

Danksagung: Bei Thomas HERZOG und Reinhard JUNKER möchte ich mich herzlich für die Durchsicht und kritische Kommentare zu diesem Beitrag bedanken.

Literatur

- BOWRING SA, GROTZINGER JP, ISACHSEN CE, KNOLL AH, PEL-
ECHATY SM & KOLOSOV P (1993) Calibrating rates of early
Cambrian evolution. *Science* 261, 1293-1298.
- BOWRING SA, ERWIN DH, JIN YG, MARTIN MW, DAVIDEK K &
WANG W (1998) U/Pb zircon geochronology and tempo
of the End-Permian mass extinction. *Science* 280,
1039-1045.
- BOWRING SA & ERWIN DH (1998) A new look at evolutionary
rates in deep time: Uniting paleontology and high-pre-
cision geochronology. *GSA Today* 8 (9), 1-8.
- COMPSTON W, WILLIAMS IS, KIRSCHVINK ZHAN ZICHAO & MA
GUOGAN (1992) Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian
time-scale. *J. Geol. Soc.* 149, 171-184.
- DAVIDEK K, LANDING E, BOWRING SA, WESTROP SR, RUSHTON
AWA, FORTEY RA & ADRAIN JM (1998) New uppermost
Cambrian U-Pb date from Avalonian Wales and age of
the Cambrian-Ordovician boundary. *Geol. Mag.* 135,
303-309.
- ERDTMANN BD, STEINER M & SIEGMUND H (1994) Entwick-
lungsgeschichte des höheren Lebens an der Wende vom
Präkambrium zum Kambrium. *Aufschluss* 45, 26-35.
- FAURE G (1986) Principles of isotope geology. John Wiley &
Sons, New York.
- GOULD SJ (1991) Zufall Mensch. München.
- GROTZINGER JP, BOWRING SA, SAYLOR BZ & KAUFMAN AJ (1995)
Biostratigraphic and geochronologic constraints on
early animal evolution. *Science* 270, 598-604.
- HUGHES RA (1995) The durations of Silurian graptolite zones.
Geol. Mag. 132, 113-115.
- ISACHSEN CE, BOWRING SA, LANDING E & SAMSON SD (1994)
New constraint on the division of Cambrian time. *Geo-
logy* 22, 496-498.
- IRAELOSON C, HALLIDAY AN & BUCHARDT B (1996) U-Pb dating
of calcite concretions from Cambrian black shales and
the Phanerozoic time scale. *Earth Plan. Sci. Lett.* 141,
153-159.
- ODIN GS, GALE NH, AUVRAY B, BIELSKI M, DORÉ F, LANCELOT
JR & PASTEELS P (1983) Numerical dating of Precambrian-
Cambrian boundary. *Nature* 301, 21-23.
- ODIN GS, GALE NH & DORÉ F (1985) Radiometric dating of
Late Precambrian times. In: SNELLING NJ (ed) The chrono-
logy of the geological record. The Geological Society,
London, Memoir 10, 65-72.
- STEPHAN M (1994) Neuere Forschungen zur Lebewelt im
Kambrium und Jung-Präkambrium – ein Überblick.
Stud. Int. J. 1, 4-11.
- TUCKER RD, KROGH TE, ROSS RJ & WILLIAMS SH (1990) Time-
scale calibration by high-precision U-Pb zircon dating
of interstratified volcanic ashes in the Ordovician and
Lower Silurian stratotypes of Britain. *Earth Plan. Sci.
Lett.* 100, 51-58.

KURZBEITRÄGE

Unverstandene Kometenentstehung?

Obwohl sich Komet Halley (Abb. 1) längst wieder in die Tiefen des Planetenraumes zurückgezogen hat, sorgen seine Daten weiter für Überraschungen. So könnten Ergebnisse von spektroskopischen Staubbmessungen zu einer neuen Vorstellung von der Entstehung von Kometen führen.

NUTH et al. (2000) berichten von kristallinen Olivin-Staubteilchen (rhombisch-bipyramidal aufgebaute Mineralien aus Fe, Mg und SiO₂ als Hauptkomponenten), die 1989 bei der Wiederkehr von Halley (Abb. 1) gemessen wurden. Dies würde fordern, daß zumindest ein Teil des Kometen viel näher an der Sonne entstand als bisher angenommen, da Olivine nur relativ sonnennah entstehen können (vgl. Abb. 2).

Kometen galten bisher als Objekte, die aus volatilem (d. h. leicht flüchtigem) Material am Rande unseres Planetensystems entstanden sein sollen (vgl. Abb. 2). Sie sollen sich für die meiste Zeit in großer Sonnenentfernung aufgehalten haben, sozusagen im Tiefkühlfach des Planetensystems.

Aufgrund von Messungen am Kometen Halley wird davon ausgegangen, daß er als kurzperiodischer Komet mit seinen Eisanteilen im Bereich der großen Planeten zwischen Jupiter und Neptun ent-

standen ist; danach sollte er durch irgendwelche gravitativen Kräfte in kältere Bereiche weit jenseits des Pluto transportiert worden sein. Nur dann, wenn Kometen auf ihrer Bahn ins Innere des Sonnensystems gebracht werden, sollten die leicht flüchtigen Elemente abdampfen und zusammen mit dem im Eis eingelagerten Staub in Form des Plasma- bzw. Staubschweifs sichtbar werden. Allerdings würde man mit dieser Entstehungsvor-

Abb. 1: Komet Halley (NASA)



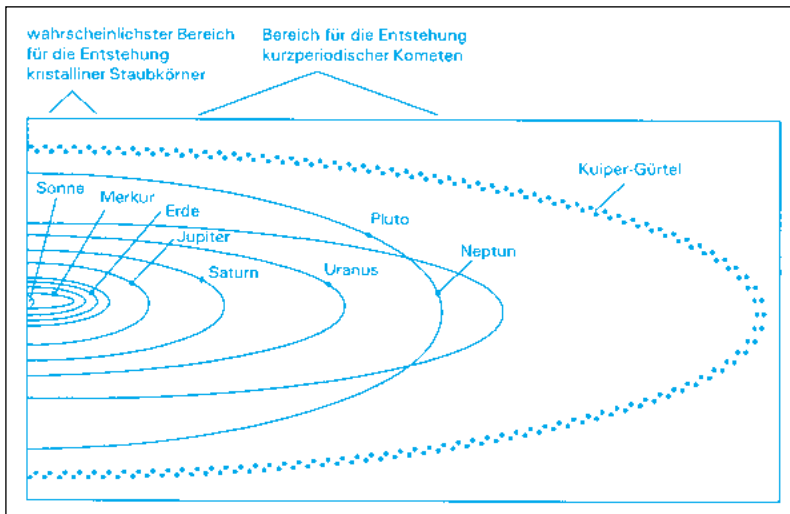


Abb. 2: In Kometen eingelagerter kristalliner Staub entstand bevorzugt im inneren Teil des Planetensystems. Er mußte deshalb über einen noch unbekannten Mechanismus in die Kometenentstehungszone kurzperiodischer Kometen transportiert worden sein.

stellung amorphen und nicht kristallinen Staub erwarten, da in diesem großen Abstand von der Sonne nicht genügend Energie vorhanden ist, um die im Allgemeinen amorphen Staubkörner im äußeren Bereich der interplanetaren Staubwolke in kristalline Olivine in diesen Mengen und den relativ kurzen Zeiträumen seit ihrer Entstehung umzuformen.

Um kristallinen Staub mit seinen geordneten internen Strukturen zu bilden, bedarf es mehr Energie, sprich größerer Sonnennähe. Amorphe Stäube galten im oben beschriebenen Sinn als früheste Erinnerung an die Entstehungsphase des Planetensystems, während kristalline Stäube erst entstehen konnten, nachdem es die Sonne als effektive Energiequelle gab. Aus dem molekularen solaren Urnebel sollte nur amorpher Staub hervorgegangen sein, während der kristalline sich erst später gebildet haben mußte. Aus der Sicht der Veränderung des interplanetaren Staubs durch Sonnenenergie mußte dies heißen: Der allgegenwärtige amorphe Staub der interplanetaren Staubwolke konnte direkt in die sich formenden Kometen eingelagert werden, wogegen sich Kometen unter Entstehungsbedingungen kristallinen Staubes nicht bilden können. Allerdings werden die Temperaturen, die zur Kristallisation amorphen Staubes gebraucht werden, in Sonnennähe gefunden. Damit läßt sich die Beobachtung kristallinen Staubes in Kometen auf ein Transportproblem kristalliner Stäube reduzieren.

Aus Laboruntersuchungen ist bekannt, daß die Rate der Umwandlung von amorphen Stäuben in kristalline extrem temperaturabhängig ist (HALLENBECK et al. 2000). Bei den niedrigen Temperaturen, bei denen Wassereis und andere volatile Elemente ausfrieren, bedarf es für die Umwandlung eines amorphen Silikat-Staubteilchens ein Mehrfaches des Alters des Planetensystems, um es in ein kristallines Olivin-Staubteilchen umzuwandeln.

Es wird deshalb angenommen, daß die Olivin-Anteile des Staubes bei Halley aus geringerer Sonnenentfernung stammen als dessen Eise. Mögli-

cherweise hat sich Olivin in der interplanetaren Staubwolke in Sonnennähe geformt, wurde dann in äußere Bereiche transportiert, wo Kometen entstehen sollen, und in diese eingelagert. Allerdings ist nicht verstanden, wie der Prozeß tatsächlich abgelaufen sein könnte, sprich welcher Mechanismus einen Materialfluß in die äußeren Bereiche des Planetensystems hätte bewirken sollen mit all den Konsequenzen auf Kometen, aber auch auf Asteroiden und Monde (z. B. deren chemischer Zusammensetzung). Die Untersuchungen deuten an, daß die Theorie der Kometenbildung und damit der Dynamik des protosolaren Nebels revidiert werden müssen.

Müssen die Theorien der Kometenbildung und der Dynamik des protosolaren Nebels revidiert werden?

Nach bisherigen Vorstellungen zur Entwicklung des solaren Nebels wurden die gebildeten Moleküle als Funktion der Zeit zunehmend komplexer: Die Sonne lieferte die Energie, und die vorhandenen Staubkörner fungierten als entsprechende Katalysatoren. Deshalb sollten alte Kometen mit einer hohen Konzentration amorpher Staubkörner relativ einfache organische Moleküle haben, während junge Kometen mit ihrem kristallinen Staub eine größere Komplexität organischer Moleküle erwarten lassen (vgl. NUTH 2000).

Fazit. Laboruntersuchungen zeigten, wie langsam Staub unter den gegebenen Bedingungen kristallisiert, und es wurde klar, daß Halley so nicht entstanden ist, wie es sich die Astronomen bisher vorgestellt hatten. Jedenfalls wäre die Zeit viel zu kurz, um z. B. bei den Sonnenumrundungen des Kometen diese Umwandlung zu erwarten.

Daraus ergeben sich folgende grundsätzlichen Fragen: Wurden Kometen zu unterschiedlichen Zeiten und/oder an unterschiedlichen Orten gebildet? Ist die Struktur der Staubkörner, die sie in Sonnennähe freisetzen, ein Hinweis auf ihr Alter? Ist diese Methode für Altersbestimmung geeignet?

Norbert Pailer

Literatur

- HALLENBECK S. NUTH JA & NELSON RN (2000) Evolving optical properties of annealing silicate grains: From amorphous condensate to crystalline minerals. *Astrophys. J.* 535, 247-255.
NUTH JA, HILL HGM & KLETETSCHKA G (2000) Determining the ages of comets from the fraction of crystalline dust. *Nature* 406, 275-276.