

Die Stabilität der Erdbahn

Kommt die Erde irgendwann der Sonne zu nahe, oder kollidiert unser Planet in ferner Zukunft mit einem der Nachbarplaneten Venus oder Mars? Langzeitrechnungen der Planetenbahnen im Sonnensystem zeigen, dass die Erdbahn mehrere Milliarden Jahre stabil bleiben kann. Diese Langzeitstabilität ist schon seit einigen Jahrzehnten bekannt. Neue Berechnungen haben nun gezeigt, dass dieser Sachverhalt alles andere als selbstverständlich ist. Denn die Störungen der anderen Planeten könnten sich „aufschaukeln“ und die Erde buchstäblich aus der Bahn werfen. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn der Planet Saturn etwas näher an der Sonne oder etwa so schwer wie der Planet Jupiter wäre. Die großen Planeten sind demnach von der richtigen Größe und an der richtigen Position, um die Erdbahn stabil zu halten. Und Venus und Erde stabilisieren ihre Bahnen sogar gegenseitig.

Peter Korevaar

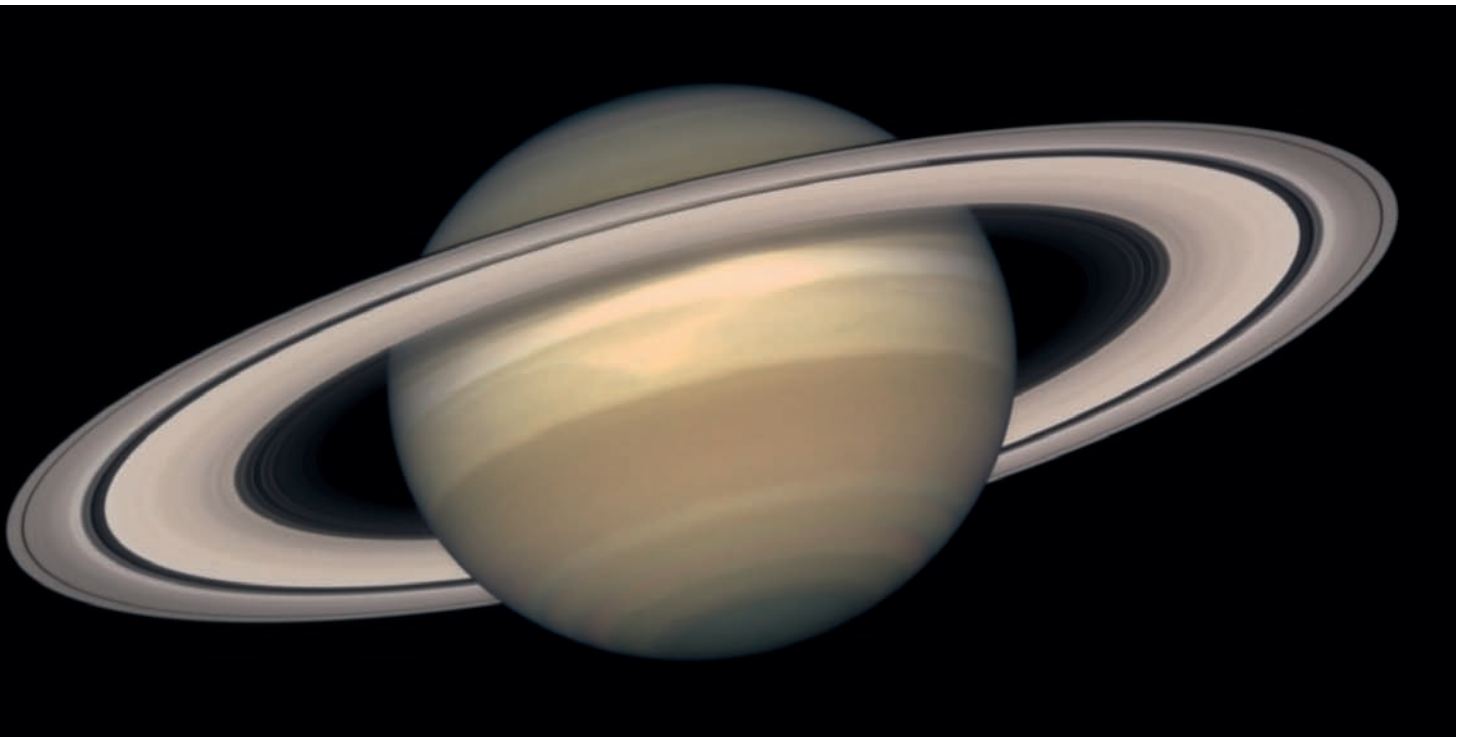


Abb. 1: Wenn Saturn 8% näher an der Sonne oder dreimal schwerer wäre, wäre die Erdbahn instabil. © NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Eigenschaften der Erdbahn

Die Erde bewegt sich auf einer nahezu kreisförmigen Bahn um die Sonne. Die Entfernung zur Sonne schwankt im Laufe eines Jahres geringfügig aufgrund der sogenannten Exzentrizität der Erdbahn (Abweichung von der Kreisform), die zur Zeit 1,67% beträgt. Während die mittlere Entfernung zur Sonne 149,6 Mio. Kilometer (= 1 AE, eine Astronomische Einheit) beträgt, sind es im sonnennächsten Punkt (Perihel), den die Erde Anfang Januar erreicht, 1,67% weniger, also 147,1 Millionen Kilometer, und im sonnenfernsten Punkt (Aphel), den die Erde Anfang Juli erreicht, 1,67% mehr, also 152,1 Millionen Kilometer.

Die Sonneneinstrahlung ist im Perihel 6,9% höher als im Aphel. Interessanterweise ist die Nordhalbkugel der Erde der Sonne im Perihel Anfang Januar abgewandt (Winter) und die Südhalbkugel der Sonne zugewandt (Sommer). Dies wirkt sich insgesamt mildernd auf das Klima der Erde aus, da sich die meisten Landmassen, die sich schneller erwärmen bzw. abkühlen als die Ozeane, auf der Nordhalbkugel befinden.

Für das Leben auf der Erde ist es zwingend erforderlich, dass die Entfernung zwischen Erde und Sonne innerhalb bestimmter Grenzen bleibt. Diese Grenzen umschließen die sogenannte „habitable“ (= bewohnbare) Zone. Die habitable Zone wird in der Regel durch die Möglichkeit

der Existenz flüssigen Wassers auf der Oberfläche definiert. Ihre Bestimmung ist eine interdisziplinäre Aufgabe, da astronomische, chemische und biologische Argumente und Berechnungen dabei eine Rolle spielen. Allgemein wird für unsere Sonne als Entfernungsbereich für die habitable Zone 0,93 AE bis 1,37 AE angegeben (KASTING et al. 1993, 108). Durch die geringe Exzentrizität der Erdbahn bleibt die Erde im Laufe eines Jahres stabil innerhalb dieser habitablen Zone (Abb. 2).

Die Exzentrizität der Erdbahn ist aber nicht konstant. Durch gravitative Störungen der anderen Planeten unseres Sonnensystems ändert sich die Exzentrizität der Erdbahn im Laufe der Zeit zwischen Werten von ca. 0% und ca. 6% (VARADI et al. 2003, 620). Im letzten Fall käme die Erde im Perihel fast an die Grenze der habitablen Zone. Wäre die Exzentrizität der Erdbahn aber 10% oder größer, wäre das Leben auf der Erde durch extreme Hitze nahe des Perihels global gefährdet. Die jetzigen Massen und Bahneigenschaften der Planeten und die dadurch hervorgerufenen gegenseitigen Störungen sind aber so, dass dieser Fall nicht eintreten wird. Langzeitberechnungen der Planetenbahnen zeigen, dass nicht nur die Erde, sondern alle Planeten unseres Sonnensystems mindestens 5 Milliarden Jahren sehr nahe ihrer jetzigen Bahnen bleiben, vielleicht mit Ausnahme von Merkur (LASKAR 2008, 1).

Simulationsrechnungen

Dass die Erde auch über längere Zeit immer sicher innerhalb der habitablen Zone bleibt, ist aber keineswegs eine Selbstverständlichkeit. Mit Hilfe von Computersimulationen kann untersucht werden, wie sich die Erdbahn verhalten würde, wenn die Verhältnisse im Sonnensystem anders wären, z. B. wenn die großen Planeten eine andere Masse oder eine andere Entfernung zur Sonne hätten.

Am Institut für Astronomie der Universität Wien werden unter der Leitung von Frau Dr. E. PILAT-LOHINGER solche Stabilitätsberechnungen durchgeführt. Die Motivation für die Durchführung der Stabilitätsberechnungen an diesem Institut kommt allerdings nicht aus unserem eigenen Planetensystem, sondern aus der extrasolaren Astronomie: Die vielen neu entdeckten Planeten um andere Sterne (auch Exoplaneten genannt) werfen generell die Frage auf, welche Bedingungen ein Planetensystem erfüllen muss, damit ein erdähnlicher Exoplanet, der sich innerhalb der habitablen Zone um das Zentralgestirn befindet, dort über lange Zeit stabil bleiben kann.

Einige der neu entdeckten Planetensysteme sind unserem eigenen Planetensystem insoweit ähnlich, als es mehrere große Planeten gibt, die

in Masse und Entfernung zum Zentralgestirn mit Jupiter und Saturn vergleichbar sind. Sollten diese Systeme also auch kleinere Planeten besitzen, die sich näher am Stern befinden, ist es wichtig zu verstehen, unter welchen Bedingungen diese über längere Zeit stabil innerhalb der habitablen Zone bleiben können.

In mehreren detaillierten Simulationsstudien wurde berechnet, wie sich die Bahnen der Planeten Venus, Erde und Mars verhalten würden, wenn die Verhältnisse im Sonnensystem anders wären (PILAT-LOHINGER et al. 2008a, 1645; PILAT-LOHINGER et al. 2008b, 83). Ausgehend von den tatsächlichen Werten für Jupiter, Saturn und Uranus wird im Rahmen der Simulationsstudie die Masse des Saturn zwischen 2 und 40 mal erhöht und die lange Halbachse von 8 AE bis 11 AE in Schritten von 0,1 AE variiert (die tatsächliche lange Halbachse

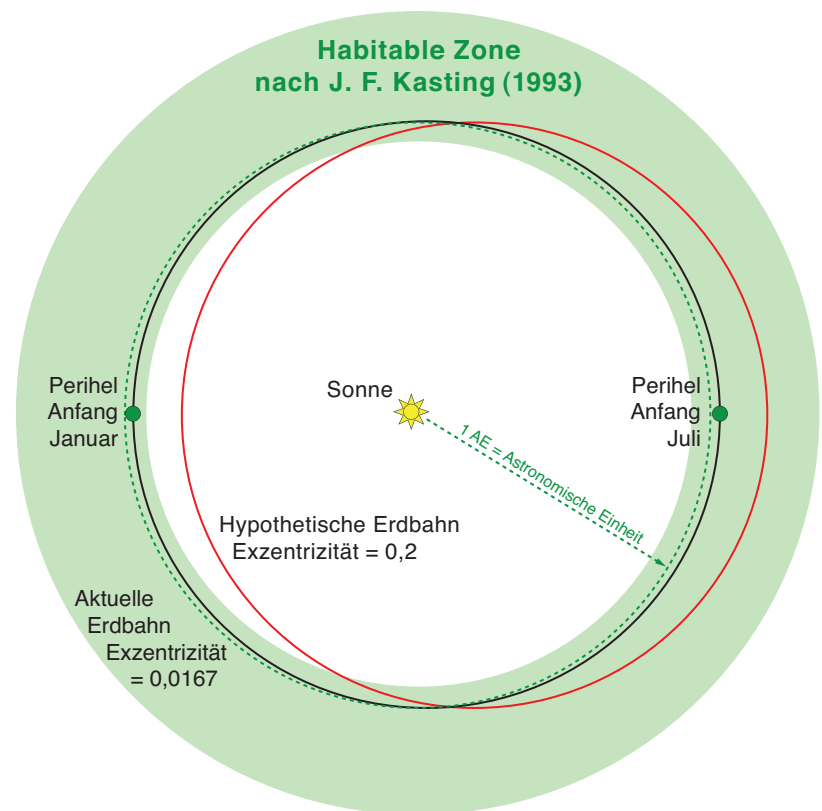


Abb. 1 Habitable Zone (grüner Bereich), darin eingezeichnet die aktuelle Erdbahn (schwarz) sowie eine hypothetische Erdbahn mit einer Exzentrizität von 20% (rot). Die Erde ist der Sonne Anfang Januar am nächsten (Perihel) und Anfang Juli am entferntesten (Aphel).

der Saturnbahn beträgt 9,53 AE). Dies ergibt insgesamt einen Parameterraum mit $40 \times 31 = 1240$ Simulationspunkten. Für jeden dieser Punkte wird eine Langzeitberechnung durchgeführt (10 Millionen Jahre), und dabei ausgewertet, inwieweit die Bahnen der Planeten Venus, Erde und Mars instabil werden. Als Maß für die Instabilität wird die maximale Exzentrizität genommen. Eine Planetenbahn mit einer Exzentrizität von 20% oder größer wird in diesem Zusammenhang schon als „instabil“ bezeichnet, obwohl sie weiterhin geschlossen ist und der Planet weder das Son-

nensystem verlässt noch mit einem anderen Planeten kollidiert oder in die Sonne stürzt.

Resonanzen

Um die Ergebnisse besser verstehen zu können, ist es zunächst erforderlich, sich mit dem Begriff der Resonanz vertraut zu machen: Die Umlaufzeiten zweier Planeten weisen eine Resonanz auf, wenn sie in einem einfachen Verhältnis stehen, wie z. B. 1:2, oder 2:3 oder 5:2. Eine solche Resonanz hat zu Folge, dass wiederholt nach einer *kurzen* Anzahl von Umläufen die beiden Planeten sich am selben Punkt in ihrer Bahn am nächsten kommen. Die Störung des jeweils größeren der beiden Planeten auf den kleineren ist dann maximal. Dadurch kann die Bahn des kleineren Planeten stark verformt werden, was sich in einer hohen Exzentrizität bemerkbar macht.

Stehen die Umlaufzeiten nicht in einem solchen Verhältnis, sind sich die Planeten bei jedem Umlauf an einer anderen Stelle am nächsten. In diesem Fall heben sich die Bahnstörungen im Allgemeinen gegenseitig wieder größtenteils auf. Resonanzen in der Umlaufzeit gefährden potenziell die Langzeitstabilität und es gilt, sie in der „Konstruktion“ eines stabilen Planetensystems zu vermeiden.

Resonanzen können zwischen jedem Paar von Planeten auftreten. Bei insgesamt 8 Planeten in unserem Sonnensystem gibt es damit 28 Paare, die theoretisch zu betrachten sind. Nicht alle Beziehungen sind dabei gleich wichtig. Die wichtigsten Einflüsse sind die der großen Außenplaneten Jupiter, Saturn und Uranus auf die Innenplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars.

Was wäre wenn ...

Die Ergebnisse der von PILAT-LOHINGER und ihrem Team durchgeführten Simulationen lassen sich in folgender Aussage zusammenfassen, die anschließend erläutert und diskutiert wird:

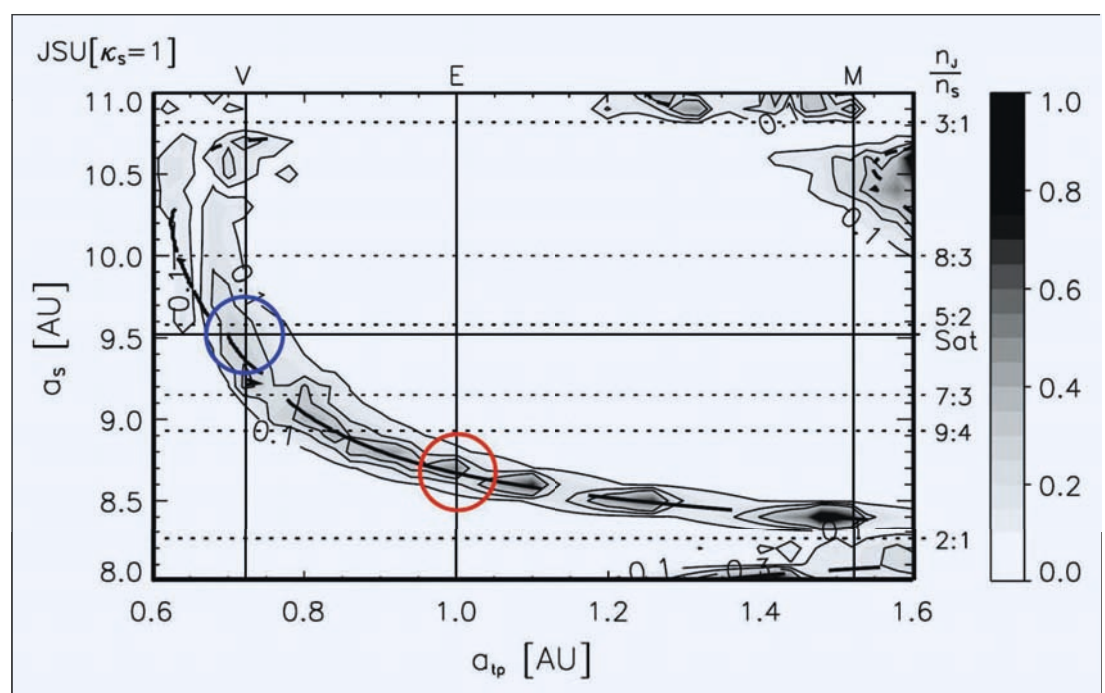
Wenn Saturn 8% näher an der Sonne oder dreimal schwerer wäre, wäre die Erdbahn instabil.

Das wichtigste Ergebnis der Simulation ergibt sich aus der Variation der langen Halbachse des Saturn. Dazu wird das Sonnensystem reduziert auf die Sonne, die Planeten Jupiter, Saturn und Uranus, sowie „Testplaneten“, deren lange Halbachsen zwischen 0,6 und 1,6 AE liegen und deren Masse als so gering unterstellt wird, dass sie selbst keine Störungen hervorbringen, sondern nur von der Sonne und den großen Planeten beeinflusst werden. Dabei wird die lange Halbachse des Saturn von 8 bis 11 AE variiert.

Das Gesamtergebnis ist in einem Diagramm dargestellt (Abb. 2). Waagrecht sind die langen Halbachsen der Testplaneten aufgetragen. Die Positionen der Planeten Venus, Erde und Mars sind als senkrechte durchgezogene Linien gekennzeichnet und mit den Buchstaben V, E und M markiert. Senkrecht ist die simulierte lange Halbachse des Saturn aufgetragen. Der aktuelle Wert beträgt 9,53 AE und ist mit einer waagerechten durchgezogenen Linie gekennzeichnet und rechts mit „Sat“ markiert.

Innerhalb des Diagramms wird die maximale Exzentrizität (max-e) dargestellt, die über den Simulationszeitraum von 10 Millionen Jahren in den Berechnungen aufgetreten ist. Gemäß der Graustufen ist max-e bei weißem Hintergrund sehr gering (< 0,1) und tendiert gegen 1 bei schwarzem Hintergrund. Die wichtigsten Resonanzen der Umlaufzeiten

Abb. 2 Stabilitätsmappe für massenlose Testplaneten in der habitablen Zone, berechnet in einem Planetensystem bestehend aus Sonne, Jupiter, Saturn und Uranus, wobei die lange Halbachse des Saturn variiert wird. Die Einzelheiten werden im Text erläutert. (Nach PILAT-LOHINGER 2008b, 83, Abdruck mit freundlicher Genehmigung)



zwischen Jupiter und Saturn sind mit gestrichelten horizontalen Linien gekennzeichnet. Bei der aktuellen Masse von Jupiter und Saturn haben diese Resonanzen allerdings keinen spürbaren Einfluss auf die Stabilität der Umlaufbahn von Venus und Erde und nur geringen Einfluss auf die Umlaufbahn von Mars.

Die wichtigste Erkenntnis ergibt sich aus dem mit rotem Kreis markiertem Bereich: Wenn die lange Halbachse des Saturn bei ca. 8,7 AE anstelle von 9,53 AE liegen würde, wäre die Erdbahn instabil, da $\max-e$ einen Wert von 0,4 erreicht und damit die Erde weit außerhalb der habitablen Zone käme: 0,6 AE im Perihel und 1,4 AE im Aphel. Die Sonneneinstrahlung würde dann im Laufe eines Jahres um einen Faktor von mehr als 5 schwanken, das Wasser der Ozeane würde im Perihel verdampfen und im Aphel gefrieren. Höchstens Bakterien würden das überleben.

Abb. 2 kann man weiter entnehmen, dass wenn die lange Halbachse des Saturn ca. 8,5 AE oder mehr als 10 AE wäre, auch die Mars-Bahn instabil werden würde. Mit dem aktuellen Wert von 9,53 AE ist die Gefahr einer Instabilität sowohl für die Erde als auch für den Mars gebannt. Aber was ist mit Venus? Der mit einem blauen Kreis markierte Bereich zeigt, dass bei dem aktuellen Wert der langen Halbachse von Saturn die Venus-Bahn instabil wäre mit einem $\max-e$ von etwa 26%. Wenn das passieren würde, käme die Venus der Erde gefährlich nahe. Ist die Erdbahn also doch gefährdet?

Die Simulationsrechnungen bringen zugleich einen Hinweis auf eine Feinabstimmung in unserem eigenen Sonnensystem.

An dieser Stelle berichtet PILAT-LOHINGER von einem sehr interessanten Befund: Die in Abb. 2 dargestellten Ergebnisse sind wie oben erwähnt ohne Berücksichtigung der Massen der Innenplaneten berechnet. Wird nun in das Modell die Erde selbst mit ihrer Masse hineingenommen, reduziert sich $\max-e$ für Venus signifikant und bleibt unter 10%. Die Erde wirkt also stabilisierend auf die Venus-Bahn. Dieses Ergebnis war schon früher gefunden worden (INNANEN et al. 1998, 2055), wurde aber durch die aktuellen Berechnungen eindrucksvoll bestätigt.

In weiteren Simulationen wurde die Masse schrittweise bis 40 Saturnmassen erhöht. Auch dann wird die Stabilität der Erdbahn beeinflusst: Wenn Saturn dreimal schwerer als jetzt wäre und damit etwa so schwer wie Jupiter,

würde sich das „Instabilitätsband“ aus Abb. 2, in dem sich der rote und der blaue Kreis befinden, nach rechts verschieben. Damit würde der blaue Kreis sich ebenfalls nach rechts verschieben und die Position der Erdbahn erreichen. Die Venusbahn wäre dann stabil, die Erdbahn aber instabil. Zusätzlich würden sich dann die Resonanzen der Außenplaneten spürbar auf die Innenplaneten auswirken: Wenn Uranus und Saturn sich in einer 3:1-, 8:3- oder 5:2-Resonanz befinden, wäre die Erdbahn sehr instabil. Dieser Effekt würde sich noch verstärken, wenn auch Uranus dreimal schwerer wäre.

Ein anderer genereller Befund ist, dass die Erdbahn generell instabil würde, wenn Saturn mindestens fünfmal schwerer als jetzt wäre und sich etwas weiter weg befinden würde (mehr als 10 AE).

Schlussfolgerung

Es gibt viele Variationsmöglichkeiten, die in dieser Simulationsstudie nicht betrachtet wurden. Zum Beispiel: Variation der Jupiterbahn oder -masse, Variation der Marsbahn oder -masse usw. Aus diesem Grund können keine endgültigen Schlüsse gezogen werden. Dennoch deuten die erläuterten Simulationsergebnisse darauf hin, dass nicht nur unsere Erde, sondern ebenso die anderen Planeten in unserem Sonnensystem die richtige Masse und die richtigen Bahnparameter haben, damit die Erde sich auf einer Bahn befindet, die über sehr lange Zeit stabil bleiben kann.

Somit bringen diese Simulationsrechnungen, die in erster Linie als Studie der habitablen Zonen von Exoplanetensystemen gedacht waren, zugleich einen Hinweis auf eine Feinabstimmung in unserem eigenen Sonnensystem.

Literatur

- INNANEN K, MIKKOLA S & WIEGERT P (1998) The Earth-Moon system and the dynamical stability of the inner solar system. *Astronomical Journal* 116, 2055.
- CASTING JF, WHITMIRE DP & REYNOLDS RT (1993) Habitable zones around main sequence stars. *Icarus* 101, 108-128.
- LASKAR J (2008) Chaotic diffusion in the Solar System. *Icarus* 196, 1-15.
- PILAT-LOHINGER E, SÜLLI Á, ROBUTEL P & FREISTETTER F (2008a) The influence of giant planets near a mean motion resonance on earth-like planets in the habitable zone of sun-like stars. *The Astrophysical Journal* 681, 1639-1645.
- PILAT-LOHINGER E, SÜLLI Á, ROBUTEL P & FREISTETTER F (2008b) On the stability of Earth-like planets in multi-planet systems. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 102, 83-95.
- VARADI F, RUNNEGAR B & GHIL M (2003) Successive refinements in long-term integrations of planetary orbits. *The Astrophysical Journal* 592, 620-630.