

Geo-V: Altersbestimmung & Radioaktivität

Datierungsmethoden:

- ▶ relativ: u.a. Stratigraphie (Schichtung von Sedimenten)
- ▶ absolut: Geochronologie

Geochronologie: z. B. Isotopenzerfall: Isotopenverhältnisse verändern sich durch

- ▶ unterschiedliche Zerfalls-/Halbwertszeiten
- ▶ kosmische Strahlung (z. B. Erzeugung von ^{14}C)

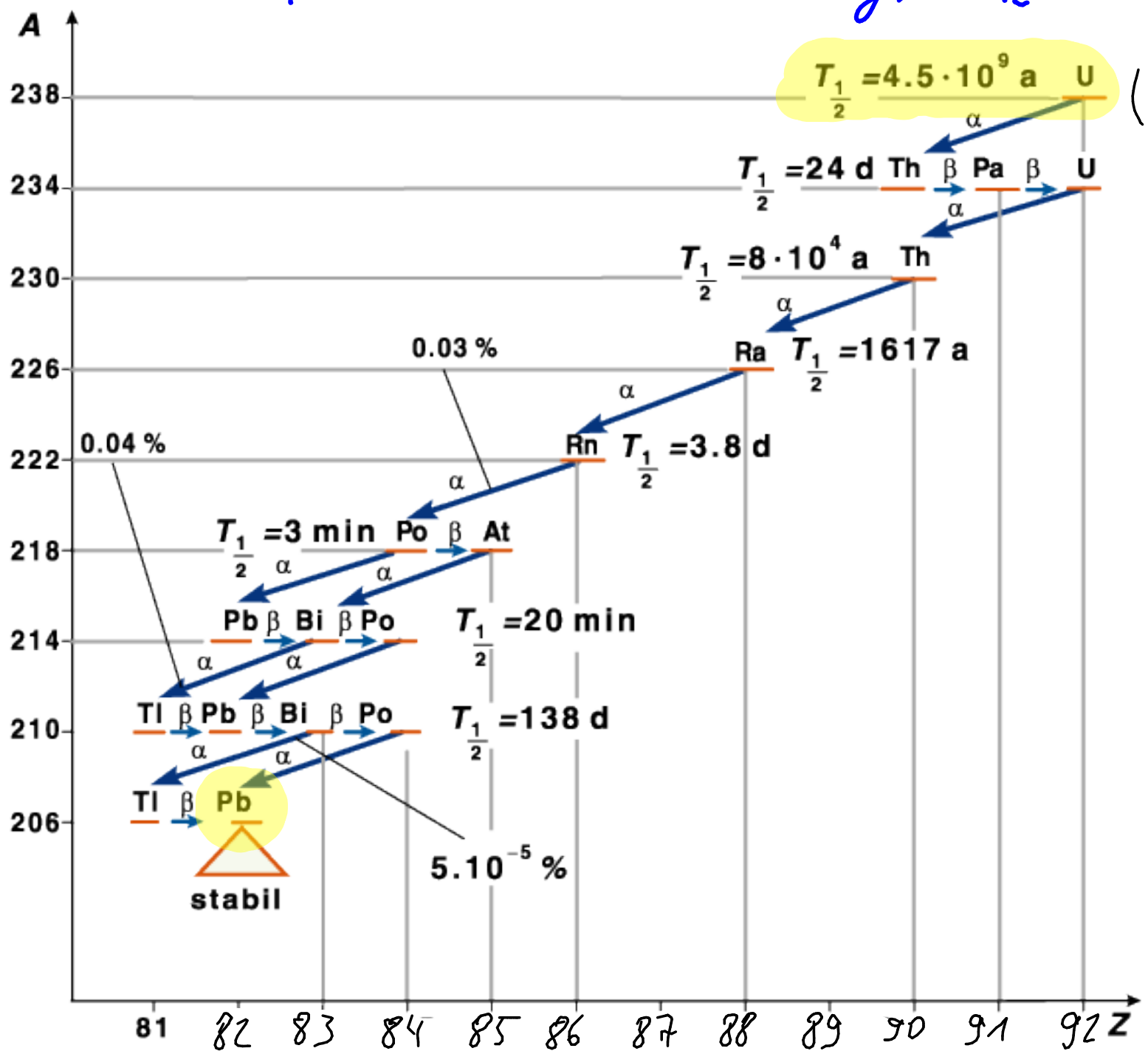
Erinnerung:

- Atomkern besteht aus Z Protonen und N Neutronen
- Massenzahl $A = Z + N$
- Kernbezeichnung für chemisches Element X : ${}^A_Z X_N$, ${}^A_Z X$ oder A_X
- Atomkerne gleicher Protonenzahl Z : Isotope
- — " — " — " — Neutronen-/Massenzahl: Isotone / Isobare
- Instabile Atomkerne können zerfallen: α , β^- , β^+ , γ -Zerfall (und weitere)
- Lebensdauer $\tau \leftrightarrow$ Halbwertszeit $T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$

□ Anzahl instabiler Kerne: $N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} = N_0 \cdot e^{-t/\tau}$

Geochronologische Datierung → nutzbare Isotopen-Zerfälle

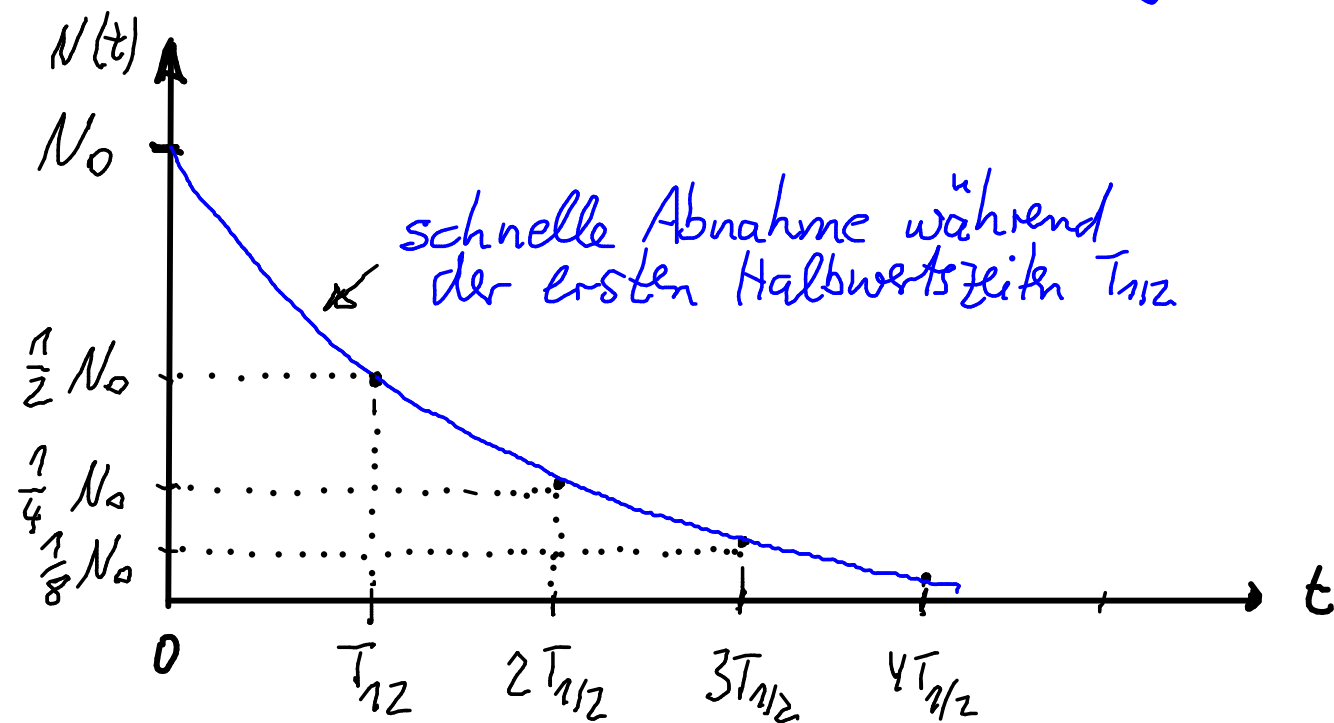
□ $^{238}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, Uran-Blei-Datierung, $T_{1/2} \approx 4.5$ Milliarden Jahre



(Uran-Radium-Reihe)

- $^{235}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow ^{207}\text{Pb}$, Uran-Blei-Datierung, $T_{1/2} \approx 704$ Millionen Jahre
(Uran-Actinium-Reihe)
- $^{232}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow ^{208}\text{Pb}$, Thorium-Blei-Datierung, $T_{1/2} \approx 14 \cdot 10^9$ Jahre (Thorium-Reihe)
- $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$, Rubidium-Strontium-Datierung, $T_{1/2} \approx 48.7 \cdot 10^9$ Jahre
- mit $^{86}\text{Rb} \rightarrow ^{86}\text{Sr}$, $T_{1/2} = 18.6$ Tage als Vergleichsreferenz
- $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$, Radiokohlenstoff-Datierung, $T_{1/2} \approx 5700$ Jahre
- $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$, Kalium-Argon-Datierung, $T_{1/2} \approx 1.25$ Milliarden Jahre

NB: Untersuchbare Zeiträume: bis zu einige $T_{1/2}$, denn



Alters-Gleichung: $N(t) = N_0 \cdot e^{-t/\tau} = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} = N_0 \cdot e^{-t \cdot \ln 2 / T_{1/2}}$

→ $t = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{N_0 - D(t)}{N_0}\right) \approx \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{N_0 + D(t)}{N_0}\right)$ falls $D(t) \ll N_0$

$N(t)$: Zahl der nach Zeit t vorhandenen instabilen Kerne

N_0 : anfängliche Anzahl instabiler Kerne

$D(t) = N_0 - N(t)$: Zahl der nach Zeit t vorhandenen Zerfallprodukte

Experimentelle Realisierung

► Zählung der radioaktiven Zerfälle ΔN

$$\Delta N = \frac{\Delta N}{\Delta t} \cdot \Delta t = \frac{dN(t)}{dt} \cdot \Delta t = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N(t) \cdot \Delta t \rightarrow \Delta N = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N(t) \cdot \Delta t$$

ist sehr klein, wenn $T_{1/2}$ groß

► Zählung der entstandenen Zerfallprodukte $D(t)$
mittels Massenspektroskopie

Massenspektroskopie

prinzipieller Aufbau: Ionenquelle \rightarrow Massenanalysator \rightarrow Detektor

Massenanalysator: \blacktriangleright Quadrupol-Massenspektrometer (QMS)

\blacktriangleright Magnetfeld bzw. Sektorfeld - Massenspektrometer

Lorentzkraft $F_L = Q \cdot v \cdot B \stackrel{!}{=} \frac{mv^2}{r} = F_{Zf}$ Zentrifugalkraft

$$\rightarrow \boxed{p = mv = Q \cdot B \cdot r}$$

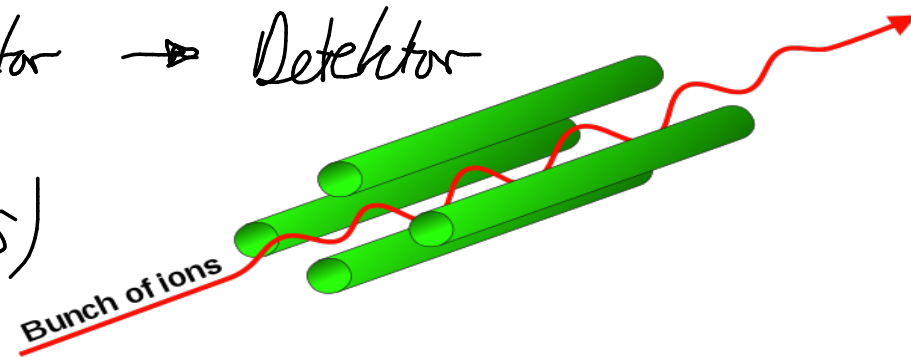
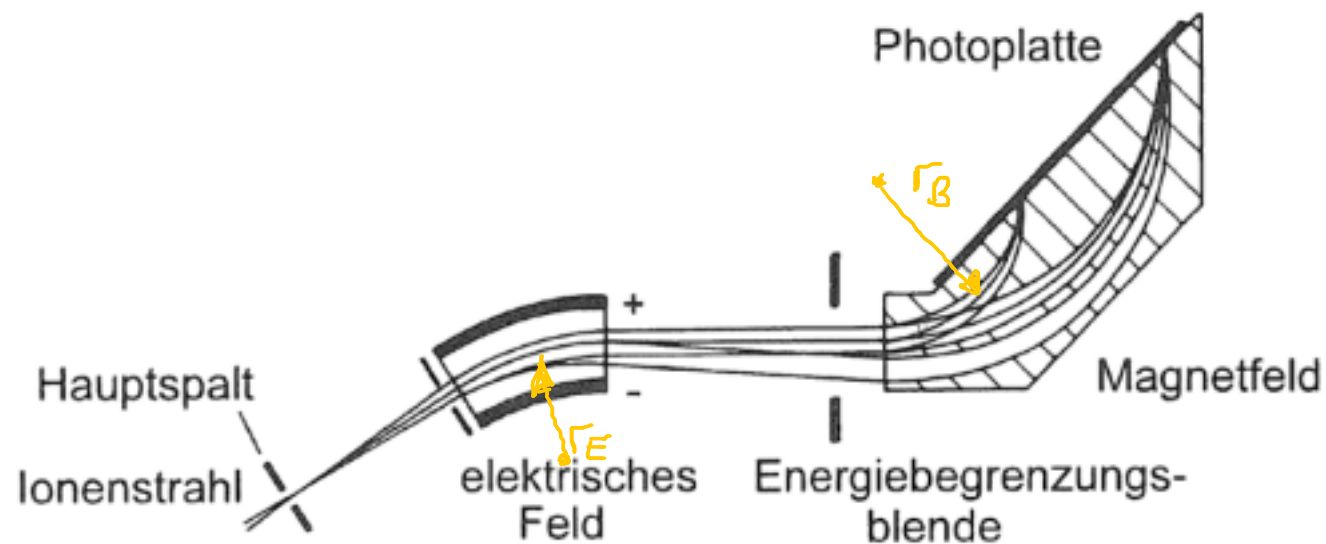
- \blacktriangleright Konzept: (1) Ionenquelle erzeugt Ionen mit fester Geschwindigkeit v
 (2) Impuls p hängt von Masse m ab
 (3) Ablenkradius r im Magnetfeld B proportional zu Masse m

z.B. Mattauch-Massenspektrometer

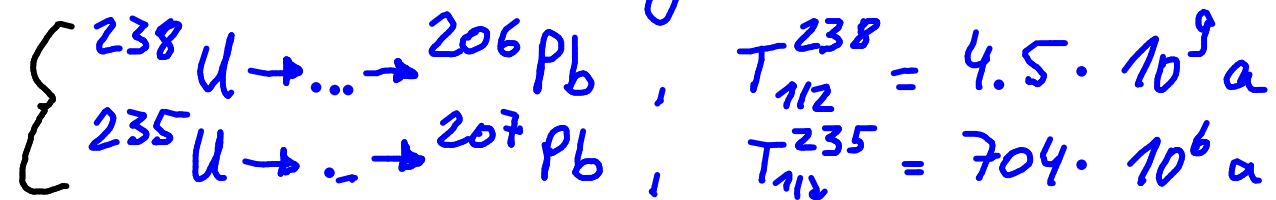
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{im E-Feld: } Q \cdot |\vec{E}| = \frac{mv^2}{r_E} \\ \text{im B-Feld: } Q \cdot |\vec{B}| \cdot v = \frac{mv^2}{r_B} \end{array} \right.$$

eliminiere v

$$\boxed{\frac{m}{Q} = \frac{|\vec{B}|^2 \cdot r_B^2}{|\vec{E}|^2 \cdot r_E^2}}$$



Uran-Blei-Datierung



Alters-
gleichung \rightarrow

$$\begin{cases} \text{(i)} & t = -\frac{T_{112}^{238}}{\ln 2} \cdot \ln \left(1 - \frac{D^{206}(t)}{N_0^{238}} \right) \\ \text{(ii)} & t = -\frac{T_{112}^{235}}{\ln 2} \cdot \ln \left(1 - \frac{D^{207}(t)}{N_0^{235}} \right) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{(i)} \rightarrow D^{206}(t) &= N_0^{238} \cdot \left(1 - e^{-t \cdot \ln 2 / T_{112}^{238}} \right) = \underbrace{N_0^{238} \cdot e^{-t \cdot \ln 2 / T_{112}^{238}}}_{N^{238}(t)} \cdot \left(e^{+t \cdot \ln 2 / T_{112}^{238}} - 1 \right) \\ & \quad \uparrow \text{heutige Isotopenzahl, bekannt!} \end{aligned}$$

\uparrow
 anfängliche (= damalige) Isotopenzahl, i.a. unbekannt

$$\begin{cases} \text{(i)} \\ \text{(ii)} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} D^{206}(t) = N^{238}(t) \cdot \left(e^{+t \cdot \ln 2 / T_{112}^{238}} - 1 \right) \\ D^{207}(t) = N^{235}(t) \cdot \left(e^{+t \cdot \ln 2 / T_{112}^{235}} - 1 \right) \end{cases}$$

Setze $D^{207}(t)$, $D^{206}(t)$ ins Verhältnis:

$$\frac{D^{207}(t)}{D^{206}(t)} = \frac{N^{235}(t)}{N^{238}(t)} \cdot \frac{e^{+t \cdot \ln 2 / T_{112}^{235}} - 1}{e^{+t \cdot \ln 2 / T_{112}^{238}} - 1}$$

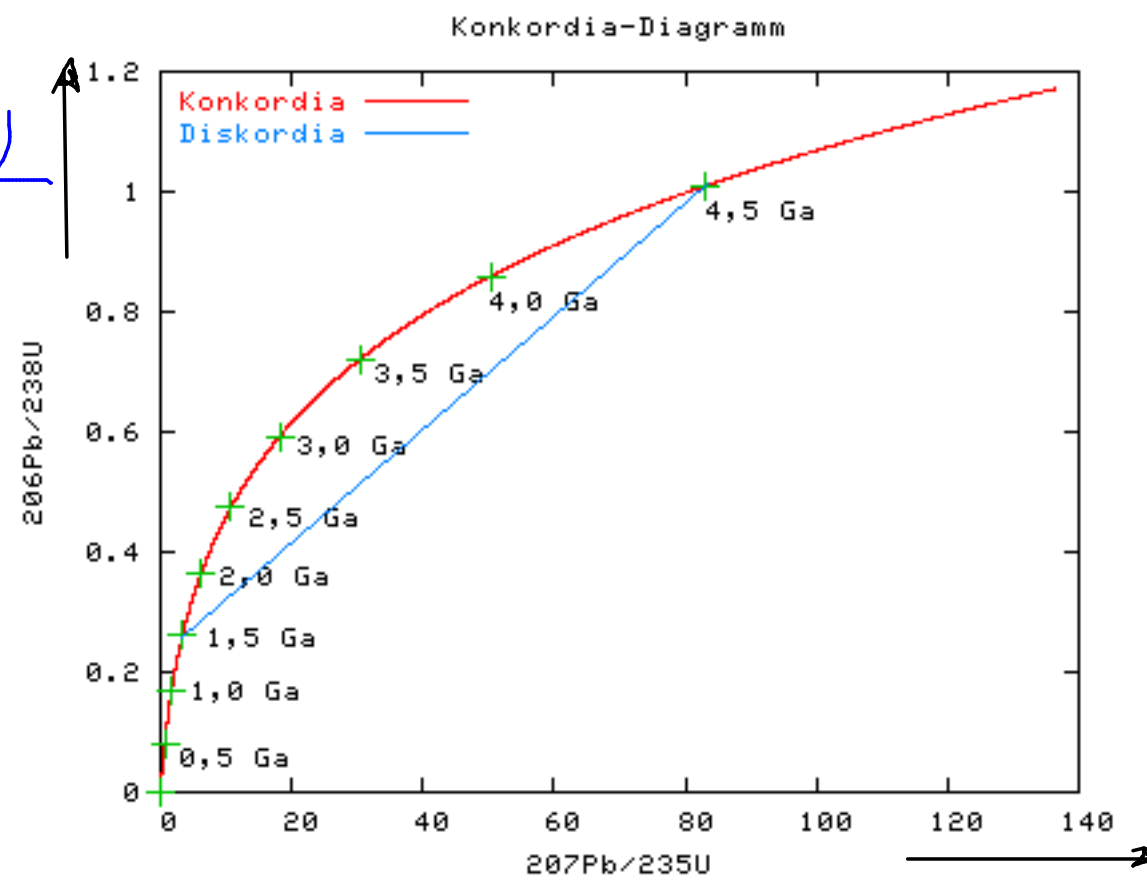
↑ heutiges Blei-Isotopenverhältnis aus Massen-Spektrometrie
 ↑ heutiges Uran-Isotopenverhältnis bekannt: $\frac{0.72\%}{99.27\%} = \frac{1}{137.8}$
 ↑ Halbwertszeiten T_{112}^{235} , T_{112}^{238} bekannt

einzigste Unbekannte: Zeit t
 → löse Gleichung (numerisch, graphisch) nach t

← Isochronen-Diagramm

Messpunkt auf Konkordia-Kurve
 ↳ zuverlässige Altersbestimmung
 gestörtes Isotopenverhältnis → Diskordia-Kurve
 (z.B. Verlust von Blei ^{206}Pb durch Diffusion bei Erhitzung → Sperrtemperatur)

$$\frac{D^{206}(t)}{N^{238}(t)}$$



$$\frac{D^{207}(t)}{N^{235}(t)}$$

Kalium-Argon bzw. Argon-Argon-Datierung

ca. 10%



$$T_{1/2} = 1.25 \cdot 10^9 \text{ a}$$

ca. 90%

nicht nutzbar, da zu viel ${}^{40}\text{Ca}$ in Natur

$$\Rightarrow t = - \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \left(1 - \frac{D^{\text{Ar}}(t)}{10\% \cdot N_0^{\text{K}}} \right)$$

↑ nur 10% aller ${}^{40}\text{K}$ zerfallen in ${}^{40}\text{Ar}$

gasförmiges ${}^{40}\text{Ar}$ in Gestein/Mineral eingeschlossen

↳ durch Aufschmelzen herauslösen und massenspektrometrisch vermessen

NB: Proben haben häufig geringe Sperr-Temperaturen ($< 500^\circ\text{C}$) → ${}^{40}\text{Ar}$ diffundiert leicht heraus

aber keine vergleichende Messung wie bei Uran-Blei-Datierung

⇒ Argon ${}^{39}\text{Ar}$ - Argon ${}^{40}\text{Ar}$ - Methode

heutiges ${}^{40}\text{K} / {}^{39}\text{K}$ -Isotopenverhältnis bekannt: $\frac{0.0117\%}{93.26\%} \approx \frac{1}{7971}$

↳ wandle Teil der ${}^{39}\text{K}$ durch Neutronenbeschuss in ${}^{39}\text{Ar}$ um: ${}^{39}\text{K} + n \rightarrow {}^{39}\text{Ar} + p$

↳ messe ${}^{40}\text{Ar}$ -Isotopenzahl $D^{40}(t)$ im Verhältnis zu erzeugter ${}^{39}\text{Ar}$ -Isotopenzahl $D^{39}(t)$

↳ Isochronen-Diagramm zur Bestimmung von t (wie bei Uran-Blei-Datierung)