Kurzbeschreibung der Bilder

Standardmodell der Planetenentstehung

Die Abbildungen mit Namen **formation*** illustrieren das Standardmodell der Planetenentstehung, d.h. ohne externe Störung. Eine protostellare Wolke (**formation1**; vgl. Zentralregion des Orionnebels oder einige der dichten Wolken im Carina-Nebel) fragmentiert, d.h. teilt sich in mehrere gravitativ gebundene Teilwolken oder -klumpen (**formation2**).

formation3: Einer dieser Gasklumpen fällt weiter zusammen unter der eigenen Schwerkraft, und da jede Gaswolke eine anfängliche Rotation hat, beschleunigt diese je weiter die Wolke sich zusammenzieht – genau wie das Wasser in einer Badewanne, wenn es zum Abfluss hin ströme. Diese Rotation führt zur Abplattung (**formation4**).

formation5+6: Im Zentrum bildet sich ein Klumpen, der die meiste Masse enthält – der Protostern. Die umgebende Scheibe enthält meist nur wenige Prozent der Masse (anfänglich bis zu mehreren 10 Prozent, aber das meiste hiervon geht verloren durch Sternwinde, Bildung von braunen Zwergen [s. Thies et al. 2010], nahe Sternbegegnungen usw.), aber sie enthält den größten Teil des Drehimpulses – die protoplanetare Scheibe.

formation7–9 zeigt die Entstehung von Protoplaneten in der Scheibe und, schließlich, das fertige Planetensystem, das dem Sonnensystem entspricht (auch wenn dieses einfache Modell die 7-Grad-Inklination zwischen der planetaren Bahnebene und dem Sonnenäquator schon nicht mehr erklären kann).

Szenario: Kollision mit Gaswolke

Die Bilder **encounter*** zeigen das Szenario eines Sterns mit protoplanetarer Scheibe, der einer dichten Gaswolke begegnet und Material von ihr aufnimmt.

annulus1 zeigt die Situation direkt nach der Begegnung, **annulus2** die Situation nach etwa 30000 Jahren, wenn sich die ursprüngliche Gasscheibe und der Ring aus aufgenommenen Gasen zueinander ausgerichtet haben.

Die **inclined***-Abbildungen zeigen die Entstehung eines Planetensystems aus dieser so entstandenen kombinierten Scheibe in drei Schritten: 1. Die kombinierte Scheibe aus ursprünglichem und aufgenommenem Material, 2. Verklumpung von Staub (oder Gravitationsinstabilität in massereichen Scheiben) erzeugt Protoplaneten, und 3. das fertige Planetensystem. Man beachte, dass der Stern immer noch in (nahezu) derselben Richtung rotiert wie vor der Kollision.

Weitere Entwicklung der Umlaufbahnen

ejection* und **kozai*** zeigen zwei mögliche vereinfachte Szenarien, wie ein „hot Jupiter“ (ein massereiche Planet auf einer sehr engen Umlaufbahn) entstehen kann.

I. Auswurf anderer Planeten: Zwei (oder mehr) Planeten wechselwirken gravitativ, 2. einer (zumeist der leichtere) wird herausgeschleudert, während der andere auf einer nunmehr exzentrischen Bahn mit gegenüber der Anfangssituation geringerer Energie verbleibt. 3. Über längere Zeit führt die Gezeitenkraft, die der Planet auf den Stern ausübt, zu einer Reduzierung der Umlaufbahn zu einer Kreisbahn, deren Radius etwa dem Wert des früheren Periastrons (d.h. des sternnächsten Punkts) entspricht. Die nunmehr sehr enge Bahn (wenige Sternradien) wird durch die Gezeiten an die Rotation des Sterns gebunden (etwa wie die Mondrotation an den Umlauf des Mondes um die Erde gebunden ist). Ein „hot Jupiter“ ist entstanden.

II. Kozai: 1. Zwei Planeten wechselwirken weniger stark als im Auswurfszenario, aber über

längere Zeit (2.) sind ihre Orbits in Resonanz zwischen hoher gegenseitiger Neigung und hoher Exzentrizität. Dieser Effekt ist für den inneren Planeten am stärksten, da seine engere Bahn mit ihrem kleineren Drehimpuls leichter verändert werden kann.

Schließlich zeigen die Bilder `system*` (teilweise überzeichnete) Beispiele für fertige Planetensysteme: 1. Ein wohlgeordnetes koplanares System, wie das Sonnensystem, und 2. ein möglicher Extremfall eines Systems mit stark gegeneinander geneigten Planetenbahnen (welches über längere Zeit instabil ist).

Rossiter-McLaughlin effect

Zusätzliche Bilder: `rmleffect*` beschreiben den Rossiter-McLaughlin-Effekt, welcher zur Feststellung von gegenüber der Sterndrehung schief stehenden Planetenbahnen dienen kann, sofern der Planet aus Sicht des Beobachters vor dessen Stern vorbeizieht („Transit“). Wenn ein Planet vor seinem Stern vorbeizieht, bedeckt er eine kleine Fläche entlang seiner (projizierten) Bahn. Durch die Sternrotation bewegt sich eine Seite des Sterns auf uns zu, die andere von uns weg. Durch den Doppler-Effekt sind sie entsprechend blau- bzw. rotverschoben. Ein Planet auf einer prograden Bahn verdeckt zuerst einen Teil der blauverschobenen Seite, so dass das Gesamtspektrum einen Rot-Überschuss hat. Später passiert der Planet den rotverschobenen Bereich, und verursacht dementsprechend einen Blau-Überschuss. Dieser Effekt kann mit empfindlichen Spektrografen nachgewiesen werden.

Wenn dieser zeitliche Verlauf in umgekehrter Reihenfolge erscheint, d.h. erst Blau-Überschuss, dann Rot-Überschuss, umkreist der Planet den Stern dessen Rotation entgegengesetzt (=retrograd). Die Neigung verschieden einer beliebig geneigten Bahn kann so ebenso gemessen werden, auch wenn die Auswertung der Daten etwas komplexer ist, als bei der reinen Bestimmung des Umlaufsinn.

Es sind JPG- und PNG-Versionen verfügbar.

Alle Abbildungen in diesem Verzeichnis: © Ingo Thies, 2011

Brief description of the images

Standard planet formation model

The images named `formation*` refer to the standard planet formation model, i.e. without any external perturbation. A protostellar cloud (`formation1`; of the size of e.g. the central region of the Orion Nebula, or some of these dense clouds in the Carina Nebula) fragments, i.e. breaks apart into several gravitationally bound sub-clouds or clumps (`formation2`).

`formation3`: Such a clump continues to collapse under gravity, and since it always has some initial spin the rotation becomes faster and faster – just like the water in a bathtub when it rushes towards the drain. This leads to a flattening in shape (`formation4`).

`formation5+6`: In the central region forms a clump containing most of the mass – the protostar. The surrounding disc contains typically a few per cent of the total mass (initially up to a few tens of percent, but most of this gets lost by stellar winds, brown dwarf formation [Thies et al. 2010], close encounters etc.), but it contains most of the angular momentum – the protoplanetary disc.

`formation7-9` show the formation of protoplanets in the disc and, finally, the planetary system, like the Solar System (although this simple model already fails to explain the observed 7 degree inclination between the planetary orbits and the solar equator).

Encounter scenario

Images `encounter*` shows the scenario of a star+disc encountering a dense clump of gas, and capturing material from it.

`annulus1` depicts the situation directly after the encounter, while `annulus2` shows the situation about 30,000 years after the encounter when disc and annulus have aligned to each other.

`inclined*` illustrate the formation of a planetary system out of this combined disc in three steps: 1. the disc resulting from the merger of the initial disc and the captured gas annulus, 2. clumping of dust (or gravitational instability in massive discs) leads to protoplanets, and 3. the resulting planetary system. Note that (`inclined4`) the star spins still in (almost) the same direction as before the encounter.

Orbital evolution

`ejection*` and `kozai*` show two possible scenarios of a hot Jupiter formation event in their simplest form.

I. Ejection: 1. two (or more) planets interact gravitationally, 2. one (typically the least massive one) gets ejected while the other remains on a now eccentric orbit with less energy than initially. 3. Over time, the tidal interaction with the star itself reduce the orbit to a circular orbit with a radius similar to the former peri-astron radius. The henceforth very close orbit (several stellar radii) gets tidally locked to the stellar rotation (like the Moon’s rotation is tidally locked with its orbit around the Earth). Such orbits can be very close to the star, i.e. we have a “hot Jupiter”.

II. Kozai: 1. the two planets do not interact that strongly as in the ejection scenario, (2.) but over a long time their orbits are in resonance and oscillate between high mutual inclination and high eccentricity. This effect is strongest for the inner planet, since due to the smaller angular momentum of its smaller orbit the orbit is easier deformed. 3. As above, tidal damping leads to a “hot Jupiter” again.

Finally, **system*** are example cartoons for a 1. regular planetary system like ours and 2. a system with mutually inclined planetary orbits as a possible extreme case for the outcome of our scenario (which may render the system unstable over time).

Rossiter-McLaughlin effect

Additional images: **rmleffect*** describe the Rossiter-McLaughlin-Effect which allows the detection of spin-orbit misalignments for transiting exoplanets. When a planet passes in front of its host star it obscures a small area of the star along its (projected) path. Due to the stellar rotation one side of the stellar disc (i.e. the 2-D projection of the star as it appears to an observer) is moving towards us and is therefore blue-shifted by the Doppler effect. The opposite side moves away from us and is red-shifted. A prograde orbiting planet first obstructs the blue-shifted part, so that the sum colour is biased slightly to the not obstructed red-shifted side. Then, the planet continues to hide progressively red-shifted areas of the star, making its remaining light be biased towards blue-shift. This can be detected by sensitive spectrographs. If this sequence occurs the other way round, i.e. first a blue bias, then a red bias, the planet has a retrograde orbit. Inclined orbits can be detected this way as well, although the analysis is a bit more complex than for mere detection of retrograde orbits.

There are JPG and PNG versions of all images.
All images in this folder: © Ingo Thies, 2011

See also: HST Images

- Protoplanetary discs: <http://www.spacetelescope.org/news/heic0917/>
- Carina Nebula gas pillar: <http://hubblesite.org/gallery/wallpaper/pr2010013a/>
- Other nebulae: <http://hubblesite.org/gallery/album/nebula/>
- General images: <http://hubblesite.org/gallery/wallpaper/>

(see there for copyright info)

References

- Thies et al. 2011, MNRAS (in press)
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1107.2113T>
- Thies et al. 2010, ApJ, 717, p577
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010ApJ...717..577T>