

## 4.5 基礎物理

### 4.5.1 宇宙研究

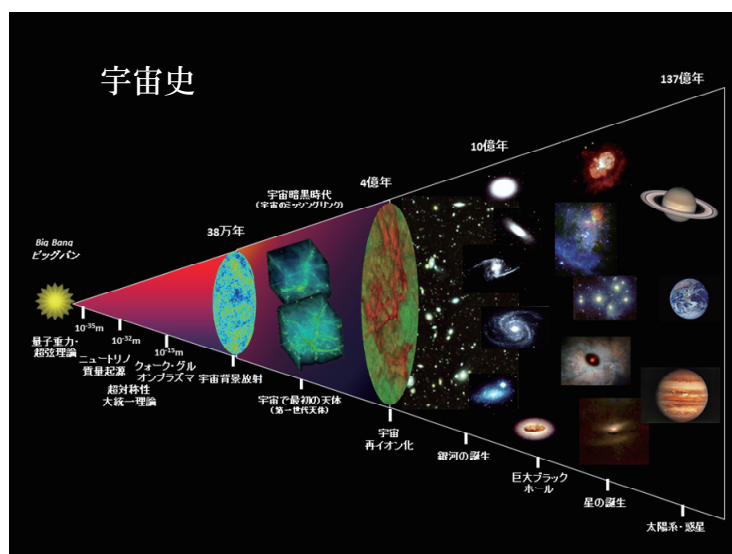
#### (1) 現在行われている課題

天文学・宇宙物理学は、宇宙の“過去・現在・未来”を探究することにより、(1) 宇宙観・自然観の醸成、(2) 新たな物理法則の発見、(3) 宇宙における生命存在の意味、(4) 人類の宇宙活動に大きな貢献をしてきた。宇宙研究は、20 世紀までに築き上げられた礎の基、21 世紀の新たなフロンティアの開拓に突き進んでいる。2009 年に日本学術会議物理学委員会、天文学・宇宙物理学分科会によって「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」[1]が取りまとめられ、宇宙研究の進むべき方向とサイエンス・ビジョンが示された。この答申で、21 世紀の宇宙研究における大型観測計画のマスタープランが示され、その中で数値シミュレーションは、大型観測計画と連動しますます重要な柱となることが強調されている。ここでは、宇宙研究分野の重要課題について、現在の取り組みとその社会的意義をまとめる。

#### (i) 宇宙史の探究

##### 主な課題の背景と現状

20 世紀は、相対性理論に基づく宇宙論の誕生に始まり、ダークエネルギーが支配する新たな宇宙像の確立を見た革新の世紀であった。この間、ビッグバン、ブラックホール、インフレーションといった新たな概念が誕生した。宇宙の成り立ちの探究においては、宇宙、素粒子、原子核の分野間連携が重要な役割を果たしてきた。原子核物理学と宇宙物理学の協働により、核反応による星の進化の概要が明



らかとなり、初期宇宙における軽元素合成のビッグバン理論が誕生した。更に、素粒子物理学と宇宙物理学から素粒子論的宇宙論という新たな融合分野が生まれ、初期宇宙のダークマター（暗黒物質）生成とダークマターが支配する宇宙の進化の基本的枠組みを確立した。これまで宇宙物理分野でノーベル物理学賞を受賞した、宇宙マイクロ波背景放射の発見、パルサー（回転中性子星）の発見、星の進化の理論、天体における原子核反応の研究、連星パルサーの発見、宇宙背景放射の異方性の発見、超新星からのニュートリノ検出、X線源としてのブラックホール天体の発見、ダークエネルギーによる宇宙の加速膨張の発見は、20 世紀の宇宙物理学の発展史を表している。

1965年にビッグバン宇宙の残光である宇宙背景放射が発見され、1990年代に入り宇宙背景放射の精密観測によって、宇宙構造の種である密度ゆらぎが発見された。これは、現在の宇宙構造が重力相互作用によって作られたものであることを意味している。しかし、ダークマターとダークエネルギーが支配する宇宙における天体形成と構造形成は、多くが未解決のままとなっている。現在、我々が知る宇宙には、星・惑星や銀河、銀河集団といったさまざまな階層の構造が存在している。宇宙の密度ゆらぎから、宇宙構造がどのようにしてできたのかは、宇宙物理学の最重要課題の一つである。宇宙における最初の天体（第一世代天体）の誕生は、“宇宙暗黒時代”に起こったと考えられている。宇宙暗黒時代とは、宇宙の晴れ上がり期から、多くの星が誕生して星が放つ紫外線によって宇宙が再び電離する（宇宙再電離）までを指す。その後の銀河の誕生と進化は、再電離した宇宙の中で進行することになる。銀河が誕生すると、その中の重たい星は超新星爆発を起こし、重元素をまき散らす。重元素を含んだガスからは、新たな星が誕生し、星形成の輪廻転生を繰り返す。また、銀河中心には巨大なブラックホールが誕生すると考えられており、ブラックホール誕生期に放つ強力な光は、銀河と宇宙全体の進化に甚大な影響をもたらす。しかし、巨大ブラックホールの起源はまだ解明されていない。また、近年、太陽系外に900個を超える惑星が発見されている。その中には、地球に近い環境を持ちうる惑星（ハビタブル・プラネット）も見つかっており、生命が誕生している期待ももたれている。このような宇宙の諸階層の天体の誕生と進化の研究は、さまざまな波長帯の観測と理論計算とが密接に結びついて大きな発展を遂げてきた。惑星の形成は、星の誕生とともに宇宙史の文脈の中で位置づけられるものであるが、宇宙における生命誕生を探究する宇宙生物学とも深く関係するため、(iii)で記述することにする。

星形成、銀河形成の研究において重要な計算は、流体力学計算である。天体形成過程の流体力学はいわゆる希薄なガスの流体であり、圧縮性流体として扱われる。そこでは、超音速流によって生じる衝撃波や低い粘性によって生じる乱流などが重要な働きをする。これらを、数値流体計算法によって扱う。数値流体計算法は、格子に基づく方法や、流体粒子による方法（SPH法：Smoothed Particle Hydrodynamics法）が用いられる。銀河形成の研究では、更にダークマター粒子や星の力学を、重力を及ぼす質点として扱うことになる。これらはN体計算法によって扱われ、流体力学と同時に解かれる。また、星形成やブラックホール現象などでは磁場が重要な働きをする場合があり、磁場と流体を組み合わせた磁気流体力学で扱われている。更に、近年では輻射場の方程式を同時に解く輻射流体力学や輻射磁気流体力学計算が行われるようになってきている。宇宙において、エネルギー輸送過程として重要なのは輻射（放射）である。輻射は厳密には輻射輸送方程式によって扱う必要がある。輻射輸送方程式は、空間3次元、方向2次元、振動数1次元の計6次元の方程式である。よって、この取り扱い、宇宙物理の計算の中でも高い計算コストのかかるものである。このため、輻射場のモーメントを0次で近似する拡散近似や1次で近似するM1法などが用いられ、これと流体力学を結合した計算が行われている。

## 社会的意義

ビッグバンやブラックホールという概念は、数十年にわたる学術的論争を経て確立したものであるが、その言葉は、今や子供から大人まで誰もが知るものとなっている。これらは、科学

への興味をかき立てる原動力になっている。宇宙史は、宇宙がたどってきた歴史を研究するものであるが、考古学と決定的に異なるのは、宇宙研究では過去を直接見ることができるという点である。遠くから届いた光は過去の情報を教えてくれる。現在の宇宙年齢は 137 億年であるが、宇宙背景放射の観測により、宇宙誕生から 38 万年の宇宙の情報がわかり、遠方銀河と巨大ブラックホールの観測から数億年の宇宙の情報が得られる。よって、宇宙史の計算は、観測と直接比較することで実証することが可能である。こうして築き上げられた宇宙史は、人類の自然観の醸成に貢献し、貴重な知的財産となる。

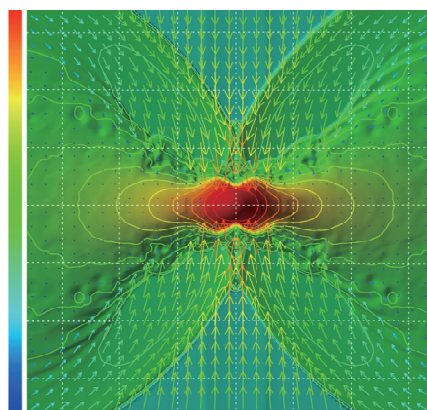
## (ii) 新たな物理の探究

### 主な課題の背景と現状

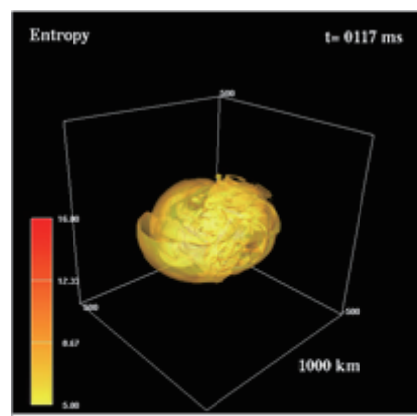
ガンマ線バーストは、太陽が 100 億年かけて放出する輻射エネルギーの 10 倍以上のエネルギーをわずか数秒から数十秒でガンマ線として放出する現象である。ガンマ線バースト時のエネルギー密度は、宇宙誕生から  $10^{-3}$  秒後のビッグバン元素合成期に匹敵し、宇宙で最も激しい現象である。1967 年の発見以来、ガンマ線バーストは宇宙物理学における最大の謎の一つとなってきた。ガンマ線バーストは、現在人類が認識している自然界の 4 つの力（重力相互作用、電磁相互作用、強い力、弱い力）すべて関わる天体現象である。よって、ガンマ線バーストは自然法則の重要な実験室となる。そして、その研究は新たな物理の探究につながる。

ガンマ線バーストは、ブラックホールを生みだすことが予想されており、一般相対性理論を数値的に解く“数値相対論”が重要な研究手段となる。これに加えて、電子・陽電子対消滅や、ニュートリノ輸送、磁気回転不安定による対流や乱流現象などの物理過程を扱う必要がある。現在、これらの物理過程を入れた 3 次元数値相対論の計算が行われている。

超新星は、大質量星の進化の終末に起こる大爆発である。特に重力崩壊型超新星爆発は、ガンマ線バースト同様、4 つの相互作用に関わる高エネルギー現象であり、いまだにそのメカニズムは解明されていない。超新星は、ニュートリノ天文学や、重力波天文学の重要な研究対象でもある。超新星の爆発メカニズムの解明において重要となるのは、ニュートリノによるエネルギー輸送と、流体的な不安定性である。陽子が電子を吸収して中性子化する際に発生するニュートリノは、星の重力崩壊によって生じた衝撃波を失速することなく星の外層まで伝播させるエネルギー供給源と考えられている。このメカニズムは球対称計算ではうまく働かないことがこれまでの研究で明らかとなり、多次元性を考えた相対論的流体計算が必要になっている。多次元効果とし



ガンマ線バーストの 3 次元数値  
相対論シミュレーション  
(関口, 柴田 et al. 2012 年)



超新星爆発の 3 次元流体  
シミュレーション  
(滝脇 et al. 2013 年)

て注目されているのは、定在降着衝撃波不安定（SASI：Standing Accretion Shock Instability）と対流であり、この不安定性とニュートリノによるエネルギー供給がカップルして爆発を起こす可能性が探求されている。

超高エネルギー宇宙線は、長年の謎となっている宇宙現象の一つである。 $10^{15}\text{eV}$  までのエネルギーの宇宙線は我々の銀河系内の超新星爆発衝撃波でつくられていると考えられているが、その具体的な加速メカニズムは未だに解決していない。更に、 $10^{20}\text{eV}$  を超える超高エネルギー宇宙線が見つかっており、メカニズムはおろか発生場所もわかっていない。超高エネルギー宇宙線のエネルギーは、素粒子の大統一理論のエネルギーに相当する。これらの高エネルギー粒子の起源は高エネルギー天体と密接に関連すると考えられている。この問題では、プラズマ粒子の運動を有限の広がりを持った超粒子としてラグランジュ的に扱い、電磁場をオイラー的に扱う電磁プラズマ粒子法（Particle-in-Cell 法）が用いられている。

更に、宇宙史の探究に避けて通れないダークマター、ダークエネルギーの問題は、依然として未解決の問題である。宇宙構造形成の標準理論で仮定している冷たいダークマターは、超対称性粒子などの素粒子であると考えられているが、実験的には未発見である。数値計算では、ダークマターを重力相互作用のみが働く超粒子として扱ったN体計算が行われる。最新の  $10^{12}$  粒子を用いた計算では、冷たいダークマターによって宇宙構造が作られたとすると、地球サイズのダークマターの塊が無数に存在することが予言されている。

## 社会的意義

物理学の基本法則の探究は、短期的な社会貢献が評価しづらい側面があるが、長期的に見れば、人間生活に大きな貢献をする可能性を持っている。この節のテーマは、一般相対性理論の検証に関わっている。一般相対性理論は、発表当時は宇宙の現象においてのみ重要な理論であり、我々の生活には無縁のものと考えられていた。しかしながら、科学技術精度が高まった今日、地球重力場においても、一般相対論重力の効果が顕わになっている。例えば GPS は、高度約 2 万 km を周回する 4 つの衛星によって機能しているが、GPS 衛星では一般相対論の効果によって地上よりも 1 日 45 マイクロ秒早く時間が進む。この一般相対論的な時間の補正をしないと、位置情報は 1 日で 11 km もの誤差を生じてしまう。宇宙の基礎研究が長期的に見て、人間生活に大きな貢献をすることは今後も期待できることである。

## (iii) 惑星形成と宇宙生物学の探究

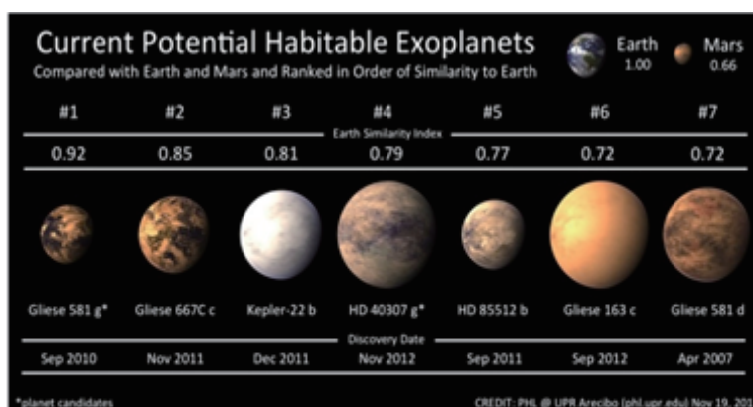
### 主な課題の背景と現状

太陽系の惑星の起源は、大きさ 0.1~1 ミクロン程度の宇宙ダストであったと考えられている。宇宙ダストは、炭素、シリコン、酸素などの重元素が固化したものである。これらの重元素は、太陽系が形成される前に起った大質量星の超新星爆発によって放出されたものである。宇宙ダストは衝突・合体を繰り返して大きくなり小隕石をつくる。そこから大きさ 1km 程度の微惑星が生まれる。そして、微惑星の衝突・合体によって火星ほどの大きさの原始惑星が生まれ、現在の惑星の誕生に至ったと考えられている。太陽系の年齢は 46 億年であるが、ダスト集積のプロセスは、数億年で進むことが必要である。1m 程度の小隕石が形成されたとしても、太陽



からの輻射による効果（ポインティングング・ロバートソン効果）によって、数億年で太陽に落下してしまい微惑星をつくることができないからである。

わが国の小惑星探査機「はやぶさ」は、小惑星イトカワから微粒子サンプルを地球に持ち帰るという偉業を成し遂げた。その後、イトカワの微粒子サンプルの放射光X線回折分析により、鉱物組成が明らかにされた。そこからわかったことは、イトカワが誕生する前に直径20km 程度の小惑星があり、大



ハビタブルプラネット（第2の地球）  
Kepler/NASA

きな衝突現象によって粉々になり、その破片が再集積してイトカワとなったということである。イトカワは、500m 大の微惑星である。ダストから隕石、隕石から微惑星への集積過程は、多粒子系の重力相互作用の問題であり、高精度のN体計算が行われている。

現在、ケプラー衛星（NASA）等により、太陽系外に 900 個を超える惑星系が発見されている。なかには、太陽系の惑星分布とは大きく異なる惑星系が見つかった。その中で、地球型惑星を太陽系外に探す試みが進められており、地球質量の2倍ほどの惑星も見つかってきている。研究のフロンティアは、更に生命を育むことのできる惑星（ハビタブルプラネット）の探査へと進んでいる。これは、宇宙生物学（アストロ・バイオロジー）の研究とともに発展している。

宇宙生物学の研究として、生命の宇宙起源説がある。生命体の基本分子にアミノ酸があるが、実験室でアミノ酸を作成すると、左巻き（L型）と右巻き（D型）が同量生成される。しかし、地球上の生命のアミノ酸を調べるとほとんどL型しか使われていない。これを、鏡像異性体過剰という。鏡像異性体過剰は、19世紀のパスツール以来100年以上にわたって謎になっている。鏡像異性体の異なるものが体内に取り込まれたときの副作用は、サリドマイド児の悲劇に象徴されている。地球上の生命体はなぜL型アミノ酸しか使わないのか、宇宙生物学ではその起源が宇宙空間にあると考えている。1969年、オーストラリアのマーチソン村に隕石が落下し、その隕石からアミノ酸が検出された。そして、わずかではあるが鏡像異性体過剰が発見されたのである。2010年には、超高温の隕石からアミノ酸が発見され、隕石のアミノ酸は地球に大気圏通過の際に変成することなく落下することがわかった。発見された鏡像異性体過剰はわずかなものであるが、実験をすると鏡像異性体過剰は自己触媒反応により急速に増大することがわかってきた。よって、アミノ酸の鏡像異性体過剰が宇宙空間で起こり隕石を通じて地球に運ばれ、それが地上で急速に増幅した可能性がある。また、実験室で円偏光の光を当てると鏡像異性体過剰が引き起こされること（光不斉化反応）がわかってきた。近年になって、星形成領域で円偏光波が実際に発見された。よって、原始惑星系の近くで大質量星が誕生したとすれば、太陽系内でアミノ酸の鏡像異性体過剰が起こった可能性がある。現在のところ宇宙空間ではアミノ酸前駆体しか観測されていないが、将来アミノ酸そのものが観測される期待もある。現在、宇宙空間で円偏光波によるアミノ酸の鏡像異性体過剰の第一原理量子力学計算が行われており、

電子の励起状態を時間依存密度汎関数法 (TDDFT) により計算し、光不斉化反応が調べられている。

宇宙生命計算科学としては、アミノ酸以外にも、系外惑星におけるバイオマーカー検出の問題がある。系外惑星におけるバイオマーカーの一つとして有力なのは光合成にともなうレッドエッジである。しかし、レッドエッジ (近赤外成分) がどのような物理過程に起因するかはまだ明らかにされていない。地上植物における光合成明反応の Z 機構は、クロロフィルと光化学系 II, I (PSII, I) によって機能する。地上植物の Z 機構は、太陽スペクトルに最適化されていることを考えると、主星の光スペクトルが変われば、光合成機構も変わる可能性がある。これを調べるために、現在 TDDFT 計算によって得られたクロロフィルの電気双極子を用い、アンテナ機構の光吸収率波長依存性がクロロフィルの配位によってどのように変わるかについて量子計算が行われている。

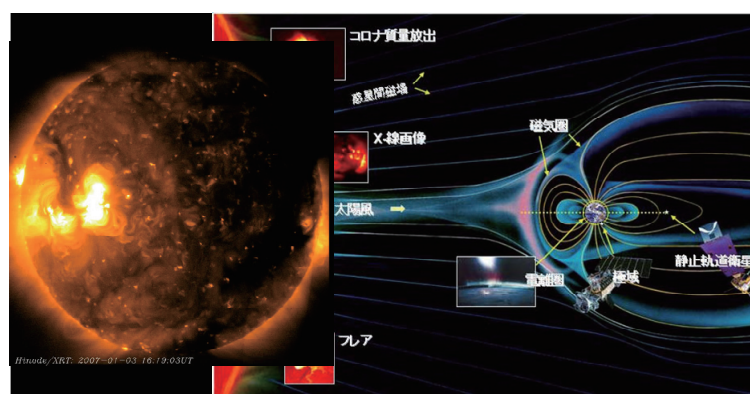
## 社会的意義

この宇宙に、地球以外に地球型の惑星は存在するのか、また地球以外の惑星に生命は存在するのか、これは多くの人が関心を寄せるテーマである。それは、宇宙における生命存在の意味を再認識することへとつながるばかりでなく、生命誕生過程の本質に迫ることができる問題である。

### (iv) 宇宙環境学の推進

#### 主な課題の背景と現状

ここで言う宇宙環境とは太陽系環境である。現在、人類の活動範囲は、地上から宇宙空間へと拡大している。人工衛星は、通信、テレビ、GPS 等で我々の生活に不可欠のものとなっている。宇宙環境は太陽活動によって大きな影響を受ける。太陽活動が活発になると、強い太陽風によって、衛星機能に影響を与える。太陽風はまた、宇宙ステーションでの活動にも影響を与える。



「ひので」X線画像 (左)  
名古屋大学 JST プロジェクト (右)

近年、太陽黒点数と地球の気候変動との関係が注目されている。太陽黒点数は 11 年周期で変動しているが、2008 年から増加に転じるはずであった黒点数が 2009 年後半まで増加せず、太陽活動に変調が生じている。17 世紀には太陽黒点が長期に出現しなかった期間があり、今期の太陽活動周期の乱れがその前兆である可能性などが検討されている。黒点は磁場の強い場所に対応し、そこではフレアという爆発現象が起こる。太陽フレアの結果、高エネルギー粒子が大量に放射される。これが太陽風である。黒点活動を知るためには、太陽における磁場の生成過程 (太陽ダイナモ) を知る必要がある。太陽磁気活動を担う太陽ダイナモを理解することは

地球環境の将来予測をするうえでも重要な課題である。また、太陽フレアでは、磁場に蓄えられたエネルギーが磁場のつなぎ換え（リコネクション）によって、プラズマに受け渡されて、高速の粒子が生成されると考えられている。磁場のリコネクションは、まだ完全には解明されていない物理過程である。これは、磁気流体力学や電磁プラズマ粒子シミュレーションが必要であり、本格的な取り組みが始まったところである。また、太陽風が地球に接近すると、衝撃波が発生する。宇宙空間の密度は低いため、この場合の衝撃波は、地上で起こる衝撃波と異なり粒子同士の衝突がほとんど起こらないガスでの衝撃波となる。これを無衝突衝撃波という。無衝突衝撃波のシミュレーションには、電磁プラズマ粒子シミュレーションが必要となる。

## 社会的意義

太陽風は、現在我々の生活に欠かせない衛星の機能に大きな影響を与える。通信衛星の故障は、重要な通信機能の遮断になるだけでなく、制御不能に落ちいった衛星が地上に落下することで被害を及ぼすこともあり得る。また、太陽風によって生じた磁気嵐によって、変電所のコイルに大電流が流れて故障し、大停電が起きたこともある。したがって、太陽活動を予測できれば、これらを防災することができる。この目的で取り組みが進められているのが「宇宙天気予報」である。通信衛星、宇宙ステーション、惑星探査機等が、正確かつ安全に機能するためには、「宇宙天気予報」などを通じて、太陽活動現象とともに変化する太陽系の環境科学の推進が必要である。

## (2) 長期的目標

### (i) 宇宙史の探究

星形成、銀河形成の研究は、流体力学や磁気流体力学計算が基本となるが、エネルギー輸送を司る輻射（放射）の取り扱いが、次の課題である。上述のように、輻射は厳密には空間3次元、方向2次元、振動数1次元の計6次元の輻射輸送方程式を解く必要がある。21世紀に入り、静的な物質場に対し6次元の輻射輸送方程式を直接解く取り組みが本格化した。しかしながら、これを流体力学や磁気流体力学と完全に結合した計算は端緒についたばかりである。6次元輻射輸送と流体力学を完全結合した3+3輻射流体力学は、エクサスケールコンピューティングのグランドチャレンジになる。また、銀河形成の研究はダークマター計算と切り離すことができない。ダークマター粒子は重力以外の相互作用をほとんどしない粒子であり、かつ粒子同士の重力的な散乱も効かない。これは無衝突粒子系と言われる。ダークマターの振舞いを正確かつ詳細に調べるためには、無衝突 Boltzmann 方程式で扱う必要があるが、Boltzmann 方程式は、位相空間密度の時間変化を計算するものであり、空間3次元、速度空間3次元の計6次元の方程式である。これは、6次元輻射輸送計算と同規模の計算コストがかかる。現在、無衝突 Boltzmann 方程式の直接計算の取り組みが始まっている。これを大幅に発展させることが長期目標となる。また、無衝突 Boltzmann 方程式は、プラズマ系で使われる Vlasov 方程式と等価なものである。無衝突 Boltzmann 方程式の直接計算は、宇宙プラズマの研究において大きな発展をもたらすことが期待できる。

以上に関する具体的な研究テーマと必要な計算機能力は、(3) の(i)および表 4.5.1-1 にまとめる。

## (ii) 新たな物理の探究

ガンマ線バーストや超新星爆発の問題では、これまで数値相対論や相対論的流体力学の3次元化は行われているが、ニュートリノ輸送については空間の球対称性を課している。ニュートリノ輸送はブラックホール生成や爆発のメカニズムに関わる重要な物理過程である。エクサスケール・コンピューティングにおいては、3次元空間のニュートリノ輸送問題（6次元問題）を完全に解き、これによって3+3相対論的流体力学を実現することが鍵となる。

超高エネルギー宇宙線問題の進展については、現在行われている電磁プラズマ粒子

（Particle-in-Cell）シミュレーションの計算分解能を2桁以上上げた計算が必要となるが、これはエクサスケールで実現することができる。また、非熱的分布を構成する高エネルギー粒子の生成を計算するためには、無衝突系プラズマのボルツマン方程式である6次元ブラソフ方程式を解く必要がある。これは、(i) で述べた無衝突ボルツマン方程式と同様、エクサスケールでの重要な取り組みとなる。

更に、ダークマター問題については、太陽系の近傍でダークマター塊がどのように存在するかを計算するためには、 $10^{14}$  粒子の大規模なN体計算を必要とする。また、ダークエネルギーの問題は、宇宙の加速膨張の発見によって裏づけられた形となっているが、その物理的説明はまだできていない。ダークエネルギーが支配する宇宙を1000億年まで外挿すると、銀河も星もばらばらになる“ビッグ・リップ”が起これるとする理論もある。このとき、ブラックホールさえも蒸発してしまう。ダークエネルギー宇宙の未来予測においても、(i) で述べたような大規模N体計算は必須である。

以上に関する具体的な研究テーマと必要な計算機能力は、(3) の(ii) および表 4.5.1-1 にまとめる。

## (iii) 惑星形成と宇宙生物学の探究

惑星形成問題において、宇宙ダストから微惑星が誕生する過程は、いまだにミッシングリンクとなっている。ダストは原始惑星系円盤の中で、赤道面に沈殿し、その後合体成長をされると考えられている。この際、ダスト粒子と乱流状態にあるガスとの相互作用を考えなくてはならない。乱流とダスト粒子の相互作用の問題は、いまだに解かれていない問題である。この問題は、現在行われている最高精度（約  $10000^3$  格子）の乱流計算とダスト粒子の計算を結合したハイブリッド計算を必要とする。これは、エクサスケールで取り組むべき重要課題となる。

アミノ酸の鏡像異性体過剰の宇宙起源の問題については、現在行われている電子の励起状態の時間依存密度汎関数法計算を更に発展させ、究極には陽子配置の変化までを量子力学計算することが目標となる。この場合は、量子多体の直接計算が必要となり、計算量はこれまでの1000倍を超える。

系外惑星における光合成の問題については、将来的にはエクサスケール・コンピューティングによってクロロフィルのダイナミクスを入れた光合成アンテナ機構の量子力学/分子動力学計算（QM/MM 計算）が可能となる。また、光合成機構が惑星大気の化学構造にどのように依存するかも探究することができる。



以上に関する具体的な研究テーマと必要な計算機能力は、(3) の(iii) および表 4.5.1-1 にまとめる。

#### (iv) 宇宙環境学の推進

太陽における磁場の生成過程の解明には、高精度磁気流体力学計算を必要とする。必要な精度は  $10000^3$  格子になり、現在の計算の 1000 倍である。また、太陽フレアで起こる磁場のリコネクションは、まだ完全には解明されていない物理過程である。これは、磁気流体力学や電磁プラズマ粒子シミュレーションが必要であり、エクサスケールの重要な研究課題である。また、太陽風によって起こる無衝突衝撃波を正確に扱うためには、無衝突プラズマの方程式であるブラソフ方程式を解く必要がある。これは、無衝突ボルツマン方程式と同様、位相空間 6 次元の方程式であり、次世代の目標である。

以上に関する具体的な研究テーマと必要な計算機能力は、(3) の(iv) および表 4.5.1-1 にまとめる。

### (3) 次世代に解決すべき課題

上記の長期目標の下、具体的に取り組むべき次世代の研究課題は以下のとおりである。

#### (i) 宇宙史の探究

##### 自己重力 N 体／流体シミュレーションによる宇宙構造形成の解明

ダークマターの構造形成や惑星形成など、宇宙で多様なスケールの構造形成が研究対象となるため、こうした問題を N 体シミュレーションや主に粒子法による流体シミュレーションにより解明する。大粒子数・小タイムステップ数では「京」で兆を超える粒子数が扱える見込みだが、惑星形成等で必要になる長時間積分では並列度が小さく効率が落ちる。したがって、高い効率の計算が可能なアーキテクチャで  $10^{12}$  程度の粒子数での長時間計算ができればブレークスルーとなる。

##### 輻射流体力学による銀河と巨大ブラックホール形成過程の解明

銀河内の星形成と巨大ブラックホール形成は密接に関わっているため、これらのダイナミクスを同時に解く計算を行うことで、銀河-ブラックホールの共進化を解明する。これには、自己重力計算、流体計算、6 次元輻射輸送計算を組み合わせた輻射流体計算が必要になる。

輻射流体計算は、近年その端緒に着いたばかりであり、海外でもまだ本格的な計算は行われていない。現在、輻射 5 次元の計算が最先端であるが、完全 6 次元輻射輸送を入れた輻射流体計算はエクサスケールでのグランドチャレンジになる。

##### 6 次元位相空間上の Boltzmann 方程式による無衝突粒子系力学の探究

宇宙大規模構造におけるニュートリノのダイナミクスの正確な取り扱いや、宇宙プラズマにおける無衝突衝撃波による粒子加速機構を、シミュレーションにより解明する。6 次元位相空間でのシミュレーションは筑波大学・東京大学のグループで行われているのみであり、精度のよい計算スキームの開発もこれからの重要な課題である。

### ダークマター宇宙における宇宙暗黒時代の進化の解明

ダークマターによる重力相互作用と初代銀河形成・銀河間ガスの進化を同時に解くことで、初期宇宙の進化を理論的に解明する。また、全宇宙にわたる中性水素の分布の進化を明らかにし、初期宇宙の構造形成やインフレーションモデルを検証する。

個別の初代天体の形成については現在でも計算可能であるが、大域的な輻射輸送を取り入れ、銀河間物質の進化と同時に解くためにはエクサスケールの計算が必要となる。また、水素分布については、現在は小さな領域あるいは宇宙進化の限られた時期のみならば計算可能であるが、137 億年にわたる宇宙全体の進化を整合的に解明するにはエクサスケールの計算が必要である。

### 自己重力輻射流体シミュレーションによる銀河スケール星間ガス進化の解明

星間ガスは星形成の現場であるとともに、大質量星から輻射や超新星爆発の形で解放されたエネルギーを銀河スケールへと伝え、銀河形成に影響を与える。星間ガスの多相構造を分解した銀河スケールのシミュレーションを行うことにより、銀河形成の物理的理解が得られ、宇宙の物質循環を解明できる。

現状、星間ガスのシミュレーションは銀河の限られた一部分に注目したもの、もしくは本質的に重要な星間ガスの多相構造を分解できていないものしか行われていない。エクサスケールの計算では、銀河スケールで星間ガスの多相構造を分解した輻射流体シミュレーションが可能となり、銀河と星間ガスの相互作用を明らかにすることが可能である。

### 輻射磁気流体計算による天体降着流・噴出流の研究

物質が回転しながら天体に落下する際に形成される降着円盤の時間変動とジェット形成機構を、現象論的な粘性パラメータを導入しない 3 次元輻射磁気流体計算によって解明する。特に、輻射と磁気流体の相互作用が重要になる明るい降着天体の進化を明らかにする。

これまでは、3 次元輻射磁気流体計算は円盤の一部を取り出した計算しか行われておらず、輻射輸送には拡散近似が採用されている。円盤全体を計算領域に含め、高次モーメントを用いて輻射輸送を高精度化する。10 年後には輻射の 6 次元計算を目指す。

### (ii) 新たな物理の探究

#### 数値相対論によるブラックホールの形成と強重力現象の解明

ブラックホールの形成や連星系をなす中性子星の合体に関する数値相対論シミュレーションを行い、強重力・極限状態下の宇宙現象を解明するとともに、放射される重力波の理論予測を行い LCGT による重力波観測計画に貢献する。このシミュレーションにおいては、重力・電磁気力・強い力・弱い力の基本相互作用すべてを考慮に入れた計算が必要になる。

基本相互作用の組み込みおよび一般相対的輻射輸送は近年その端緒についたばかりであり、日本のグループが世界をリードする状況にある。運動量空間を積分した輻射輸送から始め、最終的に 7 次元の輻射輸送を解くのが 20 年先に向けた課題である。

## 相対論的輻射流体計算による超新星爆発メカニズムの探究

重元素などの物質の起源である超新星爆発のメカニズムを解明し、大口径望遠鏡、カムイカレンデ、重力波干渉計など次世代観測機器と比較可能なデータを提供する。ニュートリノの6次元輻射輸送計算を、核物質および重元素の3次元流体計算と同時に行う。

現状、ニュートリノの輻射輸送計算は空間3次元、位相空間1次元の合計4次元に簡易化されて行われている。これを近似なしに空間3次元、位相空間3次元で行い、非球対称的な物質の配位からのニュートリノ輻射と物質へのフィードバックを精査する。

## 相対論的粒子計算による超高エネルギー現象と粒子加速機構の探究

$10^{15}$  eVを超える高エネルギー粒子については、その加速メカニズムだけでなく起源もわかっていない。これらは活動天体のダイナミクスの理解と密接に関連しており、非熱的粒子を生成する粒子加速の問題は、宇宙物理学・天文学・プラズマ物理学・宇宙線物理学などの学際的研究対象となっている。

相対論的プラズマの粒子加速問題に対して、輻射減衰を組み込んだプラズマ粒子シミュレーションコードの開発が始まっており、エクサスケールでは、輻射によるプラズマへの反作用が無視できない超高エネルギー天体現象や超強度光子場（レーザープラズマ）での相対論的プラズマ領域での研究が可能になってくる。

## 6次元ブラソフシミュレーションによるプラズマ非熱的分布形成の解明

非熱的分布を構成する高エネルギー粒子の生成メカニズムを明らかにすることで、宇宙物理学の最大の謎の一つである宇宙線の起源に迫ることができる。熱的プラズマの粒子数に比べて非熱的粒子の数が圧倒的に少ないことから、分布関数の時間発展を直接解くブラソフシミュレーションの手法を確立することで、粒子法に代わる新たなアプローチによる解明が期待できる。

これまでの研究は、速度空間3次元の4次元静電シミュレーションが多くを占めている。速度空間3次元＋実空間3次元の6次元電磁プラズマシミュレーションの粒子加速問題への適用は、エクサスケールでの計算によって初めて可能となる。

## (iii) 惑星形成と宇宙生物学の探究

### 惑星系形成のシミュレーション

太陽系のように、恒星を中心としてその周囲を回る複数の惑星からなるシステムの形成過程を明らかにする。10AU以上の幅を持つ広い円環領域を対象とし、長い時間の進化を計算する。

国内外において、狭い円環領域における複数の惑星形成の計算は実行されつつあり、微惑星系集積による1個の惑星の形成だけでは見えなかった現象が本質的に重要な役割を担っていることが明らかとなってきた。今後は、ある領域における惑星形成の結果が他領域に及ぼす効果を考慮するため、10AU以上の幅を持つ広い円環領域を対象とし、長い時間の進化を計算することが必要である。

### 地球・惑星形成のシミュレーション

地球をはじめとした、太陽系内外の多様な惑星の形成過程を明らかにする。

原始惑星の巨大衝突による月形成や地球内部構造の形成など個々の過程は、これまでもある程度のシミュレーションがなされている。しかし、各々の精度がまだ不十分であるうえ、それらを組み合わせた複合過程についてはほとんど計算がなされていない。エクサスケールでの計算により、各過程の高精度化と複合過程のシミュレーションが実施可能となる。

### 惑星表層環境の形成と進化シミュレーション

地球をはじめとする太陽系内外の惑星表層環境の形成と進化を明らかにする。

地球の表層環境（大気・海洋を含む気候）については、社会的要請もあり、大規模な数値シミュレーションを用いた研究が国内外において盛んに行われている。太陽系内外の惑星の多様な表層環境を理解するためには、多様なパラメータに対する多くのシミュレーションを行う必要がある。

### 量子計算による宇宙アミノ酸生成と光不斉化過程の探究

生命はL-アミノ酸で構成されているが、L体過剰生成は原始太陽系での光（円偏光）との相互作用で生成された可能性が示唆されている。この環境を実験的に再現することはきわめて困難であるが、第一原理計算によるシミュレーションならば検証が可能となる。

偏光波によるアミノ酸のL体過剰生成の研究は、現在実験室で行われているのみであり、宇宙空間を想定した研究はない。この研究は、エクサスケールでのみ本格的な計算が可能であり、生命の宇宙起源を探究するうえでのブレークスルーとなる。

### (iv) 宇宙環境学の推進

#### 輻射磁気流体計算による太陽恒星ダイナモの探究

天体プラズマ活動のエネルギー源である磁場の生成維持物理機構を太陽恒星を対象として明らかにする。球殻状領域内で3次元拡散入磁気流体方程式を解き、乱流と大規模構造とを同時に分解する。

現状では、磁気周期活動の片鱗が見え始め、乱流への遷移もぎりぎり達成できたかどうかというところである。今後は、より高解像度・大Reynolds数で乱流を十分発達させたシミュレーションを実施することで、大きなパラダイムシフトが起こる可能性がある。

#### プラズマ計算による太陽圏・宇宙空間無衝突衝撃波の研究

超新星衝撃波ではマッハ数が100を超え高効率で電子が加速されるが、太陽圏で見られる衝撃波ではマッハ10程度以下の場合が多く、電子がほとんど加速されていない。衝撃波における非熱的電子の生成をマッハ数によって整理することで、太陽圏から宇宙までの高エネルギー粒子の生成メカニズムを統一的に理解することができる。

プラズマ粒子コードによる衝撃波粒子加速の研究は、計算コストを軽減するために粒子数を減らしたり、規格化を換えたりした計算がほとんどであり、統一的な計算結果の比較ができていないのが現状である。エクサスケールの計算においては、超新星衝撃波でのパラメータ領域で計算することが初めて可能になる。



## 宇宙天気予報に基づく太陽系環境科学の推進

太陽活動と太陽地球システムダイナミクスのメカニズムを探るとともに、その変動を予測する技術を獲得することにより、生存空間としての太陽系の理解を深めると同時に衛星・通信・電力網など高度な社会基盤に対する宇宙天気擾乱の影響を最小化することができる。

数値シミュレーションに基づく宇宙天気予報の実験的試みが米国を中心に推進されている。今後、エクサスケールでの計算の実現によって、太陽面とコロナの精密観測を取り込んだデータ駆動シミュレーションが確立し、宇宙天気数値予報が実用段階に入ると考えられる。

### (4) 課題を解決するために必要なアプリケーション群

上記4つのテーマについて、短期的に取り組むべきキーサイエンスとエクサスケールコンピューティングに向けた長期的戦略ならびに必要な計算機スペックをまとめる。

#### (i) 宇宙史の探究

宇宙史の探究において行われる次の個別テーマについて、その意義と計算内容、および現状とエクサスケールへの展望を表4.5.1-1にまとめる。

- 1.4.1 自己重力N体／流体シミュレーションによる宇宙構造形成の解明
- 1.4.2 輻射流体力学による銀河と巨大ブラックホール形成過程の解明
- 1.4.3 6次元位相空間上の Boltzmann 方程式による無衝突粒子系力学の探究
- 1.4.4 ダークマター宇宙における宇宙暗黒時代の進化の解明
- 1.4.5 自己重力輻射流体シミュレーションによる銀河スケール星間ガス進化の解明
- 1.4.6 輻射磁気流体計算による天体降着流・噴出流の研究

#### (ii) 新たな物理の探究

新たな物理の探究において行われる次の個別テーマについて、その意義と計算内容、および現状とエクサスケールへの展望を表4.5.1-1にまとめる。

- 2.4.1 数値相対論によるブラックホールの形成と強重力現象の解明
- 2.4.2 相対論的輻射流体計算による超新星爆発メカニズムの探究
- 2.4.3 相対論的粒子計算による超高エネルギー現象と粒子加速機構の探究
- 2.4.4 6次元ブラソフシミュレーションによるプラズマ非熱的分布形成の解明

#### (iii) 惑星形成と宇宙生物学の探究

惑星形成と宇宙生物学の探究において行われる次の個別テーマについて、その意義と計算内容、および現状とエクサスケールへの展望を表4.5.1-1にまとめる。

- 3.4.1 惑星系形成のシミュレーション
- 3.4.2 地球・惑星形成のシミュレーション
- 3.4.3 惑星表層環境の形成と進化シミュレーション

### 3.4.4 量子計算による宇宙アミノ酸生成と光不斉化過程の探究

#### (iv) 宇宙環境学の推進

宇宙環境科学の推進において行われる次の個別テーマについて、その意義と計算内容、および現状とエクサスケールへの展望を表 4.5.1-1 にまとめる。

#### 4.4.1 輻射磁気流体計算による太陽恒星ダイナモの探究

#### 4.4.2 プラズマ計算による太陽圏・宇宙空間無衝突衝撃波の研究

#### 4.4.3 宇宙天気予報に基づく太陽系環境科学の推進

表 4.5.1-1 エクサスケール・コンピューティングによるサイエンス (宇宙)

アプリ	テーマ名	意義と計算内容	現状とエクサスケールへの展望	ベタスケール (現状)	エクサスケール (展望)
				(1) 計算法 (2) 問題規模 (3) 計算量 (PFLOPS・hour)	(1) 計算法 (2) 問題規模 (3) 計算量 (EFLOPS・hour)
1.4.1	自己重力N体／流体シミュレーションによる宇宙構造形成の解明	ダークマターの構造形成から惑星形成にいたる宇宙における多様なスケールでの構造形成をN体+主に粒子法による流体コードで解明する。	大粒子数・小タイムステップ数では「京」で兆を超える粒子数が扱える見込みだが、惑星形成等では必要になる長時間積分では並列度が小さく効率が落ちる。高い効率が出るアーキテクチャで10～100億程度の粒子数での長時間計算ができればいくつかの分野でブレークスルーになる。	(1) 独立時間刻みとツリーのハイブリッド (2) $10^5 \sim 10^{12}$ 粒子 (3) $10^3$ PFLOPS・hour	(1) 独立時間刻みとツリーのハイブリッド (2) $10^{14}$ 粒子、1run (3) 420 EFLOPS・hour
1.4.2	輻射流体力学による銀河と巨大ブラックホール形成過程の解明	銀河内の星形成と巨大ブラックホール形成のダイナミクスを同時に解く計算を行うことで、銀河－ブラックホールの共進化を解明する。自己重力計算、流体計算、6次元輻射輸送計算を組み合わせた輻射流体計算が必要になる。	輻射流体計算は、近年その端緒に着いたばかりであり、海外でもまだ本格的な計算は行われていない。現在、輻射5次元の計算が最先端であるが、完全6次元輻射輸送を入れた輻射流体計算はエクサスケールでのグランドチャレンジになる。	(1) Tree Radiation SPH (2) $10^9$ 粒子 + $5 \times 10^6$ 光源 (3) $10^4$ PFLOPS・hour	(1) Tree Radiation SPH (2) $10^{11}$ 粒子 + $5 \times 10^8$ 光源、1run (3) 2000 EFLOPS・hour
1.4.3	6次元位相空間上の Boltzmann 方程式による無衝突粒子系力学の探究	宇宙大規模構造におけるニュートリノのダイナミクスを正確な取り扱い。宇宙プラズマにおける無衝突衝撃波における粒子加速の解明。	6次元位相空間でのシミュレーションは筑波大学・東京大学のグループで行われているのみ。精度のよい計算スキームの開発もこれからの重要な課題。	(1) 有限体積法 (方向分割) (2) 位置空間 $128^3$ 個、運動量空間 $64^3$ 個 (3) 20 PFLOPS・hour	(1) 有限体積法 (2) 位置空間 $256^3$ 個、速度空間 $256^3$ 個、10run (3) 100 EFLOPS・hour
1.4.4	ダークマター宇宙における宇宙暗黒時代の進化の解明	ダークマターによる重力相互作用と初代銀河形成、銀河間ガスの進化を同時に解く。初期宇宙の進化を理論的に解明する。また、全宇宙にわたる中性水素の分布の進化を明らかにし、初期宇宙の構造形成やインフレーションモデルを解明する。	個別の初代天体の形成は計算できるが、大域的な輻射輸送を取り入れ、銀河間物質の進化と同時に解くためにエクサスケールが必要。また、水素分布については現在は小さな領域あるいは宇宙進化の限られた時期のみ計算可能。137億年にわたる進化を整合的に追うにはエクサスケールが必要。	(1) Tree-PM (2) 100億粒子+1000光源 (3) 10000 PFLOPS・hour	(1) Particle-Mesh+FFT (2) $10^{13}$ 粒子 + $10^5$ 光源、10run (3) 140 EFLOPS・hour
1.4.5	自己重力輻射流体シミュレーションによる銀河スケール星間ガス進化の解明	星間ガスは星形成の現場であるとともに、大質量星から輻射や超新星爆発の形で解放されたエネルギーを銀河スケールへと伝え、銀河形成に影響を与える。星間ガスの多相構造を分解する銀河スケールのシミュレーションを行うことにより銀河形成の物理的理解が得られ、宇宙の物質循環を解明できる。	現状、星間ガスのシミュレーションは銀河の限られた一部分に注目したもの、もしくは本質的に重要な星間ガスの多相構造を分解できていないものしか行われていない。エクサスケールにより、銀河スケールで星間ガスの多相構造を分解した輻射流体シミュレーションが可能になり、銀河と星間ガスの相互作用を明らかにできる。	(1) Tree-Based Radiation Transfer + mesh 流体 (2) $1024^3$ メッシュ + $10^4$ 光源 (3) $10^2$ PFLOPS・hour	(1) Tree-Based Radiation Transfer + mesh 流体 (AMR) (2) $8192^3$ メッシュ + $10^8$ 光源、10run (3) $10^3$ EFLOPS・hour

1.4.6	輻射磁気流体計算による天体降着流・噴出流の研究	物質が回転しながら天体に落下する際に形成される降着円盤の時間変動とジェット形成機構を現象論的な粘性パラメータを導入しない3次元輻射磁気流体計算によって解明する。特に、輻射と磁気流体の相互作用が重要になる明るい降着天体の進化を明らかにする。	3次元輻射磁気流体計算は円盤の一部を取りだした計算しか行われておらず、輻射輸送には拡散近似が採用されている。円盤全体を計算領域に含め、高次モーメントを用いて輻射輸送を高精度化する。10年後には輻射の6次元計算を目指す。	(1) 相対論的磁気流体方程式の近似リーマン解法+1次モーメント法による輻射輸送 (2) 512 <sup>3</sup> 格子点、10 <sup>8</sup> 時間ステップ (3) 100 PFLOPS・hour	(1) 相対論的磁気流体方程式の近似リーマン解法+輻射輸送の6次元計算 (2) 512 <sup>3</sup> 格子点、光線方向1000、振動数100、10 <sup>8</sup> 時間ステップ、4run (3) 1100EFLOPS・hour
2.4.1	数値相対論によるブラックホールの形成と強重力現象の解明	ブラックホールの形成、中性子星連星の合体の数値相対論シミュレーションを行い、強重力・極限状態下の宇宙現象を解明するとともに、放射される重力波の理論予測を行い LCGT による重力波観測計画に貢献する。4つの基本相互作用すべてを考慮に入れた計算が必要になる。	4つの基本相互作用の組み込みおよび一般相対論的輻射輸送は近年その端緒についたばかりであり、日本のグループが世界をリードする状況にある。運動量空間を積分した輻射輸送から始め、最終的に7次元の輻射輸送を解くのが20年先に向けた課題である。	(1) 4次精度 RK, HRSC (2) 空間(400×400×200) 10 <sup>7</sup> (steps) (3) 10 <sup>4</sup> PFLOPS・hour	(1) 4次 RK, Rad-HRSC (2) 空間(1000 <sup>3</sup> ), 10 <sup>7</sup> (steps), 10run (3) 280 EFLOPS・hour
2.4.2	相対論的輻射流体計算による超新星爆発メカニズムの探究	重元素などの物質の起源である超新星爆発のメカニズムを解明し、大口径望遠鏡、カミオカンデ、重力波干渉計など次世代観測機器と比較可能なデータを提供する。ニュートリノの6次元輻射輸送計算を核物質と重元素の3次元流体計算と同時に行う。	現状、ニュートリノの輻射輸送計算は空間3次元、位相空間1次元の合計4次元に簡易化されて行われている。これを近似なしに空間3次元、位相空間3次元で行い、非球対称的な物質の配位からのニュートリノ輻射と物質へのフィードバックを精査する。	(1) ニュートリノの輻射輸送計算 (2) 空間 600×128×128、位相空間 20 のグリッドでシミュレーション開始から1s計算する。 (3) 876 PFLOPS・hour	(1) ニュートリノの輻射輸送計算 (2) 空間 512×64×128、位相空間 24 <sup>3</sup> のグリッドでシミュレーション開始から1s計算する、10run (3) 220 EFLOPS・hour
2.4.3	相対論的粒子計算による超高エネルギー現象と粒子加速機構の探究	10 <sup>15</sup> eVを超える高エネルギー粒子については、その加速メカニズムだけでなく起源もわかっていない。これらは活動天体のダイナミクスの理解と密接に関連しており、非熱的粒子を生成する粒子加速の問題は、宇宙物理学・天文学・プラズマ物理学・宇宙線物理学などの学際的研究となっている。	相対論的プラズマの粒子加速問題に対して、輻射減衰を組み込んだプラズマ粒子シミュレーションコードの開発が始まっており、エクサスケールでは、輻射によるプラズマへの反作用が無視できない超高エネルギー天体現象や超強度光子場（レーザープラズマ）での相対論的プラズマ領域での研究が可能になっている。	(1) Particle-in-Cell 法 (2) 1024 <sup>3</sup> グリッド点、粒子数 10 <sup>12</sup> 個 (3) 200 PFLOPS・hour	(1) Particle-in-Cell 法 (2) 4096 <sup>3</sup> グリッド点、粒子数 10 <sup>15</sup> 個、1run (3) 140 EFLOPS・hour
2.4.4	6次元ブラソフシミュレーションによるプラズマ非熱的分布形成の解明	非熱的分布を構成する高エネルギー粒子の生成メカニズムを明らかにすることで、宇宙物理学の最大の謎の一つである宇宙線の起源に迫ることができる。熱的プラズマの粒子数に比べて非熱的粒子の数が圧倒的に少ないことから、分布関数の時間発展を直接解くブラソフシミュレーションの手法を確立することで、粒子法に代わる新たなアプローチによる解明が期待できる。	速度空間3次元の4次元静電シミュレーションが多くを占める。速度空間3次元+実空間3次元の6次元電磁プラズマシミュレーションの粒子加速問題への適用は、エクサスケール計算で初めて可能となる。	(1) セミ・ラグランジュアン法 (2) 実空間 1024 <sup>3</sup> 点、速度空間 256 <sup>3</sup> 点の5次元計算 (3) 1440 PFLOPS・hour	(1) セミ・ラグランジュアン法 (2) 実空間 1024 <sup>3</sup> 点、速度空間 256 <sup>3</sup> 点の6次元計算、1run (3) 420 EFLOPS・hour
3.4.1	惑星系形成のシミュレーション	太陽系のように、恒星を中心としてその周囲を回る複数の惑星からなるシステムの形成過程を明らかにする。10AU以上の幅を持つ広い円環領域を対象とし、長い時間の進化を計算する。	国内外において、狭い円環領域における複数個の惑星形成の計算は実行されつつある。こうした計算により、微惑星集積による1個の惑星の形成だけでは見えなかった現象が見えてきた。しかもそれが、本質的に重要な役割を担っていることが見えてきている。ある領域における惑星形成の結果が他領域に及ぼす効果を考慮するため、10AU以上の幅におよぶ広域を対象とした計算が必要である。	(1) 重力多体系計算 (2) 10万體、10万年分、100 run (3) 100 PFLOPS・hour	(1) 重力多体系計算 (2) 10 <sup>8</sup> 體、10 <sup>8</sup> 年分、100 run (3) 420 EFLOPS・hour

3.4.2	地球・惑星形成のシミュレーション	地球をはじめ、太陽系内外の多様な惑星の形成過程を明らかにする。	原始惑星の巨大衝突による月形成、地球内部構造の形成など個々の過程は、ある程度のシミュレーションがなされている。しかし、各々の精度がまだ不十分である上、それらを組み合わせた複合過程についてはほとんど計算がなされていない。エクサスケール計算により、各過程の高精度化と、複合過程のシミュレーションが実施可能となるだろう。	(1) SPH (2) 1 万體、1 ヶ月分、100 run (3) 3.5 PFLOPS・hour	(1) SPH (2) 10 億體、数ヶ月分（ステップ数 100M）、100 run (3) 1250 EFLOPS・hour
3.4.3	惑星表層環境の形成と進化シミュレーション	地球をはじめとする太陽系内外の惑星表層環境の形成と進化を明らかにする。	地球の表層環境（大気・海洋を含む気候）については、社会的要請もあり、大規模な数値シミュレーションを用いた研究が国内外において盛んに行われている。太陽系内外の多様な惑星の多様な表層環境を理解するためには、多様なパラメータに対する多くのシミュレーションを行う必要がある。	(1) 格子法 HD+輻射輸送 (2) $1,920 \times 960 \times 96$ 、19 年分、1run (3) 1400 PFLOPS・hour	(1) 格子法 HD+輻射輸送 (2) $3,840 \times 1920 \times 192$ 、10 年分（ステップ数 100M）、100run x 10 天体分 (3) 560 EFLOPS・hour
3.4.4	量子計算による宇宙アミノ酸生成と光不斉化過程の探究	生命は L-アミノ酸で構成されているが、この L 体過剰生成は原始太陽系での光（円偏光）との相互作用で生成された可能性が示唆されている。この環境を実験的に再現することはきわめて困難であるが、第一原理計算によるシミュレーションならば検証が可能となる。	偏光波によるアミノ酸の L 体過剰生成の研究は、現在実験室で行われているのみであり、宇宙空間を想定した研究はない。この研究は、エクサスケールでのみ本格的な計算が可能であり、生命の宇宙起源を探究する上でのブレイクスルーとなる。	(1) 量子ダイナミクス計算サーフェスホッピング法 (2) 1 アミノ酸 $\times$ 10 初期状態 $\times$ 3000 サーフエスホッピング (3) $3 \times 10^4$ PFLOPS・hour	(1) 量子ダイナミクス計算サーフェスホッピング法 (2) 20 アミノ酸 $\times$ 10 初期状態 $\times$ 3000 サーフエスホッピング (3) 600 EFLOPS・hour
4.4.1	輻射磁気流体計算による太陽恒星ダイナモの探究	天体プラズマ活動のエネルギー源である磁場の生成維持物理機構を太陽恒星を対象として明らかにする。球殻状領域内で 3 次元拡散入磁気流体方程式を解き、乱流と大規模構造とを同時に分解する。	現状では、磁気周期活動の片鱗が見え始めた。また乱流への遷移もぎりぎり達成できたかどうかというところである。今後は、より高解像度・大 Reynolds 数で乱流を十分発達させたシミュレーションを実施することで、大きなパラダイムシフトが起こる可能性がある。	(1) 非弾性近似 (anelastic) (2) $250^3$ (3) 10 PFLOPS・hour	(1) 音速抑制法 + Yin Yang grid (2) $1024 \times 8192 \times 24576 \times 2$ 、 $5 \times 10^7$ step、1run (3) 42 EFLOPS・hour
4.4.2	プラズマ計算による太陽圏・宇宙空間無衝突衝撃波の研究	超新星衝撃波ではマッハ数が 100 を超え高効率で電子が加速されるが、太陽圏で見られる衝撃波では 10 程度以下の場合が多く電子がほとんど加速されていない。衝撃波における非熱的電子の生成をマッハ数によって整理することで、太陽圏から宇宙までの高エネルギー粒子の生成メカニズムを統一的に理解することができる。	プラズマ粒子コードによる衝撃波粒子加速の研究は、計算コストを軽減するために粒子数を減らしたり、規格化を換えたりした計算がほとんどであり、統一的な計算結果の比較ができていないのが現状である。エクサスケールの計算においては、超新星衝撃波でのパラメータ領域で計算することが初めて可能になる。	(1) Particle-in-Cell 法 (2) $24000 \times 512^2$ グリッド点（粒子数 $10^{14}$ 個） (3) $10^4$ PFLOPS・hour	(1) Particle-in-Cell 法 (2) $72000 \times 3072^2$ グリッド点（粒子数 $10^{16}$ 個）、2run (3) 200 EFLOPS・hour
4.4.3	宇宙天気予報に基づく太陽系環境科学の推進	太陽活動と太陽地球システムダイナミクスメカニズムを探るとともに、その変動を予測する技術を獲得することにより、生存空間としての太陽系の理解を深めると同時に衛星・通信・電力網など高度な社会基盤に対する宇宙天気擾乱の影響を最小化することができる。	数値シミュレーションに基づく宇宙天気予報の実験的試みが米国を中心に推進されている。今後、エクサスケールの実現によって、太陽面とコロナの精密観測を取り込んだデータ駆動シミュレーションが確立し、宇宙天気数値予報が実用段階に入ると考えられる。	(1) 電磁流体力学有限要素・有限差分スキーム、ハイブリッドスキーム、PIC 等 (2) $512^3$ 格子 (3) 50 PFLOPS・hour	(1) 電磁流体力学有限要素・有限差分スキーム、ハイブリッドスキーム、PIC 等 (2) $3000^3$ 格子、100run (3) 170 EFLOPS・hour



課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモ リバンド 幅 (PB/s)	メモリ量 /ケース (PB)	ストレ ージ量/ ケース (PB)	計算時 間/ケー ス (hour)	ケース数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
自己重力N体/流体シ ミュレーションによる宇宙 構造形成の解明	420	1.4	5	100	1000	1	1,500,000	独立時間刻みとツリーの ハイブリッド	10 <sup>14</sup> 粒子	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度30GB/s/ノード
輻射流体力学による銀 河と巨大ブラックホール 形成過程の解明	1000	0.2	2	1	2000	1	7,200,000	Tree radiation SPH	10 <sup>11</sup> 粒子 + 5x10 <sup>8</sup> 光源	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度100GB/s/ノード
6次元位相空間上の Boltzmann方程式による 無衝突粒子系力学の探 究	130	0.3	20	2	80	10	360,000	有限体積法	位置空間256 <sup>3</sup> 個 速度 空間256 <sup>3</sup> 個	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度1000GB/s/ノ ード
ダークマター宇宙におけ る宇宙暗黒時代の進化 の解明	140	1.3	1.3	1	100	10	500,000	Particle-Mesh + FFT	10 <sup>13</sup> 粒子+10 <sup>5</sup> 光源	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度128GB/s/ノード
自己重力輻射流体シミュ レーションによる銀河ス ケール空間ガス進化の 解明	100	0.3	2	10	1000	10	3,600,000	Tree-Based Radiation Transfer + mesh流体 (AMR)	8192 <sup>3</sup> メッシュ+10 <sup>8</sup> 光 源	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度128GB/s/ノード
輻射磁気流体計算によ る天体降着流・噴出流の 研究	560	4	0.08	200	500	4	4,000,000	相対論的磁気流体方 程式の近似リーマン 解法+輻射輸送の6 次元計算	512 <sup>3</sup> 格子点、1000光線 方向、100振動数、10 <sup>8</sup> 時間ステップ	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度30GB/s/ノード
数値相対論によるブラッ クホールの形成と強重 力現象の解明	1000	100	0.04	50	28	10	1,000,000	4次元RK、Rad-HRSC	1000 <sup>3</sup> 10 <sup>7</sup> step	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度2.88GB/s/ノード
相対論的輻射流体計算 による超新星爆発メカニ ズムの探究	18	70	1.6	1.3	1200	10	780,000	ニュートリノ輻射輸送 計算(超新星爆発)	空間512x64x128 位相空 間24 <sup>3</sup> で1秒分の時間を 計算	100Tflops/ノード × 10000ノード、主記 憶100GB/ノード、主記憶バンド幅 20TB/s/ノード、オンチップメモリ容量 2MB/コア、1000コア/ノード、通信速度 60GB/s/ノード
相対論的粒子計算によ る超高エネルギー現象と 粒子加速機構の探究	680	68	68	700	200	1	490,000	Particle-in-Cell法	4096 <sup>3</sup> グリッド、10 <sup>15</sup> 粒 子	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度1GB/s/ノード
6次元プラズマシミュレ ーションによるプラズマ非 熱的分布形成の解明	300	4	320	3200	1400	1	1,500,000	セミ・ラグランジュアン 法	実空間1024 <sup>3</sup> 点、速度空 間265 <sup>3</sup> 点の6次元計算	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度1GB/s/ノード
量子計算による宇宙アミ ノ酸生成と光不斉化過 程の探究	100	0.1	1	10	6000	1	2,200,000	量子ダイナミックス計 算サーフェスホッピング 法	20アミノ酸x10初期状態 x3000サーフェスホッピ ング	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度100GB/s/ノード
輻射磁気流体計算によ る太陽恒星ダイナモの 探究	100	88	7	13	410	1	150,000	音速抑制法+Yin-Yang grid	格子点 1024x8192x24576x2、 5x10 <sup>7</sup> step	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度1GB/s/ノード
プラズマ計算による太陽 圏・宇宙空間無衝突衝 撃波の研究	70	9	6	120	1400	2	710,000	Particle-in-Cell法	72000x3072 <sup>2</sup> グリッド点 (粒子数10 <sup>16</sup> 個)	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度1GB/s/ノード
宇宙天気予報に基づく 太陽系環境科学の推進	17	2	2	1	100	100	600,000	電磁流体力学有限要 素法・有限差分スキ ーム、ハイブリッドスキ ームPIC等	3000 <sup>3</sup> 格子	100Tflops/ノード × 10000ノード、1000 コア/ノード、通信速度100GB/s/ノード

※本見積もりは未だ精査中である。より精度の高い数値はWeb版(→「1.2. 本文書の構成」)を参照のこと。

## (5) 他分野との連携

### (i) 宇宙史の探究

天体の形成・進化の研究は、宇宙理論と宇宙観測の密接な連携の下に進んできたことは論を待たない。更に、宇宙論や元素合成においては、素粒子・原子核分野とも連携してきた。これらの連携は、今後も継続される。

星形成、銀河形成、巨大ブラックホール形成過程では、衝撃波や乱流が重要な役割を果たす。これらは、HPCI 戦略プログラム「戦略分野 4：次世代ものづくり（以下、分野 4）」で探究されている課題と密接に関係する。更に、宇宙物理学で用いられる圧縮性流体の格子法は、多くが航空工学などの分野で開発されてきたものである。よって、今後も分野 4 との連携は重要になると考えられる。

第一世代星の形成過程では、水素原子 3 つの衝突による水素分子の形成（3 体反応）が重要な素過程であるが、3 体反応は反応断面積を実験的に決定することはきわめて難しく、量子力学に基づく数値計算を必要とする。しかし、これまでの計算で正確な反応率は求まっていない。多体系の量子力学計算は、さまざまな工夫が必要となる。これは、HPCI 戦略プログラム「戦略分野 2：新物質・エネルギー創成（以下、分野 2）」の研究と密接に関係するものであり、分野 2 との連携は、宇宙量子力学という学問分野の開拓につながる。

## (ii) 新たな物理の探究

ガンマ線バースト、超新星爆発は、陽子の中性子化とニュートリノ発生、電子・陽電子対消滅といった素粒子・原子核の素過程が重要な役割を果たす。中心核が中性子星化した際の状態方程式も、爆発がどのように起こるかを定める重要な要素である。素粒子・原子核分野では、数値計算によって、量子色力学から原子核の核力を導出する研究が進んでおり、原子核多体系への新たなアプローチによって、中性子星化の物理素過程の研究にも新たな進展が期待されている。このような点において、素粒子・原子核との連携は不可欠なものとなる。超高エネルギー宇宙線の起源に関わる粒子加速の問題は、プラズマ物理学の最先端の研究としても精力的に行われており、宇宙物理学・天文学・プラズマ物理学・宇宙線物理学などの学際的研究分野となっている。その意味で、分野 4 との連携は、研究の遂行において必須である。

## (iii) 惑星形成と宇宙生物学の探究

惑星形成の研究は、地球惑星科学分野との連携が重要であり、現在観測分野でも密接な連携の下で進められている。

アミノ酸鏡像異性体過剰の問題は、量子多体計算として計算物質科学に密接に関係する。また、鏡像異性体過剰の増幅問題は生命科学の問題でもある。よって、この研究課題は、HPCI 戦略プログラム「戦略分野 1 予測する生命科学・医療および創薬基盤」や分野 2 との融合研究となる課題である。

## (iv) 宇宙環境学の推進

太陽活動と太陽風の研究は、プラズマ物理と深い関係にある。したがって、分野 4 のプラズマ分野との連携は、重要性が高い。

また、通信衛星や宇宙ステーションを太陽活動に従って制御することは、地上災害からの防災を宇宙スケールにまで拡大した“宇宙防災”である。よって、宇宙防災の推進は、HPCI 戦略プログラム「戦略分野 3：防災・減災に資する地球変動予測」と連携して進めることも重要になる。

## (6) 公的な意見交換会とそのサマリー

2012年9月20日、日本天文学会秋季年会（大分大学）における理論天文学宇宙物理学懇談会総会において、宇宙分野の計算科学ロードマップ白書作成経緯および平成23年度版白書初稿について報告し意見の募集を行った。いただいたコメントは白書に反映させた。

2012年12月20日、理論天文学宇宙物理学懇談会メーリングリストに白書初稿を投稿し意見を求めた。また、12月23日理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム（つくば国際会議場）における総会で、白書の内容を説明し、意見交換した。いただいた意見は白書に反映させた。

2013年3月27日、日本物理学会年次大会（広島大学）における素粒子論領域・理論核物理領域・（物性）領域11,9,8,7,3,4,5,6,12合同シンポジウムにて宇宙分野の平成24年度版計算科学ロードマップについて説明し意見交換を行った。

## ロードマップ

### 宇宙史の探求

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
自己重力N体／流体シミュレーションによる宇宙構造形成の解明	大粒子数・小時間刻み数・短時間積分で兆を超える粒子数での計算		惑星形成に必要な長時間積分を高い効率で行いブレークスルーを目指す			
輻射流体力学による銀河と巨大ブラックホール形成過程の解明	5次元に近似した輻射流体力学計算		完全な6次元輻射流体計算			
6次元位相空間上のBoltzmann方程式による無衝突粒子系力学の探究	有限体積法による6次元位相空間での萌芽的計算		有限体積法による6次元位相空間での高精度計算			
ダークマター宇宙における宇宙暗黒時代の進化の解明	初期天体形成計算、大域的輻射輸送計算、小領域水素分布計算の個別発展的計算		初期天体形成と輻射輸送および水素分布計算を統合的に連成した宇宙進化シミュレーション			
自己重力輻射流体シミュレーションによる銀河スケール星間ガス進化の解明	銀河の小領域や疎分解能での星間ガスシミュレーション		銀河スケールの多層構造を反映した銀河と星間ガスシミュレーション			
輻射磁気流体計算による天体降着流・噴出流の研究	降着円盤の一部での3次元拡散入輻射流体近似計算の高度化		降着円盤全体を含む6次元輻射輸送＋磁気流体計算			

図 4.5.1-1 宇宙史の探求ロードマップ

## 新たな物理の探求

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
数値相対論によるブラックホールの形成と強重力現象の解明	4つの基本相互作用を組み込んだ相対論的輻射輸送計算の開発と発展		4つの基本相互作用を組み込んだ相対論的輻射輸送計算(7次元輻射輸送計算が目標)			
相対論的輻射流体計算による超新星爆発メカニズムの探究	ニュートリノ輻射輸送を近似的に取り入れた計算		非球対称物質中の完全6次元ニュートリノ輻射輸送を取り込んだ計算			
相対論的粒子計算による超高エネルギー現象と粒子加速機構の探究	相対論的プラズマの粒子加速計算のための輻射減衰を取り込んだ計算の開発と検証		超高エネルギー天体現象や超高強度光子場での相対論的プラズマ領域での研究			
6次元プラソフシミュレーションによるプラズマ非熱的分布形成の解明	空間1～2次元・速度空間3次元近似のプラソフ法による電磁プラズマシミュレーション手法の確立と発展		空間3次元速度空間3次元の6次元プラソフ法による電磁プラズマシミュレーション			

図 4.5.1-2 新たな物理の探求ロードマップ

## 惑星形成と宇宙生物学の探求

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
惑星系形成のシミュレーション	狭い円環領域における複数個の惑星形成計算		10天文単位にわたる広域を対象とした長時間の惑星形成計算			
地球・惑星形成のシミュレーション	原始惑星の巨大衝突による月形成や地球内部構造の形成過程の解明計算の進展		各物理過程の高精度化と過程の複合連成による惑星形成の高精度計算			
惑星表層環境の形成と進化シミュレーション	地球表層環境シミュレーションの地球外惑星表層環境シミュレーションへの展開		多様な環境パラメータに対する高サンプル惑星表層環境シミュレーション			
量子計算による宇宙アミノ酸生成と光不斉化過程の探究	円偏光波によるアミノ酸の電子励起状態の量子力学計算		円偏光波によるアミノ酸、アミノ酸前駆体の陽子・電子量子ダイナミクス計算			

図 4.5.1-3 惑星形成と宇宙生物学の探求ロードマップ

## 宇宙環境学の推進

年代 課題	2012 ～	2014 ～	2016 ～	2018 ～	2020 ～	2022 ～
輻射磁気流体計算による太陽恒星ダイナモの探究	疎解像度低レイノルズ数での磁気流体計算による太陽磁気周期活動の理解		高解像度大レイノルズ数での磁気流体計算による太陽磁気周期活動の解明			
プラズマ計算による太陽圏・宇宙空間無衝突衝撃波の研究	太陽圏における衝撃波に対するプラズマ粒子計算による衝撃波粒子加速の計算		超新星による衝撃波に対するプラズマ粒子計算による衝撃波粒子加速の計算と衝撃波粒子加速機構の統一的理解			
宇宙天気予報に基づく太陽系環境科学の推進	太陽活動と太陽地球システムダイナミクスのメカニズム探索計算と、予測技術の開発		太陽面と太陽コロナ精密観測とのデータ駆動シミュレーションによる宇宙天気予報			

図 4.5.1-4 宇宙環境学の推進ロードマップ



参考文献

- [1] 「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」日本学術会議物理委員会天文学・宇宙物理学分科会（2010） [<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-0319.pdf>]