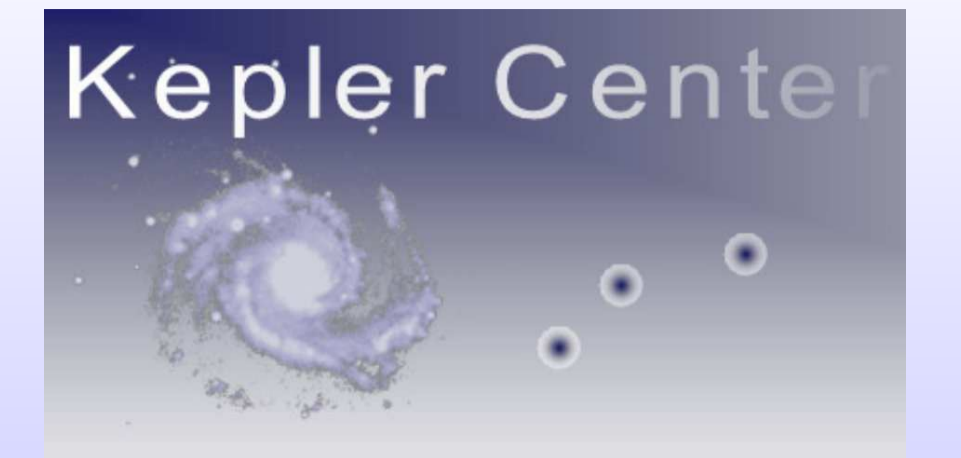




Planetenentstehung und planetare Migration

Bertram Bitsch, Tobias Müller & Wilhelm Kley



Motivation

In den vergangenen 14 Jahren wurden über 350 Planeten in entfernten Sternensystemen entdeckt. Die meisten dieser sog. Exoplaneten haben Massen von einer Jupitermasse und mehr, und viele kreisen in einer sehr geringen Entfernung mit Umlaufperioden von nur wenigen Tagen um ihren Zentralstern (siehe Abb. 2). Planeten bilden sich innerhalb einer protoplanetaren Scheibe, welche den jungen entstehenden Stern umgibt (Abb. 1). Das Scheibenmaterial wird im Laufe der Zeit vom Stern aufgesammelt (akkretiert), so dass ein Planet, der in geringer Distanz zum Stern in der Scheibe entstanden ist, ebenfalls vom Stern verschluckt werden würde. Weiterhin ist die Temperatur in der Scheibe in Sternnähe zu hoch, um direkt Planeten dort entstehen zu lassen. Der Planet muss sich also in einer größeren Distanz zum Stern gebildet haben und dann zu diesem hin gewandert sein. Viele Aspekte einer solchen Planetenwanderung (Migration) sind noch nicht gut verstanden. Deswegen versuchen wir nun mit Hilfe von numerischen Rechnungen im Computer diesen Migrationsvorgang von Planeten in protoplanetaren Scheiben zu simulieren, um mehr über die Entstehung und Entwicklung von jungen Planetensystemen zu erfahren.

Hydrodynamische Gleichungen

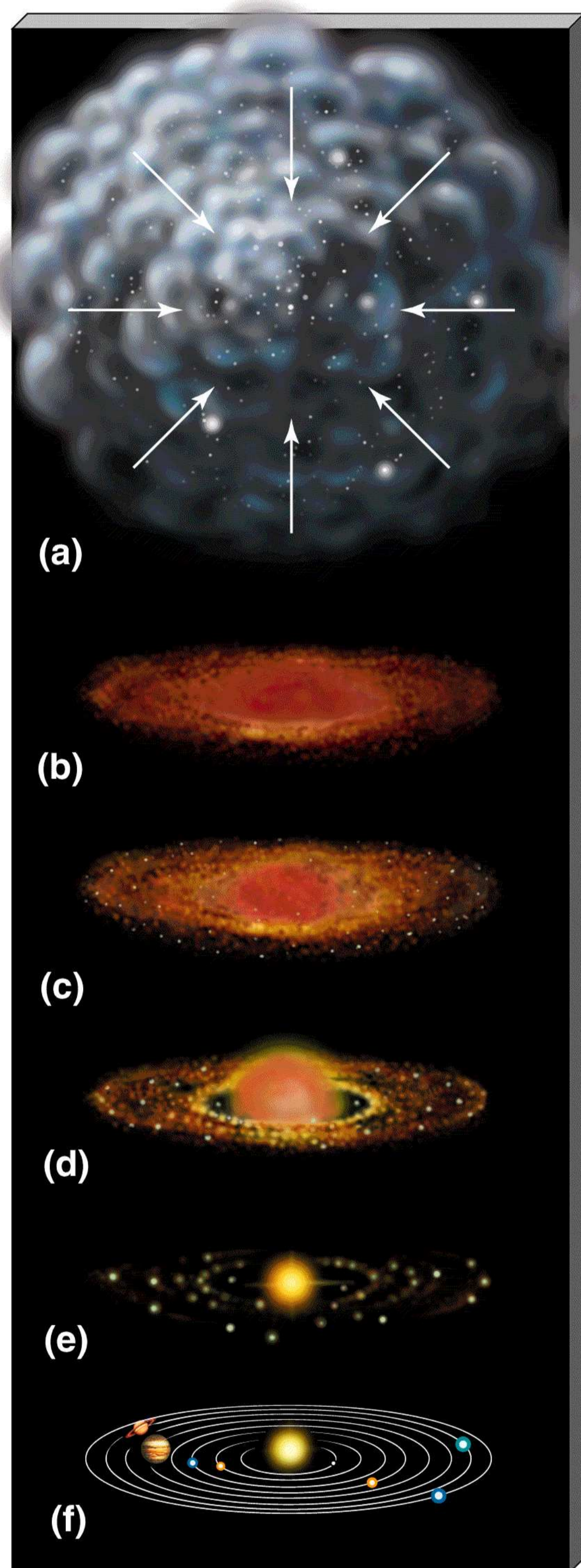
Die Bewegung des Gases in der protoplanetaren Scheibe wird durch die Hydrodynamischen Gleichungen (Erhaltung von Masse, Impuls, Energie) beschrieben:

$$a) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0,$$

$$b) \rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = \rho (\mathbf{a} - \nabla \Phi) - \nabla p + \nabla \sigma,$$

$$c) \frac{\partial \rho c_v T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_v T \mathbf{u}) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + Q^+ - \nabla \cdot \mathbf{F}.$$

Entstehung von Planetensystemen



Eine interstellare Molekülwolke kollabiert unter ihren eigenen Gravitation (a) und formt einen Zentralstern mit einer ihn umgebenden Gas- und Teilchenscheibe, der sogenannten Akkretionsscheibe (b).

Staubpartikel haften zusammen und formen Planetesimale, d.h. Objekte von einigen Kilometern Größe (c).

Die Planetesimale wachsen durch gravitative Akkretion des Gases in der Scheibe weiter zu Proto-Planeten (c-e).

Die Proto-Planeten wachsen durch Kollisionen untereinander weiter und werden zu Planeten, dabei regulieren sie ihre Umlaufbahnen (f).

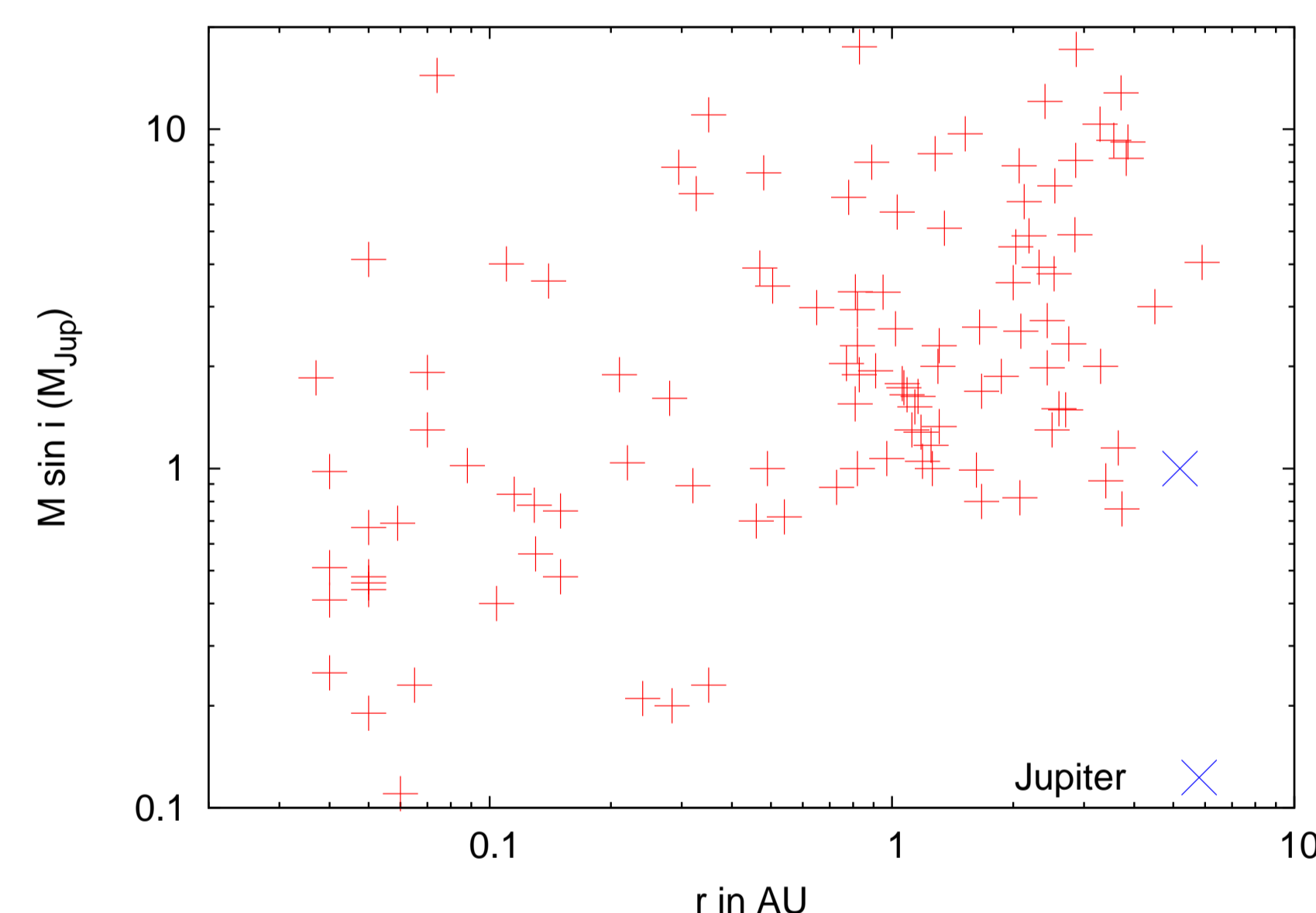


Abb. 2 Das Schaubild spiegelt das Verhältnis von Entfernung zum Zentralstern zu Masse der entdeckten Exoplaneten wieder. Es wird deutlich, dass der bis jetzt gefundenen Exoplaneten eine sehr große Masse haben und sehr nahe beim Zentralstern zu finden sind.

Planetare Migration

Da Planeten mit sehr großen Massen nicht in der direkten Umgebung des Sterns entstehen können, müssen sie während der Evolution der protoplanetaren Scheibe in dieser wandern. Die planetare Migration lässt sich sehr gut anhand der Spiralarme erklären (hellrot in Abb. 3). Der innere Spiralarm ($r < 1$) zieht den Planeten nach vorne, was einer Beschleunigung des Planeten entspricht und somit den Planeten nach Außen drückt. Der äußere Spiralarm ($r > 1$) hingegen zieht den Planeten nach hinten, was den Planeten abbremst und ihn somit nach Innen drückt.

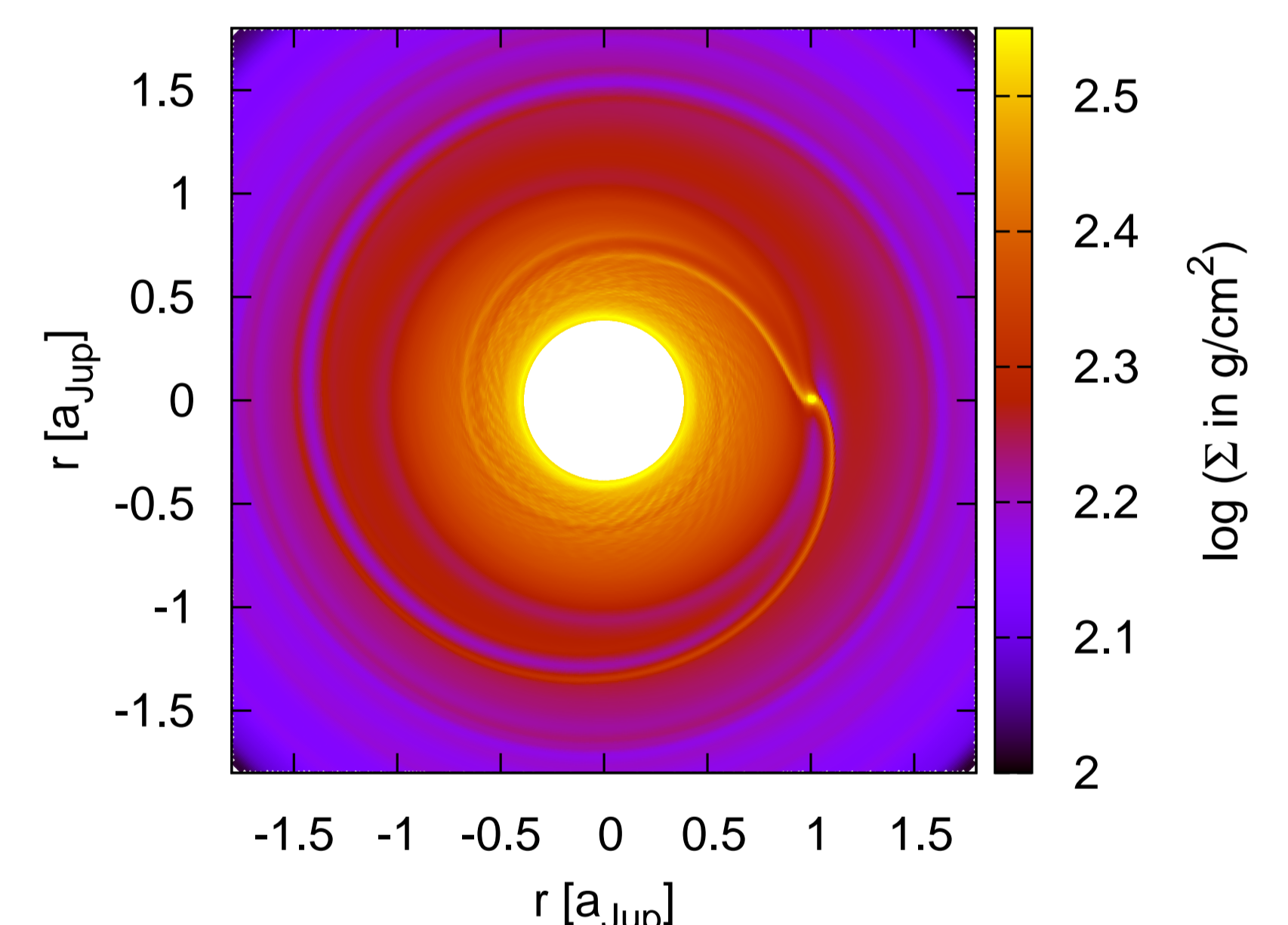


Abb. 3 Durch einen Planeten induzierte Spiralarme in der protoplanetaren Scheibe. Der Planet bewegt sich entgegen dem Uhrzeigersinn.

Die Beiträge des inneren und äußeren Spiralarms sind dabei abhängig von der zugrundeliegenden Energiegleichung c). Berücksichtigt man die grün und rot markierten Terme, man spricht von einer voll radiativen Simulation, so wandert ein 10 Erdmassenplanet nach außen, während er für die isotherme Simulation (die Terme werden nicht berücksichtigt) nach Innen wandert.

2D Struktur einer simulierten Akkretionsscheibe

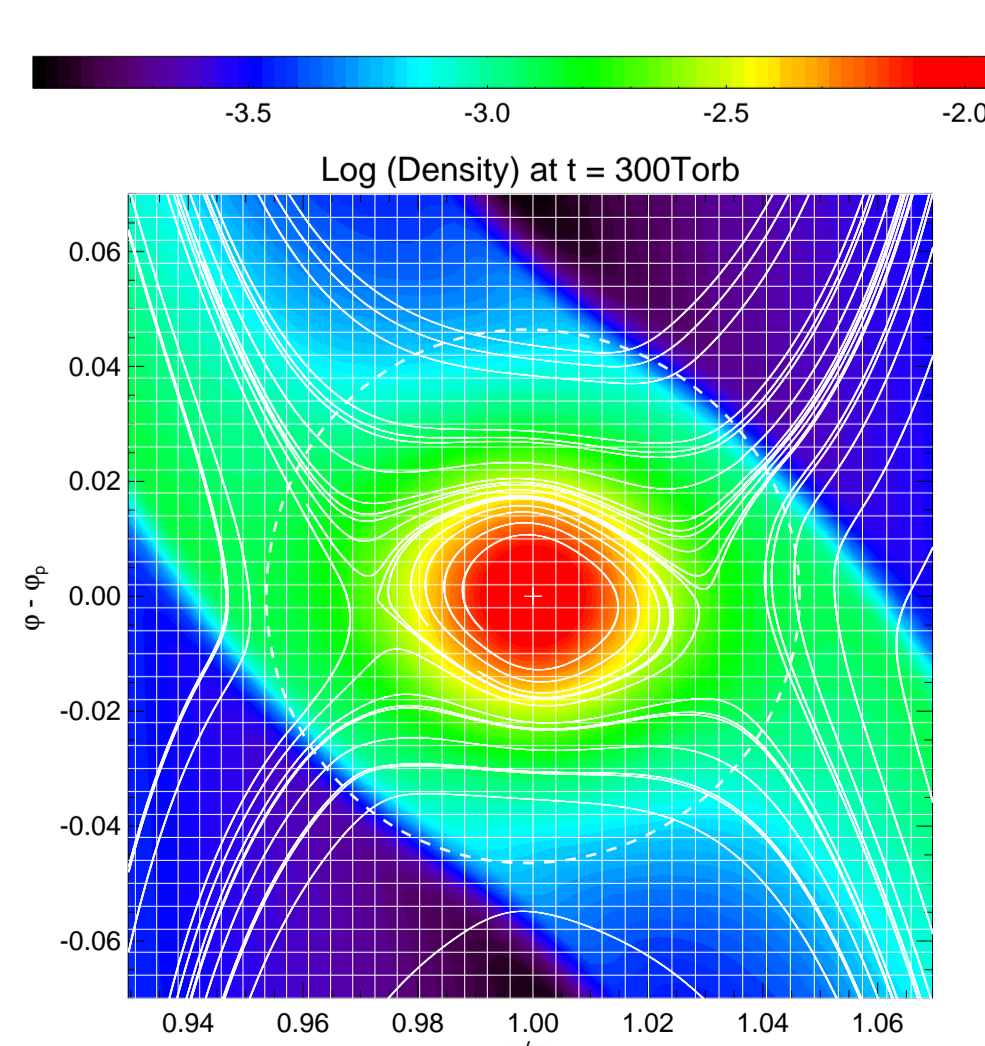


Abb. 4 Stark vergrößerter Ausschnitt der Dichtestruktur um den Planeten in der Akkretionsscheibe. Die sogenannten "Streamlines" geben Aufschluss über den Massefluss.

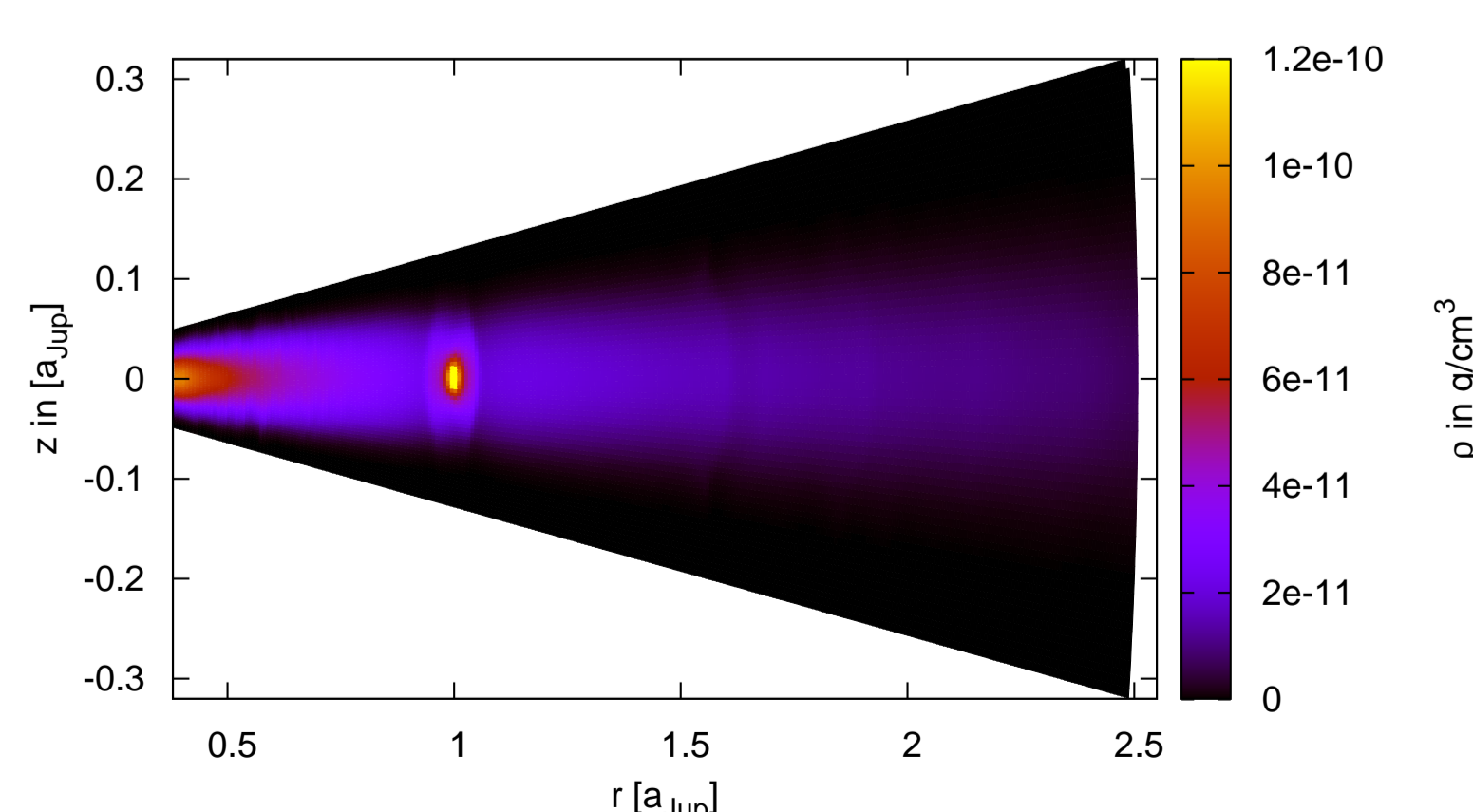


Abb. 5 Dichtestruktur der Akkretionsscheibe in der $r - z$ -Ebene. Der Planet sammelt durch sein Gravitationspotential Materie aus der Akkretionsscheibe aus allen Richtungen um sich an.

Zusammenfassung

Simulationen zur Migration von Planeten in Scheiben sind ein zentraler Bestandteil in der Erklärung zur Entwicklung eines Planetensystems. Die Berücksichtigung von immer mehr physikalischen Effekten (Vergleich: isotherme und voll radiative Simulationen) führt dabei zu immer genaueren Ergebnissen.

Durch planetare Migration kann erklärt werden, warum so viele Planeten sehr nahe bei ihrem Zentralstern gefunden werden. In unserem Sonnensystem hat planetare Migration nur in begrenztem Umfang stattgefunden, so ist z.B. Neptun etwas nach außen gewandert, und hat Pluto "eingefangen".