

4-03 U-Pb-Altersbestimmung – Übersichtsblatt

Vorbemerkung: Dieses Blatt bezieht sich auf eine für die Erstellung der Geologischen Zeitskala 2012 (GTS2012; GRADSTEIN et al. 2012) relevante Methode. Die Zusammenstellung basiert in Teilen auf FAURE & MENSING (2005) und SCHOENE (2014). Zu einer Diskussion von U-Pb-Altersbestimmungen siehe KOTULLA (2020).

System

U-(Th)-Pb-System.

Ziel, Grundlage, Vorgehensweise,

Basisannahme(n)

→ 4-01; Anhang 1 (unten).

Historie (Anwendung für geologische Zeitskala)

HOLMES (1911, 1913), U-Pb- und U-He-Alter (geochemische Gesamtgesteinsanalysen).

Altersbestimmungsverfahren

Anspruch: unabhängig und absolut.

Natürlich vorkommende Uranisotope

^{238}U (99,27%), ^{235}U (0,72%), ^{234}U (0,0055%) und ^{236}U (Spuren).

Natürlich vorkommende Bleisotope

^{204}Pb (1,4%), $^{206}\text{Pb}^*$ (24,1%), $^{207}\text{Pb}^*$ (22,1%) und $^{208}\text{Pb}^*$ (52,4%); *mit radiogener Komponente aus dem (unabhängigen) Zerfall von ^{238}U , ^{235}U und ^{232}Th .

Zerfallsmechanismus (Kurzform)

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6\beta^- + \text{Q}$; Q = 47,4 MeV/Atom.

$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 7\alpha + 4\beta^- + \text{Q}$; Q = 45,2 MeV/Atom.

Jeweils unter der Voraussetzung eines geschlossenen Systems und eines Dauergleichgewichtes.

(Aktuelle) Zerfallskonstanten

Letztes Zählexperiment: JAFFEY et al. (1971); → 4-09.

U-Pb-Datum und -Alter

Die durch die Gleichungen (3) und (4) (→ 4-09) ermittelten $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - und abgeleitet $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -Daten werden erst durch (geologische) Interpretation zu Altern (z. B. Kristallisations-, Eruptions- oder Abkühlungsalter).¹

Anwendung

Terrestrische und extraterrestrische Minerale (und Gesteine).

Bevorzugte (uranhaltige) Analyse-Minerale

Zirkon (ZrSiO_4 ; für $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$), untergeordnet

Monazit (ThPO_4 ; für $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$); für das Phanerozoikum primär aus (umgewandelten) vulkanischen Aschenlagen gewonnen, die Sedimentfolgen zwischengeschaltet sind (z. B. KOTULLA 2020).

Zirkon-Kristallisation

Ggf. Substitution von Zr durch U und Th (ähnliche Ionenradien): Zr^{4+} (0,87 Å), U^{4+} (1,05 Å), Th^{4+} (1,10 Å). Eine Substitution durch Pb^{2+} (1,32 Å) wird ausgeschlossen², Pb^{4+} allerdings hat einen vergleichbaren Ionenradius (0,78-0,94 Å).

Messtechniken

- Thermo-Ionen-Massenspektrometrie (TIMS, thermal ionization mass spectrometry) in Verbindung mit Isotopenverdünnung (isotope dilution, ID-TIMS) oder chemischer Abradierung (chemical abrasion, CA-TIMS).
- Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie (SIMS, secondary ion mass spectrometry).
- Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma nach Laserablation (LA-ICPMS, laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry).

Unsicherheiten (nichtanalytisch, „geologisch“)

Diskordanz-Phänomene (synonym mit Verhalten im offenen System); Ursachen häufig nicht bekannt): Vermengung unterschiedlicher „Alters“-Domänen (z. B. zonar aufgebauter Zirkon mit einem „älteren“ Kern); Pb-Verlust; Ungleichgewicht der Zwischenprodukte (Fraktionierung während der Kristallisation oder bei partieller Aufschmelzung); initiales Pb; Mobilität des Urans unter oxidierenden Bedingungen (Wasserlöslichkeit der Uranyl-Ionen, $[\text{UO}_2]^{2+}$).

Regulative

Stratigraphie (relative Altersfolge der Gesteinskörper); globale und korrelierbare (isochrone) Zeitmarken (i. d. R. biostratigraphische Bindung).

Bildung. Wegen seines folglich hohen U/Pb-Verhältnisses eigne es sich für Datierungen.

¹ SCHOENE (2014, 358f).

² Ionenradien von FAURE & MENSING (2005, 221); deshalb enthalte Zirkon sehr wenig Blei zum Zeitpunkt der

Reproduzierbarkeit (des Ergebnisses)

Abhängig von der Bewertung der Präzision und weiterer Kriterien. Häufig gering; jedes publizierte Alter hat einen individuellen Werdegang einer Interpretation und einen einzigartigen Set von Unsicherheiten.

Anwendungsspanne in GTS2012

Mit zwei Ausnahmen Santonium-Stufe (Oberkreide) und älter (> ca. 83 Mio. [radiometrische] Jahre); fast ausnahmslos $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Alter.

Anhang I: Die Annahmen in FAURE & MENSING (2005)

Nach FAURE & MENSING (2005) ist die Interpretation des numerischen Wertes der Gleichung 2, eines Datums der Vergangenheit, von gewissen Annahmen über die geologische Geschichte des zu datierenden Gesteins oder Minerals sowie den in der Kalkulation angewendeten numerischen Werten D_0 und λ abhängig.

$$D = D_0 + N(e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{D - D_0}{N} + 1 \right) \quad (2)$$

D = Anzahl der Tochteratome (D für daughter, Tochter); D_0 = Anzahl initialer Tochteratome; N = Anzahl verbleibender Mutteratome (N für nuclide, Nuklid); λ = (aktuelle) Zerfallskonstante; t = Datum in der Vergangenheit.

Die Annahmen sind:

1. Keine Abgänge (Verluste) oder Zugänge (Gewinne) von Mutter- oder Tochteratomen außer durch den Zerfall der Mutter zur stabilen Tochter.
2. Die Zerfallskonstante des Mutternuklids ist zeitinvariant, physisch nicht beeinflussbar und genau bekannt.
3. Für D_0 wird ein angemessener Wert verwendet; entweder auf Basis der chemischen Eigenschaften des Tochterelements oder seiner isotopischen Zusammensetzung in dem terrestrischen Reservoir, von welchem das Gestein oder Mineral stammt.
4. Die gemessenen Werte von D und N sind genau; sie sind repräsentativ für das zu datierende Gesteine oder Mineral.

Anhang II: Online-Lehrmaterial

Inzwischen gibt es zahlreiches Lehrmaterial, das die gesamte Prozesskette von der Beprobung über die Probenaufbereitung bis zur finalen Analyse visualisiert – „Virtual Labs for Teaching“. Die nachfolgende Tabelle weist auf Material des Isotope Geology Laboratory der Boise State University, Dr. Mark SCHMITZ, hin (Zugriffe 11/2019).

Slide shows <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/education-and-outreach/how-its-done-u-pb-geochronology-slide-shows/>

Analyse-App: „ZirChron“ <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/education-and-outreach/zircon-virtual-zircon-analysis-app/>

Data Reduction Software <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/labshare/data-reduction-software/>

Videos „U-PB ZIRCON GEOCHRONOLOGY BY ID-TIMS: CLEANING DISSOLUTION VESSELS“ (07.09.2013; 5:05 Min.); <https://youtu.be/H7w05Wpy7mQ>

„U-PB ZIRCON GEOCHRONOLOGY BY ID-TIMS: CHEMICAL ABRASION & DISSOLUTION“ (07.09.2013; 14:13 Min.); <https://youtu.be/ChZhd2jpDIQ>

„U-PB ZIRCON GEOCHRONOLOGY BY ID-TIMS: COLUMN CHEMISTRY SEPARATION“ (07.09.2013; 8:45 Min.); <https://youtu.be/NSm8UiTm5c8>

Handbücher <https://www.boisestate.edu/earth-isotope/labshare/laboratory-handbooks/>

Literatur

- FAURE G & MENSING TM (2005) Isotope Principle and Applications. 3rd Edition, Hoboken, N. J.
- HOLMES A (1911) The association of lead with uranium in rock-minerals, and its application to the measurement of geological time. Proceedings of the Royal Society, Ser. A, 85, 248-256.
- HOLMES A (1913) The Age of the Earth. London.
- JAFFEY AH, FLYNN KF, GLENDENIN LE, BENTLEY WC & ESSLING AM (1971) Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . Physical Review C 4, 1889-1906.

KOTULLA M (2020) Bentonit-Horizonte in paläozoischen Sedimentfolgen: Tephrostratigraphie und U-Pb-Altersbestimmungen mit magmatogenen Zirkonen. W+W Special Paper G-20-1, Baiersbronn.

https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/Bentonit-Horizonte_G-20-1.pdf

SCHOENE B (2014) U-Th-Pb Geochronology. In: RUDNICK RL (ed.) Treatise on Geochemistry, Volume 4, 2nd edition, 341-378.

→ und Blattnummer: Verweis auf andere Beiträge der Online-Loseblattsammlung.

Zur Ergänzung → 4-10, 4-21, 4-22.