



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

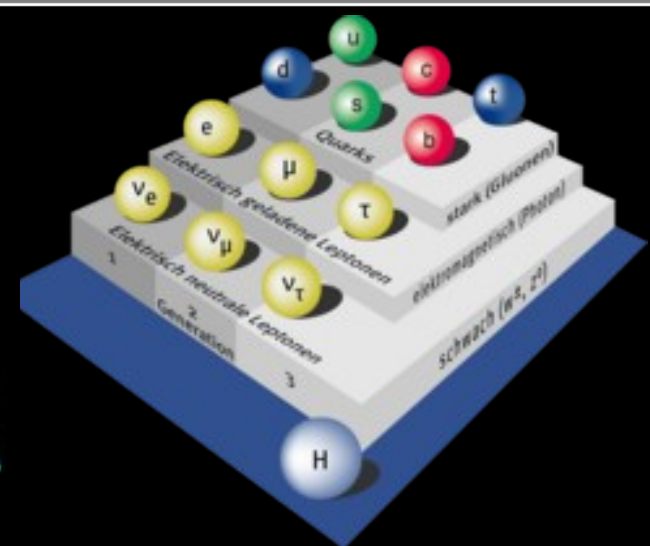
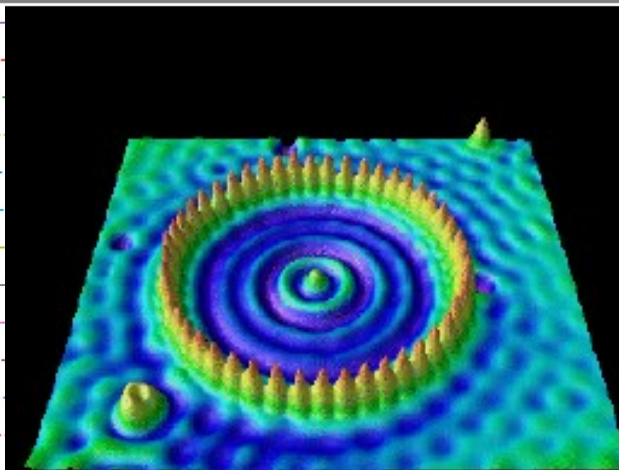
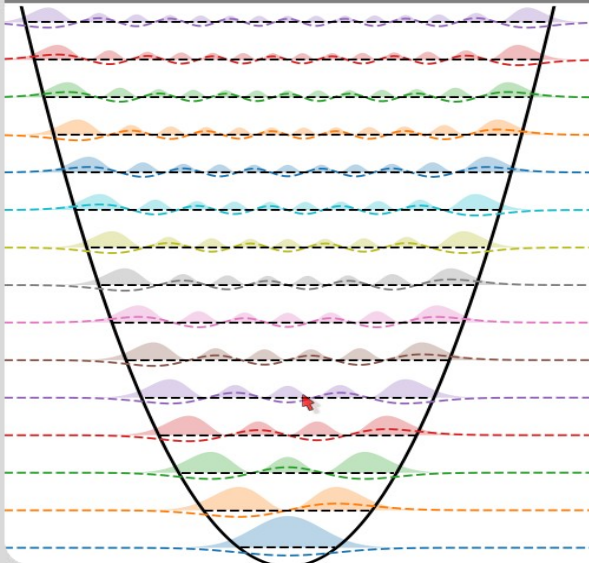
Vorlesung 20 Moderne Physik (L)

Einführung in die Kernphysik

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



Vom 29. Juni bis 3. Juli können Sie an einer Online- Umfrage zur Vorlesung und zu den Übungen teilnehmen.

Dazu diese Links verwenden

[Vorlesungsevaluation](#)

[Evaluation der Übungen für LA](#)

oder

[Evaluation der Übungen für Geo/Met](#)

(die gleichen Links finden Sie auf der Ilias-Seite der Vorlesung)

Das Übungs-Team und ich bitten um rege Teilnahme !

Halbleiterbauelemente

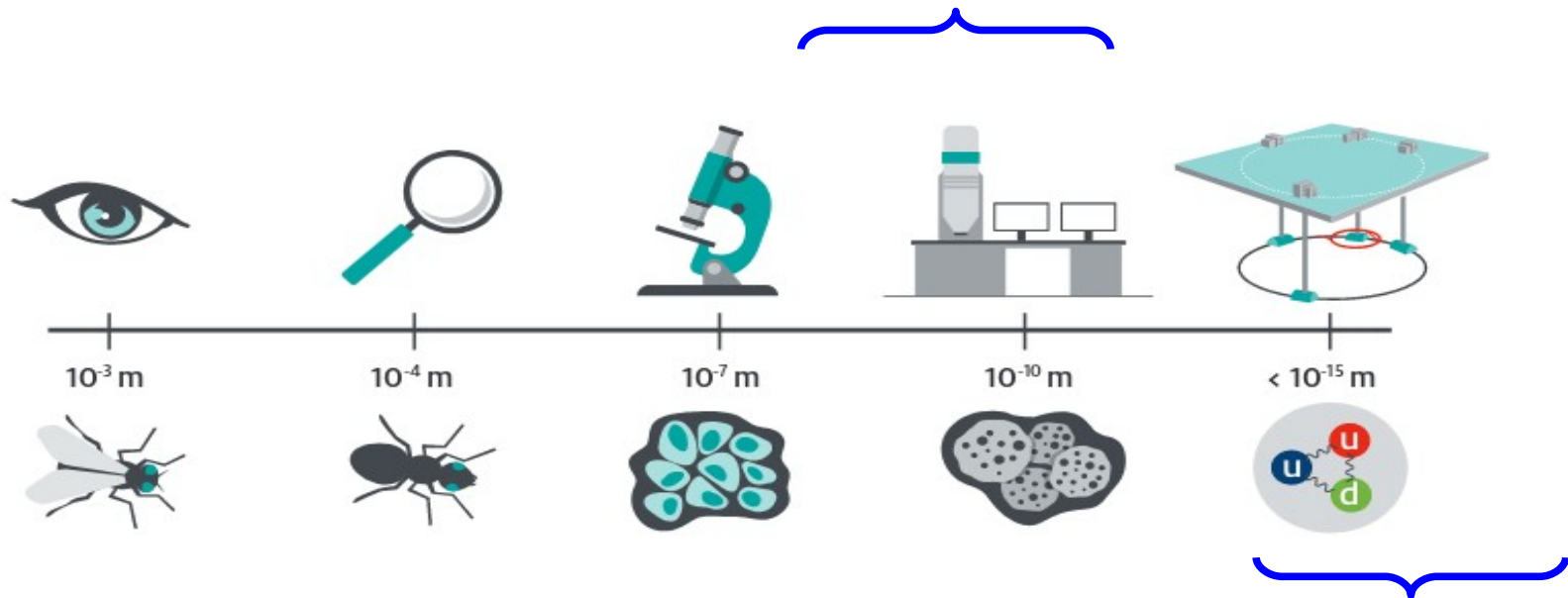
- elektrische Eigenschaften von Halbleitern können durch Dotieren in weiten Grenzen eingestellt werden
- an der Kontaktstelle zwischen p- und n-leitendem Material entsteht eine Ladungsträgerverarmte Zone, deren Breite durch ein externes Potential beeinflusst werden kann
- Anwendungen:
 - Halbleiterdiode, Sensoren für Licht und ionisierende Strahlung, Solarzelle, Leuchtdiode, Halbleiter-Laser
 - Transistoren als Verstärker und elektronische Schalter

Supraleitung:

- Entdeckung: Kamerlingh Onnes (1911)
- BCS-Theorie (1957): Wechselwirkung zweier Elektronen durch Phononen → Cooper-Paare (Bosonen)
- Vielteilchensystem aus allen Cooper-Paaren mit gemeinsamer Wellenfunktion → nicht durch Atome, Gitterdefekte gestört
 - Konsequenz I: elektrischer Widerstand verschwindet
 - Konsequenz II: Magnetfeld aus Supraleiter verdrängt (Meißner-Ochsenfeld-Effekt)

- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) **Kernphysik**
- 12) Teilchenphysik
- 13) Astrophysik und Kosmologie

Bisher haben wir mit Größenskalen im Bereich $\sim \text{nm}$ beschäftigt
Atome, Moleküle, Festkörper

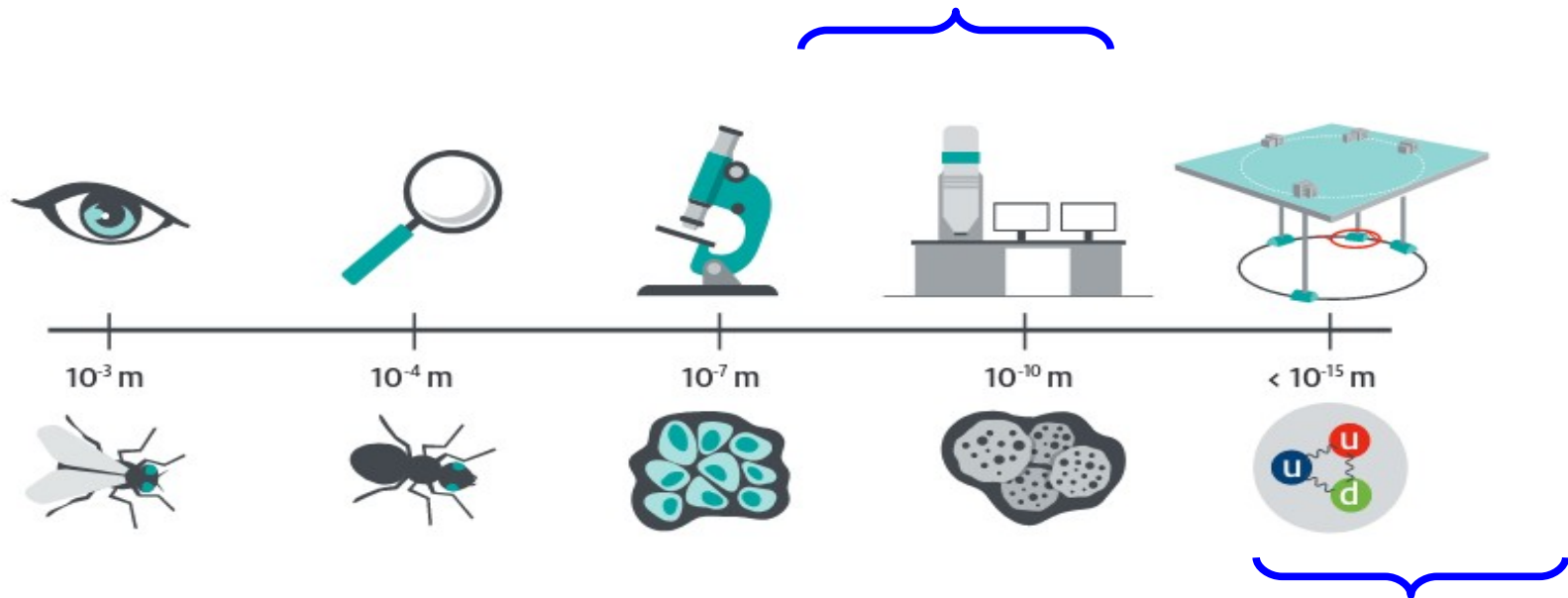


<https://www.teilchenwelt.de>

Nun: **Atomkern und dessen Zusammensetzung**

- Kerne: $\sim 10^{-14} \text{ m} = \sim 10 \text{ fm}$
- fundamentale Teilchen $< 10^{-19} \text{ m}$

Bisher haben wir mit Größenskalen im Bereich $\sim \text{nm}$ beschäftigt
 Atome, Moleküle, Festkörper



<https://www.teilchenwelt.de>

Nun: **Atomkern und dessen Zusammensetzung**

- Kerne: $\sim 10^{-14} \text{ m} = \sim 10 \text{ fm}$
- fundamentale Teilchen $< 10^{-19} \text{ m}$

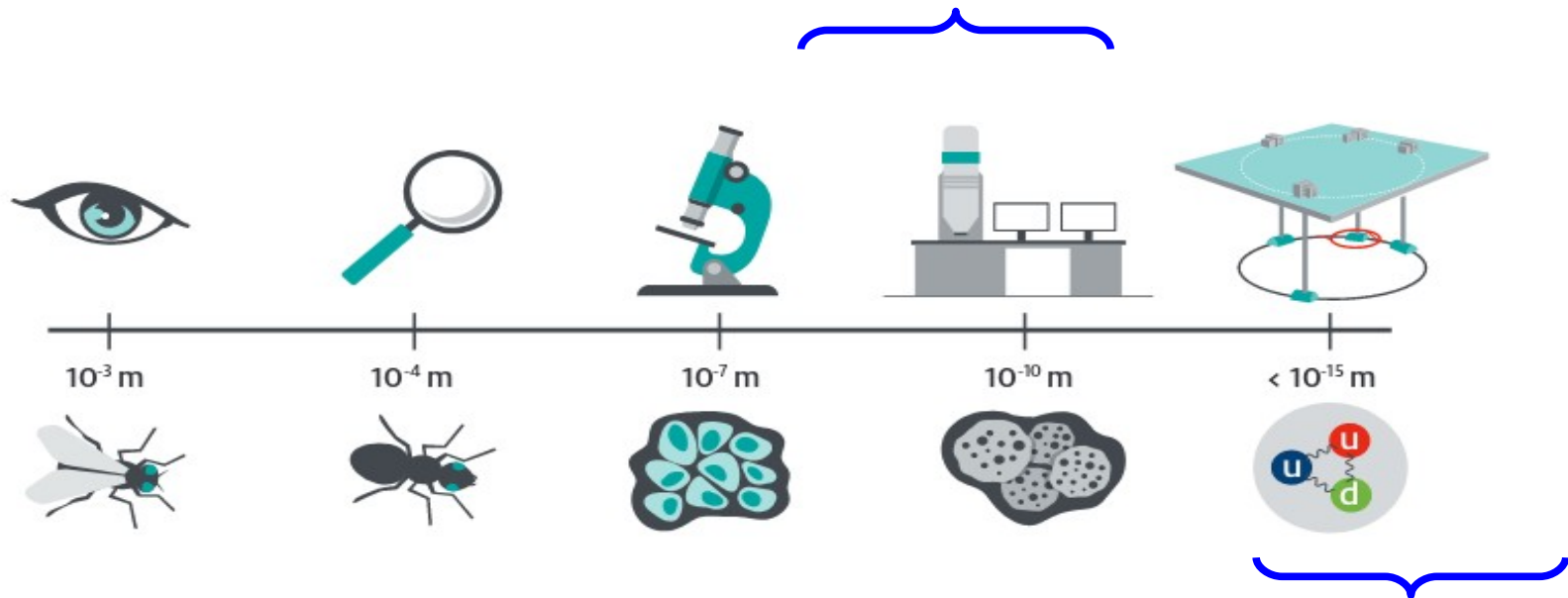
Untersuchungsmethode:

Streuung von Teilchen mit sehr kleiner de Broglie-Wellenlänge

- Elektronen
- Protonen
- Neutronen

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = \frac{2\pi \cdot 197 \text{ MeV f}}{pc} \simeq \frac{1 \text{ GeV f}}{pc}$$

Bisher haben wir mit Größenskalen im Bereich $\sim \text{nm}$ beschäftigt
 Atome, Moleküle, Festkörper



<https://www.teilchenwelt.de>

Nun: **Atomkern und dessen Zusammensetzung**

- Kerne: $\sim 10^{-14} \text{ m} = \sim 10 \text{ fm}$
- fundamentale Teilchen $< 10^{-19} \text{ m}$

Untersuchungsmethode:

Streuung von Teilchen mit sehr kleiner de Broglie-Wellenlänge

- Elektronen
- Protonen
- Neutronen

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar c}{pc} = \frac{2\pi \cdot 197 \text{ MeV f}}{pc} \simeq \frac{1 \text{ GeV f}}{pc}$$

typische Energieskala: 100 keV – 100 MeV

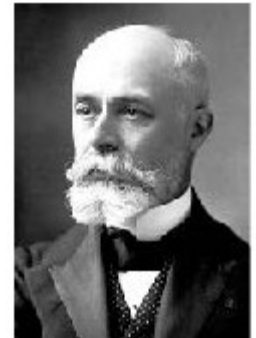
Experimentell: Atomkerne teilweise stabil, teilweise instabil

→ **natürliche Radioaktivität**

Experimentell: Atomkerne teilweise stabil, teilweise instabil

→ **natürliche Radioaktivität**

Becquerel (1896): Uransalze schwärzen fotografische Platte
(heute: Zerfall eines Atomkerns unter Teilchenemission)

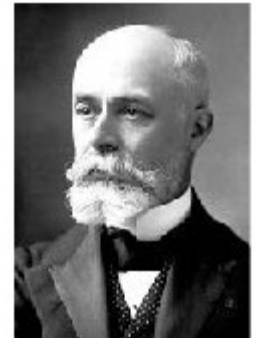


H. Becquerel

Experimentell: Atomkerne teilweise stabil, teilweise instabil

→ **natürliche Radioaktivität**

Becquerel (1896): Uransalze schwärzen fotografische Platte
(heute: Zerfall eines Atomkerns unter Teilchenemission)

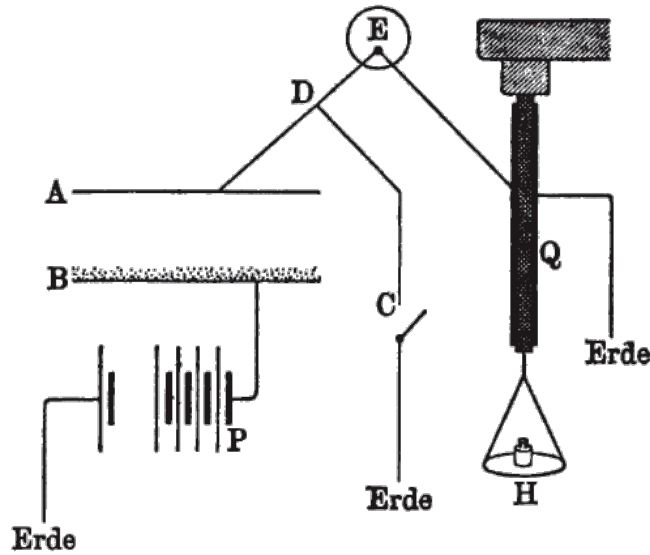


H. Becquerel

Becquerel, Curie, Rutherford u. a.: Entdeckung unterschiedlicher
Strahlungsarten (Unterscheidung: Ladung, Durchdringungsvermögen)

→ **α -, β - und γ - Strahlung**

Versuchsaufbau Marie und Pierre Curie



- A, B Plattenkondensator
(Platte B mit radioaktiver Probe)
- C Schalter
- P Batterie
- E Elektrometer
- Q piezoelektrischer Quarz als
veränderlicher Widerstand
- H Schale für Gewichte

Messprinzip: Entladung eines Kondensators durch Ionisation der Luft

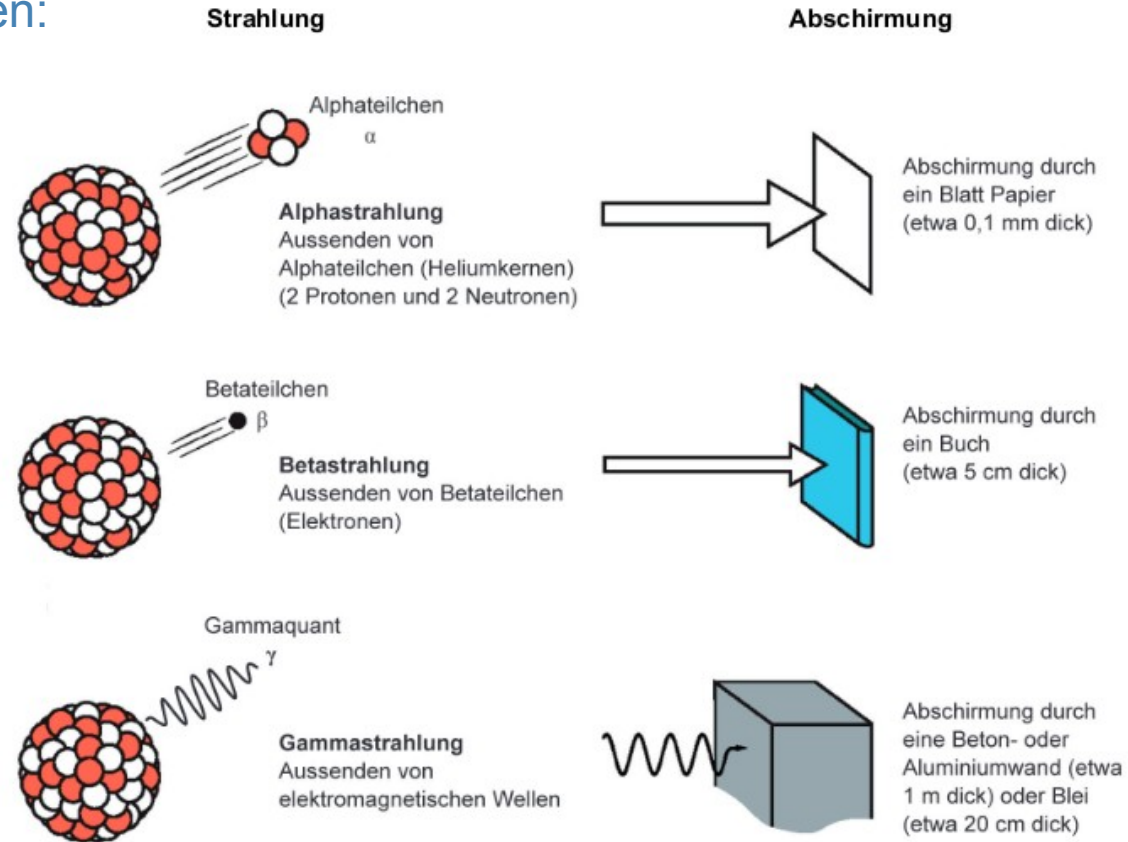


M. Curie



P. Curie

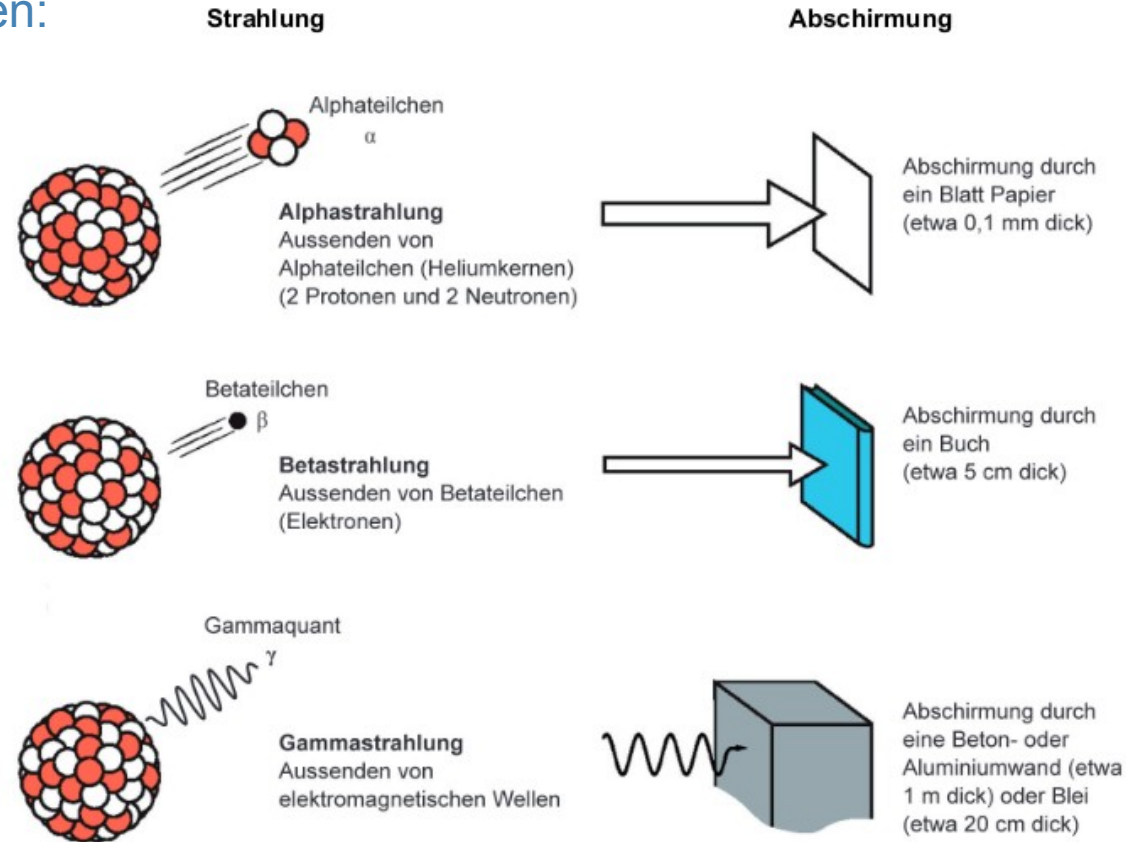
Heute Allgemeinwissen:



Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt

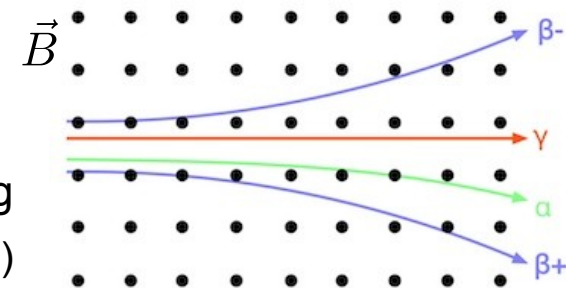
$\vec{B}$

Heute Allgemeinwissen:

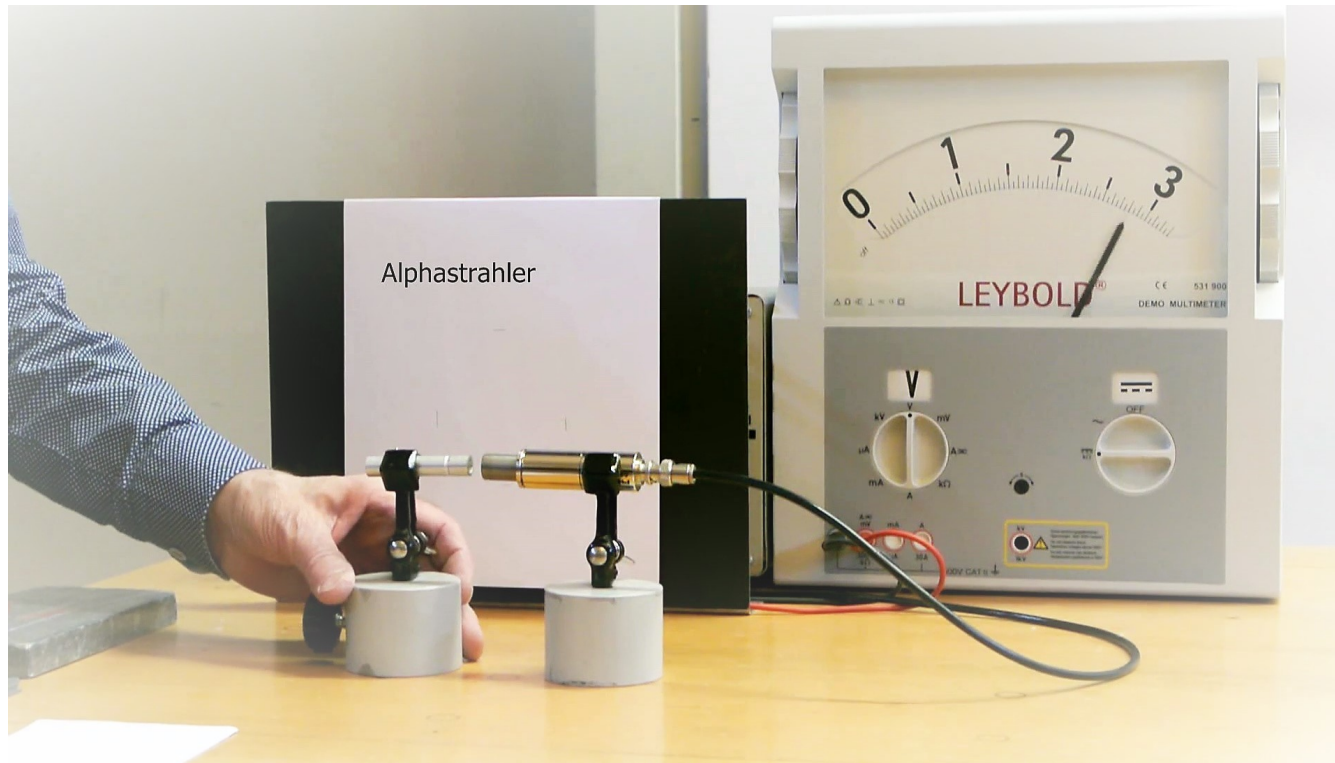


Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt

- α - Strahlung besteht aus He-Kernen, 2-fach positiv geladen
- β - Strahlung sind Elektronen, negativ geladen
- γ - Strahlung ist hochenergetische elektromagnetische Strahlung
- es gibt auch β^+ -Strahlung (Positronen, Anti-Teilchen des Elektrons)

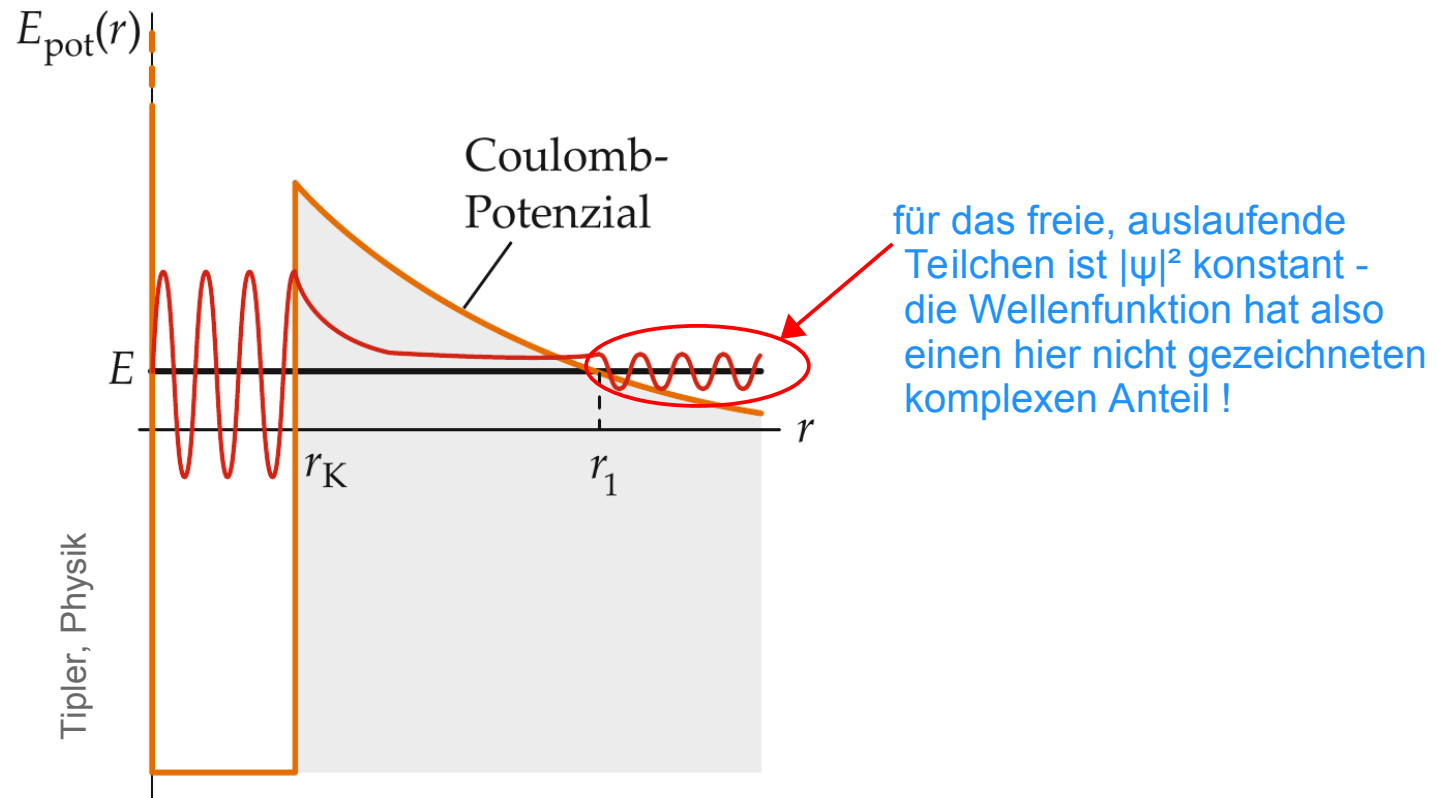


Modernes Experiment mit Schul- bzw. Praktikums-Geräten:



https://www.experimente.physik.uni-freiburg.de/H_Atom_und_Kernphysik/radioaktivitaet/reichweiteabsorptionstrahlung

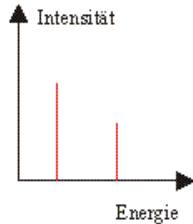
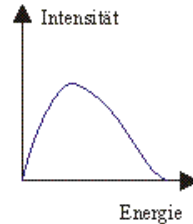
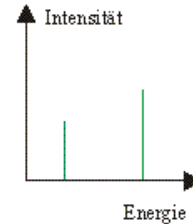
Ein einfaches Modell für den α -Zerfall
hatten wir schon als Übungsaufgabe zur Quantenmechanik behandelt:



Potenzielle Energie eines Alphateilchen in einem radioaktiven Kern.

Beim α -Zerfall tunnelt das α -Teilchen durch die Barriere. Weil die Transmissionswahrscheinlichkeit sehr klein ist, kann man näherungsweise annehmen, dass das gebundene α -Teilchen als Überlagerung einer nach rechts und einer nach links laufenden ebenen Welle beschrieben wird. In der Barriere fällt die Wellenfunktion exponentiell ab. Die Tunnelwahrscheinlichkeit ist also leicht zu berechnen

(s. Übungsaufgabe).

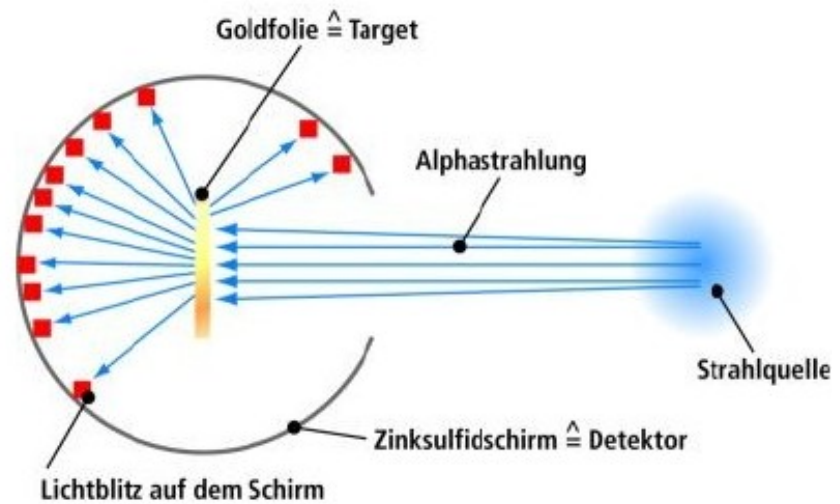
	α -Strahlung	β^- -Strahlung	γ -Strahlung
Identität	Heliumkerne	Elektronen	elektromagnetische Strahlung
Geschwindigkeit	ca. 10% von c	ca. 90% von c	Lichtgeschwindigkeit c
Ladung	+2e	-e	---
Ablenkbarkeit im Magnetfeld	nur schwer ablenkbar (relativ kleine spez. Ladung)	leicht ablenkbar (relativ hohe spez. Ladung)	nicht ablenkbar
Spezifisches Ionisationsvermögen ¹⁾	sehr hoch	mittel	gering
Reichweite in Luft	einige Zentimeter	einige Meter	sehr weit
Abschirmung möglich durch:	Papier	einige Millimeter dickes Aluminium	Blei
Energiespektrum	diskret 	kontinuierlich 	diskret 
Vorgang im Kern	Zwei Neutronen und zwei Protonen bilden ein α -Teilchen, das emittiert wird	Ein Neutron wandelt sich in ein Proton und Elektron plus Anti-Neutrino um, die emittiert werden	Kern geht von angeregtem Zustand in einen niederenergetischen Zustand

Rutherford, Geiger, Marsden 1909 („Rutherford-Experiment“):

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel

Ergebnis:

Es treten auch große Streuwinkel und sogar Rückstreuung auf !



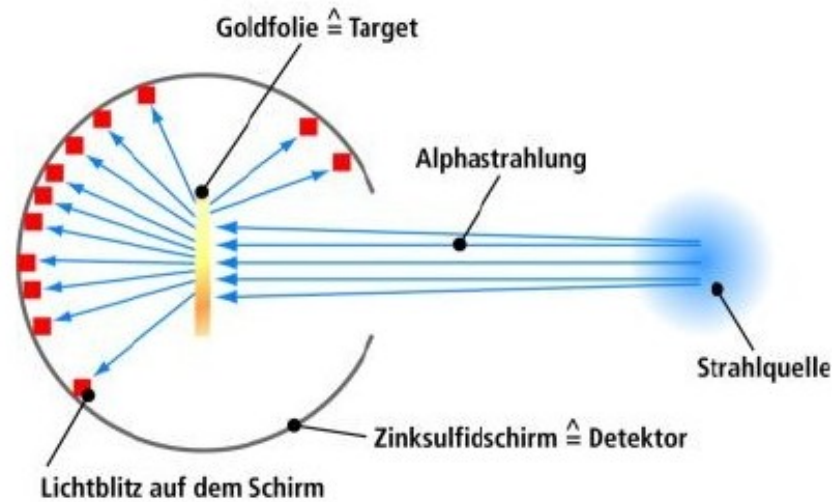
Schon in Vorlesung 5 besprochen

Rutherford, Geiger, Marsden 1909 („Rutherford-Experiment“):

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel

Ergebnis:

Es treten auch große Streuwinkel und sogar Rückstreuung auf !



Schon in Vorlesung 5 besprochen

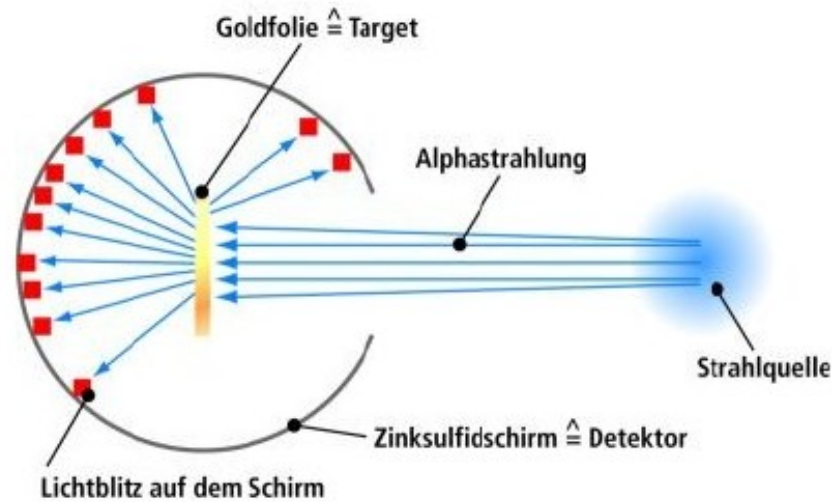
Erster Hinweis auf massiven, sehr kleinen Atomkern

Rutherford, Geiger, Marsden 1909 („Rutherford-Experiment“):

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel

Ergebnis:

Es treten auch große Streuwinkel und sogar Rückstreuung auf !

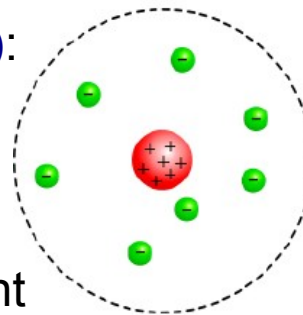


Schon in Vorlesung 5 besprochen

Erster Hinweis auf massiven, sehr kleinen Atomkern

→ Rutherford'sches Atommodell (1911):

- Atom besteht aus sehr kleinem, **massivem Kern**
- und einer **Hülle**, die aus leichten, negativ geladenen Elektronen besteht

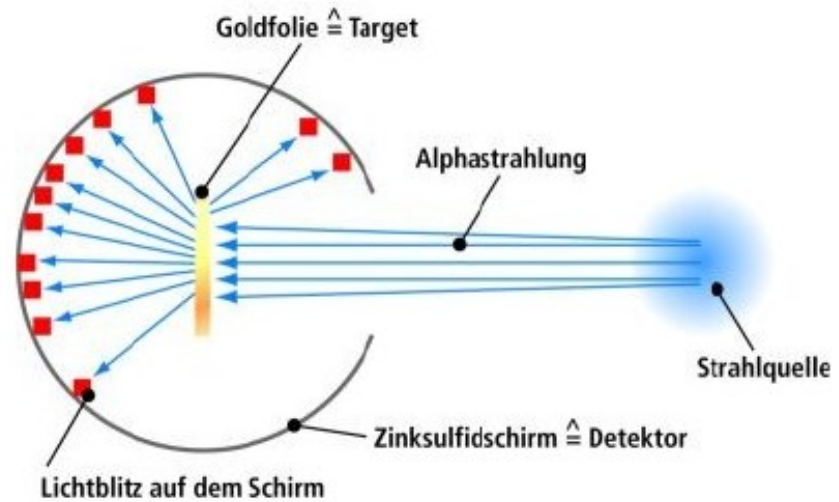


Rutherford, Geiger, Marsden 1909 („Rutherford-Experiment“):

Beschuss einer Goldfolie mit α -Teilchen und Messung der Streuwinkel

Ergebnis:

Es treten auch große Streuwinkel und sogar Rückstreuung auf !

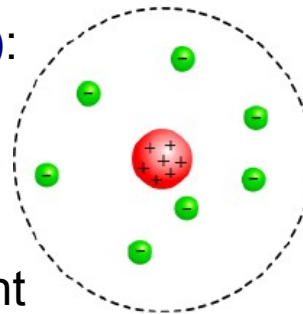


Schon in Vorlesung 5 besprochen

Erster Hinweis auf massiven, sehr kleinen Atomkern

→ Rutherford'sches Atommodell (1911):

- Atom besteht aus sehr kleinem, **massivem Kern**
- und einer **Hülle**, die aus leichten, negativ geladenen Elektronen besteht

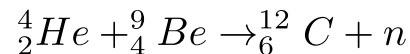


Rutherford -Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}_{\text{Rutherford}} = \left(\frac{zZ\alpha\hbar c}{4E_{\text{kin}}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\Theta/2)}$$

Rutherford 1917: erste Elementumwandlung
durch Beschuss von Stickstoff mit α -Strahlung in Sauerstoff

Rutherford 1920: Postulat eines weiteren, elektrisch neutralen
Kernbausteins mit etwa der gleichen Masse
wie das Proton: das **Neutron**



- Nachweis durch Protonen, die von den Neutronen aus Paraffin ausgelöst werden.

seit 1932: Proton-Neutron-Modelle des Kerns

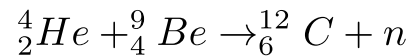
(W. Heisenberg, D. Iwanenko)

Rutherford 1917: erste Elementumwandlung
durch Beschuss von Stickstoff mit α -Strahlung in Sauerstoff

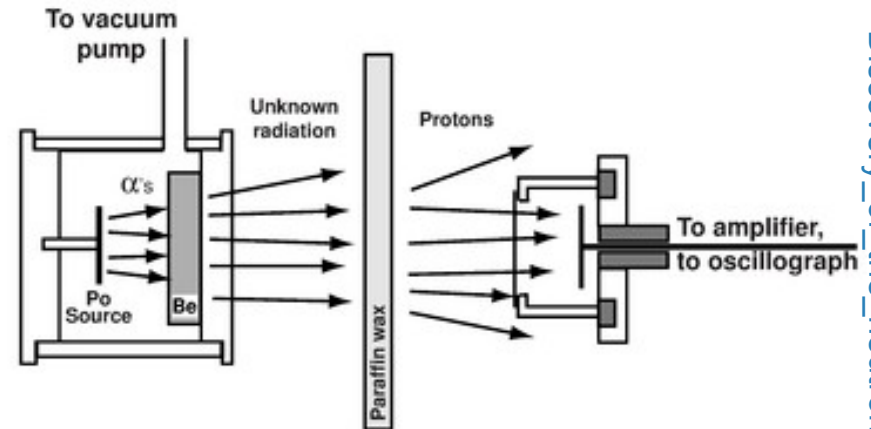
Rutherford 1920: Postulat eines weiteren, elektrisch neutralen
Kernbausteins mit etwa der gleichen Masse
wie das Proton: das **Neutron**

Chadwick 1932: Entdeckung des **Neutrons**

- Erzeugung von Neutronen durch
Beschuss von Beryllium mit α -Strahlung



- Nachweis durch Protonen, die von den
Neutronen aus Paraffin ausgelöst werden



seit 1932: Proton-Neutron-Modelle des Kerns

(W. Heisenberg, D. Iwanenko)

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

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

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\underbrace{\lambda N(t)}$$

Aktivität, Einheit „Bequerel“, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall / s}$

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\underbrace{\lambda N(t)}$$

Aktivität, Einheit „Bequerel“, 1 Bq = 1 Zerfall / s

Lösung der Differentialgleichung: $\Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda \cdot t)$

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\underbrace{\lambda N(t)}$$

Aktivität, Einheit „Bequerel“, 1 Bq = 1 Zerfall / s

Lösung der Differentialgleichung: $\Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda \cdot t)$

Exponentielles Zerfallsgesetz

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\underbrace{\lambda N(t)}$$

Aktivität, Einheit „Bequerel“, 1 Bq = 1 Zerfall / s

Lösung der Differentialgleichung: $\Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda \cdot t)$

Exponentielles Zerfallsgesetz

$\tau = 1/\lambda$ ist die **mittlere Lebensdauer**

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\underbrace{\lambda N(t)}$$

Aktivität, Einheit „Bequerel“, 1 Bq = 1 Zerfall / s

Lösung der Differentialgleichung: $\Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda \cdot t)$

Exponentielles Zerfallsgesetz

$\tau = 1/\lambda$ ist die **mittlere Lebensdauer**

Nach der Zeit τ ist die Zahl der Kerne auf $1/e$ abgefallen.

gleiche Argumentation wie bei der Lebensdauer atomarer Zustände:

Anzahl N instabile Kerne,

die mit fester Wahrscheinlichkeit pro Zeitintervall spontan zerfallen.

Frage: Wie viele Kerne sind zum späteren Zeitpunkt t noch vorhanden ?

Zerfallsrate dN/dt ist proportional zur Zahl der noch vorhandenen Kerne:

$$\rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\underbrace{\lambda N(t)}$$

Aktivität, Einheit „Bequerel“, 1 Bq = 1 Zerfall / s

Lösung der Differentialgleichung: $\Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda \cdot t)$

Exponentielles Zerfallsgesetz

$\tau = 1/\lambda$ ist die **mittlere Lebensdauer**

Nach der Zeit τ ist die Zahl der Kerne auf $1/e$ abgefallen.

Halbwertszeit: $N(t_{1/2}) = \frac{1}{2}N_0 \rightarrow t_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$

Pause

und Zeit für Fragen ?

Strahlung ist grundsätzlich nur **über**
elektromagnetische Wechselwirkung im Detektor nachweisbar:

Strahlung ist grundsätzlich nur **über elektromagnetische Wechselwirkung** im Detektor nachweisbar:

- Freisetzen beweglicher Ladungsträger durch
 - **Ionisation** von Atomen erzeugt freie Ladungsträger und Photonen
(z.B. Gasen oder flüssigen Edelgasen)
Signal durch Ladungssammlung
 - **Erzeugung von Elektron-Lochpaaren** am p-n-Übergang
Strom in Sperr-Richtung

Strahlung ist grundsätzlich nur **über elektromagnetische Wechselwirkung** im Detektor nachweisbar:

- Freisetzen beweglicher Ladungsträger durch
 - **Ionisation** von Atomen erzeugt freie Ladungsträger und Photonen
(z.B. Gasen oder flüssigen Edelgasen)
Signal durch Ladungssammlung
 - **Erzeugung von Elektron-Lochpaaren** am p-n-Übergang
Strom in Sperr-Richtung
- Erzeugung von (optischen) Photonen
 - **Anregung von Atomen** erzeugt Photonen
(Ausbreitung in durchsichtigen Medien)
Nachweis durch Photoeffekt

Strahlung ist grundsätzlich nur **über elektromagnetische Wechselwirkung** im Detektor nachweisbar:

- Freisetzen beweglicher Ladungsträger durch
 - **Ionisation** von Atomen erzeugt freie Ladungsträger und Photonen
(z.B. Gasen oder flüssigen Edelgasen)
Signal durch Ladungssammlung
 - **Erzeugung von Elektron-Lochpaaren** am p-n-Übergang
Strom in Sperr-Richtung
- Erzeugung von (optischen) Photonen
 - **Anregung von Atomen** erzeugt Photonen
(Ausbreitung in durchsichtigen Medien)
Nachweis durch Photoeffekt

dann: Sammeln von Ladungen bzw. Photonen, Verstärkung,
elektrische Anzeige bzw. elektronische Verarbeitung und Digitalisierung

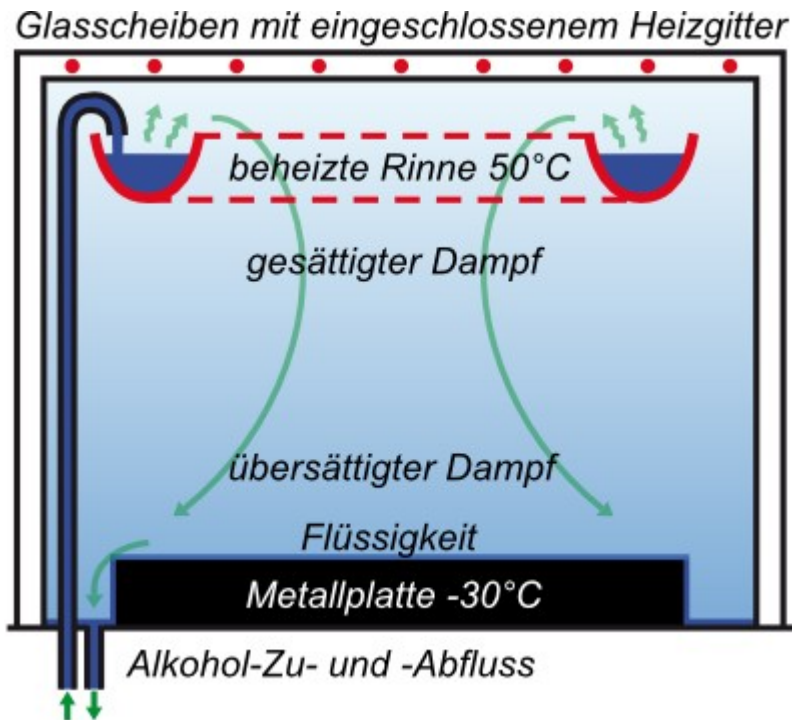
Strahlung ist grundsätzlich nur **über elektromagnetische Wechselwirkung** im Detektor nachweisbar:

- Freisetzen beweglicher Ladungsträger durch
 - **Ionisation** von Atomen erzeugt freie Ladungsträger und Photonen
(z.B. Gasen oder flüssigen Edelgasen)
Signal durch Ladungssammlung
 - **Erzeugung von Elektron-Lochpaaren** am p-n-Übergang
Strom in Sperr-Richtung
- Erzeugung von (optischen) Photonen
 - **Anregung von Atomen** erzeugt Photonen
(Ausbreitung in durchsichtigen Medien)
Nachweis durch Photoeffekt

dann: Sammeln von Ladungen bzw. Photonen, Verstärkung,
elektrische Anzeige bzw. elektronische Verarbeitung und Digitalisierung

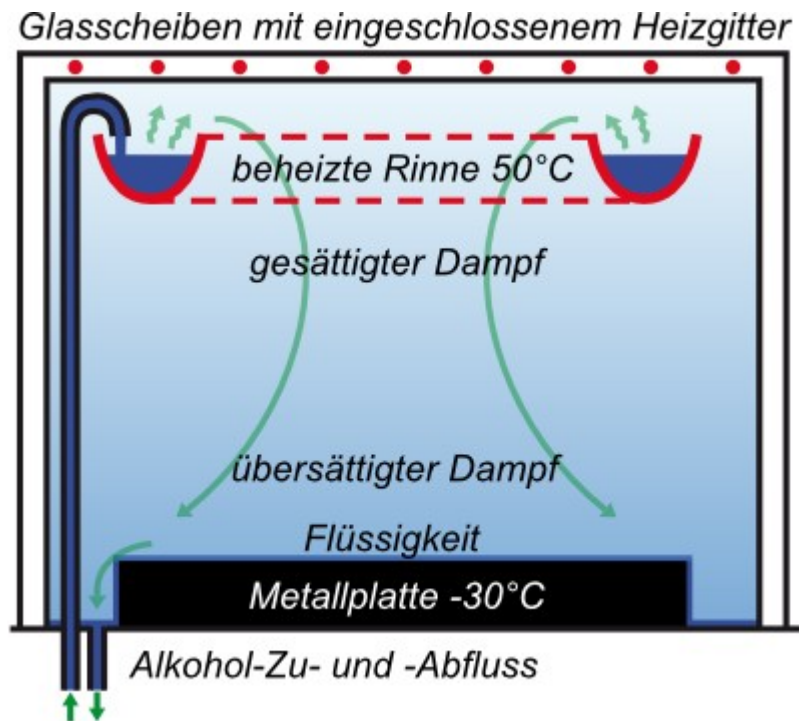
Beispiele aus Ihren Praktika: Photozelle, Nebelkammer, Geiger-Müller-Zählrohr,
Photodiode, Halbleiterzähler, Szintillationszähler

Prinzip: Nebeltröpfchen entlang einer Teilchenspur in gesättigtem Dampf



Prinzipieller Aufbau

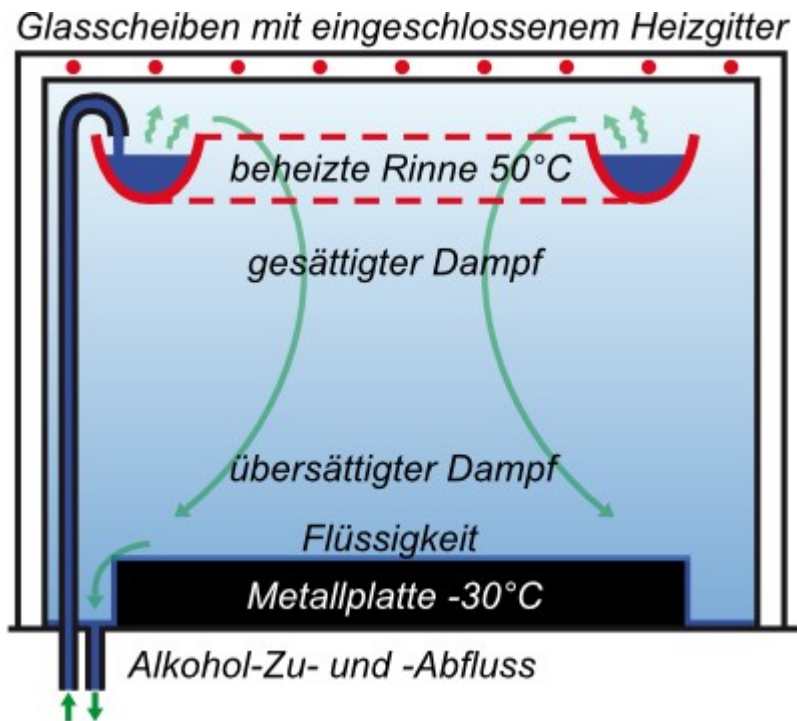
Prinzip: Nebeltröpfchen entlang einer Teilchenspurs in gesättigtem Dampf



Prinzipieller Aufbau



Prinzip: Nebeltröpfchen entlang einer Teilchenspür in gesättigtem Dampf

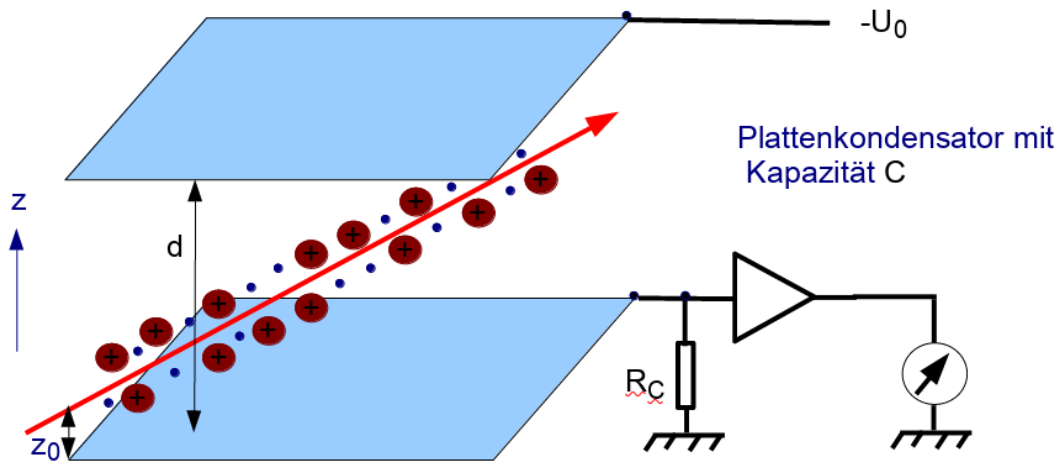


Prinzipieller Aufbau

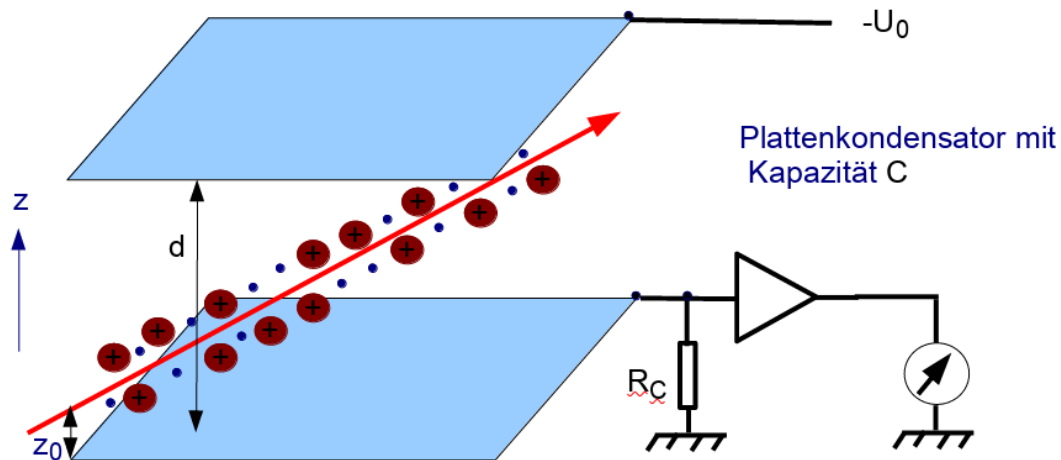


Video:
Nebelkammer

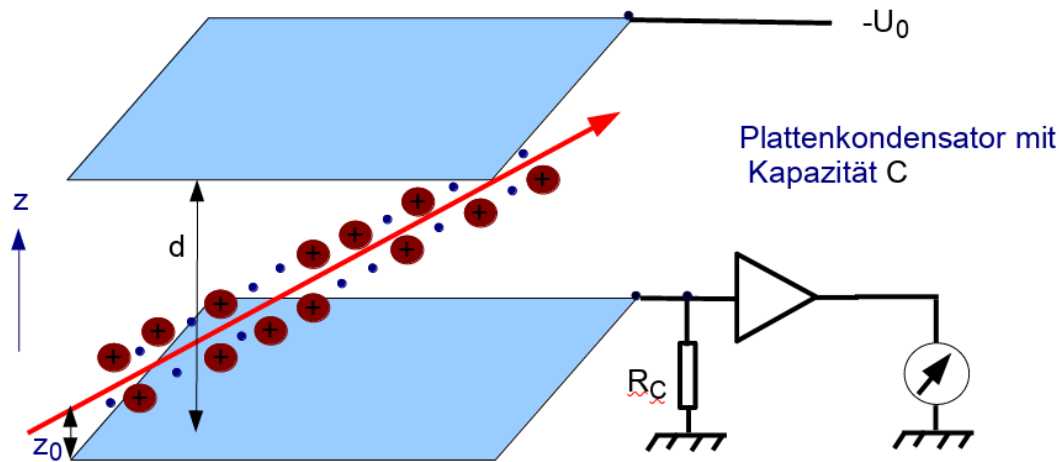
Prinzip: Entladen eines Kondensators durch Erzeugung freier Ladungsträger
Nachweis ionisierender Strahlung“



Prinzip: Entladen eines Kondensators durch Erzeugung freier Ladungsträger
Nachweis ionisierender Strahlung“



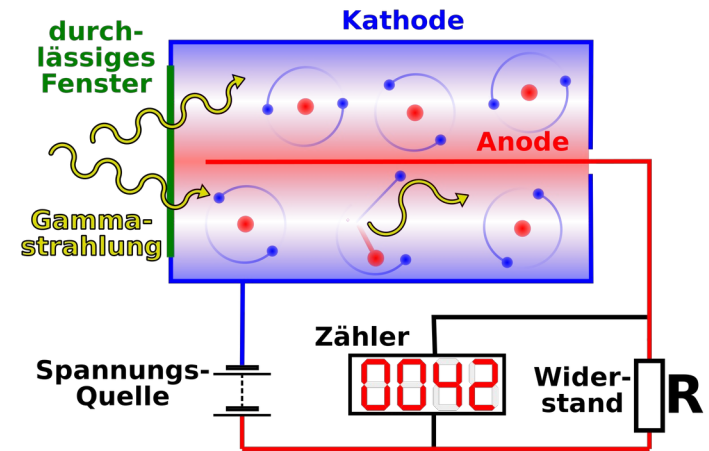
Prinzip: Entladen eines Kondensators durch Erzeugung freier Ladungsträger
Nachweis ionisierender Strahlung“



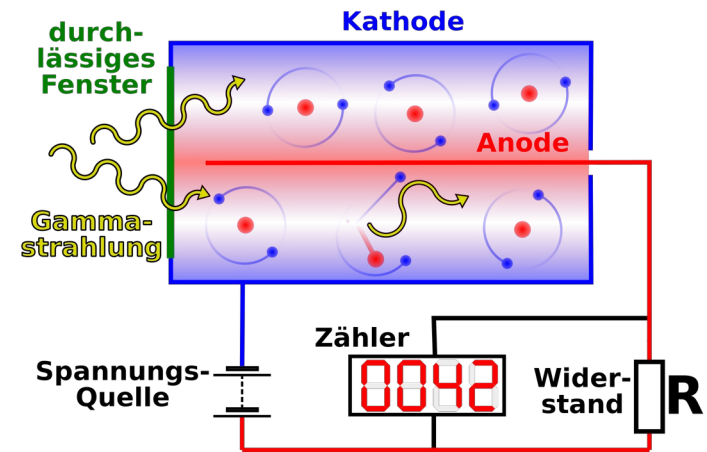
Einfachste Realisierung: ein Plattenkondensator mit Gas (Luft)

- Anlegen von Hochspannung →
Elektronen und Ionen werden auf Platten gesammelt
- Ladungsträgerstrom als Spannungsabfall an R_C messbar
- Mobilität der Elektronen um Größenordnungen höher → zwei Signalanteile

Prinzip: zylindrische Ionisationskammer mit dünnem Draht als Anode, Vervielfachung der Ladungsträger in der Nähe des Anodendrahts durch Stoßionisation



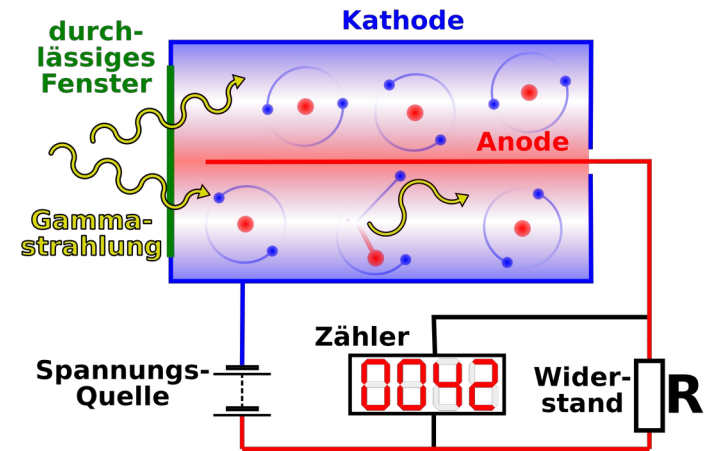
Prinzip: zylindrische Ionisationskammer mit dünnem Draht als Anode, Vervielfachung der Ladungsträger in der Nähe des Anodendrahts durch Stoßionisation



Entladungsprozess nach „Zünden“ des Rohrs muss unterbrochen werden:

- großer Ladewiderstand, d.h. Zusammenbruch der Versorgungsspannung oder kurzzeitiges elektronisches Absenken der Spannungsversorgung
 - große „Totzeit“ von ~ 0.1 ms
- „Selbstlöschung“ durch Zugabe eines „Löschgases“ („Quencher“, Kohlenwasserstoffe oder Alkohole, z. B. CH_4 , C_2H_6 , ... , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, ...)
 - kleinere Totzeit im Bereich ~ 1 μs

Prinzip: zylindrische Ionisationskammer mit dünnem Draht als Anode, Vervielfachung der Ladungsträger in der Nähe des Anodendrahts durch Stoßionisation



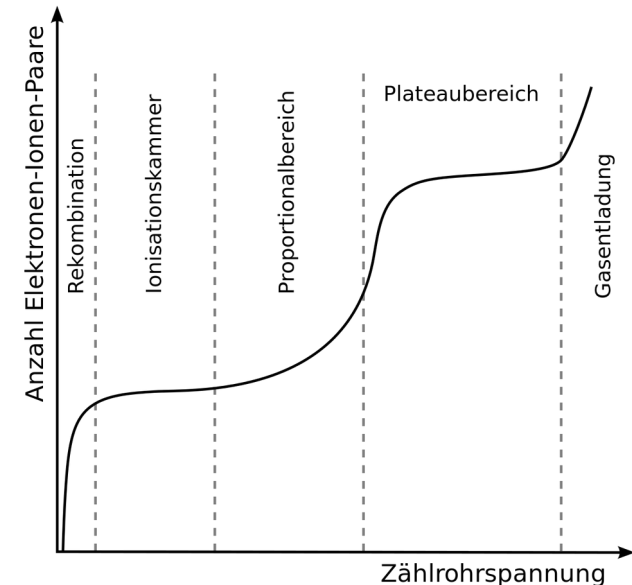
Entladungsprozess nach „Zünden“ des Rohrs muss unterbrochen werden:

- großer Ladewiderstand, d.h. Zusammenbruch der Versorgungsspannung oder kurzzeitiges elektronisches Absenken der Spannungsversorgung

→ große „Totzeit“ von ~ 0.1 ms

- „Selbstlöschung“ durch Zugabe eines „Löschgases“ („Quencher“, Kohlenwasserstoffe oder Alkohole, z. B. CH_4 , C_2H_6 , ... , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, ...)

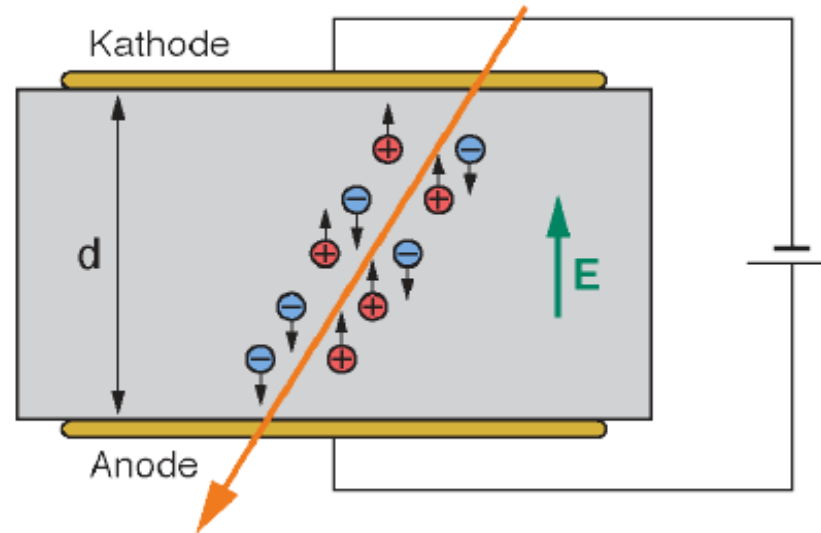
→ kleinere Totzeit im Bereich ~ 1 μs



Abhängigkeit des Ladungssignals von der Betriebsspannung

Prinzip:

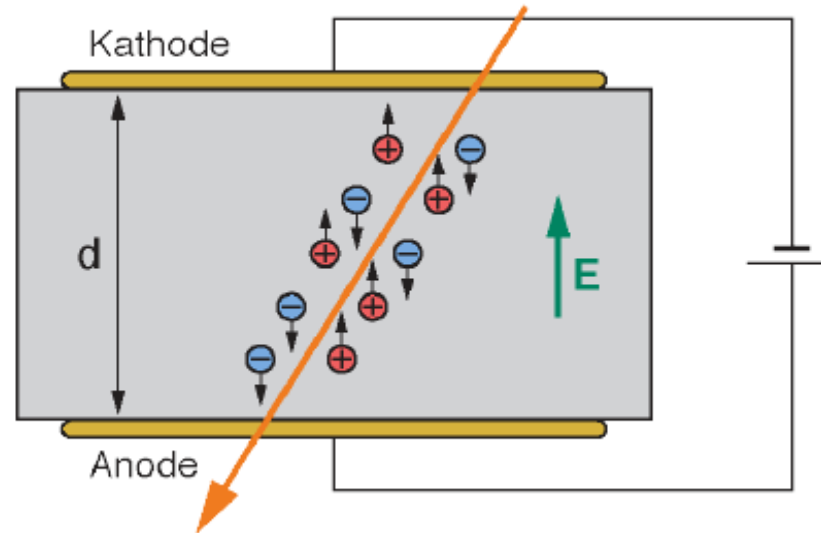
Erzeugung von Elektron-Lochpaaren in depletierter Zone eines p-n-Übergangs



s. Vorlesung 19,
Halbleiteranwendungen

Prinzip:

Erzeugung von Elektron-Lochpaaren in depletierter Zone eines p-n-Übergangs



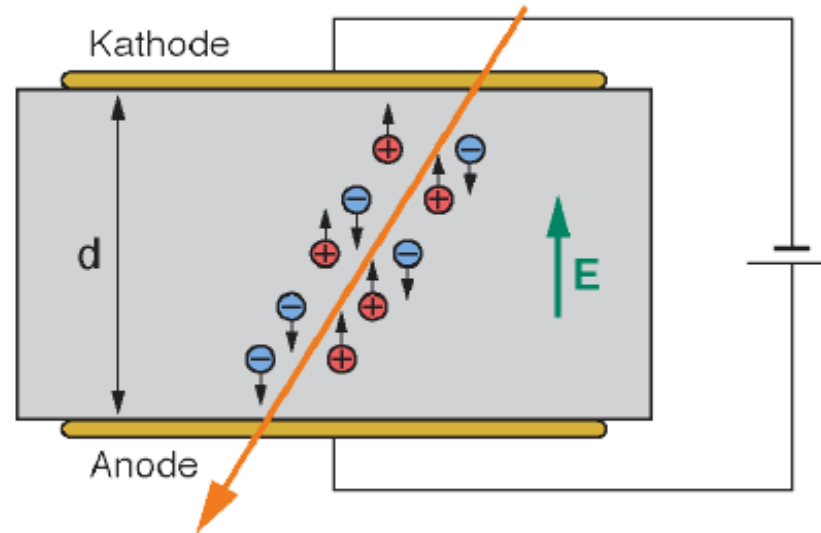
s. Vorlesung 19,
Halbleiteranwendungen

Festkörper als Nachweismedium

- hohe Dichte, d.h. kurze Absorptionslänge für geladene Teilchen
- Bandlücke im Halbleiter (Si: 3,6 eV, Ge: 2,8 eV)
viel kleiner als Ionisationsenergien, d.h.
mehr Elektron-Loch-Paare als Elektron-Ionen-Paare
- sehr hohe Raten möglich

Prinzip:

Erzeugung von Elektron-Lochpaaren in depletierter Zone eines p-n-Übergangs



s. Vorlesung 19,
Halbleiteranwendungen

Festkörper als Nachweismedium

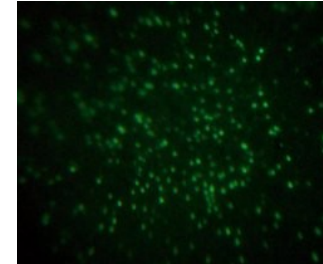
- hohe Dichte, d.h. kurze Absorptionslänge für geladene Teilchen
- Bandlücke im Halbleiter (Si: 3,6 eV, Ge: 2,8 eV) viel kleiner als Ionisationsenergien, d.h. mehr Elektron-Loch-Paare als Elektron-Ionen-Paare
- sehr hohe Raten möglich



Prinzip:

Erzeugung und Sammlung von Photonen in transparentem Medium

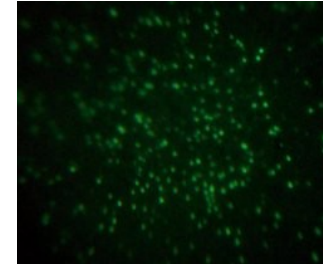
sehr alte Methode: Beobachtung und Zählen von Lichtblitzen auf Zinksulfid-Schirm



Prinzip:

Erzeugung und Sammlung von Photonen in transparentem Medium

sehr alte Methode: Beobachtung und Zählen von Lichtblitzen auf Zinksulfid-Schirm



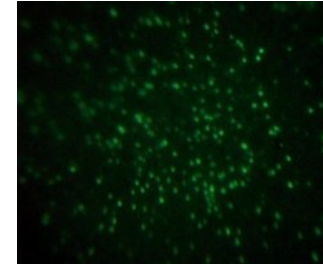
heute: szintillierendes Medium, Beobachtung mittels „Sekundärelektronenvervielfacher“ (engl. Photomultiplier, „PM“)

seit kurzem gibt es auch sogenannte „Silizium-Photomultiplier“ („SiPM“), die einzelne Photonen am p-n-Übergang nahe des Durchbruchs nachweisen.

Prinzip:

Erzeugung und Sammlung von Photonen in transparentem Medium

sehr alte Methode: Beobachtung und Zählen von Lichtblitzen auf Zinksulfid-Schirm



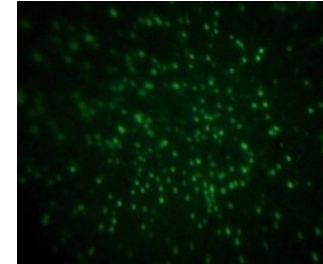
heute: szintillierendes Medium, Beobachtung mittels „Sekundärelektronenvervielfacher“ (engl. Photomultiplier, „PM“)

seit kurzem gibt es auch sogenannte „Silizium-Photomultiplier“ („SiPM“), die einzelne Photonen am p-n-Übergang nahe des Durchbruchs nachweisen.

Prinzip:

Erzeugung und Sammlung von Photonen in transparentem Medium

sehr alte Methode: Beobachtung und Zählen von Lichtblitzen auf Zinksulfid-Schirm

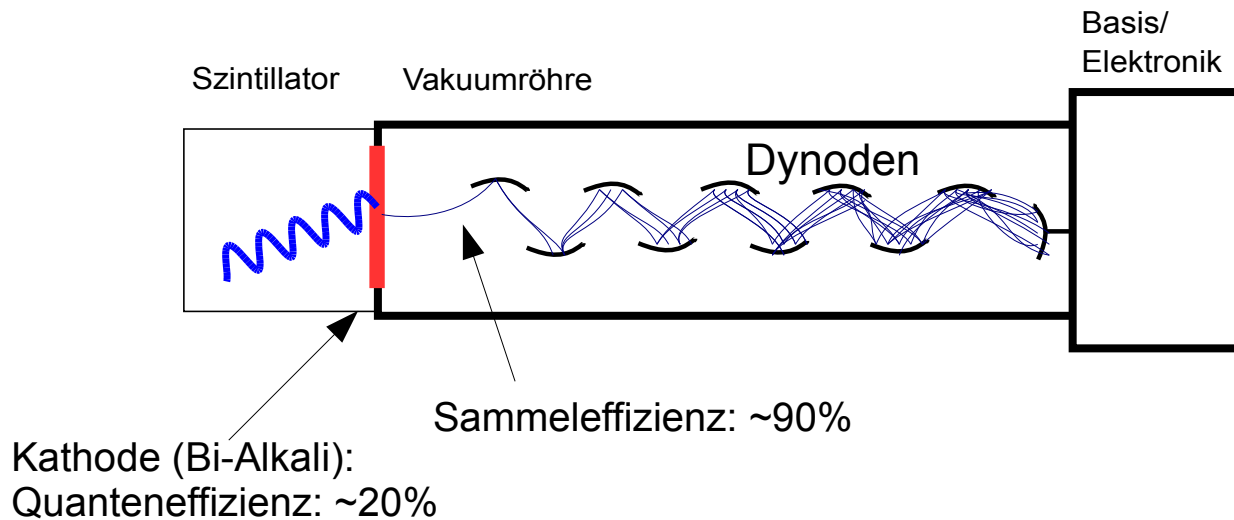


heute: szintillierendes Medium, Beobachtung mittels „Sekundärelektronenvervielfacher“ (engl. Photomultiplier, „PM“)

seit kurzem gibt es auch sogenannte „Silizium-Photomultiplier“ („SiPM“), die einzelne Photonen am p-n-Übergang nahe des Durchbruchs nachweisen.

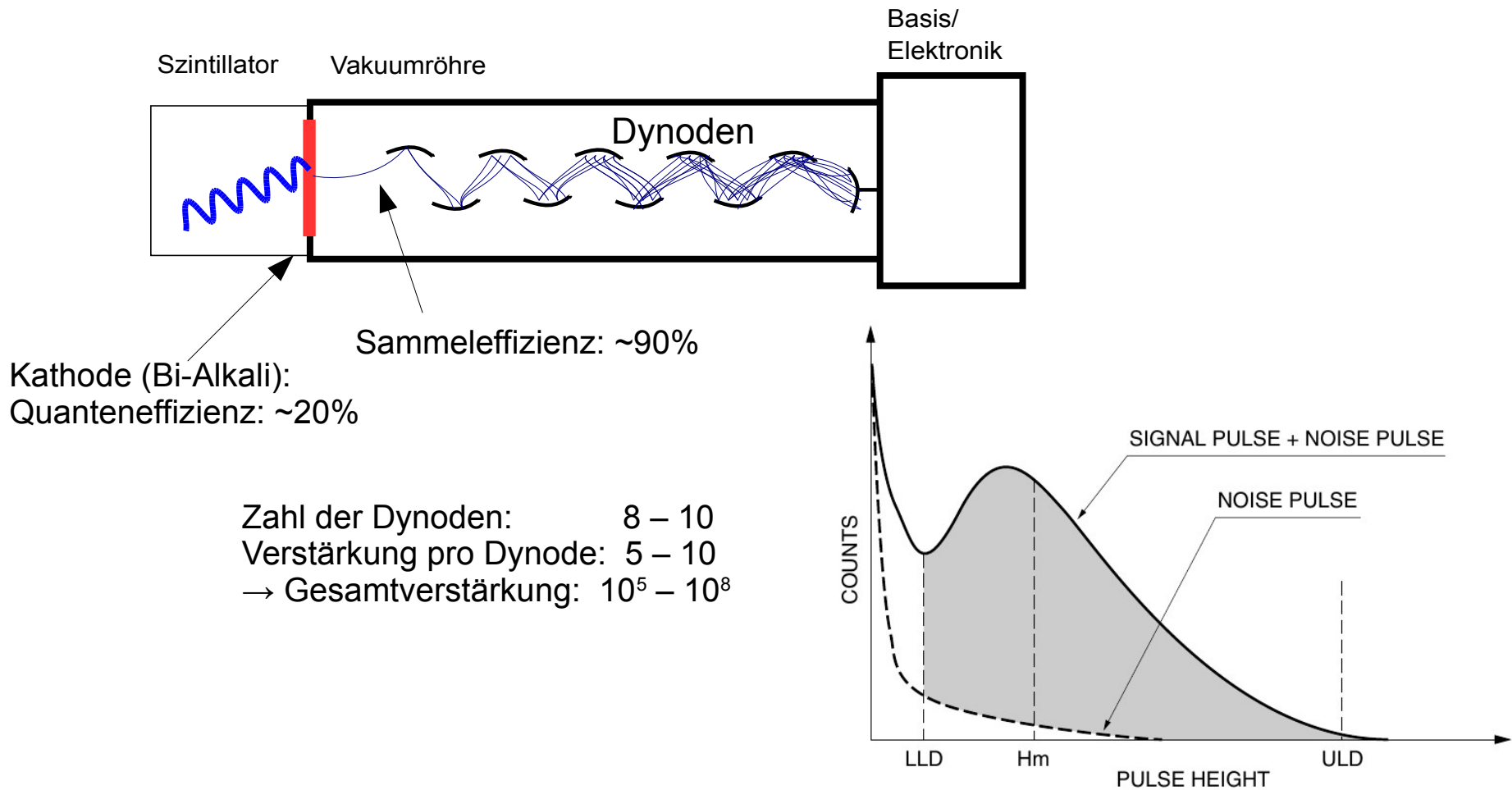


Prinzip: Erzeugung primärer Elektronen durch Photoeffekt,
Beschleunigung der Elektronen und Erzeugung von Sekundärelektronen
durch Stoßionisation in einem mehrstufigen Prozess



Zahl der Dynoden: 8 – 10
Verstärkung pro Dynode: 5 – 10
→ Gesamtverstärkung: $10^5 - 10^8$

Prinzip: Erzeugung primärer Elektronen durch Photoeffekt, Beschleunigung der Elektronen und Erzeugung von Sekundärelektronen durch Stoßionisation in einem mehrstufigen Prozess



Typische Verteilung der
Signal- und Rauschanteile

Die **grundlegende Maßeinheit** für Radioaktivität ist die **deponierte Energie**:

- Energiedosis: $D = E / m$ [D] = 1J/kg = 1 Gy („Gray“, alte Einheit rad)
1 Gray [Gy] = 100 rad [rd]
- Dosisleistung: dD/dt , Einheit Gy/s

- hohe Strahlendosen führen zu direkter Schädigung von Zellen und Organen mit unmittelbaren Symptomen
- hohe Dosen führen zur Schäden an der DNA und Mutationen
→ verminderte Teilungsfähigkeit der Zellen, Entstehung von Krebszellen

w berücksichtigt Strahlenart, Energie, zeitliche Verteilung der Dosis

Die **grundlegende Maßeinheit** für Radioaktivität ist die **deponierte Energie**:

- Energiedosis: $D = E / m$ [D] = 1J/kg = 1 Gy („Gray“, alte Einheit rad)
1 Gray [Gy] = 100 rad [rd]
- Dosisleistung: dD/dt , Einheit Gy/s

Da unterschiedliche Strahlenarten biologisches Gewebe unterschiedlich schädigen, führt man **Bewertungsfaktoren** ein

- hohe Strahlendosen führen zu direkter Schädigung von Zellen und Organen mit unmittelbaren Symptomen
- hohe Dosen führen zur Schäden an der DNA und Mutationen
→ verminderte Teilungsfähigkeit der Zellen, Entstehung von Krebszellen

w berücksichtigt Strahlenart, Energie, zeitliche Verteilung der Dosis

Die **grundlegende Maßeinheit** für Radioaktivität ist die **deponierte Energie**:

- Energiedosis: $D = E / m$ [D] = 1J/kg = 1 Gy („Gray“, alte Einheit rad)
1 Gray [Gy] = 100 rad [rd]
- Dosisleistung: dD/dt , Einheit Gy/s

Da unterschiedliche Strahlenarten biologisches Gewebe unterschiedlich schädigen, führt man **Bewertungsfaktoren** ein

- hohe Strahlendosen führen zu direkter Schädigung von Zellen und Organen mit unmittelbaren Symptomen
- hohe Dosen führen zur Schäden an der DNA und Mutationen
→ verminderte Teilungsfähigkeit der Zellen, Entstehung von Krebszellen
- bewertete Dosis: $H = w \cdot D$, [H] = 1 Sv = 1 J/kg („Sievert“)
früher 1 rem = 0.01 Sv
w berücksichtigt Strahlenart, Energie, zeitliche Verteilung der Dosis

Die **grundlegende Maßeinheit** für Radioaktivität ist die **deponierte Energie**:

- Energiedosis: $D = E / m$ [D] = 1 J/kg = 1 Gy („Gray“, alte Einheit rad)
1 Gray [Gy] = 100 rad [rd]
- Dosisleistung: dD/dt , Einheit Gy/s

Da unterschiedliche Strahlenarten biologisches Gewebe unterschiedlich schädigen, führt man **Bewertungsfaktoren** ein

- hohe Strahlendosen führen zu direkter Schädigung von Zellen und Organen mit unmittelbaren Symptomen
- hohe Dosen führen zur Schäden an der DNA und Mutationen
→ verminderte Teilungsfähigkeit der Zellen, Entstehung von Krebszellen

- bewertete Dosis: $H = w \cdot D$, [H] = 1 Sv = 1 J/kg („Sievert“)
früher 1 rem = 0.01 Sv

w berücksichtigt Strahlenart, Energie, zeitliche Verteilung der Dosis

- effektive Dosis $H_{\text{eff}} = \sum_T w_T \cdot H_T$, [H_{eff}] = Sv
 - H_T : Äquivalentdosis in Gewebeart T
 - w_T : Bewertungsfaktor für Gewebeart T

	Deterministische Strahlenschäden	Stochastische Strahlenschäden
Beschreibung	Meist unmittelbar auftretende Schäden an Geweben und Organen	Später auftretende Schäden aufgrund von Zellen, deren <u>DNA</u> (Erbmaterial) geschädigt wurde
Ursache des Schadens	Abtötung oder Fehlfunktionen zahlreicher Zellen	Mutationen und nachfolgende Vermehrung von einzelnen mutierten Zellen (Körperzellen oder Keimzellen)
Dosis- Abhängigkeit	Je höher die Strahlendosis, desto schwerer der Strahlenschaden	Je höher die Strahlendosis, desto höher die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Strahlenschadens
Dosis- Schwellenwert	<u>ca. 500</u> Millisievert (mSv); beim <u>ungeborenen Kind</u> <u>ca. 50 bis 100 mSv</u>	Nicht vorhanden
Beispiele	Rötungen der Haut, Haarausfall, Unfruchtbarkeit, akute Strahlenkrankheit, Fehlbildungen und Fehlentwicklungen des Gehirns beim Ungeborenen	Krebs, <u>Leukämie</u> , vererbbaare Effekte

Strahlungswichtungsfaktoren nach ICRP 60

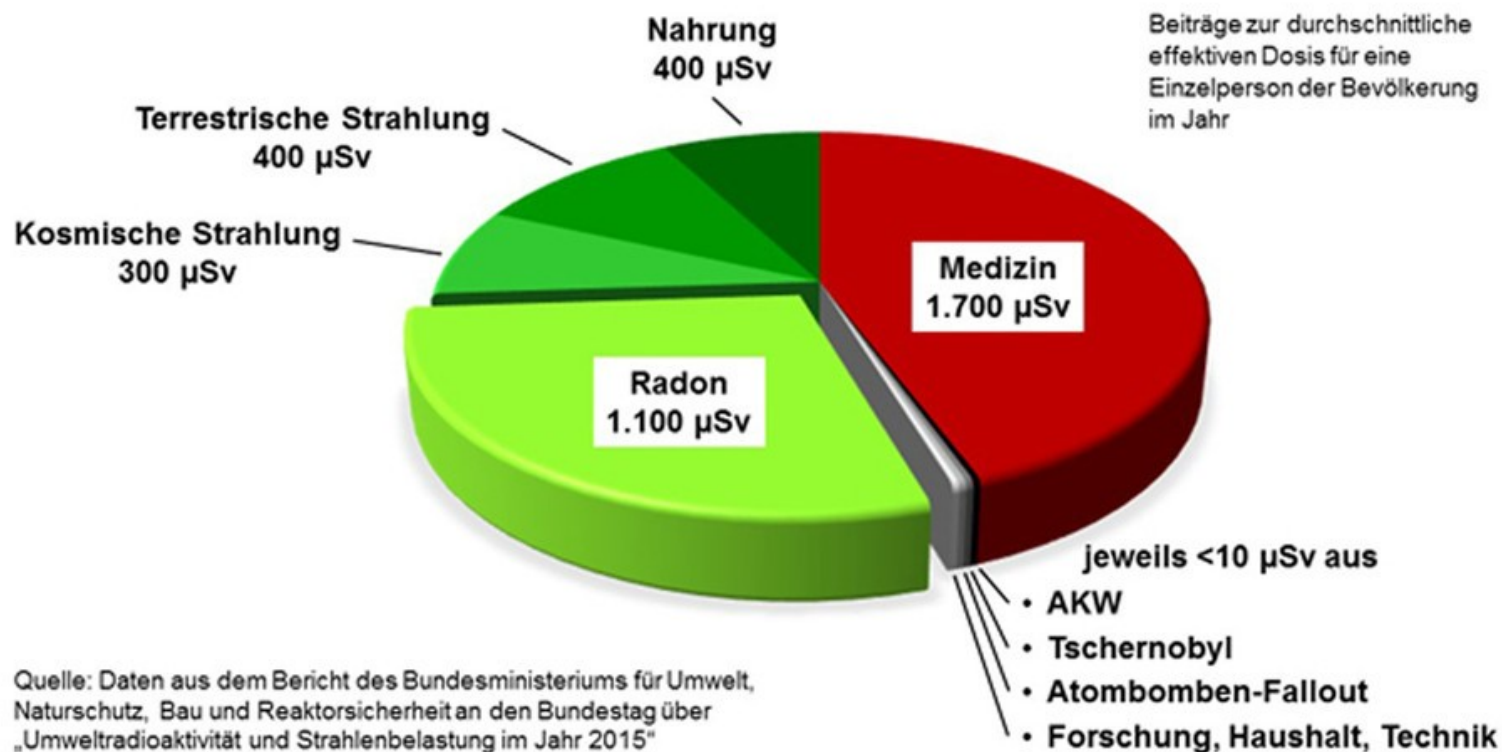
Art der Strahlung	Energiebereich	Strahlungswichtungsfaktor w_R
Photonen (typ. Gammastrahlung, Röntgenstrahlung ^[1])	alle Energien	1
Elektronen und Myonen	alle Energien	1
Neutronen	< 10 keV	5
	10 – 100 keV	10
	0,1 – 2 MeV	20
	2 – 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen	> 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne, Rückstoßkerne	alle Energien	20

ICRP = Internationalen Strahlenschutzkommission

Strahlung ist ein Umweltphänomen, an das sich das Leben angepasst hat

- biologische Systeme verfügen über Reparaturmechanismen

Durchschnittliche Strahlenexposition des Menschen in Deutschland



Für die **Strahlenbelastung** verschiedener Bevölkerungsgruppen gelten strenge **Grenzwerte**, s. z.B. [Bundesamt für Strahlenschutz](#)

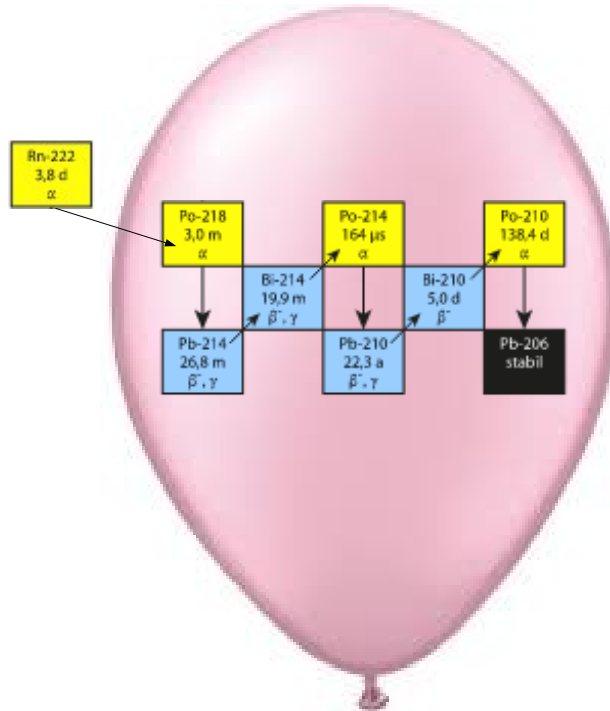
2-3 mSv/a	Durchschnittliche jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland aus natürlichen Quellen
2 mSv/a	Durchschnittliche jährliche Dosis einer Person in Deutschland aus künstlichen Quellen, vornehmlich Medizin (Wert für 2015: etwa 1,7 mSv)
10-20 mSv	Typischer Dosisbereich für eine Ganzkörper-Computertomographie eines Erwachsenen
20 mSv/a	Grenzwert (maximal zulässige Dosis) der jährlichen Strahlenexposition für beruflich strahlenexponierte Personen in Deutschland
bis zu 0,1 mSv pro Flug	Dosis durch Höhenstrahlung bei einem Flug von München nach Japan
1 mSv/a	Grenzwert der jährlichen Strahlenexposition für Personen der allgemeinen Bevölkerung
250 mSv	Richtwert für eine Person beim Einsatz lebensrettender Maßnahmen oder zur Vermeidung großer Katastrophen in Deutschland

Für die **Strahlenbelastung** verschiedener Bevölkerungsgruppen gelten strenge **Grenzwerte**, s. z.B. [Bundesamt für Strahlenschutz](#)

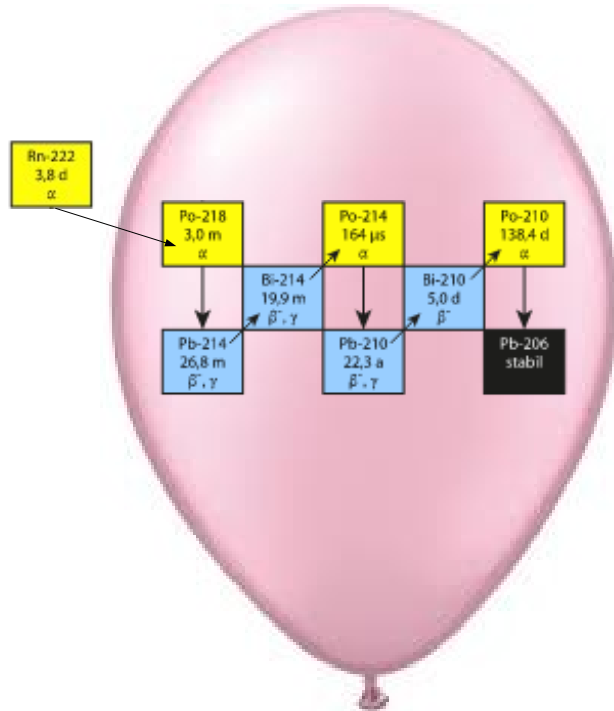
2-3 mSv/a	Durchschnittliche jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland aus natürlichen Quellen
2 mSv/a	Durchschnittliche jährliche Dosis einer Person in Deutschland aus künstlichen Quellen, vornehmlich Medizin (Wert für 2015: etwa 1,7 mSv)
10-20 mSv	Typischer Dosisbereich für eine Ganzkörper-Computertomographie eines Erwachsenen
20 mSv/a	Grenzwert (maximal zulässige Dosis) der jährlichen Strahlenexposition für beruflich strahlenexponierte Personen in Deutschland
bis zu 0,1 mSv pro Flug	Dosis durch Höhenstrahlung bei einem Flug von München nach Japan
1 mSv/a	Grenzwert der jährlichen Strahlenexposition für Personen der allgemeinen Bevölkerung
250 mSv	Richtwert für eine Person beim Einsatz lebensrettender Maßnahmen oder zur Vermeidung großer Katastrophen in Deutschland

Der Umgang mit radioaktiven Präparaten setzt die Teilnahme an einer
- regelmäßig zu wiederholenden - Strahlenschutzunterweisung voraus

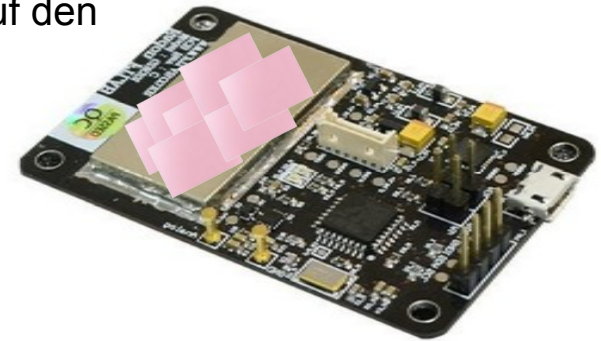
- 1.) Anziehung von ^{222}Rn -Zerfallsprodukten durch elektrostatisch aufgeladenen Luftballon



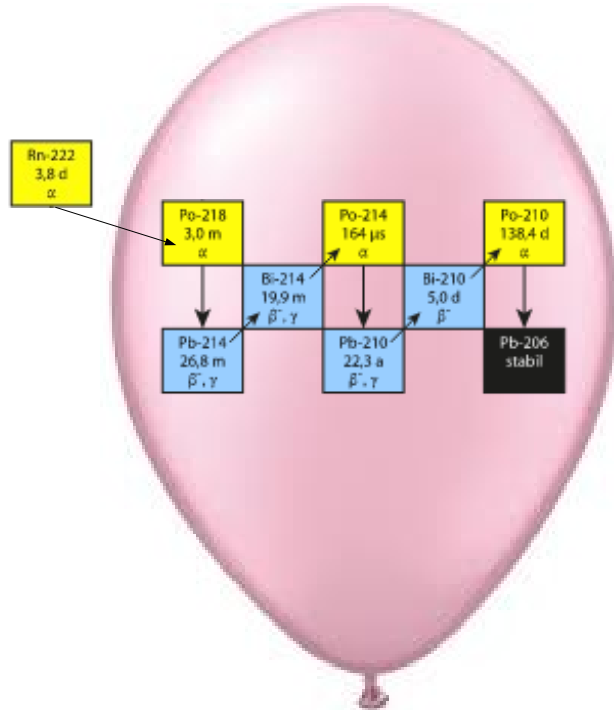
- 1.) Anziehung von ^{222}Rn -Zerfallsprodukten durch elektrostatisch aufgeladenen Luftballon



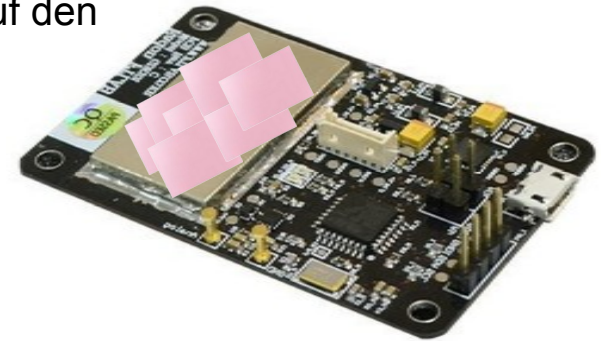
- 2.) nach ca. 10 min Luft entweichen lassen und Ballon auf den Sensor legen



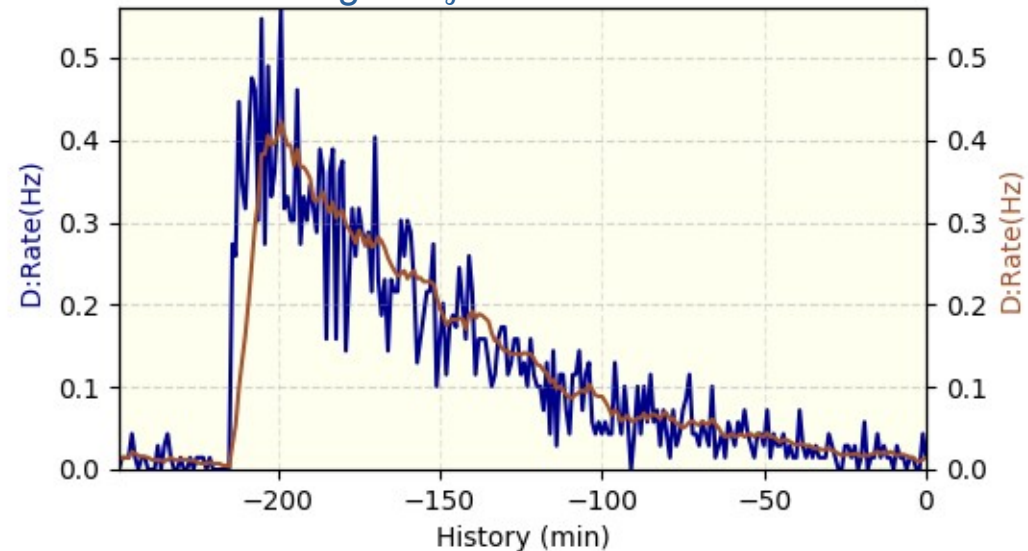
- 1.) Anziehung von ^{222}Rn -Zerfallsprodukten durch elektrostatisch aufgeladenen Luftballon



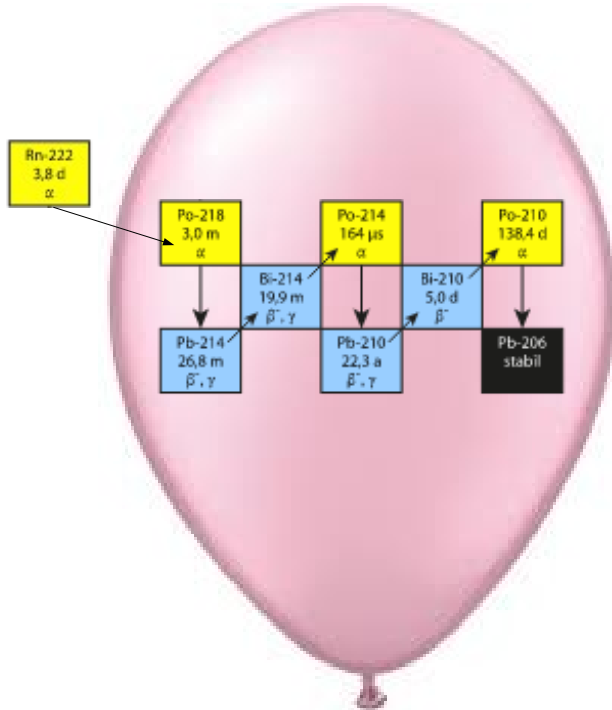
- 2.) nach ca. 10 min Luft entweichen lassen und Ballon auf den Sensor legen



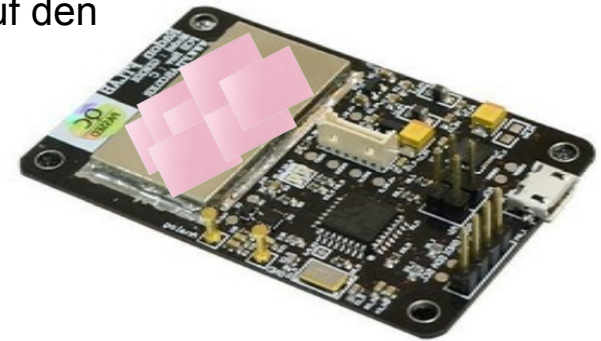
Messung der γ -Rate mit 1 min. Torzeit



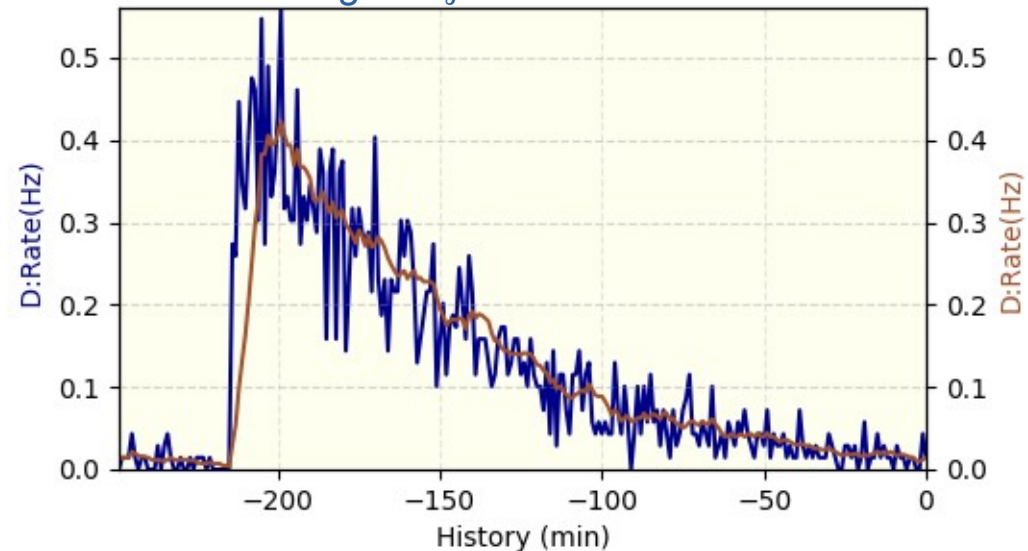
- 1.) Anziehung von ^{222}Rn -Zerfallsprodukten durch elektrostatisch aufgeladenen Luftballon



- 2.) nach ca. 10 min Luft entweichen lassen und Ballon auf den Sensor legen



Messung der γ -Rate mit 1 min. Torzeit



Überlagerung der Zerfälle verschiedener Nuklide,
daher kein reines Exponentialgesetz !

Wir wissen bereits:

Atomkerne bestehen (nur) aus **Protonen** und **Neutronen**

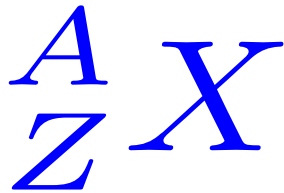
d. h. die Angabe der **Zahl der Protonen** und **Neutronen**
charakterisiert einen **Kern vollständig**.

Wir wissen bereits:

Atomkerne bestehen (nur) aus **Protonen** und **Neutronen**

d. h. die Angabe der **Zahl der Protonen** und **Neutronen**
charakterisiert einen Kern vollständig.

→ **Nomenklatur:**



X: Chemisches Symbol, äquivalent zur Kernladungszahl,
d. h. Zahl der Protonen **Z**

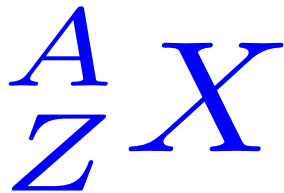
A: Massenzahl, **A = Z + N**, **N** =Zahl der Neutronen

Wir wissen bereits:

Atomkerne bestehen (nur) aus aus **Protonen** und **Neutronen**

d. h. die Angabe der **Zahl der Protonen** und **Neutronen**
charakterisiert einen Kern vollständig.

→ **Nomenklatur:**



X: Chemisches Symbol, äquivalent zur Kernladungszahl,
d. h. Zahl der Protonen **Z**

A: Massenzahl, **A = Z + N**, **N** =Zahl der Neutronen

- **Z** bestimmt die Struktur der Elektronenhülle, d.h. die chemischen Eigenschaften
- bei **gleichem Z** kann es **verschiedene Neutronenzahlen N** geben;
solche Kerne nennt man **Isotope**

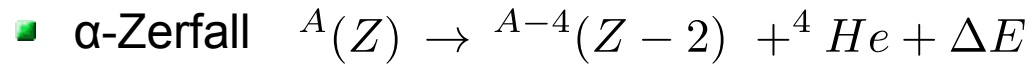
Beispiele:	${}^1_1\text{H}$	Wasserstoffkern, Proton
	${}^2_1\text{H}$	Deuterium (schwerer Wasserstoff)
	${}^4_2\text{He}$	Heliumkern, α -Teilchen
	${}^{12}_6\text{C}$	Kohlenstoffkern
	${}^{14}_6\text{C}$	Kohlenstoff-Isotop

Verwende (Z) als Bezeichnung für das chemische Symbol.

Kerne mit ungünstigem Z / N zerfallen in energetisch niedrigere Konfigurationen

Verwende (Z) als Bezeichnung für das chemische Symbol.

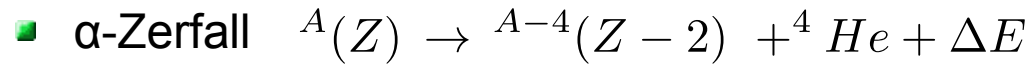
Kerne mit ungünstigem Z / N zerfallen in energetisch niedrigere Konfigurationen



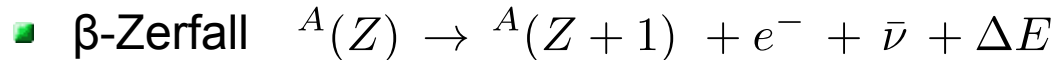
Emission eines α -Teilchens

Verwende (Z) als Bezeichnung für das chemische Symbol.

Kerne mit ungünstigem Z / N zerfallen in energetisch niedrigere Konfigurationen



Emission eines α -Teilchens



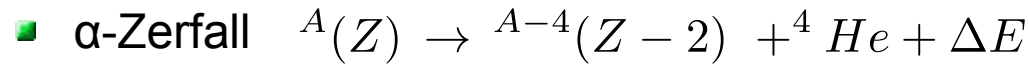
Emission eines Elektrons + **Neutrino**,

von Pauli postuliertes Teilchen zur „Rettung“
von Energie- und Impulserhaltung im β -Zerfall

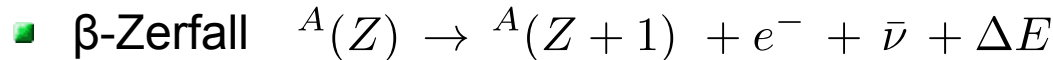
Umwandlung Neutron $\rightarrow$ Proton + Elektron + Antineutrino

Verwende (Z) als Bezeichnung für das chemische Symbol.

Kerne mit ungünstigem Z / N zerfallen in energetisch niedrigere Konfigurationen



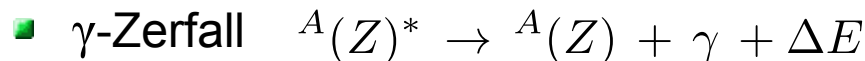
Emission eines α -Teilchens



Emission eines Elektrons + **Neutrino**,

von Pauli postuliertes Teilchen zur „Rettung“
von Energie- und Impulserhaltung im β -Zerfall

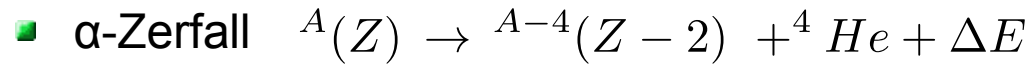
Umwandlung Neutron $\rightarrow$ Proton + Elektron + Antineutrino



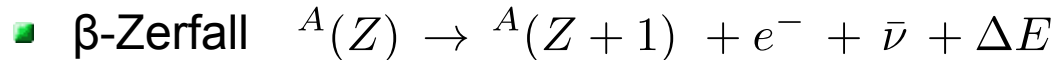
Emission eines Photons durch einen angeregten Kern,
fast immer auch in Folge eines α - oder β -Zerfalls

Verwende (Z) als Bezeichnung für das chemische Symbol.

Kerne mit ungünstigem Z / N zerfallen in energetisch niedrigere Konfigurationen



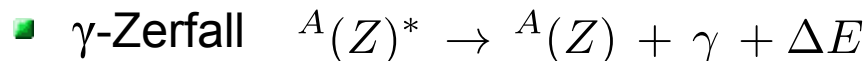
Emission eines α -Teilchens



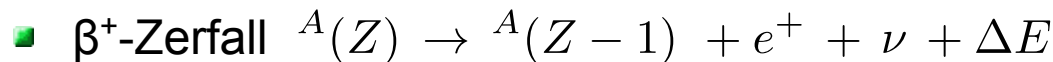
Emission eines Elektrons + **Neutrino**,

von Pauli postuliertes Teilchen zur „Rettung“
von Energie- und Impulserhaltung im β -Zerfall

Umwandlung Neutron $\rightarrow$ Proton + Elektron + Antineutrino



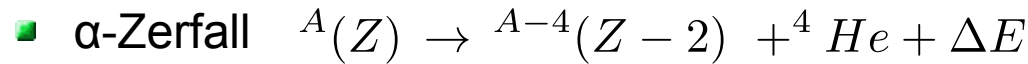
Emission eines Photons durch einen angeregten Kern,
fast immer auch in Folge eines α - oder β -Zerfalls



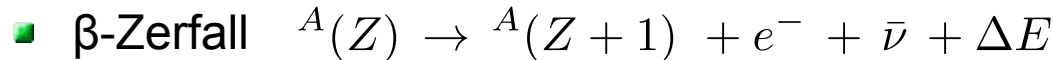
Emission eines Positrons + Neutrinos, Protonumwandlung in Neutron

Verwende (Z) als Bezeichnung für das chemische Symbol.

Kerne mit ungünstigem Z / N zerfallen in energetisch niedrigere Konfigurationen



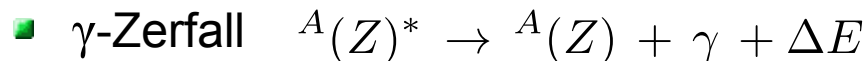
Emission eines α -Teilchens



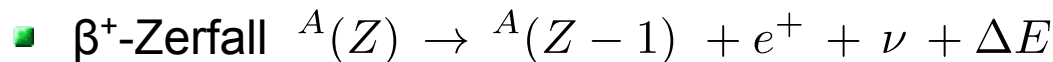
Emission eines Elektrons + **Neutrino**,

von Pauli postuliertes Teilchen zur „Rettung“
von Energie- und Impulserhaltung im β -Zerfall

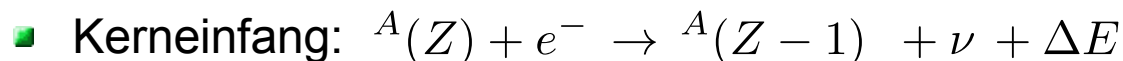
Umwandlung Neutron $\rightarrow$ Proton + Elektron + Antineutrino



Emission eines Photons durch einen angeregten Kern,
fast immer auch in Folge eines α - oder β -Zerfalls



Emission eines Positrons + Neutrinos, Protonumwandlung in Neutron



In Kernreaktionen sind erhalten:

- Energie, Impuls und Drehimpuls (Spin berücksichtigen !)
- Elektrische Ladung
- die sog. „Lepton-Zahl“ (d.h. Zahl der geladenen Leptonen & Neutrinos und deren Antiteilchen)
- Nukleonen-Zahl (eigentlich „Baryonenzahl“), d.h. die Gesamtzahl an Protonen und Neutronen ändert sich nicht

In Kernreaktionen sind erhalten:

- Energie, Impuls und Drehimpuls (Spin berücksichtigen !)
- Elektrische Ladung
- die sog. „Lepton-Zahl“ (d.h. Zahl der geladenen Leptonen & Neutrinos und deren Antiteilchen)
- Nukleonen-Zahl (eigentlich „Baryonenzahl“), d.h. die Gesamtzahl an Protonen und Neutronen ändert sich nicht

Beispiel:

	n	→	p	e⁻	$\bar{\nu}$
Ladung	0		1	-1	0
Spin	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$	$\pm\frac{1}{2}$	$\mp\frac{1}{2}$
Baryonenzahl	1		1	0	0
Leptonzahl	0		0	1	-1

Ende Vorlesung

und Zeit für Fragen ?