

- die Anwesenheit von organischem Material an sich läßt nicht auf einen biogenen Ursprung schließen; PAKs wurden auch in anderen Arten von Meteoriten gefunden;
- das kleinste terrestrische Mikrofossil ist 100 mal größer.

Es tauchte die Frage auf, ob so kleine Gebilde groß genug sind, um alle Erbinformationen unterzubringen und ob sie überhaupt zu einem Stoffwechselprozeß fähig sind.

- Es ist wichtig festzustellen, ob es sich nicht um mineralogische Pseudofossilien handelt, die biologischen gleichen;
- es ist keine Zellwand in der betreffenden Struktur nachgewiesen worden;
- wurden die Karbonatanteile bei niedriger oder hoher Temperatur gebildet?

HARVEY & MCSWEEN (1996) diskutieren 650 °C; dann müßte besagte Evidenz als Kontamination betrachtet werden.

Weitere Untersuchungen galten der Struktur der Magnetit-Teilchen, die zusammen mit Eisensulfid die Karbonatkügelchen überziehen. Sie entstehen meist anorganisch, werden auf der Erde aber auch von Bakterien ausgeschieden. Allerdings unterscheiden sie sich in der Struktur. Im Meteoriten sind sie wendeltreppenartig geformt. Diese Form ist bei irdischen Magnetiten selten; bei den von Organismen gebildeten Formen kommt sie überhaupt nicht vor.

Das Team von McKAY reagierte auf diese Kritik mit der Feststellung der Notwendigkeit weiterer Forschungen. An oberster Stelle steht die Suche nach Zellwänden besagter Mikrofossilien. SCHOPF äußerte zusätzlich den Wunsch nach Evidenzen einer Mikro-Organismenpopulation, deren Chemie deutlich unterschiedlich ist zu dem Material, in dem sie eingebettet ist.

Ausblick. Die Ankündigung von möglichem Leben auf dem Mars hat sowohl in weiten Fachkreisen als auch in der Öffentlichkeit für eine gewisse Aufregung gesorgt. Eine Bestätigung dafür, daß Lebensspuren außerhalb der Erde gefunden wurden, könnte langfristig einen größeren Umschwung im Bewußtsein der Menschheit auslösen, als sie Kopernikus mit seiner Erkenntnis verursachte. Auf der anderen Seite könnte ein negativer Ausgang beim Mars ebenfalls erhebliche Auswirkungen haben. Es könnte bedeuten, daß Leben an ganz besondere Konditionen gebunden ist. In diesem Sinne ist F. TIPLER der exponierteste Vertreter, der das Leben auf unseren Planeten beschränkt sieht. Trotz langjähriger Anstrengungen von SETI (Search for Extra-terrestrial Intelligence), ist die Suche nach extra-terrestrischem Leben bis heute erfolglos geblieben. Aber es ist offensichtlich, daß die ersten möglichen Hinweise auf eventuelles Leben auf dem Mars erst der Anfang einer viel größeren Arbeit ist, die noch bevorsteht.

Norbert Pailer

Literatur

- DAY DA (1996) Life on Mars? *Spaceflight 38*, 327-330
- HARVEY RP & MCSWEEN HY (1996) A possible high-temperature origin for the carbonates in the martian meteorite ALH84001. *Nature 382*, 49-51.
- McKAY DS et al. (1996) Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001, *Science 273*, 924.
- GUTIERREZ JL (1996) Exploration and preservation of Mars, *Spaceflight 38*, 331-333.
- MELOSH HJ (1994) *The Planetary Report*, 15, N4, p. 16-19.

Aktuelle Ergebnisse der Erkundung des Jupitersystems

Abb. 1: Erstes Bild des Jupiter-Staubrings durch Voyager: Die Kamera schaut zurück auf Jupiter, dessen Atmosphäre gerade vom Licht der aufgehenden Sonne erreicht wird. Der Blickwinkel erfaßt nur den inneren Teil des Staubrings, der weiter außen eine haarnadelförmige Struktur bildet.

1. Voyager-Nachlese: Staubaufenthaltsdauer im Jupiterring war um Faktor 100 zu hoch geschätzt

Der mächtige Staubring des Saturn ist uns seit seiner Entdeckung durch Chr. HUYGENS im Jahre 1659



bekannt. Die Staubringe anderer Gasriesen unseres Planetensystems konnten erst durch in situ-Messungen der Raumsonden *Voyager 1* und *2* eindeutig bestätigt werden. Während um Saturn Gesteinsbrocken von bis zu 10 Metern ihre Kreise ziehen, sind es bei Jupiter Staubkörnchen von typischerweise 10 Mikrometer Durchmesser.

Der in drei Struktureinheiten gegliederte Jupiter-Staubring mit einem Radius von ca. 120.000 Kilometern, was grob dem 20fachen des Erdradius entspricht, ist ein recht zartes Gebilde. Dies wird auch aus Abb. 1 ersichtlich, die von *Voyager* stammt. Seine ganze Materie zusammengepackt ergäbe einen Würfel von 40 Meter Kantenlänge (KASPER 1996).

Genau diese sehr filigrane Struktur gibt den Astrophysikern Rätsel auf, denn die Bahnen von mikroskopisch kleinen Teilchen lassen sich sehr



Jupiter	Io	Europa	Ganymed		Kallisto
778.300.000	421.000	670.000	1.070.000	– durchschnittlicher Abstand (km) –	1.880.000
142.800	3.630	3.140	5.260	– Durchmesser (km) –	4.800

Abb. 2: Durchmesser und Abstände der vier großen Jupitermonde. Bei Jupiter ist der mittlere Abstand zur Sonne angegeben, bei den Monden der Abstand zu Jupiter.

leicht stören. Allein der Strahlungsdruck und elektromagnetische Kräfte in der Magnetosphäre des Jupiter können den Bewegungsablauf der meisten Teilchen in relativ kurzer Zeit so verändern, daß sie aus der Bahn geworfen werden und auf Jupiter zuspieren.

Der Ring kann also nicht statisch sein. Er benötigt eine ergiebige Staubquelle, vor allem, wenn man die zugrundegelegten großen Zeiträume berücksichtigt. Dafür kommt eigentlich nur der Mechanismus von Impaktvorgängen in Frage. Projektile treffen auf einen größeren Körper, und der bei den Einschlägen erzeugte Auswurf bildet das Material für den Ring. Dabei darf der „größere Körper“ nicht zu groß sein (höchstens einige Zehner Kilometer), weil sonst der freigewordene Staub größtenteils gravitativ an ihn gebunden bleibt und für den Ring nicht zur Verfügung steht. Andererseits ist damit auch das Reservoir für den Ring äußerst begrenzt. Tatsächlich wurden durch genauere Analysen am äußeren Rand des Rings zwei kleinere Monde, Adrasthea und Metis, ausgemacht. Damit wäre eine – wenn auch zeitlich limitierte – Quelle gefunden.

Durch ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen den aus den Vulkansloten des Jupitermondes Io ausgestoßenen Teilchen und deren Aufladeprozess durch Photoelektronen aus Jupiters Ionosphäre, gelangten die Astronomen zu einer Umdeutung der Entstehung negativ geladener Staubteilchen (HORANYI & CRAVENS 1996). Legt man diesen Prozess zugrunde, so ist eine stärkere negative Aufladung zum Inneren der Ringscheibe hin zu erwarten.

Zudem wird der Staub – begünstigt durch die niedrigere Dichte nach außen – von der UV-Strahlung der Sonne zunehmend photoionisiert und positiv geladen. Da also die positive Ladung nach außen zunimmt, resultiert ein positiver radialer Gradient, der die Trajektorien der Teilchen entscheidend beeinflusst. Verfolgt man unter diesen Annahmen die Bahnbewegung der Teilchen, so folgert KASPER weiter, kommt man zu erstaunlichen Ergebnissen: Die Lebensdauer t beträgt in Abhängigkeit von der Größe ca.

$$t = 100 a^3$$

mit a : Radius in Mikrometern. Für kleine Teilchen bedeutet dies eine Aufenthaltsdauer im Ringsystem von weniger als einem Jahr, während frühere Schätzungen sich auf 100 Jahre und mehr beliefen.

Verschiedene Beobachtungen, wonach der Ring sporadisch eine azimuthale Helligkeitsasymmetrie aufweist, stützen die Annahme der kurzen Aufenthaltsdauer der Partikel.

2. Neueste Ergebnisse der Raumsonde Galileo

Neue Einblicke in Jupiters Mondwelt

Noch ungefähr dreieinhalb Jahrhunderte nach ihrer Entdeckung durch GALILEI im Jahre 1610 blieben die vier größten Monde des Jupiter in den Teleskopen der Astronomen kleinste Lichtscheibchen, die selbst bei besten Beobachtungsbedingungen kaum etwas von ihren Geheimnissen preisgaben. Abb. 2 zeigt Jupiter zusammen mit seinen vier größten Monden in maßstäblichen Abstandsskalen.

In den 70er Jahren unseres Jahrhunderts rückten neue Beobachtungstechniken zur spektroskopischen Bestimmung der Oberflächen der vier Galileischen Monde Io, Europa, Ganymed und Kallisto wieder ins aktuelle Blickfeld der Planetenforscher. Genauere Vermessungen der Durchmesser wurden möglich. Wolken aus neutralem Natrium und ionisiertem Schwefel wurden auf Io entdeckt. Die Vorbeiflüge der amerikanischen Raumsonden Pioneer 10 und 11 in den Jahren 1973 und 1974 ermöglichten erste in-situ-Messungen der Magnetosphären in Jupiters Umfeld. Daran schlossen sich 1979 die Vorbeiflüge der beiden Voyager-Sonden an, die uns anstelle kleiner Lichtscheibchen neue Welten vor Augen führten, wie sie bislang weder gesehen noch so erwartet worden waren. Die vier größten, unmittelbar benachbarten Monde zeigten trotz gemeinsamer Geschichte völlig unterschiedli-

Abb. 3: Ansicht der vier Galileischen Monde, deren unterschiedliche Eigenschaften für manche Aufregung sorgten:

- Io als der vulkanisch aktivste Körper im Planetensystem
- Europa mit der glattesten Oberfläche und Hinweisen auf Wasser unter dem Eispanzer
- Ganymed mit der gefalteten Eisoberfläche
- Nur Kallisto traf mit seiner vernarbten Oberfläche die allgemeinen Erwartungen



Abb. 4: Nippur-Sulcus-Region, die 54x90 km groß ist. Die ursprüngliche Oberfläche wurde durch Faltungen verändert. Der querverlaufende Strom ist möglicherweise ein vulkanischer Wasser-Eis-Fluß.



che Gesichter: Io erwies sich trotz ihrer großen Entfernung von der Sonne als der vulkanisch aktivste Körper im Planetensystem. Der nächste Mond, Europa, zeigte mit der glattesten Oberfläche im Planetensystem eine außergewöhnlich junge Oberfläche: ein gewaltiger Panzer aus riesigen Packeisfeldern, die durch Thermalrisse abgetrennt sind. Sein Nachbar, Ganymed, überraschte mit ganzen Strängen überdimensionaler Furchen. Nur der äußerste Mond, Kallisto, hatte die stark durch Impaktvorgänge geprägte Oberfläche, die man erwartete. Abb. 3 zeigt die vier Monde, wie sie sich als Ergebnisse der Voyager-Sonden darstellten

Die vier größten, unmittelbar benachbarten Monde zeigten trotz gemeinsamer Geschichte völlig unterschiedliche Gesichter.

In jüngster Zeit haben das Hubble-Weltraumteleskop und seit Dezember 1995 die Jupiter-Sonde *Galileo* uns Einblicke in weitere Details gewährt, über die hier – ausgehend von Ergebnissen der Voyager-Sonden – kurz berichtet werden soll.

Ergebnisse der Jupiter-Atmosphärensonde

Im Dezember 1995 tauchte nach einer sechsjährigen Reise das erste von Menschenhand gemachte Objekt in die Jupiter-Atmosphäre ab. Es war der bisher gewalttätigste Akt an einer Raumsonde: Mit etwa 180.000 km/h kam die Sonde ein klein wenig langsamer an der Jupiter-Atmosphäre an als die Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levi im Jahre 1994. In den ersten Minuten nach dem Aufprall heizte sich die Atmosphäre nahe der Sonde auf eine Temperatur auf, die doppelt so hoch war wie die Temperatur der Sonnenoberfläche. An dem abschmelzenden Schutzschild bauten sich Kräfte von einer 230fachen Erdbeschleunigung auf. Hätte die Sonde den vorgesehenen 3°-Korridor nicht getroffen, wäre sie entweder an der Atmosphäre abgeprallt oder verbrannt. In diesem Fall gelang

die 170 km tiefe „Höllenfahrt“, während der die Wissenschaftler mit einem 57minütigen Datenstrom beglückt wurden, auf den sie 20 Jahre lang gewartet hatten:

- Entdeckung eines neuen Strahlungsgürtels als Äquivalent zum van-Allen-Gürtel der Erde, allerdings 10mal stärker.

- Jupiter ist sehr viel trockener als prognostiziert: *Voyager* hatte einen doppelt so hohen Wasseranteil als der der Sonne ermittelt; Untersuchungen der Shoemaker-Levi-Einschläge führten gar zu einem zehnfachen Anteil, während die *Galileo*-Sonde nur eine der Sonne vergleichbare Menge nachwies. Möglicherweise sind die unterschiedlichen Meßergebnisse Abbild einer regional unterschiedlichen Verteilung des Wasserdampfgehaltes in Jupiters Atmosphäre.

- Blitze in der Jupiteratmosphäre sind drei- bis zehnmal seltener, aber etwa zehnmal stärker (sowohl was die Größe als auch die elektrische Ladung betrifft) als bei der Erde.

- *Galileo*-Sonde sah Stürme, die die Hurrikans der Erde als leichte Brisen erscheinen lassen. Sie nahmen mit der Tiefe an Stärke zu, so daß ihr Verhalten eher den Vorgängen in Sternen als Gasmasen in einer Planetenatmosphäre ähnelten.

- In anderer Hinsicht ist Jupiter sehr Stern-untypisch. Nach entwicklungstheoretischen Gesichtspunkten sollten die mächtigen Atmosphären der Gasplaneten die Zusammensetzung eines Urgannebels ähnlich widerspiegeln wie die Sonne. Bei Jupiter wurde jedoch eine Anreicherung von Helium um Faktor zwei gemessen, was man mit dem Ausfall von sog. Droplets zusammenbringt, die zu einer Anreicherung in größeren Tiefen führen sollten.

Ganymed – Ungeahnte Details und ein Magnetfeld. Gleich die ersten Bilder des Jupitermondes Ganymed machten es klar: *Galileo* gewährt uns Einblicke in eine bizarre Eiswelt. Ganymeds Landschaften, geformt alleine aus Wassereis und Geröll, sind vielgestaltiger als geahnt. Der Kontrast ist unerwartet hoch. In Abb. 4 steht die Sonne etwa 70° hoch und trotzdem ist die Topographie bestens zu sehen. Auflösungen bis 70 Meter wurden erreicht. Wo *Voyager* nur glatte Gebiete sah, die man für frische „Eislava“ hielt, zeigt *Galileo* eine Reihe von Einschlagskratern, womit also gerade diese Gebiete relativ alt sein sollten. Damit wird die geologische Geschichte Ganymeds auf den Kopf gestellt. Nun scheinen die Faltungen der jüngere Prozeß zu sein. Aber die ersten superscharfen Bilder waren nicht einmal das bedeutendste Resultat: Zwei andere Instrumente haben eindeutige Anzeichen eines Magnetfelds samt „Minimagnetosphäre“ bei Ganymed festgestellt. Das Plasmawellen-Spektrometer registrierte 45 Minuten lang einen „starken Radiolärm“, und das Magnetometer sah die Gesamtfeldstärke, die bis dahin ausschließlich vom Magnetfeld des Jupiter bestimmt war, auf das Fünf-

fache hochschnellen. Als *Galileo* den Mond passiert hatte, kehrten die Feldstärke und die -richtung zu den alten Werten zurück. Damit hat ein Mond ein eigenes Magnetfeld und einen eigenen Strahlungsgürtel, also eine Magnetosphäre, innerhalb der mächtigen Jupitermagnetosphäre. Der Anstieg geladener Teilchen um Faktor 100 zeigt an, daß Ganymed auch eine Ionosphäre hat, was wiederum die Existenz einer dünnen Atmosphäre nahelegt (Fischer 1996a).

Woher könnte nun ein Magnetfeld für einen Mond stammen? Selbst wenn der Mond sich in jungen Jahren einen Eisenkern zugelegt haben sollte, müßte es Ganymed an innerer Wärme fehlen, um heute einen magnetfelderzeugenden Dynamo zu betreiben. Denn die normale Wärmequelle im Innern von festen Himmelskörpern ist die Radioaktivität und die genügt bei Ganymed dazu bei weitem nicht! Deshalb bringt man das Magnetfeld mit der Vorstellung eines salzigen Ozeans unter dem Eispanzer zusammen. Da aber die elektrische Leitfähigkeit von Salzwasser viel geringer ist als die von Metall, müßte der Ozean rasant umgerührt werden, wozu die innere Wärme als Energiequelle ebenfalls nicht ausreicht. Vielleicht spielen hier Gezeitenefekte eine Rolle, mit denen man auch los Vulkanismus erklärt (PAILER 1996).

Europa – Wasser unter dem Eispanzer? Zukünftige Vorbeiflüge von *Galileo* sollen Bildauflösungen bis 26 Meter pro Pixel verbessern. Aber schon die ersten Impressionen in Abb. 5 gaben Anlaß zu weitgehenden Mutmaßungen: Auf Europa soll es einen 10-15 Kilometer dicken Eispanzer geben; darunter 60-80 Kilometer dickes, „warmes Eis“, sprich Wasser, darin sogar mögliche Lebensformen (FISCHER 1996b).

Die Eisoberfläche der Europa, die so groß ist wie der Erdmond, ist von einem Gewirr von langen, dunklen Bändern mit weißen „Mittelstreifen“ durchzogen wie dies exemplarisch Abb. 6 zeigt. Die Streifen entpuppen sich bei genauerem Hinsehen als Lücken zwischen den einzelnen Eisschollen. Da aus diesen Strukturen auf eine Bewegung der Eisschollen geschlossen wird, vermuten die Astronomen darunter ein Schmiermittel in Form eines zähflüssigen Mediums. Die Bänder mit Mittelstreifen werden in diesem Sinne folgendermaßen interpretiert: Irgendwo kommt es zu einem Spannungsriß. Der Druck unter der Eisscholle entlädt sich, indem fontänenartig Wasser im Bereich des Risses nach oben dringt und silikatisches Material aus der Tiefe nach oben reißt. Daher die dunklen Flanken. Letztlich läuft dann klares Wasser nach, das den



Abb. 5: Gesamtansicht des Jupitermondes Europa mit der glattesten Oberfläche im Sonnensystem. Sie besteht aus einem mächtigen Eisschild, der von bis zu 3000 Kilometer langen Spannungsrissen durchzogen ist. Eine auffällige Signatur bildet der 50 Kilometer große Krater Pwyll (Keltischer Gott der Unterwelt)

Graben von unten her auffüllt. Bislang wilde Spekulation. Der beste Nachweis wäre die Aufnahme eines entsprechenden Geysir-Szenarios.

Dieser Vorgang funktioniert allerdings nur dann, wenn eine entsprechende Energiequelle vorhanden ist. Sollte der Mechanismus, der den Vulkanismus auf Io betreibt und das Magnetfeld bei Ganymed ermöglicht, auch für Ozeane unter Europas Eispanzer verantwortlich sein?



Abb. 6: Oberflächendetails des Jupitermondes Europa. Der mächtige Eispanzer wird von langen Spannungsrissen durchsetzt, deren Struktur auf mögliches Wasser unter dem Eis schließen läßt.

Noch interessanter sind die Spekulationen über den „Meeresboden“: Da Europas Wärme von innen kommt, dürfte sie mit warmen Quellen übersät sein – vielleicht vergleichbar mit den unterseeischen vulkanischen Schloten, in deren Umgebung nach spekulativen Szenarien auch irdisches Leben seinen Anfang genommen haben soll. Manche Forscher wagen deshalb sogar die Vermutung, daß Europa ein vielversprechenderer Platz sei, um mögliche Lebensspuren zu finden, als der Mars.

Norbert Pailer

Literatur

- FISCHER D (1996a) Galileo bei Ganymed, *Sterne und Weltraum* 10/1996, 720-723.
- FISCHER D (1996b) Flüssiges Wasser auf dem Jupitermond Europa, *Sterne und Weltraum* 11/1996, 816-817.
- HORANYI M & CRAVENS TE (1996) The structure and dynamics of Jupiter's ring. *Nature* 381, 293-295.
- KASPER M (1996) Jupiters feiner Ring. *Sterne und Weltraum* 12/1996, 903.
- PAILER N (1996) Faszination Weltraum. Bilder vom Rand der Welt. Neuhausen.