

# 東京大学大学院理学系研究科附属 ビッグバン宇宙国際研究センター



Research Center for the Early Universe





## ■ 序文

ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU; Research Center for the Early Universe) は、1995年に文科省プログラム「COE (卓越した研究拠点) 形成基礎研究」に基づき理学系研究科の内部組織として設けられた、「初期宇宙研究センター」を前身とし、1999年4月、当時の文科省令により、東京大学理学系研究科に設置されたセンターです。

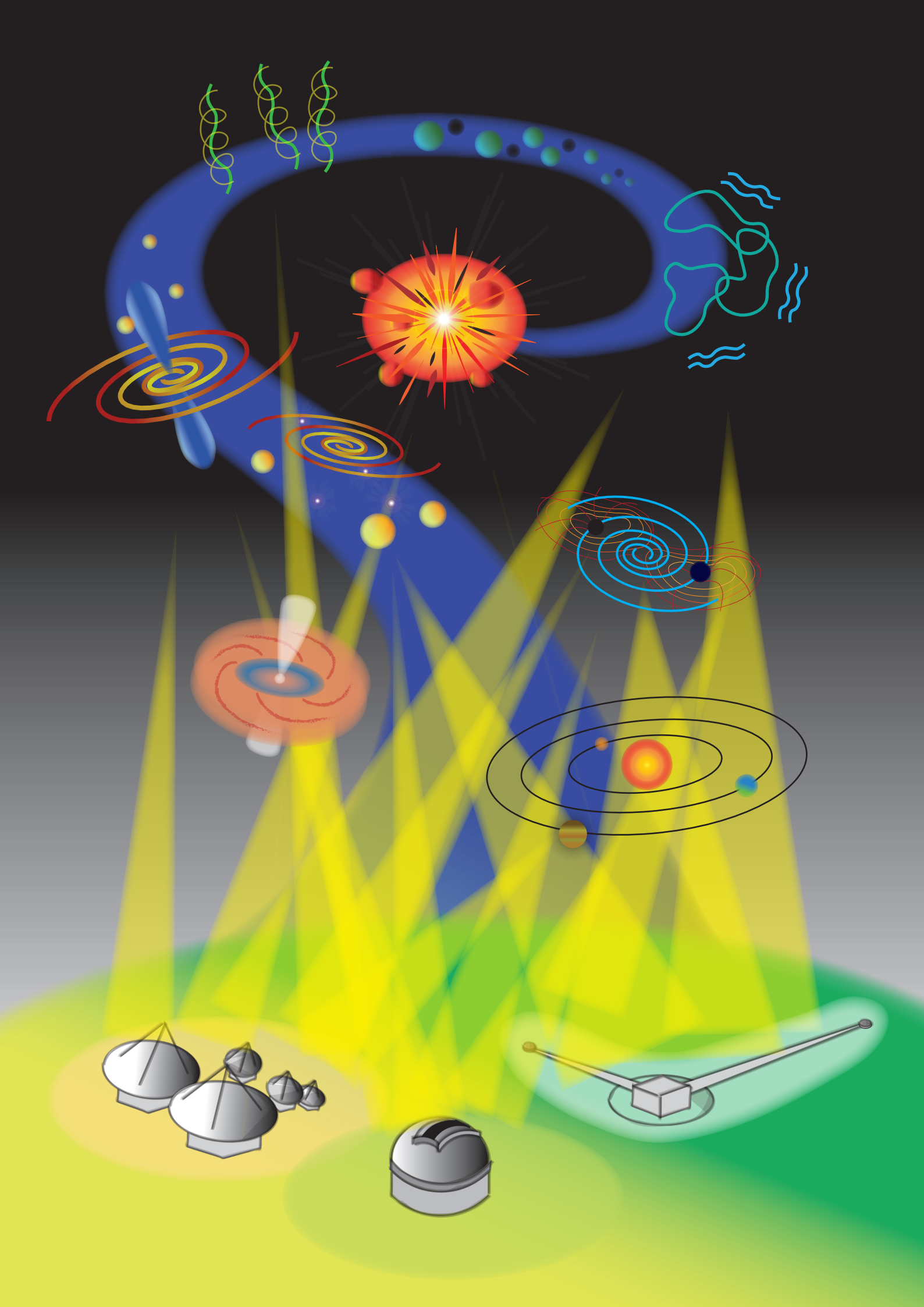
当初は、教授1名、助教授1名、助手2名でスタートしましたが、現在では教授2名、准教授2名、助教4名が着任しており、複数の特任助教、多くの博士研究員、大学院学生とともに、活発な研究を展開しています。さらに、理学系研究科内の物理学専攻、天文学専攻、地球惑星科学専攻に在籍する関連研究者の方々に研究協力者として参加して頂くことで、理学系研究科内での宇宙物理学研究のハブ的役割を担っています。宇宙物理学は基礎科学の中でも極めて進展が著しい分野の一つであり、RESCEUもそれに対応して柱となる研究テーマを定期的に再編することで、知の新たな地平線を開拓するとともに、数多くの最先端の研究成果を挙げ続けています。

宇宙の誕生とその後の進化は、宇宙物理学の根幹とも言うべき重要な問題であり、RESCEUが発足以来追求し続けているテーマでもあります。RESCEUでは、素粒子物理学や重力理論の最新の成果を組み合わせる宇宙の起源と誕生に関する理論モデルを提案すると共に、多波長にわたる宇宙論的観測を行い、さらにはそれらの精密観測データを初期条件としてその後の天体諸階層の進化を数値シミュレーションによって明らかにしています。

米国のLIGOによる2015年の重力波直接検出は、物理学の歴史に残る大発見となり、直ちに重力波天体物理学という新たな分野が生まれ、急速に発展しています。RESCEUのグループも、米国と欧州の重力波研究グループとの国際共同研究を通じてブラックホールや中性子星からの重力波検出に本質的な貢献をしてきました。さらに、日本のKAGRA実験のデータ解析と物理的解釈においても大きな役割を果たすことが期待されています。

1990年代に発見された太陽系外惑星は、太陽系の起源、星と惑星の共進化、さらには宇宙生物学を包含する新たな天文学の一分野として確立しています。RESCEUでは、すばる望遠鏡を用いた惑星観測プロジェクトを主導するとともに、電波による原始惑星系円盤の観測、惑星系の光度曲線データの精密解析、スペースミッションを用いた太陽系の起源の解明、など多様な研究が展開されています。

これらはそれぞれ、Evolution of the universe and cosmic structures (宇宙の進化と構造形成)、Gravitational-wave astrophysics and experimental gravity (重力波天体物理学と重力実験)、Formation and characterization of planetary systems (惑星系の形成とその諸性質の探求)という、現在のRESCEUにおける3つの主要プロジェクトと位置づけられており、東京大学のみならず国内外の多くの共同研究者とともに、総合的かつ国際的な視野に立脚した研究に発展しています。



## Project 1

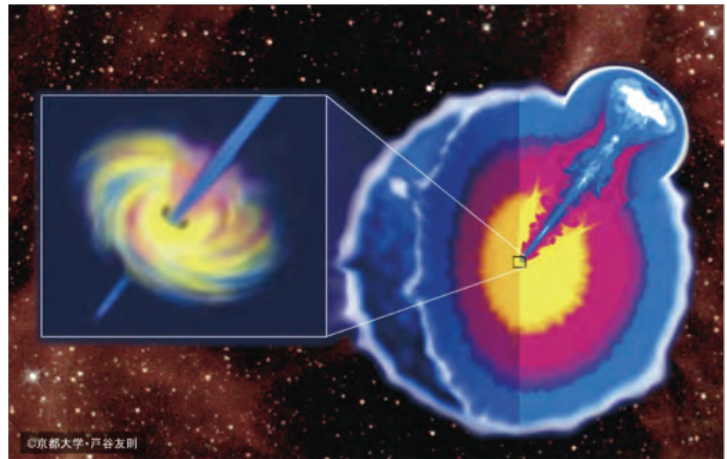
### Evolution of the Universe and cosmic structures

#### 宇宙と天体構造の進化

宇宙がどのように生まれ、どう進化してきたのか、このような根源的な問いに答えるべく、最新の理論と観測を用いて研究を進めるのがこのプロジェクトです。ビッグバン宇宙論の持つ根源的な問題を解決する手段として提案されたインフレーション宇宙論は、微小な密度の不均一性を生成するので、これによって宇宙大規模構造の初期条件が与えられます。これに基づいて初期天体形成から大規模構造形成に至るまで、精密な数値シミュレーションを行うことによって宇宙の進化を再現する理論的研究と観測的研究を並行して進めています。

後者については、すばる望遠鏡を用いた広視野測光・分光サーベイによって広い天域にわたるダークマター分布地図を作成し、宇宙階層構造の性質を観測的に明らかにしようとしています。特に、ダークマター分布の時間進化には重力相互作用に基づく宇宙構造形成を妨げる宇宙膨張の情報が刻み込まれているため、すばる望遠鏡を用いたダークマター分布地図の観測から宇宙膨張を加速させるダークエネルギーの正体を探る計画が進行しています。

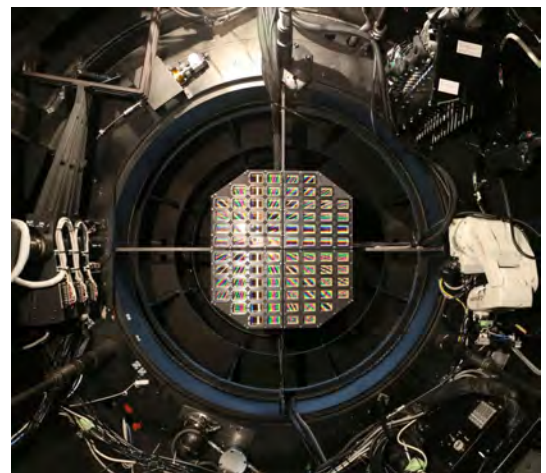
こうした構造の進化と共に、元素組成の変化すなわち銀河の化学進化も、宇宙の歴史をたどる上で極めて重要な研究課題です。ヘリウムよりも重い元素は恒星の内部でおこる核融合反応によって作られますが、恒星の内部にため込まれた重元素は、超新星爆発やガンマ線バーストのような極限天体現象によって星間空間に返されます。これを原料として



ガンマ線バーストから噴出するジェットの想像図

次世代の星が形成され、さらに超新星爆発やガンマ線バーストを起こすことにより、銀河は化学進化していきます。このうち、宇宙最大の爆発現象ともいわれているのがガンマ線バーストで、数秒から数十秒続く長いものと2秒以下の短いものがあることが知られています。前者は極超新星に伴ってできるブラックホールから放出されるジェットによって、後者は連星中性子星合体によって説明されています。

私たちはこれらの激しい変動を示す天体現象から放射されるX線やガンマ線、そして重力波の観測を行っています。特に今まで観測したことのない時間分解能でこれらの激しい変動天体に対する可視光観測を行うために、木曾観測所のシュミット望遠鏡に装着する、CMOS検出器

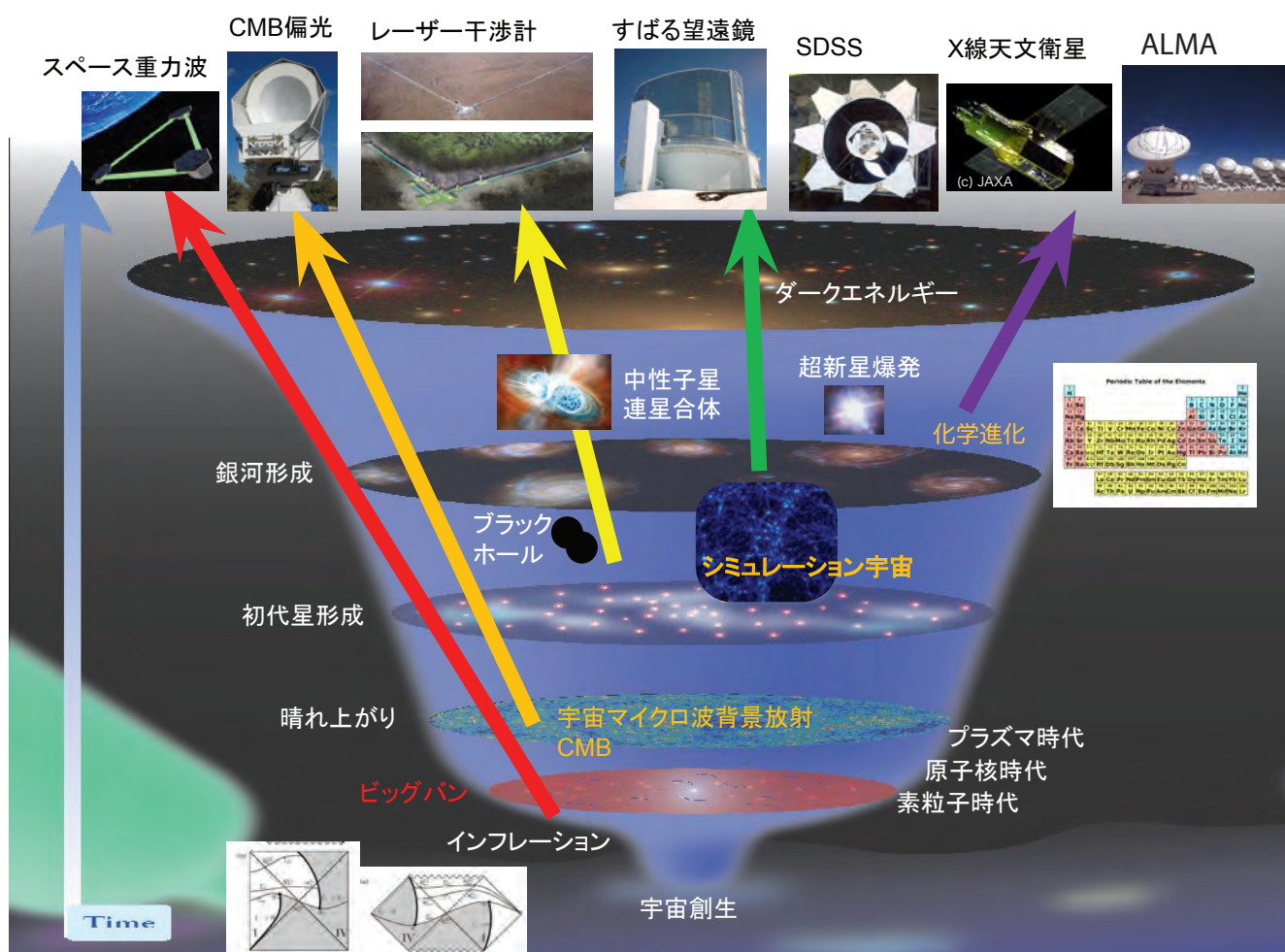


超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen



84台を並べた超広視野高速カメラ Tomo-e Gozenを製作しました。これらの観測によって得られたデータを理論モデルと比較することにより、銀河の化学進化を総合的に研究しています。インフレーション宇宙論そのものに迫る研究も重要な研究テーマの一つです。初期宇宙のインフレーションは宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度ゆらぎの精細観測によって強く支持されています。しかし、現在の宇宙の基礎理論とされる一般相対性理論や素粒子標準模型ではインフレーションをはじめとする初期宇宙に起こった現象を記述することが難しいことがわかっています。そこで私たちは、素粒子理論や重力理論に動機付けられた標準模型や相対論を超えた仮説的な理論の枠組を用いて初期宇宙のインフレーションやダークマター、物質反物質非対称性の起源の詳細を説明するモデルを提案しています。

さらに、理論的に予言されたインフレーション宇宙の詳細を観測的に検証することも不可欠です。今後のCMBのBモード偏光の観測計画を進めると共に、重力波プロジェクトと協力して宇宙重力波望遠鏡計画の検討をし、インフレーションとそれに引き続くビッグバンがいつ起こったかを明らかにすることを目指しています。



宇宙の進化図上に示された研究対象および観測装置

## Project 2

### Gravitational-wave astrophysics and experimental gravity 重力波天体物理学と重力実験

重力波は電磁波と同様に、波として伝播します。伝播するのは物体の質量が動くことによって作られる重力場です。そのため、電磁波では電化や電流の動きを探れるのに対し、重力波では質量の動きを探れるのです。

重力波は2015年に初観測され、それはブラックホール連星合体に伴って発生したものでした。この天文イベントは検出された日付にちなんで、GW150914と名付けられました。以降も連星合体に伴う重力波イベントが数多く見つかっています。RESCEUの重力波天体物理学部門では、このような新分野において最先端の研究を行っています。RESCEUメンバーは2



数値シミュレーションによるブラックホール連星合体直前の歪んだ時空 (SXS collaboration)

つの重力波観測国際プロジェクト、KAGRAとLIGOに参加し、KAGRAとLIGO、そしてGEO600とVirgoの各検出器から得られる観測データの解析を行っています。

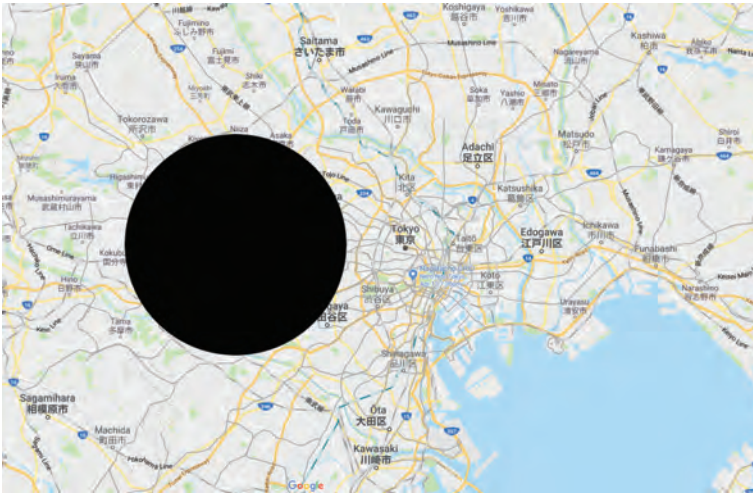
また、私たちは、KAGRA 検出器の設計と運用に参画しています。こうした活動は検出器の感度を高め、他の検出器との国際共同観測に参加するために必要不可欠です。さらに私たちは次世代検出器において問題となるであろう、重力勾配雑音に関する研究も進めています。また、B-DECIGOと呼ばれる、宇宙に重力波検出器を設置する計画についての概念設計とレーザー干渉計の開発を行っています。



LIGOの検出器制御室

私たちは電磁波を突発的に発する天体の研究者や、J-GEMという日本の天体観測プロジェクトとも密接な共同研究を行っています。私たちは、木曾シュミット望遠鏡のためのTomo-e Gozen CMOSカメラを開発しました。このCMOSカメラは高い時間分解能を持ち、広視野のシュミット望遠鏡と組み合わせることで非常に素早く全天を観測することができます。この利点を活かすことで、いつ起こるか分からない中性子星連星合体に伴って放射される電磁波（キロノヴァ）を、その発生直後から見つけ出し観測することが可能になります。





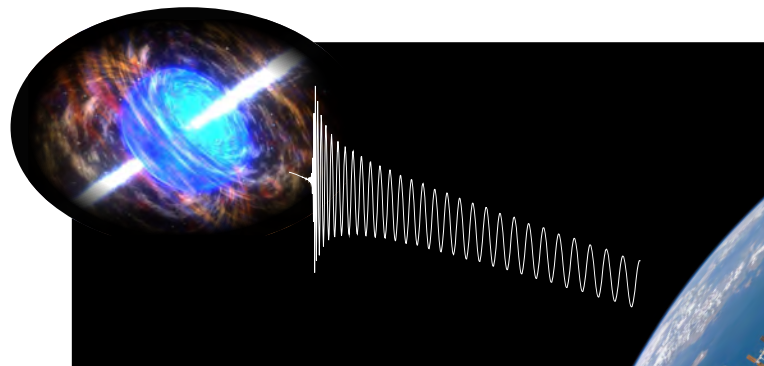
東京周辺の地図上に置かれた中性子星の大きさ

中性子星は超新星爆発の後に星の一部が重力的に潰れたものです。この中性子星同士が衝突すれば、非常に大きな重力波が放射されます。ブラックホール連星の場合とは異なり、極高密度物質が粉碎されることになるので、非常に強い光も同時に放射されます。

中性子星同士の合体はRESCEU重力波天体物理学部門のメンバーが開発した重力波検出ソフトウェアGstLAL

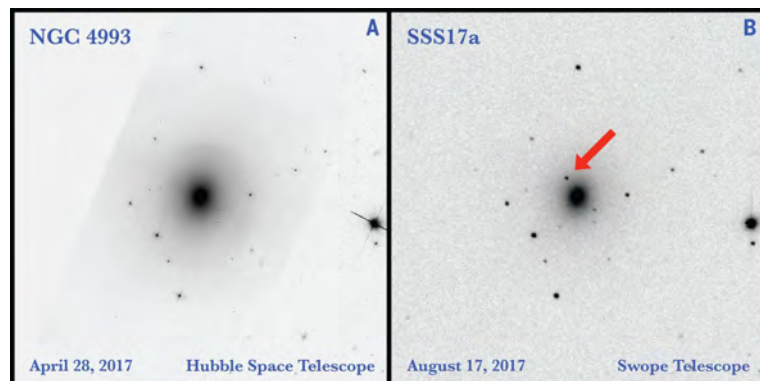
(<https://wiki.ligo.org/Computing/DASWG/GstLAL>) を用いて初めて発見されました。このソフトウェアは他の多くの重力波イベントの発見にも寄与しています。僅か数秒の時間で解析を行い、木曾シュミット望遠鏡や他のJ-GEMの望遠鏡などの電磁波望遠鏡に通知することができるため、初の中性子星連星合体イベント (GW170817) の際には衝突直後に放射された光を捉えることに成功しました。

RESCEU重力波天体物理学部門は、重力波を用いた新たな発見により、我々の宇宙に関する理解をさらに深めることを目指しています。



上図: 中性子星連星合体により放射された重力波が地球に届く様子の概念図

下図: 中性子星連星合体 (GW170817) 後に現れた突発天体を示す、イベント前後での可視光による撮像 [Science, 358 (1556), 2017]



## Project 3

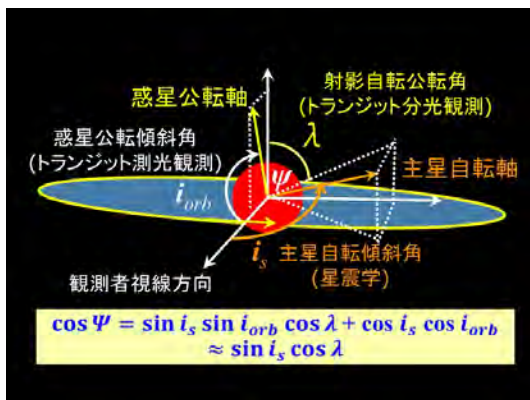
### Formation and characterization of planetary systems

#### 惑星系の形成とその諸性質の探求

宇宙物理学の普遍的ゴールの一つは「見たことのない世界の果てを探る」です。宇宙の果てとその起源、および、重力波で見る宇宙の姿はいずれもその端的な例ですし、私たちが住む太陽系の始原物質探索、誕生直後の星と惑星の観測、そして太陽系の外にある多様な惑星系の探求もまた、その問題意識を共有しています。そしてそれらは、宇宙における生命の起源という究極の科学的疑問へとつながっています。

プロジェクト3は、以下に示す多様なサブプロジェクトから構成され、異なる視点から相補的に惑星系の探求を行っています。

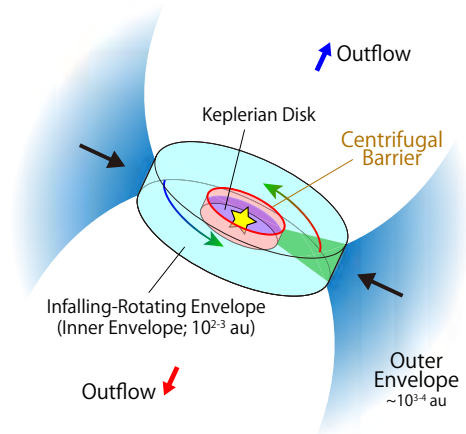
#### トランジット惑星系の自転公転角の起源と進化



系外惑星系の主星自転軸と惑星公転軸のなす角度(自転公転角)は、惑星系の初期条件とその後の軌道進化を探る重要な観測データです。特にトランジット惑星系の場合、自転公転角は、私たち観測者に対する自転傾斜角  $i_s$  と天球面への射影角  $\lambda$  の2成分から推定できます。我々は、星震学によって  $i_s$  を、精密測光分光観測から  $\lambda$  を推定するとともに、天体力学を用いてそれらの起源と進化を探っています。

#### 原始惑星系円盤の形成過程と物質進化

アルマ望遠鏡を用いた電波スペクトル線観測で、誕生したばかりの原始星まわりに惑星系のもとになる円盤構造がどのように形成され、そこでどのような物質進化が起こっているかを研究しています。形成初期の円盤構造を詳しく調べるとともに、最近明らかになってきた円盤形成領域の化学的多様性の全貌と惑星系への進化を探求しています。これらを太陽系始原物質の分析結果と対応させ、太陽系の初期状態の理解を目指します。



原始星円盤形成領域の模式図

#### 長周期トランジット惑星の統計と検出

現在発見されているトランジット系外惑星のうち、太陽系の惑星のような惑星は木星に対応するケプラー衛星のデータ中の長周期ガス惑星くらいです。このような長周期系の検出方法を開発し、さらにすばる望遠鏡やGAIA衛星の観測などを駆使することで、長周期惑星のカタログ作成と惑星形成理論との比較を進めています。また、将来的に超小型衛星で持続的にこのような領域を探索することができないか、超高視野光学系の開発や衛星ミッションの概念設計を行っています。



## 原始惑星への固体とガスの集積過程

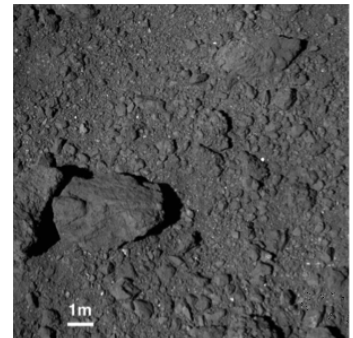
惑星形成とは、主に固体とガスが集積する過程です。固体集積は微惑星とよばれるkmスケールの岩石または氷の天体の衝突合体であり、ガス集積は原始惑星にガスが流れ込む過程です。私たちは、多くの微惑星の重力相互作用を直接計算することでそれらの運動・合体過程を、流体力学計算によってガス集積過程を考察しています。

## ハビタブル水惑星の形成と気候の安定性

地球上の生命にとって水は必須の物質ですが、温暖で安定な気候を維持するためにも水は重要な役割を果たしています。私たちは、水の獲得過程および惑星内部・大気間での分配過程を理論的に調べ、惑星が獲得する海水量の決定機構と多様性を明らかにしようとしています。また、炭素循環等を組み込んだ表層環境数値モデルから海水量と気候の関係を明らかにし、宇宙におけるハビタブル惑星・地球の普遍性または特殊性の解明を目指しています。

## 小惑星探査による太陽系の起源と進化の解明

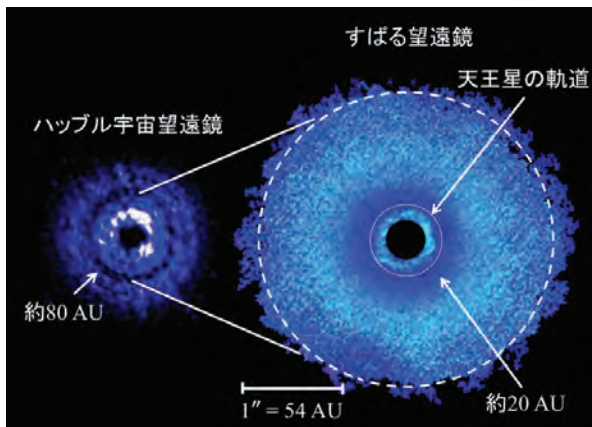
かつて惑星の軌道は不変と考えられていましたが、大きく変動し得ることが分かってきました。この問題を解明する鍵は小惑星帯にあります。我々は、低温で形成した後、内側小惑星帯に移動した可能性のある天体を探査して、この問題を解こうとしています。具体的には、はやぶさ2、OSIRIS-RExで得たデータの解析を進めるとともに、次世代小惑星探査計画をJAXAや海外機関と共同で検討しています。



はやぶさ2が捉えた小惑星リュウグウの姿。  
(画像提供: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)

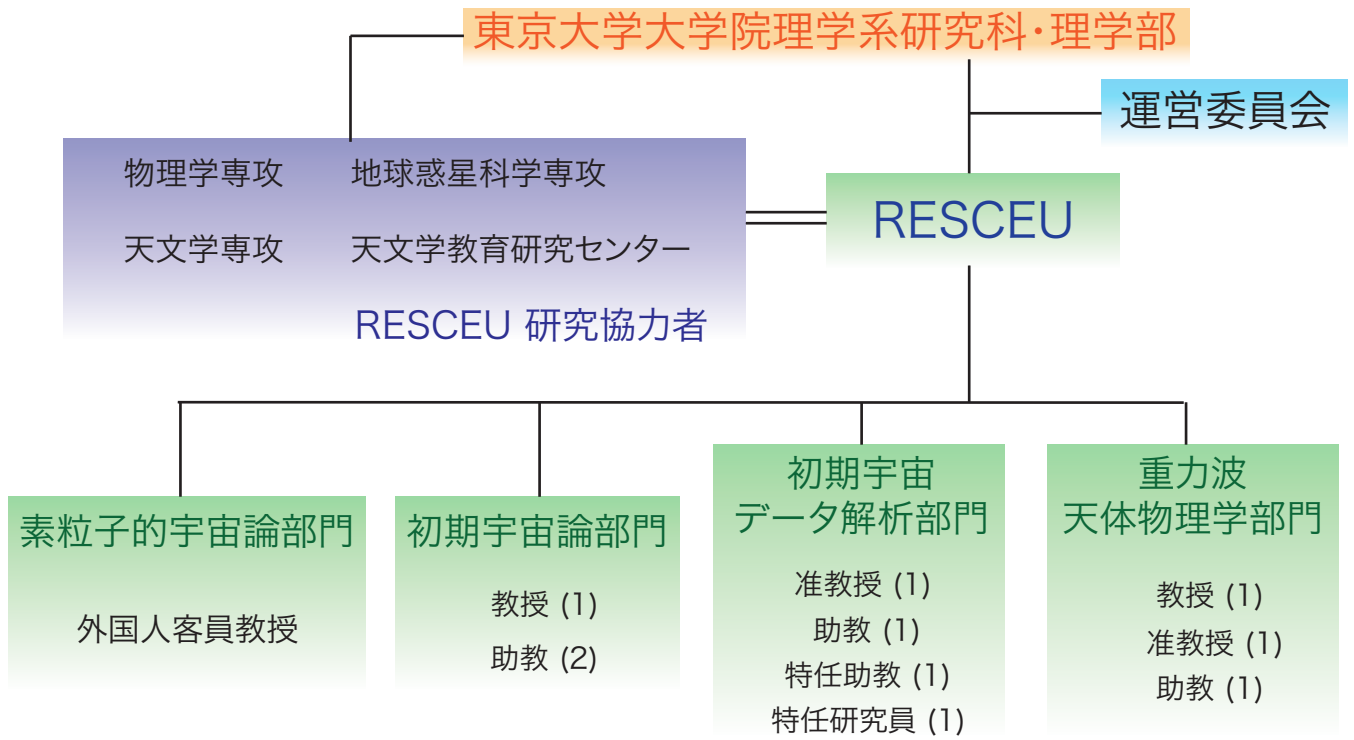
## 系外惑星の直接観測

今までに発見されている系外惑星のほとんどは、間接的方法にもとづいています。これに対して、中心星からの光を隠すことで惑星からの光をとらえる直接撮像は今後の惑星研究にとって本質的であり、すでにすばる望遠鏡によって数例成功しています。また、従来は可視域に限られていた精密分光を赤外線波長で行える検出器IRDをすばる望遠鏡に搭載するとともに、赤外線多色カメラでの測光観測と組み合わせることで、赤色矮星のまわりのハビタブル惑星系システム探査を進めています。



すばる望遠鏡が描いた惑星誕生現場の詳細  
(ハッブル宇宙望遠鏡との比較)

# 機構図



2019年4月 本郷キャンパスにて



## ■ 歴代センター長

1999年4月～2001年3月 佐藤勝彦  
2001年4月～2003年3月 牧島一夫  
2003年4月～2007年3月 佐藤勝彦  
2007年4月～2015年3月 牧島一夫  
2015年4月～現在 須藤靖



## ■ 構成員

### RESCEU所属

横山順一 (教授・Project1)    Kipp Cannon (教授・Project2)    茂山俊和 (准教授・Project1)  
仏坂健太 (准教授・Project2)    大栗真宗 (助教・Project1)    鎌田耕平 (助教・Project1)  
檜山和己 (助教・Project2)    西澤篤志 (助教・Project2)

### 物理学専攻所属

吉田直紀 (教授・Project1)    須藤靖 (教授・Project3)    山本智 (教授・Project3)  
馬場彩 (准教授・Project1)    日下暁人 (准教授・Project1)    安東正樹 (准教授・Project2)

### 地球惑星科学専攻所属

田近英一 (教授・Project3)    杉田精司 (教授・Project3)    生駒大洋 (准教授・Project3)  
河原創 (助教・Project3)

### 天文学専攻所属

戸谷友則 (教授・Project1)    田村元秀 (教授・Project3)    嶋作一大 (准教授・Project1)

### 天文学教育研究センター所属

土居守 (教授・Project2)    河野孝太郎 (教授・Project2)

## 所在地



〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学理学部4号館6階 (秘書室1617号室)  
東京大学大学院理学系研究科 附属ビッグバン宇宙国際研究センター  
TEL : 03-5841-4169 (秘書室) FAX : 03-5841-7638 (秘書室)  
URL : <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp>

## 交通

### ■ 最寄駅

- 本郷三丁目駅 (地下鉄丸ノ内線・大江戸線) より徒歩11分
- 根津駅 (地下鉄千代田線) より徒歩8分
- 東大前駅 (地下鉄南北線) より徒歩10分
- 御茶ノ水駅 (JR・地下鉄丸ノ内線) より都営バス (学07系統東大構内行き) で7分

### ■ 空港から

- 成田空港から : 京成成田 (京成本線(1時間15分)または京成スカイライナー(40分))  
~ 京成上野 (徒歩 (20分) またはタクシー (5分))  
または 空港第2ビル (成田エクスプレス (1時間)) ~ 東京 (JR中央線)  
~ 御茶ノ水 (都営バス (7分)) ~ 東大構内
- 羽田空港から : 羽田空港国際線ターミナル (京急空港線 (12分)) ~ 品川 (JR線 (20分))  
~ 東京 (地下鉄丸ノ内線 (10分)) ~ 本郷三丁目駅 (徒歩 (11分))

### ■ 主要駅から

- 上野駅から : 徒歩20分または都営バス(学01系統東大構内行き)で10分またはタクシーで5分
- 東京駅から : 東京 (地下鉄丸ノ内線 (10分)) ~ 本郷三丁目駅 (徒歩 (11分))