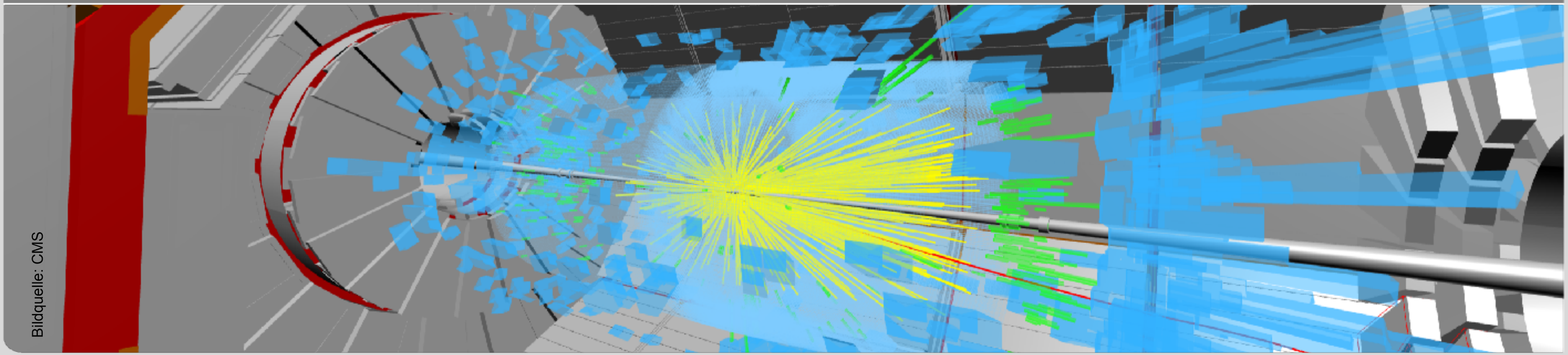
Karlsruher Institut für Technologie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 1. Vorlesung

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



Bildquelle: CMS

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 1

Einführung

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 1.1

Organisatorisches

Das Team: Dozent/inn/en

- **Prof. Dr. Ulrich Husemann** (ETP)
  - E-Mail: ulrich.husemann@kit.edu (bevorzugte Methode zur Kontaktaufnahme)
  - Web: http://ekpwww.etp.kit.edu/~husemann
  - Derzeit im Home Office (Tel. 0721-608-24038 wird weitergeleitet)
  - Ansonsten: Campus Nord (Bau 401, Raum 407, Tel.: 0721-608-24038), Campus Süd (Physik-Hochhaus 30.23, Raum 8-19, Tel.: 0721-608-47482)
  - Telefonische Sprechstunde: dienstags, 16:30–17:30 Uhr, oder nach Vereinbarung

- **Prof. Dr. Kathrin Valerius** (IKP)
  - E-Mail: kathrin.valerius@kit.edu (bevorzugte Methode zur Kontaktaufnahme)
  - Derzeit im Home Office (Tel. 0721-608-29014 wird weitergeleitet)
  - Ansonsten: Campus Nord (Bau 402, Raum 203, Tel. 0721-608-29014), Campus Süd (Physik-Flachbau 30.22, Raum F2-34, Tel.: 0721-608-43575)
  - Telefonische Sprechstunde: mittwochs, 13:00–14:00 Uhr, oder nach Vereinbarung

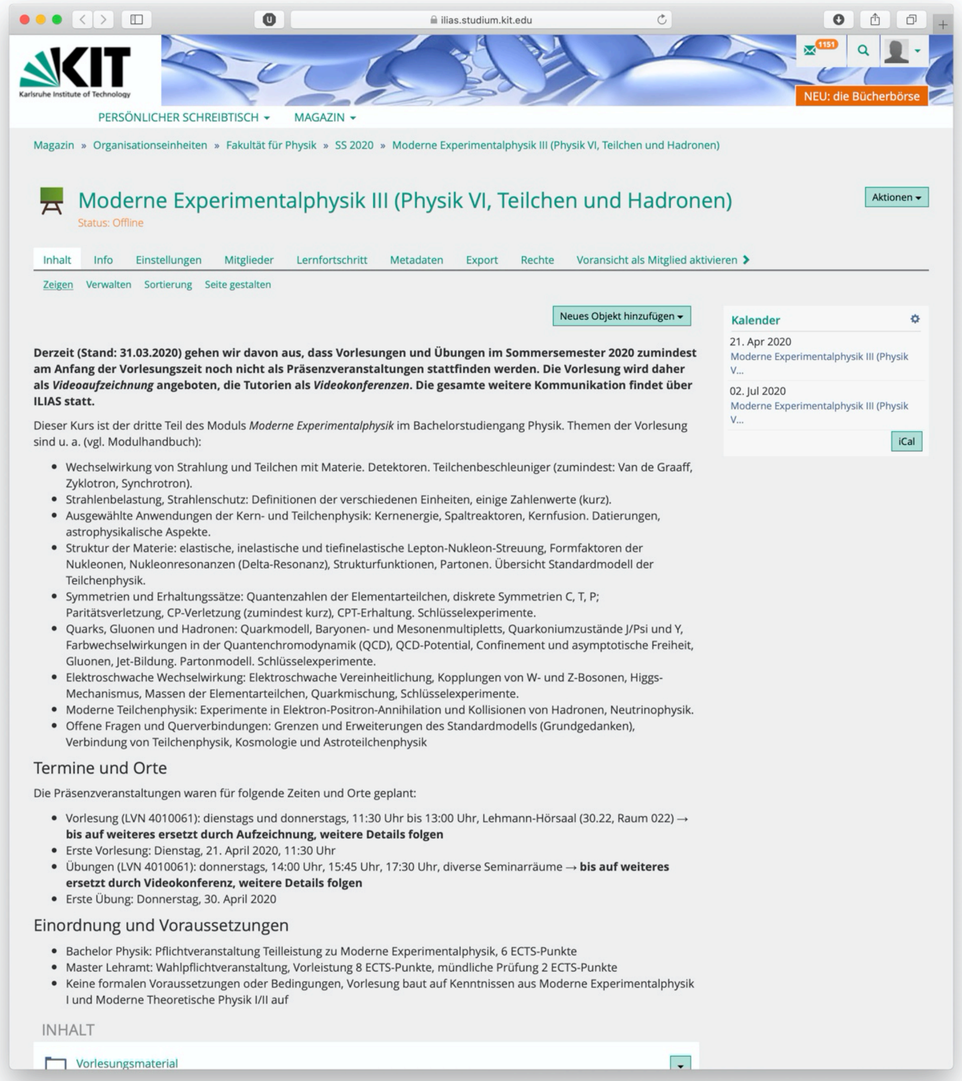
Das Team: Übungsleiter und Tutor/inn/en

- Übungsleiter: **Dr. Nils Faltermann** (ETP)
  - E-Mail: nils.faltermann@kit.edu
  - Kontakt: Physik-Hochhaus 30.23, Raum 9-23,
    Tel.: 0721-608-44715
- Tutor/inn/en:

Simon Adam	Svenja Müller	Rebecca von Kuk
Lukas Armbruster	Nikita Shadskiy	Sebastian Wieland
Janis Casper	Maximilian Stadelmaier	
Marcel Köpke	Jost von den Driesch	

ILIAS

- **ILIAS** als zentraler Platz für
  - Hinweise zur Online-Lehre
  - Vorlesungsaufzeichung und -folien
  - Übungsblätter
  - Diskussionsforum
  - Literaturliste, weitere Links
  - Kontakte zu Ihnen: Ankündigungen, …
- Direkter Link:
  - https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=crs_1080515&client_id=produktiv
  - Bitte registrieren Sie sich als Kursmitglieder



Online-Lehre Sommersemester 2020

Karlsruher Institut für Technologie

- Bis auf weiteres: **keine Präsenzveranstaltungen** am KIT
- Vorlesung: **Videoaufzeichnung**
  - Lehrveranstaltungsnummer 4010061
  - 2× pro Woche (Dienstag/Donnerstag), Folien als PDF
  - 3 SWS = 20 Vorlesungen bis einschließlich 02.07.2020

Zusatzangebot:
Online-Fragestunde
über Zoom (dienstags, 11:30–12:30 Uhr)

- Tutorien: **Videokonferenz** in Microsoft Teams
  - Lehrveranstaltungsnummer 4010062
  - 10 Gruppen, donnerstags 14:00, 15:45, 17:30 Uhr, erster Termin: 30.04.2020
  - Anmeldung: http://www.physik.kit.edu/Tutorium/SS20/Physik6/ (bis 23.04.2020)
- **Keine** Vorlesungen und Übungen: Donnerstag, 21. Mai 2020 (Christi Himmelfahrt), und Donnerstag, 11. Juni 2020 (Fronleichnam)

Einordnung und Voraussetzung

- **Pflichtveranstaltung** im Bachelorstudium Physik (SPO 2015):
  - Teilleistung (T-PHYS-102315) im Rahmen des Moduls „Moderne Experimentalphysik” (M-PHYS-101532)
  - 6 ECTS-Punkte (unbenotet)
- **Wahlpflichtmodul** im Masterstudium Lehramt Physik:
  - Teilleistung 1 (T-PHYS-109060): Vorleistung, 8 ECTS-Punkte (unbenotet)
  - Teilleistung 2 (T-PHYS-109061): mündliche Prüfung, 2 ECTS-Punkte (benotet)
- **Keine formalen Voraussetzungen** oder Bedingungen
- **Empfehlenswert**: Vorlesung baut auf auf Kenntnissen aus Modulen „Moderne Experimentalphysik I” (Atome und Kerne), „Moderne Theoretische Physik I/II” (Quantenmechanik) und „Rechnernutzung”

Vorleistung und Übungsblätter

- Vorleistung = **aktive Teilnahme** an den Übungen
- Bearbeitung der **Übungsblätter**:
  - Teamarbeit ist erwünscht: Abgabe in Gruppen von **bis zu drei Studierenden** (benutzen Sie Werkzeuge Ihrer Wahl zur Kommunikation)
  - Ausgabe: jeweils **dienstags** (nur online über ILIAS)
  - Abgabe: jeweils **montags bis 18:00 Uhr** (nur online über ILIAS)
- Kriterien zum Bestehen der Vorleistung:
  - **8 Übungsblätter**, jeweils 20 Punkte
  - Jeweils **mindestens 50% der Punkte** von **Blatt 1–4** und von **Blatt 5–8**
  - Anstatt Vorrechnen an der Tafel: **mindestens eine vorbereitete Präsentation** (z. B. PowerPoint) zu einer der designierten **Vorrechnenaufgaben**

Online-Anmeldung Vorleistung

- Online-Anmeldung zur Vorleistung im Campus-System:
  - Bachelor Physik (SPO 2015): Prüfungsnummer 7800081 (Campus)
  - Bachelor Physik (SPO 2010): Prüfungsnummer 262 (QISPOS)
    → bitte **melden Sie sich per E-Mail**, falls Sie in der SPO 2010 studieren
  - Master Lehramt Physik: Prüfungsnummer 7800082 (Campus)
  - An- und Abmeldebeginn: 21.04.2020, 12:00 Uhr
  - An- und Abmeldeschluss: 03.07.2020, 12:00 Uhr
- Achtung: Anmeldung und keine Abmeldung = „nicht bestanden”

Mündliche Prüfungen

- Bachelor Physik:
  - Abschluss des Moduls „Moderne Experimentalphysik” mit mündlicher Modulprüfung (benotet)
  - SPO 2015: Teilleistung T-PHYS-102312, 4 ECTS-Punkte (benotet)
  - Voraussetzung: Vorleistungen aus Moderne Experimentalphysik I–III
  - Prüfende: alle Dozent/inn/en der Experimentalphysik
  - Termine: nach Vereinbarung
- Master Lehramt Physik: Wahlpflichtmodul
  - Teilleistung T-PHYS-109061, 2 ECTS-Punkte (benotet)
  - Voraussetzung: T-PHYS-109060, Vorleistung Mod. Experimentalphysik III
  - Termine: nach Vereinbarung

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 1.2

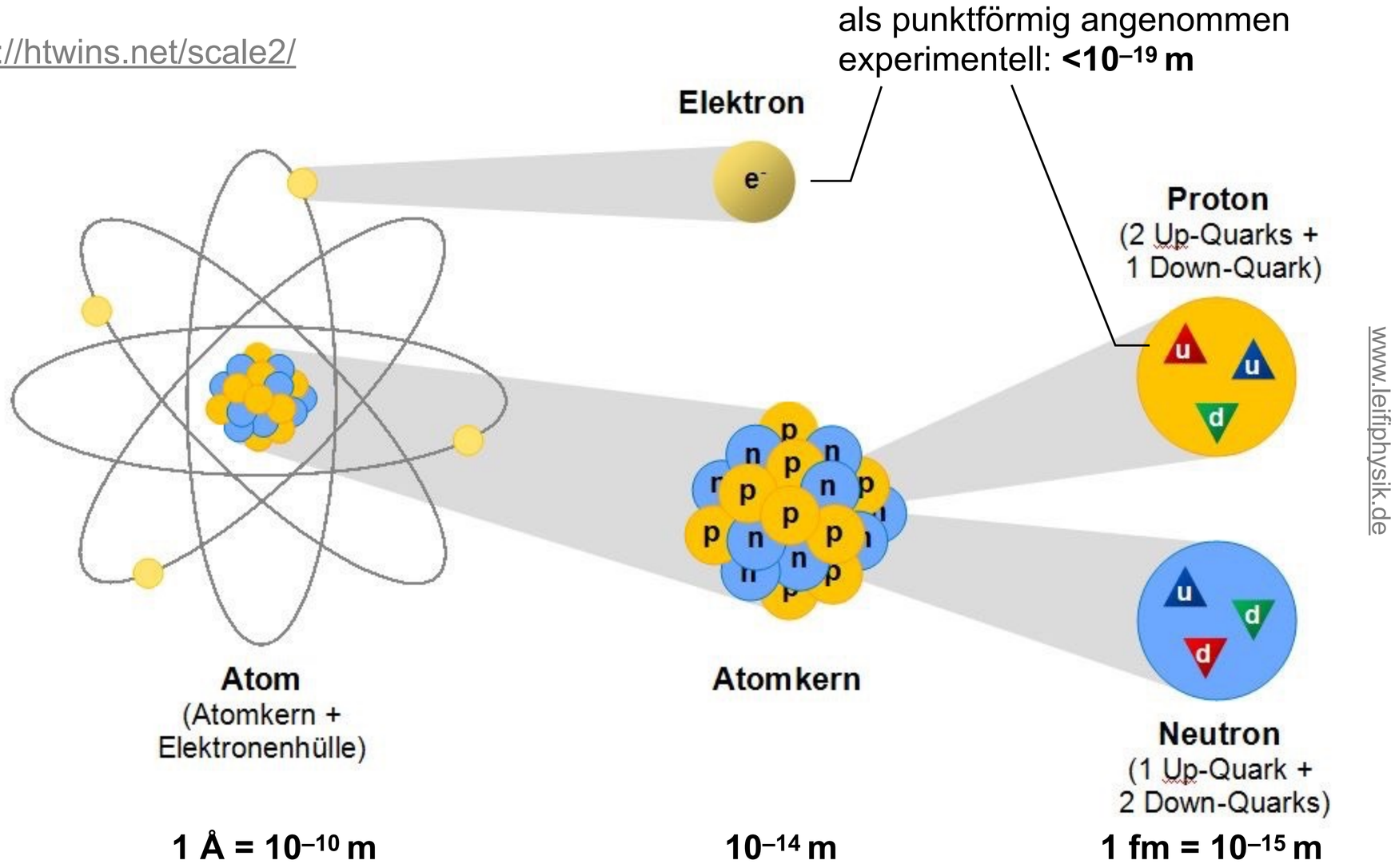
Übersicht und Literatur

Erkenntnisgewinn in der Physik

- Was ist ein physikalisches **Modell**?
  - **Vereinfachtes** Bild eines komplexen Sachverhalts → **begrenzte** Gültigkeit
  - Beispiel (vgl. Moderne Experimentalphysik I): Tröpfchenmodell des Kerns
- Was ist eine physikalische **Theorie**?
  - Beschreibung eines **Ausschnitts der Realität** aufgrund von **Annahmen**
  - **Empirische** Verankerung
  - Vorhersage von Beobachtungen → **Falsifizierbarkeit**
  - Beispiel in dieser Vorlesung: Standardmodell der Teilchenphysik
- Zusammenspiel Theorie–Experiment
  - **Induktiv**: Experimentelle Phänomene → Modell/Theorie
  - **Deduktiv**: Theorie → Vorhersage von Experimenten

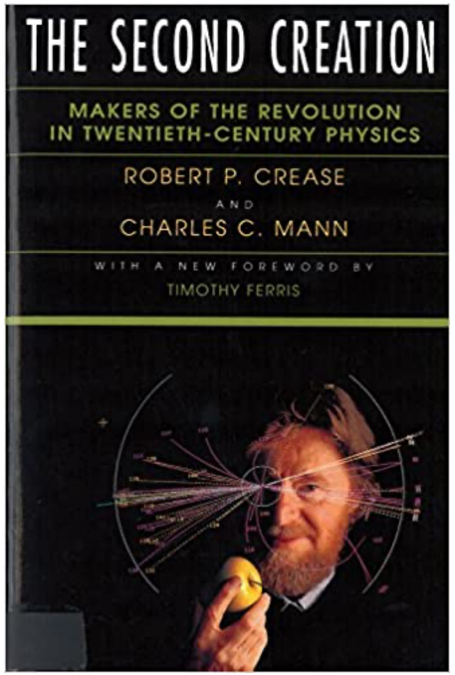
Größenskalen

Siehe auch: http://htwins.net/scale2/



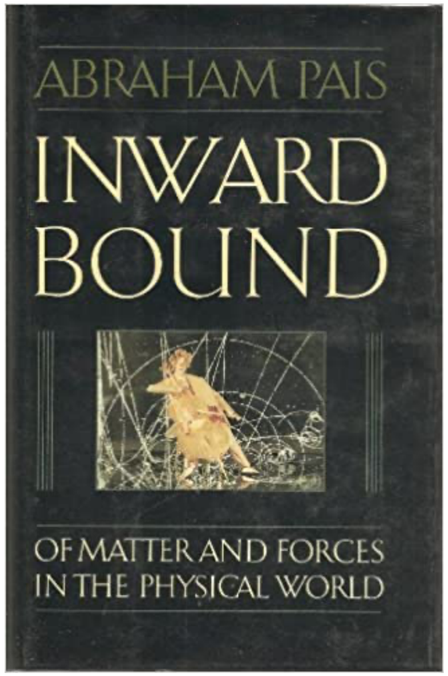
Kurze Geschichte

Historie der Kern- und Teilchenphysik spannend erzählt:



R. P. Crease & C. C. Mann:
The Second Creation
Makers of the revolution in 20th-century physics
MacMillan (1986)

A. Pais:
Inward Bound
Of matters and forces in the physical world
Clarendon Press (1986)



Kurze Geschichte

- 1895–1900: **Röntgenstrahlung** und **Radioaktivität**
  (W. C. Röntgen, H. Becquerel, M. und P. Curie, E. Rutherford)
- 1901–1910: **Quantenphysik** und **Relativitätstheorie**
  (M. Planck, A. Einstein)
- 1911–1920: **Atomkern**, **Höhenstrahlung**, **Alpha-** und **Betastrahlung**
  (E. Rutherford, V. Hess, N. Bohr, J. Chadwick)
- 1921–1926: **Compton-Effekt**, **Kernspin**, **Fermionen** und **Bosonen**
  (A. Compton, E. Fermi, P. Dirac, S. Bose)
- 1926–1930: **Unschärferelation, Geigerzähler, Teilchenbeschleuniger**
  (W. Heisenberg, H. Geiger/W. Müller, R. Wideröe/E. Lawrence)

Kurze Geschichte

- 1930–1934: **Neutrino**, **Neutron**, **Positron**, **Theorie der Betazerfalls**
  (W. Pauli, J. Chadwick, C. Anderson, E. Fermi)
- 1934–1936: **Cherenkov-Effekt**, **Yukawa-Potenzial**, **Tröpfchenmodell**
  (P. Cherenkov, H. Yukawa, H. Bethe/C. F. von Weizsäcker)
- 1937–1940: **Myon**, **Kernspaltung**, **Transurane**
  (C. Anderson/S. Neddermeyer, O. Hahn/ F. Straßmann/L. Meitner, …)
- 1941–1945: **Synchrotron**, **Kaon**, **Kernspinresonanz**
  (V. Veksler/E. McMillan, L. Leprince-Ringuet, F. Bloch/ E. Purcell)
- 1946–1947: **Pion, Photomultiplier, Strangeness**
  (C. Powell, F. Marshall, G. Rochester/C. Butler)

Kurze Geschichte

- 1948–1950: **Schalenmodell des Kerns**, **Quantenelektrodynamik**
  (O. Haxel/H. Jensen/M. Goeppert-Mayer, R. Feynman/J. Schwinger/S. Tomonaga)
- 1951–1957: **Struktur der Kerne**, **Antiproton**, **Paritätsverletzung**
  (R. Hofstadter, E. Segrè/ O. Chamberlain, T.-D. Lee/ C.-N. Yang/ C.-S. Wu)
- 1956–1964: **Neutrinos**, **Teilchenzoo**
  (C. Cowan/F. Reines, L. Lederman/ M. Schwartz/ J. Steinberger, …)
- 1964–1966: **Quarks**, **Higgs-Mechanismus**, **CP-Verletzung**
  (M. Gell-Mann/ G. Zweig, P. Higgs/ R. Brout/ F. Englert/…, J. Cronin/ V. Fitch/…)
- 1967–1969: **Standardmodell, Partonmodell**
  (S. Glashow/ A. Salam/ S. Weinberg, J. Friedman/H. Kendall/R. Taylor/J. Bjorken)

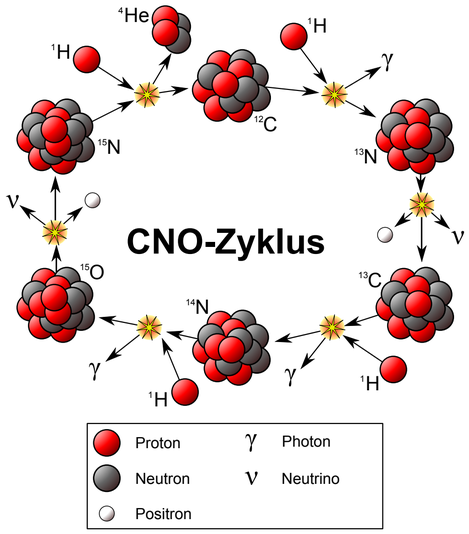
Kurze Geschichte

- 1970–1974: **KM-Mechanismus**, **Neutrale Ströme**, **Charm**
  (M. Kobayashi/ T. Maskawa, Gargamelle, S. Ting/ B. Richter)
- 1975–1990: **Tau-Lepton**, **Beauty**, **Gluon, W- und Z-Boson**
  (M. Perl, L. Lederman, PETRA, C. Rubbia)
- 1991–2001: **Top-Quark, Tau-Neutrino**, **Neutrino-Oszillationen**
  (Tevatron, DONUT, Super-Kamiokande/SNO)
- 2002–heute: **Higgs-Boson**, **Gravitationswellen**
  (LHC, LIGO)

Was ist moderne Kernphysik?

- **Kerne** und **Hadronen**:
  - Aufbau des Atomkerns
  - Stabile und instabile Kerne
  - Phasendiagramm von Kernmaterie
- Kern**reaktionen**:
  - Alpha-, Beta-, Gamma-Zerfälle
  - Kernanregung, Kernfusion, Kernspaltung
- Nukleare **Astrophysik**:
  - Die ersten drei Minuten des Universums
  - Sterne, Supernovae, Elementsynthese

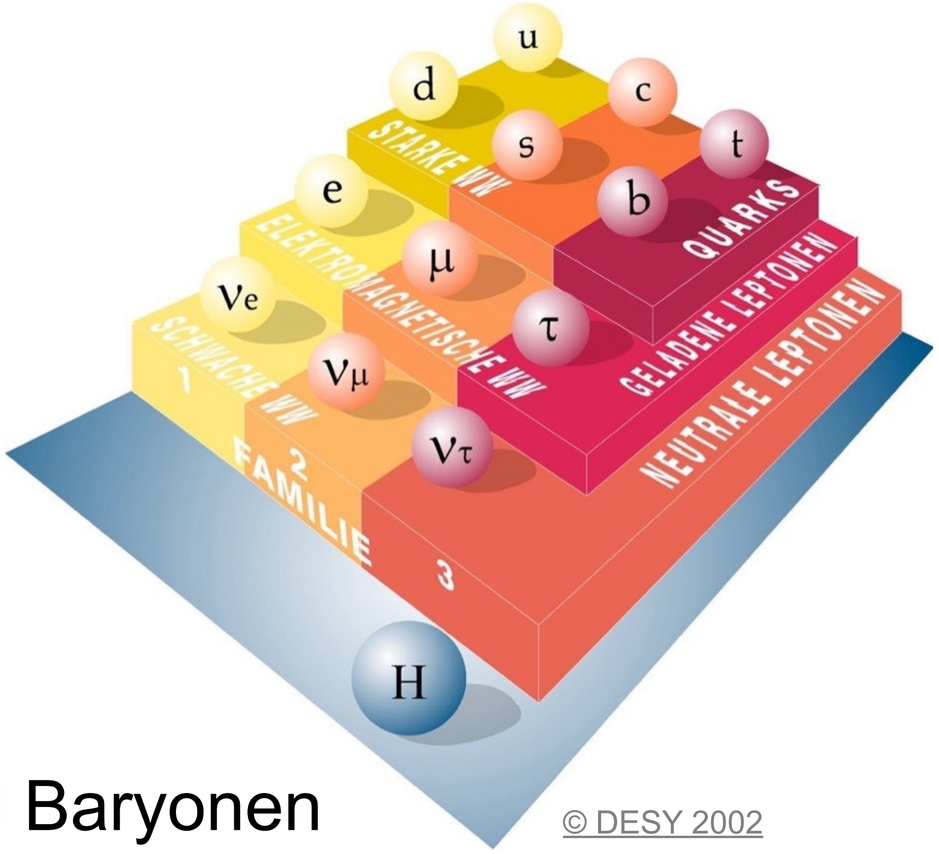
www.nucleonica.com



CWitte, CNO Cycle.svg, CC BY-SA 3.0

Was ist moderne Teilchenphysik?

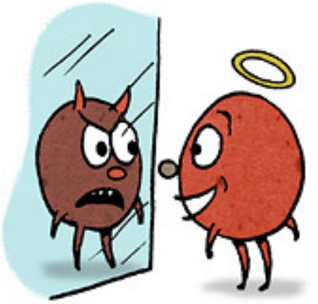
- **Fundamentale Wechselwirkungen**:
  - Starke Wechselwirkung
  - Elektroschwache Wechselwirkung
- **Fundamentale Teilchen** und deren **Eigenschaften**:
  - Fermionen: Quarks und Leptonen
  - Bosonen: Eichbosonen, Higgs-Boson(en)
- **Zusammengesetzte** Teilchen: Mesonen und Baryonen
- Offene Fragen, z. B. was sind **Dunkle Materie** und **Dunkle Energie**?



© DESY 2002

Übergreifende Themen

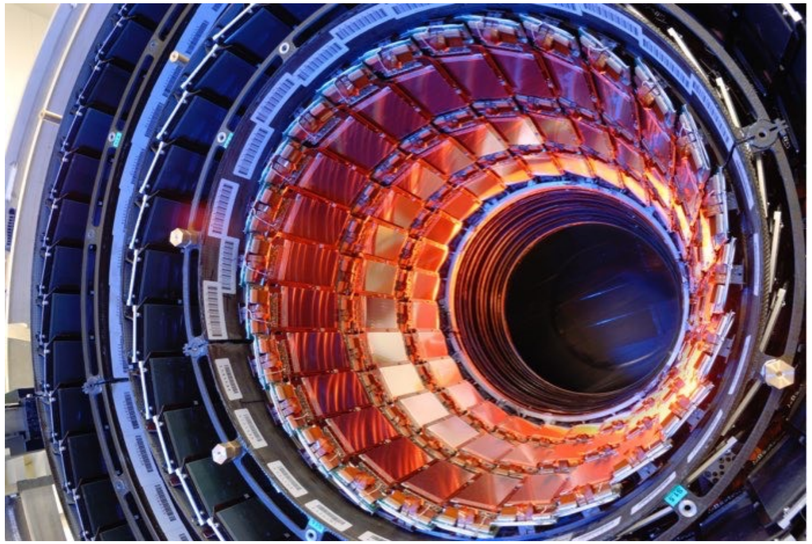
- **Symmetrien** und **Erhaltungssätze**:
  - Diskrete Symmetrien: Parität, Ladungskonjugation, Zeitumkehr
  - Kontinuierliche Symmetrien



D. Goldin, NY Times

- **Hochtechnologie**:
  - Beschleuniger
  - Detektoren
  - Computing
  - Statistische Datenanalyse

www.google.com



CMS

Gliederung der Vorlesung

Karlsruher Institut für Technologie

Allgemein

1. Einführung (1 VL)
2. Vom Atom zum Elementarteilchen (3 VL)
3. Experimentelle Methoden (3,5 VL)

Kerne

4. Anwendungen der Kernphysik (1,5 VL)

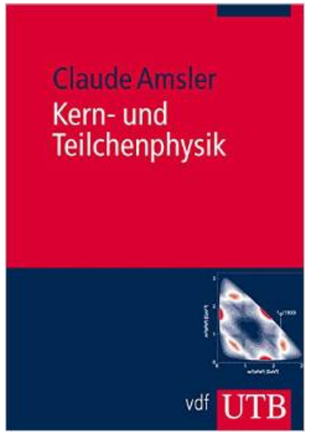
Teilchen

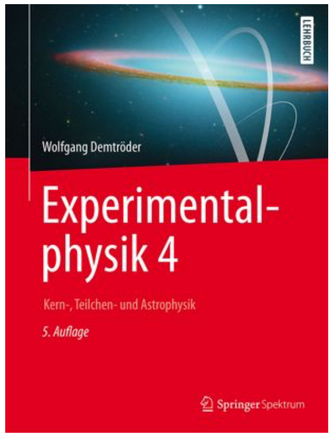
5. Symmetrien und Erhaltungssätze (2 VL)
6. QCD: Quarks, Gluonen und Hadronen (2,5 VL)
7. Elektroschwache Wechselwirkung (2,5 VL)
8. Moderne Teilchenphysik (3 VL)

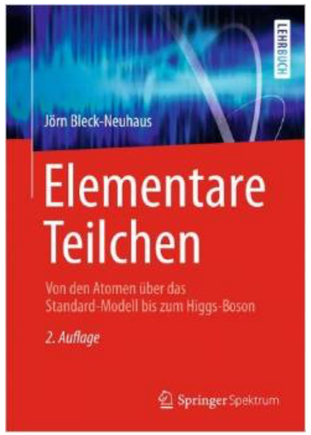
9. Offene Fragen und Querverbindungen (1 VL)

Allgemeine Lehrbücher

- B. Povh, K. Rith, Ch. Scholz, F. Zetsche, W. Rodejohann: Teilchen und Kerne, Springer (2014)
- C. Amsler: Kern- und Teilchenphysik, UTB/vdf (2007)
- W. Demtröder: Experimentalphysik 4, Kern-, Teilchen und Astrophysik, Springer (2017)
- J. Bleck-Neuhaus: Elementare Teilchen, Springer (2013)

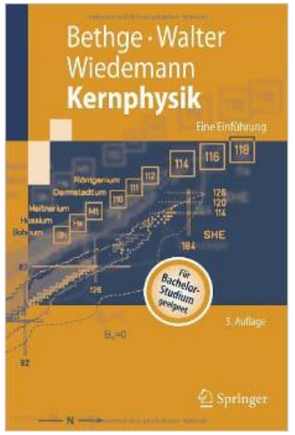


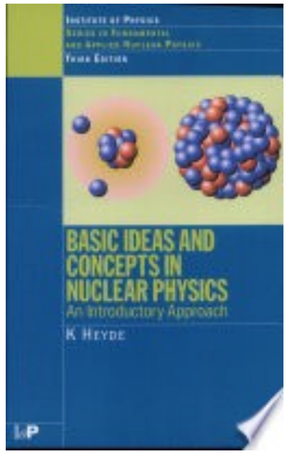


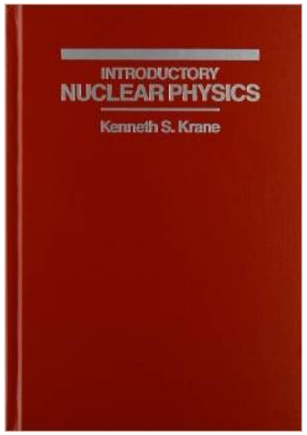


Bücher zur Kernphysik

- K. Bethge, G. Walter, B. Wiedemann: Kernphysik, Springer (2008)
- Th. Mayer-Kuckuk: Kernphysik, Teubner (2002)
- K. Heyde: Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics, Institute of Physics (2004)
- K. S. Krane: Introductory Nuclear Physics, Wiley (1987)

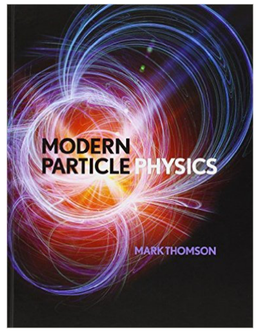


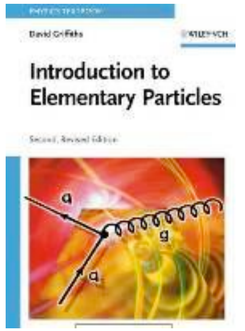


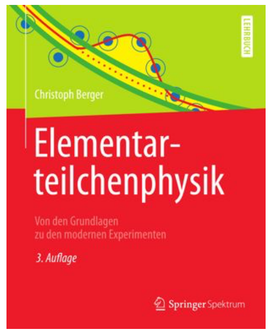


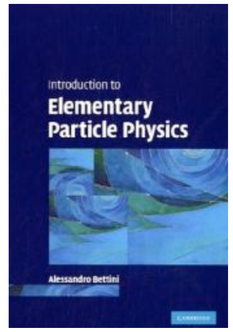
Bücher zur Teilchenphysik

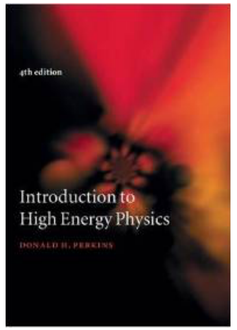
- M. Thomson: Modern Particle Physics, Cambridge University Press (2013)
- D. Griffith: Introduction to Elementary Particles, Wiley (2008)
- C. Berger: Elementarteilchenphysik, Springer (2014)
- A. Bettini: Introduction to Elementary Particle Physics, Cambridge University Press (2008)
- D. Perkins: Introduction to High Energy Physics, Cambridge University Press (2000)
- R. N. Cahn, G. Goldhaber: The Experimental Foundations of Particle Physics, Cambridge University Press (2000)

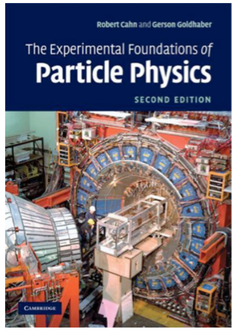






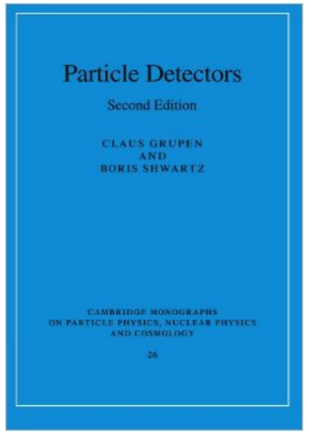






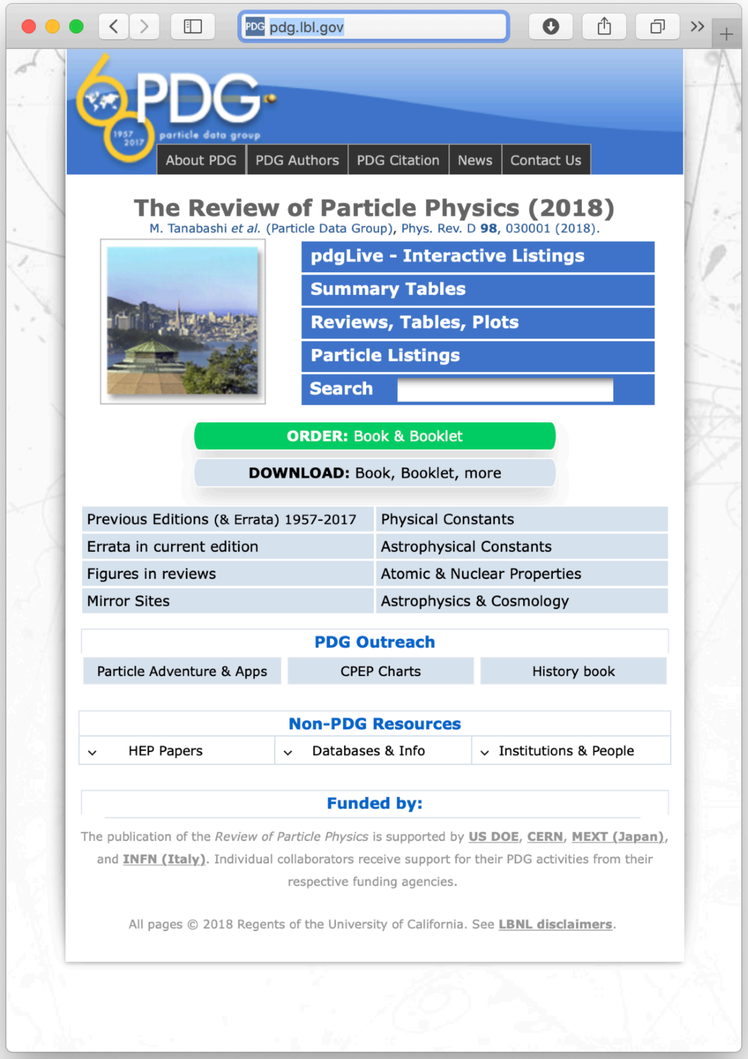
Bücher: Technologie

- Beschleunigerphysik:
  - K. Wille: Physik der Beschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Springer (1996)
  - F. Hinterberger: Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik, Springer (2008)
- Teilchendetektoren:
  - K. Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung, Springer (2005)
  - H. Kolanoski, N. Wermes: Teilchendetektoren, Springer-Spektrum (2016)
  - C. Grupen: Particle Detectors, Cambridge UP (2008)



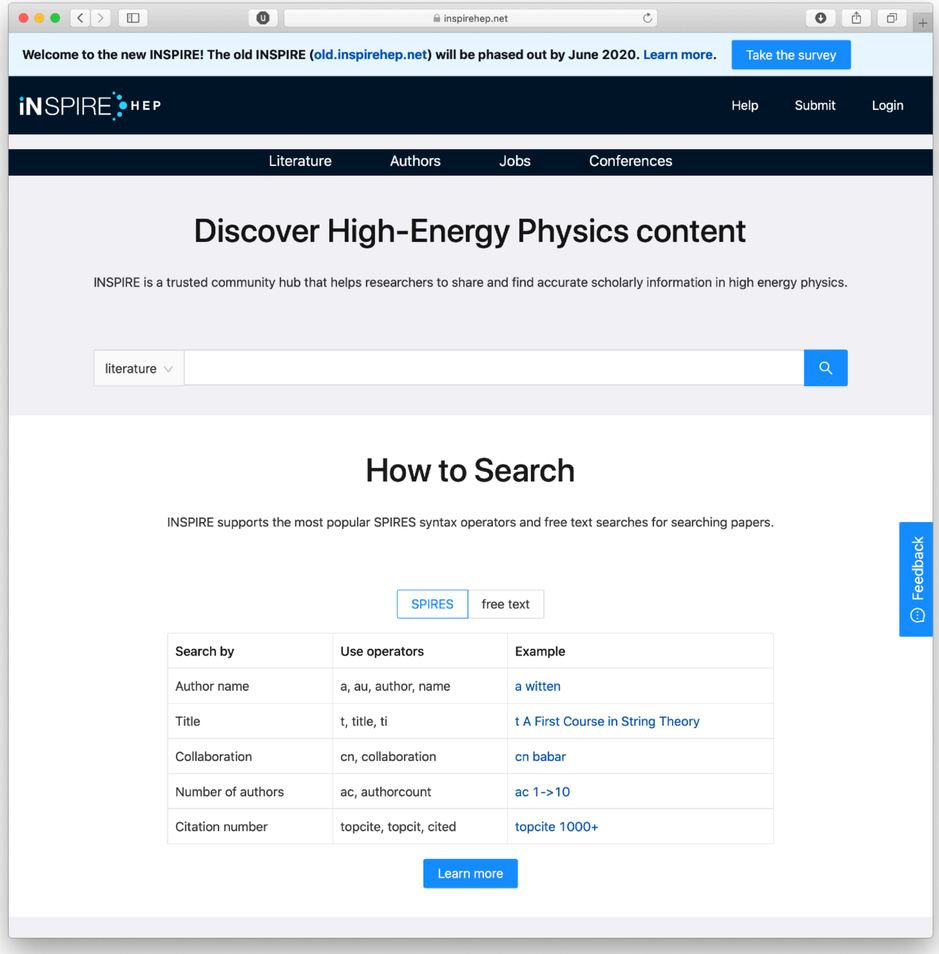
Nachschlagewerke

- The Review of Particle Physics:
  - **PDG** – Das „heilige Buch” der Teilchenphysiker/innen: Teilcheneigenschaften, Übersichtsartikel für Experten
  - Aktuelle Langversion: M. Tanabashi et al., Phys. Rev. D 98, 030001 (2018).
  - Kurzversion: Particle Physics Booklet
  - Online-Version: http://pdglive.lbl.gov



Suche nach Primärliteratur

- **arXiv** (http://arxiv.org):
  - Vorabdrucke von Veröffentlichungen („Preprints”)
  - Themen: Physik, Mathematik, Informatik, Systembiologie, Finanzmathematik, Statistik
- **INSPIRE** (http://inspirehep.net):
  - Literaturdatenbank für Teilchenphysik
  - arXiv-Preprints und Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften
  - Erweiterte Suchfunktionen, Literaturverzeichnis (diverse Formate)



Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 1.3

Einheiten und Einheitensysteme

Typische Energieskalen

- Energieeinheiten:
  - Dimension: $M\,L^2\,T^{-2}$ (M, L, T: Dimensionssymbole für Masse, Länge, Zeit)
  - SI-Einheit: **Joule** → ungünstig für Prozesse mit Kernen/Teilchen
  - Günstiger in Kern- und Teilchenphysik: **Elektronenvolt** (eV)
  - 1 eV = Energie, die Teilchen mit Ladung $Q = e$ (Elementarladung $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C) beim Durchlaufen einer Potenzialdifferenz von 1 V gewinnt

Typische Energieskalen in der Kern- und Teilchenphysik	
Energie von Röntgenstrahlung	keV = 10^3 eV
Bindungsenergie von Atomkernen	MeV = 10^6 eV
Ruheenergie des Protons ($E = mc^2$)	GeV = 10^9 eV
Strahlenergie am LHC	TeV = 10^{12} eV
Energie kosmischer Strahlung	bis zu ZeV („Zetta-eV") = 10^{21} eV

Einheiten: Impuls und Masse

- Impulseinheiten:
  - Dimension: M L T^{-1} → SI-Einheit: **kg m s^{-1}**
  - Günstiger in Kern- und Teilchenphysik: **eV/c**
    (mit c = 299.792.458 m s^{-1} Lichtgeschwindigkeit im Vakuum)
  - 1 eV/c = 0,53 ·10^{-27} kg m s^{-1}
- Bemerkungen:
  - Impuls = **vektorielle** Größe: **p** = (p_x, p_y, p_z)
  - Oft verwendet: **Transversalimpuls** $p_T^2 = p_x^2 + p_y^2$ (Bewegungsrichtung: z)
  - Relativistische **Energie-Impuls-Invariante** (→ später): $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$
  - Masseneinheit: **eV/c^2** → 1 eV/c^2 = 1,78 ·10^{-36} kg

Nützliche Umrechnungen

Größe	Kern- und Teilchenphysik	SI-Einheiten
Länge	1 fm (1 Fermi)	10^{-15} m
Energie	1 GeV	$1{,}602 \cdot 10^{-10}$ J
Masse	1 GeV/c^2	$1{,}78 \cdot 10^{-27}$ kg
Reduziertes Planckscher Wirkungsquantum $\hbar$	$6{,}582 \cdot 10^{-25}$ GeV s	$1{,}055 \cdot 10^{-34}$ Js
$\hbar c$	197,3 MeV fm	$3{,}162 \cdot 10^{-26}$ Jm

Einheitensysteme

- **SI**-Einheiten:
  - Für amtlichen und geschäftlichen Verkehr vorgeschrieben (EinhZeitG)
  - In Kern- und Teilchenphysik unüblich (da unpraktisch)

- **Natürliche** Einheiten in der Kern- und Teilchenphysik: $\hbar = c = k_B = 1$
  - Dimension von c: L T^{-1} → c = 1: Länge und Zeit haben **dieselbe Einheit**; Energie, Impuls und Masse haben dieselbe Einheit
  - Dimension von $\hbar$: E T
    → $\hbar$ = 1: Energie und Zeit haben zueinander **inverse Einheiten**
  - Dimension von k_B: E Θ^{-1}
    → k_B = 1: Energie und Temperatur haben **dieselbe Einheit**
  - Nur **eine Einheit** für Energie, Länge, Zeit und Temperatur benötigt

Einheitensysteme

- Konvention in Kern- und Teilchenphysik: Temperatur in **Energieeinheiten**, Länge und Zeit in **inversen Energieeinheiten**
  - Länge (aus $\hbar c = 1$): $1\ \mathrm{GeV}^{-1} = 0{,}197\ \mathrm{fm}$
  - Zeit (aus $\hbar = 6{,}582 \cdot 10^{-25}\ \mathrm{GeV\ s}$): $1\ \mathrm{GeV}^{-1} = 6{,}582 \cdot 10^{-25}\ \mathrm{s}$
  - Temperatur (aus $k_B = 8{,}617 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{eV\ K}^{-1}$): $1\ \mathrm{GeV} = 11{,}604 \cdot 10^{12}\ \mathrm{K}$

- Dimensionslose **Kopplungskonstante α** der elektromagnetischen Wechselwirkung („Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante"):

$$\alpha \overset{\text{SI}}{=} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\,\hbar c} \overset{\text{nat. Einh.}}{=} \frac{e^2}{4\pi} \approx \frac{1}{137} \quad \rightarrow \quad e = \sqrt{4\pi\alpha} \approx 0{,}3$$

(Heaviside-Lorentz-System für elektromagnetische Einheiten: $\varepsilon_0 = 1$)

Rückmeldung zur Vorlesung

- Diese Vorlesung enthält sehr viele Informationen
  → wieviel bleibt bei Ihnen „hängen”?
  - Präsenzvorlesung: **Audience Response System** (Handy/Computer)
  - Kurze Fragen zum **Verständnis** des Vorlesungsstoffs
    (ja/nein oder multiple choice)
  - Möglichkeit zur **Diskussion** mit Banknachbar/inne/n
    → **besseres** Verständnis
- Online-Vorlesung:
  - Fragen auf **ILIAS** unter „Vorlesungsmaterial” → Ihre anonyme Antworten
  - Auflösung und Diskussion in der **folgenden Online-Vorlesung**
    (und ggf. in Tutorien)

Aufgabe 1

- Warum ist es sinnvoll, in der Teilchenphysik mit natürlichen Einheiten zu arbeiten?
  A. Die physikalische Interpretation wird erleichtert, weil Skalen an typischen Skalen in der Teilchenphysik angepasst sind.
  B. Es ist einfacher, Gleichungen in natürlichen Einheiten auszuwerten.
  C. Es ist einfacher, Gleichungen in natürlichen Einheiten auszudrücken.
  D. Dimensionsanalysen werden in natürlichen Einheiten einfacher.
  E. Das deutsche *Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung* verbietet den Einsatz des SI-Systems.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS: https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 1.4

Relativistische Kinematik

Relativistische Kinematik

- Vierervektoren im Minkowski-Raum:

$$x_\mu = (ct, x, y, z)$$

- Lorentzinvariante Größe („Vierer-Abstand"):

$$g^{\mu\nu} x_\mu x_\nu = x^\nu x_\nu = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

↑ Minkowski-Metrik: $[g^{\mu\nu}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$

- Lorentztransformation (1 Raumdimension):

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma \\ -\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

mit $\beta \equiv \frac{v}{c}$ (in 3D: $\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c}$) „Boostfaktor"

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - |\vec{\beta}|^2}}$$ „Lorentz-Faktor"

- Viererimpuls p_μ:

  - Vierergeschwindigkeit $u_\mu = \frac{dx_\mu}{d\tau}$

    mit τ Eigenzeit und $d\tau = \frac{dt}{\gamma}$

  - $p_\mu = m u_\mu = m\gamma (c, v_x, v_y, v_z)$

    $\equiv \left(\frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z\right)$

→ $\gamma = \frac{E}{mc^2}$

→ $\vec{\beta} = \frac{\vec{p}c}{E}$

Relativistische Kinematik

- Energie-Impuls-Invariante:

$$g^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = p^\nu p_\nu \equiv p^2 = (m\gamma)^2 (c^2 - v^2)$$
$$= \frac{E^2}{c^2} - |\vec{p}|^2$$

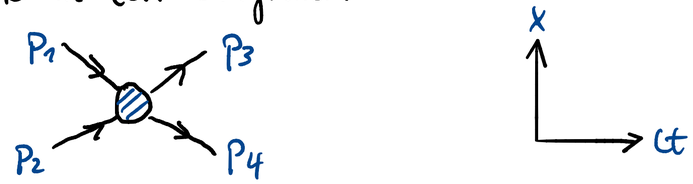
- Invariante Masse (manchmal: „Ruhemasse"):
  betrachte p^2 im Ruhesystem: $|\vec{v}| = 0$, $\gamma = 1$
  $\rightsquigarrow$ $p^2 = (mc)^2$

- Beispiel: Teilchenkollision („Schwerpunktsenergie"):

$$p_1 = \left(\frac{E_1}{c}, \vec{p}_1\right), \quad p_2 = \left(\frac{E_2}{c}, \vec{p}_2\right)$$

$$\rightsquigarrow (Mc)^2 = (p_1 + p_2)^2$$
$$= \frac{1}{c^2}(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$
$$= \frac{E_1^2}{c^2} - |\vec{p}_1|^2 + \frac{E_2^2}{c^2} - |\vec{p}_2|^2 + \frac{2E_1E_2}{c^2} - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$
$$= (m_1c)^2 + (m_2c)^2 + 2\left(\frac{E_1E_2}{c^2} - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2\right)$$

- Mandelstam-Variable s, t, u:
  - betrachte Teilchenstreuung in Raum-Zeit-Diagramm



  $\rightsquigarrow$ Vierimpulserhaltung: $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$

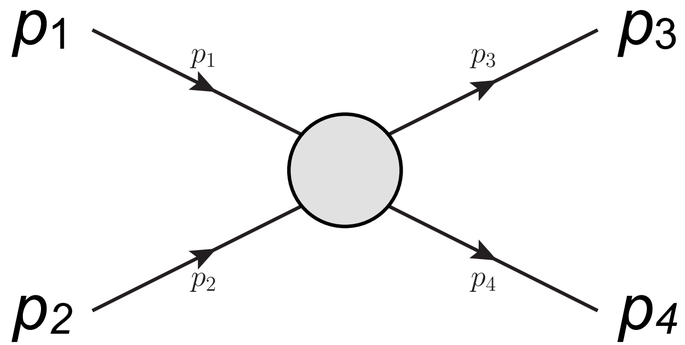
  - konstruiere lorentzinvariante Größen:

1) $s \equiv (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2$
   $\rightsquigarrow$ Quadrat der Schwerpunktsenergie

2) $t \equiv (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2$
   $\rightsquigarrow$ Quadrat des Vierimpulsübertrags zwischen Teilchen 1 und 2

3) $u \equiv (p_1 - p_4)^2 = (p_3 - p_2)^2$

Kurze Zusammenfassung

- Einheiten für Kern- und Teilchenphysik:
  - Zentrale Größe: Energie → Einheit: Elektronenvolt (eV)
  - Praktisch: **natürliche Einheiten** ($\hbar = c = k_B = 1$)
    → Einheit von Energie, Impuls, Masse und Temperatur: eV
    → Einheit von Länge und Zeit: eV^{-1}
- Relativistische Kinematik:
  - Viererimpuls: $p_\mu = m\gamma(c, v_x, v_y, v_z) \equiv \left(\frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z\right)$
  - Mandelstam-Variablen:

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