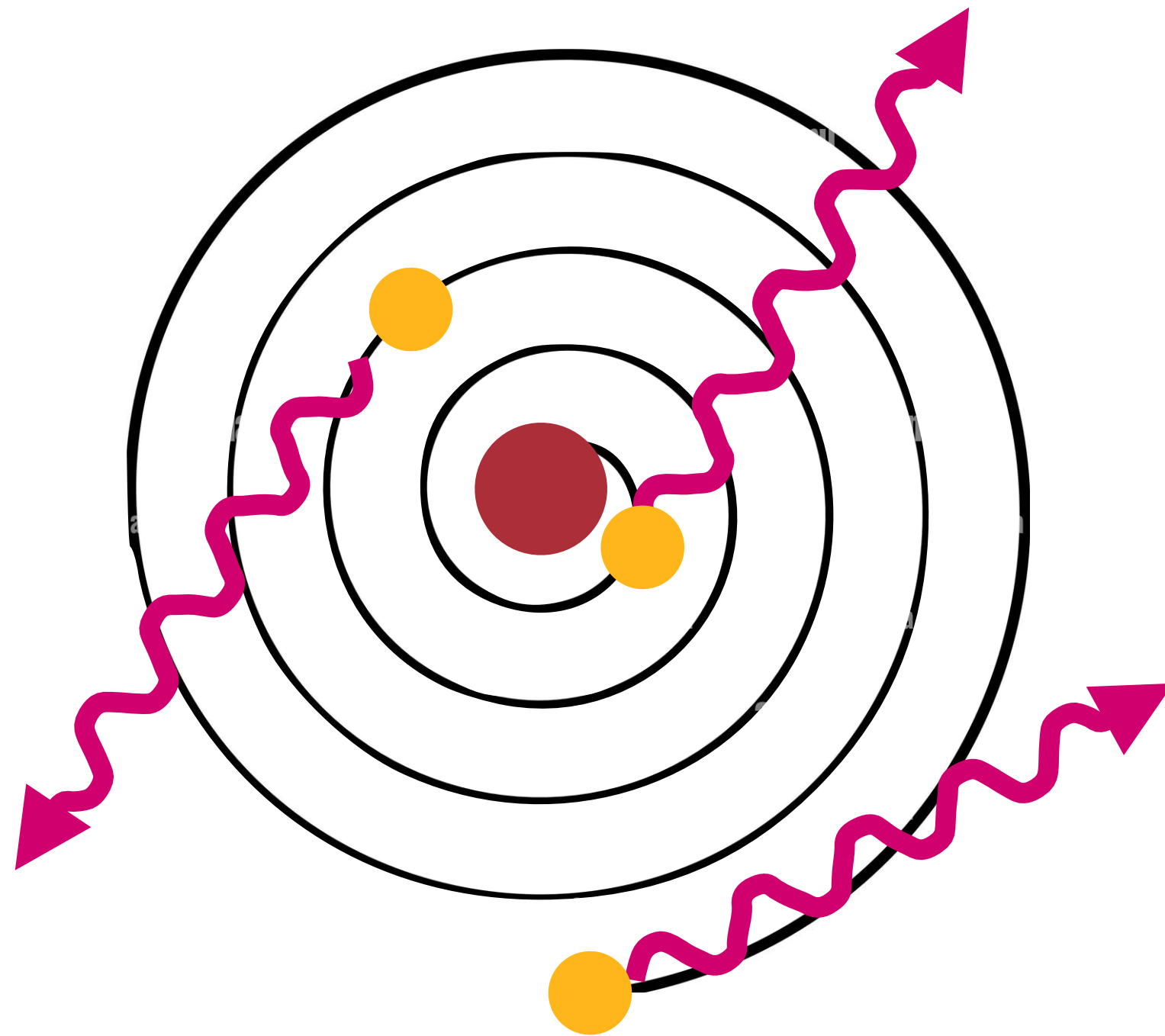
Goldfolie

**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*!

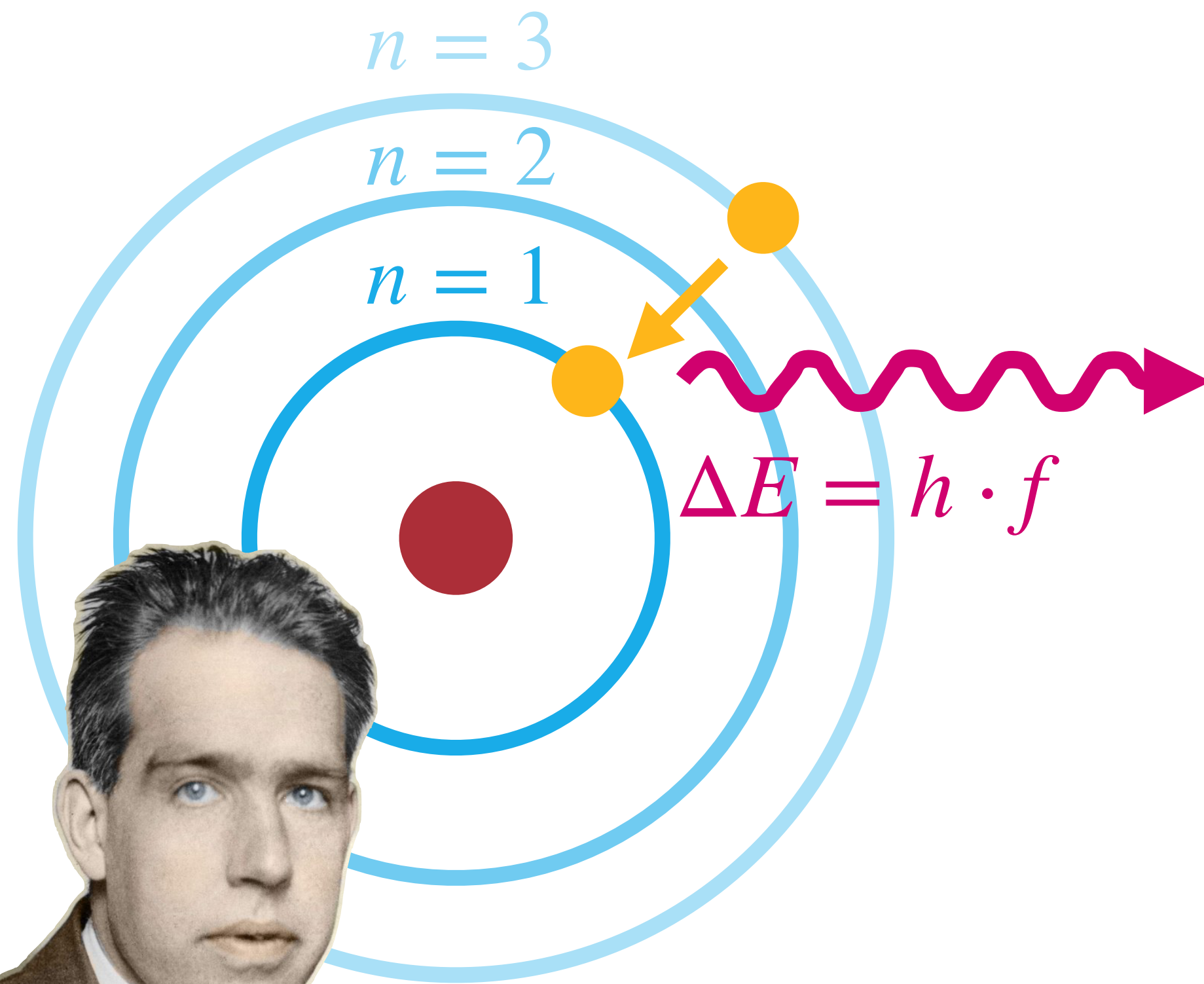
* Das war auch schon J.J. Thomson bei Formulierung seines Rosinenkuchen-Models klar, ihm aber egal.



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 $-1/n^2$.



Niels Bohr

Das Bohr'sche Atommodell, 1913



Sichtbare Emissionslinien des Wasserstoffs

Postulate:

Wie lassen sich diese scheinbar willkürlichen Postulate begründen?

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

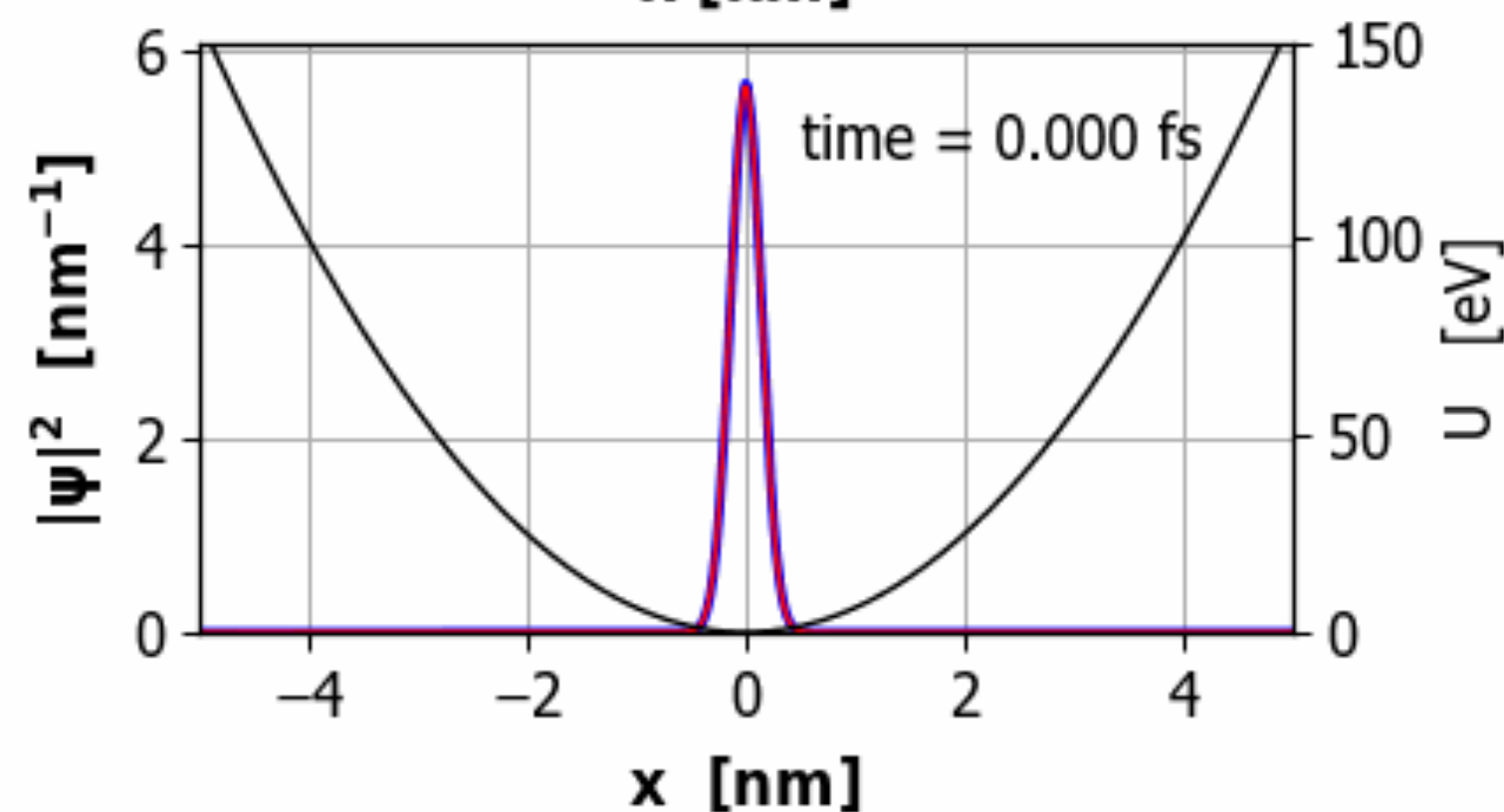
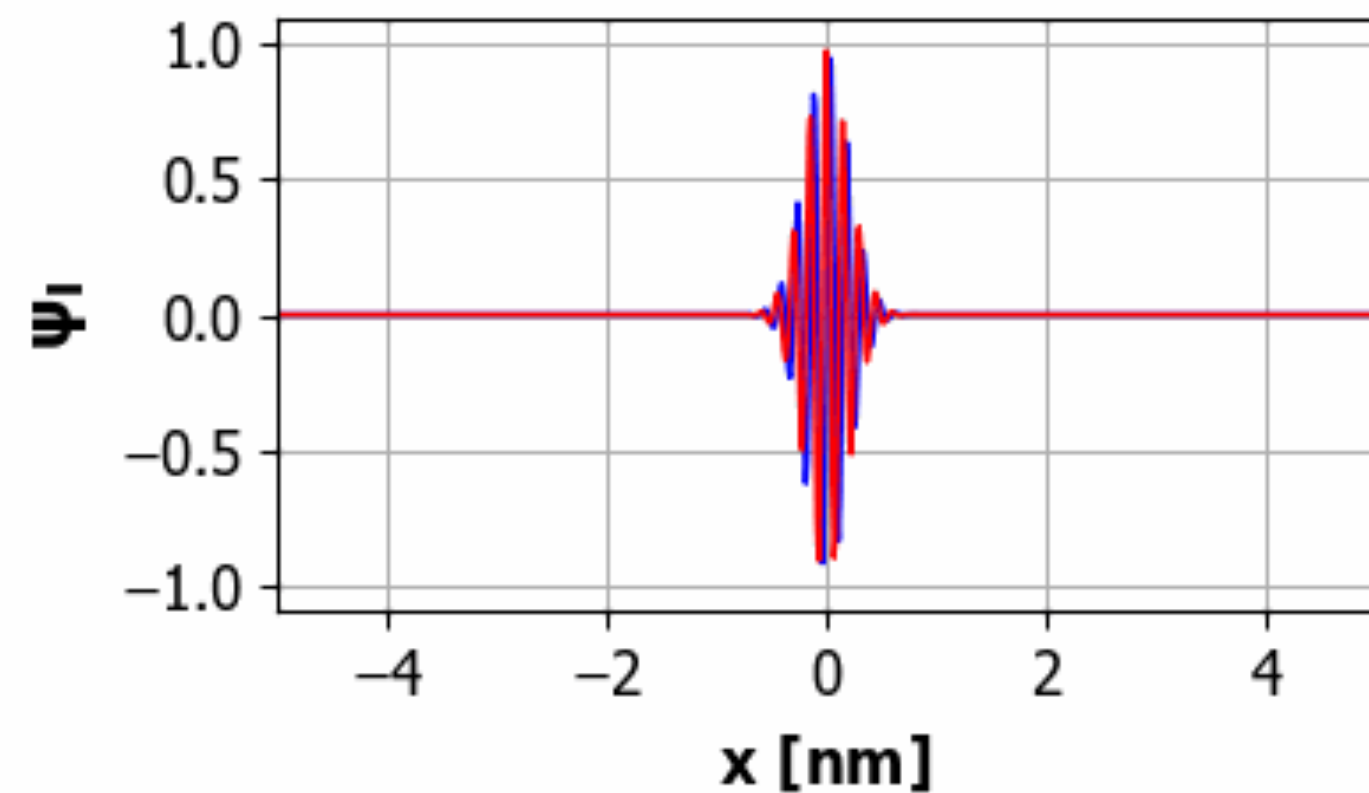
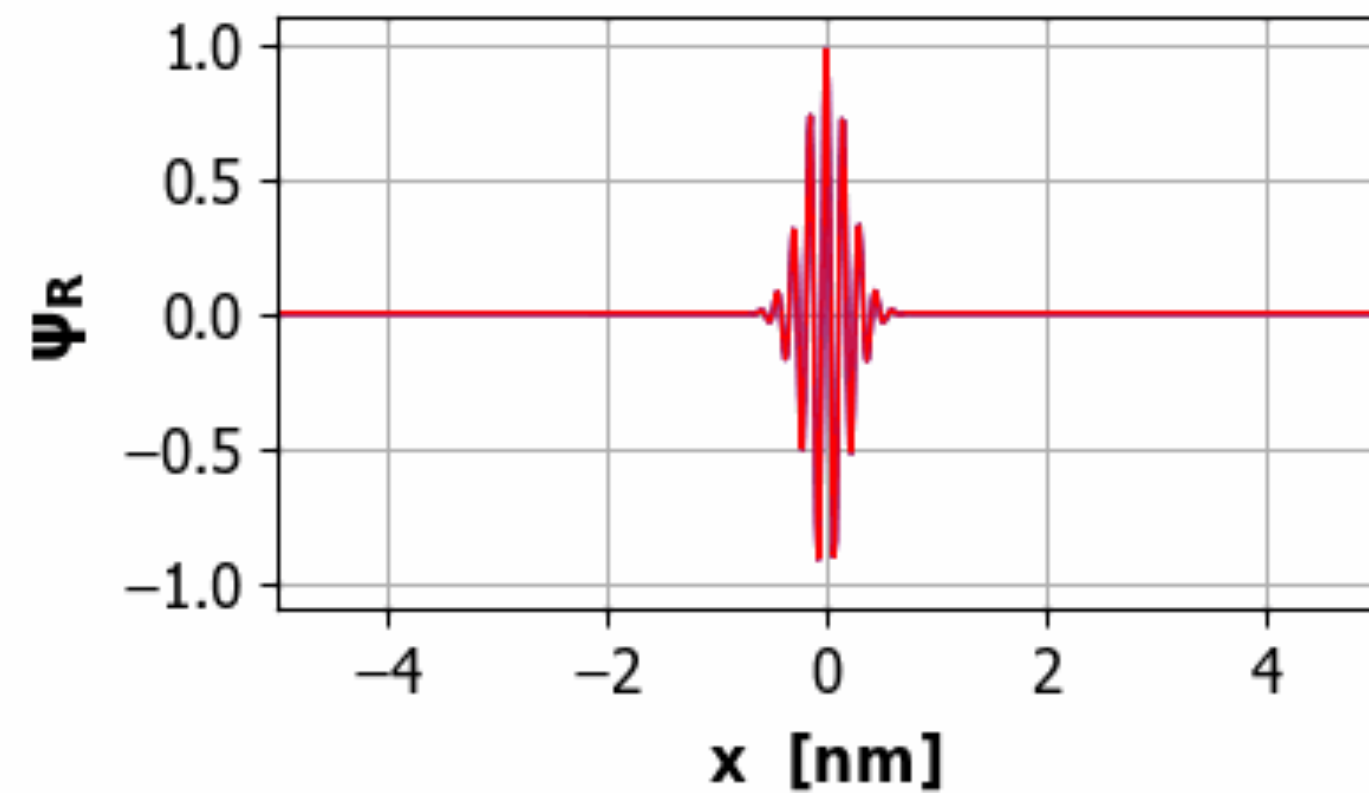


Nils Bohr

Die Schrödinger-Gleichung, 1926



Erwin
Schrödinger



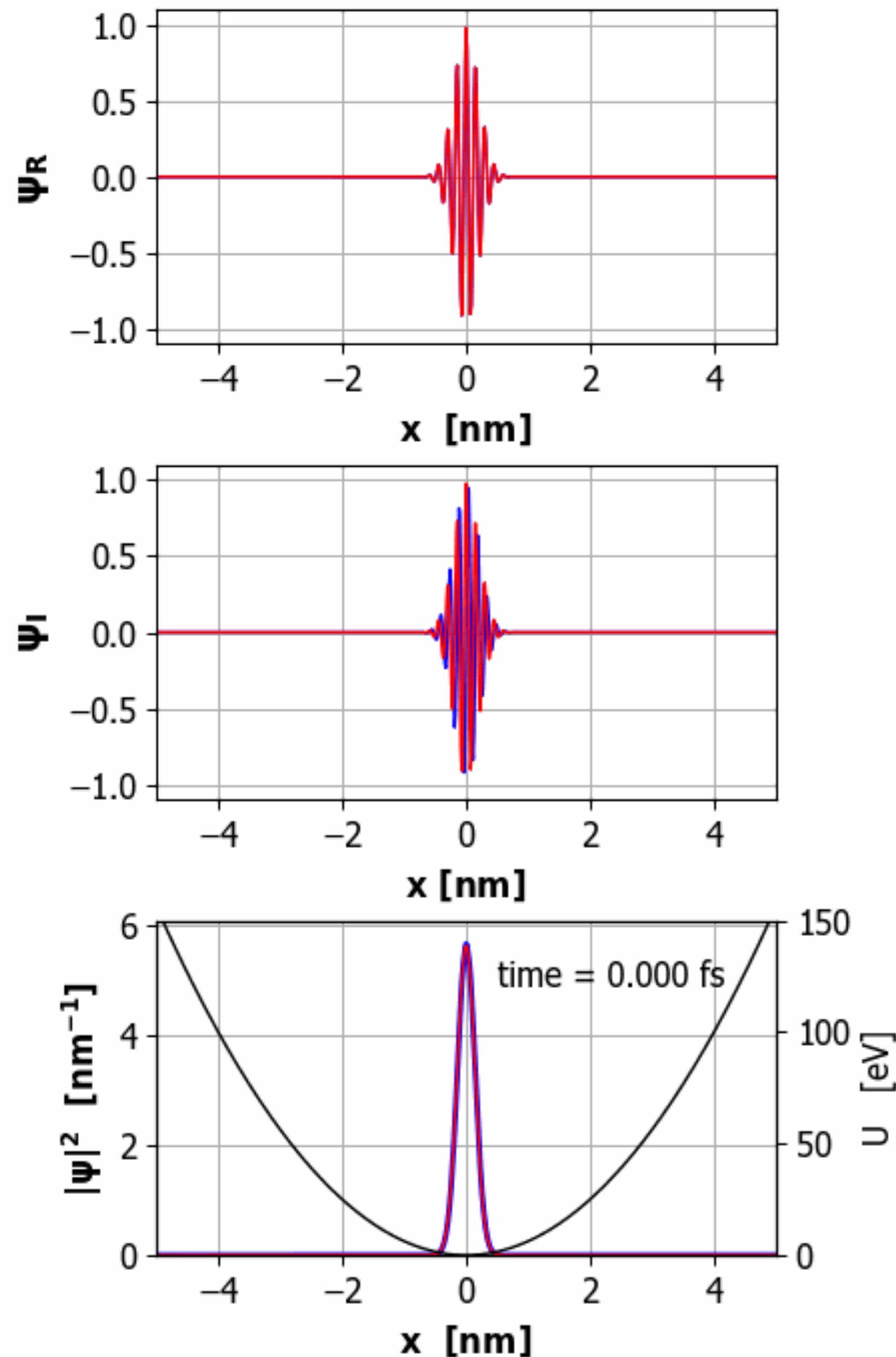
$$\hat{H} |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

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.

Die Schrödinger-Gleichung, 1926



Erwin
Schrödinger

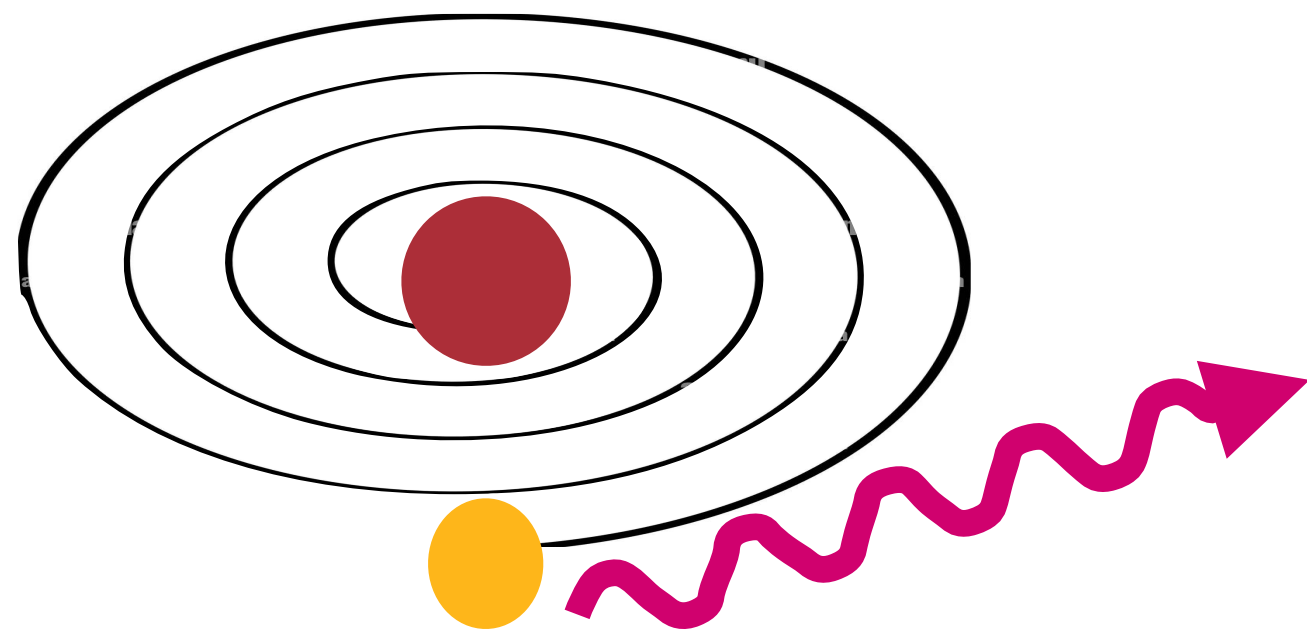


$$\hat{H} |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

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?

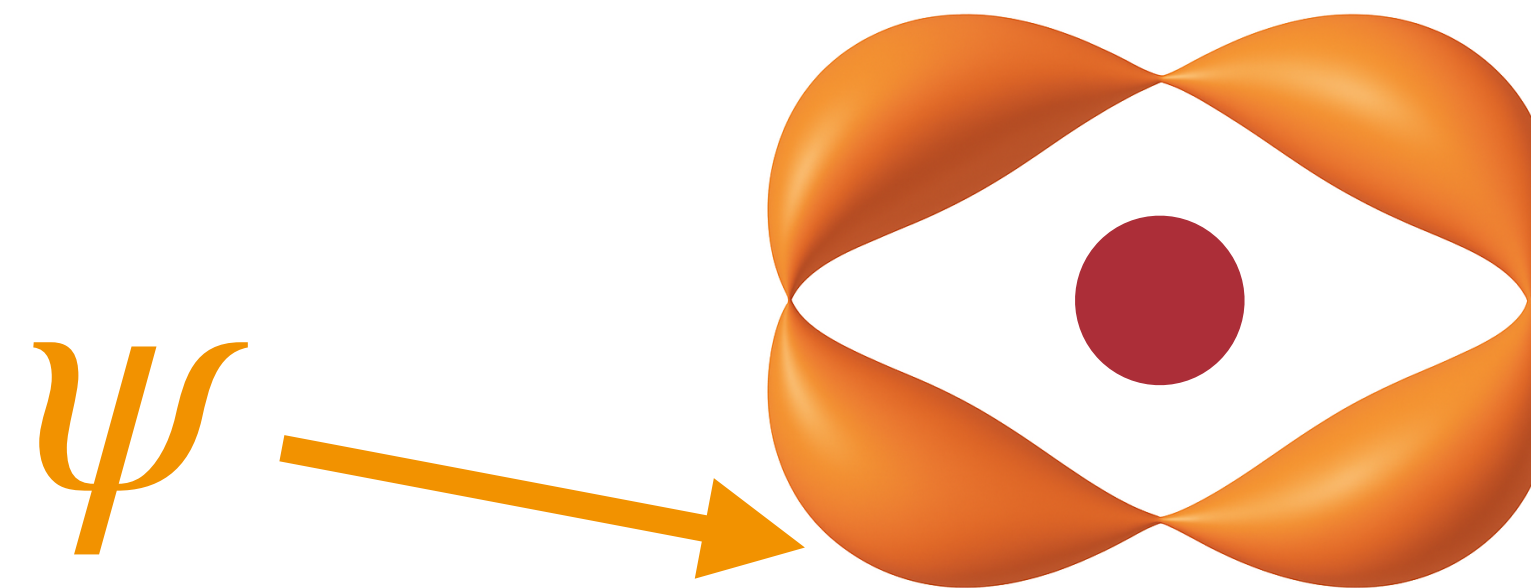
Klassisch:



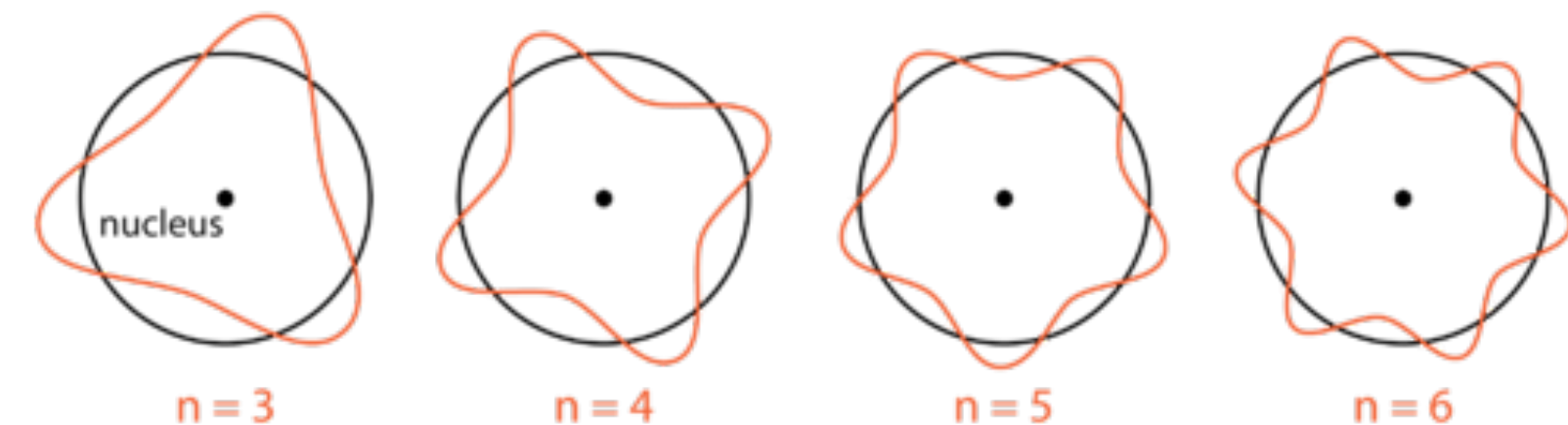
Das **Elektron** umkreist als Teilchen den **Kern**. Das Elektron stürzt nach Sekundenbruchteilen in den Kern, weil es Energie durch **Strahlung** verliert.



Quantenmechanisch:

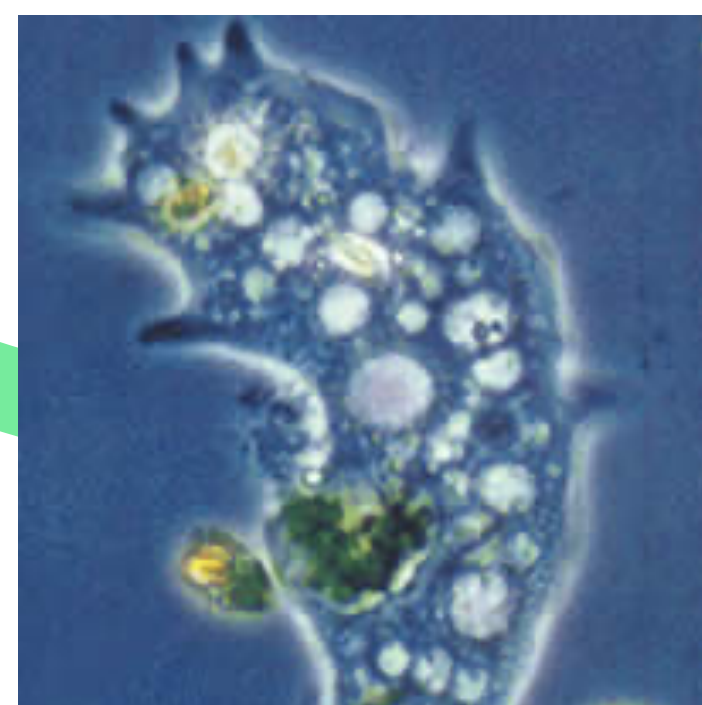


Die **Wellenfunktion** des Elektrons formt eine **stehende Welle** um den **Kern**. Es wird keine Strahlung emittiert, da sich keine Ladungen bewegen.

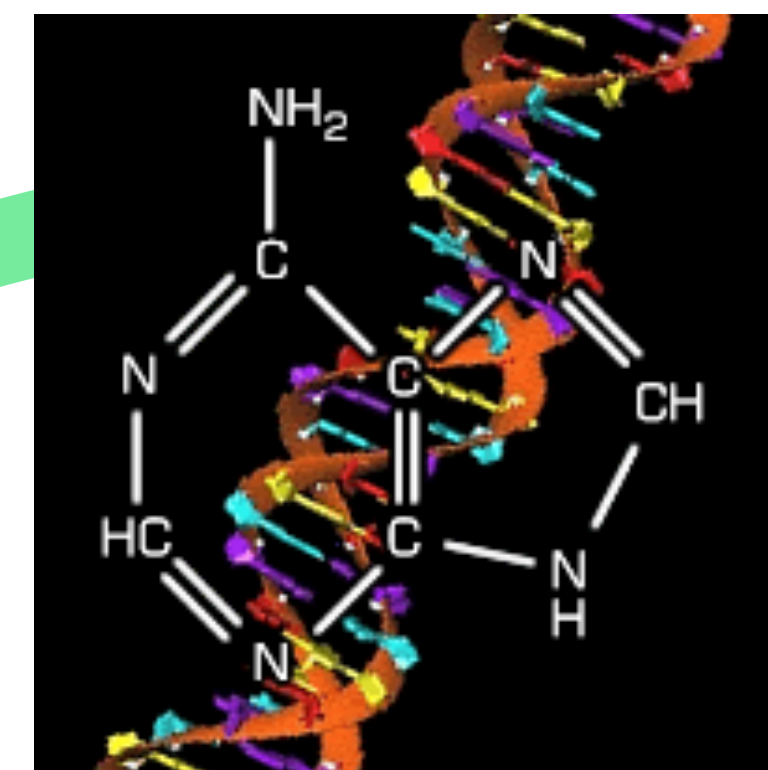




**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



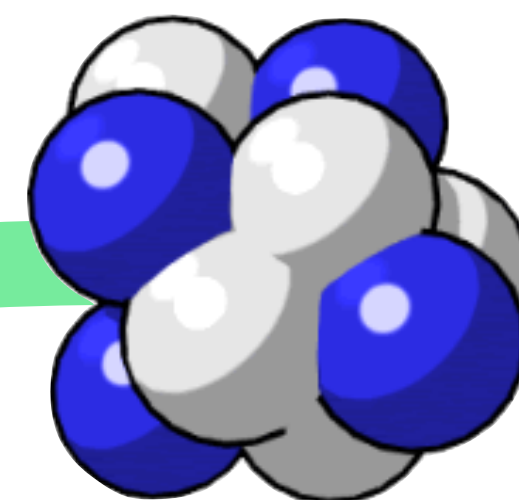
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



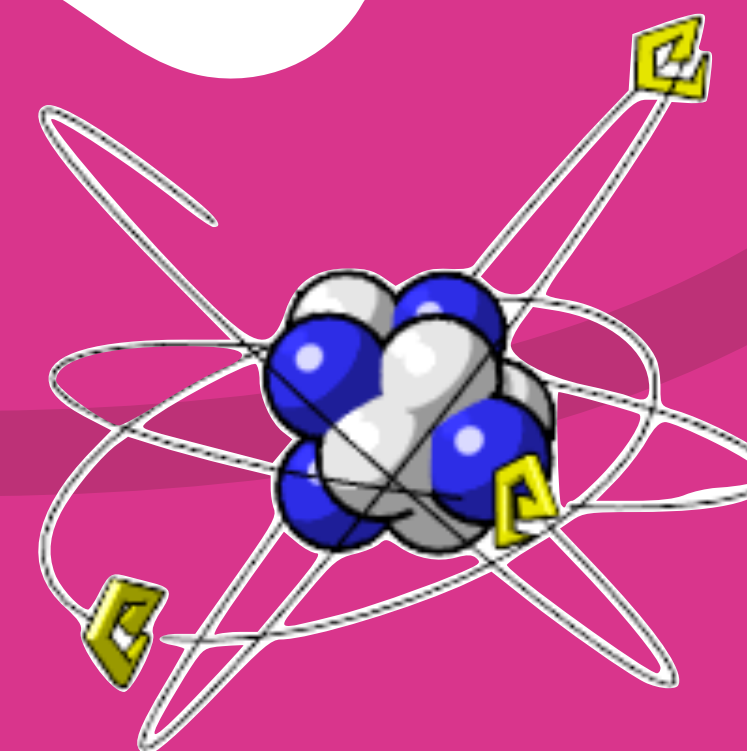
**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



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



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

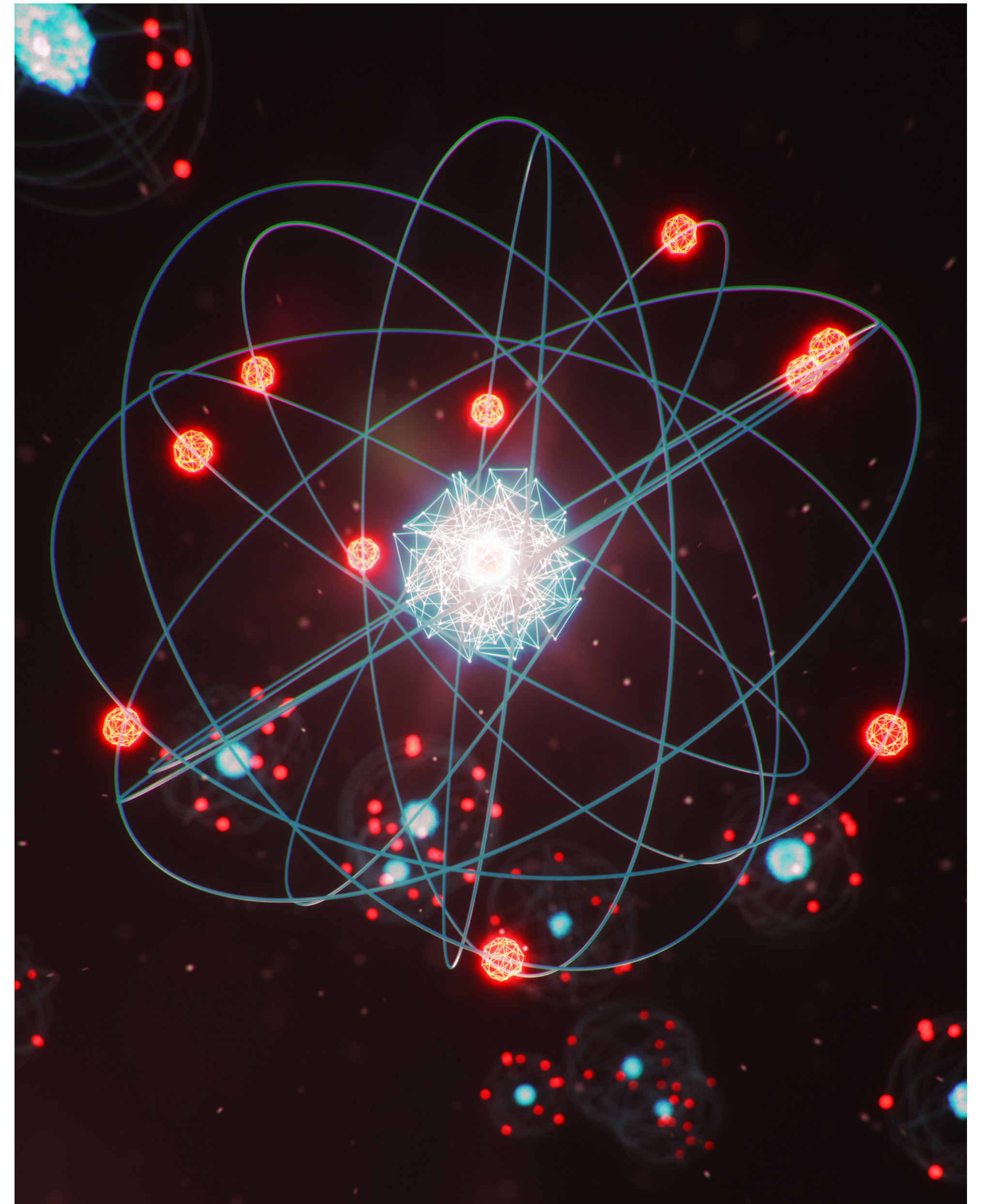


**Das Atom der Chemie:
Das Atom**



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 „Kernspalterei“, 31.07.2025

Dr. Carlo Tasillo

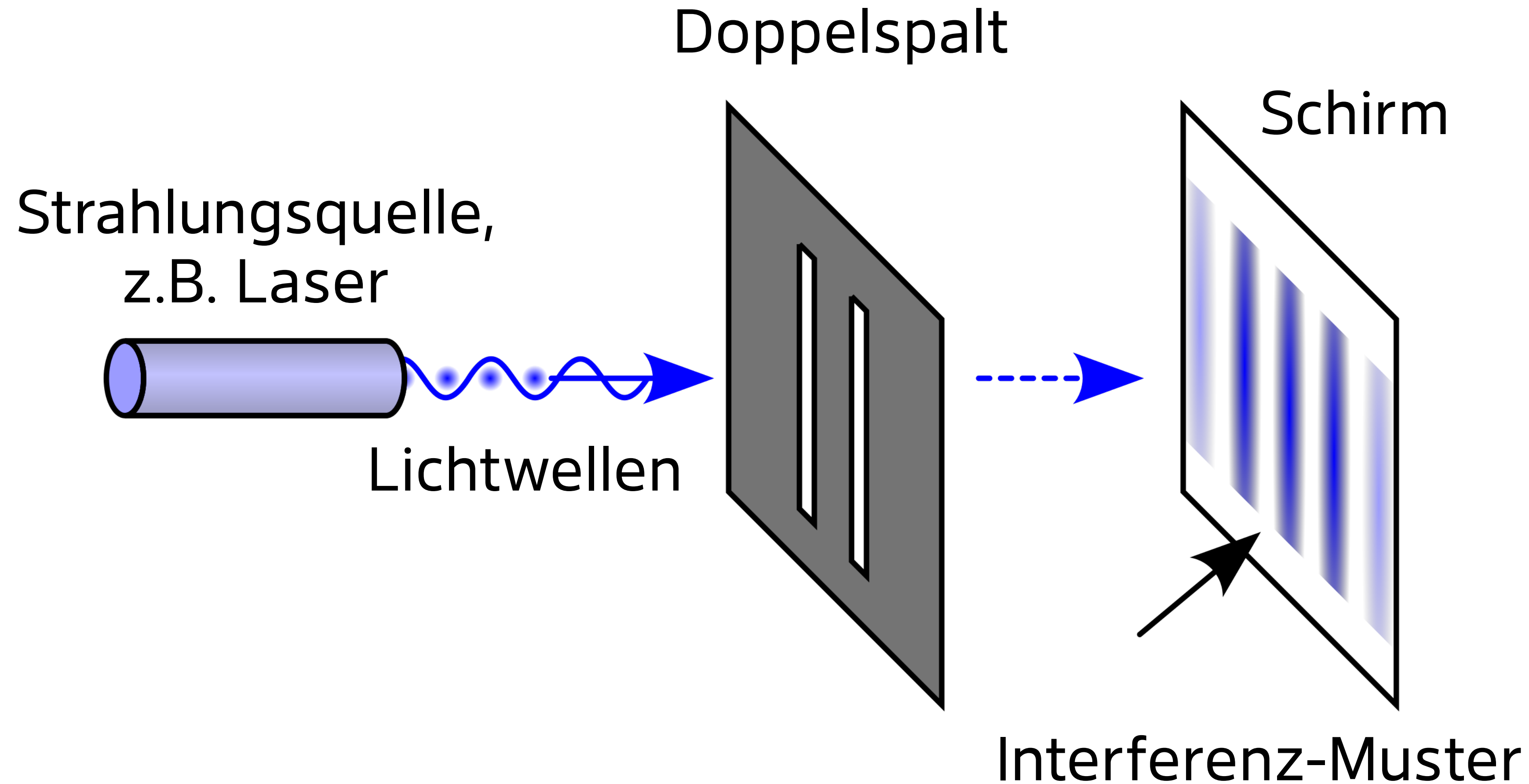
Postdoctoral researcher
Department of Physics and Astronomy
Uppsala University

carlo.tasillo@physics.uu.se



UPPSALA
UNIVERSITET

Doppelspalt-Experiment, Young 1801

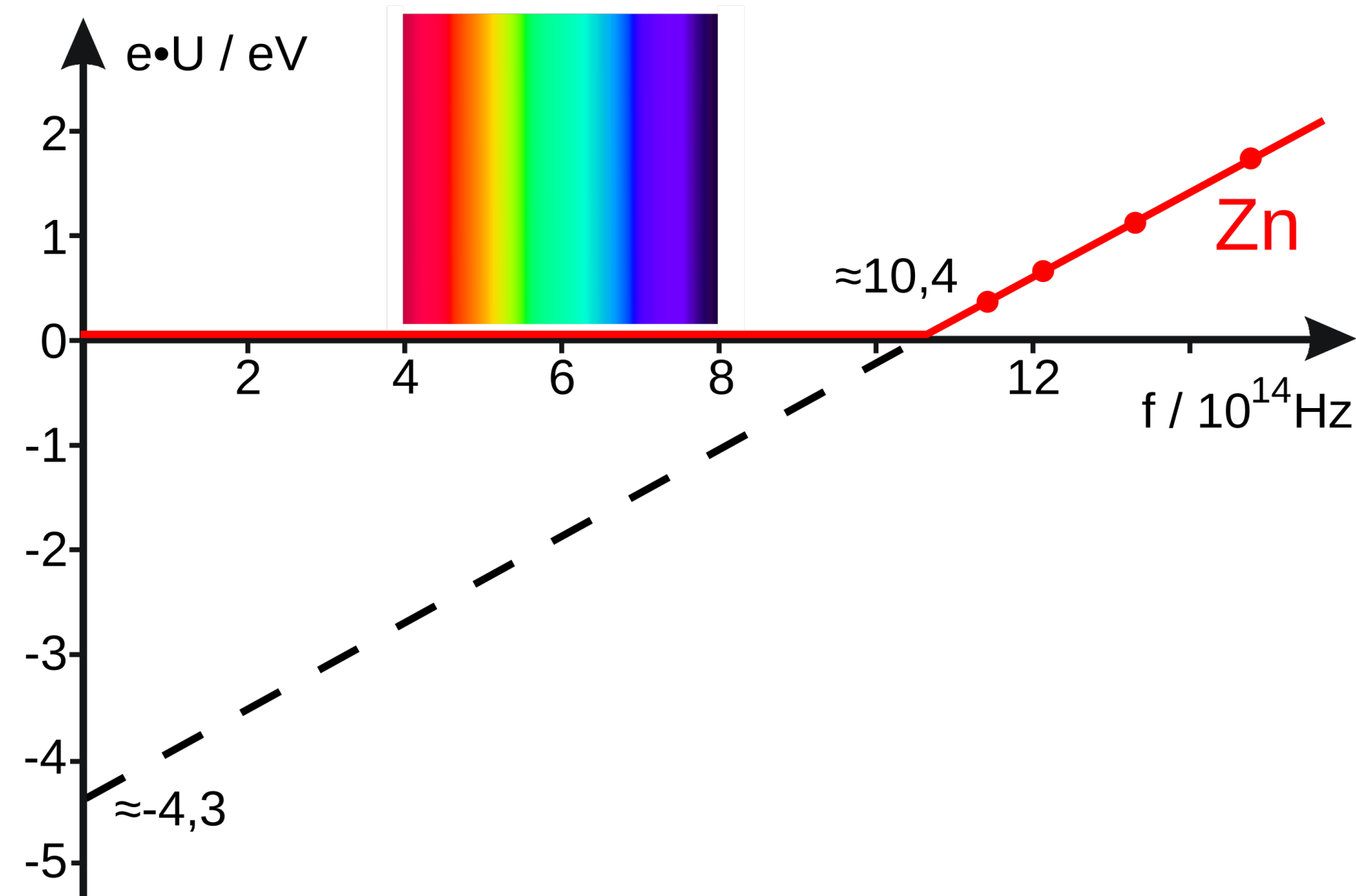
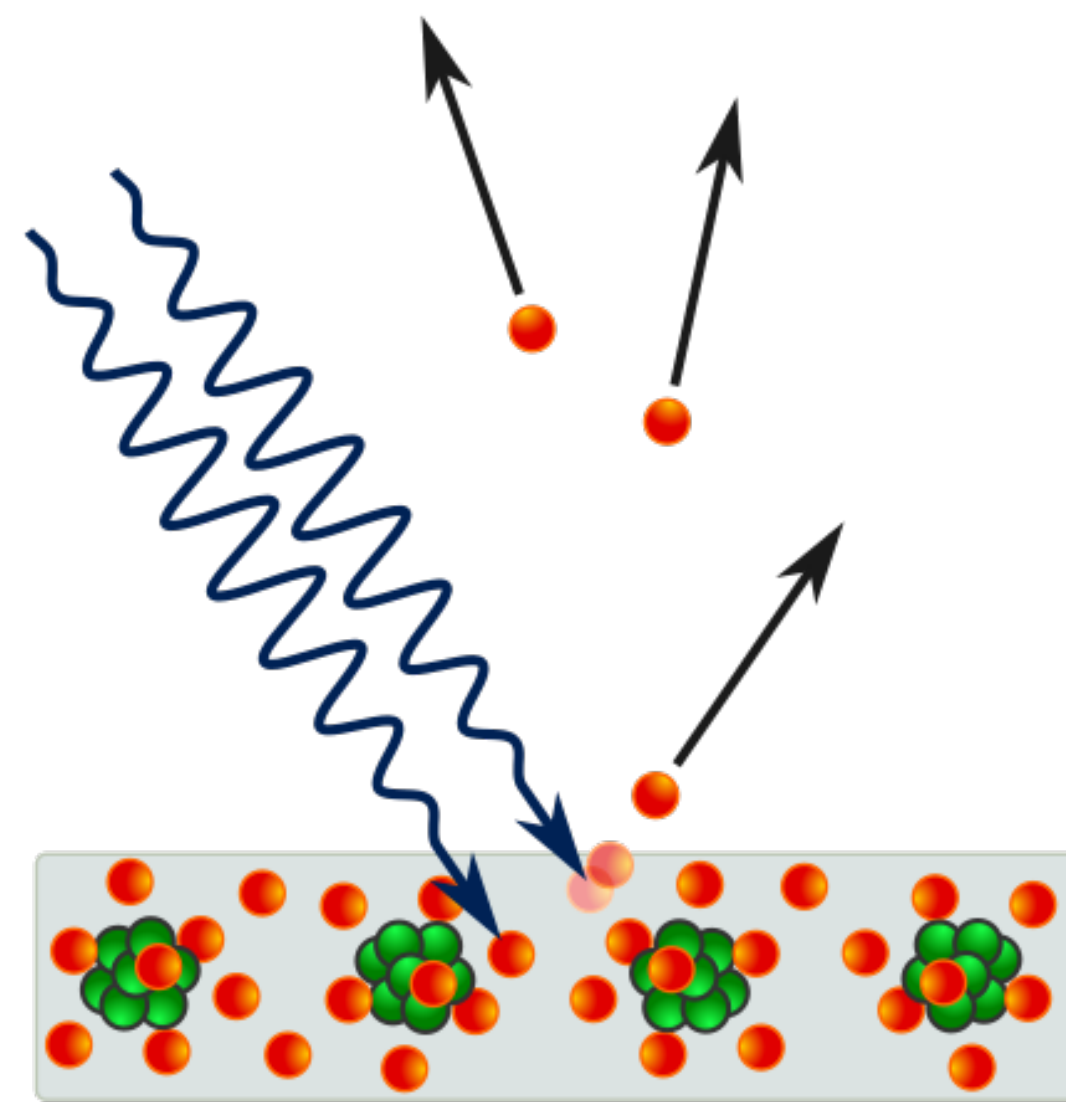


<https://www.falstad.com/ripple/>

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.

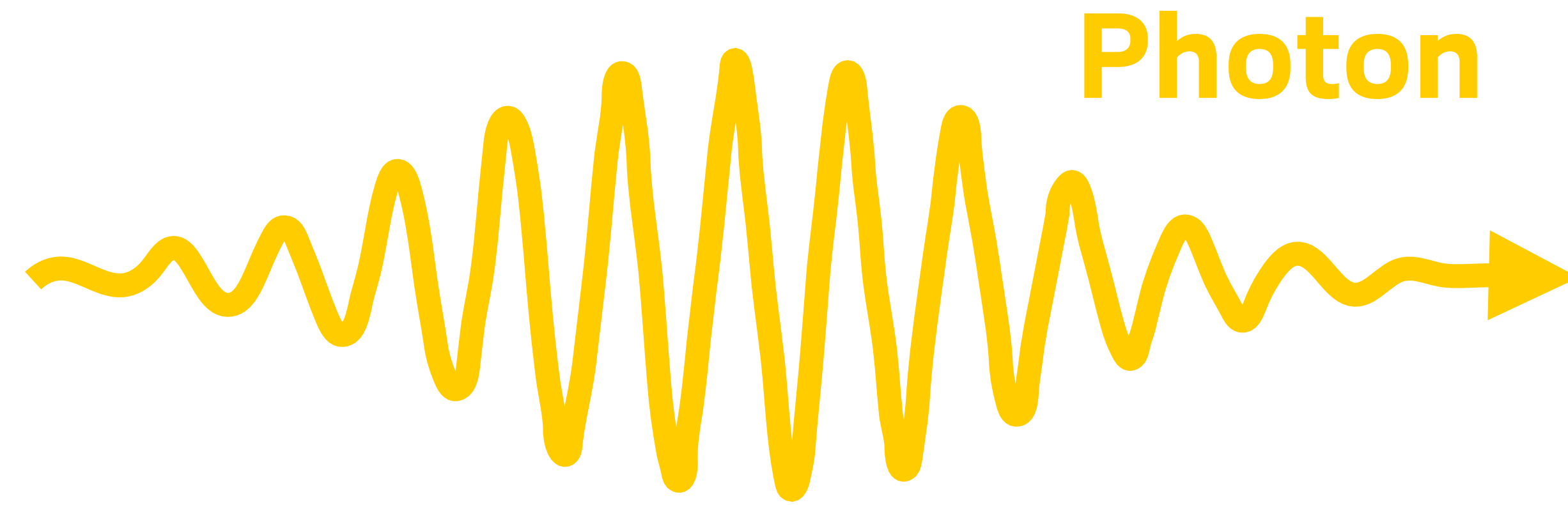
Licht ist also ein Teilchen der Energie $E = h \cdot f$.

Albert Einstein



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



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 werden. Dennoch hat das Licht auch Welleneigenschaften.

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

Lichtwelle:
Elektromagnetische Wellen
⇒ Interferenzen



Lichtteilchen:
Photonen
⇒ Photoelektrischer Effekt



Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht



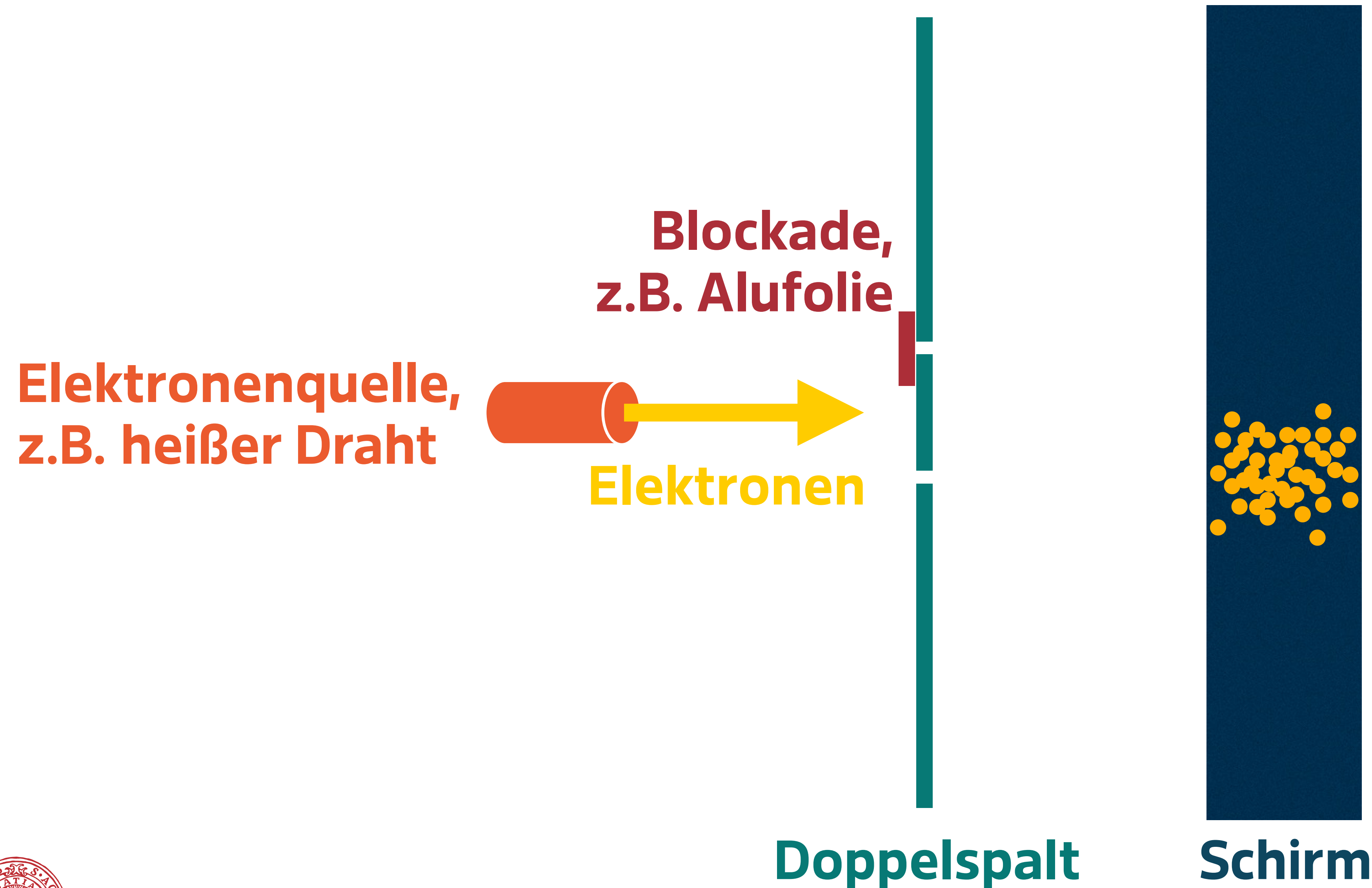
Blockade,
z.B. Alufolie

Doppelspalt

Schirm



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

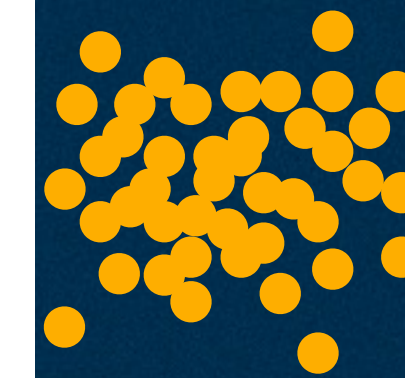
Elektronen



Blockade,
z.B. Alufolie

Doppelspalt

Schirm



Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht

Elektronen



Doppelspalt

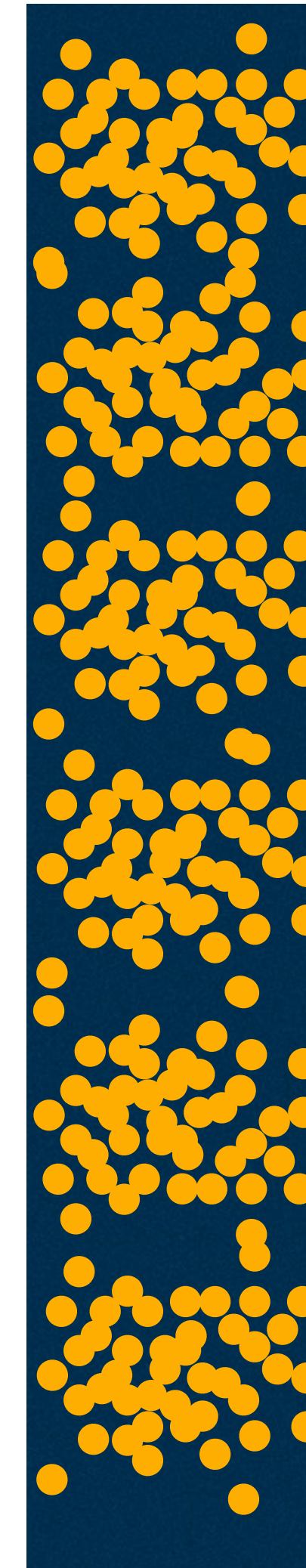
Schirm



Doppelspalt mit Elektronen

Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht

Elektronen

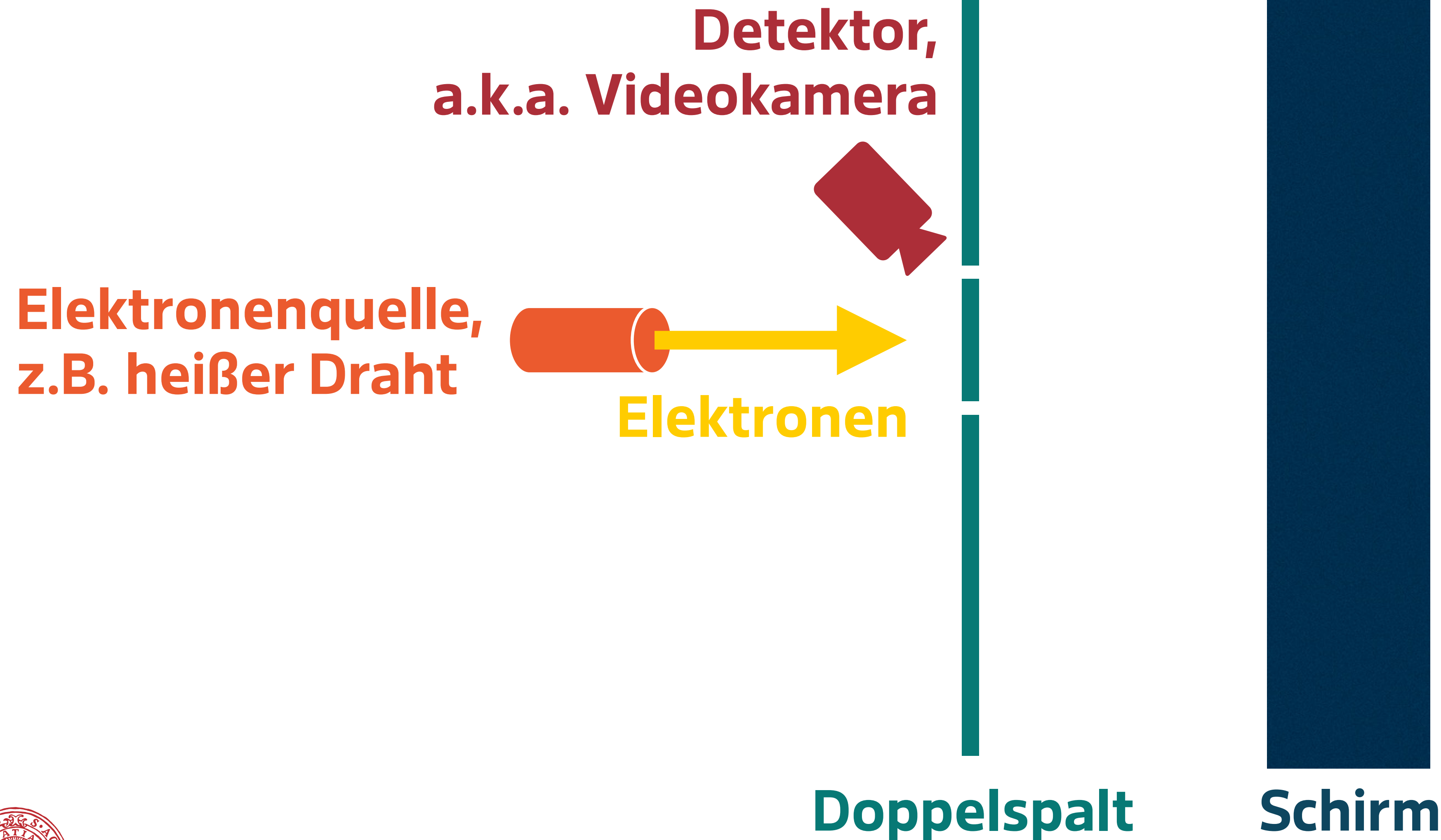


Doppelspalt

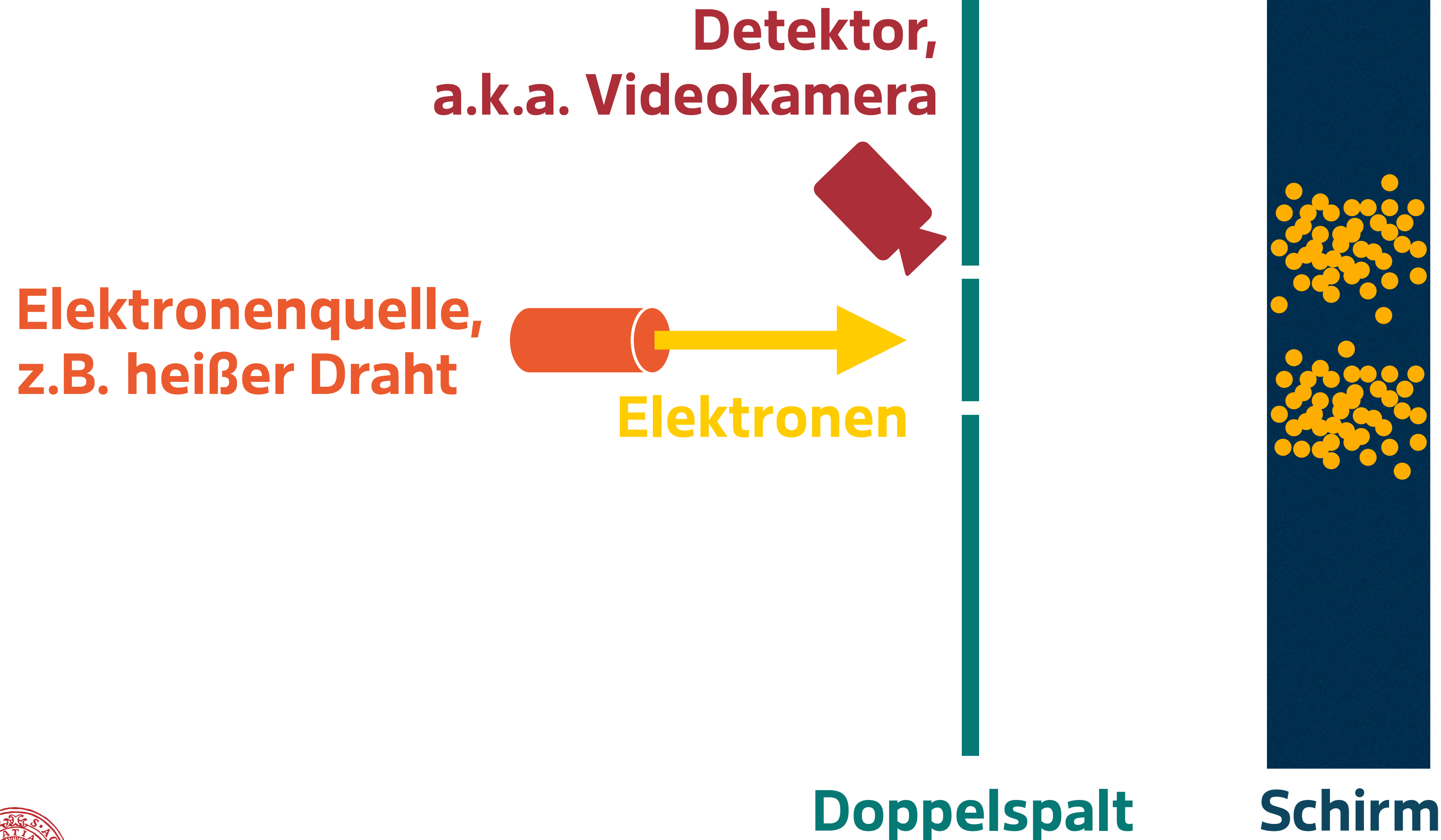
Schirm



Doppelspalt mit Elektronen



Doppelspalt mit Elektronen

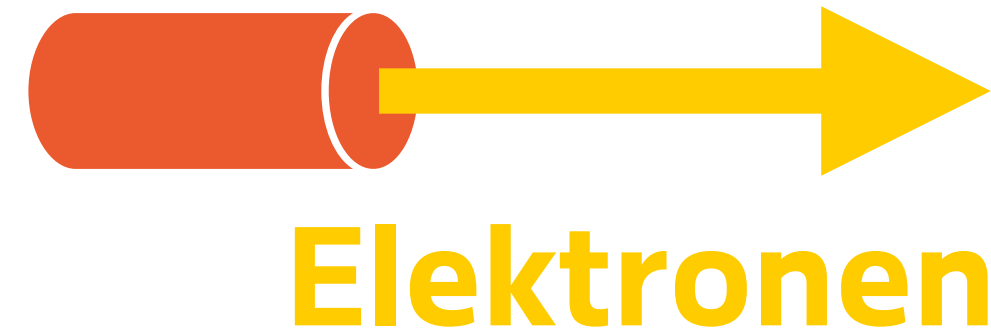


Doppelspalt mit Elektronen

**Ausgeschalteter Detektor,
a.k.a. Videokamera**



**Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht**



Elektronen

Doppelspalt

Schirm



Doppelspalt mit Elektronen

**Ausgeschalteter Detektor,
a.k.a. Videokamera**

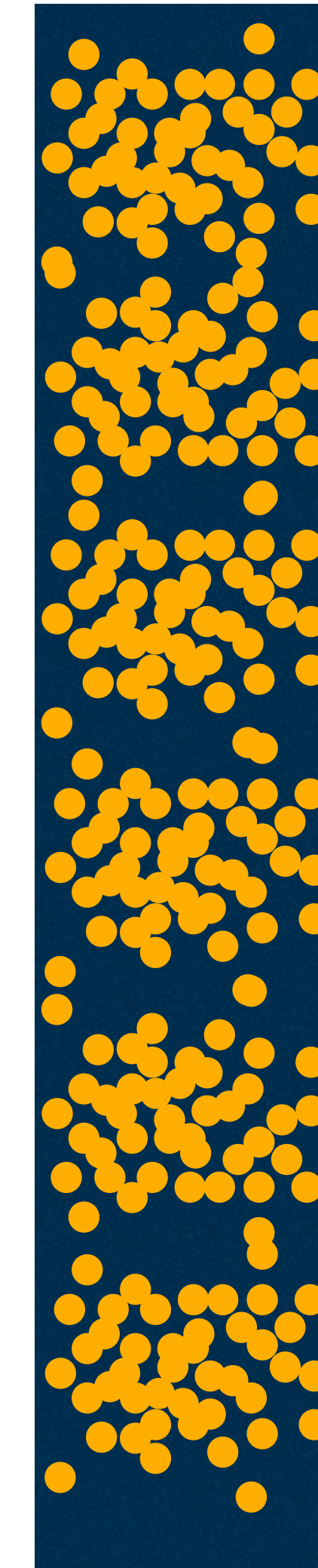


**Elektronenquelle,
z.B. heißer Draht**



Elektronen

Doppelspalt



Schirm

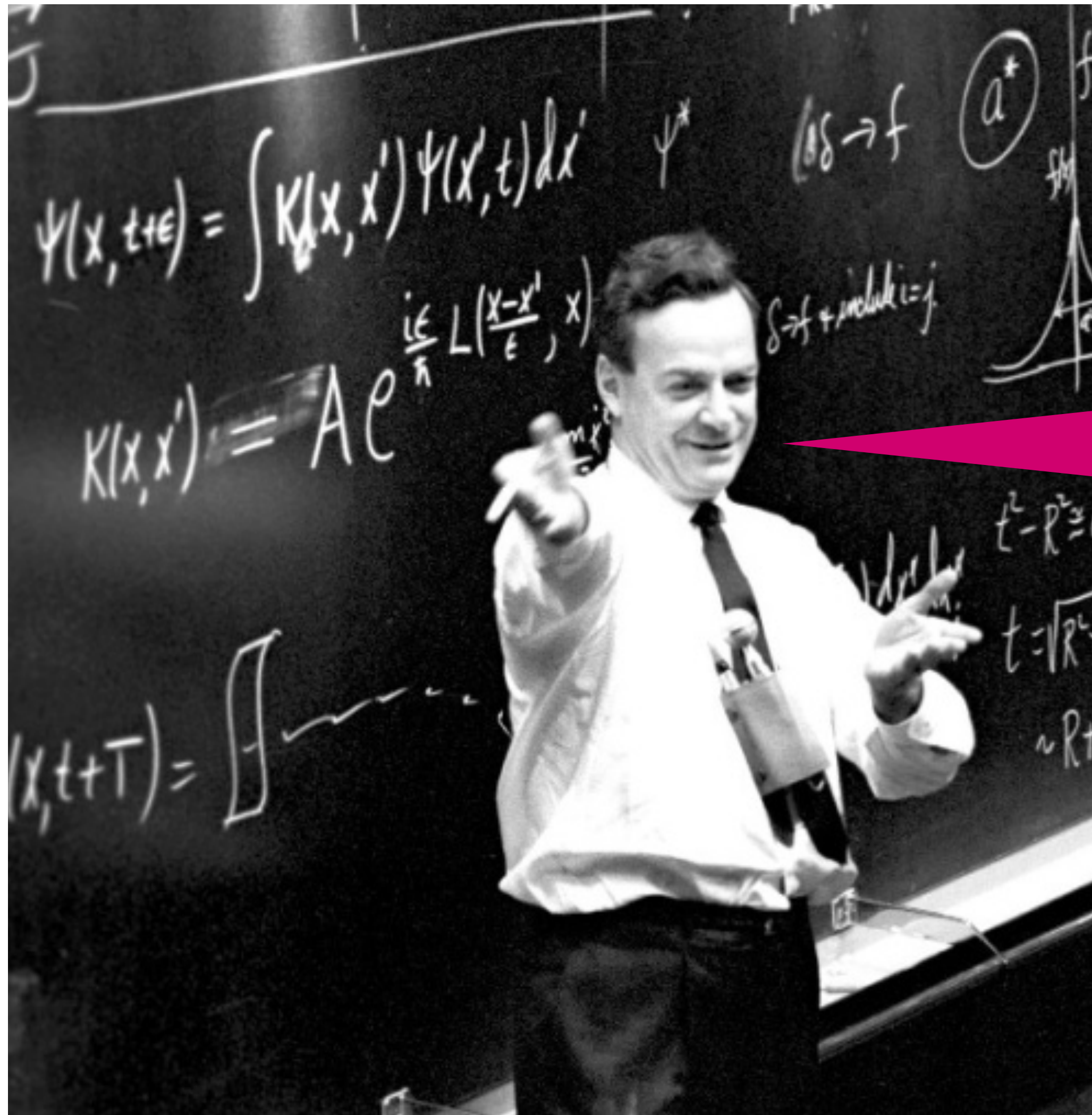


Äsops Parabel vom Fuchs und den Trauben



„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?

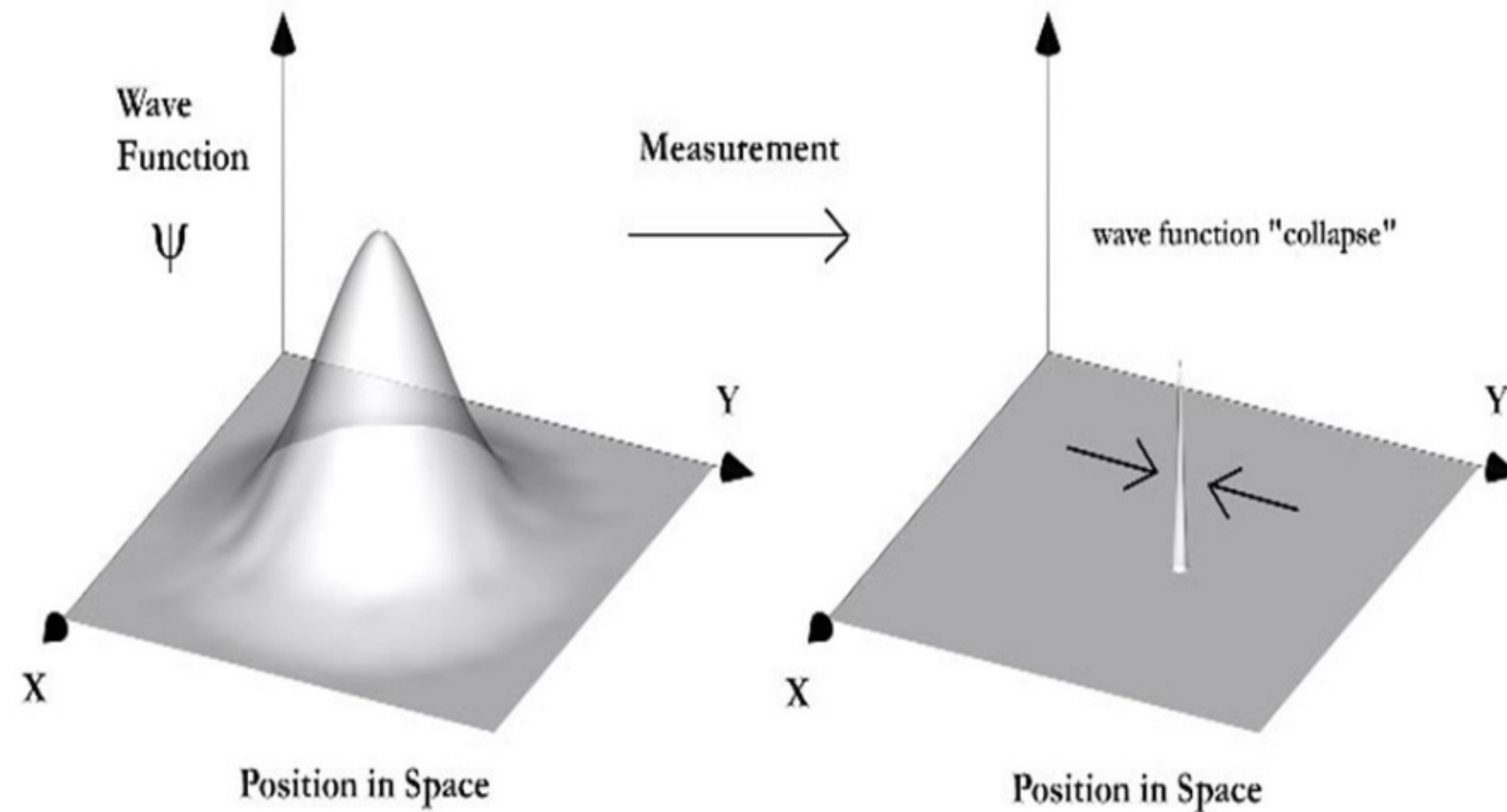


„I think I can safely say
that nobody understands
quantum mechanics.“

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



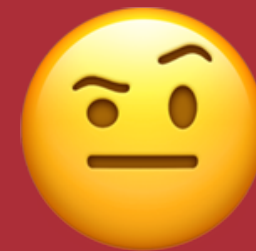
Die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik



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.



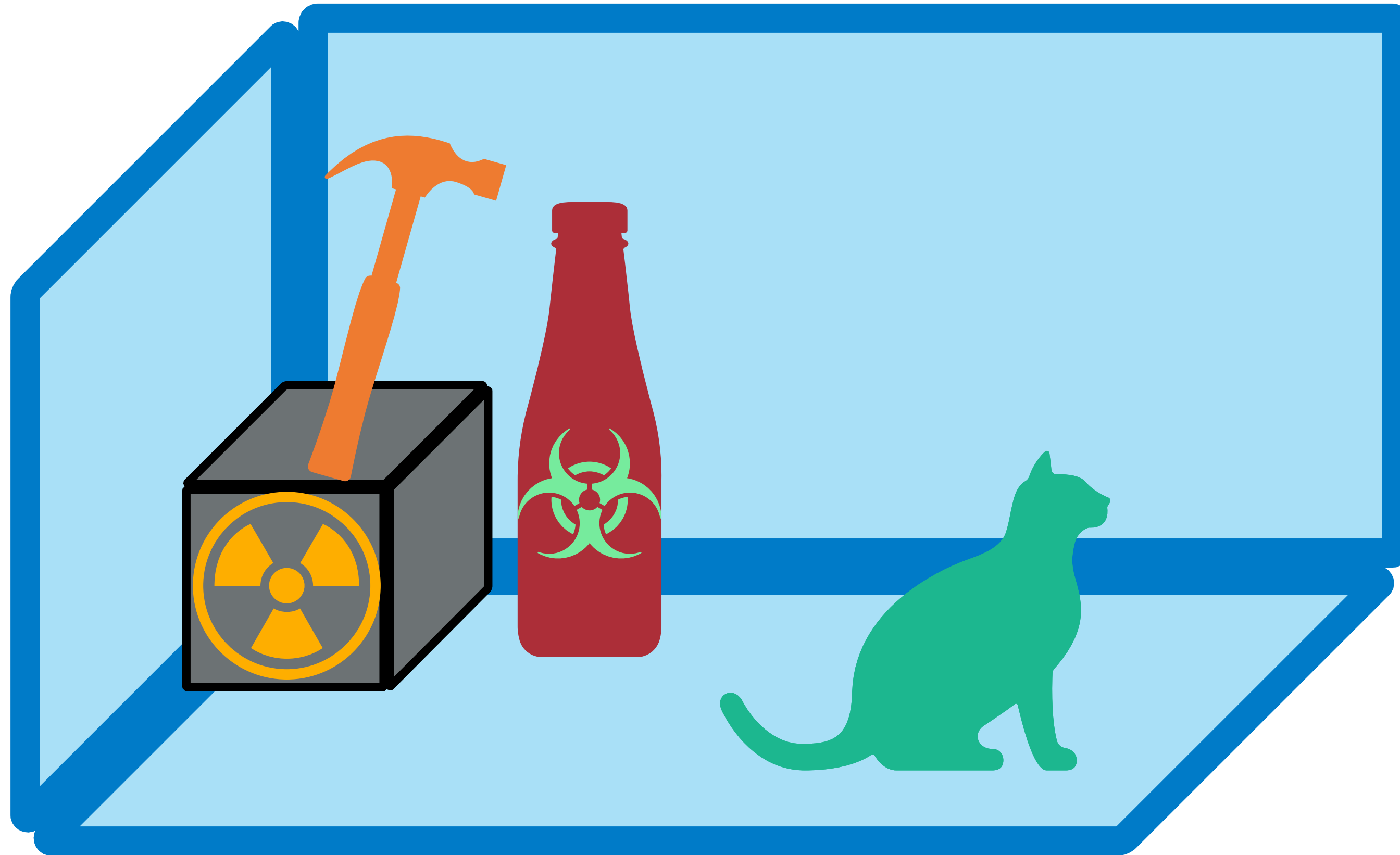
Erklärung des
Messeffekts am
Doppelspalt



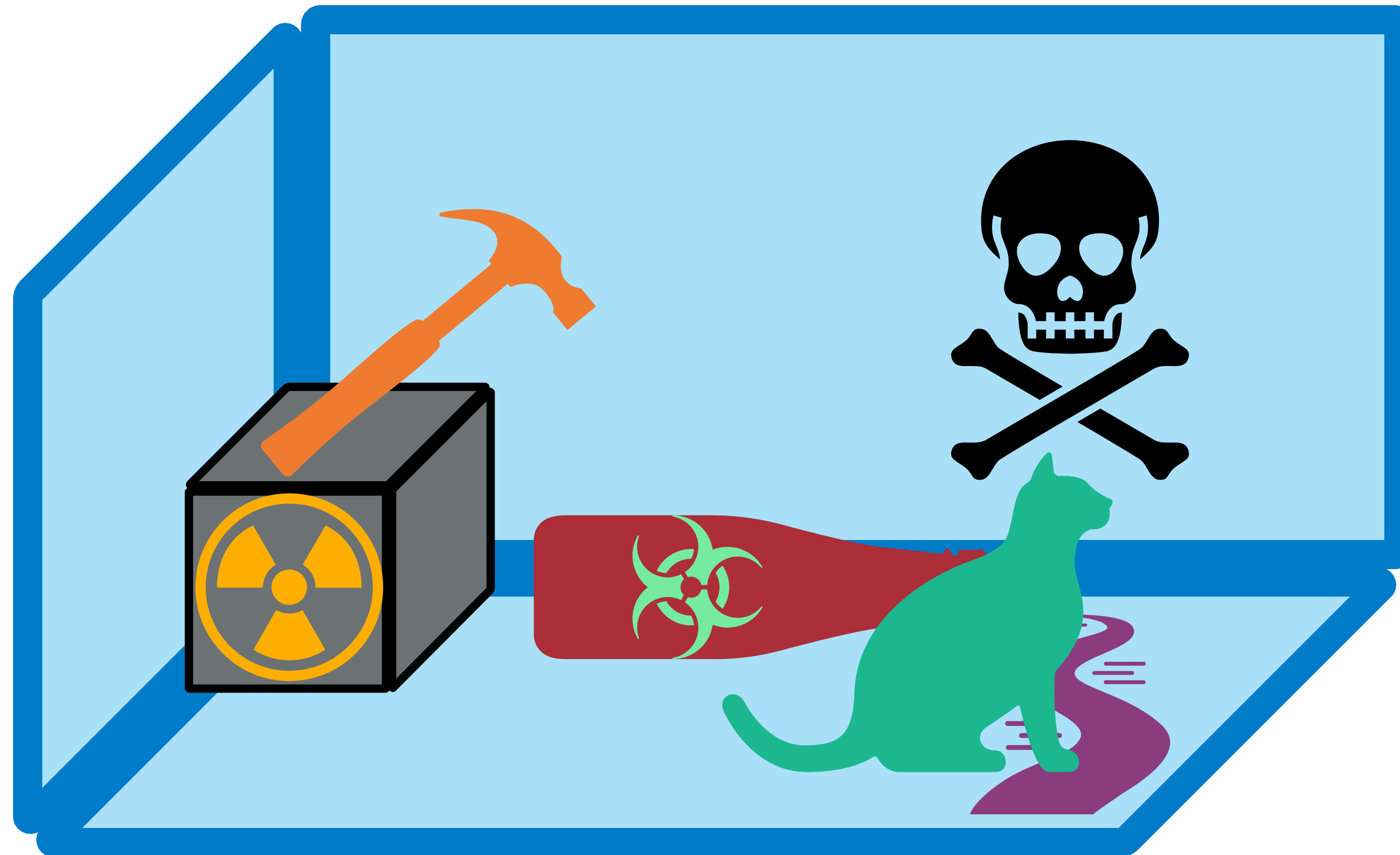
Das ungelöste Messproblem:
„Misst“ das Universum sich selbst?
Was ist $\Psi_{\text{Universum}}$? Determinismus?



Schrödinger's Katze

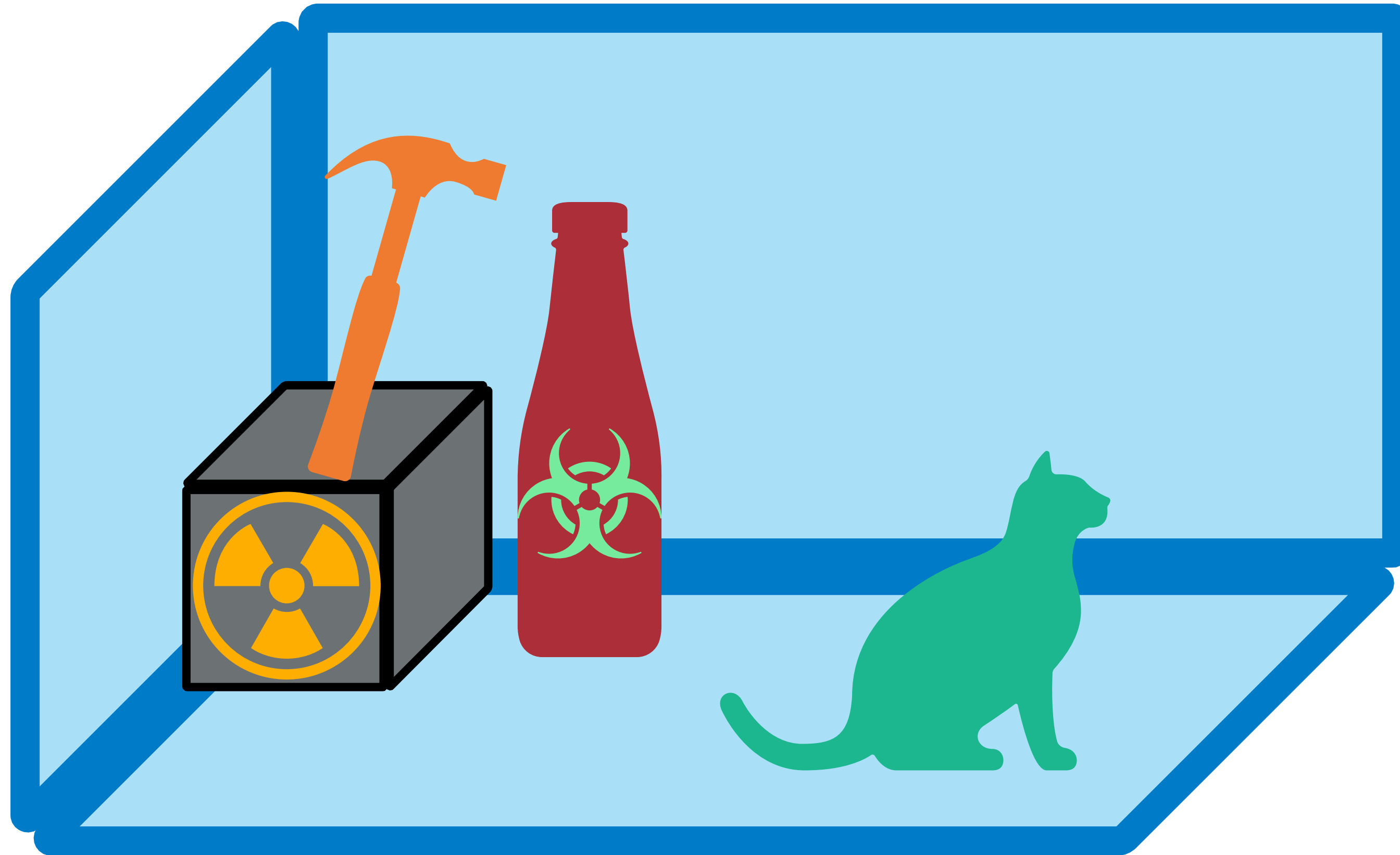


Schrödinger's Katze

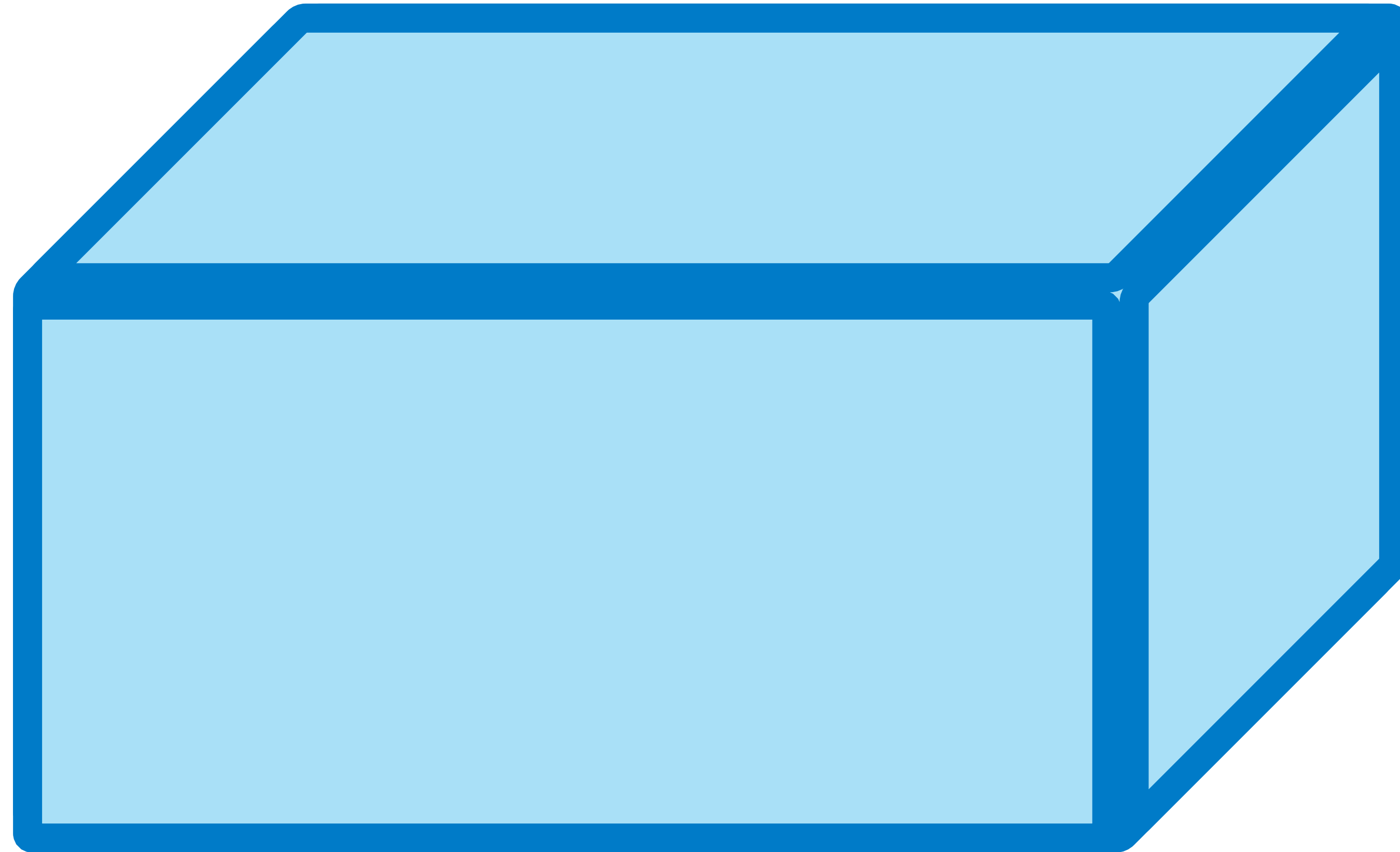


**Sobald das radioaktive
Präparat zerfällt, ist die
Katze sicher tot.**

Schrödinger's Katze



Schrödinger's Katze

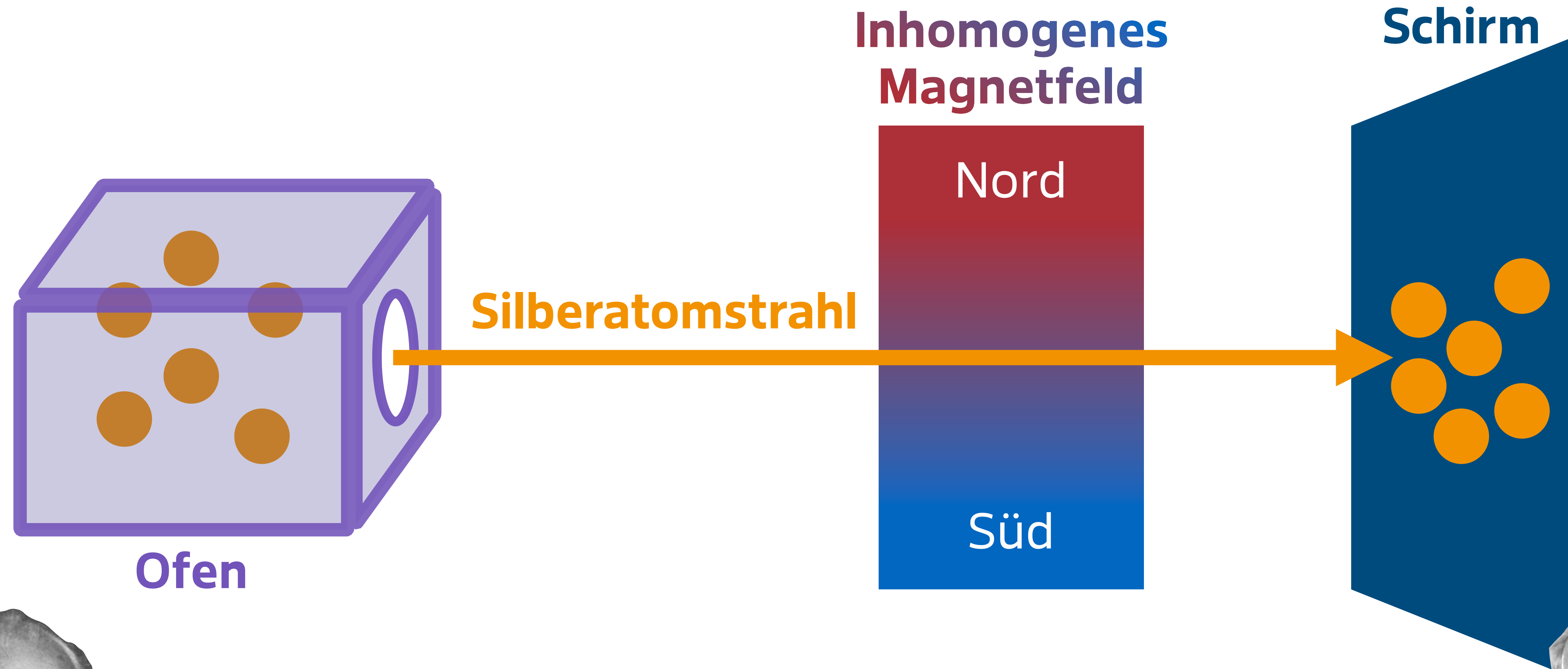


Sobald die Kiste geschlossen ist, ist der Zustand der Katze durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben. Erst bei Öffnung der Kiste entscheidet sich, ob die Katze tot oder lebendig ist — so wie auch ein Elektron unbeobachtet sowohl durch den linken als auch den rechten Spalt geht:

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



Der Stern-Gerlach-Versuch, 1922: Erwartung

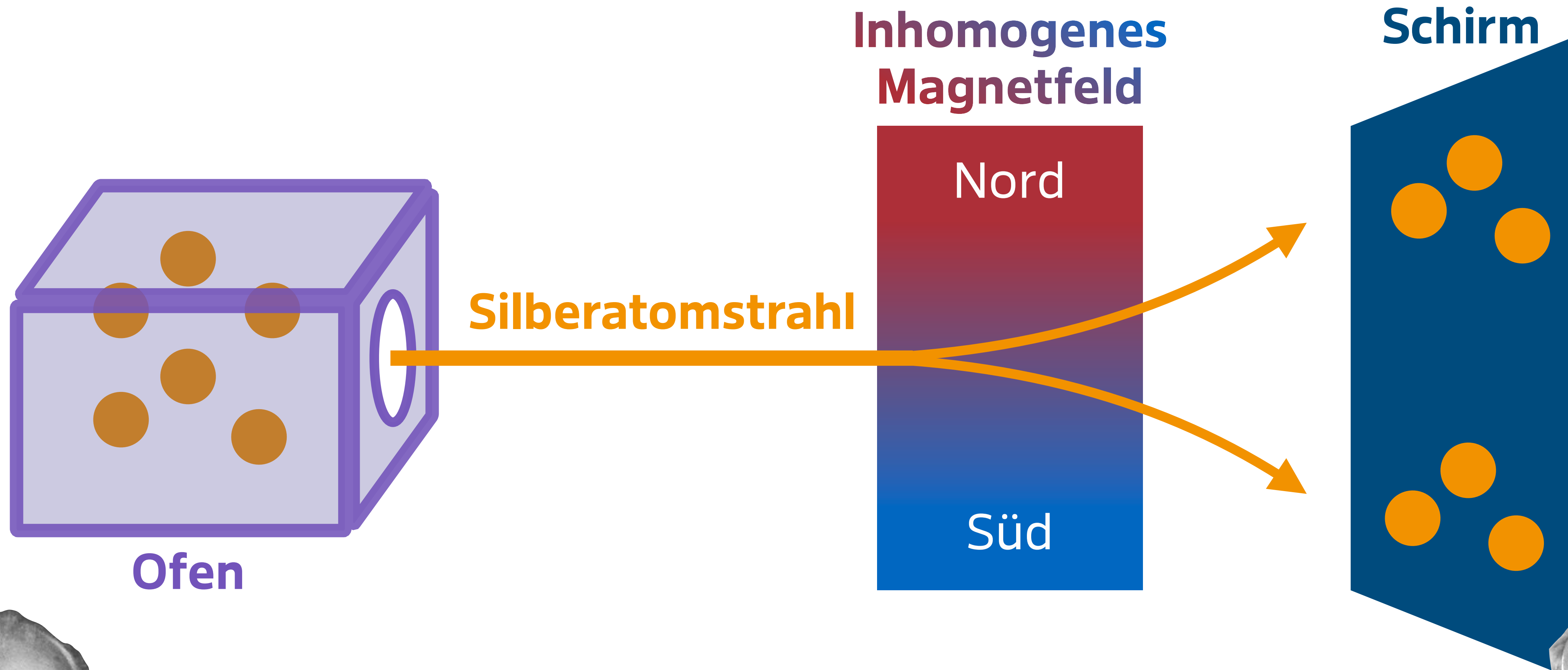


Walther
Gerlach



Otto
Stern

Der Stern-Gerlach-Versuch, 1922: Messung

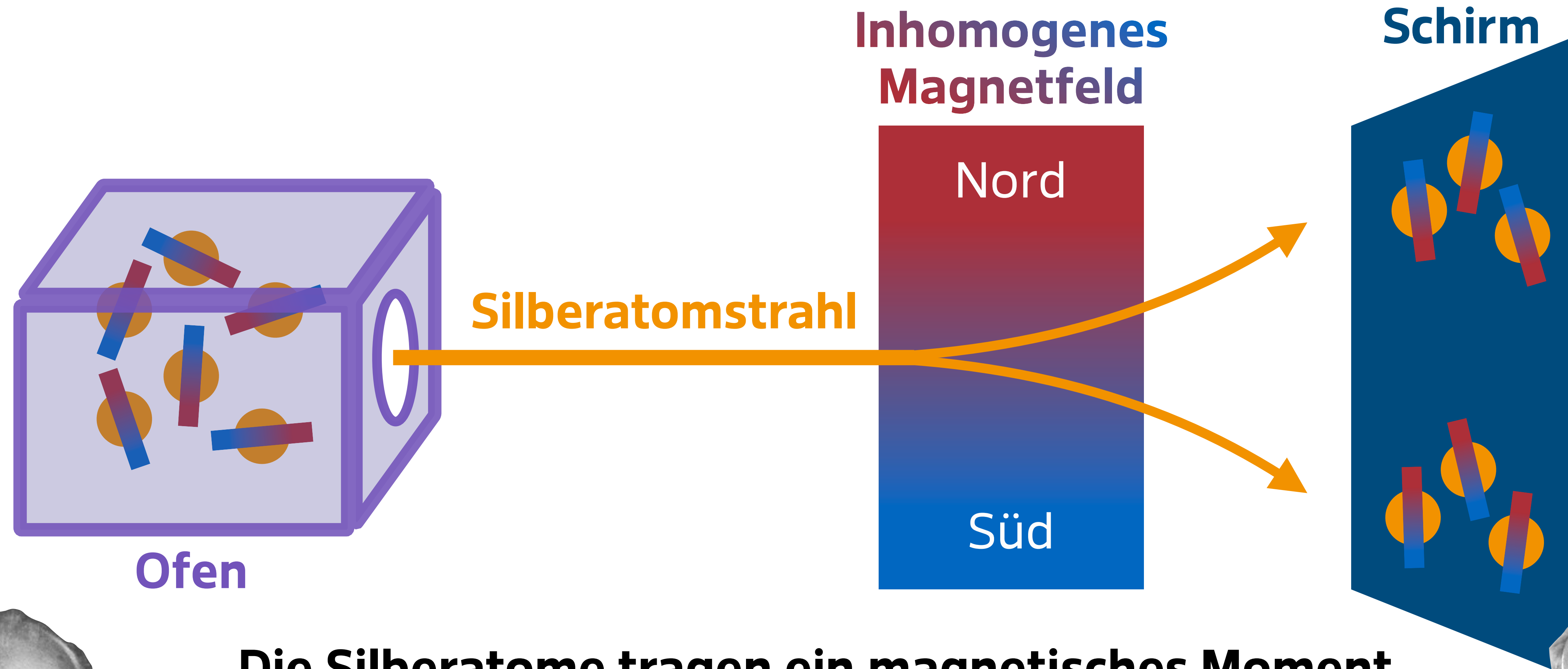


Walther
Gerlach



Otto
Stern

Der Stern-Gerlach-Versuch, 1922: Erklärung



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

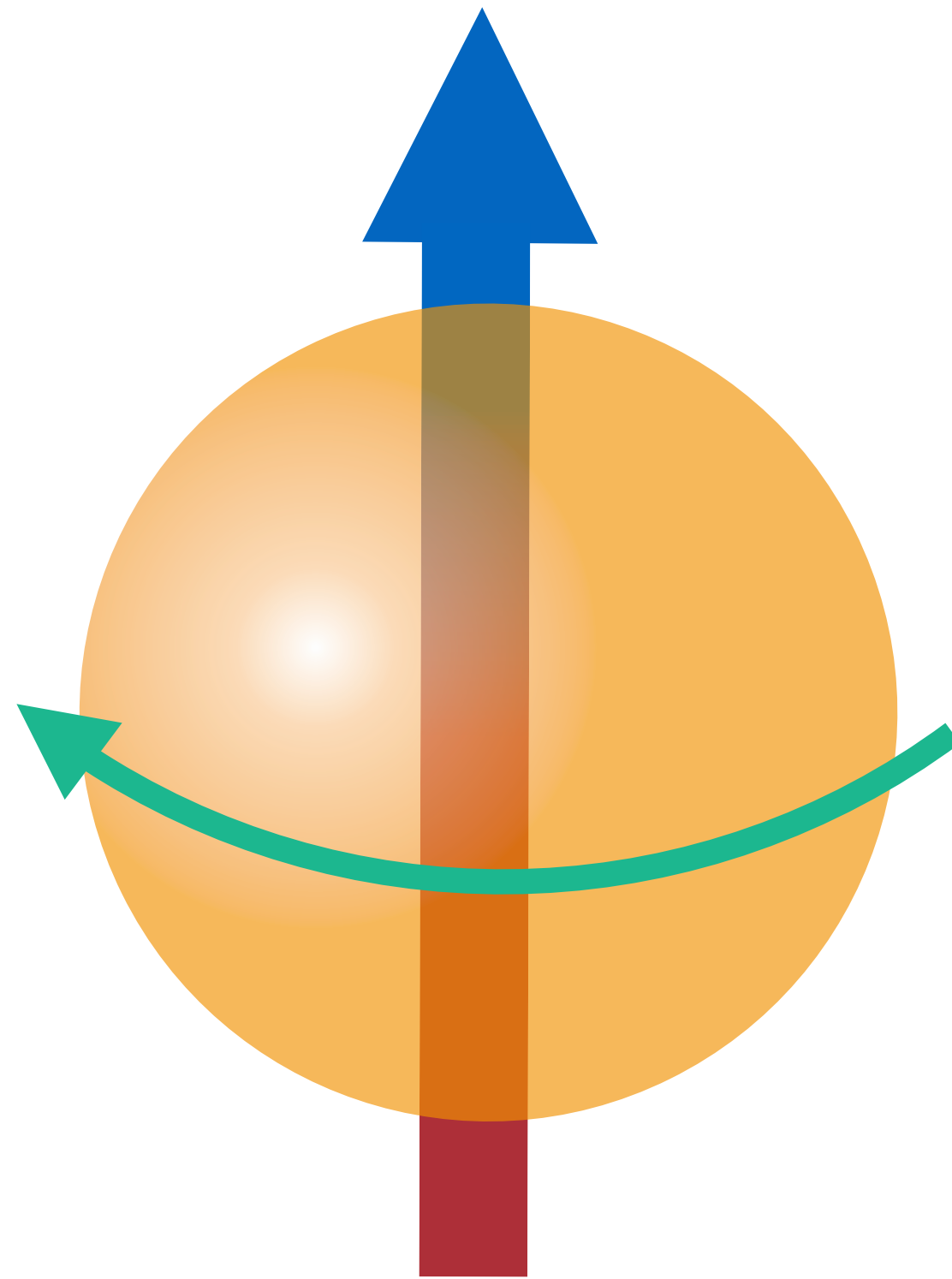


Walther
Gerlach

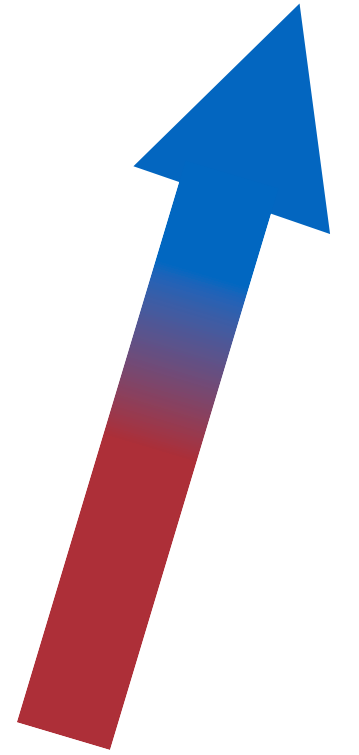


Otto
Stern

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:



oder

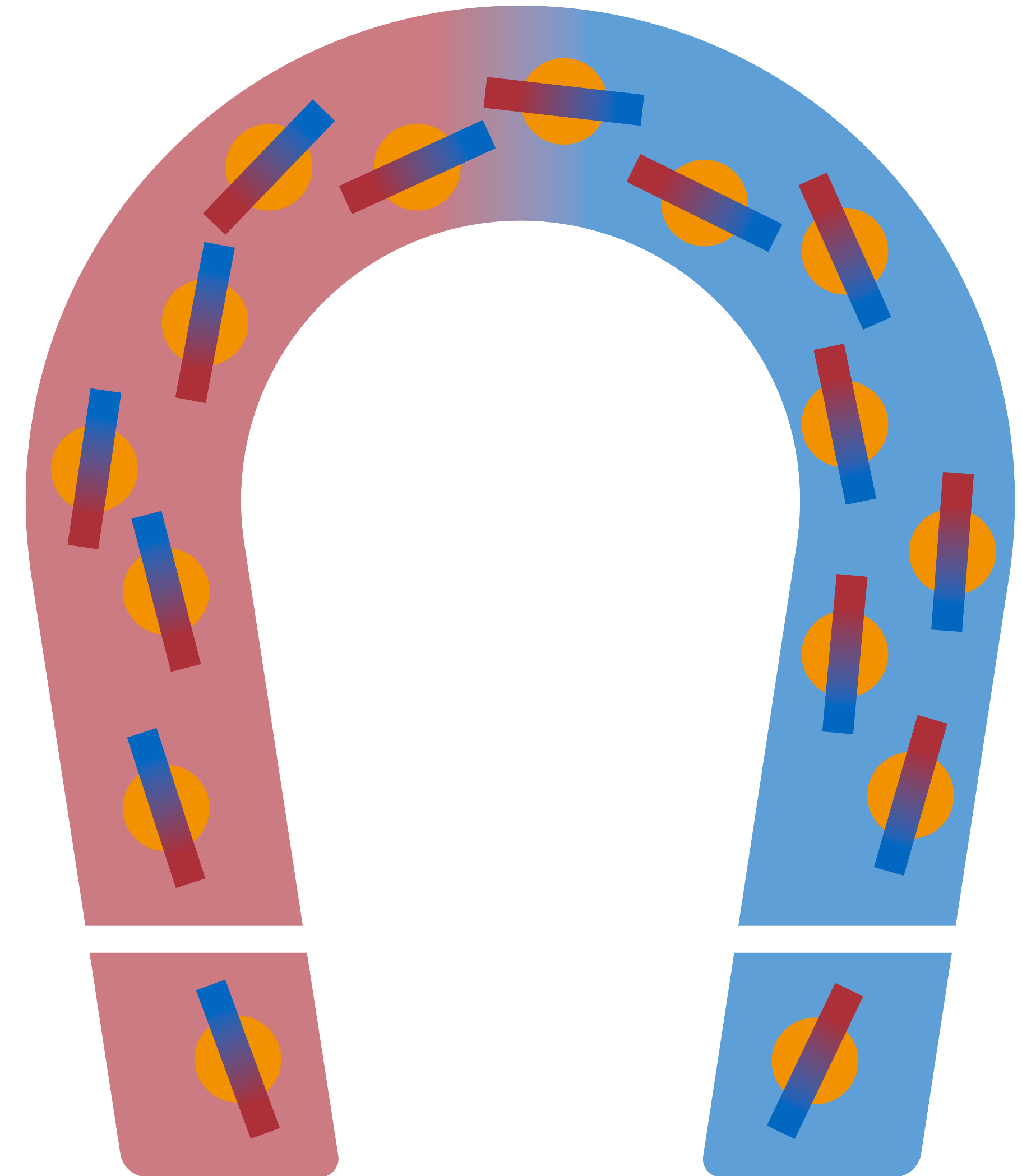


$$|\text{Spin}\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$

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**.

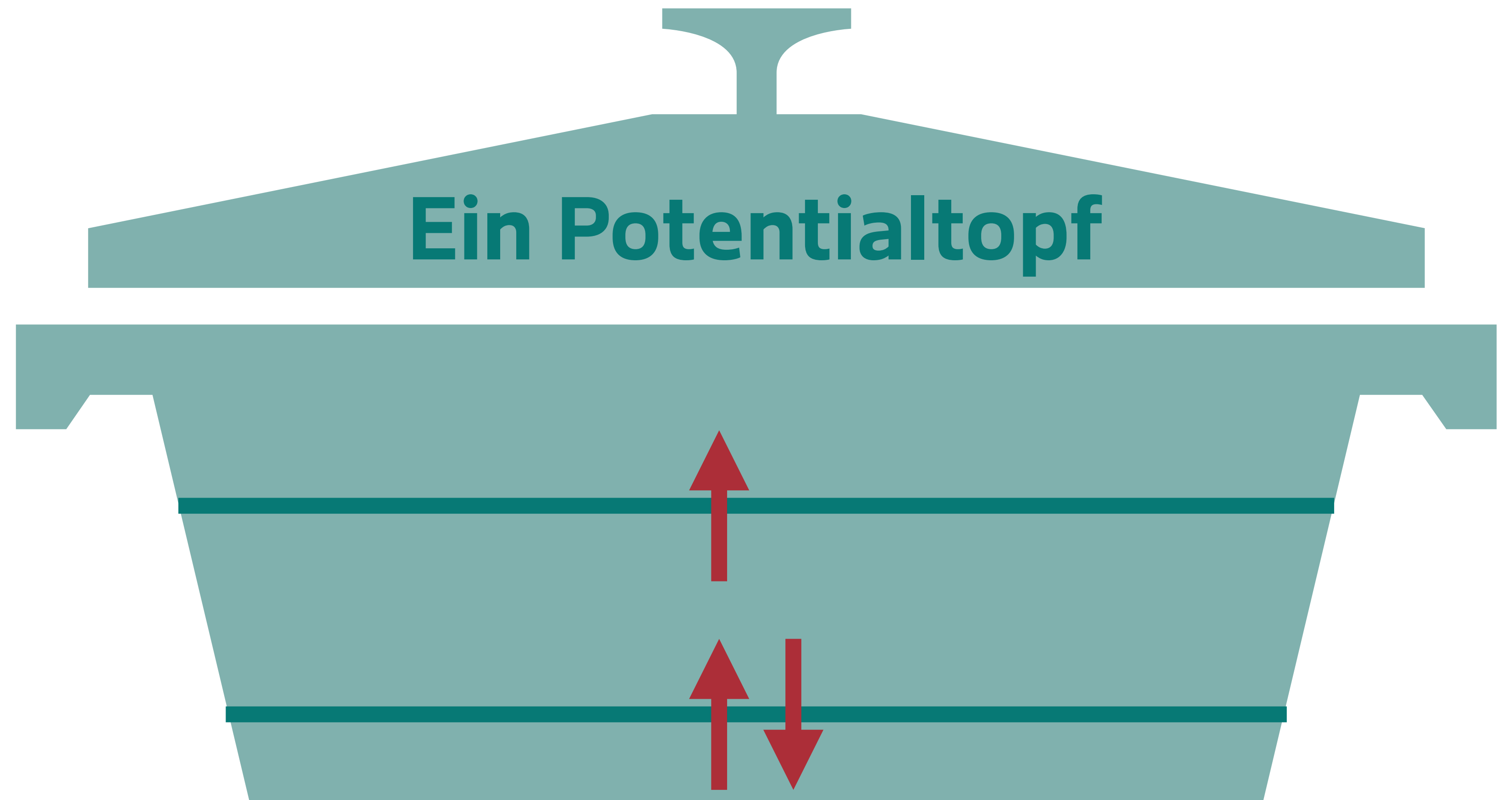


Pauli-Ausschlussprinzip

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

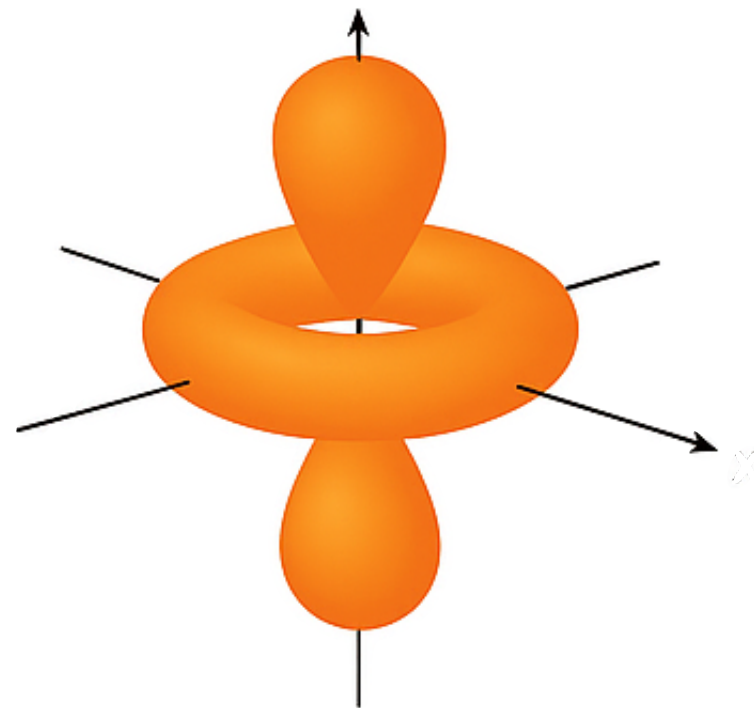
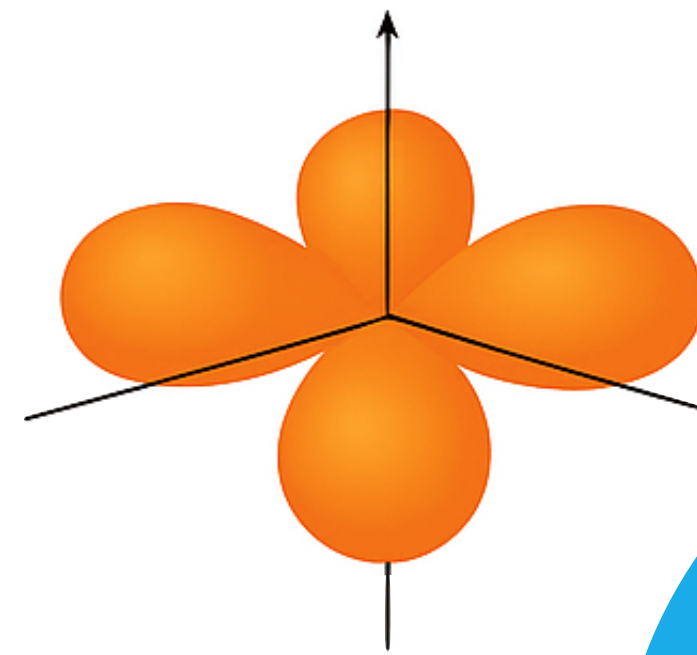
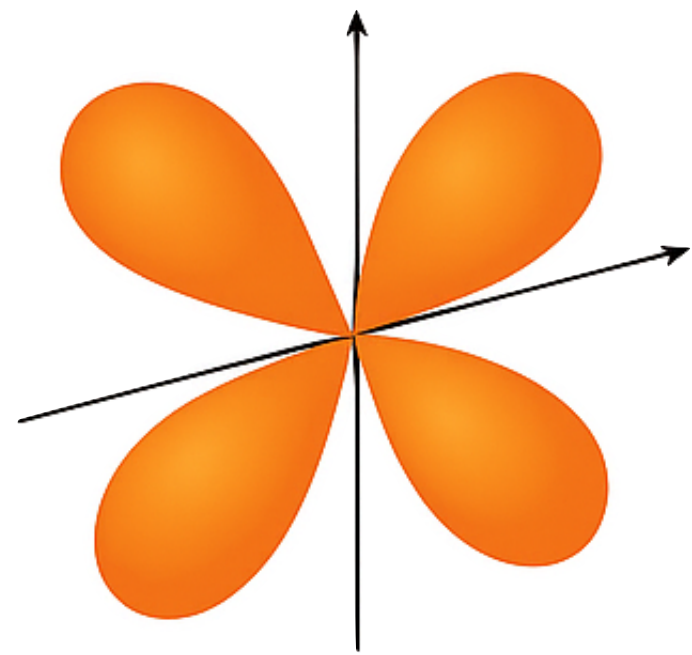
n

Sommerfeld

n, ℓ, m

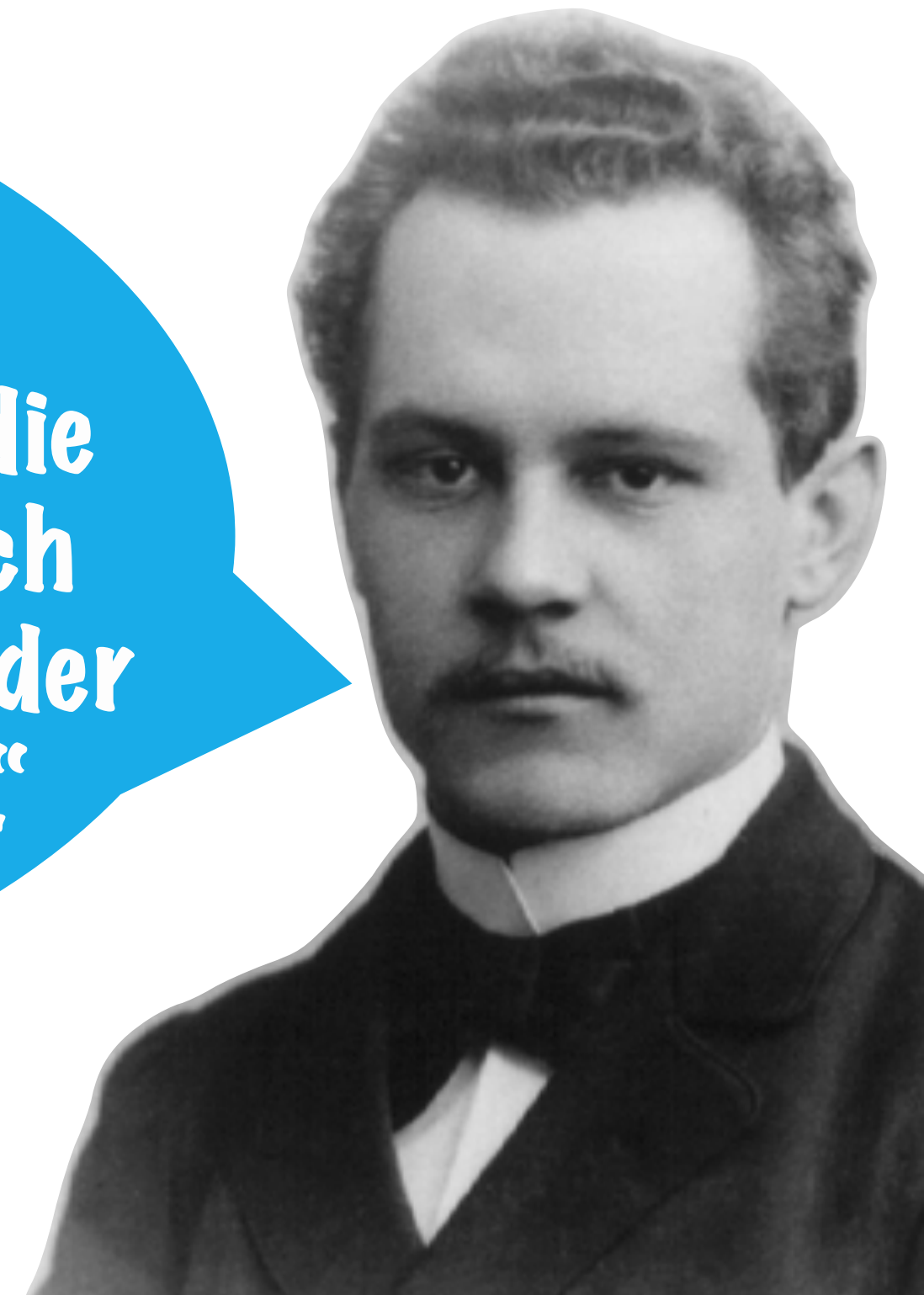
Orbitalmodell

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

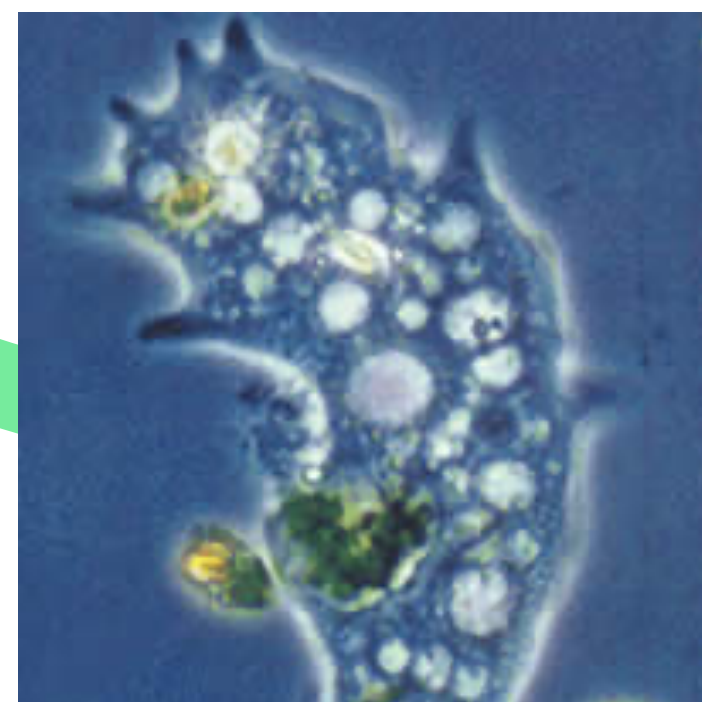


Carlo Tasillo — Von der Kuh zum Quark

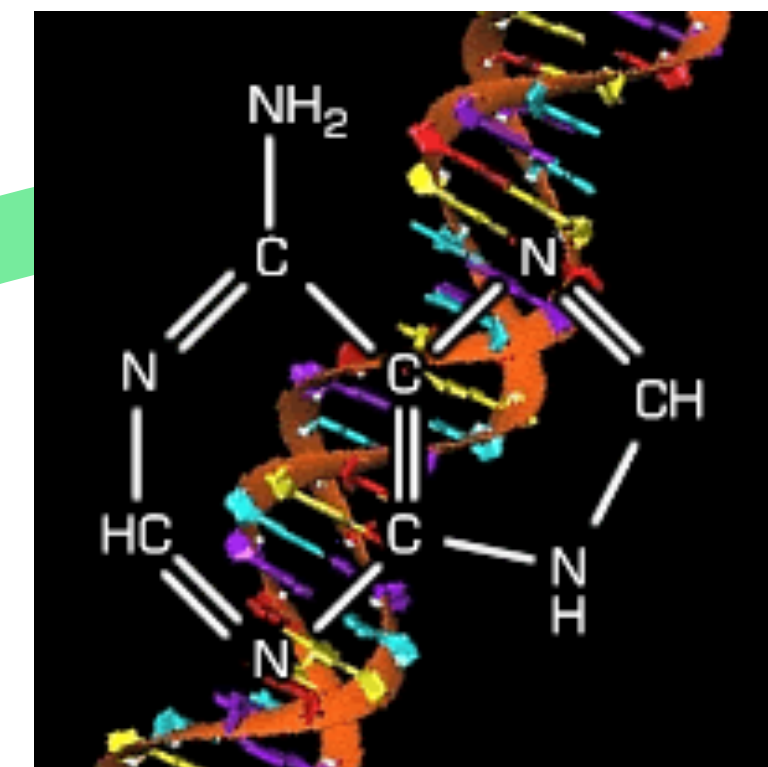




**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



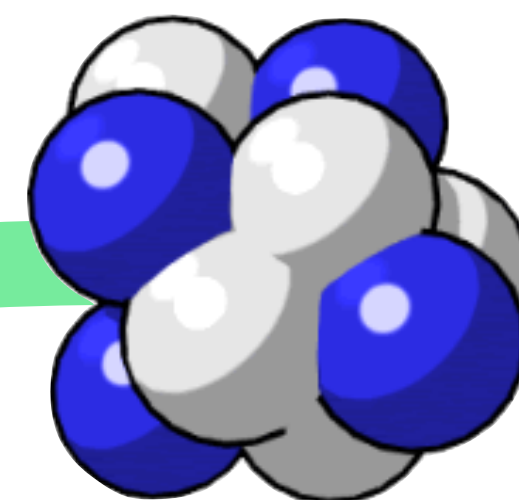
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



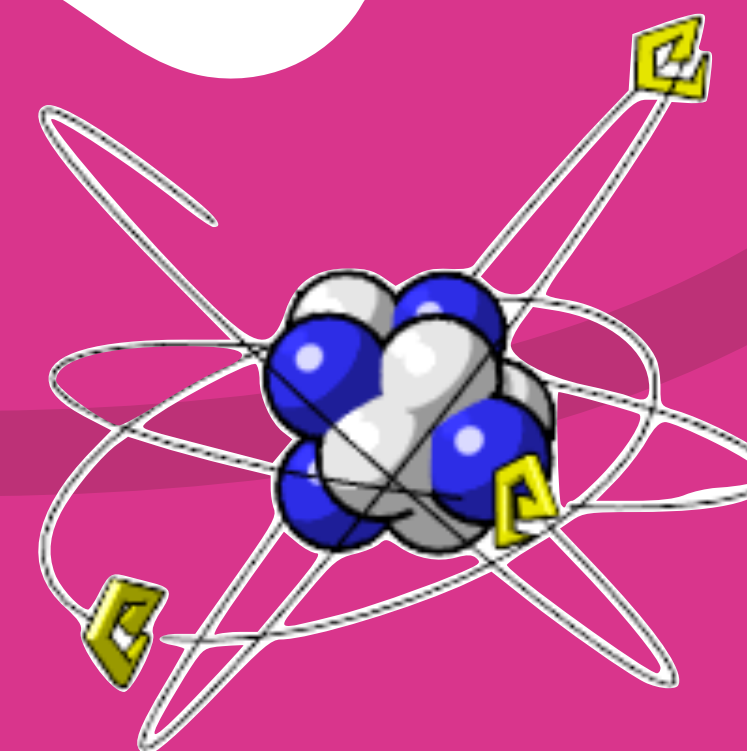
**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



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



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



**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

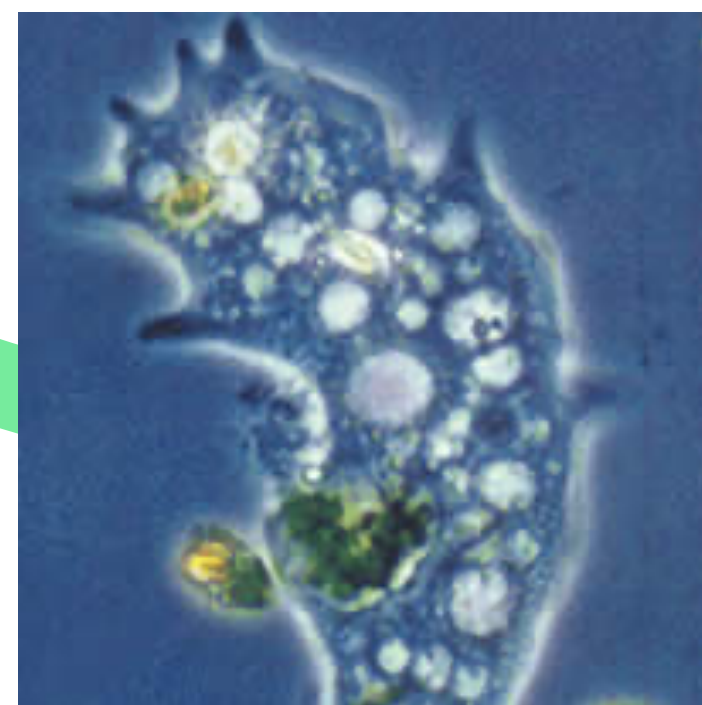




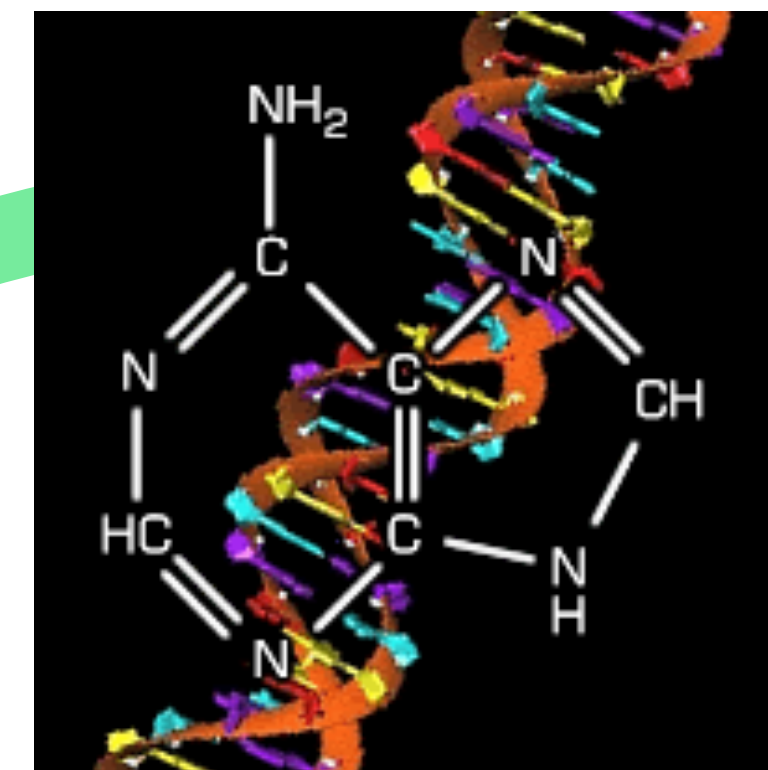
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



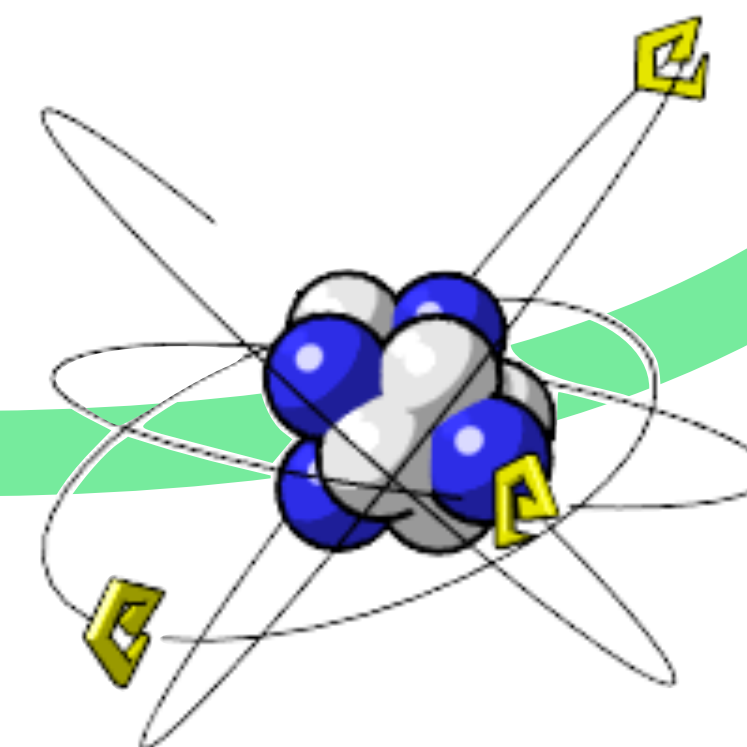
**Das Atom der Teilchenphysik:
Elektronen, Neutrinos und Quarks**



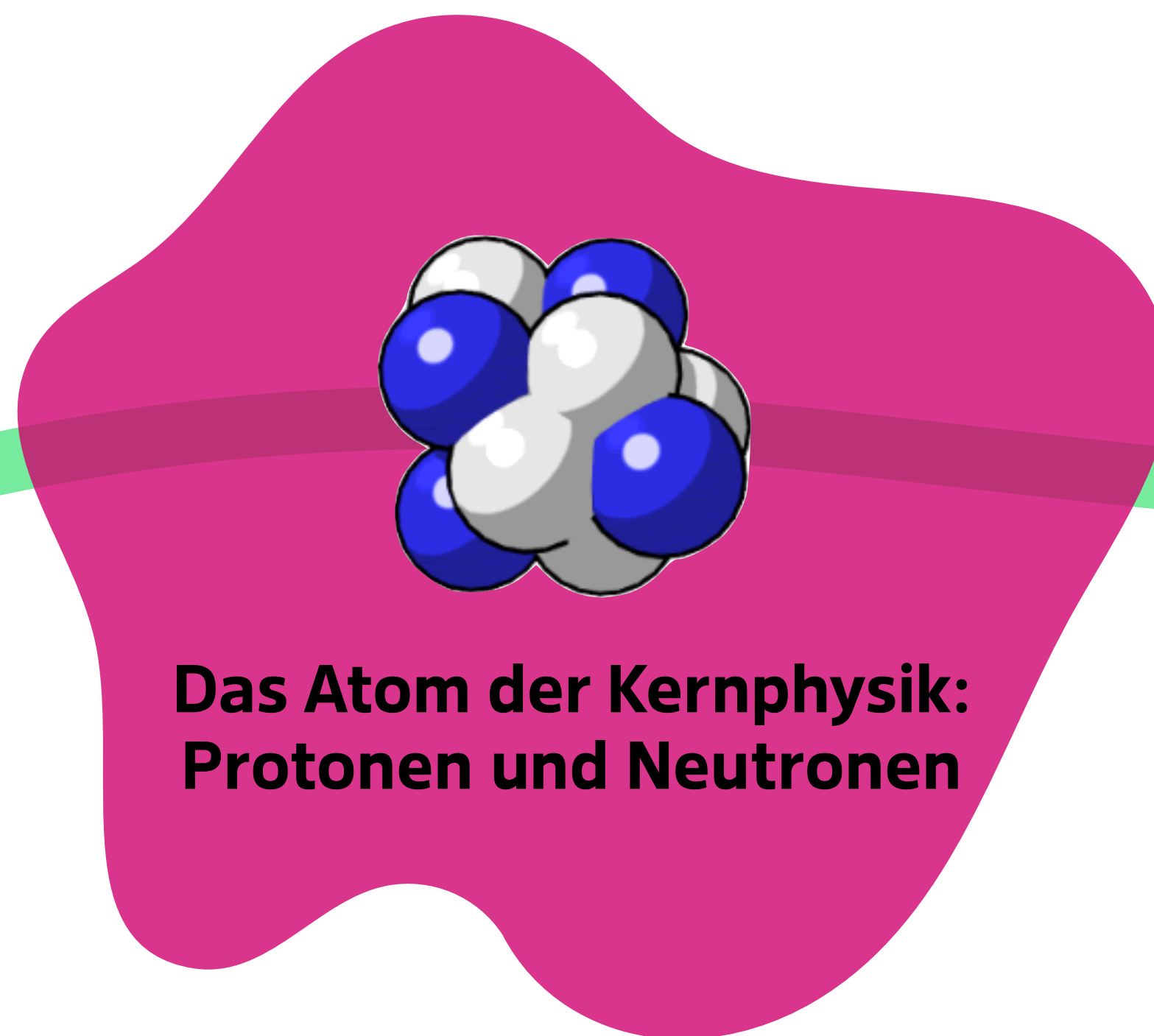
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



**Das Atom der Genetik:
Die DNA**

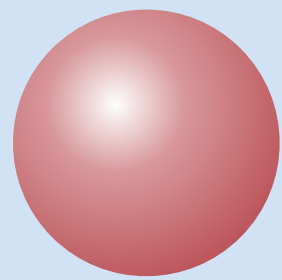
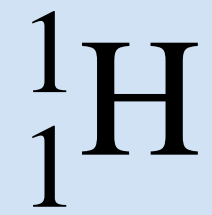


**Das Atom der Chemie:
Das Atom**

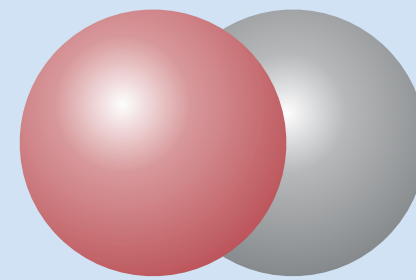
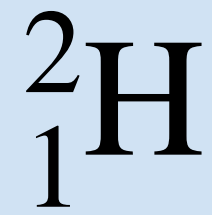


**Das Atom der Kernphysik:
Protonen und Neutronen**

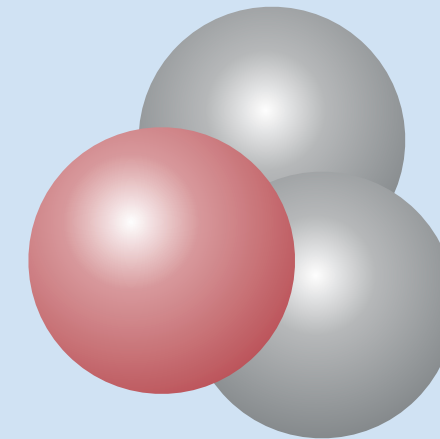
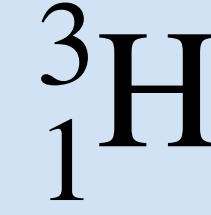
Der Aufbau der Atomkerne



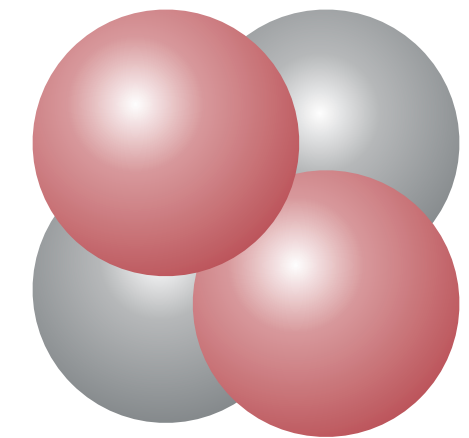
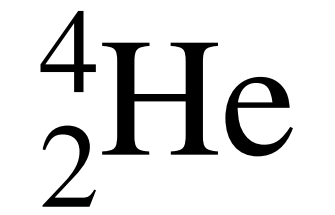
Wasserstoff-Kern



Deuterium-Kern

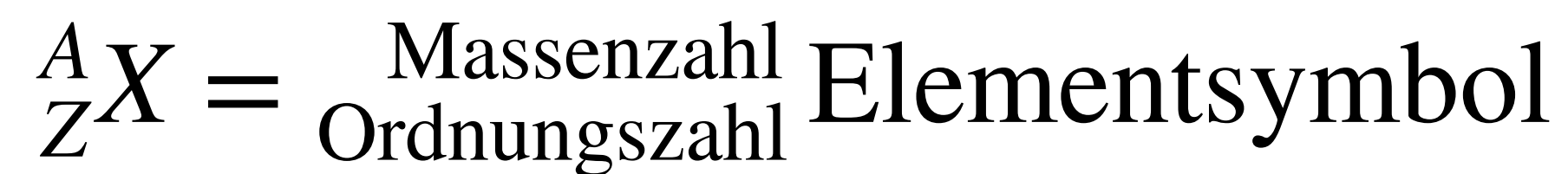
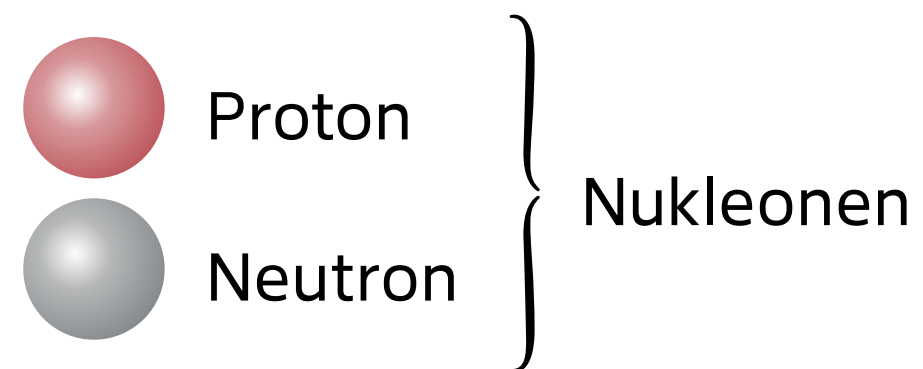


Tritium-Kern



Helium-Kern

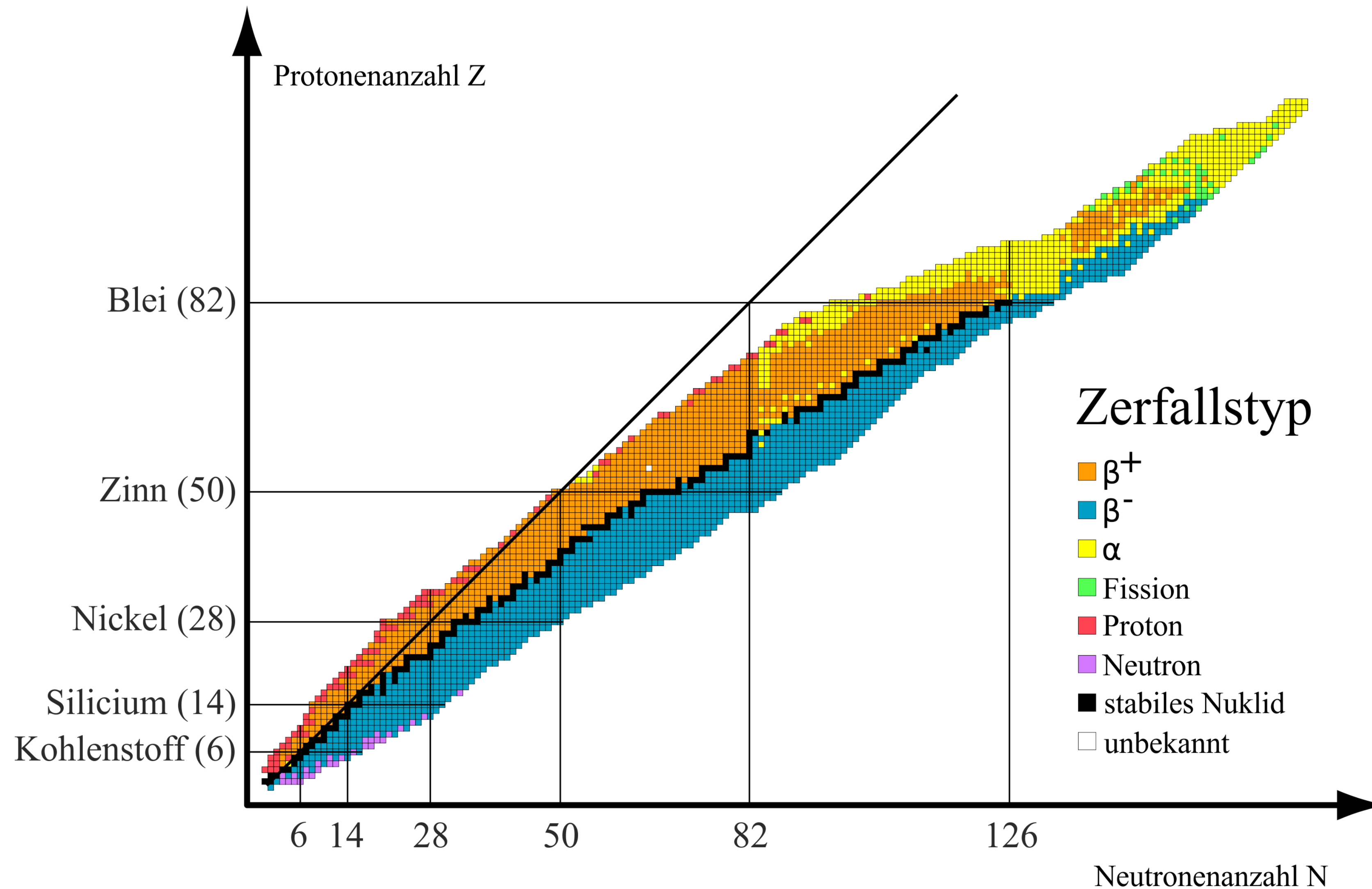
Isotope des Wasserstoffs



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



Nuklidkarte



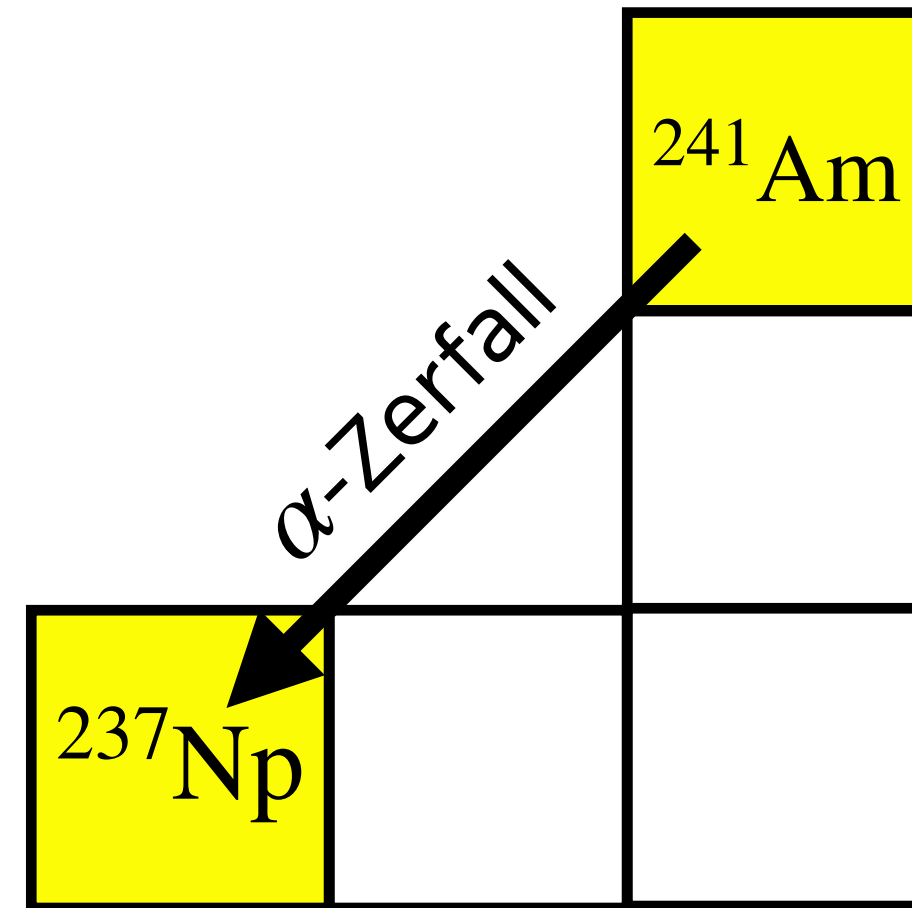
Element: Stoff, der chemisch nicht weiter zerlegt werden kann. Jedes Z hat ein Element-Symbol.

Nuklid: Eine Sorte Atome, charakterisiert durch N und Z

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



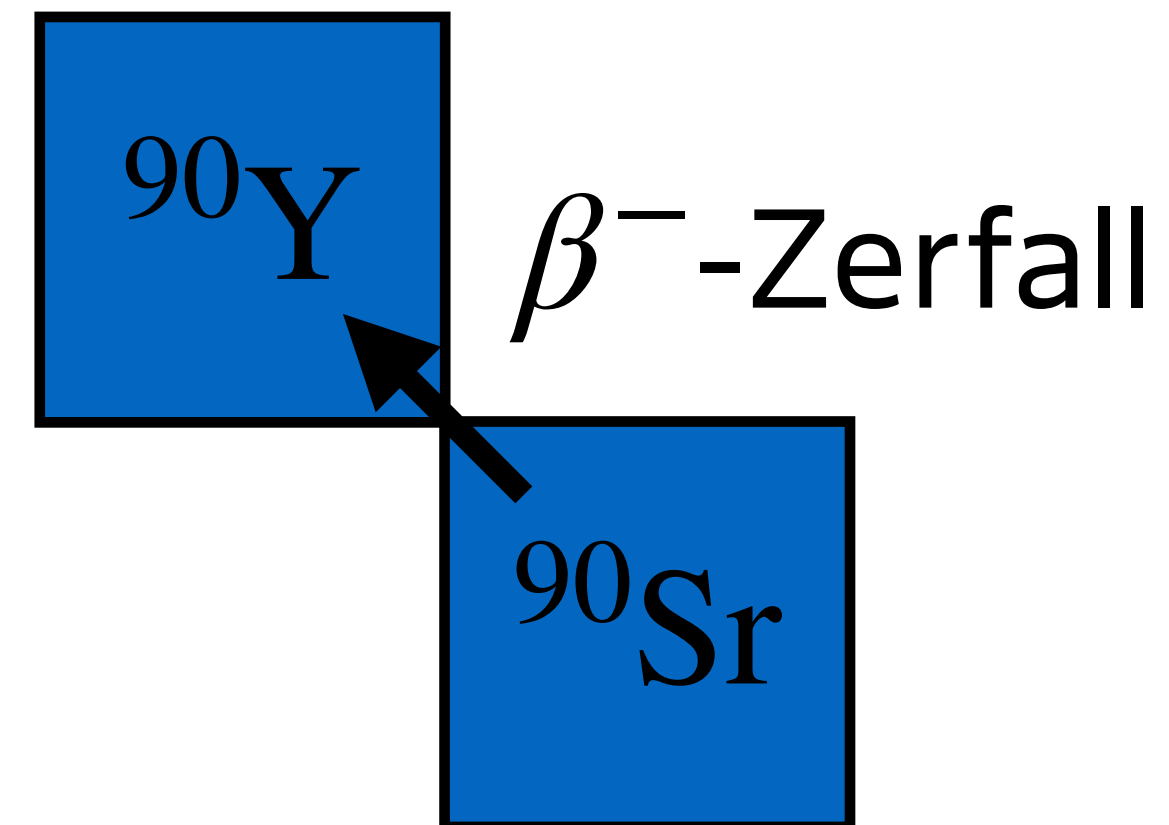
Kernzerfälle



Beim α -Zerfall:

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

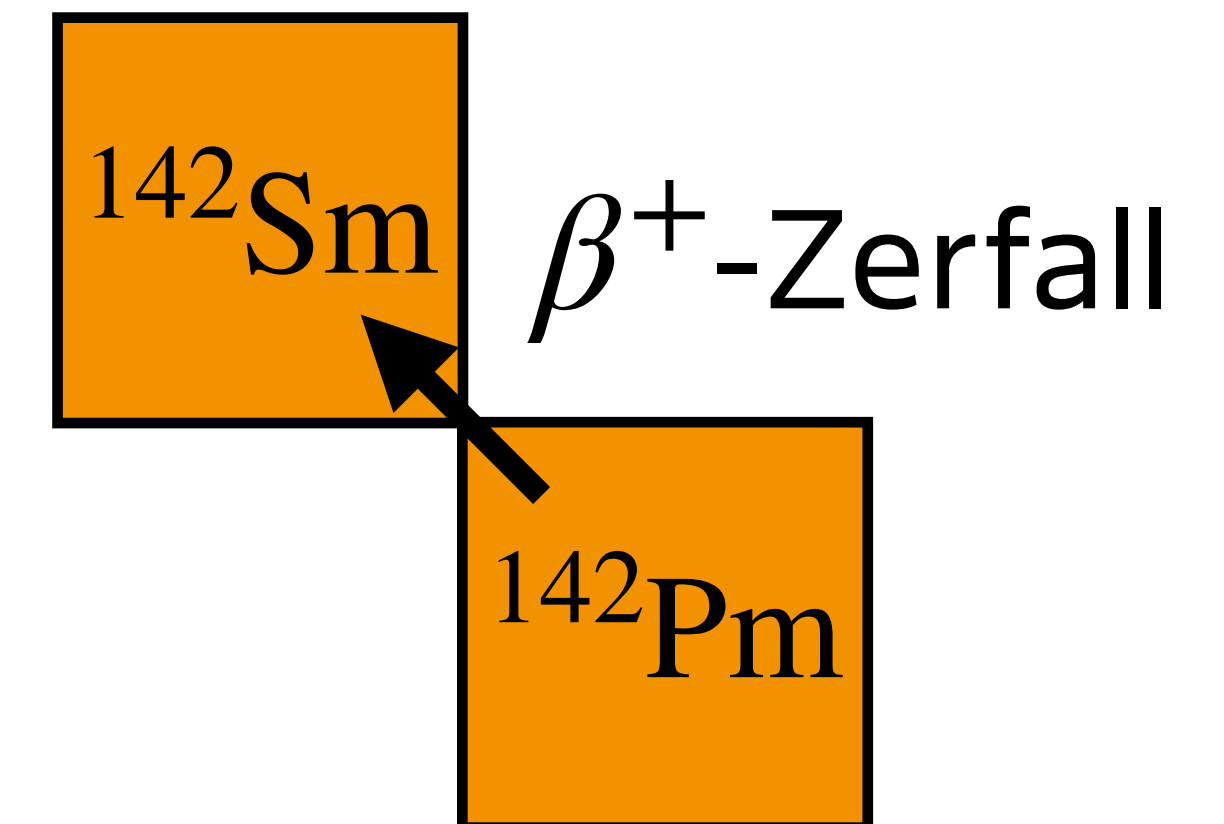
Durch Emission eines
 ^4_2He -Kerns



Beim β^- -Zerfall:

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

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



Beim β^+ -Zerfall:

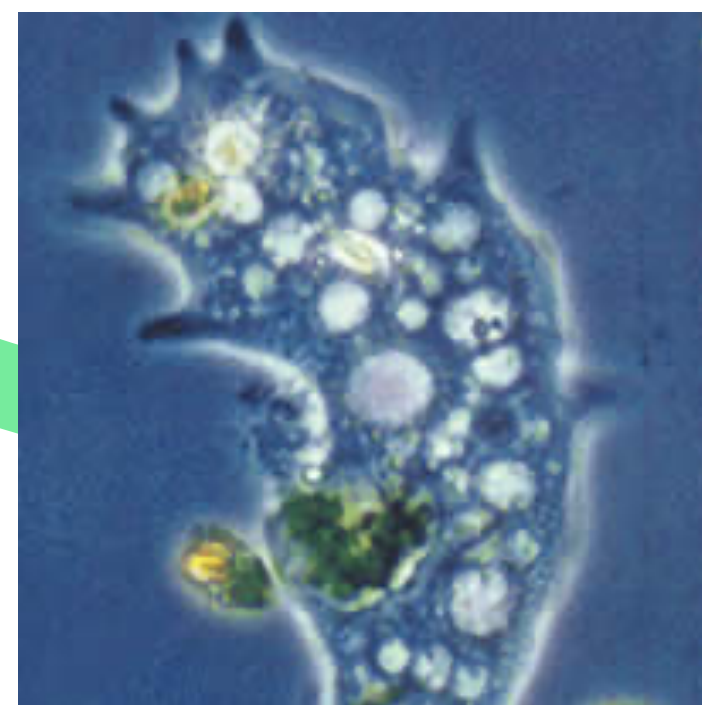
- Steigt Z um 1
- Sinkt N um 1
- Bleibt A gleich

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

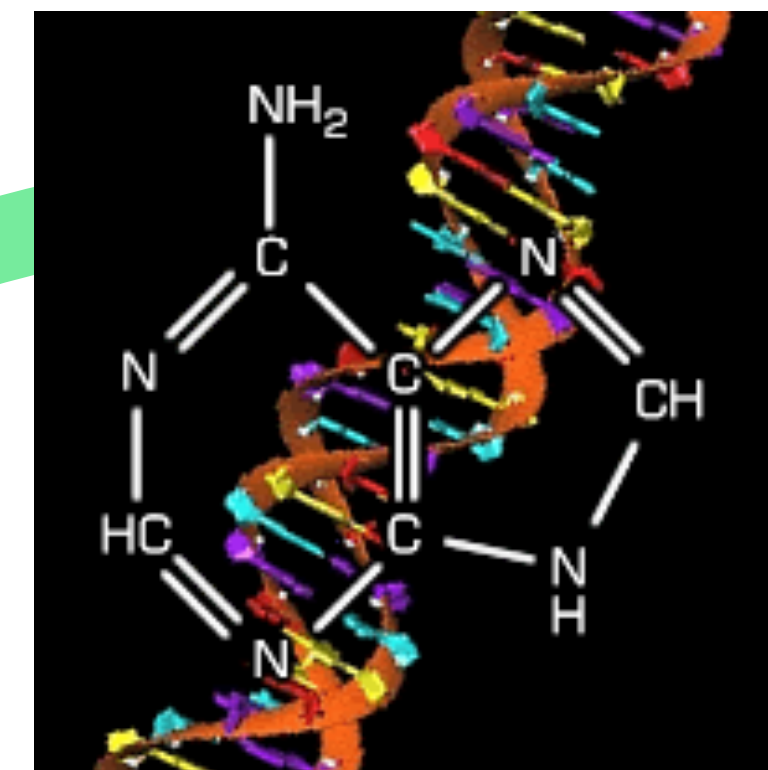




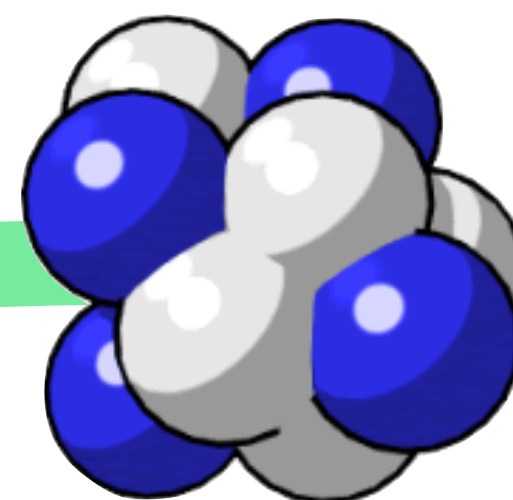
**Das Atom der Milch-Wirtschaft:
Die Kuh, lat. Bos taurus**



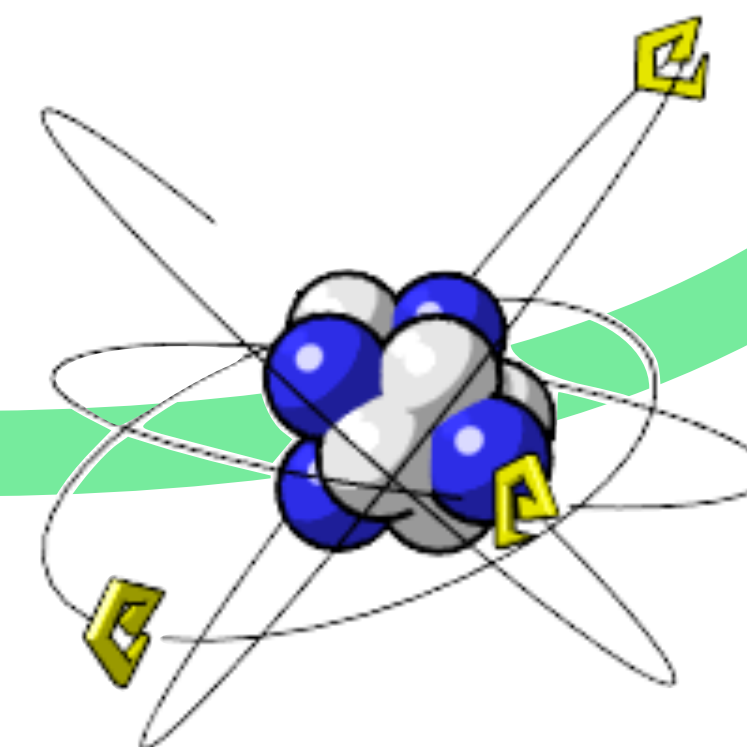
**Das Atom des Lebens:
Die Zelle**



**Das Atom der Genetik:
Die DNA**



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



**Das Atom der Chemie:
Das Atom**



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



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



Paul Dirac

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

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

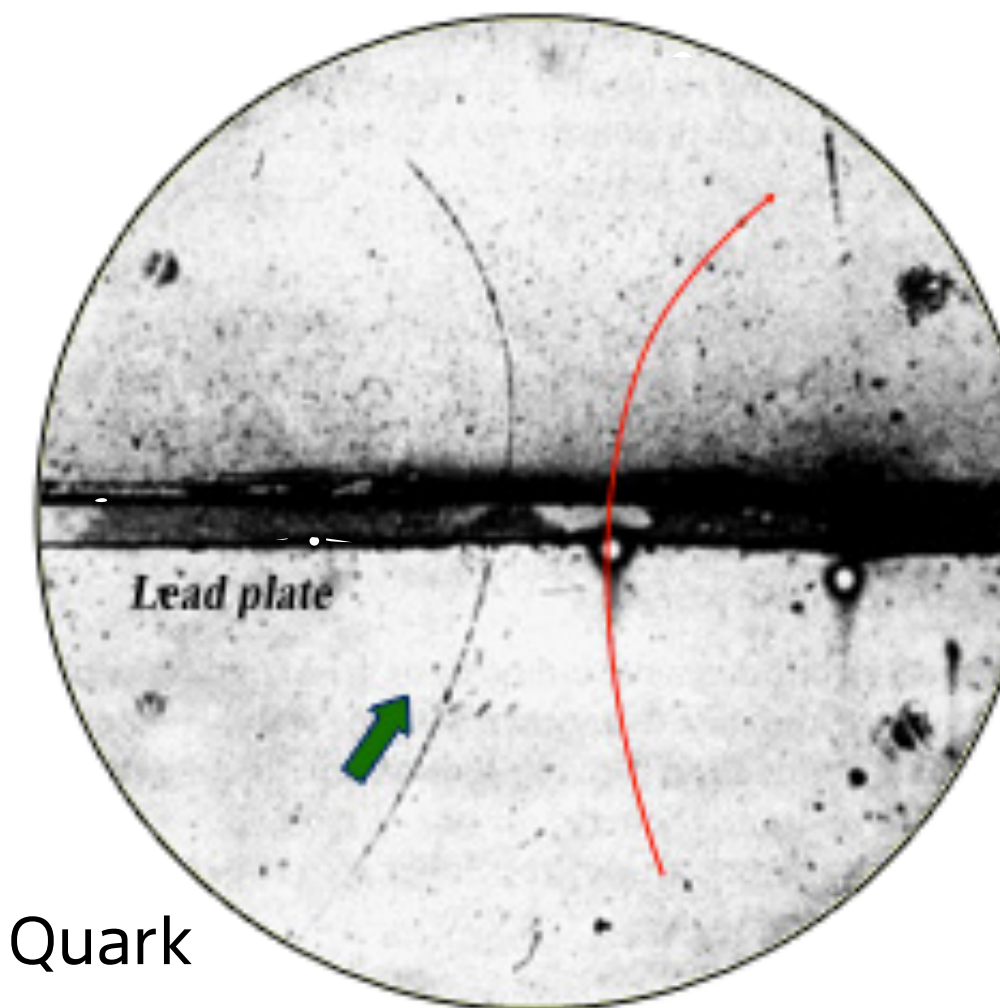
$$\hat{H}|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt}|\psi(t)\rangle$$



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.

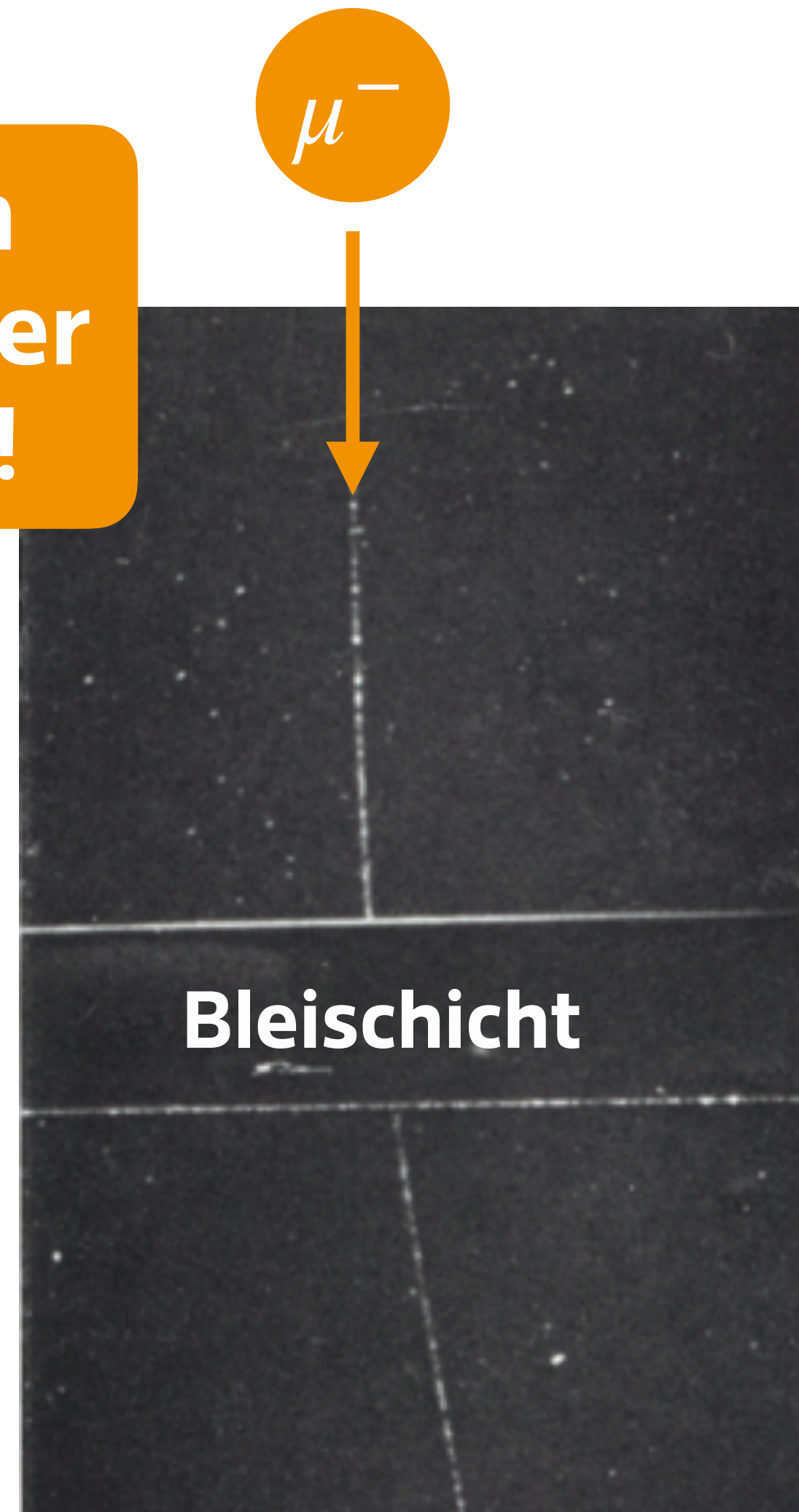


Carl David Anderson



Entdeckung des Myons, Anderson (1936)

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



Carl D.
Anderson

Entdeckung des Myons, Anderson (1936)

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

μ^-



Bleischicht



Isidor I.
Rabi

„Wer hat das
bestellt?!“



Carl D.
Anderson

Entdeckung des Myons, Anderson (1936)

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

μ^-



Bleischicht



Isidor I.
Rabi

„Wer hat das
bestellt?!“

„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!“

Willis E.
Lamb



Carl D.
Anderson

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.

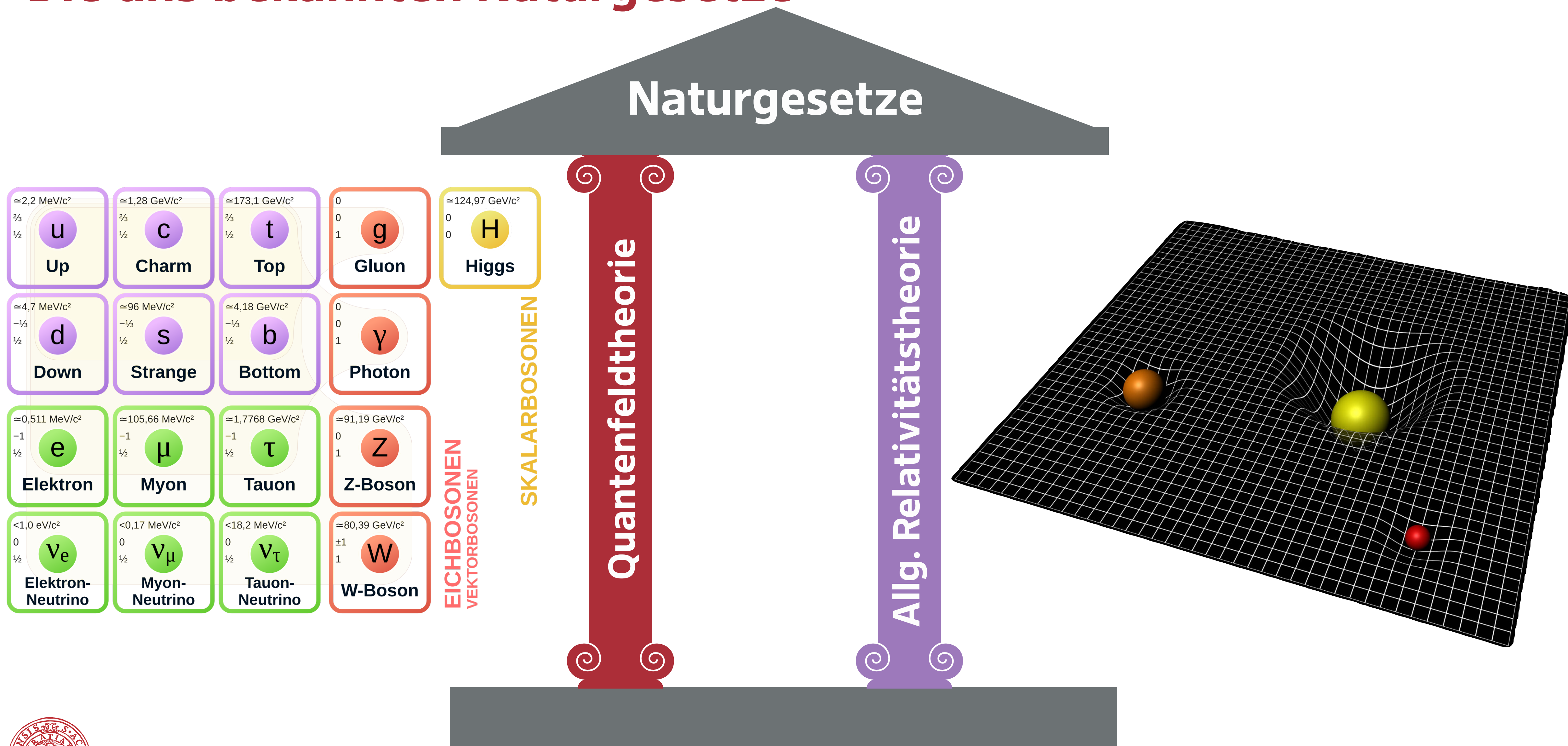
* bis auf die Dunkle Materie

** bis auf die Gravitation

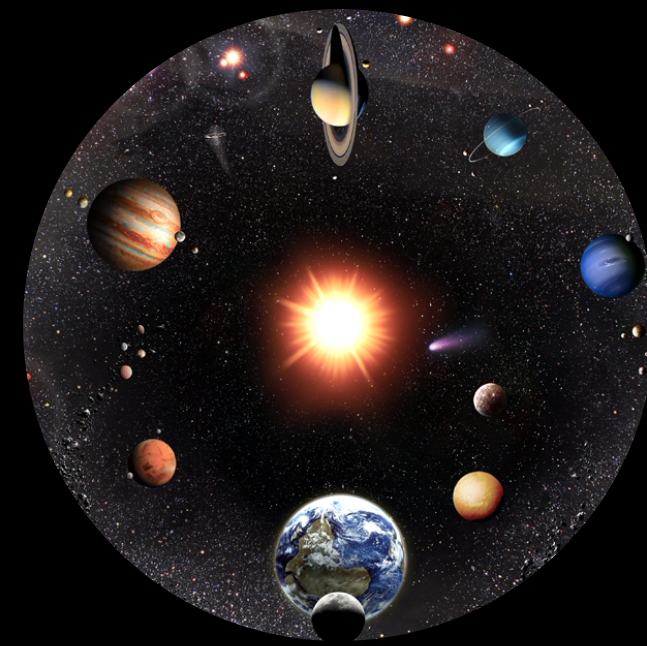


Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
LEPTONEN	I	II	III	
	Masse $\approx 2,2 \text{ MeV}/c^2$ Ladung $\frac{2}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ u Up	Masse $\approx 1,28 \text{ GeV}/c^2$ Ladung $\frac{2}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ c Charm	Masse $\approx 173,1 \text{ GeV}/c^2$ Ladung $\frac{2}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ t Top	Masse 0 Ladung 0 Spin 1 g Gluon
	Masse $\approx 4,7 \text{ MeV}/c^2$ Ladung $-\frac{1}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ d Down	Masse $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ Ladung $-\frac{1}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ s Strange	Masse $\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$ Ladung $-\frac{1}{3}$ Spin $\frac{1}{2}$ b Bottom	Masse 0 Ladung 0 Spin 1 γ Photon
	Masse $\approx 0,511 \text{ MeV}/c^2$ Ladung -1 Spin $\frac{1}{2}$ e Elektron	Masse $\approx 105,66 \text{ MeV}/c^2$ Ladung -1 Spin $\frac{1}{2}$ μ Myon	Masse $\approx 1,7768 \text{ GeV}/c^2$ Ladung -1 Spin $\frac{1}{2}$ τ Tauon	Masse $\approx 91,19 \text{ GeV}/c^2$ Ladung 0 Spin 1 Z Z-Boson
	Masse $< 1,0 \text{ eV}/c^2$ Ladung 0 Spin $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	Masse $< 0,17 \text{ MeV}/c^2$ Ladung 0 Spin $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	Masse $< 18,2 \text{ MeV}/c^2$ Ladung 0 Spin $\frac{1}{2}$ ν_τ Tauon-Neutrino	Masse $\approx 80,39 \text{ GeV}/c^2$ Ladung ± 1 Spin 1 W W-Boson
				Masse $\approx 124,97 \text{ GeV}/c^2$ Ladung 0 Spin 0 H Higgs
				SKALARBOSONEN
				EICHBOSONEN VEKTORBOSONEN

Die uns bekannten Naturgesetze



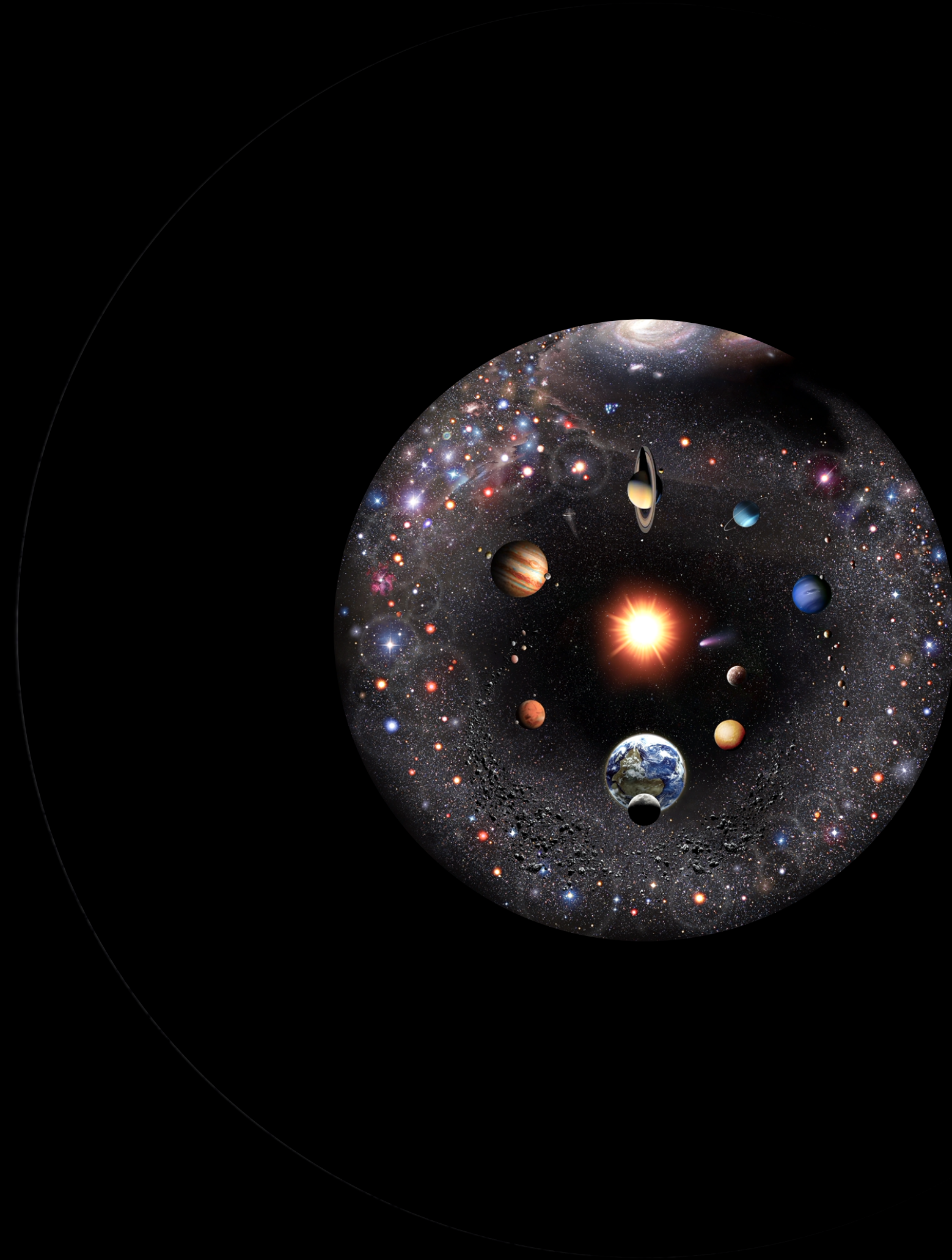
Das beobachtbare Universum



Unser Sonnensystem

PABLO
CARLOS
BUDASSI

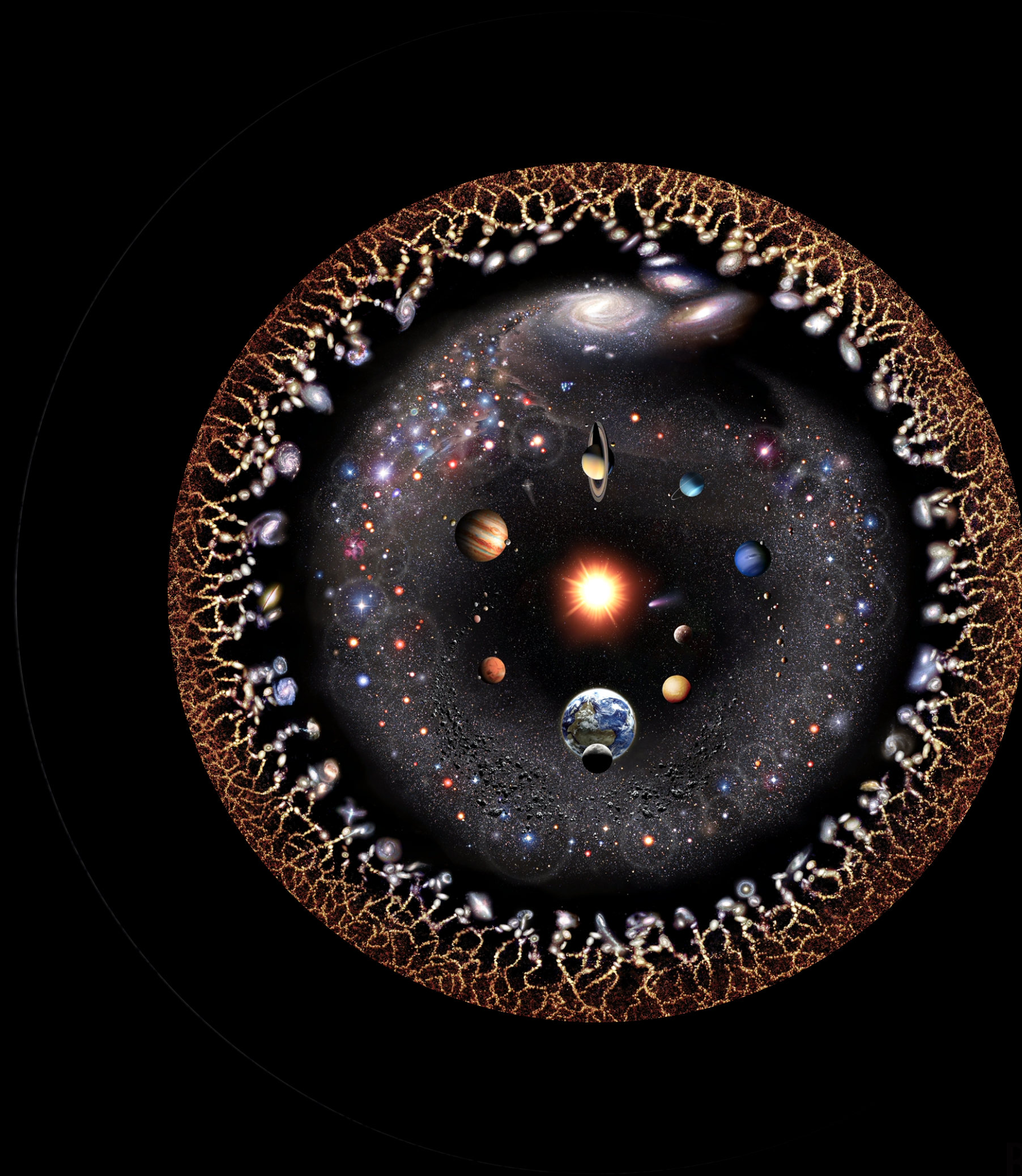
Das beobachtbare Universum



Die Milchstraße

PABLO
CARLOS
BUDASSI

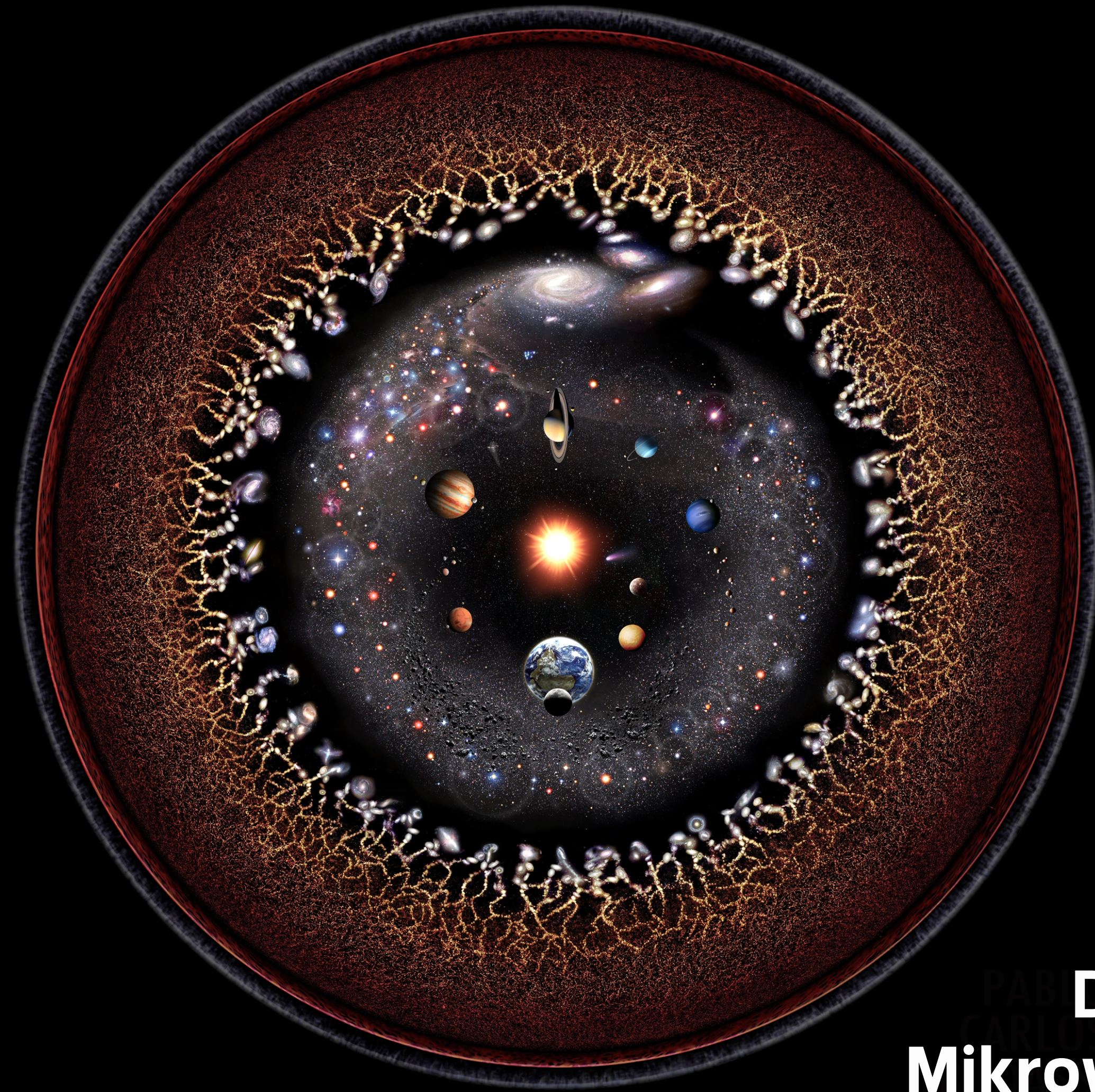
Das beobachtbare Universum



Andere Galaxien

PABLO
CARLOS
BUDASSI

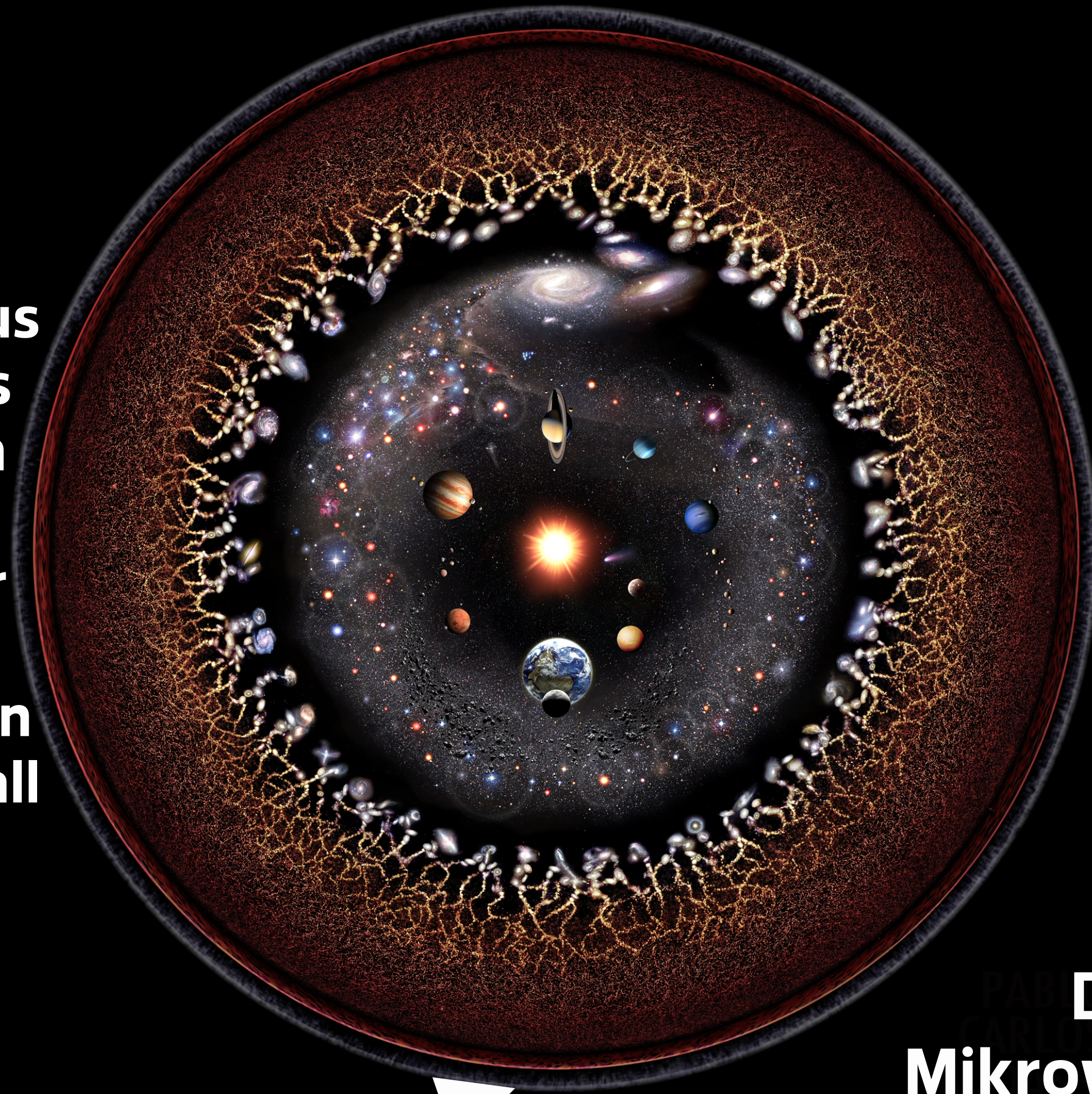
Das beobachtbare Universum



**Der kosmische
Mikrowellen-Hintergrund**

Das beobachtbare Universum

Zu diesem Zeitpunkt bestand das 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.



**Der kosmische
Mikrowellen-Hintergrund**

At Last, There's

A globe-spanning

Astronomers detect 'cosmic bass note' of gravitational waves

Sound comes from the merging of supermassive black holes across the universe, according to scientists

Scientists 'hear' cosmic hum from gravitational waves

Gravitational waves that ripple through the universe

Scientists have observed for the first time the faint ripples caused by the motion of holes that are gently stretching and squeezing everything in the universe

'Black Hole' Galaxy Space

Gravitational waves at the center of the Milky Way

Scientists reveal how black holes come from collisions

of Low-Frequency Gravitational Waves

the waves, which

and from pairs

cosmic hum from

faint ripples caused by the motion of black holes, which are rippling everything in the universe.

A Background 'Hum' Pervades the Universe. Scientists Are Racing to Find Its Source

Astronomers are now seeking to pinpoint the origins of an exciting new form of gravitational waves that was announced earlier this year

Monster gravitational waves spotted for first time

Colossal gravitational waves—trillions of miles long—found for the first time

by studying rapidly spinning dead stars, which create giant ripples of spacetime likely from merging supermassive black holes

In a major discovery, scientists say space-time churns like a choppy sea

The mind-bending finding suggests that everything around us is constantly being rolled by low-frequency gravitational waves

it may be from supermassive black holes

Gravitational Waves

First Evidence of Giant Gravitational Waves Thrills Astronomers

For first time ever, scientists "hear" gravitational waves rippling through the universe

are tuning in to a never-before-seen type of gravitational waves spawned by pairs of supermassive black holes

new form of ripple in spacetime

Scientists discover that universe is a giant gravitational wave

background waves produce a background hum across the whole universe

After decades of searching, astronomers have found a distinctive pattern of light, from spinning stars called pulsars, that suggests huge gravitational waves are creating gentle ripples in space-time across the universe

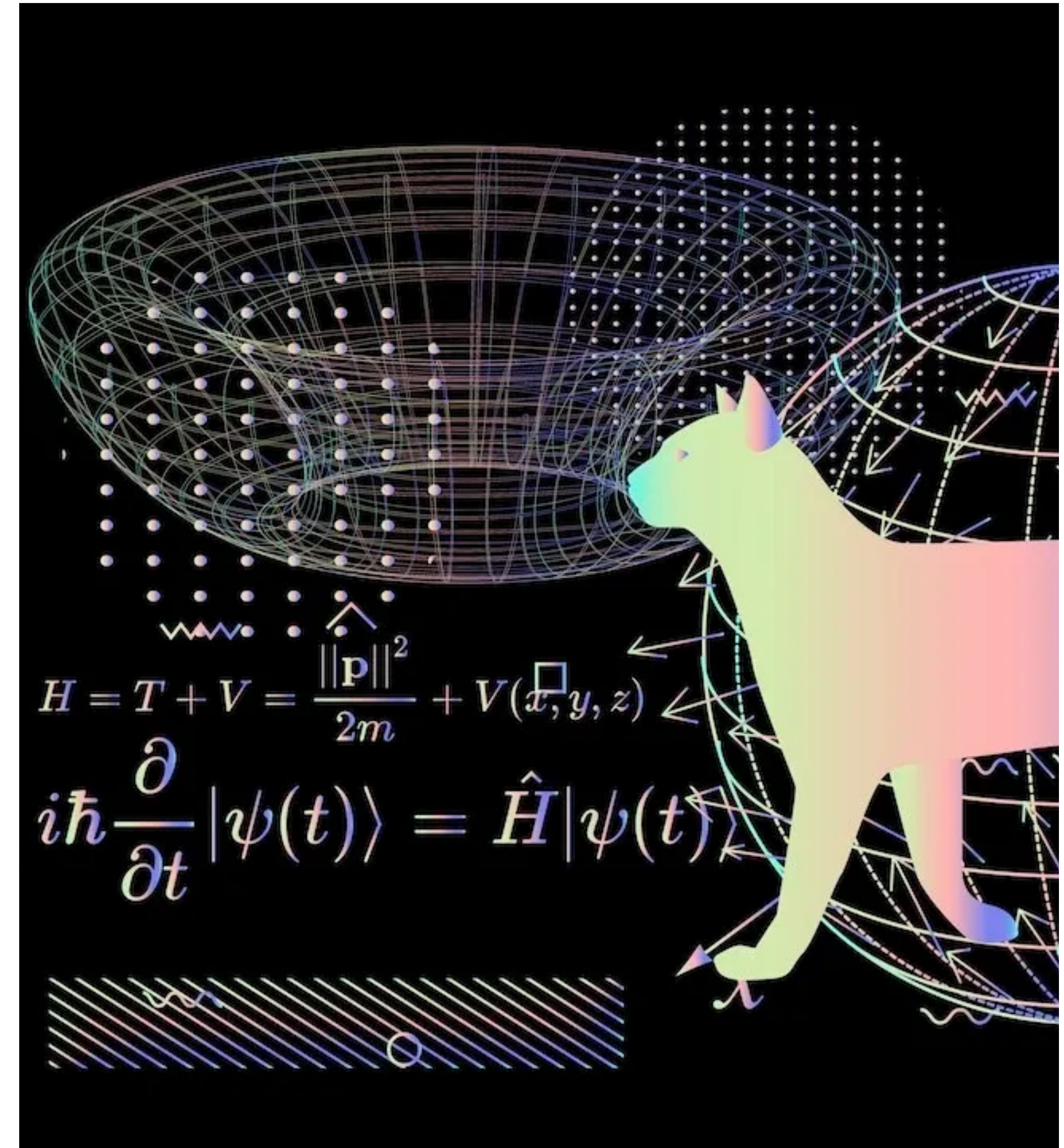
The results are a background hum across the universe.



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!

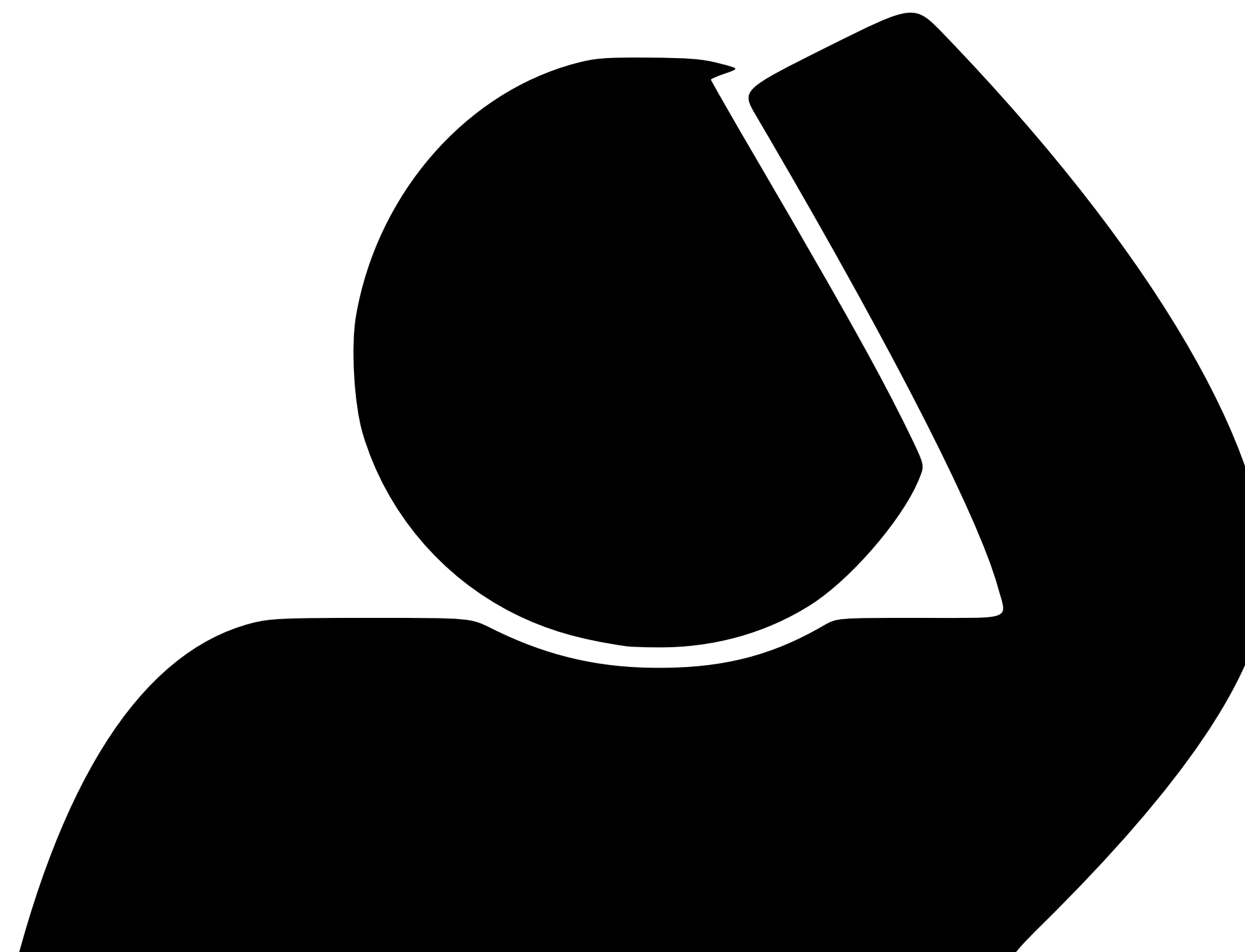


**Dankeschön für eure
Aufmerksamkeit!**
Gibt es Fragen?



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

Richard
Feynman



Alternative Interpretation der Quantenmechanik: Die Viele-Welten-Theorie



Die Kopenhagener Deutung wird oft [...] dahingehend missdeutet, als behauptete 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.

