

Atomkerne

- Isotope und Isobare
- Radioaktiver Zerfall
- Zerfallsgesetz
- Nachweis radioaktiver Strahlung
- Kernreaktionen
- Dosimetrie
- Anwendungen

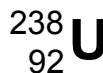
Zusammensetzung von Kernen

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen = Nuklidon

Protonenzahl Z = Ordnungszahl

Neutronenzahl N

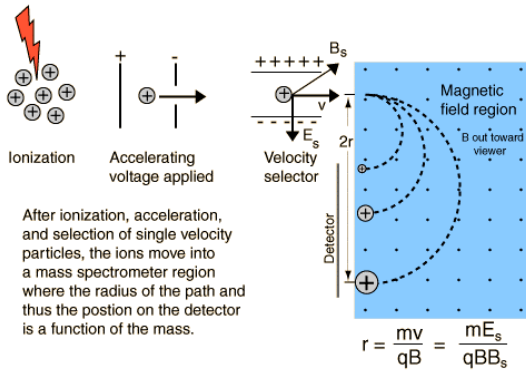
Massenzahl A = Nukleonenzahl: $A = Z + N$



Z bestimmt Stellung im Periodensystem

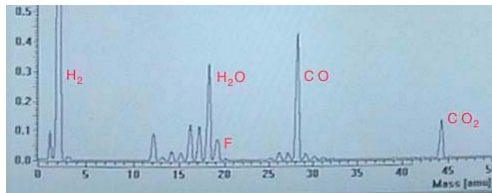
Bei gleichen Z unterschiedliche N : **Isotope** oder **isotope Nuklide**

Massenspektrometer



Auflösungsvermögen
 $\Delta m/m = 1/50\,000$

After ionization, acceleration, and selection of single velocity particles, the ions move into a mass spectrometer region where the radius of the path and thus the position on the detector is a function of the mass.



Rutherford'sches Atommodell

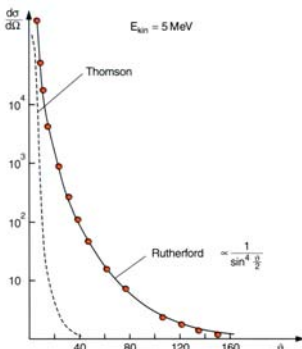
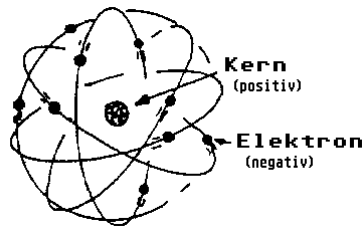


Abb. 2.88. Vergleich zwischen den experimentellen Ergebnissen Rutherfords (Kreise), dem W.Q. für Coulombstreuung und dem Streuquerschnitt des Thomson-Modells.

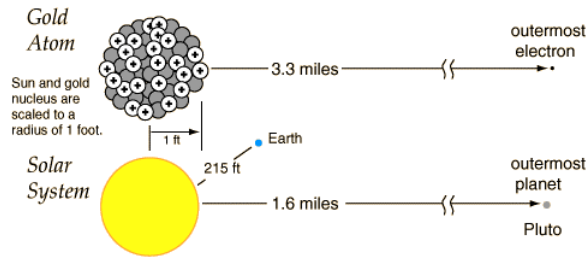


Messung

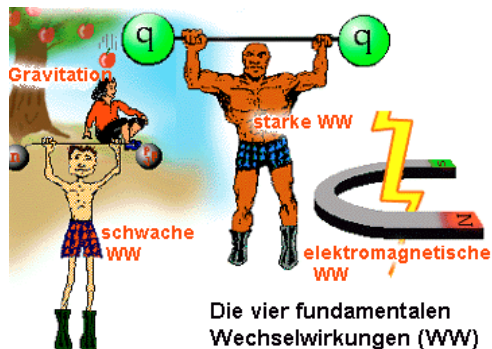


Modell: Leeres Atom
 Kernradius : Atomradius
 1 : 100 000

Atomkerne

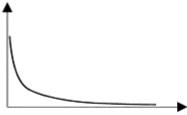
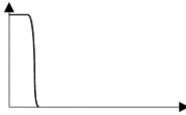


Kernkräfte



Wechselwirkung:	Gravitation	schwach	elektromagnetisch	stark
Austauschteilchen:	Graviton	W^+ , W^- und Z^0	Photon	Gluon
relative Stärke:	10^{-38}	10^{-5}	10^{-2}	1
"koppelt an"...	Masse	schwache Ladungen	elektrische Ladungen	Farbladung (Quarks und Gluonen)

Vergleich Kernkräfte

	Coulombkraft	Kernkraft
Reichweite	bis ins Unendliche; mit $1/r^2$	bis etwa $1,5 \cdot 10^{-15}$ m kurzreichweitig
Verlauf	 anziehend/abstoßend	 "stark" anziehend
betrifft	geladene Teilchen	Kernbausteine (p,n) ladungsunabhängig

Atommasse

Relativen Atommassen: Bezugsgröße ist die Masse des neutralen ^{12}C Isotopes

Für die Atommassenkonstante u (gleich $(1/12)$ der Masse von ^{12}C) gilt:

$$1 u = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Massendefekte

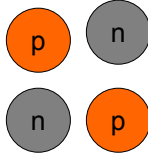
Massen der Kernbausteine



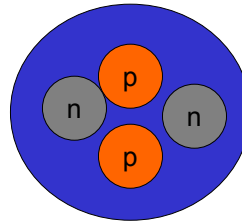
Proton $m_p = 1,0072765 \text{ u}$



Neutron $m_n = 1,0086650 \text{ u}$



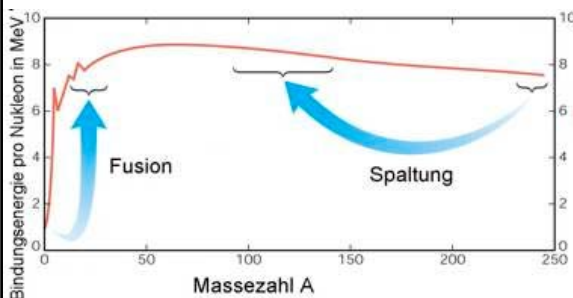
2 p und 2 n ungebunden
 $m = 4,00318830 \text{ u}$



Heliumkern: 2 p und 2 n
 $m = 4,0015061 \text{ u}$

Massendefekt $\Delta m = 2 m_p + 2 m_n - m_{\text{He}} = 0,0303769 \text{ u}$

Bindungsenergie



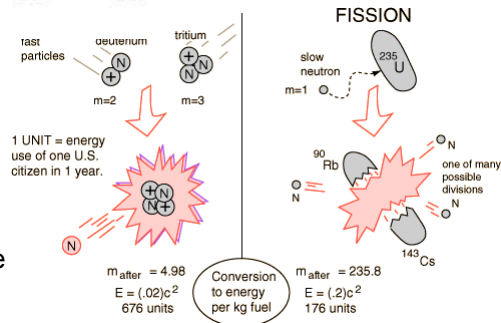
Bindungsenergie pro Nukleon $\Delta W/A$

Fusion

2 leichte Kerne in 1 schweren Kern
 Energie wird frei

Fision

1 schwerer Kern in 2 mittlere Kerne
 Energie wird frei



Arten von Kernen

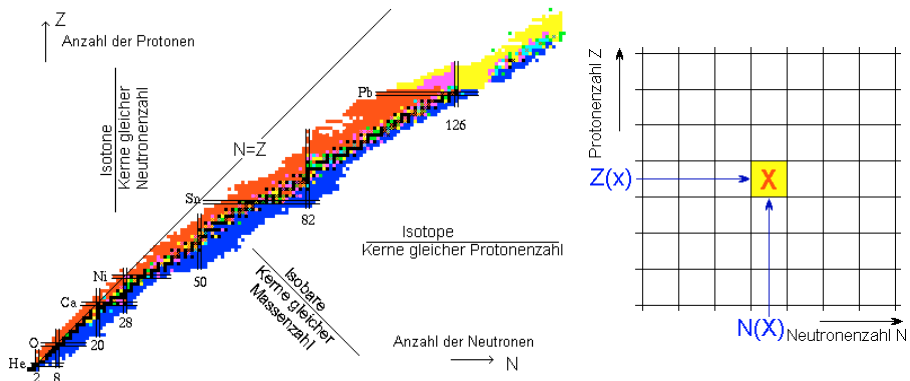
Stabile Kerne: Zentrum des Existenzbereiches

Instabile Kerne, die natürlich vorkommen
natürlich radioaktive Kerne

Instabile Kerne, die nicht natürlich vorkommen
künstlich hergestellte

Instabile Kerne nennt man Radionuklide
Kernart entspricht Farbe in Nuklidkarte

Nuklidkarte



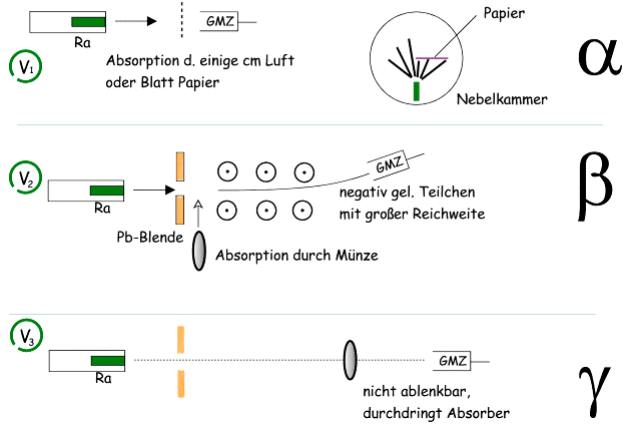
111 Elemente 2770 Nuklide

Leichte Elemente $N = Z$

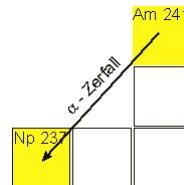
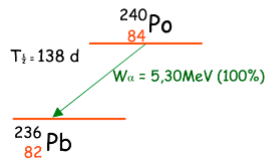
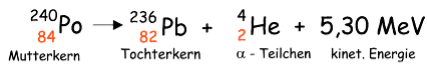
Schwere Elemente $N > Z$

Radiaktiver Zerfall Arten

Trennen der Strahlung von Ra 226



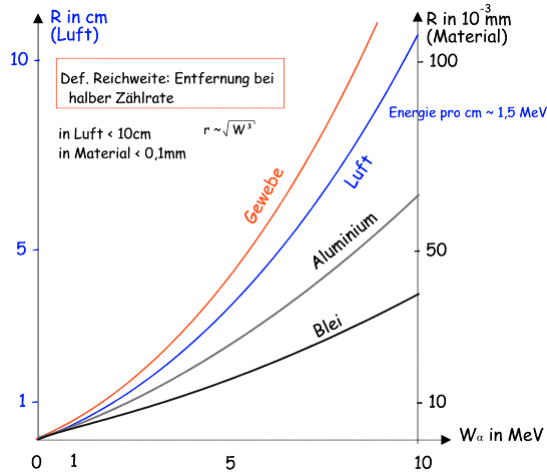
α Zerfall



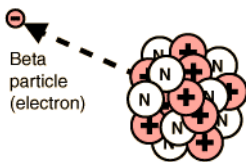
Isotopenraster
beim α Zerfall

α Zerfall nur bei schweren Kernen $Z > 83$

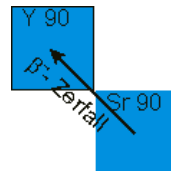
Reichweite von α Strahlung



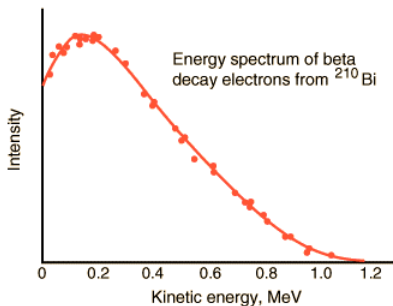
β^- Zerfall



Elektron emittiert



Massenzahl A bleibt erhalten
Kernladungszahl Z vergrößert sich
Neutron in Proton umgewandelt



Emittierte β Teilchen haben keine einheitliche Energie
Maximalenergie typisch
Energiedifferenz zwischen Anfangs- und Endkern
Wohin geht der Rest der Energie?

Genauere Betrachtung β^- Zerfall

Mutterkern (Z) \Rightarrow Tochterkern (Z+1) + β^- Teilchen (Elektron)

Aus Energie und Impulserhaltung
erhaltung weitere Teilchen und Energieterme notwendig

Antineutrino: neutrales masseloses Teilchen

Mutterkern (Z) \Rightarrow Tochterkern (Z+1) + β^- Teilchen (Elektron)
+ Antineutrino + kin. Energie

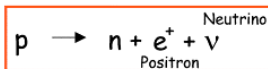
Auch freie Neutronen sind nicht stabil !!

Neutron n \Rightarrow Proton p + Elektron + Antineutrino + kin. Energie

Halbwertszeit 10min

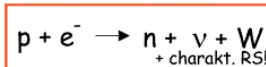
β^+ Zerfall

β^+ Zerfall:



Freie Protonen können
aber nicht zerfallen:
 $m_p < m_n$

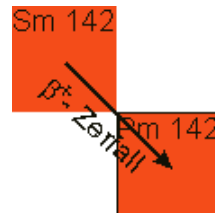
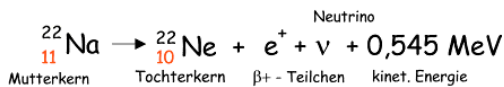
K-Einfang (nur im Atom)



Elektroneneinfang aus der Hülle
anschließend Röntgenstrahlung (warum?)

Beide Reaktionen wandeln ein Proton in ein Neutron um. Die Ordnungszahl erniedrigt sich.

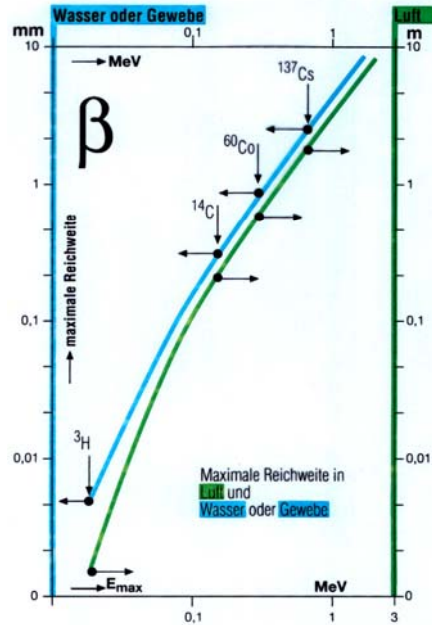
Beispiel für β^+ :



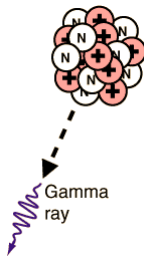
Massenzahl A bleibt erhalten
Kernladungszahl verringert sich
Proton in Neutron umgewandelt

Reichweite β Strahlung

- β^- -Teilchen aus radioaktiven Zerfällen haben i. a. kontinuierliche Energien.
- Pro cm Luft werden ca. 300 Ionenpaare gebildet.
- (= $4,8 \cdot 10^{-17}$ As).
- Reichweite in Luft: 5 cm bis 10 m, in Wasser: 10 μm bis 10 mm.
- β^- -Teilchen bleiben Elektronen, β^+ zerstrahlt mit e^- in zwei Photonen.



γ Zerfall

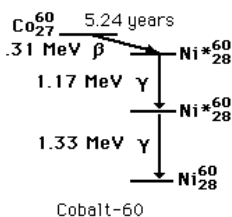


Beispiel:



Entsteht bei Übergang eines angeregten Kerns in den Grundzustand.

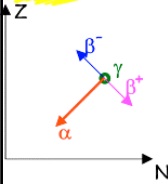
Röntgenstrahlung: Atomare Übergänge ($<100\text{keV}$)
 γ Strahlung: Kernübergänge ($10\text{keV} \dots 100\text{ MeV}$)



Cobalt 60 Zerfall
 Strahlentherapie Tumorbehandlung

Zerfallsreihen

Schema



Verschiebungssätze

Anzahl Nucleonen A

- α $-2n -2p$ $A = A - 4$
- β^- $-1n +1p$ $A = \text{const}$
- γ Kernstruktur konst. $A = \text{const}$

4 Zerfallsreihen



Stabiles Nuklid

C 12
98,89

Elementsym
Isotopenhäufigkeit

β^- -Zerfall
(Negatronen)

Sr 90
28,6 a
 β^- 0,5
 γ^-

Elementsym
Halbwertszeit
maximale β^- -Energie
keine γ -Energie

β^+ -Zerfall
(Positronen)
Elektroneneinfang

Sm 142
72,4 m
 β^+ 1,0
 ϵ

Elementsym
Halbwertszeit
Elektroneneinfang
maximale β^+ -Energie

α -Zerfall

Am 241
433 a
 α 5,4
 γ^+ 0,1

Elementsym
Halbwertszeit
 α -Energie
 γ -Energie

Spontaner Zerfall

Fm 244
3,3 m
st

Elementsym
Halbwertszeit
Spontane Spaltung

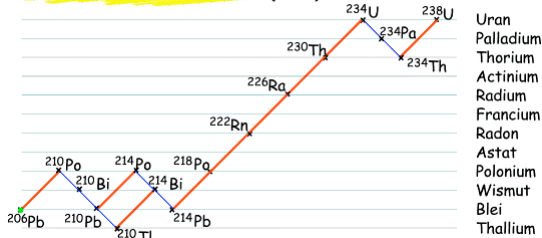
Kern zeigt verschiedene Zerfälle mit gleicher Häufigkeit

Bi 212
60,5 m
 α 6,05
 β^- 2,05
 γ 0,727

Elementsym
Halbwertszeit
 α -Energie
 β^- -Energie
 γ -Energie

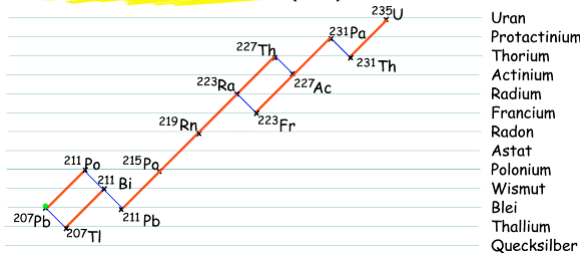
Zerfallsreihen

Uran-Radium-Zerfallsreihe (4n+2)



- Uran
- Palladium
- Thorium
- Actinium
- Radium
- Francium
- Radon
- Astat
- Polonium
- Wismut
- Blei
- Thallium

Uran-Actinium-Zerfallsreihe (4n+3)



- Uran
- Protactinium
- Thorium
- Actinium
- Radium
- Francium
- Radon
- Astat
- Polonium
- Wismut
- Blei
- Thallium
- Quecksilber

Radioaktiver Zerfall

- *Radioaktive Umwandlungsreaktionen sind statistische Prozesse.*
- Für jedes Isotop und für jede energetisch mögliche Zerfallsart dieses Isotops gibt es eine feste, (fast) nicht beeinflussbare Eintrittswahrscheinlichkeit.
- „*Makroskopische*“ Einflussgrößen wie Druck, Temperatur, mag. u. el. Felder können die Zerfallseigenschaften der Atomkerne nicht beeinflussen.

Radioaktiver Zerfall

- Zerfallswahrscheinlichkeit λ
- Aktivität $A(t)$ = Zerfälle pro Zeiteinheit = Zerfallswahrscheinlichkeit λ * Zahl der Atome N

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

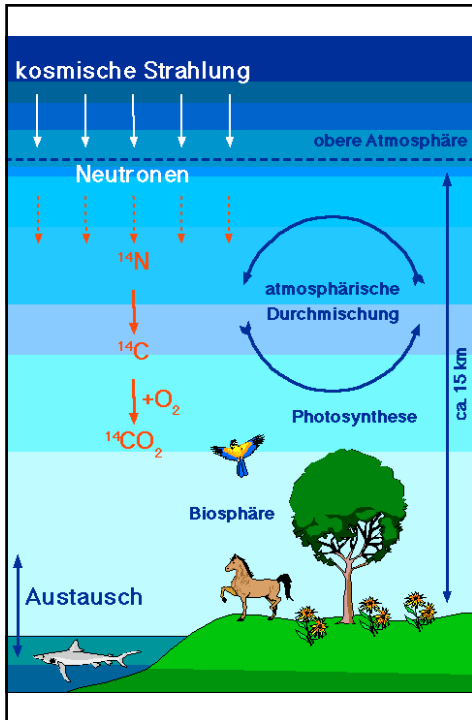
differentielle Form des *radioaktiven Zerfallsgesetze*

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$$

integrale Form des *radioaktiven Zerfallsgesetze*

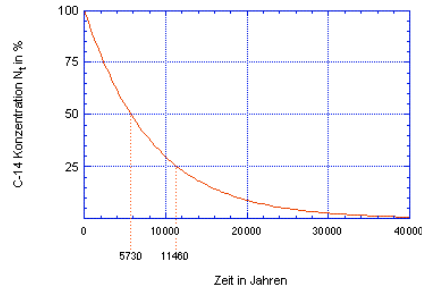
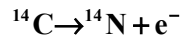
Halbwertszeit: $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

$$N(t) = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right)$$



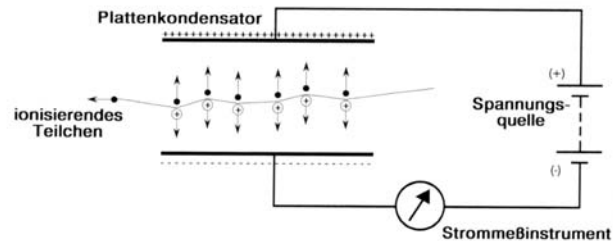
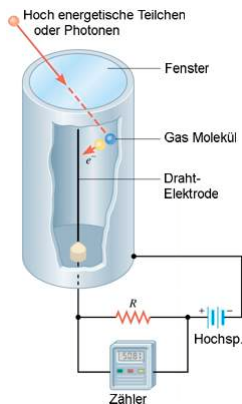
C14 Methode

Lebender Organismus
 Isotopengemisch C14/Rest konstant
 Toter Organismus
 C14 zerfällt



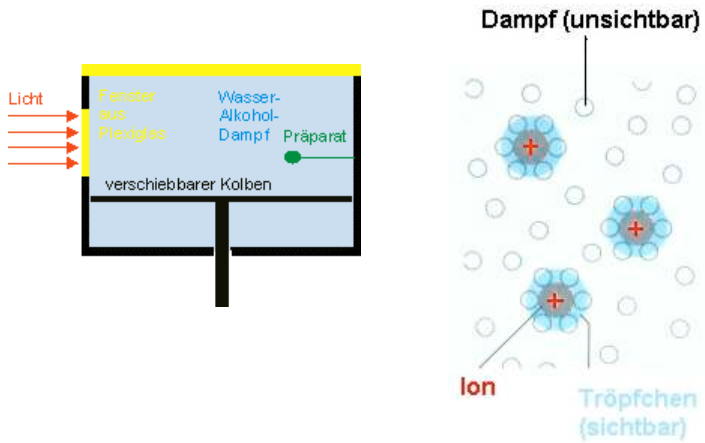
Halbwertszeit 5730 Jahre

Ionisationsdetektor

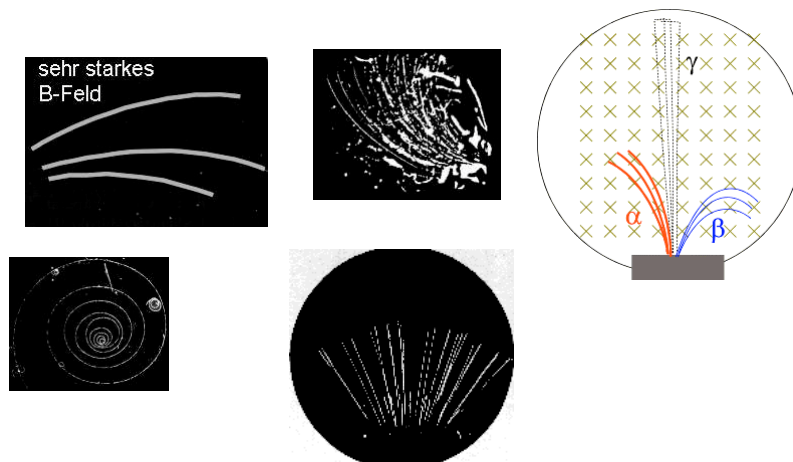


8.1: Messung des Ionisationsstroms (Dosisleistungsmessung)
 ⊕ Ion, ● Elektron

Nebelkammer

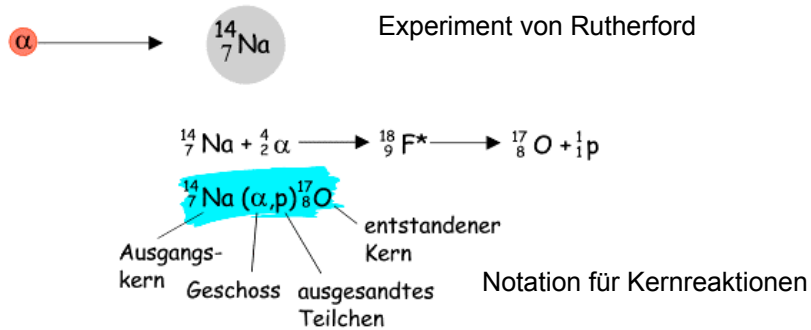


Nebelkammerbilder



Kernreaktionen

Beschuss von Kernen mit energetischen Teilchen:
Kerne wandeln sich um



Bei Kernreaktionen gelten auch die Erhaltungssätze:
Energie, Impuls und Ladung bleiben erhalten

Neutronen

Rutherford: Kernmasse und Ladung stimmen nicht überein
„Kernelektronen“ neutralisieren Protonen

1930 Beschuss von Beryllium mit α Strahlung
Entstehung von Strahlung mit unbekannter Herkunft

1932 Chadwick erklärt Versuch durch Neutronen und bestimmt Masse

Eigenschaften von Neutronen

Neutronenmasse gleich Protonenmasse

elektrisch neutral

können nur mit Nukleonen reagieren

Nachweis nur indirekt möglich

Kernreaktionen geeignet, da keine Coulombabstoßung

Nachweis von Neutronen:

Wechselwirkung mit leichten Elementen α Strahlung erzeugt

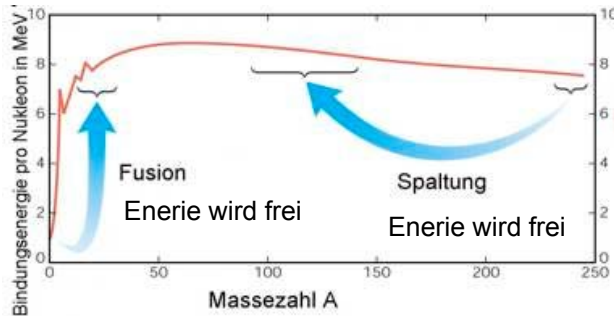
Neutronen durchdringen Blei sehr leicht, Abschirmung mit Wasser

Kernreaktionen

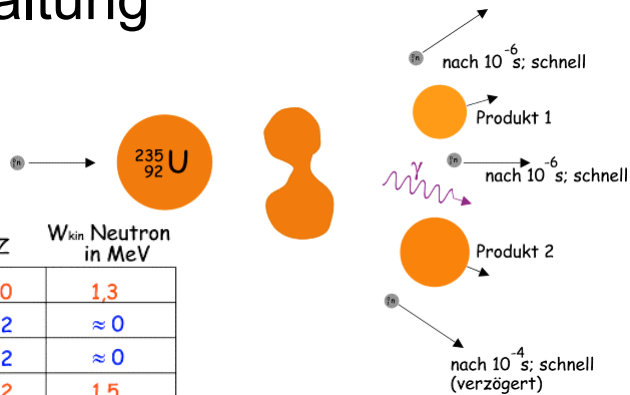
Ca 1930 Experiment mit schweren Kernen unter Neutronenbeschuss
 β - Strahler entstehen

1939 Hahn und Straßmann: Deutung der Versuchsergebnisse als
 Kernspaltung mit β - aktiven Reaktionsprodukten

Energiebetrachtung



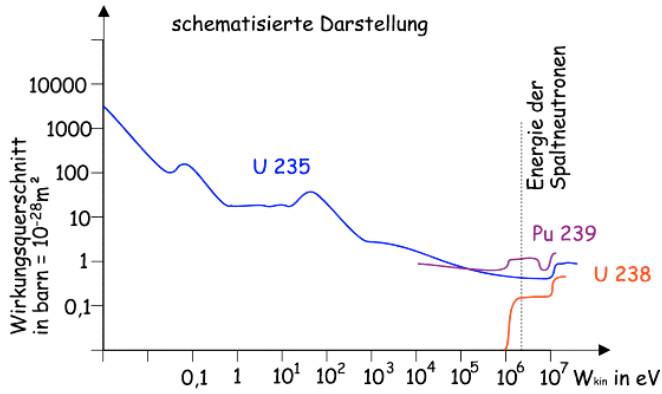
Kernspaltung



Material	N	Z	W_{kin} Neutron in MeV
$^{232}_{90}\text{Th}$	142	90	1,3
$^{233}_{92}\text{U}$	141	92	≈ 0
$^{235}_{92}\text{U}$	143	92	≈ 0
$^{238}_{92}\text{U}$	146	92	1,5
$^{239}_{94}\text{Pu}$	145	94	≈ 0
$^{240}_{94}\text{Pu}$	146	94	0,5
$^{241}_{94}\text{Pu}$	147	94	≈ 0

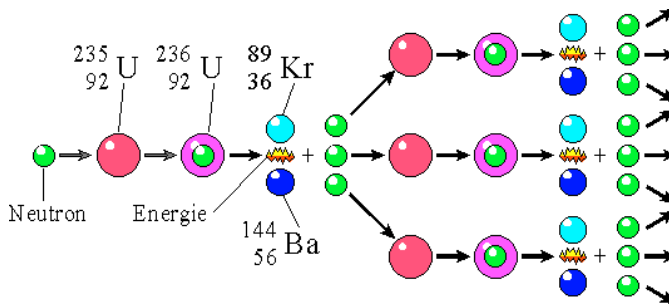
Schnelle Neutronen spalten Kerne mit gerader Neutronenzahl N
 Langsame Neutronen spalten Kerne mit ungeradem N

Wirkungsquerschnitt

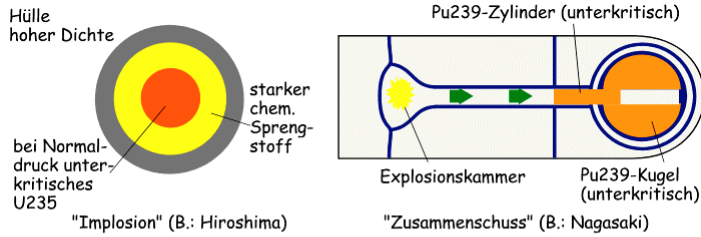


- Spaltneutronen haben ca. 2 MeV
- => Erhöhung der Ausbeute durch "Verlangsamung" (Moderation)
- Zur direkten Verwendung bei 2 MeV eignet sich Pu 239 am besten

Kettenreaktion

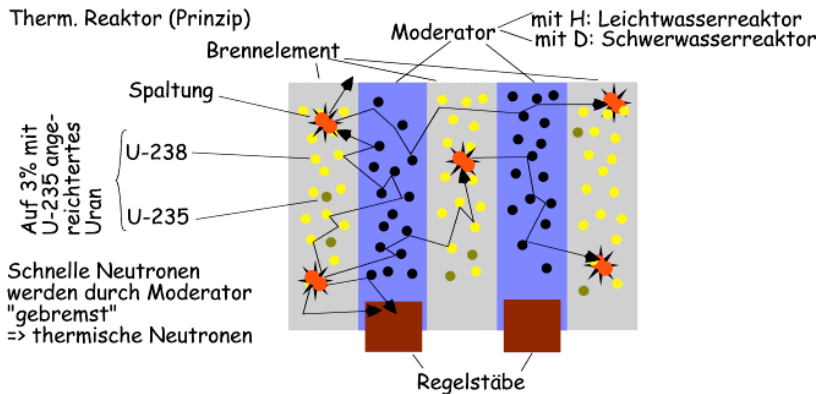


Atombombe

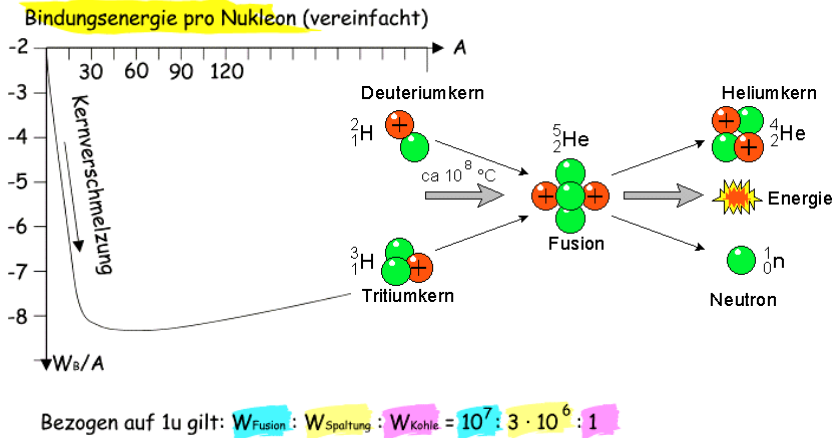


pro Spaltung 1,6 freie, schnelle Neutronen
 bei 1kg: $2,5 \cdot 10^{24}$ Kerne
 $(1,6)^{120} \approx 2,5 \cdot 10^{24} \Rightarrow$ nach 120 "Generationen" ist Material "verbraucht"
 $120 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ s} \approx 3 \mu\text{s}$ (Zeit für gesamte Kettenreaktion)
 $180 \text{ MeV} \cdot 2,5 \cdot 10^{24} = 7,2 \cdot 10^{13} \text{ J} \approx 20 \text{ kT TNT}$
 "kritische Masse" > 10 kg, da Wirkungsquerschnitt von 2 MeV Neutronen klein

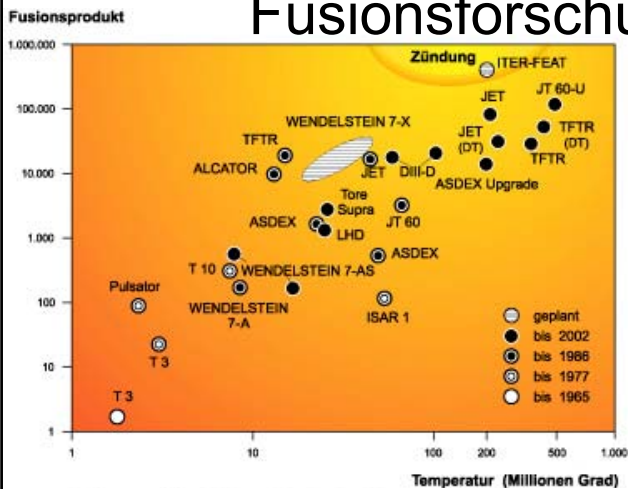
Kernreaktor



Fusion



Fusionsforschung



Um Prozess in Gang zu setzen:

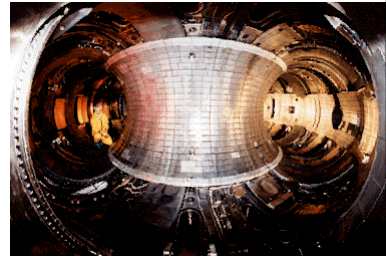
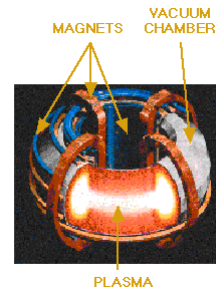
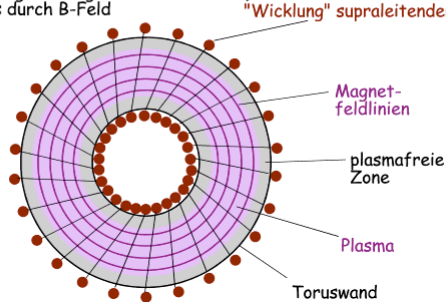
hohe Temperaturen und definierte Dichten über bestimmte Zeit (Fusionsprodukt)
 Heizung mit Laser, Gasentladung, Kernspaltung, Wärmequelle (Sonne)

Fusionsreaktor

Benötigt wird eine dichte "Teilchensuppe" bei $T > 10^8 \text{ K}$
Hierbei gilt $E_{\text{kin}} = 1,5 \text{ kT} \approx 9 \text{ keV}$ > Bindungsenergie der Elektronen

Atomkerne und Elektronen sind ungebunden: Plasma

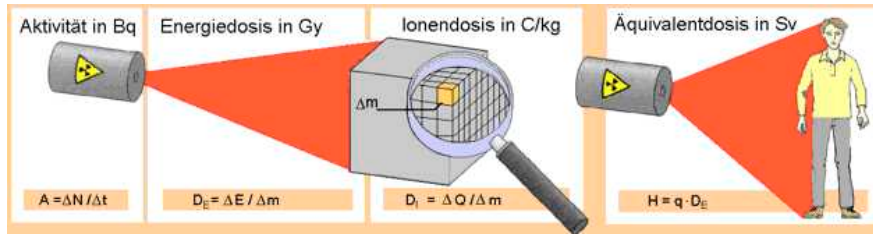
Plasmaeinschluss nicht durch Wände
(würde sofortigen Energieverlust bedeuten)
=> Einschluss durch B-Feld



Wirkung der Strahlung: positiv oder negativ?

- Biologische Systeme können bei nicht zu großer Strahlungs-dosis „positive“ Effekte zeigen.
- Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung und der Radioaktivität standen zunächst mehr die „biopositiven“ Aspekt im Vordergrund.
- Die Erzeugung maligner Karzinome wurde wegen der großen Latenzzeiten erst später offenbar.

Dosimetrie



Begriffe



Grundsätzliches Prinzip der Messung:

$$\text{Dosis} := \frac{\text{Strahlungsgröße}}{\text{Bestrahlte Masse}}$$

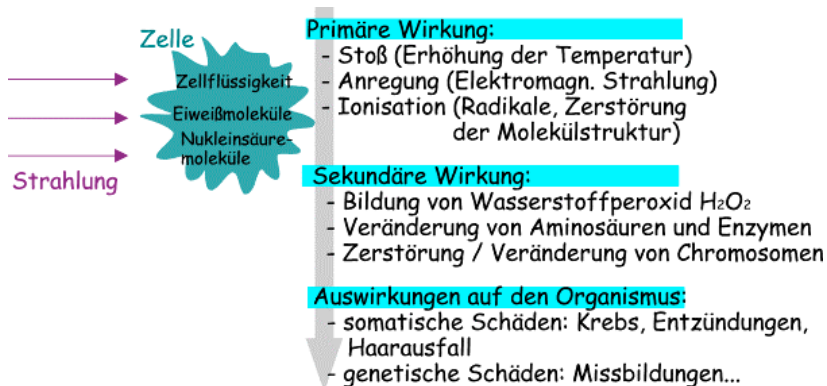
Strahlungsgröße	Name	Definition
Zahl der in Luft unter Normalbedingungen erzeugten Ionen	Ionendosis	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$ $[I] = \frac{\text{As}}{\text{kg}}$
Absorbierte Energie	Energiedosis	$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$ $[D] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Gy (Gray)}$
Absorbierte Energie, multipliziert mit einem Faktor der biolog. Wirksamkeit.	Äquivalentdosis	$H = q \cdot D$ $[H] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Sv (Sievert)}$

Q- Faktoren

Strahlungsart	q-Faktor
Röntgen und γ -Strahlung	1
β -Strahlung	1
thermische Neutronen	3
α -Strahlung	10
Protonen, schnelle Neutronen	10
Schwere Rückstoßkerne	30

Die Werte wurden empirisch festgelegt.

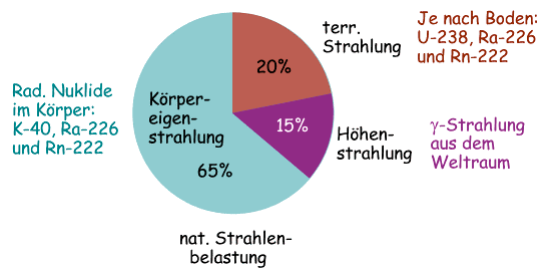
Wirkung auf Organismen



Dosis Menschen

Äquivalentdosis in Sievert	Symptome			Langzeitwirkung
	nach 3h	nach 24h	nach 3d	
1	-	-	-	-
2	Übelkeit	ev. Erbrechen		mehrere Wochen Arbeitsunfähigkeit
4	Übelkeit, Erbrechen	Erbrechen	ev. Fieber, Durchfall	mehrere Monate Arbeitsunfähigkeit
6	Schock, Apathie, Erbrechen	Erbrechen, ev. Fieber	Fieber, Erythem, Durchfall	Tod

erhöhtes Krebsrisiko

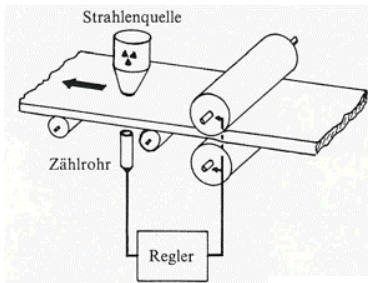


Typische Dosiswerte bei medizinischer Diagnostik

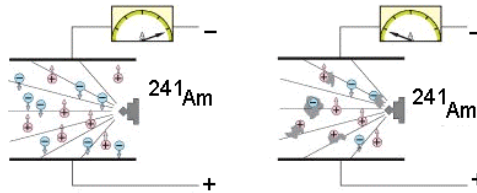
Untersuchungsart	Dosis [mSv]
Zahnaufnahme	0,01
Gliedmaßen	0,05
Schädel	0,1
Brustkorb (Thorax)	0,1
Mammografie	0,5
Hüfte	0,5
Wirbelsäule	1
Becken	1
Harntrakt	5
Galle	7
Magen	8
Darm	17

Mittelwerte der effektiven Dosis für röntgendiagnostische Untersuchungen.

Anwendungen Technik



Dickenmessung



Rauchmelder

Bestrahlung von Lebensmitteln

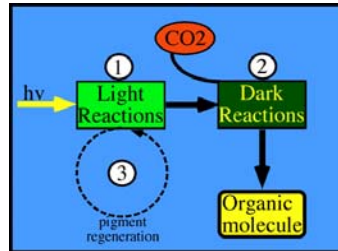
Anwendungsbereich	Lebensmittel	Strahlendosis in kGy
Keimhemmung ²⁾	Kartoffeln, Zwiebeln, Knoblauch, Ingwer	0,02 - 0,15
Abtötung von Schädlingen (Insekten, Würmer)	Weizen, Mehlprodukte ¹⁾ Hülsenfrüchte, frische und getr. Früchte, getr. Fisch/Fleisch ²⁾	0,2 - 0,5
Verzögerung der Reifung Verzögerung des physiologischen Verderbs ²⁾	Bananen, Mangos, Papayas Kirschen, Aprikosen, Feigen, Tomaten, Erdbeeren	0,25 - 1,0
Verlängerung der Haltbarkeit ¹⁾	verpacktes Gemüse	0,5 - 2,0
	Champignons, Erdbeeren	1,0 - 2,5
	Papayas, Mangos ²⁾	bis 3,0
Verzögerung der Hutöffnung ³⁾	Champignons	2,0
Inaktivierung von Krankheitserregern (z.B. Salmonellen) ¹⁾	Fleisch	bis 2,0
	Fisch, Schalentiere	bis 2,0
	Geflügel	bis 7,0
Dekontamination (Keimverminderung)	Shrimps, Garnelen ³⁾	1,0 - 2,0
	Gewürze, Trockenkräuter ¹⁾	5,0 - 10
Verlust der Zähigkeit ³⁾	Dörrobst	5,0
Verkürzung der Röstdauer ³⁾	Kaffee	5,0 - 10
Vermindering von Blähungen nach Verzehr ³⁾	Bohnen, Erbsen	10
Verkürzung der Kochzeit von Trockensuppen ³⁾	Fertigsuppen	3,0 - 30
Künstliche Alterung ³⁾	Cognac	keine Angabe
Sterilisation ⁴⁾	tiefgefr. Patientendiäten	25,0 - 45,0

Radioaktive Markierungen

- **Radioaktive Isotope (^3H , ^{14}C) werden z. B. zur Markierung von organischen Molekülen verwendet.** Es können radioaktiv markierte Verbindungen hergestellt werden und diese dann bei der Synthese organischer Moleküle verwendet werden. Die Methode erlaubt, Molekülstrukturen und Reaktionsmechanismen zu untersuchen.
- **Anwendungsgebiet:** Organische Chemie, Biochemie, Physiologie, Gentechnik.



M. Calvin
1911-1997

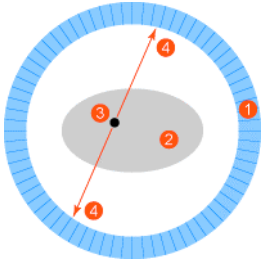


Aufklärung der Photosynthese
Nobelpreis 1961

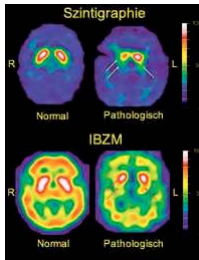
Radioaktive Markierungen

- **Anwendungen in der Technik:**
- **Verfahrenstechnik:** Ortungsproblem, Dichtheitsprüfung in komplexen Anlagen der chemischen und petrochemischen Industrie.
- **Verschleißmessungen:** Maschinenteile können durch Kernreaktion oder Diffusion gezielt **radioaktiv markiert werden**, um qualitative und quantitative Verschleißmessungen zu ermöglichen.

PET Positron Emission Tomography



Radioaktiv markierte Substanz (Tracer)
Anreicherung
Positron Emission
Positron trifft auf ruhendes Elektron (Masse-Energie)
Paarweise Emission von zwei γ Quanten



Anwendungen: Onkologie, Kardiologie, Neurologie