



Zerfallsreihen
Zerfallskanäle
Teilcheneinfang
Nachweis

Ionisierende Strahlung

Ionisierende Strahlung

Zeittafel

1896 Bequerel weist radioaktive Strahlung nach

1898 Marie und Pierre Curie entdecken neues Element Radium

1900 Giesel und Walkhoff entdecken, das Radium gefährlich für die Haut ist

1913 Hevesy und Paneth entwickeln Tracermethode (radioaktive markierte Substanz)

1929 Einführung Thorotrast (radioaktives Thorium) als Röntgenkontrastmittel

1934 Marie Curie stirbt an aplastischer Anämie

1936 Gordon Locher schlägt Bor-Neutroneneinfangtherapie vor

1958 Anger entwickelt Gammakamera

Metallene Putzhilfe

»Eine Antwort auf die verzweifelten Stoßseufzer von Hausfrauen und Feuerwehrkommandanten ist dieser ferngesteuerte Roboter. Der MM.47 schafft fast alles, von Haushaltsarbeiten bis zum

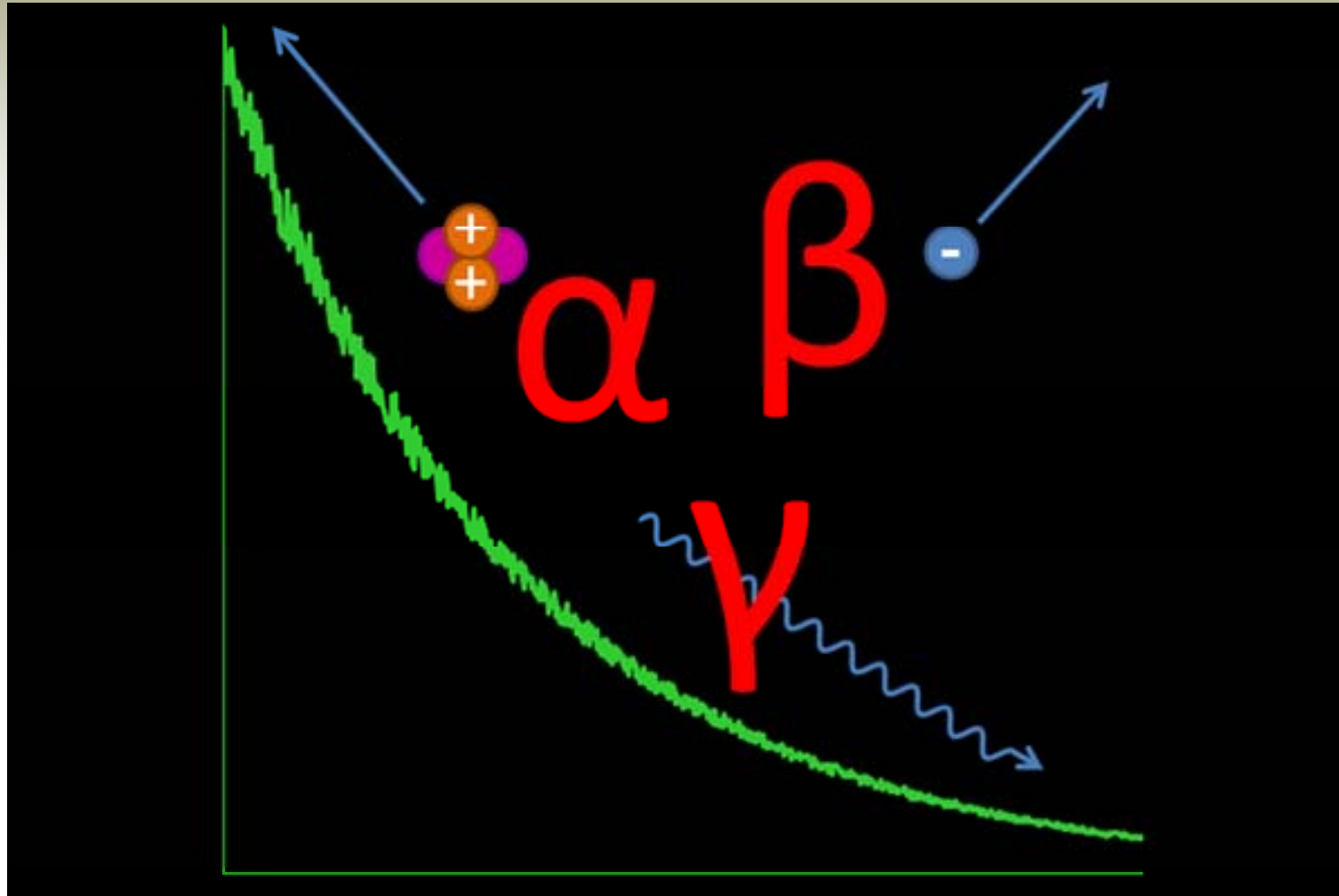


1961

Umgang mit radioaktivem Material. Er kann sogar in brennende Räume gehen und Feuer bekämpfen, während sich sein Bedienungsmann in sicherer Entfernung hält. Der fast 50 kg wiegende Roboter besteht aus Kunststoff und hat etwa 3000 Mark gekostet.« Populäre Mechanik 72, September 1961, S. 56

**MM.47 weiß,
was Frauen wünschen.**

Thema Ionisierende Strahlung Zerfallskanäle

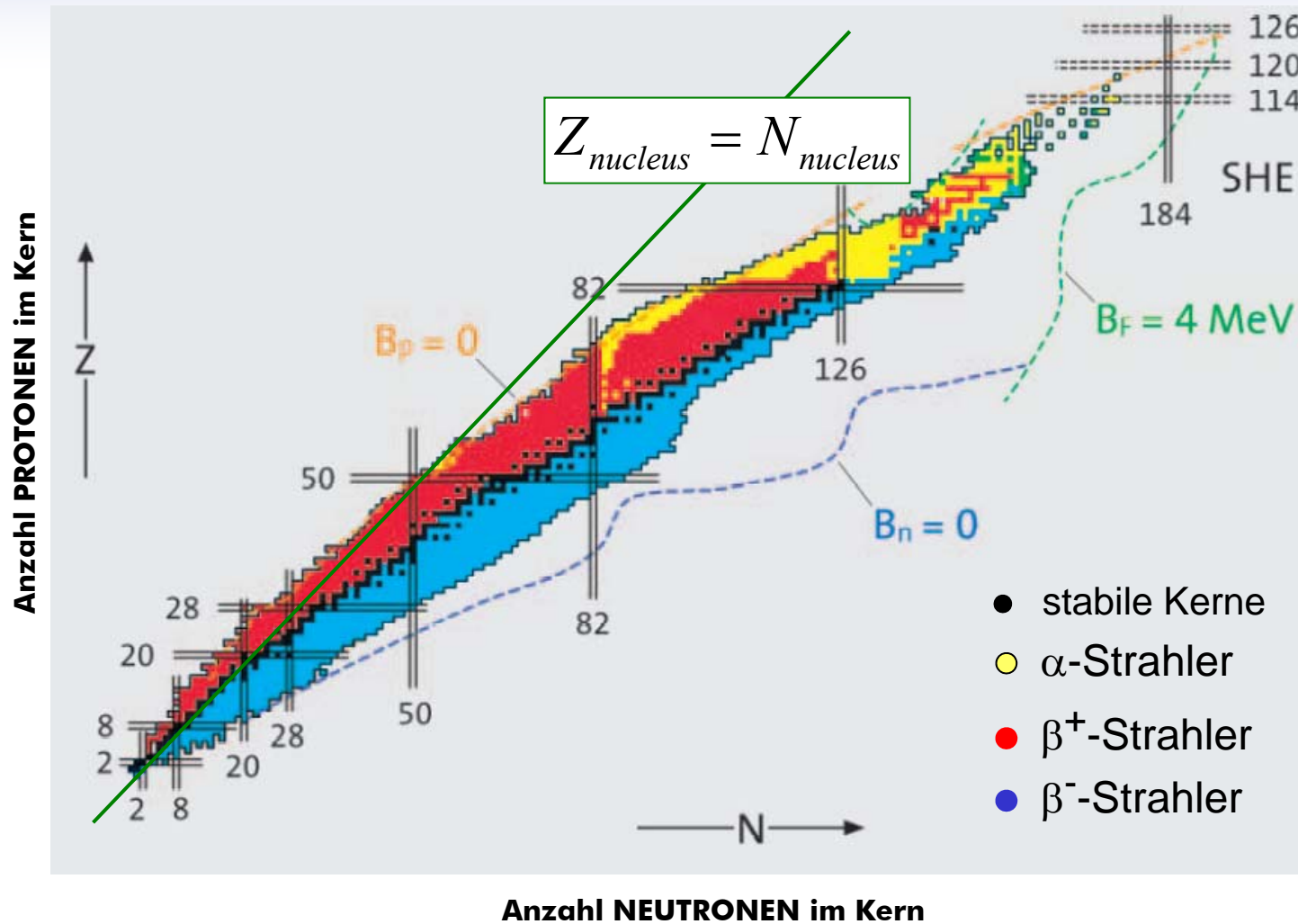




Radioactivity is shown to be accompanied by chemical changes in which new types of matter are being continually produced.... The conclusion is drawn that these chemical changes must be sub-atomic in character.

(Ernest Rutherford)

Nuklidkarte



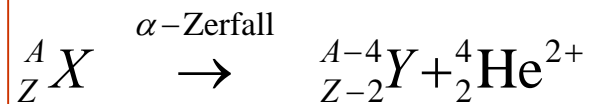
Diagnose

Nicht jede Kombination von Protonen und Neutronen ist stabil

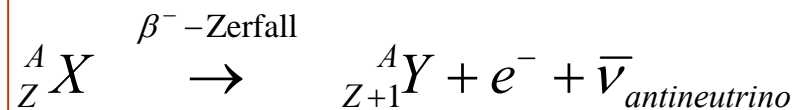
Zusammenfassung Zerfallswege eines Kerns

Symptome

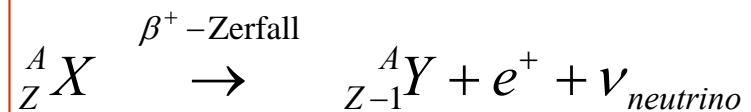
- α -Teilchen ist ein zweifach positiv geladener Heliumkern
- β -Teilchen ist entweder ein Elektron (β^-) oder ein Positron (β^+ , **positiv** geladenes Elektron)
- γ -Teilchen ist ein hochenergetisches Lichtquant mit Photonenenergie im Bereich MeV



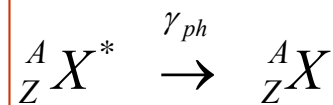
α -Zerfall



β^- -Zerfall



β^+ -Zerfall



γ -Zerfall eines elektronisch angeregten Kerns

Diagnose

- radioaktiver Zerfall ist ein statistischer Prozess
- genauer Zeitpunkt des Zerfallsereignis daher nicht vorhersagbar
- Kernumwandlung löst Kernbindungskräfte
- freiwerdende Bindungsenergie setzt enorme Energiemengen im Bereich MeV (10^6 eV)



radioaktiver Zerfall

Änderung im Kern

Zerfallsart	Emissionsprodukt	Ordnungszahl ΔZ	Neutronenzahl Δn	Nukleonenzahl ΔA
α	${}^4_2\text{He}$	-2	-2	-4
β^-	Elektron e^-	+1	-1	0
β^+	Positron e^+	-1	+1	0
K - Einfang		-1	+1	0
n - Einfang		0	+1	+1
γ	Photon	0	0	0

Isotopenprobleme

Jod-131 und andere

$$\lambda_{\text{I-131}} = \frac{\ln 2}{8 \text{ Tage}} = 0.087 \frac{1}{\text{Tag}}$$

Schilddrüse

$$T_{1/2}^{\text{I-131}} \approx 8 \text{ Tage}$$

Jod 131

$$T_{1/2}^{\text{Pu-240}} \approx 6550 \text{ Jahre}$$

Plutonium 240

$$T_{1/2}^{\text{Cs-137}} \approx 30 \text{ Jahre}$$

Caesium 137

Lunge

Muskeln

da ähnlich Kalium

Strontium 90

Knochen
da ähnlich Kalzium

$$T_{1/2}^{\text{Sr-90}} \approx 29 \text{ Jahre}$$

Diagnose

Radioaktive Elemente können chemisch ähnliche Elemente im Körper ersetzen



Isotopenprobleme

Jod-131

example



At Chernobyl, iodine-131 also got into the food supply via milk from cows that had fed in pastures tainted with radioactive iodine

$$\begin{aligned} \text{Zerfallskonstante} \\ \lambda_{\text{I-131}} &= \frac{\ln 2}{8 \text{ Tage}} = \frac{0.693}{8 \text{ Tage}} \\ \lambda_{\text{I-131}} &= \frac{0.087}{\text{Tag}} \end{aligned}$$

Symptome

Käse aus kontaminierter Milch stellt potenzielle radioaktive Belastung dar

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda_{\text{I-131}} t)$$

Ziel ist Reduzierung der Belastung auf ein Niveau von 1%

$$\frac{N(t)}{N_0} = \frac{1}{100} = \exp(-\lambda_{\text{I-131}} t)$$

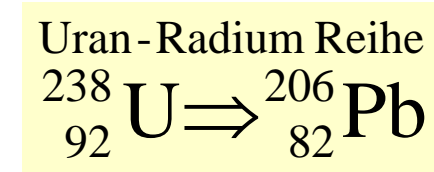
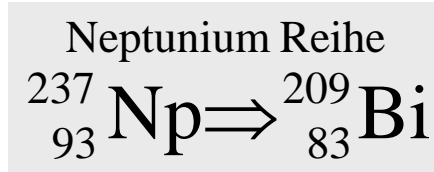
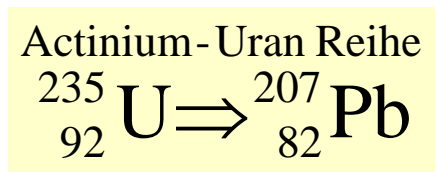
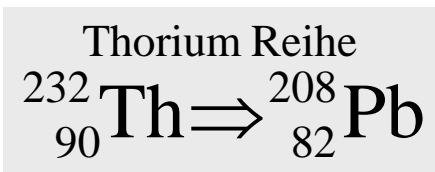
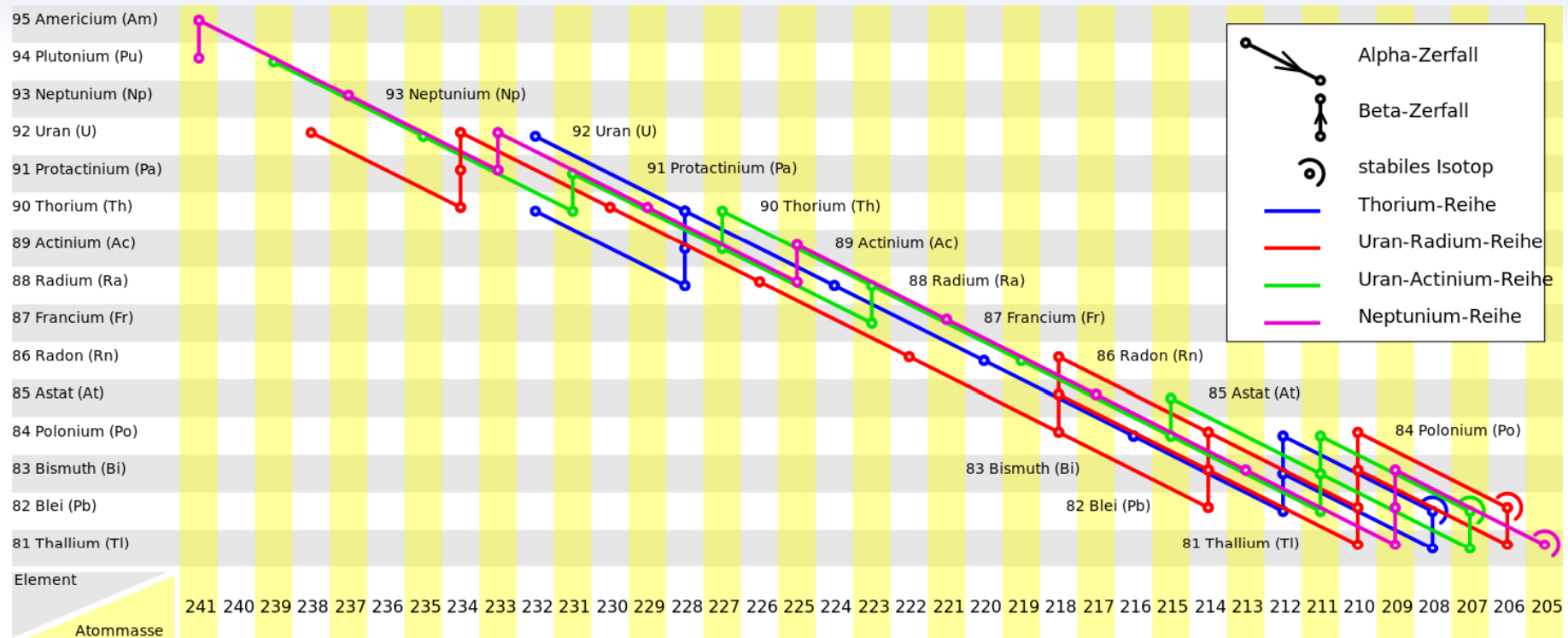
$$t = -\frac{\ln 0.01}{\lambda_{\text{I-131}}} = 53 \text{ Tage}$$

Diagnose

Innerhalb von etwa zwei Monaten sinkt Jod-131 Belastung auf akzeptablen Wert

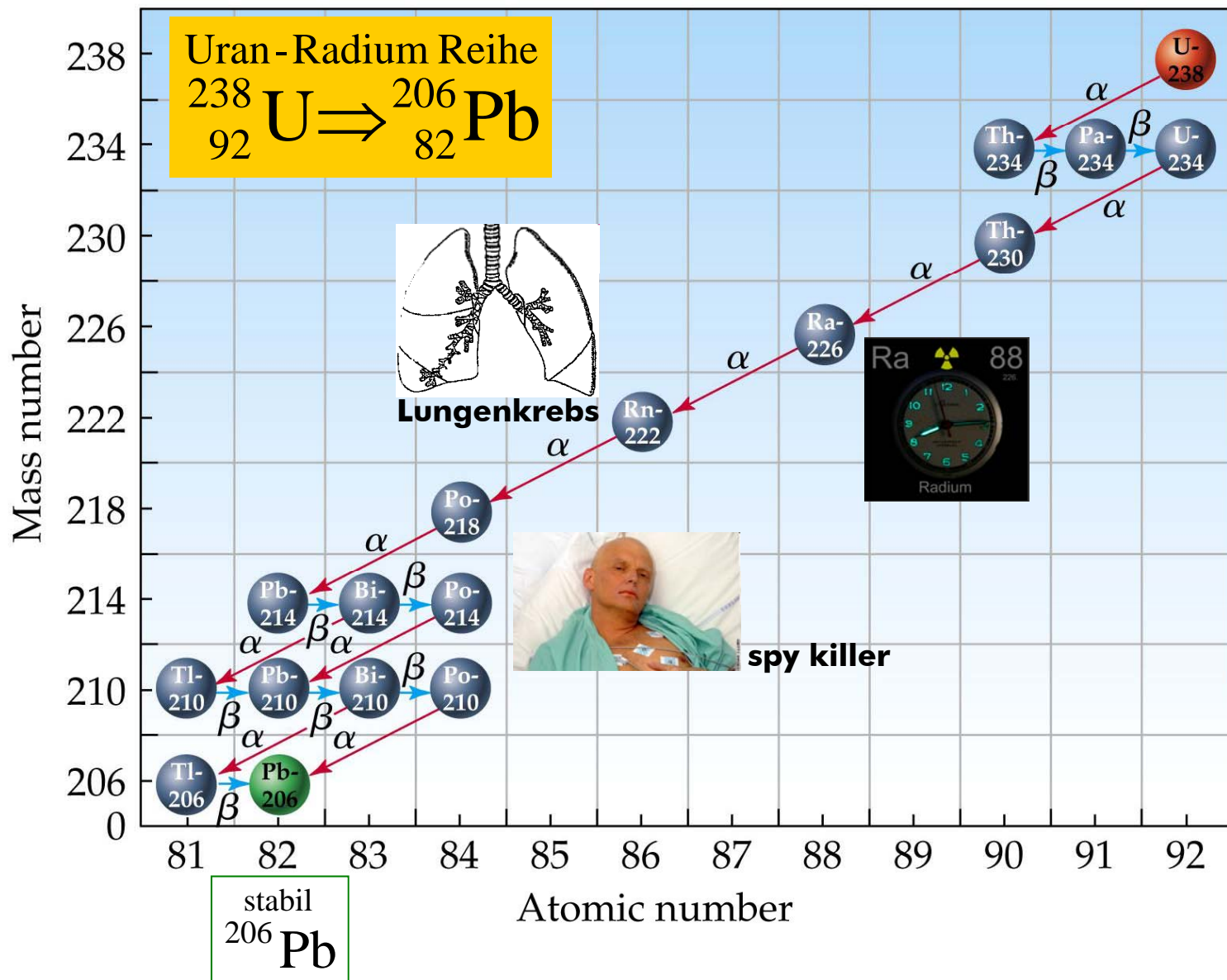


VIER Zerfallsreihen



Diagnose

- es gibt nur vier sogenannte Zerfallsreihen
- jede Zerfallsreihe hat eigene charakteristische Zerfallskette (Fingerabdruck)



Diagnose

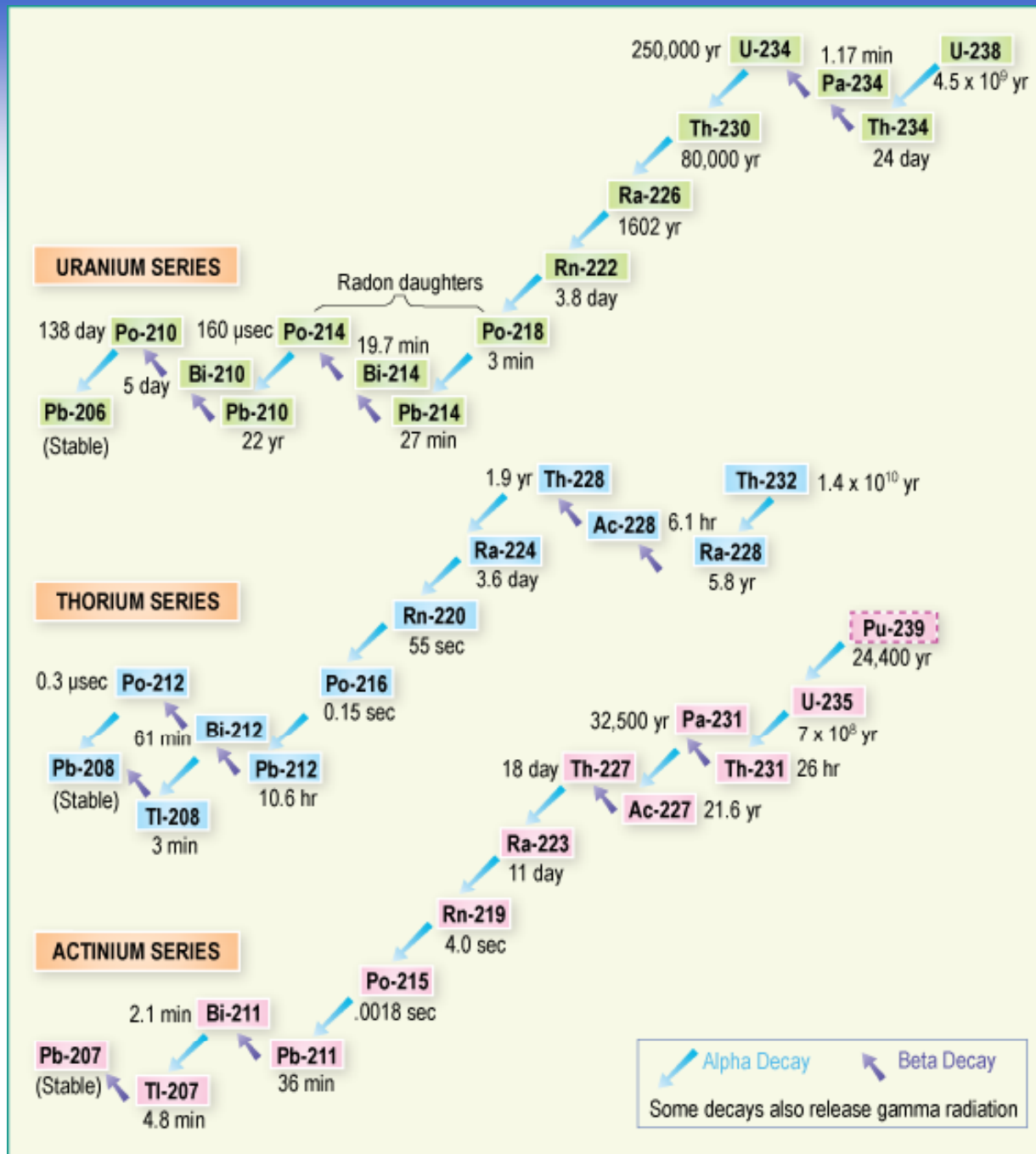
- radioaktiver Zerfall eines Elements erzeugt neue radioaktive Nuklide
- manche instabile Isotope sind radiologisch ungefährlich, aber toxisch (Po-210)

International Herald Tribune
October 24, 2006

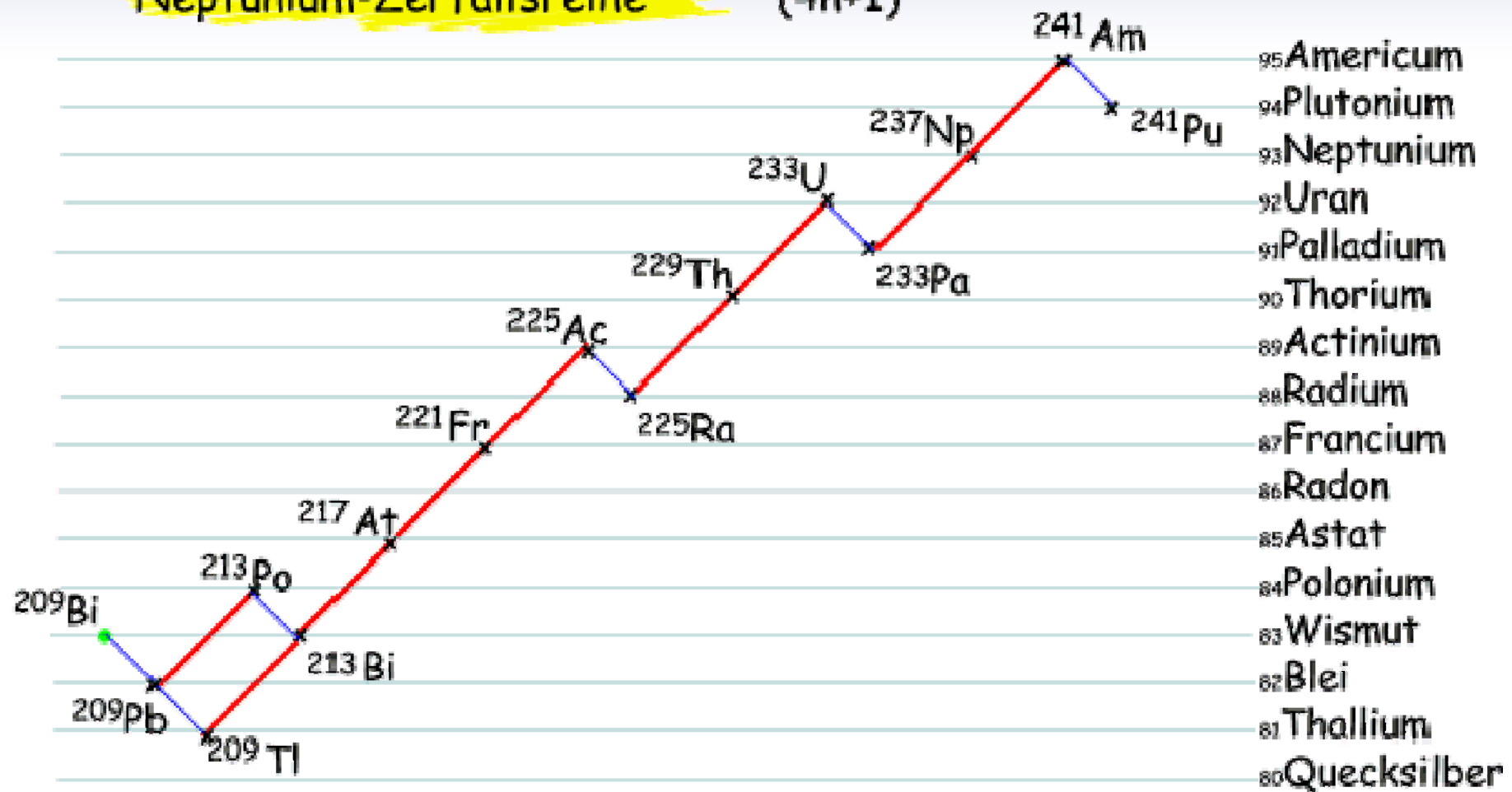
Use of polonium 210 would pose risk to spy's killer

If substantial amounts of polonium 210 were used to poison Alexander Litvinenko, whoever did it presumably had access to a high-level nuclear laboratory and put himself at risk in carrying out the assassination, experts said Friday. Polonium 210 is highly radioactive and toxic. By weight, it is about 250 million times as toxic as cyanide, so a particle smaller than a dust mite - too small to see - could be fatal. Handling it is dangerous and requires special equipment. It is also extremely rare in nature, although it occurs in uranium ores and has been found in minute quantities in tobacco and other plants. But making the "significant quantities" described by the British Health Protection Agency would require a nuclear laboratory that could bombard bismuth with neutrons. "To most chemists, this is astonishing," said Andrea Sella, a lecturer in inorganic chemistry at London's University College. "This is not available commercially. "This is not the kind of weapon that any kind of amateur could construct," he added. "It would require real resources to do it.,, Polonium 210 does its damage by emitting alpha particles, which have enough energy to tear apart the genetic machinery of cells. It gives off 5,000 times as many such particles as the same amount of radium. Because it is so radioactive, it creates its own heat, and tiny amounts have been implanted in satellites as a source of heat and electricity. It was also used in the Soviet Union's Lunokhod moon rovers. It presumably entered Litvinenko's body through food or drink, or by being inhaled, or through a wound.



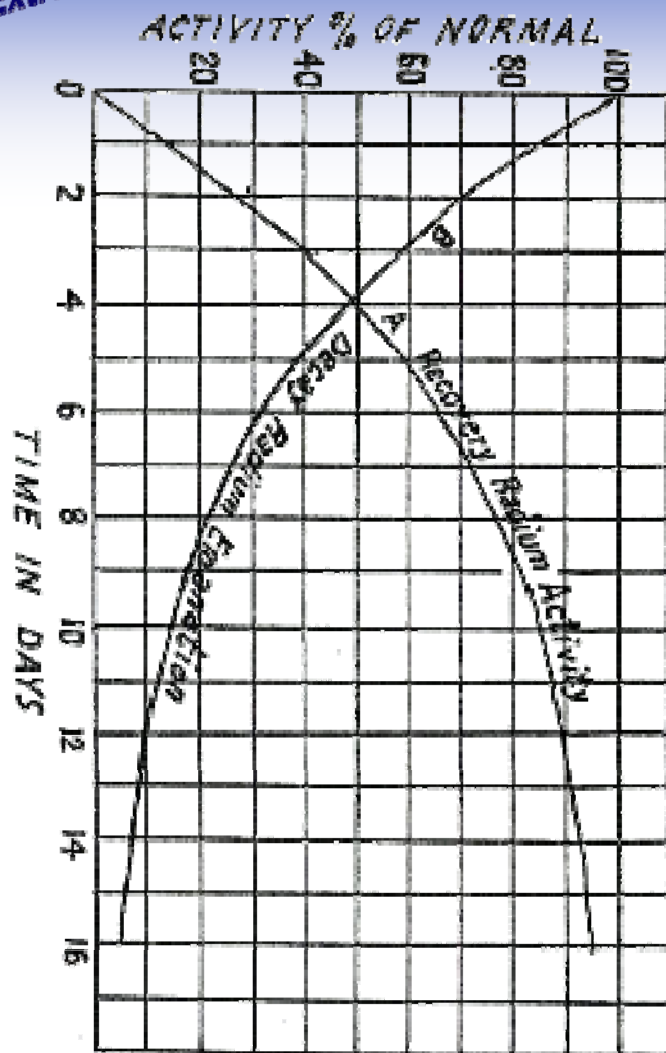


Neptunium-Zerfallsreihe (4n+1)



Ernest Rutherford clan Wappenphysik

Extrablatt

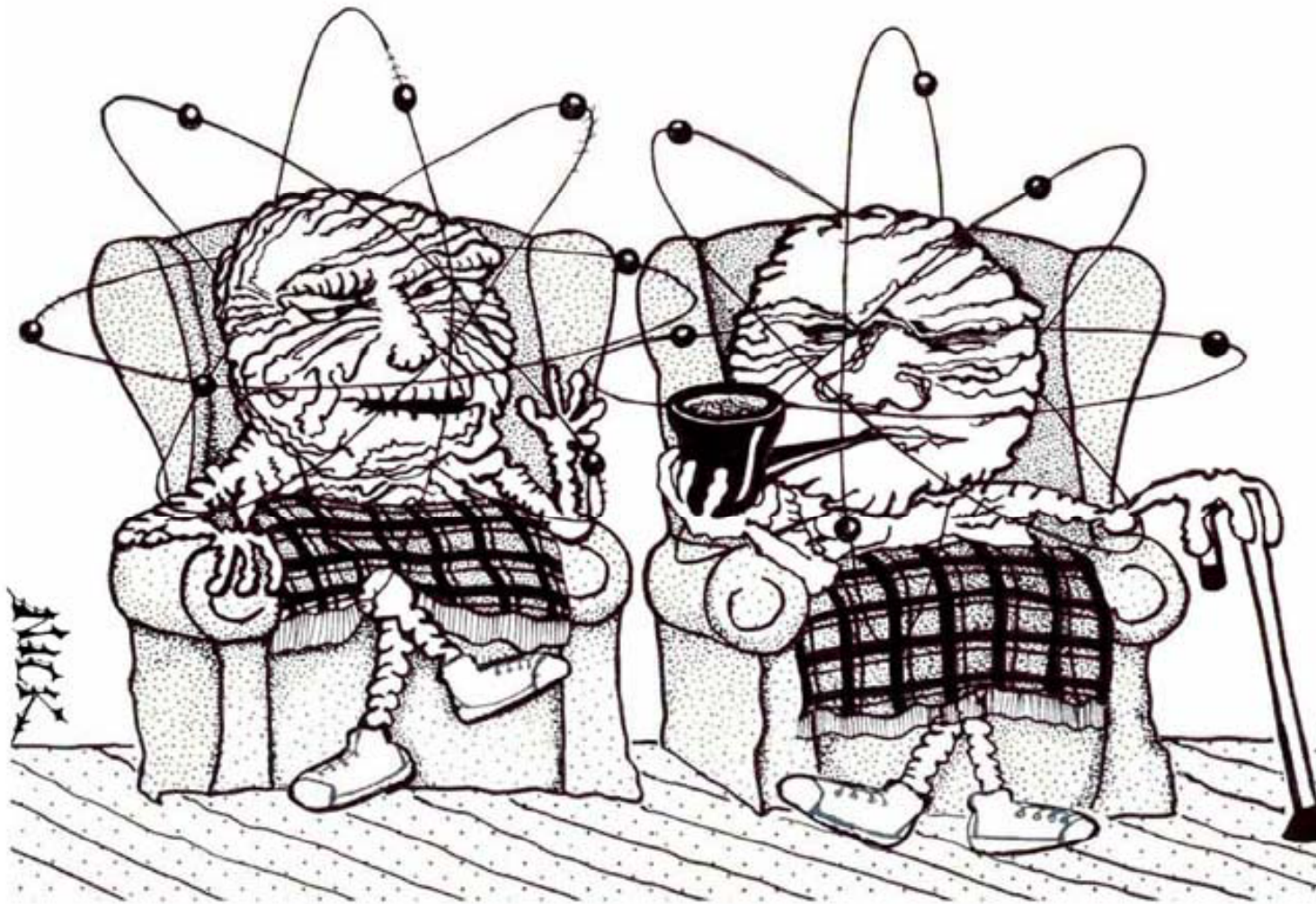


Diagnose

- Wappen der Familie Rutherford (Lord Rutherford of Nelson)
- die sich kreuzenden Kurven stammen aus Rutherford berühmter Arbeit zur Radioaktivität

E. Rutherford *A Radio-active Substance emitted from Thorium Compounds* Phil. Mag. 49, 1 (1900)

At the home for old atoms...



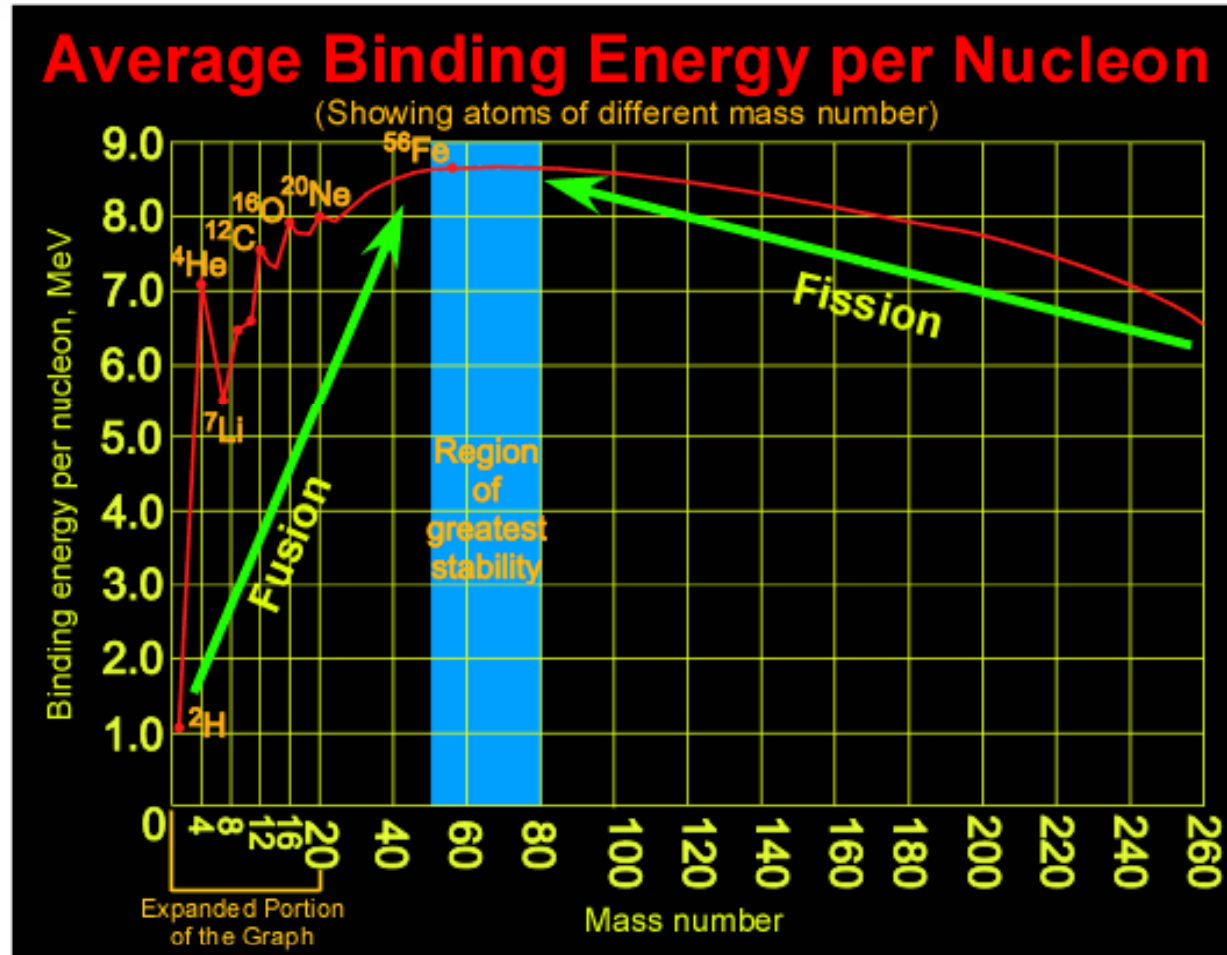
“When I was young I used to feel so alive and dangerous! Would you believe I started life as a uranium-238? Then one day I accidentally ejected an alpha particle. Now look at me—a spent old atom of lead-206. It seems that all my life since then has been nothing but decay, decay, decay...”

Interessant ist Bindungsenergie pro Nukleon

Stabilität von Kernen

Symptome

Bindungsenergie mit 8.77 MeV pro Nukleus maximal beim Element Eisen (Fe-56)



Diagnose

Kern kann durch Änderung der Kernzusammensetzung seine Bindungsenergie erhöhen

Zerfallskette

educated guess

Radioaktiver Zerfall leichter Kerne

- bei erhöhter Anzahl Neutronen wandelt sich Neutron in Proton um (β^- -Zerfall)
- bei geringerer Anzahl Neutronen wandelt sich Proton in Neutron um (β^+ -Zerfall)

α decay



β decay



γ decay



positron decay

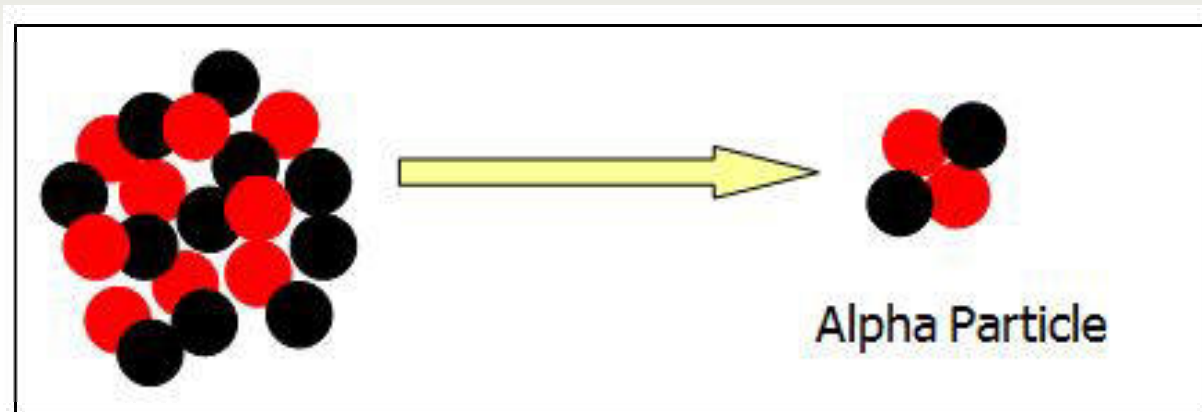


Radioaktiver Zerfall schwerer Kerne

- zerfallen über Alpha-Zerfall
- Zerfall führt zu energetisch stabilerem Nukleon

Thema Ionisierende Strahlung

α -Zerfall

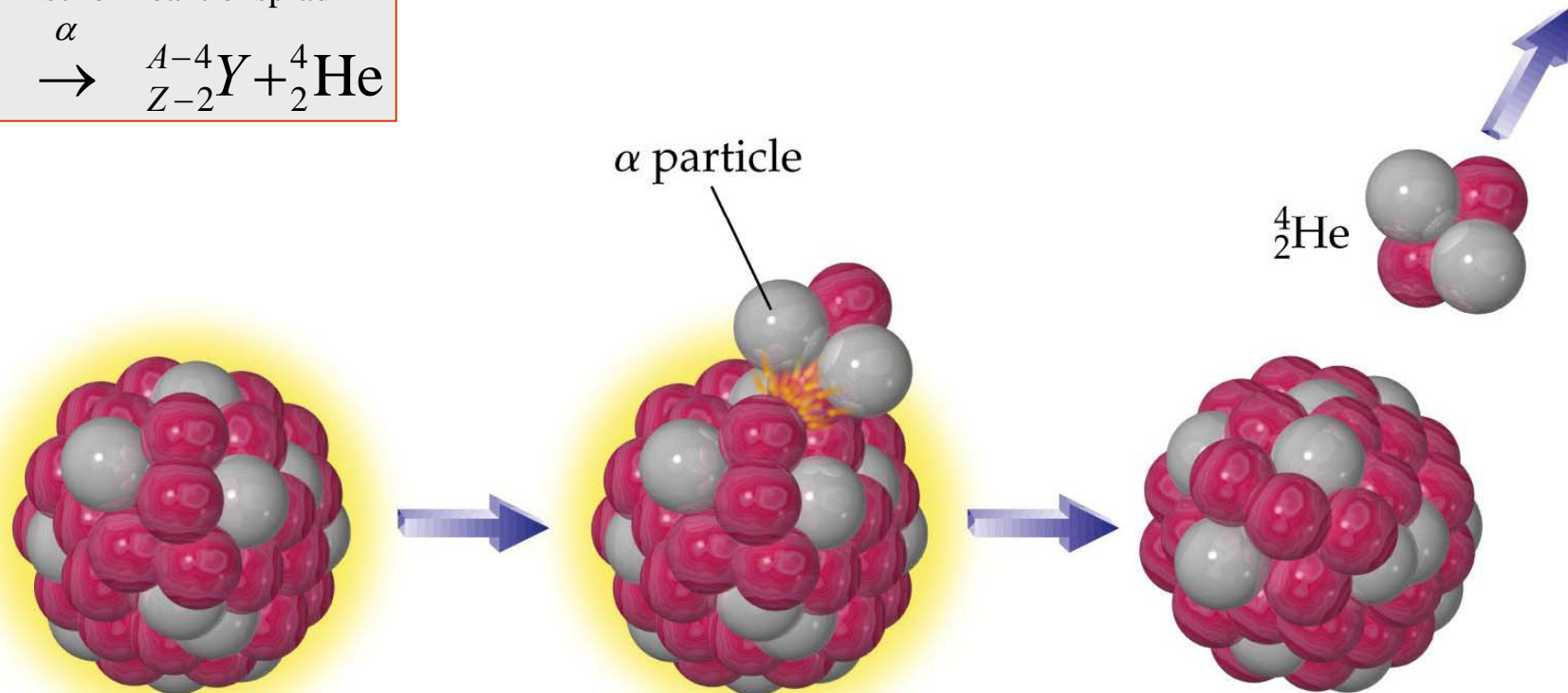
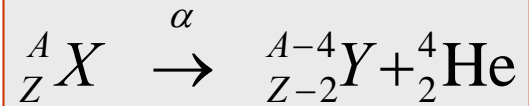




α - Zerfall

Kern emittiert Heliumkern

chemischer Reaktionspfad



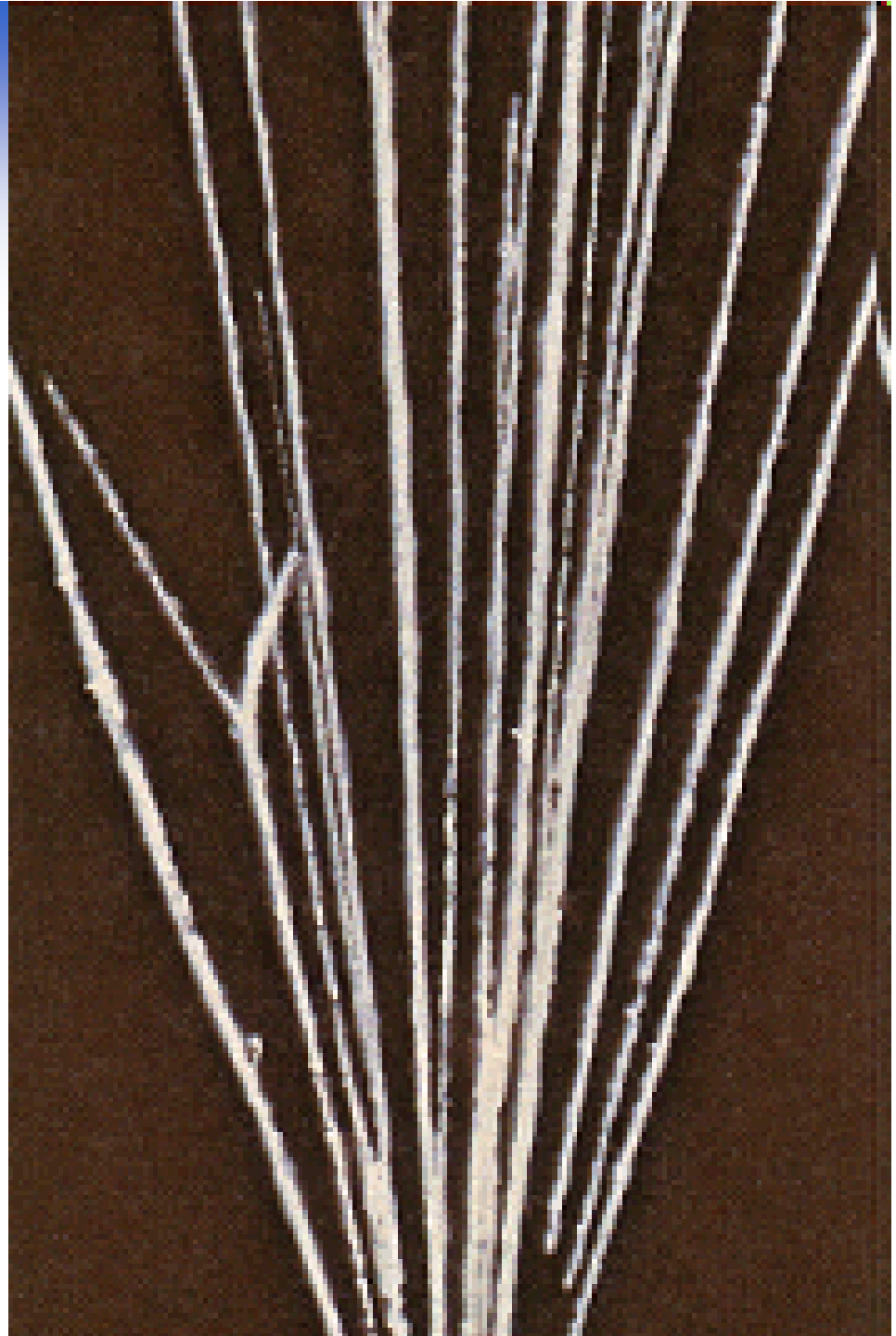
Diagnose

- zweifach positiv geladenes Heliumatom verlässt den Kern
- kaum Ablenkung der Bahn des Teilchens in Materie
- starke Ionisation von Materie durch α -Teilchen bis 7000 Ereignisse pro Millimeter Gewebe
- Alphastrahlung hat hohe biologische Wirksamkeit

α - Zerfall

Kern emittiert Heliumkern

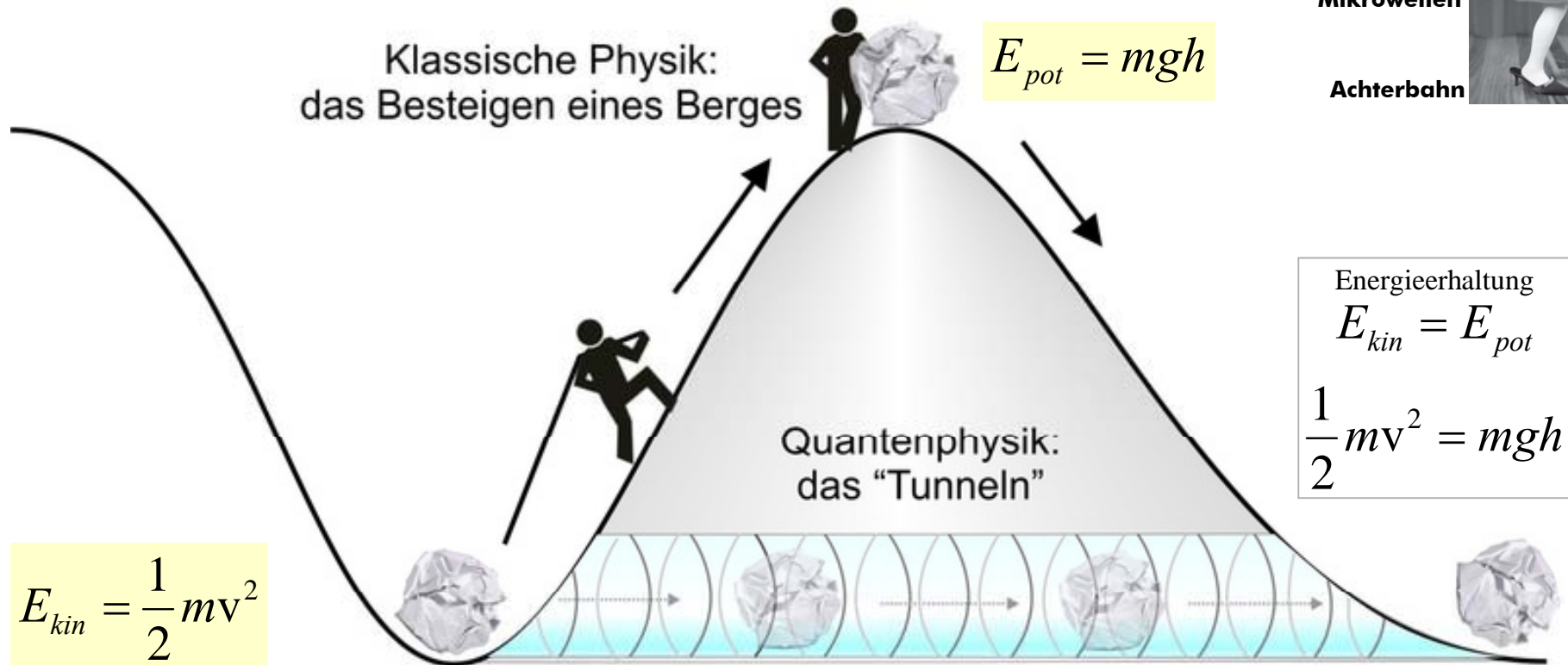
Spuren von α -Teilchen in Nebelkammer



quantum vs klassisch Tunneleffekt

Symptome

Energieerhaltung ist fundamental und universell gültig in der Physik

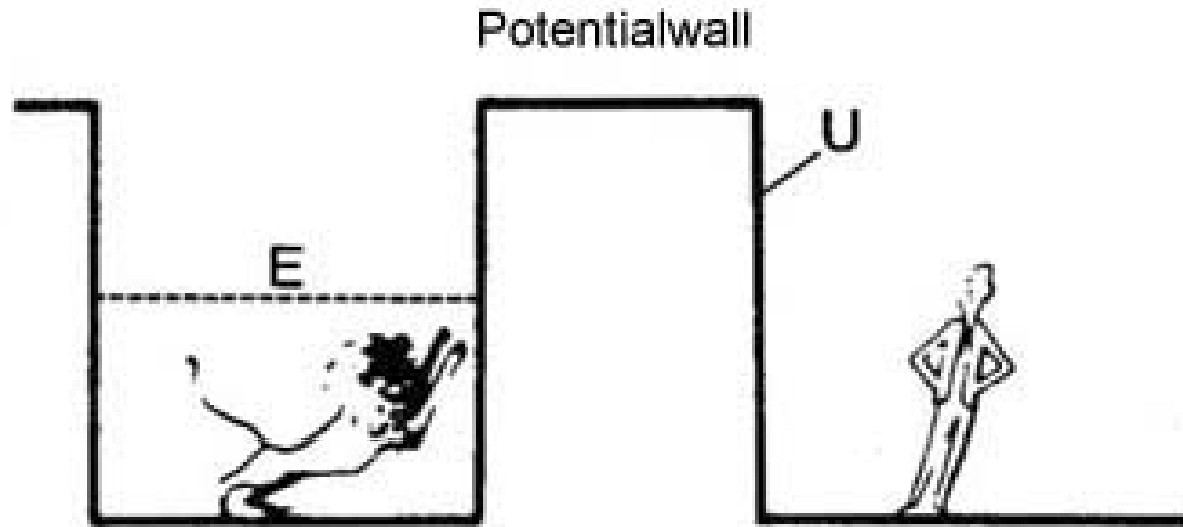


Diagnose

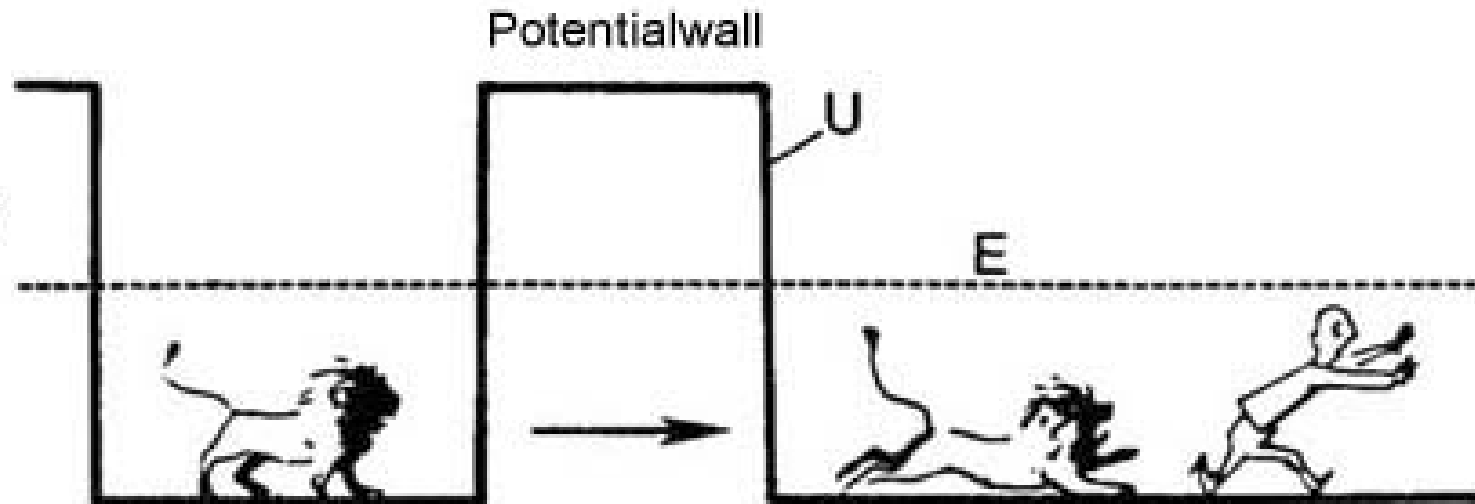
Aufgrund Energieerhaltung kann energiearmes Teilchen Potenzialwall NICHT überqueren

quantenphysikalische Gefährspotenzial Tunneleffekt

Klassisches
Modell



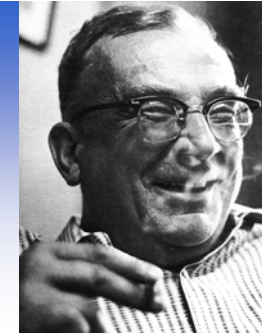
Quanten-
mechanisches
Modell



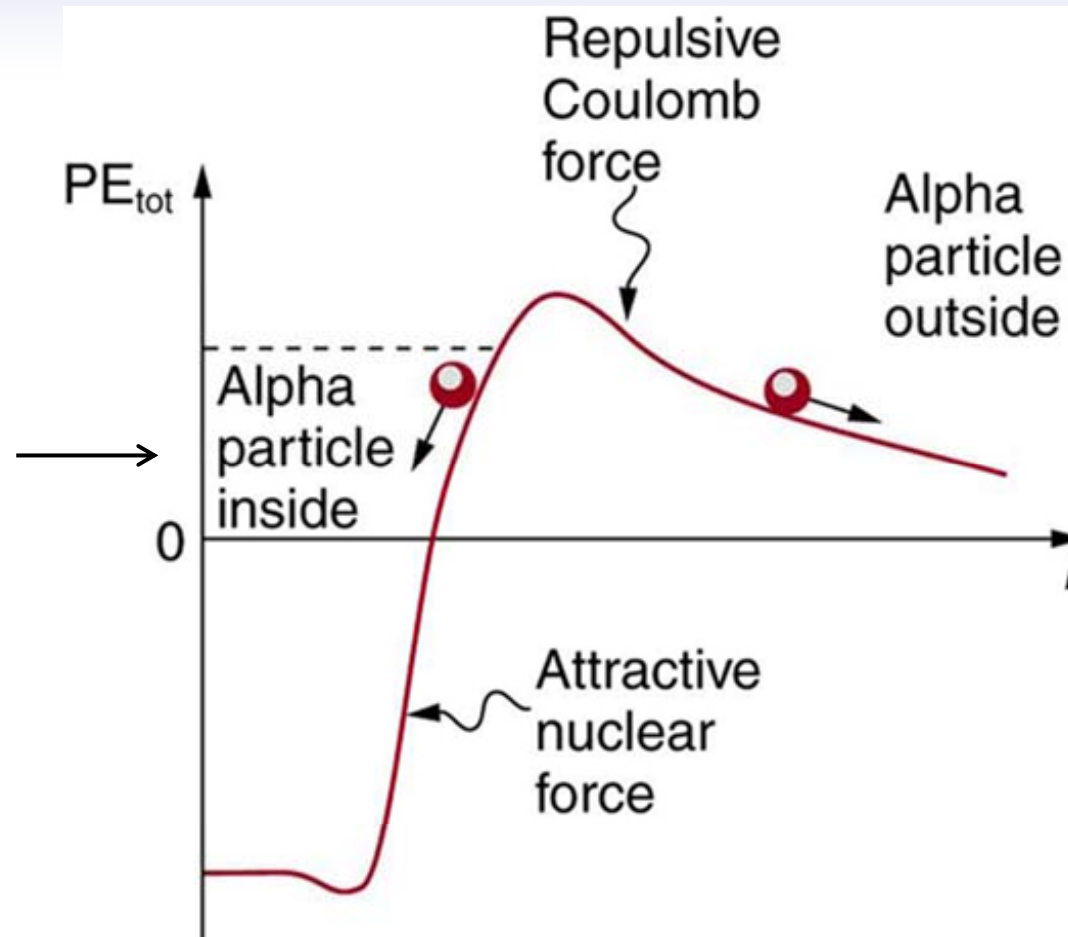


Gamov 1928

α – Zerfall



George Gamov
1904-1968



Tunneleffekt mit
Mikrowellen



Diagnostik

- quantenphysikalischer Teilcheneffekt, der mit klassischer Physik nicht erklärt werden kann
- Heliumkern tunnelt durch Kernbarriere und taucht auf anderer Seite Potenzialwall auf
- physikalische Ursache ist Welleneigenschaften der Materie und schwache Wechselwirkung

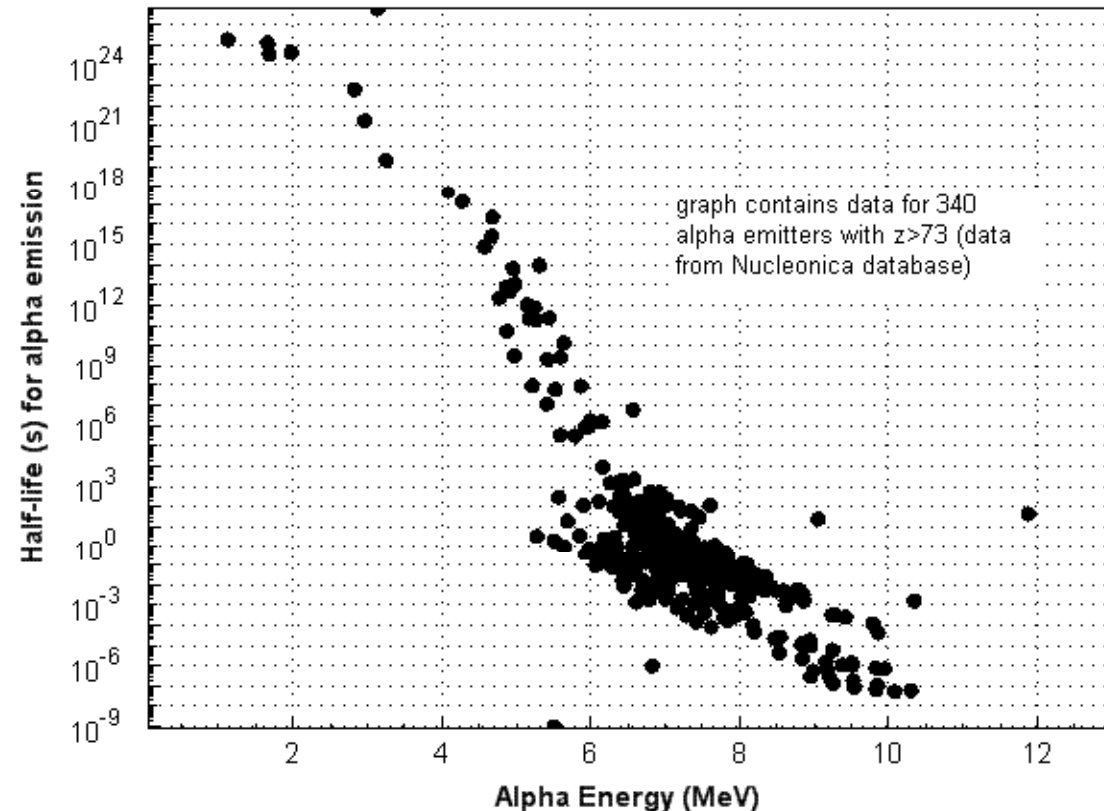
α -Zerfall

Geiger-Nuttall Regel

Symptome

Experimentelle Beobachtung: kurzlebige Isotope emittieren hochenergetische Alphateilchen

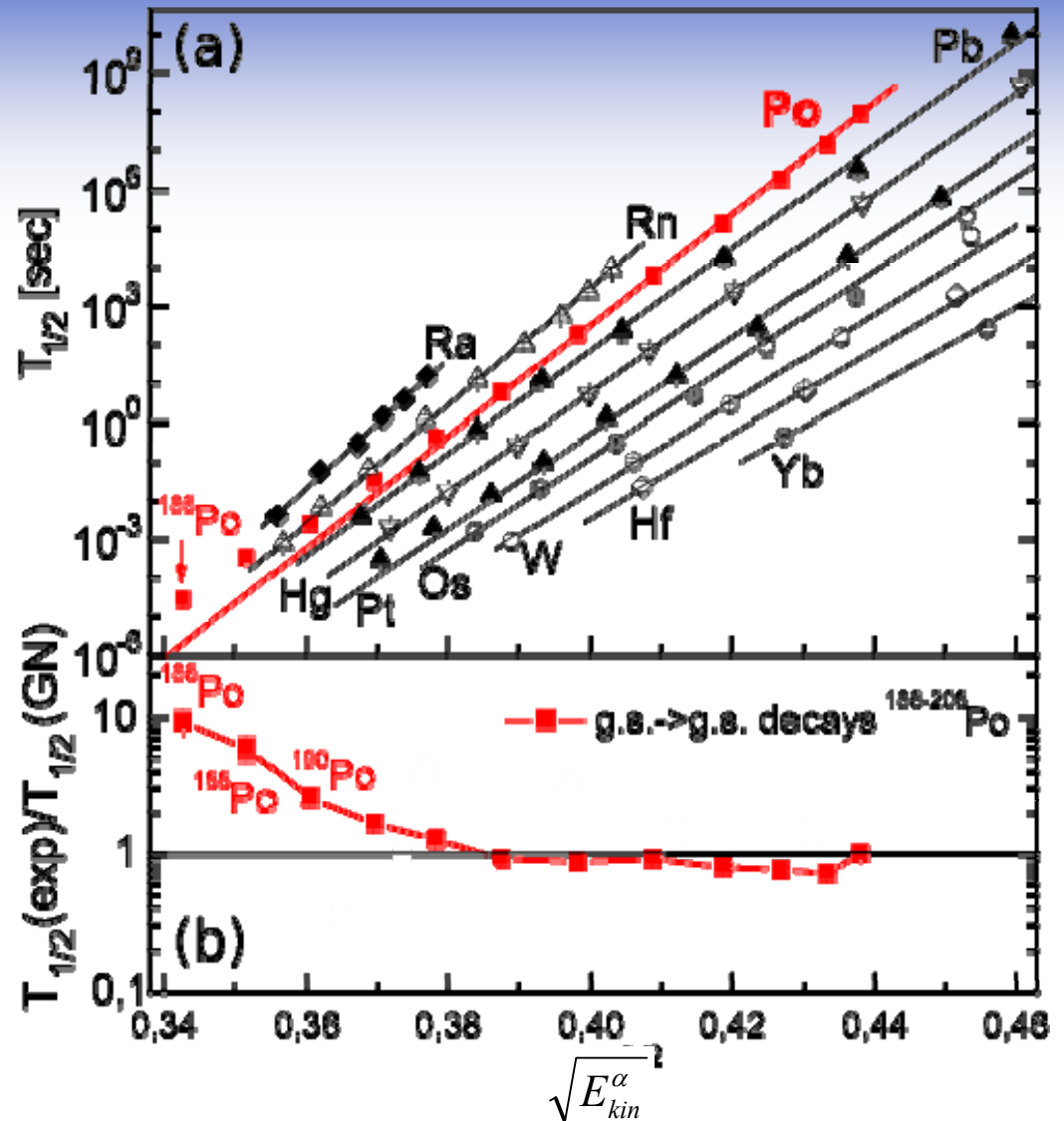
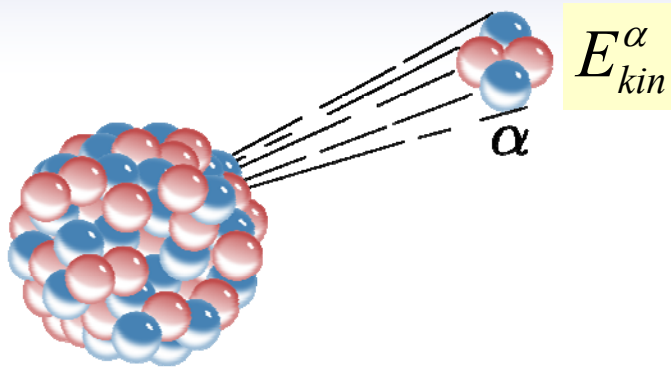
	E_{kin}^{α} [MeV]	λ_{decay} [s]
^{238}U	4.1	$4.5 \cdot 10^9$
^{226}Ra	4.7	$1.6 \cdot 10^3$
^{210}Po	5.3	138 d
^{214}Po	7.7	$1.6 \cdot 10^{-4}$
^{212}Po	8.8	$3 \cdot 10^{-7}$



-Diagnose

- empirisch gefundener Zusammenhang zwischen Zerfallskonstante und Energie Alphateilchen
- Wahrscheinlichkeit, dass Alphateilchen Kern verlässt hängt von kinetischer Energie ab
- mit klassischer Physik nicht zu erklären, sondern erst durch Quantenphysik (Gamov)
- wichtiger Beitrag bei Anerkennung Quantenmechanik

Halbwertszeit vs α -Energie Geiger-Nuttall



Geiger-Nuttall Regel

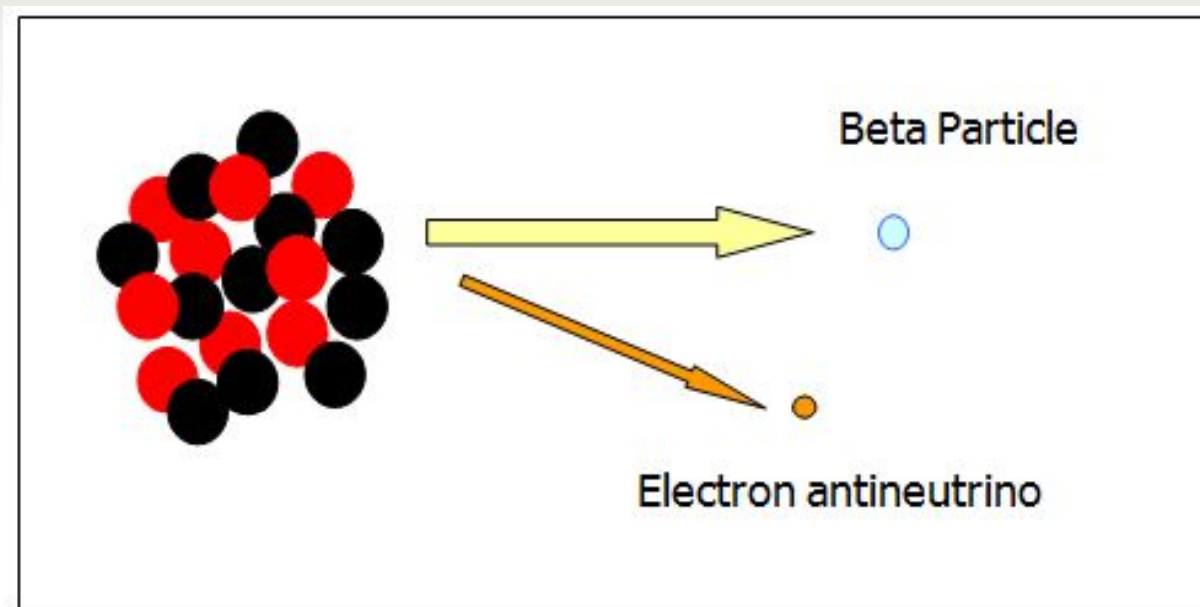
$$\ln \lambda_{decay} = A_{GN} - B_{GN} \frac{Z}{\sqrt{E_{kin}^{\alpha}}}$$

Diagnose

- oben: Geraden geben Geiger-Nuttall Gesetz mit angepassten Koeffizienten wieder
- unten: Abweichen experimenteller Werte von Vorhersagen Geiger-Nuttall Regel für Polonium

Thema Ionisierende Strahlung

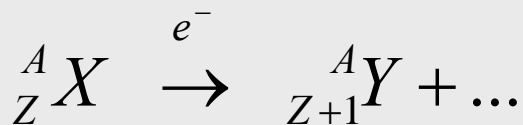
β -Zerfall



β^- -Zerfall

Kern emittiert negative Ladung

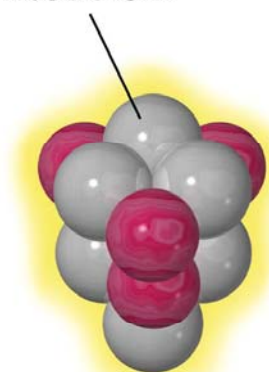
chemischer Reaktionspfad



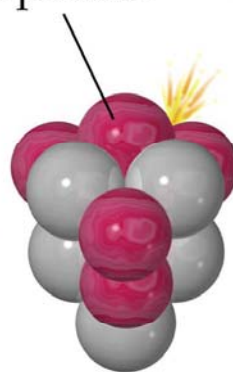
Electron (β particle) is emitted from nucleus

Neutron turned into a proton

Neutron



${}^{14}_6\text{C}$ nucleus



${}^{14}_7\text{N}$ nucleus

					VIII 2 He Helium 4.00260
III B	IV B	VB	VIB	VII B	
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.99840	10 Ne Neon 20.1797
13 Al Aluminum 26.98154	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.97376	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 76.95	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80

elektro

Kernbestandteil zerfällt in geladene Produkte
Neutron \rightarrow **Proton + Elektron**
 Ladungserhaltung ist erfüllt

Diagnose

- Ordnungszahl nimmt um EINS zu und dadurch Änderung chemisches Element
- durch Umwandlung Neutron in Proton bleibt Anzahl Nukleonen konstant

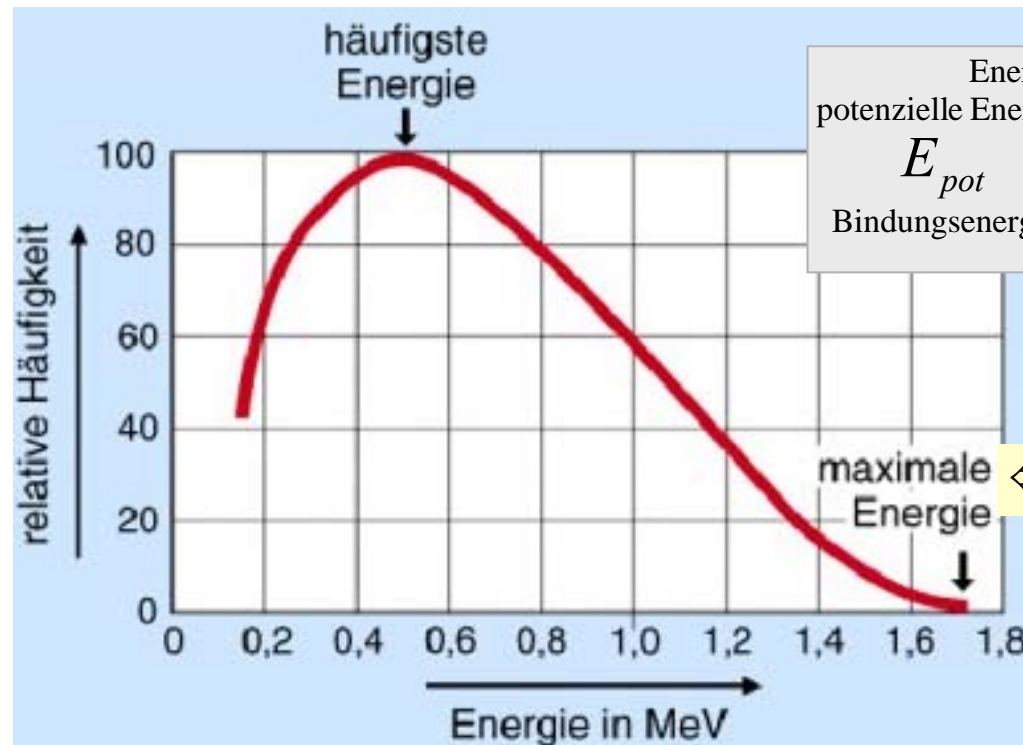


Energie- und Impulserhaltung

β^- - Zerfall

Symptome

- im Kern kann sich kein Elektron aufhalten (Heisenberg)
- Teilchen mit Masse Elektron muss im radioaktiven Zerfall des Kerns entstanden sein
- Energie aus Coulombabstoßung kann EXAKT berechnet werden
- Elektron SOLLTE deshalb wohldefinierte kinetische Energie haben (~ 1 MeV)



Energieerhaltungssatz

potenzielle Energie

$$E_{pot} = E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$$

Bindungsenergie

kinetische Energie

⇐ Energieerhaltung

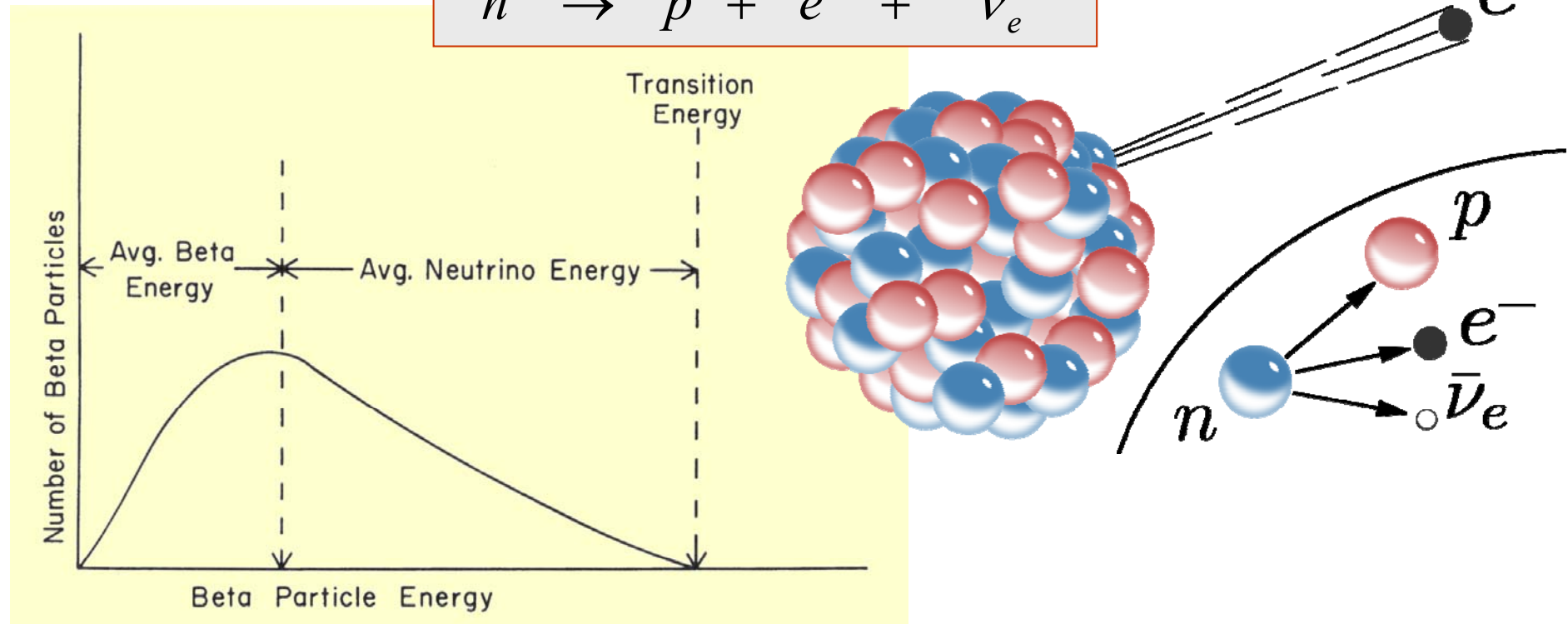
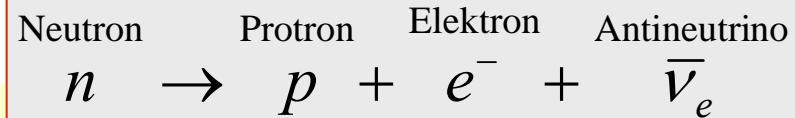
Diagnose

- Experimentelles Ergebnis widerspricht theoretischer Erwartung
- Elektronenverteilung zeigt KONTINUIERLICHE Energieverteilung
- WIDERSPRUCH zum Energie- und Impulserhaltungssatz

β^- - Zerfall

Symptome

Energie- und Impulserhaltung sind fundamental und universell gültig in der Physik

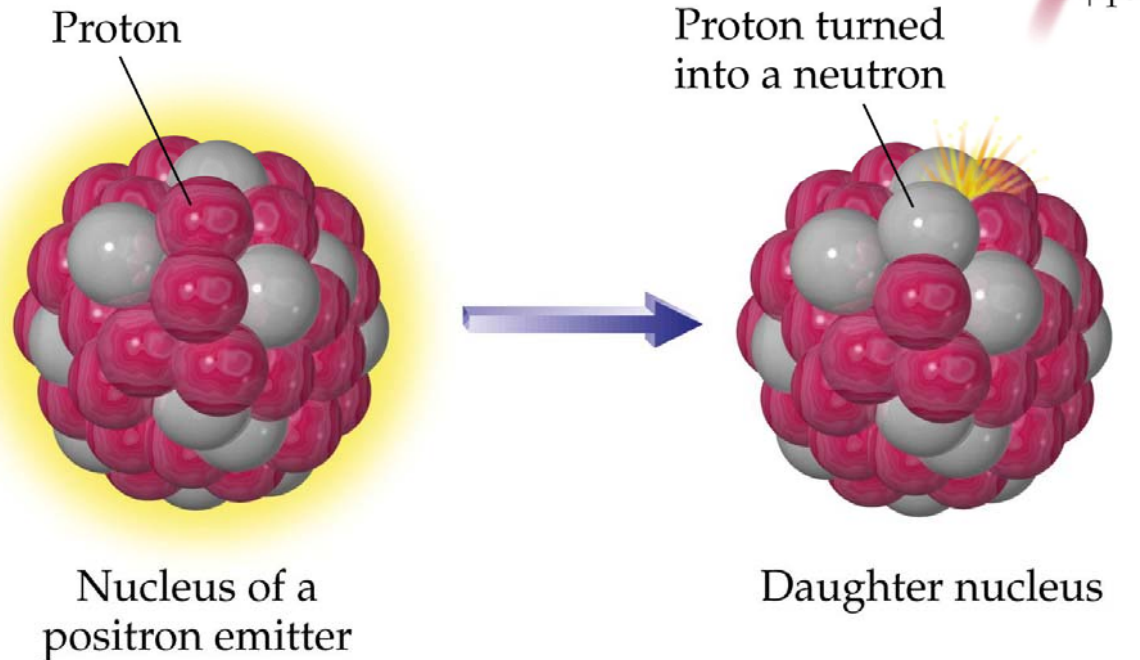
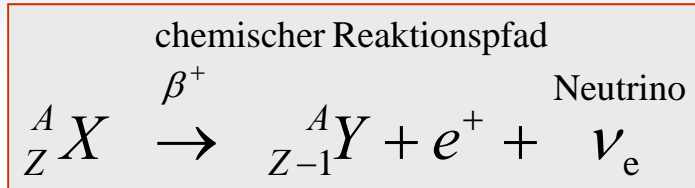


Diagnose

- in β^- -Zerfall wird Teilchen ERZEUGT, das Energie und Impuls aufnimmt (Pauli 1930)
- Antineutrino nimmt TEIL der Energie und des Impulses auf
- Energieaufteilung zwischen Komponenten STATISTISCH und durch Quantenphysik bestimmt
- Energiespektrum der Elektronen wird durch diesen Beitrag stark verbreitert

β^+ – Zerfall

Kern emittiert ein Positron



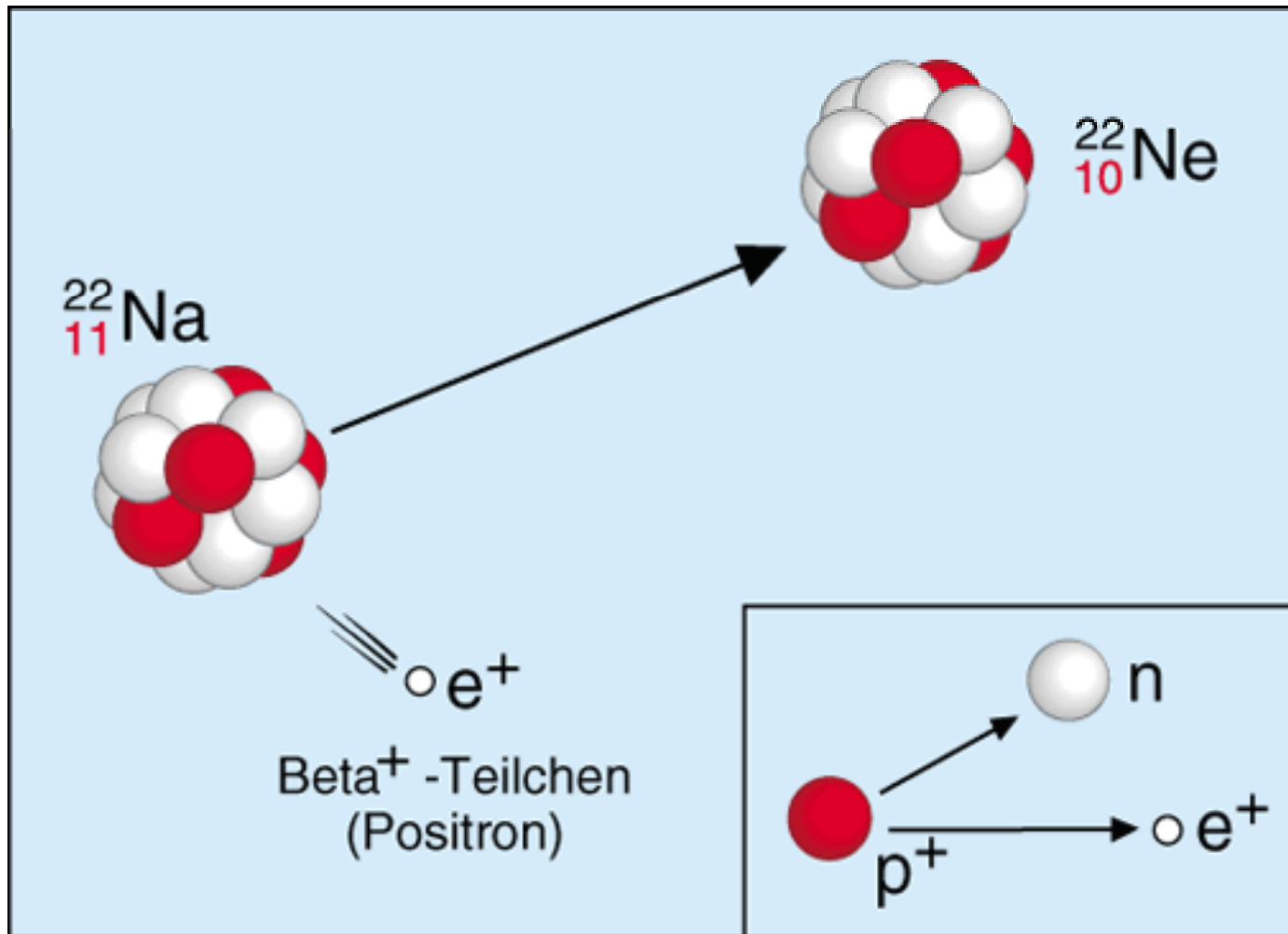
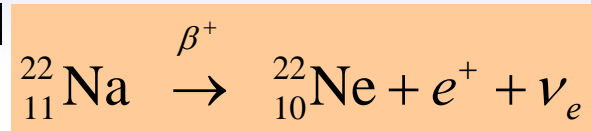
Diagnose

- Positron e^+ hat dieselbe Masse wie Elektron
- Teilchen ist allerdings positiv geladen
- β^+ -Zerfall hat Bedeutung in tomographischer Diagnostik PET (*positron-emission-tomography*)

β^+ – Zerfall

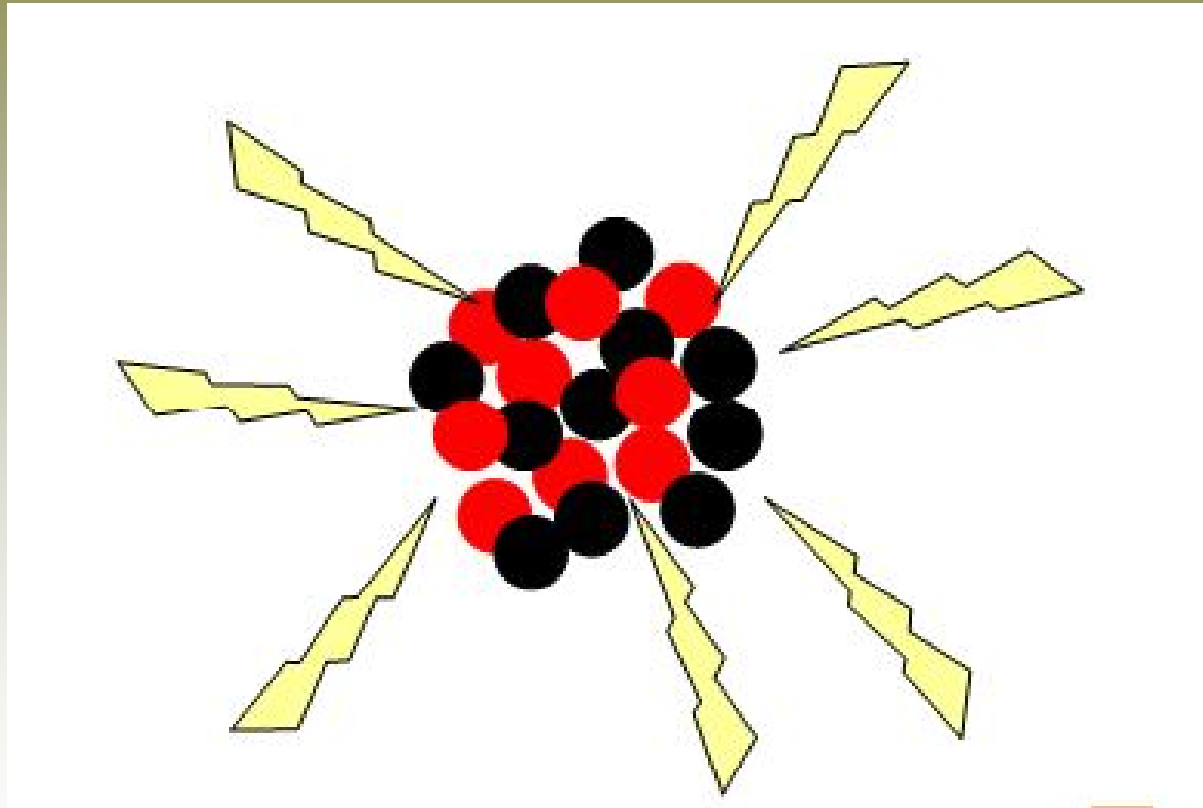
Kern emittiert ein Positron

example

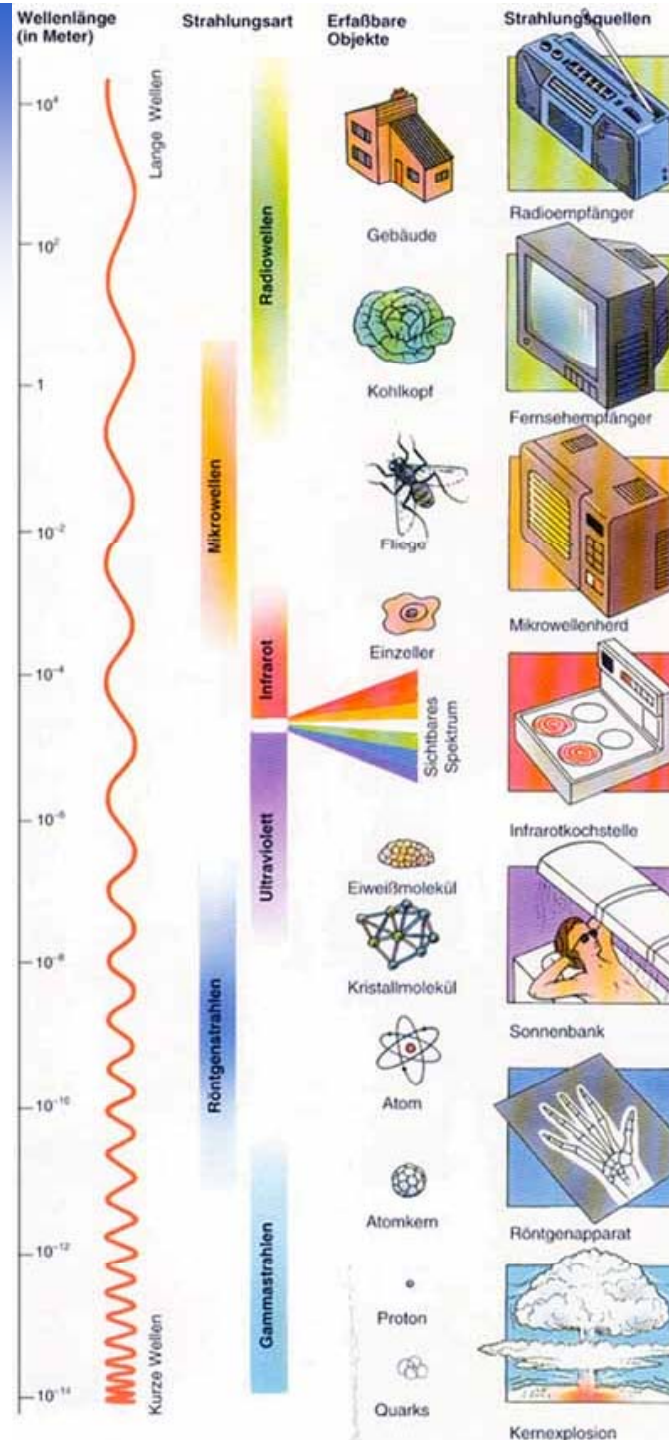


Thema Ionisierende Strahlung

γ -Zerfall

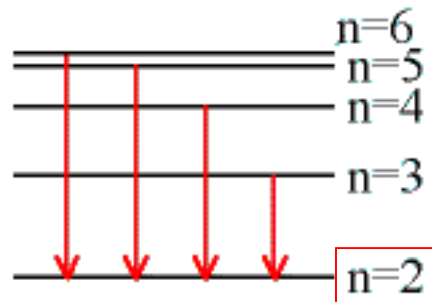


Extrablatt



elektromagnetische Strahlung aus Wasserstoff

Optisch vs γ – Strahlung

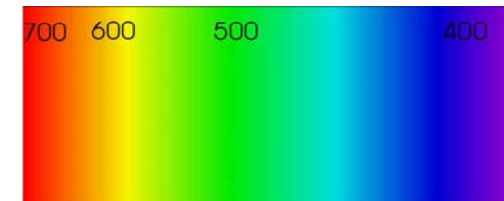


————— n=1 (Ground State)

Optische Strahlung

$$E_{VIS} = h \nu_{VIS} \approx 1 \text{ eV}$$

$$\lambda_{VIS} \approx 10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{m}$$



Gammastrahlung

$$E_{\gamma} = h \nu_{\gamma} \approx 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$\lambda_{\gamma} \approx 10^{-12} \text{ m} = 1 \text{ pm}$$

Diagnose

- Wasserstoff emittiert Licht im sichtbaren Spektralbereich (Balmerserie)
- Energie wird durch elektronische Übergängen im Valenzband bereitgestellt
- Energie der Photonen liegt im Bereich eV

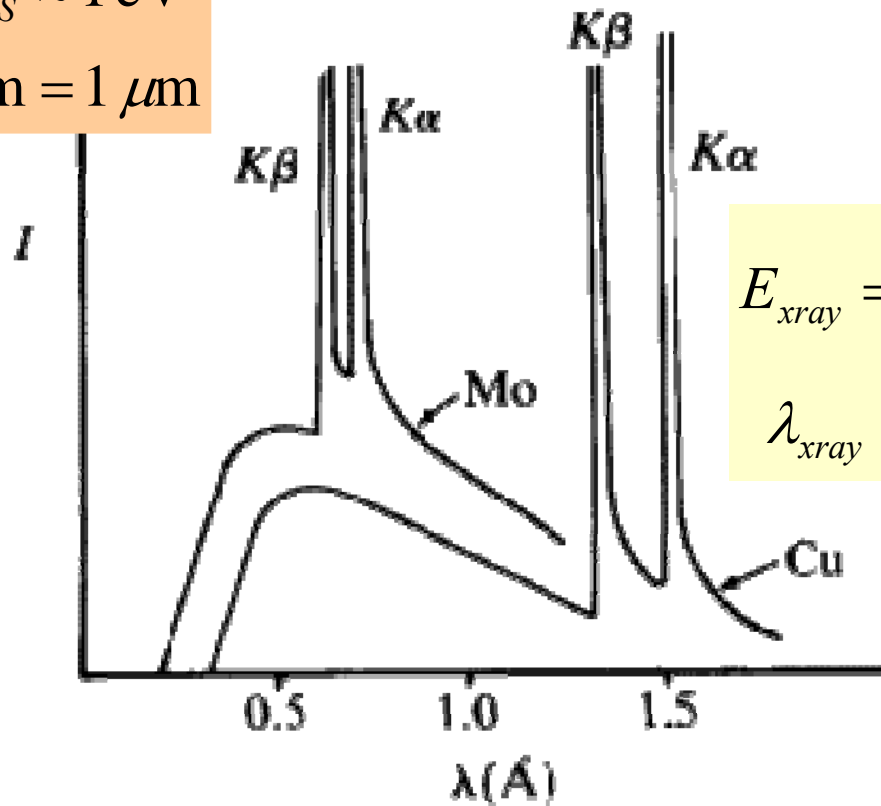
elektromagnetische Strahlung aus inneren Atomschalen

Röntgen- vs γ – Strahlung

Optische Strahlung

$$E_{VIS} = h \nu_{VIS} \approx 1 \text{ eV}$$

$$\lambda_{VIS} \approx 10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{m}$$



Röntgenstrahlung

$$E_{xray} = h \nu_{xray} \approx 10^4 \text{ eV} = 10 \text{ keV}$$

$$\lambda_{xray} \approx 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$$

Gammastrahlung

$$E_{\gamma} = h \nu_{\gamma} \approx 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$\lambda_{\gamma} \approx 10^{-12} \text{ m} = 1 \text{ pm}$$

Diagnose

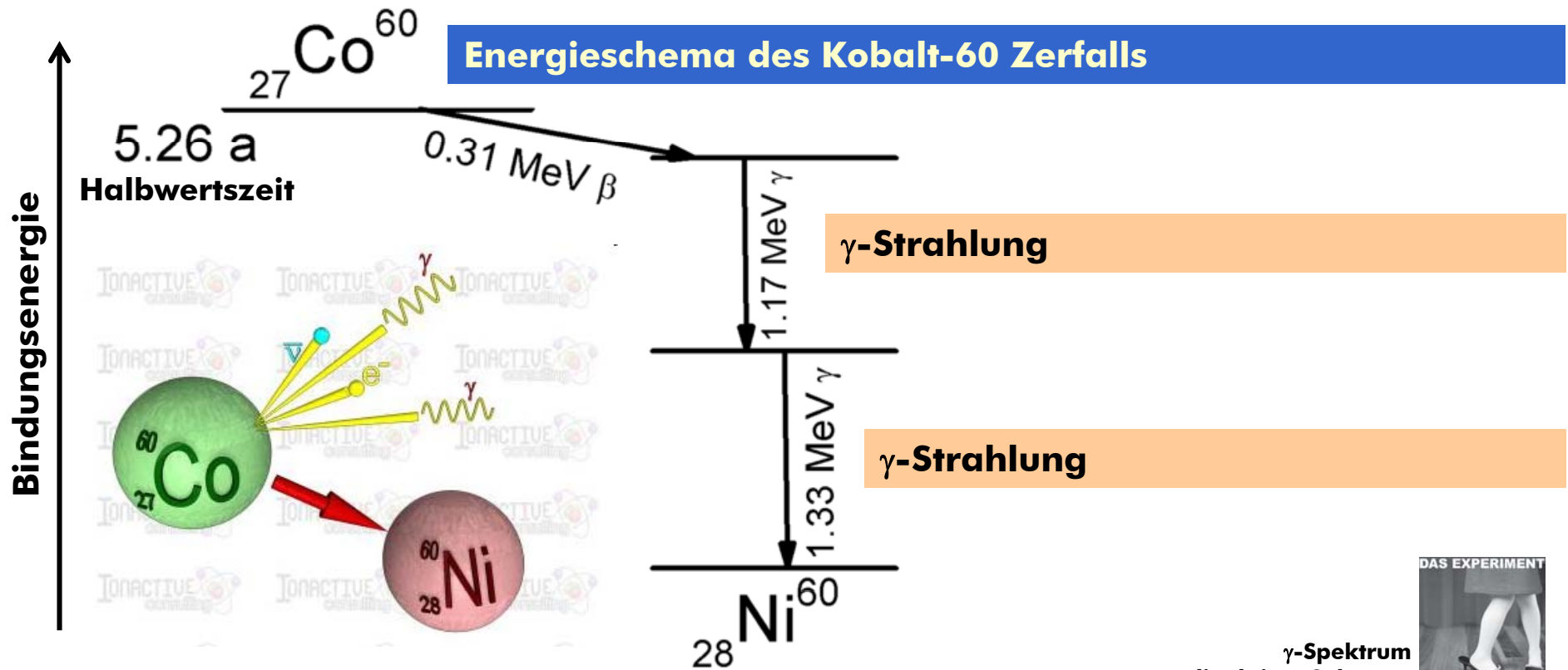
- schwere Elemente emittieren Licht im Röntgenbereich (charakteristische Strahlung)
- Energie wird durch elektronische Übergängen in Kernnähe bereitgestellt
- Energie der Photonen liegt im Bereich keV

elektromagnetische Strahlung aus dem Kern

γ – Strahlung

Symptome

- γ -Strahlung entsteht in Verbindung mit α - oder β - Zerfällen
- radioaktiver Zerfall erzeugt Kern in einem angeregten Zustand

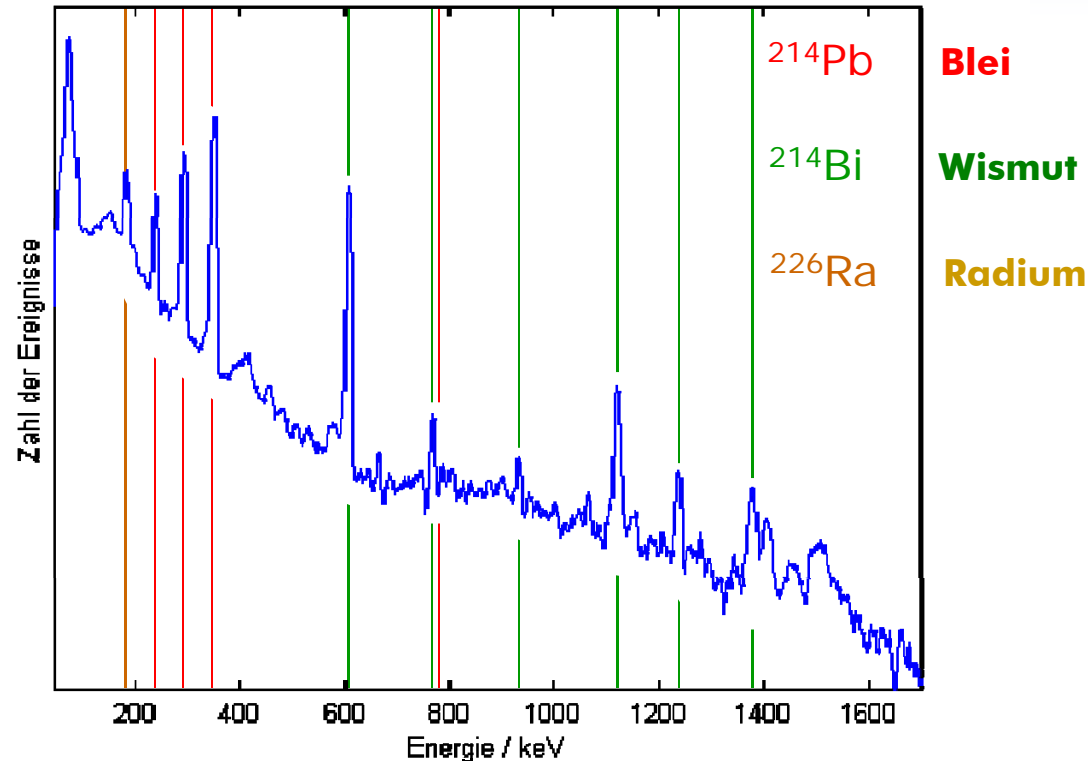


Diagnose

- angeregter Kern wechselt in energetisch tiefer gebundenen Zustand über
- Überschuss an Energie (freiwerdende Bindungsenergie) wird als γ -Photon abgegeben
- γ -Spektrum einer Probe liefert spektralen Fingerabdruck radioaktiver Substanz

Lichtemission aus dem Kern

Gammastrahlung

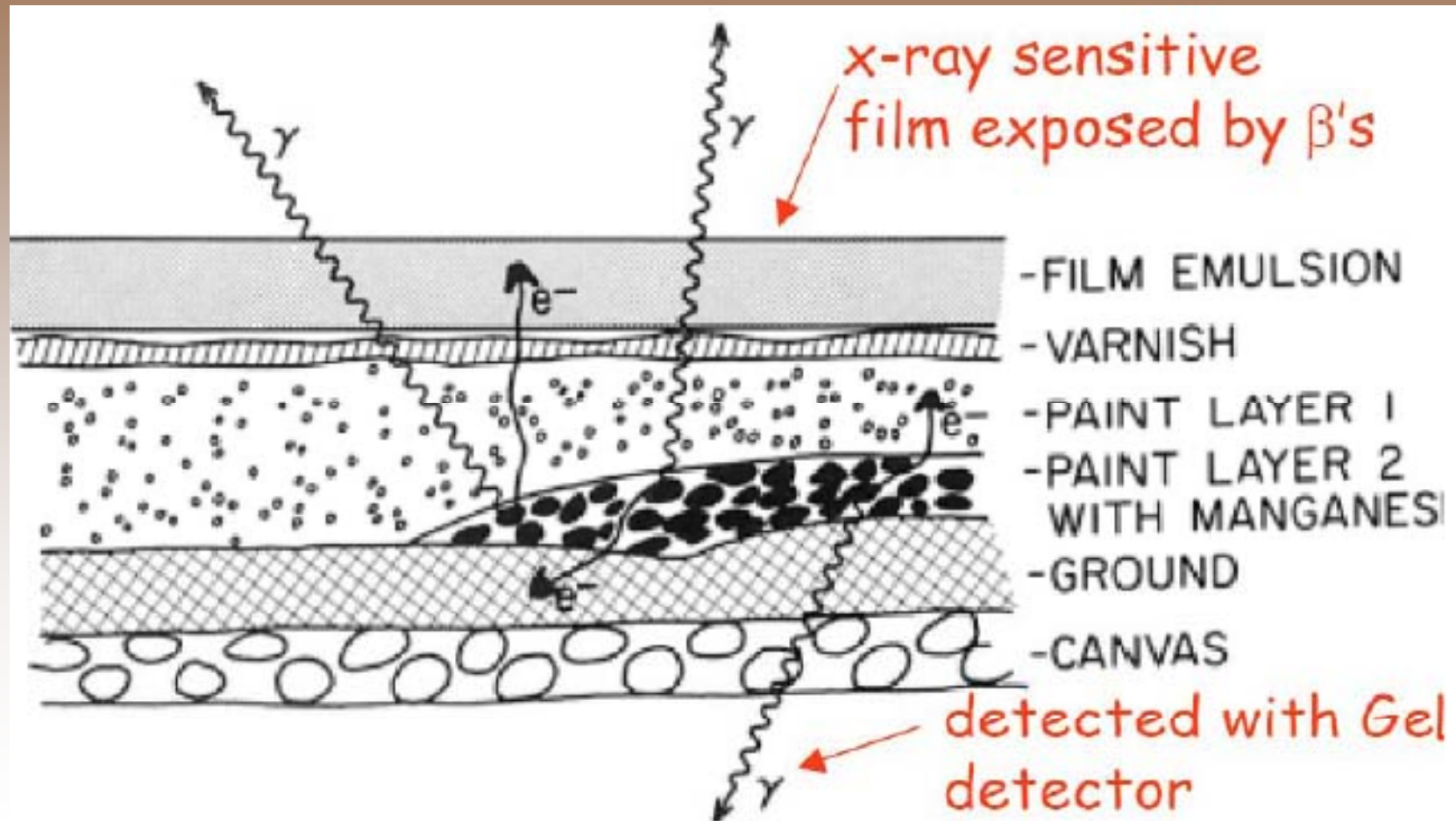


Diagnose

- Energiezustände im Kern sind elementspezifisch
- jedes radioaktive Element emittiert bei Relaxation charakteristische γ -Strahlung
- Gammastrahlung enthält Fingerabdruck der Elemente
- Identifizierung unbekannter radioaktiver Substanzen



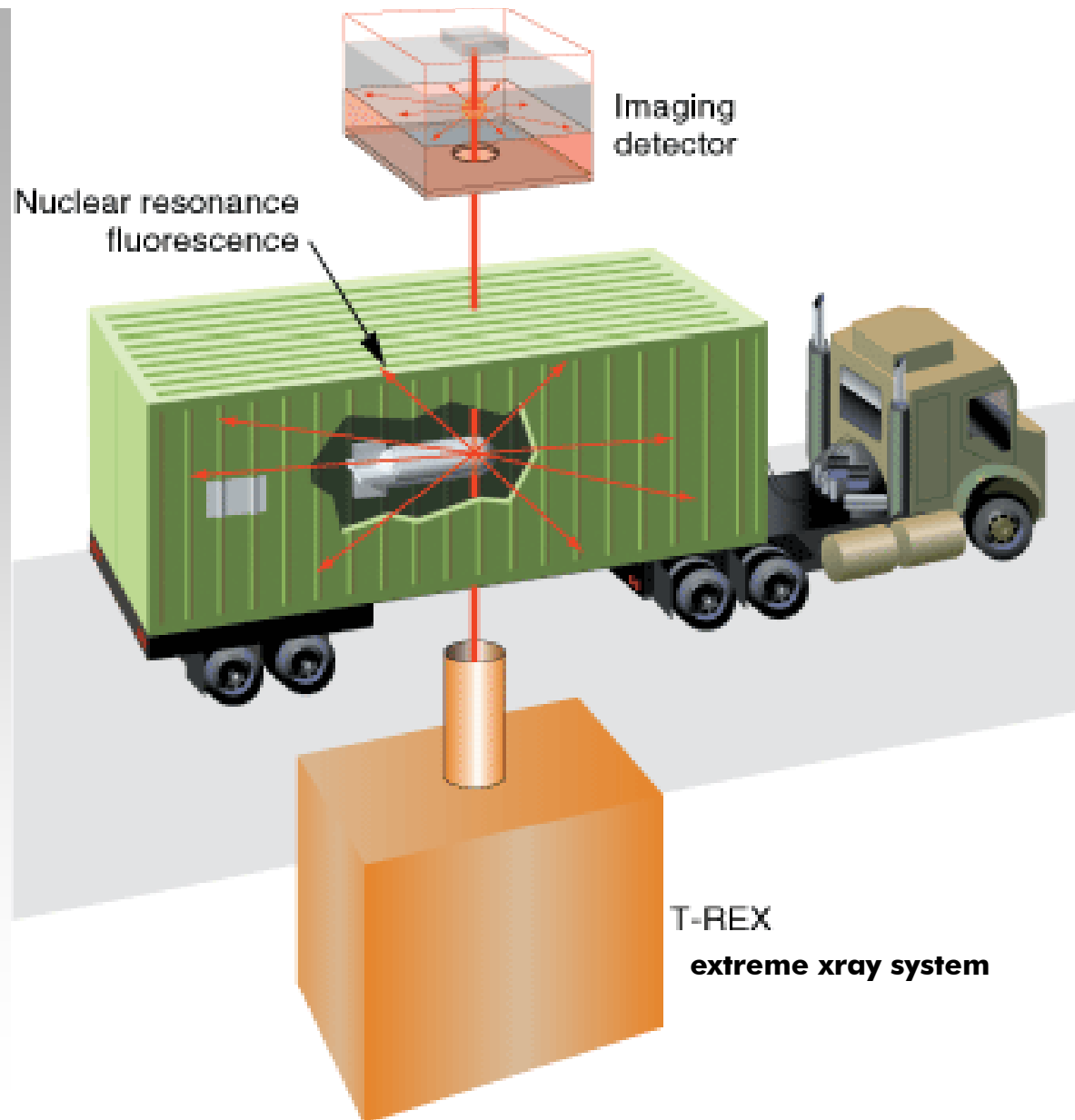
Neutroneneinfang Gemäldeanalyse



Diagnose

- Röntgenfilm gibt Position der emittierten Strahlung an
- γ -Strahlung charakteristisch für chemische Zusammensetzung des Pigments

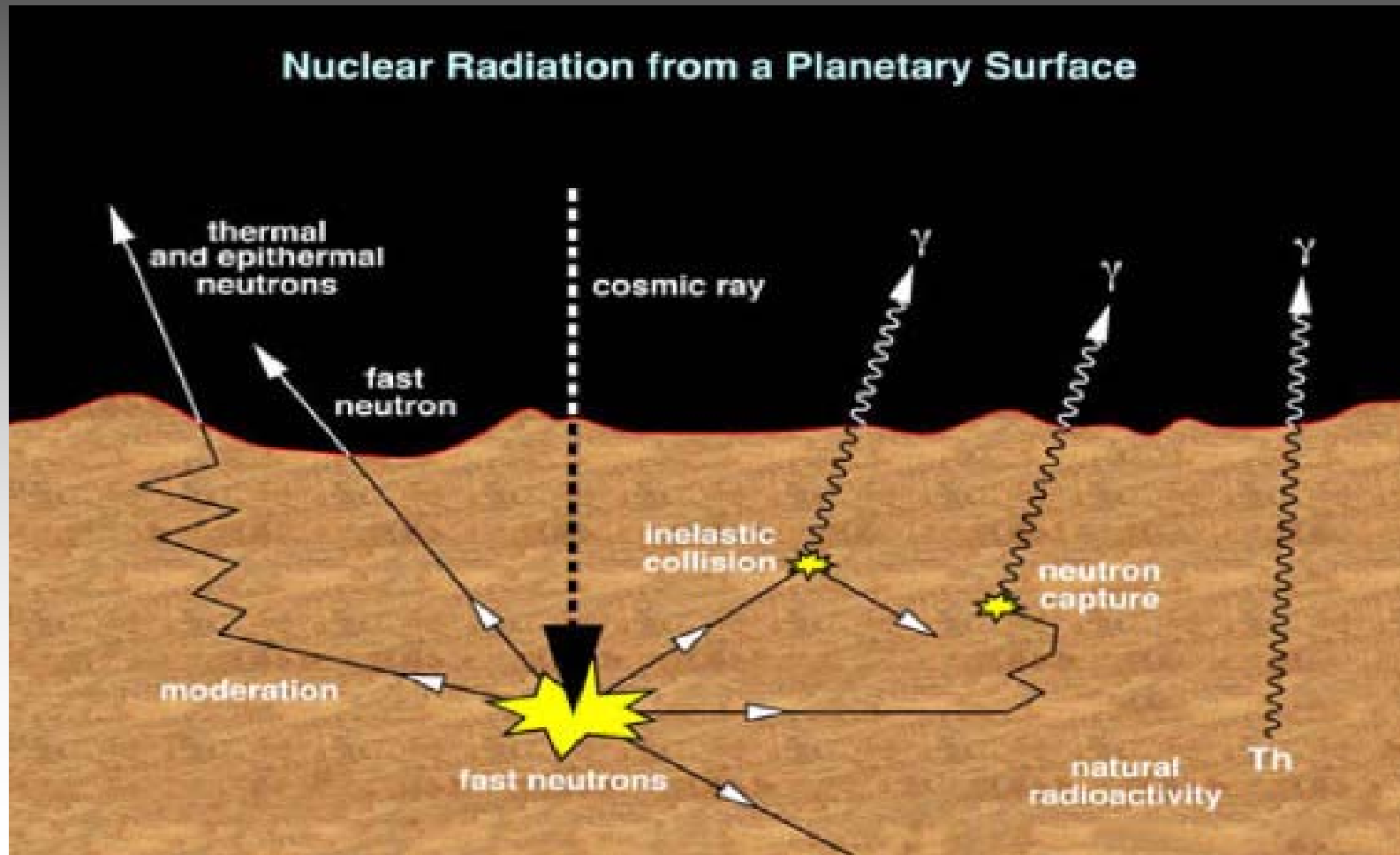
isotopengenau γ -detection



Diagnose

- hochenergetischer Röntgenstrahl regt Isotope zu Kernfluoreszenz an
- isotopenspezifische Emission erlaubt Nachweis geringer Mengen nuklearen Materials

γ -Spektrum Fluoreszenz



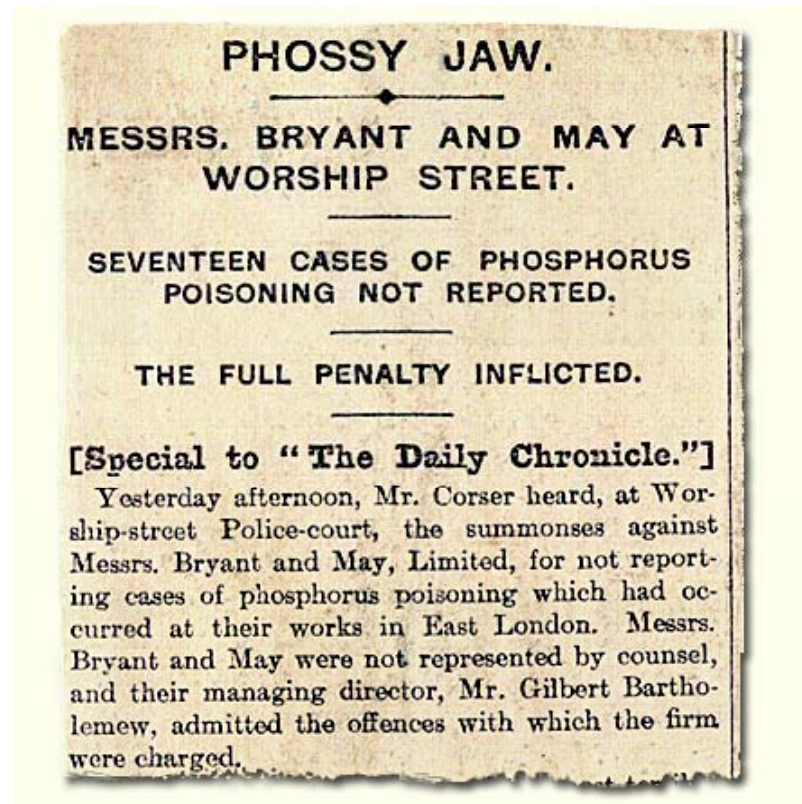
Diagnose

- kosmische Strahlung erzeugt über Neutronenwechselwirkung charakteristische γ -Emission
- chemische Zusammensetzung von Planeten wie Merkur können so bestimmt werden

γ -Spektrum Fluoreszenz

Symptome

- Radiumuhren sind Instrumente, deren Ziffern mit radiolumineszierender Paste bestrichen sind
- Substanz enthält radioaktives Radium
- höchste Produktionsrate um 1900, als Gefährlichkeit noch nicht bekannt war



Diagnose

- Uhren wurden hauptsächlich von jungen Frauen durch aufpinseln der Substanz hergestellt
- Kontakt über Pinsel mit Radium führte beispielsweise zu Degeneration Kieferknochen

Extrablatt



A New Light

With the coming of electric light it seemed as if the last step in convenient illumination had been taken. But, already, there is a supplement to electric light. It goes by the name of Undark.

No longer is it necessary to grope in the dark for a lighting switch. The switch itself shines. No longer even is electric light, or light of lamp or candle, necessary in order to see many of the things you wish to see in the dark. Undark shows them to you.

Undark is a combination of zinc sulphide and radium. The latter is used in such minute quantities that it is absolutely harmless yet its energy makes the zinc sulphide glow continuously.

Manufacturers have been quick to recognize the value of Undark. They apply it to the dials of watches and clocks, to electric push buttons and pull chain pendants, to the buckles of bedroom slippers, to house numbers, flashlights, compasses, gasoline gauges, autometers and many other articles which you frequently wish to see in the dark.

For interesting little folder telling of the production of radium and the uses of Undark address:



To Manufacturers

The number of manufactured articles to which Undark will add increased usefulness is unlimited. From a sales standpoint, it has many obvious advantages. We gladly answer inquiries from manufacturers, and, when it seems advisable, will carry on experimental work for them. Undark may be applied either at your plant, or at our own.

The application of Undark is simple. It is furnished as a powder, which is mixed with an adhesive. The paste thus formed is painted on with a brush. It adheres firmly to any surface.

United States Radium Corporation

58 Pine Street, New York City

Factories: Orange, N. J.

Mines: Colorado

UNDARK

Radium Luminous Material

Shines in the Dark



The Power of Radium at Your Disposal

Twenty-three years ago radium was unknown. Today, thanks to constant laboratory work, the power of this most unusual of elements is at your disposal. Through the medium of Undark, radium serves you safely and surely.

Does Undark really contain radium? Most assuredly. It is radium, combined in exactly the proper manner with zinc sulphide, which gives Undark its ability to shine continuously in the dark.

Manufacturers have been quick to recognize the value of Undark. They apply it to the dials of watches and clocks, to electric push buttons, to the buckles of bed room slippers, to house numbers, flashlights, compasses, gasoline gauges, autometers and many other articles which you frequently wish to see in the dark.

The next time you fumble for a lighting switch, bark your shins on furniture, wonder vainly what time it is because of the dark—remember Undark. *It shines in the dark.* Dealers can supply you with Undarked articles.

For interesting little folder telling of the production of radium and the uses of Undark address

RADIUM LUMINOUS MATERIAL CORPORATION
58 PINE STREET NEW YORK CITY
Factories: Orange, N. J. Mines: Colorado and Utah

UNDARK

Radium Luminous Material

Shines in the Dark



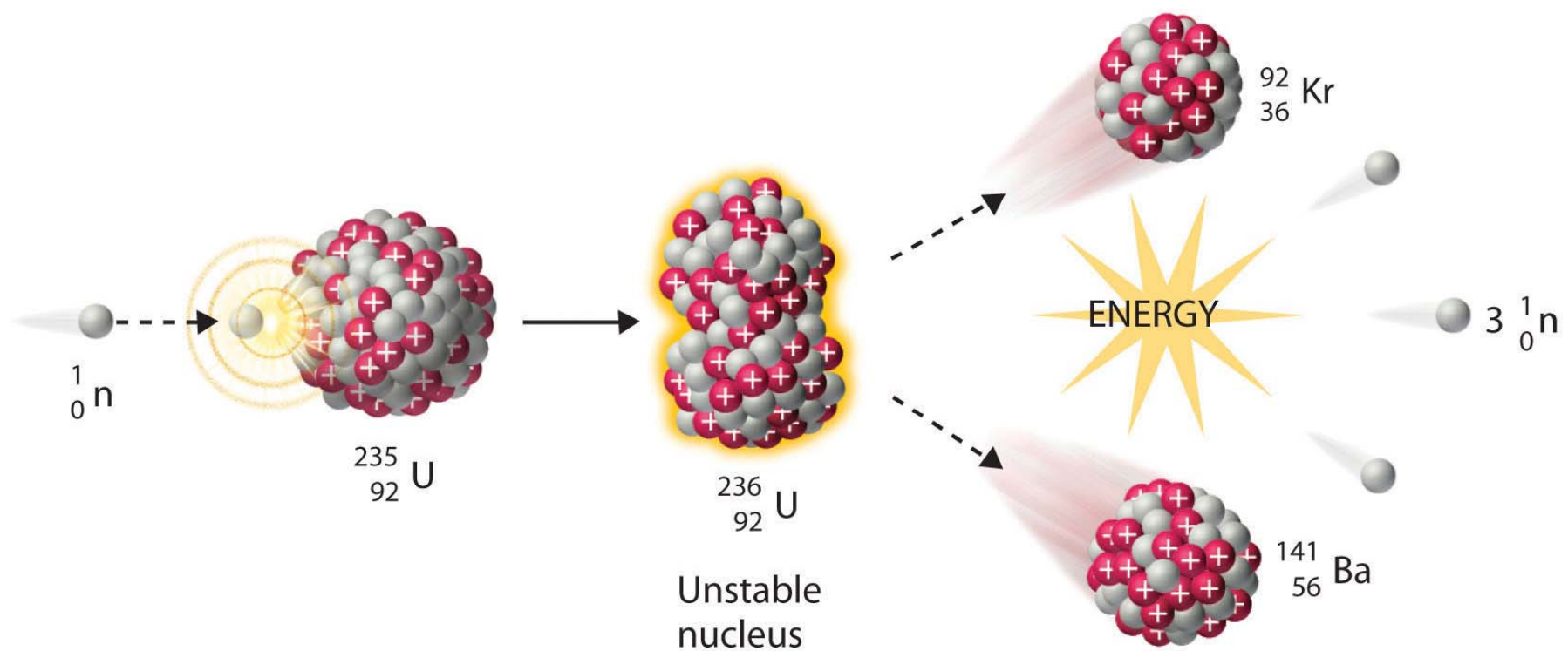
To Manufacturers

The number of manufactured articles to which Undark will add increased usefulness is manifold. From a sales standpoint, it has many obvious advantages. We gladly answer inquiries from manufacturers and, when it seems advisable, will carry on experimental work for them. Undark may be applied either at your plant, or at our own.

The application of Undark is simple. It is furnished as a powder, which is mixed with an adhesive. The paste thus formed is painted on with a brush. It adheres firmly to any surface.

Thema Ionisierende Strahlung

Teilcheneinfang



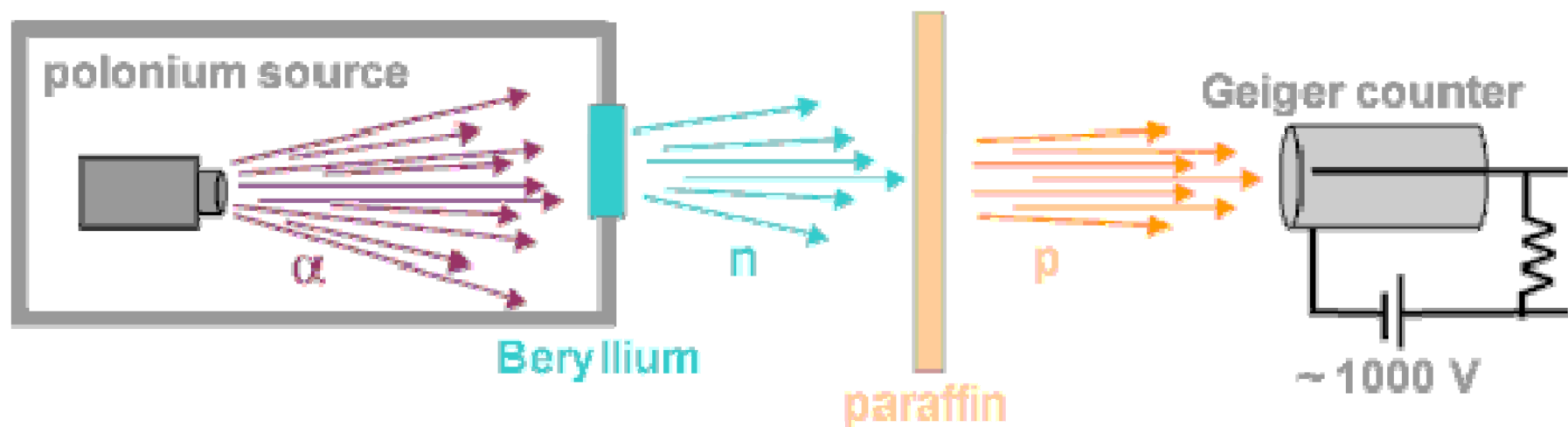


Chadwick 1932

Entdeckung des Neutrons

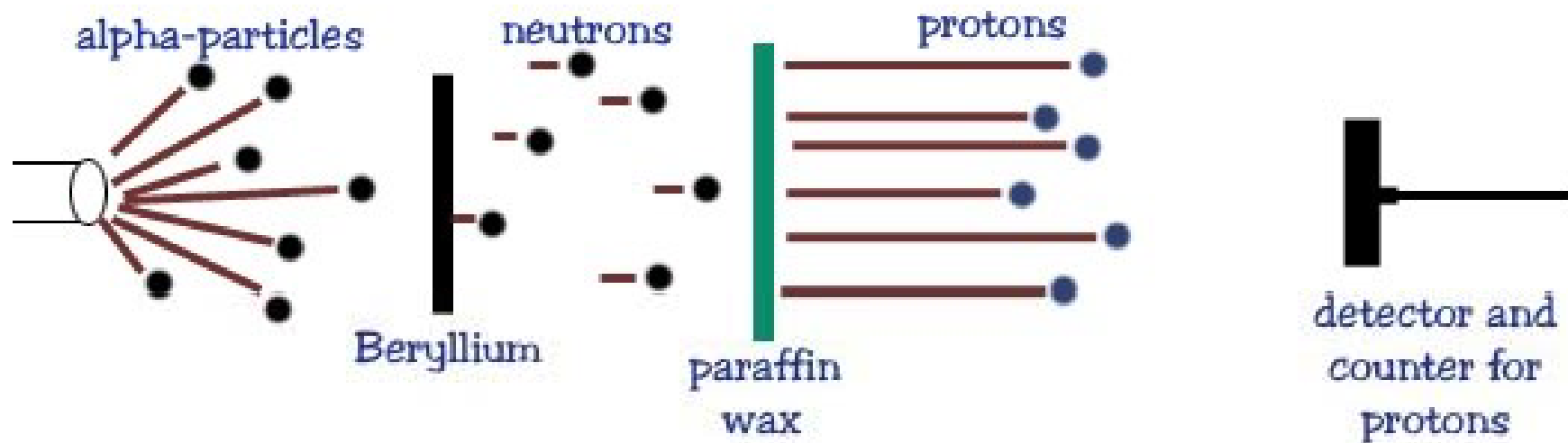
Symptome

- Berylliumprobe mit α -Teilchen bestrahlt, emittiert unbekannte Strahlung
- anfänglich Vermutung ist, dass es sich um γ -Strahlung handelt, da Strahlung nicht durch elektrische und magnetische Felder abgelenkt
- beim Durchgang durch Paraffin werden Protonen ausgelöst



Diagnose

- bei der Strahlung handelt es sich um neutrale Teilchen und nicht um γ -Photonen, da KEIN Photoeffekt ausgelöst wird
- Teilchen müssen schwerer als Elektronen sein, da Prototonen aus dem Kern ausgelöst werden



**The Nobel Prize in Physics 1935 was awarded to James Chadwick
for the discovery of the neutron**

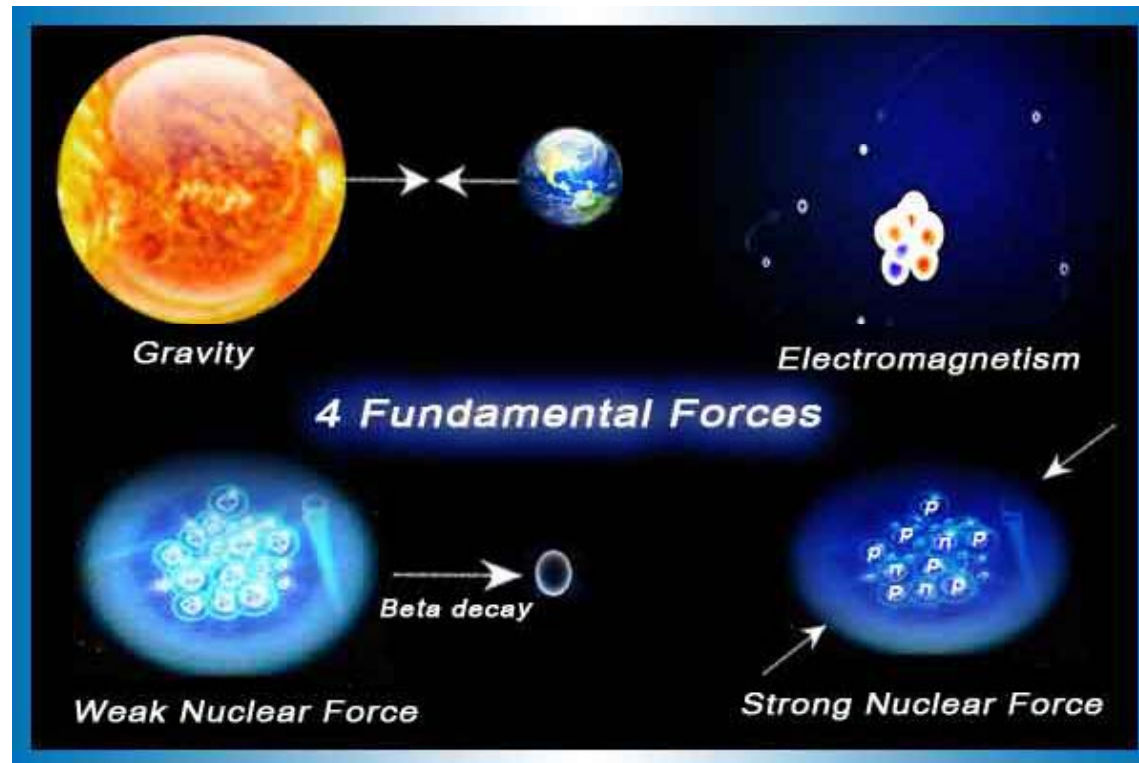


Wechselwirkung mit Materie

Neutronen-Kernstöße

Symptome

- Neutronen tragen **KEINE** elektrische Ladung
- Wechselwirkung mit Materie nicht über Ladung, sondern über die starke Wechselwirkung



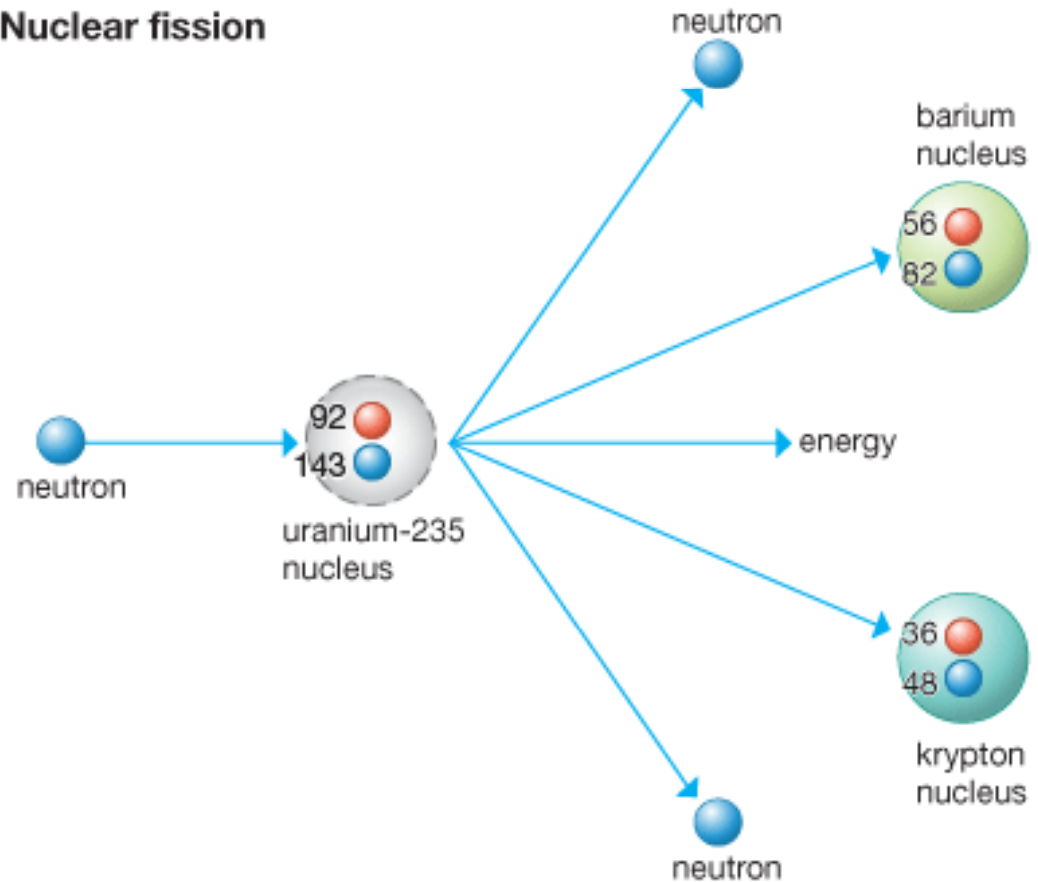
Diagnose

- Reaktionsquerschnitt annähernd geometrischer Querschnitt des Atomkerns
- hoher Wirkungsquerschnitte für langsame, man sagt thermische, Neutronen
- Einfang thermischer Neutronen führt zu instabilen Kernen
- instabiler Kern zerfällt unter Teilchen- oder Lichtemission



Neutron trifft Kern

Nuclear fission



Diagnose

- Reaktionsquerschnitt annähernd geometrischer Querschnitt des Atomkerns
- Einfang thermischer Neutronen führt zu instabilen Kernen
- instabiler Kern zerfällt unter Teilchen- oder Lichtemission



Wechselwirkung mit Materie

Elastische Neutronen-Kernstöße



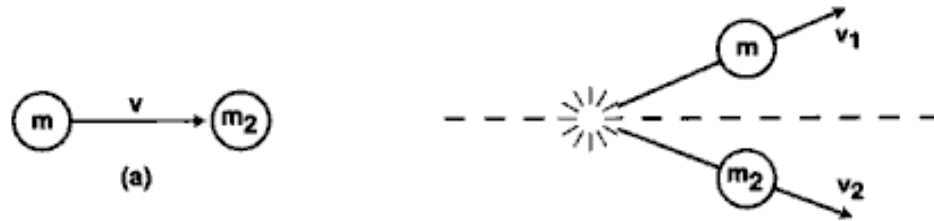
Symptome

- beim Stoß von Neutronen mit Kernen gilt der Impulserhaltungssatz
- beim diesem elastischen Stoß wird auf Kern Energie in Form kinetischer Energie übertragen

Impulserhaltungssatz

Impulserhaltungssatz

$$m_{\text{neutron}} v_{\text{neutron}}^{\text{initial}} = m_{\text{neutron}} v_{\text{neutron}}^{\text{final}} + m_{\text{nucleus}} v_{\text{nucleus}}^{\text{final}}$$



BEFORE COLLISION
Kinetic Energy = $1/2 mv^2$
Momentum = mv

AFTER COLLISION
Kinetic Energy = $1/2 mv_1^2 + 1/2 m_2 v_2^2$
Momentum = $mv = mv_1 + m_2 v_2$

Energieerhaltungssatz

Energieübertrag bei elastischem Stoß von Neutron mit Kern

$$\Delta E_{\text{elastisch}} = 4 \cdot E_{\text{kin}}^{\text{neutron}} \frac{m_{\text{neutron}} \cdot m_{\text{Kern}}}{(m_{\text{neutron}} + m_{\text{Kern}})^2}$$

example

Energieübertrag bei elastischem Stoß von Neutron mit Kohlenstoff

$$\Delta E_{\text{elastisch}} = 4 \cdot E_{\text{kin}}^{\text{neutron}} \frac{1.0 \text{ amu} \cdot 12.0 \text{ amu}}{(1.0 \text{ amu} + 12.0 \text{ amu})^2} = 0.071 \cdot E_{\text{kin}}^{\text{neutron}}$$

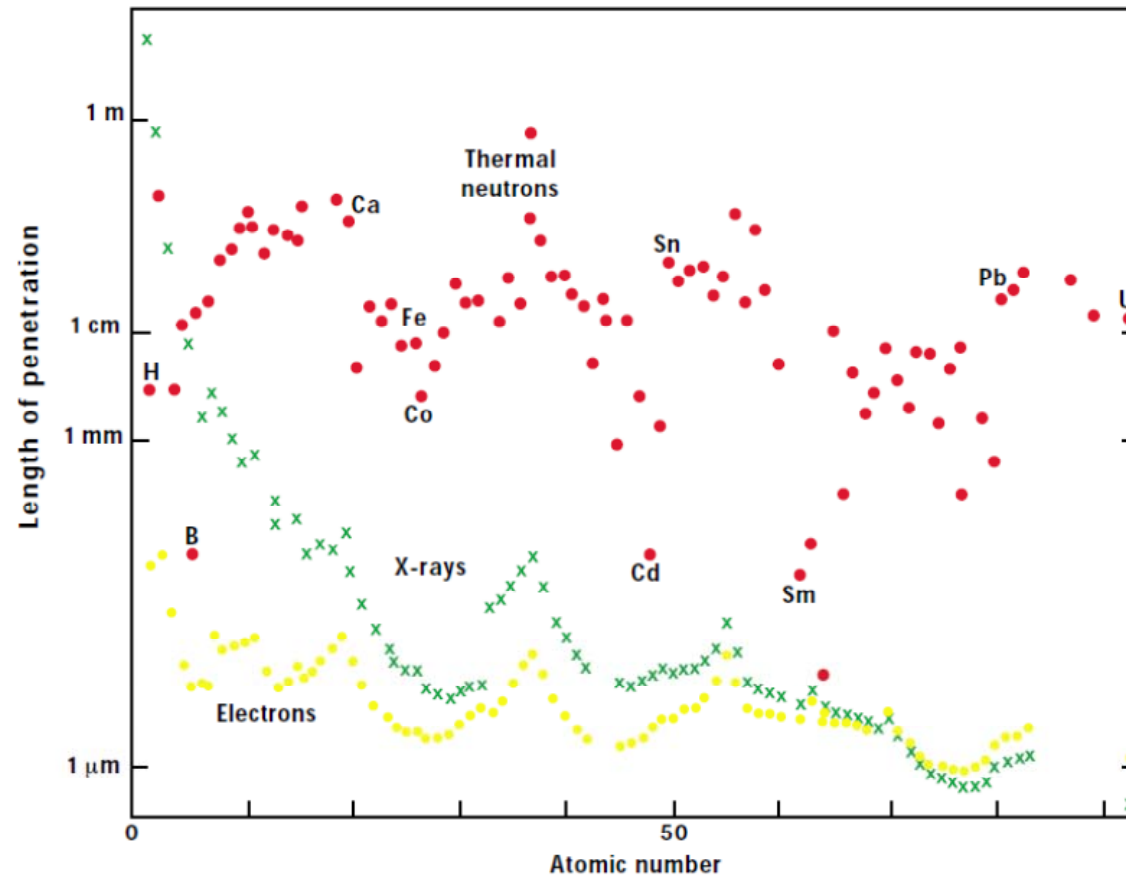
Diagnose

Hoher Impuls- und Energieübertrag bei Stößen mit leichten Kernen wie Wasserstoff

Eindringtiefe Vorteil für Neutronen

Symptome

Im Gegensatz zu Röntgenstrahlung und Elektronen sind thermische Neutronen kaum elementspezifisch und zeigen keine Systematik bezüglich des Periodensystems



Diagnose

Für die Analyse sind Neutronen interessant, weil neutrale Teilchen eine hohe Eindringtiefe haben und mit ALLEN Elementen eines Materials wechselwirken

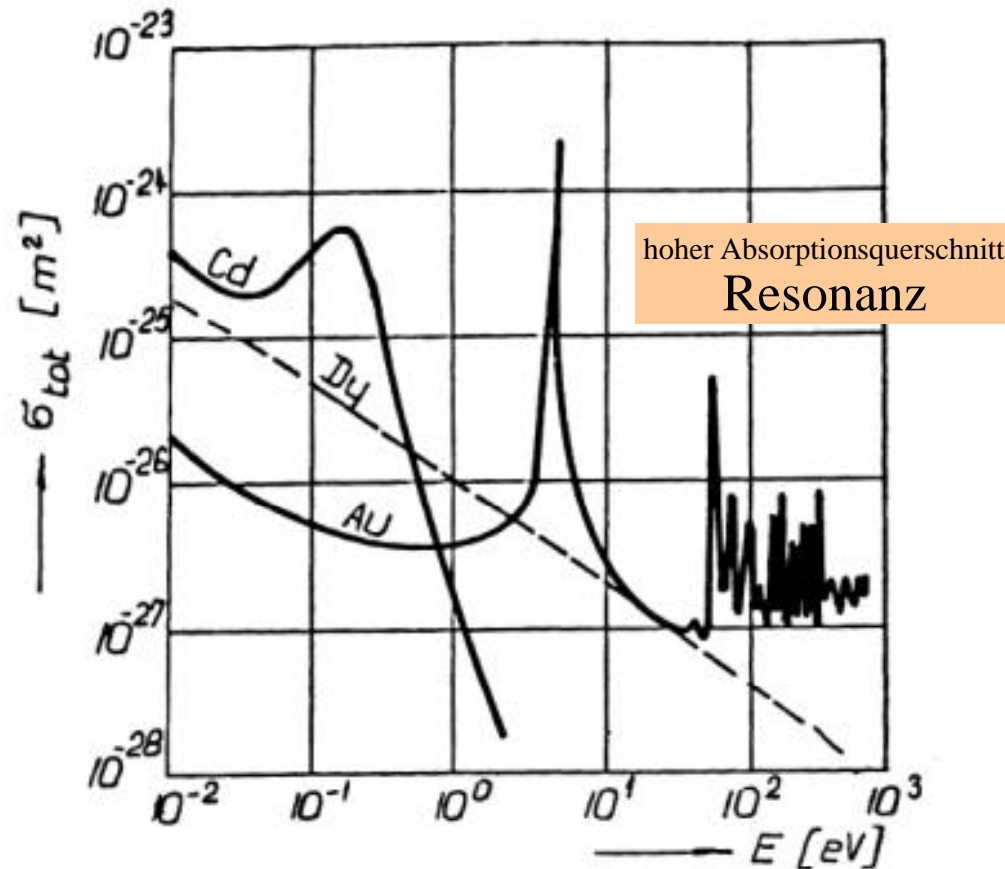


Wechselwirkung mit Materie

Inelastische Neutron-Kern Stoß

Symptome

- Neutronen sind deBroglie-Materiewellen
- hohe Wirkungsquerschnitte für langsame, man sagt thermische, Neutronen
- in inelastischen Stößen wird Energie übertragen und Kern elektronisch angeregt



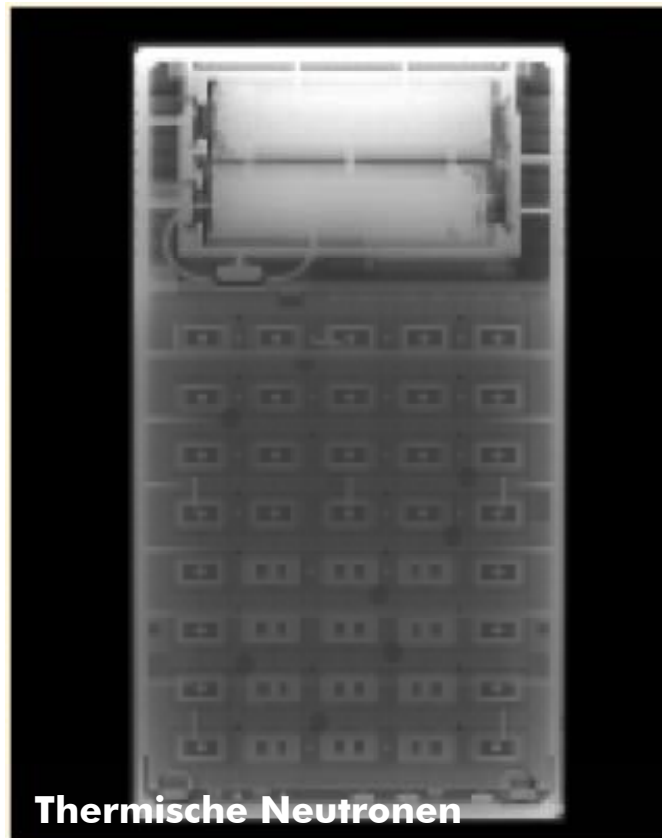
Diagnose

- bei bestimmten Stoßenergien kommt es zu Neutron-Kern Resonanzen
- Probe kann empfindlich auf bestimmte Elemente untersucht werden

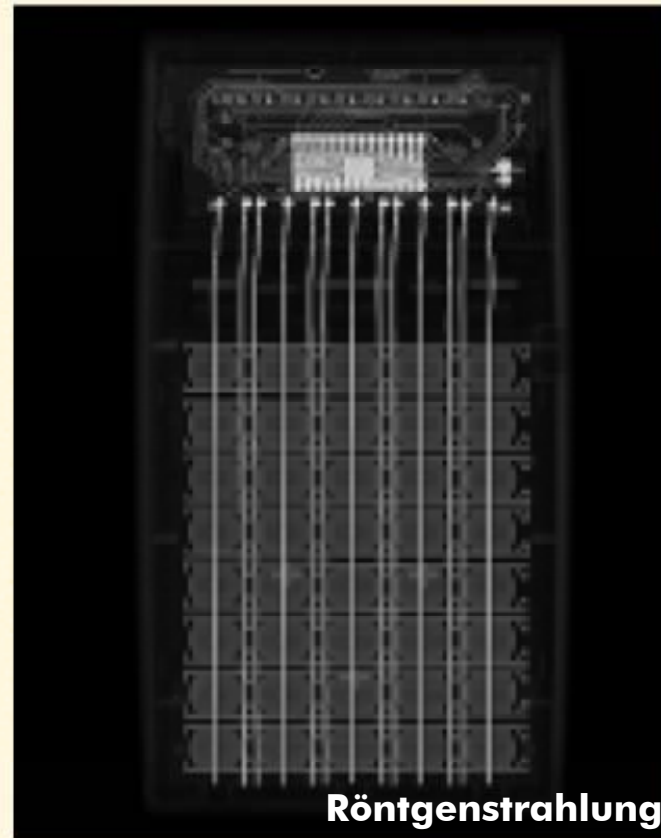
Neutronen vs Röntgen

Symptome

- Röntgenstrahlung wechselwirkt insbesondere mit schwereren Elementen
- Kontrast für leichte Elemente wie Wasserstoff und Kohlenstoff ist gering
- in dem untersuchten Objekt sieht man im Röntgenbild im wesentlichen schwerere Metalle



Thermische Neutronen

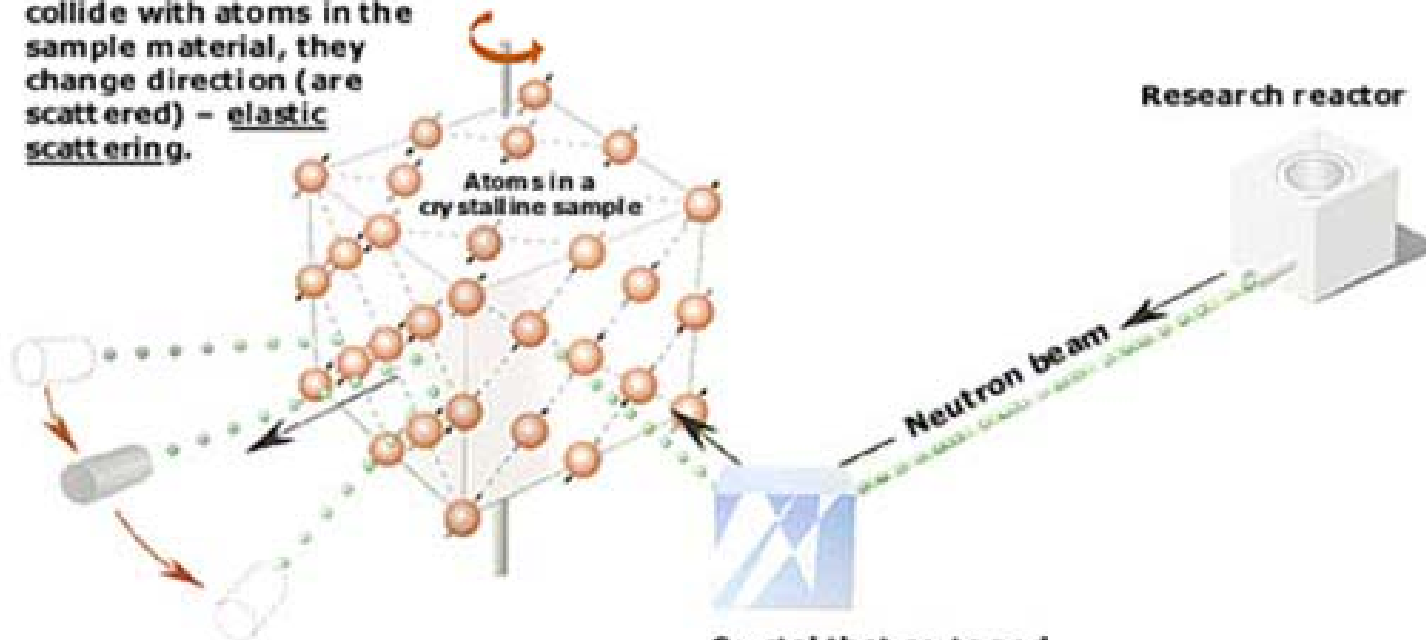


Röntgenstrahlung

Diagnose

Neutronen-Radiography macht aufgrund der hohen Empfindlichkeit leichte Elemente sichtbar

When the neutrons collide with atoms in the sample material, they change direction (are scattered) - elastic scattering.



Detectors record the directions of the neutrons and a diffraction pattern is obtained.

The pattern shows the positions of the atoms relative to one another.

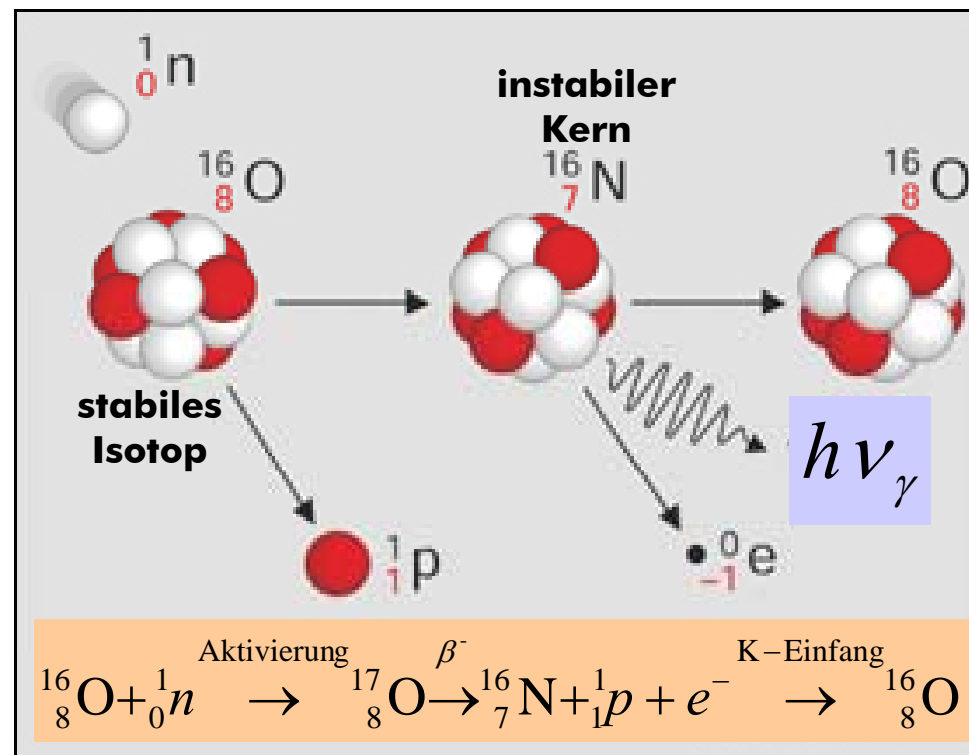
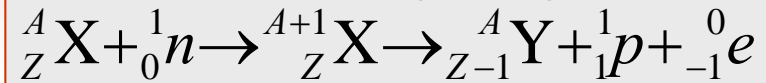
Crystal that sorts and forwards neutrons of a certain wavelength (energy) - monochromatized neutrons

The Nobel Prize in Physics 1994 was awarded for pioneering contributions to the development of neutron scattering techniques for studies of condensed matter jointly with one half to Bertram N. Brockhouse for the development of neutron spectroscopy and with one half to Clifford G. Shull for the development of the neutron diffraction technique

Nukleares Übergewicht führt zu Aktivierung

Neutroneneinfang

chemische Reaktionsgleichung



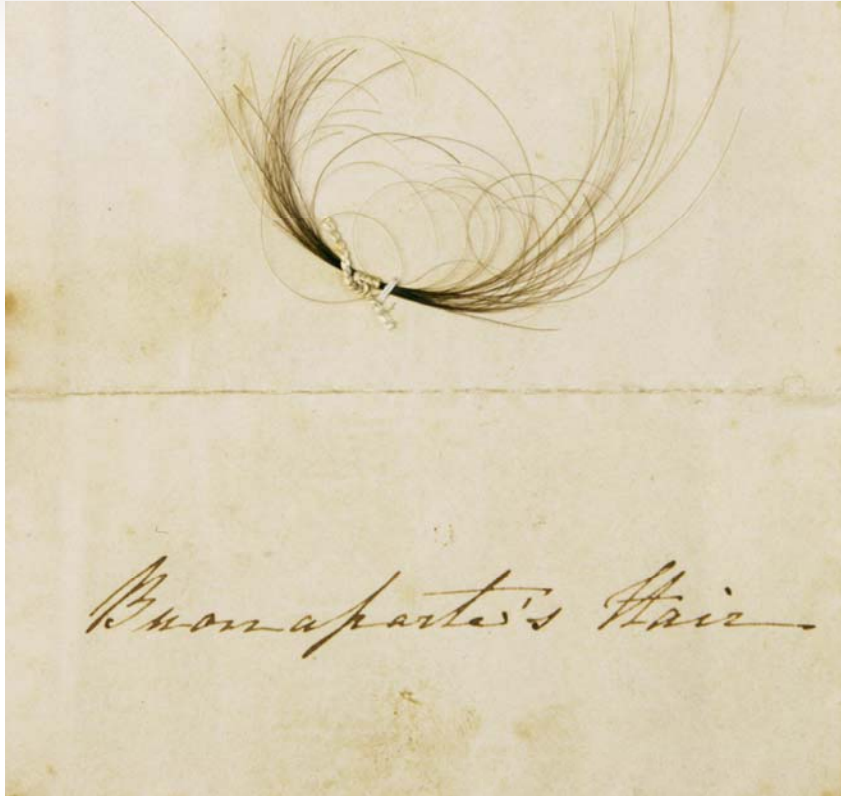
Diagnose

- hohen Empfindlichkeit der Aktivierungsanalyse durch Nachweis einzelner γ -Photonen
- Methode zur Bestimmung von Bestandteilen, die nur in niedrigen Konzentrationen vorliegen

Neutroneneinfang Gerichtsmedizin

Symptome

Wurde Napoleon vergiftet wie Wieder&Hapgood in *The Murder of Napoleon* (1982) behaupten?



nature

**Napoleon Bonaparte—no evidence
of chronic arsenic poisoning**

Diagnose

- Vergleich Haar Napoleon mit anderen Zeitgenossen durch Neutronenaktivierung von Ar-75
- mittlerer Arsengehalt nicht außergewöhnlich
- Arsen war im 18. Jahrhundert Bestandteil von Tinte
- Arsenkonzentration im Menschen heutzutage geringer

Wechselwirkung mit Materie

Therapie mit Neutronen

Symptome

- energiereiche Neutronen (10 MeV) haben typische Eindringtiefen von 10 cm
- energiearme Neutronen (2 MeV) haben geringere Eindringtiefen von 5 cm



A schematic showing the structure of DNA.

Neutrons kill cancer cells by destroying their DNA.

Diagnose

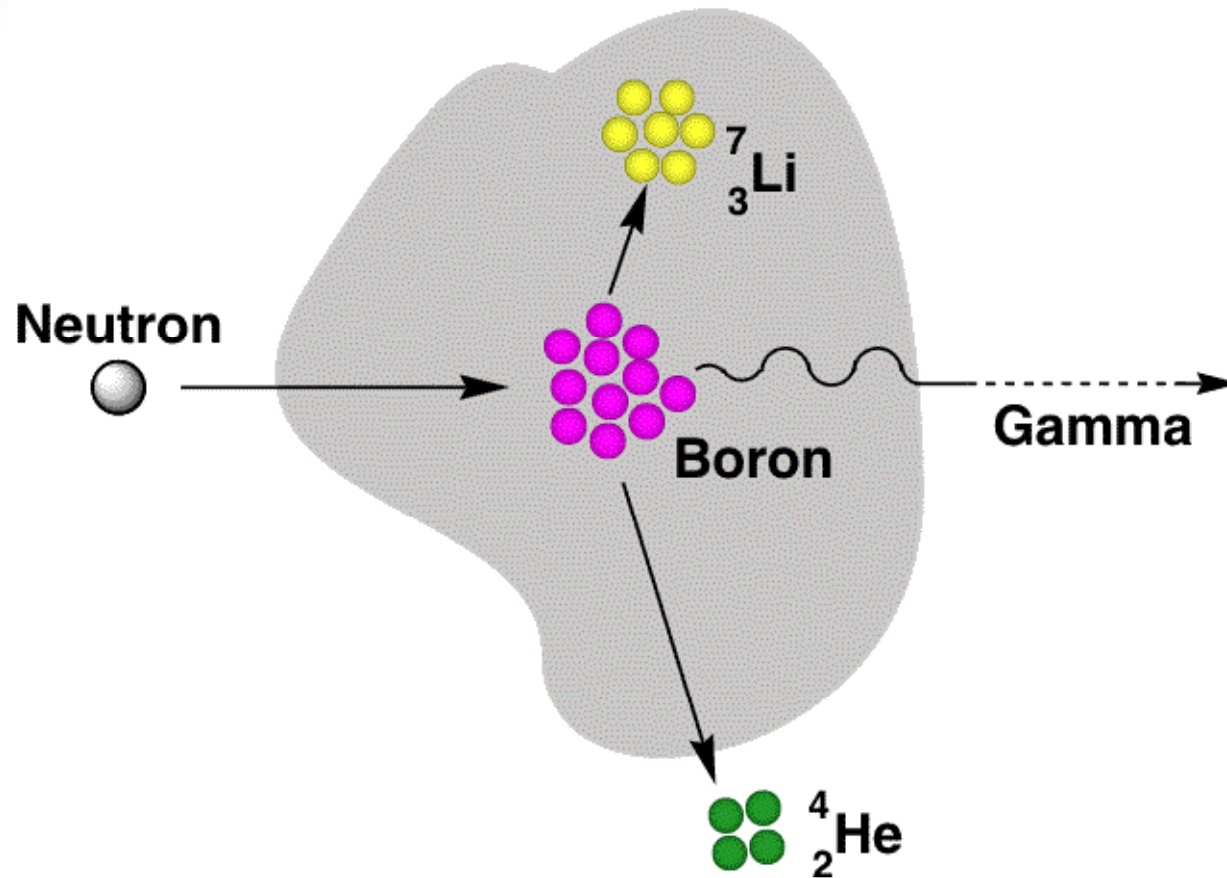
Elastische Stöße thermische Neutronen eignen sich zur Behandlung oberflächennaher Tumore

Wechselwirkung mit Materie

Bor-Neutroneneinfangtherapie

Symptome

- Bor-10 hat hohen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen
- Querschnitt gegenüber Neutronenstoß mit Wasserstoff um Faktor 10^4 erhöht



Diagnose

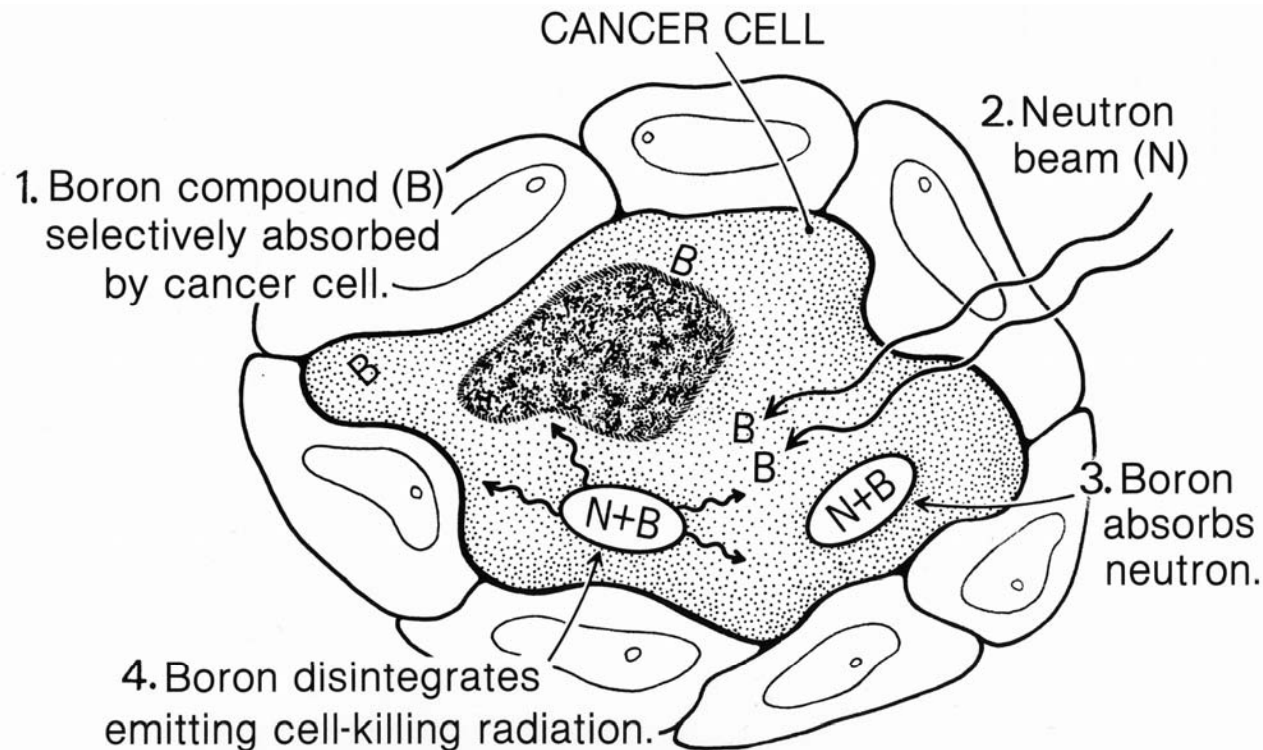
Radioaktiver Zerfall führt zur Emission von α -Teilchen und ${}^7\text{Li}$

Wechselwirkung mit Materie

Bor-Neutroneneinfangtherapie

Symptome

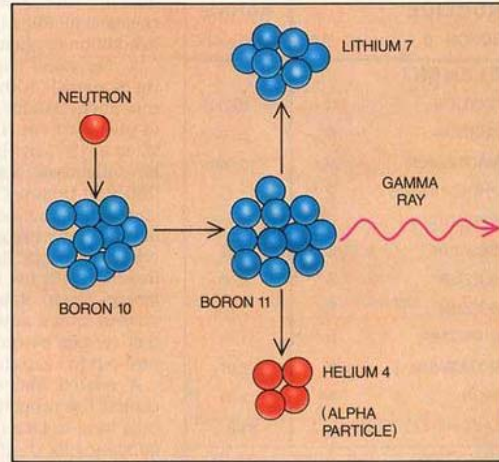
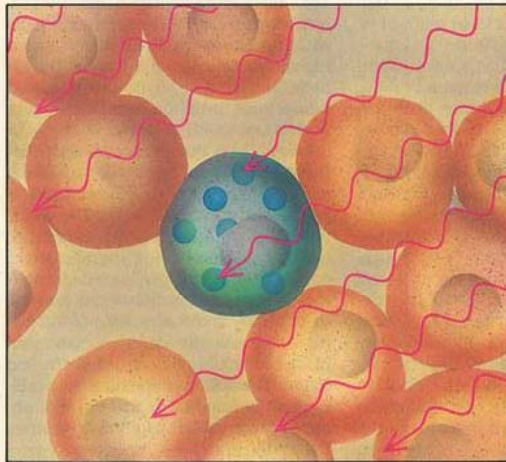
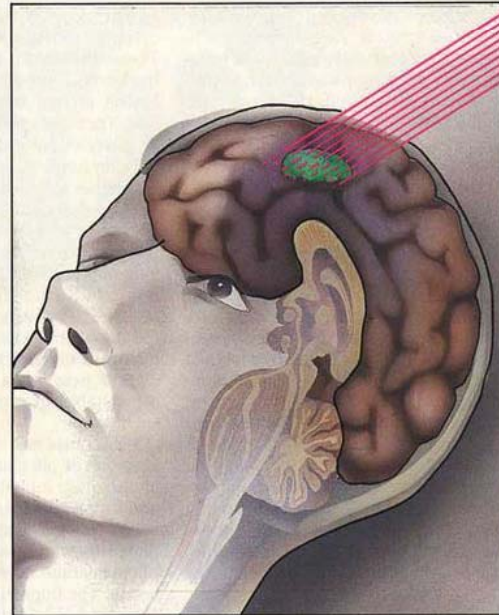
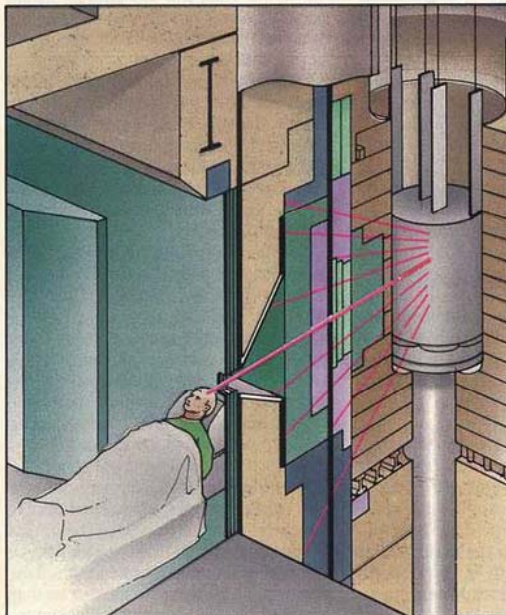
Mittlere freie Weglänge der Zerfallsprodukte in Gewebe geringer als $9 \mu\text{m}$



Diagnose

- mittlere freie Weglänge der Zerfallsprodukte in Gewebe geringer als $9 \mu\text{m}$
- Einwirkung deshalb insbesondere auf Bor-angereicherten Zellen
- Anreicherung von Bor führt zu selektiver Schädigung bösartigem Gewebes

boron-neutron- capture therapy BNCT

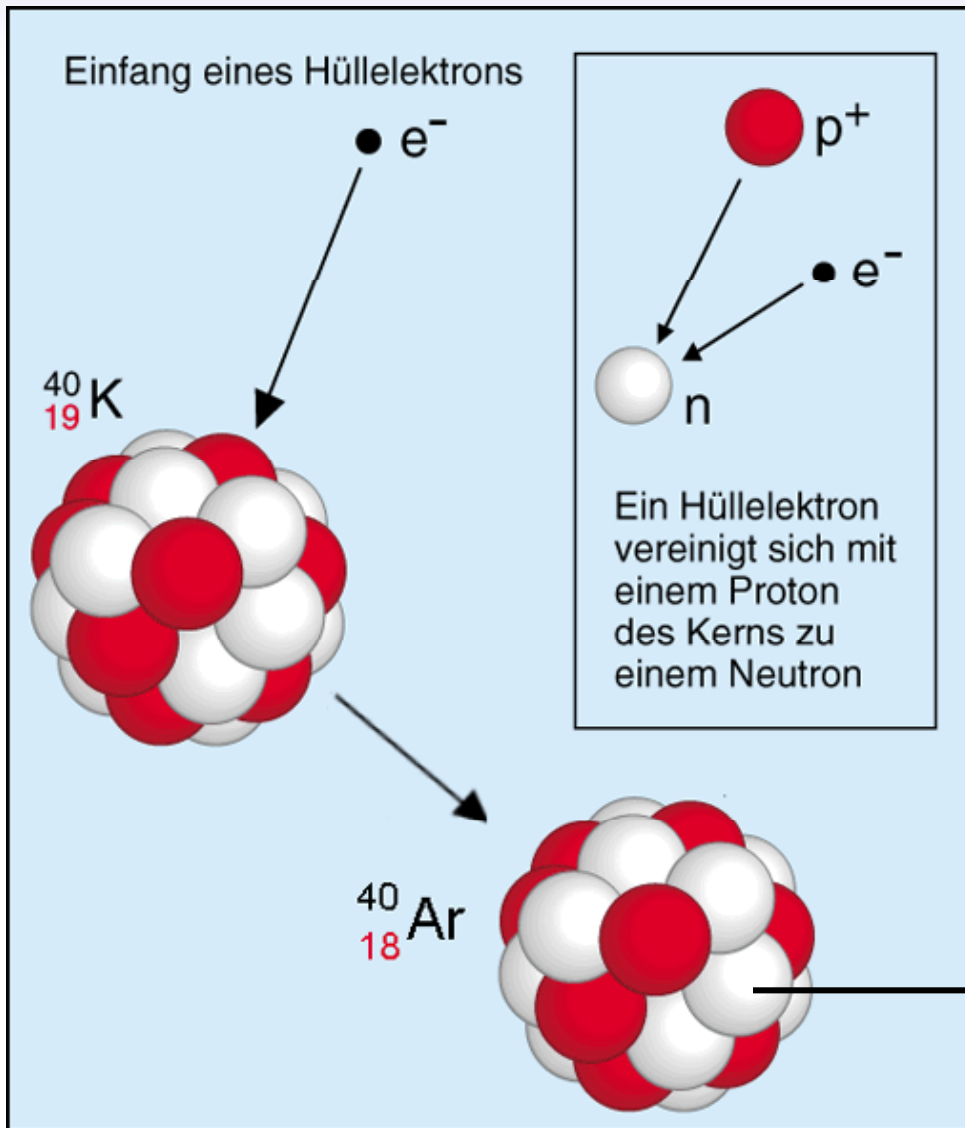


epithermal Neutronenfluss
 10^9 Neutronen
 $\text{s} \cdot \text{cm}^2$
Energiebereich 0.02-100 eV

Diagnose

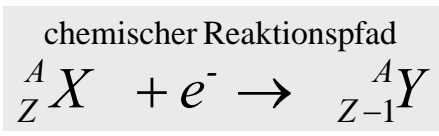
Verwendung von Linearbeschleunigern zur erzeugt intensive Neutronenstrahlen

Kern mopst Elektron aus Atomhülle K-Einfang

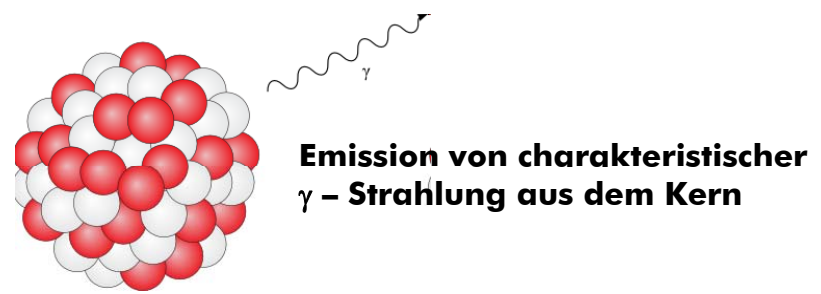
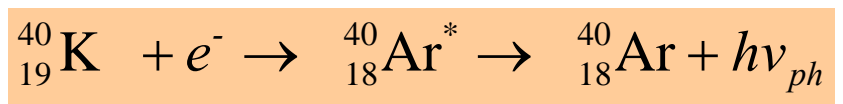


Ladungserhaltung

$$p^+ + e^- \rightarrow n^0$$

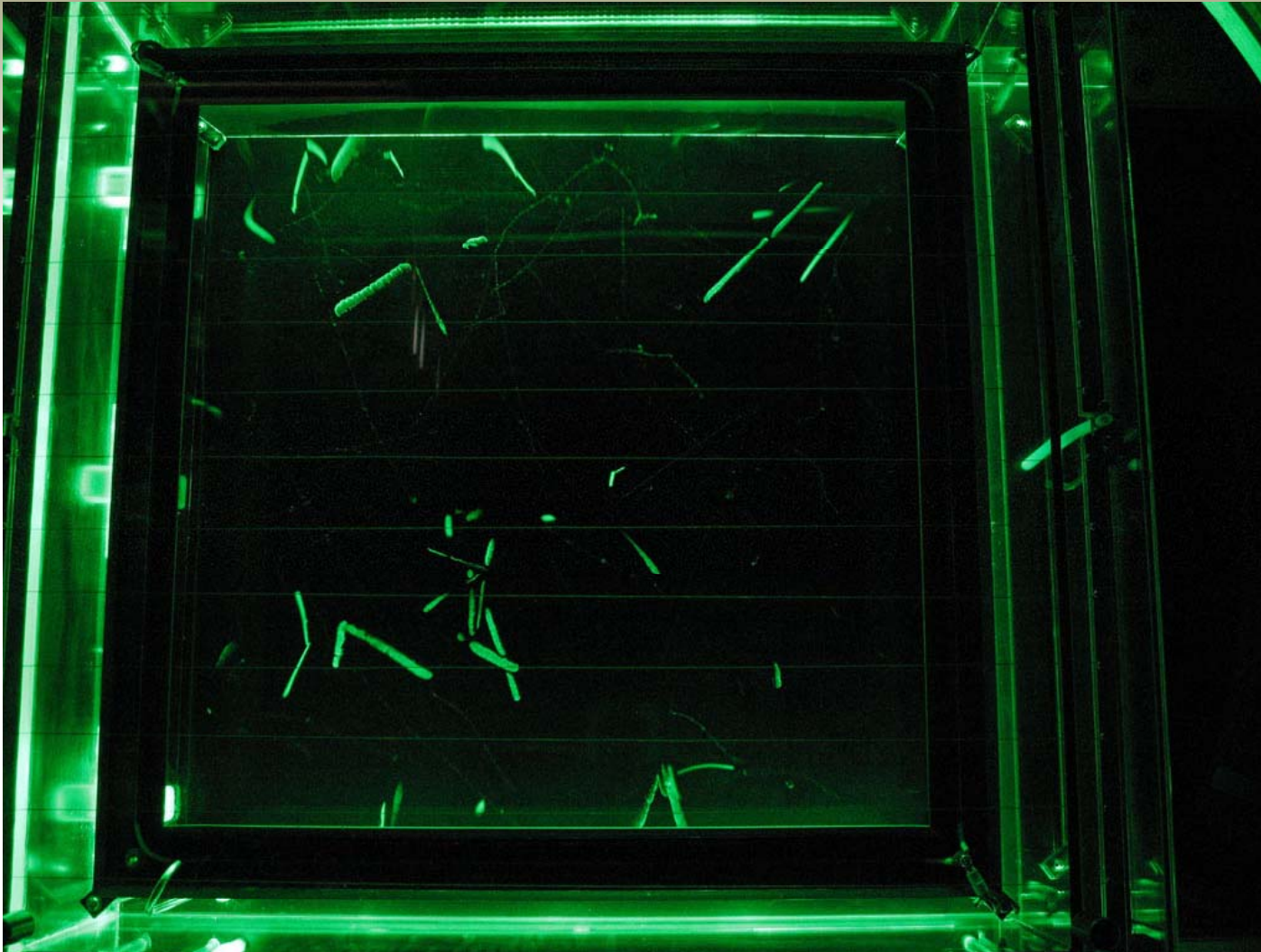


example



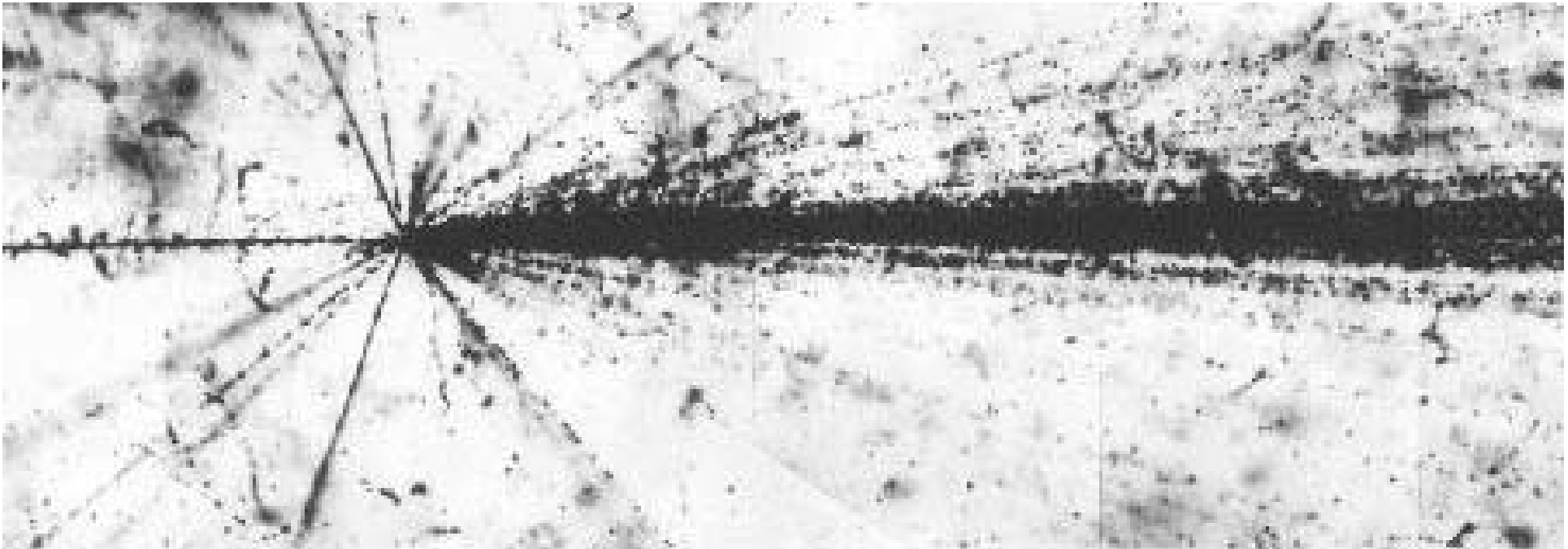
Thema Ionisierende Strahlung

Nachweis





Hochenergiephysik



Ergebnis des Stoßes eines hochenergetischen kosmischen Teilchens mit einem Atom in einer photographischen Emulsion betrachtet durch ein Mikroskop



Analyse radioaktive Strahlung

Symptome

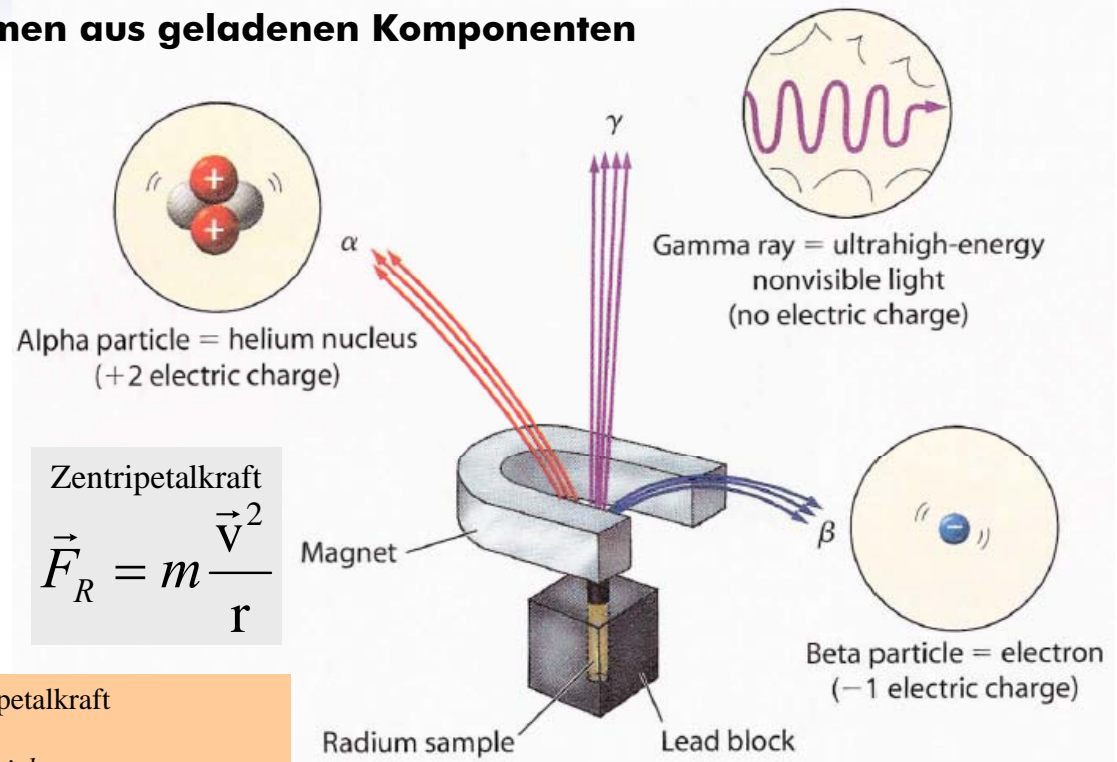
Radioaktive Strahlung setzt sich zusammen aus geladenen Komponenten

Lorentzkraft

$$\vec{F}_M = q_{\pm} (\vec{v}_{particle} \times \vec{B}_M)$$

$$F_M = q_{\pm} \cdot v_{particle} \cdot B_M$$

senkrechter Einschuss in das Magnetfeld



Zentripetalkraft

$$\vec{F}_R = m \frac{\vec{v}^2}{r}$$

Kräftegleichgewicht aus Lorentzkraft und Zentripetalkraft

$$q_{\pm} v_{particle} B_M = m_{particle} \frac{v_{particle}^2}{r_{particle}}$$

$$r_{particle} = \frac{m_{particle} v_{particle}}{q_{\pm} B_M} \approx \frac{p_{particle}}{q_{\pm} B_M}$$

Radius Kreisbahn in Magnetfeld

Impuls des Teilchens

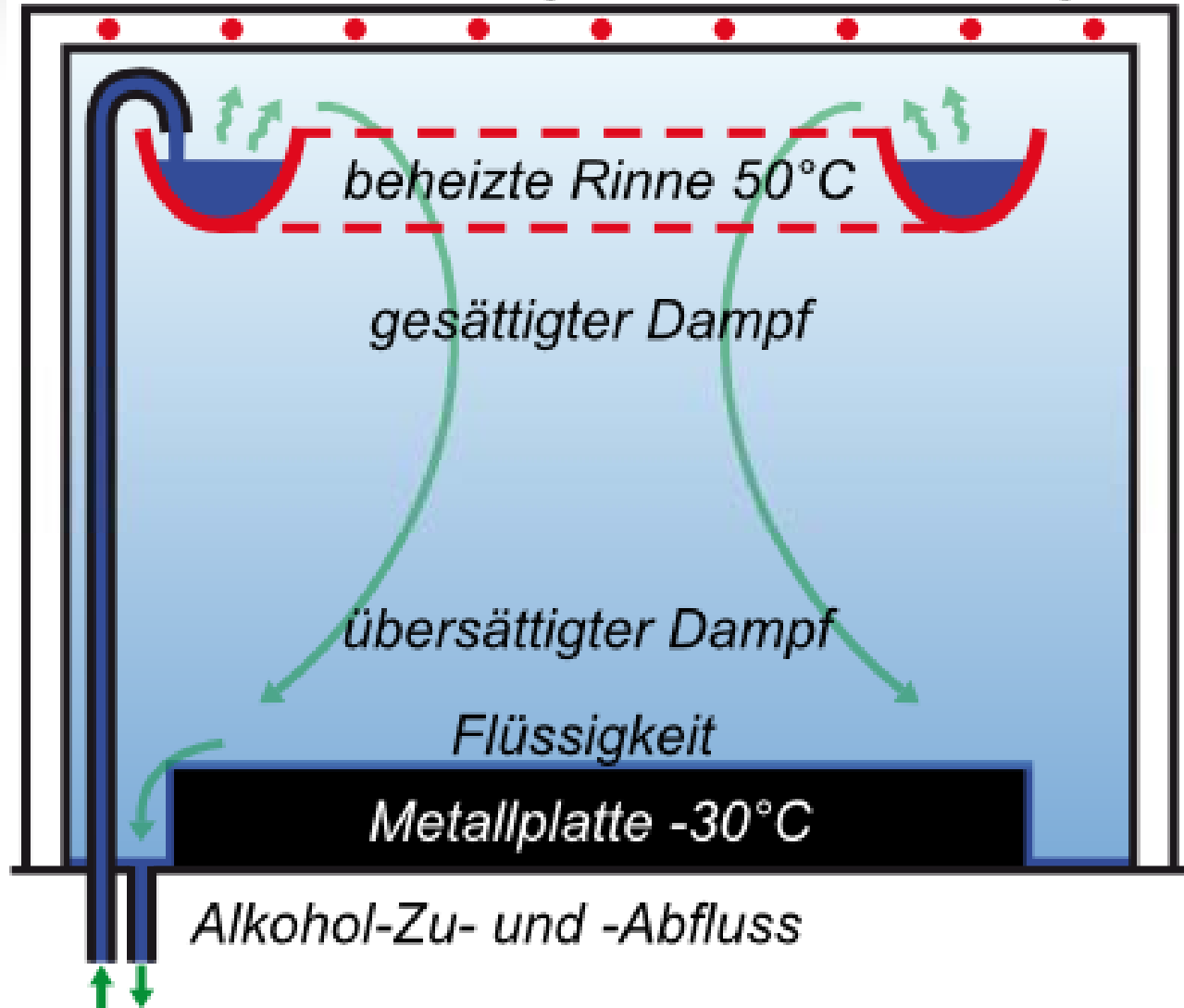
Diagnose

Aus Ablenkung im Magnetfeld kann Teilchenart und Ladung bestimmt werden

Analyse radioaktiver Strahlung

Nebelkammer

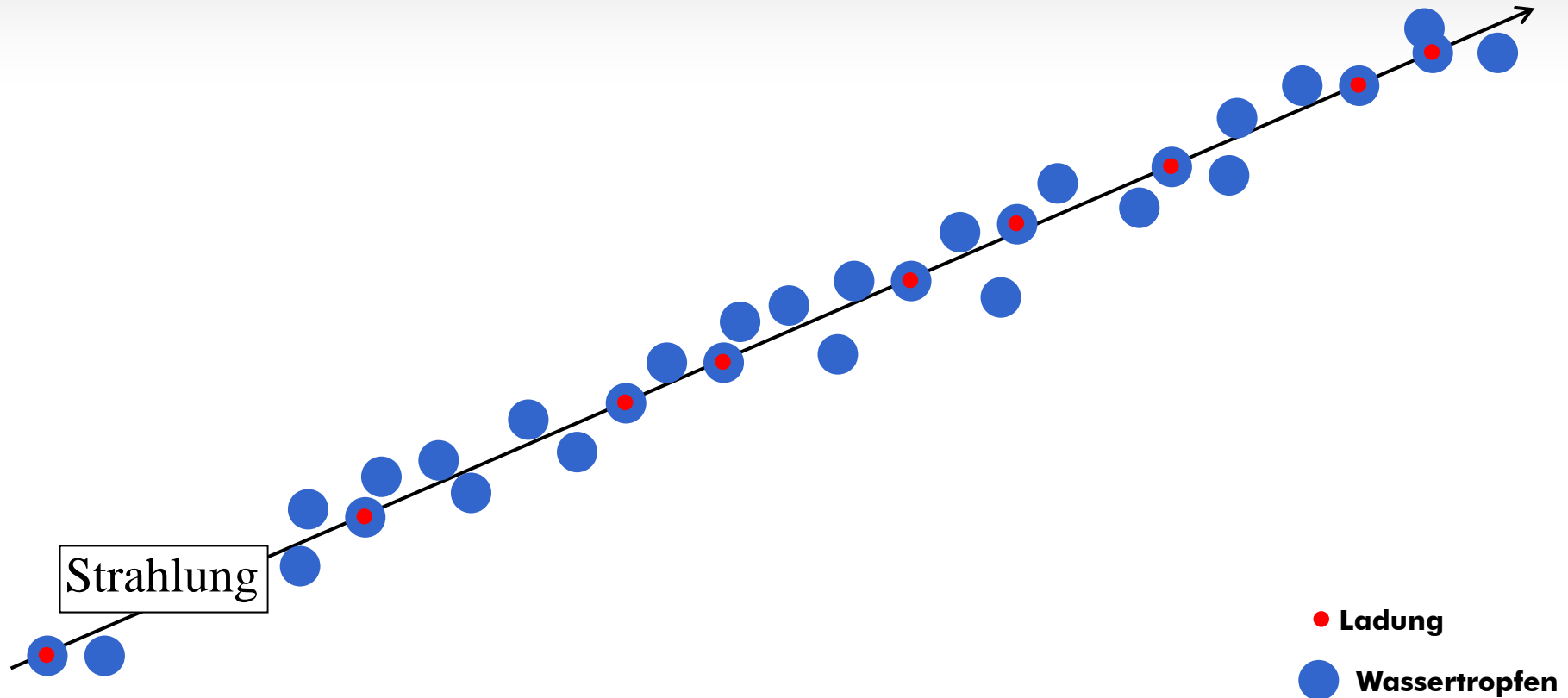
Glasscheiben mit eingeschlossenem Heizgitter



Nebelkammer

Symptome

Flüssigkeit und Wasserdampf im thermodynamischen Gleichgewicht



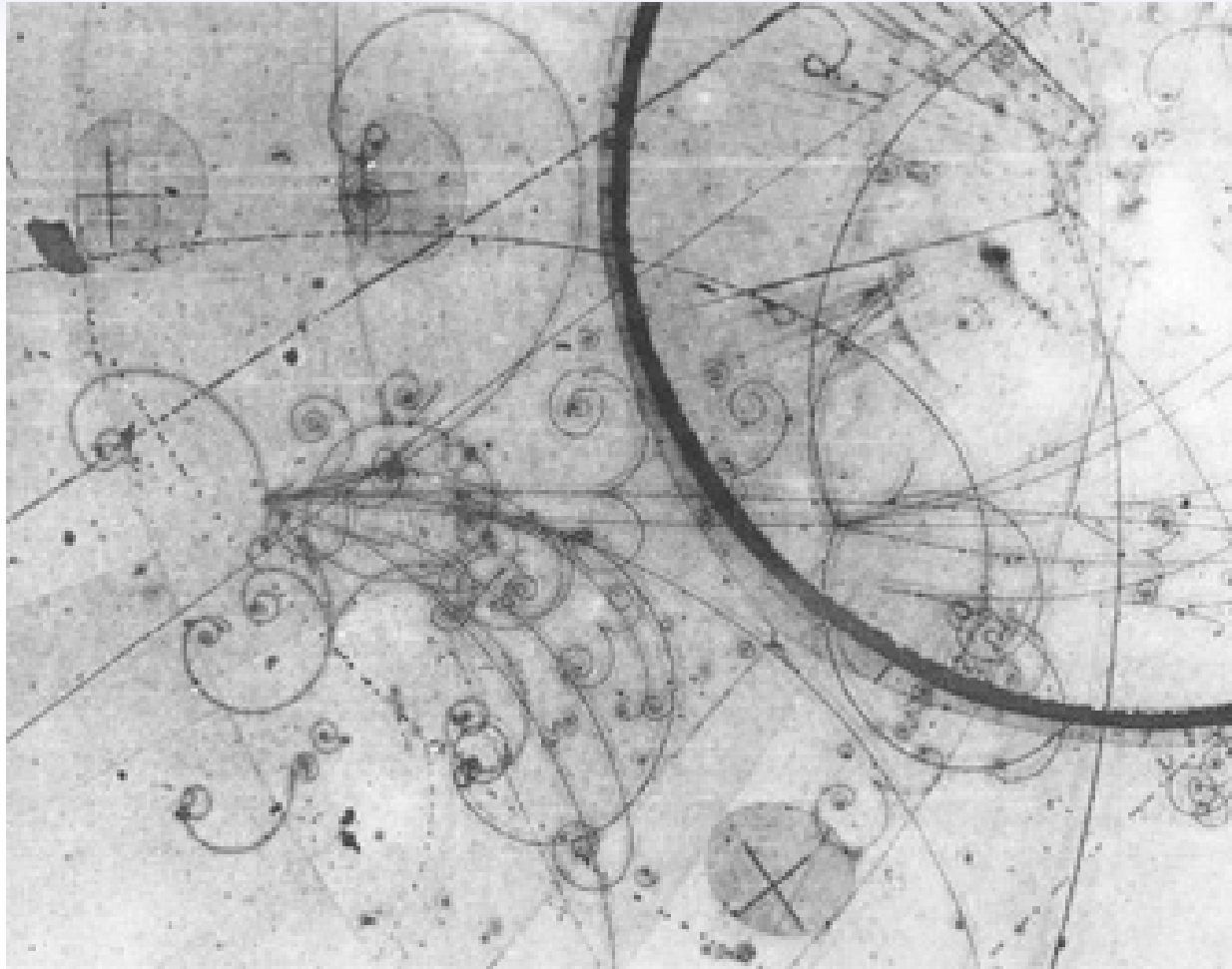
Diagnose

- energiereiches, geladenes Teilchen durchquert gesättigten Wasserdampf
- Stoßionisation erzeugt zahlreiche Ionen
- Ionen sind Kondensationskerne für Bildung feiner Tröpfchen
- Gesamtheit der Kondensationskeime bildet sichtbare Kondensstreifenspur



Nachweis energetischer Teilchen und kosmischer Strahlung

Nebelkammer



Nebelkammer

Diagnose

Bildung von Nebeltröpfchen, wenn Kondensationskeime durch die Wechselwirkung energiereicher Teilchen im gesättigten Wasserdampf erzeugt werden



**The Nobel Prize in Physics 1927 was divided equally between ...
and Charles Thomson Rees Wilson
for his method of making the paths of electrically charged particles
visible by condensation of vapour**

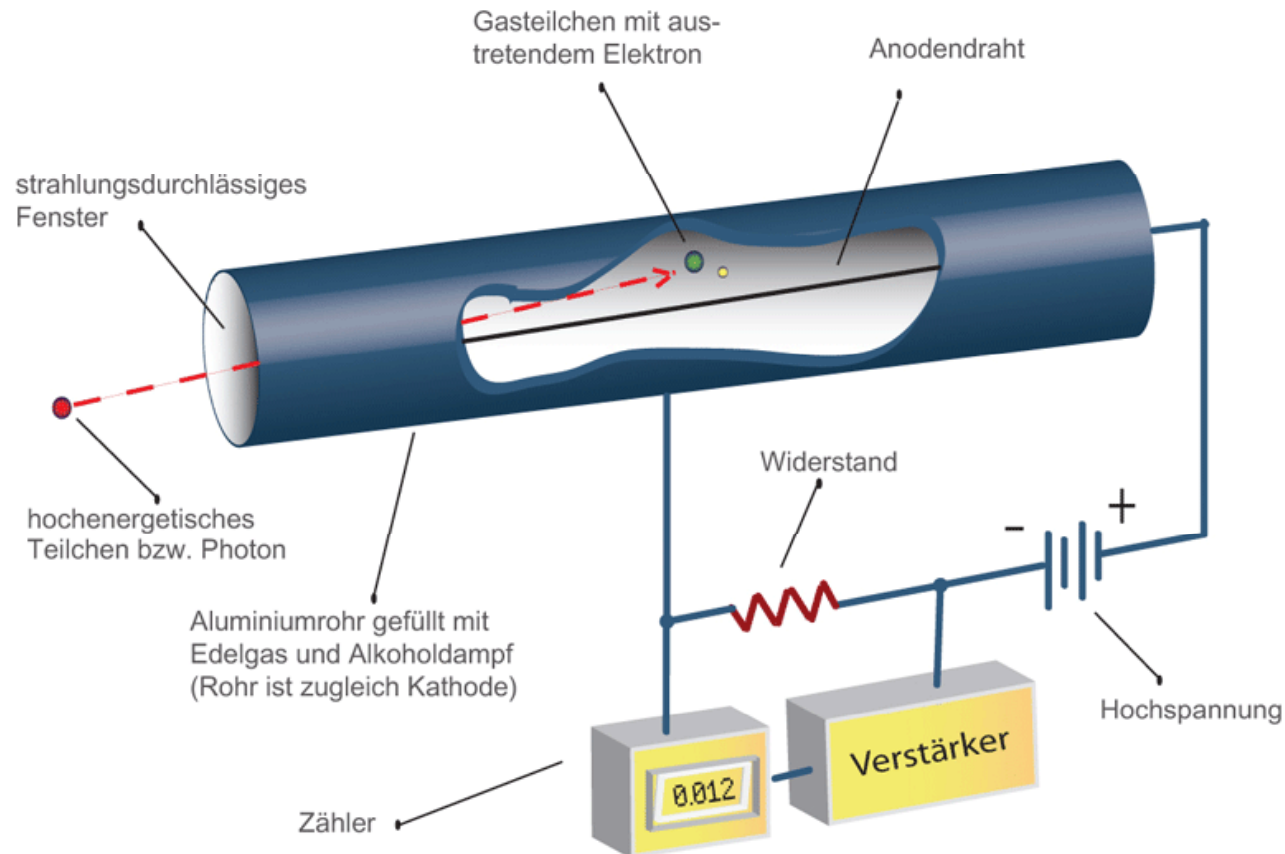


Nachweis radioaktiver Strahlung

Zählrohr

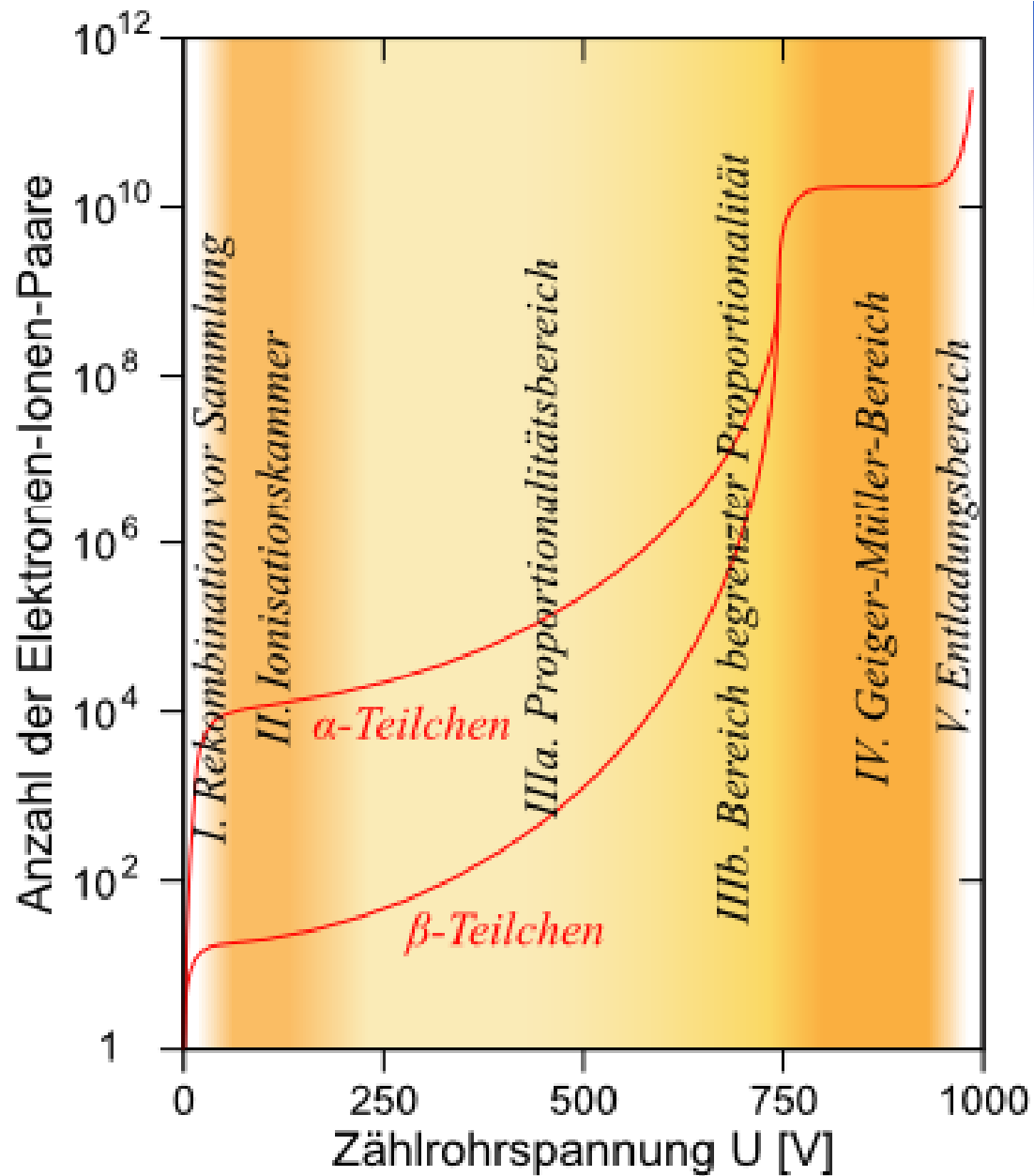
Symptome

Zum Nachweis energiereicher Strahlung nutzt man aus,
dass in der Wechselwirkung mit dem Füllgas Elektronen entstehen



Diagnose

- erzeugte Ladungen werden durch ein elektrische Feld abgesaugt
- durch die angelegte Spannung kann Detektionseigenschaft eingestellt werden



Diagnose

- im Proportionalbereich ist Anzahl der Elektronen **PROPORTIONAL** der Energie der Strahlung
- im Geiger-Müller Bereich erzeugt **JEDES** energetische Elektron ein Zählereignis

1960 Kindermilch-Test



Diagnose

- Kernwaffentests in 1950er Jahren erzeugen radioaktives Strontium-90
- Sr-90 lagerte sich als Staubbestandteil auf Wiesen ab
- Radioaktives Element gelangte über Viehfutter in die menschliche Nahrungskette