

# Interim reports 2015

Oct. 7-8, 2015

## ◆Program

Day 1: Oct. 7 (Wed)

10:15-10:30	Lab. Meeting	
10:30-11:30	Yuki Tanaka*	Radiative transfer in the MHD calculation for the atmosphere of the gas giants
11:30-12:30	Torsten Stamer*	Radiative Hydrodynamics Simulation of Brown Dwarf Formation
12:30-14:00	Lunch	
14:00-15:00	Shoji Mori*	Suppression of magnetorotational turbulence by the electron heating: a new relation between current and magnetic turbulence strength
15:00-16:00	Keisuke Sugiura	弾性体ゴドノフ SPH 法を用いた Tensile Instability の防止と衝突計算への応用
16:00-16:15	Break	
16:15-17:15	Tomoya Miyake	原始惑星系円盤の磁気乱流で駆動される円盤風中でのダストの動力学

\*In English

Day 2: Oct. 8 (Thu)

10:30-11:30	Yansong Guo	大速度分散コンパクト分子雲の起源：大質量ブラックホールによる重力散乱過程についての理論的研究
11:30-13:15	Lunch	
13:15-14:15	Yuki Ohno	惑星内部の対流の数値シミュレーション
14:15-15:15	Kensuke Kakiuchi	磁気流体計算で探る銀河中心領域のガスの鉛直構造
15:15-15:30	Break	
15:30-16:30	Yutaro Sato	N 体計算と統計的な計算を組み合わせた惑星集積コードの開発
16:30-17:30	Kenta Nakashima	$\chi$ 二乗検定を用いた連星系 HD139461 の軌道要素の解析

◆ Abstract

**Day 1: Oct. 7**

Yuki Tanaka
Radiative transfer in the MHD calculation for the atmosphere of the gas giants
<p>For exoplanetary science, the atmosphere of a planet is very important because many physical properties can be obtained from transit observations. For example, atmospheric structures and compositions of exoplanets have been revealed through transit spectroscopic observations in the optical and near-infrared wavelength. Furthermore, structures of the upper atmosphere of hot Jupiters and a large amount of the escaping atmosphere from hot Jupiters have also been investigated through several transit observations in UV wavelength. Characteristics of the planetary atmospheres are believed to be related not only with their observational features but also their internal structures and formation mechanism, therefore research on the atmosphere of the exoplanets have become more popular.</p> <p>In our previous studies, we demonstrated magnetohydrodynamic (MHD) calculation to treat details of a mechanism of atmospheric escape and the structure of the upper atmosphere of gaseous planets, especially for the hot Jupiters. As a result, we showed that MHD waves heat up the upper atmosphere of the hot Jupiters, and they can drive a large amount of atmospheric escape from the upper atmosphere. We also carried out calculations that take into account the magnetic diffusion in the planetary atmosphere, and showed MHD waves have an important role even in the weakly-ionized atmosphere of the planets.</p> <p>It is important for MHD calculation in the planetary atmosphere to treat the heating by MHD waves and radiative cooling/heating. We used radiative cooling functions that are used for the solar and stellar atmosphere in the previous calculations, but more accurate calculations of the radiative transfer are needed to apply our model to cooler gaseous planets. In this talk we use the two-stream approximation to solve the radiative transfer and determine radiative cooling/heating rate for the MHD calculation.</p> <p>I show several calculation results and discuss effects on the atmospheric structure and atmospheric escape. I will also talk about my recent progress and future tasks.</p>

Torsten Stamer
Radiative Hydrodynamics Simulation of Brown Dwarf Formation
<p>Brown Dwarfs are believed to be formed through the collapse of very low-mass, high-density molecular clouds. The details of this collapse are of interest, since those clouds tend to be hard to observe, making their abundance and mass distribution quite uncertain.</p> <p>I am developing a RHD simulation for the collapse scenario, which aims to show what mass function is needed to explain the observed numbers of Brown Dwarfs.</p> <p>In my talk, I will briefly explain the basics of the numerical method, and show some current results.</p>

Shoji Mori

Suppression of magnetorotational turbulence by the electron heating: a new relation between current and magnetic turbulence strength

原始惑星円盤内の乱流はその角運動量を外側へ輸送する一方で、サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星までその成長に影響を及ぼす。円盤で乱流を起こす機構の1つとして磁気回転不安定性が考えられている。この不安定性は電離度に依存しており、低電離度では不安定は発達しない。円盤内ではダストが荷電粒子を吸着し、低電離度になるために乱流が起きない場所があり、デッドゾーンと呼ばれる。これまでデッドゾーンの外側では激しい乱流が起きていると考えられていた。しかし、その発達した磁気乱流によって作られる強い電場が電子を加熱し(電子加熱)、加熱された電子がダストに効率よく吸着され、電離度が減少し、磁気乱流が弱まる可能性が指摘されている。我々は、電子加熱が原始惑星系円盤中のどの領域で起こりうるかを調べ、どの程度磁気乱流が抑制されるかを推定した。その結果、デッドゾーンの外側の 20 AU から 80 AU という広い領域で電子加熱が起きうることを明らかにした。また、磁気乱流は従来の理解に対し、著しく弱まることが示唆された。

Kensuke Sugiura

弾性体ゴドノフ SPH 法を用いた Tensile Instability の防止と衝突計算への応用

固体惑星は天体衝突の繰り返しによる合体成長で形成されたと考えられている。従って惑星の起源を詳しく理解するにあたって、小天体同士の衝突による破壊及び合体の効果を詳細に理解することは極めて重要である。しかし小天体は km 以上のサイズを持つため、室内実験で衝突を再現することは不可能である。よって数値計算を用いて小天体の衝突破壊・合体の効果を評価する必要がある。

近年小天体の衝突計算が、Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)法という流体の数値計算方法を弾性体力学に応用することで行われている(e.g., Benz and Asphaug 1999)。一般に広く使われている簡略な SPH 法は標準 SPH 法と呼ばれている。しかしこの標準 SPH 法には、固体が引き伸ばされた時に生じる張力を表す負の圧力の状態において、Tensile Instability という粒子同士がくっついてしまう不安定性が存在する(Sweple et al. 1995)。Monaghan 2000 ではこの不安定性を人工圧力という粒子が近づいた時に反発力になる項を導入して解決したが、この解決方法は元の方程式にない項を導入した不自然なものである。また標準 SPH 法は一般の乱雑な粒子配置では空間 1 次精度以下であり、それが計算に悪影響を及ぼすのではないかと懸念されている。

Inutsuka 2002 で開発されたゴドノフ SPH 法では離散化が注意深くなされており、空間 2 次精度を達成している。そこで本研究ではまず Inutsuka 2002 の定式化に習い、弾性体力学に必要な偏差応力テンソルを含む運動方程式とエネルギー方程式、及び偏差応力テンソル自身の時間発展方程式を、空間 2 次精度を達成するように離散化し、弾性体ゴドノフ SPH 法を開発した。次に、この安定性を線形安定性解析を用いて評価し、新しい Tensile Instability の解決方法を見出した。本発表では、Mehra et al. 2012 で行われている完全弾塑性体モデルを用いた板への球の衝突を弾性体ゴドノフ SPH 法を用いて計算した結果を紹介し、Tensile Instability への有効性を示す。

Tomoya Miyake
原始惑星系円盤の磁気乱流で駆動される円盤風中でのダストの動力学
<p>原始惑星系円盤進化の上で、未だ理論的に解明されていないことの一つに円盤ガスの散逸機構があり、その候補として、中心星からの UV や X 線放射による光蒸発が幅広く研究されている。一方で、磁気回転不安定 (MRI) 起源の磁気乱流により駆動される円盤風もまた、光蒸発と同等以上に円盤散逸の効果があるとの指摘が Suzuki &amp; Inutsukan (2009) によりなされている。ガスの散逸はダストの運動に影響を与えるが、このような円盤風を考慮したダストの動力学をこれまで調べられていない。そこで本研究では、磁気乱流駆動型の円盤風を考慮した原始惑星系円盤の、ダスト密度の鉛直方向分布の時間進化を単純化した 1 次元数値シミュレーションの手法で調べ、さまざまなサイズのダストの動力学について研究を行なった。その結果、摩擦力によりガスと強結合した小さなサイズのダストは、円盤風により円盤上空へと流れ出し、大きいダストは、円盤内部に留まることがわかった。さらに面白い事に、中間サイズのダストは重力と円盤風によるダストを持ち上げる力が釣り合い、ダストは赤道面から数スケールハイトの位置に浮いて滞留するという結果を得た。また、中心星からの距離に対する依存性を考慮すると、比較的小さいダストは円盤外側の領域にのみ残り、大きいダストは円盤赤道面付近に留まるという結果を得た。これらの結果は、円盤内のダストが円盤内側領域から、そして小さいサイズから消失していくことを示唆している。また、ダストが原始惑星系円盤上空に持ち上げられていると思われる赤外線観測の結果を、本機構の観点から議論し、加えて、ALMA などによる今後の高空間分解能観測による検証方法についても議論する。</p>

## Day2: Oct. 8

Yuki Ohno
惑星内部の対流の数値シミュレーション
<p>近年、理論予測よりもはるかに大きな半径を持つ短周期巨大ガス惑星が検出されている。この異常膨張の原因に対していくつかの説が提示されているが、未だ解決はしていない。一つの可能性として、惑星内部での熱輸送効率が小さいことで半径の収縮を抑えることが考えられている。巨大ガス惑星は形成時に大量の集積熱を有しており、輻射冷却により準静的に収縮する。そのため、惑星内部でのエネルギー流束が小さければ集積熱を長期間保持することができ、半径が大きい時期が長く続くと考えられる。ここで、惑星内部でのエネルギー輸送はその構造に大きく依存する。一般に巨大ガス惑星は全対流しており、主に対流によりエネルギーが輸送されていると考えられている。</p> <p>対流現象は重力下で温度勾配が断熱温度勾配よりも急である場合に発生する (Schwarzschild の条件)。しかし、組成 (平均分子量) に勾配がある場合には、対流の安定性が変化することが知られている (Ledoux の条件)。後者の条件で安定であるが前者の条件では不安定な領域では、熱と組成の拡散の影響を受けて、二重拡散対流と呼ばれる対流現象が起こり熱輸送効率が減少する。つまり、組成勾配によって内部構造が変化し、熱輸送効率も大きく影響を受ける。</p> <p>熱輸送効率が定量的にどの程度変化するかは数値シミュレーションにより検証する必要がある。</p> <p>本研究では、温度と組成の勾配、およびそれらの拡散を考慮した流体計算を行い、エネルギー流束を定量的に評価し、観測された巨大ガス惑星の半径異常の原因を解明することを目的としている。粒子を用いたラグランジュ的な流体数値計算手法の一つである SPH 法を用いて数値シミュレーションを行った。粒子法では拡散係数をゼロにすることで拡散の効果を完全に取除いた計算をすることができ、拡散が結果に与える効果をはっきりと確認できるというメリット</p>

がある。今回の発表では、熱伝導（熱の拡散）を考慮した 2 次元の数値シミュレーションの結果を紹介し議論する。

#### Yansong Guo

大速度分散コンパクト分子雲の起源：大質量ブラックホールによる重力散乱過程についての理論的研究

銀河系中心の分子雲領域（CMZ）では星間物質が一般に高密度であり広い速度幅を有している。その中でさらに広い速度幅とコンパクトな空間構造を持っている「高速度コンパクト雲（HVCC）」と呼ばれる雲が多数発見されている。最近、慶応大学・岡朋治らの観測グループにより、Sgr C 領域において爆発起源に特徴的な膨張シェル構造を持たない HVCC が観測された。その HVCC は非常に広い速度幅 ( $\Delta v > 100\text{km/s}$ ) を持ち、かつ低温 (10K) であることが明らかになった。このような温度が低くかつ構造も非常に乏しい HVCC の大きな速度分散の生成機構については大質量コンパクトな構造による重力散乱が考えられている。そこで、本研究では衝撃波を正確に捉えるゴドノフ SPH 法 (Inutsuka, 2002) を駆使し数値模擬観測を行うことにより、観測データを再現することを目指している。

#### Kensuke Kakiuchi

磁気流体計算で探る銀河中心領域のガスの鉛直構造

銀河系中心領域におけるガスの位置速度分布から、同領域においてガスが非円周運動をしていることは明らかである。また、銀河系中心領域における磁場の強さは数  $\mu\text{G}$  と円盤部と比較しても強いことが観測によって示されている。近年では、銀河系中心領域で確認されているガスのループ構造が磁気浮力によって持ち上げられたガスの様相を捉えているという研究報告もなされている。このことから、この非円周運動の原因にも磁場が影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる。そこで、Suzuki et al. (2015) は、3 次元磁気流体シミュレーションを行い、銀河系中心におけるガスの運動と磁場の関係性について調査を行った。数値計算によって得られた銀河経度-視線速度 ( $l-v$ ) 図には、観測の  $l-v$  図に見られる非軸対称な平行四辺形構造が描画されており、銀河系中心領域における磁気活動が動径方向の流れを励起させることで、非円周運動になることを示した。しかし、ここでは鉛直方向のガスの運動について解析されなかった。そこで、本研究では同数値計算の結果を用いて銀河系中心領域の鉛直構造の解析を行った。解析の結果、数値計算の  $l-v$  図内で高い視線速度が励起されている領域に対応する場所で銀河面の上空から銀河面に向かって急激な下降流が存在していることが判明した。この下降流は、磁気圧によって支えられていたガスが磁力線の歪曲によって鉛直方向に重力の影響を受けやすくなったために引き起こされたものであると考えている。本発表では、この下降流について研究報告を行う。

#### Yutaro Sato

N 体計算と統計的な計算を組み合わせた惑星集積コードの開発

太陽系の地球型惑星は火星程度の大きさの原始惑星同士の衝突によって形成されたと考えられており、これは巨大衝突ステージと呼ばれる。このことは理論的な研究からだけでなく、地質学的な証拠からも支持されている。そこで、このステージで原始惑星が巨大衝突を起こして地球型惑星が形成される過程の N 体シミュレーションを行った。その結果、確かに巨大衝突は起こり、地球型惑星が形成された。しかし、形成された惑星の離心率は現在の地球型惑星のものよりもはるかに大きくなってしまった。本研究において、原始惑星同士の衝突のみを扱ってきたことが原因だと考えられる。実際の宇宙にはもっと様々なサイズの粒子が存在しているからである。そこで、原始惑星の他に小さな微惑星が多数存在しているような系を考える。この系

では、力学的摩擦によってランダム運動の運動エネルギーはどの惑星も等しくなる。さらに、運動エネルギーは質量と速度の二乗の積に比例しているため、質量の大きな原始惑星はランダム速度が小さくなる。ランダム速度を小さくするには軌道傾斜角と離心率が小さくならなければならない。このようなプロセスで、形成された地球型惑星の離心率を下げられるはずである。その一方で、N 体計算の計算量は粒子数の二乗に比例するので、あまり多くの粒子を扱うことができないことが問題視されていた。しかし今年に入って、多くの粒子を扱うことができないが、直接天体の軌道を計算できる N 体計算と、衝突破片など多数の粒子を扱う時に有効な統計的な計算のそれぞれの長所を取り入れた新たな惑星集積コードが開発された (Morishima 2015)。

中間発表ではこの新コードについて説明した上で、本研究にどのように取り入れていくかについて議論する予定である。

#### Kenta Nakashima

##### $\chi$ 二乗検定を用いた連星系 HD139461 の軌道要素の解析

HD139461 は分光観測によって連星をなしていることが判明した系であり、この連星系の軌道長半径は 2.05AU、離心率は 0.83 と求められた。(Kato et al. 2013)。また、連星系 HD139461 の主星 (HD139461A) の視線速度変化には、二体問題では説明できないようなズレが存在する。このズレは周期的に変化しており、そのために主星の周りには三つ目の天体、「惑星」が存在することが示唆されている。加藤らはこのズレを「惑星」が主星の周りをケプラー軌道で公転しているという仮定の上で解析し、この「惑星」は連星系の主星の周りを軌道長半径 0.179AU、離心率が 0.31 の軌道で公転しており、質量が最低でも 0.7 木星質量程度のガス巨星であると見積もった。

本研究ではこれまで、主星と伴星の二体問題、主星と「惑星」の二体問題、さらには三つの天体をすべて考慮した数値シミュレーションを行ってきた。その結果、主星の視線速度変化のズレは単純に二つの二体問題の足し合わせでは説明できないことが分かった。そこで、主星、伴星、「惑星」のより正確な軌道要素を求めるために、 $\chi$  二乗検定を用いて解析を行った。三体問題について考える前に、まずは主星と伴星の二体問題について最適な軌道要素を求める。その上で、三体問題についても  $\chi$  二乗検定を適用することによって、視線速度のズレを説明するにはどのような「惑星」が必要なのか制限をつけることを目指す。