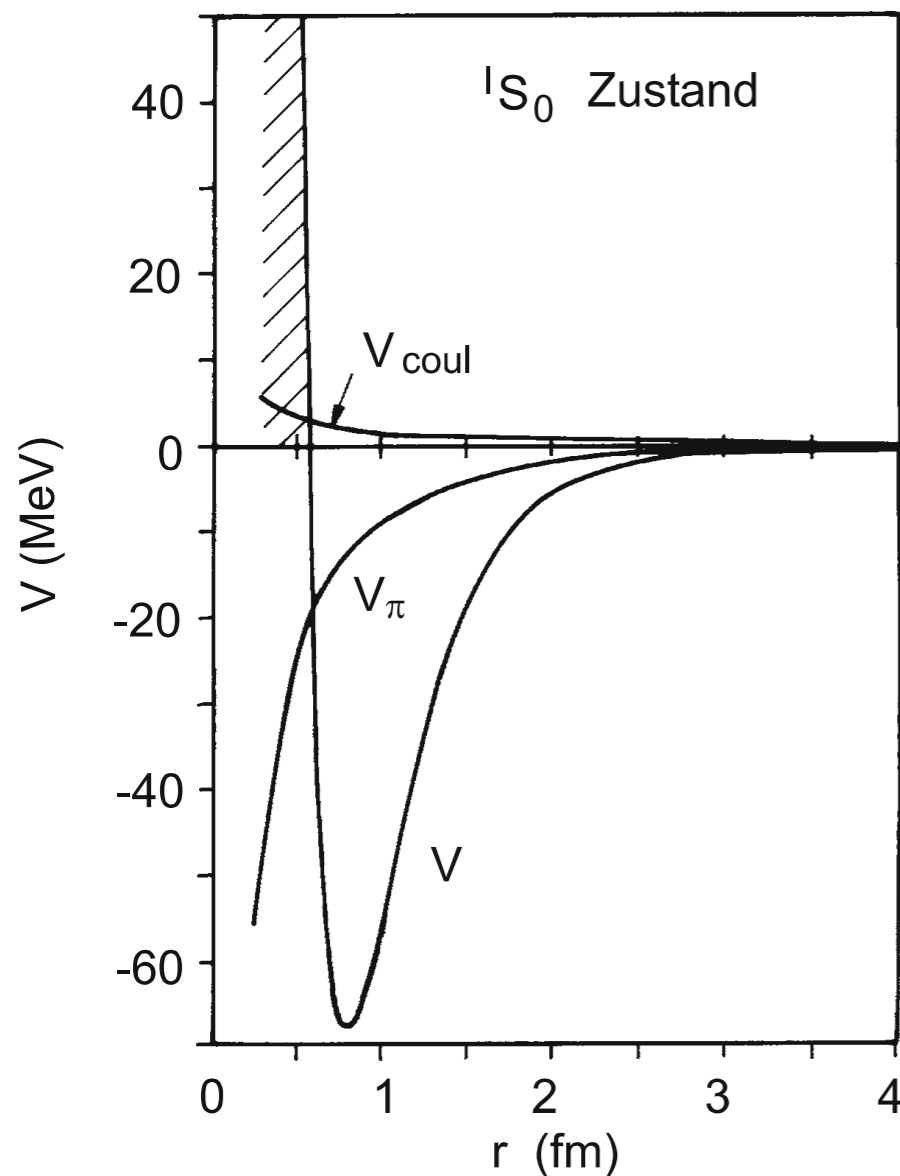


Kapitel 4.4

Struktur der Kernkräfte

Kernpotenzial für 1S_0 -Zustand



Bethe, Walter, Wiedemann

- **Anforderungen** an phänomenologisches Kernpotenzial (Einteilchennäherung) durch experimentelle Befunde
 - **Starke anziehende** Kraft mit **kurzer** Reichweite (1.5 fm)
 - **Abstoßung** bei kleinen Abständen (<0.8 fm)
 - **Absättigung** der Kernkräfte: Wechselwirkung fast nur zwischen benachbarten Nukleonen → fast konstante Bindungsenergie
 - Starke **Spin-Bahn-Kopplung** → magische Zahlen
 - **Quadrupolmomente** → kein reines Zentralpotenzial

Parametrisierung Kernpotenzial

- Allgemeiner phänomenologischer Ansatz für Kernkräfte
 - **Zentralkraft** (Deuteron: 96% 3S_1 -Zustand)
 - **Spinabhängige Zentralkraft** (Spin-Spin-Wechselwirkung)
 - **Spin-Bahn-Kopplung** (vgl. Schalenmodell)
 - Nichtzentrale **Tensorkraft** (Deuteron: 4% 3D_1 -Zustand)

- Potenzial zwischen zwei Nukleonen mit relativem Abstand \mathbf{r} , relativem Impuls \mathbf{p} , Spins \mathbf{s}_1 und \mathbf{s}_2 , Bahndrehimpuls $\mathbf{L} = \mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2$:

$$V(r) = V_0(r)$$

$+ V_{ss}(r) \frac{\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2}{\hbar^2}$	Spin-Spin
$+ V_{Ls}(r) (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2) \frac{\mathbf{L}}{\hbar^2}$	Spin-Bahn
$+ V_T(r) \left(\frac{3(\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{r})}{r^2 \hbar^2} - \frac{\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2}{\hbar^2} \right)$	Tensor

(+ weitere Terme aus Symmetriegründen → vernachlässigbar)

Yukawa-Potenzial

- Ansatz für Kernpotenzial (Yukawa, 1935):
abgeschirmtes Coulombpotenzial

$$V_0(r) = -g^2 \frac{\exp[-r/\lambda]}{r}$$

H. Yukawa



www.nobelprize.org

- Interpretation: begrenzte Reichweite λ durch Austausch **massiver skalarer virtueller Teilchen** → Vorhersage von „Mesonen“
- Reichweite = reduzierte Compton-Wellenlänge des Mesons

$$\lambda = \frac{\hbar}{m_{\text{Meson}} c}$$

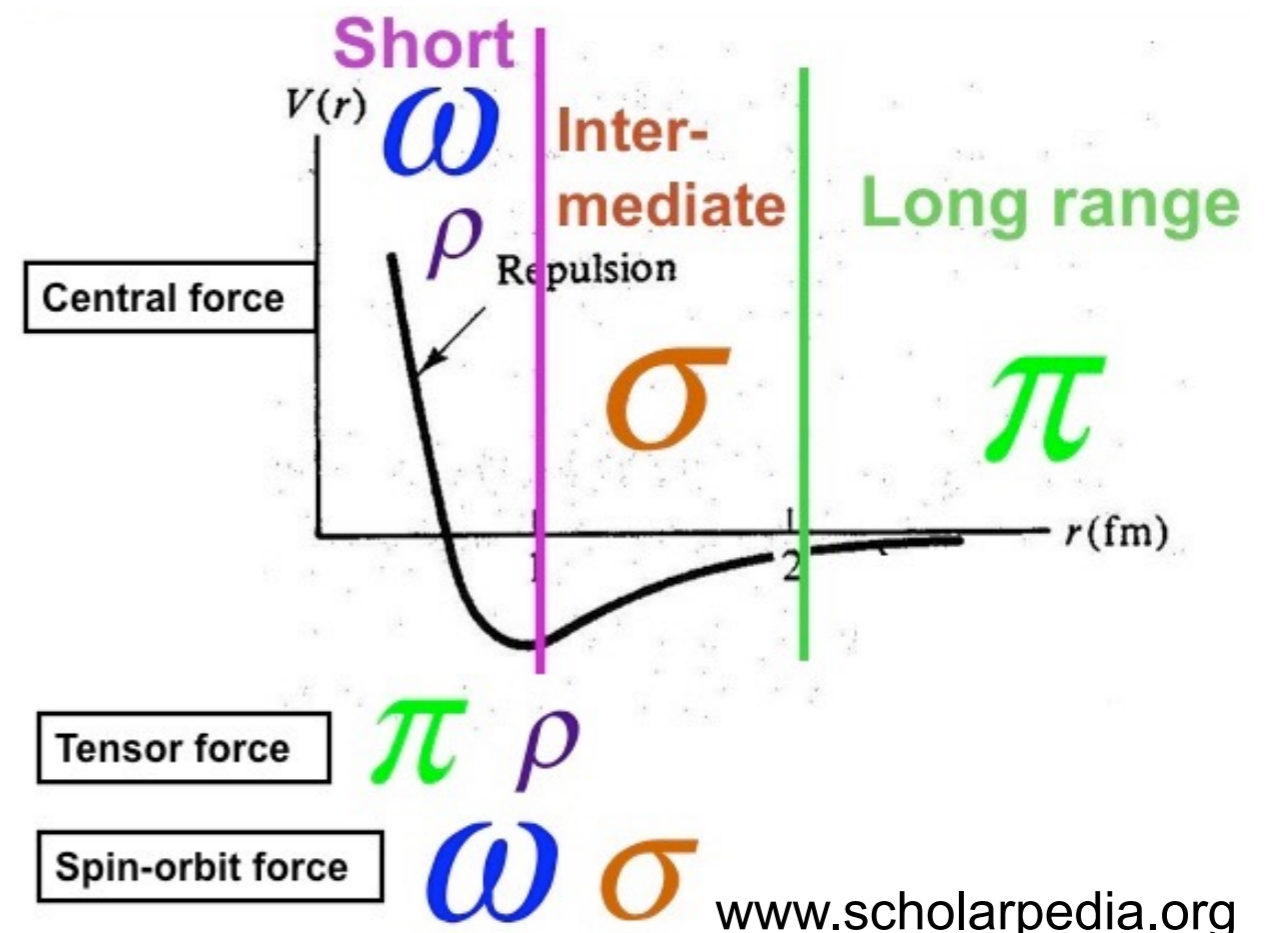
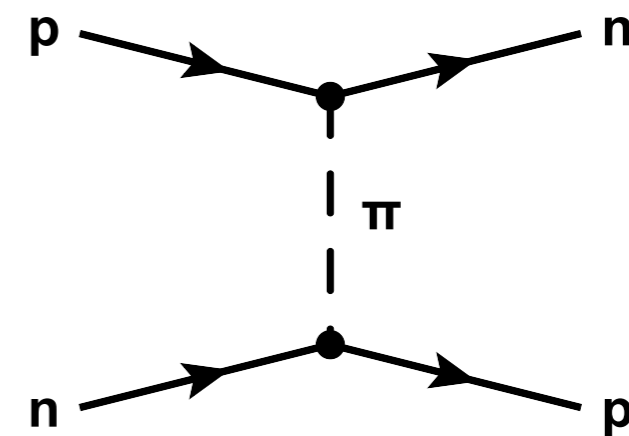
- Vorhersage des **Pions**: Reichweite $\lambda \approx 1.5 \text{ fm}$ → $m_{\text{Meson}} \approx 130 \text{ MeV}/c^2$
- 1947: Entdeckung des geladenen Pions in kosmischer Strahlung,
heute experimentell: $m(\pi^\pm) = 139.57018 (35) \text{ MeV}/c^2$

Mesonenaustausch

- Austausch **einzelner Pionen**:
 - **Anziehende** Wechselwirkung zwischen Nukleonen für Abstände $> 1-2$ fm
 - **Tensorkraft** (\rightarrow später)

- Genauere Modellierung der Kernkräfte: weitere Prozesse benötigt
 - Austausch von ≥ 1 **skalaren Mesonen** ($\pi, \eta, f_0 = \sigma$): **Anziehung** bei mittleren Abständen
 - Austausch von **Vektormesonen** (ρ, ω): **Abstoßung** bei kleinen Abständen

Feynman-Diagramm Pionenaustausch



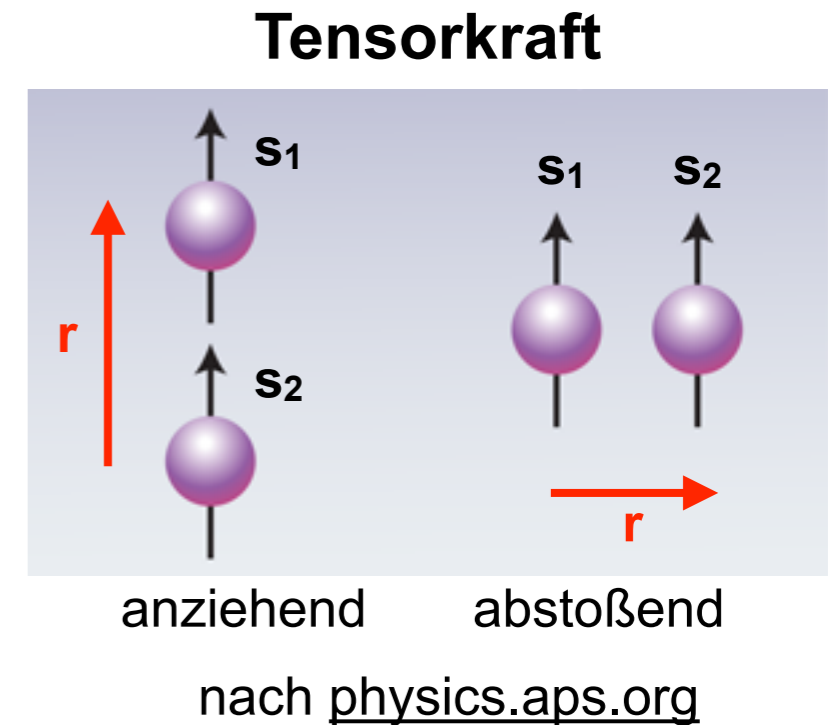
www.scholarpedia.org

Mesonenaustausch

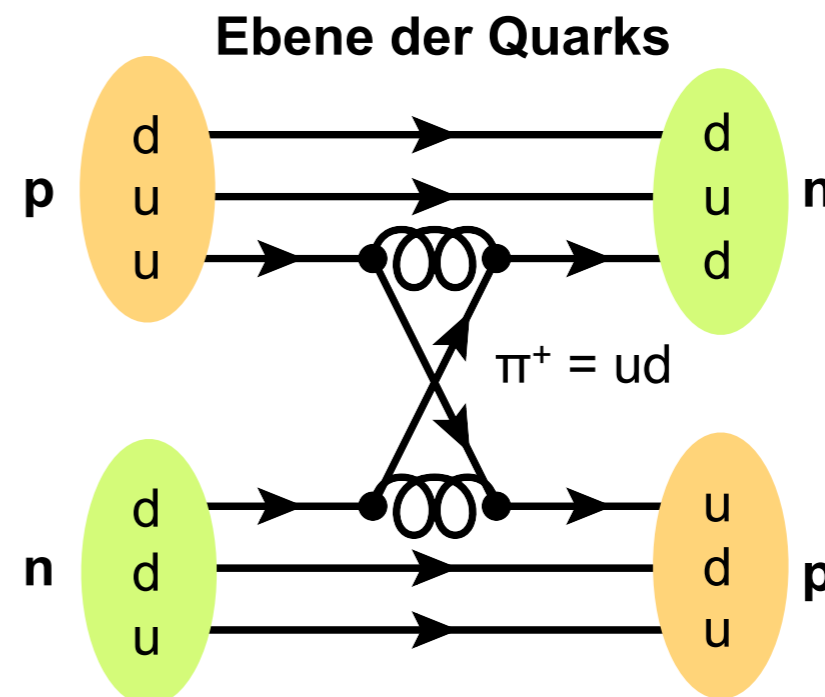
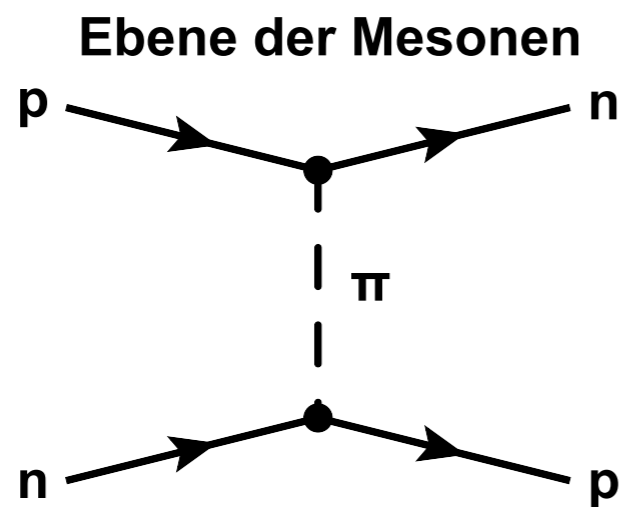
■ Pionenaustausch und **Tensorkraft**

- Erklärung des Quadrupolmoments im Deuteron durch Kraft abhängig von **Orientierung der Spins** relativ zu Verbindungslinie der Nukleonen
- Beschreibung: **Tensorkraft** mit Potential

$$V \sim 3 \frac{(\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{r})}{|\mathbf{r}|^2} - \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2$$



■ Pionenaustausch auf **Quarkebene**



Abstoßung im Quarkmodell

- Abstoßung bei kleinen Abständen: **Spin-Spin-Wechselwirkung** der Quarks
 - Kleine Abstände zwischen zwei Nukleonen: **Wellenfunktionen** der sechs Quarks **überlappen**
 - Drehimpuls $\ell = 0$ für alle Quarks: Energieerhöhung durch **parallel ausgerichtete Spins** oder durch **Drehimpulsänderung** für ≥ 2 Quarks
- Fazit: Mesonenaustausch
 - Mesonenaustausch: gutes **Modell** aber **keine vollständige Theorie** der Wechselwirkung zwischen Nukleonen
 - Sehr erfolgreich bis in 1980er Jahre
 - Neuere theoretische Entwicklungen: **effektive Feldtheorie** (chirale Störungstheorie) und **Gittereichtheorie** (engl.: lattice gauge theory)

Kurze Zusammenfassung

- Kern = komplexes **Vielteilchensystem**
 - Starke Kraft = **Restwechselwirkung** der QCD
 - Reichhaltige **Struktur der Kernkräfte**: abstoßende und anziehende Kräfte, Richtungsabhängigkeit, Korrelationen zwischen ≥ 2 Teilchen, kollektive Kernanregungen, Halo-Kerne, ...
 - Bis heute **keine vollständige Theorie** der Kernkräfte → Modelle
- Modellierung der Kernkräfte:
 - Phänomenologische **Parametrisierung** des Kernpotenzials: Zentralkraft, Spin-Spin- und Spin-Bahn-Kopplung, Tensorkraft
 - Modell für Beiträge zum Kernpotenzial: Austausch eines oder mehrerer **virtueller Mesonen**

Kapitel 5

Instabile Kerne

Überblick

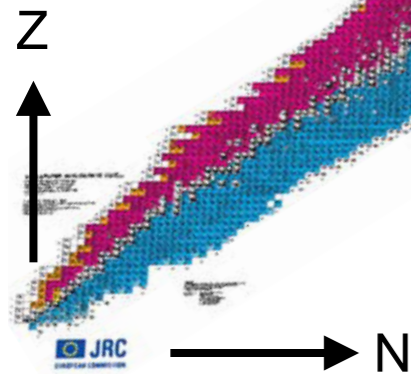
Farbcode:

stabil

β^- -Zerfall

β^+ -Zerfall

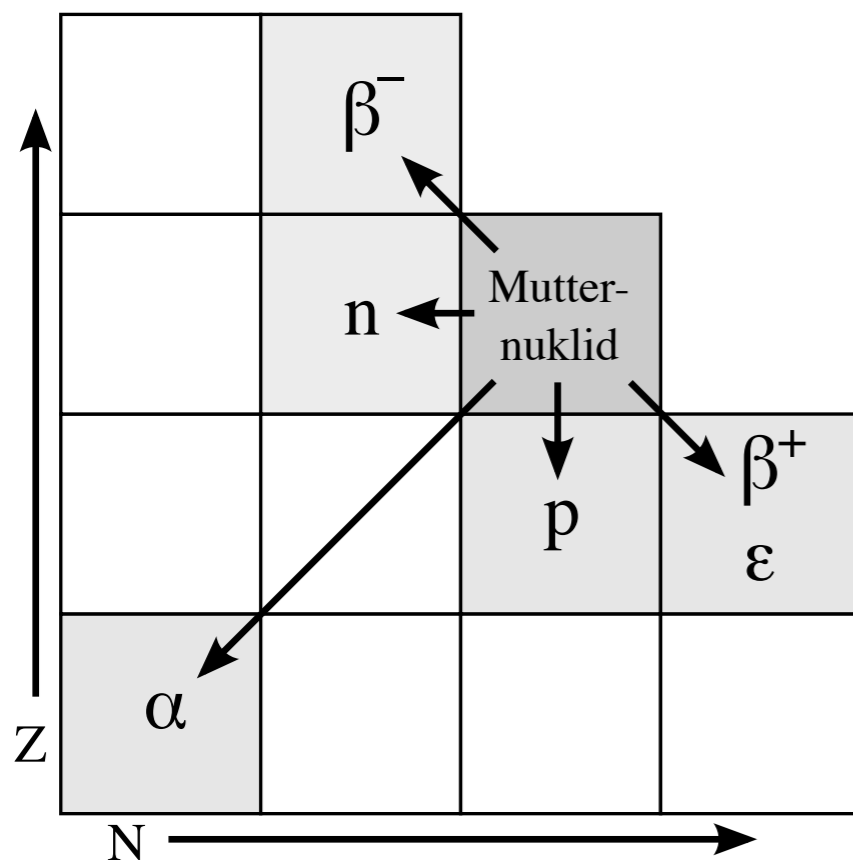
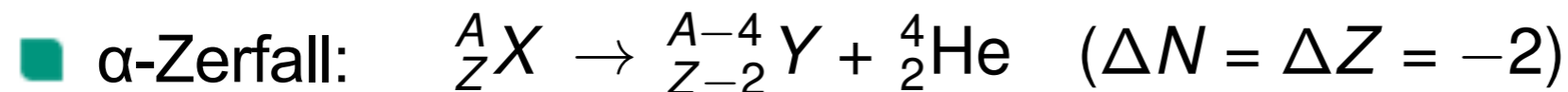
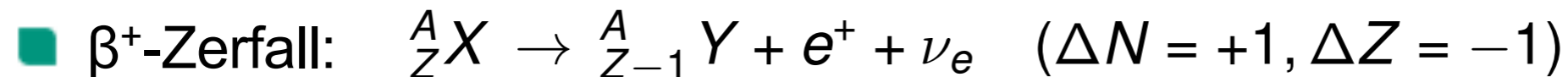
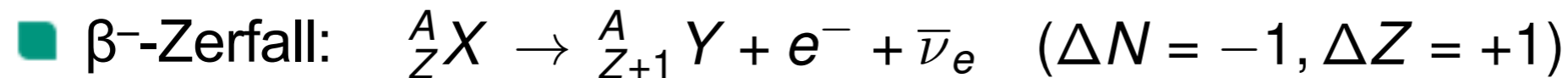
α -Zerfall



- Nur sehr wenige stabile Kerne, alle anderen **zerfallen spontan** (vgl. Nuklidkarte), wichtigste Mechanismen:
 - Überschuss an Neutronen: **β^- -Zerfall** ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)
 - Überschuss an Protonen: **β^+ -Zerfall** ($p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$)
 - Schwere Kern mit genug Energie zur Bildung von zwei Tochterkernen, einer davon meist Heliumkern: **α -Zerfall**
- **Angeregte Kernzustände**: Zerfall unter Emission von **Gammastrahlung**
- Sehr schwere Kerne: (induzierte) **Kernspaltung**

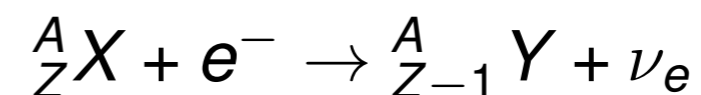
Reaktionen in Nuklidkarte

Radioaktive Zerfälle:



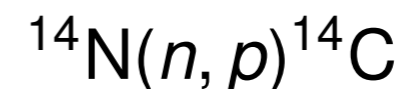
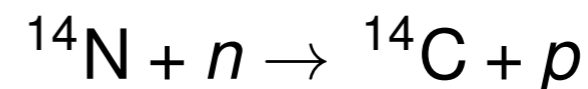
Weitere Prozesse:

- Elektroneneinfang (engl.: electron capture, EC):



- Gammastrahlung: ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$

- Weitere Kernreaktionen, z. B. Beispiel (n,p)-Prozess:



Kurzschreibweise: Ausgangskern (Projektil, Ejektil) Endkern

Kapitel 5.1

Zerfallsgesetz

Zerfallsgesetz und Aktivität

- Betrachte Ensemble von N instabilen Kernen:

- Zerfallsrate proportional zu Zahl der Kerne

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \equiv -A(t)$$

- Lösung der Differenzialgleichung: **Zerfallsgesetz** $N(t) = N_0 \exp[-\lambda t]$

- **Aktivität A** des Ensembles:

- Zeitabhängigkeit der Aktivität: $A(t) = \lambda N_0 \exp[-\lambda t]$

- SI-Einheit **Becquerel**, $1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$ (ein radioaktiver Zerfall pro Sekunde)

- Manchmal noch alte Einheit **Curie**, $1 \text{ Ci} = 3.7 \text{ GBq}$, angelehnt an Aktivität von $1 \text{ g } ^{226}\text{Ra}$

- Typische Größenordnungen von Aktivitäten:

Menschlicher Körper	kBq
Radioaktive Quelle im Praktikum	MBq
^{60}Co -Quelle zur Sterilisation von Lebensmitteln	PBq

Lebensdauer und Breite

- Charakteristisches Zeitintervall: **mittlere Lebensdauer τ**

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t A(t) dt = \dots = \frac{1}{\lambda}$$

- Nach $t = \tau$: nur noch **$1/e = 36.8\%$** der Kerne vorhanden
- Typische Werte von Lebensdauern:

Zerfall Top-Quark ($t \rightarrow Wb$)	$5 \cdot 10^{-25}$ s
Betazerfall Tritium	17.7 a
Alphazerfall natürliches Uran (^{238}U)	$6.4 \cdot 10^9$ a
Zerfall des Protons	$> 2 \cdot 10^{29}$ a

- Unschärferelation: instabile Zustände mit mittlerer Lebensdauer τ
 → charakteristische **Breite Γ** der Energieverteilung

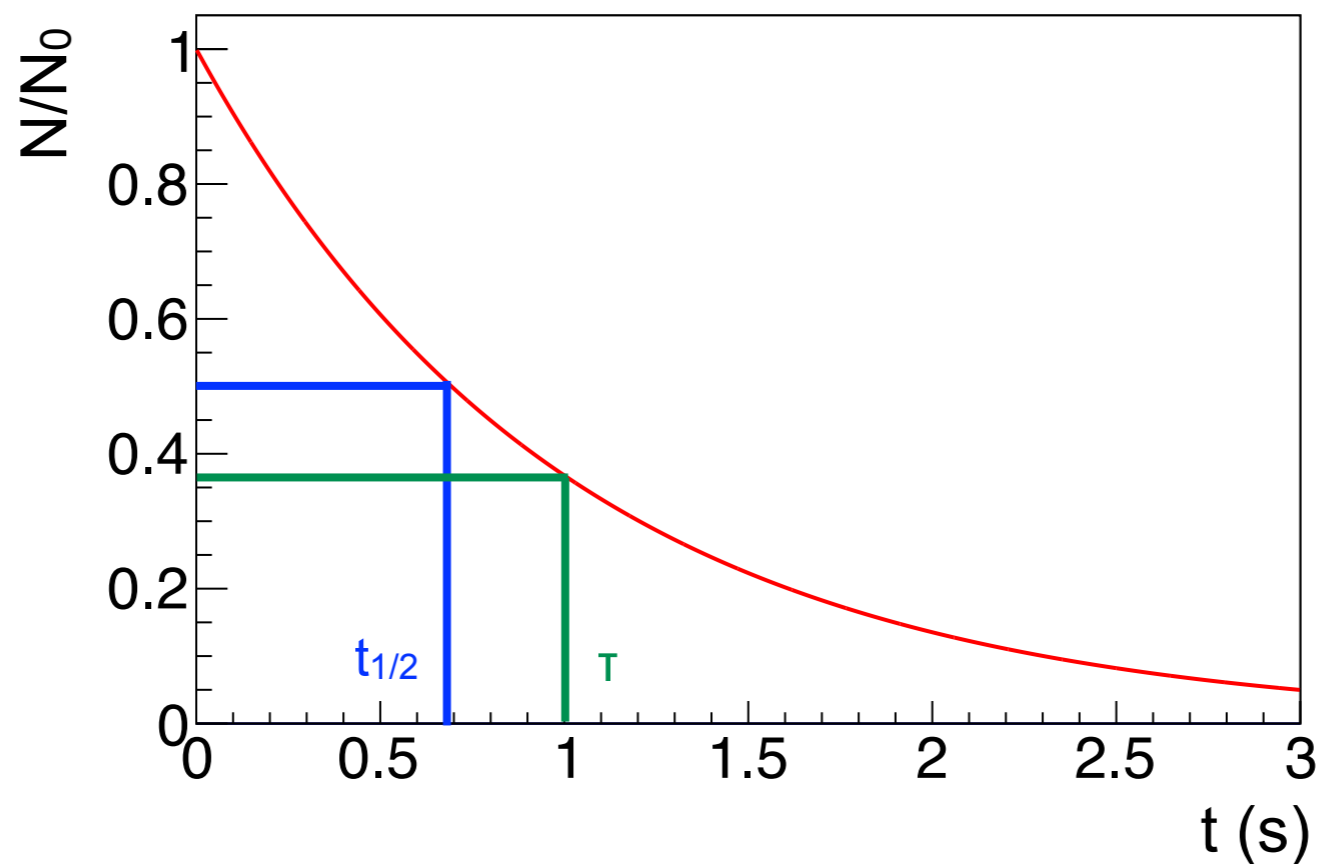
$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$$

Halbwertszeit

- Alternatives charakteristisches Zeitintervall: **Halbwertszeit $t_{1/2}$**

$$N(t_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0 \quad \rightarrow \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2 \approx 0.693 \cdot \tau$$

- Nach $t = t_{1/2}$: nur noch **50%** der Kerne vorhanden



Zerfallsbreite

- Zerfallsbreite = **Energieunschärfe** eines instabilen Teilchenzustands („Resonanz“)

- Beispiel Z-Boson:

- Zerfallsbreite: $\Gamma = 2.4952(23)$ GeV

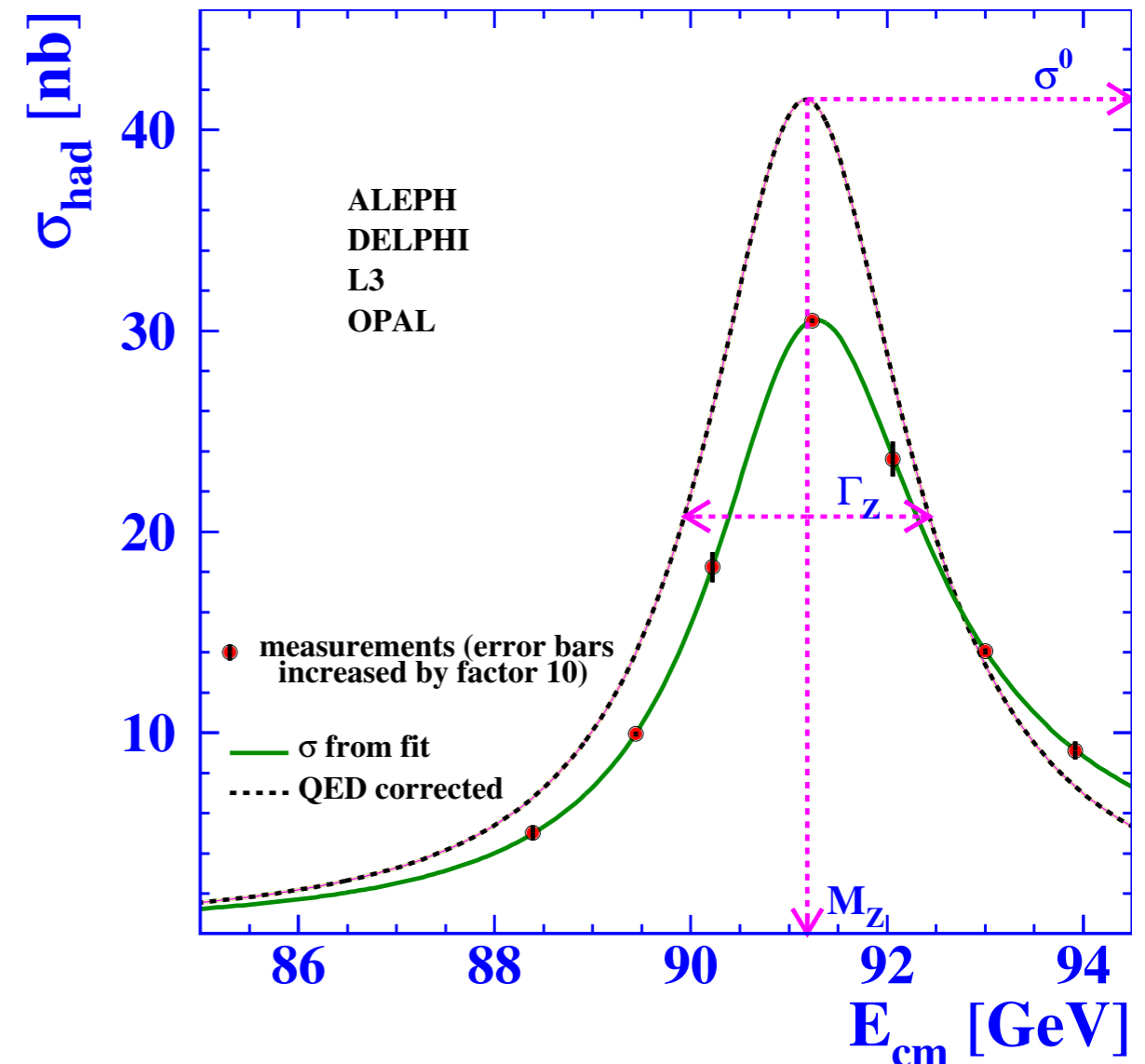
- Lebensdauer: $\tau \approx 2.6 \cdot 10^{-25}$ s

- Beschreibung mit **Breit-Wigner-Verteilung** (vgl. Rechnernutzung)

$$f(E; E_0, \Gamma) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma/2}{(E - E_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

- Γ entspricht voller Breite bei halber Höhe (full width at half maximum, FWHM)

Breite der Z-Resonanz



Phys. Rep. 427 (2006) 257

Zerfälle mit Verzweigung

- Gleichzeitige (konkurrierende) Zerfälle in **unterschiedliche Zerfallskanäle**, z. B.

- ^{212}Bi : β -Zerfall in ^{212}Po (64%) und α -Zerfall in ^{208}Tl (36%)

- π^+ : schwache Zerfälle in $\mu^+ \nu_\mu$ (99.99%) und $e^+ \nu_e$ (0.01%)

- **Zerfallsgesetz** für Zerfälle mit Verzweigung:

$$\frac{dN(t)}{dt} = - \sum \lambda_i N(t) \quad \rightarrow \quad N(t) = N_0 \exp \left[- \sum \lambda_i t \right] \equiv N_0 \exp \left[- \lambda_{\text{tot}} t \right]$$

- **Totale Breite Γ_{tot}** : Summe der **Partialbreiten** $\Gamma_i = \hbar \lambda_i$

$$\Gamma_{\text{tot}} = \frac{\hbar}{\tau} = \hbar \lambda_{\text{tot}} = \sum (\hbar \lambda_i) = \sum \Gamma_i$$

- **Verzweigungsverhältnis B_i** (engl.: branching fraction, branching ratio):
Anteil der Partialbreite für einen Zerfall an der totalen Breite

$$B_i = \frac{\Gamma_i}{\Gamma_{\text{tot}}}$$

Weitere Strahlungseinheiten

- **Energiedosis D** = deponierte Energie pro Masse
 - SI-Einheit **Gray**, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (alte Einheit: $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$)
- **Äquivalentdosis H**: gewichtete Energiedosis $H = w_R \cdot D$
 - SI-Einheit **Sievert**, $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ (alte Einheit: $1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$)
 - w_R : **Strahlungswichtungsfaktor** (früher: Qualitätsfaktor)
 - Berücksichtigung von Strahlungsart, Energiebereich, zeitlicher Verteilung

Strahlenart und Energiebereich	Strahlungs- Wichtungsfaktor w_R
Photonen, alle Energien	1
Elektronen und Myonen ⁷ , alle Energien	1
Neutronen $E_n < 10 \text{ keV}$	5
$10 \text{ keV} \leq E_n \leq 100 \text{ keV}$	10
$100 \text{ keV} < E_n \leq 2 \text{ MeV}$	20
$2 \text{ MeV} < E_n \leq 20 \text{ MeV}$	10
$E_n > 20 \text{ MeV}$	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen, $E > 2 \text{ MeV}$	5
α -Teilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne	20

 Gruppen, Grundkurs Strahlenschutz,
 Springer 2008

Weitere Strahlungseinheiten

- **Effektive Dosis H_{eff} :** gewichtete Äquivalentdosis $H_{\text{eff}} = \sum_T w_T \cdot H_T$
- SI-Einheit **Sievert**
- H_T : Äquivalentdosis in Gewebeart T (engl.: tissue)
- w_T : **Gewebe-Wichtungsfaktor**

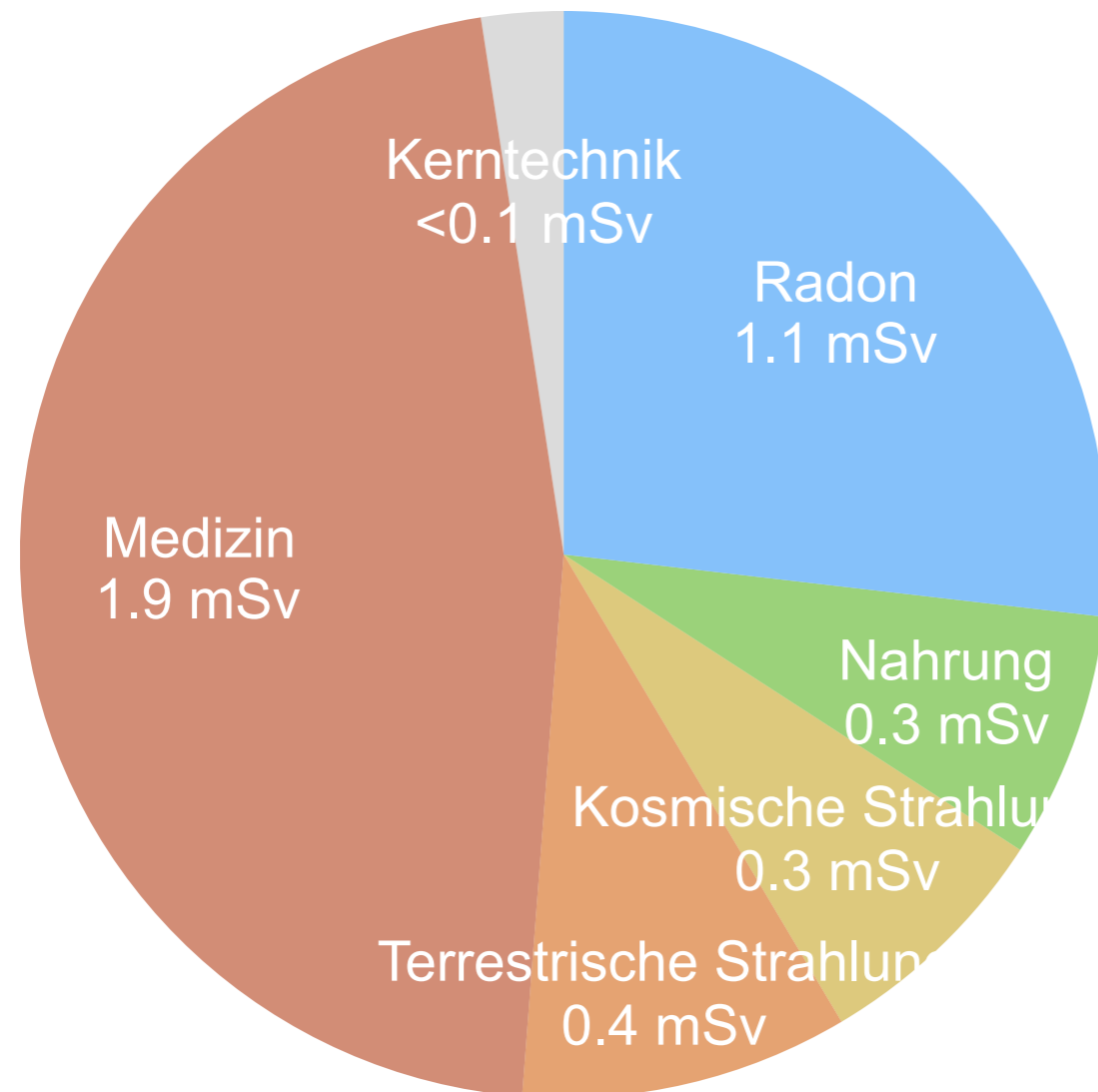
Organ oder Gewebe	Gewebe-Wichtungsfaktor w_T
Keimdrüsen	0,20
rotes Knochenmark	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
andere Organe oder Gewebe	0,05

Gruppen, Grundkurs Strahlenschutz, Springer 2008

- **Dosisleistung:** Dosis pro Zeit (in Gy/s bzw. Sv/s)

Strahlenbelastung

Strahlenbelastung in Deutschland 2011 (effektive Dosis)



Datenquelle: www.bfs.de

- Mittlere Strahlenbelastung in Deutschland: ca. **4 mSv/Jahr**
- Wichtigster natürlicher Beitrag: Einatmen von **Radonfolgeprodukten**
- Wichtigster zivilisatorischer Beitrag: **Medizin**
- Berufliche Strahlenexposition: **ALARA-Prinzip** („as low as reasonably achievable“)
- Grenzwert für berufliche Exposition: 20 mSv/Jahr
- Grenzwert für Allgemeinbevölkerung: 1 mSv/Jahr

Kurze Zusammenfassung

- Radioaktive Zerfälle: **exponentielles Zerfallsgesetz** $N(t) = N_0 \exp[-\lambda t]$ mit charakteristischen Größen
 - Nach **mittlerer Lebensdauer** $\tau = 1/\lambda$: nur noch $1/e$ der Kerne vorhanden
 - Nach **Halbwertszeit** $t_{1/2} = \tau \ln 2$: nur noch $1/2$ der Kerne vorhanden
 - (Energie-) **Breite** instabiler Zustände: $\Gamma = \hbar/\tau$
 - Zerfälle mit Verzweigung: **Verzweigungsverhältnis** $B_i = \Gamma_i/\Gamma_{\text{tot}}$

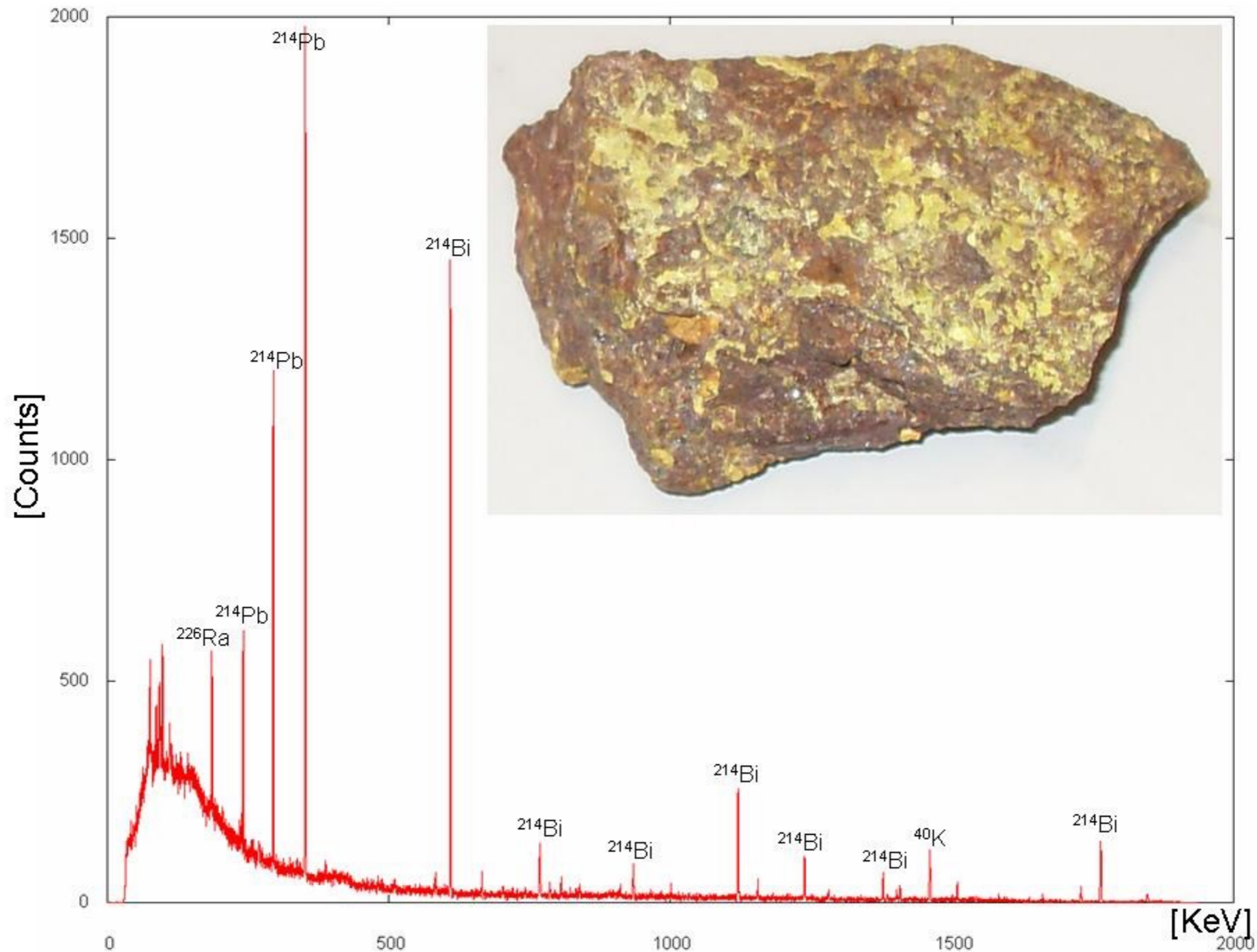
- Strahlungseinheiten:
 - **Aktivität** einer Quelle: $A(t) = \lambda N(t)$, Einheit **Becquerel** (1 Bq = 1/s)
 - **Energiedosis**, Einheit **Gray** (1 Gy = 1 J/kg)
 - **Äquivalentdosis** (\rightarrow Gewichtung Energiedosis mit Strahlungsart), Einheit **Sievert** (1 Sv = 1 J/kg)
 - **Effektive Dosis** (\rightarrow Gewichtung Äquivalentdosis mit bestrahltem Gewebe), Einheit **Sievert** (1 Sv = 1 J/kg)

Kapitel 5.2

Gammastrahlung

- Gammastrahlung = **Photonenemission** angeregter Kerne:
 - ≥ 1 **monoenergetische** Photonen, Energiebereich 100 keV bis 10 MeV
 - gg-Kerne: große Anregungsenergie (Trennung gepaarter Nukleonen), alle anderen Kerne: „erreichbare“ Energieniveaus (Abstand einige 100 keV)
 - Typische Halbwertszeiten angeregter Kerne: **10^{-15} s bis 10^{-9} s** (Ausnahme **Kernisomere**: längere Lebensdauer, $t_{1/2} > 10^{-9}$ s)
 - Gammaskopie: **Spektrallinien** (\rightarrow Photonenenergie) und **Winkelverteilung** relativ zum Kernspin (\rightarrow Quantenzahlen: Spin, Parität)
- Abregung angeregter Kerne **ohne Photonemission**:
 - **Innere Konversion**: Übertragung der Photonenenergie auf Hüllenelektron
 \rightarrow diskretes Spektrum von **Konversionselektronen** mit $E_{\text{kin},e} = E_{\gamma} - E_{B,e}$
 \rightarrow Auffüllen der Leerstelle: Röntgenübergänge, Emission Auger-Elektronen
 - **Innere e^+e^- -Paarbildung** im Kernfeld falls $Q = E_{\gamma} > 2m_e$

Gammastrahlenspektrum von Uranerz



MuseI007, Gammastrahlenspektrum_Uranerz.jpg, CC BY-SA3.0

Multipolarität

- Klassifikation elektromagnetischer Übergänge in Kernen nach **Multipolordnung** (vgl. Atomphysik)
- Ansatz: Multipolentwicklung der Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern
 - Fermis Goldene Regel: **Zerfallskonstante** aus Matrixelement & Phasenraum

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle \psi_f | \mathcal{M}_{fi} | i \rangle|^2 \rho(E_f)$$

- Matrixelement: **elektromagnetische Wechselwirkung** $\sim \frac{e}{m} \mathbf{p} \cdot \mathbf{A}$
- Niedrigste Multipolmomente: **elektrischer Dipol (E1)** und **magnetischer Dipol (M1)** mit Zerfallskonstanten

$$\lambda_{E1} = \frac{e^2}{3\pi\epsilon_0\hbar^4 c^3} E_\gamma^3 |\langle \psi_f | \mathbf{r} | \psi_i \rangle|^2 \quad \text{Wechselwirkung mit elektrischem Dipol er}$$

$$\lambda_{M1} = \frac{\mu_0}{3\pi\hbar^4 c^3} E_\gamma^3 |\langle \psi_f | \boldsymbol{\mu} | \psi_i \rangle|^2 \quad \text{mit } \boldsymbol{\mu} = \frac{e}{2m} (\mathbf{L} + g\mathbf{s}) \text{ magnetisches Moment}$$

(\mathbf{L} Drehimpuls, \mathbf{s} Spin, g Landé-Faktor)

- **Auswahlregeln für Gammastrahlung: Paritätserhaltung und Drehimpulserhaltung** in elektromagnetischer Wechselwirkung
 - Paritätsoperation **P**: Punktspiegelung am Ursprung, $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$ (\rightarrow später)
 - Drehimpulserhaltung: Änderung des Gesamtdrehimpulses **J** durch relativen Drehimpuls **L** und Spin **s** des emittierten Photons: $\ell = \mathbf{L} + \mathbf{s}$
 - Charakterisierung des Anfangs- und Endzustands: Eigenwerte des Paritätsoperators $P_{i,f}$ und Gesamtdrehimpulsoperators $J_{i,f}$
- **Elektromagnetische Wechselwirkung: dieselbe Physik nach Paritätsoperation \rightarrow Paritätssymmetrie erhalten**
 - Multipolentwicklung: **Kugelflächenfunktionen** mit **definierter Parität**
 \rightarrow Auswahlregel aufgrund der **Paritätserhaltung**
 - Multipolordnung gegeben durch Eigenwert von ℓ
 - Elektrische Übergänge $E\ell$: $P_f P_i = (-1)^\ell$
 - Magnetische Übergänge $M\ell$: $P_f P_i = (-1)(-1)^\ell = (-1)^{(\ell+1)}$

Auswahlregeln

■ Austauschteilchen: **einzelnes Photon**

■ Drehimpulserhaltung ($\ell = L + s$):

$$\mathbf{J}_f = \mathbf{J}_i + \boldsymbol{\ell} \quad \rightarrow \quad |J_f - J_i| \leq \ell \leq J_f + J_i$$

■ Photon = masseloses Spin-1-Teilchen:

$s = 1$, zwei Polarisierungen $m_s = \pm 1$

\rightarrow kein Multipolübergang $J_i = 0 \rightarrow J_f = 0$

■ Photon kann zusätzlich relativen Drehimpuls L forttragen

■ Zusammenfassung: **Auswahlregeln**

■ Dipolübergänge E1, M1: $\Delta J = 0, \pm 1$

■ Quadrupolübergänge E2, M2: $\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2$

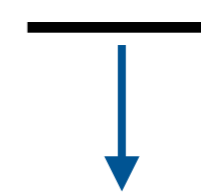
■ Multipolübergänge $E\ell, M\ell$: $\Delta J = 0, \dots, \pm\ell$

■ Übergänge mit $J_i = 0 \rightarrow J_f = 0$ verboten

■ Parität: $E\ell \rightarrow P_f P_i = (-1)^\ell, M\ell \rightarrow P_f P_i = (-1)^{\ell+1}$

Beispiele (nach Bethke):

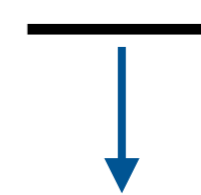
$$J^p = 1^+$$



$$J^p = 0^+$$

$\ell = 1, P_f P_i = 1$
M1-Übergang

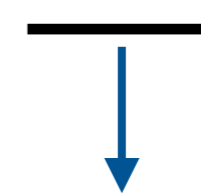
$$J^p = 1^-$$



$$J^p = 0^+$$

$\ell = 1, P_f P_i = -1$
E1-Übergang

$$J^p = 3/2^+$$

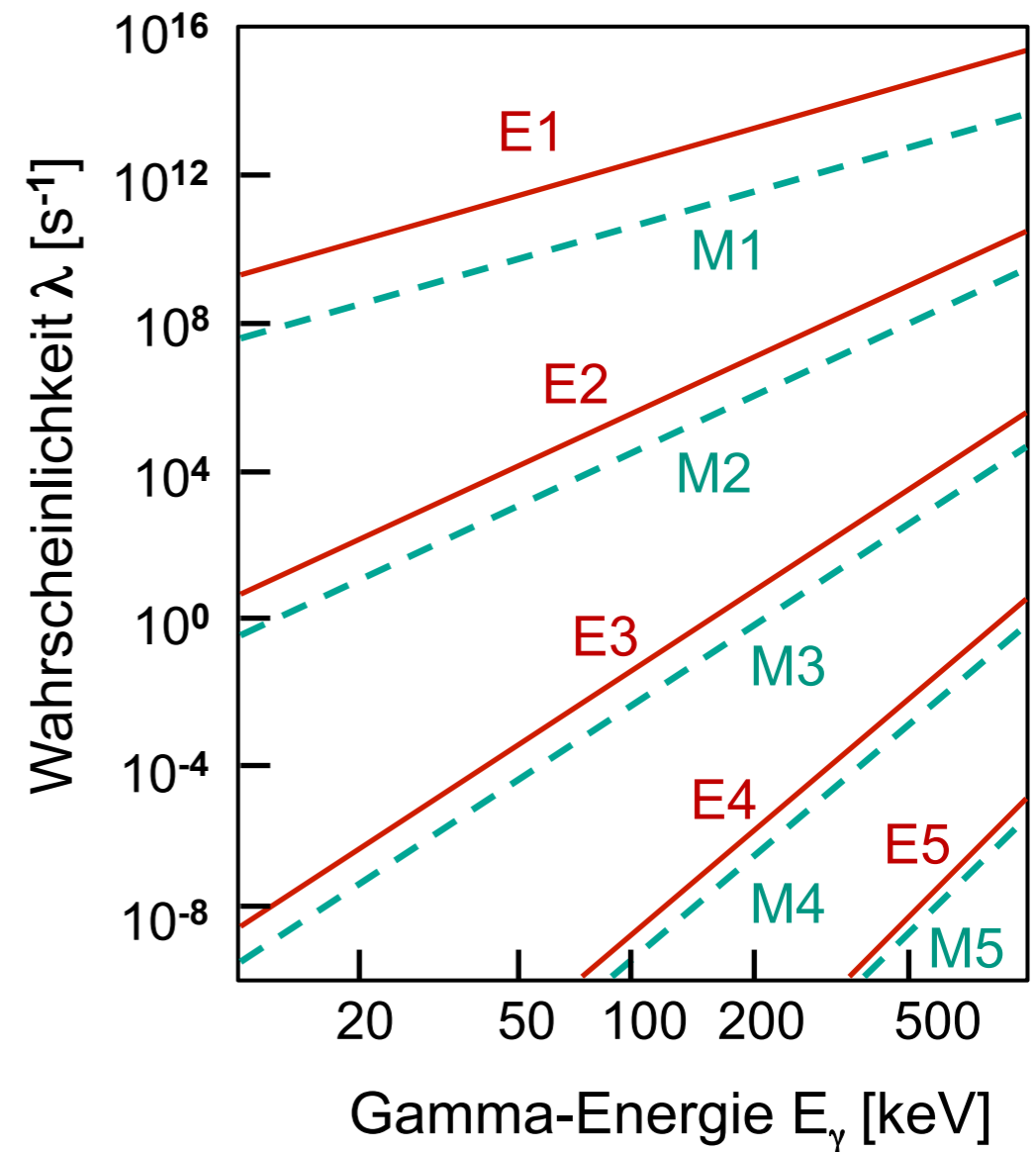


$$J^p = 1/2^+$$

$1 \leq \ell \leq 2, P_f P_i = 1$
gemischter M1-
und E2-Übergang

Zerfallskonstante

- Gesamter Gammazerfall:
Überlagerung erlaubter Übergänge
- Wichtigkeit der Übergänge über
Zerfallskonstante λ
- Für dieselbe Multipolordnung:
Zerfallskonstante für $M\ell$ **kleiner** als für $E\ell$ (zusätzlicher Faktor v/c), höhere Multipolordnungen **stark unterdrückt**
- Beispiel $3^+ \rightarrow 1^+$ -Übergang:
E2, M3, E4 erlaubt, E2 dominant
- Beispiel ^{110m}Ag : erster erlaubter Übergang $6^+ \rightarrow 2^-$ (M4)
→ metastabiles Isomer mit $t_{1/2} = 249.8$ d
- **Starke Energieabhängigkeit:**

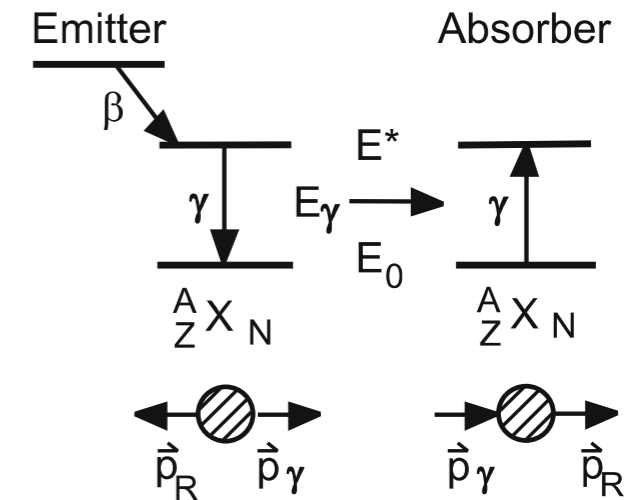


nach S.A. Moszkowski, Theory of Multipole Radiation, 1965

Mößbauer-Effekt

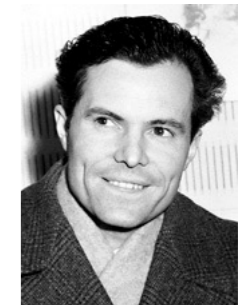
■ Kernresonanzfluoreszenz

- Resonante Absorption von Photonen in Atomkern:
 $E_\gamma = E_f - E_i = E^* - E_0$
- Zu beachten: Auswahlregeln und Kinematik
- Impulsübertrag auf Kern \rightarrow Photon kann nicht von freien Kernen emittiert und wieder absorbiert werden (trotz endlicher Breite der Energieniveaus)



Bethe, Walter, Wiedemann

R. Mößbauer



www.nobelprize.org

■ Mößbauer (1958)

- Kerne in Kristallgitter: Impulsübertrag auf **gesamtes Gitter**
 \rightarrow Resonanzbedingung durch langsame Bewegung des Kristalls erfüllt
- Quantenmechanik: endliche Wahrscheinlichkeit, bei Stoß keine Energie auf Gitter zu übertragen (Debye-Waller-Faktor)
- Anwendung: extrem genaue **Frequenzmessung**, z. B. Linienaufspaltung im Magnetfeld (\rightarrow lokale B-Felder)

Kurze Zusammenfassung

- Gammastrahlung durch **Photonenemission** angeregter Kerne
 - **Monoenergetische** Photonen, 100 keV bis einige MeV
 - Überlagerung von Multipolübergängen verschiedener Ordnung
 - Auswahlregeln für **Parität**:
 $P_f P_i = (-1)^\ell$ für elektrische Übergänge $E\ell$,
 $P_f P_i = (-1)^{(\ell+1)}$ für magnetische Übergänge $M\ell$
 - Auswahlregeln für **Drehimpuls**: $\mathbf{J}_f = \mathbf{J}_i + \ell$
 $\rightarrow |J_f - J_i| \leq \ell \leq J_f + J_i$ und $0 \rightarrow 0$ -Übergänge verboten
 - Vergleich der Zerfallskonstanten für dasselbe ℓ : $\lambda_{E\ell} > \lambda_{M\ell}$
 - Vergleich der Zerfallskonstanten für ℓ und $\ell+1$: $\lambda_{E\ell} \gg \lambda_{E(\ell+1)}$, $\lambda_{M\ell} \gg \lambda_{M(\ell+1)}$
- Anwendung: Gammaskopie