

Ein Update zur „kambrischen Explosion“

Die „kambrische Explosion“ der Lebewesen gilt als markanteste Diskontinuität (Sprung) in der Fossilabfolge der Lebewesen. Eine aktuelle Übersichtsarbeit bestätigt die „explosive“ Natur: Der Fossilbericht zeigt keine allmählich zunehmende Verschiedenartigkeit, sondern ein früh etabliertes Maximum an vielen verschiedenen Körperbauplänen. Natürliche Ursachen sind nach wie vor ungeklärt. In einer anderen aktuellen Studie wird gezeigt: Genetische Module, die bereits vor der „Explosion“ in einfacheren Lebewesen existiert haben müssten, scheinen frei kombinierbar gewesen zu sein. Beide Befunde sind evolutionstheoretisch nicht zu erwarten, können aber als Indizien für einen Schöpfungsursprung gewertet werden.

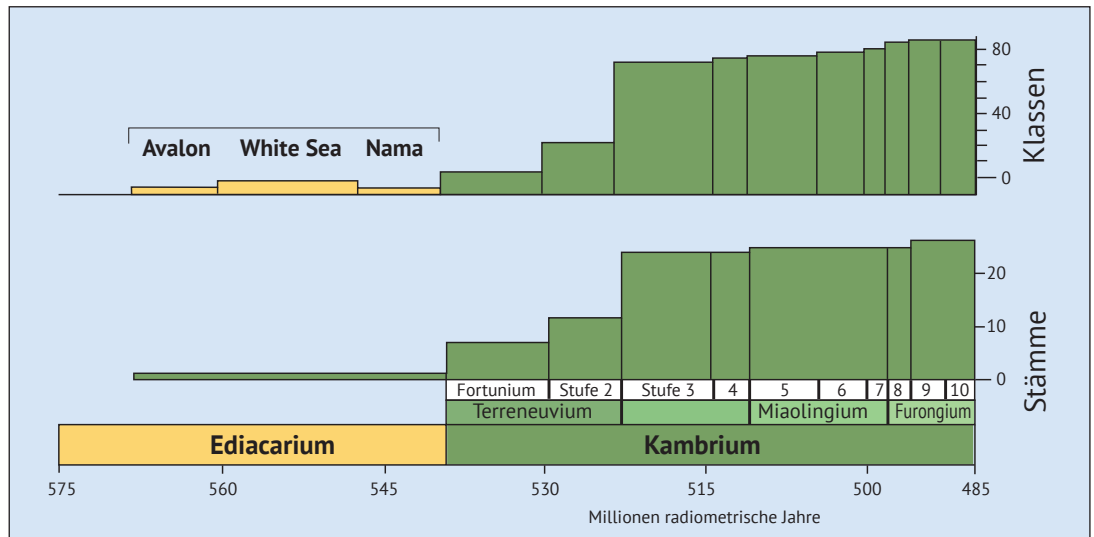
Reinhard Junker

Bereits Charles DARWIN war es klar: Die Abfolgen von Fossilgemeinschaften in den Sedimentgesteinen sind ausgesprochen diskontinuierlich, d. h. sie treten sprunghaft auf. Er erkannte dies als ernsthaftes Problem für seine Evolutionstheorie. Evolution verläuft nach DARWINs Theorie graduell. Müsste man dagegen eine sprunghafte Evolution annehmen, könnte man die Sprünge stattdessen auch als Indiz für Schöpfung werten: Gruppen von Lebewesen sind von Beginn an voneinander abgrenzbar.

An dieser Situation hat sich bis heute im Wesentlichen nichts geändert. Es wurden zwar manche Fossilien entdeckt, die als Übergangsformen deutbar sind, aber das große Gesamtbild zeigt nach wie vor *systematische* Diskontinuitäten; das wird allgemein kaum bestritten.

Die auffälligste Diskontinuität zeigt sich im unteren Teil des Kambriums (vgl. JUNKER 2014). Verschiedenste Tierstämme sind fossil erstmals im ersten Drittel des Kambriums nachgewiesen worden, und das in großer Vielfalt und Verschiedenartigkeit. Dieser paläontologische Befund wird meist als „kambrische Explosion“ bezeichnet (ERWIN & VALENTINE 2013; vgl. Abb. 1). Zu den kambrischen Tierstämmen gehören solche mit grundverschiedenen Bauplänen wie z. B. Schwämme (Porifera), Hohltiere (Coelenterata), Ringelwürmer (Annelida), Armfüßer (Brachiopoda), Gliederfüßer (Arthropoda, z. B. Trilobiten), Weichtiere (Mollusca), Stachelhäuter (Echinodermata) und auch Chordatiere (Chordata; darunter auch kieferlose Fische).

Abb. 1 Anzahlen von Tierklassen und Tierstämmen im Ediacarium und Kambrium. Die Ediacara-Fossilien lassen sich in drei Gruppen unterteilen; sie lassen sich aber kaum den Tierstämmen zuordnen, die ab dem Kambrium fossil überliefert sind. (Nach ERWIN 2020)



Immer wieder werden Versuche unternommen, die kambrische Explosion zu „entschärfen“.

Dass dieser Befund diametral evolutionstheoretischen Erwartungen und Vorhersagen widerspricht, muss kaum hervorgehoben werden. Daher ist es nicht überraschend, dass immer wieder Versuche unternommen werden, die „Explosion“ zu „entschärfen“ und aufzuzeigen, dass der Fossilbefund in einem evolutionären Szenario erklärbar sei. Vor allem wird argumentiert, dass es fossile Hinweise auf eine längere vorkambrische Evolution gebe; somit erscheine die kambrische Vielfalt der Baupläne doch nicht so plötzlich im Fossilbericht.



Abb. 2 *Yilingia spiciformis*, ein wurmartiges Fossil (rechts) mit einer Spur (links), etwa 20 mm breit, aus ~550 Millionen radiometrische Jahre altem Gestein im Gebiet des Yangtze Gorges in Südchina. (Zhe Chen/Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, and Shuhai Xiao/Virginia Tech)

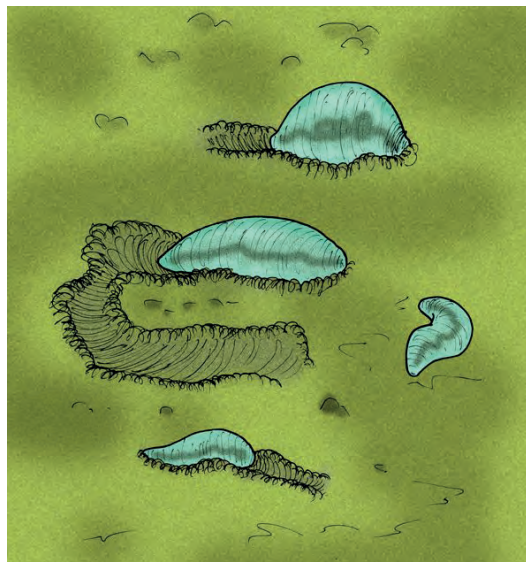


Abb. 3 Rekonstruktion von *Icaria wariootia* aus dem Ediacarium von Südastralien. (Apokryltaros, CC BY-SA 4.0)

Tatsächlich ist eine große Anzahl vorkambrischer Fossilien aus dem Ediacarium bekannt (vgl. Abb. 1). Wenn diese als Vorläufer kambrischer Formen gedeutet werden könnten, würde der Zeitraum für eine evolutive Entwicklung der kambrischen Baupläne somit deutlich verlängert. Die Ediacara-Fauna ist in ihrer Natur allerdings umstritten. Nur wenige Formen werden überhaupt als mögliche Vorläufer kambrischer Arten diskutiert. So wurde teilweise vorgeschlagen, *Dickinsonia* als Rippenqualle oder als Plattentier (Placozoa) zu interpretieren, *Haootia* als Nesseltier, *Kimberella* als Weichtier oder *Yilingia* als Ringelwurm oder Gliederfüßer. WARSON (2020) lässt einige dieser Formen Revue passieren, beispielsweise *Yilingia spiciformis* (Abb. 2). Dieses Tier konnte auf dem Meeresboden wandern, sein Körper war aus Segmenten aufgebaut, besaß einen klaren Vorder- und Hinterteil und einen spiegelsymmetrischen Körper – einige wesentliche Tiermerkmale. Bei *Icaria wariootia* (Abb. 3) gibt es Hinweise darauf, dass ein Maul und ein Verdauungstrakt ausgebildet waren. ZHANG & SHU (2021, 643) weisen allerdings darauf hin, dass Ähnlichkeiten einzelner Arten der Ediacara-Fauna mit bekannten Tierstämmen eher allgemeiner Art seien und daher nicht als gemeinsame diagnostische Merkmale geeignet seien. Diese Formen ließen sich nur schwer mit heutigen Tierstämmen in Verbindung bringen, und es sei schwierig, Nachkommen für sie in kambrischen Faunen (Tierwelt in einem Gebiet) zu finden. Diese Schwierigkeit der Identifikation von Tieren der Ediacara-Fauna als Vorfahren von kambrischen Stämmen wurde auch von vielen anderen Autoren bestätigt (vgl. JUNKER 2014, 6).

Aber selbst wenn einige präkambrische Fossilien mit Formen der kambrischen Explosion theoretisch in Verbindung gebracht werden könnten, würde dies nichts am großen Bild ändern. Im Vergleich zur vorkambrischen Fauna ist die Fossilvielfalt des Unterkambriums im-

mens, weitgehend andersartig und von deutlich größerer Verschiedenartigkeit. Denn es treten ja nicht nur einige wenige Tierstämme plötzlich im Kambrium in Erscheinung, sondern circa 30 Stämme, deren Herkunft man jeweils erklären müsste (JUNKER 2014, 6). Ein aktuelles Bild zeichnen ZHANG & SHU (2021) in einer Übersichtsarbeit. Die Autoren halten den Begriff „Explosion“ wegen der deutlichen Unterschiede zu adaptiven Radiationen in den nachfolgenden geologischen Perioden für angebracht (S. 642). Besonders bemerkenswert sind folgende Befunde:

- Die meisten Äste auf der Ebene der Tierstämme erreichten ihre maximale morphologische Breite (Verschiedenartigkeit) in einem Zeitintervall nahe ihres ersten Auftauchens im Fossilbericht im frühen Kambrium; Ausnahmen bilden allerdings vor allem die Gliedertiere und Chordatiere (641, 649). Diesen Befund nennt auch ERWIN (2020) als eine von drei entscheidenden Beobachtungen im Zusammenhang mit dem Wechsel vom Ediacarium zum Kambrium.
- Die meisten heute vorkommenden Tierstämme tauchten in den ersten 20 Millionen radiometrischen Jahren (MrJ) des Kambriums zum ersten Mal in der Fossilgeschichte auf. Die meisten kambrischen Fossilien lassen sich problemlos in eine Stamm- oder Kronengruppe eines heute vorkommenden Tierstammes einordnen (644).
- Sowohl die skelettierte als auch die weichteilige Fauna enthielt aber auch eine Reihe von „seltsamen“ Formen, deren Morphologie sich nicht ohne Weiteres in lebende Tierstämme oder Tierklassen einordnen lässt (647). Das heißt: Die Formenvielfalt ganz verschiedenartiger Baupläne war daher größer als heute (vgl. ERWIN 2020, der diesen Befund ebenfalls hervorhebt).
- Es ist seit Langem bekannt und bestätigt sich weiterhin, dass es weder unter den Fossilfunden ein morphologisches Kontinuum über ein breites Spektrum von Körperbauplänen gibt, noch dass sich die Stämme in ihrer frühen Fossilgeschichte ähnlicher sind (649).
- Fossile Belege deuten auch darauf hin, dass die meisten Körperbaupläne von Vielzellern nach 560 MrJ erschienen. Die maximale Dauer der kambrischen Explosion beträgt somit etwa 40 MrJ. Für Gliederfüßer veranschlagen DALEY et al. (2018) wegen des Fehlens passender Fossilien in fossilführenden Ediacara-Schichten weniger als 30 MrJ. Im Großen und Ganzen der evolutionär interpretierten Erdgeschichte sind auch 40 MrJ eine sehr kurze Zeitspanne, die nur etwa 1 % der Geschichte des Lebens nach dem Evolutionsmodell ausmacht (652). Ein Großteil der „Explosion“ der Verschiedenartigkeit ereig-

nete sich allerdings in nur 5 bis 10 MrJ (s. Zusammenstellung und Diskussion bei JUNKER 2014, 8).

- Die meisten Ediacara-Fossilien sind schwer in eine bekannte Tiergruppe einzuordnen. Die meisten Ediacara-Forscher neigen dazu, Ediacara-Formen als eine Art „Wundertüte“ unterschiedlicher, sonst unbekannter Lebensformen zu betrachten (643).
- Mehrere Indizien sprechen dafür, dass es sich bei der kambrischen Explosion aus evolutionärer Perspektive um ein echtes Ereignis handelt und nicht um ein Artefakt eines unvollkommenen Fossilnachweises (646f.).

Der Blick auf das große Ganze macht deutlich, dass die Metapher „Explosion“ gerechtfertigt ist.

Der Blick auf dieses große Ganze macht deutlich, dass die Metapher „Explosion“ gerechtfertigt ist. Insbesondere ist das frühe Erreichen der maximalen morphologischen Breite (Verschiedenartigkeit) im Kambrium diametral evolutionstheoretischen Vorhersagen entgegengesetzt. Der Gesamtbefund ist und bleibt aus evolutionstheoretischer Sicht rätselhaft.

Ursachen der „Explosion“

ZHANG & SHU (2021) befassen sich auch mit den zahlreichen Versuchen, natürliche Ursachen für die kambrische Explosion aufzudecken. Es werden intrinsische (z. B. genetische) und extrinsische (z. B. ökologische) Ursachen diskutiert. Für die Autoren handelt es sich aber durchweg lediglich um *Voraussetzungen* für Veränderungen, nicht um Erklärungen. So könne die „Explosion“ zwar nicht ohne molekulare und entwicklungsgenetische Aspekte verstanden werden; aber das Entwicklungssystem allein reiche nicht aus, um die kambrische Explosion zu erklären. Genauso begründet ein zeitliches Zusammenfallen des Auftretens neuer Baupläne mit ökologischen Veränderungen keine Kausalität. Das ist verständlich: Ökologische Prozesse an sich haben keine verändernde Kraft an Erbgut und Bauplänen von Lebewesen. Zudem passt keine der vorgeschlagenen ökologischen Hypothesen zu den geologischen, paläontologischen und molekularen Daten. Bestimmte ökologische Faktoren waren während der kambrischen Explosion nicht einzigartig, sondern auch in anderen Zeiten vorhanden; daher können sie nicht erklären, warum die „Explosion“ gerade im Unterkambrium stattfand (654). Die Autoren kommen zum Schluss, dass keine einfache, einzelne Ursache das gesamte Phänomen erklären kann (654, 641).

Vergleichende Studien und der letzte gemeinsame Vorfahr

Setzt man eine Evolution aller Lebewesen als gegeben voraus, kann man auf der Basis von vergleichenden Untersuchungen und unter Berücksichtigung des Fossilbefundes Rückschlüsse auf die genetische und morphologische Ausstattung hypothetischer Vorfahren ziehen. Nach einer neueren Studie von ERWIN (2020) offenbart dieser Ansatz mehrere allgemeine Muster in der mutmaßlichen Evolution des regulatorischen Genoms der Vielzeller (Metazoa). Demnach sei ein Großteil des entwicklungsbiologischen „Werkzeugkastens“ der vielzelligen Tiere vor fast einer Milliarde radiometrischer Jahre mit der Entstehung und frühen Entwicklung der sogenannten Holozoa entstanden. Unter den Holozoa („Gesamttiere“) versteht man diejenige rein hypothetische (!) Gruppe von Organismen, die die vielzelligen Tiere und ihre engsten einzelligen Verwandten umfasst (vgl. Abb. 4). Deren „Werkzeugkasten“ soll einen komplexen Lebenszyklus mit mehreren Zelltypen ermöglichen haben.

Ein Großteil des entwicklungsbiologischen „Werkzeugkastens“ der vielzelligen Tiere soll beim gemeinsamen Vorfahren vorhanden gewesen sein.

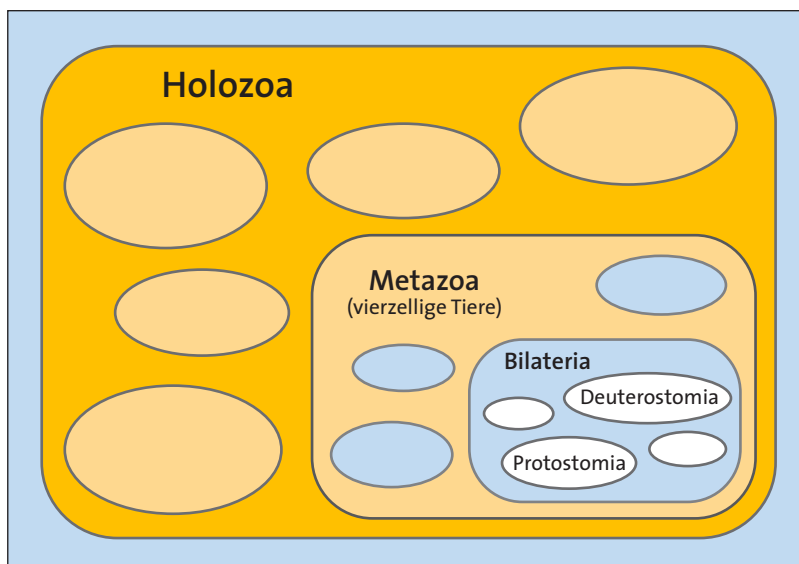


Abb.4 Schematische Darstellung der im Text genannten systematischen Gruppen. Nicht beschriftete Ovale stehen jeweils für verschiedene Untergruppen. Holozoa („Gesamttiere“) sind die rein hypothetische (!) Gruppe von Organismen, die die vielzelligen Tiere und ihre engsten einzelligen Verwandten umfasst. „Bilateria“ bedeutet „Zweiseitientiere“. Zu den Protostomia („Urmundtiere“) gehören z. B. die Häutungstiere (Ecdysozoa), die Lophotrochozoen (z. B. Weichtiere) und die Plattwurmartigen (Platyzoa), zu den Deuterostomia („Neumundtiere“) zählen vor allem die Rückensaitentiere (Chordatiere, darunter auch die Wirbeltiere) und die Stachelhäuter.

Die Bezeichnung „Urmundtiere“ rührt daher, dass bei diesen Tieren die erste embryonale Anlage einer Körperöffnung beim ausgewachsenen Tier zum Mund bzw. Maul wird. Bei den „Neumundtieren“ wird die erste Öffnung zum After, während sich der Mund erst später in der Entwicklung bildet.

Außerdem haben nach ERWIN (2020) vergleichende Studien von Holozoa-Gruppen gezeigt, dass das Ausmaß des regulatorischen Genoms des letzten gemeinsamen Vorfahren der Vielzeller weitaus größer hätte sein müssen, als noch vor einem Jahrzehnt angenommen wurde. Woher diese regulatorische Vielfalt beim letzten gemeinsamen Vorfahr der Metazoa evolutionär hätte kommen können, bleibt aber ein großes Rätsel (vgl. JUNKER 2014, 25, 27). Dagegen sei ERWIN (2020) zufolge der evolutionstheoretische gemeinsame Vorfahr der beiden Hauptgruppen der vielzelligen Tiere, der Proto- und Deuterostomier („Urmund“- und „Neumundtiere“; vgl. Abb. 4), morphologisch (vom Körperbau) weniger komplex gewesen, als in der Vergangenheit behauptet wurde. Daraus müsse man zwangsläufig schließen, dass eine mehrfach unabhängige umfangreiche Kooptation (Übernahme) von regulatorischen Modulen in den verschiedenen Gruppen der Bilateria (Zweiseitentiere, zu denen u. a. die Protostomier und Deuterostomier gehören; vgl. Abb. 4) angenommen werden.

Die letzte Schlussfolgerung lässt besonders aufhorchen. Denn es stellt sich unwillkürlich die Frage, wie ganze regulatorische Module gleichsam „neu verbaut“ werden konnten, und das auch noch mehrfach unabhängig. Ein solcher Vorgang würde aufwendige Abstimmungen erfordern. Solche Prozesse sind evolutionstheoretisch jedoch nicht zu erwarten, weil sie offensichtlich teleologischer Art sind, also ein anvisiertes Ziel voraussetzen. Ein Einbau von Modulen erfordert vorbereitete Konstellationen. Die vergleichenden Studien sprechen für eine (mindestens teilweise) freie Verfügbarkeit von regulatorischen Modulen. Aber nur ein Schöpfer ist frei; Evolution ist dagegen an natürliche Prozesse gebunden, die auch experimentell belegbar sein sollten.

Literatur

- DALEY AC, ANTCLIFFE JB, DRAGE HB & PATES S (2018) Early fossil record of Euarthropoda and the Cambrian Explosion. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 5323–5331.
- ERWIN DH (2020) The origin of animal body plans: a view from fossil evidence and the regulatory genome. *Development* 147, dev182899.
- ERWIN DH & VALENTINE JW (2013) The Cambrian explosion. The construction of animal biodiversity. Greenwood Village, Colorado.
- JUNKER R (2014) Zur neueren Diskussion über die kambrische Explosion. W+W Special Paper B-14-1, https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/b-14-1_kambrische_explosion.pdf.
- WATSON T (2020) The bizarre species that are rewriting animal evolution. *Nature* 586, 662–665.
- ZHANG X & SHU D (2021) Current understanding on the Cambrian Explosion: questions and answers. *Paläont. Z.* 95, 641–660.