

# Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

17. April 2018

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



# 1 Einführung

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

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

$\psi_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2/2}$   
 $\psi_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (2xy - x^2 + y^2) e^{-x^2/2 - y^2/2}$   
 $\psi_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (2x^2y - 2xy^2 - x^2 + y^2) e^{-x^2/2 - y^2/2}$

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

$H = \frac{p^2}{2m} + V(x)$   
 $J = Xp - pX$   
 $E = \frac{1}{2}(x^2 + p^2)$   
 $J = Xp - pX$   
 $a^{\dagger} a + \frac{1}{2} = a a^{\dagger} - \frac{1}{2}$   
 $a^{\dagger} a = a a^{\dagger} - 1$

$(J_+)^n \psi_0 = n! (J_+)^{n-1} \psi_0$   
 $D_+ = \frac{a^{\dagger} - ib}{\sqrt{2}}$   
 $[J, J_+] = J_+$   
 $[J_+, D_+] = 0$   
 $[J_+, D_-] = 0$   
 $[D_-, D_+] = 1 = \frac{1}{2}(x+ip)(x-ip) - \frac{1}{2}(x-ip)(x+ip) = \frac{1}{2}(x^2 - p^2 - x^2 + p^2) = 1$   
 $[J, D_+] = -D_+$   
 $[J_+, D_+] = 0$   
 $[J_+, D_-] = 0$   
 $[J_+, D_-] = 0$

$N = (a^{\dagger}a + \frac{1}{2})$   
 $N\psi_0 = \frac{1}{2}\psi_0$   
 $(J_+)^{\dagger} = J_- = \frac{a - ib}{\sqrt{2}}$

# 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

## Voraussetzungen

- **Keine** formalen Voraussetzungen oder Bedingungen
- Empfehlenswert:
  - Kenntnisse aus den Modulen  
„Moderne Experimentalphysik I (Atomphysik)“  
„Moderne Theoretische Physik I/II“

# 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. vorraus. 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:

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

Übungen:  
 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 Anschieben an die Tafel. Rechnen Sie damit, auch selbst während der Vorlesung vorgenommenen Anschiebe und Folien, werden nach jeder Vorlesung auf elektronisch über upload auf ILIAS. Sie können die bereits hochgeladenen Anschiebe/Folien und Übungsblätter in der folgenden Liste finden:

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 Anschieben an die Tafel. Rechnen Sie damit, auch selbst während der Vorlesung vorgenommenen Anschiebe und Folien, werden nach jeder Vorlesung auf elektronisch über upload auf ILIAS. Sie können die bereits hochgeladenen Anschiebe/Folien und Übungsblätter in der folgenden Liste finden:

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 Anschieben an die Tafel. Rechnen Sie damit, auch selbst während der Vorlesung vorgenommenen Anschiebe und Folien, werden nach jeder Vorlesung auf elektronisch über upload auf ILIAS. Sie können die bereits hochgeladenen Anschiebe/Folien und Übungsblätter in der folgenden Liste finden:

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 Anschieben an die Tafel. Rechnen Sie damit, auch selbst während der Vorlesung vorgenommenen Anschiebe und Folien, werden nach jeder Vorlesung auf elektronisch über upload auf ILIAS. Sie können die bereits hochgeladenen Anschiebe/Folien und Übungsblätter in der folgenden Liste finden:

Sie können sich hier elektronisch zu den Übungen anmelden.

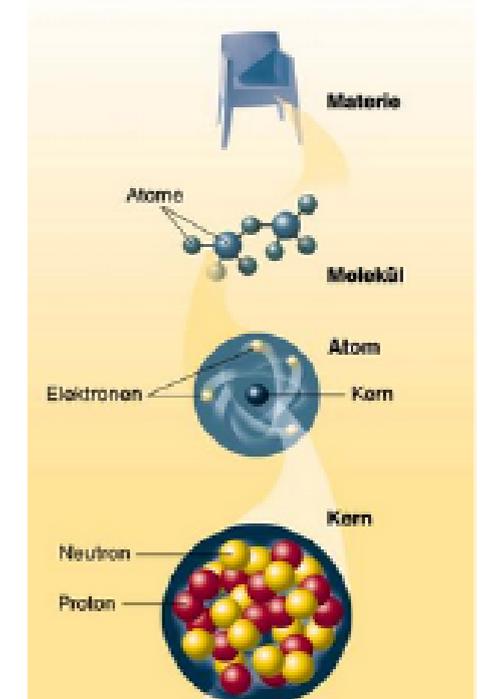
Wir planen 26 Vorlesungen und 12 Übungsblätter die zur Bearbeitung ausgegeben werden. Die Vorlesung erfolgt in Form von Folien und Anschieben an die Tafel. Rechnen Sie damit, auch selbst während der Vorlesung vorgenommenen Anschiebe und Folien, werden nach jeder Vorlesung auf elektronisch über upload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

Sie können sich hier elektronisch zu den Übungen anmelden.

- **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**

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

## 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)
    - Donnerstag 10.05.2018 (→ Christi Himmelfahrt)
    - Donnerstag 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

---

<b>Zeitfenster:</b>	<b>Raum:</b>	<b>Übungsgruppe:</b>
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](mailto: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

Ausgabe: Di, 02.05.2018 (09:45)

Abgabe: Mo, 07.05.2018 (13:30) Briefkasten Geb. 30.23

# Einordnung der Veranstaltung

---

- **Pflichtveranstaltung** im Bachelorstudium Physik (6 LP-Punkte):
  - Leistungsnachweis über “Vorleistung” (= erfolgreiche Teilnahme an Übungen)
  - Teilleistung als **Vorraussetzung 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)

## 1.2 Kursübersicht und Literatur

---

# Gliederung der Vorlesung

YOU  
ARE  
HERE

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 Erhaltungssätze	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: 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

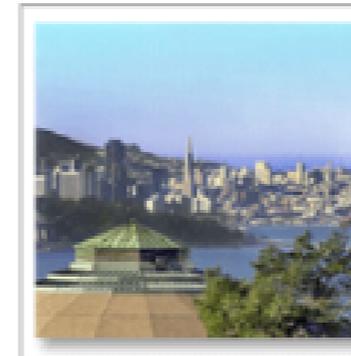
---

- 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)

- 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.

## 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

<a href="#">Previous Editions (&amp; Errata) 1957-2016</a>	<a href="#">Physical Constants</a>
<a href="#">Errata in current edition</a>	<a href="#">Astrophysical Constants</a>
<a href="#">Figures in reviews</a>	<a href="#">Atomic &amp; Nuclear Properties</a>
<a href="#">Mirror Sites</a>	<a href="#">Astrophysics &amp; Cosmology</a>

### 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:

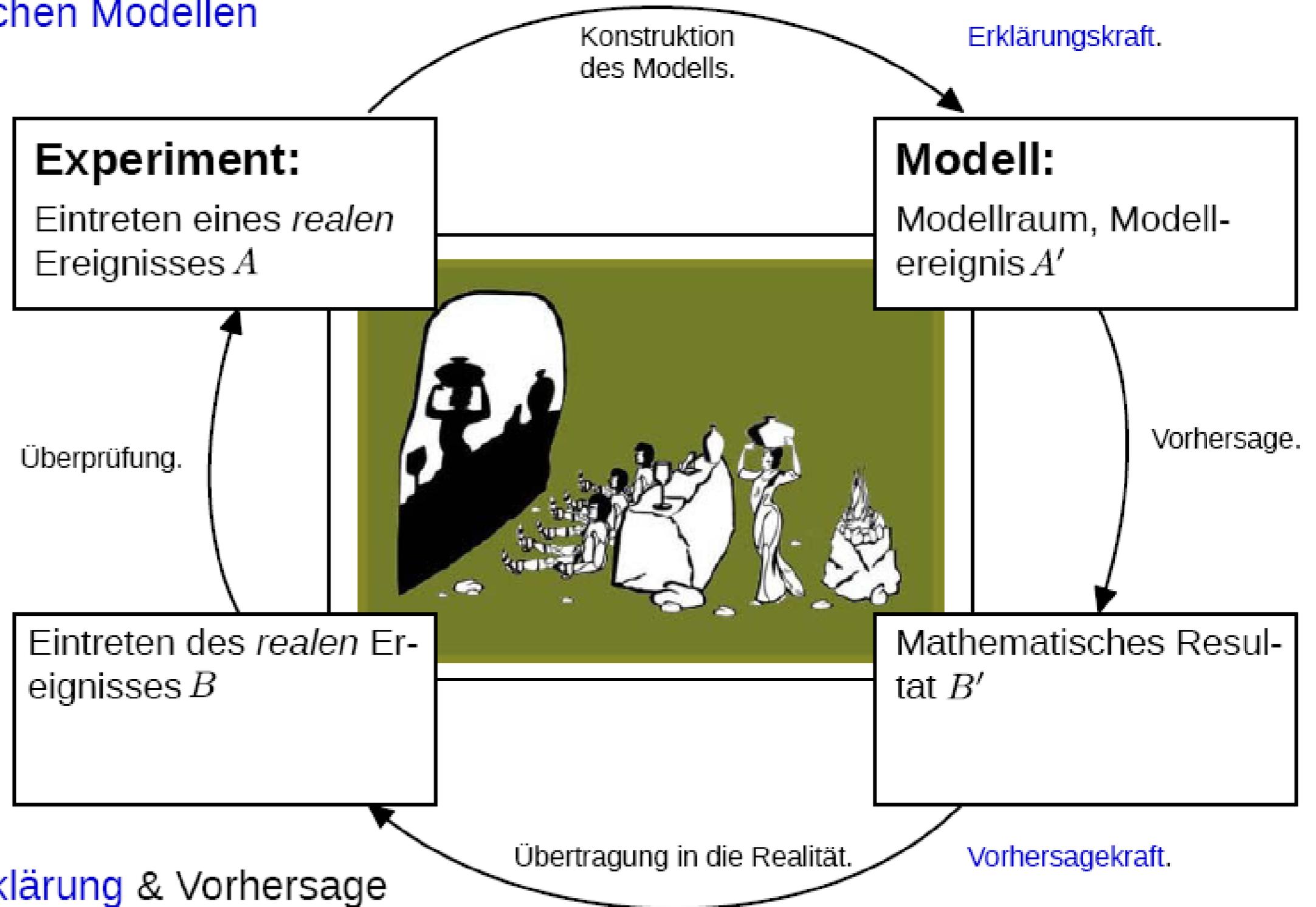
US DOE, CERN, MEXT (Japan), IHEP-CAS (China), INFN (Italy), MINECO (Spain), IHEP (Russia)

## 1.3 Erkenntnisgewinn bei kleinsten Skalen



# Erkenntnisgewinn im Wandel der Zeit

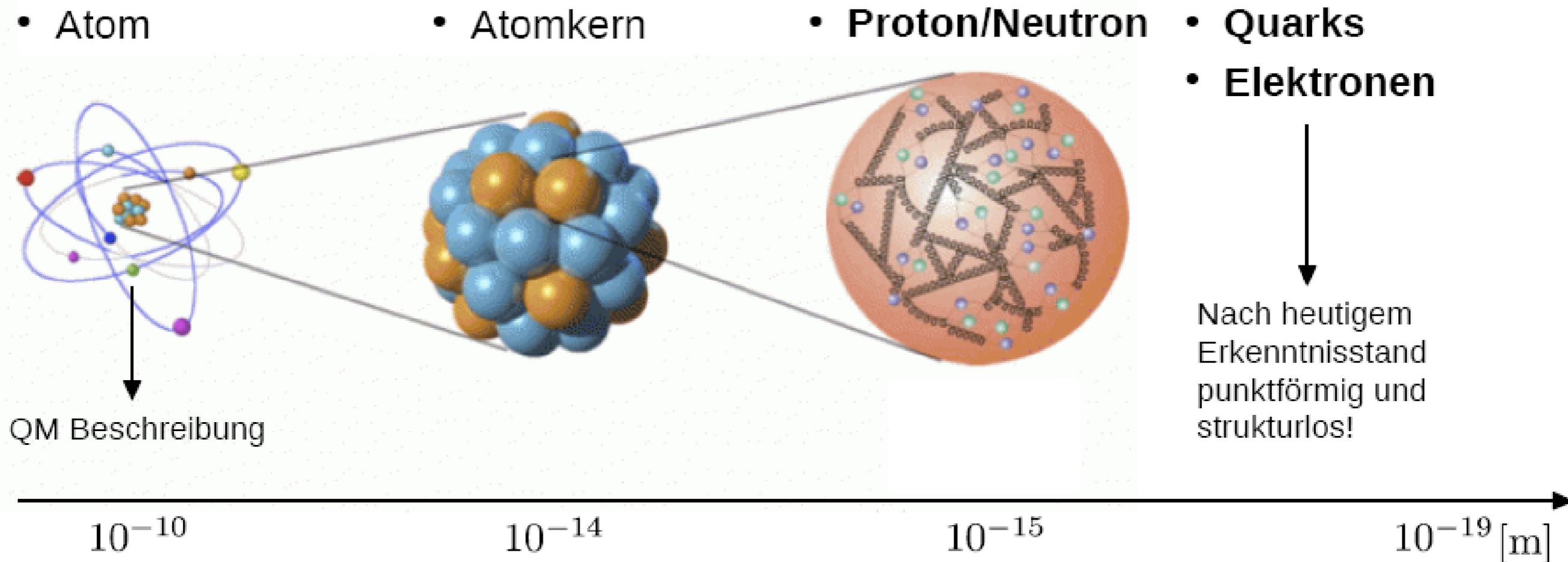
- Seit der **Frühmoderne** geleitet von **mathematischen Modellen**



- **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 (→ modellbehaltet)!

# 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

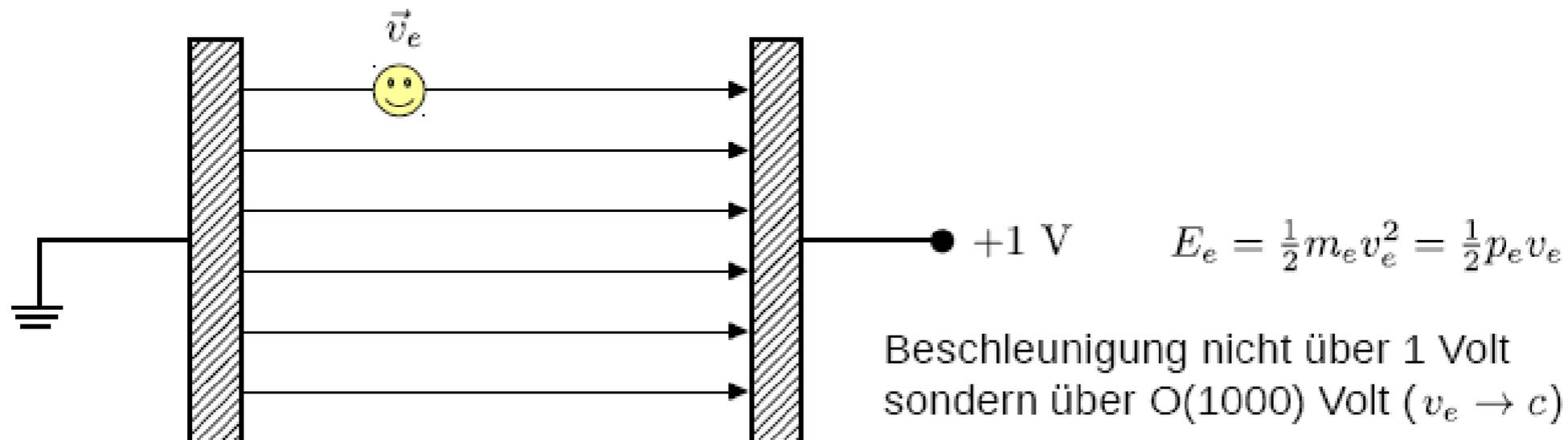
- **Beispiel-2:**

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	$1.602 \times 10^{-10}$ J
Masse	1 GeV/c <sup>2</sup>	$1.78 \times 10^{-27}$ kg
$\hbar$	$6.626 \times 10^{-25}$ GeV s	$1.055 \times 10^{-34}$ J s
$\hbar c$	197.3 MeV fm	$3.162 \times 10^{-26}$ J m

- **Q:** Die Masse des Elektrons beträgt 511 keV/c<sup>2</sup>. 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	GeV <sup>-1</sup>
Länge	m	GeV <sup>-1</sup>

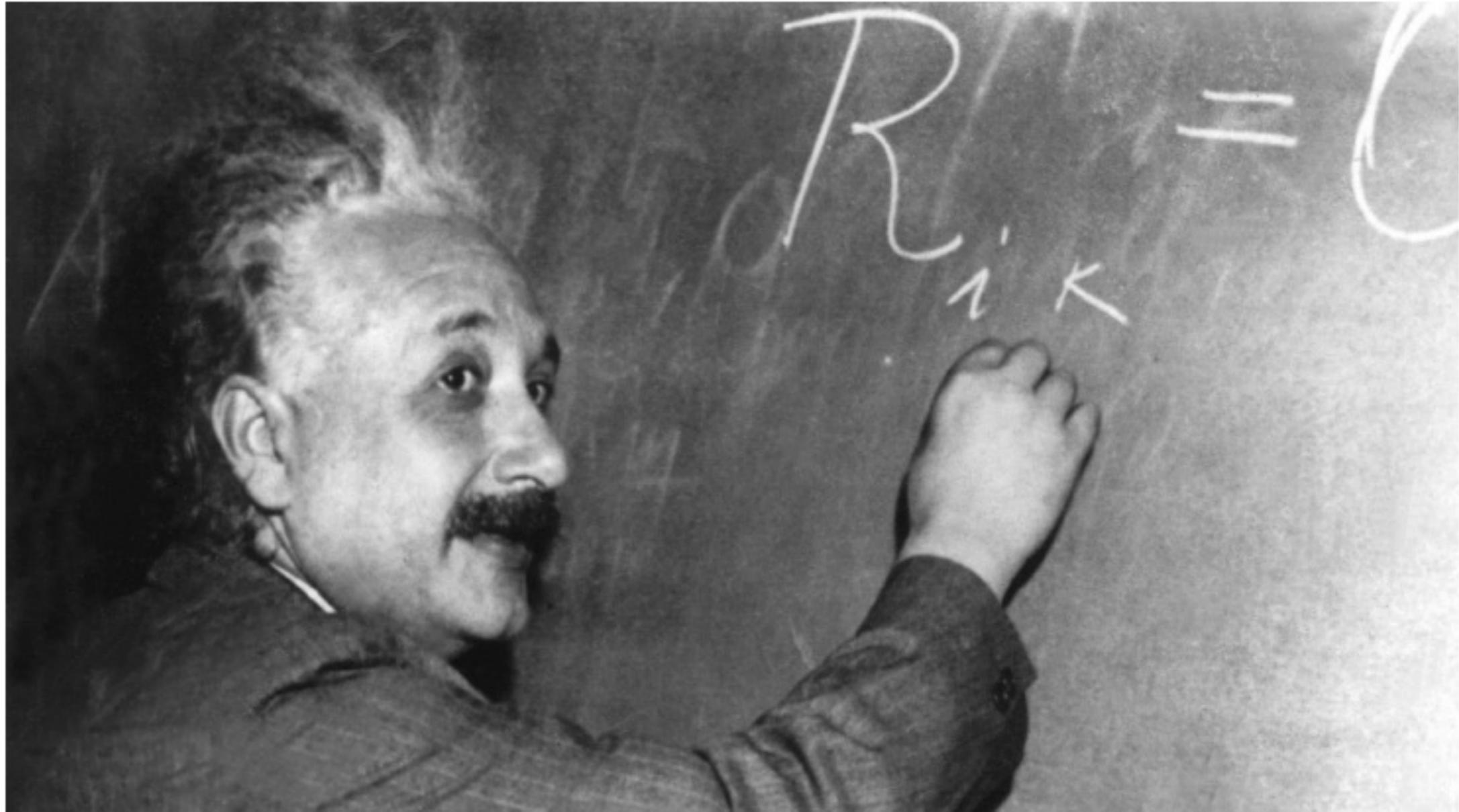
• **Q:** Welche Einheiten haben in diesem System Länge und Zeit?

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

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

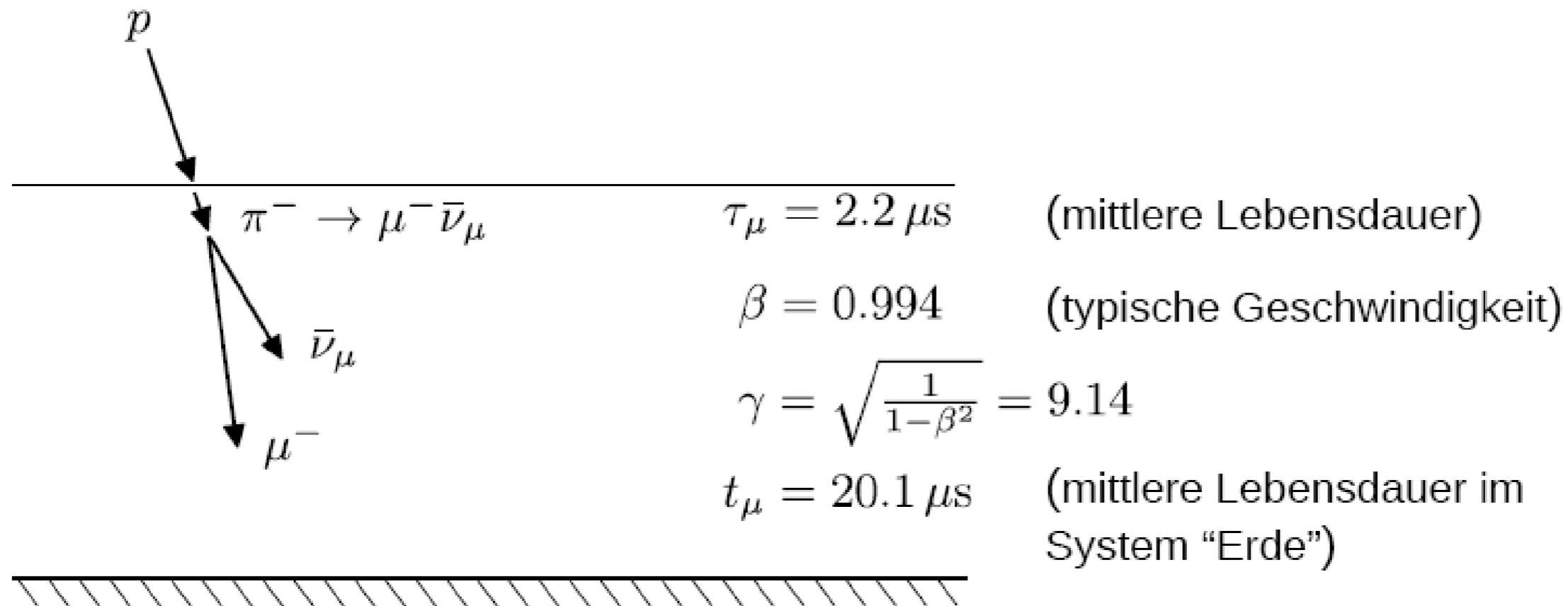


## 1.4 Relativistische Kinematik



# 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:



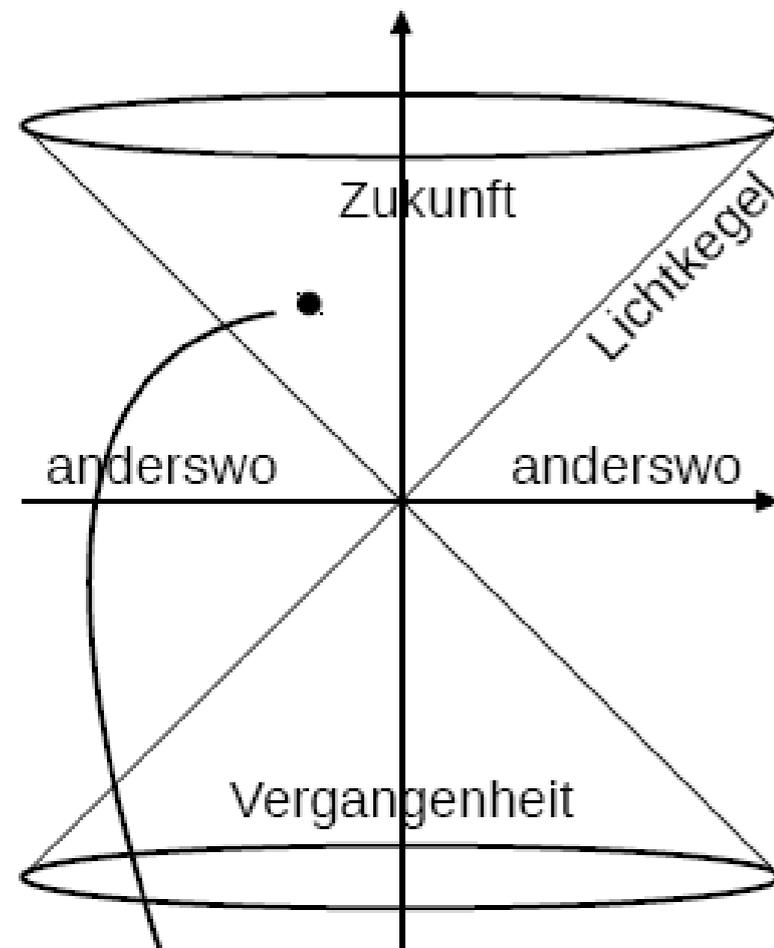
$$l_\mu = 660 \text{ m} \quad (\text{mittlere Weglänge ohne Relativitätstheorie})$$

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

# Vierervektorkalkül

- **Konstantheit der Lichtgeschwindigkeit:**

Die spezielle Relativitätstheorie fußt auf der Beobachtung  $c = const$  in allen Inertialsystemen



(Minkowski-Raum)

(Ereignis)

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

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:**

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

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



# Weitere Invarianten und Lorentzvektoren

**Eigenzeit:**

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

**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:

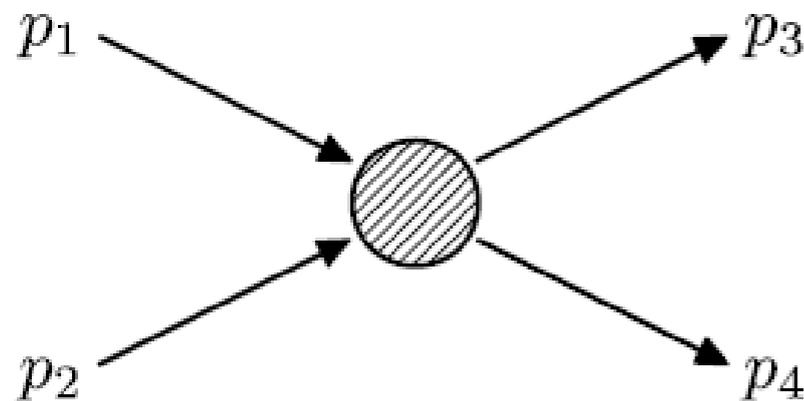
$$p'_\mu p^{\mu'} = E^2 - p^2 = m^2$$

**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

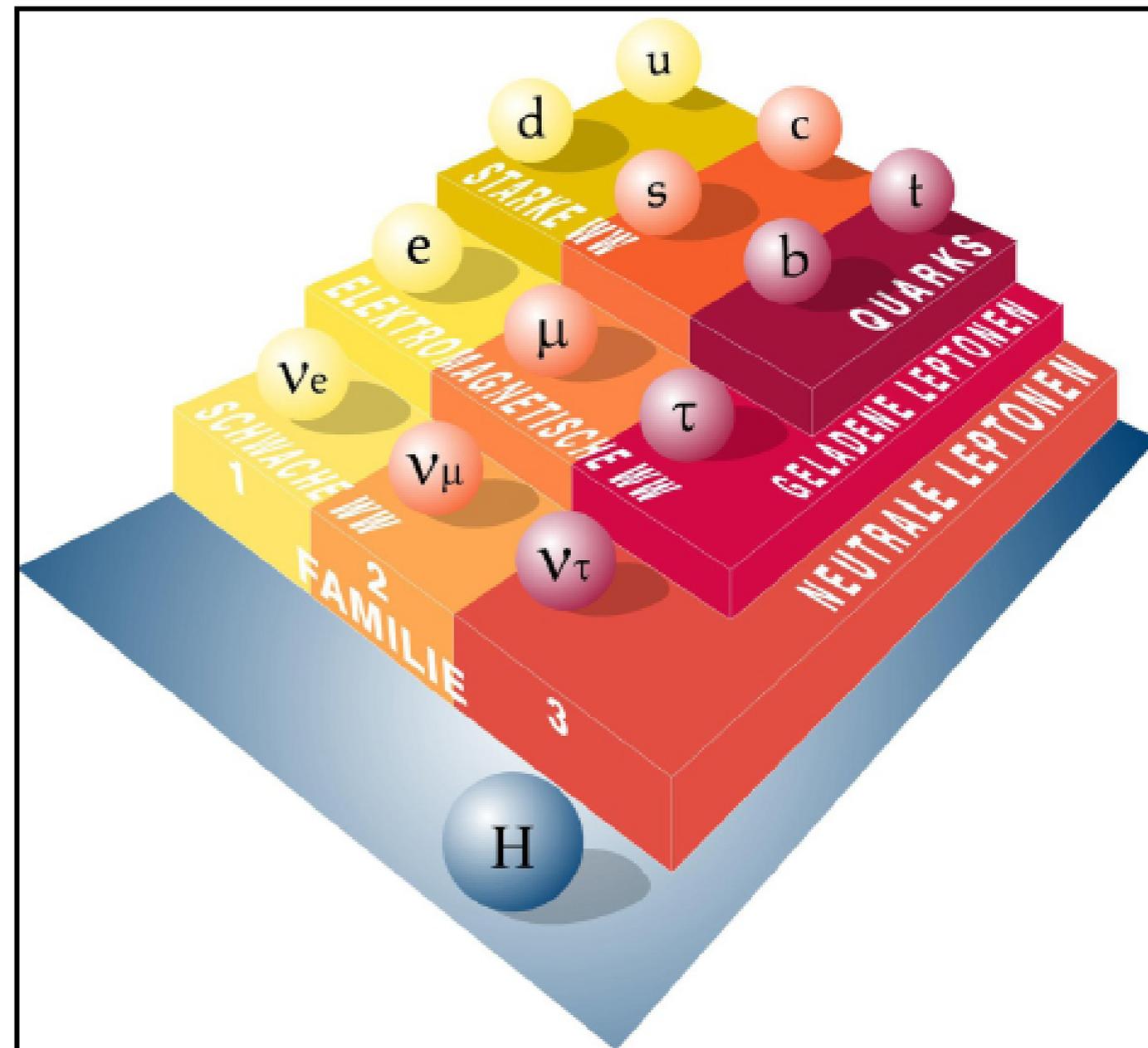
YOU  
ARE  
HERE

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 Erhaltungssätze	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	-



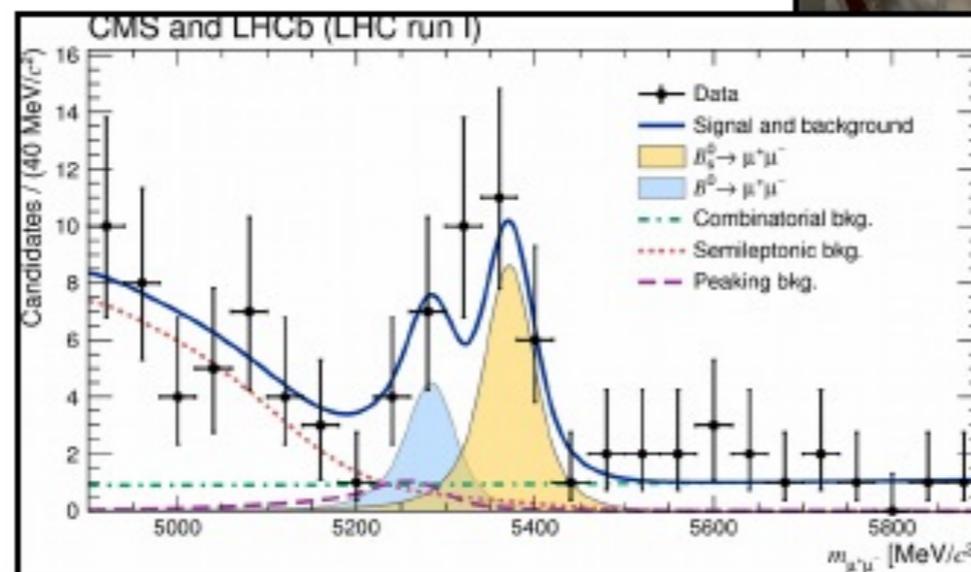
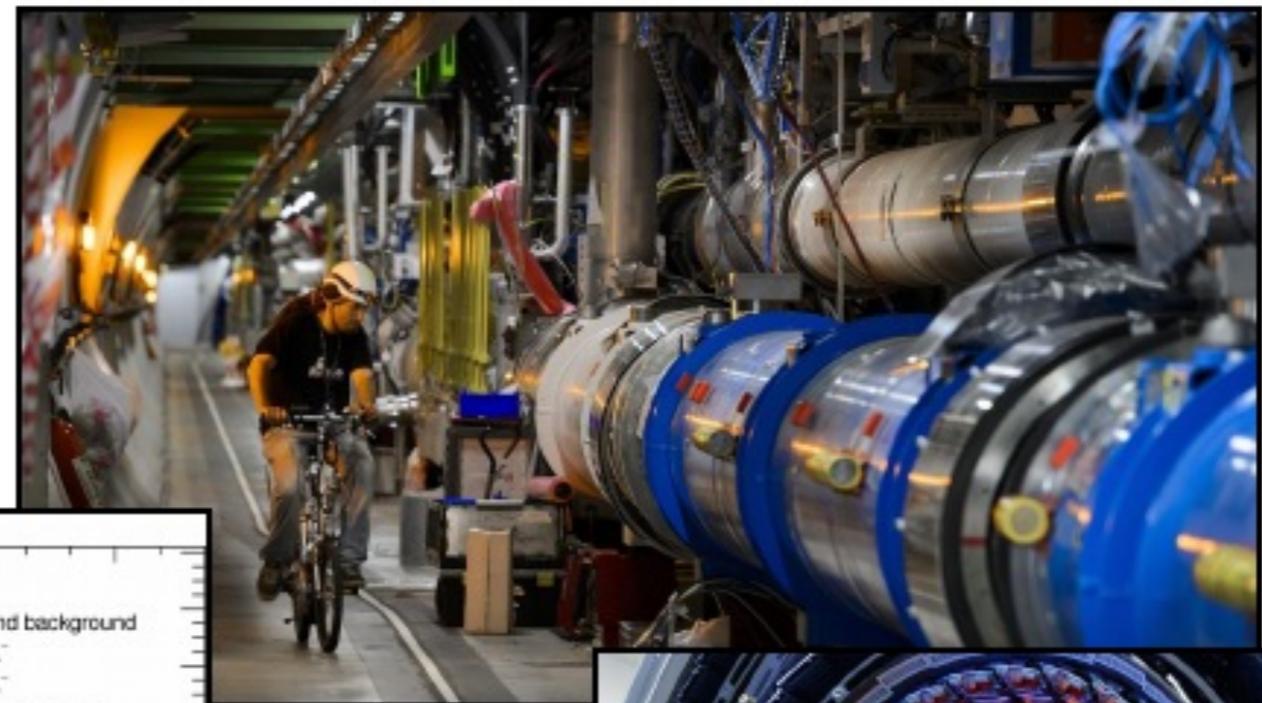
# Was ist moderne Teilchenphysik?

- **Fundamentale Materie und ihre Eigenschaften**
  - Materieteilchen (→ Fermionen)
  - Wechselwirkungsteilchen (→ 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

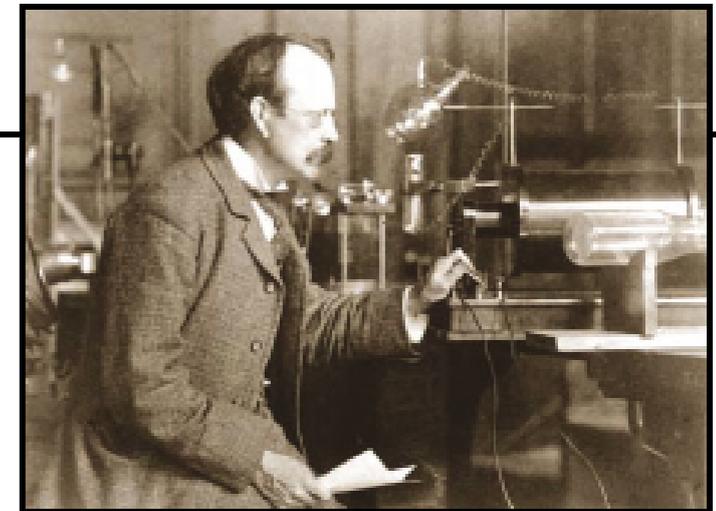


Nature (2015) 14474



# Geschichte der Teilchenphysik

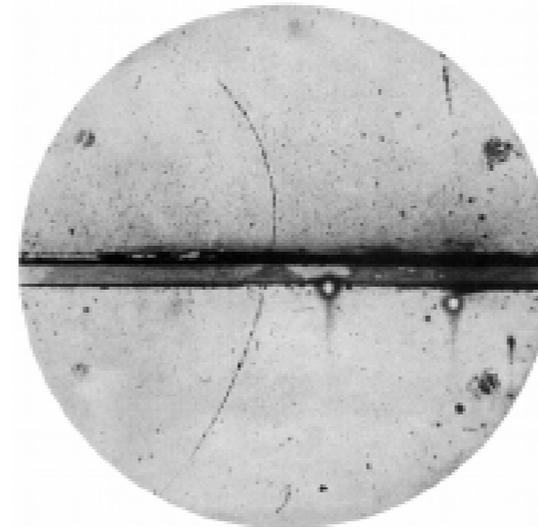
 Discovery of the electron (1897)



J. J. Thomson (1856 – 1940)

-  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  $\pi^0$  (→ R. Bjorklund et al 1950) 
- Discovery  $K^{+/-}$  (→ "V"-particles 1947 – 49) 
- Discovery  $K^0, \Lambda^0$  (→ "V"-particles 1947) 
- Discovery  $\Sigma$ 's,  $\Xi$ 's (→ 1950's) 
- Discovery  $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$  (→ 1952) 

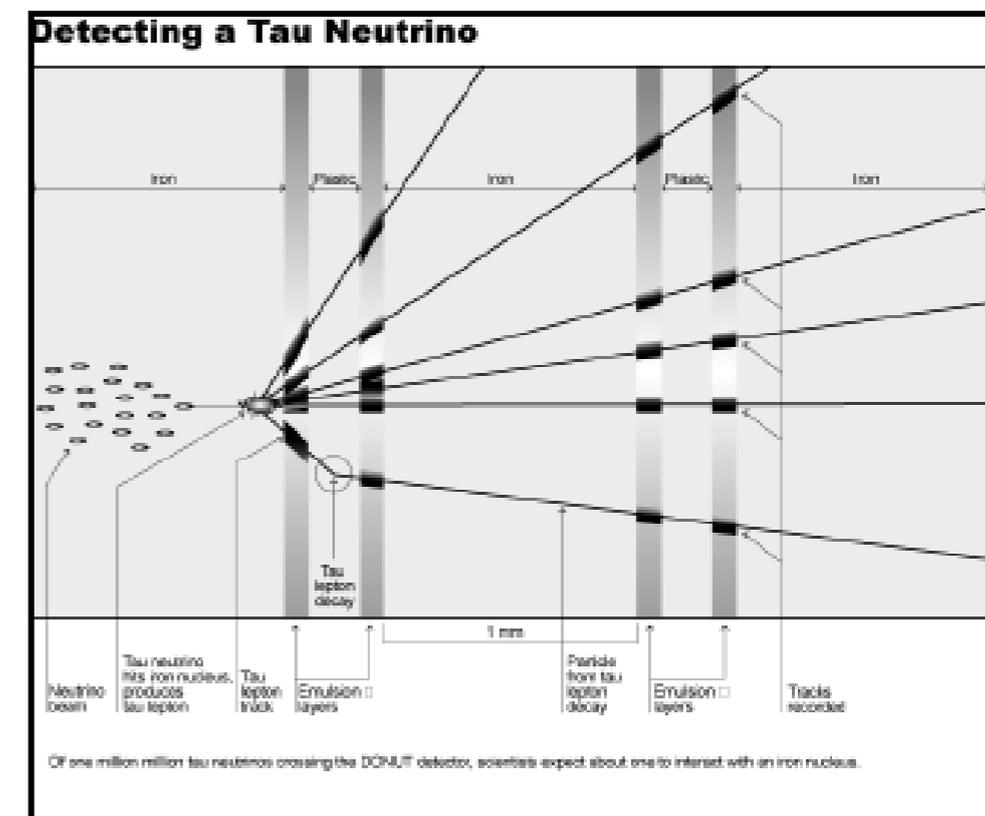
 Discovery of the positron (1932)



C. D. Anderson (1905 – 1991)

 Overall  $\mathcal{O}(30)$  Nobel prizes in physics went to directly to particle physics related topics.

-  Invention of bubble chamber (→ D. Glaser 1952)
-  Observation of  $\nu_e$  (→ 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  $\nu_\mu$  (→ L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger 1962)
-  Observation CP violation of weak IA (→ J. Cronin, V. Fitch 1964)
-  Discovery  $J/\psi$ 's (→ B. Richter, S. Ting, 1974) 
- Discovery  $\Upsilon$ 's (→ L. Lederman, E288 collaboration, 1977) 
-  Discovery of  $W, Z$  (→ UA1 & UA2 collaboration, 1983) 
- Observation of  $t$  (→ CDF & D0 collaboration 1995) 
-  Observation of  $\nu_\tau$  (→ DONUT collaboration 2000)
-  Discovery of  $H$  (→ ATLAS & CMS collaboration 2012)



DONUT collaboration



discovered in airshower experiments  
discovered in collider experiments