

ne Merkmale früh in der Geschichte einer Formengruppe etabliert sind. Und da *Microraptor* in einen anderen evolutionären Ast als die Vögel gestellt wird, muss diese Art der Mauser mindestens zweimal unabhängig entstanden sein (Konvergenz). Das bedeutet aber auch, dass der Flug mithilfe von Federn bei *Microraptor* unabhängig von den Vögeln entstanden sein müsste (PEI et al. 2020) – aus evolutionstheoretischer Sicht unerwartet und unwahrscheinlich. Damit verlöre der Flug mithilfe von Federn seinen Status als evolutionäres Schlüsselmerkmal.

[CHATTERJEE S & TEMPLIN RJ (2007) Biplane wing planform and flight performance of the feathered dinosaur *Microraptor gui*. PNAS 104, 1576-1580 • KIAT Y, BALABAN A et al. (2021) Sequential molt in a feathered dinosaur and implications for early Paravian ecology and locomotion. Curr. Biol. 30, 3633-3638 • PEI R, PITTMAN M et al. (2020) Potential for powered flight neared by most close avialan relatives, but few crossed its thresholds. Curr. Biol. 30, 1-14.] R. Junker

■ „Total unsichere“ Phylogenie an der Basis der Vögel

Vögel gelten heute in der Fachwelt als „lebende Dinosaurier“. In den letzten Jahren wurden zunehmend vogeltypische Merkmale bei Dinosauriern aus der Gruppe der Theropoden* nachgewiesen. Daher gilt ein schrittweiser Übergang von Dinosauriern zu Vögeln als fossil gut belegt. Nur wenige Merkmale eignen sich demnach, um zwischen Vögeln und Dinosauriern zu unterscheiden. Man könne daher heute keine Grenze mehr zwischen Dinosauriern und Vögeln ziehen. Eine Analyse zahlreicher vogeltypischer Merkmale zeigt jedoch, dass diese in der Regel so unsystematisch auf verschiedene Theropodengruppen verteilt sind, dass evolutionstheoretisch eine mehrfach unabhängige Entstehung angenommen werden muss (Konvergenz*). Darüber hinaus sind nach aktuellen Phylogenien* viele dieser Merkmale nicht an der Basis der jeweiligen Gruppen, sondern bei jüngeren Formen ausgeprägt gewesen, womit sie nicht als Merkmale bei mutmaßlichen Vogelvor-

läufern gerechnet werden können (JUNKER 2019).

Die Vögel und die mit ihnen evolutionstheoretisch nächstverwandten Gruppen – die Deinonychosaurier (Troodontidae und Dromaeosauridae) – werden als Paraves* zusammengefasst. In einer aktuellen Überblicksarbeit über diese Gruppe gelangen AGNOLIN et al. (2019) zu Schlussfolgerungen, die die o. g. Ergebnisse von JUNKER (2019) bestätigen. Sie stellen fest, dass ein Konsens über die phylogenetischen Beziehungen der Paraves längst nicht erreicht ist. Der evolutionäre Übergang zu den Vögeln sei wesentlich komplexer gewesen als bisher angenommen und weitgehend verdeckt durch die mosaikartige Verteilung anatomischer Merkmale im Theropoden-Stammbaum (AGNOLIN et al. 2019, 2). Daher sei das Wissen über die Schritte zum Erwerb anatomischer und verhaltensbiologischer Merkmale, die zum Ursprung des Vogelfluges beitragen, noch immer ungewiss und im Wandel begriffen. Die Autoren stellen weiter fest, dass sie keine klare Abfolge von evolutionären Neuerungen finden konnten. Auch sei der Fossilbericht im Bereich des Übergangs von Dinosauriern zu Vögeln spärlich, und neue Fossilien würden benötigt, um die Lücken zwischen den verschiedenen Kladen (Zweige des Stammbaums) der Paraves zu schließen. Die Natur der frühen Radiation*, die unter den Paraves zu den Vögeln geführt habe, sei „völlig ungewiss“ („totally uncertain“), ebenso wie ihr Ursprungszentrum und ihre Ausbreitungswege (AGNOLIN et al. 2019, 22).

Es sei außerdem seit langem bekannt, dass viel „Experimentierung“ stattfinde, wenn eine neue adaptive Zone erreicht wird. Daher werde der Übergang von Dinosauriern zu Vögeln von zahlreichen Konvergenzen in eng verwandten Linien bei vogelartigen Merkmalen begleitet. Das Ausmaß der evolutionären Experimentierung und der Konvergenzen in Bezug auf „Vogelartigkeit“, die durch jüngste Entdeckungen, insbesondere aus China, deutlich geworden seien, hätten zur

Folge, dass ein Konsens über phylogenetische Beziehungen schwer zu erreichen sei (AGNOLIN et al. 2019, 22). Dies äußere sich auch darin, dass in den letzten Jahren verschiedene Hypothesen zur Phylogenie der Paraves vorgeschlagen wurden (AGNOLIN et al. 2019, 2).

Kommentar: Wenn wirklich eine Evolution abgelaufen wäre, würde man ein solches Ergebnis („totally uncertain“) nicht erwarten. Das Auftreten von Konvergenzen gilt als unwahrscheinlich, erst recht, wenn es vielfach vorkommt. Nicht umsonst konstruiert man Stammbäume so, dass möglichst wenige Konvergenzen angenommen werden müssen. Begriffe wie „Experimentierung“ oder „komplexe Evolution“ verschleiern diesen Umstand nur, ohne etwas zu erklären. Sie stehen für den Befund, dass die Merkmale der einzelnen Gruppen netzartig und nicht baumartig verbunden sind. Evolutionstheoretisch erwartet man aber baumförmige, nicht netzförmige Ähnlichkeitsbeziehungen unter den Gruppen der Lebewesen. Weitere Funde können diese Situation auch nicht mehr grundsätzlich auflösen, könnten aber das „Merkmalsnetz“ noch „dichter“ machen. Bestenfalls kommen durch neue Funde keine neuen netzförmigen Verbindungen mehr hinzu. Die Geschichte der Paläontologie gibt zu dieser Erwartung allerdings wenig Anlass. Diese Situation wiegt umso schwerer, als der mutmaßliche evolutive Übergang von

Glossar

Konvergenz: Zwei- bis mehrfache Entstehung weitgehend baugleicher Merkmale bei nicht abstammungsverwandten Formen.

Paraves: Vögel und ihre evolutionstheoretisch nächstverwandten Gruppen. Üblicherweise werden die Deinonychosaurier (Troodontidae und Dromaeosauridae) dazu gerechnet. Als gemeinsames (namengebendes) Merkmal der Deinonychosaurier („schreckliche Klaue“) gilt eine vergrößerte sichelförmige zweite Krallen.

Phylogenie: Stammbaumrekonstruktion

Radiation: Vielfache evolutionäre Aufspaltung einer Organismengruppe.

Theropoden: „Handräuber“, Gruppe zweibeiniger, meist räuberisch lebender Dinosaurier; aus dieser umfangreichen Gruppe sollen die Vögel hervorgegangen sein.

Dinosauriern zu Vögeln als eine der bestbegründeten Evolutionsabfolgen gilt.

[AGNOLIN FL, MOTTA MJ, BRISSON EGLI F, LO COCO G & NOVAS FE (2019) Paravian Phylogeny and the Dinosaur-Bird Transition: An Overview. *Front. Earth Sci.* 6:252. doi: 10.3389/feart.2018.00252 • JUNKER R (2019) Sind Vögel Dinosaurier? Eine kritische Analyse fossiler Befunde. Internet-Publikation. https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/b-19-4_dinos-voegel.pdf] R. Junker

■ Das Urknallmodell unter Zeitdruck

Quasare gehören zu den hellsten Objekten im Universum und sind deshalb auch über größte Distanzen auffindbar. Ein Quasar ist das aktive Zentrum einer Galaxie, bestehend aus einem Schwarzen Loch, welches von einer Gasscheibe umgeben ist. Durch die Gravitations-Anziehung kommt das Gas dem Schwarzen Loch immer näher und heizt sich dabei auf. Dadurch sendet es Licht unterschiedlicher Wellenlänge aus, das so hell sein kann, dass es das Licht aller Sterne in der Galaxie um ein Vielfaches übertrifft. Einige Quasare sind zusätzlich von zwei entgegengesetzten Jets begleitet, durch welche Strahlung und Materie in die Umgebung hinausgeschleudert werden.

Im Januar 2021 kündigte ein internationales Team von Astronomen an, dass es mit dem Quasar J0313–1806 den bislang am weitesten entfernten Quasar entdeckt habe (WANG et al. 2021). Dabei

wurde die Entfernung aus der Rotverschiebung des Lichtspektrums abgeleitet, welche für kosmologische Objekte mit zunehmender Distanz anwächst. Im Standardmodell der Kosmologie muss das Licht bereits kurz nach dem Urknall ausgesandt worden sein, damit es genügend Zeit zur Verfügung hatte, um die riesige Distanz zu unserer Milchstraße zurückzulegen. Die Autoren geben an, dass das beobachtete Licht den Quasar nur 630 Millionen Jahre nach dem Urknall und damit um 20 Millionen Jahre früher als den bislang entferntesten Quasar verlassen haben muss.

Mit Hilfe des Lichtspektrums konnten die Forscher grob abschätzen, wie schwer das Schwarze Loch des Quasars J0313–1806 damals gewesen sein muss. Überraschenderweise stellte es sich als sehr massereich heraus, und zwar $1,6 \pm 0,4$ Milliarden Mal schwerer als die Sonne. Dies wirft die Frage auf, wie ein solch massereiches Schwarzes Loch in vergleichsweise kurzen 630 Millionen Jahren entstehen konnte. Aus der kosmischen Hintergrundstrahlung schließt man nämlich, dass die Materie kurz nach dem Urknall extrem gleichförmig verteilt gewesen sein muss. Außerdem ist bekannt, dass Sterne und Schwarze Löcher nicht beliebig schnell wachsen können (sogenannte Eddington-Grenze). Je mehr Materie diese Objekte an sich ziehen, desto heller strahlen sie und desto mehr verdrängt die Strahlung das zum Wachstum benötigte Gas aus der Umgebung. Selbst wenn das Schwarze Loch mit maxi-

maler Geschwindigkeit gewachsen wäre, hätte der Quasar zur Zeit der ersten Sterne bereits eine Masse von über 10.000 Sonnenmassen haben müssen. Dieser Wert liegt aber jenseits der maximalen Masse der damaligen Schwarzen Löcher, bei denen man davon ausgeht, dass sie durch den Kollaps der ersten Sterne entstanden sind.

Welche Erklärungen gibt es dafür, dass bereits 630 Millionen Jahre nach dem Urknall ein so massereicher Quasar existieren haben könnte? Gegenüber *ScienceNews* schlug Xiaohui FAN, ein Mitautor der Studie, zwei Möglichkeiten vor (TEMING 2021). Entweder können Schwarze Löcher viel schneller wachsen als bisher gedacht oder es gibt einen anderen Mechanismus, durch den Schwarze Löcher im frühen Universum entstanden sein könnten. Dies könnte so abgelaufen sein, dass Schwarze Löcher nicht nur aus dem Kollaps von Sternen, sondern direkt aus dem Kollaps von Gas und Dunkler Materie entsprungen sein könnten (BEGELMAN et al. 2006). Gemäß FAN sind beide Möglichkeiten denkbar, aber keine konnte bisher nachgewiesen werden. Eine dritte Möglichkeit besteht darin, dass der Quasar nicht durch natürliche Prozesse, sondern auf übernatürliche Weise erschaffen worden ist.

Wie könnte sich die Frage nach der Entstehung der ersten Quasare weiter entwickeln? Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft dank neuer Technik noch weiter entfernte Quasare entdeckt werden. Nach dem Urknallmodell sollten diese umso masseärmer sein, je weiter sie entfernt sind. Es wird spannend sein zu beobachten, ob sich diese Erwartung erfüllen wird. Bei der Frage nach den Entstehungsmechanismen ist nicht zu erwarten, bald mehr Gewissheit zu haben. Da die vorgeschlagenen Mechanismen lediglich theoretisch oder mit Simulationen, jedoch nicht mit Laborexperimenten untersucht werden können, wird immer eine Unsicherheit bestehen bleiben. Im besten Fall könnten Beobachtungen den einen oder anderen Mechanismus mehr oder weniger plausibel machen.



Abb. 1 Künstlerische Darstellung des Quasars J0313–1806 (NOIRLab/NSF/AURA/J. DA SILVA, CC BY 4.0)