

Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2013/14

Vorlesung # 10, 09.01.2014

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik



Experimentelle Techniken

- Abschirm-Methoden
gegen externe Strahlung:
aktiv & passiv
- Zerfallsketten: die vier
primordialen α -Ketten
- Radon

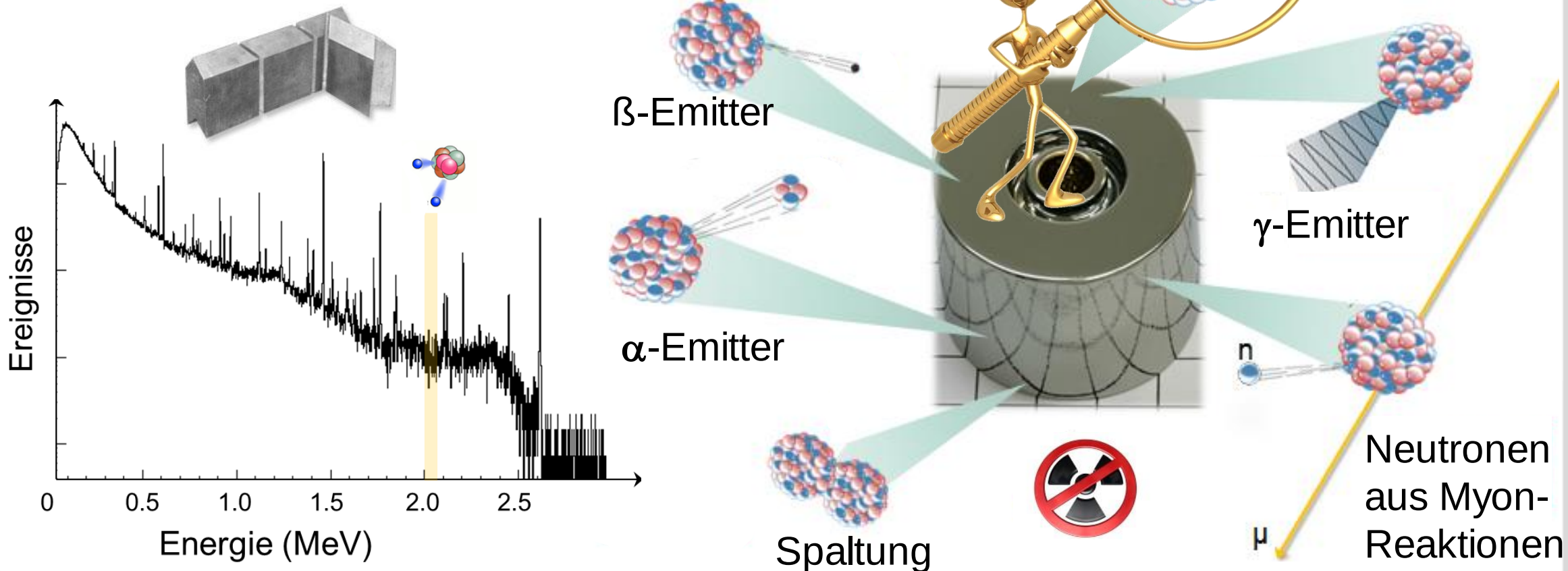


Signal & Untergrund

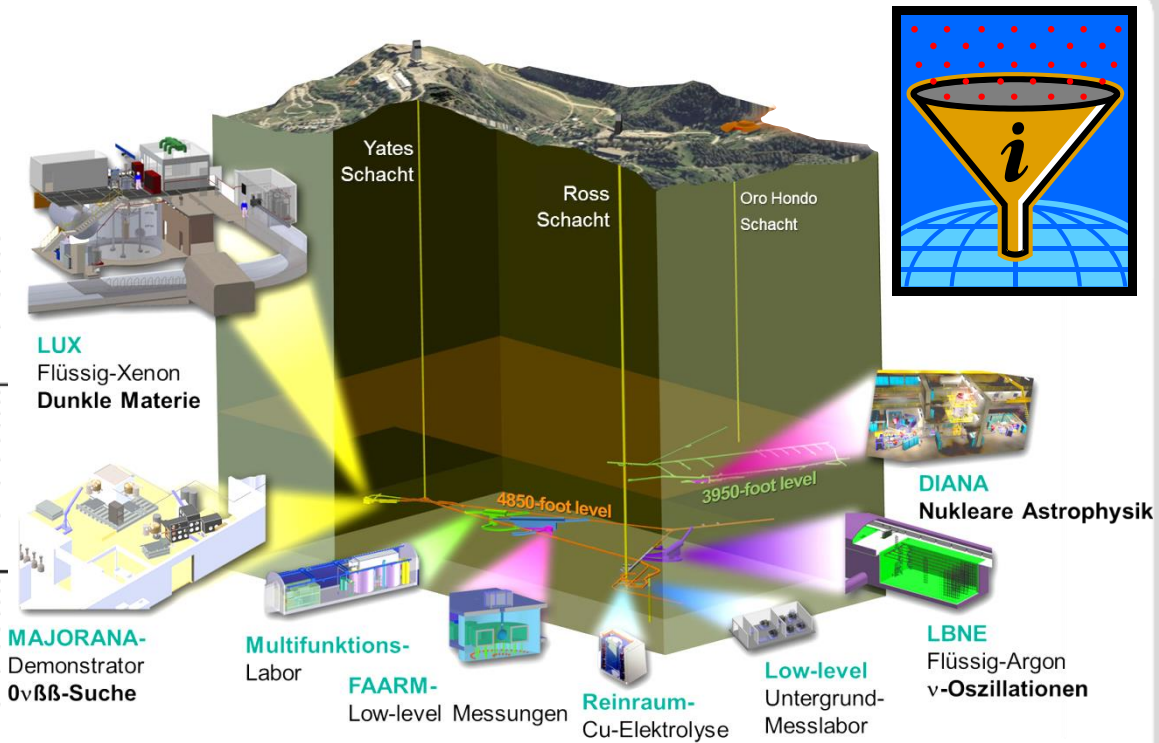
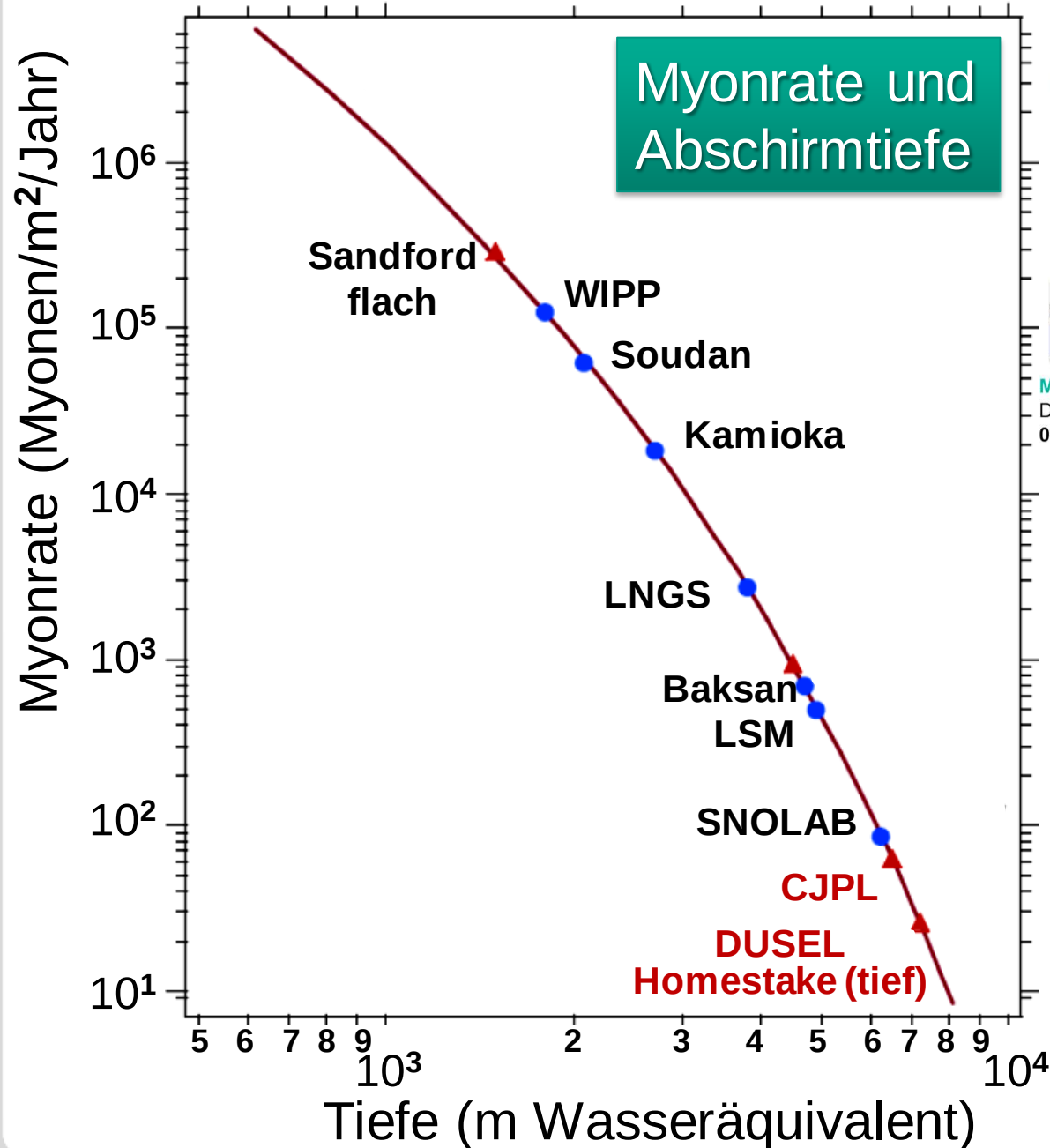


■ Suche nach **seltenen Prozessen** ($0\nu\beta\beta$, solare ν 's, CDM) erfordert

- Signalrate: < 1 Ereignis / 100 kg **pro Jahr**
- stringente Materialselektion (keine α, β, γ -Emitter)
- Reduktion von myon-induzierten Prozessen
- Abschirmung



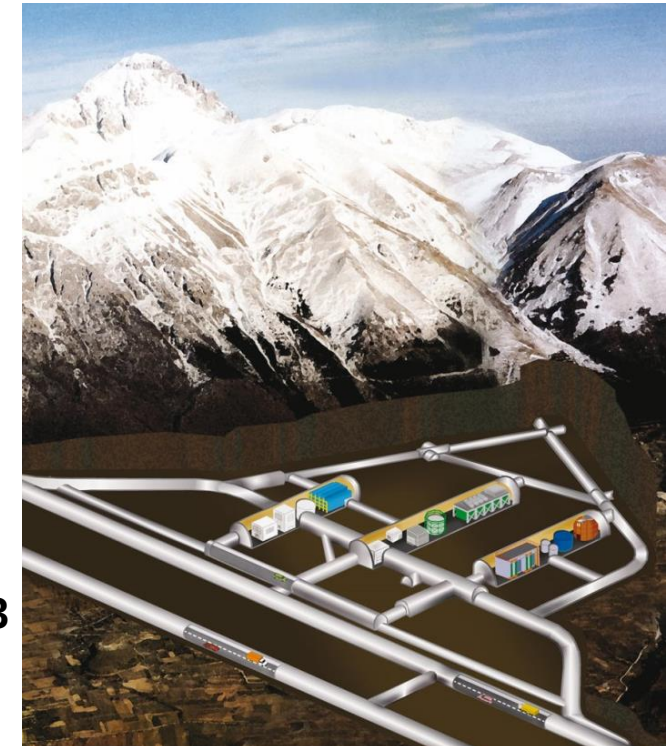
Untergrundlabore



- Myon-Abschirmung durch Fels

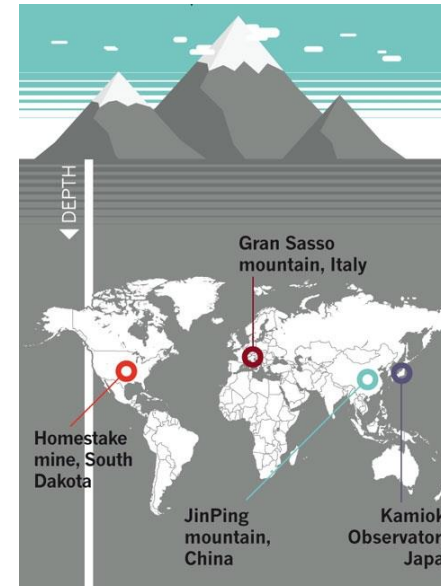
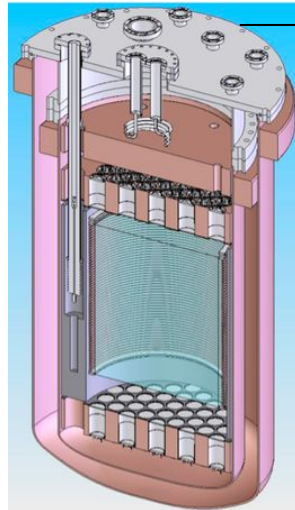
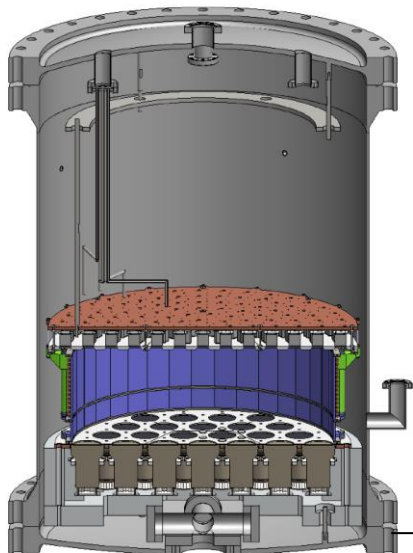
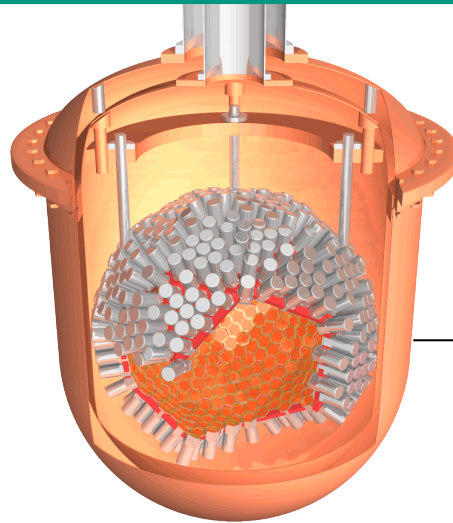
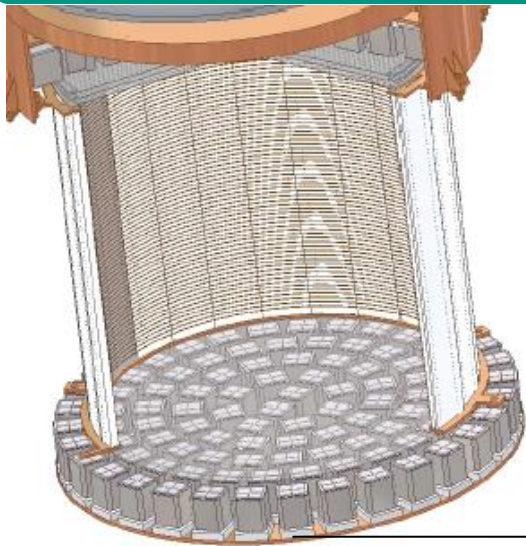


Standardfels
 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$



Suche nach Dunkler Materie

- Suche nach Dunkler Materie mit **LXe** in vier Untergrundlaboren



XMASS (Kamioka)



XENON100 (LNGS)
LUX (Sanford)

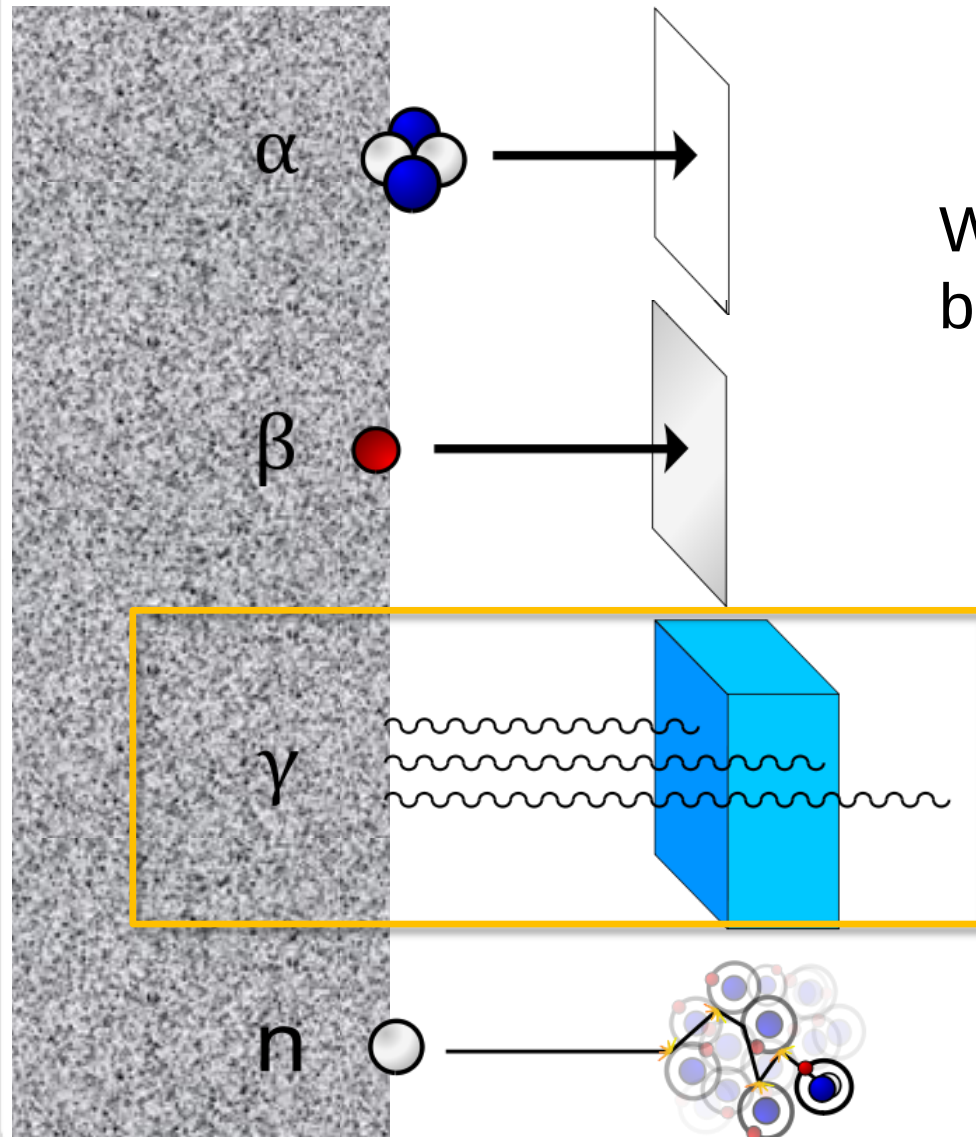


PANDAX (CJPL)

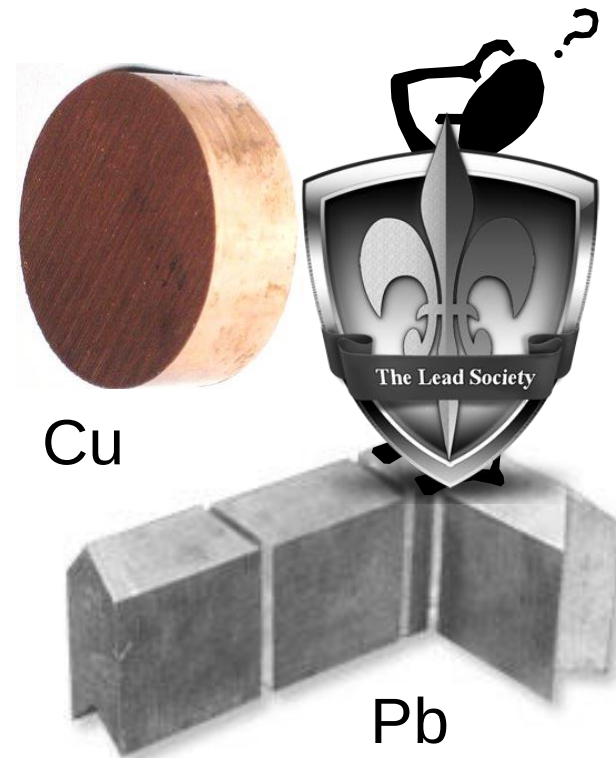


2.2.2 Abschirm-Methoden

- natürliche Radioaktivität im Gestein erzeugt: **α -Teilchen** (3-7 MeV), **β -Elektronen** (0.02 – 2 MeV), **Gammas** (< 3.6 MeV) und **Neutronen** (MeV)

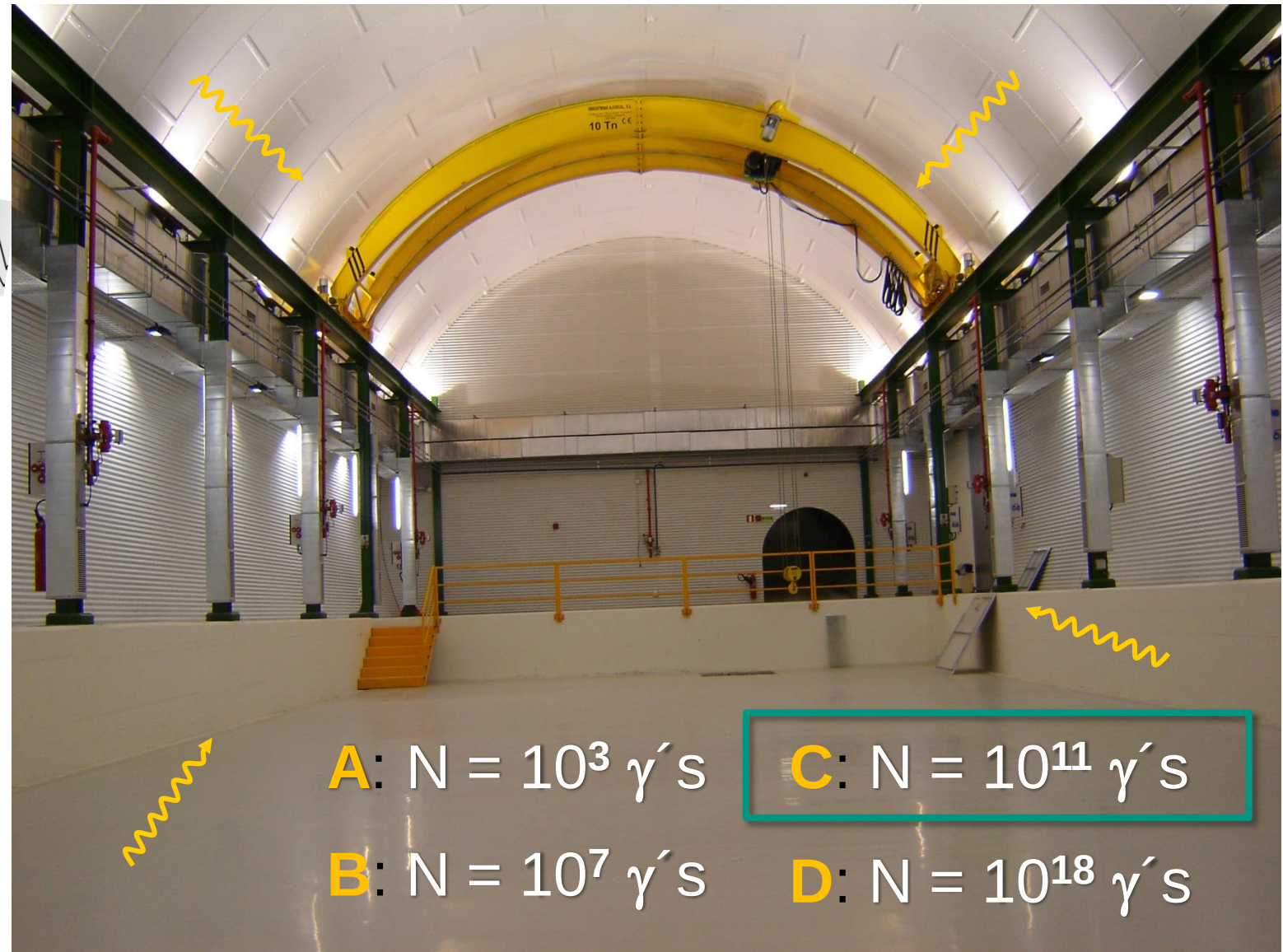
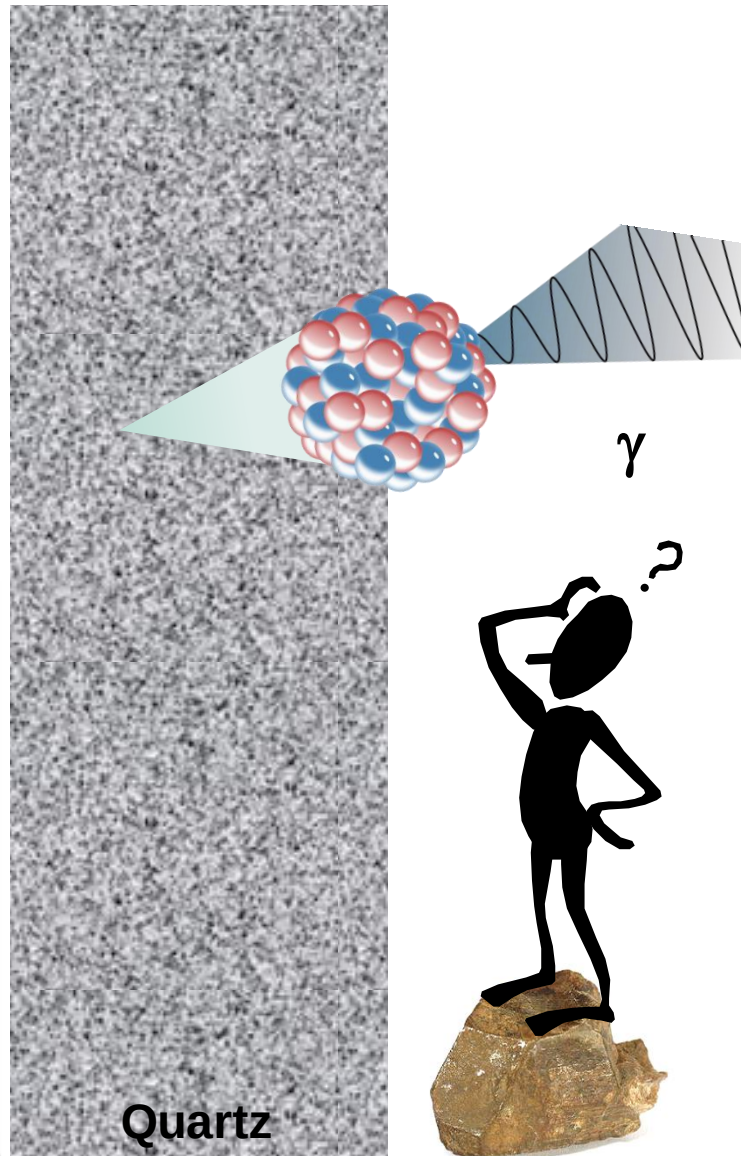


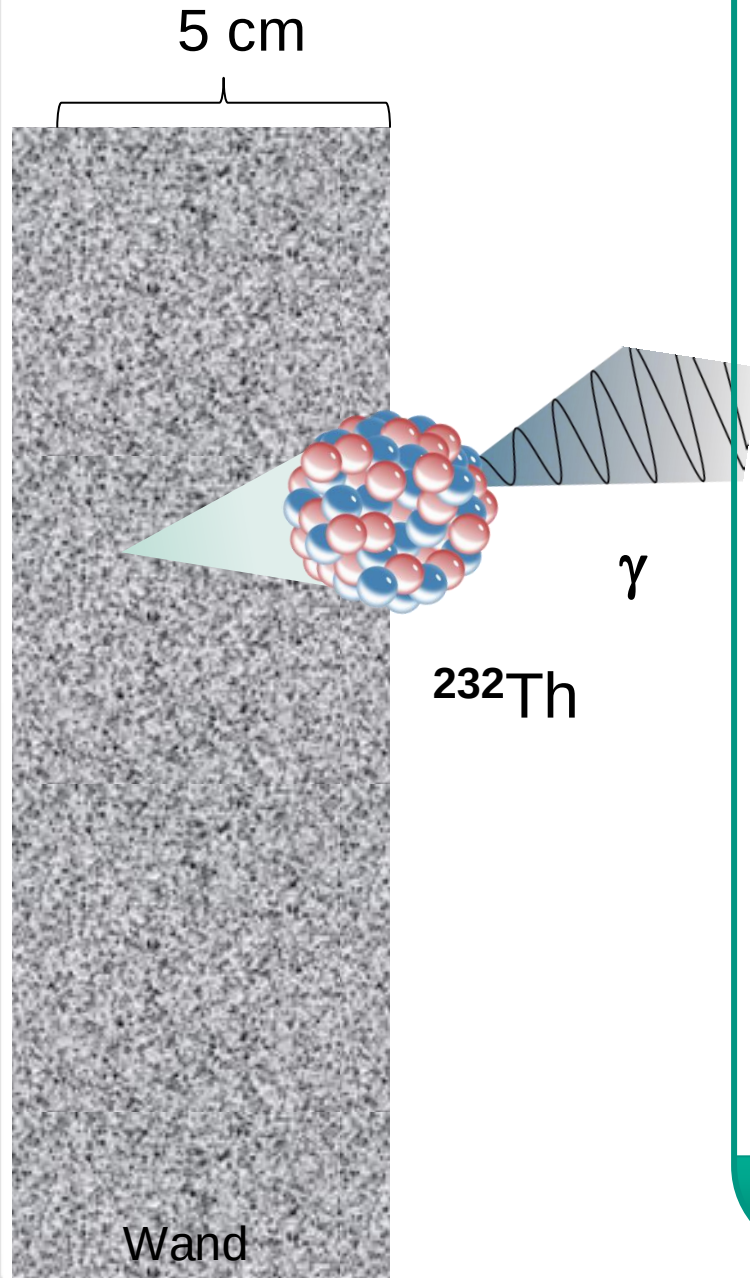
Wieviel Abschirmung benötigt der Detektor?



natürliche Radioaktivität - Gestein

- Wie viele Gammas strahlt die 600 m² Oberfläche eines Labors im Jahr ab?





■ Beispiel: Labor mit 600 m² Oberfläche:

γ's aus den ersten 5 cm der Wände

→ 30 m³ Gestein trägt zum γ-Untergrund bei

- wichtiger γ-Strahler: ²³²Th (Thorium-232)

- mit Anteil 10⁻⁶ g(Th) / g = 100 g Th

- mit $t_{1/2}(\text{}^{232}\text{Th}) = 1.4 \times 10^{10} \text{ a}$ erzeugt
1 g Th $\Rightarrow 4 \cdot 10^{10}$ Gammas / Jahr
 $\Rightarrow 1300$ Gammas / Sekunde



■ Gamma-Raumuntergrund:

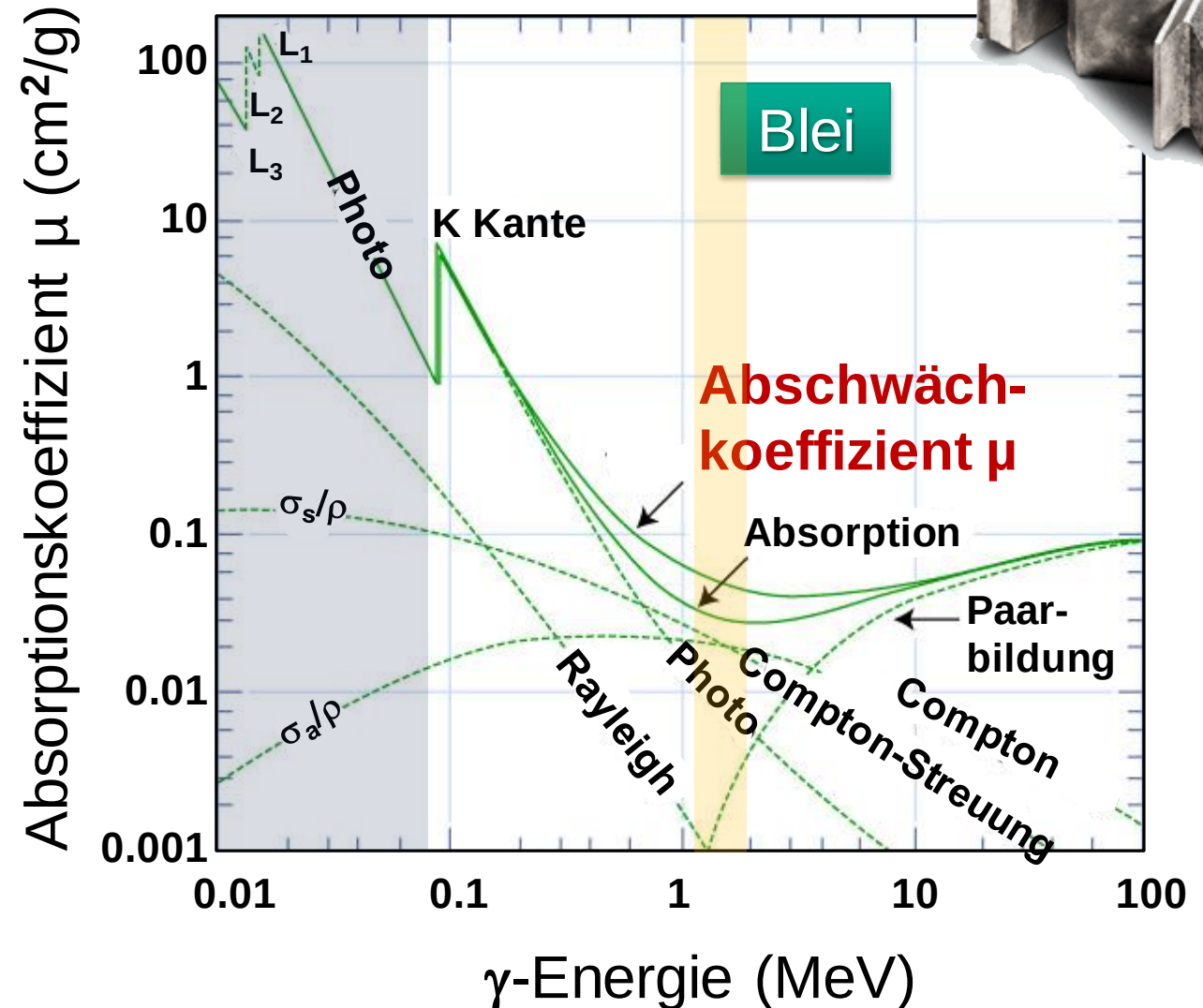
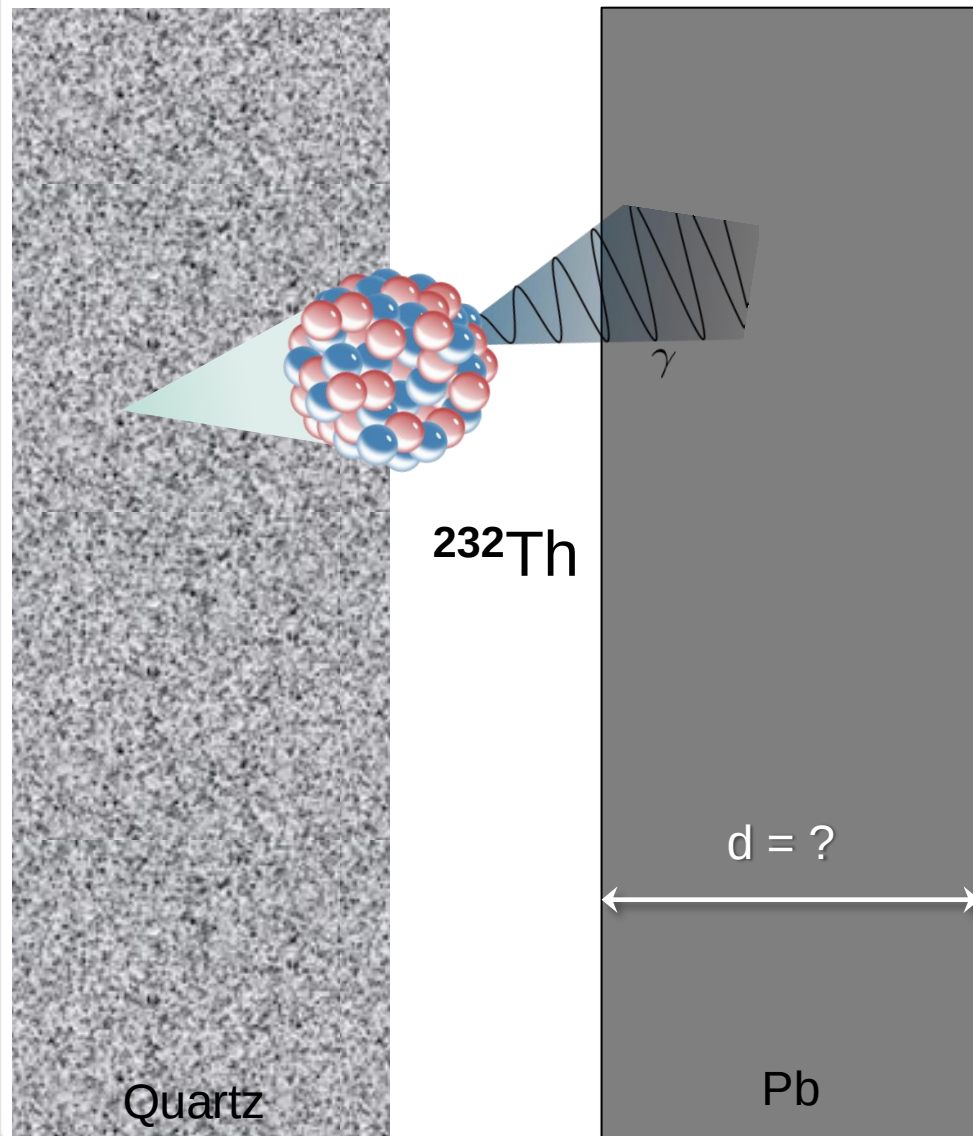
$N \sim 10^{11}$ Ereignisse / Jahr

- höchstenergetische γ's (2.6 MeV von ²⁰⁸Tl)
kommen aus der ²³⁸U/²³²Th Zerfallskette

Abschirmung des γ-Raumuntergrunds erforderlich

Abschirmwirkung von Blei

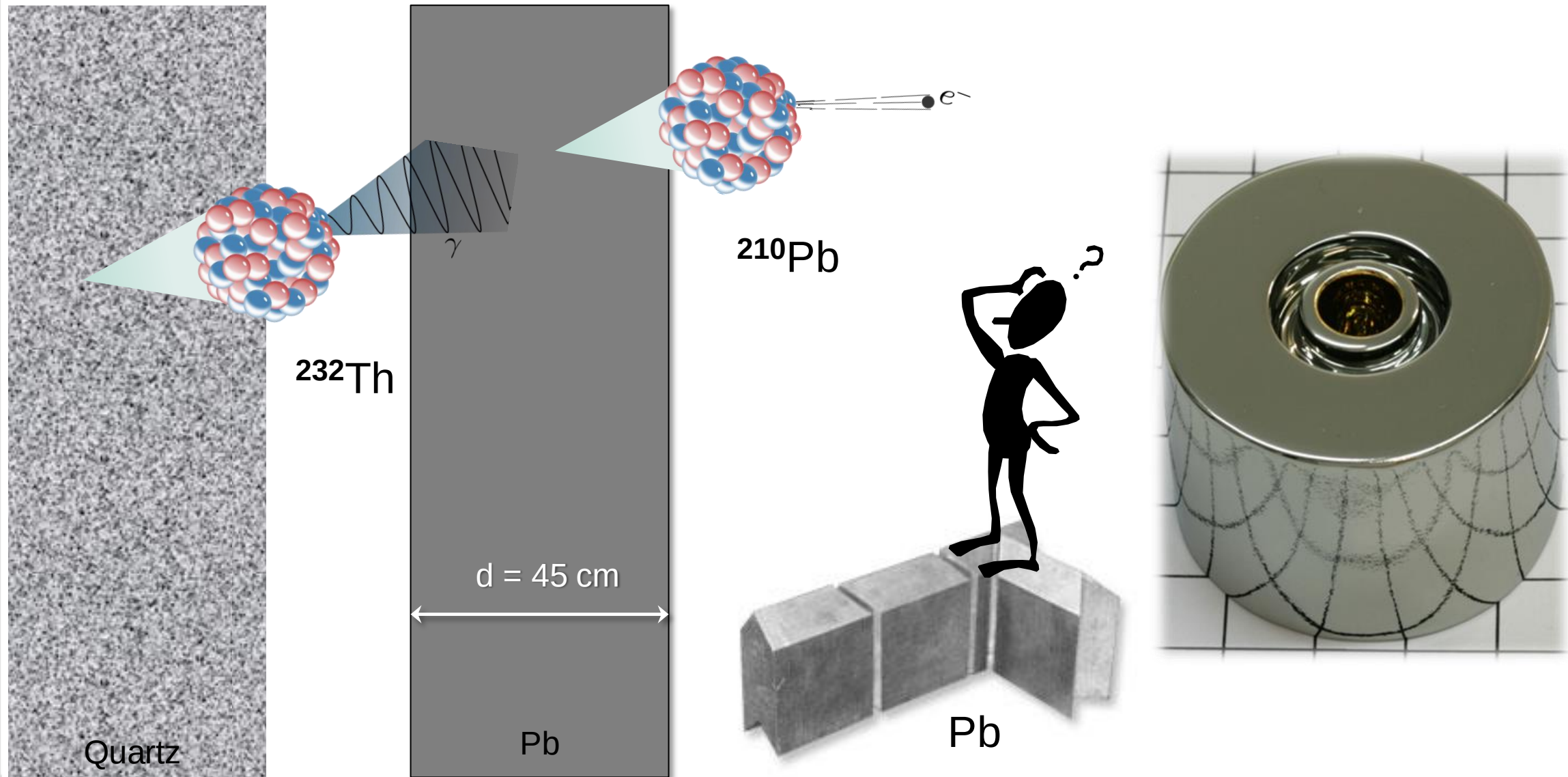
- benötigter Abschirmfaktor für ~ 1 MeV γ 's $\sim 10^9 = 20 X_0$ (X_0 : Strahlungslänge)
Abschirmung aus massivem Blei (Pb) mit $d = 0.45$ m



Blei-210 Untergrund

■ **Isotop Pb-210** entsteht aus der ^{238}U -Zerfallskette mit $t_{1/2}(^{210}\text{Pb}) = 22 \text{ a}$

⇒ Abschirmung erzeugt Untergrundsignal, dies muss abgeschirmt werden



Blei-210 Untergrund & römisches Blei

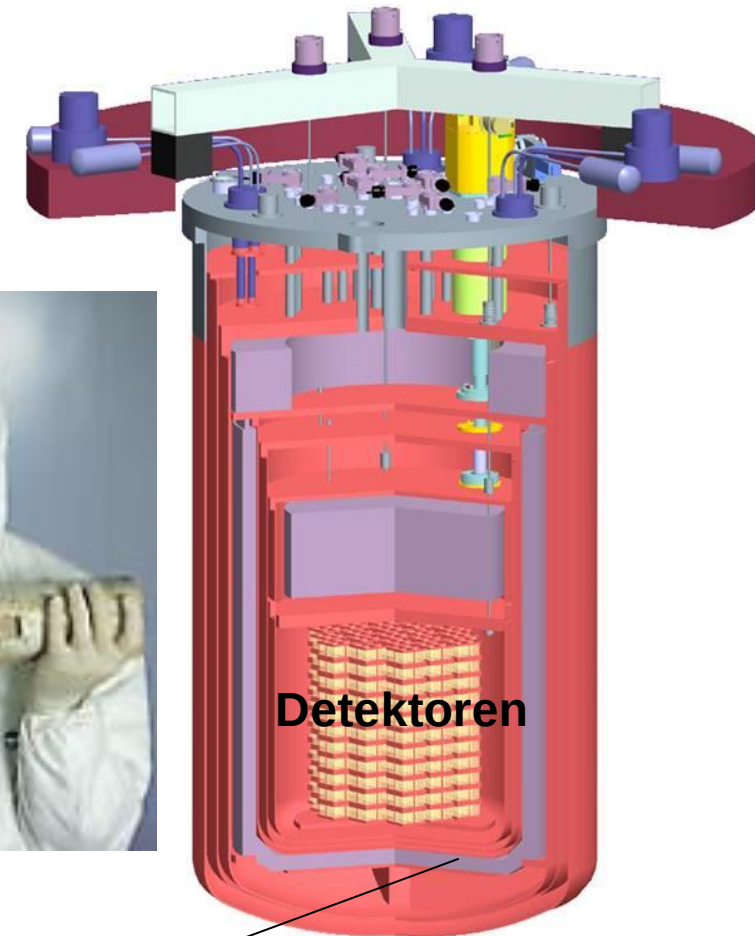
- **Isotop Pb-210** ist aus Blei-Ladungen von versunkenen römischen Galeeren zerfallen, da $\Delta T = 2000$ y (**Roman Lead**)



Taucher beim Bergen von römischem Pb aus einer 2000 Jahre alten römischen Galeere für das INFN (CUORE Exp.)



Römisches Pb

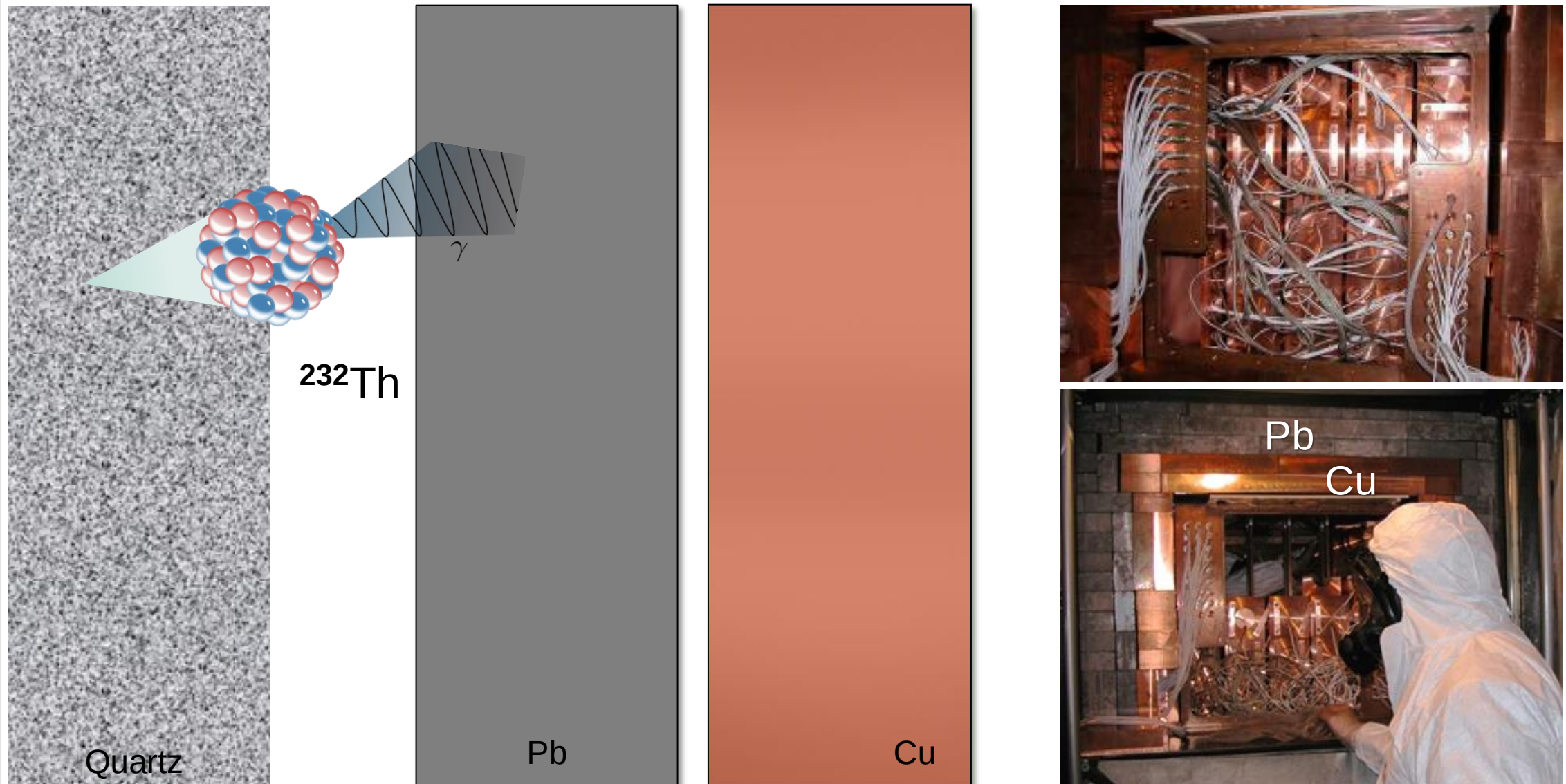


Detektoren

CUORE

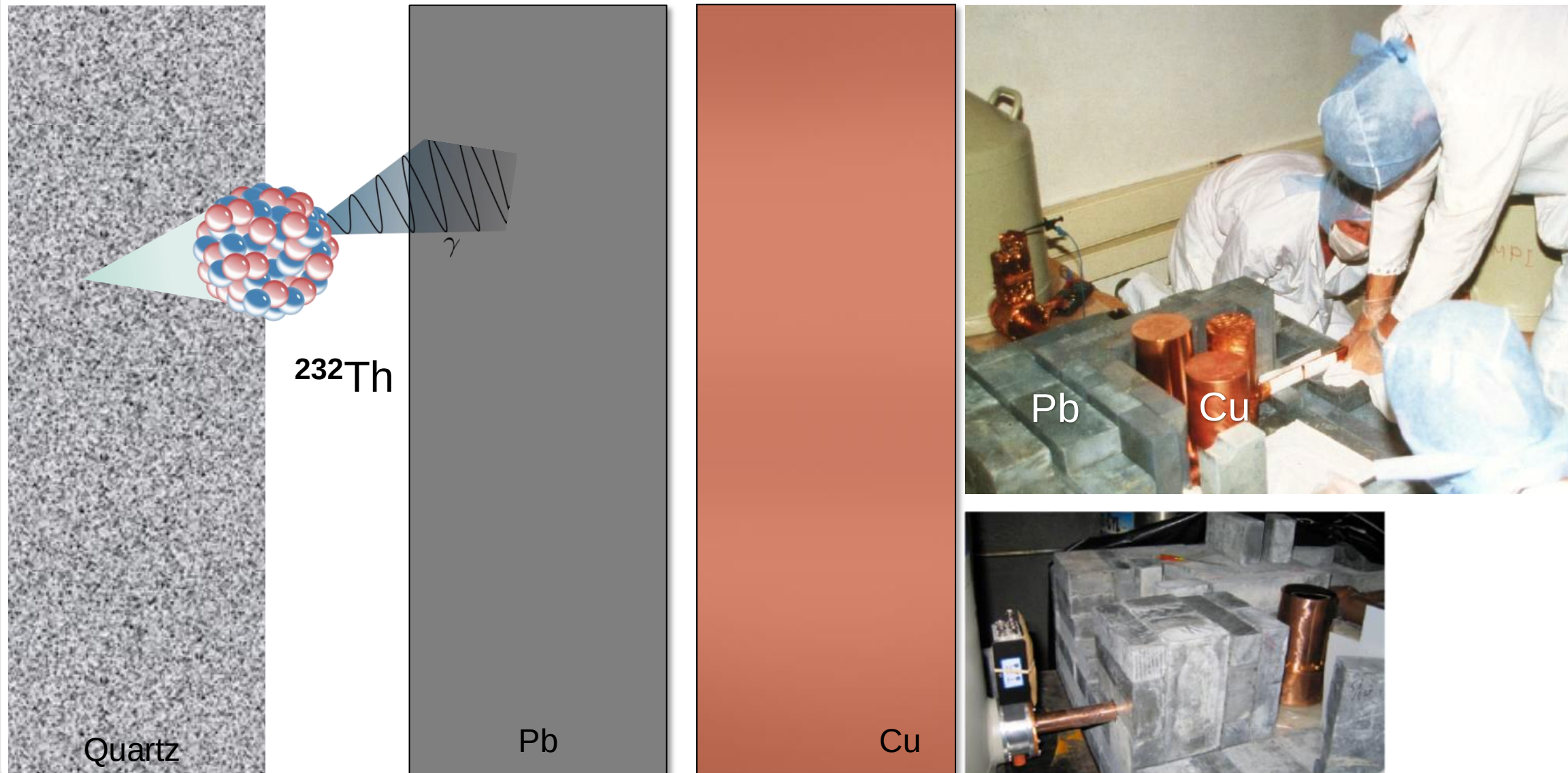
natürliche Radioaktivität - Gestein

- innere Cu-Abschirmung im **DAMA-Libra** Experiment
- Suche nach Dunkler Materie mit NaJ-Szintillatoren im LNGS



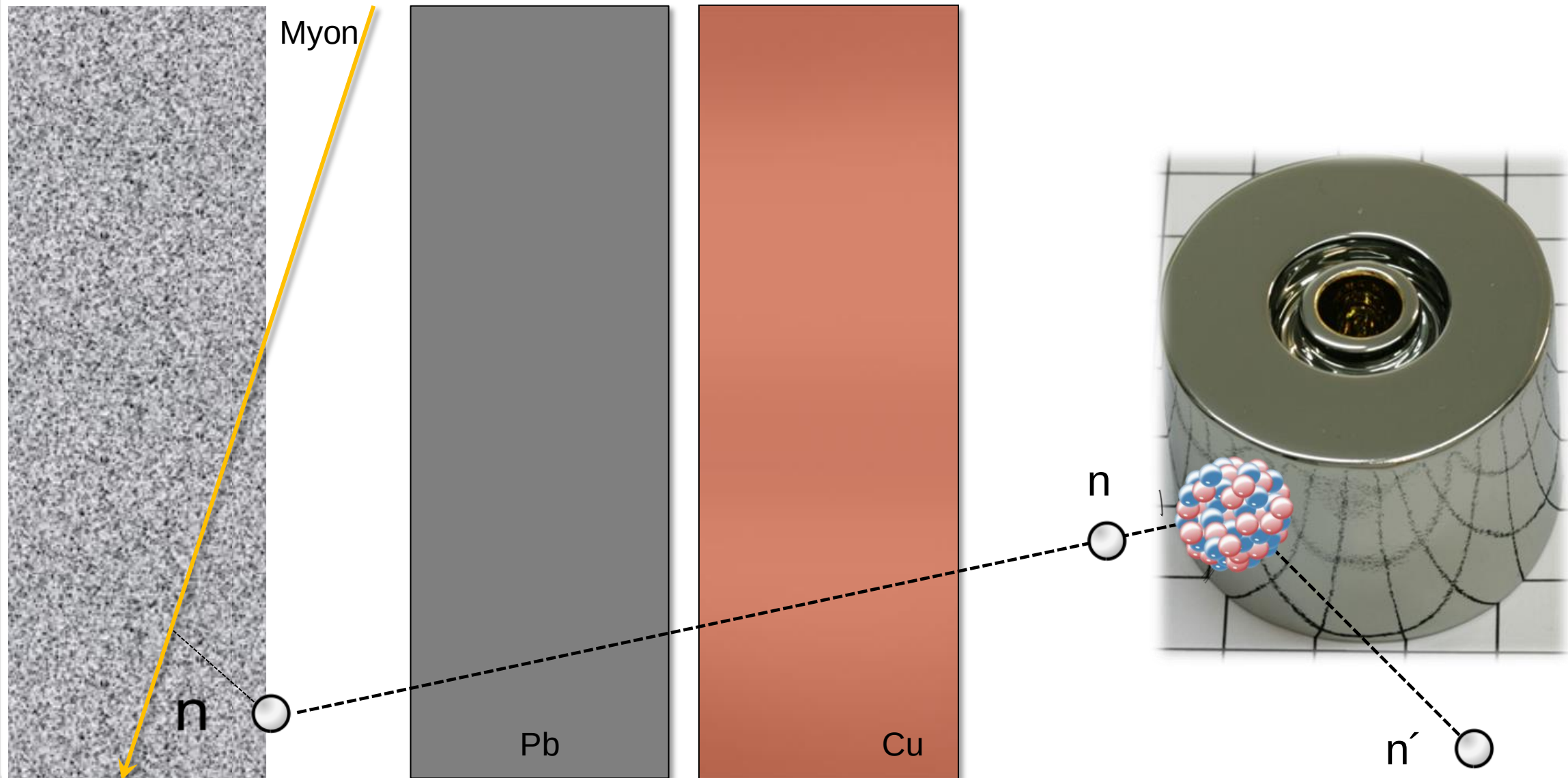
natürliche Radioaktivität - Gestein

- Pb-Abschirmung & Cu-Kryostat im **Heidelberg-Moskau** Experiment
 - Suche nach $0\nu\beta\beta$ -Zerfällen mit ^{76}Ge -Dioden im LNGS



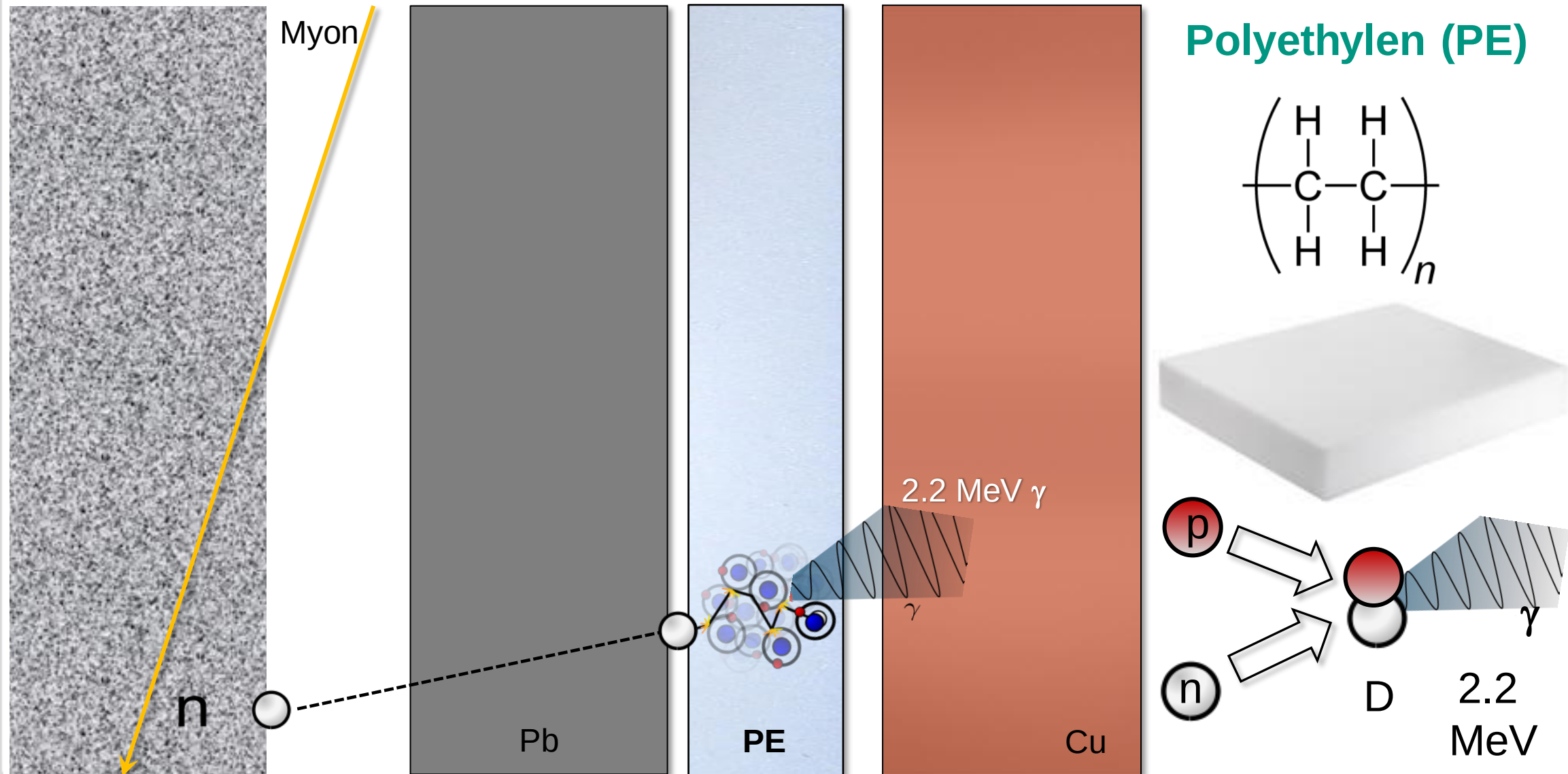
Myon-induzierte Radioaktivität - Gestein

- Myonen können durch tief-inelastische Streuprozesse im Gestein **hochenergetische Neutronen** erzeugen, die die Abschirmung durchdringen



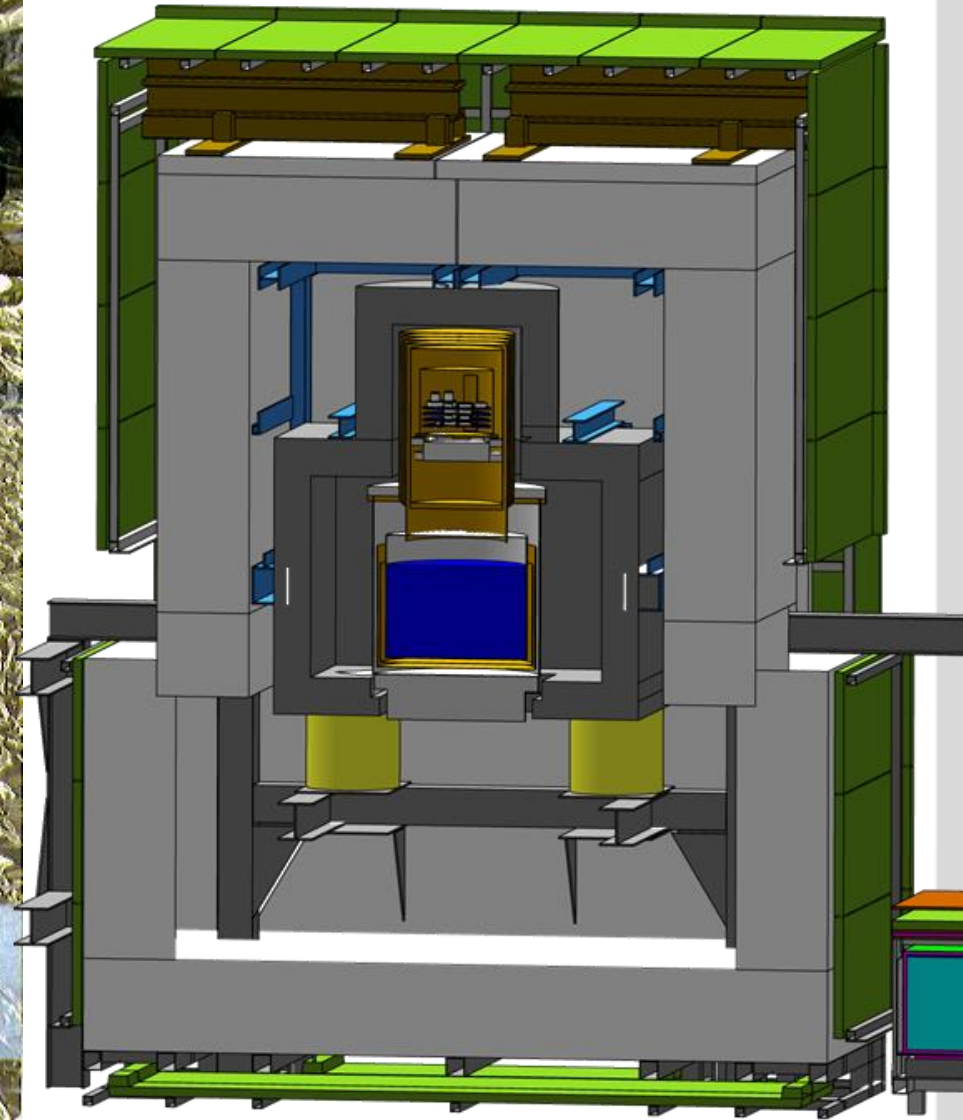
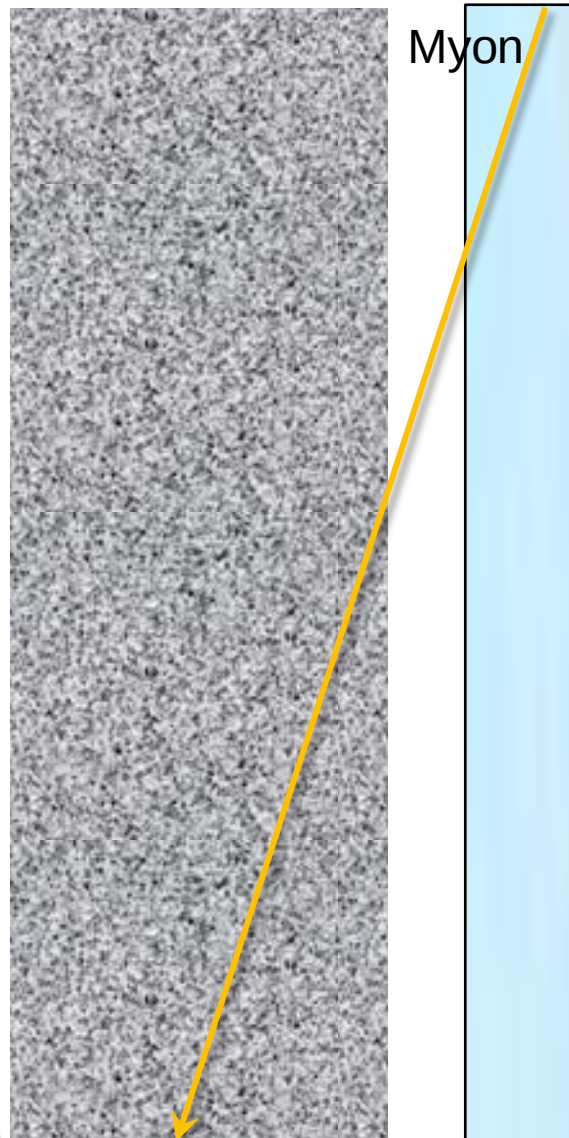
Moderation von Neutronen durch PE

- Zum **Abbremsen von hochenergetischen Neutronen** werden H-reiche Materialien benutzt (elastischer Stoß von Neutronen und Protonen)



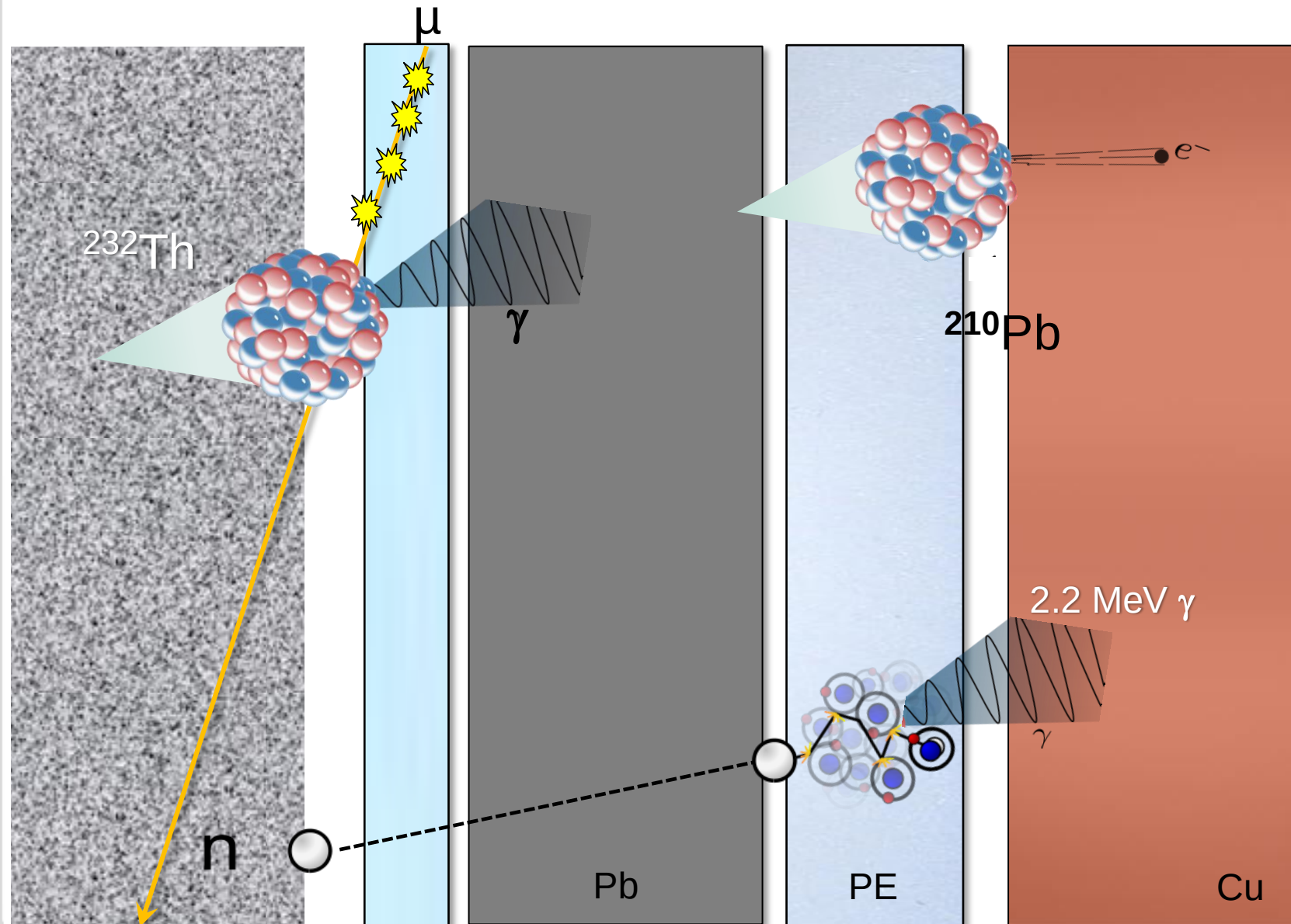
Aufbau eines Vetozähler

- Anordnung der Szintillator-Module in einer 4π Geometrie um die Veto-Effizienz zu maximieren



Aktive und passive Abschirmung

■ Optimale Kombination von aktiver und passiver Abschirmung



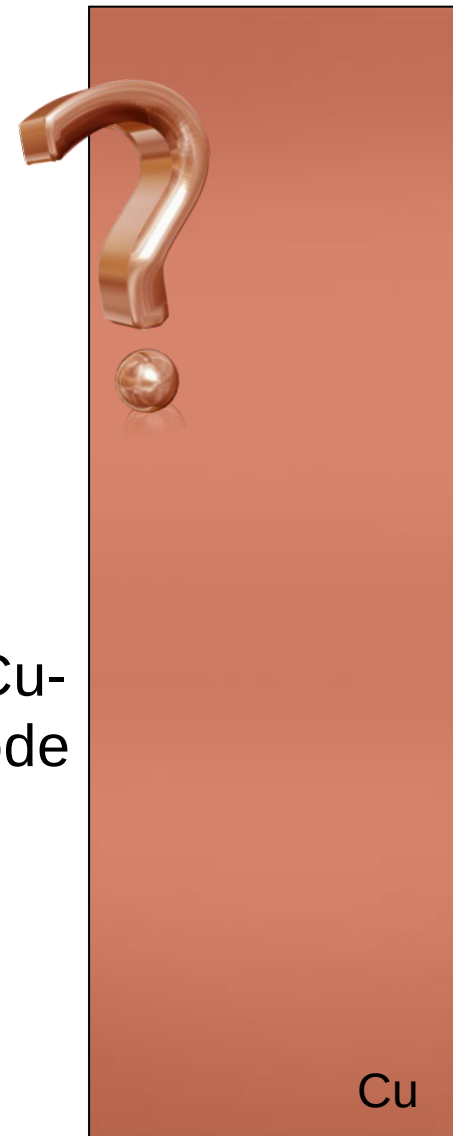
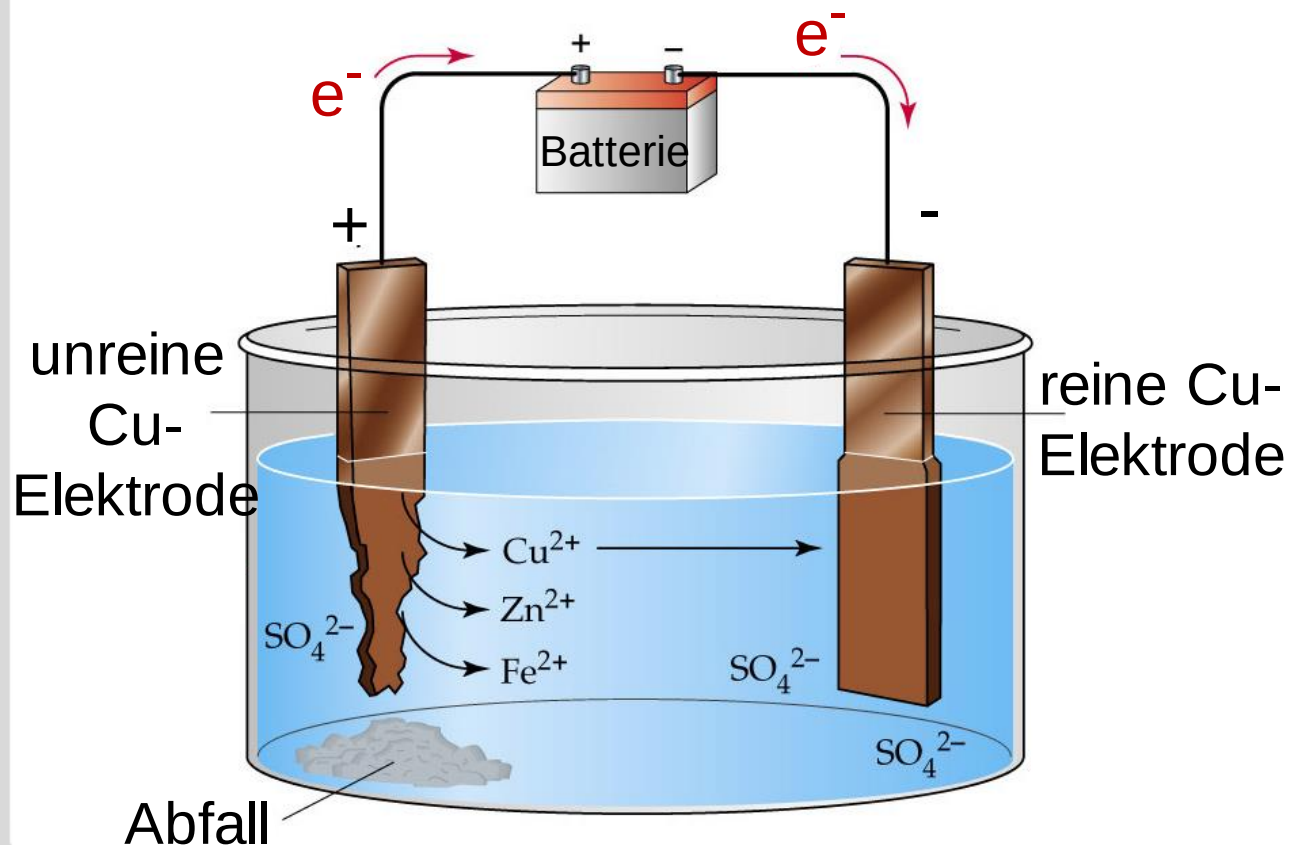
Aktive und passive Abschirmung

■ Extrem untergrundarme Materialien für Astroteilchenphysik

- Detektor, innere Cu-Abschirmung (elektrolytisch, OFC)

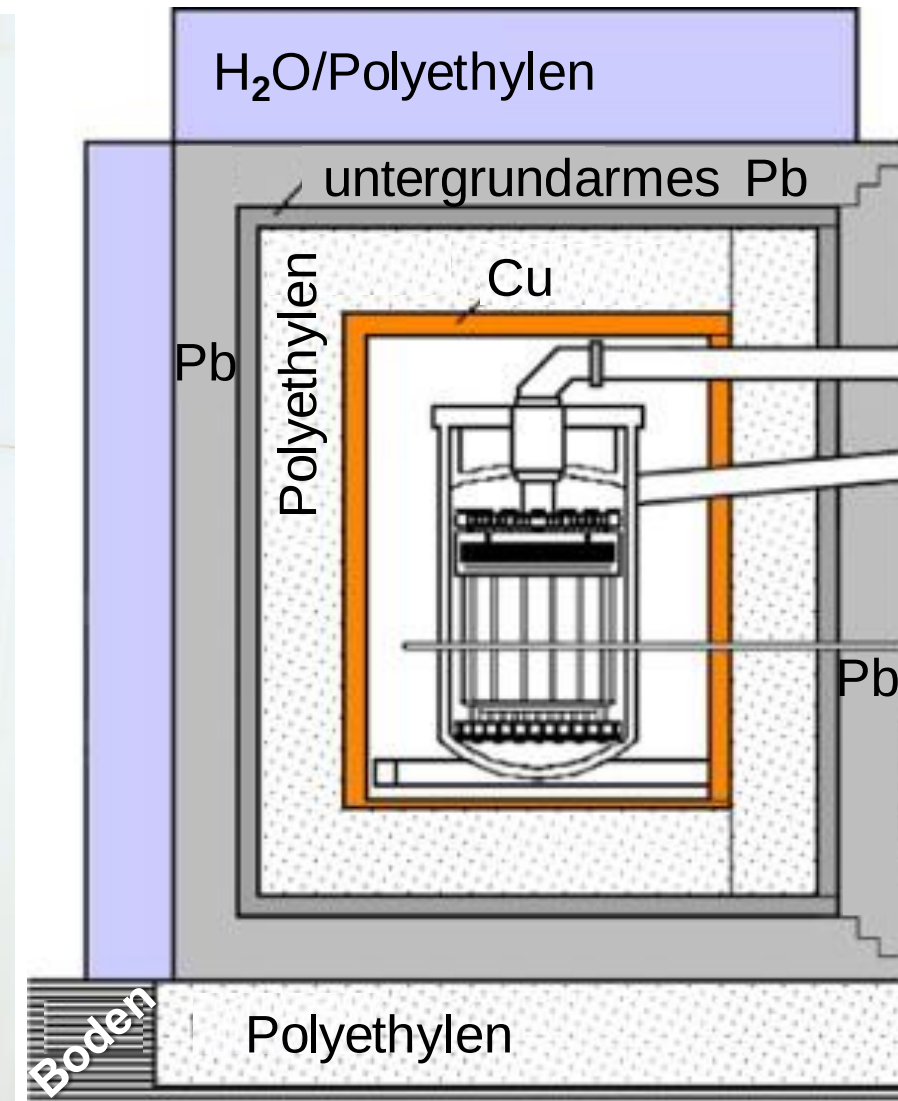
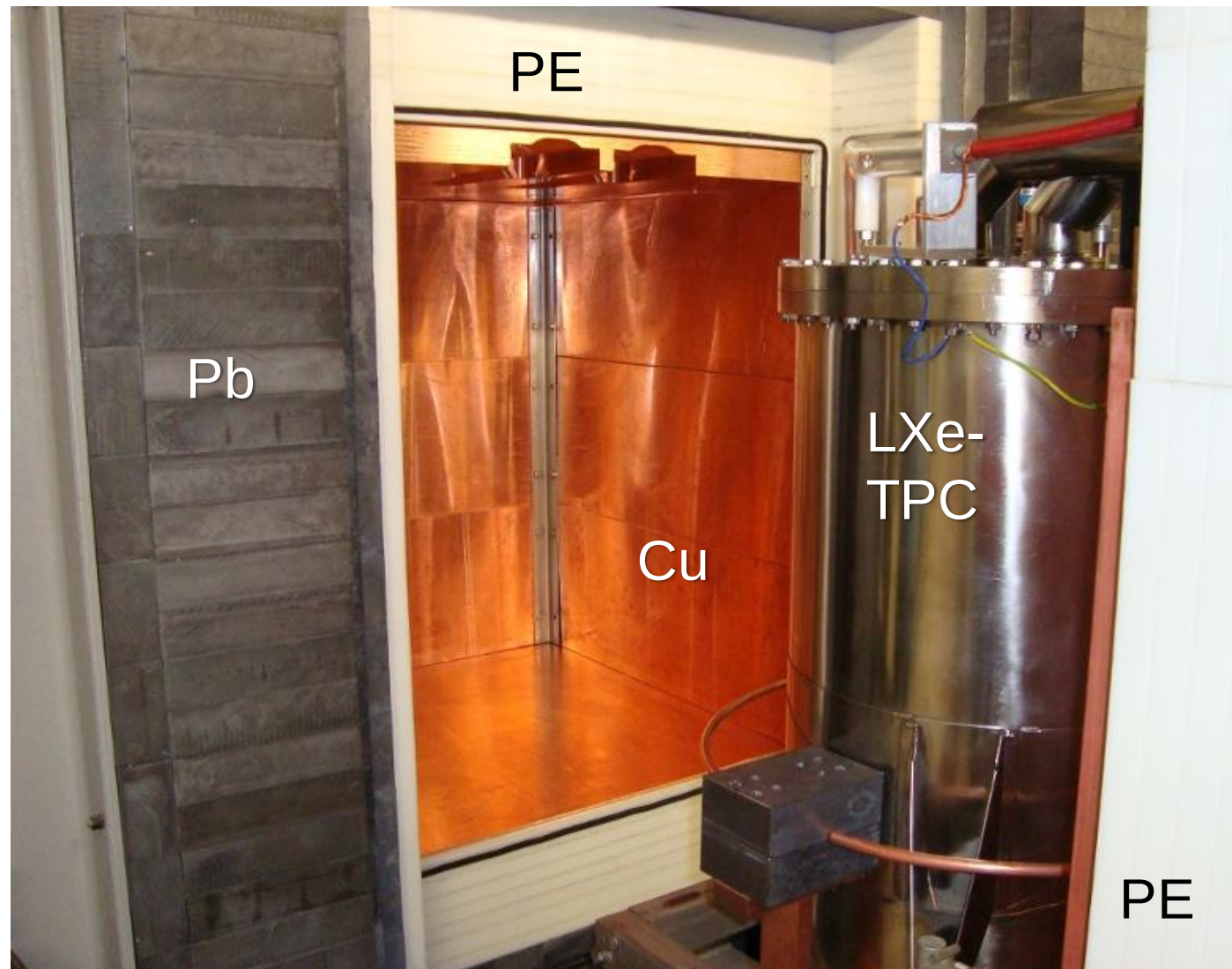
~100 nBq/kg für die Suche nach

- dunkler Materie
- $0\nu\beta\beta$ -Zerfall (Neutrino-Physik)

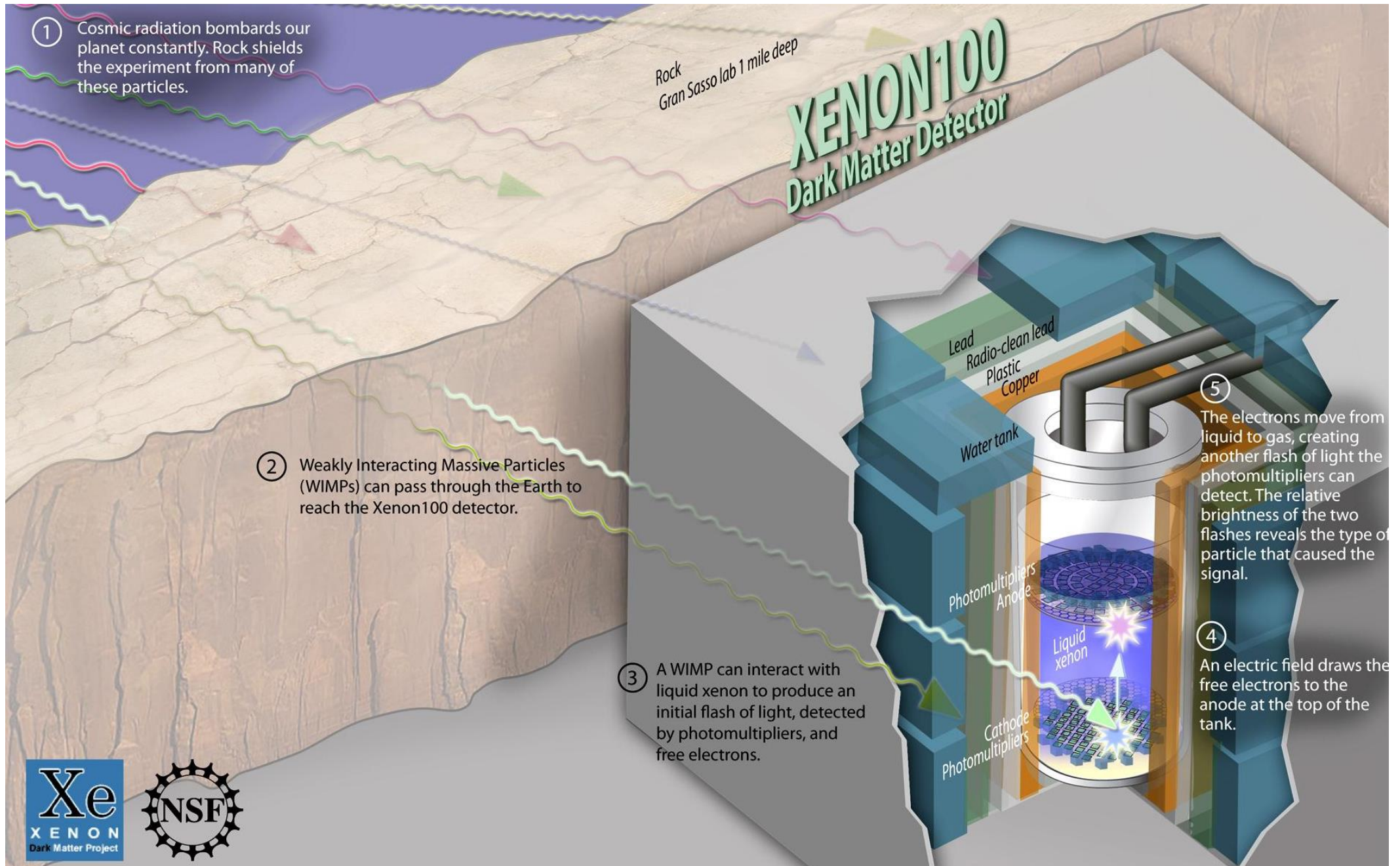


Abschirmung – Beispiel XENON100

- Pb-Abschirmung & Cu-Abschirmung im **XENON100** Experiment
 - Suche nach WIMP-Streuprozessen mit Xe-TPC im LNGS

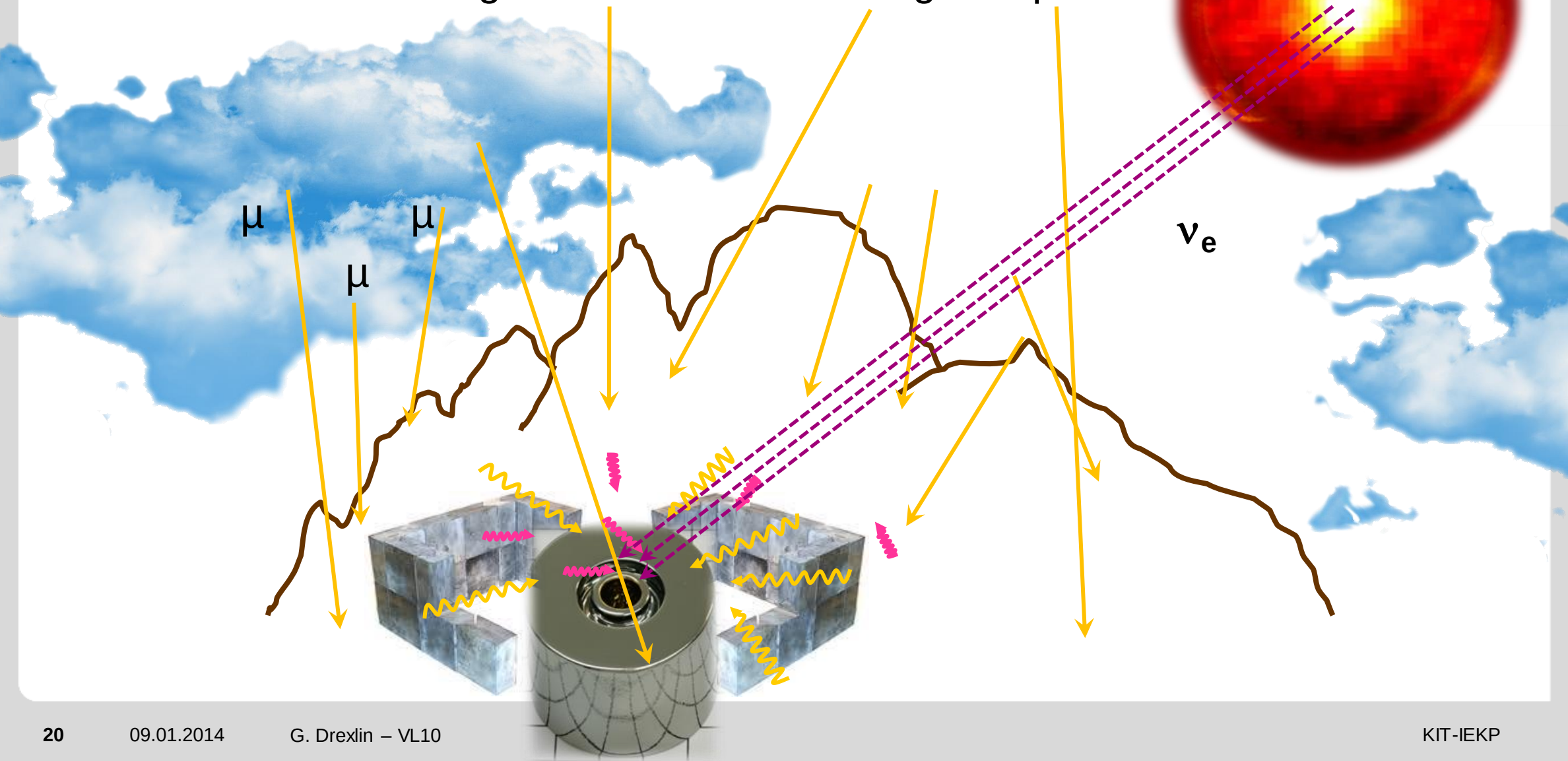


Untergrundreduktion – XENON100



Untergrundreduktion – Grenze

- **Solare Neutrinos:** extrem kleine Wechselwirkungsrate
 - sind für aktuelle Suche nach seltenen Ereignissen mit Massen $M \sim 100$ kg keine relevante Untergrundquelle



Untergrundreduktion – Grenze

■ Solare Neutrinos: wie dick müsste Pb-Abschirmung sein?

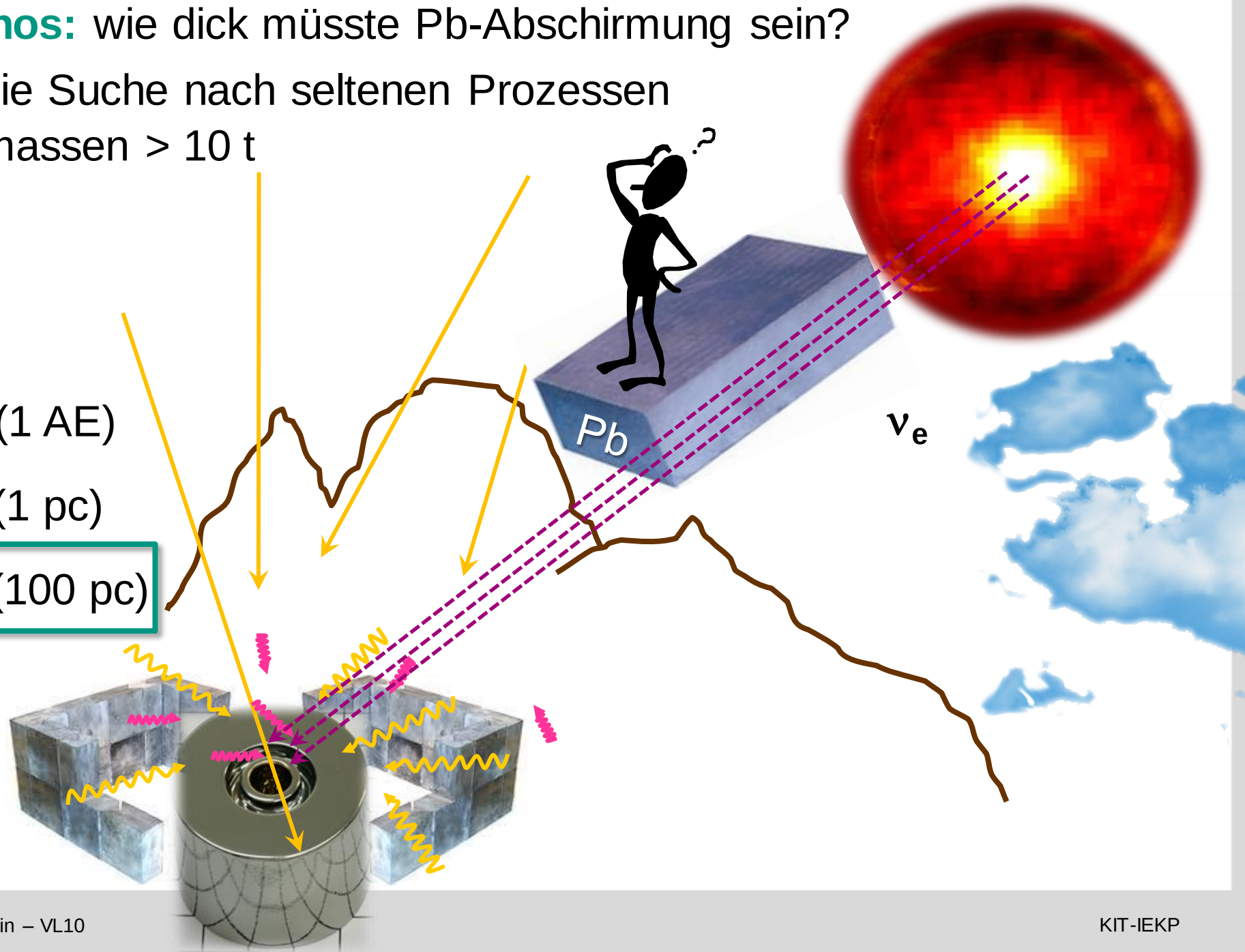
- limitieren die Suche nach seltenen Prozessen bei Targetmassen > 10 t

A: 10^2 km

B: 10^8 km (1 AE)

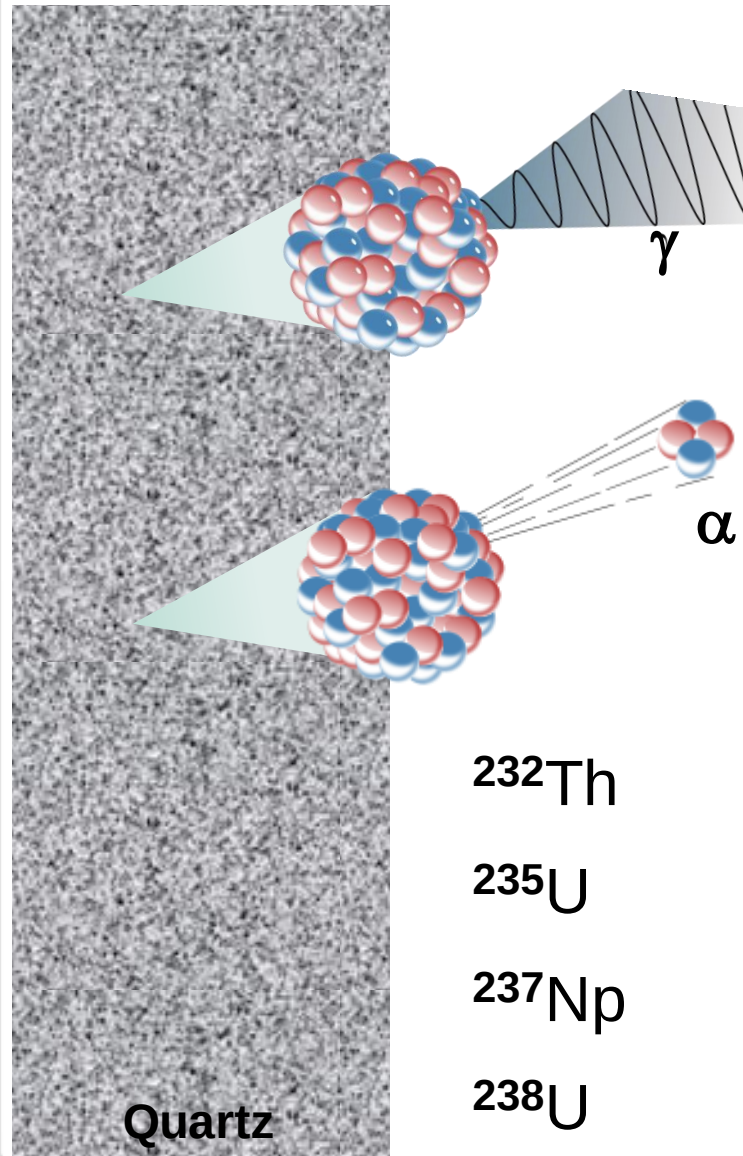
C: 10^{14} km (1 pc)

D: 10^{16} km (100 pc)



2.2.3 Zerfallsketten

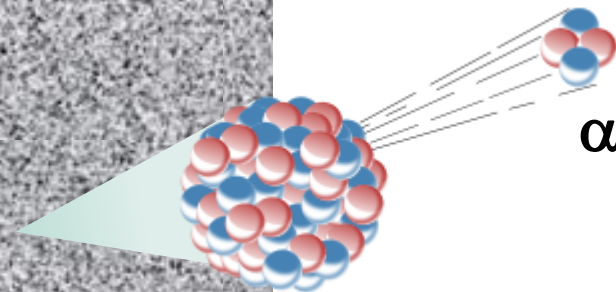
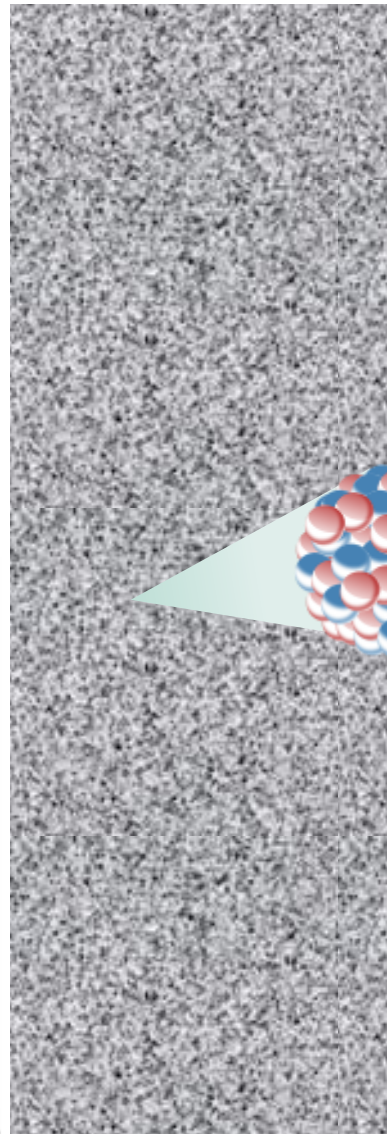
■ Woher kommen die radioaktiven Isotope im Gestein?



■ Radioaktive schwere Elemente

gebildet in Kernkollaps-SN-Explosionen

- schwere (instabile) Elemente aus dem r-Prozess bei SNaE (vgl. ATP II) in solarem Nebel
- Anreicherung in der Erdkruste

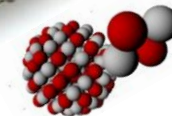
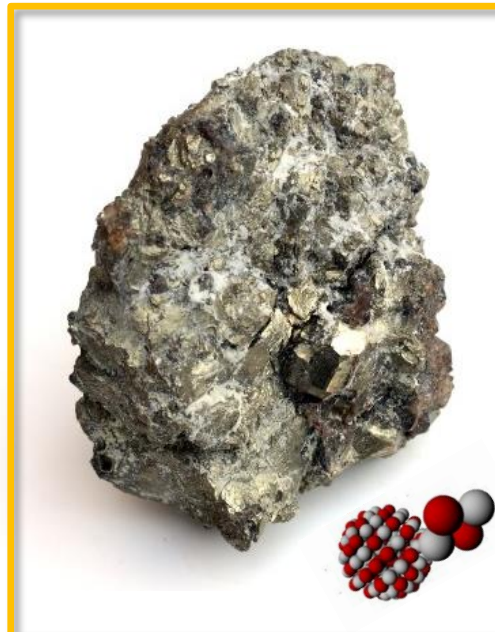


^{232}Th

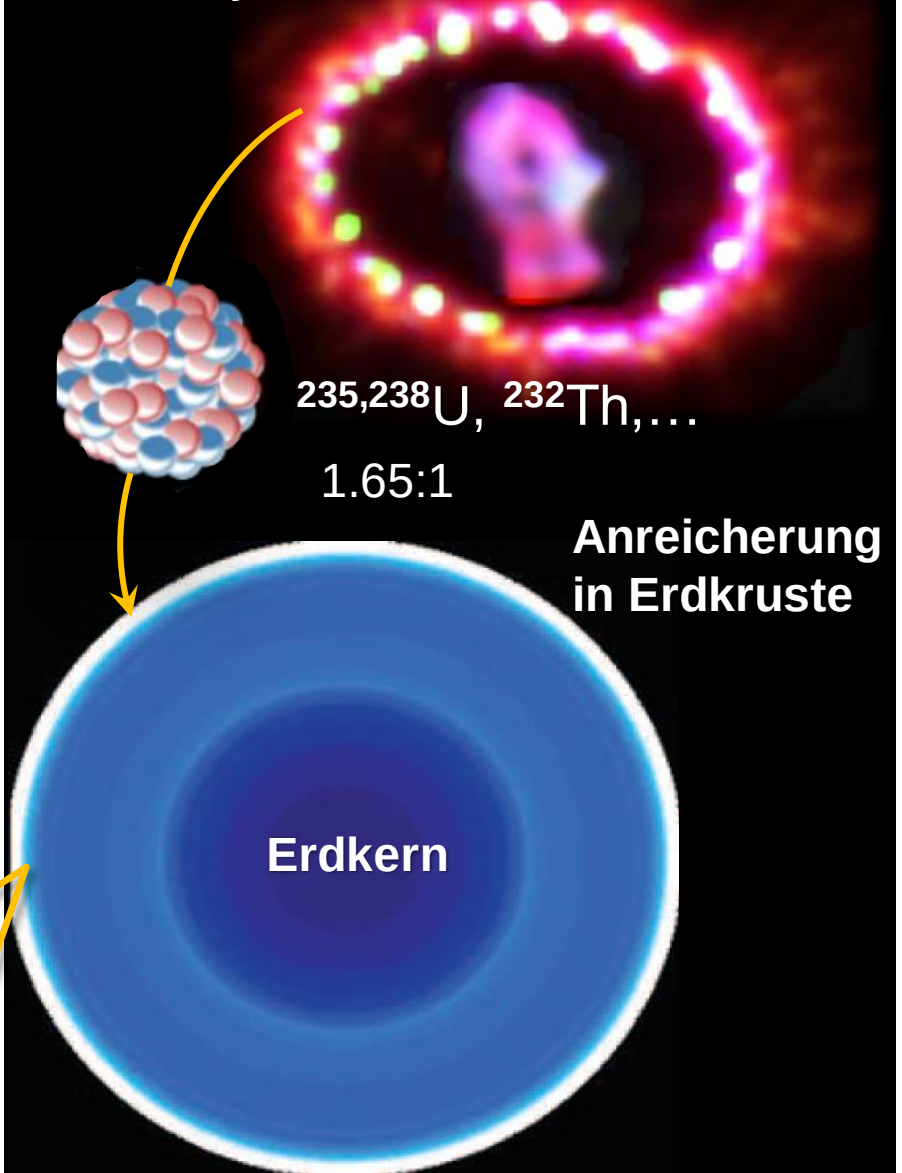
^{235}U

^{237}Np

^{238}U



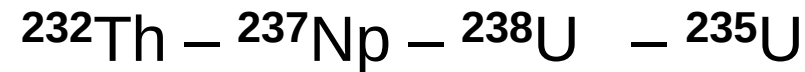
SN Explosionen vor/nach Bildung des Sonnensystems



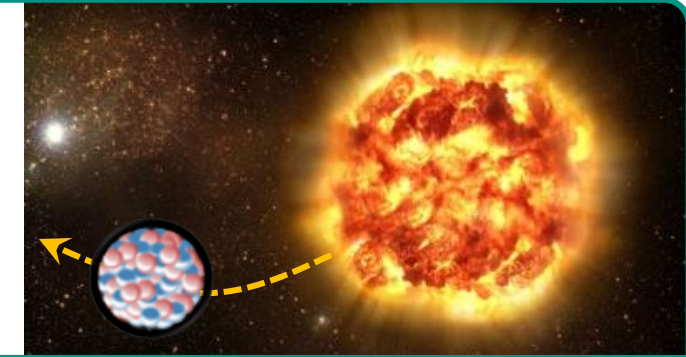
Primordiale Zerfallsketten

■ die vier 'primordialen' Zerfallsketten

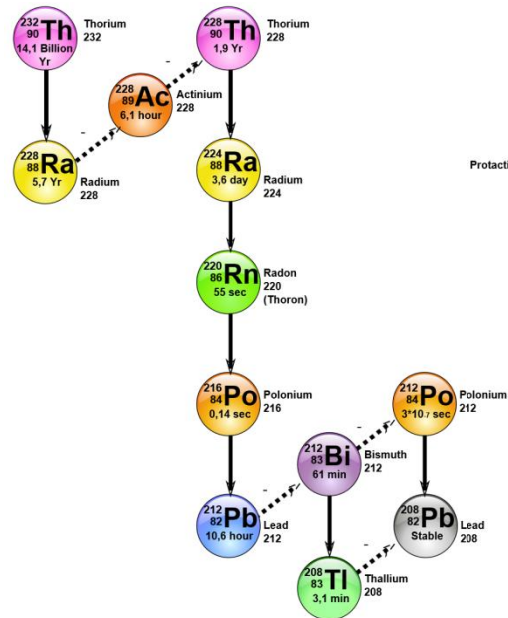
- langlebige Mutterisotope: $10^6 - 10^{10}$ a



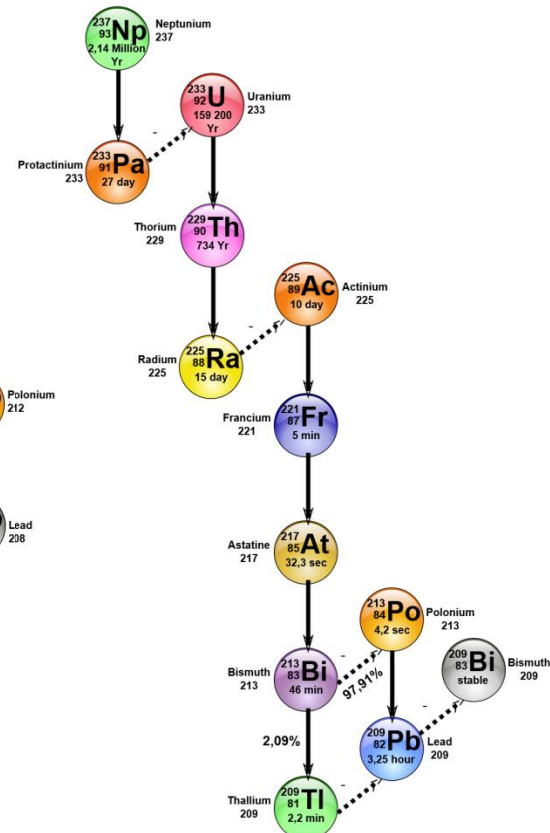
- stabile End-Isotope: $^{208}\text{Pb} - ^{209}\text{Bi} - ^{206}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}$



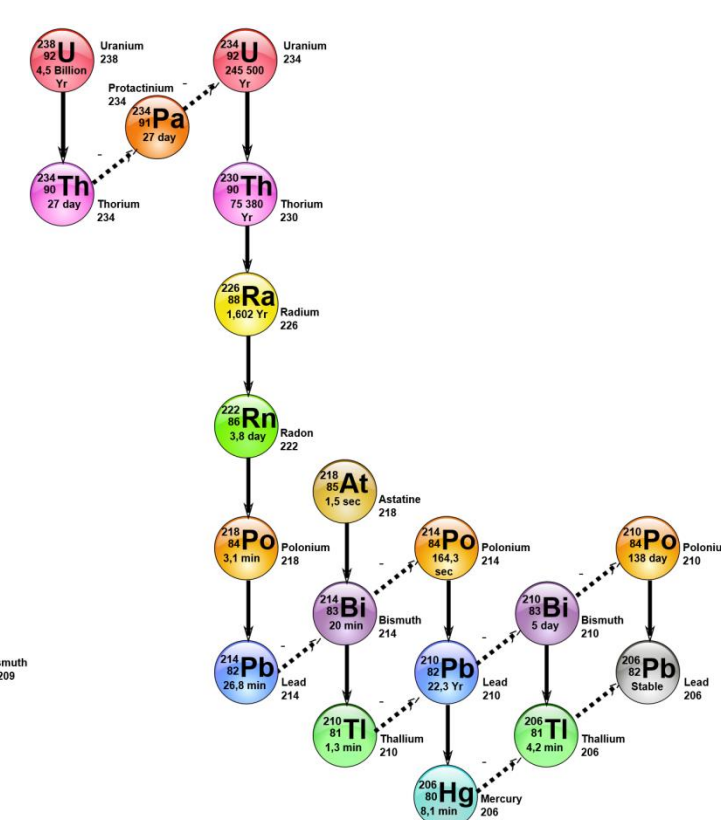
Thorium-Reihe



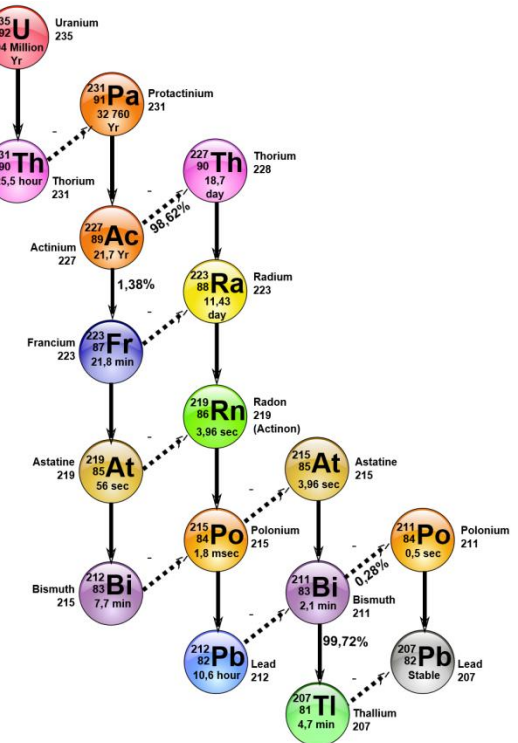
Neptunium-Reihe



Uran-238-Reihe



Aktiniden(U-235)-Reihe



■ radioaktive Zerfallskette:

durch den Zerfall eines Ausgangsisotops (^{235}U) werden radioaktive Tochterkerne erzeugt, die ihrerseits wieder zerfallen (**Ende: stabiles Isotop**)

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1$$

Zerfall Mutterkern

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

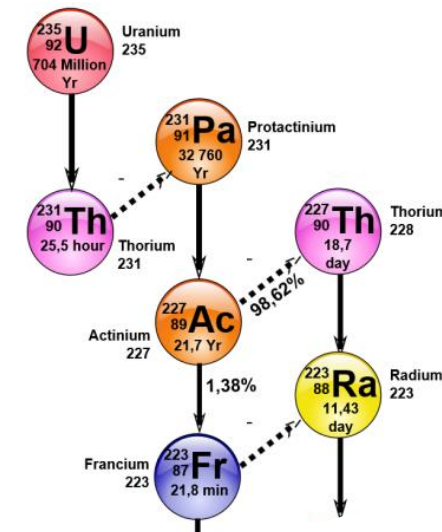
Erzeugung Tochterkern & Zerfall Tochterkern

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 \cdot N_2 - \lambda_3 \cdot N_3$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

■ säkulares Gleichgewicht:

Aktivität A_i aller Isotope der Kette ist identisch
& die Häufigkeit N_i der Isotope ist konstant



Aktiniden-Reihe

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt}$$

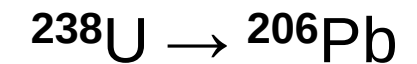
$$A_1 = A_2 = A_3$$

$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 = \lambda_3 \cdot N_3$$

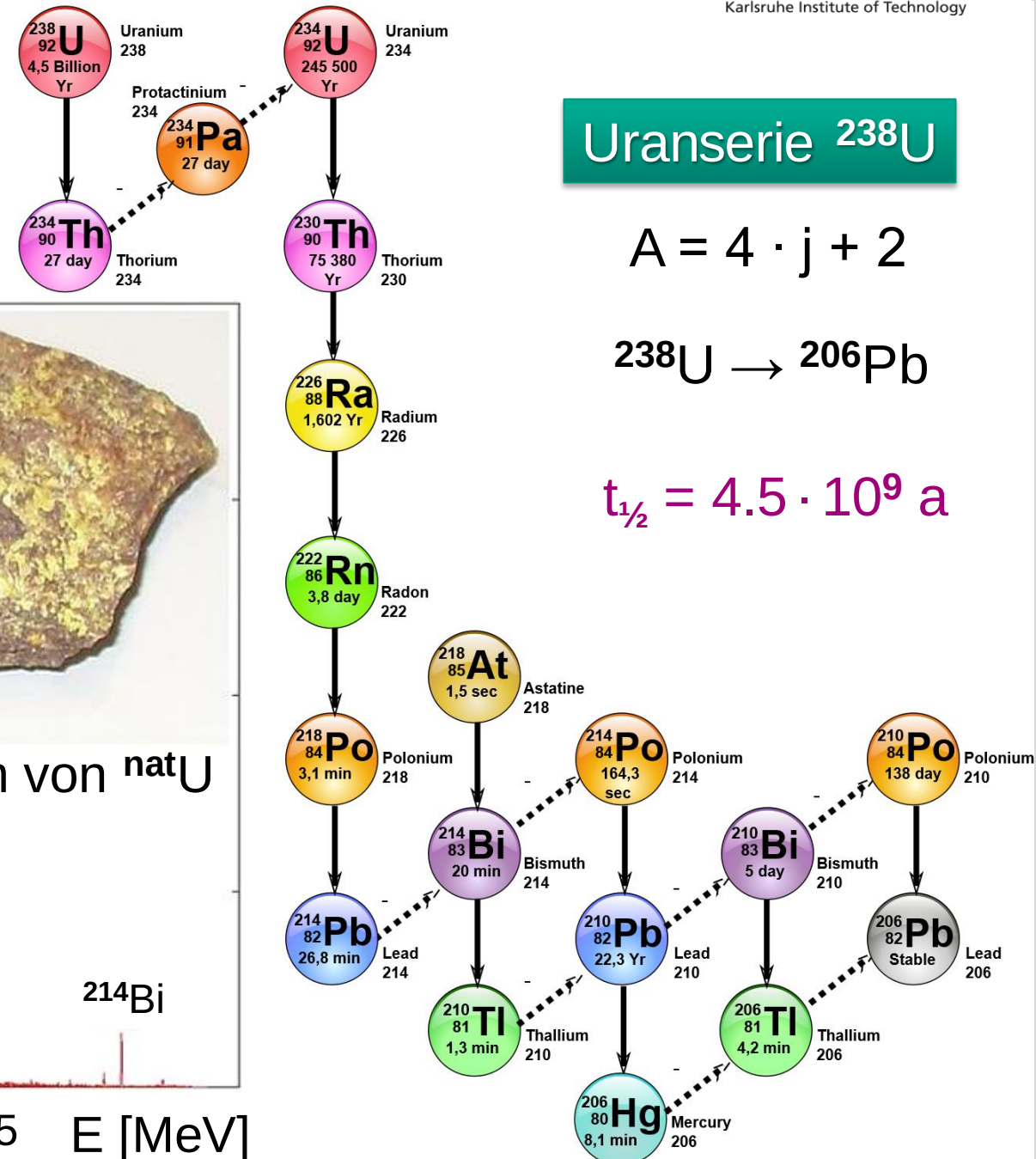
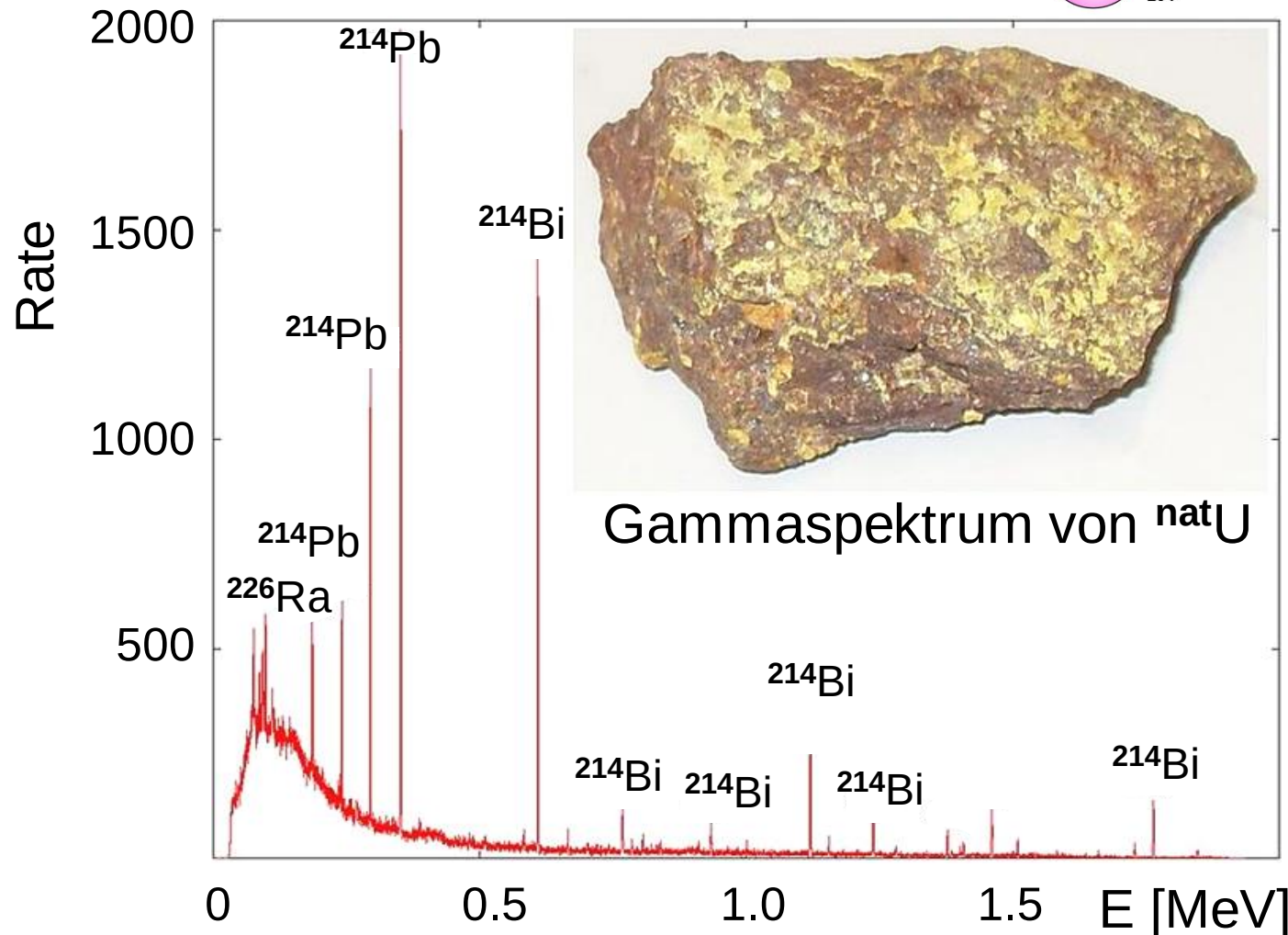
Zerfallskette von Uran-238

Uranserie ^{238}U

$$A = 4 \cdot j + 2$$



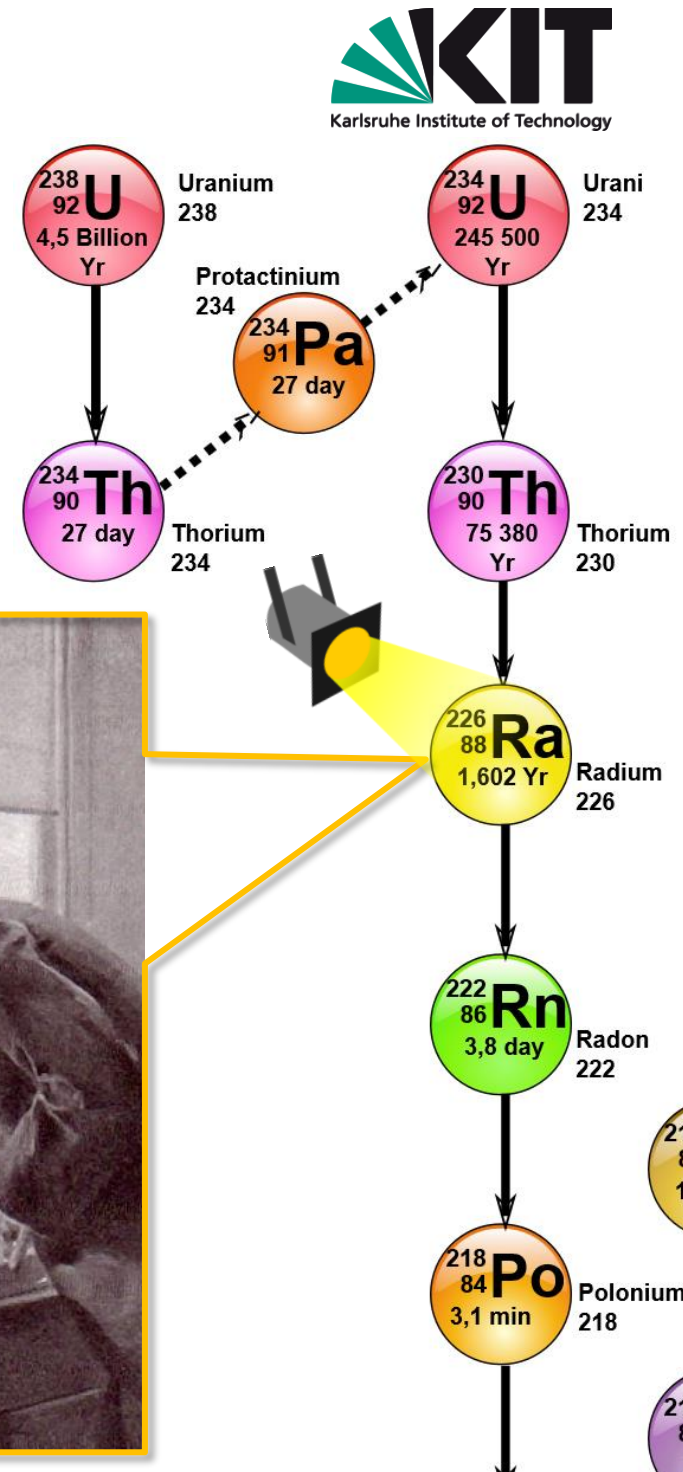
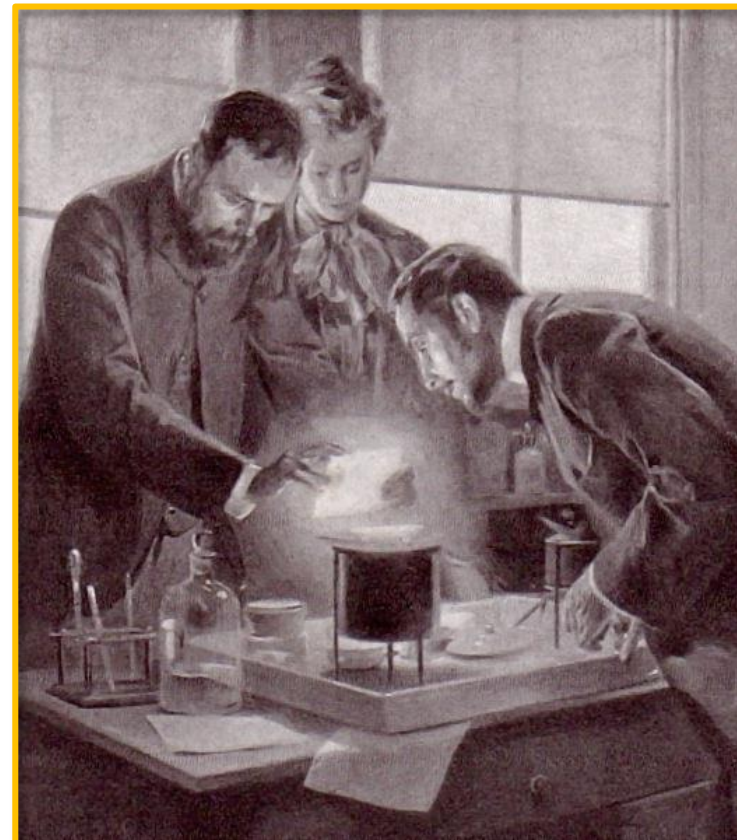
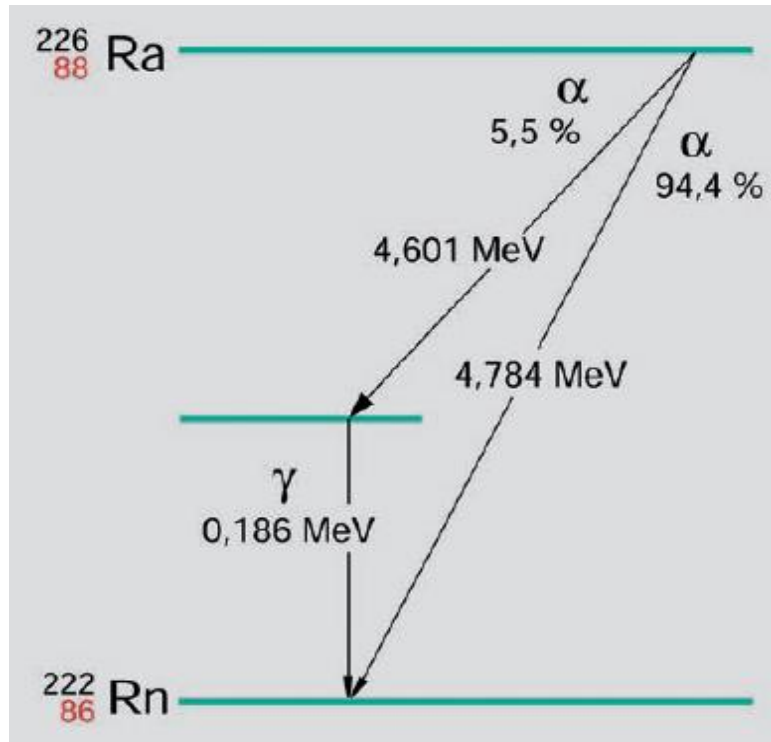
$$t_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9 \text{ a}$$



Radium-226: Entdeckung

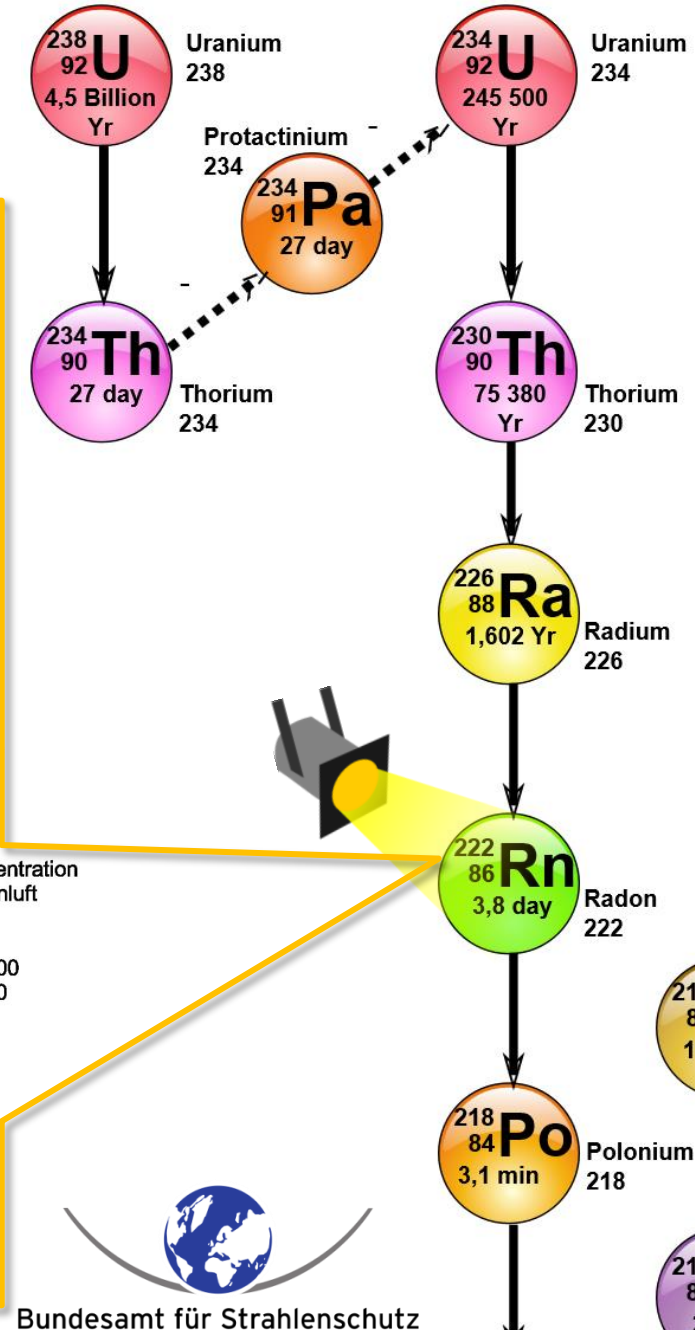
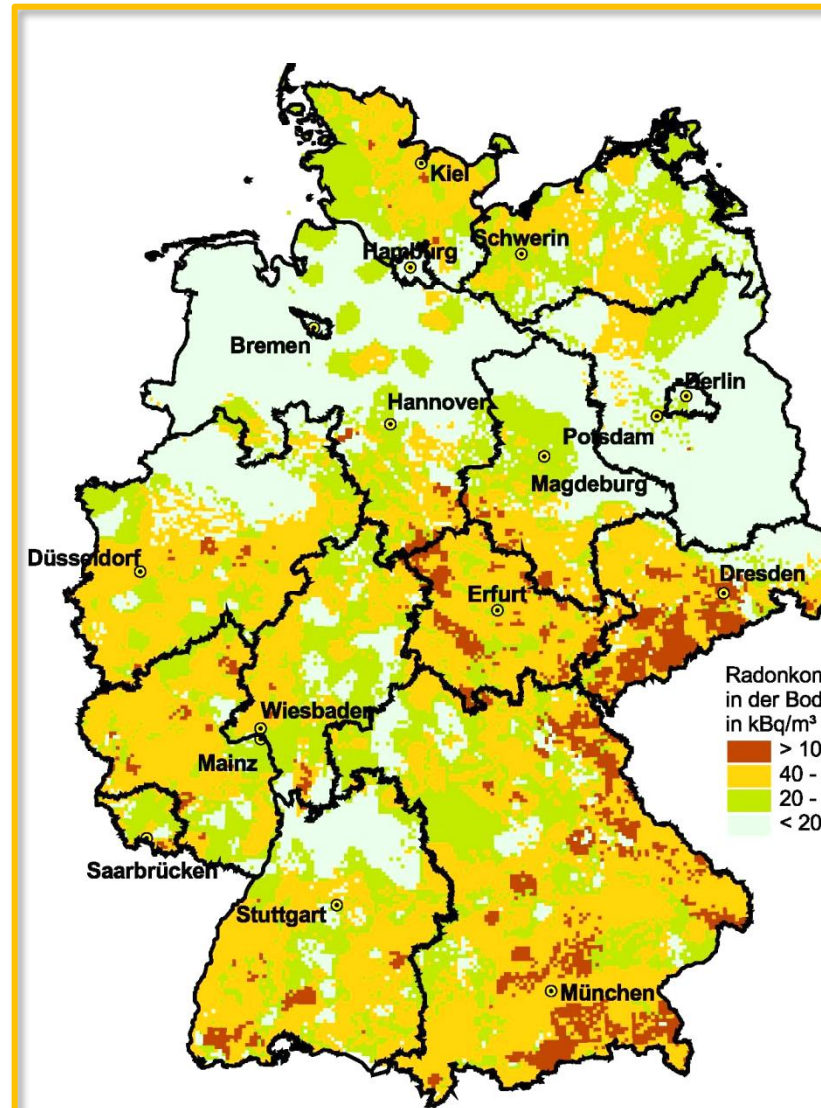
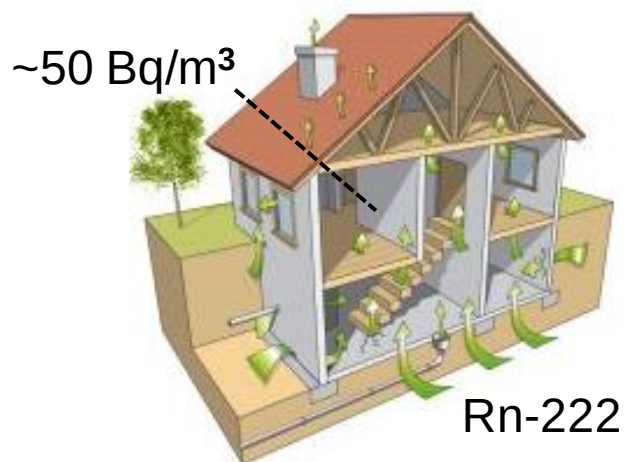
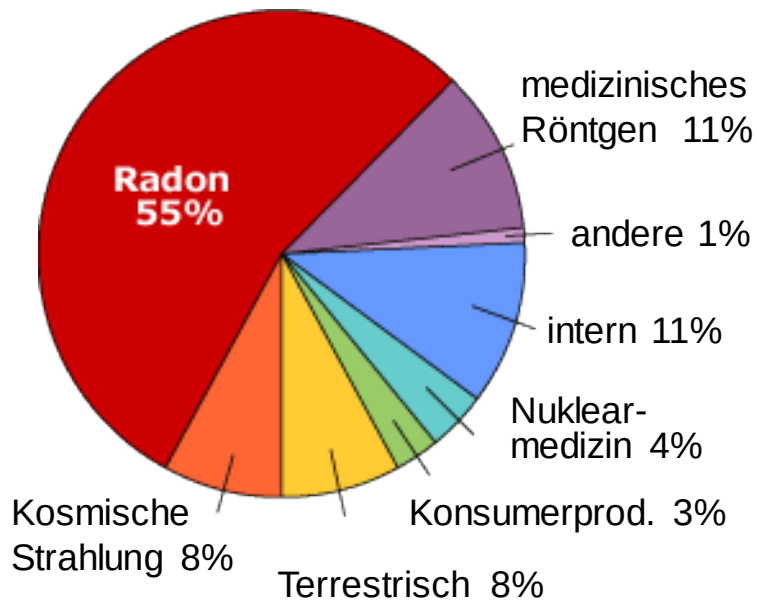
■ Radium-226

- Halbwertszeit $t_{1/2} = 1602$ a
- Entdeckung 1898
von Pierre & Marie Curie
Nobelpreis für Chemie 1911



Edelgas Radon-222

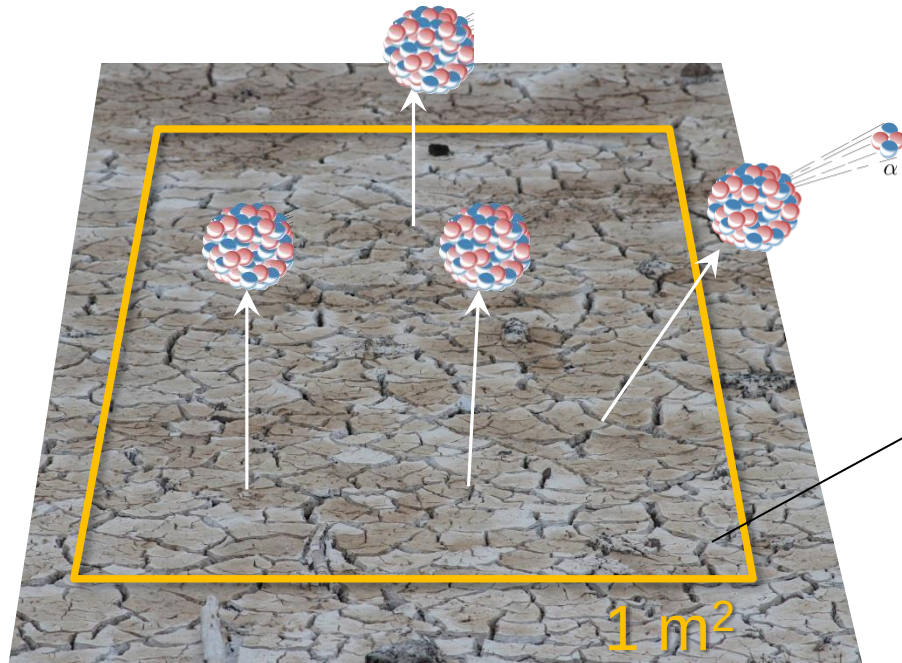
- **Radon-Emanation** aus dem Boden trägt zu ~50% zur natürlichen Strahlenexposition bei



Bundesamt für Strahlenschutz

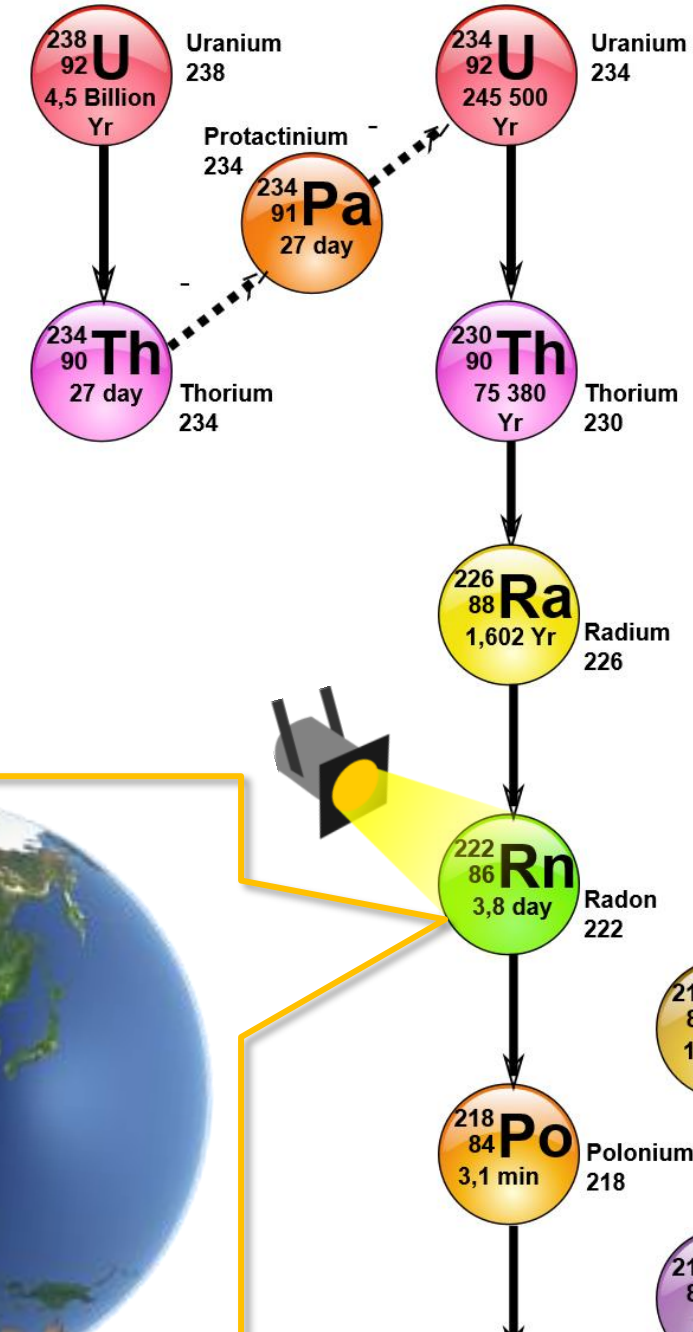
Edelgas Radon-222

- **Radon-Emanation** aus 1 m² Boden
~7400 ²²²Rn-Atome/s = 0.5 pCi Rn-222/s



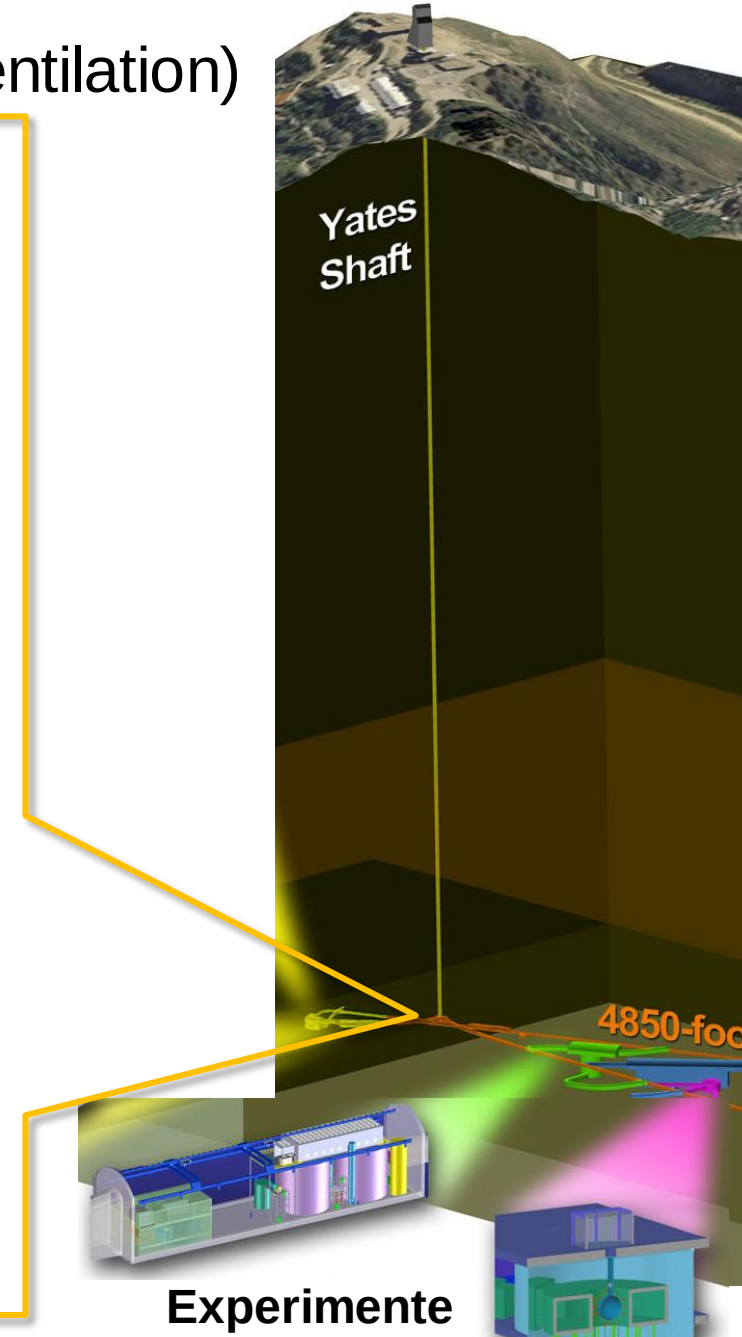
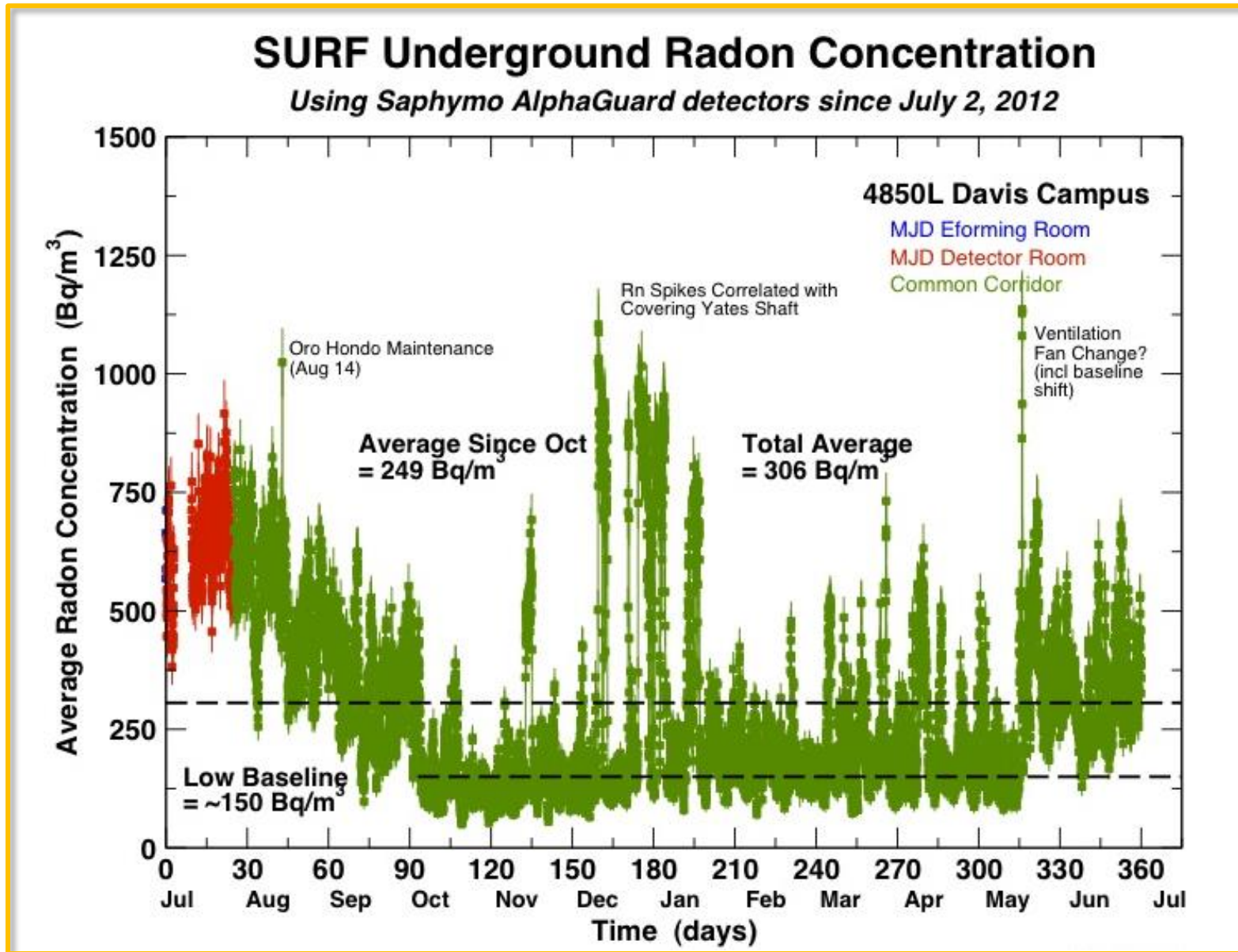
Boden:
1 pCi Ra-226/g

- Jährliche Emanation von Radon-222 aus dem gesamten Erdboden:
- $2.4 \cdot 10^9$ Ci = 91 TBq



Edelgas Radon-222

■ Radon-Emanation in einem Untergrundlabor (↗ Ventilation)

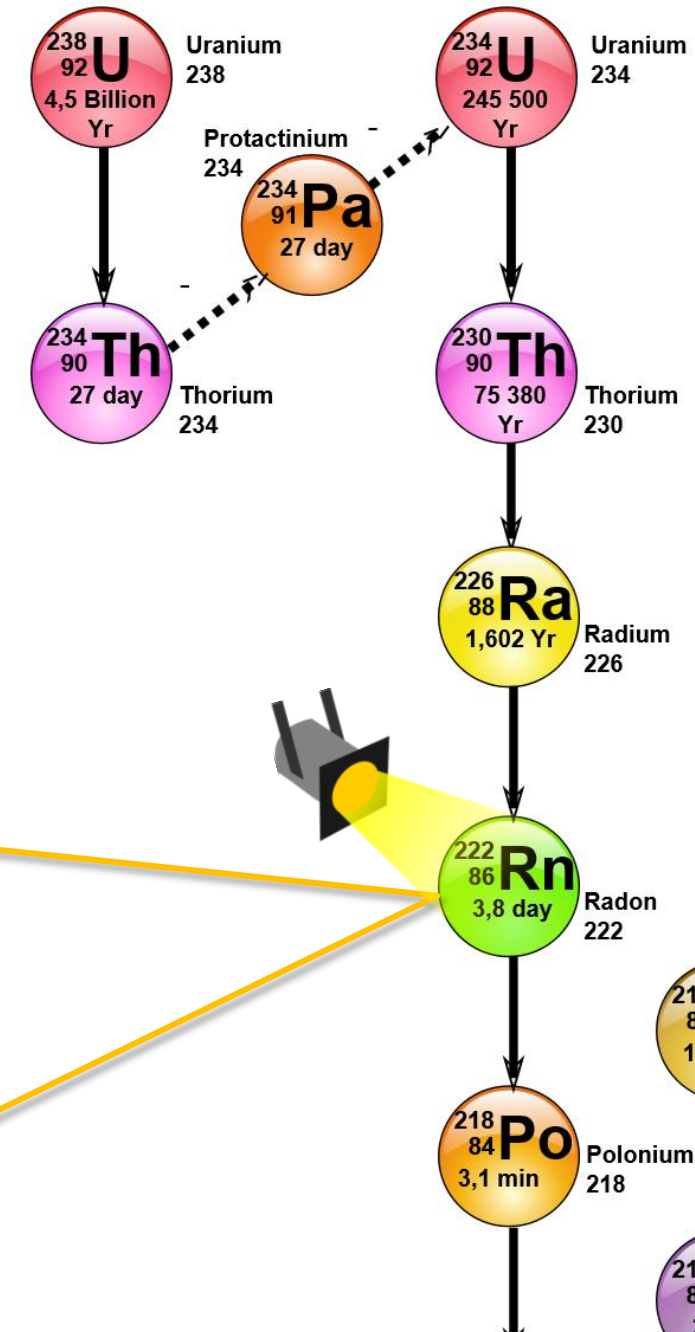
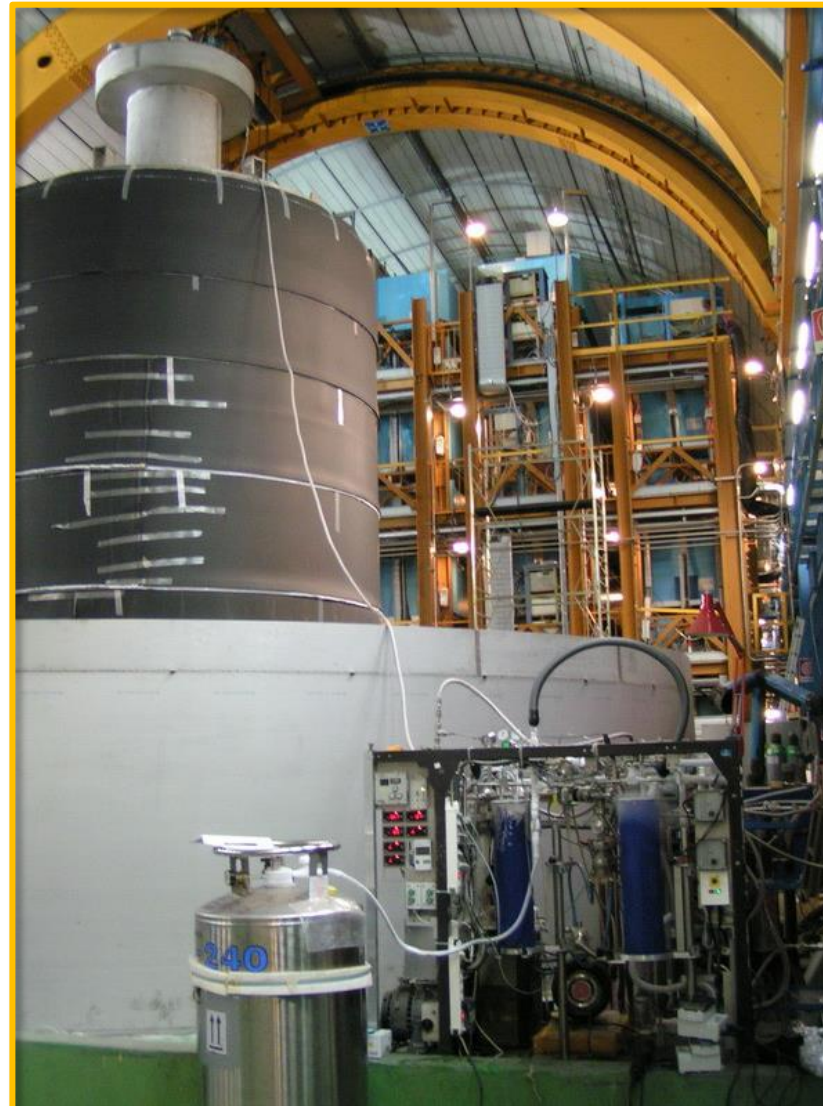


Edelgas Radon-222

- **Radon-Emanation** aus Detektorkomponenten stellt eine gefährliche Quelle von Untergrund dar

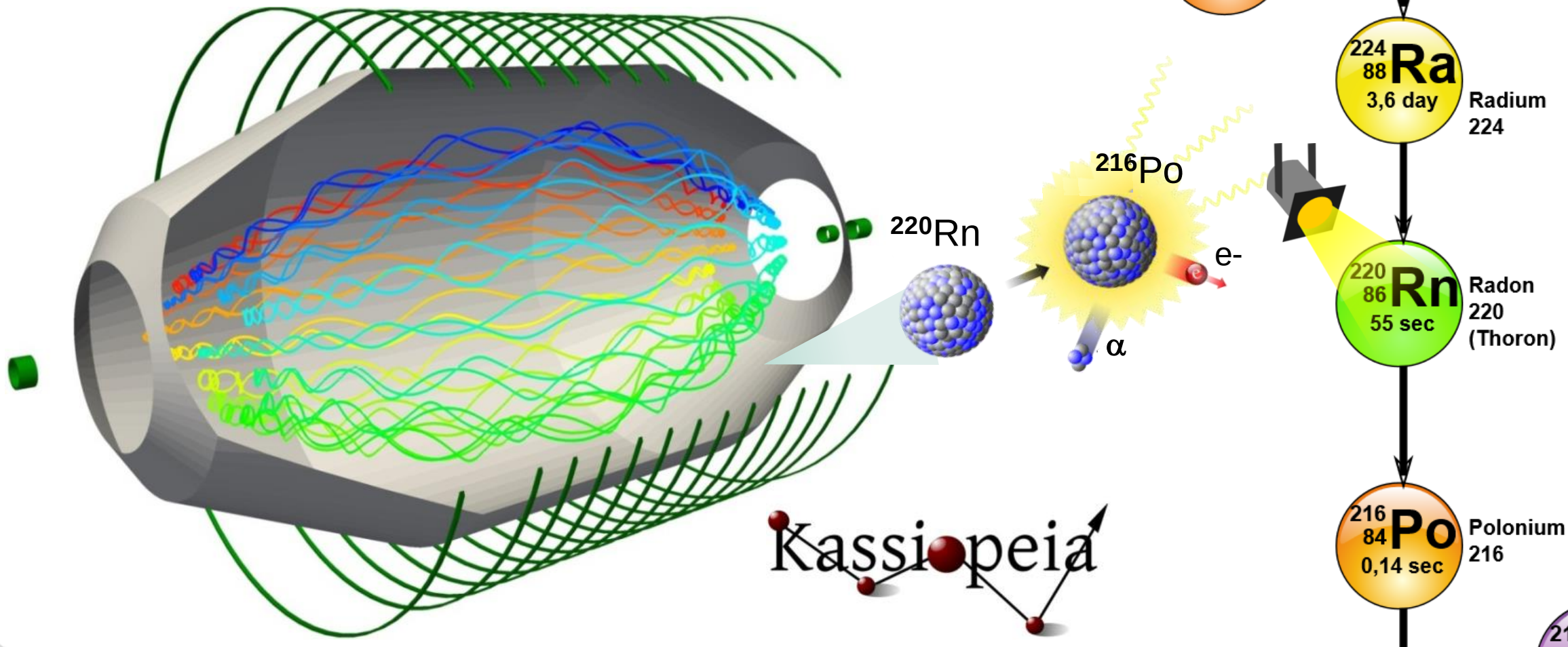


Messung der Radon-Emanation im GERDA Kryostaten am LNGS



Edelgas Radon-220

- **Rn-220** aus Schweißnähten des Edelstahl: Untergrundquelle im KATRIN Spektrometer, da α -Zerfall von Elektron-Emission begleitet



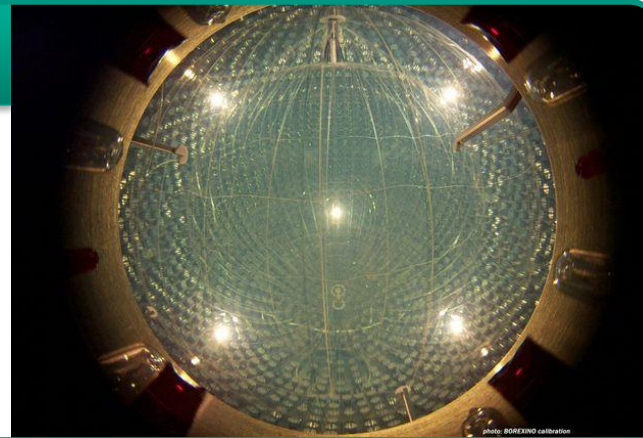
Edelgas Radon - Gegenmaßnahmen

- **Radon-Emanation** setzt Radon in das aktive Detektorvolumen frei, daher Gegenmaßnahmen:

1. kontinuierliche externe Belüftung / Abpumpen

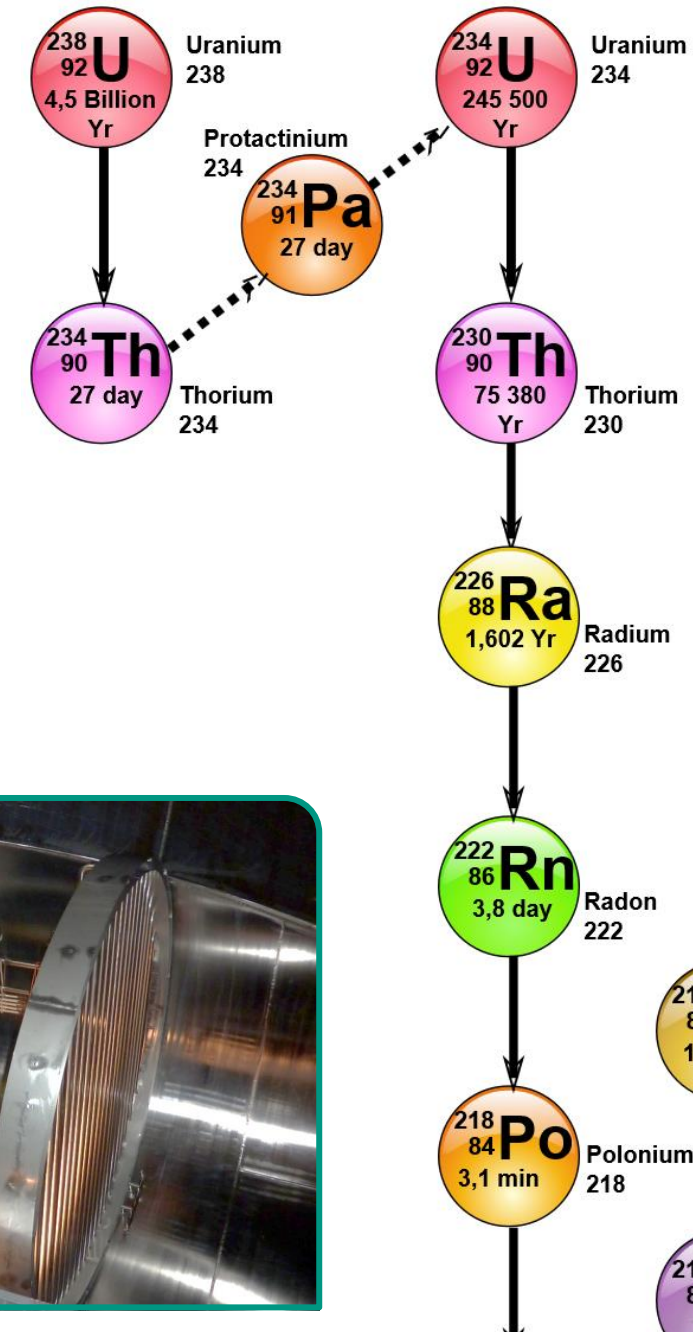
2. passive Radon-Barriere

- Bsp.: dünne Nylonballons im **Borexino-Experiment** (< 2 Radon-Zerfälle/Tag)



3. passive Radon-Kryofalle

- Bsp.: Kupfer-Baffles im **KATRIN-Experiment**
Rn-Atome frieren fest auf IN2-kalter Cu-Oberfläche (77K)

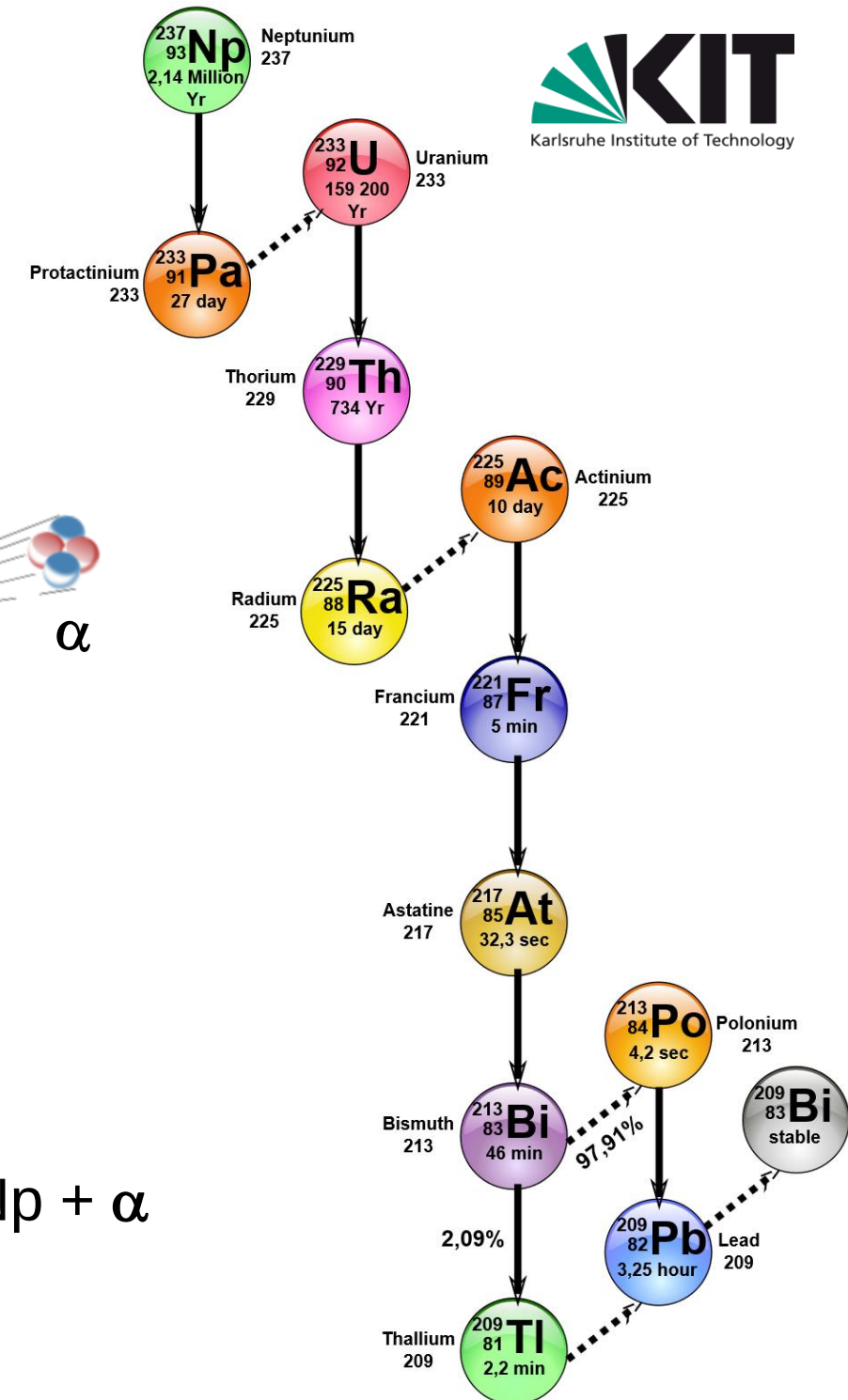
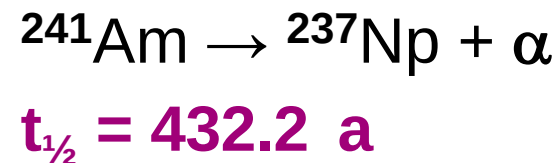
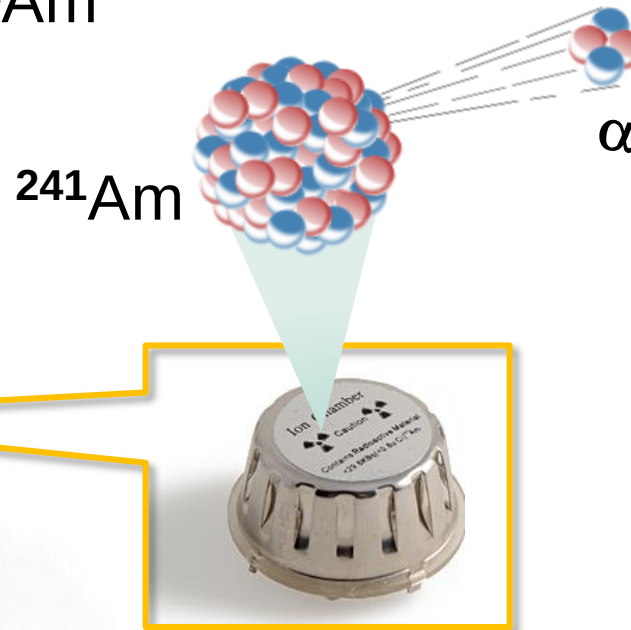


Zerfallsketten – ^{237}Np

Neptuniumserie ^{237}Np $A = 4 \cdot j + 1$



■ Rauchmelder enthalten ^{241}Am



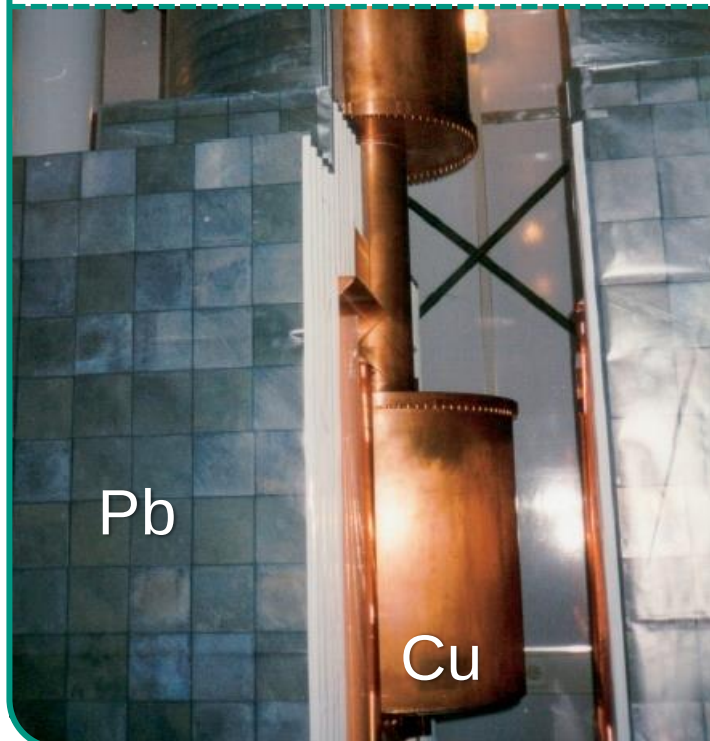
Untergrundreduktion

■ **Separation des Signals** vom Untergrund durch 3 Techniken:

äußere Abschirmung

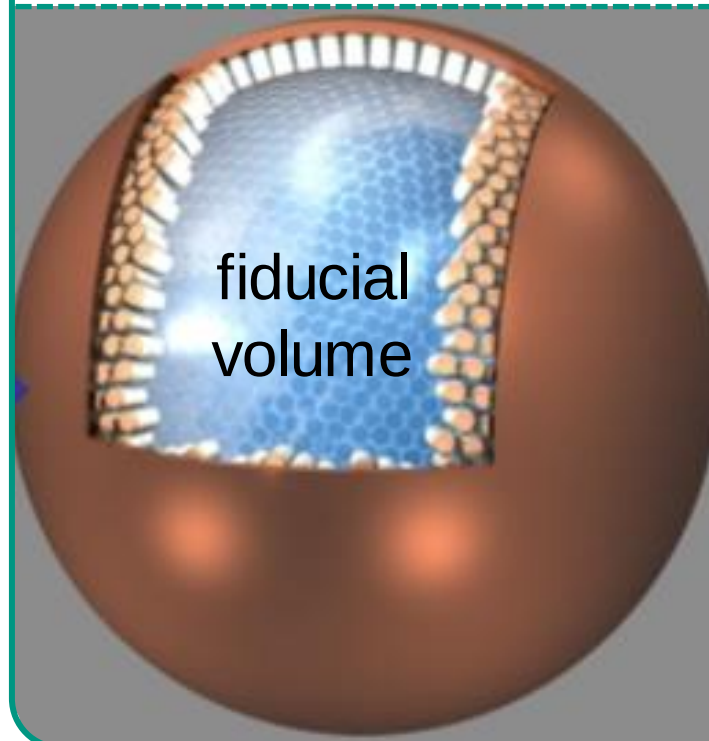
passiv: Cu,Pb gegen γ 's
PE gegen Neutronen

aktiv: äußerer μ -Veto



Selbst-Abschirmung

Beschränkung auf den
innersten Bereich,
keine Oberflächeneffekte
⇒ **fiducial volume**



Teilchendiskriminierung

Ereignisparameter wie
Ionisation, Szintillation
Phononen: ideal zur
Teilchendiskriminierung

