

「特定高速電子計算機施設の共用の促進に
関する基本的な方針」に対する意見書

地球電磁気・地球惑星圏学会
太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会

目次

はじめに

1. 五つの基本方針に対する意見の概要
2. 地球電磁気・地球惑星圏学会、太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会の紹介
 2. 1 地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）の紹介
 2. 1.1 沿革・規模
 2. 1.2 研究対象領域
 2. 2 太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会の紹介
 2. 2.1 設立の背景・目的
 2. 2.2 特定電子計算機を必要とする研究課題
3. 五つの基本方針に対する具体的な意見

付録 用語集

はじめに

60年の歴史を持つ地球電磁気・地球惑星圏学会は、現在では地球科学・宇宙科学の広範な研究領域をカバーするに至っている。地球電磁気・地球惑星圏学会において1つ大きな研究領域をなしている太陽地球惑星系科学分野では

- 人類の持続的発展を支える宇宙利用の基盤構築
- 太陽活動に応じて大きく変動する太陽—地球惑星系の理解
- 宇宙空間プラズマ科学の普遍的・根源的理解

の3つの大きな目標を掲げ、基礎科学のみにとどまらず宇宙開発などの応用側面も視野にいたれた研究活動を行い、我が国の科学技術の国際競争力の増進に貢献している。

太陽地球惑星系科学分野では30年以上前の早い段階から数値シミュレーションによる研究の重要性が認識されており、当該分野の科学的発展に数値シミュレーションが大きな役割を果たしている。我が国は当該分野において世界の研究をリードする数値シミュレーションによる研究成果をあげており、また、こうした長い研究の歴史から、シミュレーション技術、人材育成などの点でも実績をあげている。

地球電磁気・地球惑星圏学会下で活動している太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会では「特定高速電子計算機の共用では、実績のある研究分野の研究者が革新的な超大規模計算を実行することで世界のトップクラスの成果をあげることを可能とする枠組みが必須」という考えを柱として、ここに「特定高速電子計算機施設の共用の促進に関する基本的な方針」に対する意見書をまとめた。特定高速電子計算機施設の共用においては、そのような枠組みを導入し、超大規模計算による利用の促進を図っていただきたい。以下に、太陽地球惑星系科学分野において特定高速電子計算機を必要とする研究課題の概略、および、5つの基本方針に対する具体的な意見について述べる。

1. 五つの基本方針に対する意見の概要

「特定高速電子計算機施設の共用の促進に関する基本的な方針」について、本意見書の概要を示す。詳細については「3. 五つの基本方針に対する具体的な意見」を参照されたい。

第1：特定高速電子計算機施設の共用の促進に関する基本的な方向について

利用分野の選定に際し、重点推進 4 分野以外の科学研究分野にも公平な利用機会が提供される事を希望する。人類のさらなる発展のきっかけをもたらす未知領域の研究分野においても、国際的な競争力が高い研究グループが特定高速電子計算機を活用し世界的な成果を挙げることで、我が国の科学技術に大きなフィードバックをもたらし得ると信じる。

第2：特定高速電子計算機施設の整備に関する事項について

利用希望者ができるだけ早い段階から準備を開始する必要があるため、当該施設のアーキテクチャや利用条件、ネットワーク環境、プレ処理・ポスト処理環境などを早期に決定し、それらの情報を積極的に公開することが重要と考える。

第3：特定高速電子計算機施設の施設利用研究に関する事項について

1. 重点課題以外の、我が国の科学技術のさらなる発展をもたらさう国際競争力の高い研究については、公平な利用機会が与えられることを希望する。
2. 利用者・研究者が効率的に利用するために、開発支援スタッフの当該施設への常駐、計算ライブラリの整備を希望する。
3. 研究の成果は国家・国民の財産であるというポリシーのもと、原則的に一般公開されることが望ましい。
4. 科学研究費補助金などに特定高速電子計算機に関する細目を設け、基礎研究分野においても競争的資金から利用料金を支払える体制を希望する。
5. 人材育成に関して、教育可能で実績のある既存研究施設での雇用を推奨し、若手研究者が研究に専念できる環境を構築する事が必要と考える。

第4：特定高速電子計算機施設の運営に関する事項

高速ネットワークを経由しての当該施設へのアクセスは、利用者機会均等の視点からも、効率的な成果の達成の視点からも重要である。当該施設から巨大なデータを転送することを考慮し、ネットワーク基盤の準備の積極的な奨励を希望する。

第5：その他特定高速電子計算機施設の共用の促進に際し配慮すべき事項

特定高速電子計算機の詳細なアーキテクチャをできるだけ早く決定し、旧帝国大学の大型計算機センター、旧国立研究所や全国共同利用施設の次期スーパーコンピュータが特定高速電子計算機と同様のアーキテクチャを採用することを奨励することを希望する。

2. 地球電磁気・地球惑星圏学会、太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会の紹介

2. 1 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) の紹介

2. 1. 1 沿革・規模

地球電磁気・地球惑星圏学会は 1947 年に日本地球電磁気学会として発足し、2007 年に発足 60 周年を迎えた学会である。学会発足当時の主な研究対象は地上観測に基づく地球の磁気・電気現象であった。その後、宇宙観測技術の発展と共にその研究対象領域は拡大し、1987 年には地球電磁気・地球惑星圏学会 (Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Science; 通称 **SGEPSS**) と改称された。現在では、超高層物理学、惑星科学、宇宙科学の多様な専門領域の研究者を主体とした、約 800 名の会員から構成されている。学会活動としては、年 2 回の定例講演会、日本地球惑星科学連合の加盟学会として欧文学術誌 *Earth, Planets and Space* の刊行、国内外の学術研究会のサポート、民間・小中高校へのアウトリーチ活動、などを学会の主な活動として行っている。学会の詳細については、学会ホームページ (<http://www.sgepss.org/>) を参照されたい。

2. 1. 2 研究対象領域

以下には **SGEPSS** の研究対象領域について簡単に紹介する。対象領域は、地球中心部から天体現象まで、多様な時空間スケールにまたがった幅広いものとなっている。

- ・ **宇宙プラズマ**：宇宙空間は星や惑星に起源を持つプラズマガスで占められている。宇宙空間は様々なプラズマ現象の研究対象として魅力的な場である。
- ・ **太陽圏**：太陽から吹き出す超音速のプラズマ流である太陽風^[1]で満たされた空間を太陽圏と呼ぶ。星間ガスと太陽風の相互作用による高エネルギー粒子加速現象などの太陽圏現象が研究されている。
- ・ **磁気圏**：太陽風は惑星の持つ磁場によって遮られる。こうして太陽風が進入できない惑星の磁場によって占められている領域を磁気圏と呼ぶ。磁気圏内では太陽風のエネルギーによって駆動される様々な現象が研究対象となる。
- ・ **電離圏**：高度約 60km を越えて高高度に上ると、大気中に含まれるイオンや電子の割合が次第に増加し、電離圏と呼ばれる領域に至る。電離圏の研究から宇宙空間と地球の関わりが研究されている。
- ・ **大気圏**：成層圏オゾンなどの地球環境に重要な大気成分、大気光・雷などの発光現象、気象で重要な大気波動など、地表から超高層までの大気現象を研究対象としている。
- ・ **惑星圏**：地上からの望遠鏡観測や惑星探査機のデータを用いて、木星、火星、金星、水星などの惑星においても地球と同様に惑星の大気圏・電離圏・磁気圏について研究が行われている。
- ・ **地球内部の電磁気現象**：地表や海底において電磁場を測定することで地球内部の電氣的、磁氣的な構造を探り、そのデータをもとに地震や火山などの活動について研究が進めら

れている。

- ・ **地磁気の成因と歴史**：地球磁場や岩石磁化を測定することで、地磁気がどのように発生し、固有磁場がどのように進化してきたのかを探っている。

以上のように、SGEPSS では幅広い研究分野を対象としており、数多くの関連研究分野との交流が必要とされるために、より特定の研究テーマに対しては分科会活動を行っている。本意見書は、以下に紹介する「**太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会**」によってまとめられたものである。

2. 2 太陽地球惑星系科学シミュレーション分科会の紹介

2. 2. 1 設立の背景・目的

昨今のコンピュータ計算能力の飛躍的な進歩により、数値シミュレーションによる研究は新たな方法論として確固たる地位を得つつある。それは太陽地球惑星系科学分野においても例外ではなく、個々の物理素過程に含まれる強い非線形過程ならびに異なる物理過程が支配する領域間が結合した複合系の真の理解を得るためには、理論、地上観測・人工衛星観測と併せて、数値シミュレーション研究は不可欠なものとなっている。

これまでの当該分野における数値シミュレーション技術は大きく分けて二つの手法が挙げられる。

太陽から超音速で吹き流れるプラズマ流である太陽風と地球磁気圏との相互作用は、さまざまな自然現象をもたらす。その代表例として、太陽表面爆発現象（フレア^[2]）に伴う、磁気嵐^[3]、オーロラ、熱圏^[4]・電離圏擾乱が挙げられる。これら自然現象は古代より人類を惹きつけてきた一方、今後の宇宙空間利用の拡大の際には障害となりうるものである。したがって、これら自然現象を理解することは地球物理学的興味のみならず、人類の宇宙進出によるさらなる発展をもたらすためにも、喫緊の課題となっている。本課題にあたっては太陽から地球大気までを含むマクロな現象を取り扱うため、プラズマを流体近似した電磁流体（MHD^[5]）シミュレーションの開発が1980年代より始まっている。我が国の研究者も本分野において先導的な役割を果たしてきており、その結果、地球近傍における宇宙空間のプラズマ現象や熱圏・電離圏擾乱を予測することを目指した、**宇宙天気予報**という新たな学問分野の創成につながっている。（JST-CRESTの研究領域「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」の研究課題、科学研究費補助金「学術創成研究費」の採択課題として進行中。）

一方、宇宙空間における無衝突プラズマ素過程を理解するため、プラズマ粒子の運動と電磁場を自己無撞着に解く、粒子（PIC^[6]）シミュレーションが1970年代より活発に行われてきた。その研究対象は衝撃波^[7]、磁気再結合^[8]、静電孤立波^[9]に代表されるように、ミクロなスケールを対象としたプラズマ物理としての側面を持ち、人工衛星の「その場」観測による実証との相補的研究手法により理論的理解が進んできた。そして、その理解は核融

合や天文分野での現象の理解に大きな役割を果たしてきた。PICシミュレーション技術においても、我が国では独自に開発が行われてきており、本分野において世界的にトップクラスの業績を上げてきている。また近年では、これまで蓄積された日本独自のPICシミュレーション技術の応用は、理学的対象から工学的対象に広がってきており、宇宙空間における人工衛星周りの環境再現や、新しい惑星間宇宙航行システムである磁気プラズマセイルの基本原則や推力性能の評価にも適用が始まっている。(JST-CRESTの研究領域「マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション」の研究課題として平成20年度より開始。)

以上のように、両手法は1970~80年代より独立に発展を遂げてきており、我が国においても最先端の技術開発がそれぞれ行われてきた。しかしながら近年では、上記自然現象の予測には、太陽から地球大気に至るまでのさまざまな物理素過程を理解し、磁気圏・電離圏・大気圏といった異なる物理が支配する領域間の結合を正確に記述しなくては実現不可能であるとの認識が深まりつつある。それは、これまでのマクロな視点に基づくMHD近似では正確に取り扱うことができなかつたプラズマ素過程が重要であることを意味し、各領域を記述する独立した物理モデルだけでは理解できないことを意味する。またそれぞれのプラズマ素過程では、マクロとミクروسケールでの現象が密接に関連した、マルチスケール現象が本質であると認識されてきているため、**マルチスケール・マルチフィジックス現象**の理解を抜きにしては宇宙天気予報を実現することはできない。

新たな数値シミュレーション科学の必要性が高まるこの潮流の中で、本分科会の高い数値シミュレーション技術を持つ研究者で構成された組織として、若手研究者主導のもと設立された。豊富な大型計算機の利用経験を持つ各々が、数値シミュレーション技術・数値モデルの情報共有の場として、太陽地球惑星系科学の真の理解を目的に活動している。特に近年では、マルチスケール・マルチフィジックス現象の理解のため、PIC法をマクロスケールまで拡大可能な、適合細分化格子 (AMR^[10]) 法を取り入れたAMR-PICシミュレーションや、MHDコードとPICコードを同時に実行する連結階層シミュレーション^[11]、PICシミュレーションに替わる新たな手法として近年注目を浴びるブラソフ・シミュレーション^[12]などの先駆的な手法の議論が活発に行われている。また、大気圏-電離圏や、電離圏-磁気圏といった異なる物理が支配する領域をシームレスにつなげる手法やルール作成の議論も行われている。

このように、太陽地球惑星系科学の数値シミュレーション研究を30年にもわたりリードしてきた当該分野が、本分科会での活動により更なる革新的な数値シミュレーション技術を開拓することによって、次世代の数値シミュレーション研究においても我が国の研究者集団が先導的な役割を果たすことができる。太陽地球惑星系科学においては、名古屋大学太陽地球環境研究所、京都大学生存圏研究所、宇宙航空研究開発機構、情報通信研究機構などが数値シミュレーションによる研究において中核的な役割を果たしており、これらの中核研究機関が以上の研究活動を支援している。

太陽地球惑星系科学分野では、最先端の数値シミュレーション技術を有する若手研究者を継続的に輩出するために、1982年より宇宙シミュレーション国際学校（ISSS）を海外の研究者らと国際共同で開催しており、これまでに行われた8回のISSSのうち、半数の4回が日本で開催されている。また、ACT-JSTの支援を受けて国内のシミュレーション学校も開催するなど、太陽地球惑星系科学分野は人材育成の面でも国内外をリードしてきた。本分科会活動を通じて、今後も世界トップクラスの数値シミュレーション技術を有する優秀な若手研究者を輩出できると考える。

本意見書は、太陽地球惑星系科学分野における若手の数値シミュレーション研究者が主体となり、該当分野における数値シミュレーション研究者の意見を整理したものである。以降では、本分科会の研究対象領域の内、特に最先端で特定高速電子計算機の演算能力を必要とする研究課題について述べたい。

2. 2. 2 特定高速電子計算機を必要とする研究課題

人類の持続的発展を支える宇宙利用の基盤構築

人類が宇宙空間へ活動領域を広げた結果、現在では気象、通信、測位、災害監視、など、実用的に大切な役割を果たす人工衛星が多数軌道上で活動し、日常生活に欠かせない要素となっている。しかし、これらの人工衛星は一度宇宙空間へ送り出されると、故障に対してほとんどの場合は修理がきかず、機能が停止することによる日常生活への影響、損害費用は無視できない。太陽フレアに起因する磁気嵐時には、放射線帯^[13]の高エネルギー粒子フラックスの増大などによる人工衛星本体への深刻な障害発生、電離層の擾乱による通信障害、熱圏擾乱による低高度衛星の軌道変動、などの様々な障害が発生する。また、大規模な太陽フレアが起こると、国際宇宙ステーションやスペースシャトルで人間が宇宙空間で活動する際に、宇宙飛行士の被爆にもつながり健康への影響が危惧される。このような磁気嵐時に発生が予想される様々な障害を回避するために、宇宙空間の擾乱発生とその規模を予測することを目標に**宇宙天気予報**の研究が行われている。現状の宇宙天気予報サービス^[14]でも、太陽活動に応じて人工衛星や宇宙飛行士の安全を確保するために一定の障害回避オペレーションがなされているが、そのオペレーションによる人工衛星の提供するサービスの休止期間をできるだけ短期間にするためにも、より精密な予報が必要とされている。

宇宙天気予報を目指した数値計算予報モデルの研究開発は、米国では数値モデルを統合する研究が活発であり、いくつかの機関で、太陽風から磁気圏、電離圏、熱圏まで統合した数値モデルが構築され、盛んに研究がなされている。これらは基本的には領域毎の独立した数値モデルを1つのフレームワークの上で連結して実行する統合モデルである。一方、国内でも宇宙天気予報を目指した数値モデルの開発がいくつかの研究グループで行われており、太陽表面から磁気圏・電離圏・大気圏（地表から熱圏）までを統合し、シミュレーションすることが目標とされている。国内の研究は、磁気圏・電離圏のリアルタイム計算

や、観測データを初期値に組み込む手法が特徴的である。例えば情報通信研究機構では、世界に先駆けてリアルタイム宇宙天気電磁流体 (MHD) シミュレーションを実行しており、人工衛星で受信した太陽風データを元に、太陽風が実際に地球磁気圏に到達する以前に磁気圏でどのような擾乱がおこるか予測計算結果を公表している。他にも、国内においては、米国の領域間結合モデルでは実現されていない、太陽風から地表までを連続的に解く現実的な結合モデルの取り組みが進められており、磁気嵐時において極域が加熱される現象が、大気大循環^[15]を通して中低緯度領域へ伝播し、電離圏に擾乱を引き起こす過程などが研究されている。また、工学的な観点で人工衛星とその周辺に存在するプラズマの相互作用を計算することで障害の原因を探り、人工衛星の設計過程に数値シミュレーションを応用する研究も始まっており、これも広い意味の宇宙天気予報の研究の一部をなしている。

これまでの取り組みは、地球周辺空間を構成する各領域における空間規模、解く物理の違いなどにより、基本的には領域毎の計算モデル（経験モデルも含む）を緩やかに統合する試みであり、各モデルの境界条件を通してのみ物理パラメータの受け渡しがなされていることが多い。しかし、近年の認識では各領域が密に結合した、**マルチフィジックス現象**が重要であるとの認識がなされている。特定高速電子計算機での宇宙天気予報研究は、**領域間をシームレスに統合し、より少ない構成モデルで統一的なシミュレーションを行なう**こと、同時に物理モデルの精密化を行うこと、が検討されている。具体的には、プラズマ粒子を単一流体として近似する MHD シミュレーションよりも精密にプラズマ粒子の物理過程を記述することができる粒子流体混成（ハイブリッド）シミュレーション^[16]を、太陽風から地球磁気圏、電離圏、大気圏までの結合モデルに世界で初めて適用する。それにより、領域毎の結合がシームレスに行われる次世代宇宙天気予報グローバルシミュレーションモデルの実現が期待されている。これらの計算によって、これまでの統合モデルでは表現できなかった物理過程を組み込むことができる。たとえば、電離圏において電波障害を引き起こすプラズマバブル現象の計算には、1km 未満の高水平分解能が必要である。これらの計算は特定高速電子計算機によって初めて計算可能なものである。実現すれば宇宙天気予報研究にとって極めて画期的な成果になると考えられている。

はじめに述べたように、宇宙天気において様々な擾乱を引き起こす原因は太陽にある。その活動を観測し、その影響が地球周辺に達するできうる限り前に精確な予報を出し、宇宙空間で活動する人間、人工衛星などを危機的状況から回避させること、衛星が地上に行っているサービスへの影響を最小限に抑えることが宇宙天気予報研究の最大の使命である。そのためにより精確な数値計算モデルの構築と高速な計算機が必要とされている。ここで挙げたシームレスな磁気圏-電離圏-大気圏結合のグローバルシミュレーションモデルの実現は、まさにこのために必要とされており、特定高速電子計算機での実現、シミュレーション結果の理解による宇宙天気研究の進展が期待されている。

このような宇宙天気研究を基にした宇宙利用の基盤構築が実現されるには、後述のようなマイクロ機構や個々のプラズマ粒子のダイナミックな挙動を再現できるシミュレーション

手法から得られるプラズマ素過程の普遍的な理解が不可欠である。例えば、はじめに述べた高エネルギー粒子の集合体である放射線帯の生成メカニズムにはプラズマのミクロな現象が大きな役割を占めていると考えられており、その理解無しには安全な宇宙利用の基盤構築は難しい。

太陽活動に応じて大きく変動する太陽-地球惑星系の理解

太陽放射と太陽風の影響のもとで変動する地球惑星環境は、「人類が唯一“その場”で観測可能な場所」における宇宙空間プラズマや大気の観測的研究と、理論・数値シミュレーション研究との連携によって理解が進められてきた。我が国は、2007年の月探査衛星^[17]の打ち上げ成功に引き続き、今後、金星探査計画^[18]（2010年打上）や国際協力による水星探査計画^[19]（2013年打上）を予定しており、木星や火星の探査計画も検討を進めている。今後10～20年間で、太陽活動の影響下で変動する惑星環境の多様なパラメータ領域における理解が、飛躍的に進展していくことが期待される。

一方で、近年の太陽系外の惑星（系外惑星^[20]）の発見ラッシュに伴い、太陽系外における惑星環境にも注目が集まりつつある。地球外生命を探求すべく、大型の宇宙望遠鏡・干渉計^[21]によって、地球型の系外惑星の大気組成（オゾンやメタンなどの生命の兆候を示す組成を含む）を直接測定する計画が世界的に進められている。複雑な大気組成や、多様な固有磁場強度を持つ系外惑星が、中心星の放射や太陽風（恒星風）によってどのような影響を受けるかは難解な問題であるため、本分野が太陽系の地球惑星の観測・理論・シミュレーション研究によって長年培ってきた知見の活用が期待されている。

中心星の活動度は、例えば、太陽に似たG型主系列星^[22]においては、年齢によって100倍以上変動することが知られている（若い星の太陽風（恒星風）強度は現在の太陽の約100倍、フレアなどの擾乱現象の頻度は1000～10000倍）。地球や惑星が辿った進化の歴史を知り、生命を育む惑星の成立条件を知るといった興味からも、若くて活動度の高い中心星に特に注目が集まっている。若くて活発な中心星の影響を調べるためには、強烈で激しく変動する太陽風（恒星風）構造を数値シミュレーションで再現した上で、惑星大気や電磁圏への影響を調べる必要がある。このような研究においては、太陽系の「その場」観測で得た知見を基に構築した「太陽-地球惑星系のシミュレーション」が基礎ツールとなる。

特定高速電子計算機利用における太陽-地球惑星系シミュレーションのゴールは、「**太陽系全体の流体シミュレーションの実現**」、すなわち、太陽から各惑星の電磁圏までを解く電磁流体（MHD）シミュレーションと、各惑星の大気圏を解く中性流体シミュレーションを連続的に繋げることである。各要素領域のシミュレーションは、宇宙天気シミュレーション研究で部分的に実績を挙げており、特定高速電子計算機における全体シミュレーションの実現は十分可能と考える。「人類による直接的な検証が可能な宇宙としての太陽系全体を数値空間上で実験する」という本研究課題は、特定高速電子計算機のグランドチャレンジ課題として相応しい。そしてこのゴールは、同時に新たな研究領域のスタートでもある。2010

年代以降に加速していく系外惑星大気環境の研究や、地球や惑星が辿った進化の歴史を探る研究の基礎となる本研究課題の波及効果は大きい。

太陽活動に応じて変動する地球惑星環境を理解し、さらに太陽系外へと適用していくためには、宇宙空間プラズマの素過程の理解が不可欠である。例えば、プラズマ波動による惑星電離大気の加速や加熱の効率は、惑星の大気進化を決定する最重要パラメータの一つであるが、その素過程の根源的理解を得ることによって初めて太陽系や太陽系外の「その場」観測が及ばない世界への適用が可能となる。宇宙空間プラズマの素過程の研究課題については、以下の宇宙空間プラズマ科学の普遍的・根源的理解で述べる。

宇宙空間プラズマ科学の普遍的・根源的理解

1990年代の国際的な地球磁気圏の衛星共同観測以降、地球周辺における宇宙空間の精密な観測データが取得されるようになったことで、地球磁気圏とその周辺に発生する諸現象の理解は飛躍的に進んだ。近年、天体物理現象においても磁場効果の重要性に対する認識が広まってきているが、中でも衝撃波、磁気再結合、乱流現象^[23]、それらに伴う高エネルギー粒子生成^[24]、拡散・輸送過程^[25]は、まさに地球周辺の宇宙空間でも繰り広げられている現象である。こうして、従来の地球物理学的な視点に加えて、**地球周辺の宇宙空間を「人類が唯一 “その場” で何が起きているかを観測可能な場所」と捉え**、宇宙空間プラズマ科学の普遍的な理解を目指そうという問題意識が高まっている。そのような中で、数値シミュレーション研究による新たな物理の提言は、宇宙科学衛星計画を策定する上で大きな役割を果たしてきており、予想外な観測結果は数値シミュレーション研究の促進を刺激するなど、シミュレーション・観測がお互い刺激しあう良い関係を築いている。

最近の理解では、プラズマが流体的に振る舞うマクロな電磁流体 (MHD) スケールから、プラズマを構成するイオンや電子のミクロな運動論的な効果が重要なスケールまで、6~7桁程度の時空間スケールに渡って相互に物理的に結合する、**マルチスケール現象**が宇宙空間ダイナミクスにおいて本質的な役割を果たしていると考えられている。このため、最も小さく・速い時間スケールを持つ電子運動論効果^[26]を正確に扱いつつ、全体としてはMHDスケールまでを計算することが望まれる。電子の運動論効果を取り入れる数値シミュレーションとして、粒子 (PIC) シミュレーションによる計算が広く行われているが、現状では512³規模の格子サイズで電子運動論-イオン運動論の結合が扱える程度である。特定高速電子計算機で10¹⁵ (ペタ) バイトクラスの主記憶容量が使えるのであれば、5120³規模の計算が行えるようになり、世界で初めて電子運動論—イオン運動論—MHDのスケール間結合^[27]を含んだ宇宙空間プラズマ素過程のダイナミクスを扱えるようになる。2017年頃には日欧協力で宇宙プラズマのスケール間結合を明らかにすることを目的とした多国籍編隊飛行科学衛星^[28]の打ち上げが計画されており、特定高速電子計算機による数値シミュレーション研究と連携することで、宇宙空間プラズマ科学の理論・実証的な研究が大きく進展することが期待される。

一方、運動論レベルの物理を含む新しい計算手法として、無衝突プラズマの輸送方程式であるブラソフ方程式を直接解く、ブラソフ・シミュレーションという試みも始まっている。この手法では、空間 3 次元、速度 3 次元の 6 次元位相空間の計算を扱うため、極めて大きな計算リソースを必要とする。特定高速電子計算機では $512^3 \times 64^3$ 程度の計算が可能となり、世界で初めて本格的な 6 次元ブラソフ・シミュレーションを行うことができる。(実空間スケールでは上記の PIC シミュレーションと同程度の規模を扱うことができる。) ブラソフ・シミュレーションでは低ノイズのシミュレーションが実行できるため、特に、粒子加速による非熱的成分^[29]の生成メカニズムや乱流場中における粒子輸送の問題で新しい成果をあげることが期待される。また、ブラソフ・シミュレーションは流体的な手法であるため、柔軟に複雑なシステムを計算することができると考えられており、将来の応用計算に向けて、特定高速電子計算機利用による計算への期待は非常に高い。

以上のように、宇宙プラズマ科学の普遍的・根源的理解をするうえで、数値シミュレーションは科学衛星による観測と併せて不可欠なものとなっている。本課題では**マルチスケール現象**を理解することが喫緊の課題となっており、特定高速電子計算機での実行によりその理解が大きく進むことが期待される。また、得られた成果は今後の宇宙天気・惑星探査研究(前述)のみならず、宇宙線生成メカニズム、パルサー風^[30]におけるエネルギー変換問題^[31]、降着円盤^[32]における角運動量輸送などの天体物理現象に対する解釈を与えるため、幅広い分野に対して波及効果も大きいと考えられる。その理解のための手法として、PIC シミュレーションとブラソフ・シミュレーションを挙げた。前者は粒子の運動を一つ一つ追うため、スカラ型の計算機で十分な性能を得ることが期待される。また、後者は位相空間上での移流方程式を解くため、しばしば流体的な手法が用いられ、ベクトル型の計算機において大きな性能を発揮することが予想される。したがって、本課題を理解するためのシミュレーションを実行するには、スカラ、ベクトル両タイプの計算機の利用が必須である。

3. 五つの基本方針に対する具体的な意見

特定電子計算機施設の共用によって、産学官の研究交流の促進を通じた多様な知識の融合が図れることに我々も期待したい。当該施設の能力を最大限に発揮し、広範な分野の研究開発の飛躍的な進展を実現するためには、その課題選定、使用法、運営体制、事前準備を適切に行うことが重要であると考えます。それらを担う組織として、幅広い分野から専門家を集めた**第三者によるワーキンググループ (WG)** を文部科学省の主導の下で立ち上げることを望む。また、当該施設の能力を最大限に発揮するには、**超 (100 万) 並列計算の技術を持った人材の教育が必須**である。同 WG において、若手人材教育・登用についてぜひとも議論していただきたい。以下では、個別方針に対する意見を述べる。

第1：特定高速電子計算機施設の共用の促進に関する基本的な方向について

国家プロジェクトである特定高速電子計算機は、様々な研究分野において大規模数値計算・数値実験を行う共通・汎用基盤であり、本方針に同意する。利用分野の選定に関しては、総合科学技術会議の第3期科学技術基本計画が定めた重点推進4分野を重点化するのはもちろんであるが、推進4分野やそれ以外の科学研究分野にも幅広く特定高速電子計算機利用の機会が提供されることを希望する。国家的共用設備利用機会の均等は、我が国の科学技術力の底上げにもつながり、また、研究者の意欲を向上させ、ひいては広い意味での我が国の科学教育、高度人材育成、幅広い科学理解増進にもつながるものと信じている。

重点推進4分野は、我が国の将来を支える重要な分野から構成されており、特定高速電子計算機の利用によって、より高い成果が期待される分野である。しかし、推進分野には選ばれていないが、人類のさらなる発展のきっかけをもたらす未知領域の研究分野においても、国際的な競争力が非常に高く、若手研究者・技術者の育成にも積極的な研究グループが数多く存在している。それらが特定高速電子計算機を活用して世界的な成果を継続的に挙げることで、それぞれの分野における強いリーダーシップを発揮することが可能であり、その結果として我が国の科学技術に大きなフィードバックをもたらすものと考えられる。

第2：特定高速電子計算機施設の整備に関する事項について

経費の効率化を図りつつ優れた成果の創出が継続的に行われるには、まず、理化学研究所が、特定高速電子計算機の計算機アーキテクチャや利用条件・制限、ネットワーク環境、プレ処理・ポスト処理環境などを早期に決定し、それらの情報を詳細に、かつ積極的に公開することが重要と考える。本プロジェクトは地球シミュレータをはるかに凌ぐ巨大プロジェクトであり、既存のプログラムは特定高速電子計算機に特化したチューニングが必要になると思われる。利用希望者ができるだけ早い段階から準備を開始することにより、プロジェクト期間中により大きな成果を挙げるためにも、文部科学省が本プロジェクトの事

前準備に対して積極的に奨励・支援していく体制が重要と考える。特定高速電子計算機の情報 の 早期開示および事前準備に対する奨励により、特定高速電子計算機の利用を希望する利用者グループが事前準備を早い段階から行われるようになり、当該施設の効率的な利用に繋がるもの と 考える。

第3：特定高速電子計算機施設の施設利用研究に関する事項について

1. 実施すべき施設利用研究に関して

施設利用研究テーマについて、営利研究や実社会での有用性の高い研究に限定されるべきではなく、実用化に時間が掛かかっても基礎科学の発展が期待できるテーマであれば広く受け付ける体制を希望する。たとえ重点化されている分野でも、既存の小型コンピュータで計算できる研究テーマについては採択するべきではなく、逆に、超大規模計算により格段のブレークスルーがもたらされる可能性のある研究や、特定高速電子計算機を用いないと実行できない研究については、基礎研究テーマであっても、新規性がどこにあり大規模計算によってどのような分野でどのような発展・進展が期待できるか、また、国際的な競争力があるかどうかという視点で評価されることを希望する。また、特定高速電子計算機に対して、十分にチューニングされた計算効率のよいプログラムを有する課題が優先されることを希望する。

申請の段階で実用研究と基礎研究を区別し、それぞれ別の審査基準、選定委員会を設け、また、計算リソース配分も実用研究に偏ることなく均等に配分することによって、より公平かつ透明性の高い施設利用研究の選定がなされるもの と 考える。更に、選定委員会メンバーには、重点課題分野からのみならず幅広い分野の専門家が含まれていることが望ましい。

2. 適切な支援体制の構築に関して

特定高速電子計算機の効率的な使用に関しては、まず、計算機アーキテクチャや利用条件・制限、ネットワーク環境、プレ処理・ポスト処理環境などを早期に決定し、それらの情報の積極的な公開を希望する。これにより、利用者・研究者が過去に構築してきたプログラムや研究環境を特定高速電子計算機用に早期にチューニングすることができる。また、特定高速電子計算機と同じアーキテクチャのテスト機を導入し、利用者が早期からプログラムのテストおよび実行を行える環境を整えることが重要である と 考える。

支援体制に関しては、性能向上についてのアドバイスを 行えるチューニングスタッフが当該施設に常駐し、ジョブ投入の並列化性能要求をクリアするための積極的なアドバイザーとなっ て いただくことを希望する。また、並列化・超並列化された汎用性の高い計算ライブラリが十分に整備されており、共有化されているライブラリの利用方法が十分に指導される環境も重要である。汎用ライブラリを各研究グループが独自に開発・チューニングを

行うのは非常に時間がかかり、本来の目的である大規模計算にまで到達しにくい。このため、当該施設が積極的に同じアーキテクチャのテスト機を用いたプログラミング講習会を行うことを希望する。

また、本プロジェクトは地球シミュレータ以上の巨大プロジェクトであり、全ての利用グループが専任担当者を用意できるとは限らない。たとえば、可視化処理担当者を見つけることが出来ないチームには、当該施設が一部協力したり、別の大学の可視化専門家を紹介したりするなど、特定の作業担当についてチームを支援する仕組みが必要である。このためには、当該施設が分野間交流の機会を作る必要があると考える。たとえば、「日本版 SC (Super Computing)」を開催して計算機科学、計算科学、ネットワーク、民間企業の関係者を一堂に集めることや、関係者の情報を収集しデータベース化しておくことが重要であると考えられる。

3. 施設利用研究の成果の取り扱い等に関して

国家プロジェクトである特定高速電子計算機によって得られた研究の成果は、国家・国民の財産であるというポリシーのもと、原則的に一般公開されることが望ましい。しかし、実用研究と基礎研究では研究費の規模のみならず、計算結果や研究成果の取り扱いにも違いがあるため、利用料金に関して別の基準が設定されることを希望する。例えば、成果を公開する研究に関しては利用料金を下げるなどの柔軟な対応を検討願う。

次に、文部科学省は、プロジェクト前（つまり今年度、来年度）の時点から、本運用に必要な基礎技術開発のための研究助成・補助をさらに積極的に立ち上げていただきたい。具体的には、科学研究費補助金などに特定高速電子計算機に関する研究であることを明示した細目を設け、多岐にわたる特定高速電子計算機利用研究テーマにおいて競争的資金を導入し、基礎研究分野でも競争的資金から利用料金を支払える体制を希望する。

4. 理解増進活動の実施に関して

特定高速電子計算機による成果については、国家プロジェクトの成果であるという認識のもと、他の研究者や国民が利用できる形での公開を義務付けることが必要である。これは、国家プロジェクトを遂行するにあたり、理解増進の点からも重要なポリシーであると考えられる。そのためには、申請段階で出力結果をオープンにする計画を立てることが重要である。

研究成果の公開や理解増進に対しては、当該施設において積極的に支援する体制が構築されることを希望する。インターネットやバーチャルリアリティーインフラを通じて計算結果を国民に公開する際や研究成果を国民に発表する際に、バーチャルリアリティー室や広報室を利用し、また、計算結果を国民に公開する際に適切な助言を与えられる広報専門のアドバイザーや可視化支援者が当該施設に常駐していることが望ましい。

5. 研究機能等の構築に関して

人材育成に関して、特定高速電子計算機プロジェクトの準備段階において、有能な若手研究者を育てるための方策が必要と考える。研究者の中には大学の業務により研究に専念できる時間が少ない場合もある。したがって、若手教員やポスドクなどが本プロジェクトに専任できるよう、教育と実績のある既存の組織における積極的な雇用の推奨を願う。

さらに若手の学生（修士課程・博士課程）には、「夢」を持たせることと、「将来の雇用」を期待させることが重要であり、狭い視野での研究テーマではなく、特定高速電子計算機には可能性が広くあることを理解できるよう情報を提供し、本プロジェクトに関わることによって雇用・就職の道がより大きく拓かれるようになることを啓蒙することが必要であると考える。

また、当該施設に、端末を利用しながら実習するための実践的な演習室を準備することを検討願う。これまでに構築したツールなどにより各研究者に適したデータ処理の演習ができるよう、複数の OS と標準的なデータ処理・可視化環境が用意されており、また、少数ノードの並列計算機が利用できる環境にあることが理想である。人材育成にはシミュレーションスクールなどの高度計算機科学教育インフラの重要性を強く認識している。特定高速電子計算機と同様のアーキテクチャを持つ計算機を用いて実習を行う機会が提供されるような実践的なシミュレーションスクールの実施場所としても、当該施設が魅力のある場所となることを期待する。

第4：特定高速電子計算機施設の運営に関する事項

高速ネットワークを経由した特定高速電子計算機へのアクセスは、利用者機会均等の視点からも、また、効率的な成果の達成の視点からも重要である。本プロジェクトでは情報学研究所などのネットワーク専門組織の支援を受けて、安全な運用ができるネットワークサービスを希望する。並行して、セキュリティーへの十分な配慮も検討願う。

ただ、本プロジェクトの利用者全員が、10Gbps 以上のネットワークインフラ環境に居ることは稀である。特に、2010 年頃において SINET に接続されていない大学の生活回線で予想されるのは、依然として 100M ~ 1Gbps 程度のネットワークであり、当該施設から巨大なデータを転送することは不可能である。また、SINET3 などのバックボーンで 10~40Gbps の高速ネットワークが実現できる環境であっても、実際のスループットが 10Gbps には達しない。（ほとんどの研究組織がファイアウォールを導入しており、実行速度が 10 分の 1 程度に落ちるためである。）したがって、情報学研究所などとの協力により、ネットワークに関する情報や対応策をあらかじめ利用希望研究機関に通達し、特定高速電子計算機の敷設と並行してネットワークインフラの準備を積極的に奨励願う。例えば、利用を希望する機関に対しての特別支援（例えばモデルケースとしての高速なセキュリティールータ購入の補助金など）なども有効であると考えられる。

第5：その他特定高速電子計算機施設の共用の促進に際し配慮すべき事項

特定高速電子計算機運用が始まってからコード開発やプレ処理、ポスト処理環境を開発していたのでは、実際に特定高速電子計算機を利用して結果を出すまでに数年かかってしまう。特定高速電子計算機利用希望者は、この数年間の間に本プロジェクトを見据えた準備を始めなければならないため、理化学研究所および文部科学省は、本プロジェクトの準備を積極的に奨励し、それをサポートする体制を構築願う。特に、旧帝国大学の大型計算機センター、旧国立研究所や全国共同利用施設のスーパーコンピュータはここ数年の間に更新されることを踏まえ、特定高速電子計算機の詳細なアーキテクチャをできるだけ早く決定し、次期スーパーコンピュータに特定高速電子計算機と同様のアーキテクチャを採用することを積極的に奨励することを希望する。また、国内の共同利用スーパーコンピュータにおいて、特定高速電子計算機を意識した研究課題を積極的に奨励することを希望する。また、本プロジェクトを成功に導くには、当該施設を用いた研究に専念できるような若手研究者の存在が不可欠である。そのために、各研究分野において実績があり教育が可能な既存の研究機関における若手研究者の積極的な雇用の支援体制の構築を検討願う。各研究分野における中核研究機関の研究体制を強化することで、特定高速計算機の共用に対して幅広い分野に対するサポートを充実させることができると考える。

付録 用語集

本意見書の文章中で使用されている技術用語・専門用語については、本用語集を参照されたい。各項目の番号は、本文中の各用語に付記された番号に対応している。

[1] 太陽風 (恒星風)

太陽から惑星間空間に向けて常時吹き出すプラズマの超音速流れ。地球公転軌道においては、平均速度約450km/s、粒子数約5/cm³、温度は10万度以上に達する。太陽以外の多くの恒星でも「恒星風」により、大量の恒星外層部のガスが放出される。

[2] フレア

太陽や恒星の大気中において発生するプラズマ爆発現象。フレアの発生に伴いX線や高エネルギー粒子が放出される。

[3] 磁気嵐

太陽風の擾乱が原因となり、地球周辺に電流が流れることで起こる地球磁場の擾乱。磁気嵐に伴って、オーロラが発生したり、無線通信が障害を受けたりする。

[4] 熱圏

高度約 90km~600km の高温中性大気領域を熱圏と呼ぶ。極域熱圏ではオーロラの発生にともなって複雑な温度変化、大気密度変化といった擾乱が起こることが知られている。

[5] 電磁流体 (MHD) シミュレーション

電子とイオンから成るプラズマをひとつの流体と近似し、プラズマの振る舞いを追う手法。磁気圏の構造、プラズマの対流などマクロな現象を考える際に使用される。

[6] PIC (Particle-In-Cell) シミュレーション

プラズマを構成するそれぞれの粒子 (イオン・電子) の運動論効果を含む代表的な数値シミュレーション。運動方程式を計算することで粒子の運動を一つ一つ追い、電磁場の発展はマクスウェル方程式を差分化して計算する。

[7] 衝撃波

媒質中を伝播する物理量の不連続変化。宇宙プラズマ中でも発生することが知られており、例えば、超音速の太陽風が惑星にぶつかることで惑星の太陽側に船首波状の不連続面 (bow shock) が形成される。

[8] 磁気再結合（磁気リコネクション）

反平行同士の磁力線が繋ぎ変わることで起こるプラズマ特有の爆発現象。蓄積された磁気エネルギーが瞬間的に解放され、熱・運動エネルギーへ変換される。太陽のフレア爆発や、爆発的なオーロラ発光（オーロラ・サブストーム）を引き起こす原因と考えられている。

[9] 静電孤立波

衝撃波面や磁気再結合領域の近傍で観測される電子スケールの非線形波。その実体は静電的なマイクロ過程の結果、安定的に捕捉された電子によるポテンシャル構造である事が、数値シミュレーションおよび理論によって確かめられている。

[10] 適合細分化格子（Adaptive Mesh Refinement: AMR）法

シミュレーション中で推移する物理現象の空間スケールに対して適切となるよう、グリッドの大きさを動的に細分化するシミュレーション技法。細かく解くべき領域だけ選択的に空間分解能を上げることで、効率的なシミュレーションが可能となる。

[11] 連結階層シミュレーション

異なる時空間スケールで進行する物理現象間の相互作用を、異なる方程式系を用いたシミュレーションを有機的に組み合わせながら解き進める手法。例えば、マクロスケールのシミュレーションを実行しつつ、必要に応じてミクロスケールのシミュレーションを発動し、その結果をマクロな物理量に反映させることなどが挙げられる。スケール間結合を取り扱う有効な手法の一つとして、様々な物理過程への応用が検討されている。

[12] ブラソフ・シミュレーション

プラズマを構成するそれぞれの粒子（イオン・電子）の運動論効果を含む新しい数値シミュレーション。無衝突プラズマの輸送方程式であるブラソフ方程式を直接計算する。6次元位相空間の計算を扱うので PIC シミュレーションに比べ計算負荷が大きいのが、極めて低ノイズのシミュレーションが実行できる。

[13] 放射線帯

相対論的な高エネルギーを持つ荷電粒子（電子や水素イオンなど）が地球磁場によって捕捉されている領域で、地球周辺をリング状に取り巻くように分布している。そこを通る衛星の深部まで帯電が引き起こされ、宇宙飛行士の被爆が懸念される領域。

[14] 宇宙天気予報サービス

太陽活動に伴う宇宙環境の変化を地上の天気になぞらえ宇宙天気と呼び、観測や数値計算によってその予報をし、情報を公開するサービス。全世界で 11 カ国がサービスを行ってお

り、日本では情報通信研究機構が予報業務を担当している。

[15] 大気大循環

赤道と極域での大気の温度差によって生じる全地球規模の対流。

[16] 粒子流体混成（ハイブリッド）シミュレーション

MHDシミュレーションのようにプラズマを流体だけに近似するのではなく、イオンは粒子、電子は流体としてプラズマを記述する手法。MHDシミュレーションでは見ることのできない、イオンの粒子的振る舞いを表現できる。

[17] 月探査衛星

月周回衛星「かぐや（SELENE：SELenological and ENgineering Explorer）」。2007年9月14日10時31分（日本時間）H-IIAロケット13号機により、種子島宇宙センターから打ち上げ。月の起源と進化の解明と共に、プラズマ、電磁場、高エネルギー粒子などの月周辺の環境計測を行う。

[18] 金星探査計画

金星探査機「PLANET-C」による探査計画。ハレー彗星探査PLANET-A（1985年）と火星探査PLANET-B（1998年）に続く、日本で3番目の惑星探査計画。2010年度H-IIAロケットにより、種子島宇宙センターから打ち上げ予定。金星の大気圏深部の運動などの観測を行う。

[19] 水星探査計画

日欧国際水星探査計画「BepiColombo（ベピ・コロombo）」。水星表面探査機（MPO：Mercury Planetary Orbiter）と水星磁気圏探査機（MMO：Mercury Magnetospheric Orbiter）の2機による水星の磁場・磁気圏・内部・表層の総合解明を目指す大型ミッション。2013年ギアナ宇宙センター（フランス領ギアナ）から打ち上げ予定。ISAS（宇宙科学研究本部）/JAXAがMMOの開発および運用を担当。

[20] 系外惑星

太陽以外の恒星を公転する惑星。木星級の巨大ガス惑星が恒星の極近傍（0.1天文単位以下）を高速で周回し、強烈な恒星光や恒星風にさらされる「ホット・ジュピター」など特異な惑星系の存在が確認されている。

[21] 宇宙望遠鏡・干渉計

トランジット法（惑星が恒星面を通過するときの減光を観測し惑星を検出する方法）専用

の宇宙望遠鏡COROT (ESA) により、地球サイズの系外惑星を探索中。干渉計 (複数の望遠鏡のデータを干渉させて信号を増幅する装置) を構成する宇宙望遠鏡Kepler (NASA/2008年打ち上げ予定)、TPF (NASA/2014年以降打ち上げ予定)、Darwin (ESA/2015年以降打ち上げ予定) と続く。

[22] G型主系列星

恒星内部で水素の核融合反応が安定に継続する「主系列星」のうち、表面温度が5,000K~6,000Kの黄色い星。温度により、型の名前が異なる。現在の太陽は、G型主系列星の段階。

[23] 乱流現象

極高レイノルズ数である宇宙プラズマ中では乱流は普遍的に存在し、様々な時空スケールにわたってエネルギー輸送や粒子加速に重要な役割を果たしていると考えられている。プラズマの運動は電磁場の影響大きく受けるので中性流体に比べ乱流現象は複雑なものとなる。

[24] 高エネルギー粒子生成

低エネルギーであった粒子がどのように加速され高エネルギーとなるかを知ることは宇宙プラズマの理解において重要である。例えば、オーロラは太陽風中に存在する粒子より10倍以上高いエネルギーの粒子が地球大気に向かって降りこみ大気粒子と衝突することで発光するが、この高エネルギー粒子がどのように生成されるかは未解明である。

[25] 拡散・輸送過程

粒子同士が衝突しない無衝突な宇宙プラズマにおいて、いかにしてプラズマの拡散・輸送が起こるかを知ることは宇宙プラズマ物理における最重要課題の一つである。

[26] 運動論効果

粒子の運動による効果。宇宙プラズマはマクロスケールな視点では流体として近似できるが、ミクロスケールでは粒子の運動の効果が無視できない。例えば、プラズマを構成する粒子は磁場を与えると磁力線に巻きつくような回転運動をするため、この回転半径より小さいスケールの領域では運動論効果が非常に大きくなる。

[27] マルチスケール現象 (スケール間結合)

無衝突・完全電離とみなせる宇宙プラズマにおいては、時空間スケールが異なると卓越する効果が異なるという特異な性質がある。各スケールの効果はそれぞれ別のスケールの効果と相互に影響しあうため、スケール間の結合を正しく理解することが、宇宙プラズマの本質的な理解にとって大切である。

[28] 多国籍編隊飛行科学衛星

多国籍編隊飛行科学衛星「SCOPE/Cross-Scale」(2017年打ち上げ予定)。10機以上の衛星群から構成されるJAXA-ESA共同の地球磁気圏観測ミッション。電子運動論効果を解像できる優れた時空間分解能を持つ親衛星とそれを囲う10機以上の子衛星による同時観測を行うことで、ミクロスケールからマクロスケールまでを同時に観測することが可能となり、スケール間結合の理解に実証的基盤を与えることが期待される。

[29] 非熱的成分

マクスウェル分布から外れた成分。高粘性の流体と違い宇宙プラズマは無衝突であるため非熱的成分が生成されやすい。ブラソフ・シミュレーションは粒子分布を極めて低ノイズに扱えるため、非熱的成分の生成・緩和過程を扱うのに適している。

[30] パルサー風

パルサー(パルス状の電磁波を発生する天体)から外側に向けて流れ出る超相対論的なプラズマ流。パルサー風中には衝撃波が形成されることが知られている。

[31] パルサー風エネルギー変換問題

パルサー近傍では磁場が卓越しているのに対し、衝撃波付近では粒子のエネルギーが卓越していることが知られているが、この間のエネルギー変換メカニズムは未解明である。

[32] 降着円盤

大量のガスやダスト(塵)がブラックホールや原始星などの中心天体の重力によって落下する際に、天体の回りに形成される回転円盤。回転している円盤の中で効率的に角運動量を輸送するメカニズムとして、弱い磁場によるプラズマ不安定(磁気回転性不安定)が注目されている。