2022年2月22日
2022年7月20日修正

素過程・相互作用軸
プラズマ量子過程ユニット
Plasma Quantum Processes

連絡先：pqp@nifs.ac.jp

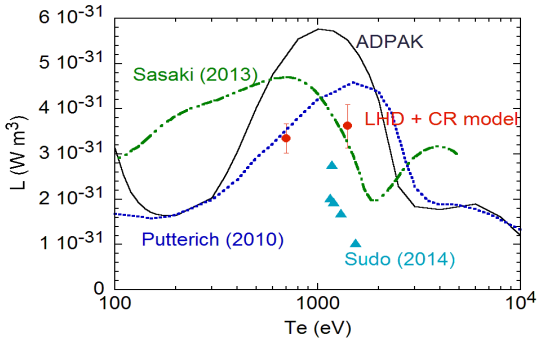
キーワード

核融合科学：　高Z多価イオン、非等方非平衡プラズマ、プラズマ物質相互作用、負イオン、レーザープラズマ相互作用、プラズマ相互作用、ミュオン触媒核融合、非等温・非線形・非弾性衝突

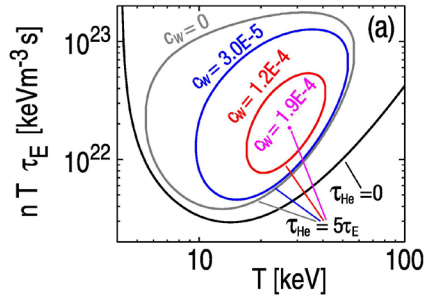
学際的：　原子分子素過程、ミュオン原子分子、高エネルギー密度プラズマ、天体プラズマ、重元素起源、極端紫外・軟X線光源開発、超高圧物性科学、レーザー量子ビーム科学、ミュオン科学、クォーク・グルーオン・プラズマ

核融合としての課題

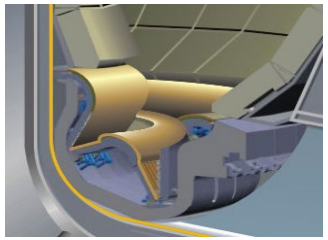
- ITERや核融合炉における高Z不純物の蓄積量・放射パワー評価や挙動解明のための高Z原子多価イオンの原子物理的性質と発光スペクトルの解明
- 非等方非平衡プラズマ中の原子分子挙動とモデリング構築による
- 原子・分子と輻射場やプラズマ対向壁との相互作用素過程
- Warm Dense Matterの原子過程やエネルギー変換機構
- 負イオン形成固体表面反応
- 非等温・非線形・非弾性衝突を含む運動論輸送
- 高出力パワーレーザーが駆動する非線形・非平衡系超高密度プラズマにおける素過程、微視的相互作用、構造形成現象の物理機構の解明
- ミュオン触媒核融合の研究基盤拡充に向けた、素過程の検証および効率的なミュオン生成と標的生成の技術基盤開発



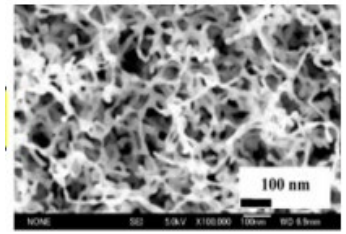
Radiation power of tungsten
Murakami et al. (2015)



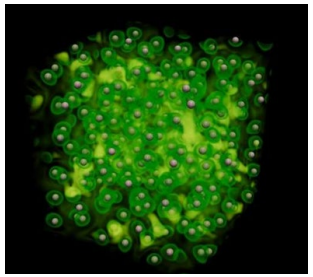
コアでのW蓄積量とIgnition条件
（Putterich et al. 2010）



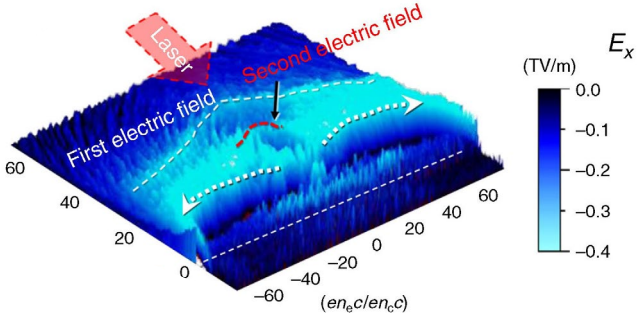
ダイバータ



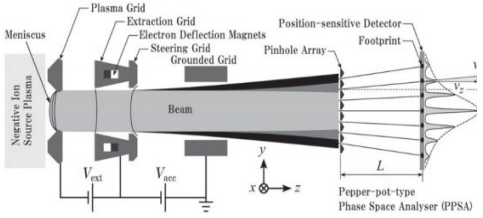
PMI



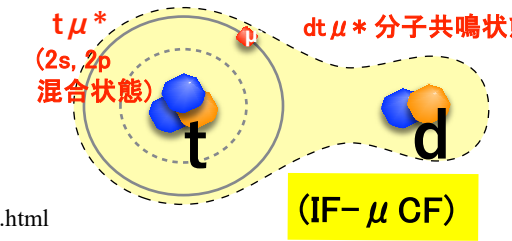
Warm Dense Matter ※



レーザープラズマ相互作用



負イオンNBI

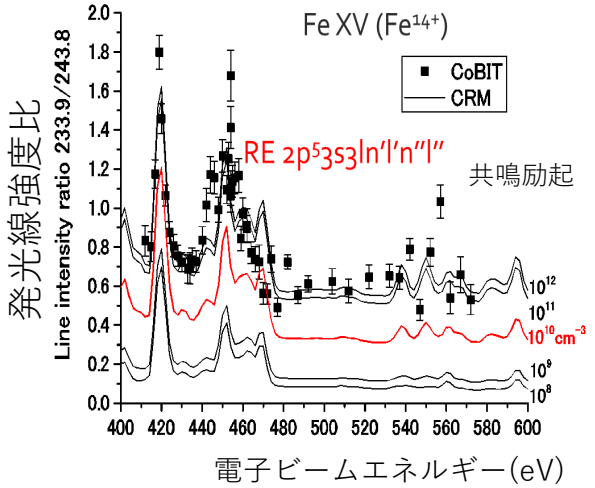


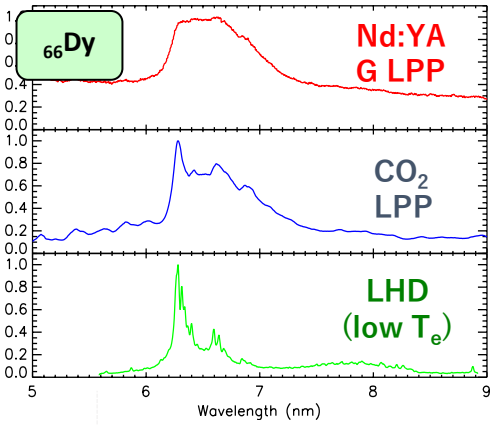
※ https://phys.org/news/2021-01-harnessing-power-ai-dense.html

学術的な特徴づけ

プラズマでのミクロな量子プロセスとして、

- 内部構造を持つ原子・分子の量子遷移とそれに伴う光子・電子・（負）イオンの発生と消滅過程
- 量子プロセスとプラズマの電磁場・輻射場との相互作用、レーザーや原子核の高強度場中の量子プロセス
- 低温から高温、低密度から高密度（縮退も含め）に至る多様なプラズマにおいて、量子プロセスがいかにプラズマ物性を規定し、どのようなプラズマ現象として発現し観測されるか
- 多様な方式（磁場閉じ込め、レーザー、ミュオン触媒等）での核融合科学の課題を解決できる原子分子素過程の総合的研究の展開
- レーザープラズマ相互作用に対し、個別の物理現象を複合・連続した非平衡開放系におけるエネルギー変換現象として、モデル化と、粒子線物質相互作用研究
- 素粒子ミュオンの量子的性質を用いたミュオン原子分子科学、少数多体量子系の計算理論による新しいミュオン触媒核融合プロセス





Opacityの影響のあるレーザー生成プラズマと影響のないLHDでのDyスペクトル

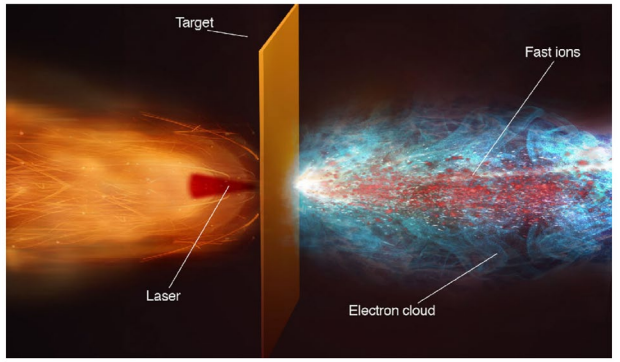
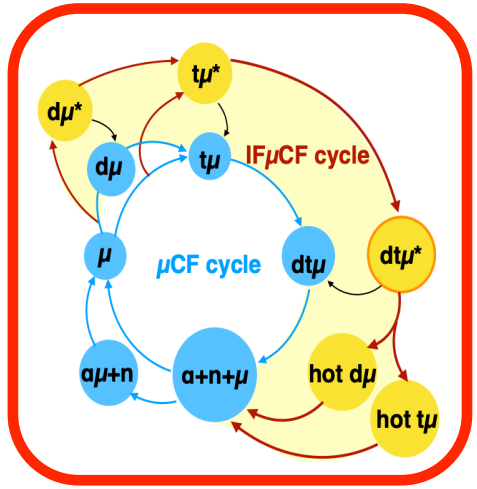


FIG. 1 (color online). Artist's view of a typical experiment on proton emission from laser-irradiated solid targets.

Rev. Mod. Phys., Vol. 85, No. 2, April–June 2013

高強度レーザー物質相互作用



新しいμCFサイクル

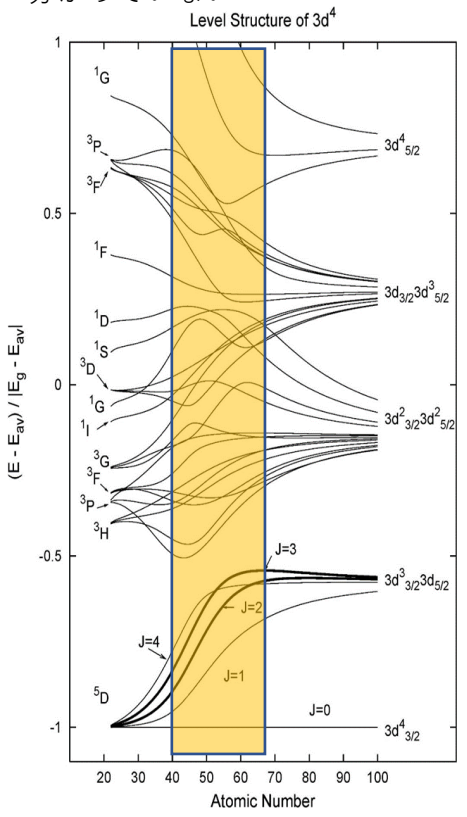
アプローチ（1）

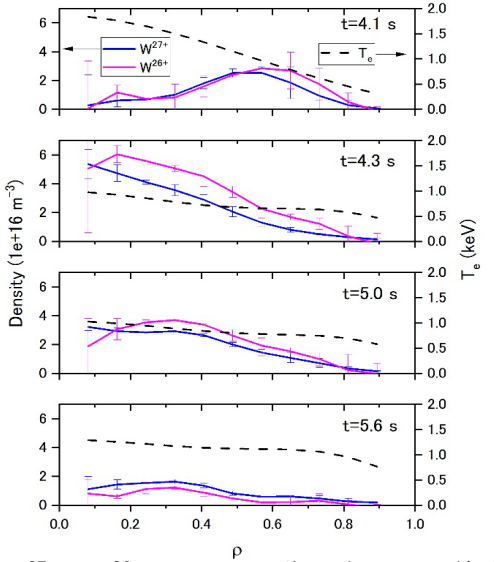
原子分子素過程の切り口で多様なプラズマの物性やダイナミクスを記述し、多様な方式での核融合科学の課題を解決するとともに、多様な分野へ展開する。

原子物理学、プラズマ科学、レーザー核融合・応用、ミュオン科学、情報科学等の国内外の専門家との共同研究ネットワークを構築し、世界的にも類を見ない原子分子素過程の総合的研究を展開。

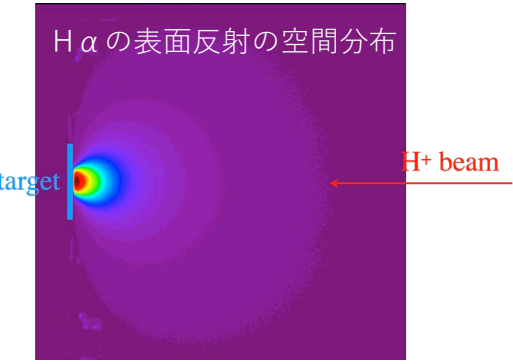
- 高Z多価原子イオンやラジカルなどのエキゾチックな原子・分子の内部構造や発光・光吸収スペクトルについて、理論原子物理学に基づいた理論研究、衝突実験やプラズマ実験での分光計測などによる素過程の実験研究
- 非平衡非等方プラズマ分光モデルの構築と実験によるモデル検証を行い、核融合・天体プラズマ診断の高精度化を実現
- 原子・分子の物質や場との**相互作用研究**として、電子・イオンビームやレーザーを用いた固体との相互作用、高強度場やトポロジーを持った光と原子・分子の相互作用、固体表面における負イオン形成などの原子・分子過程、強結合プラズマやWarm Dense Matterなどの高密度プラズマなどにおける量子プロセス、プラズマ中の原子・分子の**集団現象の研究**を、原子・分子素過程を取り込んだ化学反応過程や運動論的プラズマダイナミクスの数値シミュレーション、輻射流体力学計算、分子動力学シミュレーション、密度汎関数法などの理論的・数値的手法と、粒子ビームやレーザー等用いた実験、プラズマ実験での分光等様々な計測で遂行

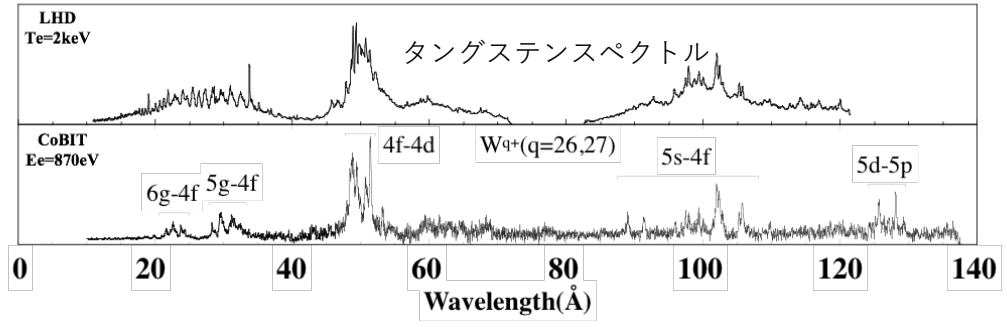
相対論的電子配置が高次に絡み合った領域では、原子構造がよく分かっていない





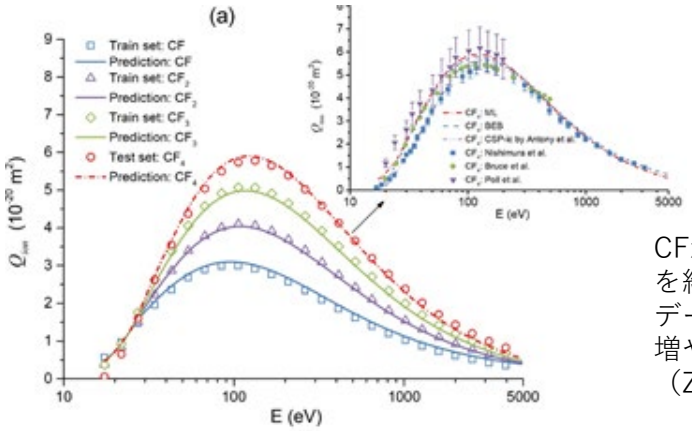
W27+とW26+イオンの近紫外域M1発光線強度から得られたLHDコアプラズマでのW多価イオン密度の時間変化（#121534）.



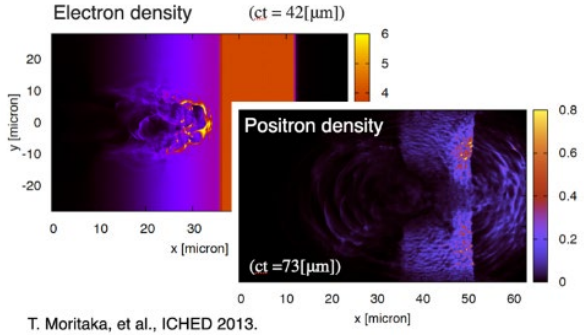


アプローチ（2）

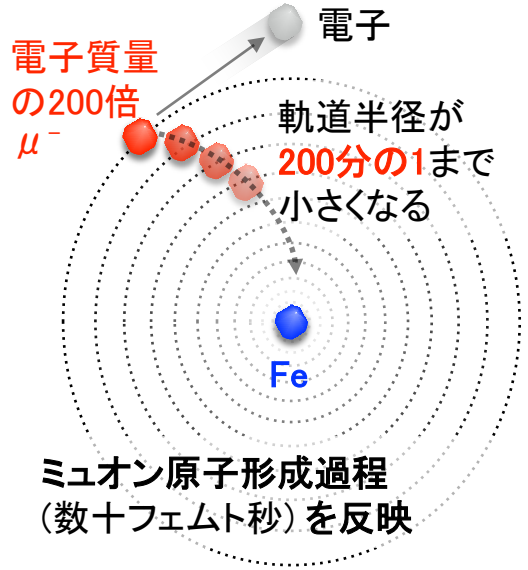
- 共同研究を通じた様々な原子実験による原子・分子データの導出を行う。
- 原子・分子データに対し、統計的手法や機械学習の方法を適用し、スパースモデリングによる新たな物理的解釈、転移学習による多体複雑系原子・分子データの推算方法の導出等を行い、新たな原子物理学研究の展開、実験への指針、応用プラズマのためのデータセットの提供を可能に。
- トムソン散乱計測、X線画像測定装置開発
- 非等温・非線形・非弾性衝突を含む運動論輸送研究
- ハイパワーレーザーが創り出す非線形・非平衡系超高密度プラズマでの素過程、微視的相互作用、構造形成研究
- 極低温ターゲットの物性研究
- ミュオン原子分子科学として、革新的分光技術の導入、新しいミュオン原子分光手法、ミュオン分子高精度分光を実施、ミュオン触媒核融合における素過程の理解を進める。

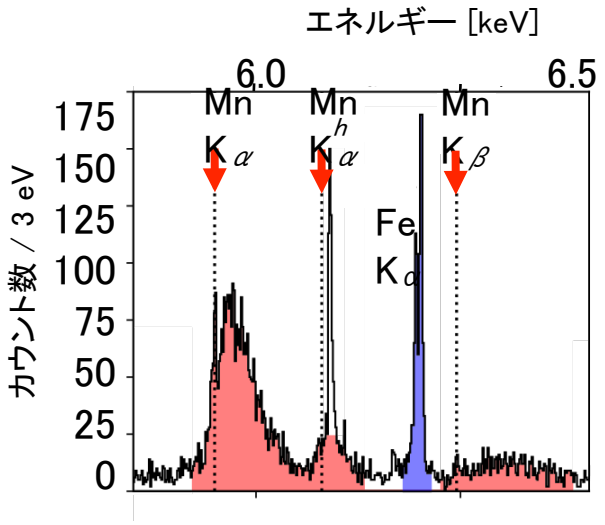


CFx分子に対し、原子物理計算と経験則を組み合わせた電離断面積計算を教師データとして、CFから順にF原子数を増やした分子の電離断面積を推定（Zhong 2019）



レーザーによる陽電子生成





学際的展開

レーザー量子ビーム

新材料

Warm Dense Matter

群論、位相空間論

原子構造の新記述法考察

ミュオン核融合

エキゾチック原子分子

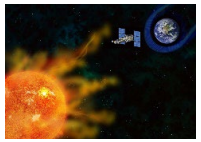
多電子系の相対論的ダイナミクス

半導体リソグラフィー用EUV光源開発

希土類元素スペクトル

次々世代EUV光源

水の窓X線顕微鏡用光源



高Z多価イオン

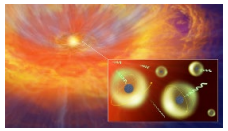
Solar-C__EUVST計画

太陽コロナ

マルチメッセンジャー天文学

LIGO/Virgo/Kagra

重元素の起源



宇宙の化学進化

キロノバ

星間物質

分子形成

ALMA

X線天文学

超新星残骸

XRISM計画

ガンマ線バースト

オーロラ

高層大気・惑星大気

CO_2, NOx, SOx

気相反応

液相との相互作用

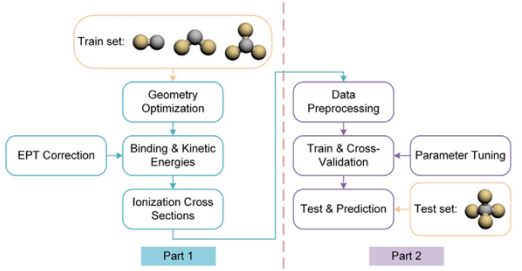
ラジカル反応

重粒子線治療

統計解析・機械学習

データ推算

構造解析

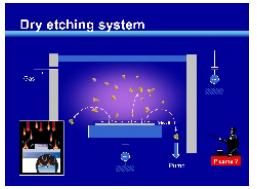


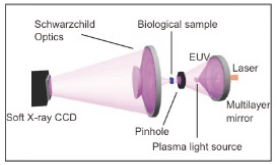
分子反応ネットワーク

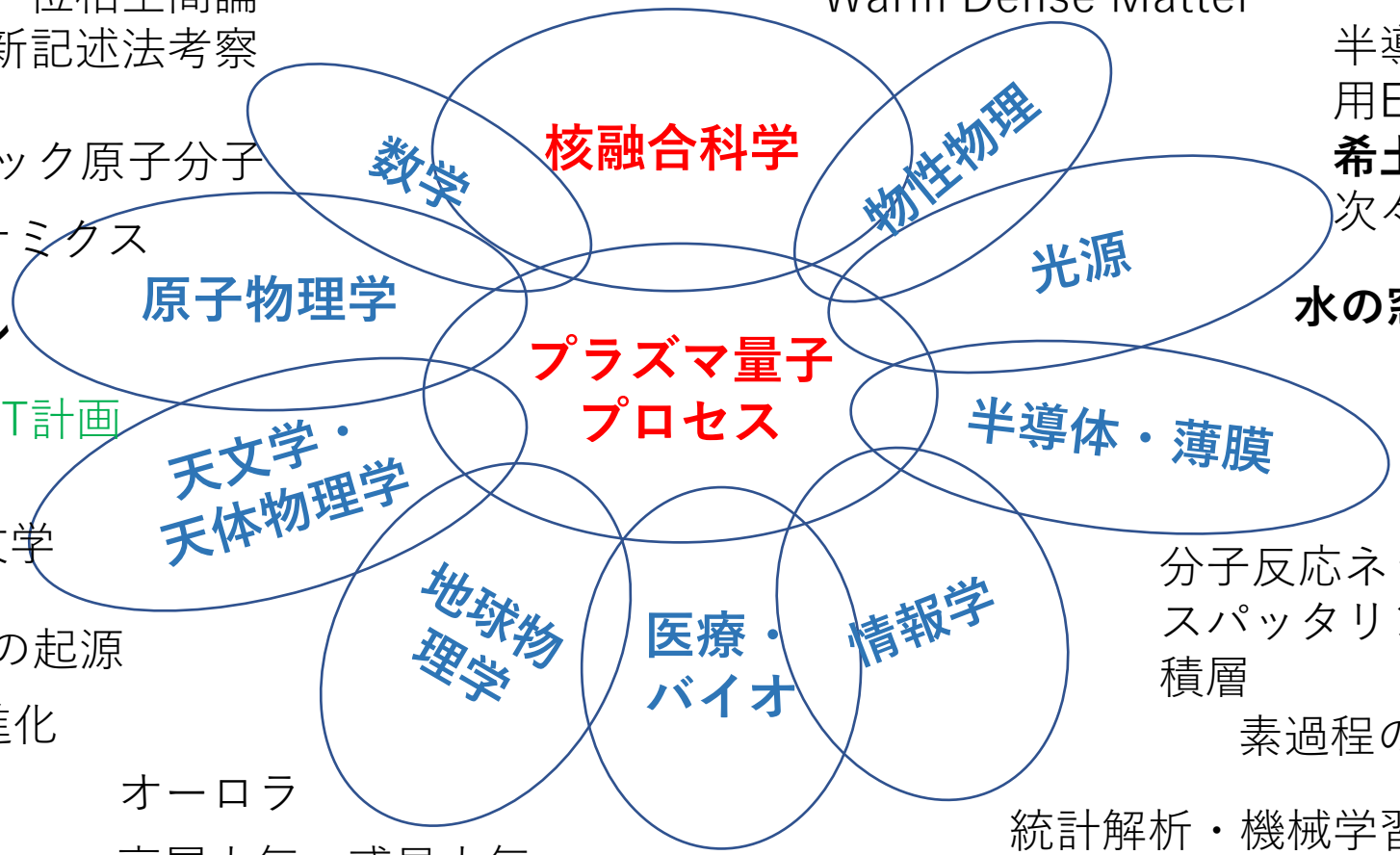
スパッタリング

積層

素過程の解明

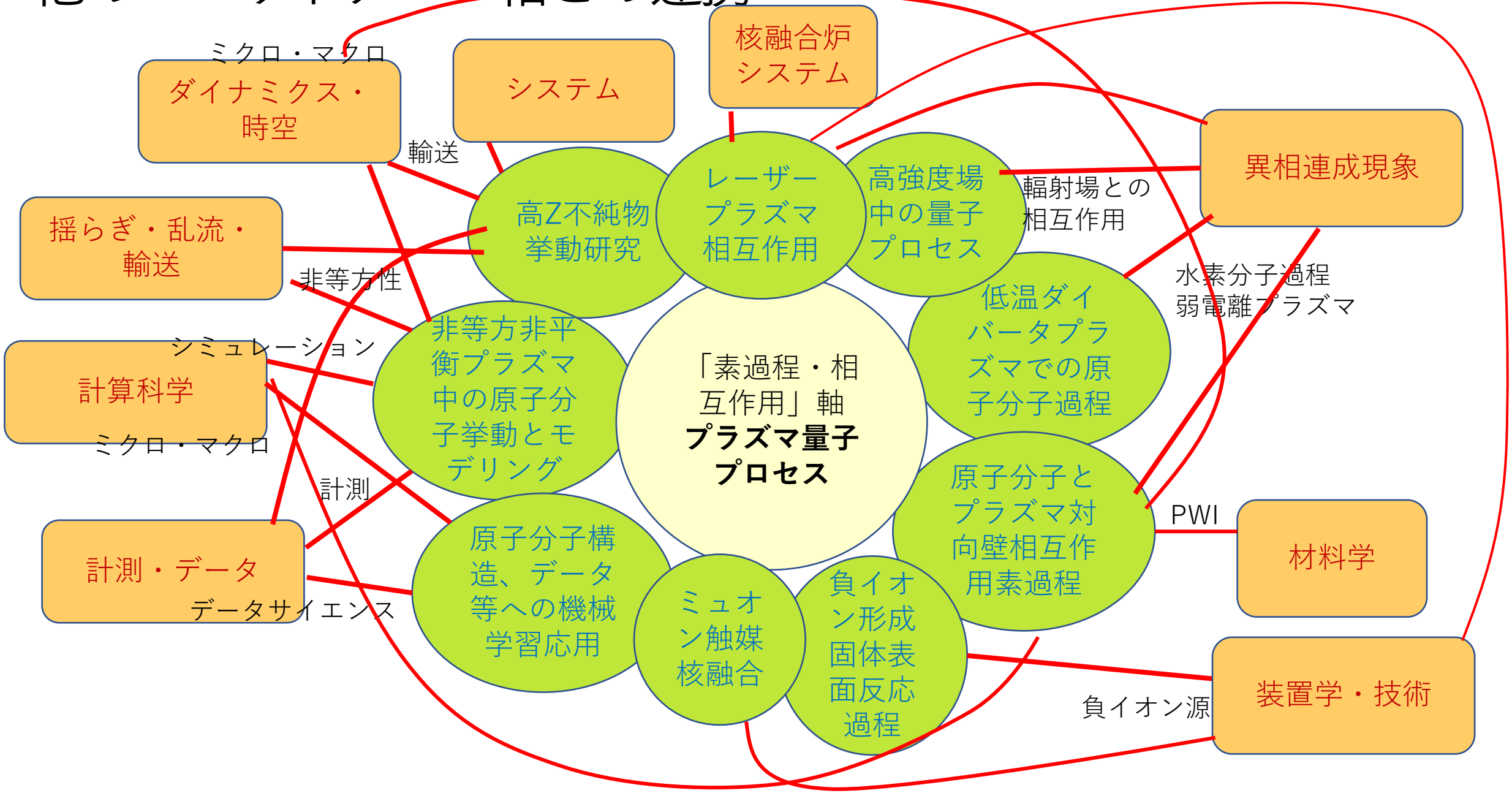






独自性・優位性

- 名大旧プラズマ研の時代から核融合研では、
  ・独自の多価イオン実験装置を用いた多価イオン物理研究、
  ・プラズマ中の原子・分子衝突断面積の数値データベース活動において国際的リーダシップをとってきた実績
  ・原子物理分野、太陽プラズマ研究、キロノバ研究、X線天文学グループ等天文学分野やレーザー生成プラズマ研究分野との共同研究の実績
  があり、これらの研究に優位性をもって取り組むことができる。
- 多様なプラズマ研究分野との交流実績から原子・分子・光過程研究を応用した新たな共同研究の発展も期待できる。
- 大阪大学レーザー科学研究所との連携研究により、
  ・ハイパワーレーザーが創り出す実験系では線源からの距離によって，強力な極限環境から自然環境までの幅広いレンジの実験環境を再現可能である.

- 宇宙プラズマにおける高エネルギー粒子が拓く物理学への発展が期待できる.
- 原子分子研究とミュオン触媒核融合研究のシナジー効果により、新しいミュオン触媒核融合過程をはじめとする革新的な研究を世界に先駆けて展開できる。

他のユニットテーマ軸との連携