

stammesgeschichtlich sehr alt geltenden Vielzellern findet sich das vielseitigste Apoptose-System.

Ein wichtiger formbildender Prozess in der Ontogenese (individuelle Entwicklung von der befruchteten Eizelle bis zum ausgewachsenen Organismus) ist der programmierte Zellabbau, also das physiologische (nicht krankhafte), programmierte Absterben von Zellen (Apoptose). Während es z. B. beim krankhaft bedingten Zelltod in der Regel zu einem unkontrollierten Aufquellen und Zerplatzen der Zelle oder zu einer unkoordinierten Zerstörung von Eiweißen oder Zellorganellen kommt (Nekrose), geschieht die Auflösung der Zellbestandteile und ihr Abbau im Rahmen der Apoptose hochgradig organisiert und physiologisch gesteuert. Apoptose dient damit immer dem Erhalt oder der koordinierten Entwicklung des Organismus. Beispielsweise werden Gewebestrukturen zwischen den ontogenetischen Anlagen von Fingern und Zehen kontrolliert zum Abbau gebracht oder durch die Auflösung der Zellen von Glaskörper und Linse wird die Lichtdurchlässigkeit der Augenlinse ermöglicht. Aber auch im ausgewachsenen Organismus spielt Apoptose eine wichtige Rolle, z. B. in der Kontrolle der Zellzahl und der Größe von Geweben, bei der Entfernung entarteter Zellen oder bei der Rückbildung der Gebärmutter nach der Geburt. Bei der Apoptose werden Nachbarzellen bzw. -gewebe durch austretende Gifte wie im Fall des o.g. krankhaft bedingten Zelltodes nicht geschädigt.

Es ist schon länger bekannt, dass die molekulare Basis der Apoptose hochkonserviert ist, das heißt, sie ist bei sehr verschiedenen Organismengruppen sehr ähnlich, was evolutionstheoretisch so interpretiert wird, dass dieser Mechanismus stammesgeschichtlich sehr früh entstand und anschließend nicht mehr nennenswert verändert wurde. In einer neuen Untersuchung wiesen amerikanische Wissenschaftler (QUISTADA et al. 2014) nach, dass Apoptose auch bei riffbildenden Korallen vorkommt. Diese gelten im Rahmen der Evolutionsanschauung als Repräsentanten einer der ältesten

Tiergruppen. Es zeigte sich, dass alle wesentlichen Komponenten des Apoptose-Programms bei Korallen vorhanden sind und denen des Menschen gleichen. Dabei spielen die Tumornekrosefaktor (TNF)-Superfamilien (TNFRSF/TNFSF) eine zentrale Rolle. Die Wissenschaftler untersuchten 53 Proteine der TNFRSF- und TNFSF-Familien in der riffbildenden Koralle *Acropora digitifera* und stellten große Sequenzähnlichkeiten mit den entsprechenden Proteinen des Menschen fest, besonders bezüglich der aktiven Zentren dieser Eiweiße. Ein Vergleich mit der Taufliege *Drosophila* ergab, dass in dieser Linie im Gegensatz zur Linie zum Menschen wichtige Teile der TNF-Superfamilie fehlen, was evolutionstheoretisch als Verlustentwicklung interpretiert wird. Zuvor war angenommen worden, dass die Zahl der Mitglieder der TNF-Superfamilie nach der Trennung der Linie der Wirbeltiere von der der Wirbellosen zugenommen habe. Nun hat sich herausgestellt, dass im Gegenteil die Korallen das vielseitigste Repertoire der TNF-Superfamilien besitzen.

Die große Ähnlichkeit der molekularen Komponenten des Apoptose-Prozesses bei Korallen und Menschen wurde eindrucksvoll demonstriert durch die Einführung eines menschlichen TNF (HuTNF) in die Korallen. Es zeigte sich, dass es direkt an die Korallen-Zellen bindet, dadurch die Caspase-Aktivität erhöht, was (über eine Kaskade von Prozessen) zur für die Apoptose typischen Bläschenbildung und zum Zellabbau führt. (Caspasen sind Enzyme, die Proteine durch Hydrolyse abbauen und bei der Apoptose eine besondere Rolle spielen.) Umgekehrt führte ein TNF von Korallen (AdTNF1) bei menschlichen Zellen zu einem signifikant häufigeren physiologisch hervorgerufenen Zelltod. TNF von Korallen und Menschen sind also austauschbar.

Beispiele wie der zelluläre Apoptose-Mechanismus zeigen einerseits ein erstaunliches Ausmaß an Konservierung eines zellulären Prozesses und seiner Bestandteile; in evolutionstheoretischer Interpretation muss ein Stillstand bezüglich der Evolution

dieses Mechanismus von mindestens 550 Millionen Jahren angenommen werden. Andererseits werfen sie aber auch die Frage auf, wann und wie ein solcher Mechanismus überhaupt evolutiv entstand. Denn wenn er offenkundig nicht nennenswert veränderbar ist, wie sollen dann hypothetische Vorstufen in irgendeiner Weise funktional und damit existenzfähig sein? Die Daten zeigen einmal mehr: Abruptes Auftreten und dann weitgehend Konstanz eines zentralen biologischen Struktur- und Funktionsgefüges.

[QUISTADA SD, STOTLANDA A et al. (2014) Evolution of TNF-induced apoptosis reveals 550 My of functional conservation. PNAS early ed, doi: 10.1073/pnas.1405912111] R. Junker

■ Ursprung des Mondes: Bestätigung einer Theia-Protoerde-Kollision?

Eine im Juni 2014 veröffentlichte Pressemitteilung der Georg-August-Universität Göttingen lässt durch klare Aussagen aufhorchen: „Mond entstand durch Planetenkollision“ (Titel) und „Wissenschaftler bestätigen Impakthypothese“ (Untertitel). Die Pressemitteilung bezieht sich auf eine kürzlich in *Science* veröffentlichte Studie von HERWARTZ¹ et al. (2014, Zitate unten in Übersetzung), in der erstmals eine minimale Differenz in der Sauerstoff-Isotopenzusammensetzung von Mond- und Erd-Gestein aufgezeigt wird. Dies wertet die Pressestelle der Universität als „sichere“ Bestätigung der Hypothese, nach welcher der Mond aus einer Kollision einer frühen Erde (Protoerde) und eines anderen Planeten bzw. Planetesimals (Theia genannt) entstand.

Für ihre aufwändige Dreifach-Sauerstoffisotopenanalyse untersuchten HERWARTZ et al. lunare Proben der Apollo-Missionen der Jahre 1969–72, terrestrische Proben (Minerale des Erdmantels) und Proben von Meteoriten (Enstatit²-Chondrite³). Als Maß dient das Verhältnis des seltenen Sauerstoffisotops ¹⁷O zum häufigsten Sauerstoffisotop ¹⁶O ($\Delta^{17}\text{O}$). Die Differenz zwischen den untersuchten terrestrischen und lunaren Gesteinen beträgt 12 ± 3 ppm

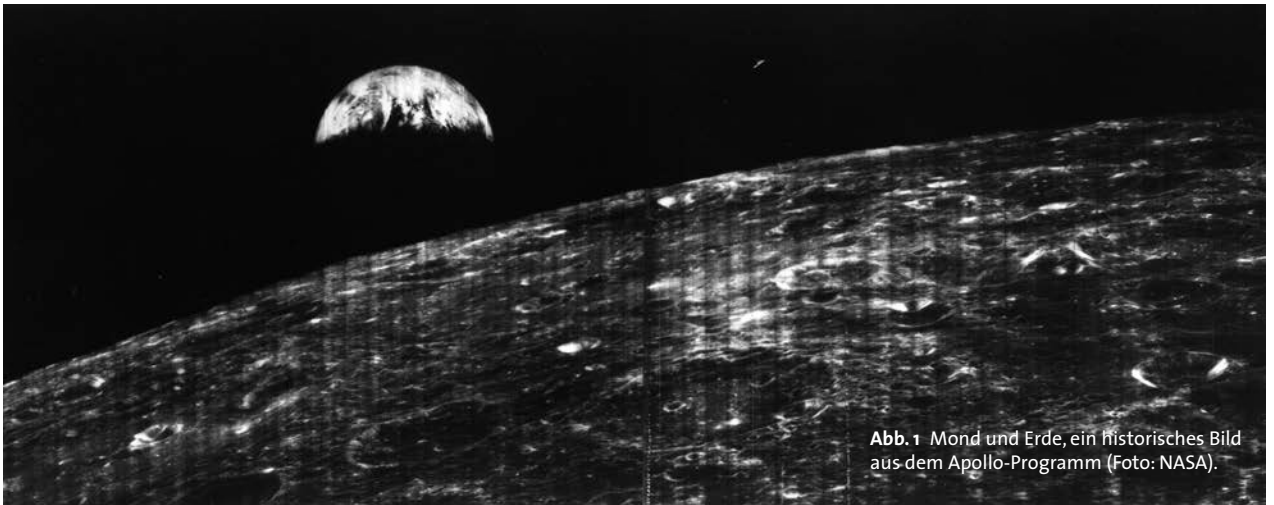


Abb. 1 Mond und Erde, ein historisches Bild aus dem Apollo-Programm (Foto: NASA).

(Anteil pro Million). Dieses Ergebnis, so HERWARTZ et al., „(...) unterstützt die Kollisionshypothese der Entstehung des Mondes“. Die angenommene marsgroße Theia soll, so spekulieren die Autoren, eine Enstatit-chondritische Zusammensetzung gehabt haben ($\Delta^{17}\text{O}$ -Differenz zu terrestrischen Proben 50 ppm).

Die Kollisionshypothese (giant impact hypotheses) ist die derzeit populärste Hypothese eines Hypothesen-„Wettstreites“ zur Entstehung des Mondes; ihre moderne Ausgestaltung geht auf HARTMANN & DAVIS (1975) zurück. Eine Erde-Mond-„Verwandtschaft“ wird auf die im Wesentlichen identische chemische Zusammensetzung der beiden Himmelskörper zurückgeführt. Allerdings werden nach der Kollisionshypothese aufgrund der Isotopenheterogenität unter den Körpern des Sonnensystems Unterschiede erwartet; der theoretische Planet Theia soll deshalb eine von der Protoerde unterschiedliche Zusammensetzung gehabt haben, die sich bei der Kollision frak-

tionierend⁴ auf Protoerde und Mond ausgewirkt habe. Eine solche Fraktionierung wurde schon aufgrund von Computermodellen erwartet, konnte aber bislang nicht bestätigt werden. Die von HERWARTZ et al. ausgewiesene (minimale) Differenz wird nunmehr von der Presseabteilung der Universität Göttingen als entscheidendes Indiz für die Richtigkeit der Entstehungshypothese gewertet. Die Autoren drücken sich allerdings vorsichtiger aus – „der Mond wurde möglicherweise durch eine katastrophische Kollision der Protoerde mit einem Planetesimal namens Theia gebildet“, – und sie räumen ein, dass eine alternative Erklärung durch spätere Einwirkung von außen durchaus plausibel ist.

Die Interpretation der Daten wirft einige grundsätzliche Fragen auf: Zunächst, ob die an einigen Proben ermittelten $\Delta^{17}\text{O}$ -Werte jeweils repräsentativ für Gesamt-Erde und Gesamt-Mond sind. Des Weiteren, inwieweit die untersuchten Gesteine die Ursprungszustände

widerspiegeln. Beispielsweise wurde erst kürzlich festgestellt, dass das Mondgestein unerwartet hohe Wassergehalte aufweist (HUI et al. 2013), und es erscheint deshalb unklar, ob es die ursprüngliche Mondkruste repräsentieren kann. Und nicht zuletzt muss der kausale Zusammenhang hinterfragt werden. Denn eine tatsächlich unterschiedliche Isotopenzusammensetzung muss nicht zwangsläufig von einer Planetenkollision herrühren. Aus diesen Gründen kann man höchstens den Schluss ziehen, dass dieser Befund der Kollisionstheorie nicht widerspricht, von einer „Bestätigung“ kann aber nicht die Rede sein.

Grenzüberschreitende Anmerkung: Mit der Kollisionshypothese wird nicht nur die Entstehung des Mondes, sondern zugleich auch die der Erde fixiert. Eingebettet in das Denkmodell einer Entstehung des Sonnensystems durch das Zusammenziehen einer Gaswolke soll die Protoerde-Theia-Kollision das letzte große Kollisionsereignis einer Vielzahl vorausgegangener Kollisionen gewesen sein und damit das Ende einer Millionen Jahre andauernden Erdentstehung in der frühen Geschichte dieses Sonnensystems markieren. In der Bibel (Genesis 1 und 2,1-2) finden wir eine Erklärung, die ohne Kollisionsmodell auskommt: Erde und Mond sind separate Schöpfungswerke in einer klar ausgewiesenen (Schöpfungs-) Reihenfolge. GOTT sprach und es geschah. Dazu braucht es keine kosmische Evolution und keine langen Entstehungszeiten. Trotz seiner Kürze enthält der



Abb. 2 Künstlerische Darstellung einer Planeten-Kollision (Bild: NASA/JPL-Caltech)

Schöpfungsbericht auch im Hinblick auf die Entstehung von Erde und Mond für den Menschen essentielle Detail-Informationen.

Anmerkungen: ¹Leitautor nunmehr Universität zu Köln; ²Mineral der Pyroxen-Gruppe, Mg₂[Si₂O₆]; ³hauptsächlich aus Chondren (Silikatkügelchen, Si-O-Verbindungen) bestehend; ⁴zu unterschiedlichen Anteilen aufteilend.

[Georg-August Universität Göttingen, Pressemitteilung Nr. 131 vom 6. Juni 2014, Mond entstand durch Planetenkollision, <http://www.uni-goettingen.de/de/3240.html?cid=4809>; HARTMANN WK & DAVIS DR (1975) Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* 24, 504-515; HERWARTZ D, PACK A, FRIEDRICHS B & BISCHOFF A (2014) Identification of the giant impactor Theia in lunar rocks. *Science* 344, 1146-1150; HUI H, PESLIER A, ZHANG Y & NEAL CR (2013) Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early moon. *Nature Geoscience* 6, 177-180.]
M. Kotulla & P. Korevaar

■ Zirkon-Populationen unterschiedlichen Alters fordern geodynamische Modelle heraus

In einem jurassischen Granit bei Rubiku (60 km nordöstlich Tirana, Albanien), im Mirdita-Ophiolith-Komplex, sind von KRYZA & BEQIRAJ (2014) zwei unterschiedliche, aber in sich homogene Zirkon-¹-Populationen² entdeckt worden; die interpretierten Isotopenalter betragen im Mittel 1.827 ± 17 und 169 ± 2 Millionen [radiometrische] Jahre. Die älteren Zirkone sollen von einem magmatischen Zirkon-Kristallisationsereignis herrühren. Sie waren „dann“, so die Autoren, zu einem überraschend großen Teil in der granitischen Magma enthalten, das bei der Platznahme des Ophioliths³ zur Kristallisation der jüngeren Zirkone führte (Bajocian-Stufe, jüngere Mitteljura).

Im Konzept der Plattentektonik werden Ophiolithe als Fragmente ozeanischer Lithosphäre interpretiert. Sie sind Kernbausteine in der Rekonstruktion der geodynamischen Prozesse sowie der Paläogeographie. Die Ophiolith-Abfolge im zentralen Albanien gehört zu dem mesozoischen Ophiolith-Komplex des alpidischen Orogensystems⁴ der Dinariden-Helleniden. Die Studie galt der Genese des Granitkomplexes

als Teil der obduzierten, zerstückelten Ophiolith-Abfolge, insbesondere der zeitlichen Einordnung von Obduktion⁵ und Platten-Kollision. Mit dem (überraschenden) Vorkommen zweier altersunterschiedlicher Zirkon-Populationen hat die Aufgabenstellung allerdings deutlich an Komplexität gewonnen.

KRYZA & BEQIRAJ diskutieren (vorsichtig) mögliche geodynamische Szenarien (mittelozeanischer Rücken, MOR; Supra-Subduktionszone, SSZ, Akkretions- und Kollisions-Situationen) und die sich daraus ergebenden paläotektonischen Implikationen. Heterogene Zirkon-Zusammensetzungen sind beispielsweise auch vom Mittelatlantischen Rücken bekannt (u.a. PILOT et al. 1998, BORTNIKOV et al. 2008). Sie kommen zu dem Schluss, dass die betrachteten Hypothesen möglicher geodynamischer Szenarien keine zufriedenstellenden Antworten, nicht einmal zu einigen wesentlichen Fragen, geben. Die Präsenz alter Zirkone in wesentlich jüngeren Gesteinen innerhalb ophiolithischer Abfolgen laufe aber geodynamischen Modellen zuwider, die eine Interaktion ozeanischer Lithosphäre mit kontinentaler Kruste vorsehen. Letztendlich können sie – nach eigenen Angaben – auf Basis der verfügbaren und limitierten Daten die Präsenz der alten Zirkone nicht erklären; es bedarf also weiterer Studien.

BORTNIKOV et al. (2008) berichteten zuvor von ungewöhnlich alten (etwa 100 bis 330 und sogar etwa 2.230 Millionen [radiometrische] Jahre) und jungen (etwa 1,2 bis 1,4 Millionen [radiometrische] Jahre) Zirkonen in denselben gabbroiden (basaltischen) Gesteinsproben aus der Markov-Tiefe des Mittelatlantischen Rückens. Das plattentektonische Konzept aber, so die Autoren, erwarte in der Spreizungszone nur die Bildung neuer ozeanischer Kruste, also nicht das Vorkommen unterschiedlich alter Zirkon-Populationen dieser Streuung. Unter der Annahme, dass die alten Zirkone artfremd sind, schlagen BORTNIKOV et al. (2008) zur Lösung des vermeintlichen Widerspruchs einen spezifischen geodynamischen Prozess im ozeanischen Mantel vor

(S. 865–6): Demnach soll eine partielle Aufnahme von Material unterschiedlichen Alters vom Friedhof („graveyard“) subduzierter Krusten-Fragmente durch das Material eines aus dem Kern-Mantel-Grenzbereich aufströmenden Plumes (Manteldiapir) erfolgen. Während des Aufstiegs soll sich das Plume- und Krusten-Material noch in einem festen Aggregatzustand befinden. Das Material schmelze schließlich, wenn der Plume-Kopf die Soliduskurve überschreite und beginne sich (sodann) über die ozeanische Lithosphäre auszubreiten. Zirkon, als das höchste Temperatur-Mineral, würde zuletzt schmelzen und sich in dem basaltischen Magma auflösen.

Diese Deutung führt zu der grundsätzlichen Frage, warum sich die im Mantel befindlichen alten Krustenfragmente auf einer langen Zeitskala noch nicht thermisch an das Mantel-Material angeglichen haben und samt den Zirkon-Mineralen „resorbiert“ worden sind. Das Vorhandensein alten Krustenmaterials lässt vielmehr auf eine kurze Zeitachse schließen; das Material (der Friedhof) ist noch vorhanden, weil es nicht ausreichend lange „aufgeheizt“ wurde. So betrachtet ist die Zirkon-Vielfalt nicht nur eine Herausforderung für geodynamische Modelle, sondern auch für die lange Zeitachse.

Anmerkungen: ¹ Mineral (ZrSiO₄), teilweise mit geringen Mengen von Uran und Thorium; ² Population: eine Gruppe von Zirkonen gleicher Art und gleichzeitiger Entstehung; ³ submarine basische bis ultrabasische (SiO₂-arme) magmatische Gesteinsserien; ⁴ Orogenese: Gebirgsbildung; ⁵ auf das Festland „geschoben“.

[BORTNIKOV NS, SHARKOV EV, BOGATIKOV OA, ZINGER TF, LEPEKHINA EN, ANTONOV AV & SERGEEV SA (2008) Finds of young and ancient zircons in gabbroids of the Markov Deep, Mid-Atlantic Ridge, 5°24'–5°02.2'N (Results of the SHRIMP-II U-PB dating): implications for deep geodynamics of modern oceans. *Doklady Earth Sciences* 421, 859–866. – KRYZA R & BEQIRAJ A (2014) Palaeoproterozoic (1.83 Ga) zircons in a Bajocian (169 Ma) granite within a Middle Jurassic ophiolite (Rubiku, central Albania): a challenge for geodynamic models. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundschau)* 102, 607–625. – PILOT J, WERNER C-D, HAUBRICH F, BAUMANN N (1998) Palaeozoic and proterozoic zircons from the Mid-Atlantic Ridge. *Nature* 393, 676–679.] M. Kotulla