

Planetenbildungsprozeß im Wandel — oder: Die weiten Maschen der Modelle

Norbert Pailer, Landstr. 24, 88719 Meersburg-Stetten

Zusammenfassung: Neue astronomische Entdeckungen machen eine Anpassung bisheriger Vorstellungen nötig. Das war zu allen Zeiten so und zeigt etwas von der Dynamik fortschreitender Erkenntnis und gleichzeitig deren Vorläufigkeit. Zu jeder Generation gehört ein Welt-/Naturbild; das eine existiert nicht ohne das andere. Dieser Prozeß hat in der Weltraumerkundung durch Anwendung von High-tech an Fahrt gewonnen, z. B. durch die Entdeckung extrasolarer Planeten. Auch die aktuelle Sonnenphysik blieb davon nicht unberührt. Schon ein kleiner Rundgang in unserer planetaren Umgebung zeigt beispielhaft, wie sehr die Modelle und Vorstellungen im Fluß sind.

Es hat sich einiges getan, seit die Erde als Scheibe betrachtet wurde, an deren Rand sich abends die Sonne hindurchsägt, um am nächsten Morgen geheimnisvoll auf der gegenüberliegenden Seite wieder aufzusteigen. Auch das Bild der Erde als Zentrum des Universums litt an einem relativ kurzen Haltbarkeitsdatum, selbst wenn heute noch kosmische Signaturen uns andeuten, daß unser System (Galaxie) möglicherweise einen ausgewie-

senen Platz in den weiten Strukturen des Kosmos einnimmt. Die einen sprechen von einer mehrfachen „Kränkung“ des Menschen, die anderen von der „Demokratisierung“ im Kosmos, die durchaus ihre Spuren im menschlichen Selbstbewußtsein hinterlassen haben.

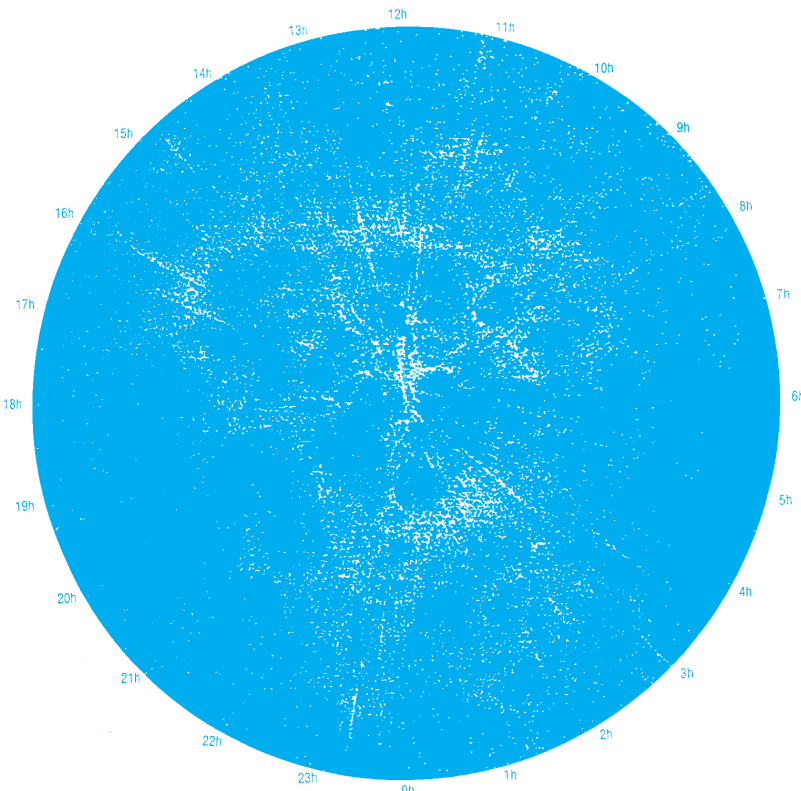
Bis zum Jahre 1610 galt unser Erdmond als einziger Mond. Seit Galilei wissen wir von vielen weiteren Monden; ihre Zahl ist in unserem Planetensystem in der Zwischenzeit auf über 100 angestiegen. Ihre Größe reicht von einem Format wie dem des Königstuhls in Heidelberg bis zu dem Jupitermond Ganymed, der größer als der Planet Merkur ist.

Im Mittelpunkt dieses Beitrags stehen zunächst die Erde und die sich wandelnden Kenntnisse über ihre planetare Umgebung. Die Verhältnisse werden dann mit den Gegebenheiten der neu entdeckten extrasolaren Planeten (Planeten um ferne Sterne) verglichen und schließlich wird die Entwicklung der Sonne mit ihren Auswirkungen auf die inneren Planeten zu diskutieren sein.

Zunächst bestand die Hoffnung, daß sich bei der Beschränkung auf die Erde und ihre planetare Umgebung die astrophysikalischen Verhältnisse relativ einfach darstellen sollten und daß der Raum für Spekulation klein sei. Es hat sich allerdings schnell gezeigt, daß die Einbeziehung anderer Planetensysteme und Aspekte des Ursprungs die Angelegenheit stattdessen schnell verkompliziert und eine Reihe grundsätzlicher Fragen unbeantwortet läßt.

Die Erde — der etwas andere Planet. Die Erde ist ein Planet, der keinen besonderen Namen hat. Er nennt sich einfach Erde. Er ist dabei aber auch unverwechselbar wie unser Erdmond, der einfach Mond heißt. Seit der kopernikanischen Wende war unser Planet Erde nach und nach zu einem unbedeutenden Staubkorn am Rande des Sagittariusarms unserer Milchstraße mutiert. Heute geben Messungen der Galaxienverteilung Hinweise, daß wir von kugelschalenförmig angeordneten Galaxienverbänden umgeben sind, in deren Zentrum wir liegen. Gleichzeitig bildet die Projektion von Galaxienkoordinaten auf die Ebene unserer Galaxie gewisse Muster, in denen lineare Strukturen zu sehen sind, die auf unser System weisen. Sie sind als „Finger Gottes“ von den Astronomen bezeichnet worden (Abb. 1).

Abb. 1: Darstellung unserer kosmischen Umgebung aus der Sicht eines virtuellen Beobachters, in einer Entfernung von einigen Milliarden Lichtjahren senkrecht zur Ebene unserer Milchstraße. Auffallend sind u. a. die sog. „Finger Gottes“: Galaxien scheinen in speichenartiger Form auf uns in die Mitte zu weisen.



Seit vielen Jahren gingen die Astrophysiker von der Vorstellung aus, daß die Untersuchung der erdnahen Planeten mit Hilfe von Entwicklungsvorstellungen erlauben würde, die Verhältnisse anderer Planeten abzuleiten. Nach dem Besuch sämtlicher Planeten unseres Planetensystems muß dieser Versuch als fragwürdig gelten, da sich die Planeten als extrem individuelle Welten herausstellten. Diese enorme Verschiedenheit läßt sich bislang in keiner Planetenentstehungstheorie schlüssig erklären. So sagte der an den Auswertungen von Planetenerkundungsdaten maßgeblich beteiligte Geologe Laurence A. SODERBLOM: „Wir dachten, wir wüßten was Planeten sind, aber nun haben wir entdeckt, wie phantasielos unsere Vorstellungen waren.“

Die enorme Verschiedenheit der Planeten läßt sich bislang in keiner Planetenentstehungstheorie schlüssig erklären.

Weiterhin haben die Verhältnisse in unserem Planetensystem dazu gedient, eine Planetenentstehungstheorie abzuleiten, die nun erstmals seit der Entdeckung extrasolarer Planeten auch auf andere Planetensysteme anzuwenden wäre. Dabei blieben Überraschungen nicht aus. Zunächst blieb es schon in unserem System ein Rätsel, wie sich große Planeten wie Uranus und Neptun im äußeren Bereich des Planetensystems gebildet haben, wo die Materie schon relativ ausgedünnt gewesen sein soll. Nun haben Verhältnisse extrasolarer Planeten weit darüber hinaus gehende Irritationen bezüglich der Planetenbildungsprozesse ausgelöst. Es sind vor allem die mehrfach Jupiter-großen Körper im Abstand der Erdbahn, die für Überraschungen sorgten (MARCY & BUTLER 1998). So sagte der Planetenjäger Geoff MARCY: „Jedes neue Planetensystem offenbart neue Kuriositäten, die wir nicht erwartet hatten. Wir haben Planeten mit kleinen Umlaufbahnen gefunden, die verrückt exzentrisch waren“¹ (in COUPER & HENBEST 2002). In der gleichen Quelle geht es weiter: „...für die Planetenjäger wurde es zunehmend unbequem. Sie hatten zur allgemeinen Zufriedenheit sichergestellt, daß Sterne Planeten in ihrem Schlepptau besitzen. Doch erwiesen sie sich nicht so wie die „anständige Welt“ unseres Sonnensystems mit schönen, fast kreisförmigen Bahnen und Gasriesen in einer angemessenen Entfernung von ihrem Mutterstern. Es waren vielmehr Planeten von der Hölle – und sie brachen alle Regeln.“²

Man nennt diese großen sonnennahen Planeten, die teilweise 20 mal näher als die Erde ihrem Mutterstern sind, „hot Jupiters“. Das Problem dieser Planeten ist, daß es nur in viel größerem

Abstand genügend Material für die Bildung von Riesenplaneten gibt, weil junge Sterne durch ihre enorme Aktivität die Materie ihrer direkten Umgebung effektiv ausdünnen. Im gleichen Aufsatz gibt Pawel ARTYMOWICZ zu bedenken: „This is still a hardhat construction area for theories.“

Teilweise wird dem Problem dadurch ausgewichen, daß unsere Planeten gar für Überlebende von mehreren Generationen von Protoplaneten mit hoher Kindersterblichkeit gehalten werden.

Das mag heißen,

1. daß unsere Planeten gar nicht dort entstanden, wo sie sich heute befinden,
2. daß sie ursprünglich viel mehr Partner in Form von Protoplaneten hatten, die es heute gar nicht mehr gibt.

Doug LIN hält in diesem Sinne unsere Planeten für die „letzten Mohikaner“. Solche weitreichenden Überlegungen machen die großen Irritationen deutlich, welche die Entdeckung extrasolarer Planetensysteme durch ihre teilweise radikal anderen Verhältnisse ausgelöst hat.

Der schnelle Planetenbildungsprozeß. Als typisches Planetenentstehungsgebiet gilt die Umgebung junger Sterne. Diese bilden mit ihrer extrem großen Aktivität – ihrer hochenergetischen Strahlungsumgebung und ihrer Teilchenströme – eine harsche Weltraumumgebung. Dieser konnten besonders silikatische Planetenkörper wie unsere inneren Planeten widerstehen. Die großen Gasplaneten mußten einen größeren Sicherheitsabstand einhalten, ohne andererseits in die zu sehr ausgedünnten Teile der ursprünglichen protoplanetaren Scheibe in größerem Abstand zu geraten.

Bisher galten einige Millionen Jahre als typische Zeitskalen für den Planetenbildungsprozeß. Wenn nun aber Entdeckungen modelliert werden müssen, die mehr als 10fache Jupitermassen im Abstand Erde-Sonne auf sich vereinen, dann gibt es neben dem zuvor erwähnten sehr exotischen Bildungsprozeß nur zwei weitere Möglichkeiten:

1. Entstehung in größerem Abstand mit späterem Transfer zu geringerer Entfernung,
2. rascher Planetenbildungsprozeß in der beobachteten Position.

Letzterem wurde aus physikalischen Gründen der Vorzug gegeben, was insgesamt heißt, daß der durch hochenergetische Vorgänge ausgelöste Sputterprozeß (Abtragen von akkumuliertem Material durch hochenergetische Teilchen) des Zentralsterns langsamer sein muß als der Planetenbildungsprozeß, so daß es am Ende zu einem schnellen Planetenaufbau kommt. Wenn sich große Gasplaneten nicht schnell bilden, so wird es sie wahrscheinlich überhaupt nicht geben. Simulationen an der Universität in Zürich (MAYER et al. 2002) zeigten, daß sich ein Planetenbildungsprozeß für die beschriebenen Verhältnisse von besagten einigen Millionen Jahren auf 300 bis 400 Jahre

verkürzen läßt. Dazu hat man in der Umgebung eines jungen Sterns z. B. das Verhalten von einer Million Teilchen mit einer Dichtevariation von 10^{-14} g/cm^3 - 10^{-8} g/cm^3 bis zu einer Entfernung von 20 AE (1 AE = Abstand Sonne – Erde) simuliert. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 gezeigt.

Die Entdeckung extrasolarer Planeten beruht auf einer indirekten Methode, der periodischen Schwankung von Sternpositionen, die auf die gravitative Wirkung umlaufender Planeten zurückgeführt wird. Bilder sind deshalb schwierig zu bekommen, da sich die (grundsätzlich relativ kleinen) Planeten als relativ dunkle Körper in unmittelbarer Nähe zu den gleißend hellen Sternen befinden. Das Hubble-Weltraumteleskop hat jedoch die Chance wahrgenommen, einen (ersten) extrasolaren Planeten zu fotografieren (falls es einer ist). Er war wohl Teil eines Doppelsternsystems und wurde unter Bedingungen der internen Dynamik gelegentlich auf Fluchtgeschwindigkeit beschleunigt und aus dem System herausgeschleudert. So die Interpretation der Verhältnisse, die in Abb. 3 dargestellt sind, was die Bedingungen für die Stabilität von Planetenbahnen ja auch nicht einfacher macht.

Die Sonne als Fusionsofen. Hans BETHE hat 1939 eine Theorie vorgeschlagen, nach der extrem schnelle Wasserstoff-Kerne im Innern der Sonne und der Sterne in Form eines Millionen Grad heißen, sogenannten thermonuklearen Prozesses, zu Helium fusionieren. Dabei wird ein kleiner Anteil an Masse der Reaktionspartner in Energie nach Einsteins Formel $E = mc^2$ umgewandelt. Dieser relativ geringe, aber permanente Massenverlust führt zur Energieerzeugung, von der wir auf unserer Erde leben:

→ Der Massenverlust beträgt rund 4 Millionen Tonnen/sec, was allerdings im Vergleich zur Gesamtmasse der Sonne von $1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ (entspricht 330.000 Erdmassen) vernachlässigbar klein ist.

→ $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2e + 2\nu_e$: Reaktionsablauf, bei dem vier H-Atome zu einem He-Atom fusionieren.

(e = Elektron, ν_e = Elektron-Neutrino)

Es gab im Laufe der Jahrhunderte unterschiedlichste Vorstellungen von der Energieerzeugung der Sonne. So wurde der Energiegewinn aus dem Zusammenprall mit Kometen und Meteoriten und/oder aus einem Gravitationskollaps als Energiequelle diskutiert. Der Nachweis von Neutrinos ist der einzige Beweis für Kernfusion im Innern der Sonne. Da die Materie für Neutrinos im Wesentlichen transparent ist, sind Neutrinos nicht einfach nachzuweisen. Sie können nahezu ungehindert einen Lichtjahr-großen ($9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$) Bleiblock passieren. Diese Eigenschaft erschwerte es, diese „Geisterteilchen“ zuverlässig nachzuweisen.

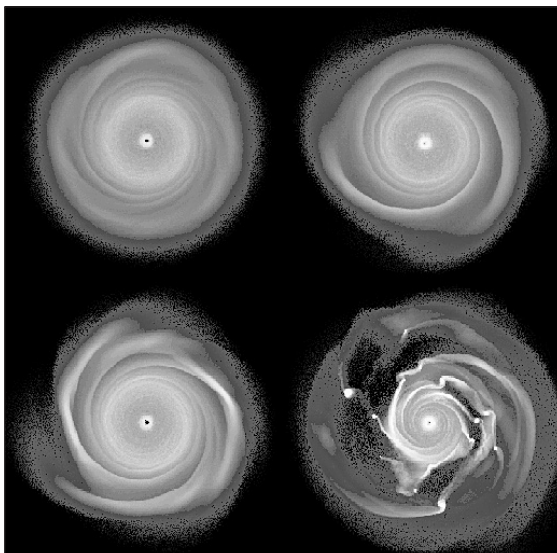
Das Missing-Neutrino-Problem und seine Auflösung.

Der erste Nachweis von Neutrinos begann 1967 tief im Innern der Homestake-Mine in South Dakota, USA. In einem Tank mit 400.000 Litern reinem Tetrachloräthylen wurde – abgeschirmt gegen Störungen von außen – die Umwandlung von ${}^{37}\text{Cl}$ -Atomen in ${}^{37}\text{Ar}$ -Atome durch Reaktionen mit Neutrinos nachgewiesen (BAHCALL 2000). Wegen der extrem kleinen Wechselwirkungsquerschnitte sollte es nur zu einigen Reaktionen pro Woche kommen. Allerdings wurde nur etwa ein Drittel der erwarteten Reaktionen ermittelt. Dieses Defizit wurde auch durch andere Nachweistekniken gemessen und somit bestätigt. Damit stellte sich das Missing Neutrino-Problem. Es gab nun zwei Möglichkeiten: Entweder stimmte etwas nicht mit dem Standard-Sonnenmodell oder das akzeptierte Neutrinomodell hatte Defizite.

Es hat sich nun herausgestellt, daß das Sonnenneutrino-Problem nicht in der Sonnenphysik, sondern in der Neutrinophysik zu suchen ist. Das kam so: Es gibt (heute) drei Sorten unterschiedlicher Neutrinos, die sich über Oszillationen ineinander umwandeln können. Erst das Sudbury Neutrino Observatory SNO (The SNO Collaboration 2001) war in der Lage, in einer 12 m großen Kugel – gefüllt mit schwerem Wasser D_2O und bestückt mit Cerenkov-Detektoren – die unterschiedlichen „flavours“ simultan nachzuweisen. Damit war das Neutrino-Defizit aufgelöst. Erst der simultane Nachweis aller möglichen Neutrino-Sorten führt zum vollständigen Bild, in dem auch die auf dem Weg zu uns umgewandelten Neutrinos berücksichtigt werden.

→ Wenn die erwähnte Gesamtmasse der Sonne vorausgesetzt und Kernfusion als Energiequelle berücksichtigt wird, reicht der Wasserstoffvorrat der Sonne für viele Milliarden Jahre, was nicht notwendigerweise heißt, daß sie schon so lange exi-

Abb. 2: Simulierte Verwirbelung in einer protoplanetaren Scheibe (MAYER et al. 2002). Bereits nach wenigen Umdrehungen bilden sich spiralförmige Arme aus, die dann fragmentieren und Planetenkörper bilden. Die Gas-Staub-Scheibe ist etwa 20 Erd-Sonne-Abstände groß.



stieren muß. Dies bedeutet aber auch, daß die Neutrinos als oszillierende Teilchen mit einer Ruhemasse > 0 zur Lösung des Problems der Dunklen Materie beitragen. Die Größe ihres Beitrags hängt von der genauen Ruhemasse und der Anzahl der Neutrinos im Universum ab; beides sind Parameter, die erst noch einer genaueren Bestimmung bedürfen, bevor weitergehende Schlußfolgerungen möglich sind (SUZUKI & TOTSUKA 1999).

→ Wenn nun gute, aktuelle wissenschaftliche Modelle wie das bisherige Neutrino-Modell durch neue Beobachtungen ausgehebelt werden können, ist die Frage, wie groß das Vertrauen in Vorstellungen über die unbeobachtbare Vergangenheit sein kann.

Das Paradoxon der jungen Sonne. Da Sterne und somit auch unsere Sonne thermonukleare Reaktoren sind, verändert sich im Laufe der Zeit zwangsläufig ihre Zusammensetzung. Deshalb sollen hier die Konsequenzen am Beispiel der Sonne kurz diskutiert werden, denn durch die stetige Veränderung im Sonneninnern wird die Sonne allmählich heller bzw. heißer.

Nach evolutionären Vorstellungen erschien auf geheimnisvolle – jedenfalls auf bis heute nicht schlüssig erklärbare – Weise vor rund 3,5 Milliarden Jahren Leben auf der Erde. Seither muß nach gängigen Sternentwicklungsmodellen die Helligkeit der Sonne um rund $1/4$ gestiegen sein (SAGAN & CHYBA 1997). Wenn man dies so gelten läßt, ergeben sich daraus durchaus beträchtliche Engpässe in den thermalen Randbedingungen für die Entwicklung des Lebens auf der Erde. Allerdings nehmen Biologen und Geologen im Allgemeinen nahezu konstante mittlere Temperaturen über die letzten 4,5 Milliarden Jahre auf der Erde an. Aus astronomischer Sicht muß jedoch von einer signifikanten Temperaturerhöhung unseres Gestirns ausgegangen werden, so daß eine gewagte Hypothese aufgestellt werden muß: Irgendwelche Faktoren sollten durch eine Balance in der Erdatmosphäre für relativ konstante Bedingungen auf der Erde zu sorgen gehabt haben. Das bedeutet (unter heutigen atmosphärischen Bedingungen), daß eine Reduktion der durchschnittlichen Sonnenleuchtkraft um 1 bis 2% die Erde zur globalen Vereisung führt und daß ihre Zunahme um rund 2% die Ozeane verdampfen läßt. Dies nennt man das „Paradoxon der jungen Sonne“. In der aktuellen Projektbeschreibung der Eddington-Weltraummission steht auf der offiziellen ESA-Seite im Internet (http://spdexst.estec.esa.nl/content/doc/eb/28395_.htm): „Either the solar models are wrong or our climate is remarkably resistant to change.“

Nehmen wir an, daß sich die Albedo (Reflektivität) der Erdoberfläche nicht geändert hat (sonst würde die Fähigkeit der Abstrahlung in der einen oder anderen Weise beeinflusst werden), dann soll-

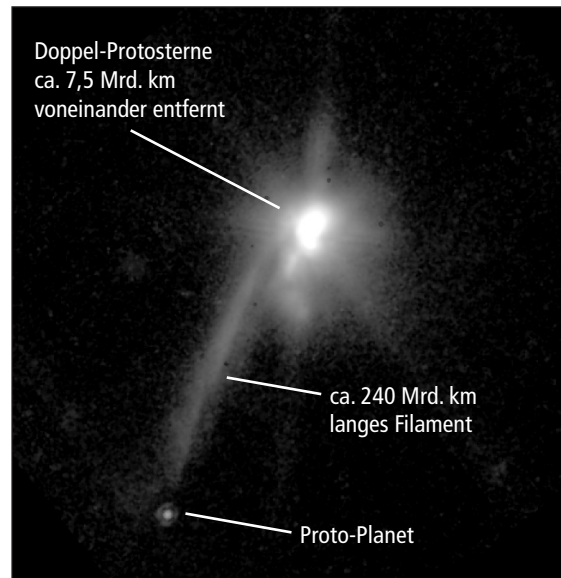


Abb. 3: Erstes Bild eines extrasolaren Planeten bzw. was man dafür hält: Das Hubble-Weltraumteleskop hat ein Objekt fotografiert, das am Ende eines Lichtfilaments zu sehen ist. Offensichtlich ist es aus dem Doppelsternsystem im Sternbild Stier herauskatapultiert worden. (TMR-1C, HST)

ten die Temperaturverhältnisse auf der Erde aus dieser Sicht konstant sein. Diese Annahme ist sicher im Einzelnen nicht realistisch, kann aber für unsere Überlegung vereinfacht so einmal gelten. Mit der theoretisch abgeleiteten 25% Erhöhung der Sonnenleuchtkraft in besagtem Zeitraum erhalten wir eine Anhebung der Temperatur auf der Erde von durchschnittlich 18°C . Da die momentane Durchschnittstemperatur etwa 15°C beträgt, müßte die durchschnittliche Temperatur vor 3,5 Milliarden Jahren bei deutlichen Minusgraden gewesen sein. Das bedeutet, daß zur Zeit der angenommenen Lebensentstehung der größte Teil der Erde gefroren war, abgesehen von kleineren tropischen Zonen mit Plustemperaturen. Wenn dies so stimmt, dann war ein weitaus größerer Anteil der Erdoberfläche hoch reflektierend, was die Menge der absorbierten Wärmeenergie reduziert und so zu sicher noch niedrigeren Temperaturen als soeben erwähnt geführt hätte.

Warum sollte die Erde die zunehmende Sonnenenergie „intelligent“ kompensieren können, während unser nächster planetarer Nachbar – die Venus – daran scheiterte?

Traditionell wird das Paradoxon aufgelöst durch die Annahme eines dynamischen Treibhauseffektes auf der Erde. Dieser hätte die Erde trotz leuchtschwächerer Sonne warm gehalten. Dabei soll die Treibhauswirkung jeweils gerade so eingestellt gewesen sein, daß sie die Wirkung der wärmer werdenden Sonne kompensierte, wobei die Entwicklung des Lebens dabei selbst eine entscheidende Rolle spielte. Allerdings würde diese Temperatur-Historie der Erde eine sehr delikate Balance erfordern. Jede anhaltende Abweichung

hätte zu Klimakatastrophen führen können oder müssen, von denen sich die Erde nicht wieder hätte erholen können. Möglicherweise sind die Nachbarplaneten Venus und Mars Beispiele für jeweils diese Szenarien.

Planetologen stufen Venus und Mars als Planeten des „Grüngürtels“ um unsere Sonne ein. De facto werden sie als dessen innere und äußere Begrenzung gesehen. Die geringere Entfernung der Venus von der Sonne gab diesem Planeten eine höhere Anfangstemperatur, jedenfalls höher als die der Erde, die dann zu einem ausgeprägten Treibhauseffekt führte. Als Ergebnis hat heute die Oberfläche der Venus mit ihrer dichten Atmosphäre mit knapp 500 °C die höchsten Planeten-Oberflächentemperaturen in unserem Sonnensystem. Ohne atmosphärische Hülle wäre die Oberflächentemperatur gerade etwa +5 °C. Im Gegensatz dazu ist Mars heute ein recht kalter Planet mit dünner, unwirtlicher Atmosphäre, auf dessen Oberfläche selten positive Temperaturwerte auftreten. Es gibt jedoch zwingende Hinweise, daß in seiner jungen Geschichte einmal mächtige Wasserströme flossen, was auf wärmere Verhältnisse hinweist (http://www.space.com/scienceastronomy/solar-system/mars_floods_020621.html). Die meisten Planetologen gehen davon aus, daß dies vor rund 3,8 Milliarden Jahren stattfand. Damals war jedoch die Sonne rund 25% leuchtschwächer als heute. Das paßt nicht zur Vorstellung, daß früher auf dem Mars Wasser geflossen ist.

Damit wird deutlich, daß das Problem der frühen Sonne ein Problem auch für Mars ist und nicht auf eine sich entsprechend verändernde Erdatmosphäre reduziert werden kann.

→ Warum war Mars wärmer zu einer Zeit, als die Sonne deutlich leuchtschwächer war?

→ Warum sollte die Erde die zunehmende Sonnenenergie „intelligent“ kompensieren können, während unser nächster planetarer Nachbar – die Venus – daran scheiterte?

→ Welche Wahrscheinlichkeit haben solche Zufälle?

Astronomie ist eine der ältesten naturwissenschaftlichen Disziplinen. Seit es sie gibt, hat sie uns „Weltbilder“ – oder besser gesagt „Naturbilder“ –

aus dem jeweiligen Verständnis ihrer Zeit geliefert, die sich – bis auf wenige Ausnahmen – konsistent mit den Beobachtungen und dem Verständnis ihrer Zeit gezeigt haben. Dabei wurde mancher Wandel notwendig, wobei heute die Möglichkeiten von High-tech-Anwendungen das Haltbarkeitsdatum solcher Vorstellungen nochmals deutlich verkürzt haben. Die diskutierten Beispiele sollten ein Gefühl für die weiten Maschen der Modelle geben.

Literatur

- BAHCALL J (2000) Neutrinos from the Sun. *Scientific American* 221, 28-37.
- COUPER H & HENBEST N (2002) Home from Home. *New Scientist*, Jan. 12th, 2002.
- MARCY GW & BUTLER RP (1998) Detection of Extrasolar Giant Planets (<http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/araa/araa.html>), *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 36, 56.
- MAYER L, QUINN TH, WADSLEY J & STADEL J (2002) Formation of giant planets by fragmentation of planetary discs. *Science* 298, 1756.
- SAGAN C & CHYBA C (1997) The early faint Sun paradox: organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases. *Science* 276, 1217-1221.
- SUZUKI Y & TOTSUKA Y (1999, eds) *Proceedings of XVIII Conference on Neutrinophysics & Astrophysics, Japan, 1998*, Amsterdam: Elsevier.
- The SNO Collaboration (2002) Measurement of charged current interactions produced by 8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. Der Artikel ist im Internet abrufbar: www.sno.phy.queensu.ca/sno/first_results

Originalzitate

¹ „Every new planetary system reveals some new quirk that we didn't expect. We've found planets in small orbits and wacky eccentric orbits.“

² „...the planet hunters became increasingly uncomfortable. They had confirmed, to everyone's satisfaction, that stars have planets in tow. But these were not like the obedient worlds of our Solar System, with nice near-circular orbits and gas giants located at decent distance from their parent star. These were planets from hell – and they were breaking all the rules.“