

Moderne Experimentalphysik II

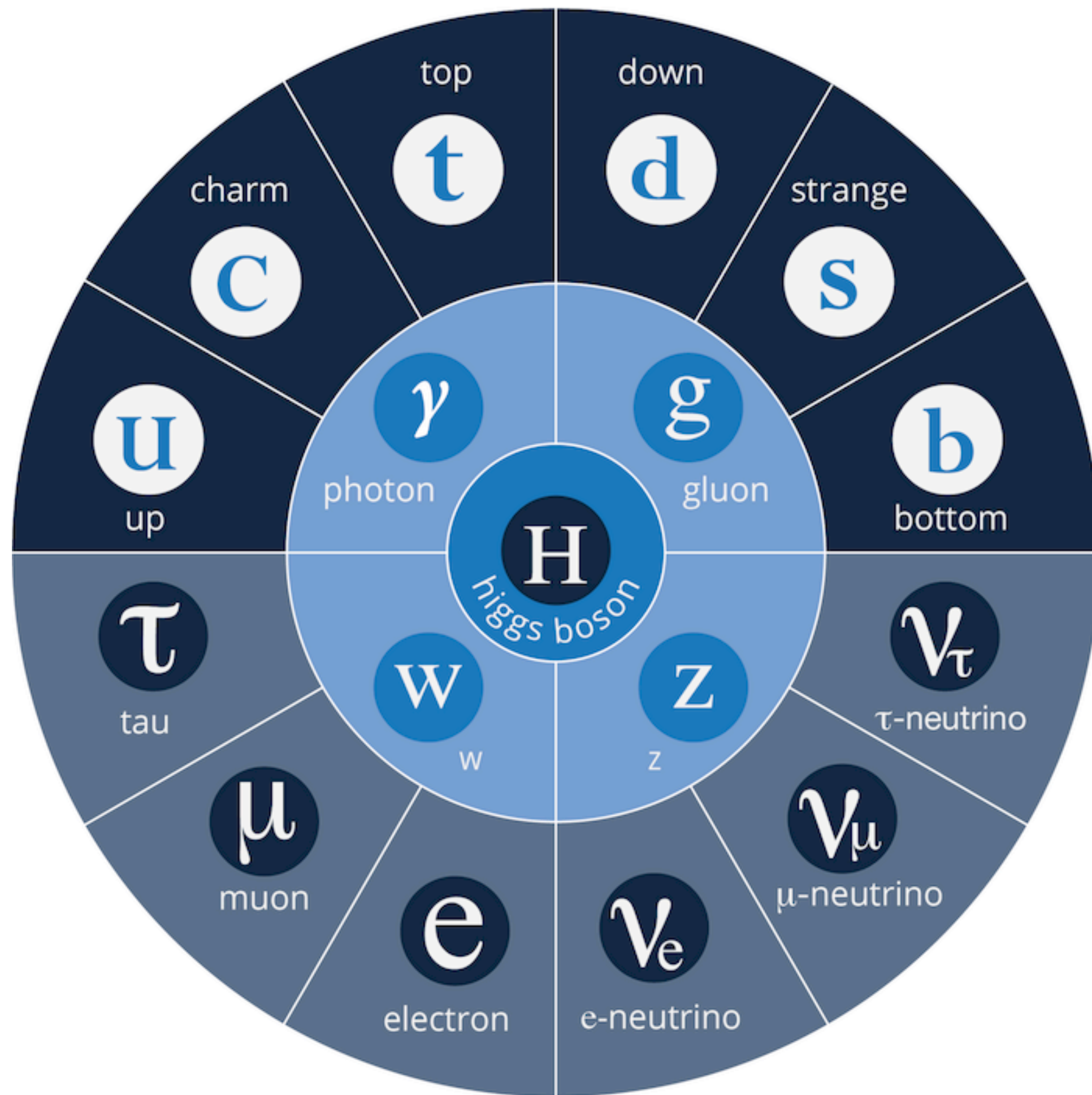
PART II: Teilchenphysik

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu)
Institute für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



■ 1. Einführung

- **1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation und Tips**
- 1.2. Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Einheiten
- 1.5. Relativistische Kinematik
- 1.6. Feynman Diagramme



Teamvorstellung

■ Dozent: **Prof. Dr. Markus Klute**

- Institute für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)
- E-Mail: markus.klute@kit.edu
- Internet: <https://web.etp.kit.edu/~klute/>
- Büro Campus Süd:
Physik-Hochhaus 30.23, Raum 9-4
Büro Campus Nord:
Geb. 401, Raum 330
- Sprechstunde (auch via Zoom) nach Vereinbarung, gerne auch in kleinen Gruppen
Bitte Anmeldung via E-Mail



Teamvorstellung

- Dozent: **Prof. Dr. Markus Klute**

- Fachgebiet: Experimentelle Teilchenphysik

Physik des Higgs Bosons, Standard Model
Präzisionsmessung, Kalorimeter, zukünftige
Beschleuniger-Experimente, Computing und
Data Analyse

- CV: studiert und promoviert in Bonn, PostDoc
am MIT, Professor in Göttingen, am MIT und
seit 2021 am KIT

- Privat:
Laufen, Tennis, Fussball, Kaffee, Pizza, Katzen



Teamvorstellung

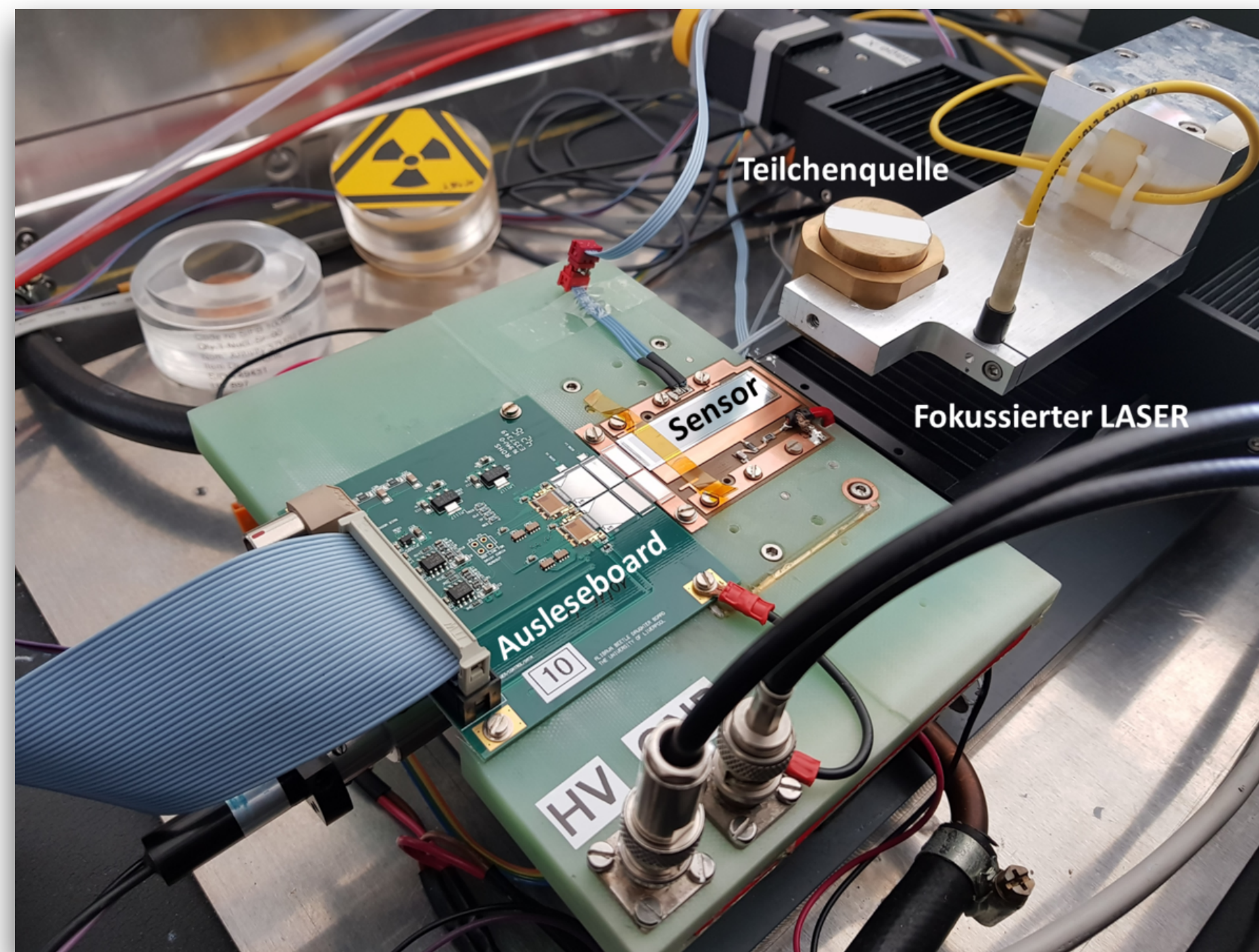
- Organisation des Tutoriums:
**Dr. Michael Waßmer (michael.wassmer@kit.edu) und
Jost von den Driesch (jost.driesch@kit.edu)**



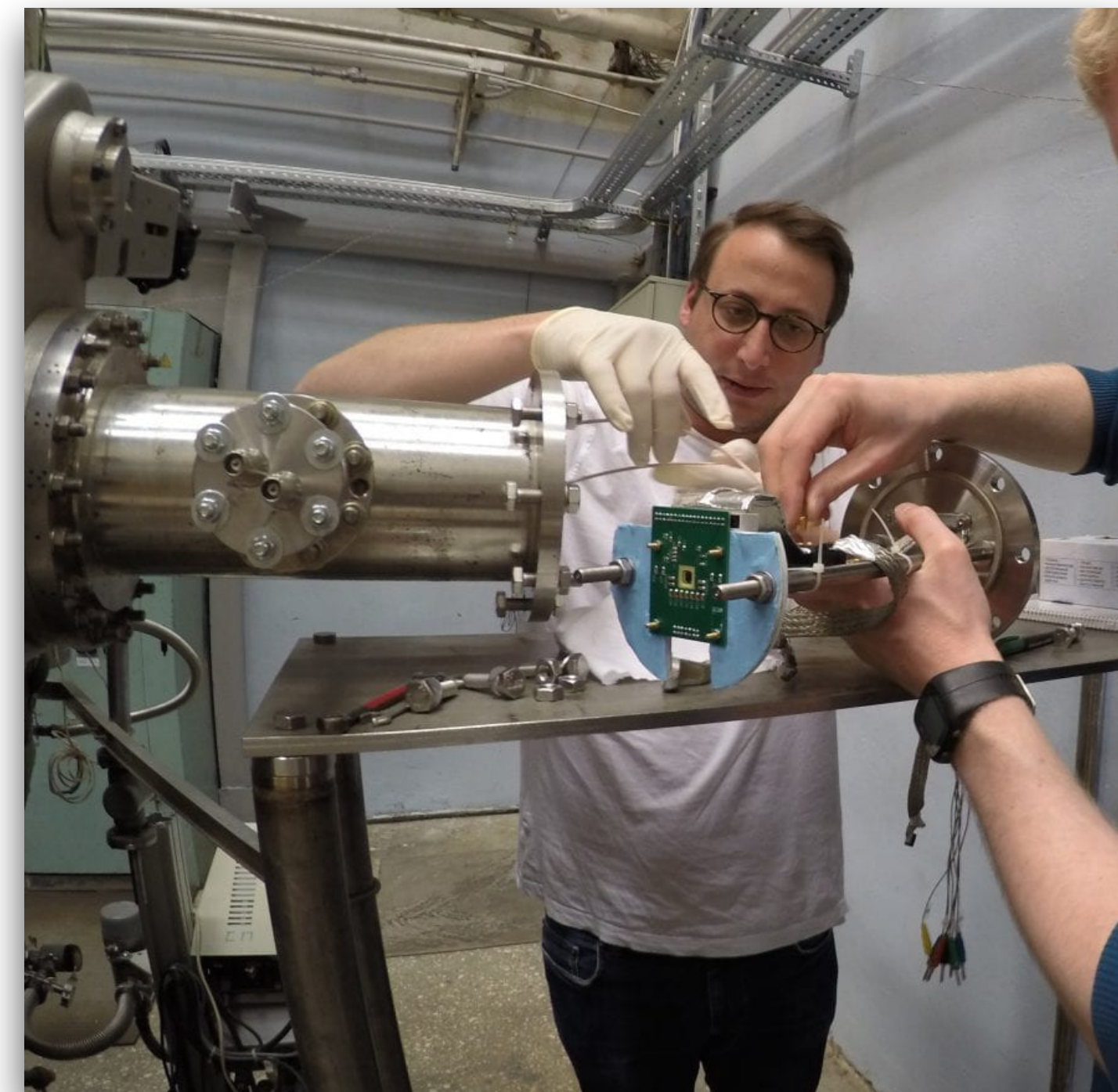
Teamvorstellung

- Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik am KIT
- Forschung am ETP/IAP: CMS, KATRIN, Belle-II, Xenon/DARWIN, DELight, Auge, IceCube, LUXE, SHADOWS, FCC, ...

Beispiel:
Si-Streifendetektor



Beispiel:
KATRIN Detektor



- Verständnis der experimentellen Grundlagen und deren mathematischer Beschreibung auf dem Gebiet der Teilchenphysik
- Kenntnis von Konzepten
- Einfache physikalische Probleme können selbstständig bearbeitet werden

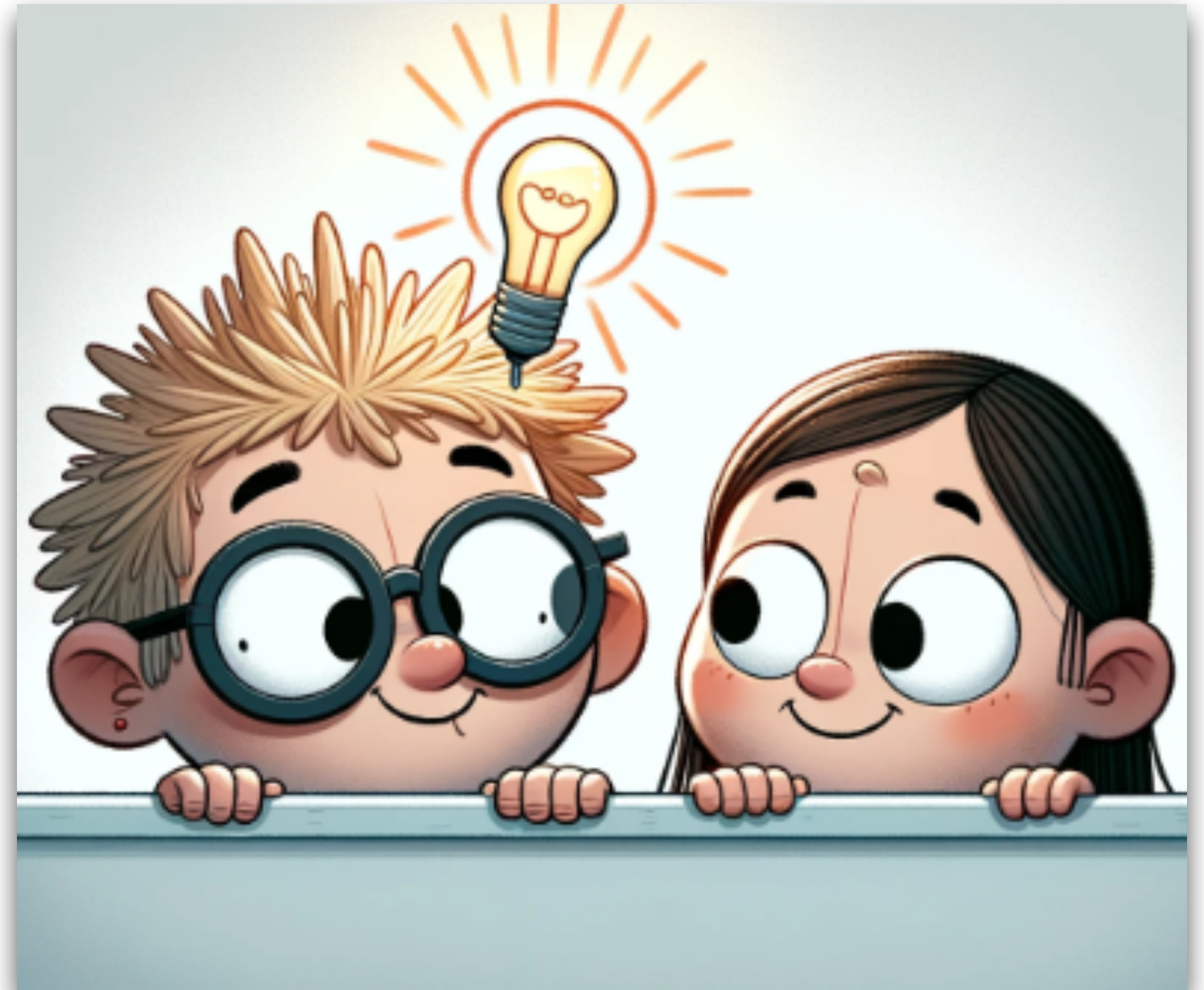


Lernphilosophie dieser Vorlesung

- Aktives Lernen

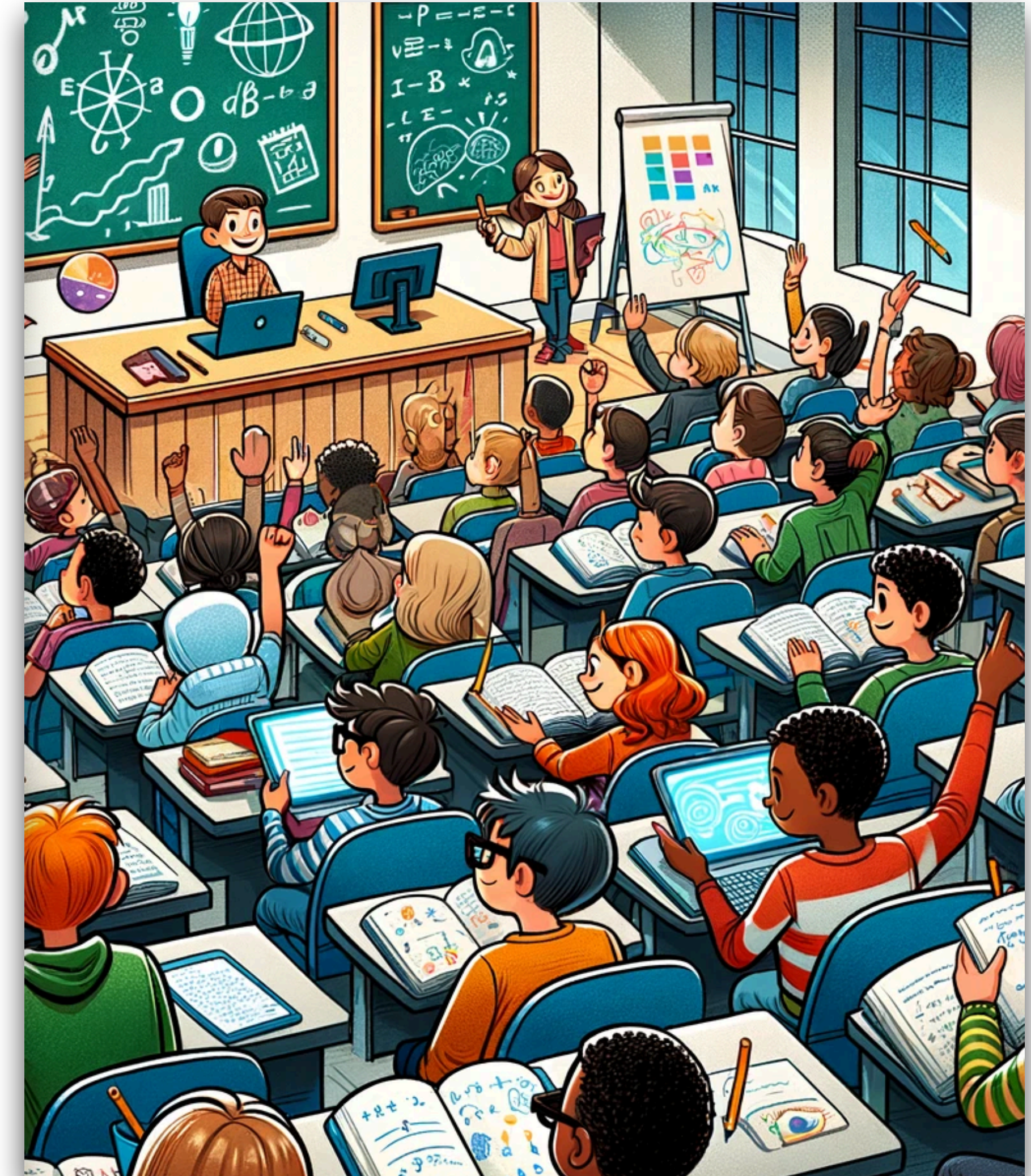


- Peer Instructions



Vorlesungskomponenten

- Präsenzvorlesung zweimal pro Woche
- Tutorium
 - Vortrag, Quiz, Fragen, Aufgaben
- Saalübung
 - Besprechung der Hausaufgaben
 - Mittwoch 11:30 Kleiner Hörsaal A
- Hausaufgaben
 - Übungszettel
 - Vor- und Nachbereitung der Vorlesung
- Bitte stellen Sie **jederzeit** Fragen?



PINGO Feedback

- Fragen zur letzten oder aktuellen Vorlesung
 - Sie geben Ihre Antwort (anonym) ein
- Feedback für Sie und für uns
 - Wir diskutieren die Antworten und gehen bei Bedarf näher auf Themen ein
- PINGO: <https://pingo.coactum.de/777912>
 - Umfrage: Moderne Experimentalphysik II - Part II
 - Zugangscode: 777912



Vorlesungstermine

				Thema Vorlesung
KW 50	Dienstag	2023-12-12		
	Donnerstag	2023-12-14	VL1	Einführung
KW 51	Dienstag	2023-12-21	VL2	Experimentelle Methoden
	Donnerstag	2023-12-23	VL3	Experimentelle Methoden
KW 52	Dienstag	2023-12-26	Weihnachtsferien	
	Donnerstag	2023-12-28		
KW 1	Dienstag	2024-01-02	Weihnachtsferien	
	Donnerstag	2024-01-04		
KW 2	Dienstag	2024-01-09	VL4	Experimentelle Methoden
	Donnerstag	2024-01-11	VL5	Experimentelle Methoden
KW 3	Dienstag	2024-01-16	VL6	Struktur der Materie
	Donnerstag	2024-01-18	VL7	Struktur der Materie
KW 4	Dienstag	2024-01-23	VL8	Symmetrien und Erhaltungssätze
	Donnerstag	2024-01-25	VL9	Symmetrien und Erhaltungssätze
KW 5	Dienstag	2024-01-30	VL10	Wechselwirkungen
	Donnerstag	2024-02-01	VL11	Wechselwirkungen
KW 6	Dienstag	2024-02-06	VL12	Wechselwirkungen
	Donnerstag	2024-02-08	VL13	Wechselwirkungen
KW 7	Dienstag	2024-02-13	VL14	Neutrino- und Astroteilchenphysik
	Donnerstag	2024-02-15	VL15	Zusammenfassung und Ausblick

Einordnung ins Physikstudium

Sem	Experimentalphysik	Theoretische Physik	Mathematik	Programmieren und Rechnernetz	Physikalische Praktika	Wahlpflicht und Bachelorarbeit	überfachliche Qualifikationen	LP
1	KlassExPhys I Mechanik V4 Ü2 8	KlassThPhys I Einführung V2 Ü2 6	Mathematik Höhere Math. I V6 Ü2 10	Programmieren Progr. und Algorithmen V2 Ü2 6				30
2	KlassExPhys II Elektrodynamik V3 Ü2 7	KlassThPhys II Mechanik V2 Ü2 6	Mathematik Höhere Math. II V6 Ü2 10	Computeralgebra Computeralgebra V1 Ü1 2			Üq Computergest. Datenauswertung V1 Ü1 2 Üq* 2	29
3	KlassExPhys III Optik & Thermodynamik V5 Ü2 9	KlassThPhys III Elektrodynamik V4 Ü2 8	Mathematik Höhere Math. III V2 Ü1 4		Praktikum Klass. Physik I P6 6	Chemie Grundl. der allg. Chemie I V4 4		31
4	ModExPhys I Kerne, Atome u. Molek. V4 Ü2 8	ModThPhys I Quantenmechanik V4 Ü2 8			Praktikum Klass. Physik II P6 6	Chemie Organ. Chemie I V3 3 Chemie Anorg. chem. Prakt.** 7		32
5	ModExPhys II Struktur der Materie V4 Ü2 8 ModExPhys I u. II Mündliche Prüf. 4*	ModThPhys II Fortg. QM u. Stat. Phys V4 Ü2 8		Wahl Rechnernutzung Stat. Datenanal. oder Einf. in C++ V1 Ü1 2	Praktikum Mod. Physik* P4 6 (wird wahlweise auch im SS ange- boten)			28*
6	Wahl ModExPhys. III Exp. Festkörper- physik oder Astro- und Teilchenphysik V2 Ü2 6	ModThPhys I u. II Mündliche Prüf. 4* Wahl ModThPhys III Th. Kond. Mat. oder Th. Teilchenphys. V3 Ü1 6				Bachelorarbeit 12 (kann im 5. oder 6. Semester an- gefertigt werden)	Üq* 2	30*
Summe: 180								

Kolloquium

■ Physikalisches Kolloquium

- Lehmann Hörsaal
- Freitag 15:45 Uhr
- Programm

■ Teilchenphysik Kolloquium

- Kleiner Hörsaal B
- Donnerstag 15:45 Uhr
- Programm

Matthew McCullough (CERN): Inflation and the Structure of the Higgs Vacuum
Thursday 14 Dec 2023, 15:45 → 17:15 Europe/Zurich

15:45 → 16:30 Inflation and the Structure of the Higgs Vacuum ⌚ 45m

When the fundamental parameters of a theory are functions of a scalar field subject to large fluctuations during inflation, quantum phase transitions can act as dynamical attractors. As a result, the theory parameters can be probabilistically localised around critical values, with the Universe finding itself at the edge of a phase transition. We illustrate how this mechanism could account for the observed near-criticality of the Higgs vacuum, as well as an explanation for the naturalness of the Higgs mass.

Speaker: Matthew Philip McCullough (CERN)

 kceta_colloquium_2...



CERN Summer Student Program

- <https://home.cern/summer-student-programme>

Summer Student Programme

The programme is currently open for applications. All applications should reach us no later than 12 noon CET on 30 January 2023. The selections will take place over the period of March/April.

The [CERN Summer Student Programme](https://home.cern/summer-student-programme) offers students pursuing bachelor's or master's degrees in physics, computing, engineering and maths a unique opportunity to join in the day-to-day work of research teams participating in experiments at CERN in Geneva, Switzerland. Beyond the outstanding first-class scientific value of their stay, the selected students will find working in a multidisciplinary and multicultural environment an extremely enriching personal experience. It is an once-in-a-lifetime opportunity to make valuable and long-lasting contacts with other students and scientists from all over the world.

In addition to the work in the experimental teams, Summer Students attend a [series of lectures](#) specially prepared for them. Several scientists from around the world share their knowledge about a wide range of topics in the fields of theoretical and experimental particle physics and computing. Visits to the accelerators and experimental areas are also part of the programme, as well as discussion sessions, workshops and a poster session. Students are required to prepare a short report on their work at CERN, which should be submitted at the end of their stay. Students come for between eight weeks (minimum stay) and 13 weeks (maximum stay).

The application form is available on the [Careers at CERN website](#) (all nationals are welcome to apply).

Hilfe bei psychischen Problem und Depression

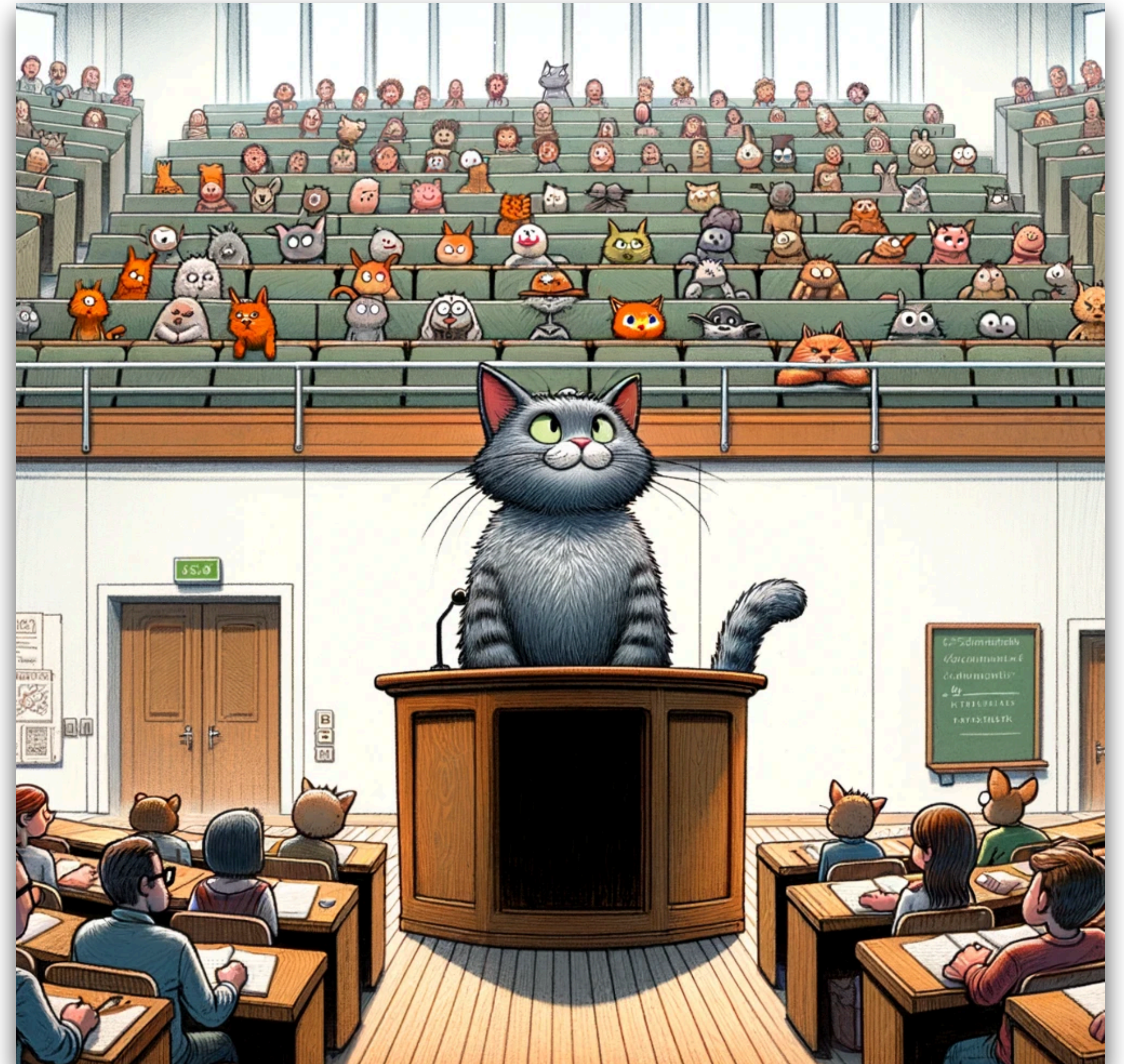
- **Depressionen sind eine häufig und ernstzunehmende** psychische Erkrankung, die Menschen aller Altersgruppen und sozialer Schichten betrifft
- Symptome sind Traurigkeit, Hoffnungslosigkeit, Schuldgefühle, Wut, Müdigkeit, Schlaflosigkeit, Appetitveränderungen, körperliche Schmerzen oder Selbstmordgedanken
- **Depressionen sind kein Zeichen von Schäche oder ein persönlicher Makel**
- Es handelt sich um eine behandelbar medizinische Krankheit
- **Suchen Sie Hilfe! Sie sind nicht allein!**
- Hilfe gibt es bei mir und:
 - Psychotherapeutische Beratungsstelle (PBS) des Studienwerks (<https://www.sw-ka.de/de/beratung/psychologisch/>)
 - Hochschulgrupper Nightline (<https://www.nightline-karlsruhe.de/>): Zuhörtelefon für Studierende von Studierenden
 - Telefonseelsorge Karlsruhe (<https://www.telefonseelsorge-karlsruhe.de/>)
 - Städtisches Klinikum Karlsruhe, Ambulanz der Psychiatrischen Klinik, 24-Stunden-Notfalldienst: +497219743773

Hilfe bei Belästigung oder sexueller Gewalt

- Belästigung und sexuelle Gewalt sind **schwerwiegende und inakzeptable** Formen des Missbrauchs, die Student*innen betreffen können
- Sie umfassen unerwünschte Annäherungen, Berührungen oder Übergriffe, Stalking, Cybermobbing, Hassreden, Diskriminierung und Nötigung
- Sie sind **nicht die Schuld der Opfer**. Sie sind Ergebnis der Handlungen und Entscheidungen der Täter
- **Suchen Sie Hilfe! Sie sind nicht allein!**
- Hilfe gibt es bei mir und:
 - Gleichstellungsbeauftragte des KIT: Britta Bergfeldt, Birgid Langer (<https://www.chg/kit.edu>)
 - Gleichstellungsbeauftragte der Physik: Prof. Corinna Hoose (corinna.hoose@kit.edu) und Prof. Milada Margarete Mühleitner (milada.muehlleitner@kit.edu)

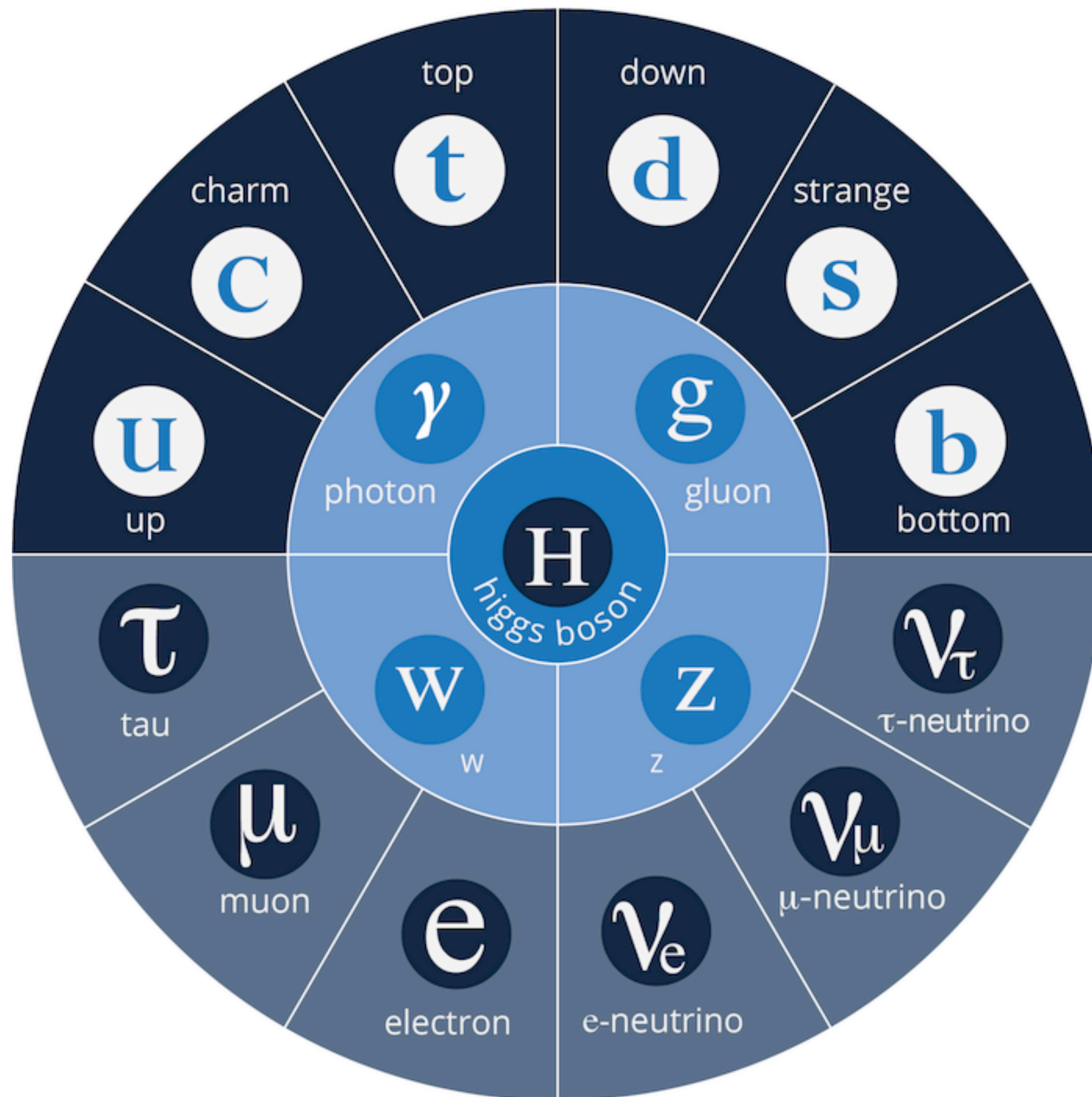
Katzen

- Eure Katze kann an den Vorlesungen teilhaben.
- Schicken Sie mir ein Bild und eine Frage zur Teilchenphysik (Übung, Vorlesung, etc.) mit Beschreibung



■ 1. Einführung

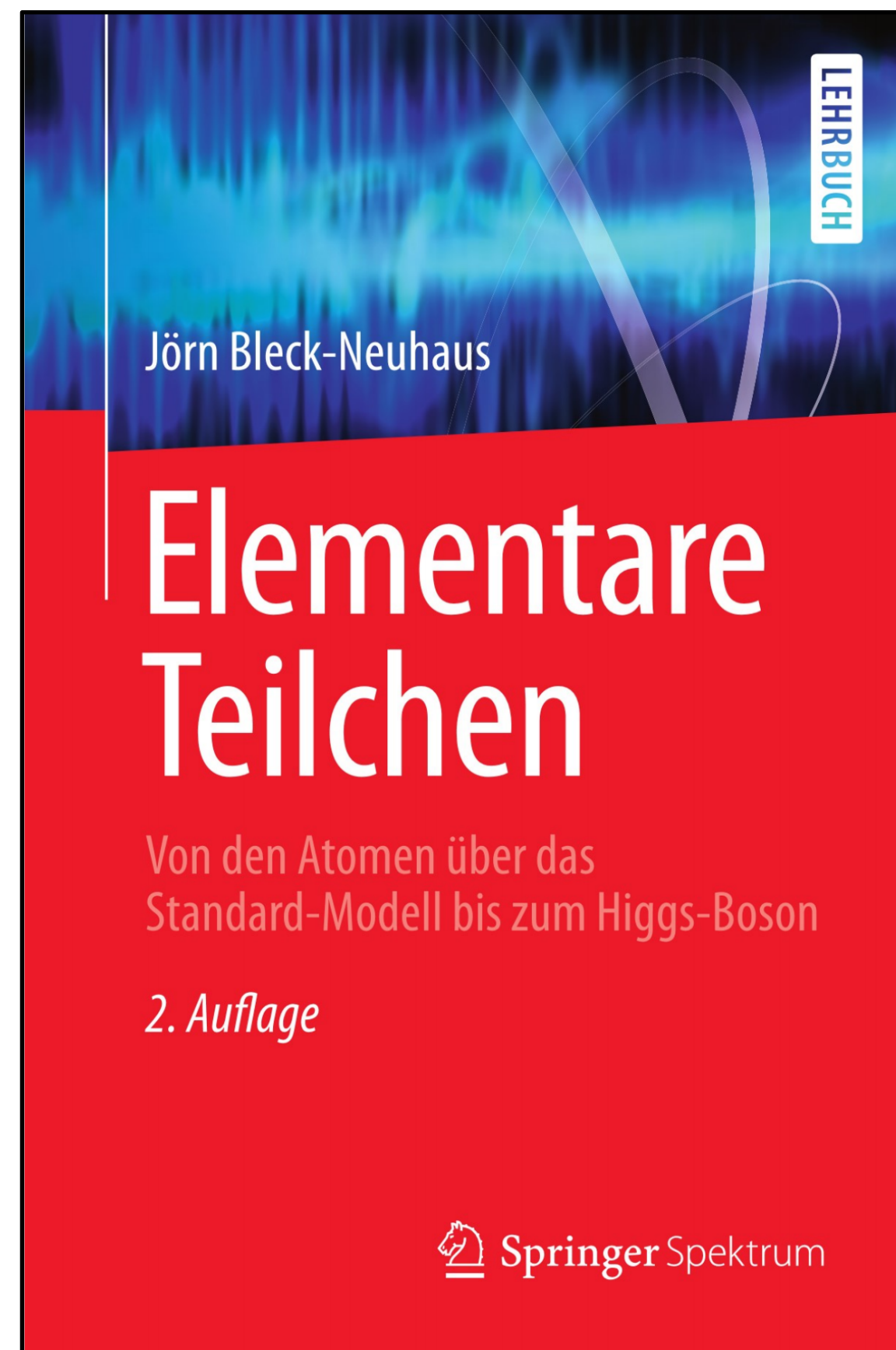
- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation, und Tips
- **1.2. Literatur**
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Relativistische Kinematik
- 1.5. Feynman Diagramme



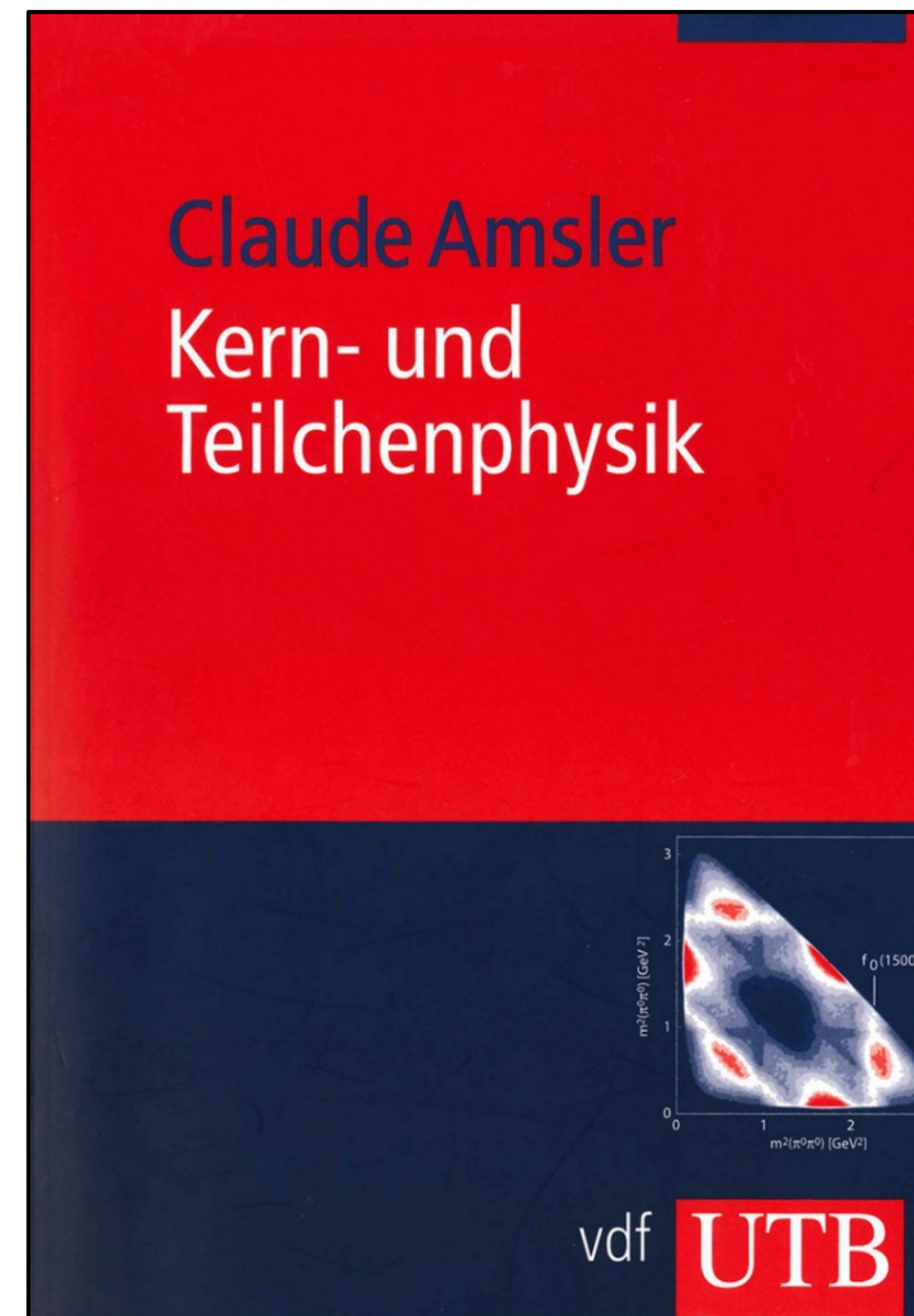
Bücher (eBooks/pdfs)



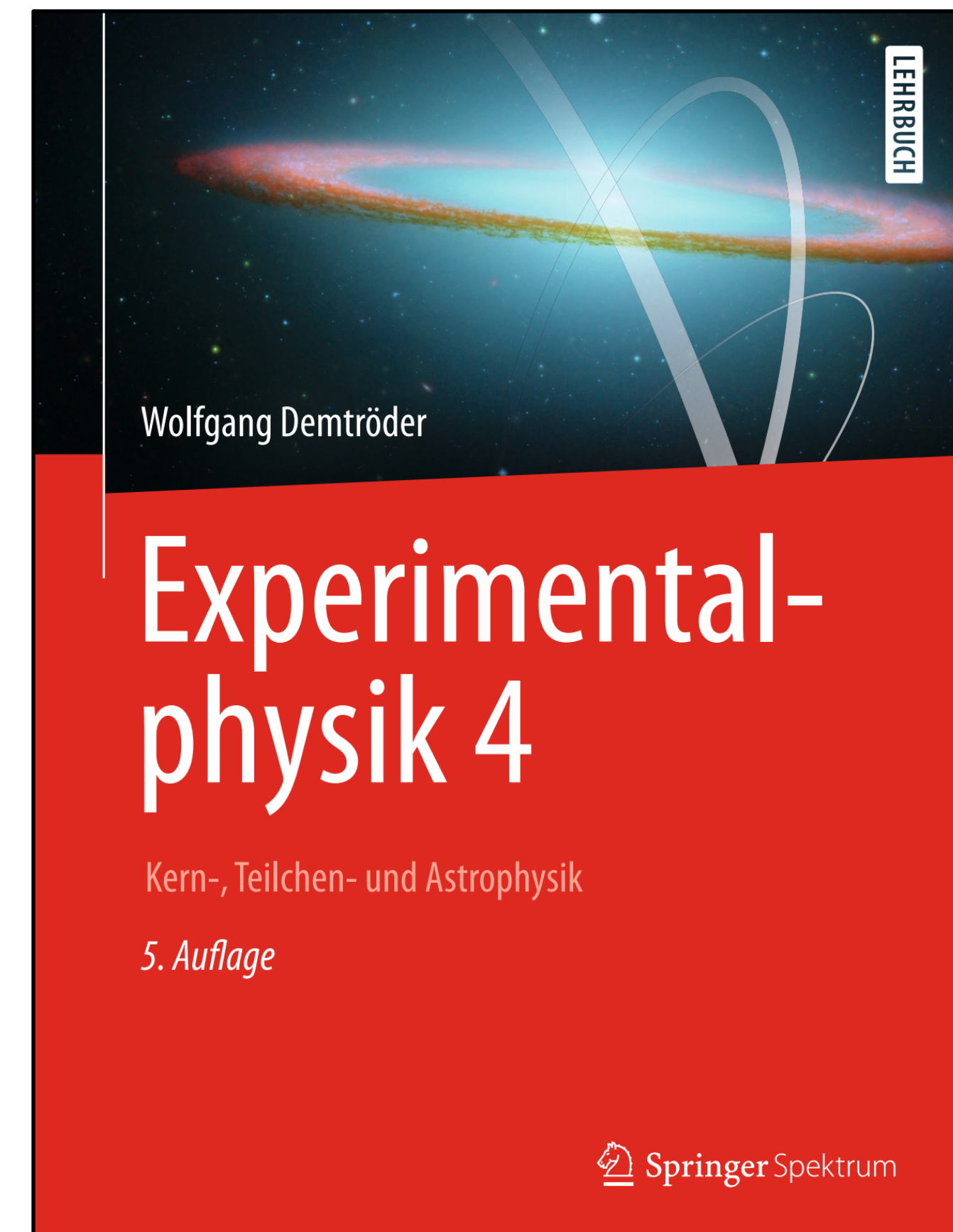
B. Povh, K. Rith, ...
[Teilchen und Kerne](#)
Springer (9. Aufl.) 2014



J. Bleck-Neuhaus
[Elementare Teilchen](#)
Springer (2. Aufl.) 2013

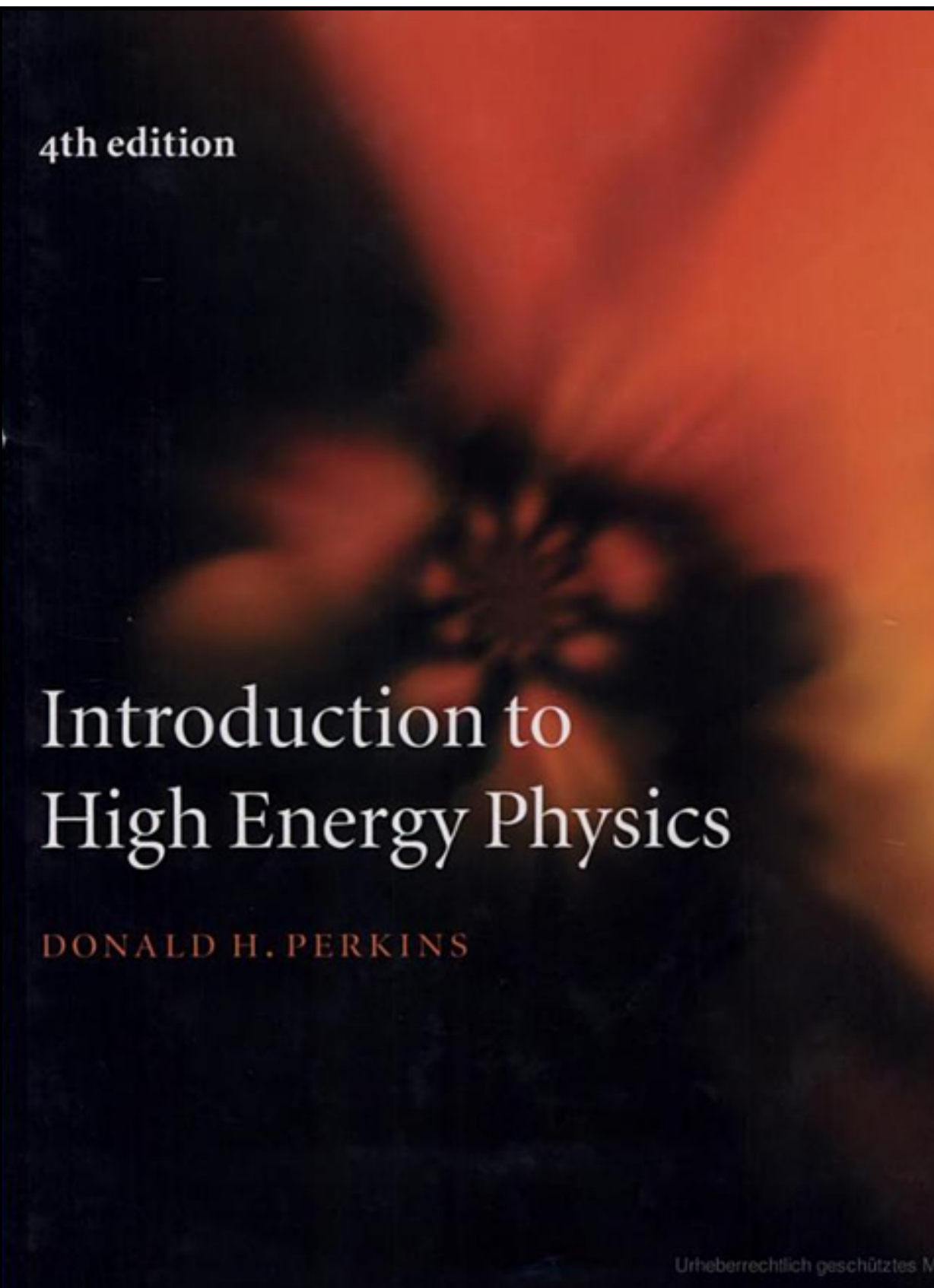


Claude Amsler
[Kern- & Teilchenphysik.](#)
vdf (1. Aufl.) 2007

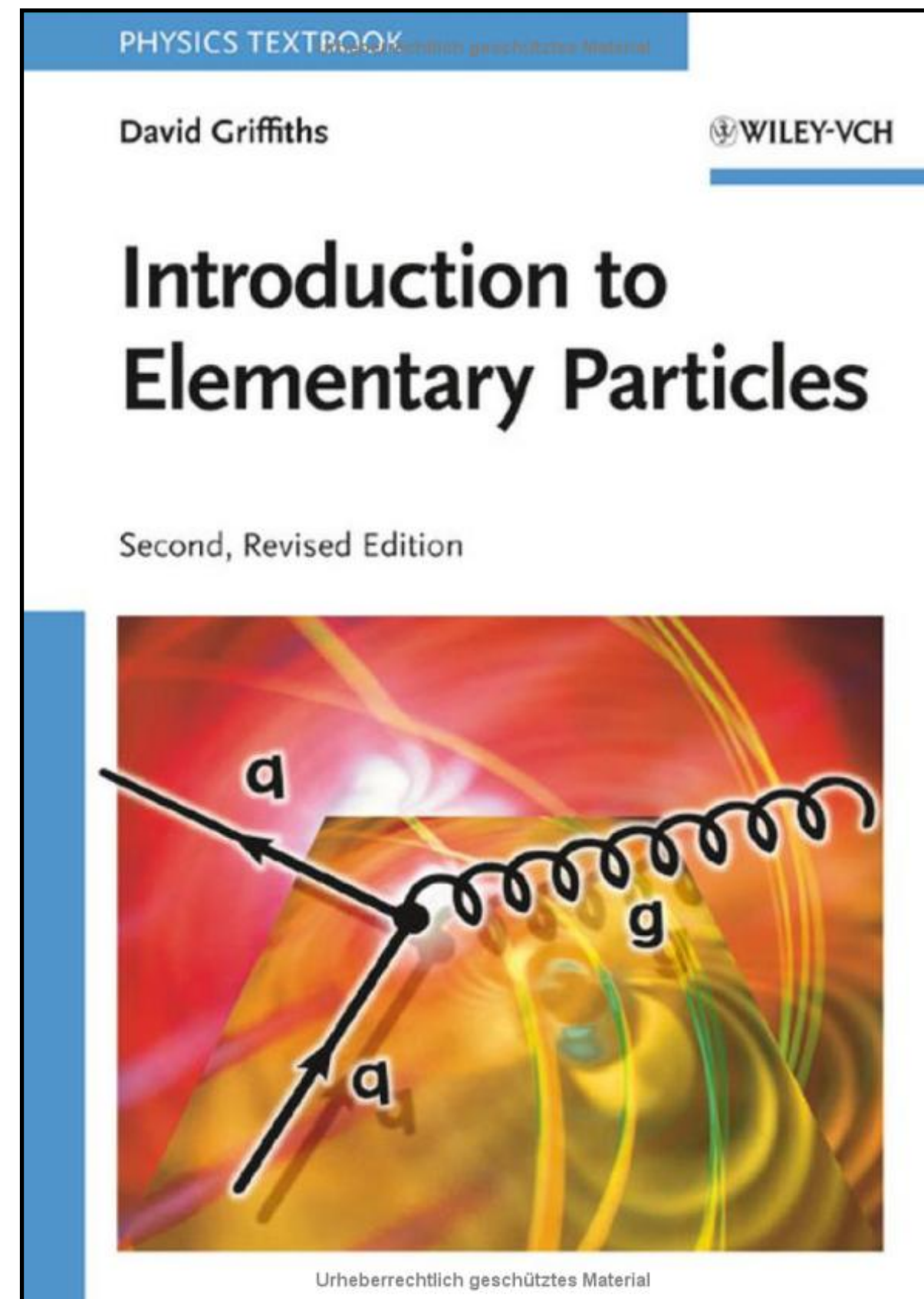


Wolfgang Demtröder
[Experimentalphysik 4](#)
Springer (5. Aufl.) 2017

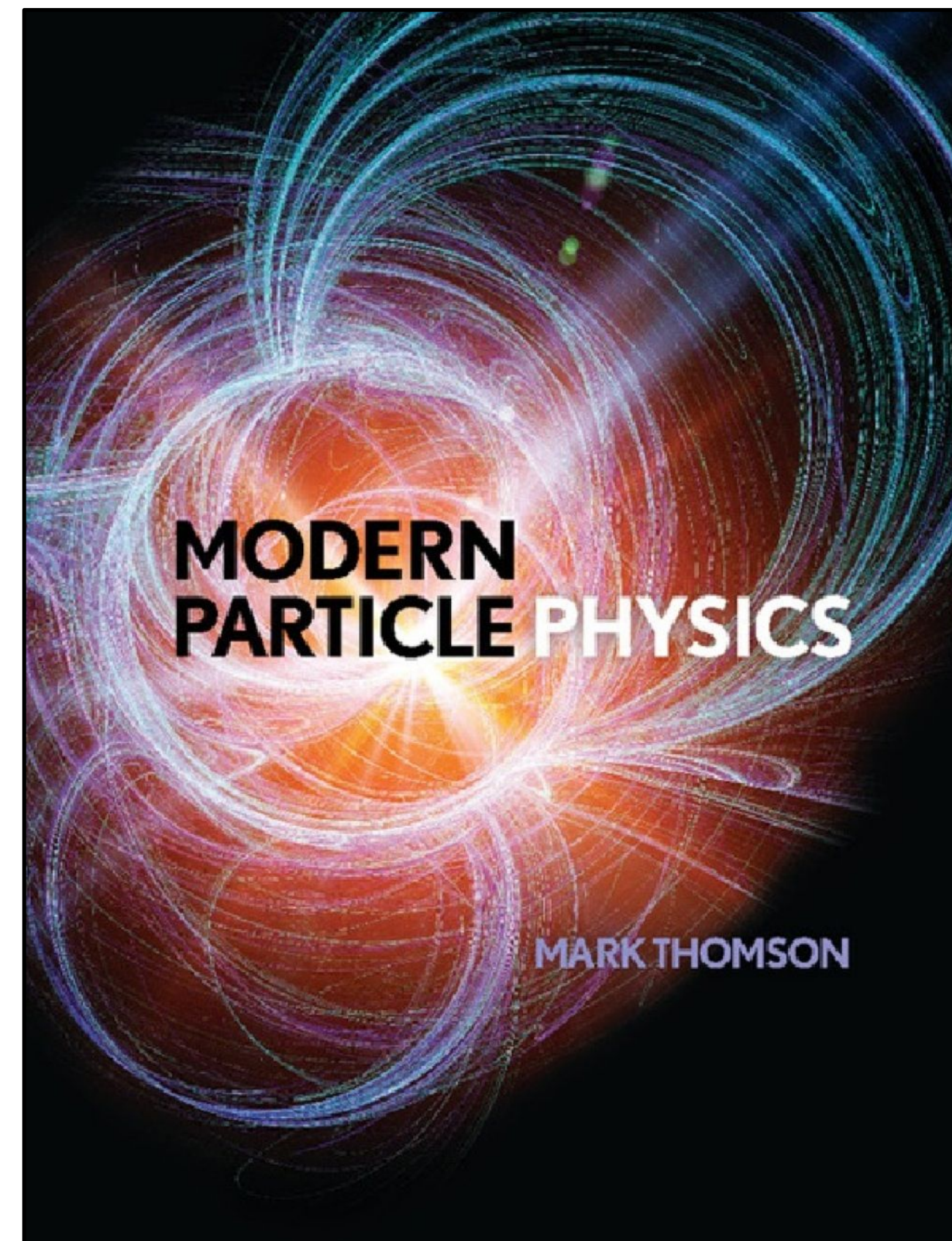
Bücher (eBooks/pdfs)



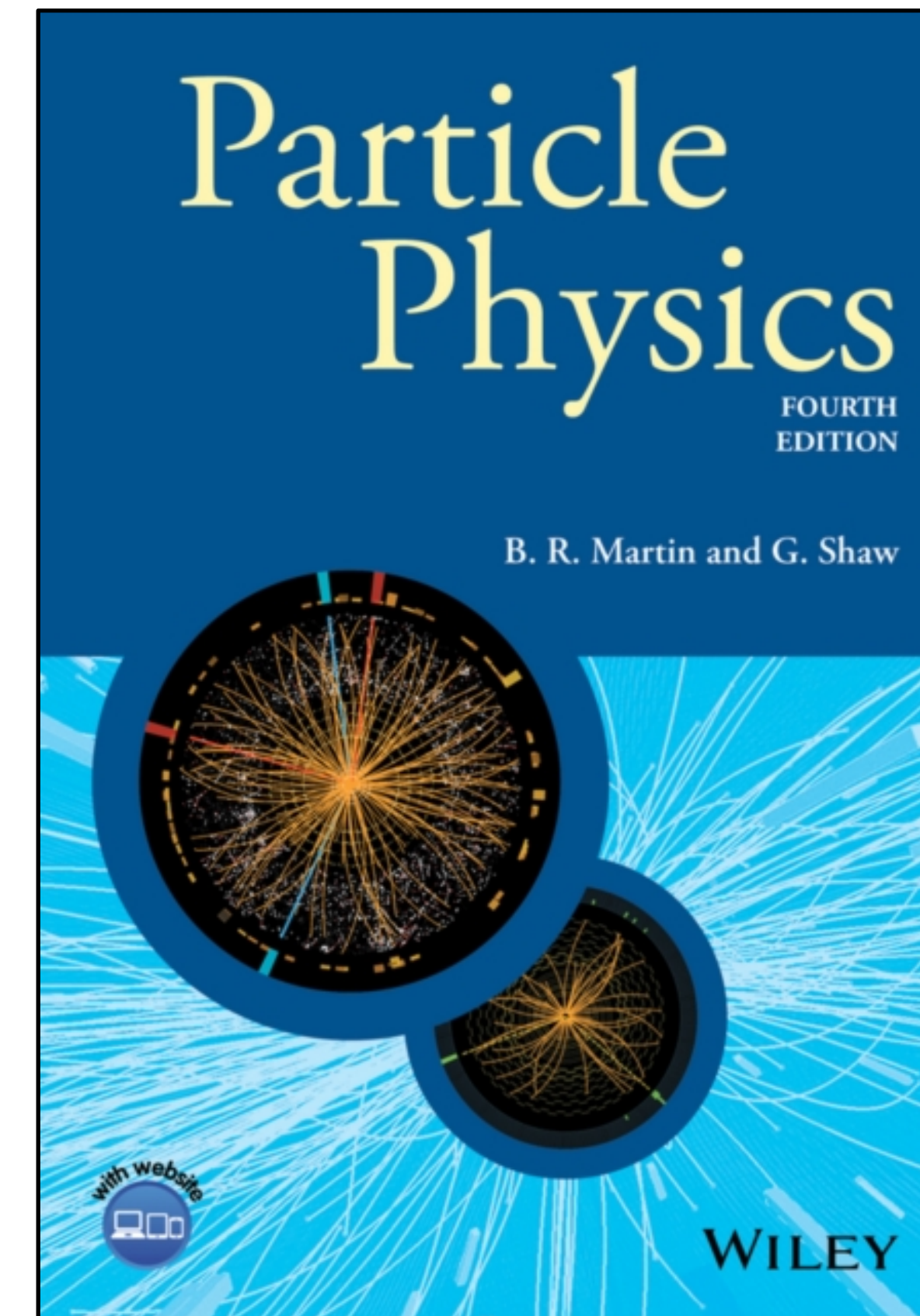
Donald **Perkins**
[Intro to HE Physics](#)
Cambridge (4. Aufl.) 2000



David **Griffiths**
[Intro to Elem. Particles](#)
Wiley (2nd rev. Ed.) 2008

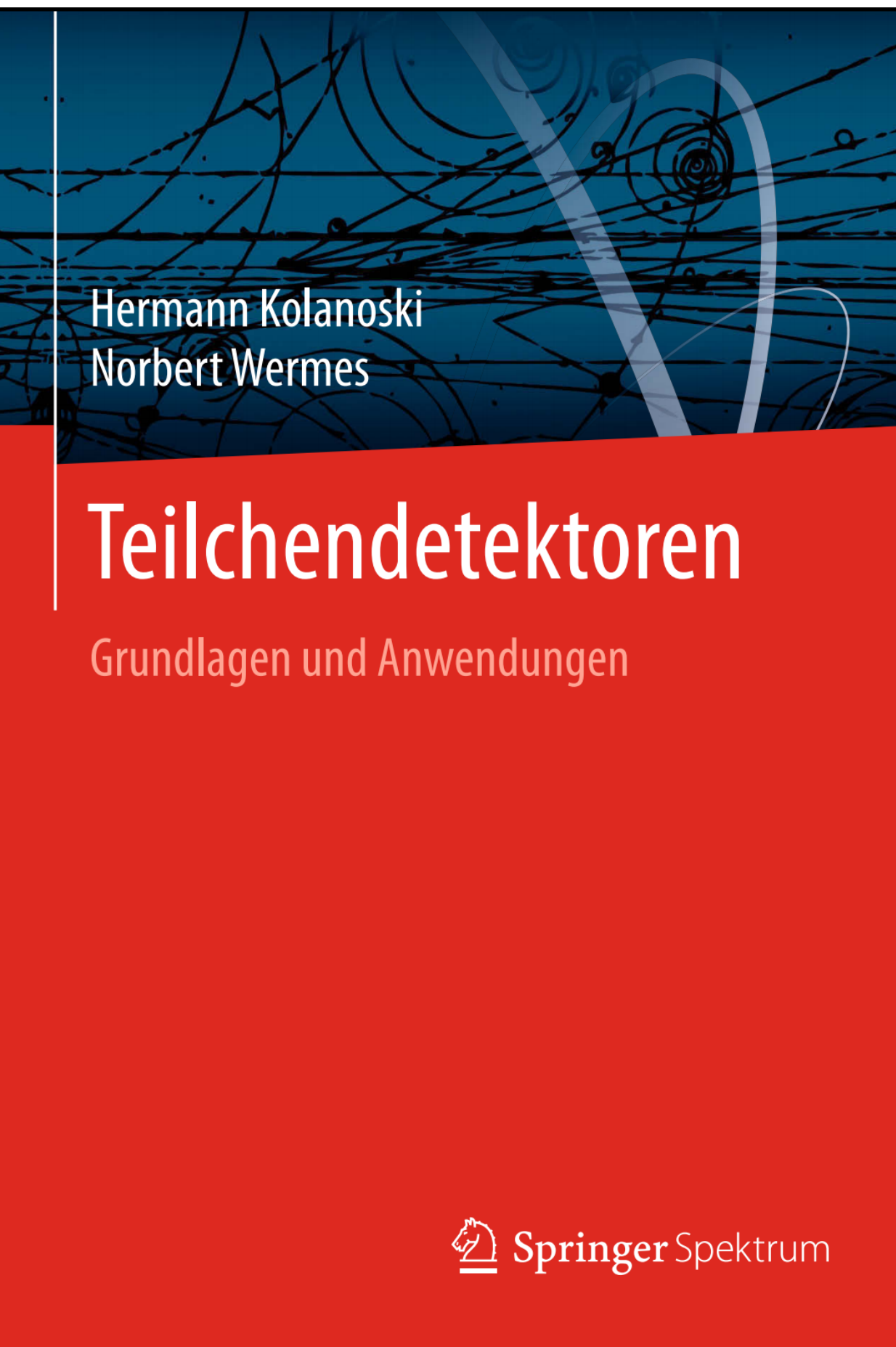


Mark **Thomson**
[Modern Part. Physics](#)
Cambridge (1. Aufl.) 2013



B.R. Martin, G.P. Shaw
[Particle Physics](#)
Wiley (4. Aufl.) 2017

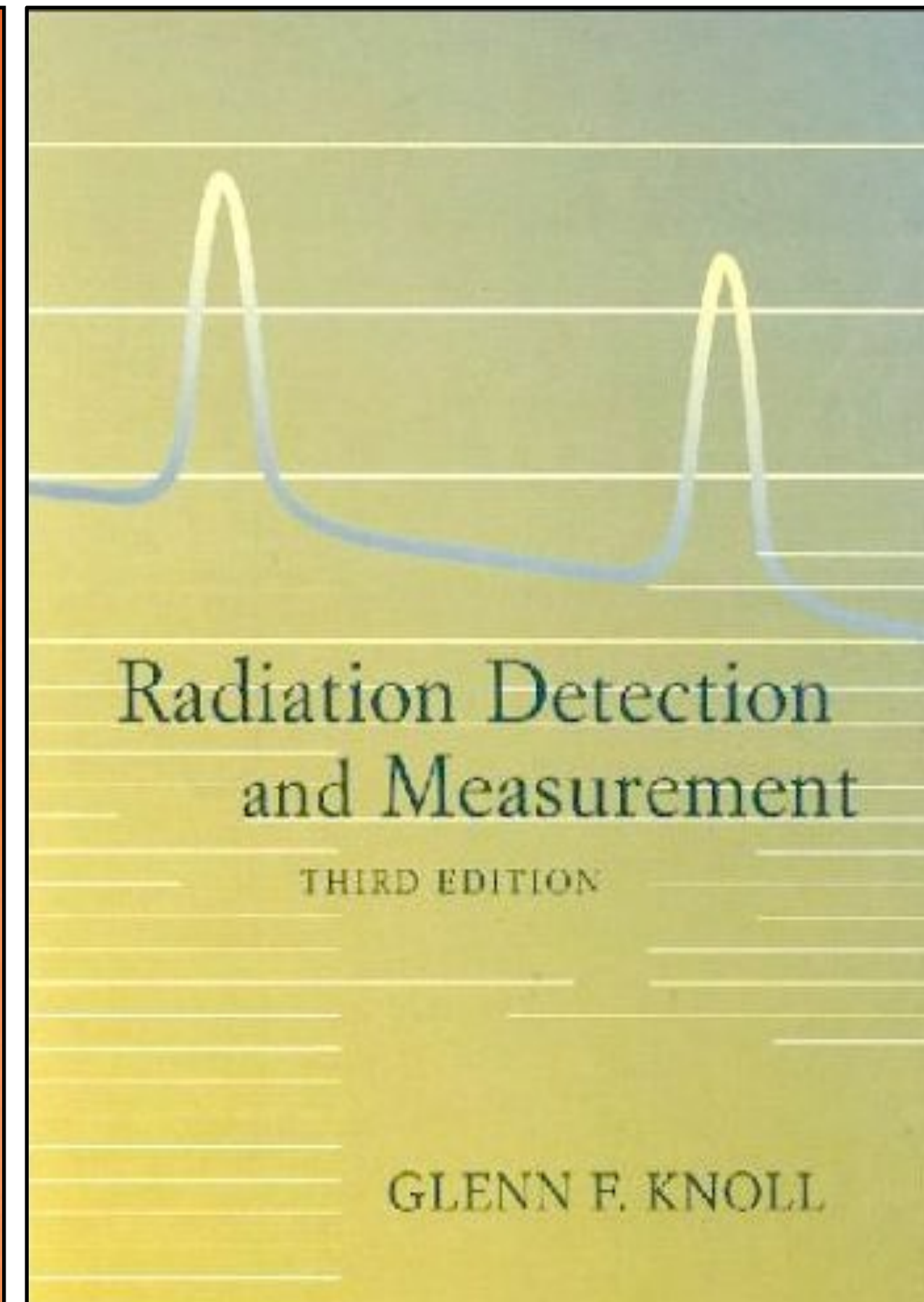
Bücher (eBooks/pdfs)



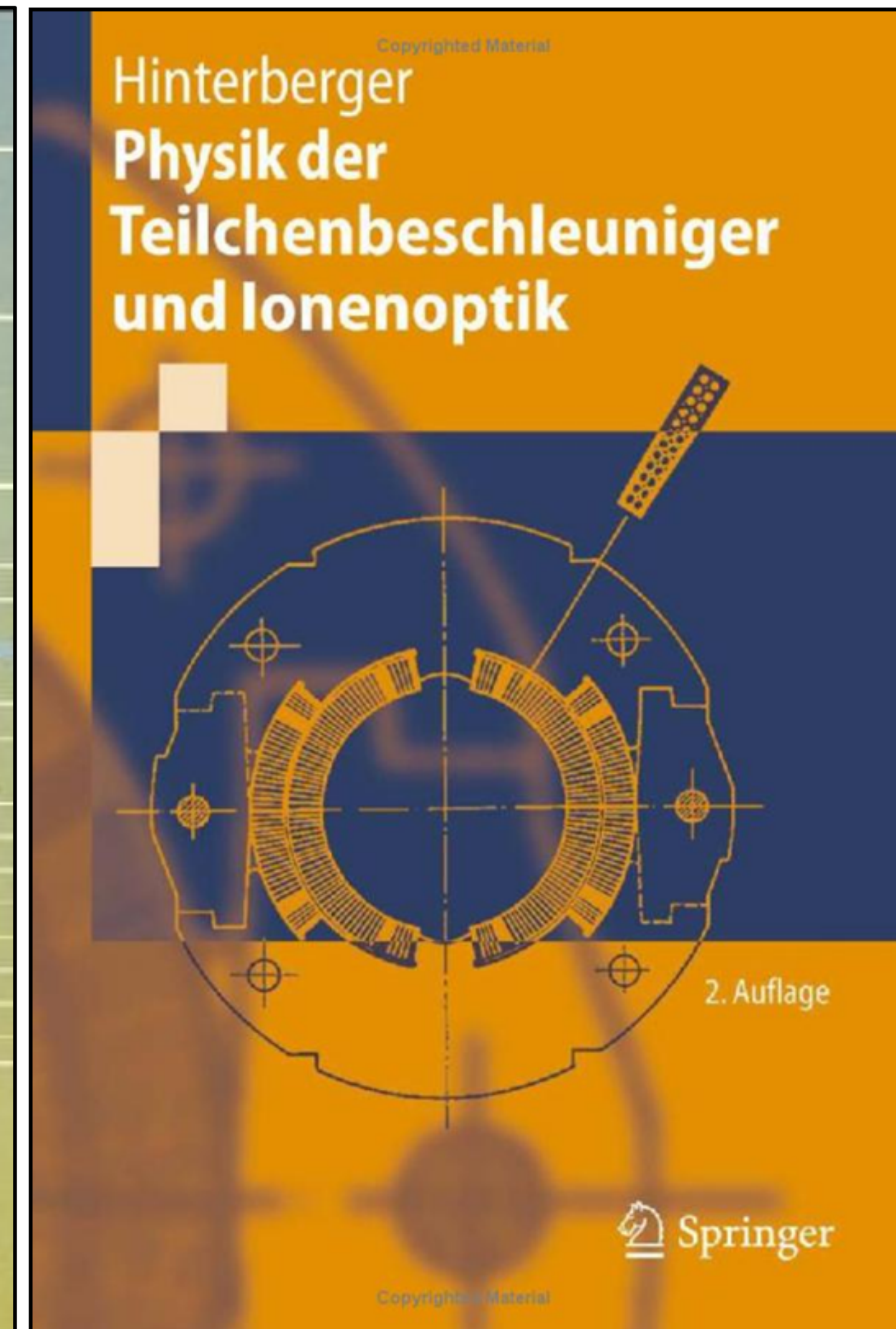
Kolanoski, Wermes
[Teilchendetektoren](#)
Springer (1. Aufl.) 2016



Konrad Kleinknecht
[Det. f. Teilchenstrhlq.](#)
Teubner (4. Aufl.) 2005



Glenn F. Knoll
[Rad. Det. & Meas.](#)
Wiley (3rd. Ed.) 2000



F. Hinterberger
[Teilchenbeschleuniger](#)
Springer (2. Aufl.) 2008

■ Particle Data Group (PDG)

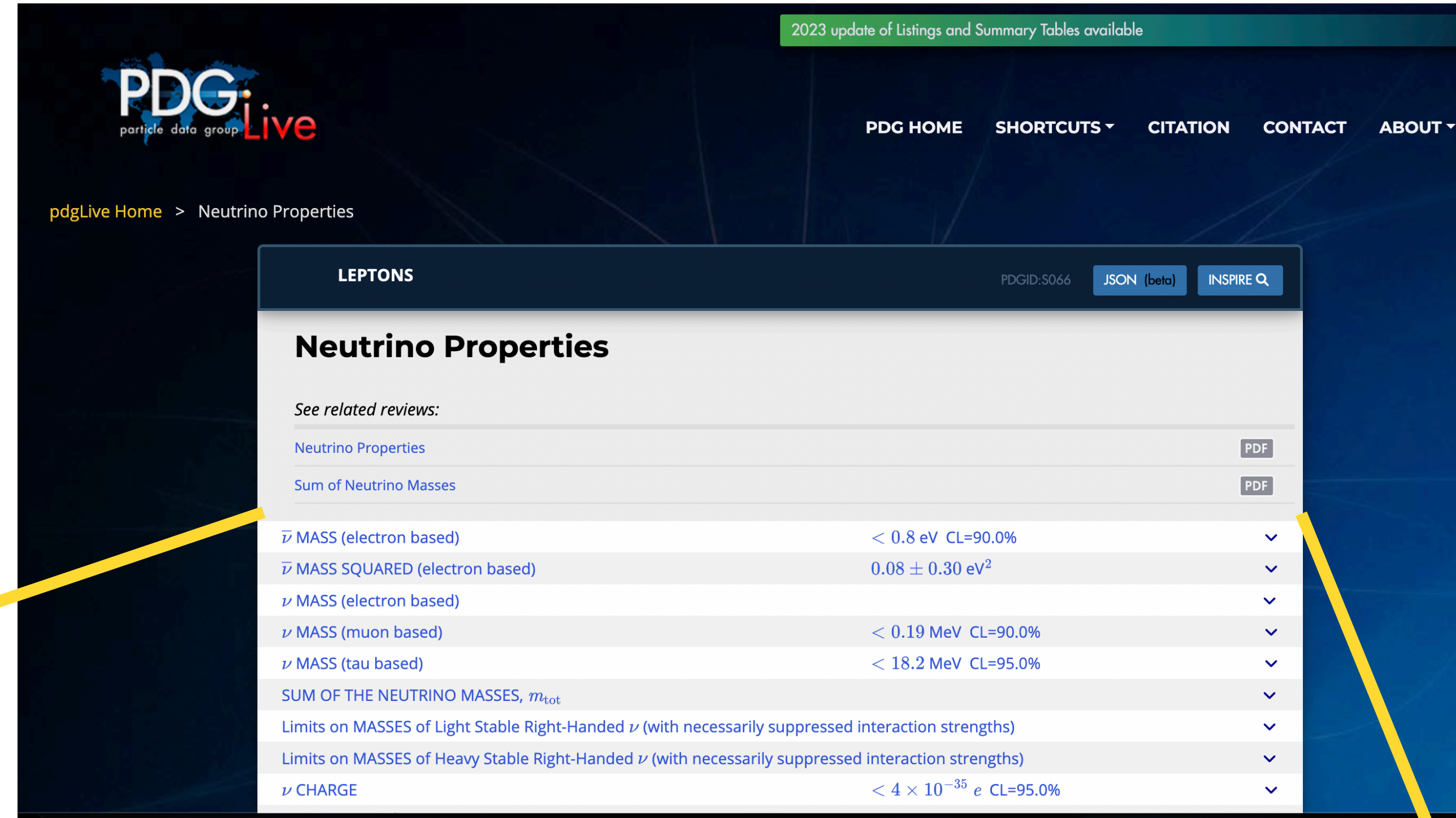
■ “Offizielle” Messgrößen

■ Wie schwer ist das Neutrino?

■ Wie zerfällt das Higgs Boson?

■ Zusammenfassungen

■ Online Version



2023 update of Listings and Summary Tables available

PDG HOME SHORTCUTS CITATION CONTACT ABOUT

pdgLive Home > Neutrino Properties

LEPTONS PDGID: S066 JSON (beta) INSPIRE Q

Neutrino Properties

See related reviews:

Neutrino Properties PDF

Sum of Neutrino Masses PDF

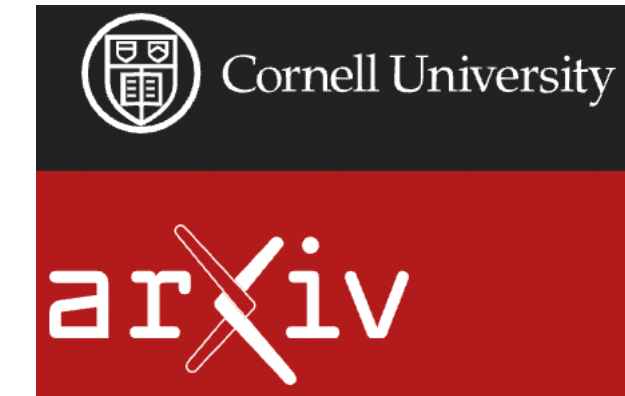
$\bar{\nu}$ MASS (electron based)	$< 0.8 \text{ eV}$ CL=90.0%	▼
$\bar{\nu}$ MASS SQUARED (electron based)	$0.08 \pm 0.30 \text{ eV}^2$	▼
ν MASS (electron based)		▼
ν MASS (muon based)	$< 0.19 \text{ MeV}$ CL=90.0%	▼
ν MASS (tau based)	$< 18.2 \text{ MeV}$ CL=95.0%	▼
SUM OF THE NEUTRINO MASSES, m_{tot}		▼
Limits on MASSES of Light Stable Right-Handed ν (with necessarily suppressed interaction strengths)		▼
Limits on MASSES of Heavy Stable Right-Handed ν (with necessarily suppressed interaction strengths)		▼
ν CHARGE	$< 4 \times 10^{-35} e$ CL=95.0%	▼

$\bar{\nu}$ MASS (electron based)	$< 0.8 \text{ eV}$ CL=90.0%
$\bar{\nu}$ MASS SQUARED (electron based)	$0.08 \pm 0.30 \text{ eV}^2$
ν MASS (electron based)	
ν MASS (muon based)	$< 0.19 \text{ MeV}$ CL=90.0%
ν MASS (tau based)	$< 18.2 \text{ MeV}$ CL=95.0%

■ Publikationen in der Teilchenphysik

- Pre-print-server: arxiv.org

- Bereiche: hep-ex, hep-ph, hep-th, ...



- Literaturdatenbank: inspirehep.net



- Wissenschaftliche Journale

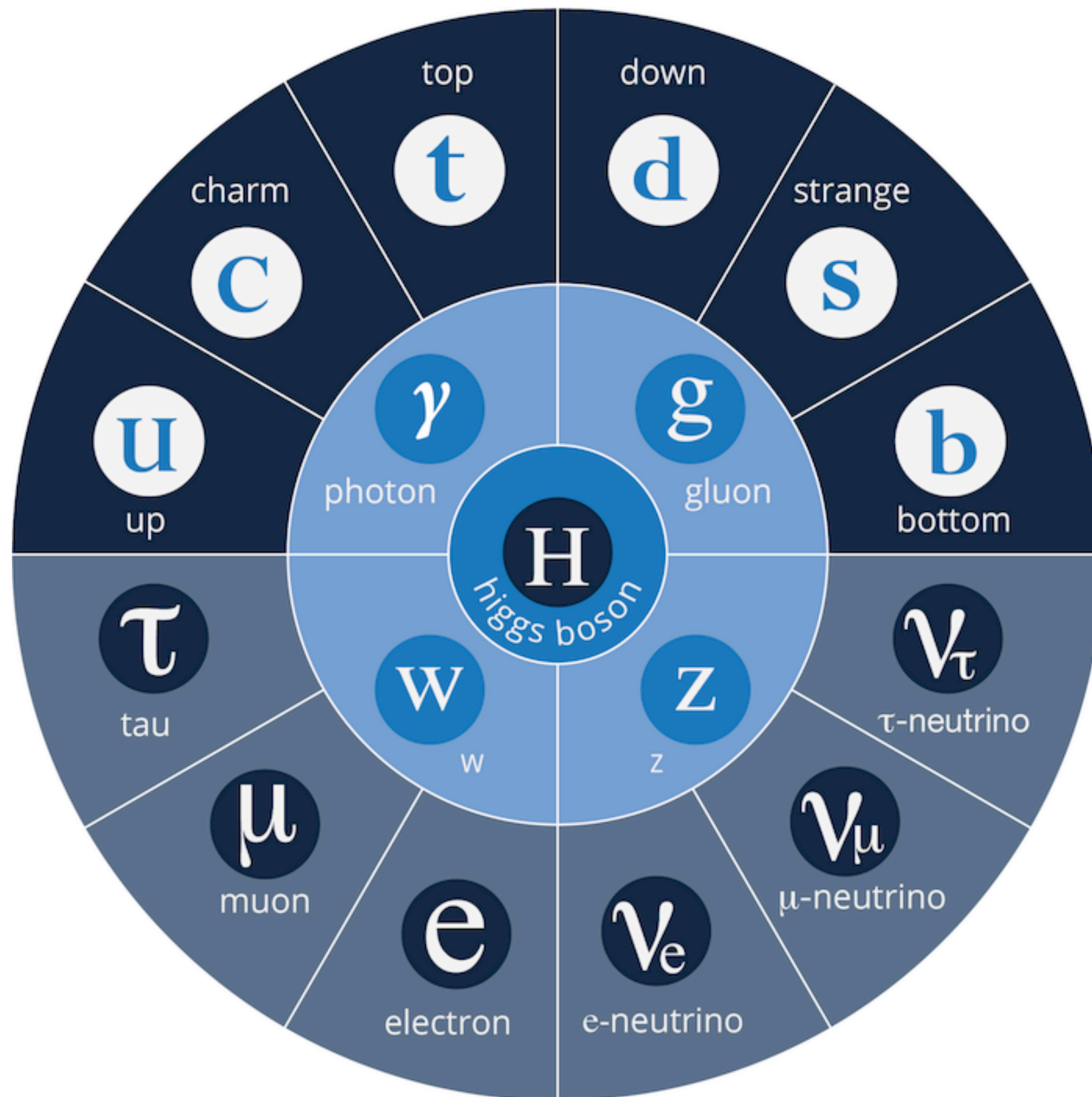
- Physical Review Letters (PRL), Journal for Highenergy Physics (JHEP), ...

PHYSICAL REVIEW LETTERS

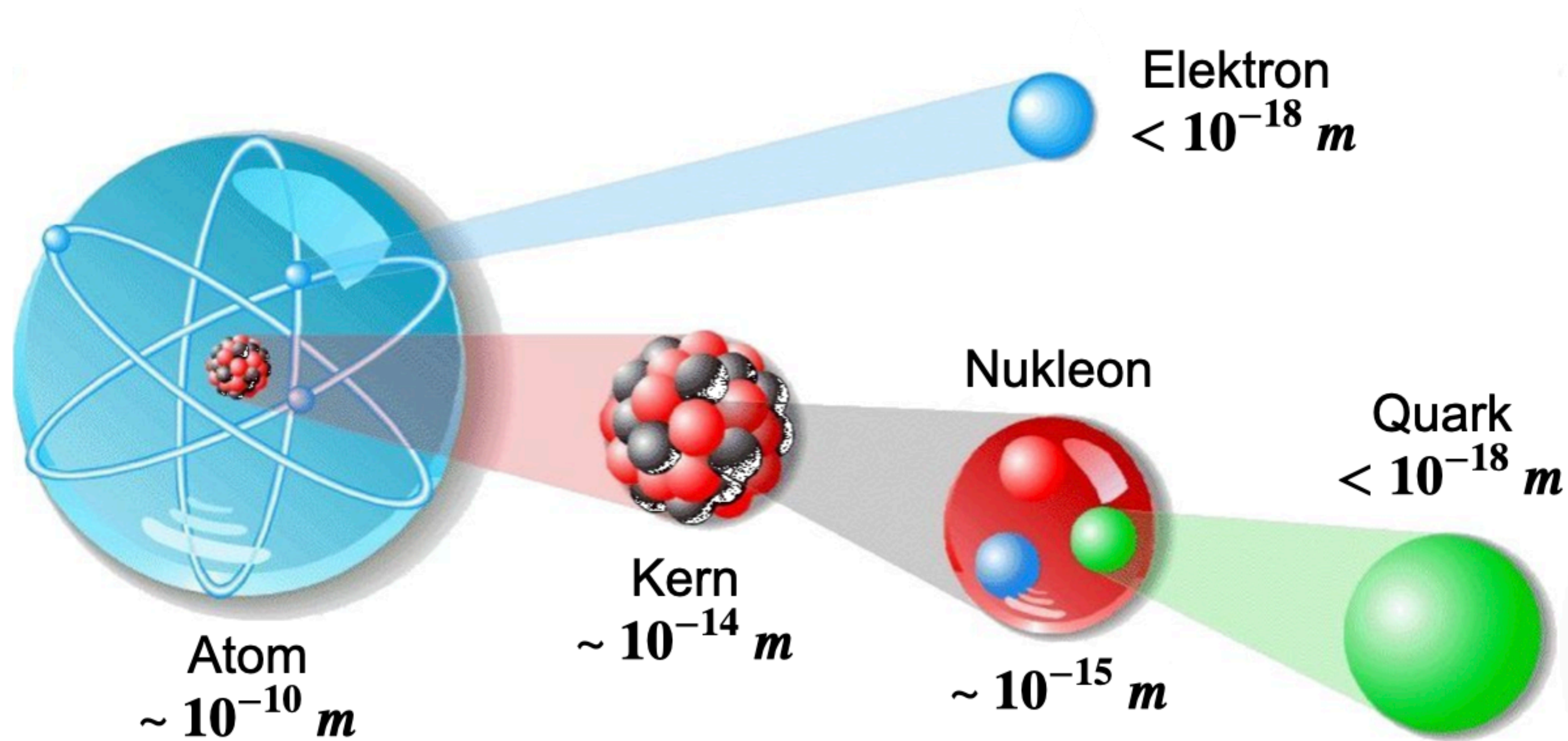


■ 1. Einführung

- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation und Tips
- 1.2. Literatur
- **1.3. Standard Model der Teilchenphysik**
- 1.4. Einheiten
- 1.5. Relativistische Kinematik
- 1.6. Feynman Diagramme

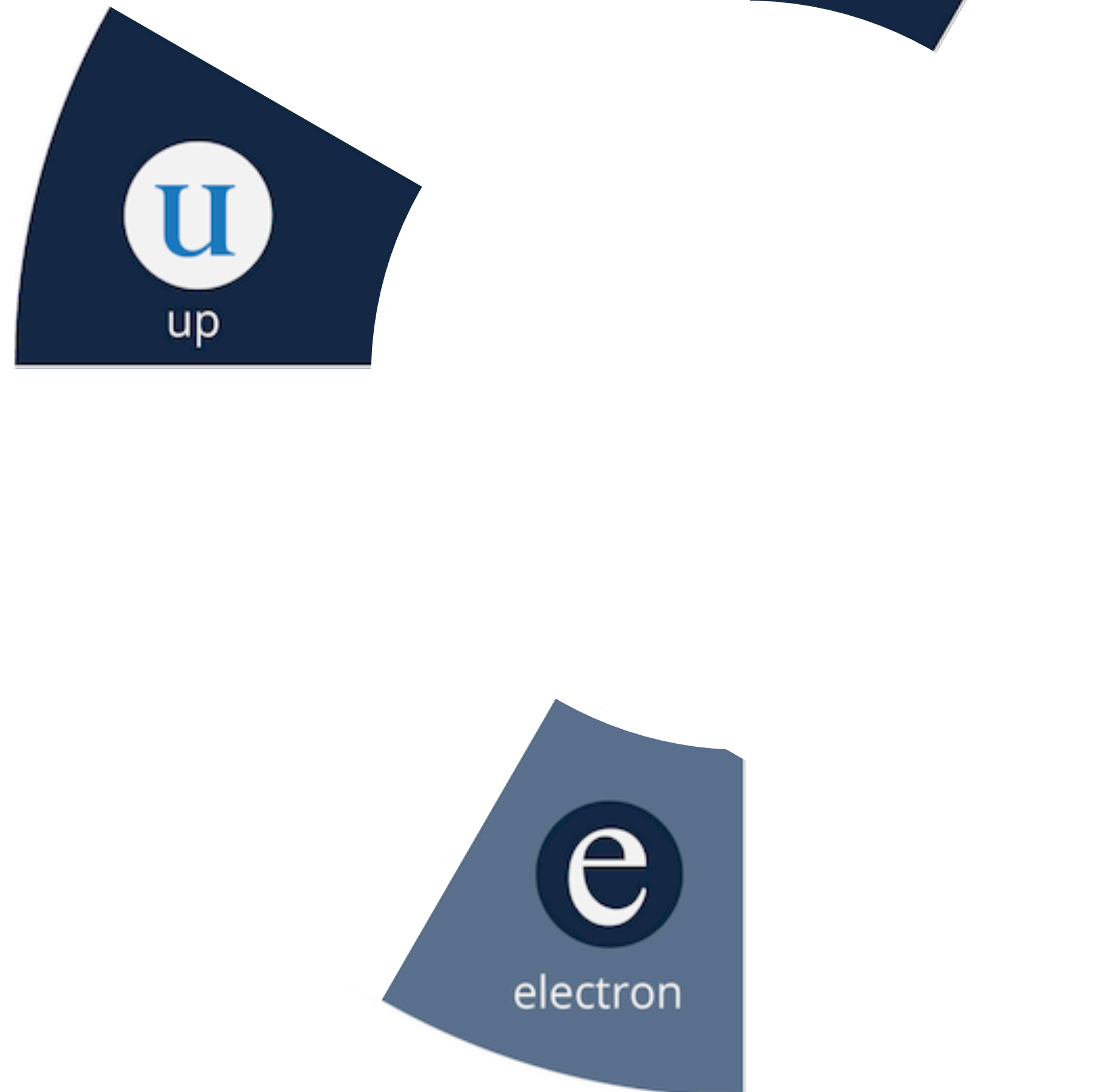


- Immer kleinere Strukturen



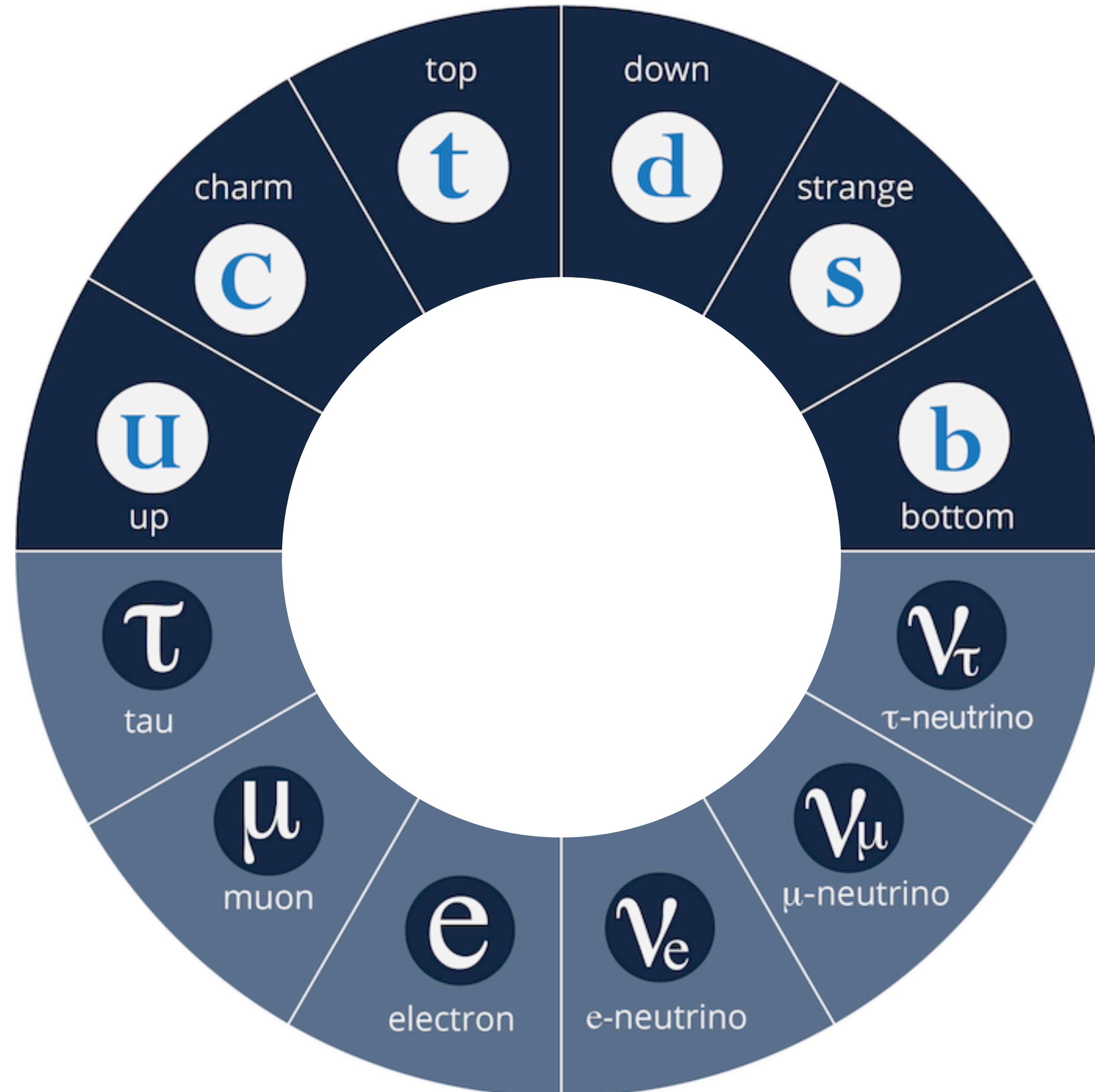
Elementare Bausteine

- Die erste Generation
- Materieteilchen



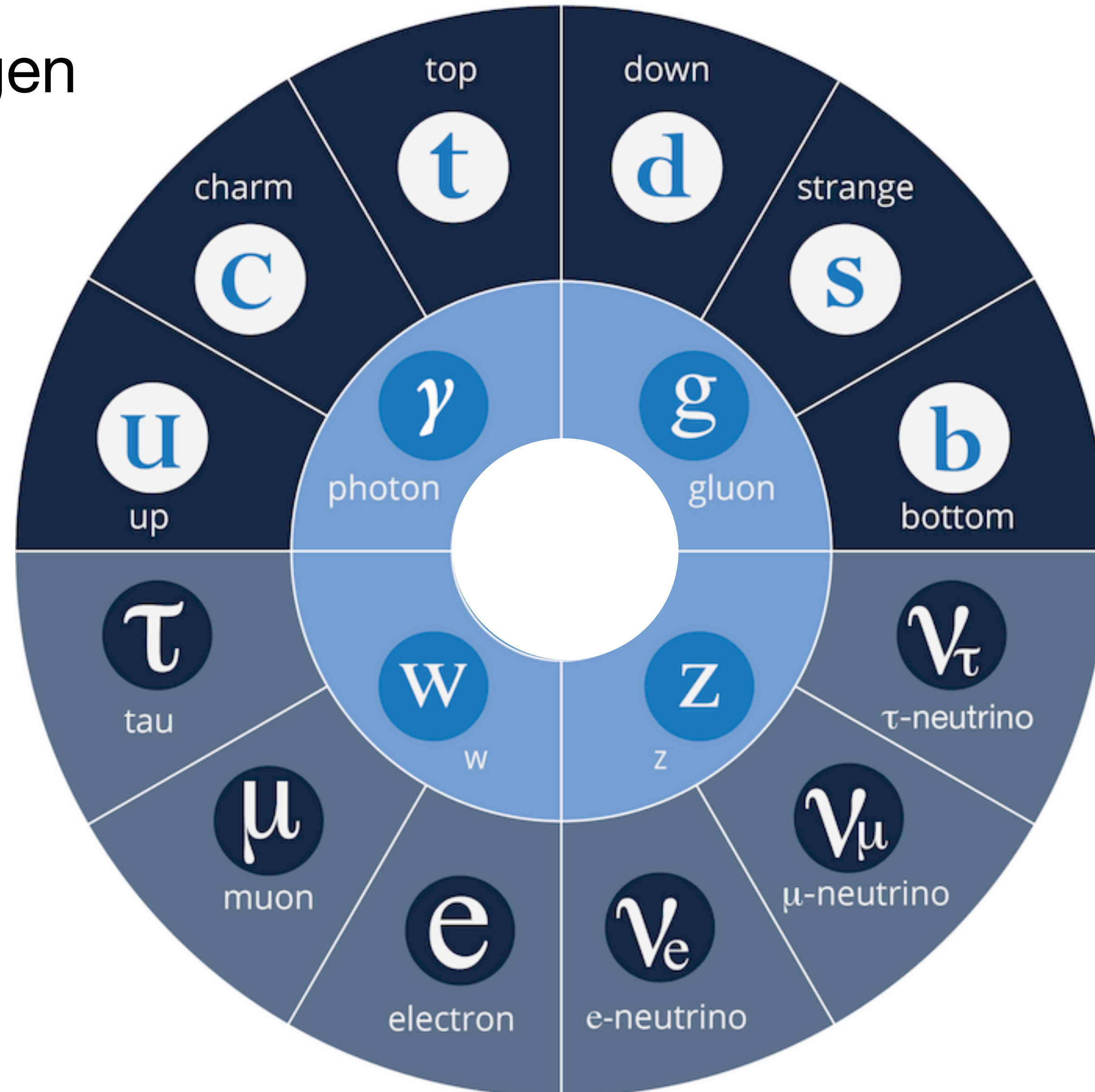
Elementare Bausteine

- Drei Generation
- Neutrinos



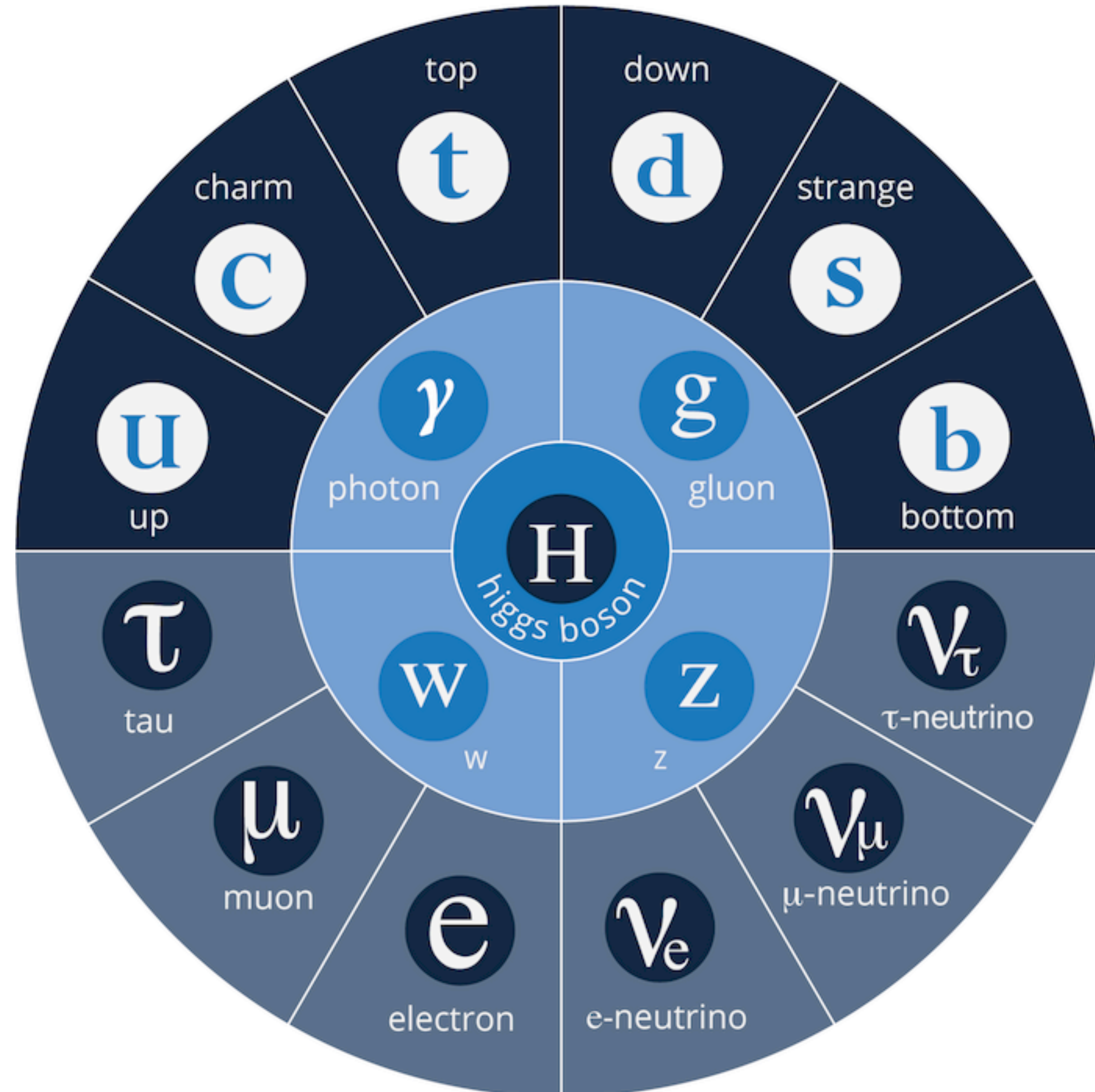
Elementare Bausteine

■ Wechselwirkungen

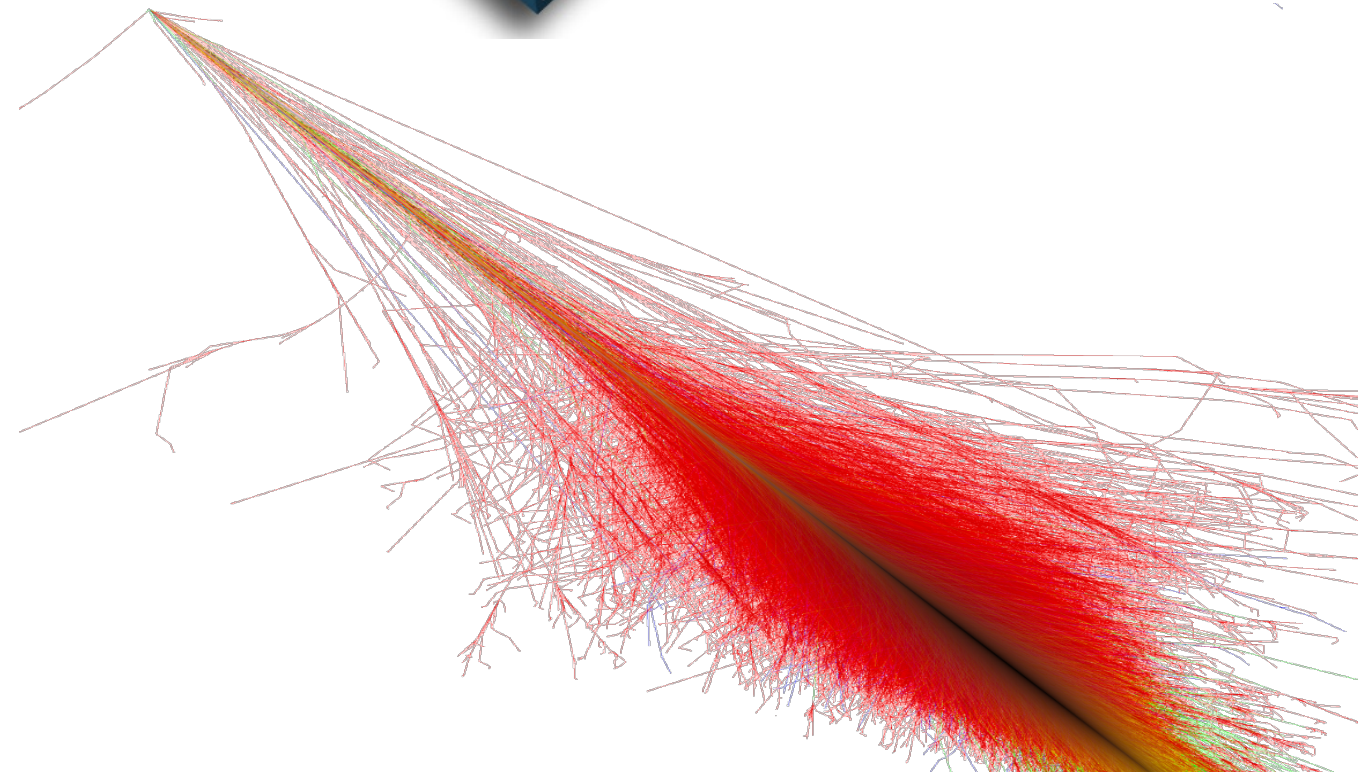
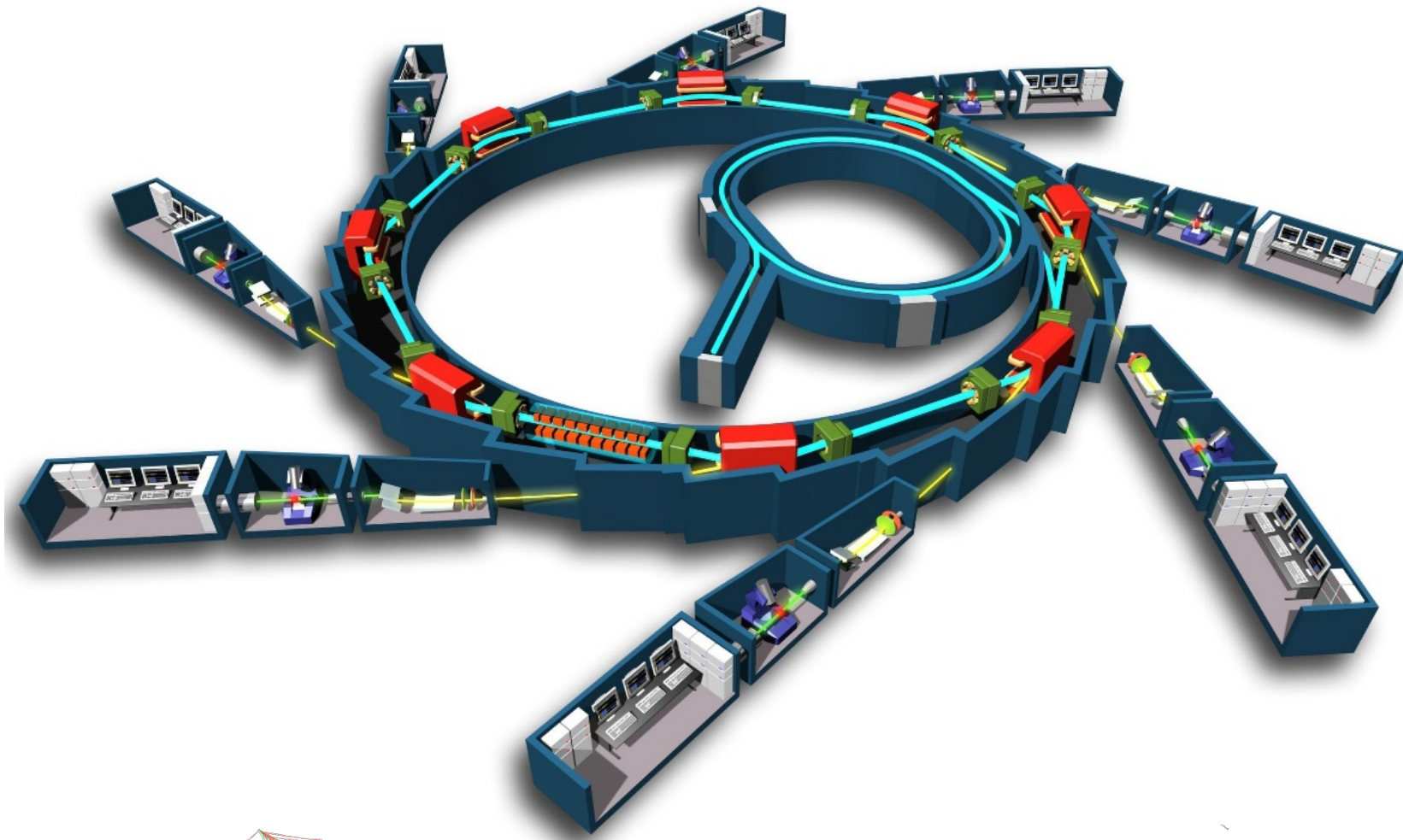


Elementare Bausteine

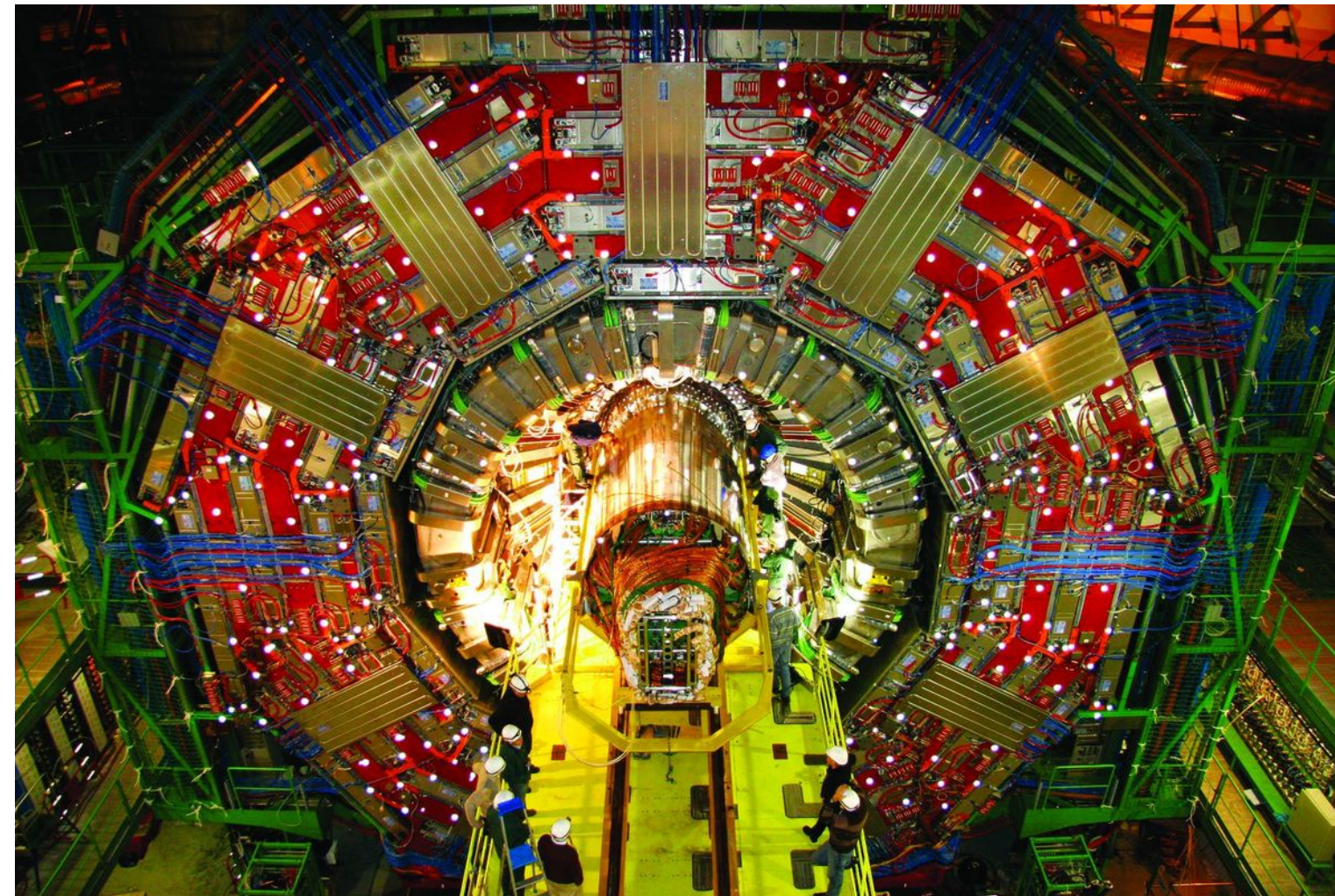
■ Higgs Teilchen



Entdeckungswerkzeuge



Beschleuniger

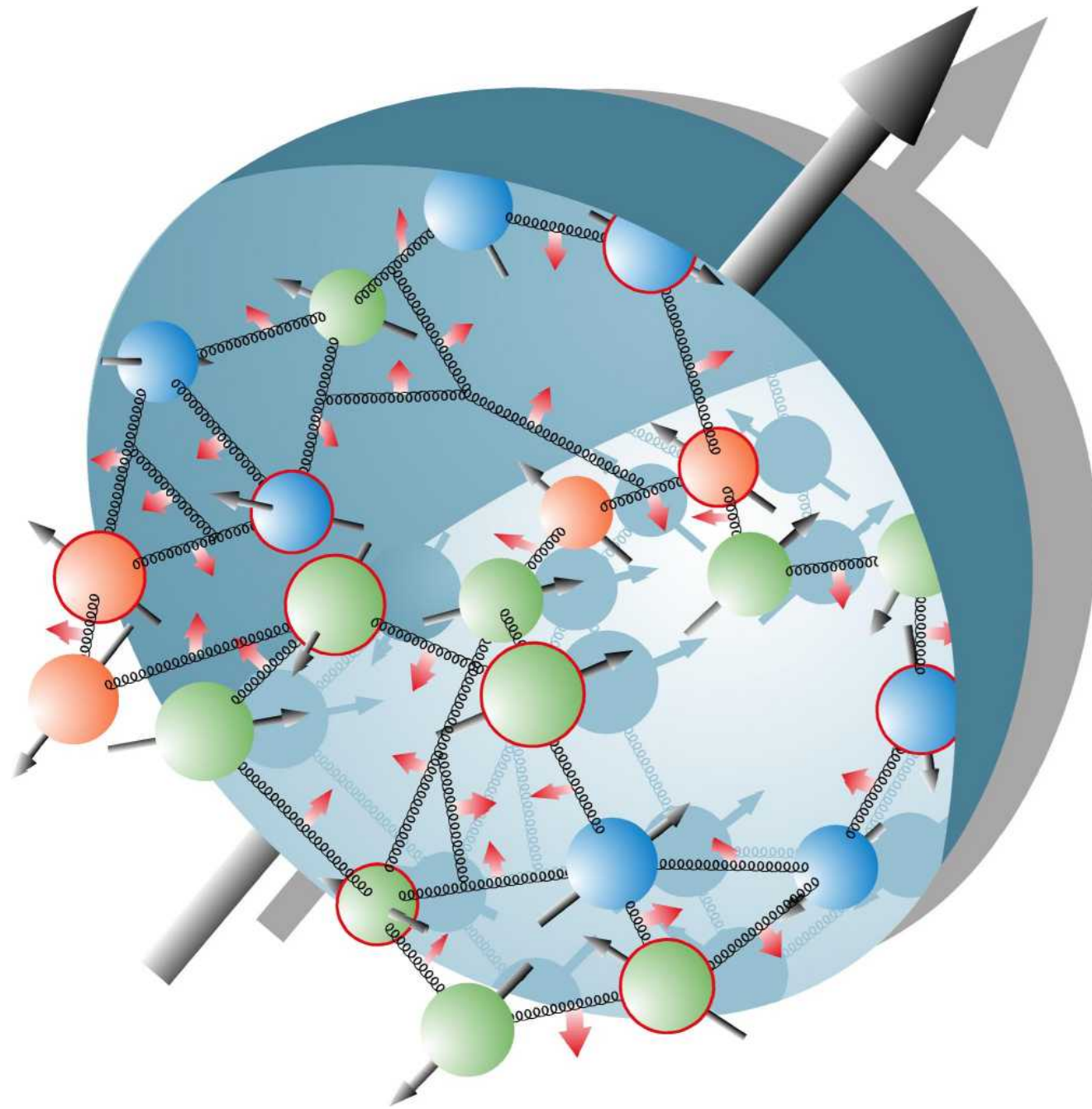


Detektoren

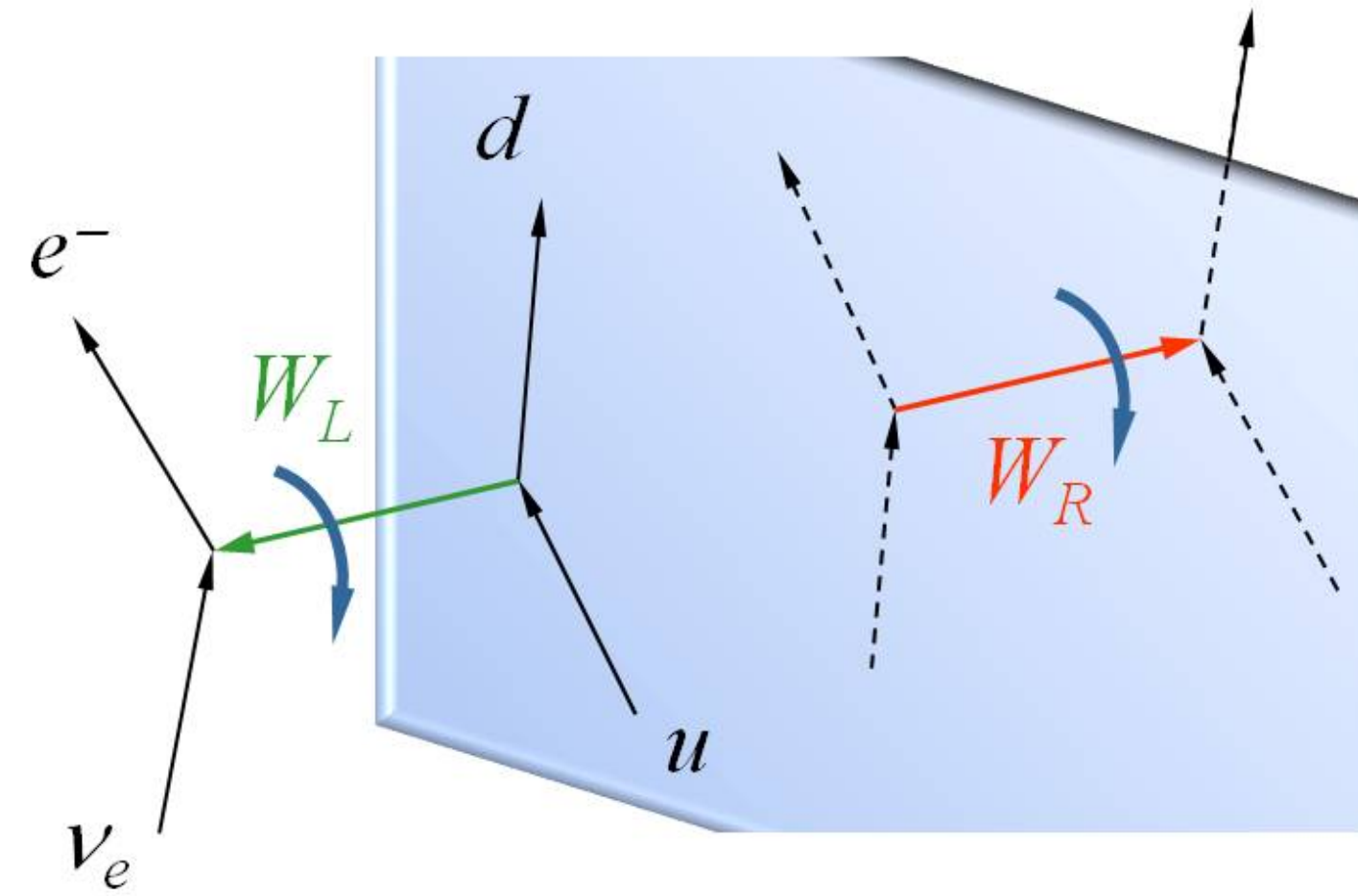


Data Science

Q: weltmaschine

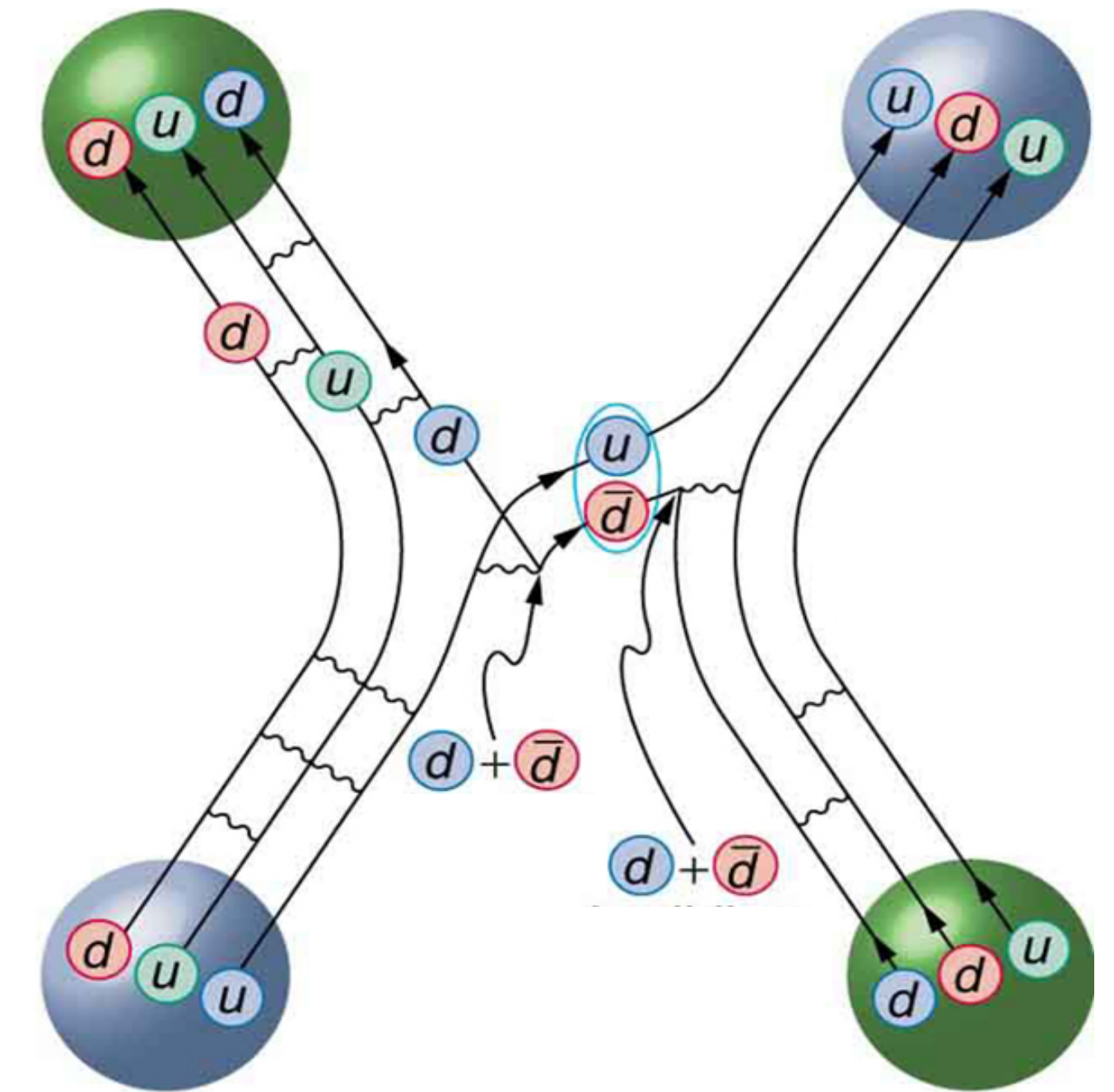


**Struktur von
Hadronen**



Q: nscl.msu.edu

Symmetrien



Q: A. Orduna

**Natur von
Wechselwirkungen**

Entdeckung, Werkzeuge und Nobelpreise

- 1901: W.C. Röntgen - Röntgenstrahlung
- 1903: H. Becquerel, Pierre & Marie Curie - Radioaktivität
- 1906: J.J. Thomson - Elektron
- 1927: A.H. Compton - Comptoneffekt
- 1935: J. Chadwick - Neutron
- 1936: C.D. Anderson - Positron,
V.F. Hess - Höhenstrahlung
- 1938: E. Fermi - Beta-Zerfall
- 1939: E.O. Lawrence - Zyklotron



Entdeckung, Werkzeuge und Nobelpreise

- 1948: P.M.S. Blackett - Nebelkammer
- 1950: C.F. Powell - Emulsionstechnik
- 1951: J.D. Cockroft, E.T.S. Walton - C.-W. Beschleuniger
- 1958: P.A. Cherenkov, I.M. Frank, I.Y. Tamm - Cherenkov-Effekt
- 1959: E.G. Segre, O. Chamberlain - Antiproton
- 1961: R. Hofstadter - Elektronstreuung und Neutronen
- 1968: L.W. Alvarez - Blasenkammer
- 1976: B. Richter, S.C.C. Ting - J/Psi, Charm Quark



Entdeckung, Werkzeuge und Nobelpreise

- 1980: J.W. Cronin, V.L. Fitch - CP-Verletzung mit Kaonen
- 1984: C. Rubbia, S. Van der Meer - W und Z Bosonen und stochastische Kühlung
- 1988: L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger - Myonneutrino
- 1990: J. Friedman, H. Kendal, R. Taylor - Tiefinelastische Streuung
- 1992: G. Charpak - Proportionalkammer
- 1995: M.L. Perl, F. Reines - Tau-Lepton
- 2002: R. Davis, M. Koshiba - Kosmische Neutrinos



Nobelpreis 2013 – Teilchenphysik



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

François Englert

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Peter W. Higgs

Prize share: 1/2



Higgs-Mechanismus für Masse!

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."

Nobelpreis 2015 – Astroteilchenphysik



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Takaaki Kajita

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

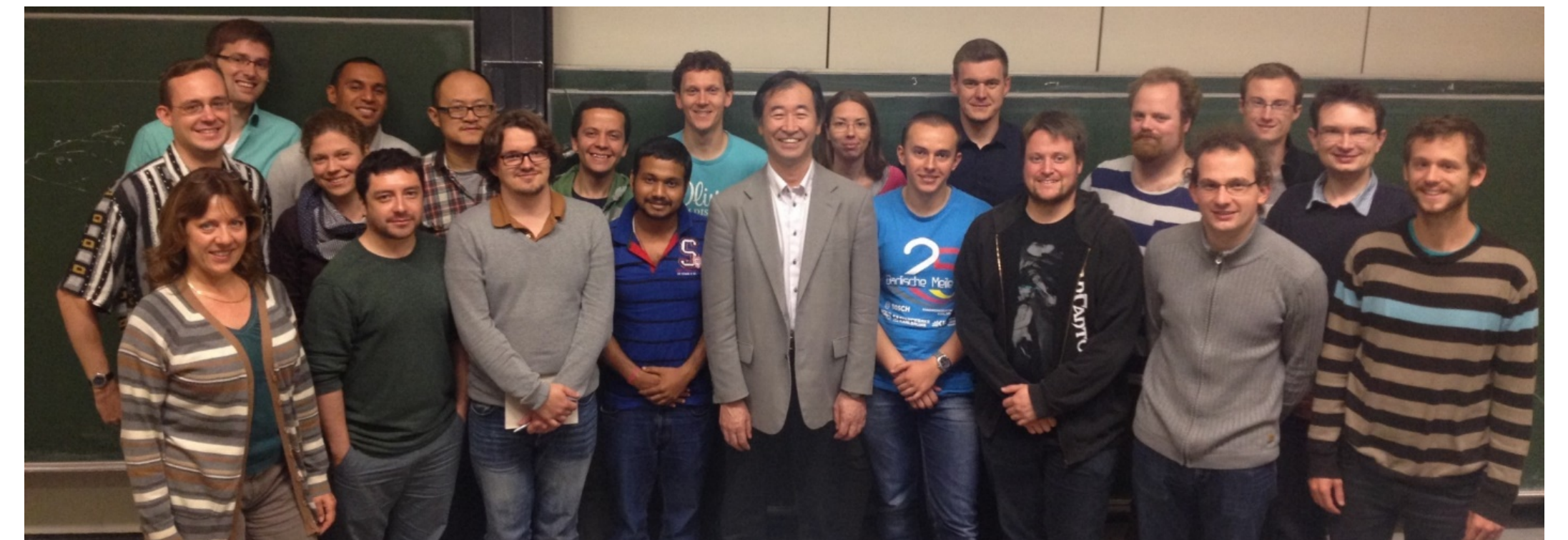
Arthur B. McDonald

Prize share: 1/2



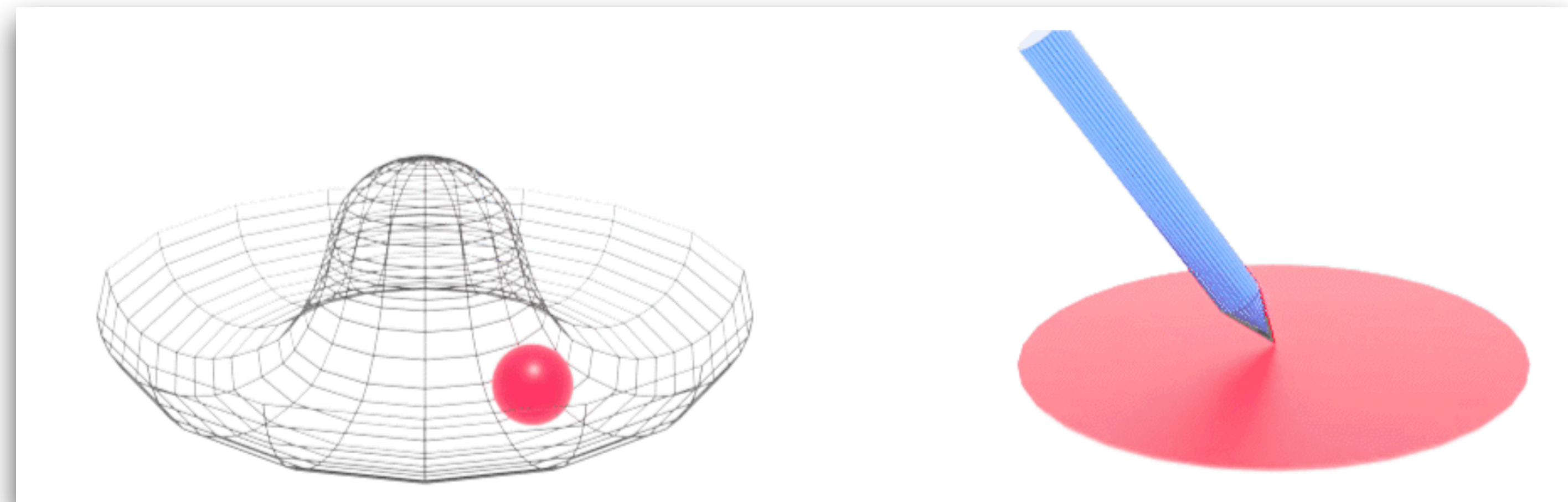
Neutrinos haben Masse & oszillieren!

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass."



Offene Fragen der Teilchenphysik

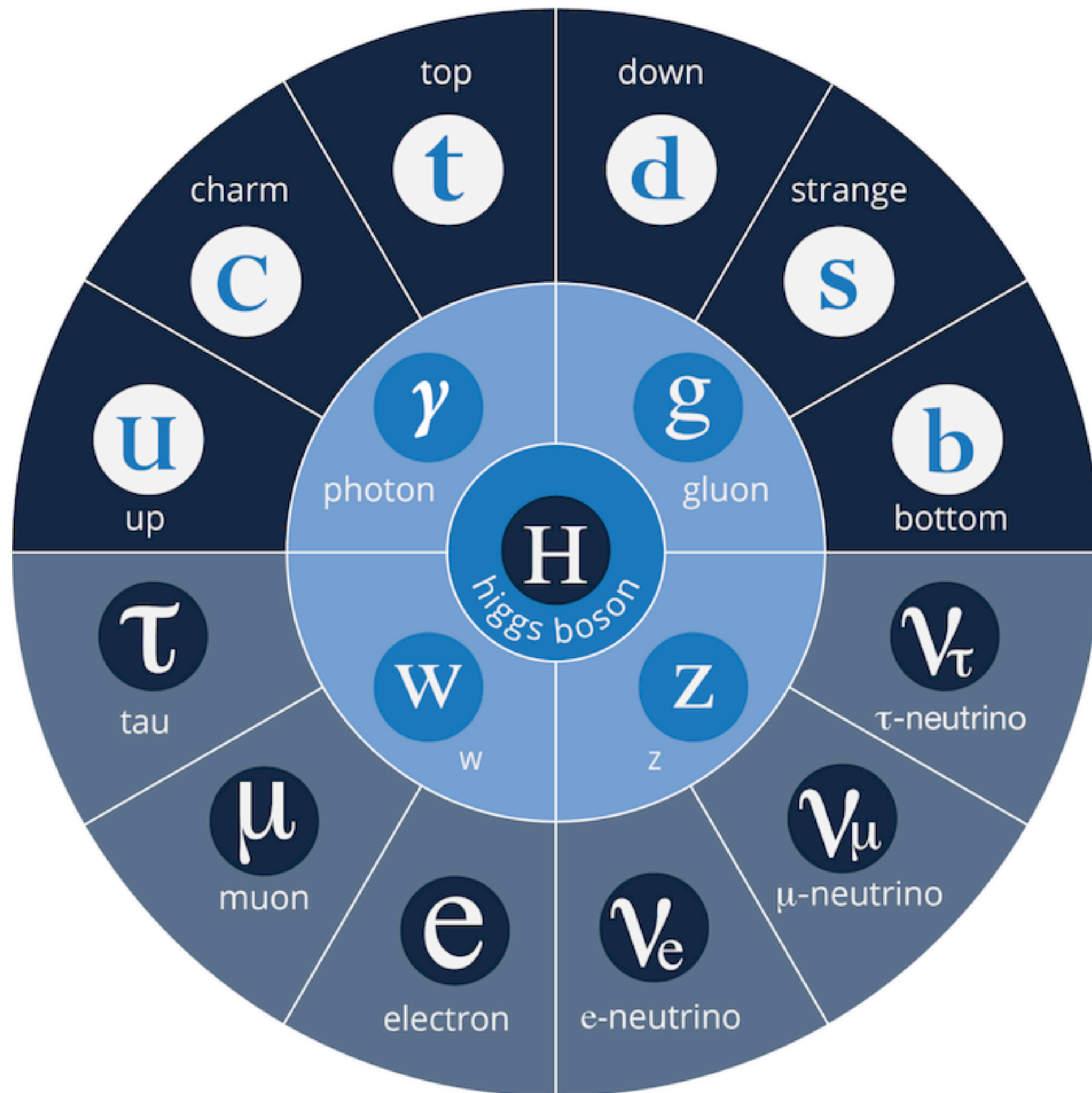
- Was ist die Natur der dunklen Materie?
- Wie werden Neutrinos massiv?
- Warum gibt es so viel Materie?
- Wie können wir Quanteneffekte der Gravitation verstehen?
- Welche Rolle spielt das Higgs Boson in diesen Fragen?
- ...





■ 1. Einführung

- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation und Tips
- 1.2. Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- **1.4. Einheiten**
- 1.5. Relativistische Kinematik
- 1.6. Feynman Diagramme

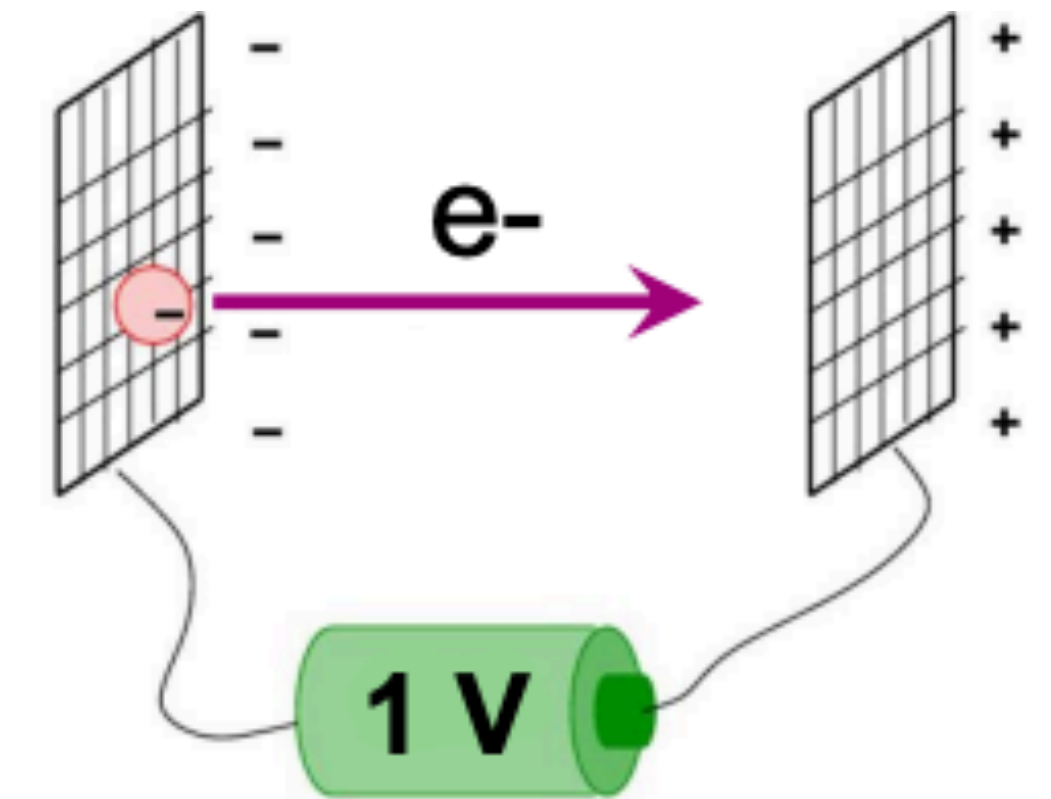


Einheiten

■ Energien in der Teilchenphysik

wichtige Einheit: **Elektronvolt (eV)** $E = |q \cdot \Delta U|$

$E = 1 \text{ eV}$ entspricht der Energie eines Elektrons ($|q| = e$)
nach dem Durchlaufen von $\Delta U = 1 \text{ V}$



$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $\Rightarrow 1 \text{ J}$ ist makroskopische Größe!
 $\approx 8066 \text{ cm}^{-1} \cdot hc$ [Wellenzahl $\tilde{\nu}$ in Kayser]
 $\approx 2,41 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \cdot h$ [Frequenz f]

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ (Planck'sches Wirkungsquantum)

■ Massen von Elementarteilchen

■ Massenspektrum: mehr als 11 Größenordnungen

Masseneinheit: $1 \text{ eV}/c^2 = 1,78 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

Elektronmasse $= 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
 $= 510\,998,928 \text{ eV} / c^2$
 $\approx 511 \text{ keV}$ ($E = m \cdot c^2$, setze $c^2 = 1$)

Protonmasse $m(p) = 938,272 \text{ MeV}$
Neutronmasse $m(n) = 939,565 \text{ MeV}$ $\sim 1 \text{ GeV}$

Topquarkmasse $m(t) = 172,76 \text{ GeV}$
Neutrinomasse $m(\nu) < 0,8 \text{ eV}$ $\left. \vphantom{\begin{matrix} m(t) \\ m(\nu) \end{matrix}} \right\} \text{Faktor} > 10^{11} !$

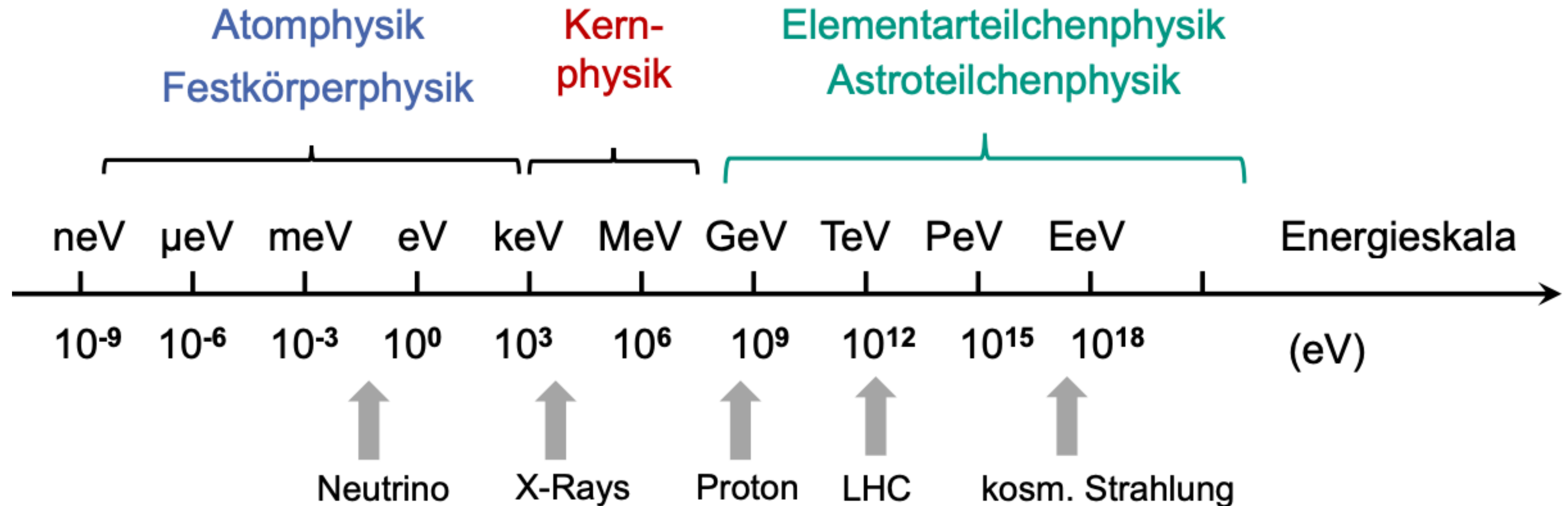


Massenerzeugung:
Higgs-Boson

■ Energieskalen

■ typische Energien: mehr als 27 Größenordnungen

- Teilchenphysik erfordert Vordringen in neue Energieskalen: GeV, TeV, ...

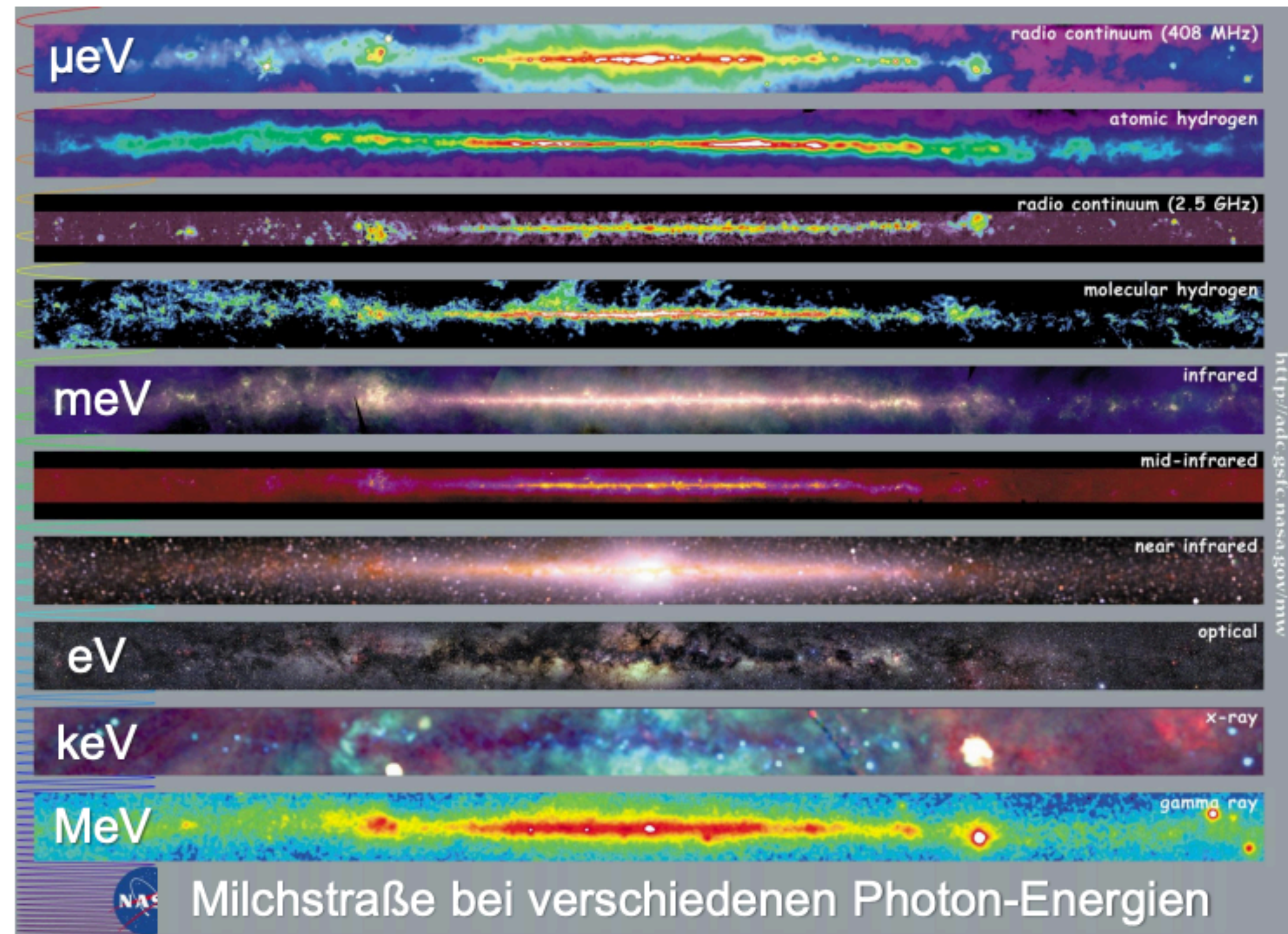


Einheiten

■ Energieskalen & Prozesse

■ Energieskalen & physikal. Prozesse

Energie E, Frequenz f
↓
 $E = 4,14 \mu\text{eV} \cdot f \text{ (GHz)}$



- nicht-SI Einheiten für Länge, Energie, Masse

Größe	Teilchenphysik	SI - Einheit
Länge	1 fm (1 Fermi = 1 femto-m)	10^{-15} m
Energie	1 GeV = 10^9 eV	$1,602 \cdot 10^{-10}$ J
Masse = E / c^2	1 GeV / c^2	$1,78 \cdot 10^{-27}$ kg
$\hbar = h / 2 \pi$	$6,588 \cdot 10^{-25}$ GeV s	$1,055 \cdot 10^{-34}$ J s
c	$2,998 \cdot 10^{23}$ fm s ⁻¹	$2,998 \cdot 10^8$ m s ⁻¹
$\hbar \cdot c$	0,1975 GeV fm	$3,162 \cdot 10^{-26}$ J m

$\hbar$: reduziertes Planck'sches Wirkungsquantum, seit 2019 numerisch fixierte Größe

■ Natürliche Einheiten

- nun $c = 1$ (dimensionslos, d.h. $\text{m/s} = 1$, also „ $\text{m} = \text{s}$ “)
bisher dimensionsbehaftete Größe: Länge L / Zeit t (in m/s)
 $\Rightarrow$ Länge L und Zeit t haben **dieselbe Einheit**
- nun $\hbar = 1$ (dimensionslos, d.h. $\text{J}\cdot\text{s} = 1$, also „ $\text{J} = \text{s}^{-1}$ “)
bisher dimensionsbehaftete Größe: Energie E · Zeit t (in $\text{J}\cdot\text{s}$)
 $\Rightarrow$ Energie E und Zeit t haben **zueinander inverse Einheiten**
- nun $k_B = 1$ (dimensionslos, d.h. $\text{J/K} = 1$, also „ $\text{J} = \text{K}$ “)
bisher dimensionsbehaftete Größe: Energie E / Temperatur T (in J/K)
 $\Rightarrow$ Energie E und Temperatur T haben **dieselbe Einheit**

- Arbeiten mit natürliche Einheiten

natürliche Einheiten $\hbar = c = k_B = 1$	
Länge in inverser Energie*	0,1975 fm = 1 GeV ⁻¹
Zeit in inverser Energie**	6,582 · 10 ⁻²⁵ s = 1 GeV ⁻¹
Temperatur in Energie***	11,604 · 10 ¹² K = 1 GeV

- nun $\hbar c = 1$ (dimensionslos) und $k_B = 1$ (dimensionslos)

Angabe von **Längen L** und **Zeiten t** in inversen Energieeinheiten (**GeV⁻¹**)

Angabe von **Temperatur T** in Energieeinheiten (**GeV**)

$$* \quad \hbar c = 0,1975 \text{ GeV fm} \quad ** \quad \hbar = 6,588 \cdot 10^{-25} \text{ GeV s} \quad *** \quad k_B = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

■ Anwendungen von natürliche Einheiten

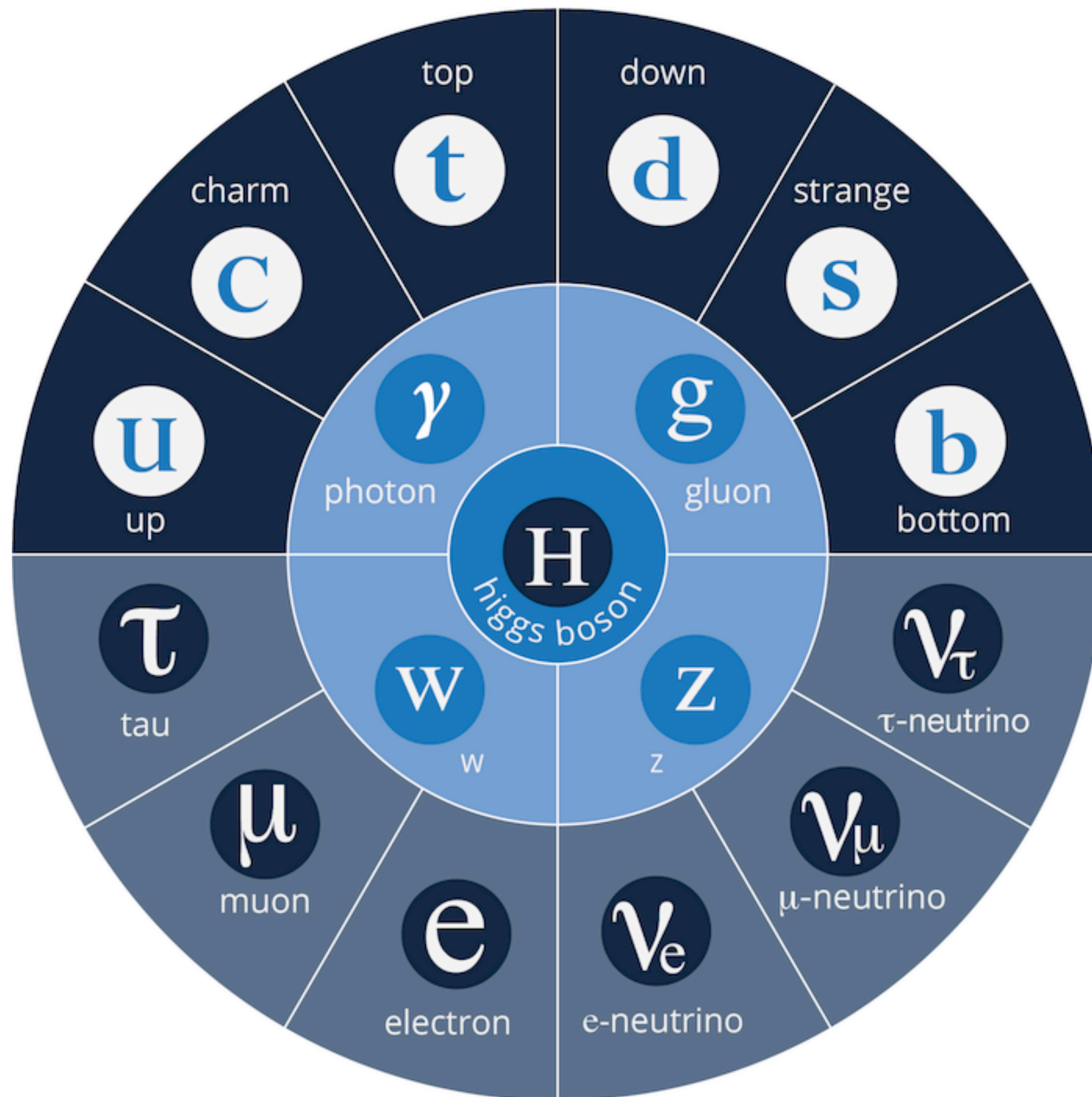
natürliche Einheiten $\hbar = c = k_B = 1$

Länge in inverser Energie*	$0,1975 \text{ fm} = 1 \text{ GeV}^{-1}$
Zeit in inverser Energie**	$6,582 \cdot 10^{-25} \text{ s} = 1 \text{ GeV}^{-1}$
Temperatur in Energie***	$11,604 \cdot 10^{12} \text{ K} = 1 \text{ GeV}$

- * um Strukturen einer **Länge** L aufzulösen: welche **Energie** E benötige ich ?
- ** welche **Lebensdauer** τ hat ein Zustand mit einer **Resonanzbreite** ΔE ?
- *** welcher **Temperatur** T (z.B. im frühen Universum) entspricht **Energie** E ?

■ 1. Einführung

- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation, und Tips
- 1.2. Übersicht und Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Einheiten
- **1.5. Relativistische Kinematik**
- 1.6. Feynman Diagramme



Relativistische Kinematik

- Grundlage: spezielle Relativitätstheorie

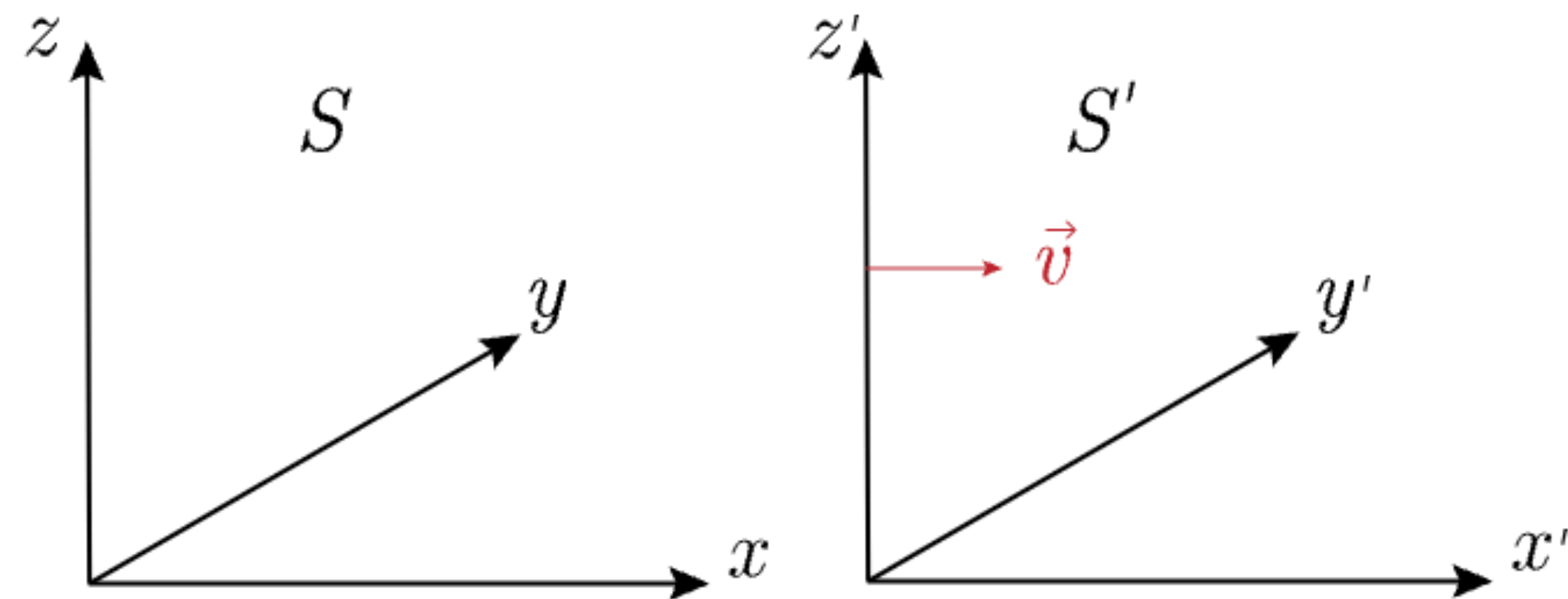
- 4er Vektor (Ort-Zeit): $x^\mu = (t, x, y, z)$ with $g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = x_\nu x^\nu = t^2 - x^2 - y^2 - z^2$

- Lorentz-Transformation

$$\text{boost: } \beta = \frac{v}{c} \text{ (in 3D: } \vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c}\text{)}$$

$$\gamma \text{ factor: } \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma \\ -\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix}$$



- Konsequenzen: Relativität der Gleichzeitigkeit, Längenkontraktion, Zeitdilatation, Nicht-lineare Addition von Geschwindigkeiten

- Energy-Impuls Vektor

$$P^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma \cdot m \cdot c \\ \gamma \cdot m \cdot \vec{v} \end{pmatrix}$$

- Relativistische Invariante

$$\begin{aligned} P_\mu \cdot P^\mu &= \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = \gamma^2 m^2 c^2 - \gamma^2 m^2 \vec{v}^2 \\ &= \gamma^2 m^2 c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \\ &= \gamma^2 m^2 c^2 \frac{1}{\gamma^2} = m^2 c^2 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \boxed{E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

- Energy-Term

$$E = \gamma \cdot mc^2 = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

- Näherung für kleine Werte von v/c

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right\} \\ &= mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^2} + \dots \end{aligned}$$

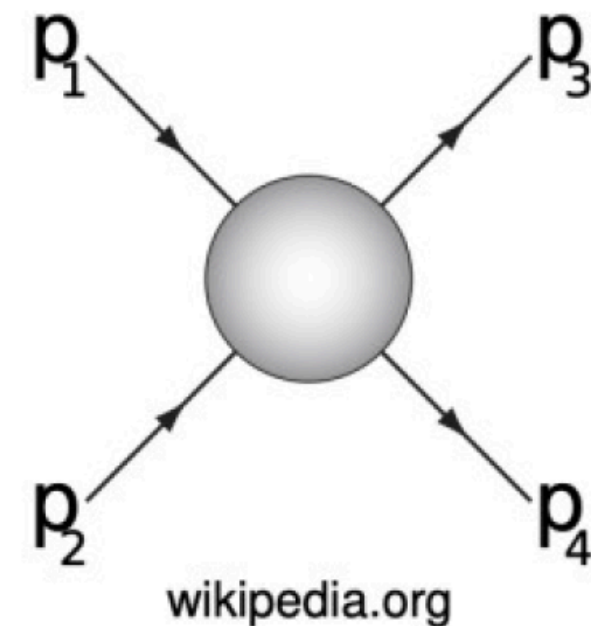
- **Beispiel:** Proton bei $E = 10 \text{ GeV}$

$$\gamma = \frac{10 \text{ GeV}}{0.938 \text{ GeV}} = 10.66$$

$$\beta = \frac{\sqrt{10^2 - 0.938^2}}{10} = 0.996$$

■ Mandelstam Variables

- **$2 \rightarrow 2$ scattering process** with 4-momenta p_i ($i = 1, \dots, 4$)



- 4-momentum conservation: $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$

- **Mandelstam variables** (4-momentum of intermediate particle)

$$\begin{aligned} s &= (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2 \\ t &= (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2 \\ u &= (p_1 - p_4)^2 = (p_2 - p_3)^2 \end{aligned}$$

- s, t, u are Lorentz invariant, have unit $[\text{energy}]^2$

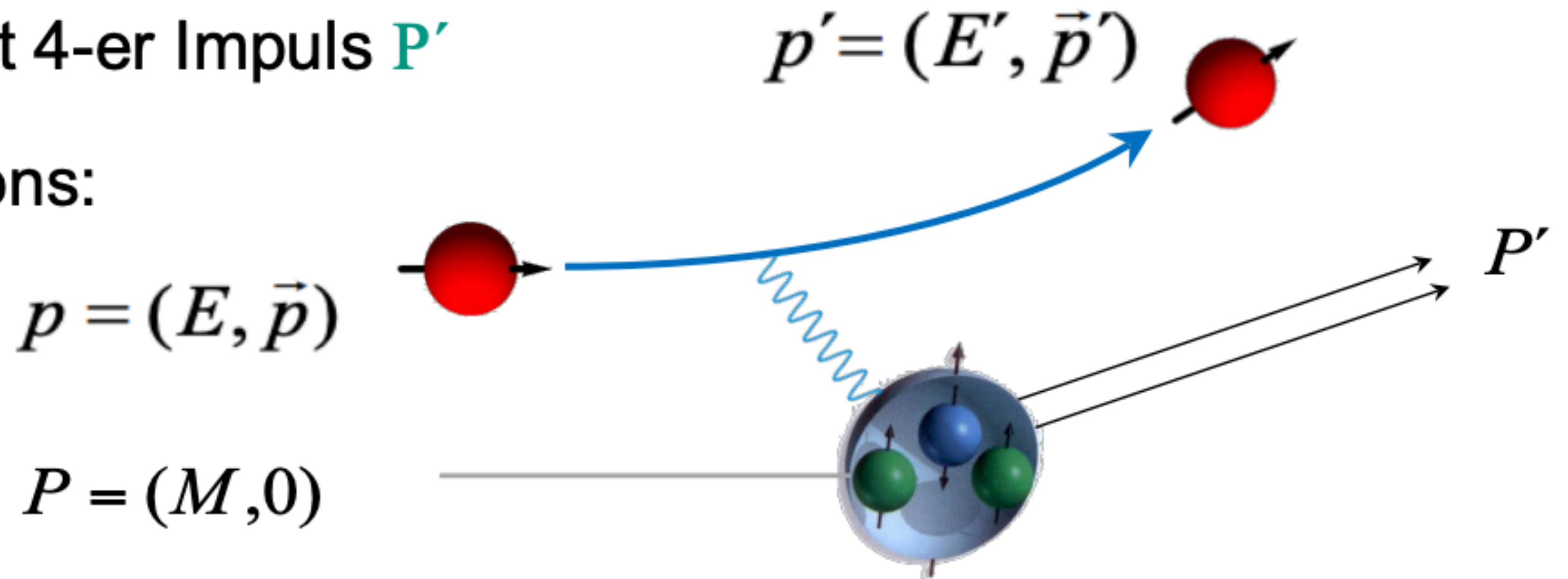
■ Elektron-Proton Streuung

- *einlaufendes* Elektron mit 4-er Impuls p
- *auslaufendes* Elektron mit 4-er Impuls p'
- „*einlaufendes*“ (*ruhendes*) Proton mit 4-er Impuls $P = (M, 0)$
- *auslaufende Resonanz* mit 4-er Impuls P'
- Energieverlust des Elektrons:

$$\nu = E - E'$$

$$p = (E, \vec{p})$$

$$P = (M, 0)$$

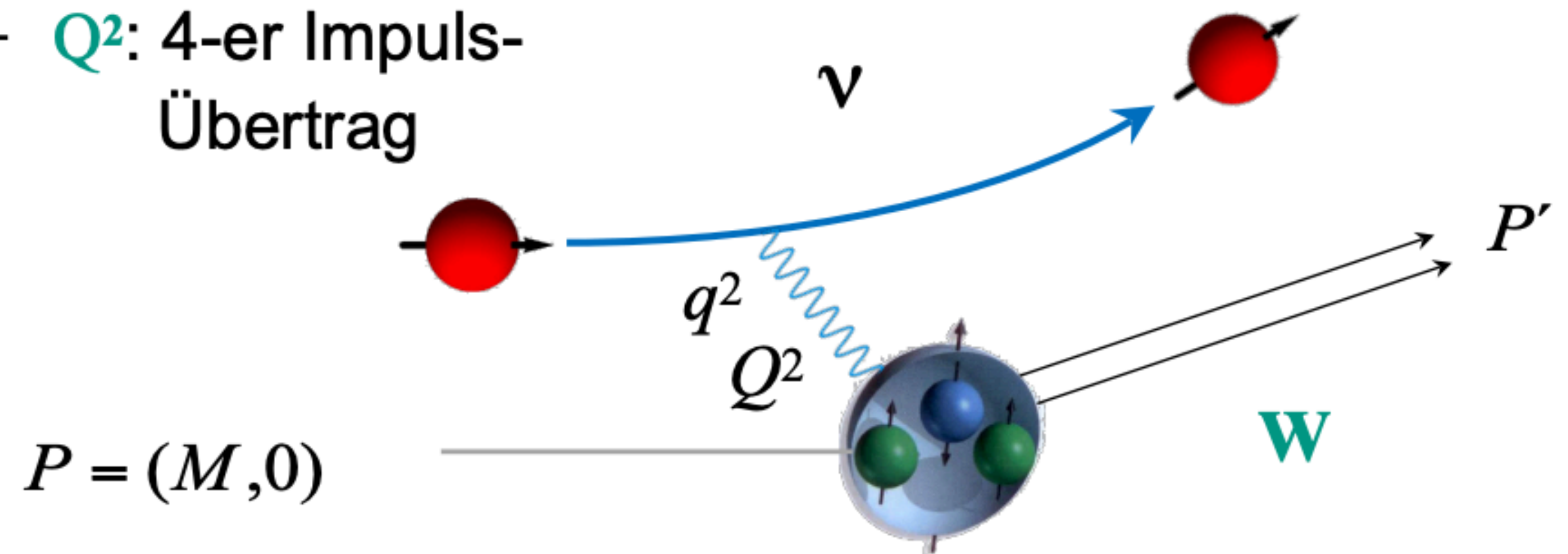


■ Elektron-Proton Streuung

$$W^2 = |P'|^2 = (P + q)^2 = M^2 + 2P \cdot q + q^2 = M^2 + 2M \cdot \nu - Q^2$$

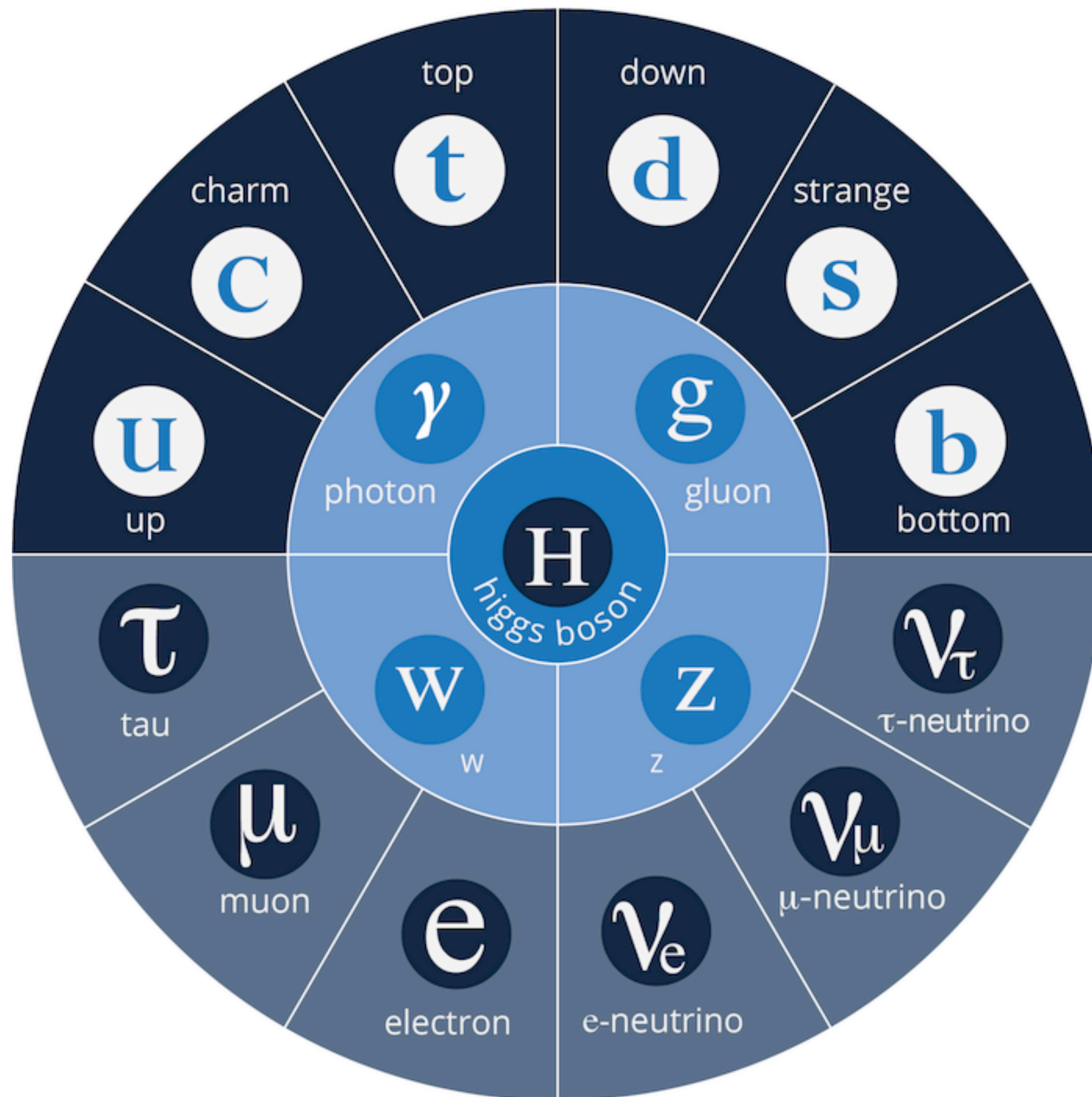
$$W^2 = M^2 + 2M \cdot \nu - Q^2$$

W : invariante Masse
 M : Masse Proton
 ν : Energie-Übertrag
 Q^2 : 4-er Impuls-Übertrag



■ 1. Einführung

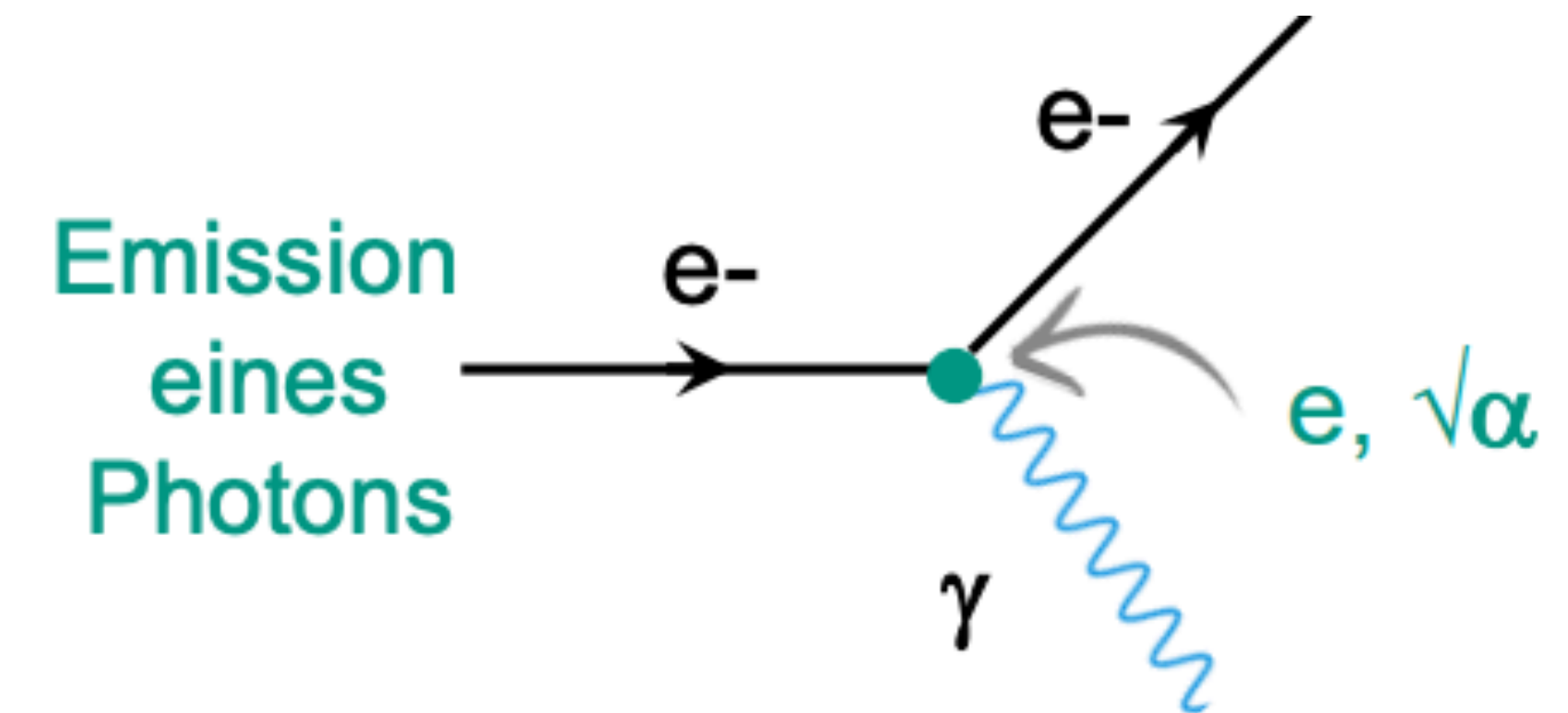
- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation, und Tips
- 1.2. Übersicht und Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Einheiten
- 1.5. Relativistische Kinematik
- **1.6. Feynman Diagramme**



Feynman-Diagramme

■ Visualisierung von Prozessen & wichtiges Tool für Berechnungen

- konkrete Rechenregeln (Störungstheorie) für Wechselwirkungen (Impulse q , ...)
- zu einem physikalische Prozess tragen oft über **mehrere Feynman-Diagramme** bei (Interferenz der Amplituden)
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen an einem **Vertex**: ●
- Kopplungskonstante: e , bzw. $\sqrt{\alpha}$
- Antiteilchen: e^+ als rückwärts laufendes e^- in der Zeit t

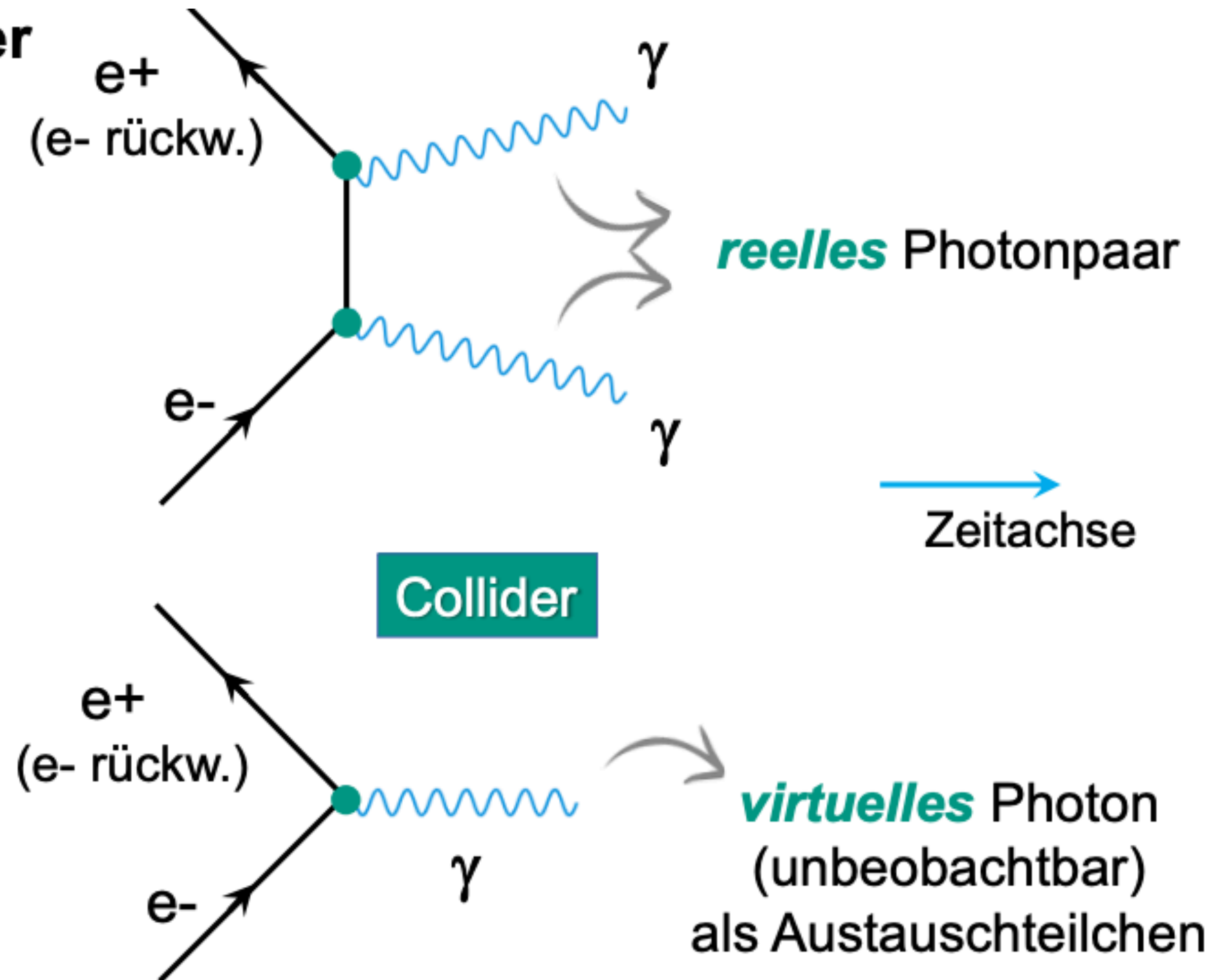


Feynman-Diagramme

■ Reelle und virtuelle Teilchen

■ Beispiele: Positronium* $\leftrightarrow$ Collider

- Energie/Impulserhaltung erfordert Erzeugung von **2 realen Photonen**
- Energie- und Impulserhaltung verbieten Produktion eines einzelnen (realen) Photons, erlaubt Bildung eines einzelnen **virtuellen Photons** (andere Energie-Impuls-Relation!)



Feynman-Diagramme

■ Virtuelle Photonen als Träger des elektromagnetischen Feldes

- Wechselwirkungen werden vermittelt durch Austausch **virtueller Teilchen**

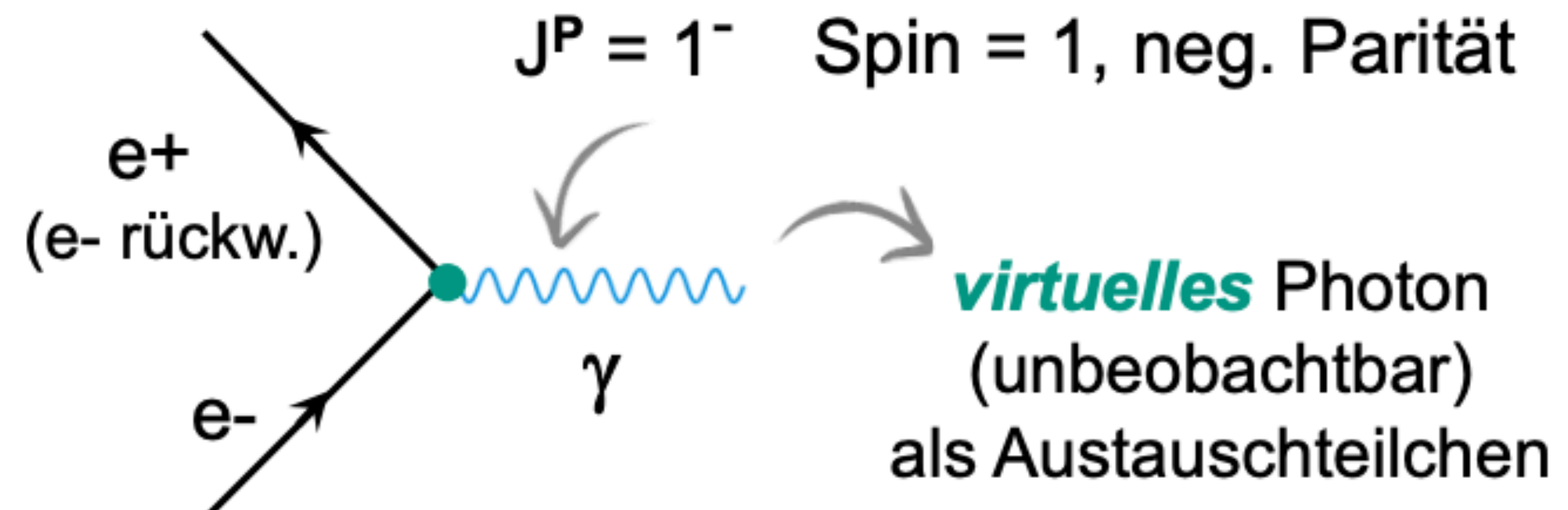
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$
$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$



Heisenberg'sche Unschärferelation

virtuelle Teilchen mit Masse - kurze Lebensdauer
- **endliche Reichweite**

- virtuelles Photon kann z.B. ein **Myon-Antimyon** Paar erzeugen
- virtuelle Teilchen: verantwortlich für **Lamb-Shift*** (H-Atom)



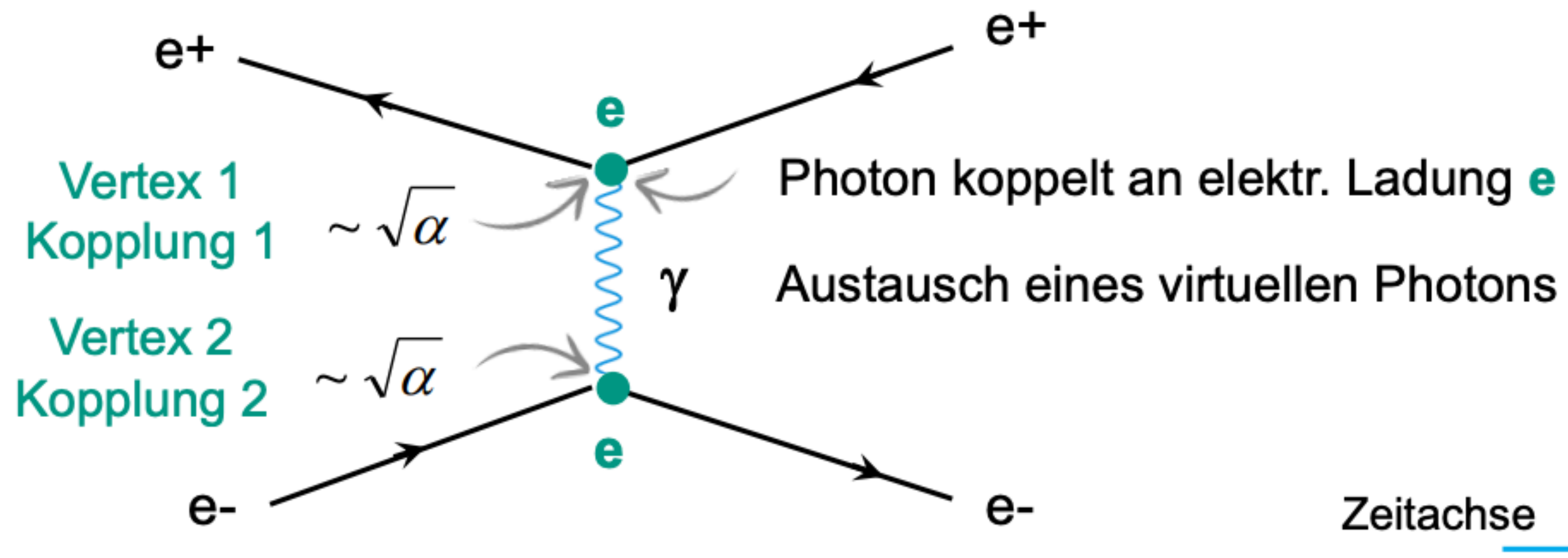
Feynman-Diagramme

■ Streuprozess

- **Kopplungsstärke*** der elektromagnetischen Wechselwirkung - **Feinstrukturkonstante** α

$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 \cdot hc} \approx \frac{1}{137}$$

- Beispiel: **Elektron-Positron Streuung** vermittelt über virtuelles Photon



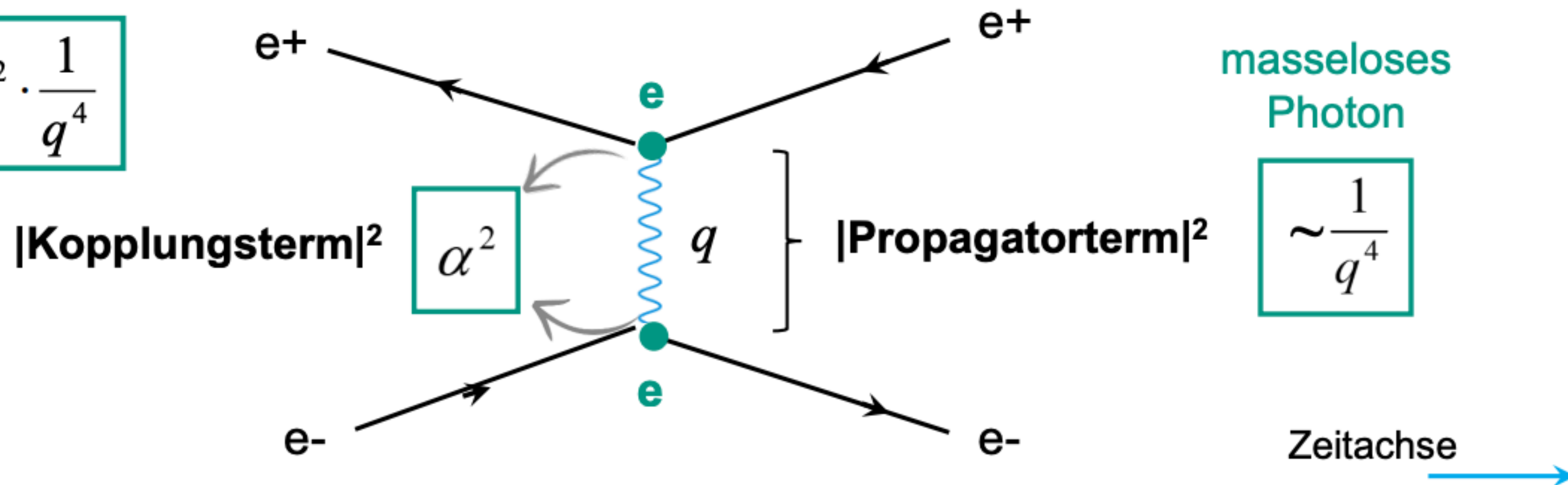
■ Streuprozess

■ Virtuelles Photon verantwortlich für Impulstransfer q

- **Propagator:** Wahrscheinlichkeitsamplitude für γ Propagation Vertex 1 $\rightarrow$ Vertex 2

- **Prozess:** e^+e^- Streuung (oder $d\sigma/d\Omega$ bei Rutherford*-Streuung):
erfordert $\rightarrow |Wahrscheinlichkeitsamplitude|^2$

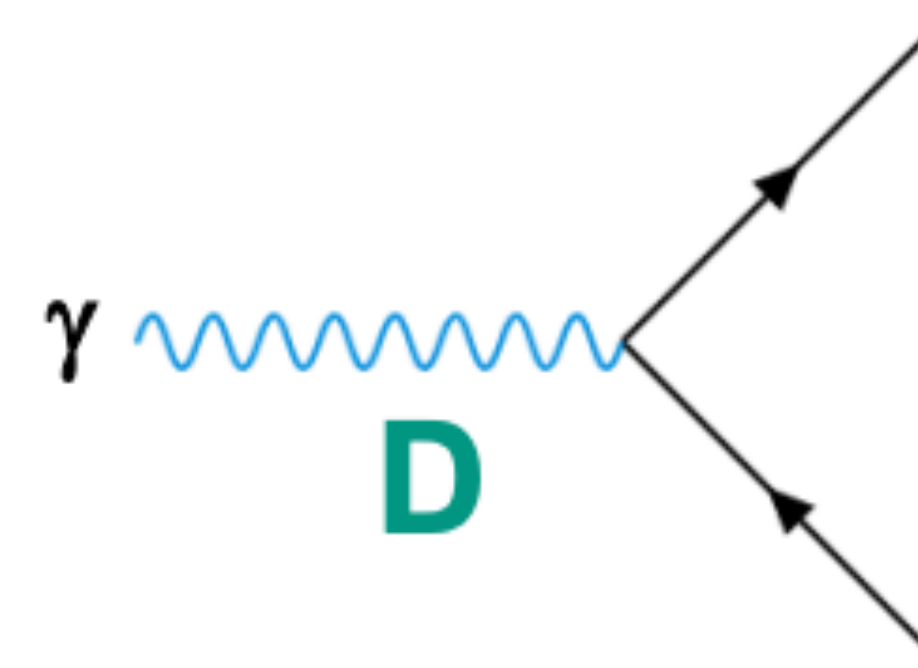
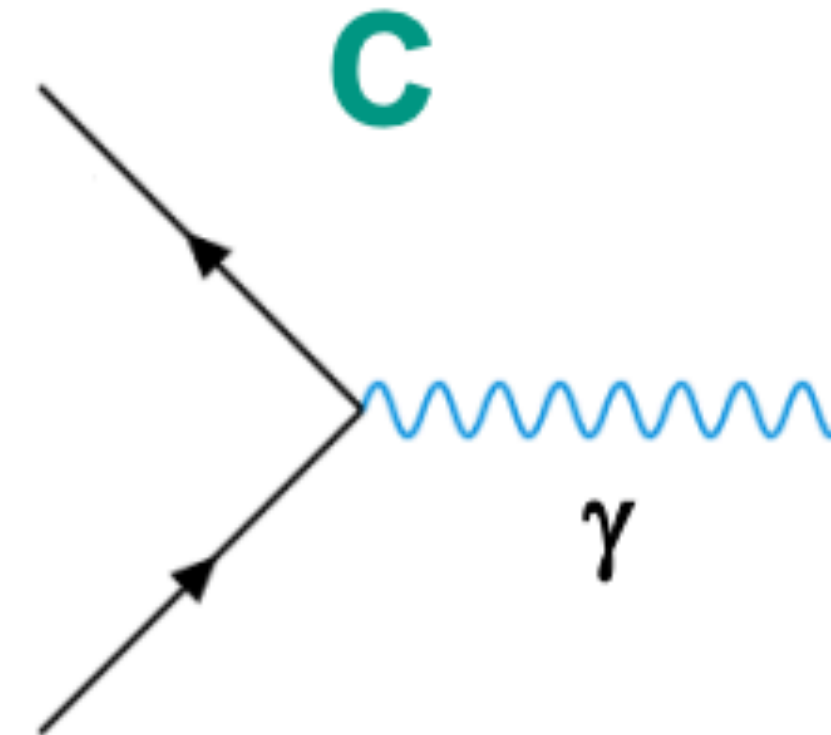
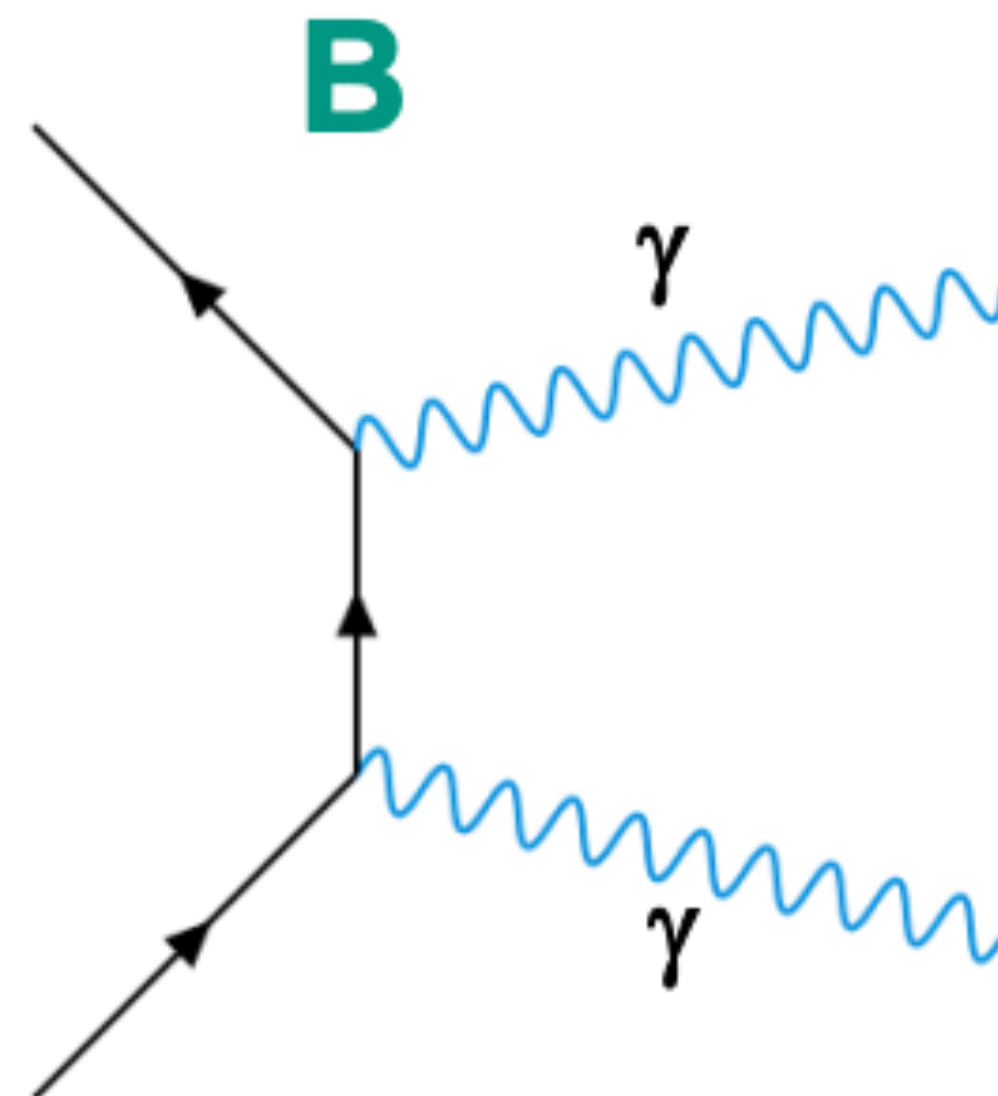
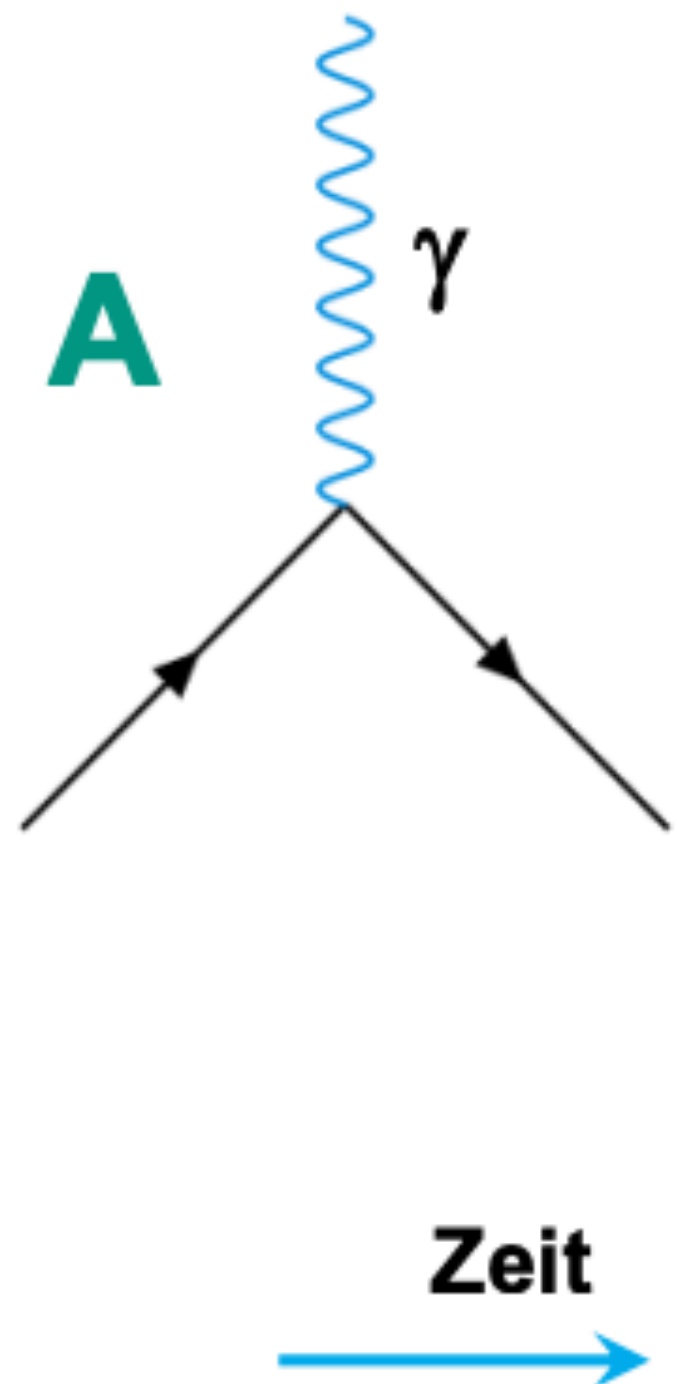
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \alpha^2 \cdot \frac{1}{q^4}$$



Feynman-Diagramme

■ Streuprozess

■ Frage: Welche Feynman-Diagramme stehen für die Vernichtung eines Elektron-Positron-Paares?



SHELDON COOPER
presents
FUN WITH ~~FLAGS~~
a Feynman
diagram



■ 1. Einführung

- 1.1. Organisatorisches, Lernziele, Motivation, und Tips
- 1.2. Übersicht und Literatur
- 1.3. Standard Model der Teilchenphysik
- 1.4. Einheiten
- 1.5. Relativistische Kinematik
- 1.6. Feynman Diagramme

