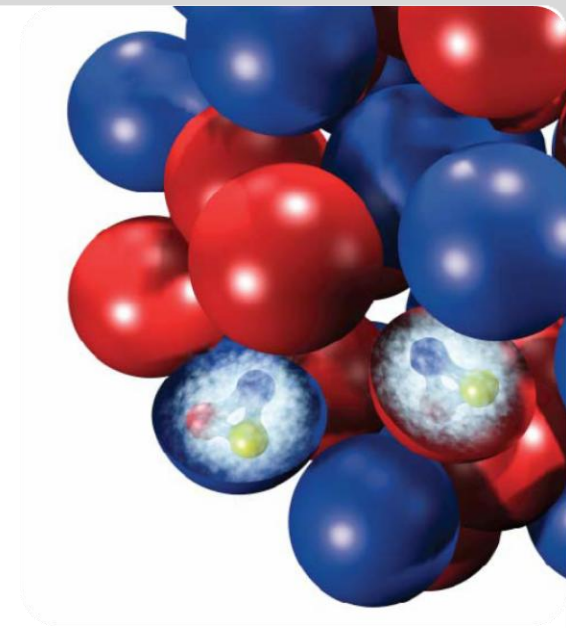


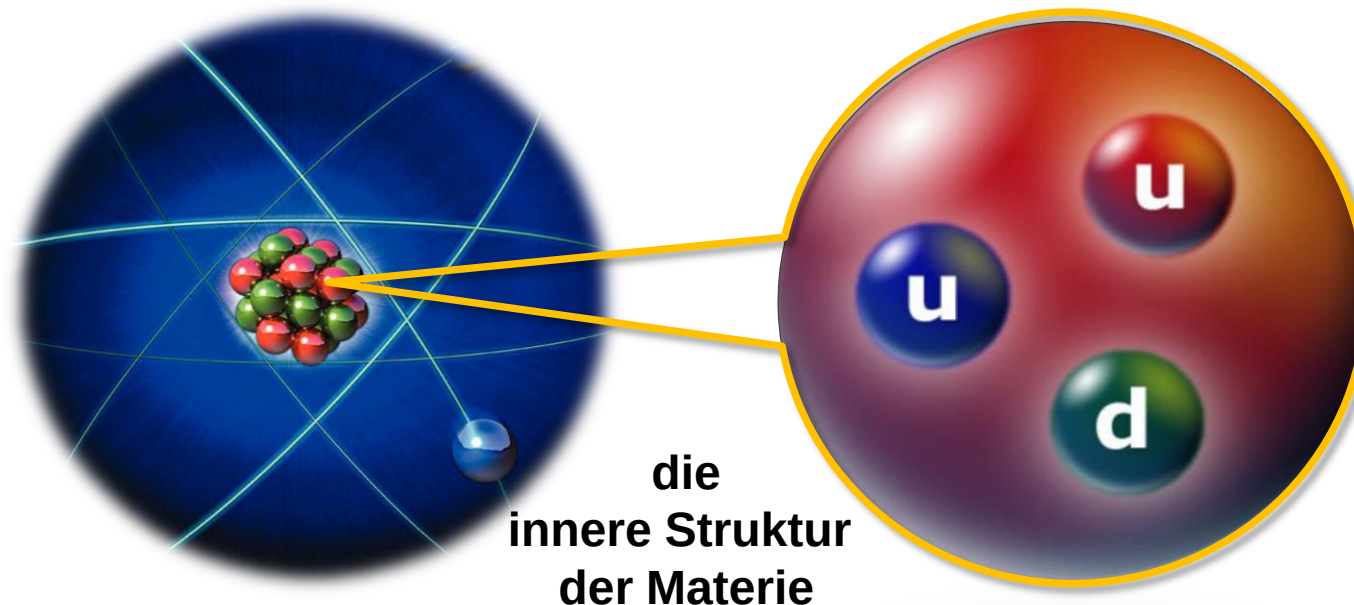
Kerne und Teilchen

Physik VI
Sommersemester 2010

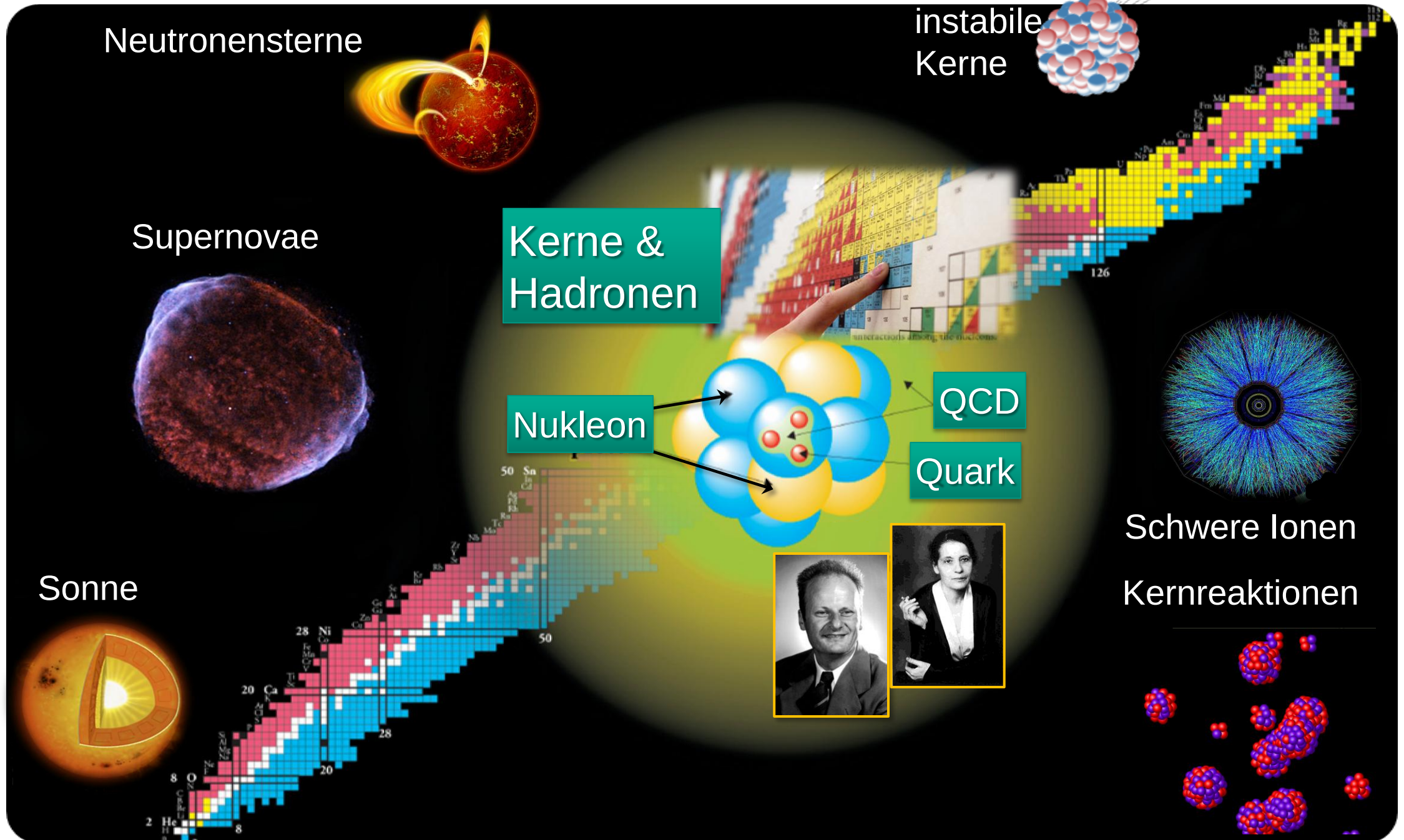


Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

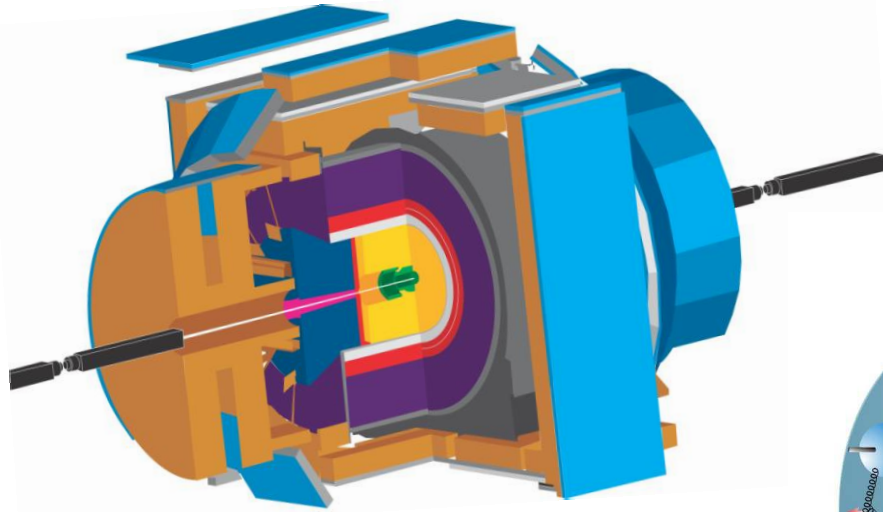
<http://www-ik.fzk.de/~drexlin/>



moderne Kernphysik - Übersicht

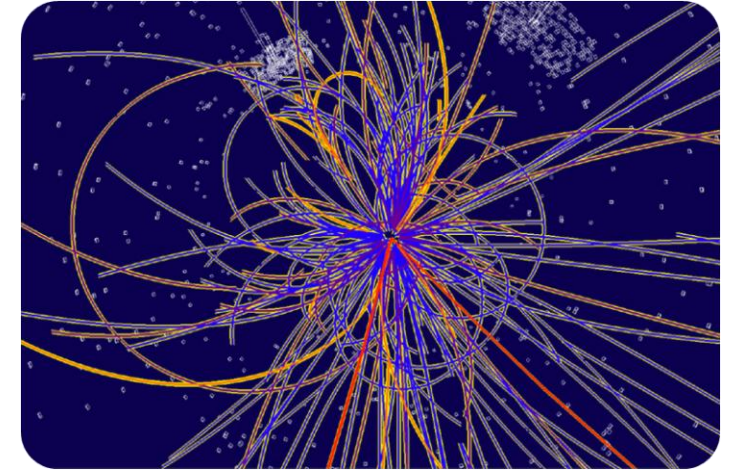
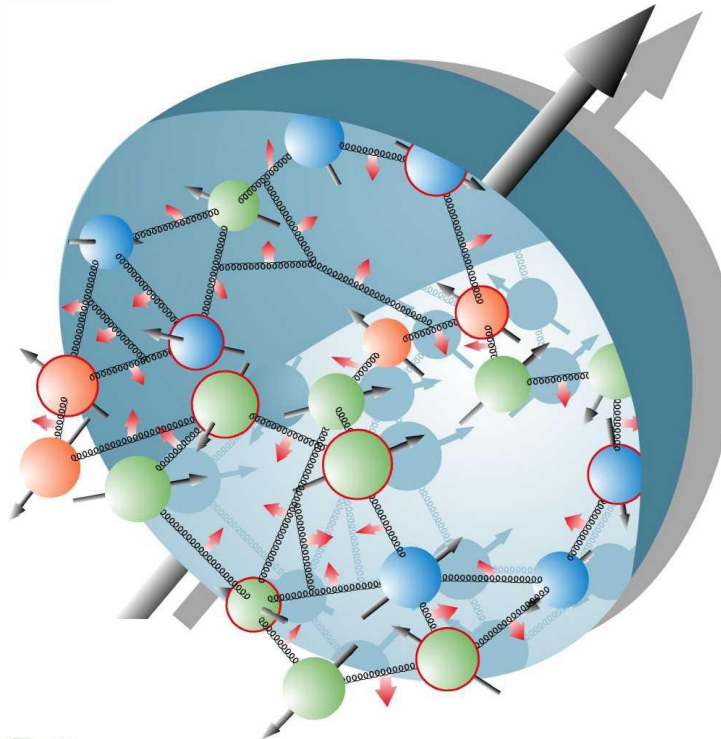


moderne Teilchenphysik – Übersicht

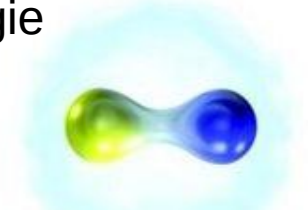


Detektoren

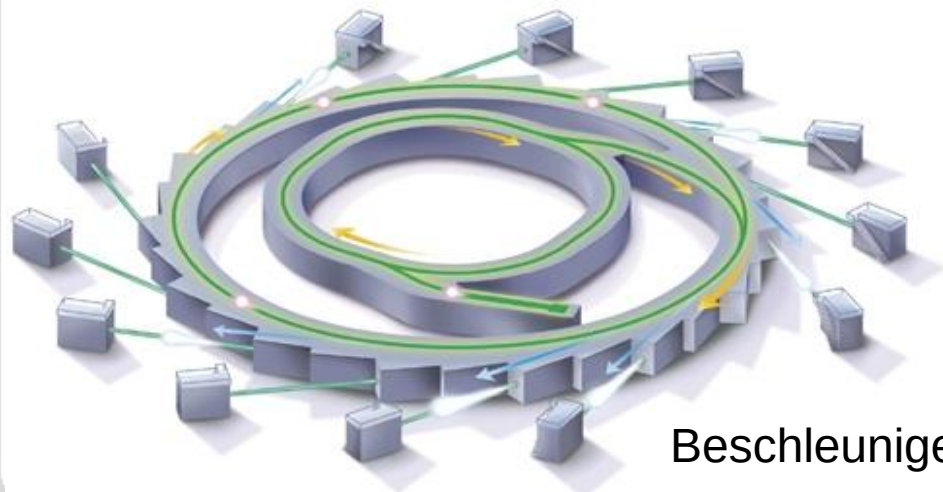
Nukleon &
Partonen



Ereignistopologie



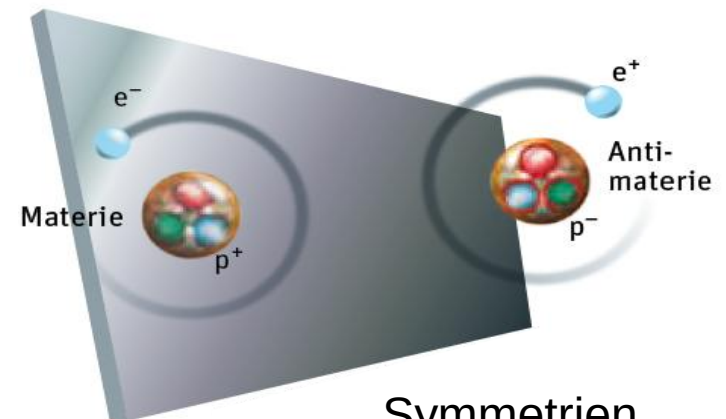
Wechselwirkungen



Beschleuniger

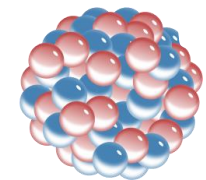


Datenanalyse



Symmetrien

1. **Einführung**
2. **Eigenschaften stabiler Kerne**
 - 2.1 Rutherford-Streuung & Wirkungsquerschnitt
 - 2.2 Kernradien & Formfaktoren
 - 2.3 Kernmodelle & Kernkräfte
 - Tröpfchen- & Fermigasmodell
 - Schalenmodell
 - Kernkräfte
 - 2.4 Kernreaktionen & Kernfusion
 - 2.5 Nukleare Astrophysik
3. **Nukleonen**
 - 3.1 Aufbau & Wechselwirkung
 - 3.2 Strukturfunktionen



4. **Instabile Kerne**

4.1 radioaktiver Zerfall

4.2 α -Zerfall

4.3 β -Zerfall

4.4 γ -Zerfall

4.5 Kernspaltung

5. **Elementarteilchen-Phänomenologie**

5.1 Einführung

5.2 Hadronen & Leptonen

5.3 Wechselwirkungen im Standardmodell

- starke Wechselwirkung
- elektroschwache Wechselwirkung
(Weinberg-Salam-Glashow)

6. **Beschleuniger & Detektoren**

- 6.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie
- 6.2 Beschleunigertypen
- 6.3 Moderne Teilchendetektoren
 - MWPCs & Driftkammern
 - Szintillatoren, Fibres & Cherenkovdetektoren
 - elektromagnetische & hadronische Kalorimeter

7. **Quarkmodell der Hadronen**

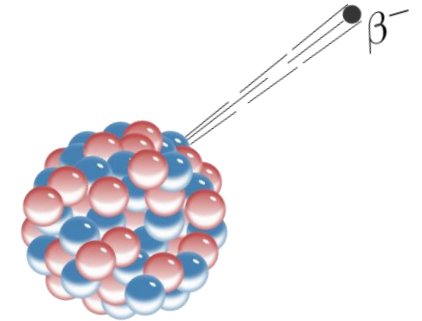
- 7.1 Struktur des Teilchenzoos
- 7.2 schwere Quarks - Quarkonia
- 7.3 hadronische Wechselwirkungen, QCD

8. **Symmetrien**

- 8.1 klassische Erhaltungsgrößen
- 8.2 Parität, Ladungskonjugation & Zeitumkehr (CPT)
- 8.3 Supersymmetrie

9. **Schwache Wechselwirkung**

- 9.1 Klassifikation schwacher Prozesse
- 9.2 Paritätsverletzung
- 9.3 Strom-Strom Kopplung



10. **Kaonen & Neutrinos**

- 10.1 Oszillation neutraler Kaonen & CP-Verletzung
- 10.1 Neutrinoquellen & -strahlen
- 10.2 Neutrino-Oszillationen
- 10.3 Neutrino-Ruhemasse & Doppelbetazerfall



11. **Querverbindungen & Ausblick**

- 11.1 Kern-, Teilchen- und Astroteilchenphysik
- 11.2 offene Fragen & neue Projekte

Übungen zu Physik VI

15 Übungsgruppen (Gruppen #1-15) am Donnerstag Nachmittag

Zeiten: **1-5: 14:00-15:30, 6-10: 15:45-17:15, 11-15: 17:30-19:00**

Orte: Seminarräume (s. separate Einteilungsblätter)

Aufgabenblätter via: pdf-file auf homepage / KIT-email Liste

Übungen: (Teil-)Aufgaben sollten vorgerechnet werden können

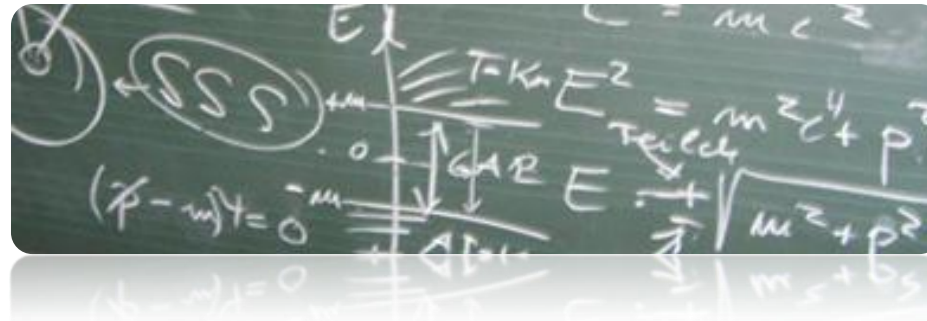
Leitung der Übungen:

Thomas Thümmeler (thomas.thuemmler@kit.edu), Tel: 07247/82-4018

Joachim Wolf (joachim.wolf@kit.edu), Tel: 07247/82-5532

Termine: 22.4 / 29.4. / 6.5. / 20.5. / 27.5. / 10.6. / 17.6. / 24.6. /

1.7. / 8.7. / 15.7. Scheinvergabe





KIT MailingLists Service

[Mailinglisten-Übersicht](#) [Hauptseite](#) [Hilfe](#)

E-Mail Adresse :

Passwort :
 [Anmelden](#)

[Erste Anmeldung ?](#)
[Passwort vergessen ?](#)

Abonnenten: 2
Eigentümer
joachim.wolf2
thomas.thuemmler

[Kontaktiere Inhaber](#)

[Abonnieren](#)
[Abmelden](#)
[Info](#)
[Archiv](#)

[Senden](#)

[RSS](#)
[Gemeinsame Dokumente](#)

Language selection [Deutsch](#) 

ktp-ss2010@lists.kit.edu
KTP - Physik VI Vorlesung - Drexlin - news letter

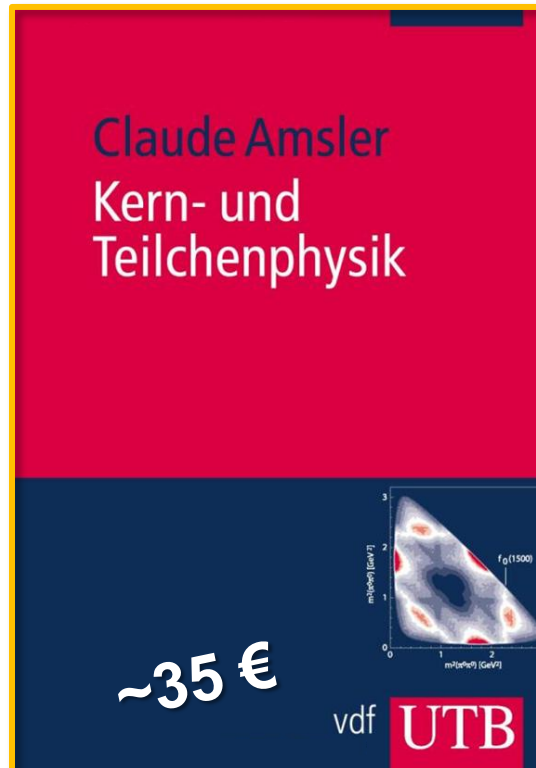
News Letter der Vorlesung Physik VI (Kern und Teilchenphysik KTP) von Prof. Drexlin im Sommersemester 2010.
Allgemeine Informationen und Übungsaufgaben werden u.A. hierüber verteilt.

§

<https://www.lists.kit.edu/sympa/info/ktp-ss2010>

Impressum Powered by Sympa 5.4.7

Bücher zur Kern- und Teilchenphysik



Claude Amsler

Kern- & Teilchenphysik

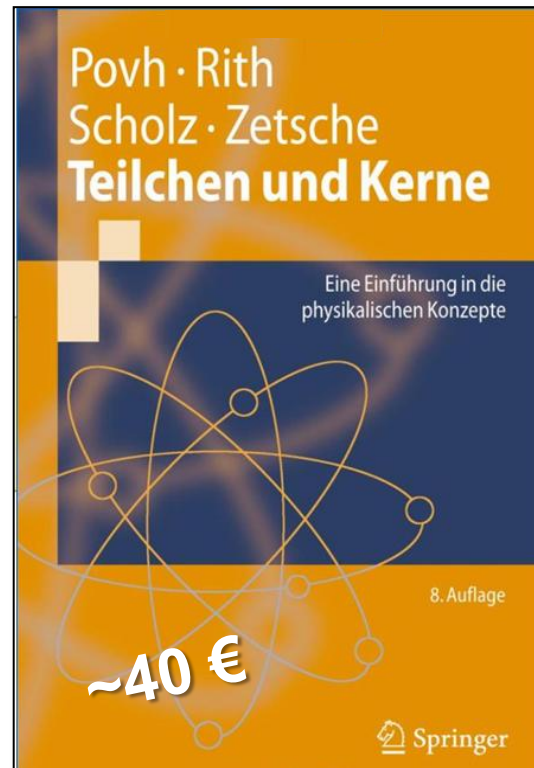
UTB Verlag (1. Aufl., 2007)

„Die Welt der elementaren

Bausteine der Materie,

Orientierung an Experi-

menten, histor. geordnet“



Bogdan Povh et al.

Teilchen und Kerne

Springer (8. Aufl., 2009)

„Einheitliche Darstellung

der Kern- & Teilchen-

physik aus experimenteller

Sicht, zahlreiche Aufgaben“



Hartmut Machner

Einführung in die Kern- &

Elementarteilchenphysik

Wiley-VCH (1. Aufl., 2005)

„Einführung in theor. Grund-

lagen und experimentelle

Methoden, Parallelen KTP“



Jörn Bleck-Neuhaus

Elementare Teilchen

Springer (1. Aufl., 3/2010)

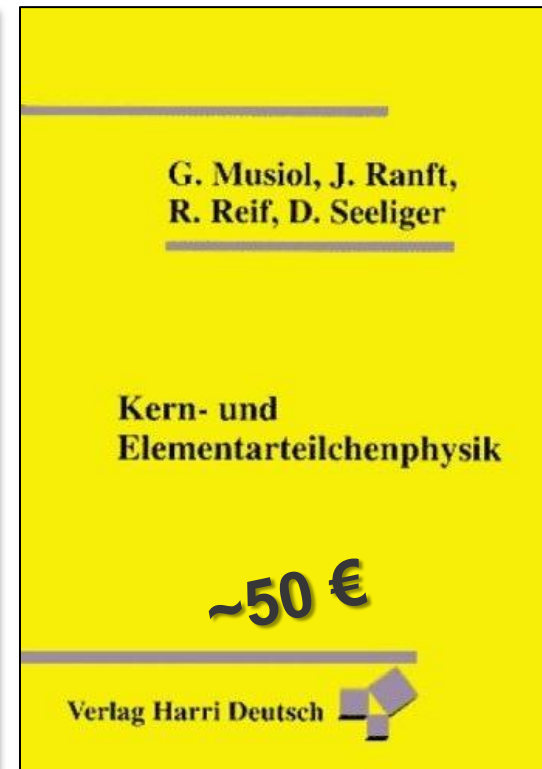
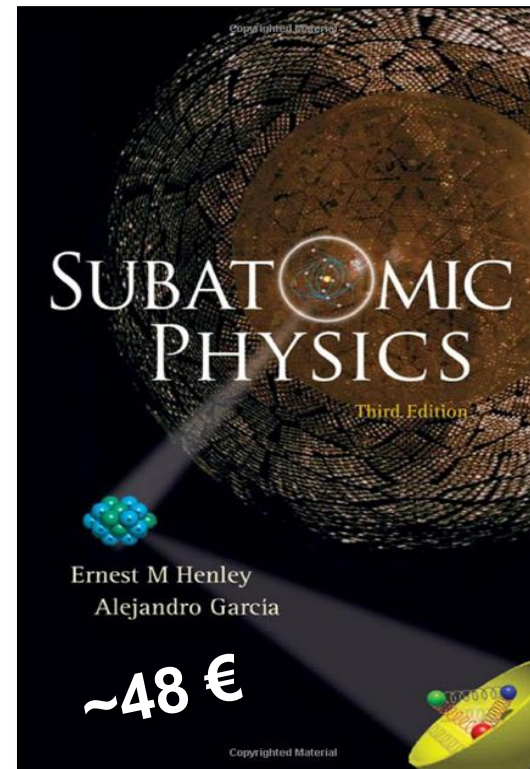
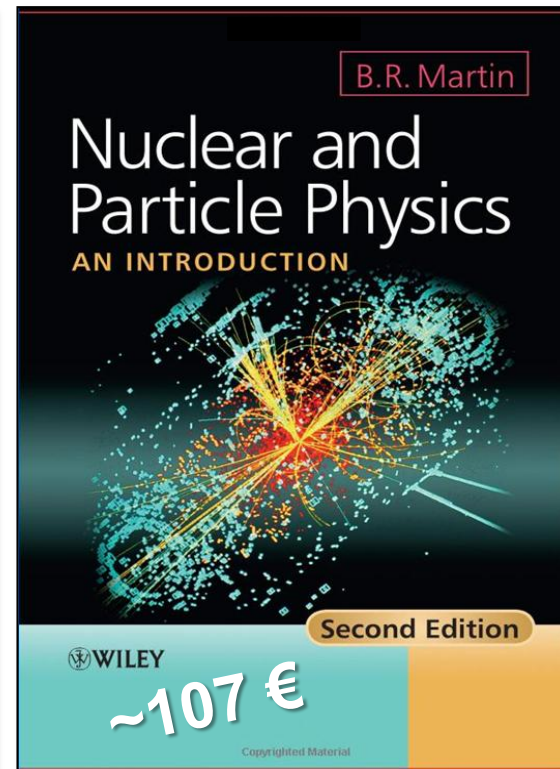
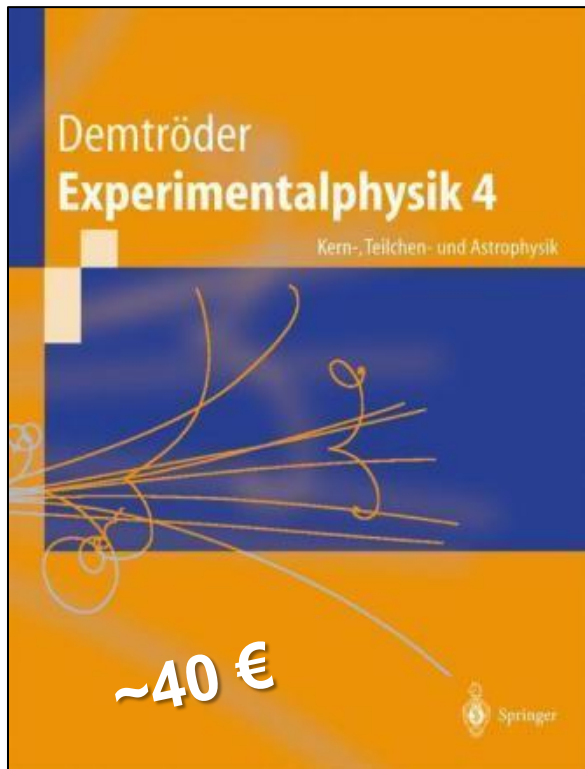
„Suche nach den letzten

Bausteinen der Materie

mit Mitteln der Modernen

Physik“

Bücher zur Kern- und Teilchenphysik



Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 4

Kern-, Teilchen- & Astrophysik.

Springer (3. Aufl., 11/2009)

„4. Band der Reihe über die

Experimentalphysik, umfass.

Neubearbeitung der Themen“

Brian R. Martin

Nuclear & Particle Physics

Wiley (2. Aufl., April 2009)

„standard topics of nuclear

& particle physics, basic

concepts and theory with

current & future applications“

Ernest M. Henley

Subatomic Physics

World Scientific (3. ed.,

„fully updated ed. of the

Classic textbook, up-to-

date introduction to both

theory & experiment“

Gerhard Musiol et al.

Kern- und Elementar-

teilchenphysik, Verlag

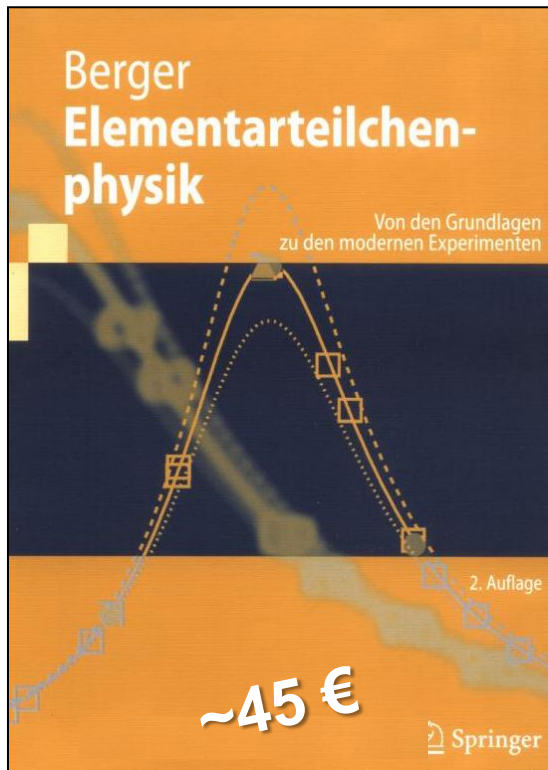
Harri Deutsch, (1995)

„zusammenfassende

Darstellung der beiden

Teilgebiete“

Bücher zur Teilchenphysik

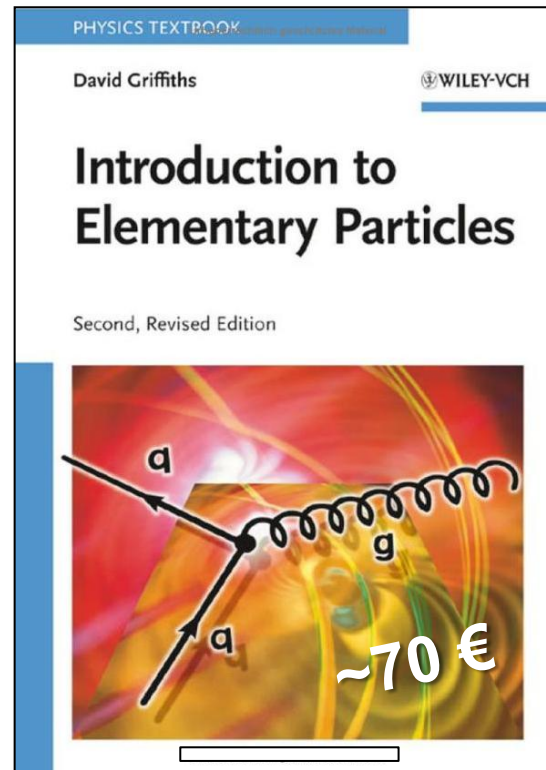


Christoph Berger

Elementarteilchenphysik

Springer (2. Aufl., 2006)

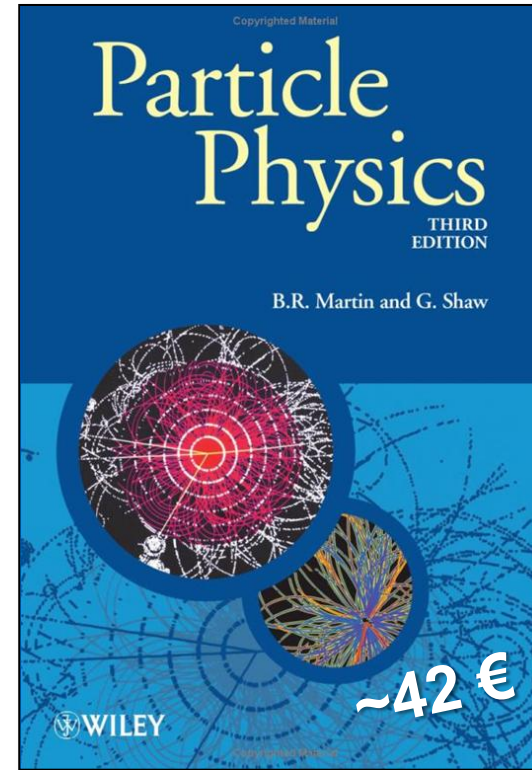
„Systematische Einführung von den Grundlagen zu modernen Experimenten, 88 Übungen mit Lösungen“



David Griffiths

Introduction to Elementary Particles, Wiley (2. ed. 2008)

„balancing intuitive understanding & mathematical, rigor, emphasizing particle theory, many exercises“

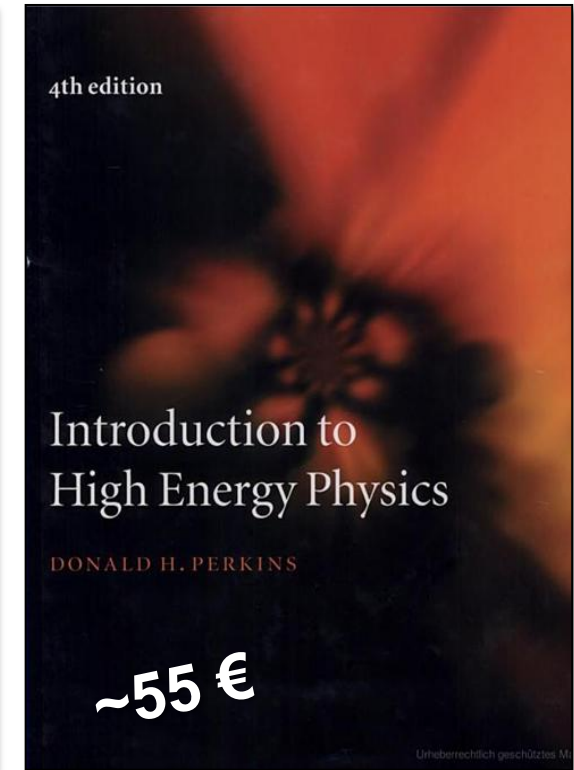


B.R. Martin, G.P. Shaw

Particle Physics

Wiley (3. Auflage. 12/2008)

„an introduction to particle physics, emphasizing the foundations of the SM in experimental data“

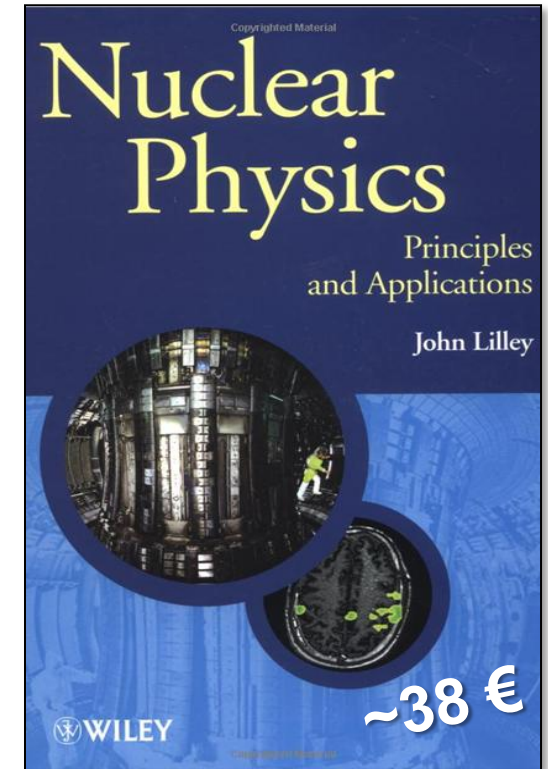
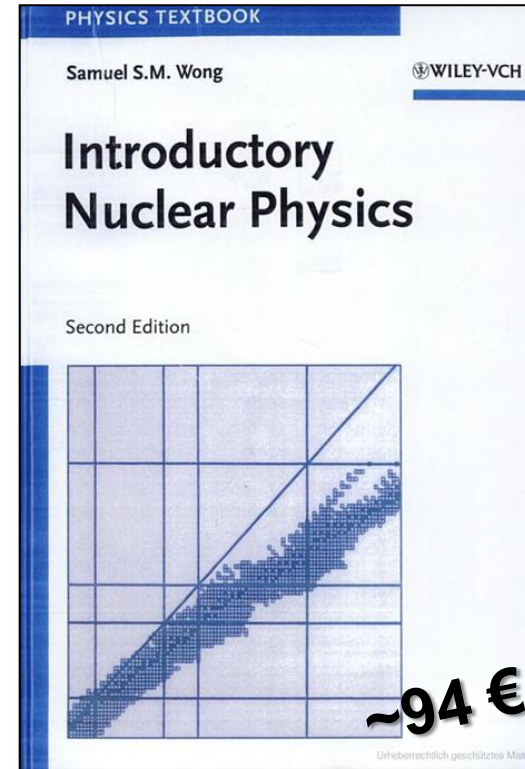
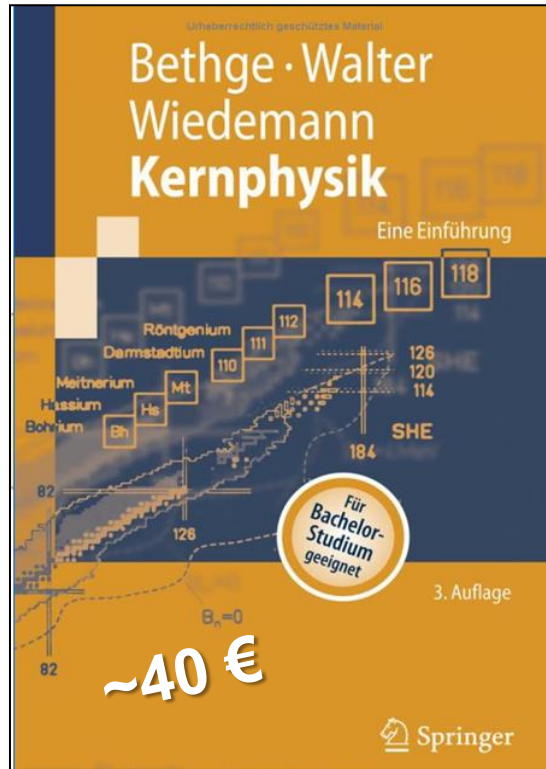


Donald H. Perkins

Introduction to High Energy Physics, Cambridge Univ. (4. Aufl., 2000)

„Introduction to modern particle physics, connects to cosmology & astrophys.“

Bücher zur Kernphysik



Theo Mayer-Kuckuk

Kernphysik

Teubner (7. Aufl., 2002)

„Grundlagen zum Gegen-

stand der Kernphysik:

etablierte Erscheinungen &

moderne Perspektiven“

Klaus Bethge et al.

Kernphysik

Springer (3. akt. Aufl., 2007)

„Überblick über theoret. &

experimentelle Grundlagen

Kernphysik. Methoden

mit zahlreichen Übungen“

Samuel S.M. Wong

Introductory Nuclear

Physics Wiley-VCH (2.Ed.,

1998, „comprehensive

introduction to nuclear

physics, with coverage of

modern topics“

John S. Lilley

Nuclear Physics -

Principles & Applications

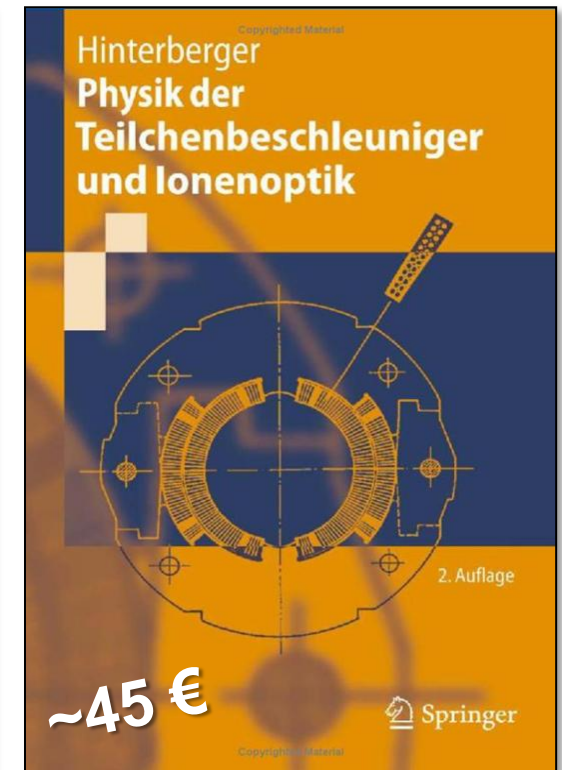
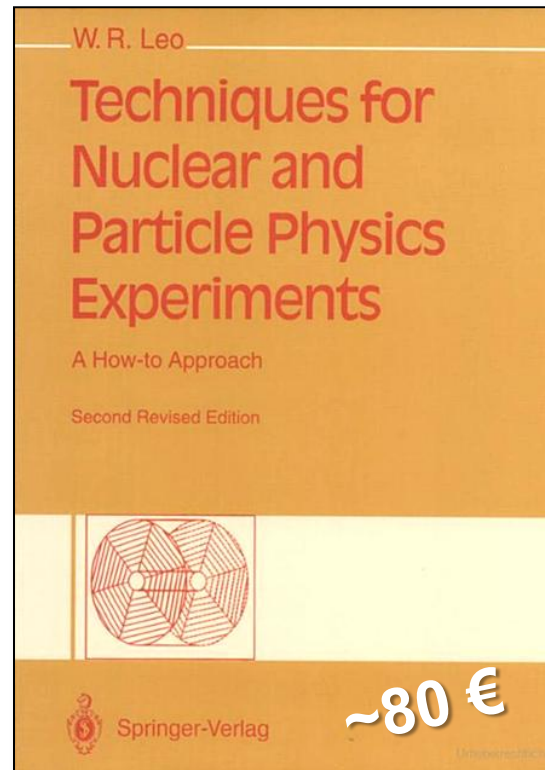
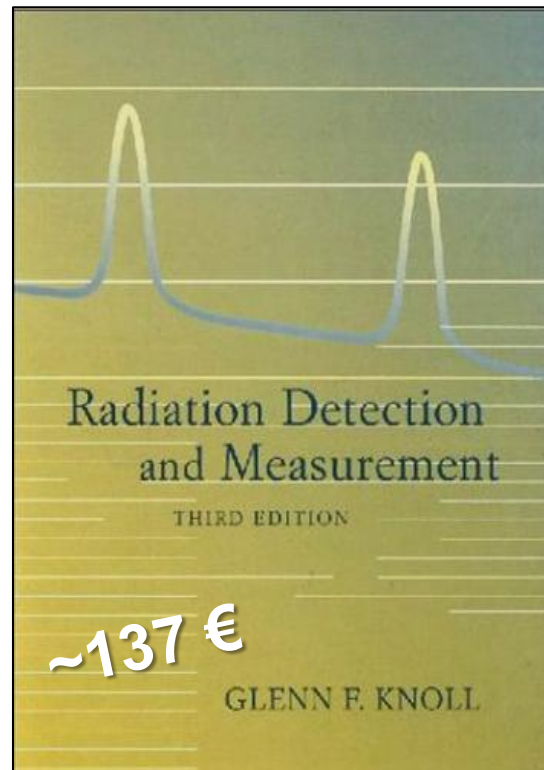
Wiley & sons, repr. 2006

„Kernphysik vom Stand-

punkt des Experimen-

tators, Anwendungen“

Bücher zu Detektoren & experimentellen Techniken



Konrad Kleinknecht

Detektoren für Teilchen-Strahlung, Teubner Verl.

4. Auflage (2005) „Überblick über den Aufbau & die Funktionsweise von Teilchendetektoren“

Glenn F. Knoll

Radiation Detection and Measurement, Wiley (3.

Ed., 2000) „most compreh. reference on methods & instrumentation in the detection of ionis. radiation“

William R. Leo

Techniques for Nuclear & Particle Physics Exp.

Springer Verl.(2. Ed. 1994) „experim. techniques & instrumentation in nuclear & particle physics expts.“

Frank Hinterberger

Physik der Teilchenbe-Schleuniger & Ionenoptik

Springer Verl.(2. Aufl. 2008) „Beschleunigertypen und Bauelemente, Ionenoptik mit magnet. Elementen“



Open access to 571,171 e-prints in Physics, Mathematics, Computer Science, Quantitative Biology, Quantitative Finance

Subject search and browse:

8 Apr 2009: Added public author identifiers, Facebook interaction, myarticles widget,

31 Mar 2009: Quantum Gases (cond-mat.quant-gas) subject area added

See cumulative "What's New" pages.

Robots Beware: indiscriminate automated downloads from this site are *not* permitted.

Physics

- **Astrophysics** (**astro-ph** new, recent, find)
includes: Cosmology and Extragalactic Astrophysics; Earth and Planetary Astrophysics;
- **Condensed Matter** (**cond-mat** new, recent, find)
includes: Disordered Systems and Neural Networks; Materials Science; Mesoscale
- **General Relativity and Quantum Cosmology** (**gr-qc** new, recent, find)
- **High Energy Physics - Experiment** (**hep-ex** new, recent, find)
- **High Energy Physics - Lattice** (**hep-lat** new, recent, find)
- **High Energy Physics - Phenomenology** (**hep-ph** new, recent, find)
- **High Energy Physics - Theory** (**hep-th** new, recent, find)
- **Mathematical Physics** (**math-ph** new, recent, find)
- **Nuclear Experiment** (**nucl-ex** new, recent, find)
- **Nuclear Theory** (**nucl-th** new, recent, find)
- **Physics** (**physics** new, recent, find)
includes: Accelerator Physics; Atmospheric and Oceanic Physics; Atomic Physics;
General Physics; Geophysics; History of Physics; Instrumentation and Detectors;
- **Quantum Physics** (**quant-ph** new, recent, find)

preprints in:

hep-ex, nucl-ex (Experiment)
hep-ph (Phänomenologie)
nucl-th (Kernphysik-Theorie)

referierte Fachartikel:

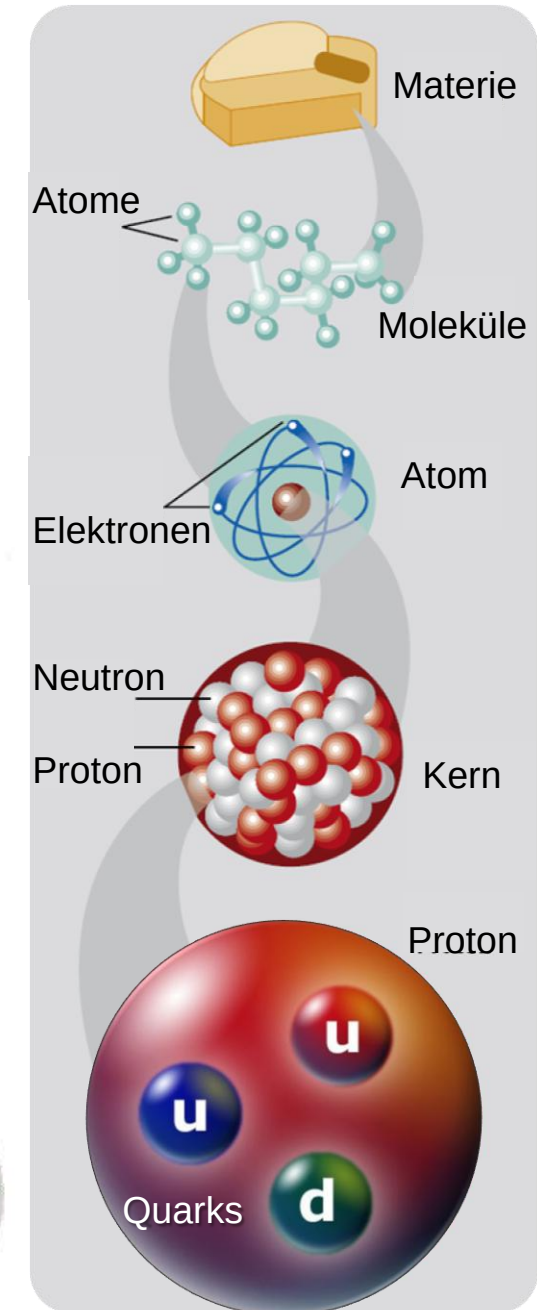
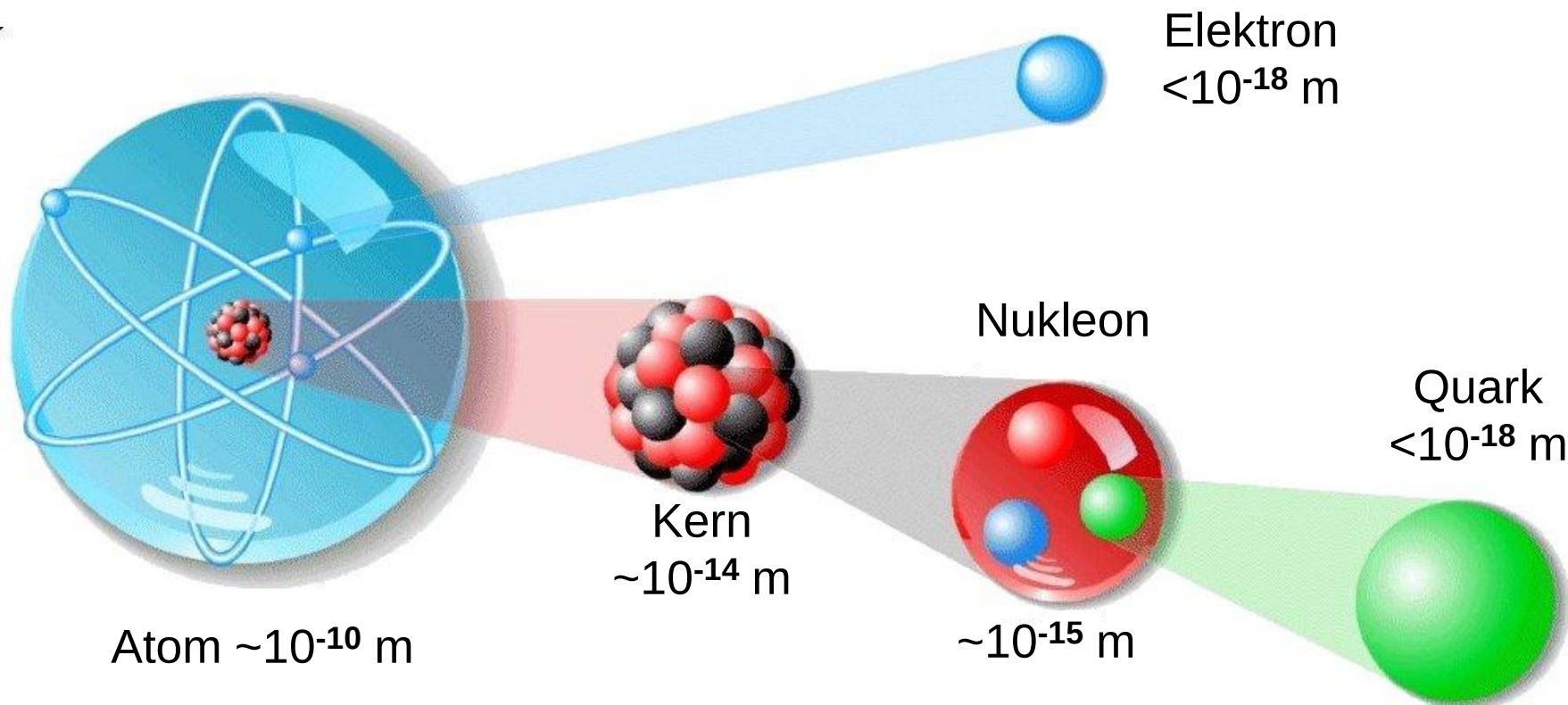
- Phys. Rev. C, D
- Phys. Rev. Letters
- J. Phys. G (Nucl. & Part.)
- Phys. Lett. B
- Astroparticle Physics

1. Einführung

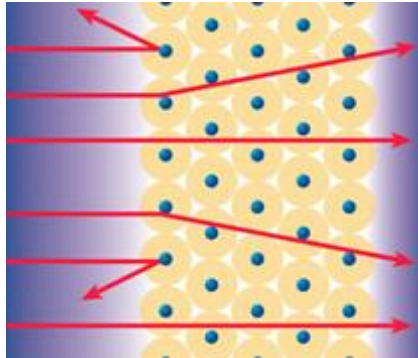
Größenskalen in der Atom-, Kern- & Teilchenphysik

Kern-/Teilchenphysik: typische Längenskala $\sim 10^{-15}$ m [fm]

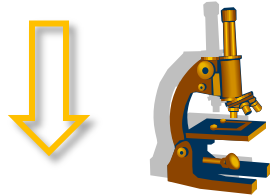
- Suche nach den elementaren Bausteinen der Materie
- reduktionistisches Prinzip: wenige fundamentale Gesetze



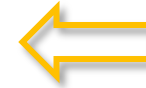
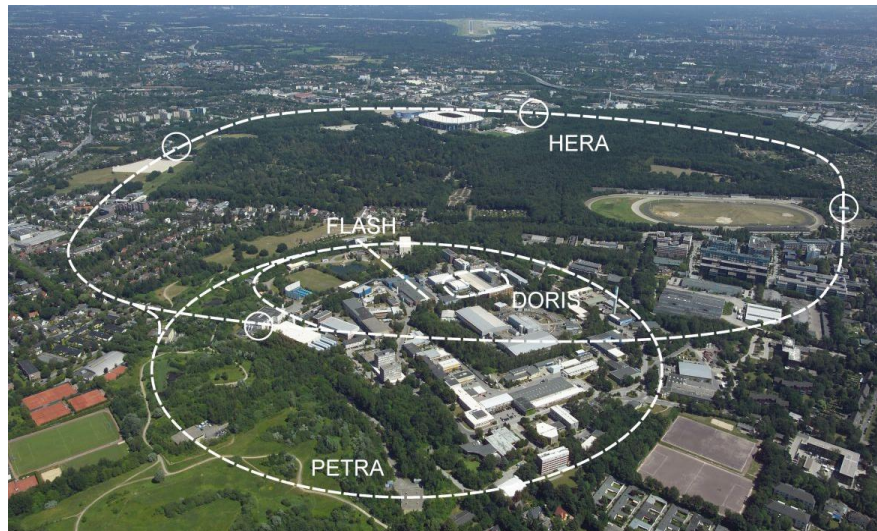
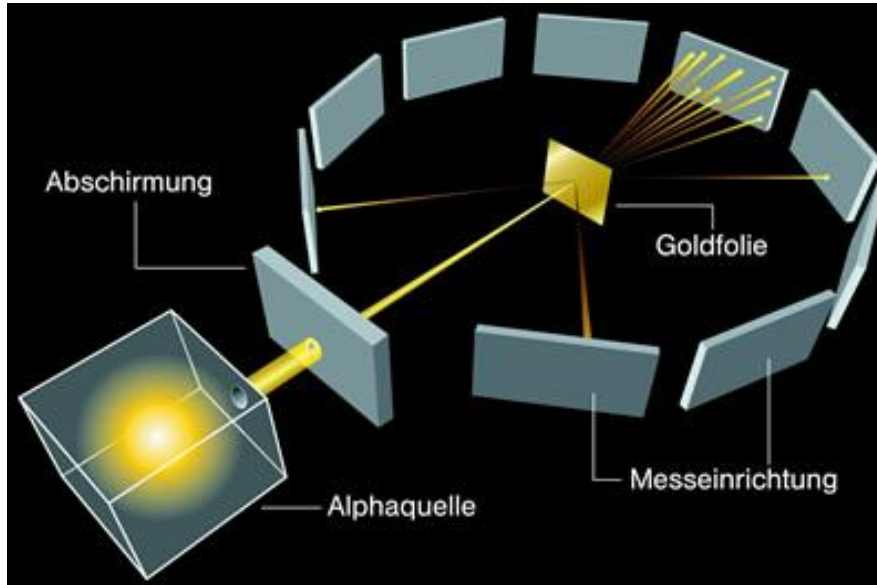
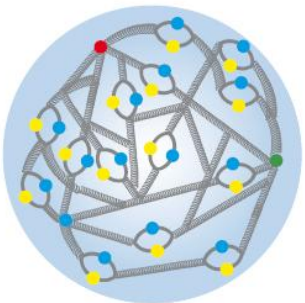
Streuexperimente zur Strukturanalyse



α -Energie: 5 MeV

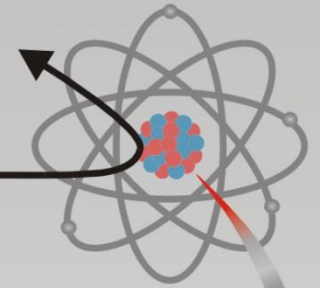


p-Energie: 800 GeV
e-Energie: 30 GeV



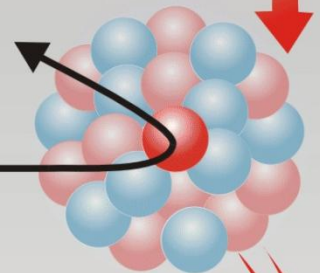
Rutherford, 1908
Entdeckung des Atomkerns

α -Teilchen



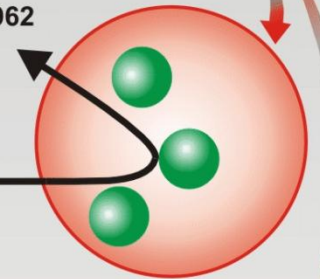
Hofstadter, 1956
Ausdehnung des Protons

Elektronen



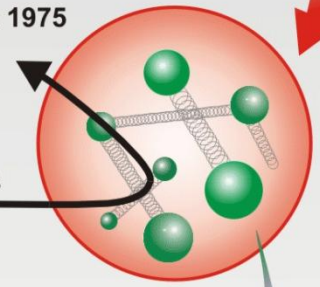
Friedman, Kendall, Taylor, 1962
Entdeckung der Quarks

Elektronen



Zahlreiche Experimente, seit 1975
HERA, seit 1992
Aufbau des Protons

Elektronen / Myonen / Neutrinos



- 1896:** Henri Becquerel entdeckt Radioaktivität von Uransalzen
- 1898:** Marie & Pierre Curie entdecken Polonium & Radium (neue Elemente)
- 1907:** Ernest Rutherford klassifiziert α , β , γ – Strahlung ($\alpha = {}^4\text{He}$ -Kern)
- 1911:** Rutherford, Geiger & Marsden entdecken den Atomkern
- 1913:** Bohr'sches Atommodell
- 1919:** erste künstliche Kernumwandlung durch Rutherford
- 1930:** E.O. Lawrence entwickelt die Idee für ein Zyklotron
- 1932:** E. Fermi's Theorie des Kern- β -Zerfalls
- 1935:** H. Yukawa postuliert Theorie der starken Wechselwirkung (Pion)
Bethe-Weizsäcker'sche Massenformel & Tröpfchenmodell

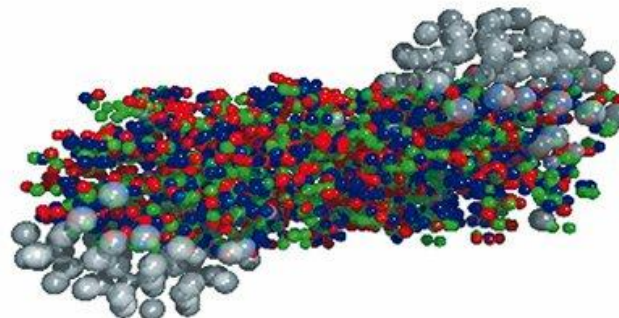


Henri Becquerel
1852-1908
Nobelpreis 1903



Marie Curie (1867-1934)
Pierre Curie (1859-1906)
Nobelpreis 1903

- 1938:** Hans Bethe postuliert CNO Kernfusionsreaktionen für stellare Energie
- 1939:** O. Hahn, F. Straßmann & L. Meitner entdecken Kernspaltung
- 1946:** F. Bloch & E. Purcell verfeinern MRI (NMR) Technik
- 1949:** Aufstellung des Schalenmodells der Kerne (M. Goeppert-Mayer)
- 1957:** Geburt der nuklearen Astrophysik (B²FH-Artikel zur Nukleosynthese)
- 1967:** J. Bell & A. Hewish entdecken Pulsare (Neutronensterne)
- 1969:** Gründung der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt)
- 1984:** CEBAF Beschleuniger (6 GeV Elektronen für Kernphysik)
- 1986:** erste Beobachtung eines Doppelbeta-Zerfalls $2\nu\beta\beta$ (seltenster Zerfall)
- 2006:** Erzeugung des bisher schwersten Elements $Z = 118$
- 2010:** ALICE Detektor am LHC sucht nach dem Quark-Gluon Plasma



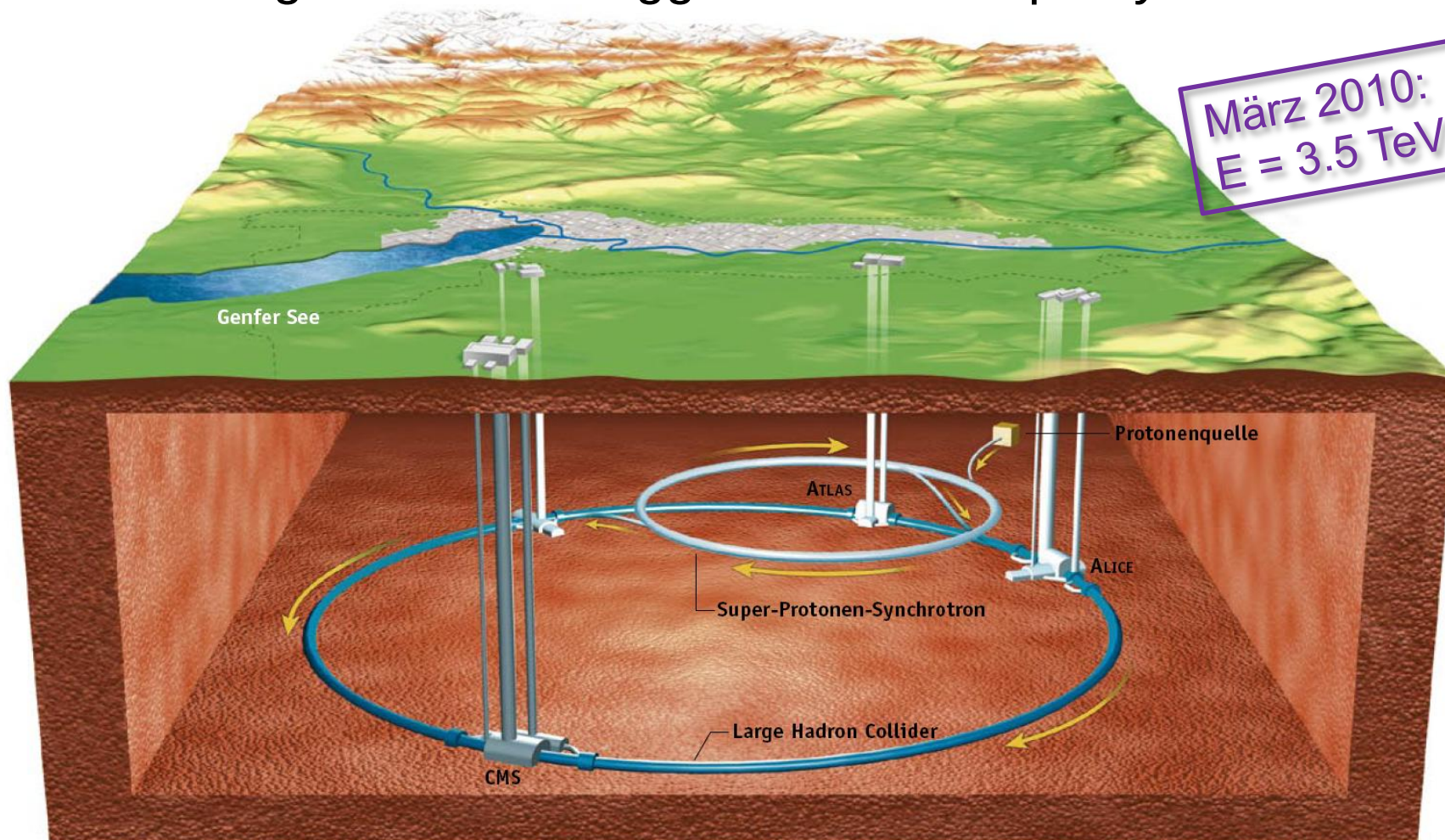
- 1897:** J. J. Thomson entdeckt das Elektron (Kathodenstrahlen)
- 1911:** V. Hess entdeckt die kosmische Strahlung
- 1928:** P.A.M. Dirac postuliert die Antimaterie
- 1930:** C. Anderson entdeckt das Positron, W. Pauli postuliert das Neutrino
- 1932:** J. Chadwick entdeckt das Neutron
- 1936:** Entdeckung des Myons in der kosm. Strahlung (Anderson, Neddermeyer)
- 1947:** C. Powell entdeckt das Pion (kosm. Strahlung) mit Emulsionen
- 1955:** Entdeckung des Antiprotons durch E. Segre & O. Chamberlain
- 1956:** erster Nachweis des Neutrinos durch F. Reines & C. Cowan
- 1957:** Verletzung der Paritätserhaltung (schwache Ww.): Wu, Lee und Yang
- 1962:** Entdeckung des 2. Neutrino (ν_μ): Lederman, Schwartz, Steinberger
- 1964:** Nachweis der CP-Verletzung bei Kaon-Oszillationen (Cronin, Fitch)
Higgs-Mechanismus für spontane Symmetriebrechung (P. Higgs)

- 1964:** M. Gell-Mann & G. Zweig postulieren die Existenz von Quarks
- 1967:** Theorie der elektroschwachen Vereinheitlichung: S. Weinberg, A. Salam
- 1973:** erster Nachweis neutraler schwacher Ströme (Gargamelle)
- 1974:** B. Richter (SLAC) und S. Ting (BNL) entdecken das J/Ψ (Charmonium)
M. Perl entdeckt das Tauon (SLAC)
- 1977:** erster Nachweis des Upsilon Υ durch L. Ledermann (Bottomonium)
- 1979:** am Speicherring PETRA: Nachweis der Gluonen durch 3-Jet-events
- 1983:** erster Nachweis der intermediären Vektorbosonen $W^\pm$, Z^0 am CERN
- 1987:** SN1987a: erster Nachweis von Supernova-Neutrinos
- 1989:** Beschränkung der Teilchengenerationen auf $N = 3$ (Z^0 -Breite)
- 1995:** erster Nachweis des Top-Quarks am Fermilab
- 1998:** Beobachtung von Neutrino-Oszillationen (Super-Kamiokande)
- 2001:** SNO löst das solare Neutrino-Problem
- 2009:** LHC wird (wieder) in Betrieb genommen

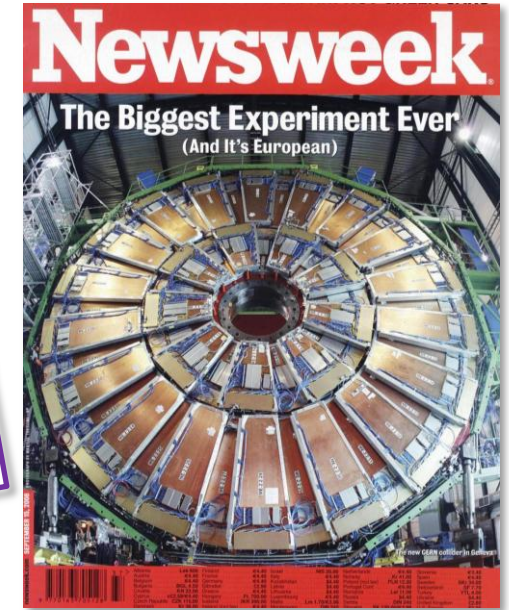
Teilchenphysik – Zukunft

LHC - Large Hadron Collider am CERN (Genf)

p-p Kollisionen bei $\sqrt{s} = 14$ TeV Schwerpunktsenergie
Zielsetzung: Nachweis Higgs-Boson & Supersymmetrie



März 2010:
E = 3.5 TeV



Einheiten: Energie & Impuls

Energie E

Einheit: **Elektronvolt (eV)**

E = 1 eV entspricht Elektron-Energie
nach Durchlaufen von $\Delta U = 1 \text{ V}$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Messung: elektromagnetische/hadronische Kalorimeter

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \quad 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \quad 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

Impuls p

Einheit: Elektronvolt/c (eV/c)

relativistische Energie-Impuls Beziehung: $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

$$1 \text{ eV/c} = 0.535 \cdot 10^{-27} \text{ kg m/s}$$

vektorielle Größe $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z) = (p_r, p_\theta, p_\phi)$

Messung: Krümmung der Teilchenbahn in B-Feld (Rigidität)
Longitudinal/Transversal-Impuls



in der Kern- & Teilchenphysik werden spezielle Einheiten verwendet, die eng mit den methodischen Grundlagen der Gebiete verknüpft sind

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

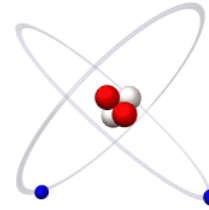
natürliche Einheiten $\hbar = c = 1$

Masse	1 GeV
Länge	1 GeV ⁻¹ = 0.1975 fm
Zeit	1 GeV ⁻¹ = $6.59 \cdot 10^{-25}$ s

Heaviside-Lorentz Einheiten

$\epsilon_0 = \mu_0 = \hbar = c = 1$		
Feinstruktur	$\alpha = e^2 / 4\pi$	1/137.06

Atom



α : Feinstrukturkonstante = $1/137$

m_e : Elektronmasse = 0.511 MeV

$$r_{\text{Atom}} \sim 10^{-10} \text{ m}$$

$$\rho_{\text{Atom}} \sim 10^3 \text{ kg/m}^3$$



Kern

α_s : starke Kopplungskonstante = 0.2

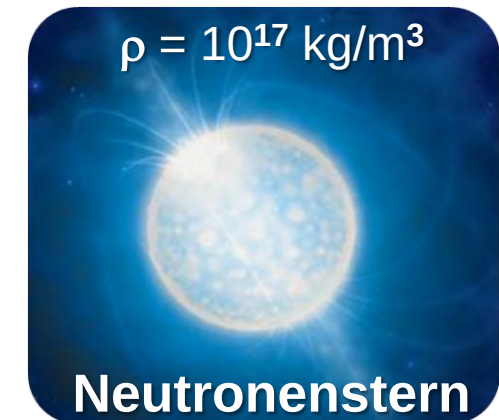
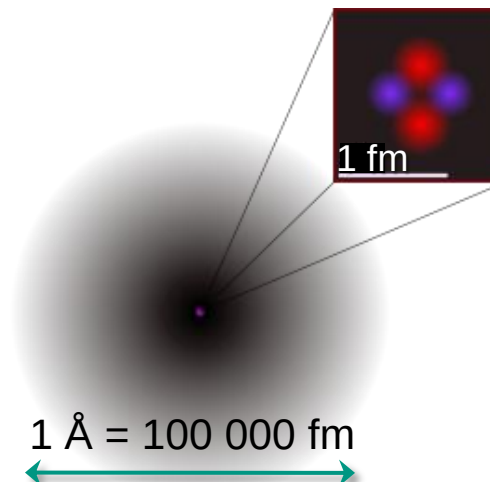
m_N : Nukleonmasse = 939 MeV

$$r_{\text{Kern}} = (2-8) \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

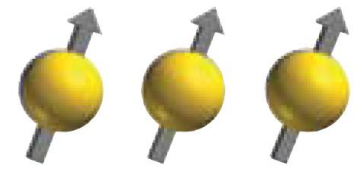
$$\rho_{\text{Kern}} \sim 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{r_{\text{Kern}}}{r_{\text{Atom}}} \sim \frac{\alpha}{\alpha_s} \cdot \frac{m_e}{m_N} \sim 3 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\rho_{\text{Kern}}}{\rho_{\text{Atom}}} \sim \frac{\alpha_s^3}{\alpha} \cdot \frac{m_N^3}{m_e^3} \sim 10^{14}$$

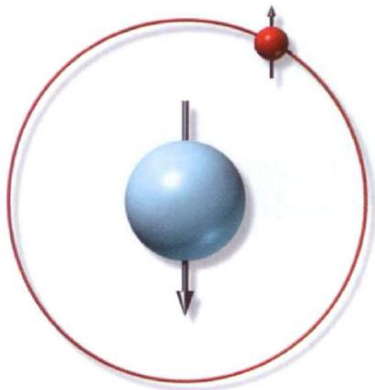


Spineigenschaften

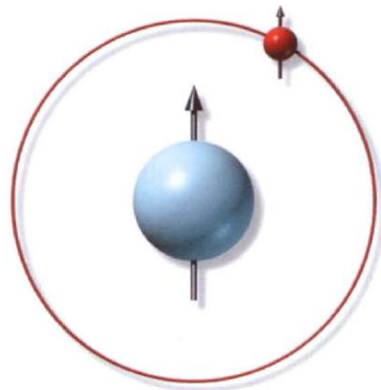


interne **Spineigenschaften**: wesentliche Rolle bei subatomaren Effekten
Kerne – Schalenstruktur (uu, gg), Teilchen – Masse, Lebensdauer (p, n, Δ^+)

$S = 0$



$S = 1$

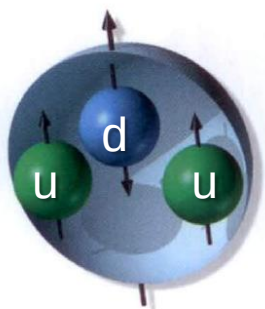


H-Atom Atomphysik - Hyperfeinstruktur

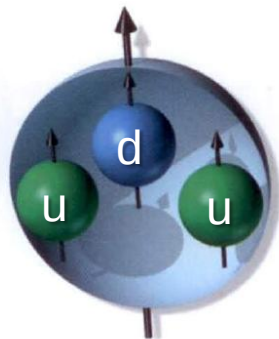
Kopplung von Hülle J und Kern I

$\Delta E = 5.9 \times 10^{-6}$ eV relativ zur Masse

$M = 939 \times 10^6$ eV (bei H-Atom)



$S = 1/2$



$S = 3/2$

Baryon Kernphysik - Baryonenstruktur

$S = 1/2$

Proton

$m = 938.27$ MeV

$\tau > 1 \times 10^{31}$ a

$S = 3/2$

Δ^+ Resonanz

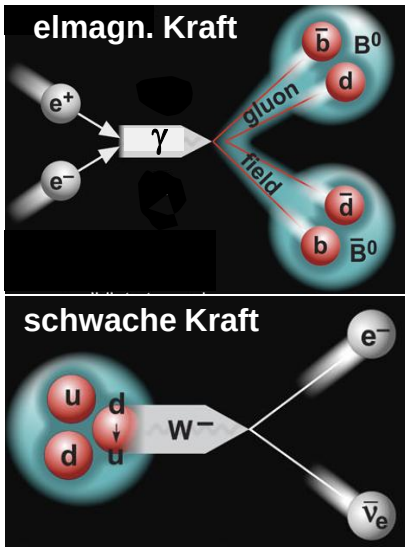
$m = 1232$ MeV

$\tau = (5.58 \pm 0.09) \times 10^{-24}$ s

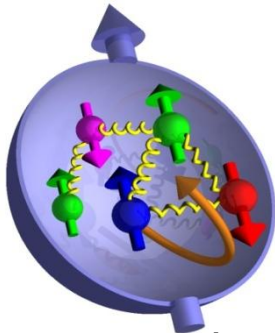
Standardmodell

Standardmodell der Teilchenphysik

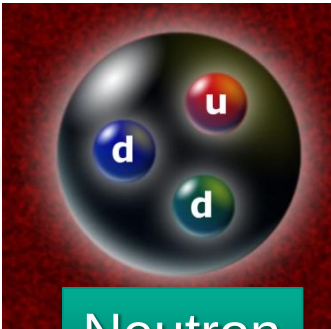
= 3 Teilchenfamilien (Leptonen & Hadronen)
 + 3 Kräfte als Quantenfeldtheorie, Gravitation
 + Massenerzeugung (Higgsmechanismus)



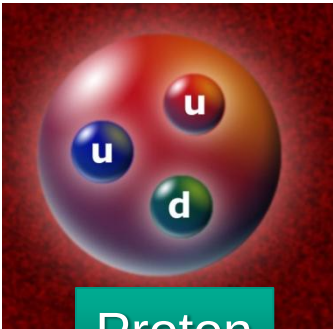
Wechselwirkung	Boson	Masse [GeV]	rel. Stärke [3 × 10 ⁻¹⁷ m]	Reichweite [m]	Potenzial
stark	Gluonen	0	60	2.5·10 ⁻¹⁵	$\alpha r^{-1} + \beta r$
elektromagnet.	Photon	0	1	∞	1/r
schwach	W ⁺ W ⁻ Z ⁰	80.4 91.2	10 ⁻⁴	10 ⁻¹⁸	$\delta(r)$



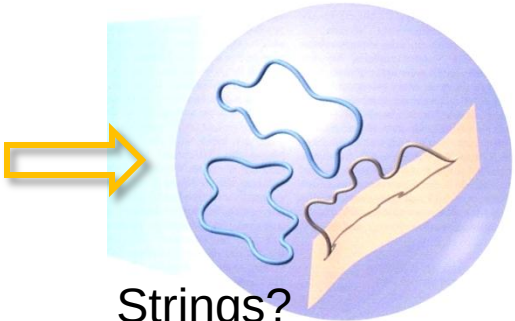
See-Quarks!



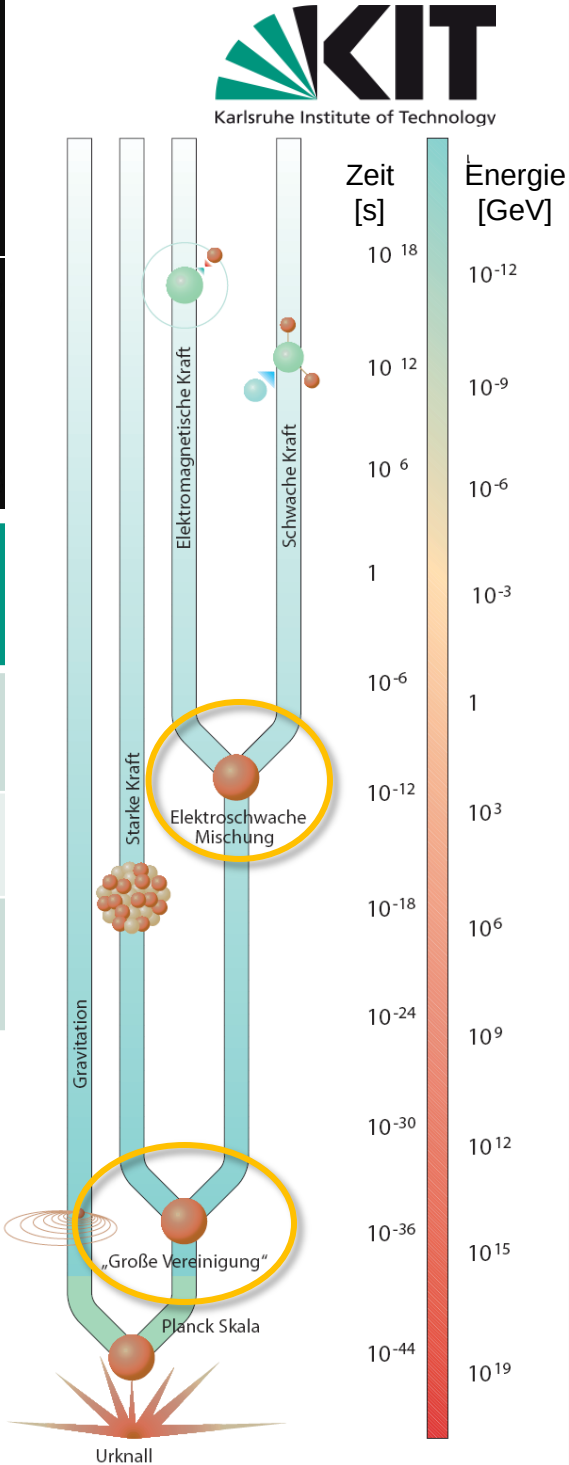
Neutron



Proton



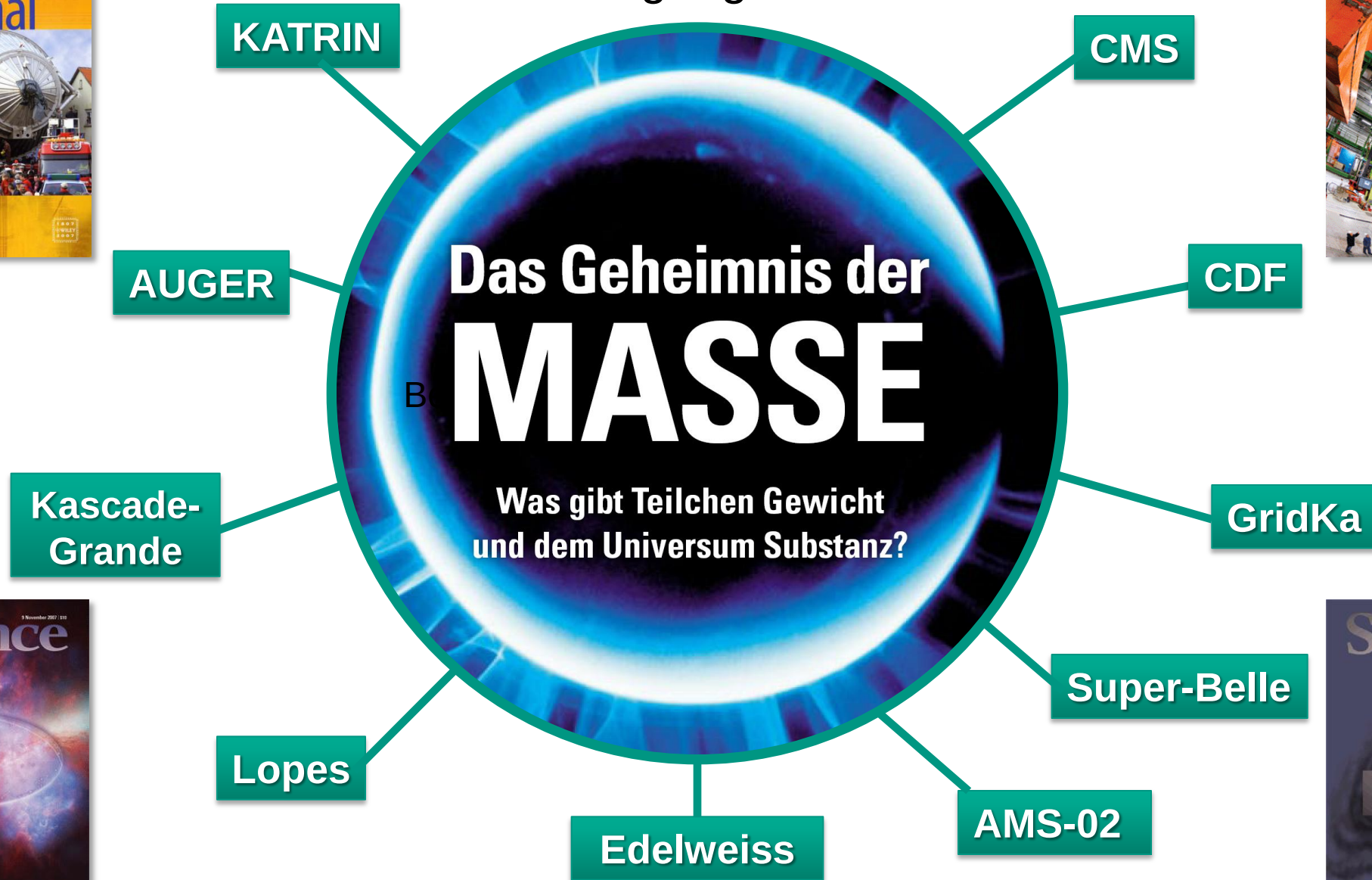
Strings?



Teilchenphysik am KIT



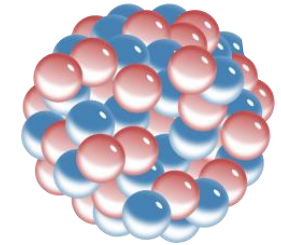
Besichtigung am 14.7.



2. Eigenschaften stabiler Kerne

Radius & Form

- Größe: Kernradius ($R = 1.2 \text{ fm} \cdot A^{1/3}$)
- Form: sphärisch / Deformation (prolat/oblat)



Dichte & Masse

- Kernmaterie mit konstanter Dichte ($\rho = 10^{17} \text{ kg/m}^3$)
- Kernmassen & Stabilitätstal



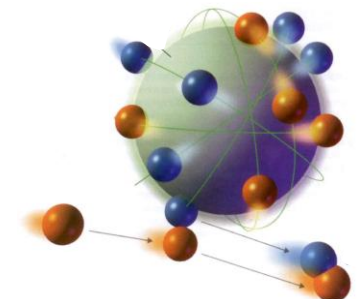
Zustände

- Quantenzahlen Spin S , Parität P , magnetisches Moment μ
- Schalenstruktur: „Leucht“-Nukleonen, kollektive Anregung



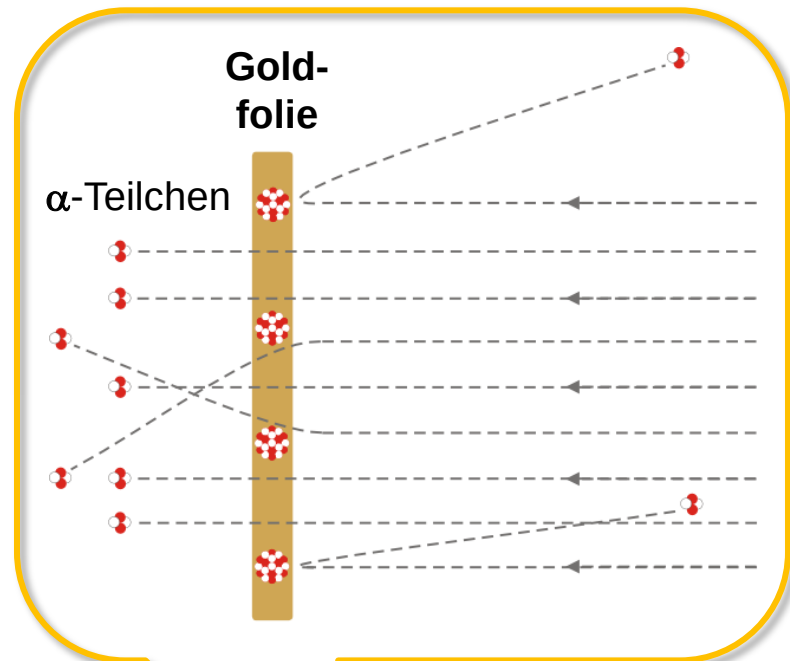
Reaktionen

- Bindungsenergien: Fusion & Spaltung, nukl. Astrophysik
- spezielle Reaktionen: Austausch/Transfer



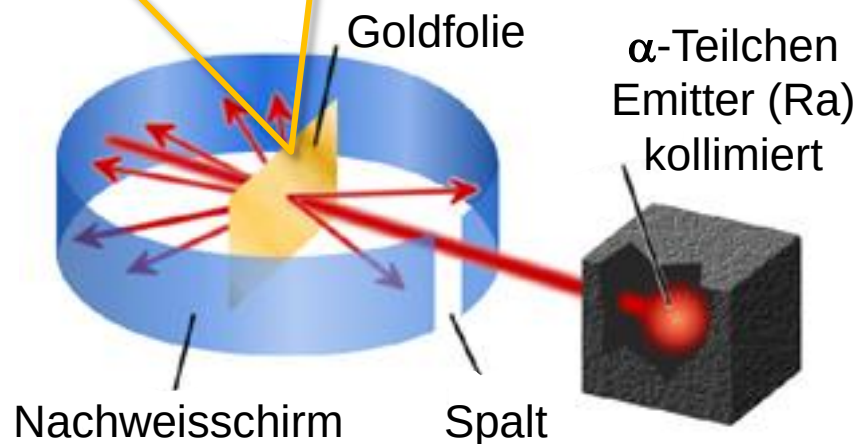
2.1 Rutherford-Streuung & Wirkungsquerschnitt

1909: Rutherford, Geiger und Marsden untersuchen in Manchester die Streuung von α -Teilchen an sehr dünnen Goldfolien



Ziel: aus der Winkelverteilung der gestreuten α -Teilchen $\rightarrow$ Rückschlüsse über Struktur des Streuzentrums (Atomkern)

Aufbau: Ra-Quelle mit $E_{\text{kin}}(\alpha) = 4.78 \text{ MeV}$
dünne Au-Folien ($Z = 79$, $d = 2000$ Atomlagen)
klassischer 'fixed target' Aufbau
Nachweis gestreuter α 's in ZnS-Szintillator



1908: Nobel-Preis für Chemie (α -, β -, γ -Kernzerfälle, ...)



Ernest Rutherford (1871-1937)

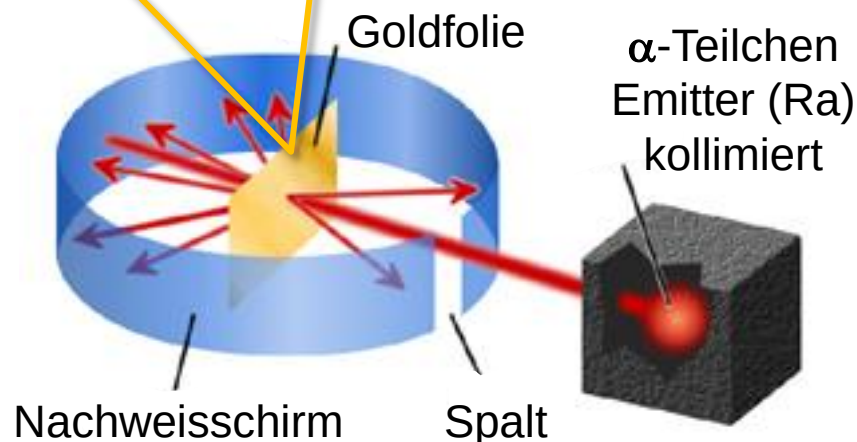
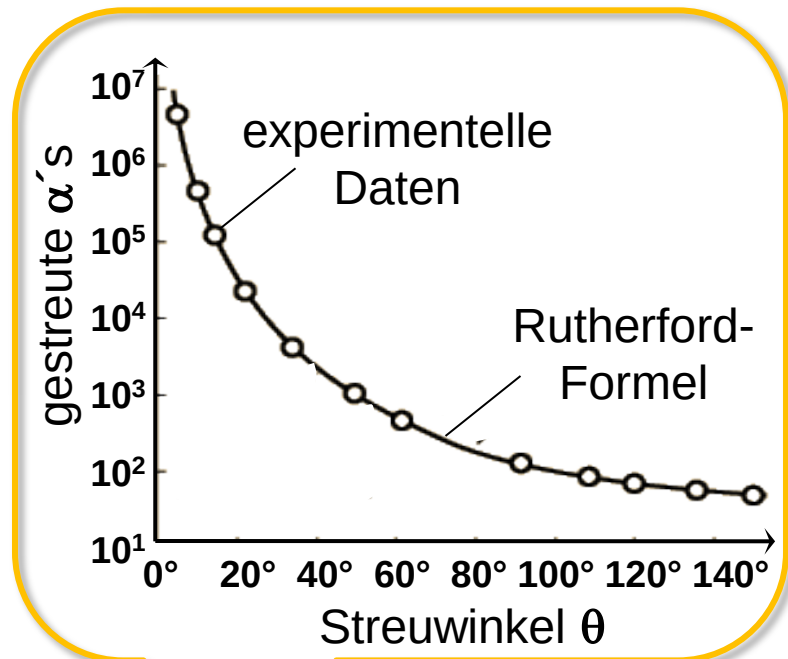
Rutherford-Streuung & Wirkungsquerschnitt

The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom

E. Rutherford, F.R.S.*
Philosophical Magazine
Series 6, vol. 21
May 1911, p. 669-688

669

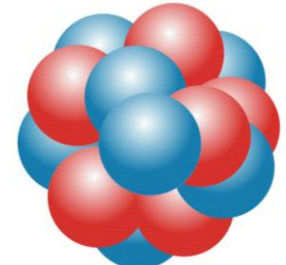
§ 1. It is well known that the α and the β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the β than for the α particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden** on the scattering of α rays indicate that some of the α particles, about 1 in 20,000 were turned through an average angle of 90 degrees in passing through a layer of gold-foil about 0.00004 cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1.6 millimetres of air. Geiger*** showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles being deflected through 90 degrees is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the deflexion does not



Beobachtung:

$$\text{Rate} \sim 1 / \sin^4 (\theta/2)$$

↪ **Streuung an
'punktförmigem'
Atomkern**



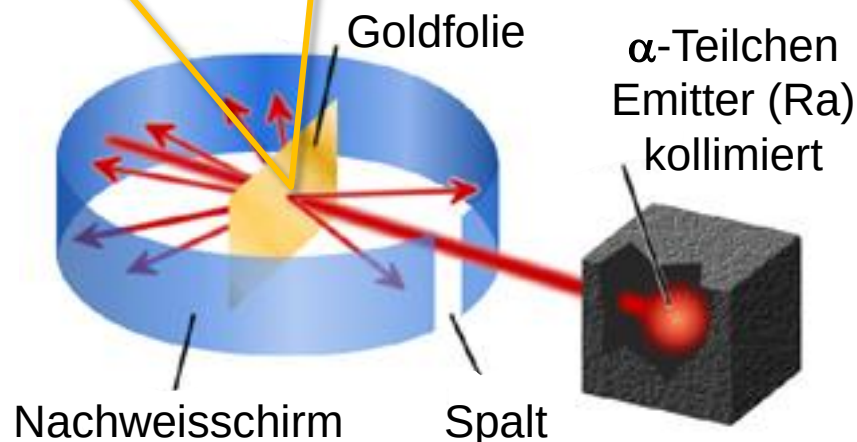
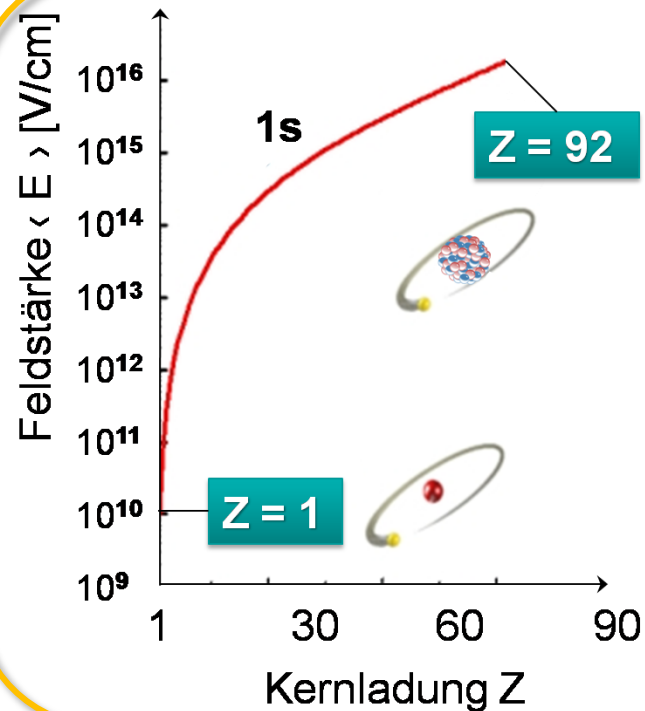
Rutherford-Streuung & Wirkungsquerschnitt

The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom

E. Rutherford, F.R.S.*
Philosophical Magazine
 Series 6, vol. 21
 May 1911, p. 669-688

669

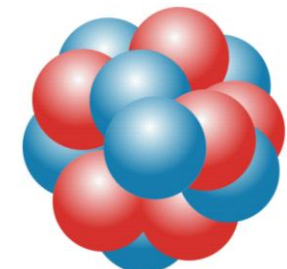
§ 1. It is well known that the α and the β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the β than for the α particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden** on the scattering of α rays indicate that some of the α particles, about 1 in 20,000 were turned through an average angle of 90 degrees in passing through a layer of gold-foil about 0.00004 cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1.6 millimetres of air. Geiger*** showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles being deflected through 90 degrees is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the deflexion does not



Beobachtung:

$$\text{Rate} \sim 1 / \sin^4 (\Theta/2)$$

↪ **Streuung an
 'punktförmigem'
 Atomkern**



Rutherford-Streuung & Target

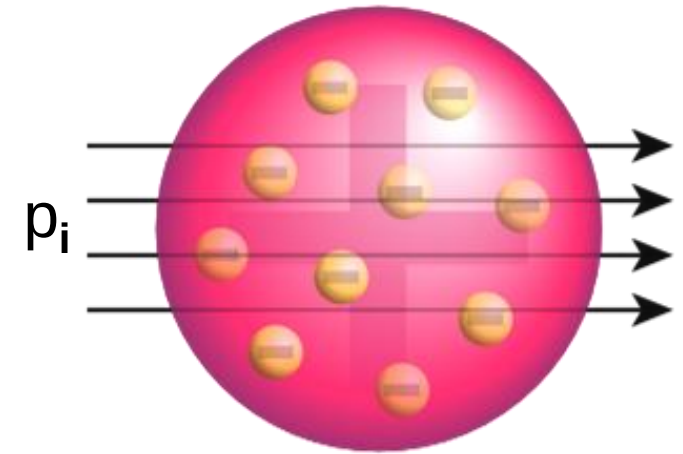
Kinematik der elastischen Streuung von α -Teilchen:

↳ Energie- und Impulserhaltung (keine innere Anregung)

α -Streuung an Elektronen (Thomson-Atommodell)

$$\frac{m_e}{m_\alpha} \approx 10^{-4}$$

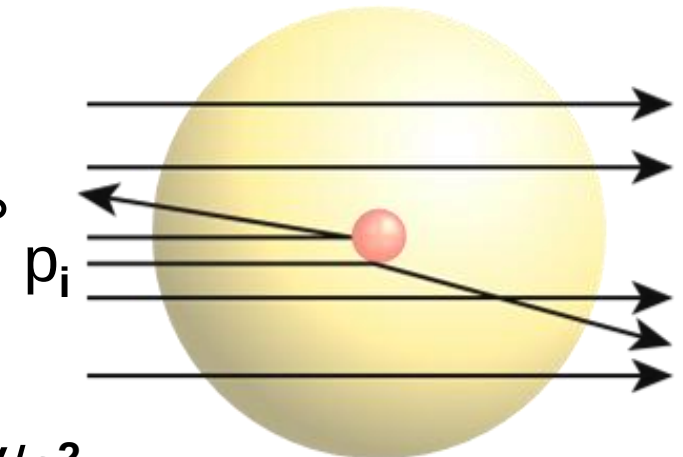
maximaler Impulstransfer $\Delta p \sim 10^{-4} p_i$
nur sehr kleine Streuwinkel $\Theta \sim 0^\circ$



α -Streuung an Au-Kernen (Rutherford-Atommodell)

$$\frac{m_{Au-197}}{m_\alpha} \approx 50$$

maximaler Impulstransfer $\Delta p \sim 2 \cdot p_i$
auch große Streuwinkel bis $\Theta_{\max} \sim 180^\circ$
(Rückstreuung des α -Teilchens)



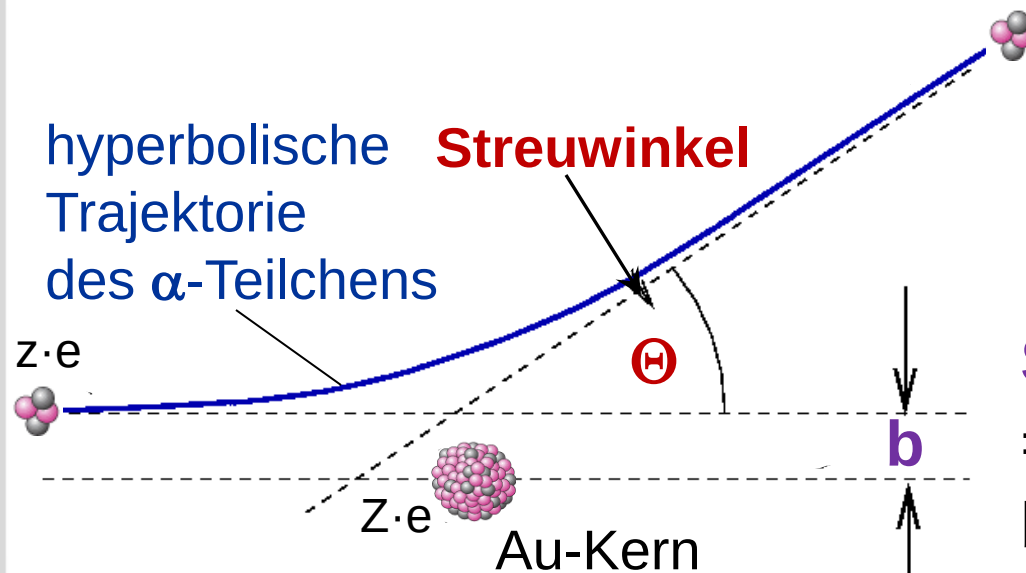
$$m_\alpha = 4 \text{ GeV}/c^2, m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2, m_{Au-197} = 197 \text{ GeV}/c^2$$

Annahmen bei der Rutherford-Streuung:

- punktförmiges Target & Projektil, beide ohne Spin ($S=0$)
- dünnes Target: nur Einfachstreuung
- kein Kernrückstoß (Au-197 ist ortsfest)
- abstoßende Coulombkraft (Z des Kerns) = rein elektromagnetische Wechselwirkung (keine Kernkräfte)

$$V(r) \sim \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{r}$$

Coulombpotenzial

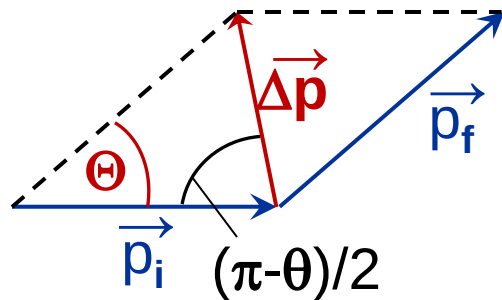


sphärische Koordinaten mit Au-197 Kern
als statischem Zentrum ($r = 0$)

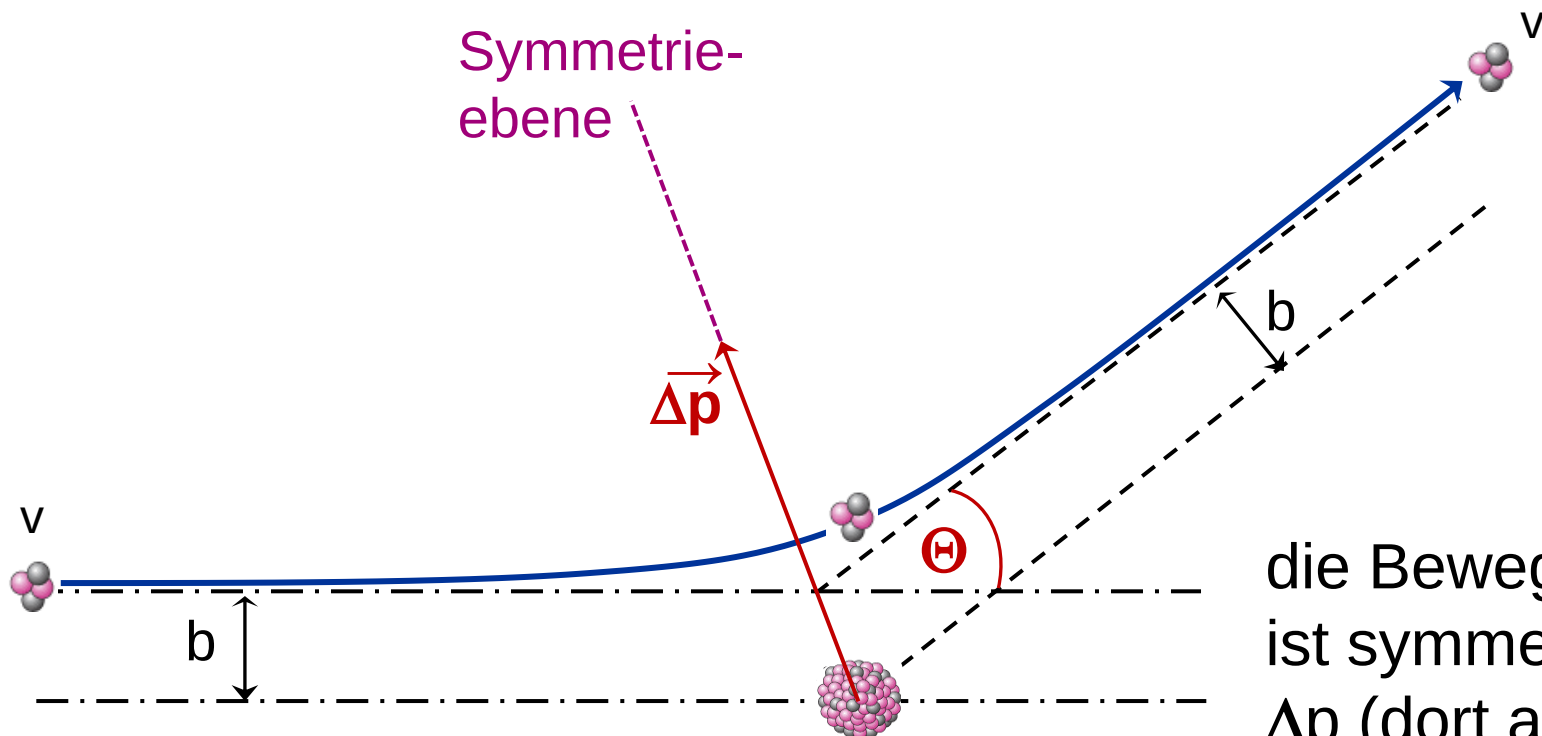
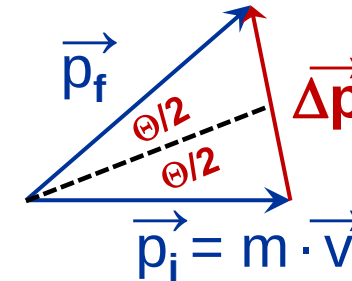
Stoßparameter (Impaktparameter) $b \in [-\infty, \infty]$
= asymptotischer Abstand ($\perp$) des α 's
 $b = 0$ zentraler Stoß, $b \neq 0$ nichtzentraler Stoß

Rutherford-Streuung: Impulse

das α -Teilchen erfährt eine **Impulsänderung** $\Delta \vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i$



$$\Delta p = 2 \cdot m \cdot v \cdot \sin \frac{\theta}{2}$$



die Bewegung des α -Teilchens ist symmetrisch zur Ebene durch Δp (dort auch kürzestes $r = r_0$)

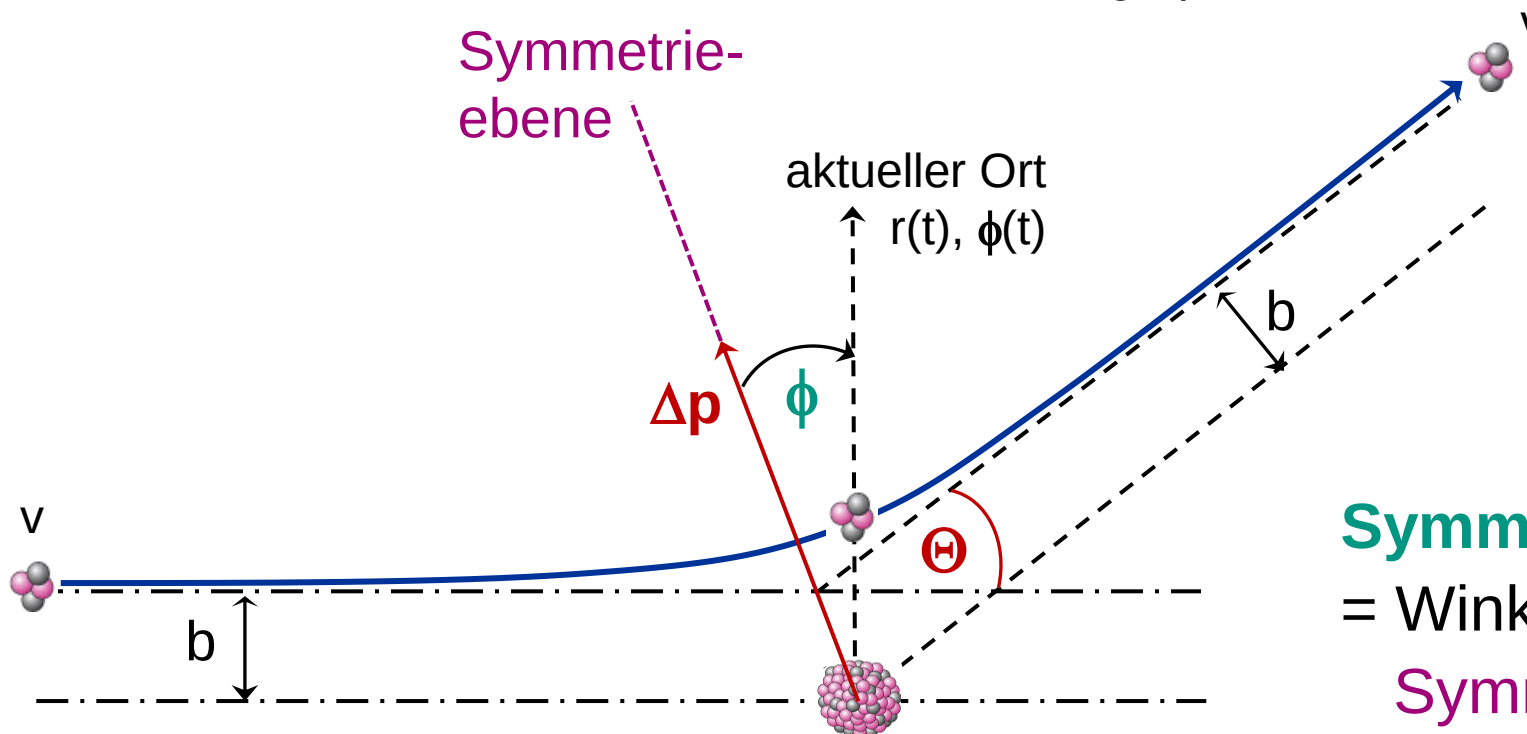
Rutherford-Streuung: Kraftstoß

das α -Teilchen erfährt eine **Impulsänderung** $\Delta \vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i$
durch einen **Kraftstoß** $\int F dt$ des Coulombfelds F

$$\Delta p = \int F_{\Delta p} \cdot dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{r^2} \cdot \cos\phi \cdot dt$$

nur die Komponente
in Richtung Δp wirkt

$\int dt$ ist unpraktisch
 dt aus weiterer
kinematischer Größe:
Drehimpuls L



Symmetriewinkel $\phi(t)$
= Winkel des α 's relativ zur
Symmetrieebene

Rutherford-Streuung: Drehimpuls

Bewegung im konservativen Coulombfeld des Kerns:

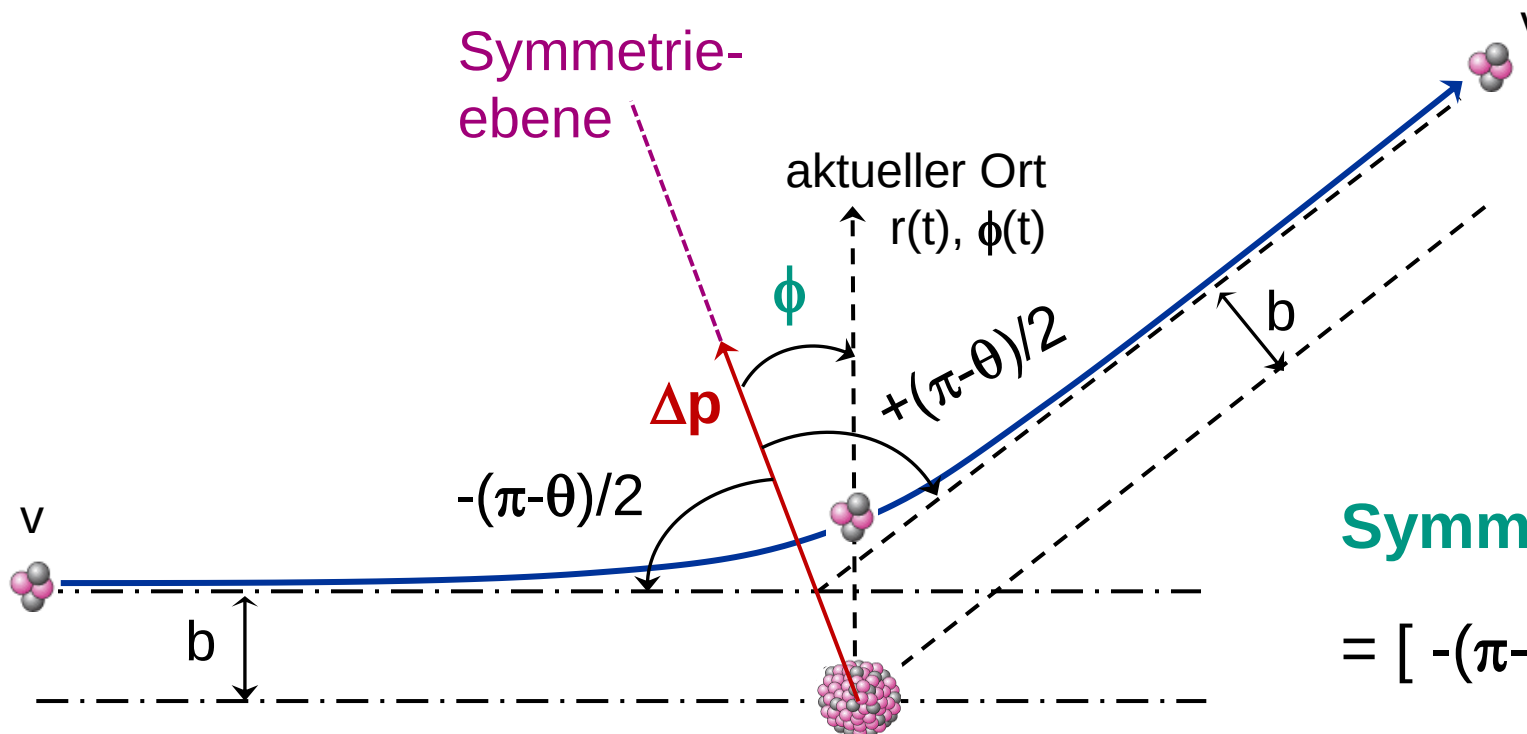
Drehimpuls L des α -Teilchens ist eine kinematische Erhaltungsgröße

$$\vec{L} = |\vec{r} \times m \cdot \vec{v}| = m \cdot v \cdot b = m \cdot \underbrace{\frac{d\phi}{dt}}_{\omega} \cdot r^2$$



$$dt = \frac{r^2}{v \cdot b} \cdot d\phi$$

damit Integration über $d\phi$ statt dt



Symmetriewinkel $\phi(t)$

$$= [-(\pi-\theta)/2 \dots +(\pi-\theta)/2]$$

Rutherford-Streuung: Relation $b - \theta$

$$\Delta p = \int F_{\Delta p} \cdot dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{r^2} \cdot \cos\phi \cdot dt$$



$$dt = \frac{r^2}{v \cdot b} \cdot d\phi$$

$$\Delta p = \int_{-(\pi-\theta)/2}^{(\pi-\theta)/2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{v \cdot b} \cdot \cos\phi \cdot d\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{v \cdot b} \cdot 2 \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

damit ergibt sich mit

$$\Delta p = 2 \cdot m \cdot v \cdot \sin\frac{\theta}{2}$$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z \cdot Z}{v^2} \cdot \frac{1}{b}$$

Relation zwischen
Streuwinkel θ und
Streuparameter b

kleiner Stoßparameter: $b \rightarrow 0 \Rightarrow \theta \rightarrow \pi$

großer Stoßparameter: $b \rightarrow \infty \Rightarrow \theta \rightarrow 0$

