

国際研究会「Revealing Evolution of Protoplanetary Disks in the ALMA Era」開催報告

野村 英子¹

1. はじめに

2012年5月8日－11日に京都大学理学研究科において国際研究会「Revealing Evolution of Proto-planetary Disks in the ALMA Era」が開催された。昨年9月よりアタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)の部分運用が始まり、数年以内には本格運用が開始される予定である。ALMAでは従来のミリ波・サブミリ波望遠鏡の性能をはるかに上回る高感度・高空間分解能観測が可能になり、原始惑星系円盤中のダスト・ガスの詳細な構造が明らかになると期待されている。具体的には、距離150 pc程度の近傍の星形成領域の円盤では、ダストではおよそ1 AU、ガスではおよそ10 AUスケールの構造が明らかになると考えられる。一方で、すばる望遠鏡などの地上望遠鏡やスピッツァー、ハーシェル宇宙望遠鏡などにより、円盤ダスト・ガスの赤外線観測は近年急速に進展した。また、地上望遠鏡およびケプラーなどの宇宙望遠鏡による近年の系外惑星探査は、惑星系の多様性およびその統計的性質をも明らかにしつつあり、観測を説明し得る汎惑星形成理論の構築が求められている。

本研究会は、これらの近年の原始惑星系円盤や残骸円盤の観測・系外惑星探査の進展を背景に、ALMAを用いた円盤ダスト・ガスの詳細観測より如何にして円盤内の物理的・化学的進化、ひいては惑星形成理論や太陽系内物質との関連について検証できるか、に焦点をあて、議論を行うことを目的として開催された。研究会では、海外からは円盤理論・観測の研究を行う

11名の講師に、国内からは円盤理論・観測に加え、惑星形成理論、系外惑星探査、太陽系内物質の研究を行う7名の講師に招待講演して頂いた。また、国内外より総勢約80名(海外：約30名、国内：約50名)の皆様にご参加頂いた。

2. 講演内容

(I) ポピュレーション・シンセシス・モデル (II) ダスト進化と磁気回転不安定性 (III) 円盤進化における中心星の影響とガス散逸 (IV) 円盤化学 (V) 惑星と円盤の相互作用の5つのセッションで招待講演を軸に27講演があった(表1にプログラムを示す)。以下にそれぞれのセッションにおける招待講演内容の概要を記す。なお、招待講演者のプレゼンテーションファイルの多くは研究会ホームページ^{*1}からダウンロードできるので、詳しくはそちらを参考にして頂きたい。

2.1 ポピュレーション・シンセシス・モデル

系外惑星の統計的観測と原始惑星系円盤の物理過程を繋ぐ鍵としてまず、東工大の井田茂氏にポピュレーション・シンセシス・モデルの最新成果について講演して頂いた。講演内では、ガス惑星同士の近接散乱による長軌道長半径を持つ惑星の形成と、その軌道長半径・質量等の統計的性質などについてお話し頂き、また惑星の軌道進化を考える上での、円盤面密度進化とそれに影響を及ぼす磁気回転不安定性や光蒸発の重要性についても触れて頂いた。

1. 京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室
nomura@kusastro.kyoto-u.ac.jp

^{*1} http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/kyoto_disk/index.html

表1：研究会プログラム：(I)招待講演，(C)一般講演。

5月8日(火)

13：30－13：50 Introduction(Hideko Nomura)

(I)POPULATION SYNTHESIS

13：50－14：35 (I)Shigeru Ida “Formation of distant jupiters and its relation to disk structure”

(II)DUST EVOLUTION & MRI

14：35－15：20 (I)Meredith Hughes “Dynamics of protoplanetary and debris disks: turbulence, magnetic fields, and clumps”

15：45－16：30 (I)Satoshi Okuzumi “Rapid Coagulation of Porous Dust Aggregates Outside the Snow Line”

16：30－16：50 (C)Hidekazu Tanaka “Growth of Cosmic Dust Aggregates and Reexamination of Particle Interaction Models”

16：50－17：10 (C)Paola Pinilla “Refining dust evolution models in protoplanetary disks with ALMA”

17：10－17：30 (C)Taku Takeuchi “Evolution of the Surface Density Structure of a Protoplanetary Disk with a Dead Zone”

17：30－18：30 poster presentation

5月9日(水)

09：00－09：45 (I)Mark Wardle “Magnetorotational instability in protoplanetary discs”

09：45－10：15 Short summary + discussion(Mark Wardle)

(III)STAR-DISK INTERACTION & GAS DISPERSAL

10：45－11：30 (I)Bill Dent “GASPS - Herschel survey of FIR lines from Class II through to debris disks”

11：30－11：50 (C)Gregory Herczeg “Accretion onto Young Stars”

11：50－12：10 (C)Eiji Akiyama “Radial Density Structure of Protoplanetary Disk: Power-Law Disk Model vs. Similarity Solution Disk Model”

13：40－14：25 (I)Gwendlyn Meeus “Proto-planetary Herbig Ae/Be discs as seen with Herschel: atomic and molecular emission lines as tracers of the disc chemistry and physics”

14：25－14：45 (C)Gerrit van der Plas “Warm CO gas as a tracer of the inner 50 AU of proto-planetary disks”

14：45－15：30 (I)Bun'ei Sato “Extrasolar Planets around Intermediate-Mass Stars”

16：00－16：45 (I)Uma Gorti “Dispersal of Protoplanetary Disks”

16：45－17：30 (I)Masahiro Ikoma “On the impact of protoplanetary disk properties on the accretion of super-Earths' atmospheres”

17：30－18：30 poster session

5月10日(木)

09：00－09：45 (I)Jonathan Williams “The Evolution of Protoplanetary Disks at Millimeter Wavelengths”

09：45－10：15 Short summary + discussion(Jonathan Williams)

(IV)DISK CHEMISTRY

10：40－11：00 (C)Yuri Aikawa “From Prestellar to Protostellar Cores: Time Dependence, Deuterium Fractionation, and Disk Formation”

11：00－11：45 (I)Charlie Qi “Molecular observations of disks with the Submillimeter Array”

11：45－12：30 (I)Edwige Chapillon “Molecular line observations of protoplanetary disks”

14：00－14：45 (I)Catherine Walsh “The Chemical Modelling of Protoplanetary Disks in the Era of ALMA”

14：45－15：30 (I)Shogo Tachibana “Clearing of the Protosolar Nebula: Constraints from meteorites, asteroids, and planets”

15：30－16：00 Short summary + discussion(Yuri Aikawa)

(V)PLANETS-DISK INTERACTION

16：20－17：05 (I)Motohide Tamura “High-Contrast Imaging Polarimetry of Protoplanetary Disks with Subaru”

17：05－17：25 (C)Nagayoshi Ohashi “New SMA and PdBI observations of the protoplanetary disk around AB Aurigae”

5月11日(金)

09：00－09：45 (I)Sean Andrews “Millimeter-wave Observations of Protoplanetary Transition Disks”

09：45－10：05 (C)Shih-Ping Lai “Probing the physical properties and morphological evolution of transition protoplanetary disks”

10：05－10：50 (I)Takayuki Muto “Planets in Protoplanetary Disks: Theory and Observations”

11：20－11：40 (C)Andres Carmona “Understanding the gas and dust structure of protoplanetary disks: a synergy of multi-instrument observations and advanced modeling, the case of HD 135344B”

11：40－12：25 (I)Thayne Currie “Direct Imaging of Exoplanetary Systems and ALMA”

12：25－12：55 Short summary + discussion(Thayne Currie)

12：55－13：10 Concluding remarks(Bill Dent)

2.2 ダスト進化と磁気回転不安定性

円盤内ダスト進化は惑星形成の第一段階であり、かつ赤外線－ミリ波・サブミリ波観測で検証が可能な過程である。またダスト進化と磁気回転不安定性は互いに密接な関係にあり、ダスト進化は円盤ガスの電離度、すなわち磁気回転不安定性に影響を及ぼし、磁気回転不安定性起源の乱流はダスト進化に影響を及ぼす。円盤ガス電離度もまた観測的検証可能な物理量であり、ダスト進化と磁気回転不安定性(乱流)、観測量の包括的理解が惑星形成第一段階解明の鍵となるであろう。

カリフォルニア大学バークレイ校のMeredith Hughes氏には、円盤内乱流の観測的検証の1つとして、サブミリ波干渉計SMA(Submillimeter Array)を用いたCO分子輝線の高感度・高速度分解能観測により、線幅に乱流成分を検出した研究成果についてお話し頂いた。さらにHughes氏には、サブミリ波ダスト偏光観測より円盤内ダストの性質と磁場へ制限を与える研究とミリ波干渉計CARMA(Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy)による偏光観測プロジェクトTADPOLについて、またミリ波干渉計でみる残骸円盤はクランプ構造を持たない、という最新の観測成果についてお話し頂いた。名古屋大学の奥住聡氏には、空隙率進化を考慮したダストの成長と運動の基本的性質から、乱流円盤中で高空隙率ダストが中心星へ落下する際、エプスタイン・ストークス抵抗則境界領域を超えて微惑星質量まで急速に成長する、という最新の研究成果についてお話し頂いた。またマッコーリー大学のMark Wardle氏には、磁気回転不安定性の基礎理論から、低電離率の原始惑星系円盤中のオーム散逸、双極性拡散(amibipolar diffusion)、ホール効果による磁気回転不安定性の安定化に関する研究まで、ホール効果の磁場の方向依存性及びダストサイズ依存性に関する最新の研究成果も含めてお話し頂いた。

2.3 円盤進化における中心星の影響とガス散逸

原始惑星系円盤ガス・ダストの主な熱源は中心星からの輻射と考えられている。輻射によるガス加熱は、ガス散逸の主要機構の1つと考えられている光蒸発を駆動する。若い星団内においては、近傍の大質量星からの照射もまた加熱源となり得る。小中質量星円盤の

物理的・化学的性質の違いに関する観測的研究が最近進展している一方で、小質量星だけでなく、中質量星周りの系外惑星探査も近年大きな成果をあげている。様々な照射環境下での光蒸発過程の検証は円盤ガス散逸過程の解明に大きく貢献し、また、中心星の違いも含めた様々な環境下での円盤進化の違いを解明することは、惑星系の多様性の理解にも繋がると考えられる。

ALMA/ESOのBill Dent氏には、ハーシェル望遠鏡による原始惑星系円盤ガスのサーベイプロジェクトGASPS(Gas in Protoplanetary Systems)の成果についてお話し頂いた。様々な年齢の星団内の星への近赤外線超過付随率の観測より、原始惑星系円盤ダストの寿命が見積もられている。GASPSは遠赤外線[OI]輝線等を用いて同様の観測を行い、円盤ガスの寿命を求めることを目的としている。講演では、各領域における円盤ガス・ダストの観測結果と、円盤ガスの寿命はダストの寿命よりもやや短いという現時点での観測解析結果が発表されたが、放射領域の違いも含め、今後さらなる統計的解析が行われる予定である。マドリード・アウトノマ大学のGwendolyn Meeus氏には、ハーシェル宇宙望遠鏡GASPSおよびDIGIT(Dust, Ice, and Gas in Time)プロジェクトによる中質量星円盤の遠赤外線ガス・ダスト観測の最新成果について、とりわけ[OI]、CO、H₂O輝線の性質について、小質量星円盤との違いも含め詳しくお話し頂いた。東工大の佐藤文衛氏には、中質量星周りの系外惑星の統計的性質の最新成果について、軌道長半径や惑星保有率などにおける小質量星周りの惑星との違いや円盤進化(散逸)との関連も含め、大変興味深い話をして頂いた。SETIのUma Gorti氏には、円盤ガスの光蒸発に関する理論的研究について、可視・赤外線輝線による観測的検証の結果も交えてレビューして頂いた。東大の生駒大洋氏には、最近のケプラー系外惑星などの惑星密度の観測結果を踏まえ、ホット・スーパー地球大気の形成と円盤温度やガス散逸時間への依存性などについて、大変興味深いお話しをして頂いた。またハワイ大学のJonathan Williams氏には、サブミリ波望遠鏡JCMT/SCUBA-2などを用いたミリ波・サブミリ波ダスト放射観測より若い星団内の円盤ダスト質量の年齢依存性を求めた研究や、ミリ波ダスト放射とCO同位体分子の輝線観測による円盤内ガス・ダスト比の多様性を明らかにした研究の最新成果について発表して頂

いた。

2.4 円盤化学

ミリ波・サブミリ波における円盤からの様々な分子輝線は1990年代後半より観測され始め、最近では干渉計の発展に伴い、観測される分子や天体の数が増えつつある。また、スピッツァーやハーシェル宇宙望遠鏡により、円盤からの赤外線分子輝線も数多くの天体で観測されるようになった。ALMAにより観測可能な分子や天体の数は著しく増加し、その観測結果を用いた円盤の物理・化学構造の解明が進展すると期待される。一方で近年のサンプル・リターンミッションも含め太陽系内物質に関する研究も進んでおり、高感度のALMAによる原始惑星系円盤からの複雑な分子種の観測は、太陽系内物質に至る物質進化解明への糸口を探る上でも重要な役割を果たすと期待される。

ハーバード・スミソニアン天体物理学センターのCharlie Qi氏には、SMAによる円盤化学サーベイプロジェクトDISCSの最新成果である、温度トレーサとなる分子種、円盤内で重水素濃縮されている分子種とその半径方向の分布、中質量星円盤におけるCO snow lineの観測などについて発表して頂いた。台湾中央研究院天文物理研究所のEdwige Chapillon氏には、ミリ波干渉計IRAM/PdBIによる円盤化学サーベイプロジェクトCIDの最新成果である低温CCH, CN, HCN & CO輝線の観測、低温領域におけるイオン・トレーサーである N_2H^+ 輝線の観測、CCSその他の硫黄を含む分子種や HC_3N 輝線の観測、ガス/ダスト比が低い中質量星円盤からのCI輝線も含めた観測成果について発表して頂いた。クイーンズ大学ベルファストのCatherine Walsh氏には、円盤化学モデルについて総括してもらい、またダスト表面からの分子の非熱的脱離と詳細なダスト表面反応を考慮した、円盤内における大型有機分子生成に関する最新の成果などを発表して頂いた。北海道大学の橘省吾氏には、隕石内物質から探る円盤内での酸化鉄生成条件やCAIやコンドリュール生成機構候補の1つとしての衝突加熱と円盤内ガス・ダスト量との関連、またスターダストミッションによる彗星中のCAIの検出を踏まえ、彗星形成領域へのCAIの輸送機構について、さらに、はやぶさ2計画についてお話し頂いた。

2.5 惑星と円盤の相互作用

近年可視・近赤外線や(サブ)ミリ波撮像観測などにより円盤の詳細構造が明らかになってきており、惑星との相互作用がその構造形成の一因に考えられている。例えば、すばる望遠鏡の系外惑星・円盤観測プロジェクトSEEDS(Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru)などでの原始惑星系円盤に非軸対称な構造が観測されており、また、スピッツァー望遠鏡による中間赤外線スペクトル観測や赤外線・(サブ)ミリ波撮像観測により中心に穴のあいた円盤(transition disk: 遷移円盤)が見つかっている。一方でが座ベータ星(β Pic)など主系列星周囲の残骸円盤の撮像観測にも惑星起源と考え得る構造が発見されている。高空間分解能・高感度のALMAは、このような円盤の詳細構造の統計的観測を可能にすると期待されている。

国立天文台の田村元秀氏には、SEEDSプロジェクトによる小中質量星円盤観測の最新成果について、各円盤の観測結果の紹介と、ギャップ等の構造を持つ円盤と持たない円盤の年齢依存性などに関する発表をして頂いた。ハーバード・スミソニアン天体物理学センターのSean Andrews氏にはSMAによる高空間分解能サーベイ観測の最新成果から、(サブ)ミリ波遷移円盤は赤外線遷移円盤よりも多数存在する、という観測結果などを発表して頂いた。工学院大学の武藤恭之氏には、円盤内の密度波理論の概要と、すばる望遠鏡による円盤内スパイラル構造の観測結果およびその密度波理論によるフィッティングと温度構造との関連に関する最新成果を発表して頂いた。NASA GoddardのThayne Currie氏には、系外惑星が直接撮像観測されたHR8799の残骸円盤の観測より惑星質量に制限を与える手法に関する研究、およびSCEXAO(Subaru Coronagraphic Extreme AO)による系外惑星・円盤観測計画と初期観測成果などについてお話し頂いた。

2.6 ポスターセッション

ポスターセッションでは約30名の発表があった。円盤に関する理論的・観測的研究を行う学生による発表が大半で、形成初期段階の円盤から惑星大気への円盤物理の影響まで、様々な内容の研究が紹介されていた。研究会初日にショートトークの時間、2日目にポ

スターセッションの時間が設けられたが、それ以外にも休み時間などを利用してポスターの前で活発に議論が行われていた。

3. まとめおよび謝辞

海外・国内より多くの皆さんに御参加頂き、盛況な研究会が開催できました。特に各セッションの後に設けた議論の時間には色々な意見を出してもらうことができ、大変良かったと思います。海外と国内の研究者間の交流の場を設けられたことも、研究会の成果の1つと思います。ALMAの本格運用を間近に控え今後の原始惑星系円盤・残骸円盤観測の方針を考える上で、

本研究会が、系外惑星観測、円盤の多波長観測や太陽系内物質との関連も含めた幅広い視点で惑星形成論にアプローチするためのヒントとなれば幸いです。またALMAに限らず、各参加者が円盤進化および惑星形成論に関する研究を今後進める上で、本研究会が何らかの足掛かりになれば幸いです。

最後になりましたが、研究会開催を支えてくれたオーガナイザーの皆様、丁寧に講演準備をして頂いた招待講演者の皆様、また、研究会を盛り上げて頂いた全ての参加者の皆様に感謝致します。また本研究会は、新学術領域研究「太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ」からの援助で開催されました。深く御礼申し上げます。



図1：研究会集合写真。