

ユニットテーマの軸「装置学・技術」公聴会
2022年3月3日

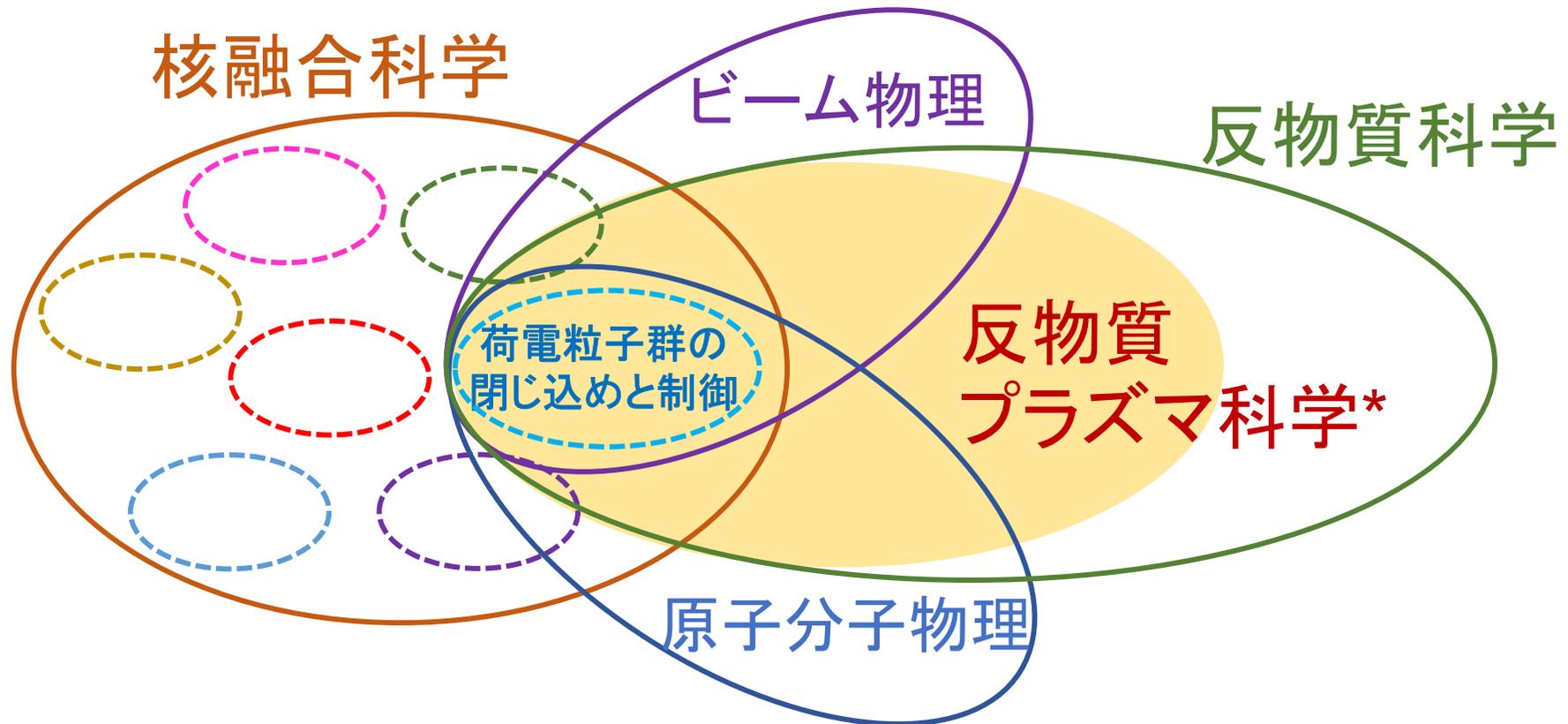
提案書CUT-13：

反物質プラズマ

Antimatter Plasmas

核融合科学としての課題

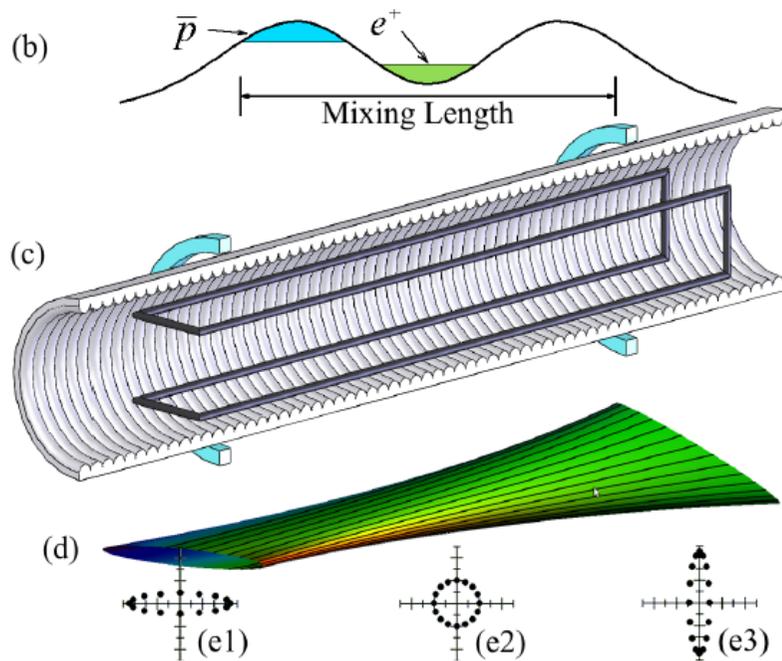
- 荷電粒子群の閉じ込めと制御に関する技術と装置学
 - プラズマ核融合科学の研究基盤の一つ
 - ビーム物理, 原子物理, 反物質科学等の研究推進の原動力



* プラ核学会誌2022.3-「荷電粒子群の閉じ込めと制御の物理が可能にした反物質研究」
檜垣「電子・陽電子プラズマ」、黒田「反水素」、永田&長嶋「ポジトロニウム」.

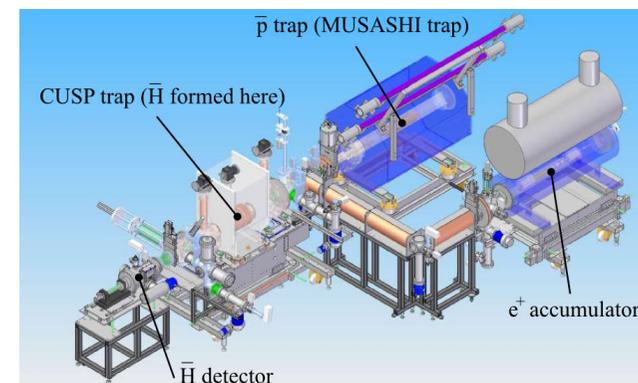
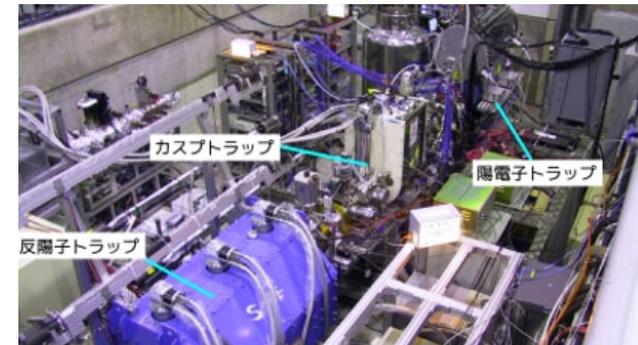
核融合科学が反物質科学に果たす役割

- プラズマとしての粒子群の閉じ込めと制御の波及効果
 - 「閉じ込めの困難さ」は多くの分野の共通課題
 - 核融合分野の知見は融合分野でのブレイクスルーに貢献できる
 - 近年の反粒子線技術の飛躍的進展との相乗効果



2005 Fajans+, PRL

四重極磁場により、微少な磁気モーメントを持つ反水素原子を捕獲するトラップ(ALPHA, ATRAP)



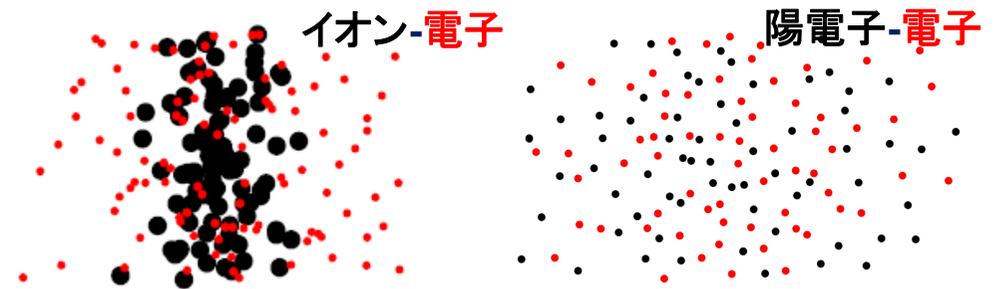
低速反陽子ビームを用いた反水素合成に活用される(ASACUSA webより)

学際的な特徴づけ(何の研究と言えるか)

- 電子・陽電子プラズマ

- ペアプラズマ ($m_{e^+}=m_{e^-}$) としての特異な波動特性と安定性

➡ 実験的に未検証の諸性質
(基礎プラズマ物理として)



- 電子・陽電子群はパルサー磁気圏等の宇宙環境に広く存在

➡ ガンマ線バーストに関わる無衝突衝撃波とWeibel不安定性, 構造形成

- ペアプラズマ生成は陽電子の大量蓄積の実現を経て達成

➡ ポジトロニウム(電子と陽電子の束縛系)のBose-Einstein凝縮,
コヒーレントなガンマ線レーザー, より複雑な反物質プラズマ生成の礎

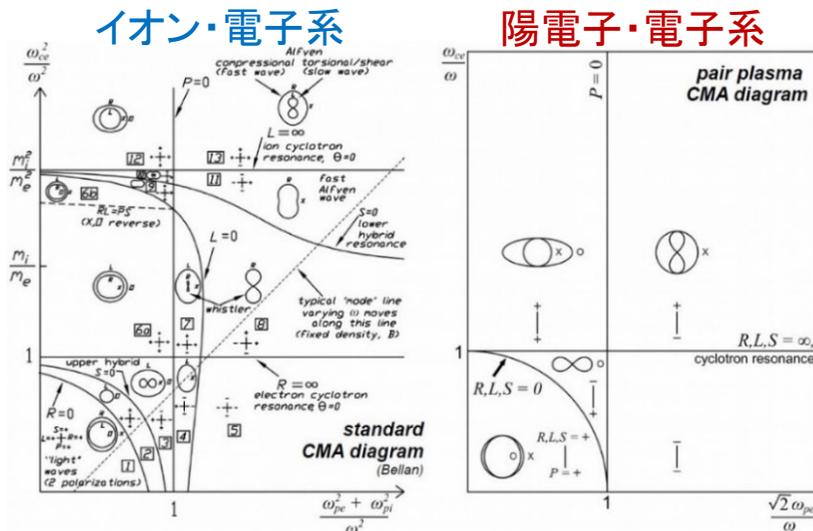
- 反水素プラズマ, より複雑な反物質プラズマへ

➡ CPT対称性, 落下試験(反物質の重力検証), 基礎物理定数

定式化・アプローチ1: ペアプラズマ研究の経緯と現状

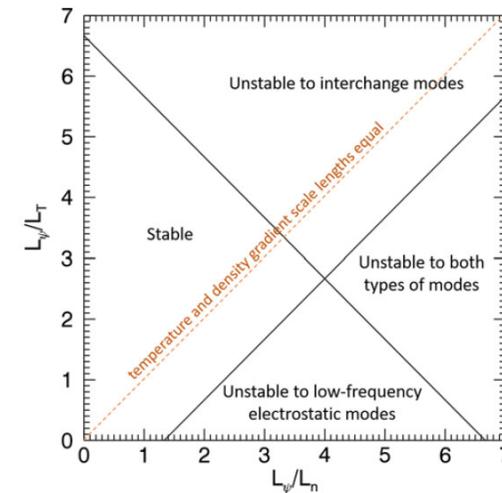
- 理論・数値計算を中心とした研究の進展

- 縮退した分散関係(波動特性)



イオン・電子プラズマ(左)とペアプラズマ(右)の分散関係*。
各島はプラズマ中の異なる波動のモードを示す。

- 運動論による強靱な安定性の予測



規格化した温度/密度勾配に対する安定性解析**

1978 Tsytovich&Wharton, Comm. Plasma Phys. Cntr. Fusion*
2014 Helander, Phys. Rev. Lett.**; 2017 Stenson, J. Plasma Phys.

- 安定性, 衝撃波, 宇宙プラズマに関する理論研究

「電子・陽電子プラズマ」の論文数 > 4000
(Web of Science 2022)

- ペアプラズマの実験研究

- ペアイオン(c60+-C60-)プラズマ
- 水素ペアプラズマ(負イオンとの関連)
- 電子・陽電子プラズマ
ミラー磁場
ダイポール, ヘリカル

2003 Oohara&Hatakeyama PRL

2017 Oohara+ PoP

2020 Higaki+ App. Phys. Exp.

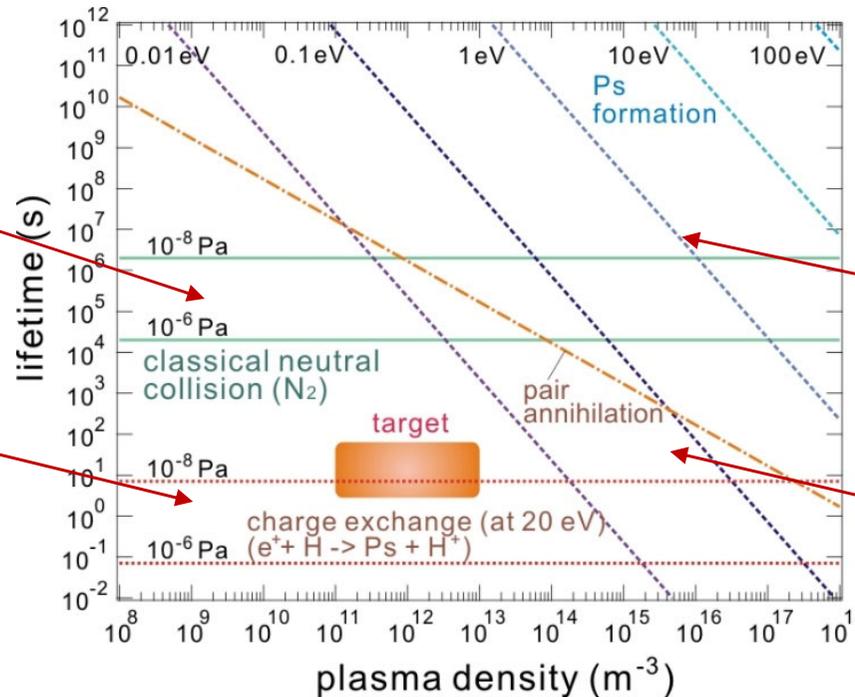
2020 Stoneking+ J. Plasma Phys.

定式化・アプローチ2: 要求パラメータと実現性

- 目標値: $n_{e^+/e^-} > \sim 10^{11-12} \text{ m}^{-3}$, $T_e \sim 1\text{eV}$ デバイ長 $\lambda_D \sim 2\text{cm} <$ 装置サイズ を満たし、プラズマとしての集団現象が発現する

中性粒子との衝突による古典拡散時間は超高真空環境では十分に長い

水素原子との荷電交換反応は、断面積がピークを持つ20eV付近を避けて回避が可能である



ポジトロニウム (Ps) 生成 極端な低温 ($< 10\text{meV}$) 状態を除き問題にならない

電子陽電子対消滅: 対象とする低密度領域では比較的小さい

様々な密度の陽電子または電子・陽電子群のlife timeを決定する機構

荷電交換反応, ポジトロニウム生成, 対消滅による制約を超えて, 研究対象となる時間スケール ($< \text{ms}$) 以上の時間, 電子・陽電子プラズマを保持可能

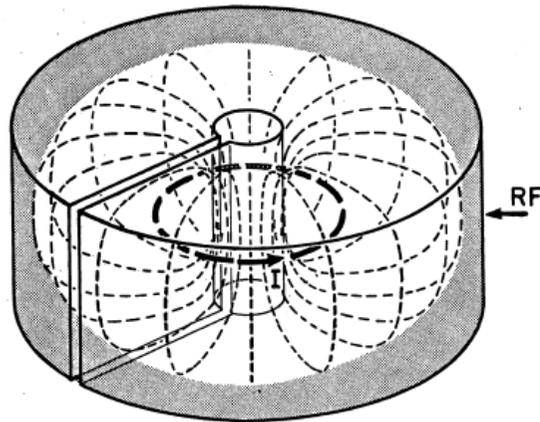
定式化・アプローチ3: 磁気浮上ダイポール1

「人工磁気圏」によるプラズマ研究の進展

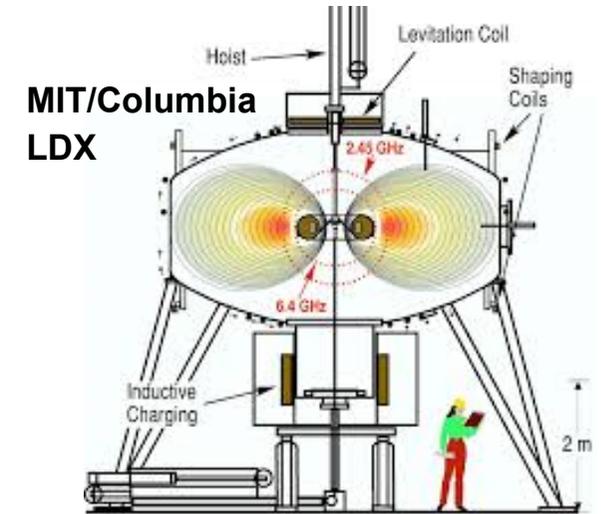
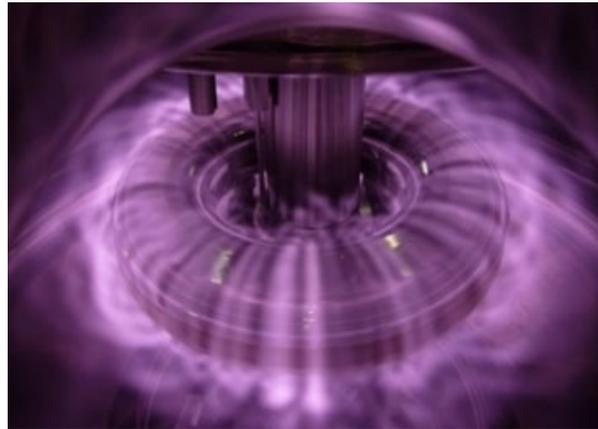
1987 Hasegawa, Comm Plasma Phys. Contr. Fusion

超伝導コイルにより惑星磁気圏と類似環境でプラズマを生成

"Dipole Fusion" by Hasegawa



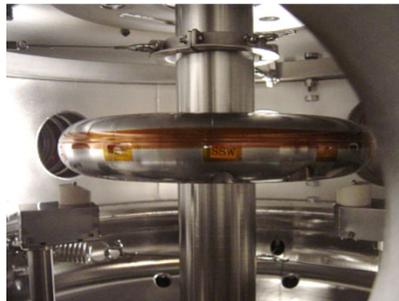
東大RT-1



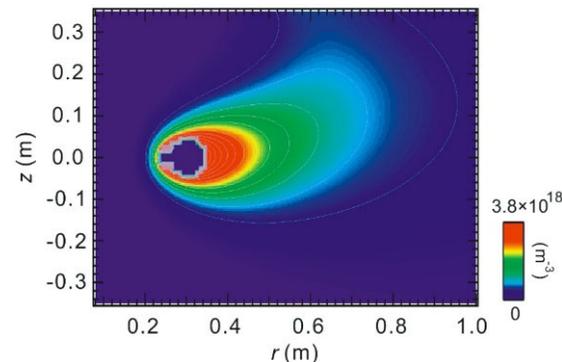
超伝導コイル磁気浮上とプラズマ実験

2006 Yoshida+ Plasma Fusion Res. 2010 Boxer+ Nature Phys.

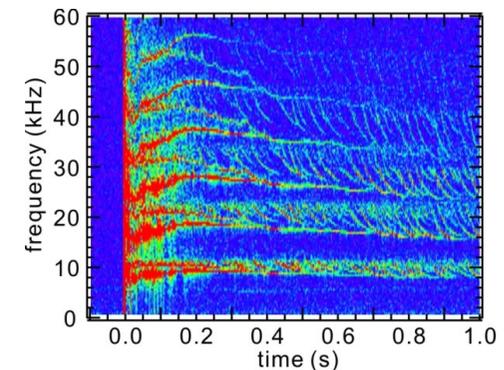
● 超伝導コイル磁気浮上



● 高 β プラズマ/先進核融合



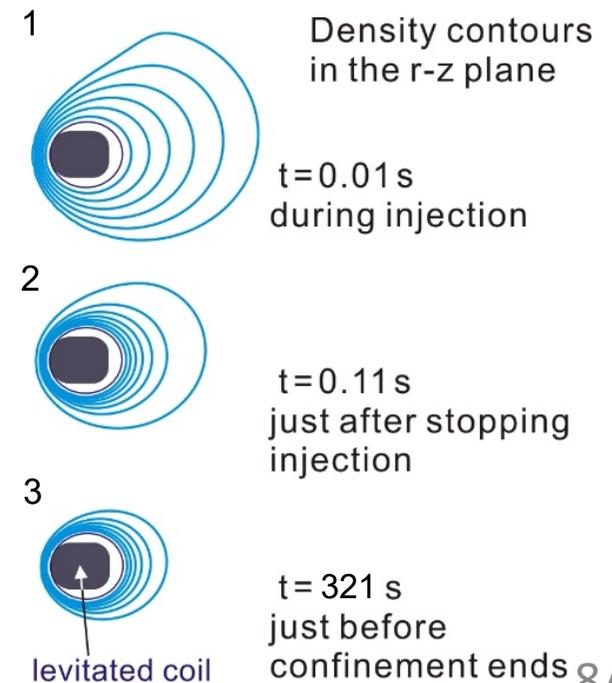
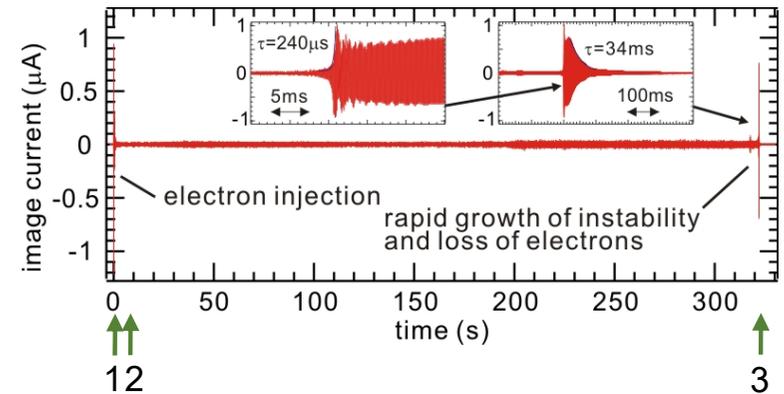
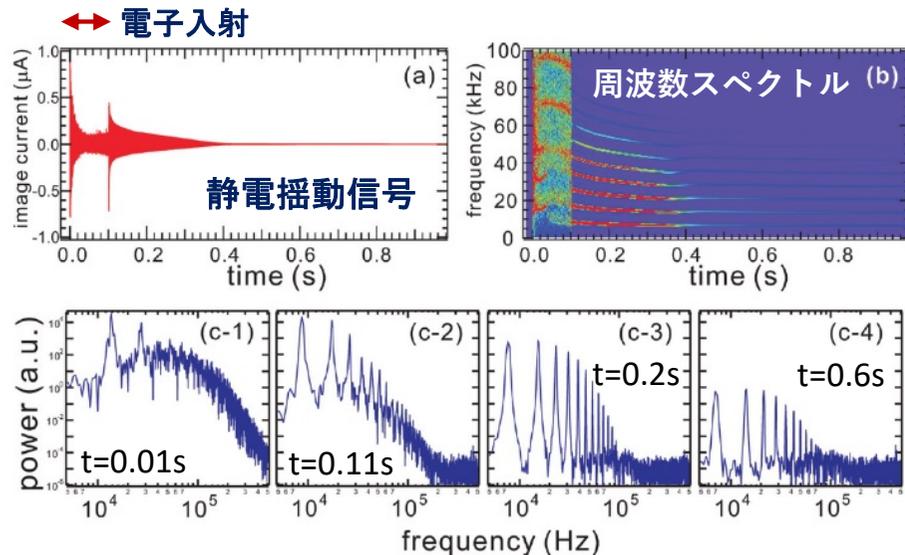
● 非中性プラズマ長時間捕獲



定式化・アプローチ4: 磁気浮上ダイポール2

非中性(純電子)プラズマの安定閉じ込めを実証

端部を持たない(電場不使用)トロイダル系の荷電粒子トラップ



乱流揺動が選択的に減衰し、永続するゆらぎを示す強靱な構造が出現する。閉じ込め限度は真空度が規定(RT-1では300秒以上)。

2004 Saitoh+ Phys. Rev. Lett.
2010 Saitoh+ Phys. Plasmas

ダイポール磁場中では強磁場領域への凝集はエントロピー増大を伴う「拡散」過程。

2018 Sato&Yoshida Phys. Rev. E

ダイポールの純磁場閉じ込めは原理的に陽電子に適用可能で、反物質ペアプラズマ生成に応用できる

定式化・アプローチ5: 大強度陽電子源＋ダイポール 分野融合的研究による「反物質プラズマ科学」の創成

- 大強度のパルス化陽電子ビームを磁気浮上ダイポールに導入し、電子と共に密度 $10^{11-12} \text{ m}^{-3}$ 、温度 1eV 以下のプラズマ状態を実現する

線形加速器と減速+蓄積法を
組み合わせ大量陽電子捕獲

+

人工磁気圏への大量陽電子
のパルス入射＋電子と共存



ペアプラズマ
の実現へ

- 反物質プラズマの集団現象を以下の実験研究を通して解明
 1. 電子陽電子群の密度向上により、ペアプラズマとして集団現象を示す境界を確定し、縮退した分散関係や後進波を含む波動現象を検証
 2. 急峻な密度勾配を持つプラズマを形成し、運動論から予測されるペアプラズマ特有の安定性が存在するか、分布構造を決定するかを解明
 3. 不安定性や乱流の効果がペアプラズマの輸送と損失に与える影響を評価

反物質プラズマの物性解明の上に、大量陽電子を活用する国内外のグループと連携し、反物質科学とプラズマ物理の融合実験を展開

定式化・アプローチ6: ペアプラズマ生成の全体計画



AIST
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

パルス陽電子源

$10^7 \text{ e+}/\text{s}, 10\text{eV}$

リニアックベース
パルス陽電子ビーム



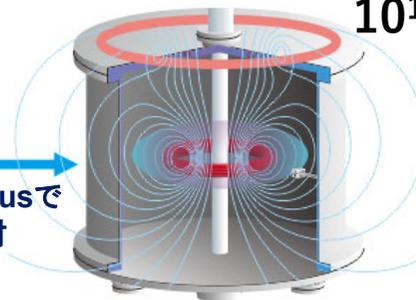
バッファガス+超伝導トラップ

陽電子の前段蓄積,
高速パルス引き出し

10^{10-11} e+



~10usで
入射



$>10^{10} \text{ e+}$
 $10^{11-12} \text{ m}^{-3}$

反物質ペア
プラズマ生成

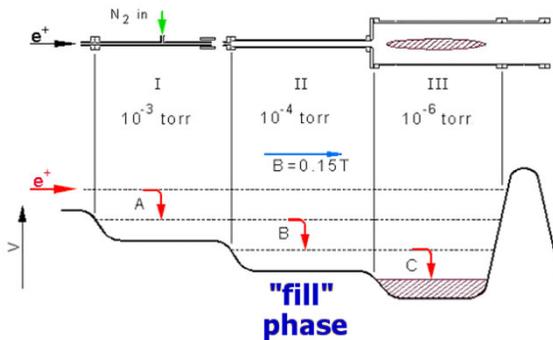
磁気浮上ダイポール

2006 Yoshida+,
PFR

物性解明
蓄積装置
として利用

産総研・リニアックベース陽電子源
2020 Higaki Michichio+ Appl. Phys. Exp.

- 大量陽電子の蓄積と引き出し
入射期と閉じ込め期の分離を実現



超伝導トラップ
への陽電子蓄積

2020
Higaki Michichio+
Appl. Phys. Exp.

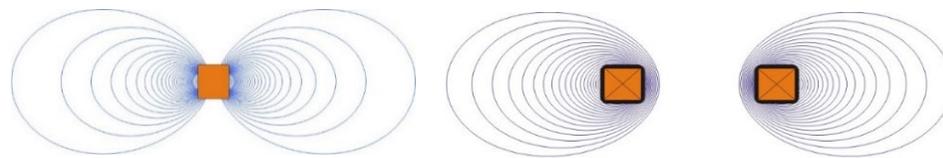
非弾性衝突を活用した減速・捕獲効率の改善

マックスプランク, UCSDグループと情報交換,
連携した開発を進める

- 人工磁気圏での反物質プラズマ実現
電子と陽電子をプラズマとして同時閉じ込め

ダイポール開発

高速・パルス入射



- プロトタイプダイポール (永久磁石による)
- 超伝導磁気浮上ダイポール「人工磁気圏」

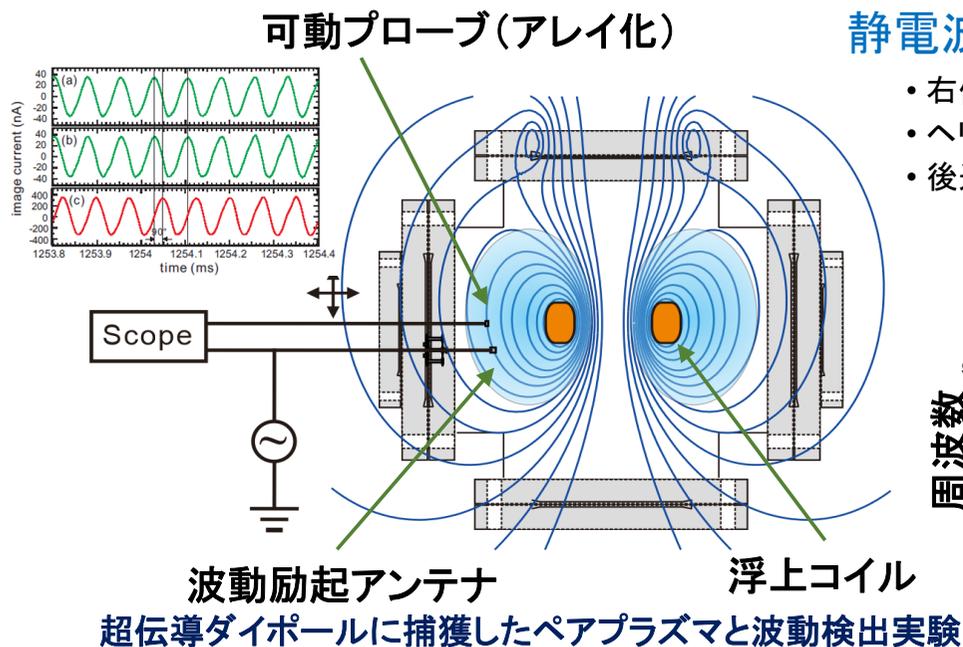
- データ解釈と理論解析

波動・安定性解析

自己組織化現象

定式化・アプローチ7: 揺動計測によるペアプラズマ物性解明

- 密度制御による**集団現象**発現と波動励起/揺動観測による**分散関係**解明

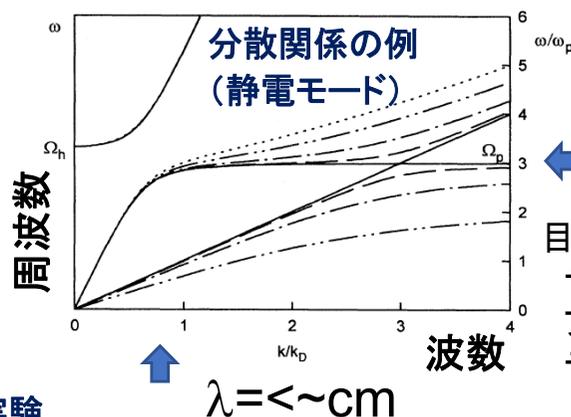


静電波・電磁波, 後進波を含む非線形波動特性の検証

- 右偏波と左偏波の分散関係が共通
- ヘリコン波, ホイッスラー波のブランチが消滅
- 後進波(位相速度と群速度が逆)の予想

1995 Zank Phys. Rev. E

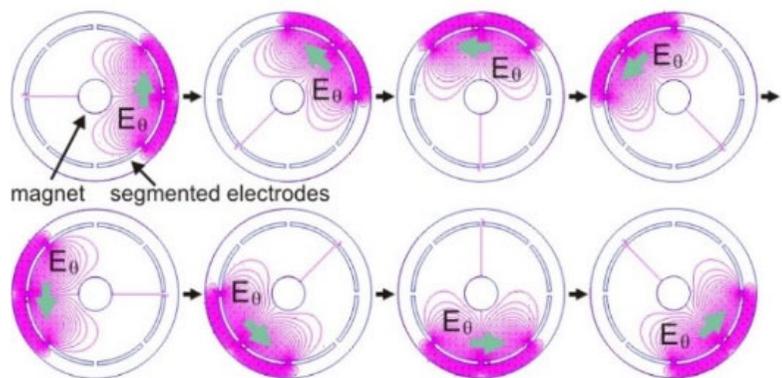
測定対象の多くのモードは現実的な計測可能範囲内



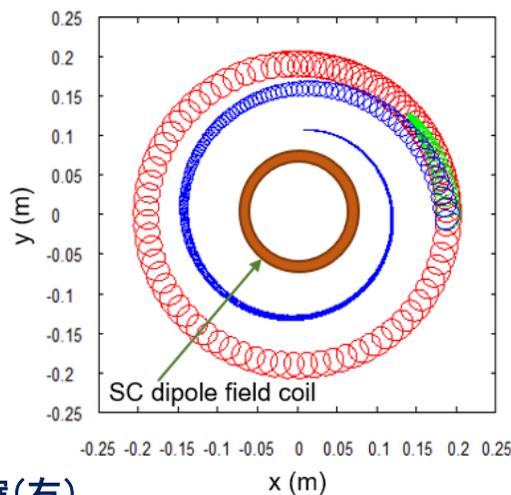
$f_p = 2.8 \text{ MHz}$

目標パラメータ $B = 0.01 \text{ T}$, $N_e = 10^{11} \text{ m}^{-3}$
 サイクロトロン周波数 $f_{ce} = 280 \text{ MHz}$
 プラズマ周波数 $f_p = 2.8 \text{ MHz}$
 デバイ長 $L_d = 2.3 \text{ cm}$

- 分割電極を用いた**揺動モード**特定と径方向輸送



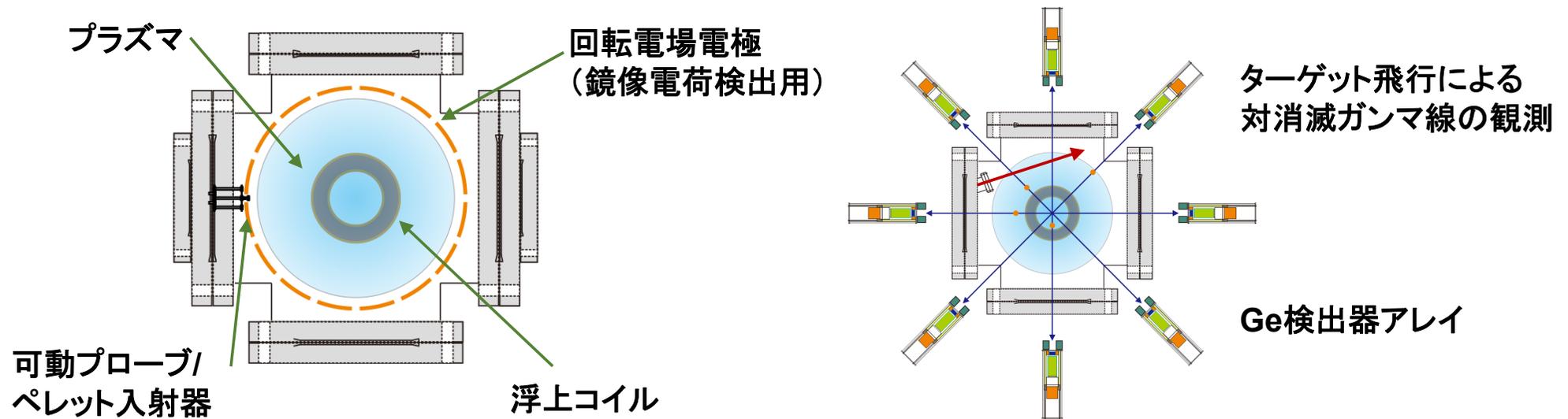
周方向の電場形成(左)と単一粒子描像の径方向圧縮(右)



- 揺動のモード数の特定
- 既存以外のモード探索
- トロイダル系のグローバルな揺動/不安定性モード検証
- モード間結合による輸送
- 古典輸送, 乱流輸送

定式化・アプローチ8: ペアプラズマの構造, 安定性の評価

- 運動論の予測する急峻な密度勾配を持つ**構造の自己組織化**過程の解明



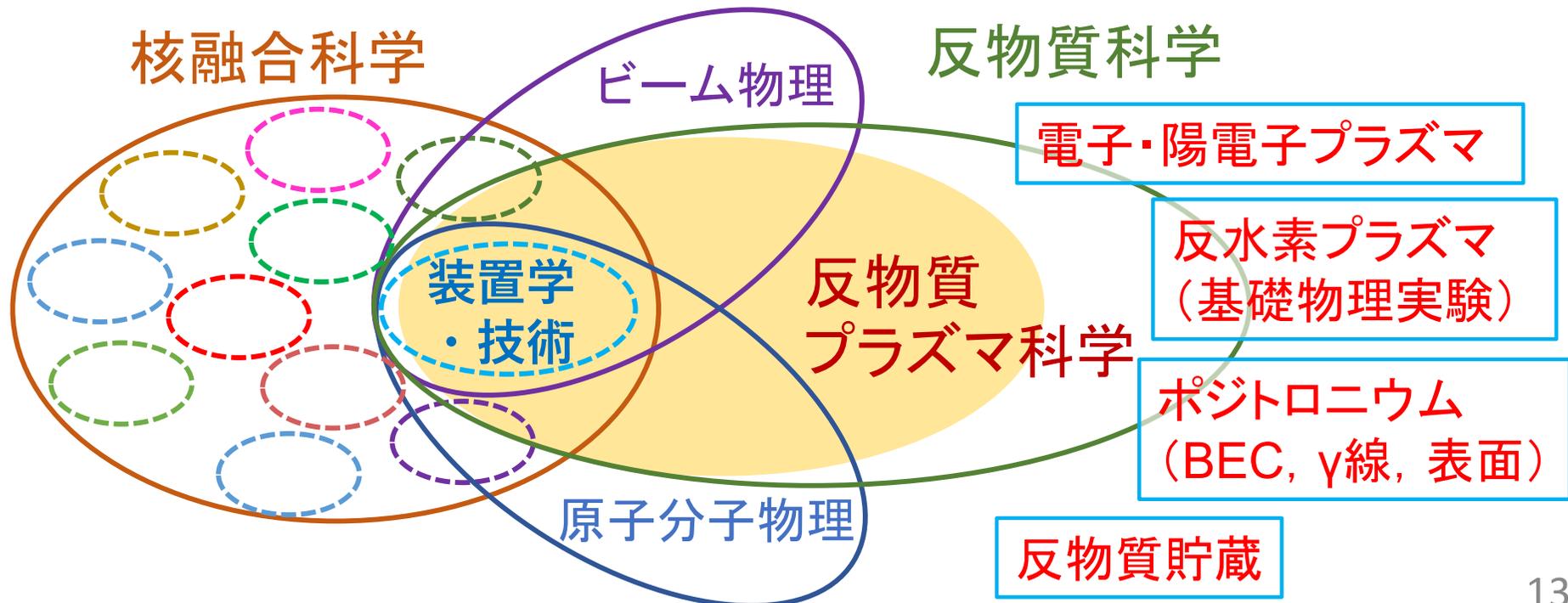
- 分割電極上の鏡像電荷による電位分布再構成
 - 単一粒子プラズマ(または電荷不均衡)に適用
 - 荷電分離, 非中性度の推定
 - プラズマ生成時, ペアプラズマ状態の検証
- 消滅ガンマ線の計測による密度推定
 - 残存中性粒子との消滅ガンマ線の計測
 - ターゲットの入射・飛翔による位置推定
 - トモグラフィ手法による密度再構成

- イオン・電子系と異なる密度勾配限界を示すか?
- 不安定性の駆動は, 密度勾配を決定する主機構か?

最も基本的な反物質ペアプラズマ(e^+/e^-)を実現し物性を解明

学際的展開

- 核融合分野で得られる**プラズマとしての粒子群の閉じ込めと制御**の技術と装置学の知見を, 反物質科学と融合
- 電子・陽電子プラズマの実現と物性解明が第一の目標
- より進んだ研究課題として, 将来的に新しい閉じ込め方式による反水素の高効率合成等への寄与が考えられる



独自性・優位性など(研究の特徴)

- 電子・陽電子群のプラズマ条件を満たすことは困難で、これまで実現していない
 - 10^{10} 以上という大量の陽電子を集積し、更に
 - 同数の電子と同時捕獲することが挑戦的、実験的に未踏の領域
- 核融合科学に基づく反物質プラズマ科学の展開により、これを解決する：
大強度のパルス化陽電子ビームを磁気浮上ダイポールに導入し、電子と共に密度 $10^{11-12} \text{ m}^{-3}$ 、温度 1eV 以下のプラズマ状態を実現する

線形加速器と減速+蓄積法を
組み合わせ大量陽電子捕獲

+

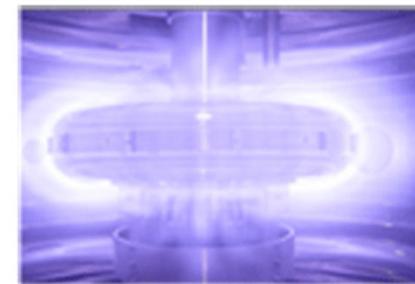
人工磁気圏への大量陽電子
のパルス入射+電子と共存



ペアプラズマ
の実現へ



2020
Higaki Michichio+
Appl. Phys. Exp.



2006
Yoshida+,
PFR

- 他のアプローチ(水素イオン, ミラー)との連携・比較研究, また, より複雑な反物質プラズマ(反水素プラズマetc.)への展開

2017 Oohara+ PoP 2020 Higaki+ App. Phys. Exp.