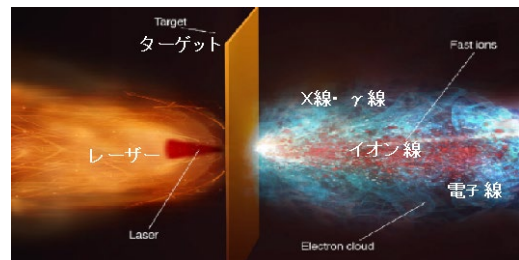


高出力レーザー駆動放射線・粒子線源の計算

千徳靖彦 教授

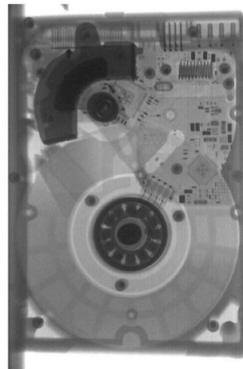
レーザー生成プラズマシミュレーションコード PICLS

PICLSは高出力レーザーと物質の相互作用をシミュレーションするコードである。PICLSコードにより、与えられた条件でレーザーパルス光を物質に照射した時に、生成されるプラズマの状態(温度・密度)を精度よく見積もることができ、さらに発生する放射線(X線・ γ 線)や粒子線(電子・イオン)の放射角度・エネルギースペクトル等の評価が可能となる。下記に示すような応用技術開発に向けた実験デザインをPICLSコードにより行うことができる。



応用1 レーザー駆動高輝度X線源

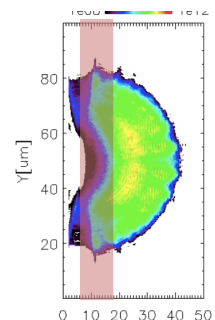
高強度レーザーを物質に照射した時に発生するX線(EUV領域からkeV領域)を、発生する光子のエネルギー、数、放射角度まで含めて予測することができる。レーザーX線は高輝度な点源であり、硬X線は金属内部の構造をサブミクロメートルの精度で走査できる。



レーザーX線で見えるハードディスクの内部構造

応用2 レーザー駆動高輝度ガンマ線源

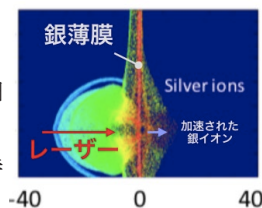
高強度レーザーを物質に照射して、電子を相対論的速度まで加速すると、高輝度なガンマ線が発生する。レーザー駆動ガンマ線は高輝度な点源であり、非破壊検査などへの応用が期待されている。



銅薄膜にレーザーを照射した時に発生した γ 線

応用3 高強度レーザー駆動高Zイオン線源

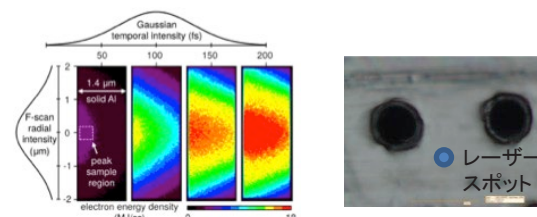
高強度レーザーの応用の一つとして期待されている高価数イオンの加速のシミュレーションを、イオン化過程の詳細を含めて計算できる。放射線ガン治療などへの応用が期待される領域である。



銀薄膜にレーザーを照射した時に加速された銀イオン

応用4 X線レーザーによる物質加工のシミュレーション

高輝度X線レーザーを照射した時に、X線レーザーのエネルギー吸収、物質の加熱状態を詳細に計算することができる。穴のサイズなどの加工精度とレーザー強度・スポットサイズの関係性を予測することができる。



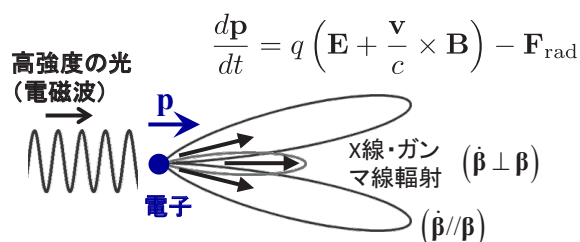
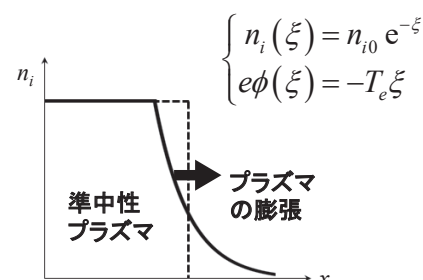
レーザー駆動高エネルギー密度プラズマの科学

岩田夏弥 准教授

共同者: 千徳靖彦教授、佐野孝好准教授

電磁気学、相対論的力学、統計物理学、流体力学等を基礎とした理論構築

高強度レーザー光が生成するプラズマの基礎物理を明らかにするため、電磁気学、相対論的力学、統計力学、流体力学などを基礎とした理論構築を行っている。光電磁場に加速される電子のミクロな運動を解いたり(下図)、電子の統計的挙動やプラズマ全体としての流体的膨張(右図)などマクロな振る舞いを記述する方程式を作ることにより、複雑な相互作用の中の基礎過程を明らかにする。高強度レーザーが生成するギガバール級の高圧プラズマの物理の理論的理解は、宇宙空間や核融合装置などで見られる様々な現象の解明に貢献できる。



応用1

レーザーによる プラズマ加熱の基礎理論

高出力レーザー装置により光を時空間的に圧縮することで、10億気圧を超える地球上最強の圧力を実現できる。このような高強度光は、光子圧で固体表面を押し込みながら物質(プラズマ)を加熱していく。最近の研究では、理論的に導かれる限界密度に光が到達すると押し込みが止まること、その後プラズマが噴出して加熱効率が急激に上昇することがわかった。このような光と物質の相互作用の基礎的理解は、様々な学術・技術応用の基盤となる。

【侵入停止】



[大阪大学プレスリリース]

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20180212_1

応用2

宇宙物理学

恒星内部や宇宙空間は、多くの領域がプラズマに満たされている。高強度レーザーを用いてプラズマの基本的性質を調べることで、宇宙における粒子加速や磁場生成の謎に迫ることができる。



[X-ray: NASA/CXC/NCSU/K. Borkowski *et al.*]

応用3

レーザー核融合

太陽内部に匹敵する高温・高密度にプラズマを圧縮・加熱できれば、核融合反応からエネルギーを取り出すことができる。化石燃料に頼らない究極のエネルギー源を目指して、核融合エネルギー開発の研究が進められている。



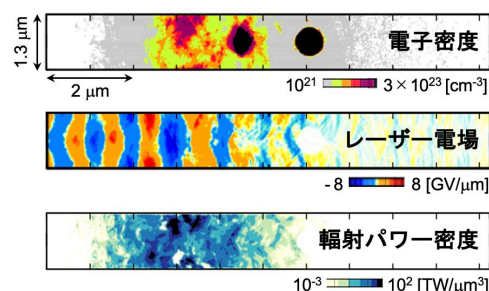
粒子シミュレーションによる レーザー駆動粒子加速の解析

岩田夏弥 准教授

共同者: 千徳靖彦教授、佐野孝好准教授

相対論的プラズマ粒子シミュレーション

プラズマの運動を数値シミュレーションで取り扱うためには、プラズマを流体的に取り扱う方法と、粒子的に取り扱う方法がある。後者は、現象のタイムスケールがプラズマの熱的緩和時間よりも短い、運動論的ダイナミクスを取り扱うことに優れている。相対論的プラズマ粒子シミュレーションでは、プラズマ粒子の相対論的運動方程式と電磁場の方程式(マクスウェル方程式)を自己無撞着に解くことで、非平衡性、非線形性の強いプラズマ現象を数値シミュレーションで再現することができる。応用として、右図のような超高強度レーザーと固体密度の物質との相互作用を解くことで、高エネルギー粒子加速や粒子からの輻射を伴うプラズマダイナミクスを解析することができる。



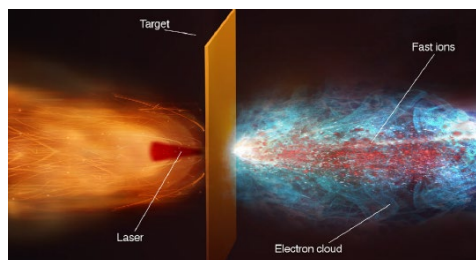
[N. Iwata *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 063115 (2016)]

応用1

レーザー駆動粒子加速 のシミュレーション

高強度レーザー光を数ミクロンから数十ミクロンの厚さの薄膜に照射すると、光子圧によって薄膜中の電子が光速に近い速度で押し出され、強い電場が物質裏面に形成される。この電場により、cm以下の加速長でイオンを高エネルギーに加速できる。

このようなレーザー駆動イオン加速は、ピコ(10^{-12})秒という短時間の間に起こる現象であるため、数値解析には運動論的效果を再現できるプラズマ粒子シミュレーションを用いる。数値解析によって、イオン加速の鍵となる高速電子生成のメカニズムなどを明らかにすることができる。



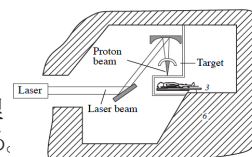
[A. Macchi *et al.*, Rev. Mod. Phys. **85**, 751 (2013)]

応用2

小型イオン加速器

レーザー駆動イオン加速では、cm以下の加速長で高価数イオンを生成すると同時に高エネルギーに加速できる。そのため、既存の線形加速器に代わる新しい高効率加速技術として注目されている。

実用化すれば、粒子線がん治療装置等の小型化、低コスト化に貢献できるほか、核物理等にも応用が期待できる。



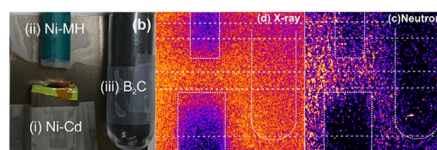
[S. V. Bulanov *et al.*, Plasma Phys. Rep. **28**, 453 (2002)]

応用3

粒子線を用いた非破壊検査

超高強度レーザーを物質に照射することで生成されるイオンビームは、高密度物質の透過写真撮影(ラジオグラフィ)に用いることができる。

また、レーザー駆動イオンビームを中性子発生に应用することで、中性子を用いたコンクリート構造物の非破壊検査などが期待されている。



[大阪大学プレスリリース
https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210916_1]



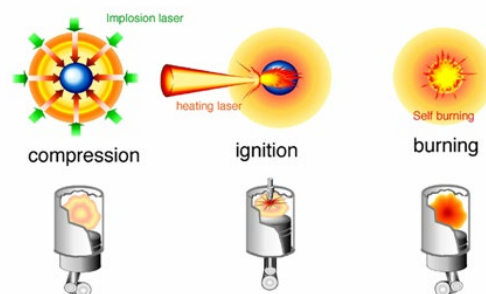
燃焼とプラズマの乱流数値シミュレーション

佐野孝好 准教授

共同者: 西原功修名誉教授(大阪大学)、松岡千博教授(大阪公立大学)、
政田洋平准教授(福岡大学)、千徳靖彦教授、岩田夏弥准教授

強い衝撃波を安定に解くことのできる磁気流体シミュレーションコード 強磁場中でのレーザープラズマ相互作用を含んだ粒子シミュレーション

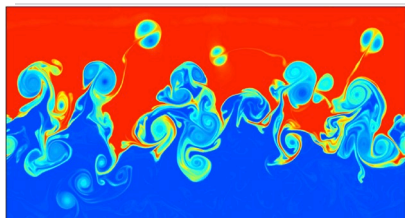
レーザープラズマ現象を理解する上で、数値シミュレーションは非常に重要な役割を持っている。マクロな物理量を解くための流体シミュレーションと、ミクロな現象を取り扱う粒子シミュレーションを駆使することで、複雑なプラズマ乱流や燃焼波面の構造に迫ることができる。



応用1

レーザー核融合における乱流混合過程

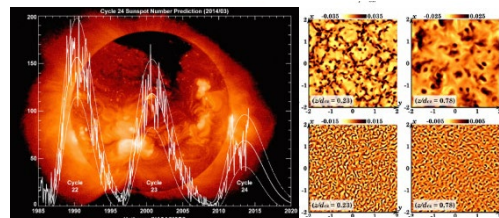
レーザー核融合実現の障壁となっている流体不安定による乱流混合を抑制することを目的として、界面不安定の磁気流体シミュレーションを行う。



応用2

太陽磁場活動にみられる宇宙ダイナモ現象

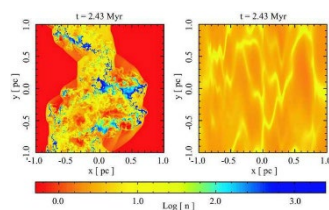
太陽磁場を維持し、太陽活動の周期性の起源となっている対流ダイナモ現象を、大規模流体シミュレーションやレーザー実験で模擬する。



応用3

燃焼過程における衝撃波面の構造解析

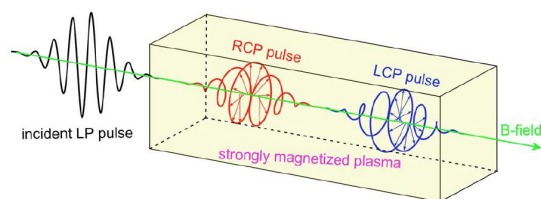
燃焼過程は様々な研究分野で重要となる。乱流と燃焼の関係を複雑な数値シミュレーションを用いて理解することで、幅広い応用が期待できる。



応用4

電磁波を用いた新しいプラズマ加熱機構

粒子シミュレーションはレーザーとプラズマの相互作用を解析する道具である。これを駆使することで、斬新なプラズマ加熱機構の発見も可能となる。

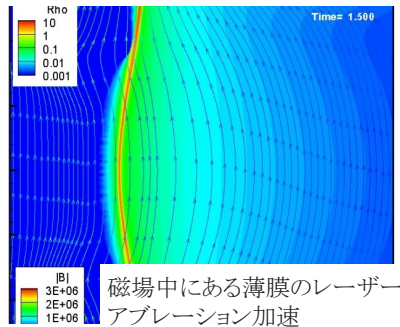


人工知能を活用した複雑・非線形な 流体と光の相互作用のシミュレーション

長友英夫 准教授

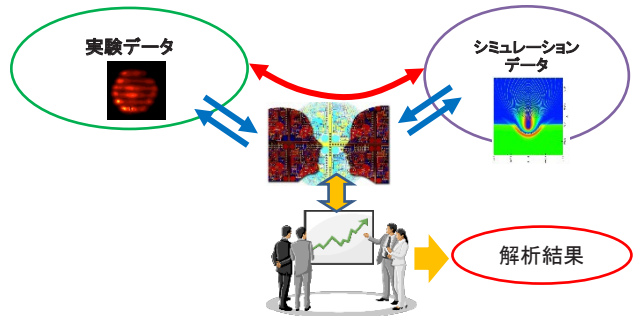
光と熱と流体運動のシミュレーション

強い光（レーザー）が物質に照射されると物質が溶け、蒸発、そしてプラズマになります。その過程で起こるレーザー吸収、電子・イオン熱伝導、プラズマ流体運動、輻射輸送などの影響を再現、予測することができます。さらには、電磁流体、状態方程式、レーザープラズマ相互作用、高速電子輸送など高エネルギー密度プラズマの様々な現象にも応用することが可能です。



人工知能による複雑非線形物理の解析、最適化

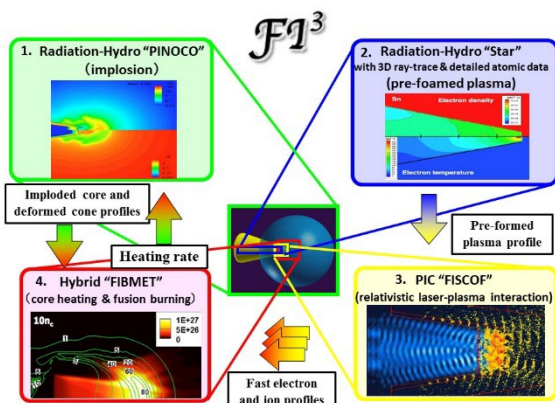
レーザープラズマは、多くの物理量が複雑に影響を及ぼしあい、予測の難しい非線形物理に支配されています。このような複雑現象はシミュレーションや実験だけでは予測が難しいことがあります。そこで、最新の情報科学技術であるディープラーニングなどのデータ解析技術を導入することによって、予測、制御性を高めることもできます。



応用1

マルチスケール・マルチフィジック ス レーザープラズマ統合シミュレーション

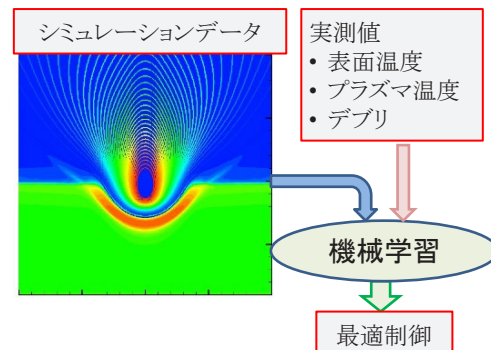
レーザー核融合やレーザー駆動のコンパクト中性子源を実現させるためには、まだ解決すべき課題が多く存在します。それらを理解、克服するために、関係するすべての物理を網羅した統合シミュレーションが活躍しています。実験結果を予測したり、実験設計はもちろん、新しい仮説の立証、数値モデルの検証などにも活用されています。



応用2

インテリジェント レーザープロセッシング

レーザー加工は様々な用途で使われるようになりました。さらに低コスト、高効率、高速、高精度になれば使い勝手が良くなり、普及も進みます。そんなレーザー加工を賢く行うために、シミュレーションと実験から得られるビッグデータを、人工知能による機械学習によって解析し、用途に合わせた最適化を試みます。



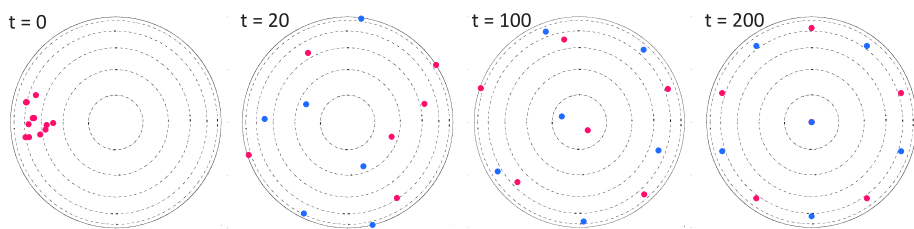
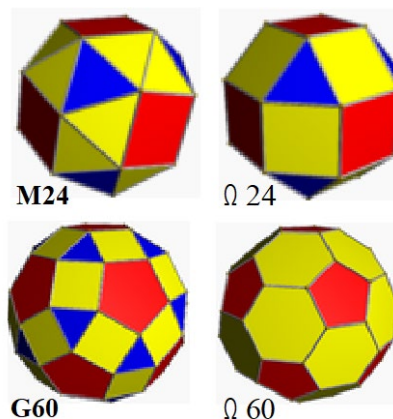
荷電粒子群の自己組織化による球面配位の最適化 - 非ユークリッド幾何学的発想による空間対称性の発見 -

村上匡且 教授

自己組織化現象と対称性

三千年以上も前のギリシャ時代、対称性を持つ美と調和は神によってもたらされたものであると信じられ、神に近づきたいと言う強い衝動とその究明意欲によって幾何学は大いに発達した。例えば、同じ正多角形からなる正多面体(プラトン多面体)は5つあること、そしてその構造は良く知られていた。また右図のように数種類の正多角形からなる立体(アルキメデス多面体)も13個あることが既に知られていた。これら多面体の発見は、点・直線・面の学理を極めたユークリッド幾何学の勝利と言って良い。では、任意の数Nに対する対称性はもはや存在しないのであろうか。

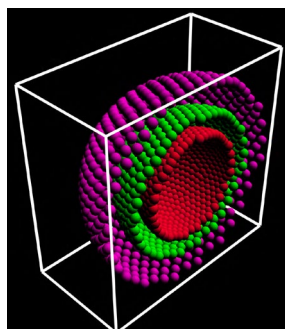
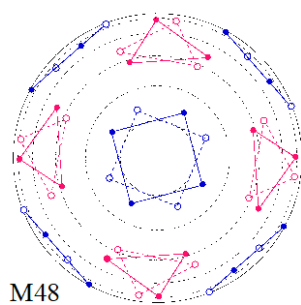
この問いに対する解決法は意外にも中学生にも理解できるほどシンプルなものである。二千年前の幾何学に頼る必要はなく、単に球面状にN個の電荷をばらまきだけで良い。あとは、勝手に電荷同士の反発力で、それら電荷は球面上を走り回り、最後は他の粒子とベストな距離を保ちつつ、安定配位を見つかるのである。右図は、簡単のため12個の正電荷が左から右へと時間発展し、最後は正12面体配置になる様子を示している。



応用1

レーザー核融合照射配位の決定からマイクロ球体の構築まで

直接照射型レーザー核融合方式では、米ロチェスター大の60ビーム(オメガ)が最大である。上記の原理に従えば、任意のビーム数に対し、常に最も安定なビーム配置を得ることができる。下図(左)はこうして発見された48ビーム配位であり、オメガに比べ照射一様性を凌駕することがわかっている。下図(右)はミクロンサイズの空洞を持つ球体表面に配列された模擬原子を表しており、この球体が爆縮すると、ナノスケールまで安定して爆縮することが発見された。



応用2

ゴルフボールのディンプル最適化

ゴルフボールのディンプルは多種多様であり、必ずしも最適化されているわけではない。ちょっとした構造やパターンの改良で飛距離が大幅に変わってくる。卓球の球は滑らかであるがゆえにベルヌーイの流体法則に従ってカーブが強くなるが、ゴルフボールはこれとは逆にまっすぐ飛ばして飛距離を伸ばす目的から、乱流を「効率的且つ対称的に生成」することが肝要となる。ここで提示した自己組織化の方法を利用した球面上への配置最適化を施すことによってディンプルの総数は言うに及ばず、幅・深さ・形状を流体力学的に計算することでそのパフォーマンスを最適化することが可能である。

