

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik (Physik VI)

Thomas Müller, Roger Wolf
17. April 2018

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



1 Einführung

$[J, a] = ib$ $[J, a^*] = -ib^*$

$J \psi_0 = i(b^* a - a^* b) \frac{(a^* + ib^*)}{\sqrt{2}} \psi_0$
 $= \frac{1}{\sqrt{2}} (b^* a a^* - a^* a^* b + i b^* b^* a - i a^* b b^*) \psi_0$
 $= \frac{1}{\sqrt{2}} (a a^* - i a^* b) b^* \psi_0$
 $= \frac{1}{\sqrt{2}} (a - ib) a^* b^* \psi_0$
 $= \frac{1}{\sqrt{2}} (b^* - i a^*) \psi_0$

$N = (a^* a + b^* b)$
 $N \psi_0 = \psi_0$

$\frac{a^* + ib^*}{\sqrt{2}} \psi_0 = \psi_+$
 $\frac{a^* - ib^*}{\sqrt{2}} \psi_0 = \psi_-$

$(J_+)^n \psi_0 = n! \psi_0$
 $(J_-)^n \psi_0 = 0$

$[J, J_+] = J_+$
 $[J, J_-] = -J_-$
 $[J_+, J_-] = 1$

$[D_+, D_-] = 1 = \frac{1}{2i} (x + ip)(x - ip) - \frac{1}{2i} (x^2 + p^2 - (x^2 + p^2)) = 1$
 $[J_+, D_+] = 0$
 $[J_-, D_-] = 0$

$E = \frac{1}{2} (\frac{1}{2} + \frac{1}{2}) \hbar \omega = \frac{1}{2} \hbar \omega$
 $E = \frac{1}{2} (\frac{1}{2} - \frac{1}{2}) \hbar \omega = -\frac{1}{2} \hbar \omega$

$\psi_+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (a^* + ib^*) \psi_0$
 $\psi_- = \frac{1}{\sqrt{2}} (a^* - ib^*) \psi_0$

$[A, B] = AB - BA$
 $[x, y] = 0$
 $[x, p] = i\hbar$

$H = \frac{1}{2} (x^2 + p^2)$
 $J = x p - p x$
 $[H, J] = 0$

$\psi_+ = \frac{1}{\sqrt{2}} (a^* + ib^*) \psi_0$
 $\psi_- = \frac{1}{\sqrt{2}} (a^* - ib^*) \psi_0$

1.1 Kursorganisation



Dozenten

- **Dozenten:** Prof. Dr. Thomas Müller / Priv. Doz. Dr. Roger Wolf (IETP)
 - Bevorzugte Kontaktaufnahme persönlich nach der Vorlesung oder per mail (zur Terminabsprache)
 - Nutzen Sie die besondere Betreuungssituation in der Physik, gehen Sie bei Fragen/Problemen aktiv auf ihre Dozenten/Betreuer zu

Vorraussetzungen

- **Keine** formalen Vorraussetzungen oder Bedingungen
- Empfehlenswert:
 - Kenntnisse aus den Modulen “Moderne Experimentalphysik I (Atomphysik)” und “Modernde Theoretische Physik I/II (v.a. Quantenmechanik)”

Vorlesung (Termine & Form)

- **4 SWS, 19(!) Termine** (11 Wochen, flexibel wenn nötig):
 - Lehrveranstaltungsnummer 4010061
 - Di 11:30 – 13:00, Do 11:30 – 13:00 (Beginn: 17.04. voraus. Ende: 28.06.)
 - Geb 30.22 Physik-Flachbau, Raum 022 Otto Lehmann-Hörsaal

Hinweise zur Vorlesung und den Übungen

Die nominellen Daten der Vorlesung und der Übungen können Sie dem elektronischen Vorlesungsverzeichnis des KIT entnehmen. Wichtige Eckdaten finden Sie im folgenden:

Donnerstags 11:30 - 13:00 (Otto Lehmann-Hörsaal)

Donnerstags 14:00 - 19:00 (s.u.)

Beginn: 11.05.2017

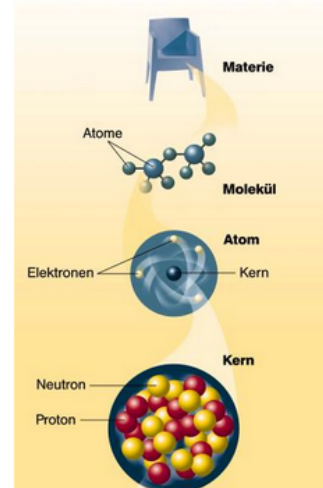
Sie können sich hier elektronisch zu den Übungen anmelden

Wir planen 26 Vorlesungen und 12 Übungsblätter die zur Bearbeitung ausgegeben werden. Die Vorlesung erfolgt in Form von Folien und Anschrieben an die Tafel. Rechnen Sie damit, auch selbst während der Vorlesung vorzunehmene Anschriebe und Folien, werden nach jeder Vorlesung auf elektronisch über upload auf ILIAS. Sie können die bereits hochgeladenen Anschriebe/Folien und Übungsblätter in der folgenden Liste finden:

Vorlesung:	Vorlesungstag:	Übungsblatt:
VL-01 Einführung, Organisation	Di 25.04.2017	-
VL-02 Kinematik, Streuexperimente	Do 27.04.2017	-
VL-03 Energieverlust geladener Teilchen	Di 02.05.2017	Blatt-01
VL-04 Energieverlust von Photonen	Do 04.05.2017	-
VL-05 Detektionstechniken, Detektorsysteme	Di 09.05.2017	Blatt-02

- **Zentrale Verwaltung** über [Webseite](#), [ILIAS System](#) (bitte registrieren Sie sich zeitnah als Kursmitglieder, Passwort für ILIAS: → Teilchen2018):
- **Bi-/Multidirektionaler Austausch** über Vorlesung hinaus (→ via **ILIAS mailing Liste**)
- **Insbesondere Ausgabe der Übungen erfolgt nur(!) elektronisch** über upload auf ILIAS

Moderne Experimentalphysik III (Physik IV, Kerne und Teilchen):



Tutorien zur Vorlesung

- **2 SWS, 8 Termine** (2x kein Tutorium wegen Feiertag, 7-9 Übungsblätter geplant):
 - Lehrveranstaltungsnummer 4010062
 - 11 Gruppen, donnerstags 14:00, 15:45, 17:30, (→ erster Termin 26.04.2018, zum Kennenlernen und für Fragen zur Vorlesung)
 - Geb 30.23 Physik-Hochhaus, Seminarräume im 2. Stock (→ nächste Folie)
 - Vorlesung/Übung fällt aus:
 - Dienstag 01.05.2018 (→ Tag der Arbeit)
 - Donnertag 10.05.2018 (→ Christi Himmelfahrt)
 - Donnertag 31.06.2018 (→ Fronleichnam)
 - **Anmeldung** zu den Übungen elektronisch [hier](#) (freigeschaltet seit 16.04., bitte melden Sie sich zeitnah zu den Tutorien an)

Tutorien: Termine & Tutoren

Zeitfenster:	Raum:	Übungsgruppe:
14:00 - 15:30	229.3	(1) - Valentin Hermann
14:00 - 15:30	229.4	(2) - Thomas Moch
14:00 - 15:30	2/0	(3) - Martin Obermair
14:00 - 15:30	2/11	(4) - Patrick Müller
15:45 - 17:15	229.4	(5) - Jan van den Linden
15:45 - 17:15	2/0	(6) - Sebastian Wieland
15:45 - 17:15	2/1	(7) - Claudius Zimmermann
15:45 - 17:15	2/11	(8) - Martin Schimassek
15:45 - 17:15	2/17	(9) - Marc Beutter
17:30 - 19:00	2/0	(10) - Markus Nowak
17:30 - 19:00	2/11	(11) - Yi Yao

- **Koordination: Dr. Roger Wolf (IETP)**

- roger.wolf@cern.ch

- Physik-Hochhaus 30.23, Raum 9-11, Tel.: (0)721 608 43591

Übungsblätter

- **7-9 Übungsblätter** geplant (falls 9 → dann 4 “halbe” Blätter)
- **Ausgabe:** online, dienstags zur Vorlesung (upload auf Webseite, ILIAS, Bekanntgabe per mail)
- **Bearbeitung:** in Gruppen von 2 Studierenden möglich. Abgabe als Gruppe in Papierform → s. rechts), abweichende Einreichungen werden NICHT akzeptiert
- **Rückgabe:** montags in der darauf folgenden Woche bis 13:30 in den Briefkasten der Vorlesung in Geb 30.23

- Erstes Blatt des Aufgabenblattes als Deckblatt verwenden
- Tackern
- Gruppe und Tutor klar vermerken
- Namen der Bearbeitenden klar vermerken



Übungsblatt 1

Name des Übungsgruppenleiters und Gruppenbuchstabe:

(1) Valentin Hermann

Namen der bearbeitenden Gruppe:

Ernie & Bert

Einordnung der Veranstaltung

- **Pflichtveranstaltung** im Bachelorstudium Physik (6 LP-Punkte):
 - Leistungsnachweis über “Vorleistung” (= erfolgreiche Teilnahme an Übungen)
 - Teilleistung als **Voraussetzung für mündliche Prüfung** “Moderne Experimentalphysik”
 - **Anmeldung** zur Vorleistung elektronisch [hier](#) (Anmeldung: 16.04. – 20.07.
Abmeldung: 16.04. – 20.07., jeweils 12:00)
- **Sie erfüllen die Vorleistung wenn Sie...**
 - ... nicht mehr als zwei Übungsblätter (ohne Entschuldigung und/oder triftigen Grund) leer abgeben, von den letzten dreien nicht mehr als eins.

Einordnung der Veranstaltung

- **Pflichtveranstaltung** im Bachelorstudium Physik (6 LP-Punkte):
 - Leistungsnachweis über “Vorleistung” (= erfolgreiche Teilnahme an Übungen)
 - Teilleistung als **Voraussetzung für mündliche Prüfung** “Moderne Experimentalphysik”
 - **Anmeldung** zur Vorleistung elektronisch [hier](#) (Anmeldung: 16.04. – 20.07. Abmeldung: 16.04. – 20.07., jeweils 12:00)
- **Sie erfüllen die Vorleistung wenn Sie...**
 - ... nicht mehr als zwei Übungsblätter (ohne Entschuldigung und/oder triftigen Grund) leer abgeben, von den letzten dreien nicht mehr als eins.
 - ... mindestens **50% der maximal erreichbaren Punkte** in Übungsblättern erzielen

Einordnung der Veranstaltung

- **Pflichtveranstaltung** im Bachelorstudium Physik (6 LP-Punkte):
 - Leistungsnachweis über “Vorleistung” (= erfolgreiche Teilnahme an Übungen)
 - Teilleistung als **Voraussetzung für mündliche Prüfung** “Moderne Experimentalphysik”
 - **Anmeldung** zur Vorleistung elektronisch [hier](#) (Anmeldung: 16.04. – 20.07. Abmeldung: 16.04. – 20.07., jeweils 12:00)
- **Sie erfüllen die Vorleistung wenn Sie...**
 - ... nicht mehr als zwei Übungsblätter (ohne Entschuldigung und/oder triftigen Grund) leer abgeben, von den letzten dreien nicht mehr als eins.
 - ... mindestens **50% der maximal erreichbaren Punkte** in Übungsblättern erzielen
 - ... mindestens **50% der maximal erreichbaren Punkte** in den letzten 3 Übungsblättern erzielen

Einordnung der Veranstaltung

- **Pflichtveranstaltung** im Bachelorstudium Physik (6 LP-Punkte):
 - Leistungsnachweis über “Vorleistung” (= erfolgreiche Teilnahme an Übungen)
 - Teilleistung als **Voraussetzung für mündliche Prüfung** “Moderne Experimentalphysik”
 - **Anmeldung** zur Vorleistung elektronisch [hier](#) (Anmeldung: 16.04. – 20.07. Abmeldung: 16.04. – 20.07., jeweils 12:00)
- **Sie erfüllen die Vorleistung wenn Sie...**
 - ... nicht mehr als zwei Übungsblätter (ohne Entschuldigung und/oder triftigen Grund) leer abgeben, von den letzten dreien nicht mehr als eins.
 - ... mindestens **50% der maximal erreichbaren Punkte** in Übungsblättern erzielen
 - ... mindestens **50% der maximal erreichbaren Punkte** in den letzten 3 Übungsblättern erzielen
 - ... aktiv an den Tutorien teilnehmen (nach Ermessen des Tutoren)

Anmeldungen zu dieser Veranstaltung?

- **Q:** Wieviele Anmeldungen zu dieser Veranstaltung haben wir diskutiert?



Anmeldungen zu dieser Veranstaltung?



- **Q:** Wieviele Anmeldungen zu dieser Veranstaltung haben wir diskutiert?
- **A:** drei! – Anmeldung zur Vorleistung, Anmeldung in ILIAS, Anmeldung zu den Tutorien
- **Q:** Wann sollten Sie diese Anmeldungen vornehmen?

Anmeldungen zu dieser Veranstaltung?



- **Q:** Wieviele Anmeldungen zu dieser Veranstaltung haben wir diskutiert?
- **A:** drei! – Anmeldung zur Vorleistung, Anmeldung in ILIAS, Anmeldung zu den Tutorien

- **Q:** Wann sollten Sie diese Anmeldungen vornehmen?
- **A:** am besten gleich nach(!) der Vorlesung... (Ausnahme: QUISPOS wird noch gesondert – per mailing Liste – bekannt gegeben)

1.2 Kursübersicht und Literatur



Gliederung der Vorlesung



Vorlesung:	Vorlesungstag:	Übungsblatt:
VL-01 Einheiten, Relativistische Kinematik	Di 17.04.2018	-
VL-02 Teilchenstreuung	Do 19.04.2018	-
VL-03 Wirkungsquerschnitt	Di 24.04.2018	Blatt-01
VL-04 Teilchenbeschleunigung	Do 26.04.2018	-
Vorlesung fällt aus	Di 01.05.2018	Blatt-02
VL-05 Teilchennachweis durch Ionisation	Do 03.05.2018	-
VL-06 Elektromag. WW und Schauer	Di 08.05.2018	Blatt-03
Vorlesung fällt aus	Do 10.05.2018	-
VL-07 Detektoren der Teilchenphysik	Di 15.05.2018	Blatt-04
VL-08 Symmetrien und Erhaltungsätze	Do 17.05.2018	-
VL-09 Fundamentale Teilchen und Kräfte im SM	Di 22.05.2018	Blatt-05
VL-10 Diskrete Symmetrien des SM	Do 24.05.2018	-
VL-11 Teilchenzoo: vom Hadron zum Quark	Di 29.05.2018	Blatt-06
Vorlesung fällt aus	Do 31.05.2018	-
VL-12 Farbladung und QCD	Di 05.06.2018	Blatt-07
VL-13 Phänomenologie der schwachen WW	Do 07.06.2018	-
VL-14 Theorie der elektroschwachen WW	Di 12.06.2018	Blatt-08
VL-15 Higgs Mechanismus	Do 14.06.2018	-
VL-16 SM: Quarksektor	Di 19.06.2018	Blatt-09
VL-17 Top: Entdeckung und Eigenschaften	Do 21.06.2018	-
VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften	Di 26.06.2018	-
VL-19 Neutrino-Physik	Do 28.06.2018	-

Lehrbücher: Kerne und Teilchen

- 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 Astroteilchenphysik, Springer (2010)
- J. Bleck-Neuhaus: Elementare Teilchen, Springer (2013)

Lehrbücher: Teilchenphysik

- M. Thompson: Modern Particle Physics, Cambridge Univ. Press (2013)
- D. Griffith: Introduction to Elementary Particles, Wiley (2008)
- C. Berger: Elementarteilchenphysik, Springer (2006)
- A. Bettini: Introduction to Elementary Particle Physics, Cambridge Univ. Press (2008)
- D. Perkins: Introduction to High Energy Physics, Cambridge Univ. Press (2016)
- R. N. Cahn, G. Goldhaber: The Experimental Foundations of Particle Physics, Cambridge Univ. Press (2000)

Lehrbücher: Technologie

- K. Wille: Physik der Beschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Springer (1992)
- F. Hinterberger: Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik, Springer (2008)
- K. Kleinknecht: Detektoren für Teilchenstrahlung, Springer (2005)
- H. Kolanoski, N. Wermes: Teilchendetektoren, Springer-Spektrum (2016)
- C. Grupen: Particle Detectors, Cambridge Univ. Press (2008)

Recherche

- Review of Particle Physics (**PDG**):
 - Teilcheneigenschaften, Übersichtsartikel (alle 2 Jahre aktualisiert)
- Server für Vorabdrucke (**arXiv**):
 - Themen: Physik, Mathematik, Informatik, Systembiologie, Finanzmathematik, Statistik
- Literaturdatenbank für Teilchenphysik (**INSPIRE**):
 - Preprints und Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften.



particle data group

About PDG PDG Authors PDG Citation Contact Us

The Review of Particle Physics (2016)

C. Patrignani *et al.* (Particle Data Group), *Chin. Phys. C*, **40**, 100001 (2016).



[pdgLive - Interactive Listings](#)

[Summary Tables](#)

[Reviews, Tables, Plots](#)

[Particle Listings](#)

Search

Order: Book & Booklet

Download or Print: Book, Booklet, Website, Figures & more

Previous Editions (& Errata) 1957-2016	Physical Constants
Errata in current edition	Astrophysical Constants
Figures in reviews	Atomic & Nuclear Properties
Mirror Sites	Astrophysics & Cosmology

Most Popular

[Reviews](#)

[Data Listings](#)

PDG Outreach

[Particle Adventure & Apps](#)

[CPEP Charts](#)

[History book](#)

Non-PDG Resources

▾ [HEP Papers](#)

▾ [Databases & Info](#)

▾ [Institutions & People](#)

Funded by:

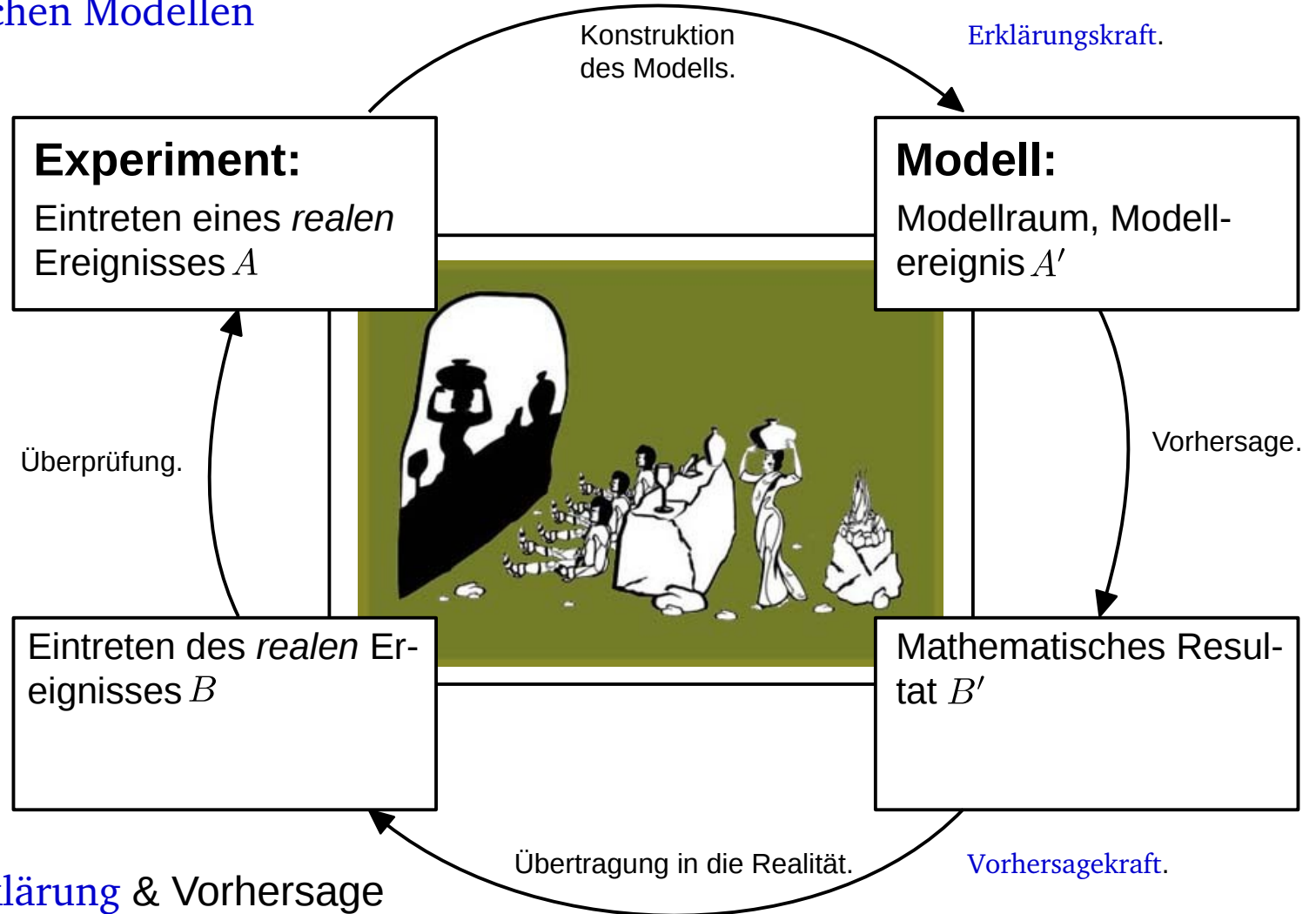
US DOE, CERN, MEXT (Japan), IHEP-CAS (China), INFN (Italy), MINECO (Spain), IHEP (Russia)

1.3 Erkenntnisgewinn bei kleinsten Skalen



Erkenntnisgewinn im Wandel der Zeit

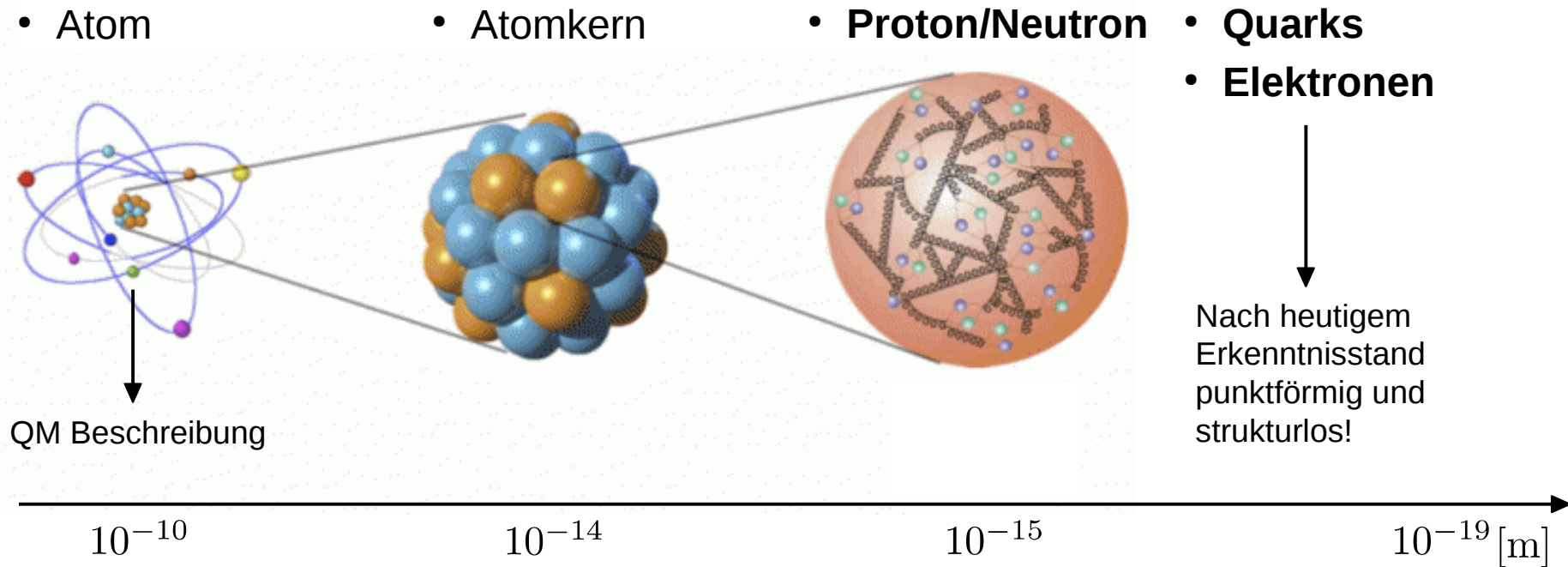
- Seit der **Frühmoderne** geleitet von **mathematischen Modellen**



- Einfache Erklärung** & Vorhersage reproduzierbarer Naturereignisse

Größenskalen dieses Kurses

- Siehe auch <http://htwins.net/scale2/>
- $10^{-6}m$ – Feinmechanik
- $10^{-9}m$ – Nanotechnologie



- Erkenntnisgewinn jenseits unserer Sinneswahrnehmung (→ modellbehaftet)!

Einheiten in der Teilchenphysik vs SI-Einheiten

- Skalen jenseits unseres Alltagsempfindens (→ flexible Verwendung von Einheiten):

- **Beispiel-1:**

Ladung des Elektrons: $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

Üblicherweise setzen wir die Ladung des Elektrons zu 1

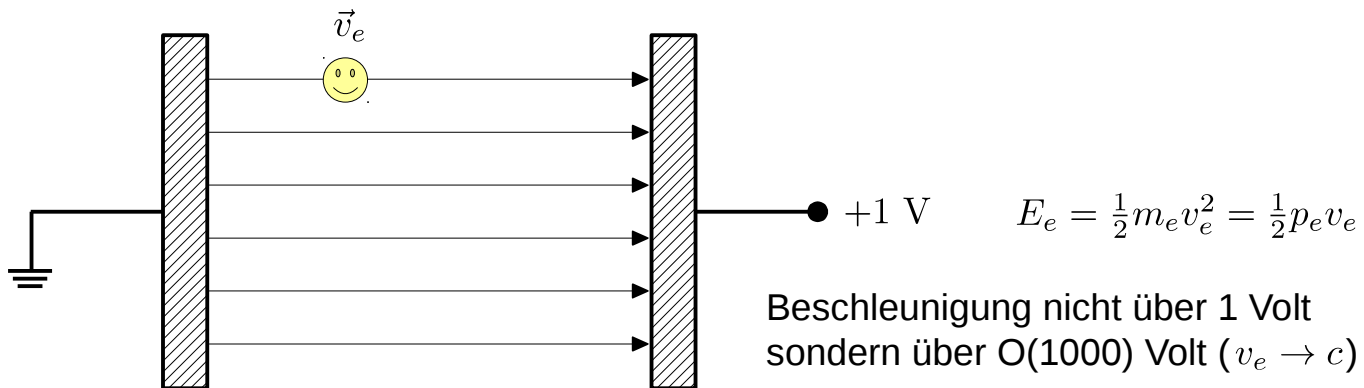
- **Beispiel-2:**

Energie des Elektrons: $eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$

Impuls des Elektrons:

Masse des Elektrons:

Oft betrachten wir Ladungen, die durch Spannungen beschleunigt werden. Die dabei gewonnene Energie betrachten wir in Vielfachen von "Elektronenvolt"



Einheiten in der Teilchenphysik vs SI-Einheiten

- Skalen jenseits unseres Alltagsempfindens (→ flexible Verwendung von Einheiten):

- **Beispiel-1:**

Ladung des Elektrons: $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

Üblicherweise setzen wir die Ladung des Elektrons zu 1

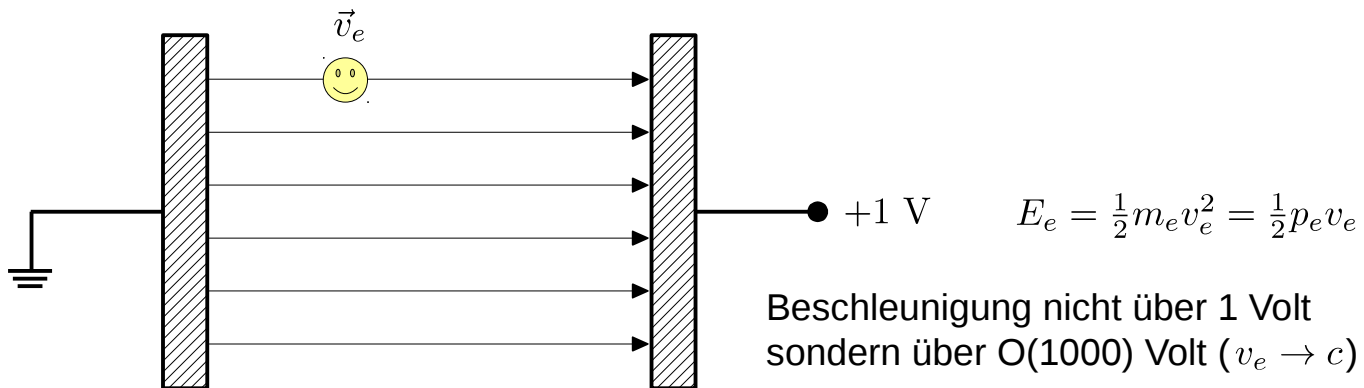
- **Beispiel-2:**

Energie des Elektrons: $eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$

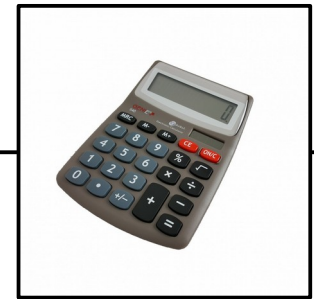
Impuls des Elektrons: eV/c

Masse des Elektrons: eV/c^2

Oft betrachten wir Ladungen, die durch Spannungen beschleunigt werden. Die dabei gewonnene Energie betrachten wir in Vielfachen von "Elektronenvolt"



Nützliche Umrechnungen



- Manchmal sind Sie gezwungen **eV in SI Einheiten** umzurechnen:

Größe	Kern-/Teilchenphysik	SI-einheiten
Länge	1 fm	10^{-15} m
Energie	1 GeV	1.602×10^{-10} J
Masse	1 GeV/c ²	1.78×10^{-27} kg
\hbar	6.626×10^{-25} GeV s	1.055×10^{-34} J s
$\hbar c$	197.3 MeV fm	3.162×10^{-26} J m

- Q:** Die Masse des Elektrons beträgt 511 keV/c². Das entspricht wieviel kg?

Nützliche Umrechnungen



- Manchmal sind Sie gezwungen **eV in SI Einheiten** umzurechnen:

Größe	Kern-/Teilchenphysik	SI-einheiten
Länge	1 fm	10^{-15}m
Energie	1 GeV	$1.602 \times 10^{-10}\text{J}$
Masse	1 GeV/c ²	$1.78 \times 10^{-27}\text{kg}$
\hbar	$6.626 \times 10^{-25}\text{ GeV s}$	$1.055 \times 10^{-34}\text{J s}$
$\hbar c$	197.3 MeV fm	$3.162 \times 10^{-26}\text{J m}$

- Q:** Die Masse des Elektrons beträgt $511\text{ keV}/c^2$. Das entspricht wieviel kg?
- A:** $511\text{ keV}/c^2 = 511\,000 \cdot 1.6 \times 10^{-19}\text{C V} / (3 \times 10^8\text{m/s})^2 = 9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$

Natürliche Einheiten

- Statt $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ immer in den Einheiten mitzuschleppen setzen wir oft $c \equiv 1$
- Weiter empfiehlt es sich $\hbar \equiv 1$ (und außerdem $k_B \equiv 1$) zu setzen (v.a. in Theorie)

Natürliche Einheiten:

Größe	Kern-/Teilchenphysik	Natürliche Einheiten
\hbar	GeV·s	1
c	[m/s]	1
Energie	GeV	GeV
Masse	GeV/c ²	GeV
Temperatur	K	GeV
Zeit	s	
Länge	m	

- **Q:** Welche Einheiten haben in diesem System Länge und Zeit?



Natürliche Einheiten

- Statt $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ immer in den Einheiten mitzuschleppen setzen wir oft $c \equiv 1$
- Weiter empfiehlt es sich $\hbar \equiv 1$ (und außerdem $k_B \equiv 1$) zu setzen (v.a. in Theorie)

Natürliche Einheiten:

Größe	Kern-/Teilchenphysik	Natürliche Einheiten
\hbar	GeV·s	1
c	[m/s]	1
Energie	GeV	GeV
Masse	GeV/c ²	GeV
Temperatur	K	GeV
Zeit	s	GeV ⁻¹
Länge	m	GeV ⁻¹

- **Q:** Welche Einheiten haben in diesem System Länge und Zeit?

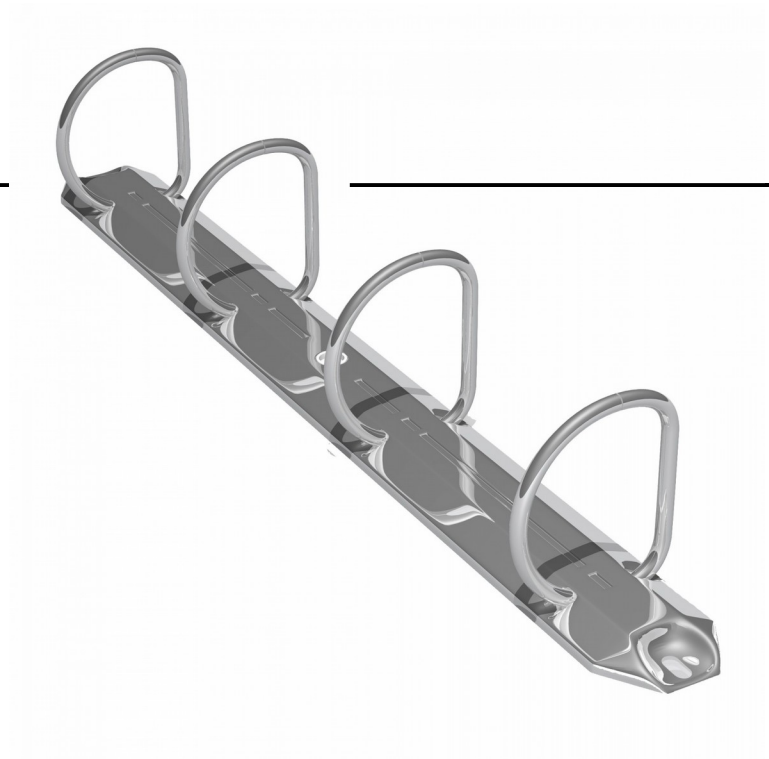
- **A:** Leite aus Heisenberg'scher Unschärferelation her:

$$\Delta p \cdot \Delta x \gtrsim \hbar, \quad \Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$$

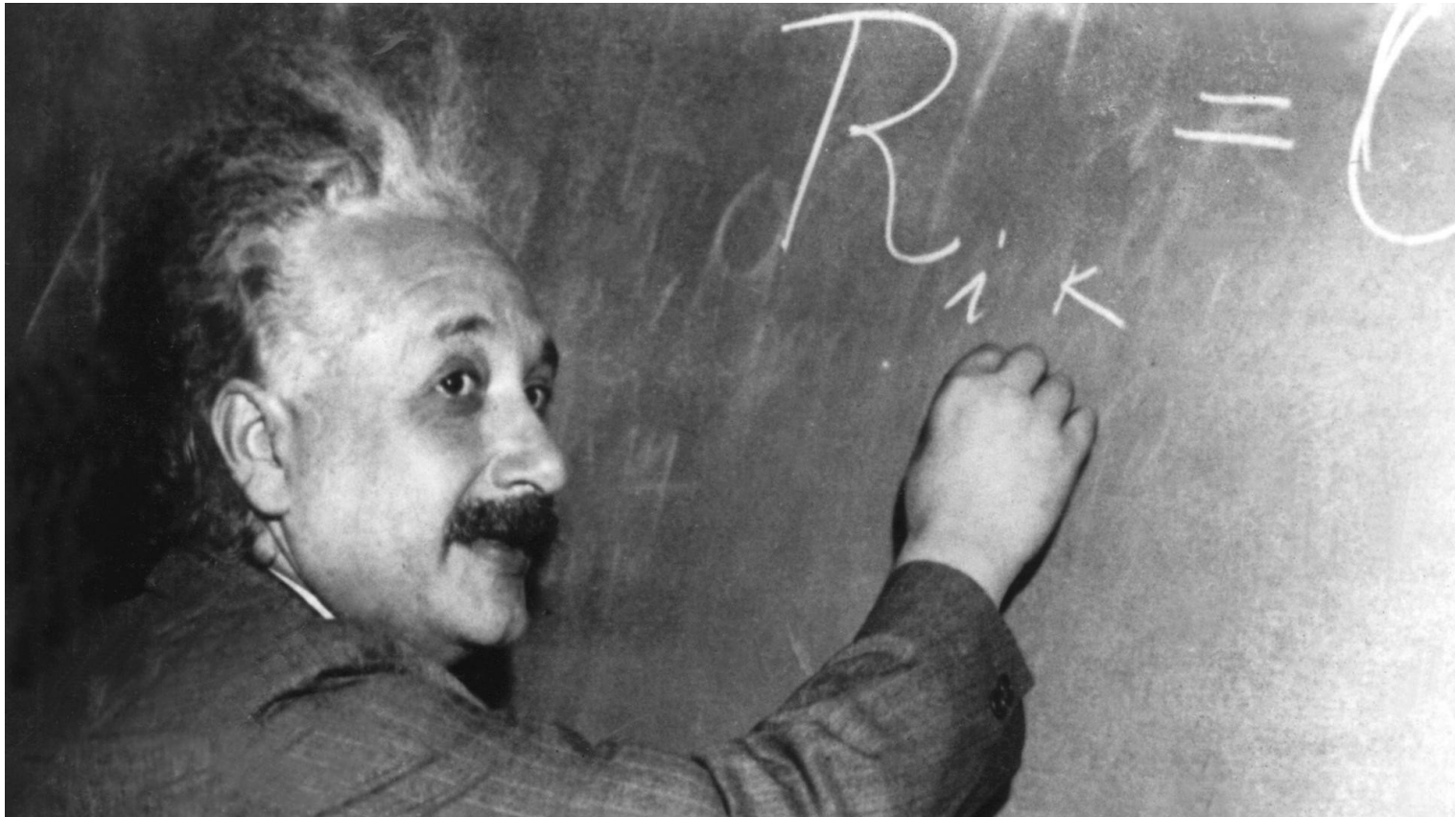


Zusammenfassung

- Größenskalen in der Teilchenphysik
- Natürliche Einheiten und SI-Einheiten
- Nützliche Umrechnungen

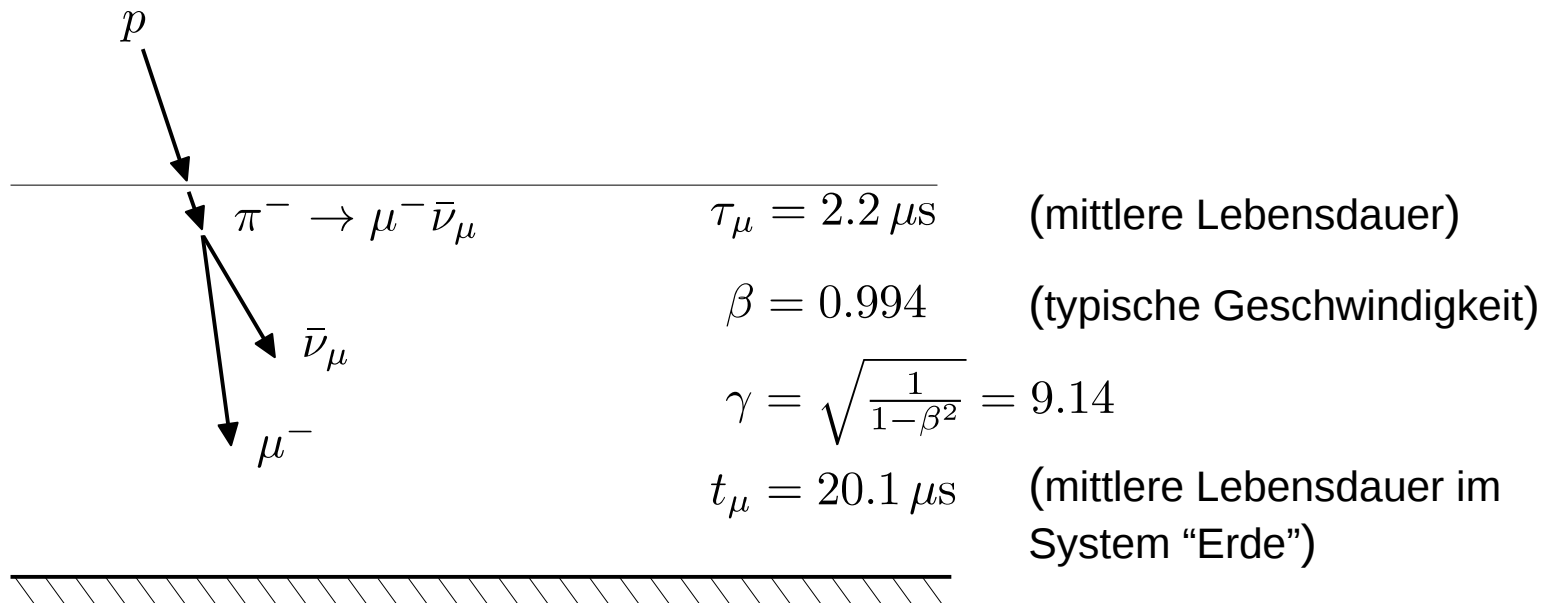


1.4 Relativistische Kinematik



Ereigniskinematik im relativistischen Regime

- In der (Astro-)Teilchenphysik bewegen wir uns i.A. in den kinematischen **Bereichen der Relativitätstheorie**
- **Beispiel:**
Erzeugung von Myonen in der kosmischen Höhenstrahlung:



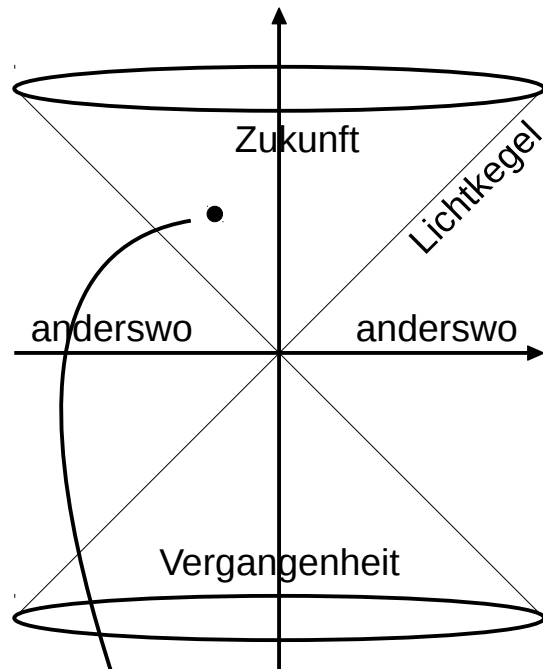
$$\ell_\mu = 660 \text{ m} \quad (\text{mittlere Weglänge ohne Relativitätstheorie})$$

$$\ell_\mu = 6 \text{ km} \quad (\text{mittlere Weglänge mit Relativitätstheorie})$$

Vierervektorkalkül

- Konstanz der Lichtgeschwindigkeit:**

Die spezielle Relativitätstheorie fußt auf der Beobachtung $c = \text{const}$ in allen Inertialsystemen



(Minkowski-Raum)

(Ereignis)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - d\vec{x}^2 \stackrel{(1)}{=} dt^2 - d\vec{x}^2 = \text{const} \quad (\text{Abstand})$$

Ort und Zeit lassen sich zu einem Lorentzvektor gruppieren:

$$x_\mu = \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

(Lorentzvektor)

$$g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

(beachte außergewöhnliche Metrik)

$$ds^2 = dx_\mu dx^\mu = dx_\mu g^{\mu\nu} dx_\nu$$

Lorentz-Transformation

- **Lorentz-Transformation:**

Lorentzvektoren transformieren sich nach der Lorentz-Transformation, beim Wechsel von einem in ein anderes Inertialsystem, Bsp.:

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -\beta\gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\beta\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma t - \gamma\beta z \\ x \\ y \\ \gamma z - \gamma\beta t \end{pmatrix}$$

(boost entlang der z-Achse)

- **Der Abstand ist invariant unter Lorentz-Transformationen:**

(hier am Beispiel eines boosts entlang der z-Achse)



Lorentz-Transformation

- **Lorentz-Transformation:**

Lorentzvektoren transformieren sich nach der Lorentz-Transformation, beim Wechsel von einem in ein anderes Inertialsystem, Bsp.:

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -\beta\gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\beta\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma t - \gamma\beta z \\ x \\ y \\ \gamma z - \gamma\beta t \end{pmatrix}$$

(boost entlang der z-Achse)

- **Der Abstand ist invariant unter Lorentz-Transformationen:**

$$\begin{aligned} x'_\mu x'^{\mu'} &= \gamma^2 (t - \beta z)^2 - x^2 - y^2 - \gamma^2 (z - \beta t)^2 \\ &= \gamma^2 (t^2 - 2t\beta z + \beta^2 z^2) - x^2 - y^2 - \gamma^2 (z^2 - 2t\beta z + \beta^2 t^2) \\ &= \gamma^2 (1 - \beta^2) (t^2 - z^2) - x^2 - y^2 = t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \\ &= x_\mu x^\mu \end{aligned}$$

(hier am Beispiel eines boosts entlang der z-Achse)



Weitere Invarianten und Lorentzvektoren

Lorentz-Skalar:

Eigenzeit:

$$d\tau = \frac{|ds'|}{c} = \sqrt{dt'^2 - \frac{d\vec{x}'^2}{c^2}} = \frac{dt'}{\gamma}$$

Lorentzvektor:

Geschwindigkeit:

$$u_\mu = \frac{dx_\mu}{d\tau} = \gamma \begin{pmatrix} c \\ v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$$

Eigenmasse:

$$p'_\mu p^{\mu'} = \gamma^2 (m^2 c^2 - \vec{p}^2) \stackrel{(1)}{=} E^2 - p^2$$

Für ein ruhendes Teilchen:

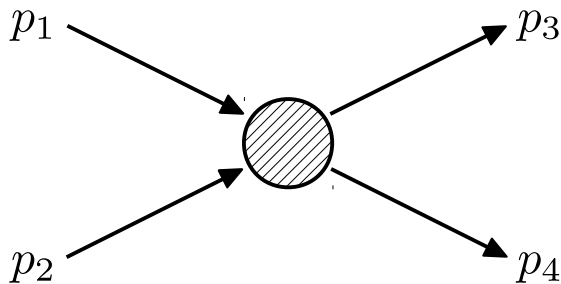
$$p'_\mu p^{\mu'} = E^2 - p^2 = m^2$$

Impuls:

$$p_\mu = m u_\mu = \gamma \begin{pmatrix} m c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Invarianten in elastischen Stößen

- Betrachte elastischen Stoß zweier Teilchen im Minkowski-Raum:



Der Stoß ist durch drei unabhängige Variablen eindeutig bestimmt: z.B. Schwerpunktsenergie, polarer & azimuthaler Streuwinkel im Schwerpunktsystem

- Der elastische Stoß läßt sich auch durch lorentzinvariante Größen unabhängig vom Bezugssystem beschreiben:

$$p_1^\mu + p_2^\mu = p_3^\mu + p_4^\mu \quad (\text{Viererimpulserhaltung})$$

$$s = (p_1^\mu + p_2^\mu)^2 = (p_3^\mu + p_4^\mu)^2 \quad (\text{Quadrat der Schwerpunktsenergie})$$

$$t = (p_1^\mu - p_3^\mu)^2 = (p_4^\mu - p_2^\mu)^2 \quad (\text{Quadrat des Viererimpulsübertrags})$$

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

Mandelstam-Variablen

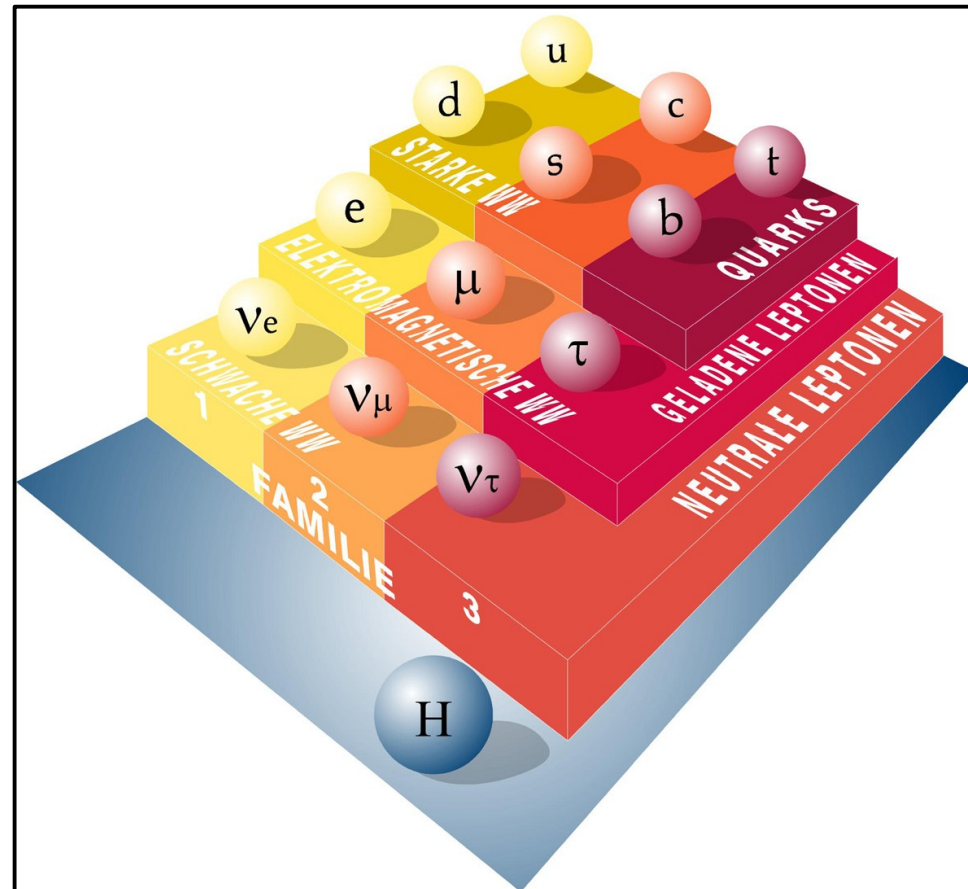
Gliederung der Vorlesung



Vorlesung:	Vorlesungstag:	Übungsblatt:
VL-01 Einheiten, Relativistische Kinematik	Di 17.04.2018	-
VL-02 Teilchenstreuung	Do 19.04.2018	-
VL-03 Wirkungsquerschnitt	Di 24.04.2018	Blatt-01
VL-04 Teilchenbeschleunigung	Do 26.04.2018	-
Vorlesung fällt aus	Di 01.05.2018	Blatt-02
VL-05 Teilchennachweis durch Ionisation	Do 03.05.2018	-
VL-06 Elektromag. WW und Schauer	Di 08.05.2018	Blatt-03
Vorlesung fällt aus	Do 10.05.2018	-
VL-07 Detektoren der Teilchenphysik	Di 15.05.2018	Blatt-04
VL-08 Symmetrien und Erhaltungsätze	Do 17.05.2018	-
VL-09 Fundamentale Teilchen und Kräfte im SM	Di 22.05.2018	Blatt-05
VL-10 Diskrete Symmetrien des SM	Do 24.05.2018	-
VL-11 Teilchenzoo: vom Hadron zum Quark	Di 29.05.2018	Blatt-06
Vorlesung fällt aus	Do 31.05.2018	-
VL-12 Farbladung und QCD	Di 05.06.2018	Blatt-07
VL-13 Phänomenologie der schwachen WW	Do 07.06.2018	-
VL-14 Theorie der elektroschwachen WW	Di 12.06.2018	Blatt-08
VL-15 Higgs Mechanismus	Do 14.06.2018	-
VL-16 SM: Quarksektor	Di 19.06.2018	Blatt-09
VL-17 Top: Entdeckung und Eigenschaften	Do 21.06.2018	-
VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften	Di 26.06.2018	-
VL-19 Neutrinoophysik	Do 28.06.2018	-

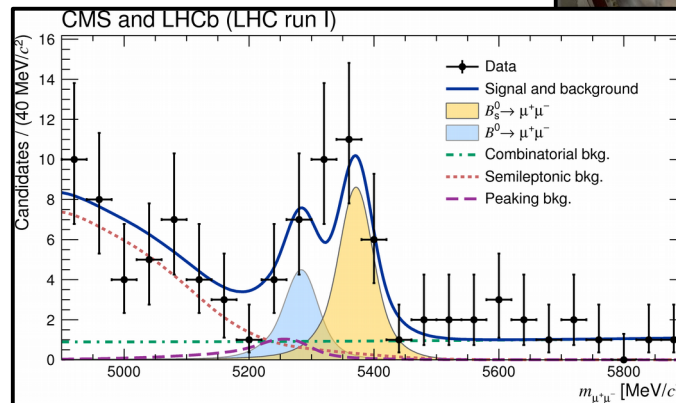
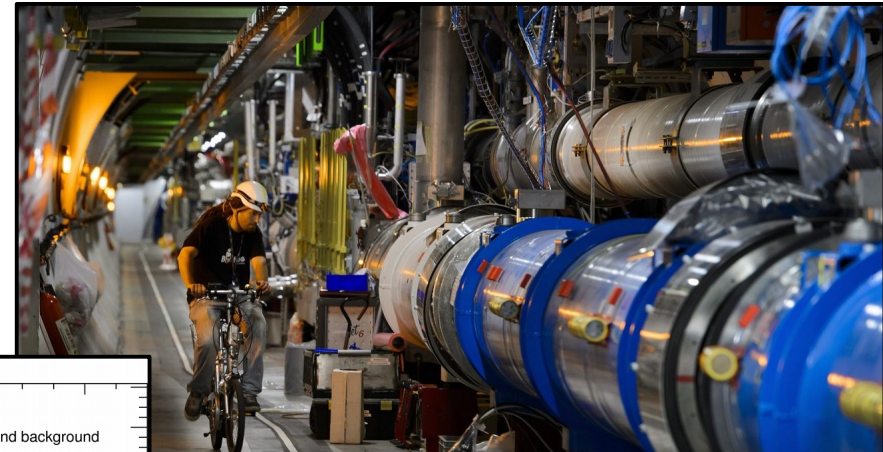
Was ist moderne Teilchenphysik?

- **Fundamentale Materie und ihre Eigenschaften**
 - Materieteilchen (\rightarrow Fermionen)
 - Wechselwirkungsteilchen (\rightarrow Bosonen)
- **Fundamentale Wechselwirkungen**
 - Elektroschwache Wechselwirkung
 - Starke Wechselwirkung
- **Zusammengesetzte Teilchen**
 - Mesonen und Baryonen
- **Offene Fragen:**
 - Anspruch “from first principles” – ungelöste Fragen des SM

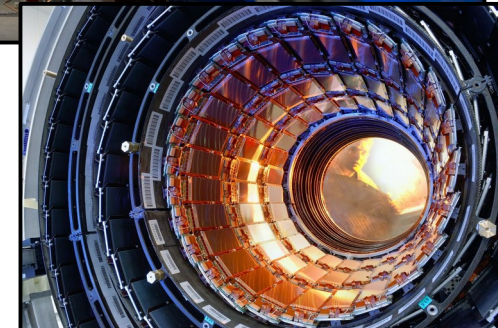


Übergreifende Themen









- **Symmetrien/Erhaltungssätze**
 - Kontinuierliche Symmetrien: Translation, Drehungen im Raum
 - Diskrete Symmetrien: Parität, Ladungskonjugation, Zeitumkehr
- **Verwendung von Hochtechnologie**
 - Beschleuniger
 - Detektoren zum Teilchennachweis
 - Computing Infrastruktur
 - Statistische Datenanalyse





Nature (2015) 14474

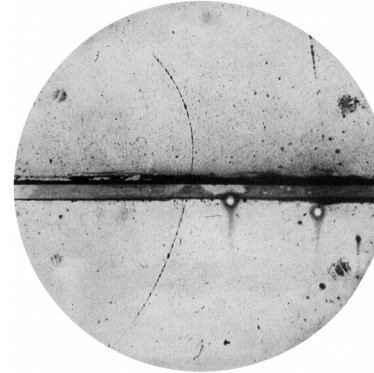


Geschichte der Teilchenphysik

- Relativistic QM (→ Dirac-Equation 1928)
- Theory of weak IA (→ E. Fermi 1933 – 34)
- Discovery $\mu^{+/-}$ (→ C. D. Anderson 1937) 
- Discovery $\pi^{+/-}$ (→ C. Powell/G. Occhialini 1947) 
- Discovery π^0 (→ R. Bjorklund et al 1950) 
- Discovery $K^{+/-}$ (→ “V”-particles 1947 – 49) 
- Discovery K^0, Λ^0 (→ “V”-particles 1947) 
- Discovery Σ 's, Ξ 's (→ 1950's)
- Discovery $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ (→ 1952) 
- Invention of bubble chamber (→ D. Glaser 1952)
- Observation of ν_e (→ C. Cowan, F. Reines 1956)
- Observation P violation of weak IA (→ C. Wu, R. Garwin 1956)
- Gauge field theory of weak IA (→ S. Glashow, S. Weinberg 1961)
- Observation of ν_μ (→ L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger 1962)
- Observation CP violation of weak IA (→ J. Cronin, V. Fitch 1964)
- Discovery J/ψ 's (→ B. Richter, S. Thing, 1974) 
- Discovery Υ 's (→ L. Lederman, E288 collaboration, 1977) 
- Discovery of W, Z (→ UA1 & UA2 collaboration, 1983) 
- Observation of t (→ CDF & D0 collaboration 1995) 
- Observation of ν_τ (→ DONUT collaboration 2000)
- Discovery of H (→ ATLAS & CMS collaboration 2012)

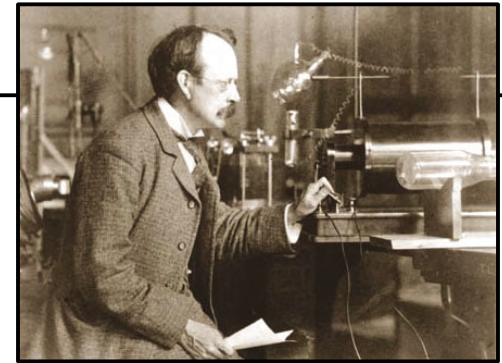
 discovered in airshower experiments
 discovered in collider experiments

Discovery of the positron (1932)

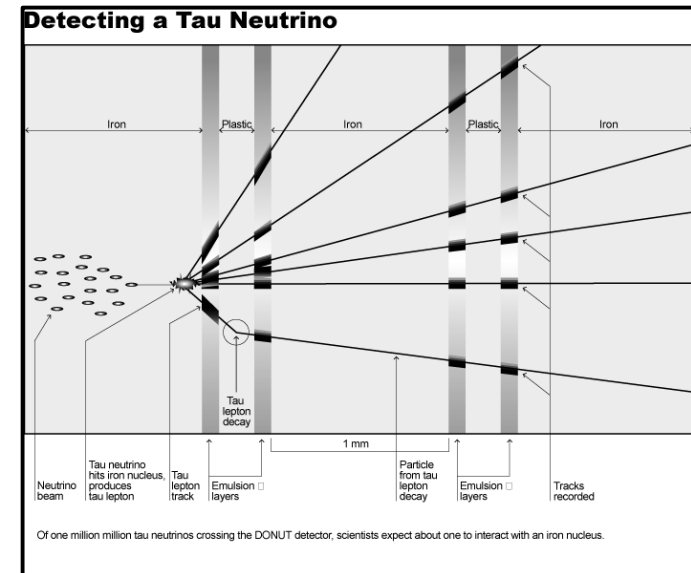


C. D. Anderson (1905 – 1991)

Discovery of the electron (1897)

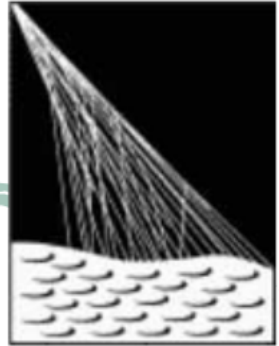
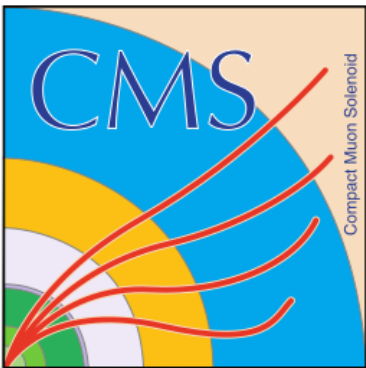


J. J. Thomson (1856 – 1940)



DONUT collaboration

Teilchenphysik @ KIT



AUGER



CORSIKA



Tunka-Rex

