



Bayesian time series analysis of terrestrial impact cratering.

Bailer-Jones CAL. MNRAS, 416 (2), 1163–1180 (2011)

Hintergrund Man kann davon ausgehen, dass Kometen- und Asteroideneinschläge starken Einfluss auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde hatten. Bis heute wurden knapp 180 Einschlagkrater mit Durchmessern bis zu 300 km und Altern bis zu 2400 Millionen Jahren entdeckt. Forscher beschäftigten v.a. zwei Fragen: (i) besteht ein Zusammenhang zwischen dem Alter dieser Krater und dem Zeitpunkt großer Artensterben? (ii) Können solche hochenergetischen Einschläge durch bestimmte Ereignisse während der Bewegung unseres Sonnensystems durch die Milchstraße (z.B. Passieren der Galaktischen Scheibe oder von Spiralarmen) ausgelöst werden? Für beide Fragestellungen nimmt die Suche einer Periodizität von Einschlägen eine Schlüsselrolle ein. Hier herrschte bisher große Uneinigkeit: je nach Aufbereitung der Daten und statistischer Auswertung wurden diverse Perioden bis zu ~50 Millionen Jahren gefunden, die teilweise als nicht "signifikant" angezweifelt wurden; andere Autoren fanden überhaupt keine Hinweise auf Periodizität. In einem neuen, "fairen" Vergleich verschiedener Modelle für die Einschlagsrate versucht Bailer-Jones die Frage nach Periodizität zu klären.

Material und Methoden In der Studie wurden Krater aus der Earth Impact Database ¹ mit Durchmessern größer 5 km ausgewertet. Die meisten dieser Krater besitzen Unsicherheitsangaben der jeweiligen Alter, obwohl manche nur obere Grenzen (Höchstalter) besitzen. Deshalb werden mehrere Datensätze mit bzw. ohne Berücksichtigung von Höchstaltern getrennt ausgewertet; die Zahl der Krater im jeweiligen

Datensatz variiert zwischen 18 und 59. Der Autor vergleicht die Wahrscheinlichkeit für die Einschlagsdaten, die ihnen von verschiedenen plausiblen statistischen Modellen zugeordnet werden. Dabei werden sowohl Unsicherheiten in den angegebenen Altern berücksichtigt als auch ein Zuschneiden der Modelle auf die jeweiligen Daten vermieden; statt z.B. eine bestimmte Periode an die Daten anzupassen, wird der Frage nachgegangen, ob generell ein Modell mit periodisch variierender Einschlagswahrscheinlichkeit die Daten besser beschreibt als z.B. ein Modell, in dem Einschläge rein zufällig stattfinden.

Ergebnis Die Kraterdaten, welche sowohl Ober- als auch Untergrenzen ihrer Alter haben, sprechen mehr für eine beständige Abnahme der Einschlagsrate während der letzten 250 Millionen Jahre als für irgendeine Periodizität. Dasselbe Ergebnis liefert der Einschluss von Kratern, für die nur Höchstalter bekannt sind, für die letzten 150 Millionen Jahre. Eine Ausweitung der Analyse auf Krater, welche in den letzten 400 Millionen Jahren entstanden sind und Durchmesser von mindestens 35 km besitzen (n=18) favorisiert eine konstante Einschlagswahrscheinlichkeit. Insgesamt sprechen die Daten also nicht für ein periodisches Signal, sondern für rein zufällige Einschläge, deren Krater umso seltener entdeckt werden, je weiter der Einschlag zurück liegt.

Kommentar Man kann zu Recht fragen, was diese Studie mit der Entwicklung der Gattung Mensch zu tun hat. Die Ant-

¹<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/>

wort: zum Glück (noch) nichts! Dennoch wurde die biologische Entwicklung auf der Erde wohl stark durch Kometen- und Asteroideneinschläge beeinflusst, was die Frage nach der Regelmässigkeit solcher Ereignisse im weiteren Sinne für uns interessant macht. Zumal es nur eine Frage der Zeit ist, bis sich der nächste Einschlag ereignen wird – Jupiter z.B. wurde erst 1994 vom Kometen Shoemaker-Levy 9 getroffen, der dabei in bis zu annähernd 2 km große Bruchstücke zerbarst. Deshalb wird im Moment verstärkt nach noch unentdeckten Asteroiden und Kometen gesucht, die eventuell eine Bedrohung für die Menschheit darstellen könnten (Vereš et al. , 2009).

Die große Stärke dieser Studie liegt in dem “fairen” Vergleich verschiedener statistischer Modelle, die eine große Spanne von plausiblen Modellen für die Einschlagsrate abdecken: entweder periodisch, rein zufällig, zeitlich zu- bzw. abnehmend (ein zeitlicher Trend) oder ein zeitlicher Trend überlagert von einem periodischen Signal.² Durch Simualtion von künstlichen Einschlagsdaten, deren Wahrscheinlichkeit periodisch schwankt, zeigt der Autor zunächst, dass man in einem solchen Fall in der Tat ein periodisches Modell für wahrscheinlicher erklären und auch die wahre Periode herausfinden würde. Auf der anderen Seite ergibt sich kein falscher Schluss auf eine periodisch schwankende Einschlagswahrscheinlichkeit, wenn den Einschlägen eine Trend- oder gleichmässige Verteilung zugrunde liegt.

In ihrer Methodik unterscheidet sich die Arbeit stark von den Vorgängerstudien, welche die Entdeckung von diversen Perioden

berichteten, deren “Signifikanz” jedoch stark von mehreren Annahmen abhängt. Zum einen kann die Signifikanz einer Periode künstlich erhöht werden, wenn das Alternativmodell schlecht gewählt ist und andere, plausiblere Modelle unberücksichtigt bleiben. Auch das Anpassen einer bestimmten Periode an die Daten mit anschließendem Vergleich zu einem Modell, das keine freien Parameter zur Anpassung besitzt, erhöht künstlich die Plausibilität der vermeintlichen Periode. In Bailer-Jones’ Analyse wird keiner bestimmten Periode der Vorzug gegeben, sondern die Plausibilität für eine generelle Periodizität geprüft.³ Entsprechend wird nicht ein bestimmter zeitlicher Trend an die Daten angepasst, sondern die Plausibilität für einen zeitlichen Trend an sich berechnet und mit derjenigen für die anderen Modelle verglichen. Daraus lassen sich dann (mithilfe einer einfachen Formel, dem sog. Satz von Bayes) relative Wahrscheinlichkeiten für die beiden betrachteten Modelle berechnen, wobei auch berücksichtigt werden kann, wie wahrscheinlich man ein Modell *a priori* (also unabhängig von den Daten) im Vergleich zum anderen hält. Dies ist ein weiterer Pluspunkt gegenüber konventionellen statistischen Methoden, die meistens auf der Berechnung von p-Werten beruhen und damit keine Aussage über die tatsächliche Wahrscheinlichkeit eines Modells zulassen. Denn ein p-Wert gibt lediglich die Wahrscheinlichkeit an, bestimmte Daten oder eine aus ihnen berechnete Statistik zu erhalten, falls eine bestimmte Hypothese (z.B. dass die Einschlagwahrscheinlichkeit zeitlich konstant ist) zutrifft. Es ist *nicht* die Wahrscheinlichkeit für diese sog. “Nullhypothese”

²Zum Beispiel könnte nur ein Teil der Einschläge eine Periodizität aufgrund der Bahn unseres Sonnensystems durch die Galaxis besitzen, während der andere Teil rein zufällig durch die Dynamik innerhalb des Sonnensystems bestimmt wird.

³Dabei wird der Begriff “periodisch” auf die *Wahrscheinlichkeit* eines Einschlages bezogen statt auf einen Einschlag an sich; ein strikter zeitlicher Abstand von Einschlägen ist im astrophysikalischen Kontext von vornherein höchst unplausibel. Dazu bedient sich der Autor dem Bayes’schen Modellvergleich, bei dem Annahmen über mögliche Werte der Modellparameter, die man unabhängig von den Daten, also *a priori*, macht, berücksichtigt werden. Zum Beispiel könnte man annehmen: “Jede Periode zwischen 10 und 50 Millionen Jahren halte ich für gleich wahrscheinlich.” Dies ist dann aber ein anderes Modell als eines mit der Annahme, jede Periode zwischen 10 und 100 Millionen Jahren sei gleichwahrscheinlich! Denn die Annahme, wie die Modellparameter *a priori* verteilt sind, ist ein wichtiger Bestandteil der Modelldefinition.

und der p-Wert erlaubt auch keinerlei Aussage über die Wahrscheinlichkeit für eine Alternativhypothese.

Die Ergebnisse sprechen klar für eine zeitlich konstante Wahrscheinlichkeit für einen Einschlag innerhalb der letzten 400 Millionen Jahre. Dieses Ergebnis beruht auf der Einschränkung der Daten auf Krater mit Durchmessern größer als 35 km, womit dem Effekt von Verwitterungen oder Auffüllungen Rechnung getragen wird. Auf der anderen Seite können genau solche Verwitterungseffekte erklären, warum die Wahrscheinlichkeit eines Einschlages – gemessen anhand der gefundenen Krater mit Durchmessern von mindestens 5 km – abnimmt, je weiter zurück man blickt. Alternativ wäre es denkbar, dass dieser Trend real ist, da andere Studien eine Erhöhung der Einschlagsrate auf der Mondoberfläche während des Phanerozoikums (die letzten 542 Millionen Jahre) nahelegen (McEwen et al. , 1997).

Abschließend bleibt noch anzumerken, dass die Zahl der hier untersuchten Krater ($n \leq 59$) wahrscheinlich zu klein ist, um komplexere, den Einschlägen zugrundeliegende Modelle wie z.B. einen Trend, der von einem periodischen Signal überlagert ist, zu erkennen. Es bleibt also abzuwarten, ob künftige Kraterentdeckungen und/oder genauere Datierungen die hier gefundene Erklärung für Kometen- und Asteroideneinschläge als eher zufällige Ereignisse revidieren. Solange gibt es keinen Grund anzunehmen, dass ein bestimmter Aspekt der Bewegung unseres Sonnensystems durch die Milchstraße (wie das Passieren der Scheibe, in der die Sternendichte erhöht ist) ursächlich für das gehäufte Auftreten von Kometen- oder Asteroideneinschlägen ist – auch wenn es vielleicht in der Natur des Menschen liegt, sich eine solche Erklärung zu wünschen (siehe dazu auch den Übersichtartikel von Bailer-Jones , 2009).

Literatur

- Bailer-Jones CAL. The evidence for and against astronomical impacts on climate change and mass extinctions: a review. *International Journal of Astrobiology*, 8 (3): 213–239 (2009)
- McEwen AS, Moore JM, Shoemaker EM. The Phanerozoic impact cratering rate: Evidence from the farside of the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 102: 9231–9242 (1997)
- Vereš P, Jedicke R, Wainscoat R, Granvik M, Chesley S, Abe S, Denneau L, Grav T. Detection of Earth-impacting asteroids with the next generation all-sky surveys. *Icarus*, 203 (2): 472–485 (2010)