

**‘Die Kambrische Explosion‘ (und die Geschichte des Lebens)** – Yvan Fischer  
(für Abbildungen und mehr Details, siehe angehängte PowerPoint-Präsentation)

Die Kambrische ‚Explosion‘ bezeichnet das in geologischen Maßstäben rasche Erscheinen makroskopisch sichtbarer, hochentwickelter, vielzelliger Tiere (**Metazoa**) in den flachen Schelfmeeren des frühen Kambriums (Beginn des Kambriums: 541 Millionen Jahren vor heute). Ein Großteil dieses Phänomens spielte sich in der 2. & 3. Stufe dieser geologischen Periode ab, d.h. etwa **zwischen 530 und 514 Millionen Jahren** (Ma). Die kambrische ‚Explosion‘ sollte wissenschaftlich korrekter als ‚**kambrische Radiation**‘ oder ‚**Große kambrische Biodiversifikation**‘ bezeichnet werden (etwa in Analogie zur adaptiven Radiation der Säugetiere nach dem plötzlichen Aussterben der bis dahin dominanten Dinosaurier und vieler anderer Tiergruppen an der Kreide-Tertiärgrenze).

Bezogen auf die gesamte Erdgeschichte, die mit der Bildung des Sonnensystems vor ca. 4,6 Milliarden Jahren begann, und auch auf die mindestens 3,5 Milliarden Jahre währende Geschichte von einzelligen Prokaryonten (Bakterien und Archaeen), stellt die kambrische Radiation ein **spätes und ‚plötzliches‘ Ereignis** dar (das am 17. & 18. November stattfand, wenn man die gesamte Erdgeschichte auf ein Kalenderjahr reduziert!).

Schon **Darwin** und seinen Zeitgenossen war dieses – gemessen an den bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts verfügbaren Fossilfunden – ‚plötzliche‘ Auftreten hochkomplexer und verschiedenartiger Organismen bekannt. Die Metazoa betraten die Bühne scheinbar unvermittelt, d.h. ohne ältere Vorstufen aus dem Präkambrium. Dies war nicht leicht mit dem Konzept einer langsamen, gleichmäßig fortschreitenden Evolution zu vereinbaren. Anders formuliert lautete die Frage: Lläuft die Evolution vielleicht doch nicht stetig, sondern in ‚Sprüngen‘ ab? (zur Beantwortung dieser Frage: siehe weiter unten).

Fangen wir aber mit der **Entdeckungsgeschichte der kambrischen Radiation** an. Schon 1698 wurde das erste kambrische Trilobiten-Fossil wissenschaftlich beschrieben. Es folgten bis zum Beginn des 20. Jahrhundert viele weitere Trilobitenfunde. Mit der Entdeckung des **Burgess-Schiefers** in den Kanadischen Rocky Mountains durch den Paläontologen Charles D. **Walcott** in 1909 wurde das Bild der kambrischen Tierwelt sehr deutlich erweitert, weil dort nicht nur Zigtausende Fossilien von weit über 100 verschiedenen Tierarten geborgen wurden, sondern auch, weil viele davon eine außergewöhnliche Weichteilerhaltung aufwiesen (und z.T. keine harten Teile besaßen).

Bis in das 21. Jahrhundert hinein wurden weltweit ca. 50 weitere solche Konservat-Lagerstätten entdeckt und intensiv erforscht (darunter insbesondere die sog. **Maotianshan-Schiefer** aus der südchinesischen **Chengjiang-Region**), in denen hervorragend erhaltene frühkambrische Fossilien zum Vorschein kamen.

So konnte nicht zuletzt durch die neuesten Ergebnisse der modernen Paläontologie das Bild einer formenreichen, z.T. bizarren, früh- bis mittelkambrischen Tierwelt bestätigt und erweitert werden, die in wenigen Jahrmillionen eine große Diversifikation aufwies: diese reichte von fast metergroßen Raubtieren wie **Anomalocaris** (das zu den Gliederfüßern = Arthropoden gehörte, wie etwa die modernen Insekten, Krebse, Spinnentiere, Tausendfüßer etc.) bis zu vielfältigen zentimeter-großen Bodenbewohnern wie **Marella** (einem Arthropoden), **Wiwaxia** (das möglicherweise zu dem Weichtieren = Mollusken gehörte), **Hallucigenia** (Arthropoden), **Aysheaia** (Lobopoden, verwandt mit den modernen Stummelfüßern), **Ottoia** (Eichelwürmer = Priapuliden), um nur einige der emblematischen kambrischen Arten zu nennen. Neben den Bodenbewohnern gab es auch Tiere mit

der Fähigkeit zu schwimmen, wie **Nectocaris** (einem frühen Vertreter der Kopffüßer = Cephalopoden) oder **Pikaia**, einem sog. Chordatier (Chordata, einer primitiven, mit Wirbeltieren eng verwandten Gruppe). Es wurden in kambrischen Schichten außerdem viele andere Vertreter heute noch lebender Tiergruppen identifiziert, wie z.B. der **Brachiopoden** (Armfüßer), **Echinodermen** (Stachelhäuter), **Polychaeten** (Vielborster), **Crustacea** (Krebstiere), aber auch einfacher gebauter Organismen wie **Cnidaria** (Nesseltiere) und **Porifera** (Schwämme). So werden im frühen Kambrium Vertreter der meisten heute bekannten Tiergruppen nachgewiesen, laut neuester Entdeckungen im Maotianshan-Schiefer sogar echte **Vertebraten** (Wirbeltiere), wie **Mylokunmingia** und **Haikouichthys**. Bei aller Vielfalt sollte erwähnt werden, dass bestimmte Tiergruppen im Kambrium zahlenmäßig das Bild dominierten, nämlich Arthropoden (wie heute noch!), Brachiopoden und Schwämme. Zu den ältesten Fossilien des Kambriums zählen die meist maximal millimeter-großen, kleinschaligen Fossilien (oder ‚**Small Shelly Fauna**‘), die z.T. Reste von ganzen Organismen, z.T. nur Fragmente größerer Skelett-Elemente darstellen. Mittlerweile wurden nahe der Basis des Kambriums (~541-537 Ma) aber auch makroskopisch sichtbare Tierfossilien wie die der Mollusken-ähnlichen **Halkieriidae**.

Mit Ausnahme der Nesseltiere und Schwämme, die radiär-symmetrisch gebaut sind, weisen alle kambrischen (und modernen) Tiergruppen einen **bilateral-symmetrischen Bauplan** auf, d.h. dass entlang einer Längsachse die rechte Körperhälfte ein Spiegelbild der linken Körperhälfte darstellt. Darüber hinaus weisen die bilateral-symmetrischen Tiere (**Bilateria**) prinzipiell einen Vorderteil (Kopf), einen Rumpf und einen Hinterteil auf. Bilateria besitzen i.d.R. einen durchgehenden Darm. Der Mund, sowie viele Sinnesorgane (u.a. Augen, Fühler) befinden sich meist im Kopfbereich. Viele Bilateria sind zumindest ursprünglich segmentiert, es kann aber bei Erwachsenen Tieren sekundäre Abweichungen von diesem Bauplan geben. Außerdem besitzen Bilateria ein Herz-Kreislaufsystem, sowie ein Nervensystem, was den außerordentlich hohen Grad ihrer Komplexität unterstreicht. Schließlich sei noch erwähnt, dass zumindest ein Teil (aber nicht die Mehrheit) der kambrischen Arten **harte Skelettelemente** wie Panzer, Schalen, Schutzplatten, Stacheln etc. besaßen, die als Abwehrmaßnahmen gegen Raubtiere interpretiert werden können. Diesem Umstand ist zu verdanken, dass man zuerst (bis zu Beginn des 20. Jahrhundert) praktisch nur Trilobiten mit ihren typischen Panzern geborgen hatte, während Fossilien mit Weichteilerhaltung – die sich naturgemäß nur unter sehr günstigen Bedingungen bilden und erhalten können – erst mit der Entdeckung außergewöhnlicher Fossil-Lagerstätten wie des Burgess-Schiefers gefunden wurden.

**Wie kam zur Entwicklung dieser hochkomplexen, vielfältigen Tierwelt** in einem so kurzen geologischen Zeitraum zustande? Diese Frage blieb bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts (und eigentlich noch eine Weile danach) ohne jede evidenz-basierte wissenschaftliche Erklärung. Auch heute noch gibt es sicher offene Fragen und viele kontrovers diskutierte Hypothesen, es zeichnet sich aber insgesamt ein zunehmend konsistentes Bild ab, nach dem die tiefen Wurzeln der kambrischen Explosion/Radiation weit ins Neoproterozoikum zurückreichen (541 bis über 600 Ma, vielleicht sogar über 800 Ma vor heute). Ein erster Schritt zu einem modernen, vollständigeren Verständnis der kambrischen Biodiversifikation war die Entdeckung ab 1947 von (mit dem bloßen Auge sichtbaren) Makrofossilien in den präkambrischen Schichten des **Ediacarums** (635-541 Ma). Zu den bekanntesten Fossilien des Ediacarums gehören die – taxonomisch noch ungeklärten – z.T. 50-100 cm großen farnwedel-förmigen, sesshaften **Charnia** und Verwandten, sowie die ‚luftmatrazen-ähnlichen‘ **Dickinsonia** und Verwandten. Paläobiochemische Untersuchungen von 2018 zeigten anhand von Lipidbiomarkern, dass Letztere eindeutig zum Tierreich gehörten. Neuere Fossilfunde (z.T. der letzten 10-20 Jahre) brachten in 550-560 Ma alten Ediacarum-Lagerstätten sogar mögliche Vertreter moderner Tierstämme wie der Polychaeten oder der Arthropoden zutage. Es wurden aus dem frühen

Ediacarum (>600 Ma) und davor (sogar aus dem frühen Neoproterozoikum vor 890 Ma) z.T. Mikrofossilien entdeckt, die als Spuren von Schwämmen interpretiert werden könnten. Im Einklang mit einem präkambrischen Erscheinen komplexer Metazoa deuten moderne genetische Untersuchungen (Gen- und Genomsequenzierungen, sowie sog. molekulare Uhren) darauf hin, dass die **gemeinsamen Vorfahren aller Metazoa schon im Cryogenium** (720-635 Ma) lebten, und möglicherweise sogar davor. Dass diese frühen Metazoa kaum als Fossilien zu finden sind, liegt vermutlich daran, dass diese Tiere sehr klein (d.h. maximal ein paar hundert µm lang) waren (wie etwa heutige Rädertierchen), keine harten Teile besaßen und verstreut, also noch relativ selten, waren.

Wie dem auch sei, hat im frühen Kambrium auf der Basis der o.g. präkambrischen Formen ohne Zweifel eine rasche, außergewöhnliche Biodiversifikation stattgefunden. Diese könnte durch eine Reihe von biologischen, ökologischen und geologischen Faktoren begünstigt worden sein. Hier seien nur ein paar Beispiele genannt: (i) das Auftreten von Raubtieren und das daraus resultierende, Evolutions-beschleunigende **Wettrüsten durch Räuber-Beute-Beziehungen**; (ii) die Erfindung einer grabenden Lebensweise mancher Tiergruppen (z.B. Würmer wie Polychaeten) und die damit verbundene **Bioturbation**, die durch eine Lockerung und Sauerstoffversorgung von Meeressedimenten neue Biotope schuf; (iii) das Auseinanderbrechen des Superkontinents **Rodinia** im Cryogenium, das in äquatorialen, tropischen, und auch in gemäßigten Zonen sehr große, lichtdurchflutete Schelfgebiete entstehen ließ (wo die primären Produzenten der Nahrungsketten, nämlich die photosynthetisch aktiven Cyanobakterien und Algen, gedeihen konnten); (iv) durch Rodinias Auseinanderbrechen nahm auch die vulkanische Aktivität und damit die Düngung der Meere zu, die wiederum das Algenwachstum und auch deren Sauerstoffproduktion verstärkte; im Einklang hiermit verzeichnet man besonders im Cryogenium und im Ediacarum ein starker, stetiger Anstieg der Sauerstoffkonzentration (im flachen Meerwasser und in der Atmosphäre), eine wichtige Voraussetzung für das Leben der komplexen Tiere in Schelfgebieten. Auch die globalen Vereisungen im Cryogenium (**Snowball Earth**) könnten aufgrund der verstärkten Kontinentalerosion durch Gletscher zur Düngung der Meere beigetragen haben.

Nun zurück zu der Frage nach dem **Lauf der Evolutionsgeschichte**, war er stetig oder sprunghaft? Die Antwort der modernen Wissenschaft, einschließlich der o.g. neuen Erkenntnisse über die kambrische Explosion/Radiation, lautet: Beides! Die Evolution im Sinne einer **Anpassung** an neue Bedingungen geschieht **stetig** (cf. Mutationen des SARS-CoV2-Virus zu besser übertragbaren Varianten!). Und die Evolution im Sinne von **Entwicklung zu größerer Komplexität** kann **unterschiedlich schnell** sein, es gibt **auch Phasen größerer Innovation**, die Kambrische Radiation ist vielleicht von allen die Spektakulärste gewesen.

**Zusammenfassend** können wir festhalten: (i) Die kambrische Radiation stellt zweifelsohne eine außergewöhnliche, schnelle Diversifikation der Metazoen dar; (ii) Dabei erschienen erstmals eindeutig identifizierbare Vertreter der meisten heute bekannten Tiergruppen (u.a. Arthropoden, Weichtiere, Brachiopoden u.v.m. und auch Wirbeltiere); (iii) Eine besondere Konstellation ökologischer, geochemischer und tektonischer Faktoren haben die kambrische Diversifikation der Tiere begünstigt; (iv) Aber: Neue Fossilfunde (aus dem Ediacarum - 635-541 Ma – und sogar davor), sowie Erkenntnisse der modernen molekularen Genetik, deuten darauf hin, dass die biologischen Wurzeln der kambrischen Explosion/Radiation weit ins Neoproterozoikum (vielleicht bis über 800 Ma) zurückreichen; (v) Der ‚Evolutions-Sprung‘ der kambrischen Radiation ist also real im Sinne der Diversifikation, aber lange nicht so abrupt, wie es vor 50 Jahren noch erschien.