

未来を見る 望遠鏡計画

副題：ポスト地球シミュレータ計画

佐藤哲也

核融合科学研究所名誉教授

総合研究大学院大学名誉教授

元地球シミュレータセンター長

兵庫県立大学名誉教授

話の流れ

- プラズマ研究と核融合科学研究所の使命
- 核融合科学研究所の運命を決する組織改革
- 理論・シミュレーション研究センターについて
- シミュレーション研究の“瓢箪から駒” — 新しい発想の誕生
- 科学の進展には自然への愛着と一体感と洞察力が不可欠
- シミュレーション研究の教えるデカルト科学の限界
- シミュレーション科学は新しい科学への扉を開く
- 核融合科学研究所は“未来を見る望遠鏡”を生み出す使命を持つ
- 未来を見る望遠鏡計画への準備状況

・ プラズマ研究の始まり

- ・ ファラデーの気体放電（1838）とオーロラ発光の関係
- ・ 19世紀末頃からオーロラの研究：
 - ・ ビルケランドのTererra実験
 - ・ チャップマンと磁気圏
 - ・ ヘビサイドと電離層

1928年 ラングミュアによる水素プラズマの実験 プラズマ振動を発見

1951年 米国プリンストン大学にプラズマ物理研究所設立

1961年 名古屋大学プラズマ研究所設立

ロケット・人工衛星の開発 — 宇宙科学研究所の設立（1964）

核融合エネルギー開発 — 核融合科学研究所の設立（1989）

・ 核融合科学研究所の設置の基本方針（理念）：

「広く全国の大学等の核融合分野の研究者の英知を結集して、大型ヘリカル装置を建設し、同装置を用いる研究を推進するとともに、核融合に関する理論・シミュレーション研究の中核的役割を果たすことを基本としつつ、自由な発想による研究を進め、広く核融合の研究を総合的に推進する。」

報告書
第1次組織検討委員会
核融合科学研究所

- ◆ 2004年度核融合科学研究所は自然科学研究機構の1研究機関となる。
- 研究組織改革の理由：「研究所におけるシミュレーション研究が近年飛躍的に進歩し新しい段階に入ったと認められ、新しい分野として確立するための新組織創設に関して、組織検討委員会を発足させる」との本島所長の諮問に基づいて検討委員会（三間委員長他19名）が2005年6月に発足。委員会は四回開催された。2006年3月に報告書。
- 報告書の論点1：「理論・シミュレーション研究センター」の最大の学術的成果はマクロ階層とミクロ階層を自己無撞着に解明する「連結階層モデル」の概念を打ち立てたことにある（2004年の外部評価委員会の評価を引用）。
- 報告書の論点2：自然体系を多階層・複合物理過程が複雑に相互作用する「非線形・非平衡・開放系」として捉え、大規模シミュレーション研究で解明する「シミュレーション科学」を構築する組織として「シミュレーション科学センター」を創設すべきである。
- 報告書の論点3：その組織は、大型ヘリカル研究部、特に理論・データ解析研究系と密に協力を図り、共同研究のためのネットワークを構築し、自然科学研究機構の他研究所との学際的な研究協力体制を主導し、さらには、天文学、分子科学、生命科学、社会科学、人文科学にシミュレーション科学を広めることにも努力すべきである。

○研究所運営会議の第2次「組織検討委員会報告書（2009）」

- ・自然科学研究機構第2期目標・中期計画設定（2010～2015年度）
- ・核融合科学研究所の**中期計画**の特記事項：3プロジェクトに集中
 - （1）LHDで核融合炉を見通すプラズマ実現
 - （2）数値試験炉の構築
 - （3）炉設計の高度化
- ・第2次組織改革（2009）：小森所長の下で検討された第2次組織検討委員会（日野委員長他9名の炉工学関連研究者）の検討報告書の提案に従い、本島体制下の第1次組織改革（2007）からたった2年で再び組織の大改革を断行

検討報告書の要点（3回委員会開催）

- （1）全ての研究部門を「ヘリカル研究部」の1研究部に統合
- （2）研究は中期計画の3プロジェクトに集約

●**内容の欺瞞性**：報告書には再編成の妥当性及び検討事項を議論したと書かれているが、議事録には再編の妥当性の議論・検討をした形跡は皆無である。特に、シミュレーション研究についての議論は一切なし。不思議なことに、報告書には、シミュレーション研究部は組織図からは消えている。第1次三間検討委員会の提案との大きな矛盾。



核融合科学研究所の政策的誤算

自然科学研究機構

機構憲章(一部抜粋)

学問の発展は本来、研究者の自由な発想と自律性を基本として達成されるものである。研究者が互いの創造的研究を尊重し、分野を超えて闊達に発言し協力してゆくことによって、社会に貢献しうる新たな学問の創出が可能となるであろう。

我々は、この理念に基づき、宇宙、物質、エネルギー、生命など広範な自然科学分野の研究を担う大学共同利用機関の連携と共同により、自然の理解を一層深め、社会の発展に寄与してゆくことを目指して、本憲章を制定するものである。

理論・シミュレーション研究センターについて

1980年代になり、京都大学ヘリオトロン核融合研究センターと名古屋大学プラズマ研究所を廃止転換し、大型ヘリカル装置計画を推進する新研究所を設立することになったが、京都大学、名古屋大学ともに固有のセンターを大学に残すことを主張した。これに対し、文部省は行政改革の観点から、2つの組織が3つの組織に再編成することは認められないとした。このような状況下で、広島大学の核融合理論研究センター(当時)を廃止転換し、新研究所に合流させるという案が浮上してきた。当時このセンターのシミュレーション研究のリーダーであった佐藤哲也は、センターの研究目標が新研究所にはなじまないとしてこの案に強く反対した。しかしながら、新たな案は生まれず、新研究所創設という大事業のため、最終的にセンターを合流させることに同意した。この同意は、3つの条件、1つは、センターの移る先として、研究所内に、大型ヘリカル研究と独立に研究センターを設立し、その名称にシミュレーションという文字を入れること、2つ目は、広く自由な発想で研究が遂行できること、3つ目として、大型シミュレーション研究を発展させるための必須研究手段である世界最大級のスーパーコンピュータの導入を可能にすること、のもとになされた。
(中略)

理論・シミュレーション研究センターのあり方について検討するため、創設準備室長の委嘱のもとに理論・シミュレーション研究検討グループが組織され、4回にわたって「理論・シミュレーション研究検討会議」が開催された。

その結果は、「核融合科学研究所(仮称)における理論・シミュレーション研究センターのあり方について」中間報告書として、1989(昭和63)年11月にまとめられ、理論・シミュレーション研究センターの設置、1990(平成2)年度後半のスーパーコンピュータの導入、計算機実験室(シミュレーション・ラボ)の設置が提言された。
(研究所創設15周年記念報告書から抜粋)

従来のシミュレーション研究の方法論

- 近代科学（要素還元科学）は階層という概念を作り出した。この階層性を活用し、各階層の特徴ある現象を階層別に取り扱う。
- マクロ空間の特定のシステム（例、実験装置、磁気圏）に着目し、境界面を通し外部とのエネルギー（フラックス）が流出入する開放システムとしてそのダイナミクスを解明する。
- マクロ階層は連続体とみなし、現れる現象は偏微分方程式(例えば、MHD方程式)で記述する。その際、マクロ場の各点においてミクロ階層の特性を媒質定数（マクロ変数に対する応答係数）と仮定してマクロシミュレーションを行う。
- ミクロ階層は無数の粒子群で構成されている。その挙動は粒子の運動方程式で記述する。その際、マクロ階層の状態を境界条件・初期条件として設定した開放系モデルを考案し、ミクロシミュレーションを行う。

理論・シミュレーション研究センターの活動（1989～2002）

- 自然界の特定の領域、あるいは、磁場閉じ込め実験装置内のエネルギー輸送・変換プロセスにおいて現れる不思議な現象（突発現象や異常現象）の因果関係を解明することを第一義的とする。
- **仮説**：閉じたマクロ系ではエネルギー・物質の出入り口がなく、エネルギーのやり取りはマクロな波を介して行われ平衡状態に落ち着く。不思議な現象は外界からのエネルギー（粒子）の流入及びミクロ場とのやり取りによって起きる。
- 外界とのエネルギーやフラックスのやり取りを取り入れた開放系マクロシミュレーション手法の開発を行い、マクロ場の異常性（エネルギーの局所的集中など）の発生源を探る。
- ミクロ場との相互作用を正確に解くには時空のスケールに無限大近い開きがあることから、マクロ場の変動に反応するミクロ場をパラメータ化（媒質係数モデル化）することによってマクロ場の不思議な現象の現象論的解明を図る。
- マクロ場の局所的歪みを境界条件・初期条件として与える開放系粒子シミュレーション方を開発し、ミクロ場の集団現象のもたらすマクロ場への影響を解明。

シミュレーションの絡繰り（例1）

- 例えば、太陽風と磁気圏との相互作用の3次元無衝突MHDシミュレーションでは、太陽風に流された地球の磁力線が太陽側で圧縮され、反太陽側に長く伸ばされたコケシの形をした磁気圏が比較的簡単に再現できる（1990）。太陽風で圧縮された磁気圏境界面と尾部の磁気中性面には電流が発生する。この磁気中性面電流と磁気圏境界面電流は一つの繋がった保存電流系であり、その閉じた電流によって太陽風の中に孤立した地球磁気圏空間を形成する。
- ところが、太陽風に南向きのIMFを持たせると、弱いリコネクションによって太陽側の地球磁場が尾部に運ばれ尾部磁気中性面を強く圧迫し、リコネクションが強くなり、磁気圏サブストームらしき現象が誘発される（1992）。
- この現象は本来無衝突MHDプラズマ（磁気圏）では起こり得ない現象である。
- 原因は、MHD方程式の微分が差分に置き換えられていることにある。差分誤差が磁場の歪点（磁気中性面）において増大し、数値的磁気散逸が増大し、リコネクションが急激に発生するという偽り（絡繰り）の物理現象である。

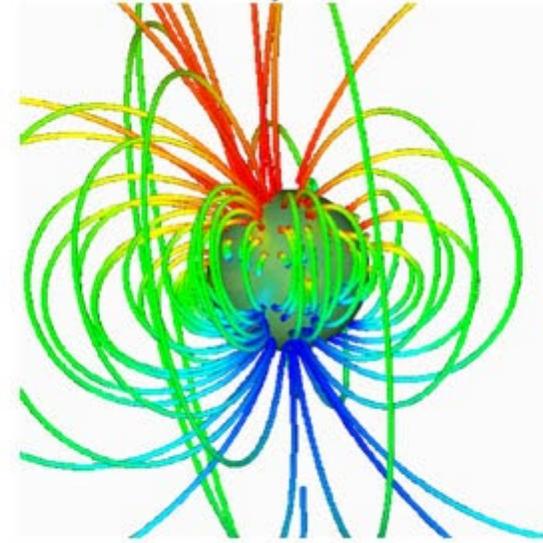
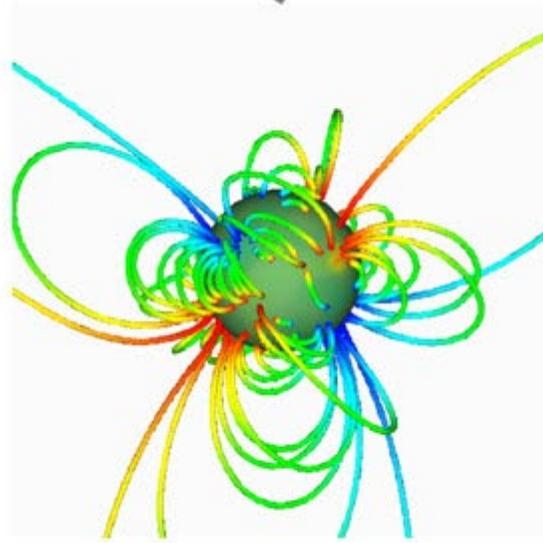
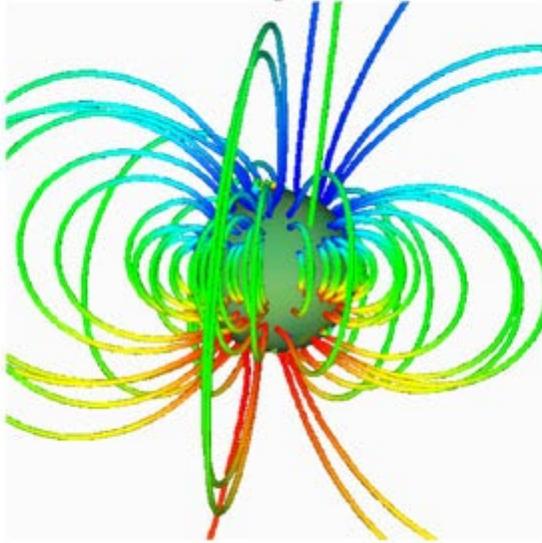
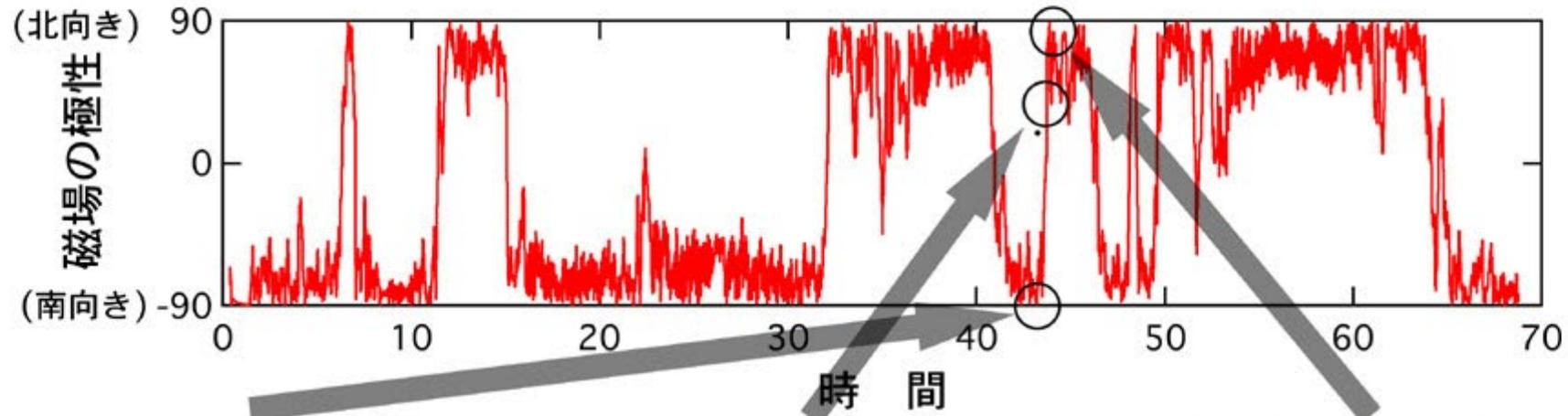


磁場構造の変形に伴うマイクロ場の自己無撞着な取り扱いの必要性！

シミュレーションの絡繰り (例2)

- 地球磁場はMHDダイナモというマクロ場固有の現象と考えられている。
- 地球内部の外核領域を模擬する大規模MHDシミュレーションによってダイナモ効果による双極子磁場の発生に成功 (1993)。
- シミュレーションを長時間続けていると長時間安定していたダイポールの極性が突然逆転するという不可解な現象が現れる。しかも、その逆転は不定期的に幾度となく繰り返えされる (2002)。確かに、南北どちらの極性もMHDダイナモの (双) 安定解であるが、逆転のトリガーになるものは存在しない。結論は、数値誤差以外にトリガーになりうるものは見当たらない。
- 従って、MHDダイナモシミュレーションにおいて、極性の逆転を誘発するには第3の物理的エイジェントの存在が不可欠である。しかも、そのエイジェントは不定期的に突然現れなければならないという大きな謎を持つ。
 - ➡ 第3のエイジェントは何んらかのミクロ不安定性以外に考えられない。

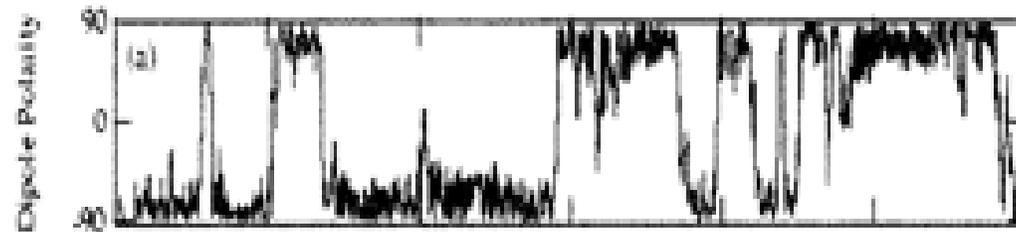
シミュレーション結果



プレート運動観測から得られた4千万年間の地磁気ダイポール地場の逆転現象



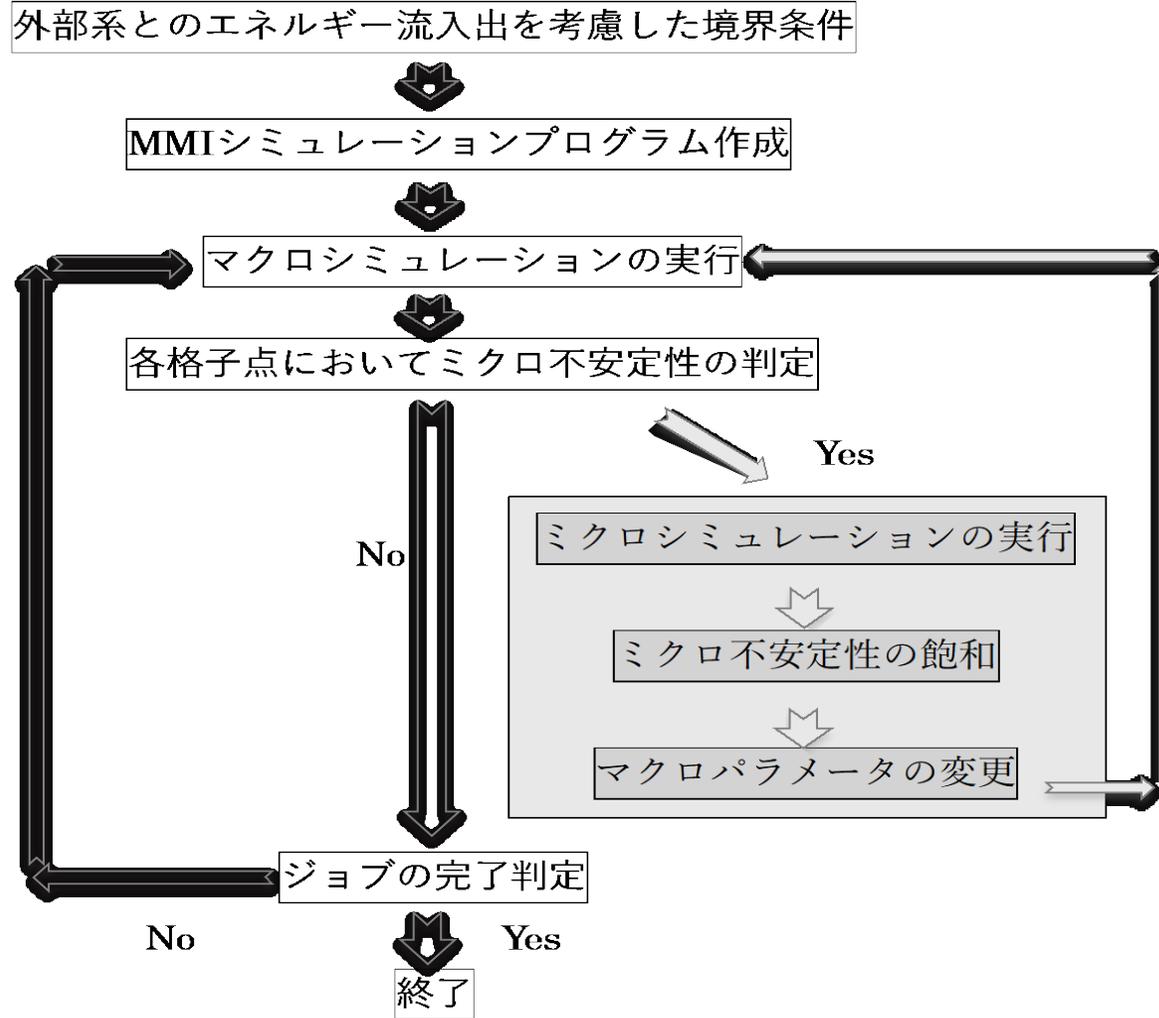
シミュレーションが得た生成ダイポール地場の不規則且つ突然の逆転現象



MMIアルゴリズムの発想は瓢箪から駒

- 平衡状態（静的状態）を常態と考える従来の科学のあり方がマクロ変数に対するミクロ場の反応係数として種々の物質定数を導入した。
- 核融合科学の対象は基本的に開放系で非平衡状態であり、物理的厳密性を要求する科学分野の一つの分野である以上、マクロ場の変動に対するミクロ場の反応をできる限り無撞着に取り入れる方法論の開発が不可欠である。
- 種々のMHDシミュレーション結果はマクロ場のエネルギー集積点での差分誤差の増大が異常現象を引き起こしていると指し示している。この局所点ということからマクロ・ミクロ連結（MMI）アルゴリズムが自然発生的に生まれてくる。

MMIアルゴリズム



従来の
シミュレーション
研究がもたらした
贈り物

- **デカルト科学（要素還元論）の再現性の実証**：自然界を現象界（マクロ階層）と媒質界（ミクロ階層）という階層性概念を活用することによって現象界に現れる現象の物理的理解に大きな役割を果たし、基本法則（因果関係）を積分していくことによって元の現象が再現されることを次々と実証した。
- **未来を見る科学の開拓の重要性の喚起**：従来のシミュレーション研究は自己無撞着にマクロ界とミクロ界を繋ぐMMIアルゴリズム開発の必要性・必然性を喚起してくれた。このMMI開発は、未来に起きる自然災害や地球環境破壊に伴う様々な人工災害を科学的信頼性を持って精度良く予測できるシミュレータ、即ち、“未来を見る望遠鏡”の実現につながる。このことは人類が未来を制御できる科学の到来を意味する。

西洋科学がもたらした社会の質的变化

- 西洋科学の基本的研究手段は数学と実験である。そして、物事の成り立ち（過去・現在）を支配する要素の普遍法則を次々と解き明かしてきた。そして、その成果（法則性）を機械化することによって生産性と輸送が格段に向上：ハードと共存する社会。
- 戦後現れたコンピュータと半導体は、社会にパソコンの普及をもたらし、人間の事務処理を格段に効率化。：ハードとソフトと共存する社会。
- 今世紀に入り、米国はベクトルプロセッサに変わって、蓄積した膨大なデータの中から人間の生活を支配している規則性を見出してくれるマルチスカラプロセッサに切り替え、データサイエンスを打ち立て、生成AIの登場となり、人間の本質である脳の働き、即ち、思考能力に取って代わるまでに巨人化した：ソフトに支配される社会。
- 現在では、人間そのものの存在意義が脅かされるまでに至ろうとしている。

西洋科学は人間社会の

未来を保証してくれない

世界は21世紀の初頭からのインターネット（通信網）の整備とマルチコアプロセッサの開発に伴い、AI支配の社会が急速に進み、個としての人とデジタル情報との直接的な関係性のみで展開する無味乾燥の世界が広がる。これは、人間の間たる“われ思う故に我あり”の思考の減退、即ち、生身の砂漠化を意味し、人間性の消滅に通じる。

近代西洋文明の牽引車である要素還元論は、物質の成り立ちを支配する因果関係（要素）を解明する唯物論であり、現在生じている現象の越し方、即ち、過去の事実（歴史）を暴くことを主題とし、暴いた法則を利用して人間の欲望を満たせばそれで良しという冷たい科学である。

従って、人類（人間全体）の未来をどう設計し、どう導いていくのがよいかという問いには無関心で、それに応える術は与えてくれない。

未来を見る科学的手段の必要性

西洋科学は、例えば、地球温暖化が人類を滅ぼすことを知りながら、それを止める科学的手段の開発には真剣に立ち向かおうとはしない。あるいは、核兵器使用を止める科学的方法論も持ち合わせていない。人間の善意（モラル）に頼るしか術がない。現在のSDG'sの取り組みが思うような効果が現れない理由は、人間のモラルに頼り、確固たる科学的方法論を持っていないことが原因ではないだろうか。

モラルだけでは人類の消滅のみならず生命の活動の場である地球環境の破壊を止めることは難しい。

少なくとも、人間の感覚ではなく、科学的に信頼のおける未来の姿を予測し、その予測を現在にフィードバックし、適切な未来のあり方を選択する術を持つべきではないだろうか。

今回の計画は、人類の忘れ物である未来を探る新しい科学的方法論を提唱し、人間のあり方を制御できる“未来を見る望遠鏡”を開発することである。

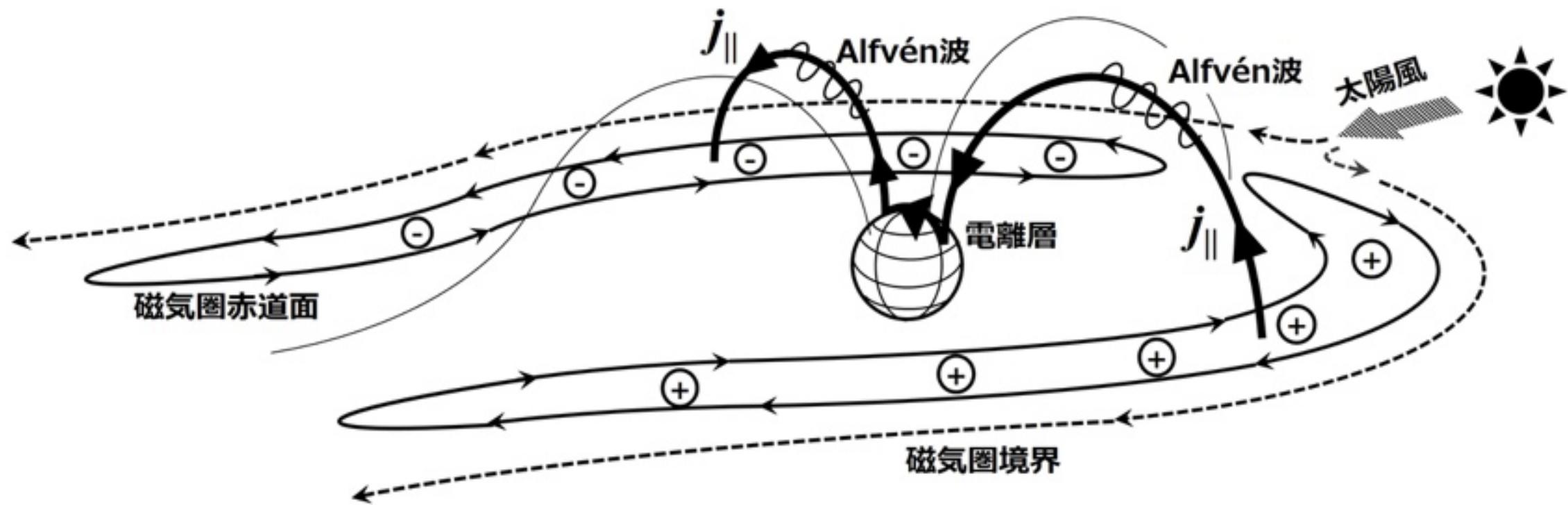
研究所における “未来を見る望遠鏡” 開発の使命

◇ プラズマ・核融合科学分野は自然界の複雑な現象を追跡できるマクロ・ミクロ連結階層 (MMI) アルゴリズムという方法論を率先して開発した。このMMIアルゴリズムはミクロな無数の個々の要素の絡み合いとその結果として発生する現実の集団的 (マクロ) な振る舞いの複雑な因果関係を自己無撞着に解き明かすことのできる現存する唯一の自己無撞着なアルゴリズムと言える。

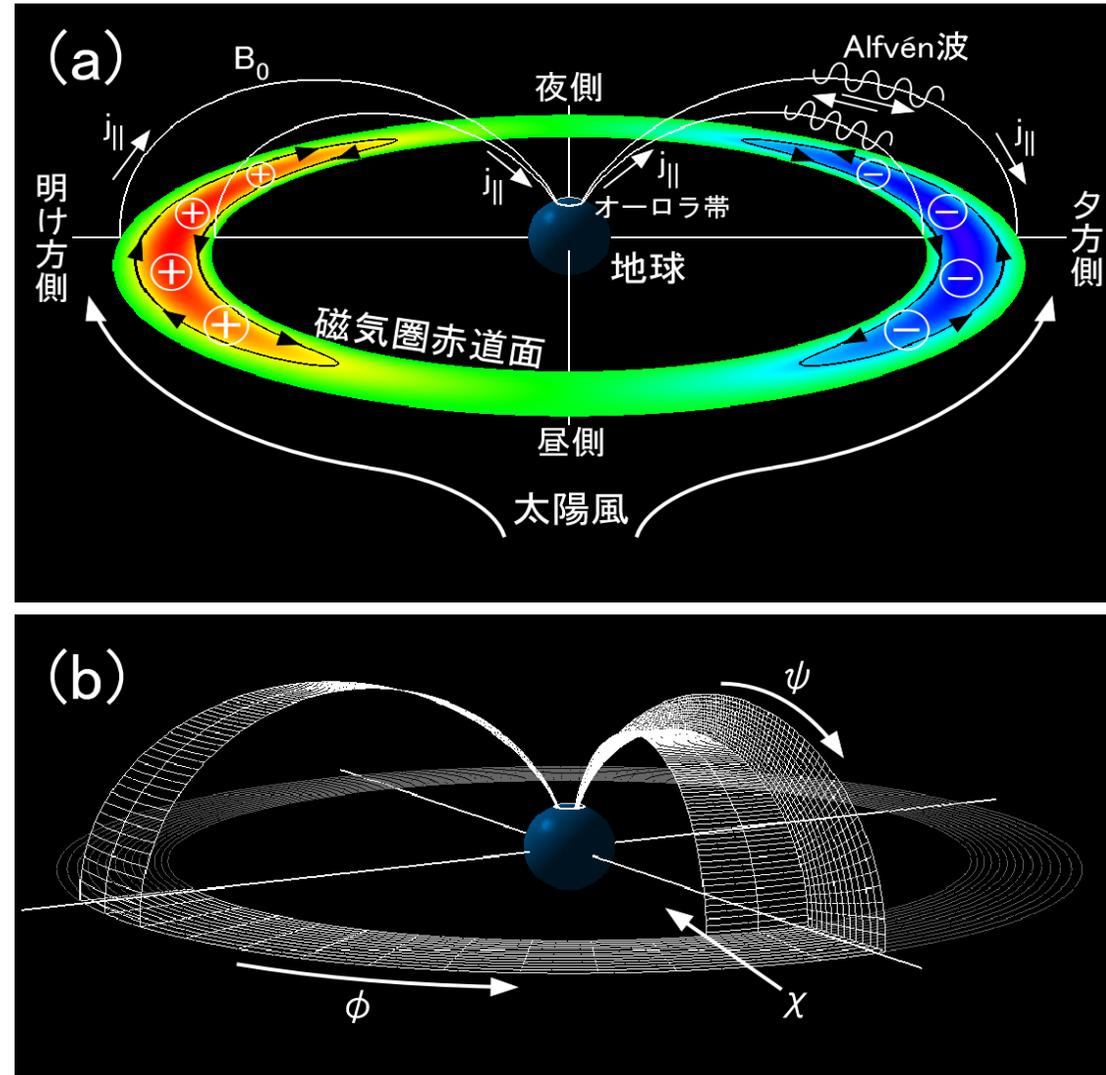
◇ このことは現在を初期条件としてMMIアルゴリズムに基づくシミュレーションを実行すれば科学的蓋然性を持って未来への展開が見えることを意味する。例えば、オーロラや地震も現状の必要なデータが観測できれば、災害を科学的蓋然性を持って予測することが可能であることを示唆している。

◇ 未来を見る望遠鏡は、ハード的には、所謂ガリレオの“過去の出来事を見る望遠鏡”ではなく、MMIアルゴリズムに則って未来に発展する事象を科学的蓋然性に基づき解き明かすことのできる“シミュレータ”である。

MMIシミュレーションの成功例



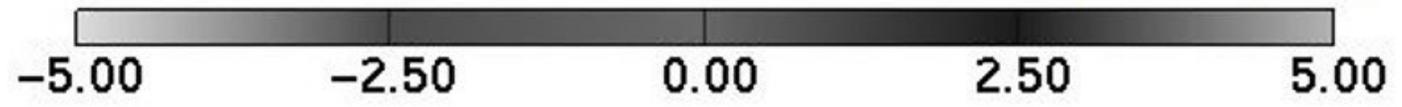
太陽風－磁気圏－電離層結合によるオーロラアークの形成シミュレーションモデル





沿磁力線電流密度
(電磁流体計算のみ)

[10^{-6}A/m^2]

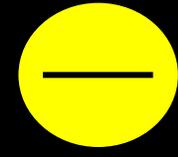


電子の流れ

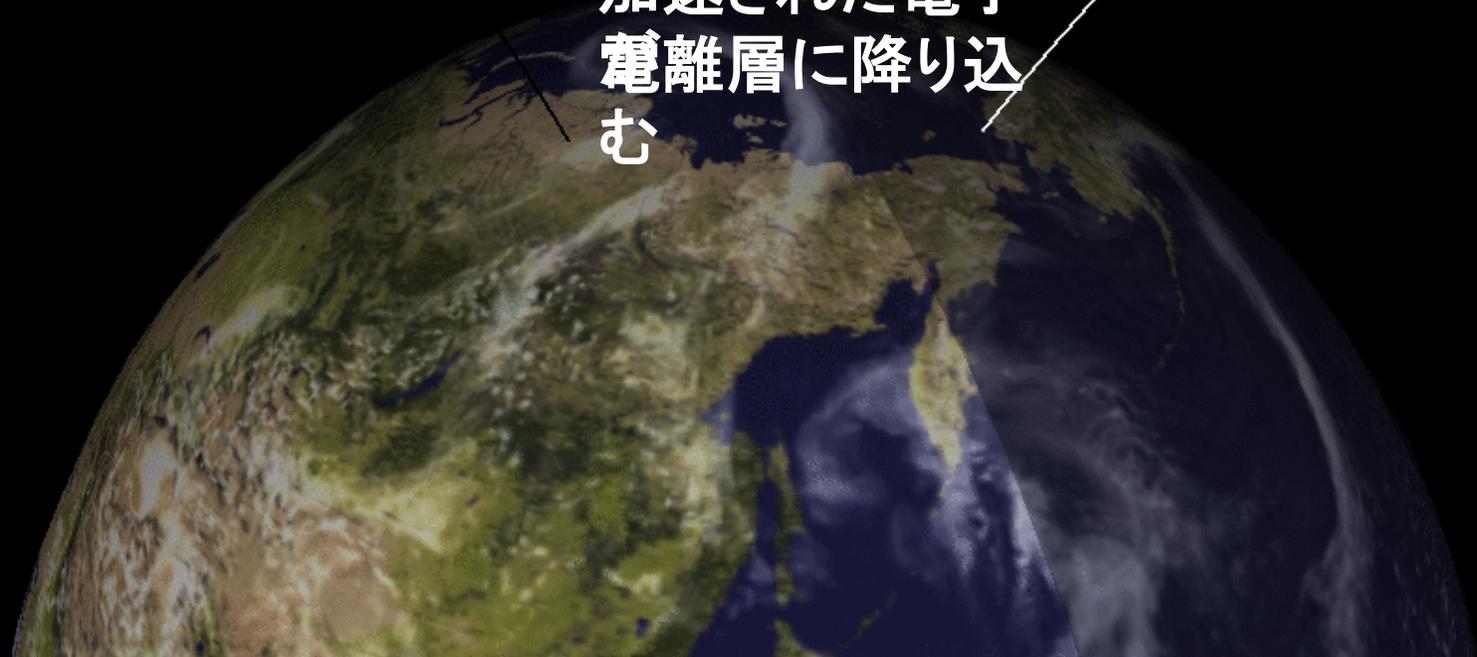
異常現象の生起による電子の大きな加速

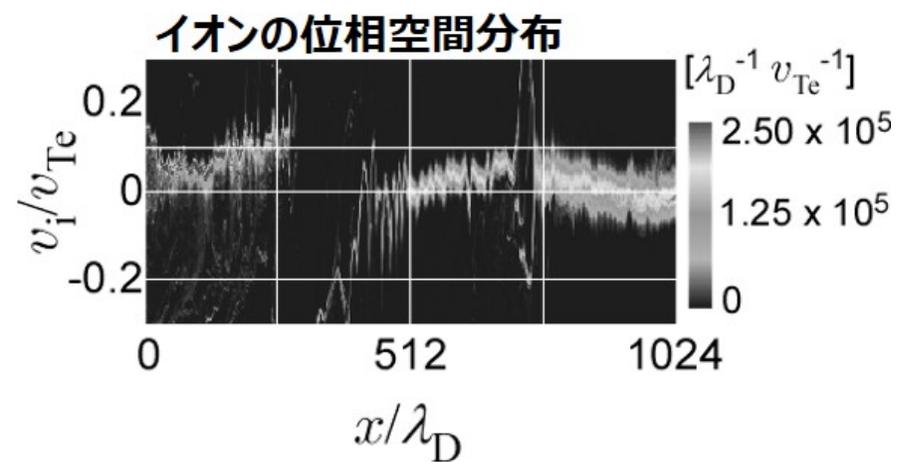
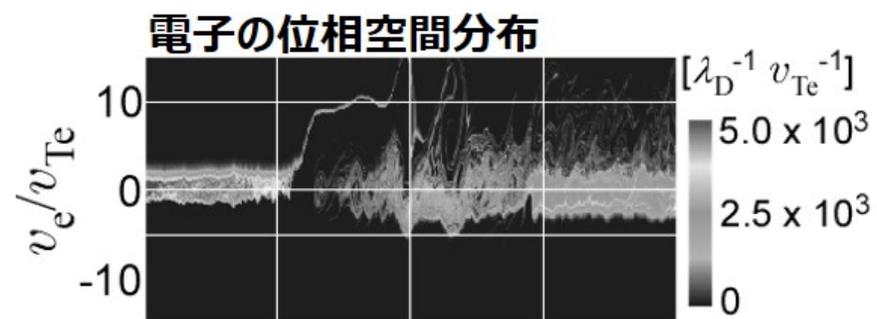
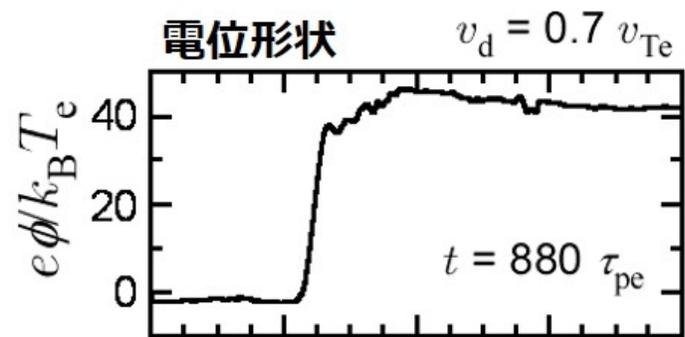


磁力線

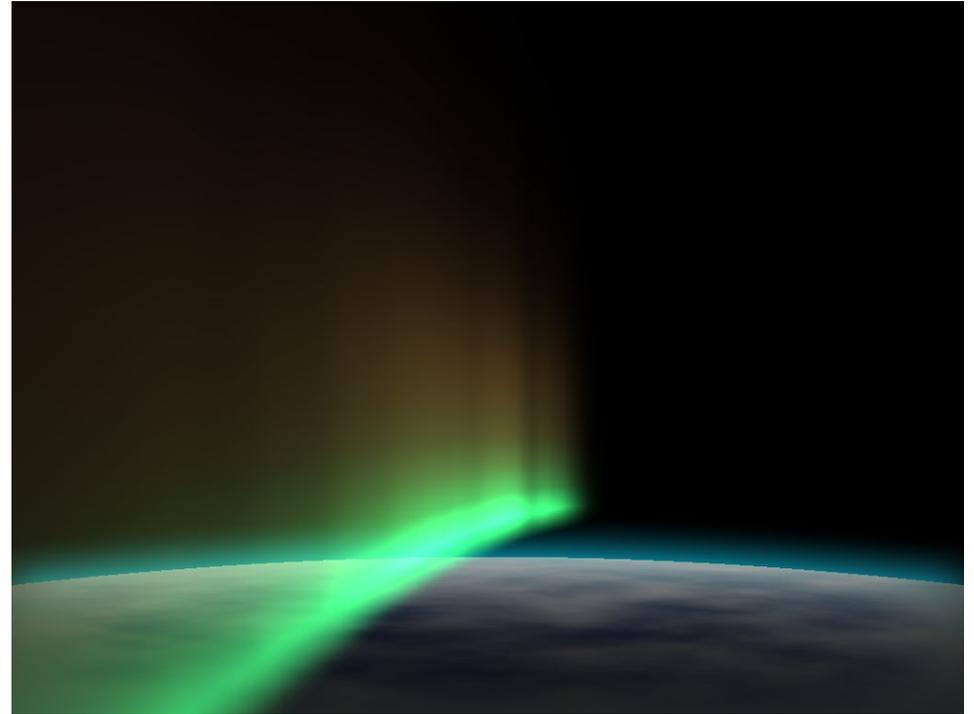


加速された電子
電離層に降り込む





MMIシミュレーションで求めたオーロラ形成



未来を見る望遠鏡計画（1）

- “未来を見る望遠鏡（Future-Viewing-Telescope: FVT）”計画の究極の目標は、地球上のあらゆる地域において、生きることが楽しいと感じる人々の満足度分布が常に正規分布状となり、その分散値が平均値の数倍を超えないように調整できる様々な方策を見出す能力を持つ望遠鏡を作り出すことである。
- この究極の目標に向かい、次に示す三つの要素を掲げて逐次、あるいは、並行して研究を進めていく。

○第1要素：自然現象の未来を見るアルゴリズムの開発

現時点において実行可能なFVTは、その科学的な基本法則体系が解明されている自然現象（プレート型地震や地磁気の逆転、さらには、生命現象や物性現象、等々）を科学的蓋然性を持って予測するアルゴリズムとシミュレーション技術（表現技術も含む）を開発する。このアルゴリズムとシミュレーション技術を具体的な自然現象に適用し、具体的な発生予測の科学的な蓋然性を検証する。

未来を見る望遠鏡計画（2）

- 自然現象は自然法則という普遍的な因果関係に基づいて生起しており、その未来の発展を知る科学的な方法論は存在する。これに対し、人間社会での出来事の生起には普遍的な法則は存在しない。しかし、全く無秩序に起きているわけではない。そこには厳密ではないが、様々な公的（法）的な制約がり、人類史の中で獲得してきた倫理（慣習）が厳然として存在する。個人的にはそれぞれの人生経験の中で経験によって取得してきた価値判断がある。

○第2要素：人間社会の未来を見るアルゴリズムの開発

人間社会のあり方を支配する蓋然性のある判断基準は存在する。これらの蓋然性のある行動基準を導入し、人間社会の進む方向性を見るシミュレーションモデルを構築する。その最初の課題として、第1目標で得られた未来に起きる自然災害を予測し、それを基盤として災害から人の生命と財産を護る最適な防御法を得るシミュレーションモデルを確立する。

未来を見る望遠鏡計画（3）

- 第1及び第2の要素はシミュレーションアルゴリズムというソフトウェアの開発であるが、第3要素はこれらの目標達成を容易にする時々刻々の状態を見える化する技術（可視化等）の開発である。

○第3要素：未来に起きる現象を逐次見える化する技術開発

望遠鏡の信頼度を上げ、その能力を向上するには、望遠鏡内に現れる時々刻々の姿を観測者である人間が五感で即座に認識できる仕掛け（on-line可視化）を充実させることが求められる。現象は3次元であり、動的である。その時間経過を詳細に知ることによって、研究者は望遠鏡の心臓部であるアルゴリズムを修正し、その精度や信頼度を上げることが可能となる。それだけではなく、一般の人々も、どのような現象が未来が発生するかを人間の感覚で即座に認識し、それに備えることが可能となる。未来を見る望遠鏡にそのような可視化技術が備わることによって、未来を見る望遠鏡の存在がより一般社会に対し科学的に信頼度の高い大切なものとなり、同時に、安心感を増大させることができる。

未来を見る望遠鏡計（4）

・第1および第2要素は基本的にはソフトウェア開発である。第3の要素は、シミュレーションによって展開する複雑な現象を時々刻々研究者が認識し、コードの性能を把握し最適化するために、あるいは、結果を大衆に五感で納得してもらうための可視化法の開発である。因果法則という複雑に絡み合った束縛条件のもとで展開して行く物事の未来の有り様を捉えるには、現状のマルチスカラプロセッサは必ずしも最適とは言えない。

○**第4の要素**：未来を見る望遠鏡となるためには、それに最適な、しかも大規模な専用シミュレータを開発することが求められる。

自然現象にしる社会現象にしる、その原点は物質粒子や人間個人の行動であり、無数のミクロな集団の因果関係を効率よく精密に追いかけることができる最適なプロセッサが必要である。同時に、自然現象も社会現象も個々人の活動を押しなべた大域的な力が支配するマクロな活動でもある。このマクロな行動を支配するマクロなダイナミズムは法則性を持っている。これらマクロな活動を効率よく求める最適なプロセッサも必要である。

・具体的なチーム構成

チーム 1 : 人間社会に悪影響をもたらす自然現象の発展を科学的に信頼のおける形で記述できるMMIアルゴリズムの開発とその具体的なシミュレーションコードの作成。具体的には、

- (1) 地球磁場の極性反転と極点移動現象の再現
- (2) プレート型地震の発生とエネルギー開放現象の再現
- (3) 地震による建物崩壊の再現 等々

チーム 2 : 流体乱流、生命現象、物性現象におけ分子間力や量子効果(ミクロ)に起因する相転移に代表される変異を記述できる科学的に信頼のおけるMMIアルゴリズムの開発とその具体的なシミュレーションコードの作成。具体的には、

- (1) 流体における乱流と微細散逸プロセスのMMI法の開発
- (2) 光渦入射によるプラズマの応答解明のMMI法の開発
- (3) 宇宙空間における有機物質の生成解明のMMI法の開発

- チーム 3 : 磁場閉じ込めプラズマにおける突発現象や異常現象のMMIアルゴリズムの開発と解明。具体的には、
- (1) トカマクのMHDシミュレーションと粒子シミュレーションを繋ぐMMIアルゴリズムの開発による閉じ込め性能の解明のためのMMI法の開発
 - (2) 磁気リコネクションのマイクロプロセスを取り入れた太陽風-磁気圏結合システムのMMIシミュレーションコード開発と磁気圏サブストームの全容解明

- チーム 4 :
- シミュレーションチーム (1~3) がシミュレーションの途中経過を見える化する最適表現法 (可視化法) の開発
 - チーム 5 と協力し、“未来を見る望遠鏡 (シミュレータ) にオンラインでつながる最適可視化装置を検討する。
 - これによって、研究全体の進展が迅速かつ効率化でき、且つ、研究成果の一般への広報にも大いに役立つ。

チーム 5 : シミュレーションチームが開発したアルゴリズムを実行するための最適半導体素子、最適プロセッサ方式（記憶装置を含めた）を検討し、最適な未来を見るシミュレータを開発する。同時に、チーム 4 で検討したデータの最適表現方式（可視化）のハードウェアを開発し、本体のシミュレータの中に実装し、“未来を見る望遠鏡”を完成させる。このチームは半導体プロセッサ開発をする企業との密なる協力体制を構築することが肝要となる。

未来を俯瞰することから新しい発想が生まれる

・ 巨大ダブルレイヤ発生シミュレーションから見出された不思議なプロセス：

イオン/電子質量比 = 1836、システム長 = 2024 デバイ長とする マクロ場に繋がる境界条件 の下での粒子シミュレーションの結果、初期には小さなイオン音波ダブルレイヤ（ポテンシャル壁）が 100~300 デバイ長間隔で連なる状態が形成されるが、その後、最上流のダブルレイヤのみが数十倍から百倍にも達する巨大なダブルレイヤへと発達する。他の下流側の全ての小さなダブルレイヤは一つ上流のポテンシャル壁で跳ね返されてくる電子分布が支配的となり、下流側のポテンシャル壁は消滅していく。最上流の巨大ポテンシャルのレベルがそのまま下流境界まで一様に保たれる状態が実現する。

・ 対流駆動によるダイポール磁場発生と南北極性の双安定性と極性決定因子の不思議：

特定の対流を与えることによって安定したダイポール磁場が生成される。その南北の極性は与える初期擾乱の微妙な違いによってほぼ等確率的に決まる。このことから MHD ダイナモのダイポールの極性は双安定解 であることが結論される。しかし、すでに形成された安定なダイポール磁場を逆転に至らしめる原因とは考えられない。逆転のトリガーは微小擾乱ではなく、ミクロ物理プロセスが関与している と考えるのが妥当である。

5 ポテンシャル
0

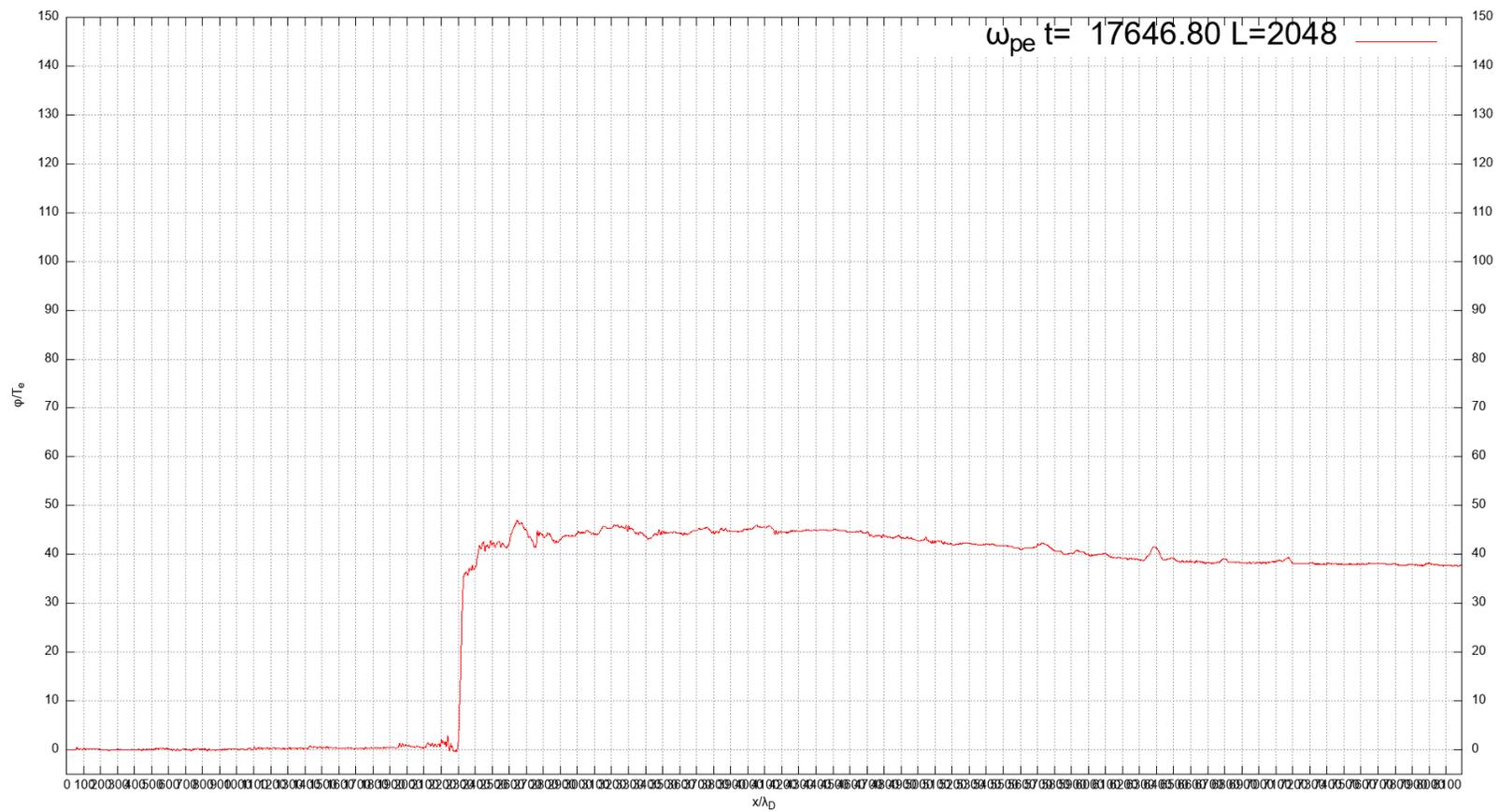


1 5 0

ポ
テ
ン
シ
ヤ
ル

0

L=8192 Dt=0.04 Vd=0.7 Ti/Te=1/20 Mi/Me=1836 NP=512



お疲れ様でした