

2023年度 核融合科学研究所 ユニット成果報告会

プラズマ装置学ユニット

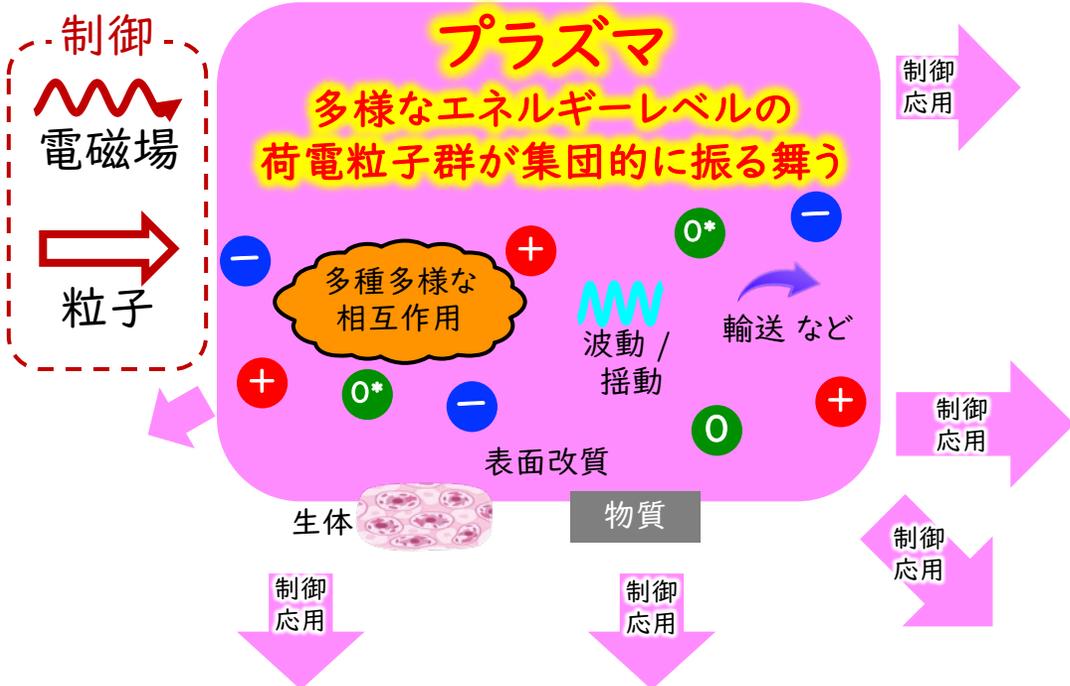
所員 (2名)	Cross Appointment (C.A.), 客員教員	所外メンバー (五十音順)	
津守 克嘉 ◎ <u>中野 治久</u>	○ 岡田 信二 (中部大, C.A.) ○ 斎藤 晴彦 (東大, C.A.) ○ 柴田 崇徳 (KEK, C.A.) ○ 高橋 和貴 (東北大, 客員)	安藤 晃 (東北大) 有川 安信 (阪大) 石 禎浩 (京大) 上杉 智教 (京大) 大嶋 晃敏 (中部大) 大原 渡 (山口大) 奥野 広樹 (理研) 木野 康志 (東北大) 剣持 貴弘 (同志社大) 笹尾 真実子 (同志社大) 佐藤 元泰 (中部大) 利根川 昭 (東海大) 中井 光男 (阪大) 波場 泰昭 (日大)	桧垣 浩之 (広大) 比村 治彦 (京工繊大) 森 義治 (京大) 三宅 泰斗 (理研) 松本 新功 (徳島文理大) 山岡 人志 (理研) 山下 琢磨 (東北大) ○ 和田 元 (同志社大) Christian L. Mahinay (Ateneo de Manila Univ.) Magdaleno R. Vasquez Jr. (Univ. of the Philippines Diliman)
下線 ユニット長 ◎ ユニット研究戦略会議 議長 ○ ユニット研究戦略会議 所外メンバー (議決権有:5名)			

ユニットの研究目的と目標

核融合研究ではゲームチェンジャーとなる破壊的イノベーションが重要



プラズマの複雑な集団現象に関する学理を進化させることで、革新的なプラズマ技術を生み出す挑戦



基本理念

多様なエネルギーレベルを有した荷電粒子群の集団的特性を理解し、その特性を利用して荷電粒子群を制御し応用する。

研究目的

プラズマ・核融合科学実験で培ってきた最先端の計測・制御技術の更なる高度化および新たな計測・制御技術の創出をするとともに、常に視野を広く持って他分野と連携・融合を行い、これら技術を用いて自然科学（応用科学を含む）の深化に質的变化もたらす手法および自然科学の新展開を追究する手法の探求する。

- プラズマ（荷電粒子）計測・制御技術の高度化
- 自然科学の深化と新展開
- 異分野や産業応用への展開

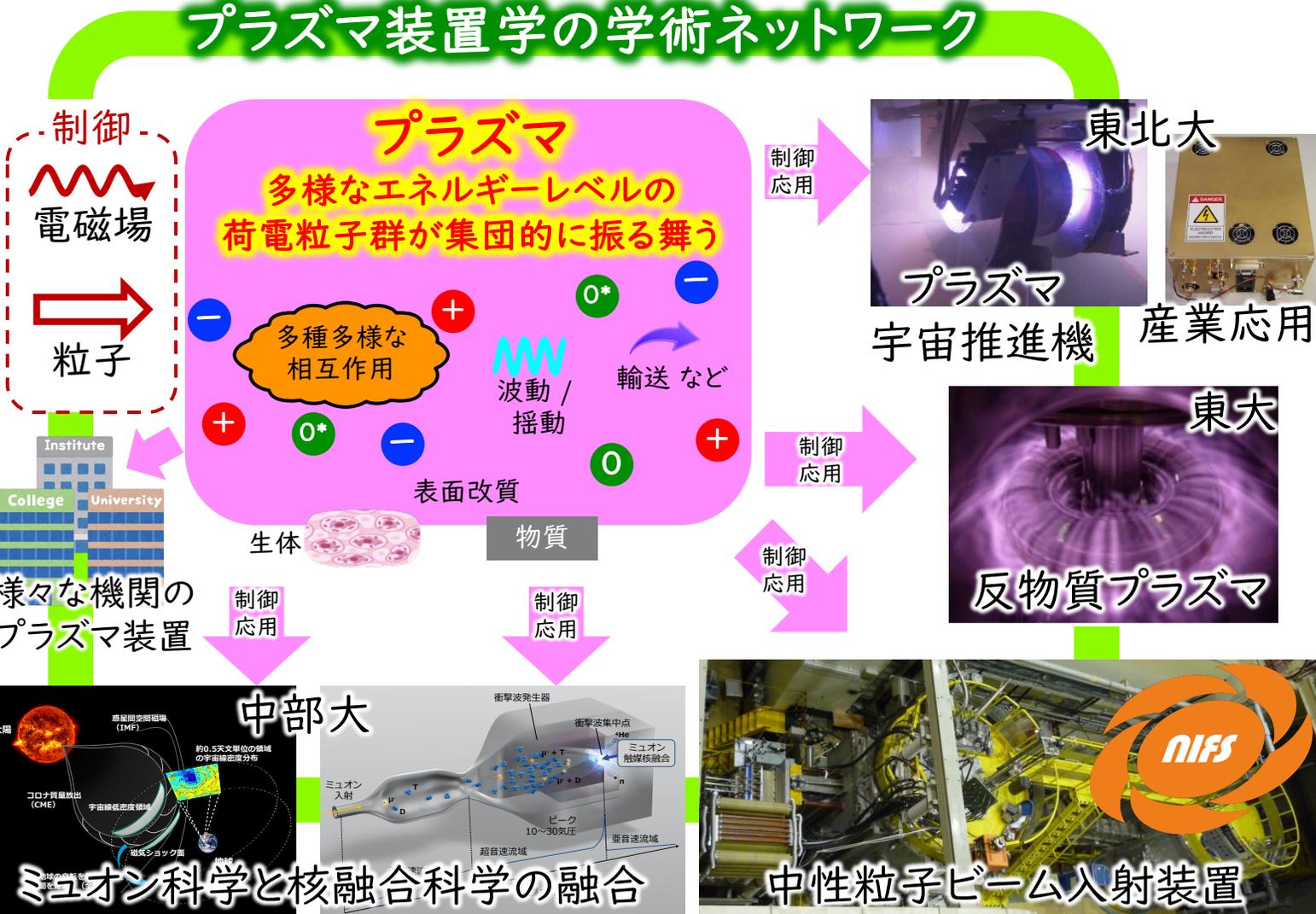
ユニットの研究目的と目標

目標

2023年度の主たるプラズマ関連装置を用いた研究テーマを、

- ❖ 中性粒子ビーム入射装置の高度化 (負イオン源 (加速器用を含む))
- ❖ 反物質プラズマ科学の開拓
- ❖ ミュオンと核融合科学の融合
- ❖ 電気推進機の高度化と産業応用

として各研究テーマの研究を進化させるとともに、プラズマ装置学の学術ネットワークを構築して各研究テーマ、分野間の連携・融合を目指す。



戦術

アカデミックプラン

ムーンショット型研究開発制度
目標10へのユニット、NIFSを
超えた申請議論 他

- ❖ 各研究テーマを独自に深化させるため、関連分野の情報収集をし、独自に予算獲得し、研究を遂行。
- ❖ 研究テーマ間に内在する知見と技術の情報共有をするとともに連携に向けた議論を行うとともに、連携を実現するために予算獲得を目指す。
- ❖ 各研究テーマの相互理解や学際的な広がりを目指したセミナー開催

プラズマ装置学の学術ネットワーク



科研費 基盤B (23K25855) (和田 (同志社大))



科研費 基盤S (23H05442) (高橋 (東北大))
民間企業 共同研究 (中野)

NINS Open Mix Lab (OML) に申請 (高橋、中野)

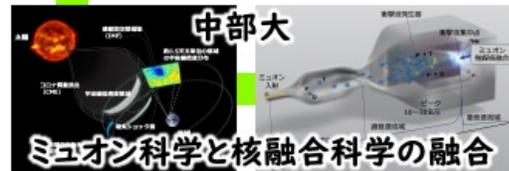


科研費 基盤S (22H04936) (斎藤 (東大))

科研費 挑戦的研究 (萌芽) (23K17680) (中野)

プラズマ装置学ユニットセミナー

1. U. Fantz (Division Head of ITER-Tech. & Diag., IPP)
2. G. Serianni (CNR-RFX / Project Leader of ITER-NBTF)
3. 柴田崇統 (KEK / NIFS)



科研費 基盤A (23H00120) (岡田 (中部大))



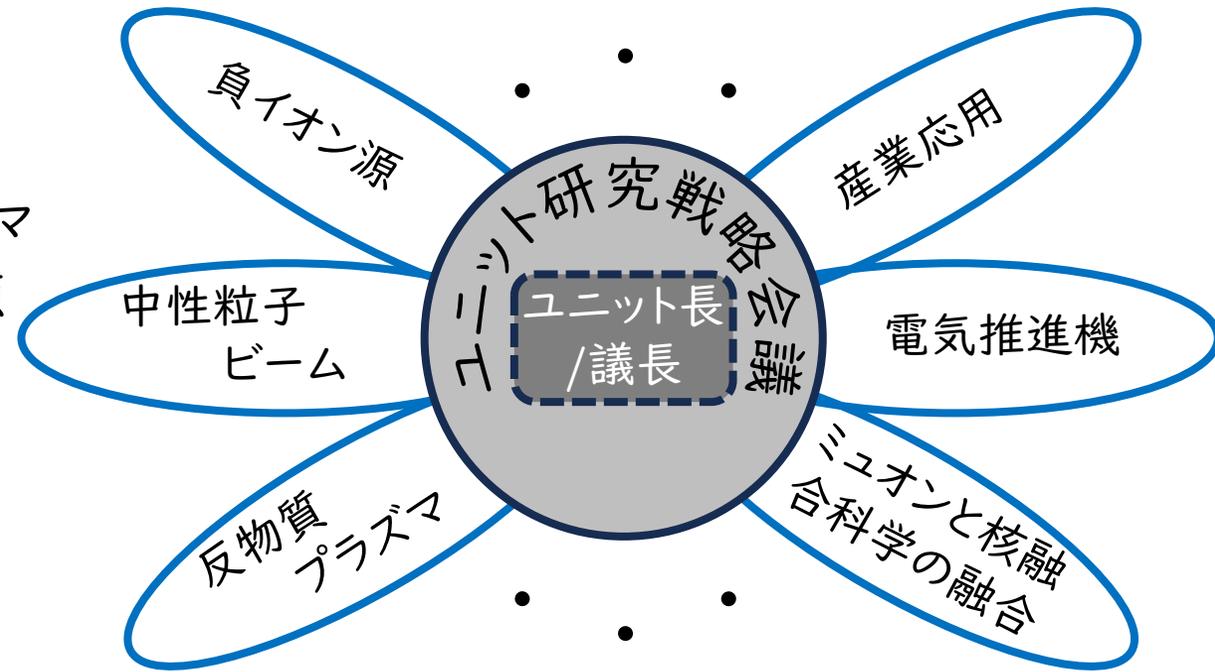
NINSネットワーク型
研究加速事業 (中野 (分担))
原型炉開発研究 (津守)
ITER機構 受託研究 (津守)
量研機構 受託研究 (津守)

協力体制

ユニット長/ユニット戦略会議議長を中心とし、
ユニット研究戦略会議メンバーを核として、各研究テーマ

- 中性粒子ビーム入射装置、加速器用負イオン源
- 反物質プラズマ
- ミュオンと核融合科学の融合
- 電気推進機、プラズマ技術の産業応用など

間で情報共有を行う体制にある。



思うようにいかない点, その原因分析と解決思案

- ユニット構築期に4名であった所員メンバーが2024年度に1名となった。
- クロスアポイントメント教員や客員教員の制度を利用して所外との連携を取っているが、より幅広い分野間連携や学際化を目指すためにはユニットメンバーの増員が望まれる。
- この問題の解決に向けて人事を含むアカデミックプランの提案やNIFS人事公募への応募の勧誘を行う。

特筆される成果と見込み

- ❖ 中性粒子ビーム入射装置の高度化（15分（質疑含む））
中野治久
- ❖ Propulsive and industrial plasma devices（15分）
高橋 和貴（東北大, NIFS客員教員）
- ❖ ダイポールによる学際研究（15分）
斎藤 晴彦（東大, NIFSクロスアポイントメント教員）
- ❖ ミュオン科学（15分）
岡田 信二（中部大, NIFSクロスアポイントメント）
- ❖ 全体討論（5分）

<中性粒子ビーム入射装置 (NBI) の高度化>

RF負イオン源の大きなビーム発散角問題解決に向けた FA/RF Hybrid放電型負イオン源実験

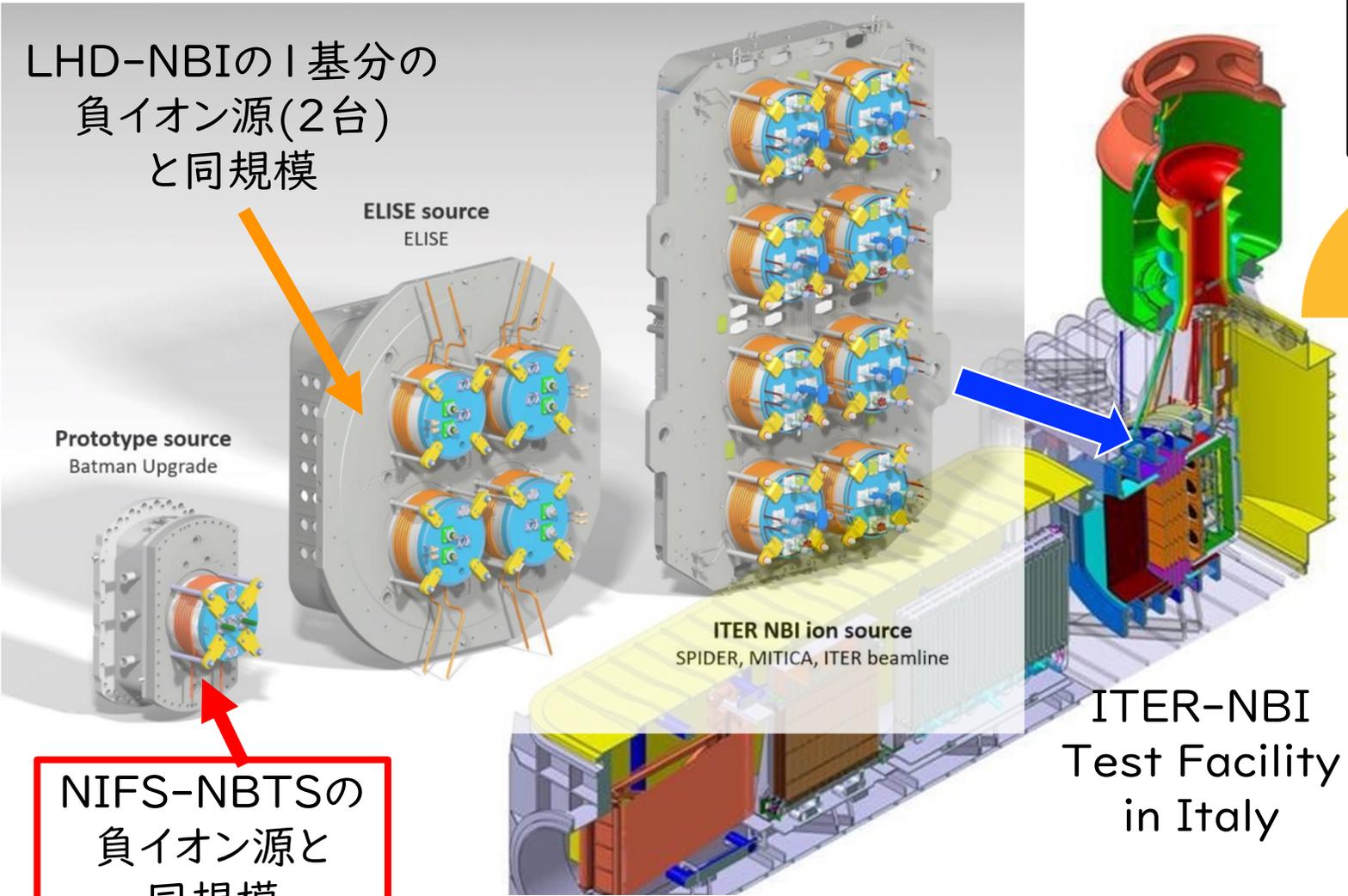
中野治久

自然科学研究機構 核融合科学研究所
プラズマ装置学ユニット

2024.05.08.

世界とNBI研究とNIFSのNBI研究の立ち位置

ITER-NBI用負イオン源開発



LHD-NBIの1基分の負イオン源(2台)と同規模

ELISE source
ELISE

Prototype source
Batman Upgrade

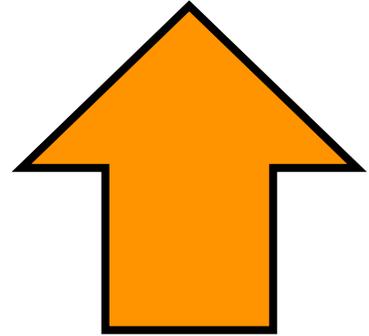
ITER NBI ion source
SPIDER, MITICA, ITER beamline

ITER-NBI
Test Facility
in Italy

NIFS-NBTSの負イオン源と同規模 (~100 keV)

ビームエネルギー: 1 MeV@H⁻, D⁻

技術統合による装置全体の性能達成を目指した開発
by ITER, QST等.



等

各要素で実現困難なことや先進的な手法を
物理学・工学的に研究
by NIFS, 大学等

NBI工学 (ITER & 原型炉を見据えて)

ITER

- 加速電圧: 1 MV
- 負イオンビーム電流: 40 A
- 低随伴電子電流比: < 1
- **ビーム発散角: < 7 mrad**
- 1時間連続運転 他

高出力、低発散角ビーム、長時間運転の基盤技術の確立 他

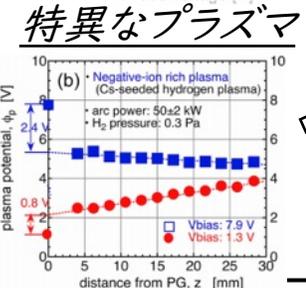
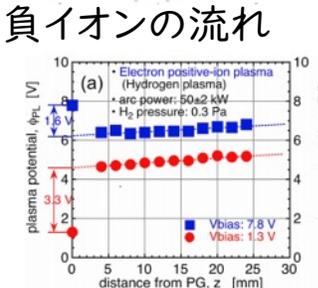
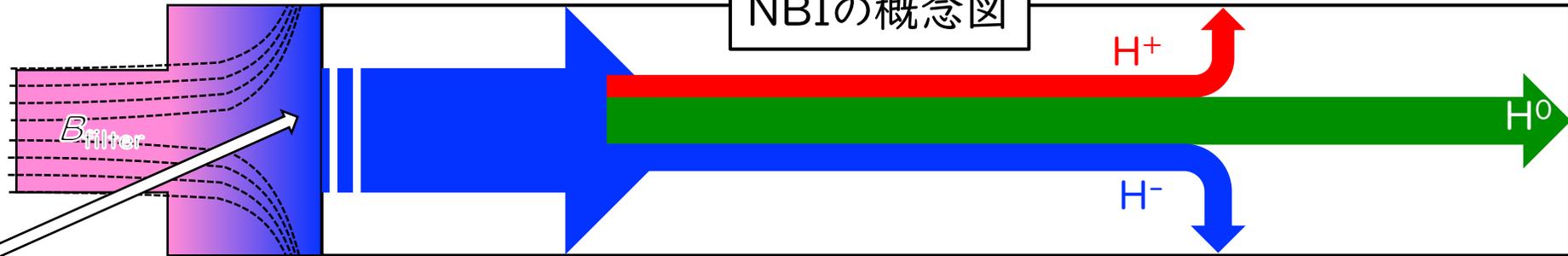
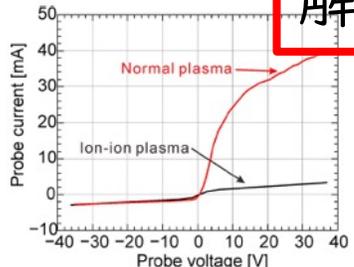
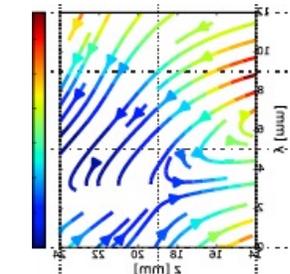
原型炉

- メンテナンスレス化
 - セシウムフリー大電流負イオン源生成技術の確立
 - 高周波負イオン源のメンテナンスレス化
- 高効率化 (経済性向上)
 - 光中性化 (プラズマ中性化とのHybrid)、低ガス圧化
- NBI、更には核融合炉システムとしての要素統合 他

各要素に関して物理/工学的な研究 (学術研究) による課題解決が不可欠。

未だ性能達成に向けて楽観視できない。

様々な方法が提案され、一部、初期的な検証されているが、先が見通せる段階にない。



電位分布 (特異な性質)

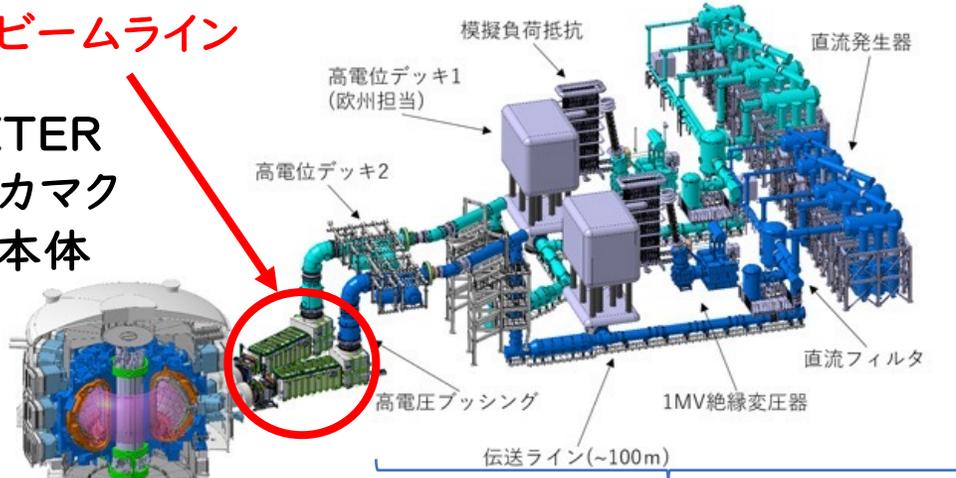
負イオン源

ITER-NBIと高周波 (RF) 負イオン源

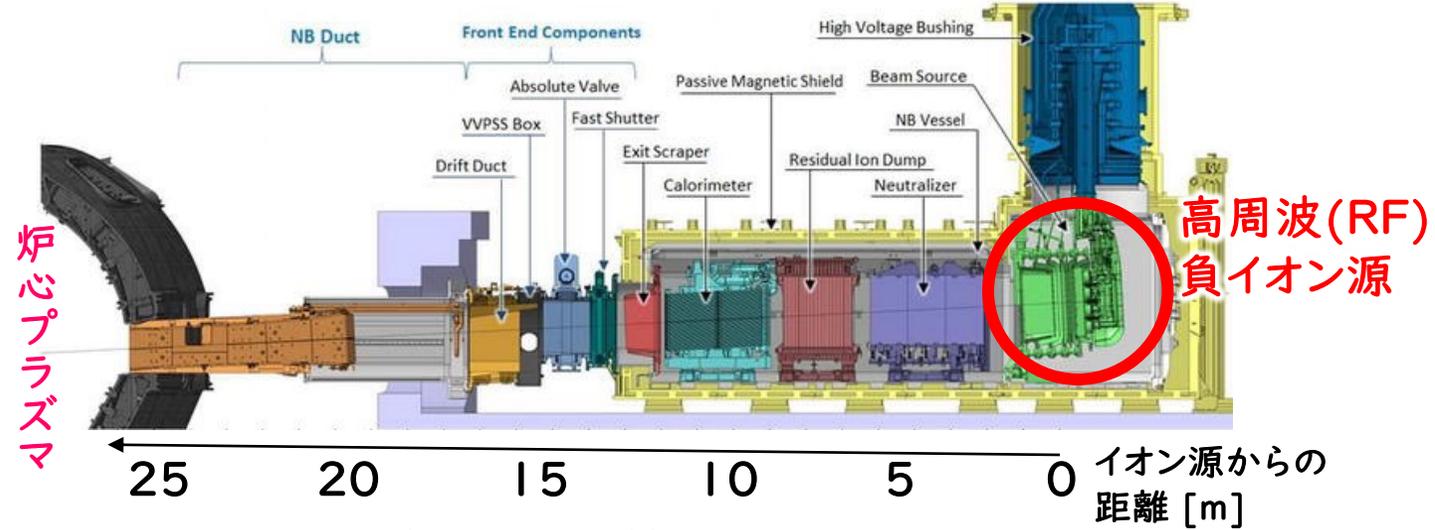
<https://www.intechopen.com/chapters/68732>

NBビームライン

ITER
トカマク
本体



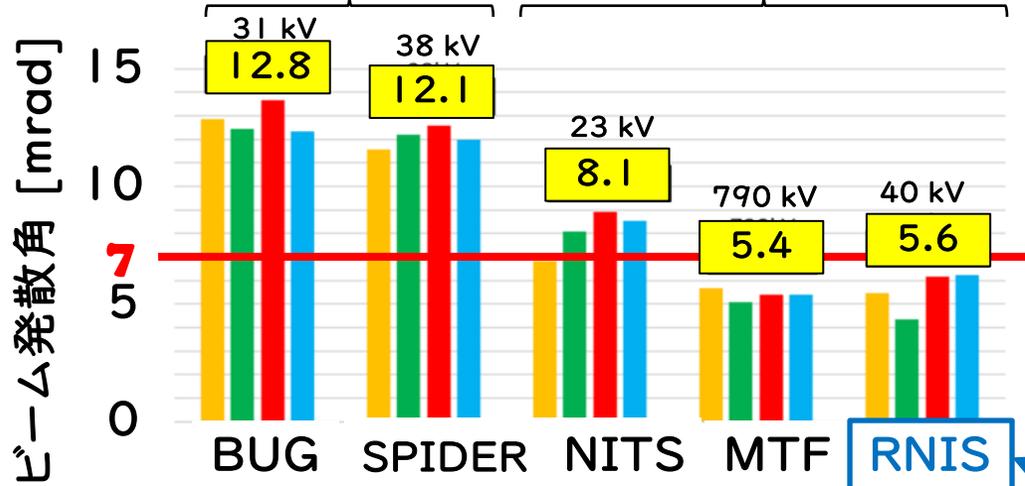
NB電源群



NBビームライン拡大図

RF負イオン源

Filament-Arc負イオン源



ITER-NBの仕様

(H / D)

ビームエネルギー

0.87 / 1 MeV

ビーム電流

46 / 40 A

ビームパルス

1000 / 3600 s

ビーム入射パワー

16.5 MW

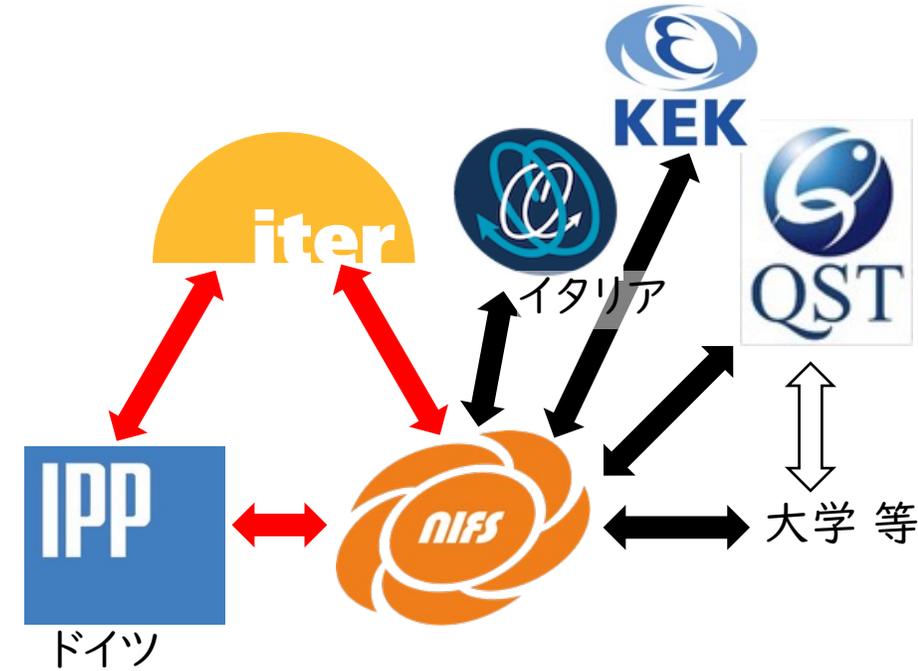
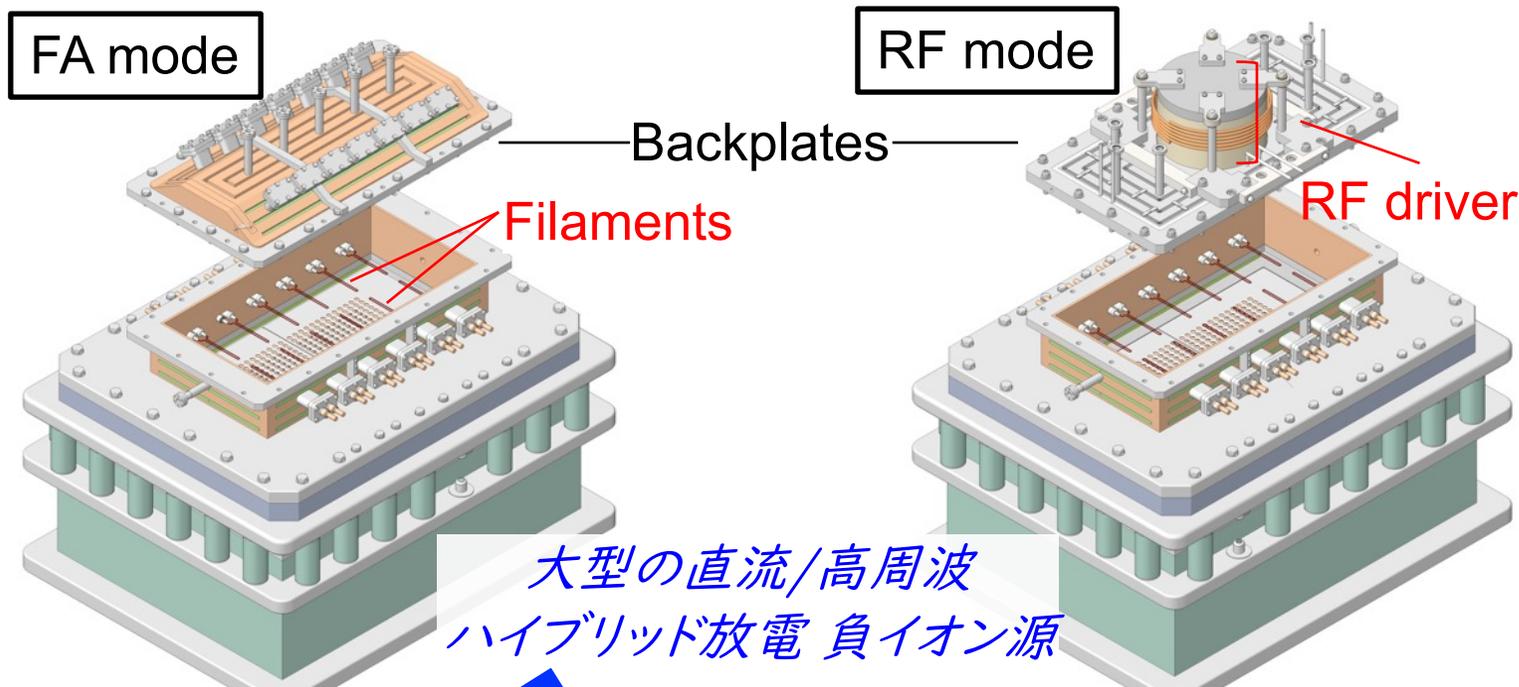
ビーム発散角

≤ 7 mrad

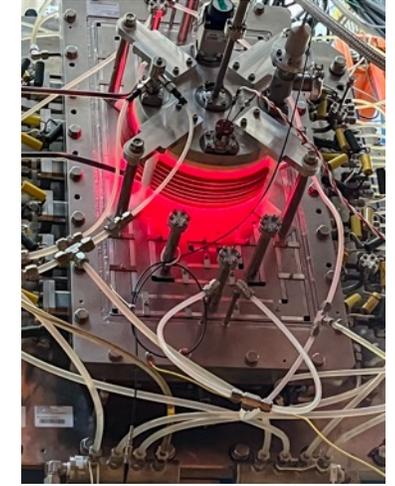
NIFS-RNIS (研究開発用負イオン源)

LHD-NBI用負イオン源と同型

NIFS-RNISのFA/RF Hybrid放電型負イオン源化

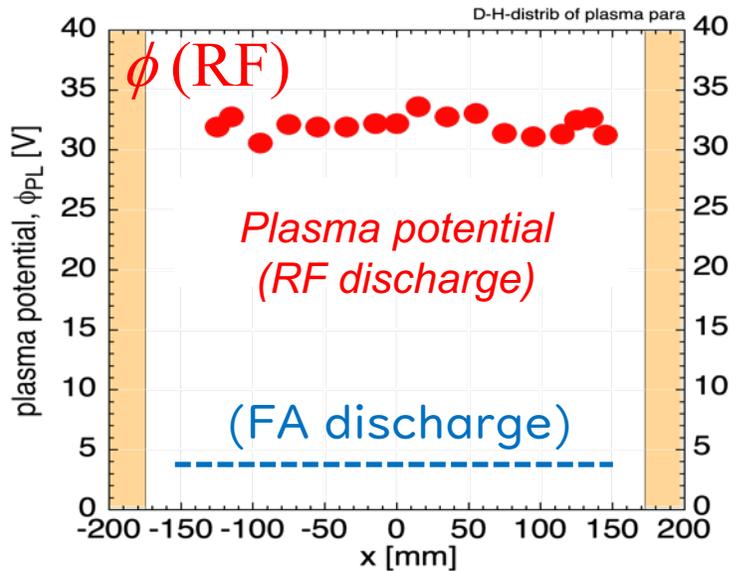
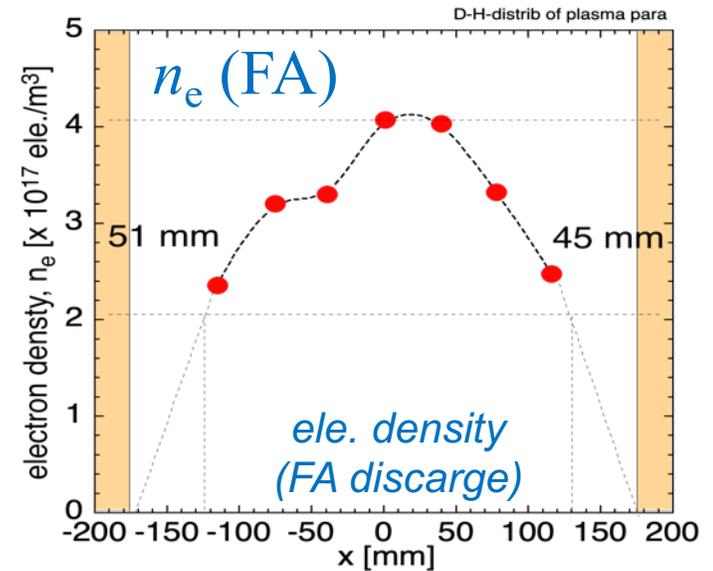
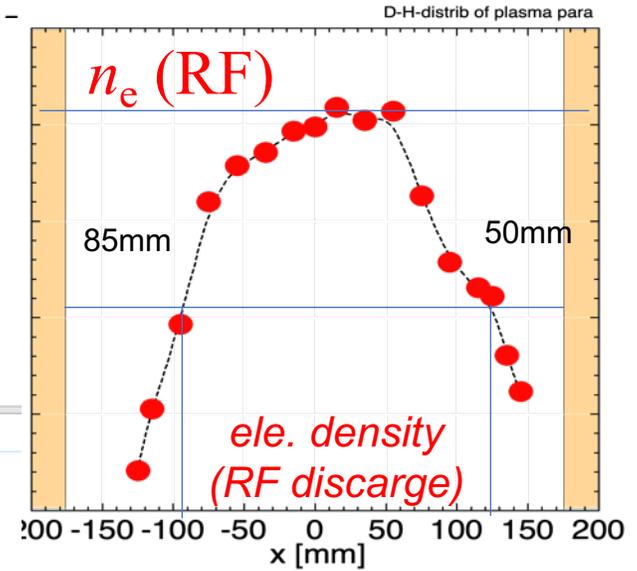
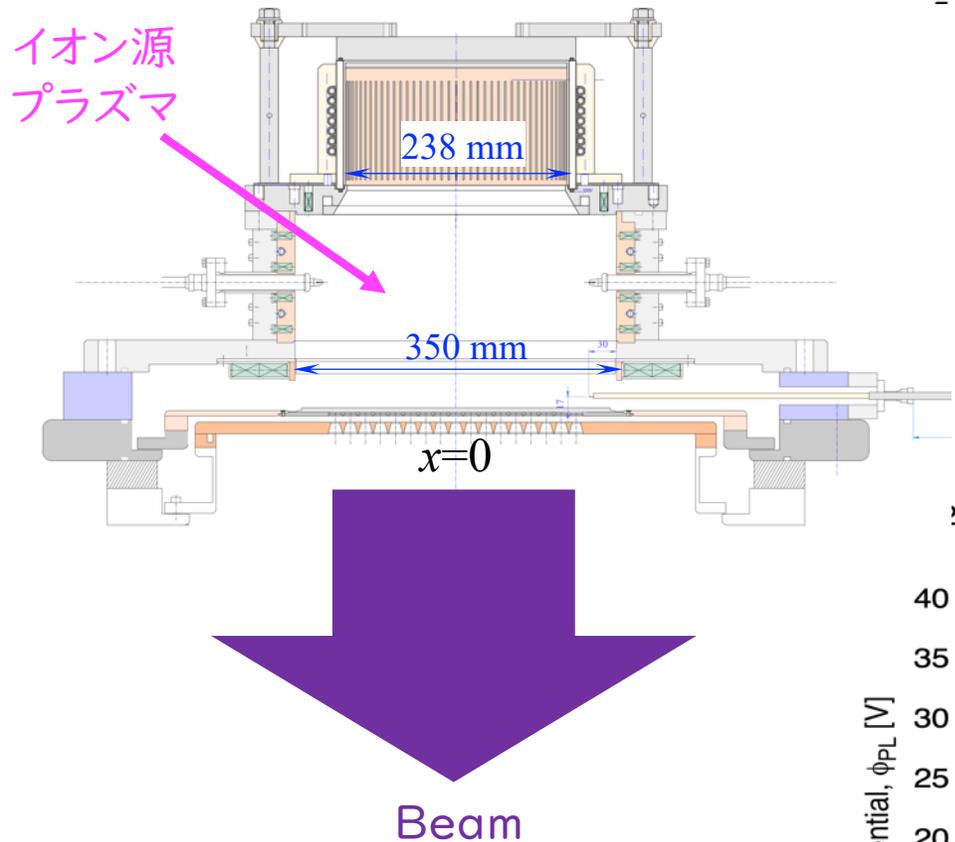


<目的>
FA/RF放電直接比較によるRF負イオン源の大きなビーム発散角問題の物理機構解明とビーム発散角縮小。



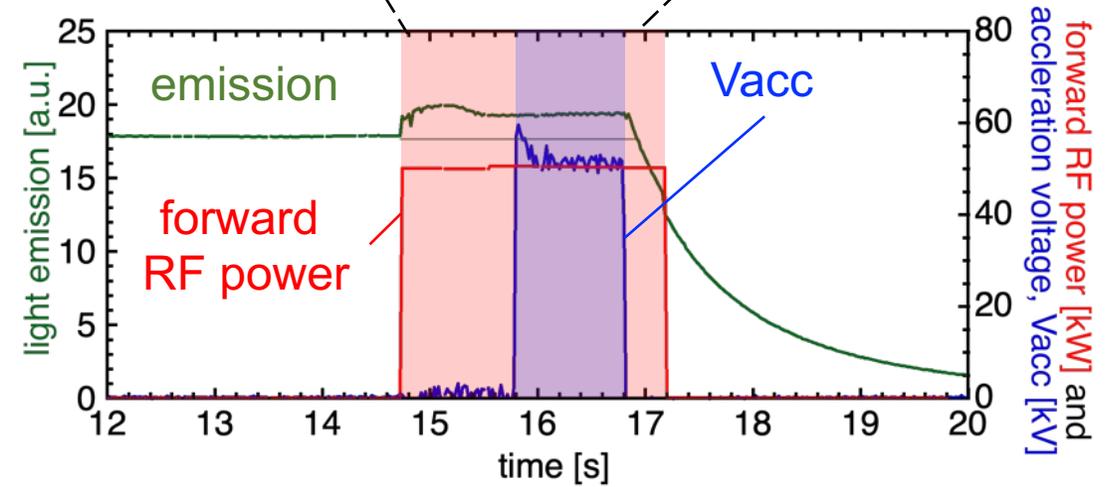
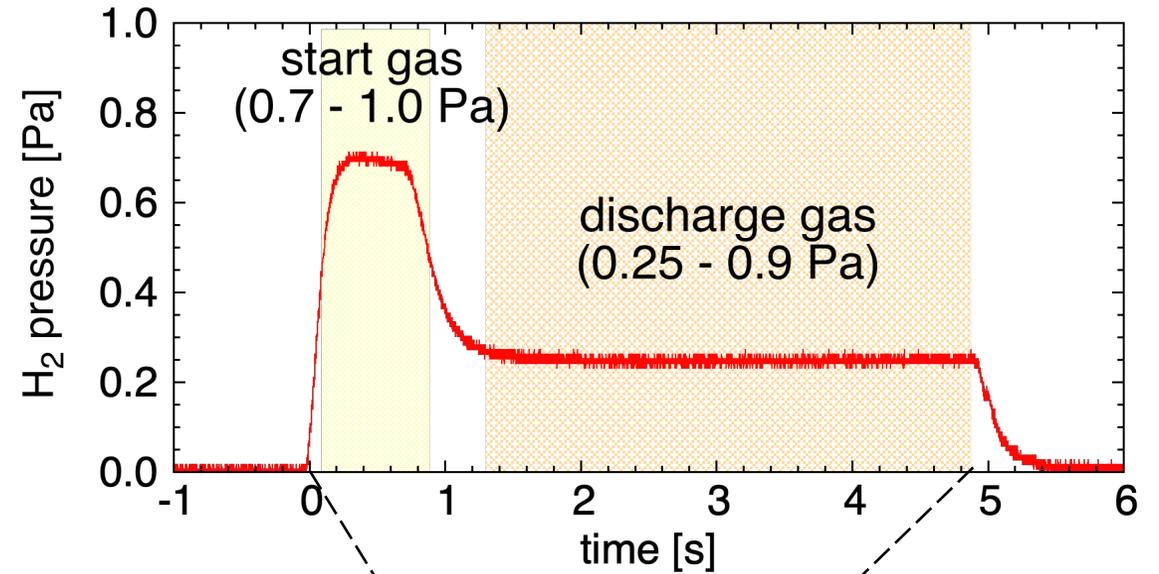
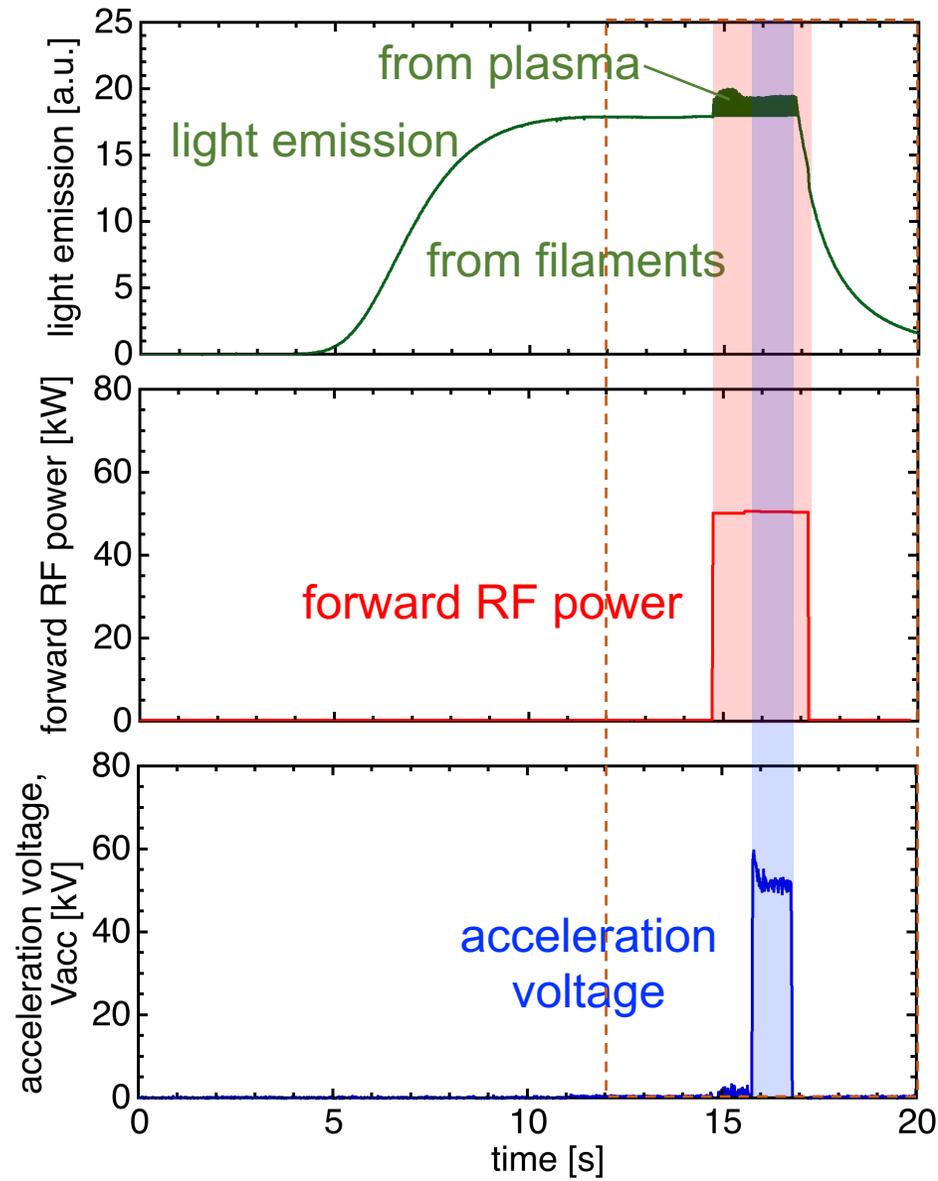
H. Nakano et al., 29th IAEA Fusion Energy Conference (2023)
K. Tsumori et al., 20th International Conference on Ion Sources (2023)

ビーム引出界面近傍のプラズマ分布

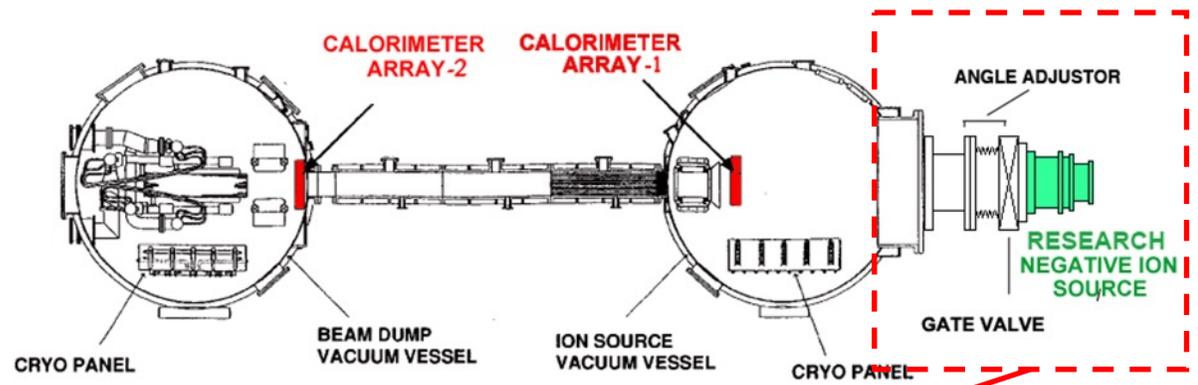


- ❖ 密度分布は両者でほぼ同一。
- ❖ 電位はRF放電の方が1桁程度大きい。

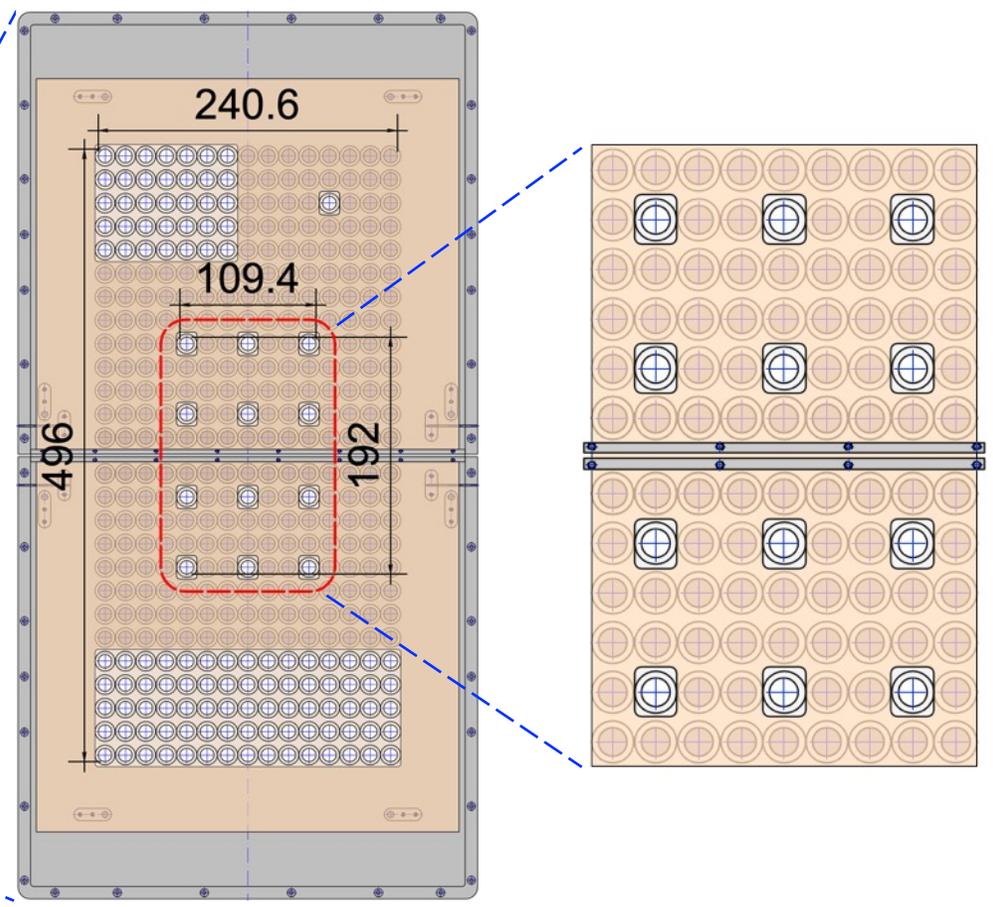
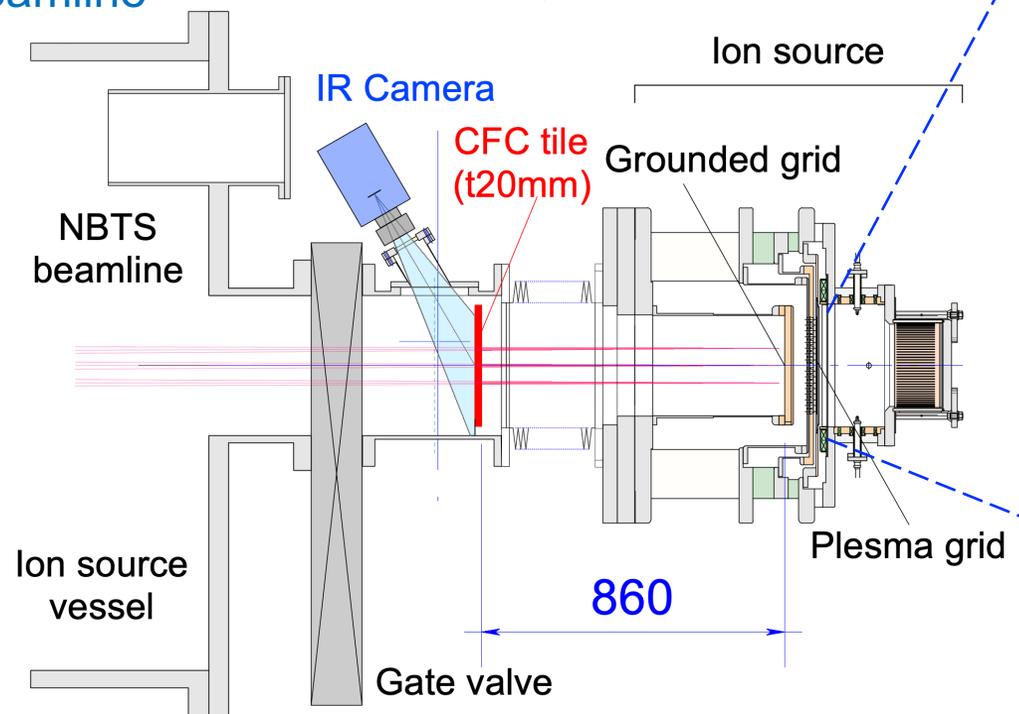
ビーム運転時の放電波形



ビーム発散角計測 (ビームレットモニター)



NIFS NBTS Beamline

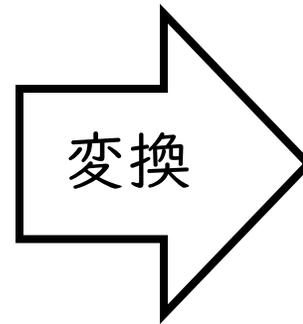
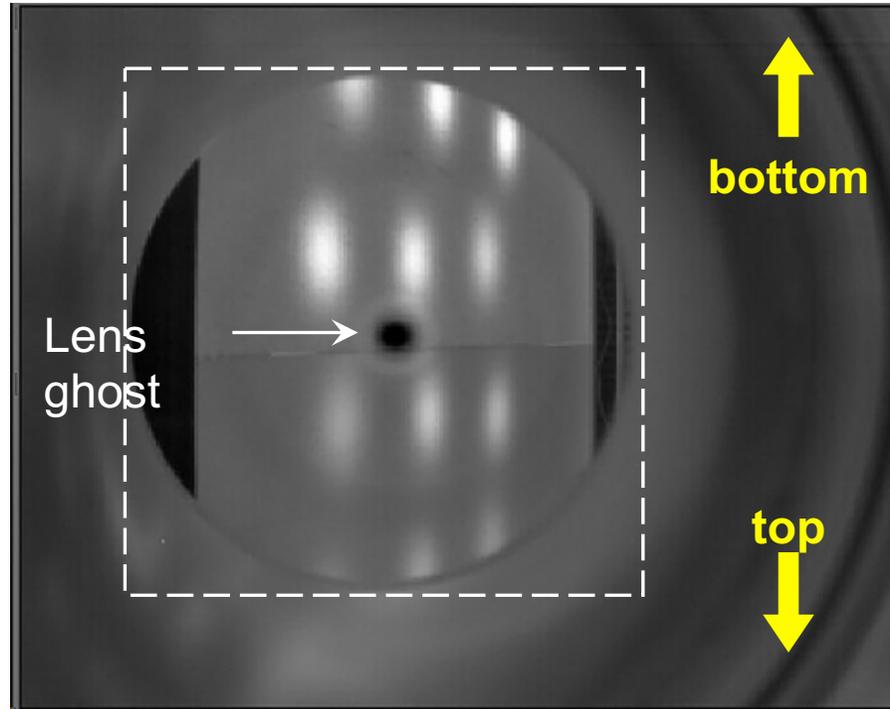


Plasma Grid and mask

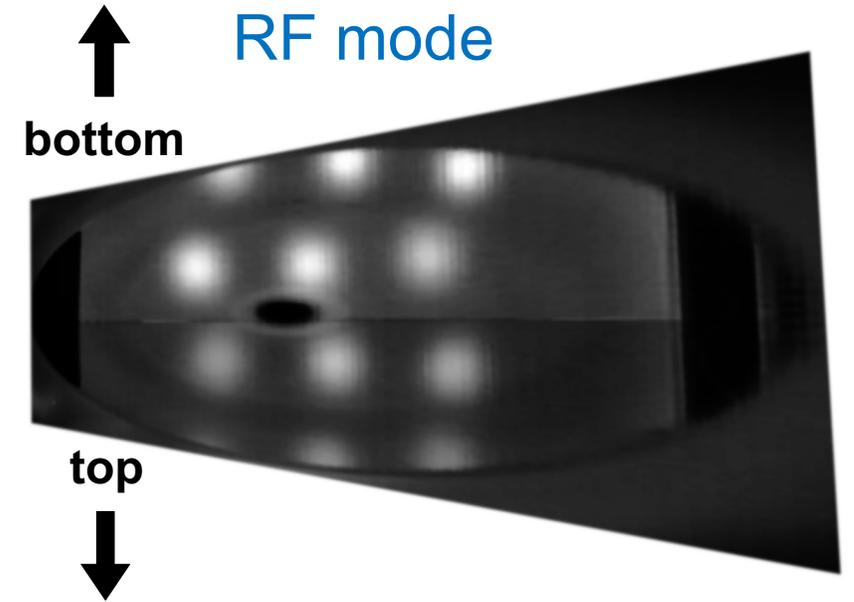
H. Nakano et al., 29th IAEA Fusion Energy Conference (2023)
 K. Tsumori et al., 20th International Conference on Ion Sources (2023)

ビーム発散角計測 (ビームレットモニター)

RF mode



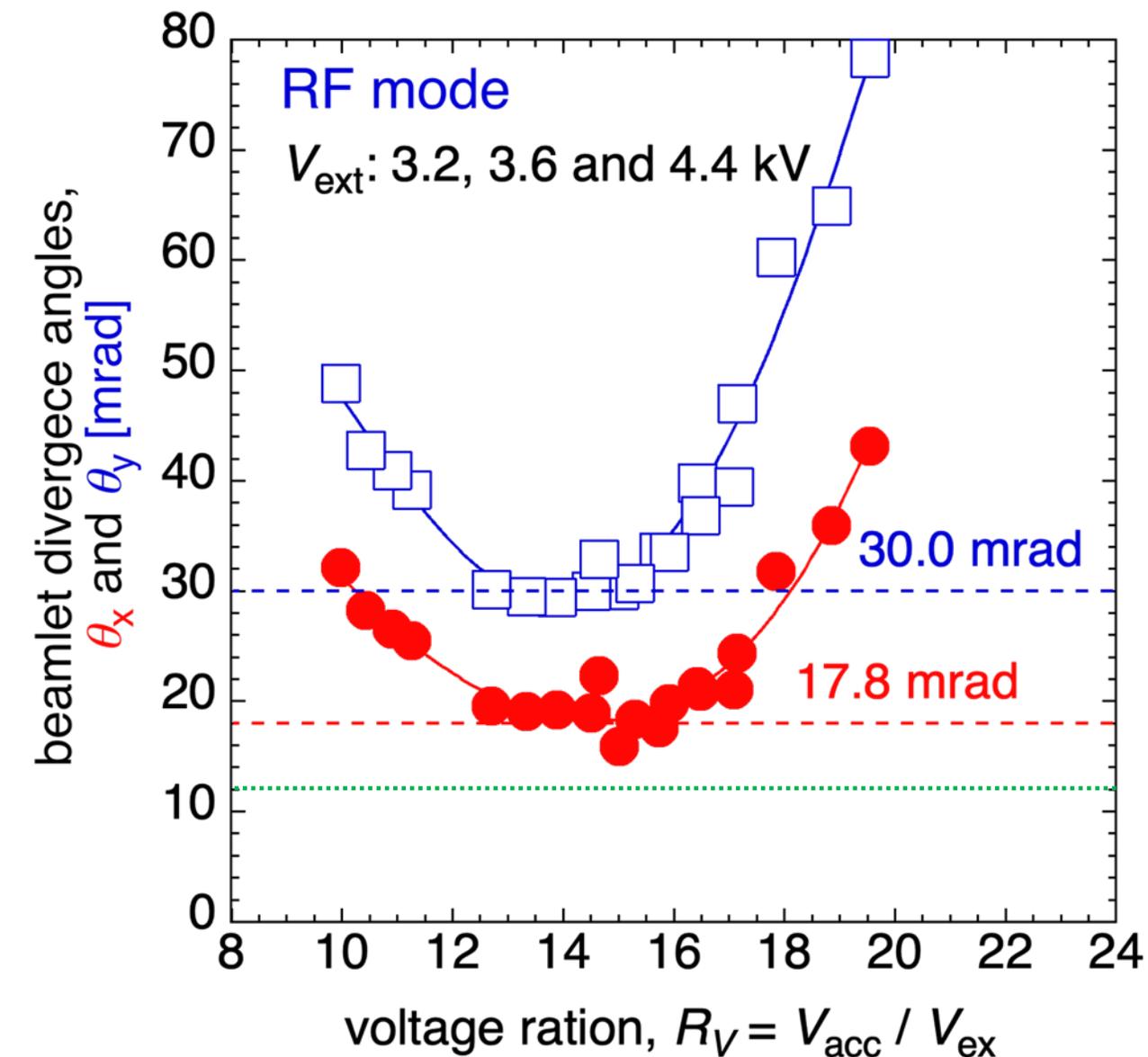
RF mode



Discharge power:	52 kW
Bias voltage:	10 V
H ₂ pressure:	0.3 Pa
ext. voltage:	3.6 kV
acc, voltage:	46 kV

❖ RF modeでビーム引き出しに成功

RF modeでのビーム発散角



❖ 十分なイオン源コンディショニング前ではあるが、NIFS-NBTSにおいてNIFS-RNISのRF modeでビーム発散角を評価できることを実証した。

❖ ビーム発散角

$\min(\theta_x): 17.8 \text{ mrad}$
 $\min(\theta_y): 30.0 \text{ mrad}$

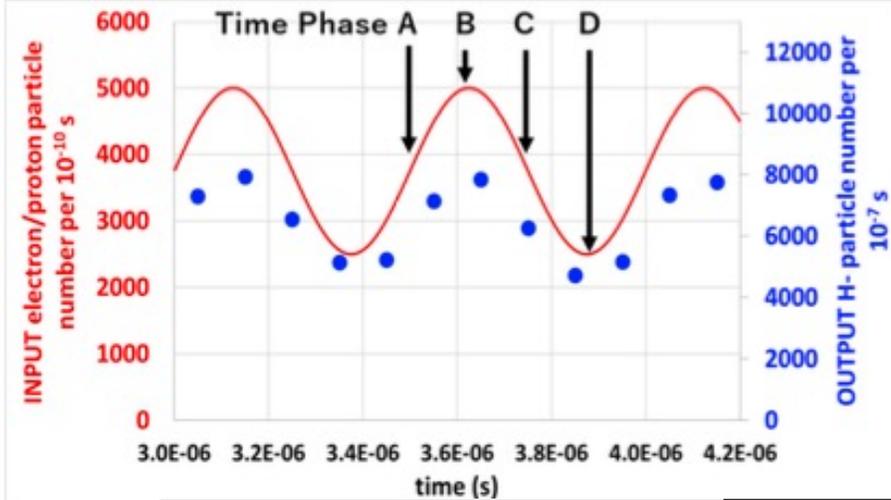
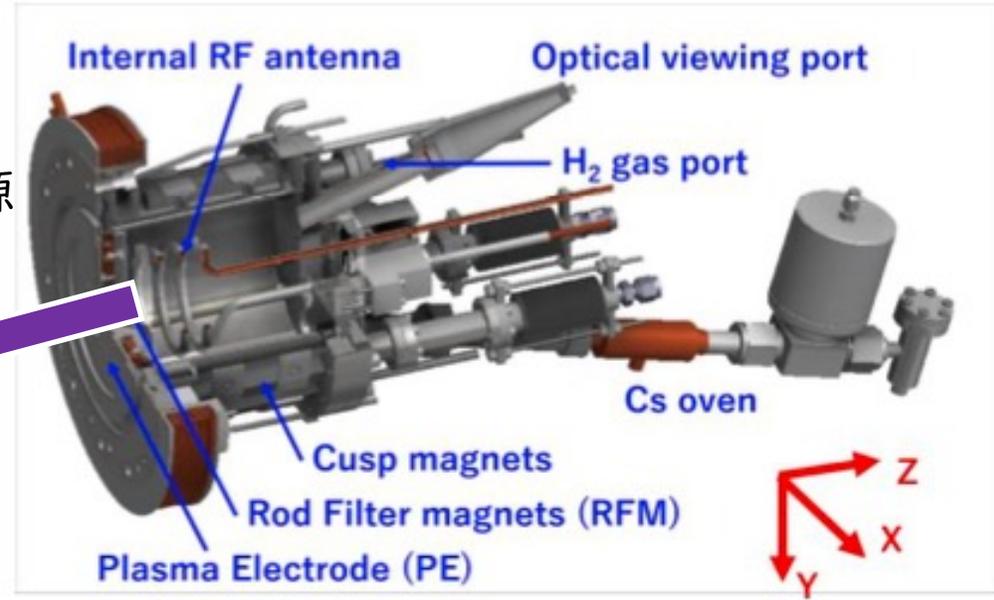
} min ave. $[(\theta_x, \theta_y)]$
23.9 mrad

他のNBI用RF負イオン源の最小値 ($\sim 12 \text{ mrad}$) より大きい。十分なイオン源コンディショニング後にはビーム発散角が縮小することが期待される。

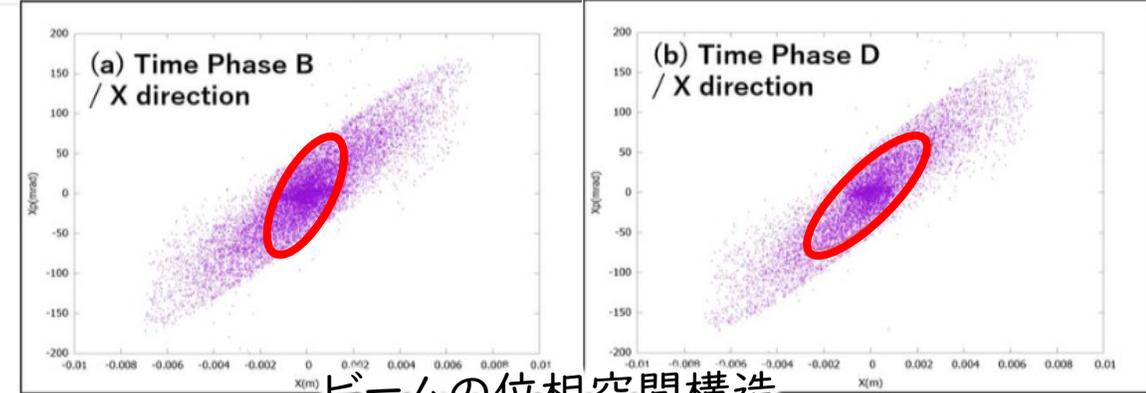
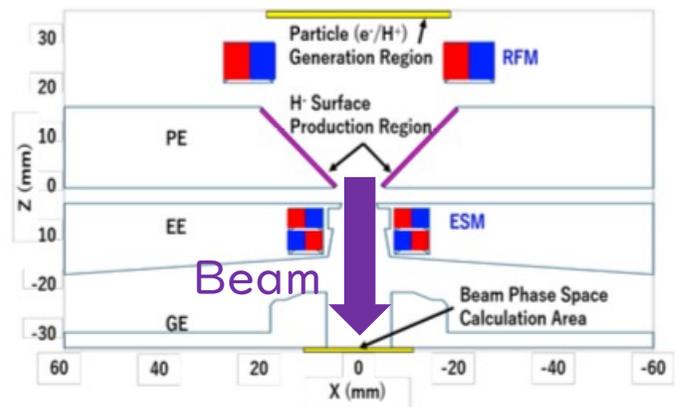
放電領域のプラズマ密度振動とビーム特性の振動

j-parc用
負イオン源

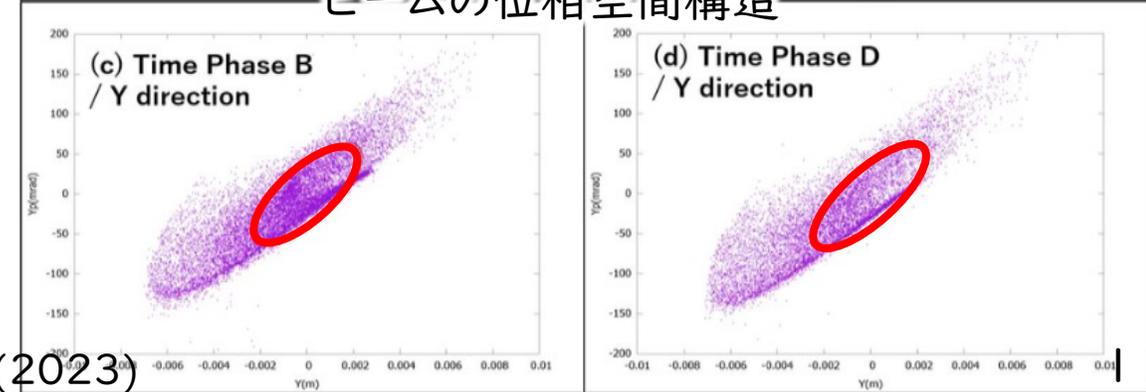
Beam



PIC-MCC
シミュレーション



ビームの位相空間構造



- ❖ シミュレーションにおいて負イオンビーム特性の変化を観測
- ❖ NBI用負イオン源でも同様の現象が起きている可能性。

まとめ

- ❖ FA/RF Hybrid放電化したNIFS-RNISを用いた実験を開始した。
- ❖ ビーム引出界面近傍の密度分布はFAとRFでほぼ同一であったが、電位が1桁程度異なった。
- ❖ RF modeでビームを引き出すことに成功し、ビーム発散角の評価ができることを確認した。
- ❖ j-parc用負イオン源のPIC-MCCによるシミュレーションより、背景粒子数が振動すると負イオン粒子数ならびに負イオンビームの位相空間構造が振動することを確認した。
 - NBI用RF負イオン源の大きなビーム発散角との関連が疑われる。



- <実験機関中、別日に来所>
- Padova大(イタリア)(1名)
- KEK(1名)
- 同志社大(1名)
- <その他の実験参加機関>
- ITER機構
- 量研機構(QST)

Propulsive and industrial plasma devices

Kazunori Takahashi^{1,2}

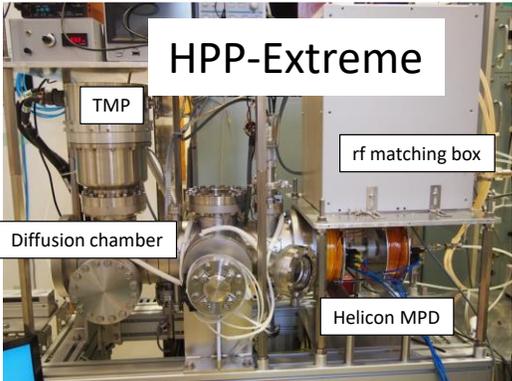
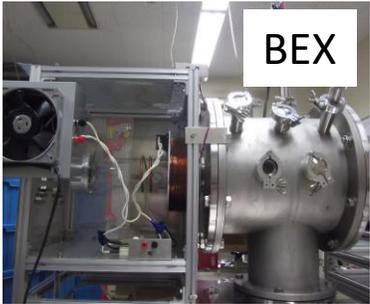
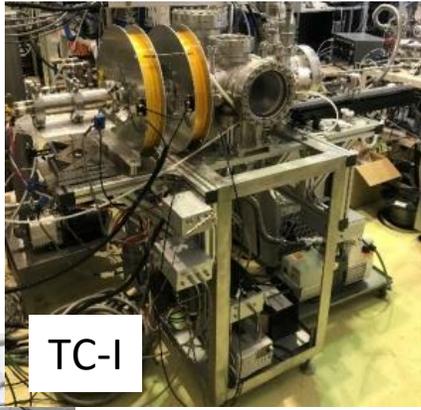
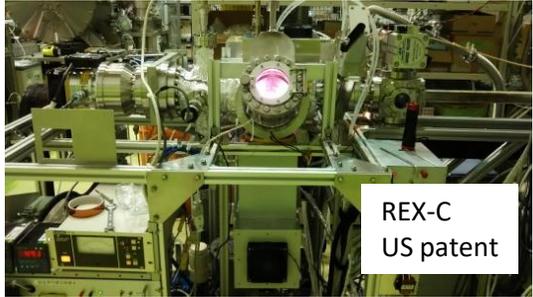
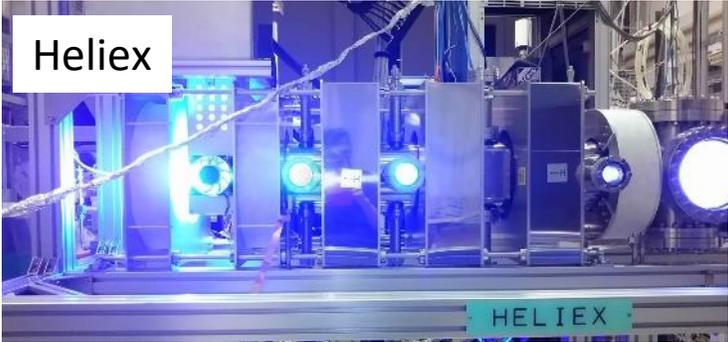
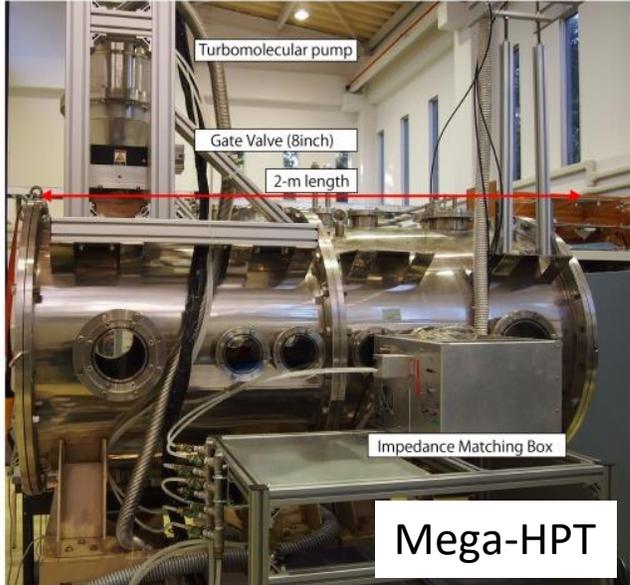
1- Tohoku University

2- National Institute for Fusion Science



Kazu's hand-made lovely plasma reactors

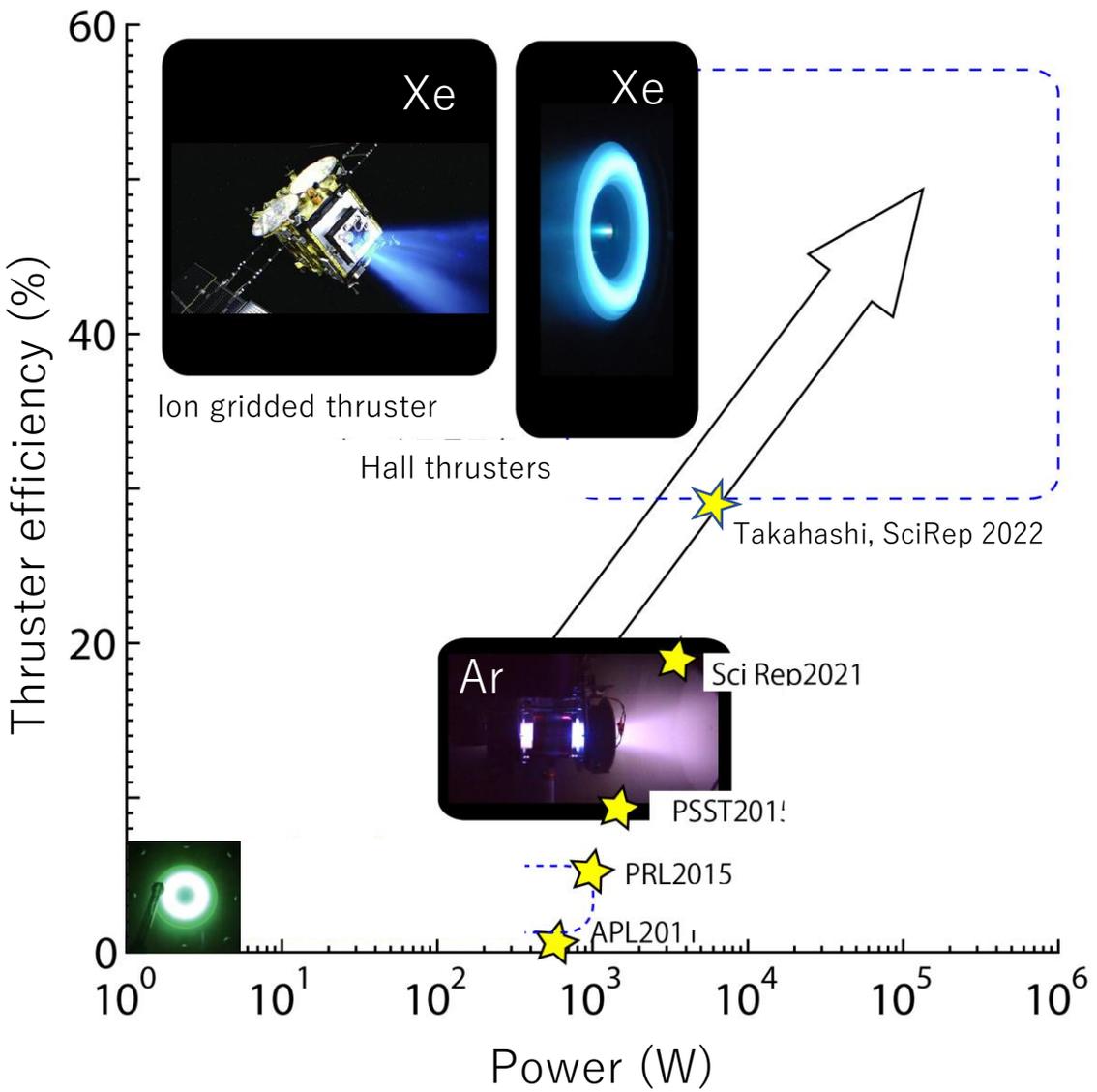
Assoc Prof Takahashi
 4 master course students
 1 part-time administrator



Test for industrial demand

Minimal Sputtering, Etching, Atomic layer deposition

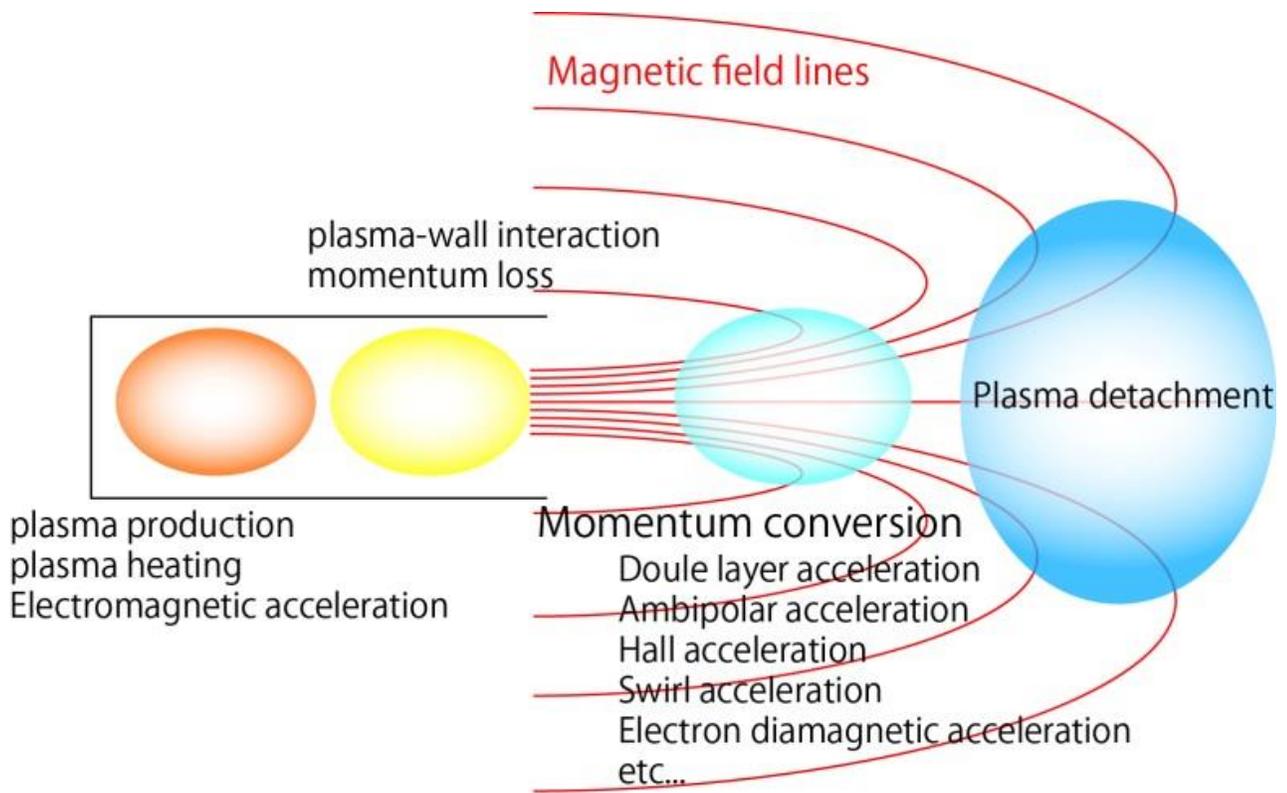
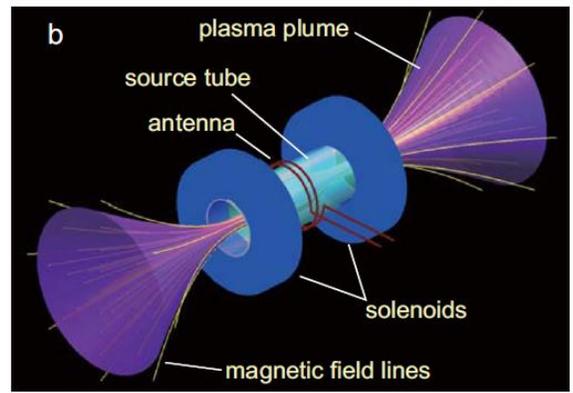
RF and magnetron plasma thruster



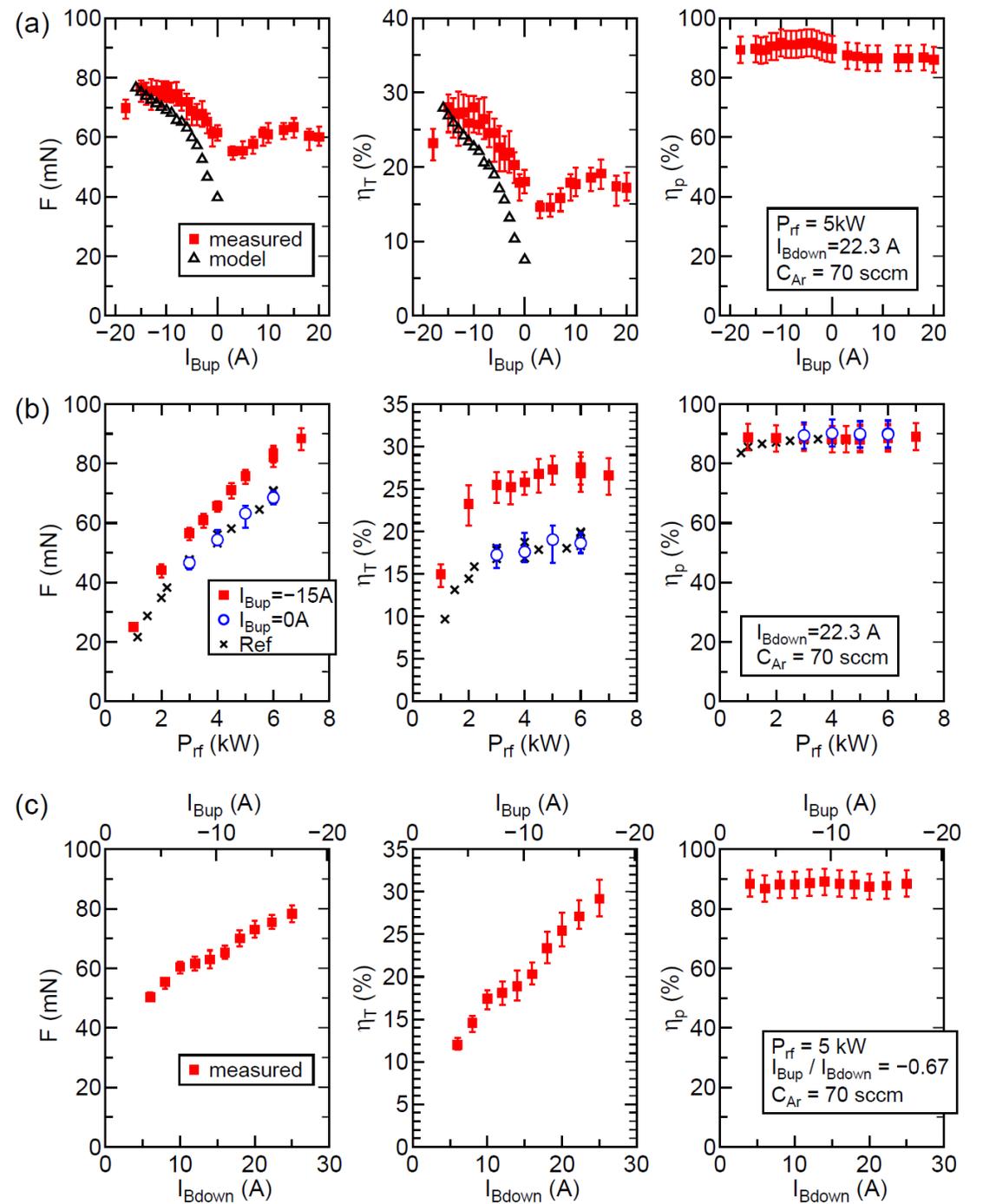
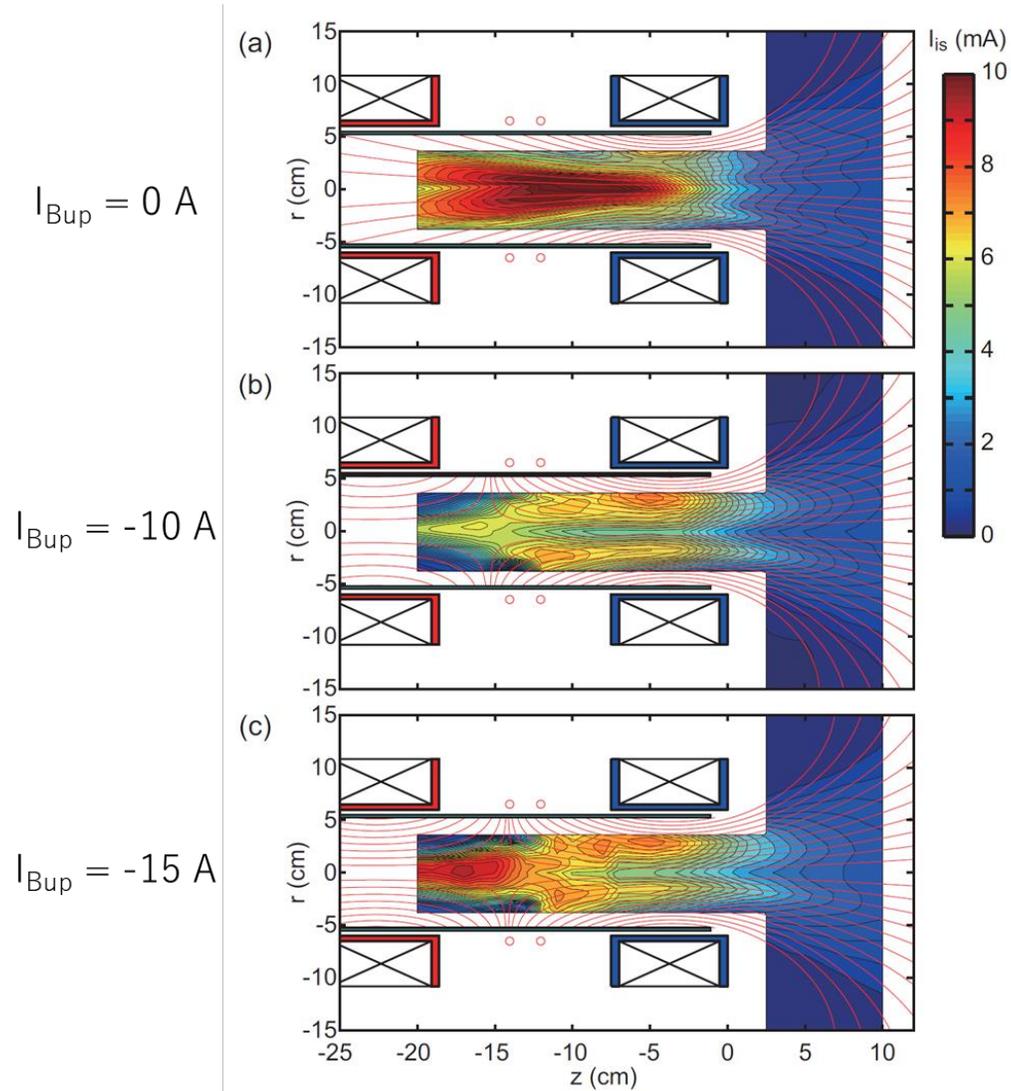
5kW operation



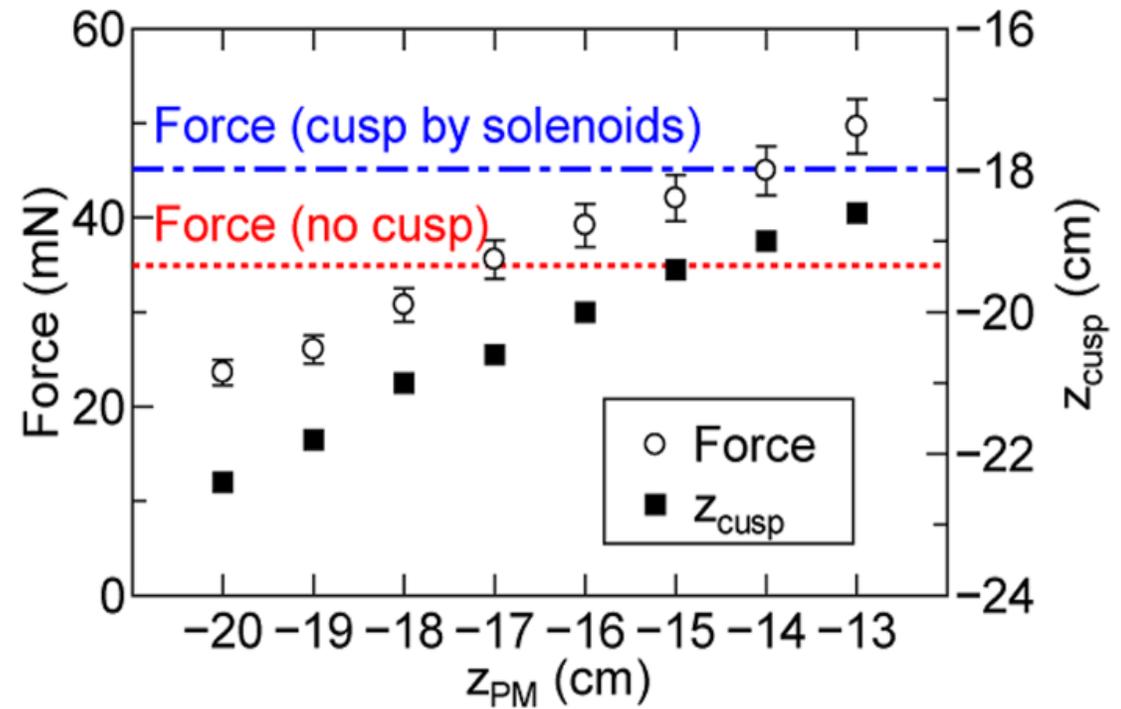
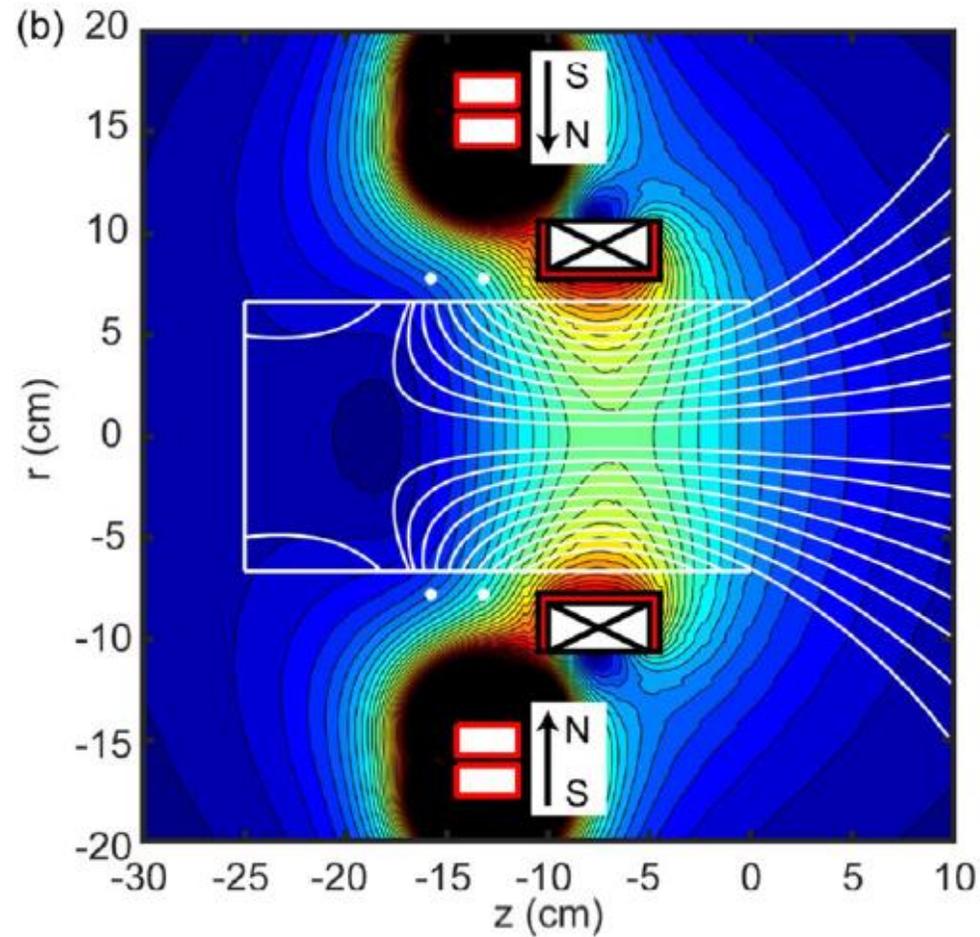
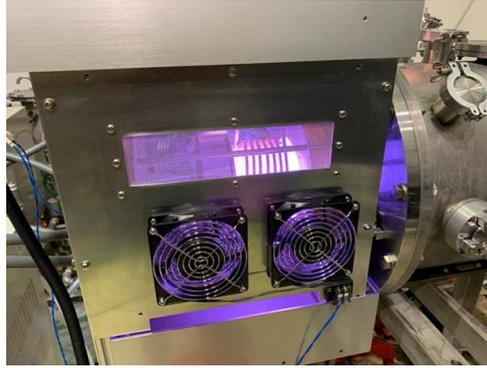
Active Space Debris Removal



Thruster assessment



PM-type toward engineering model

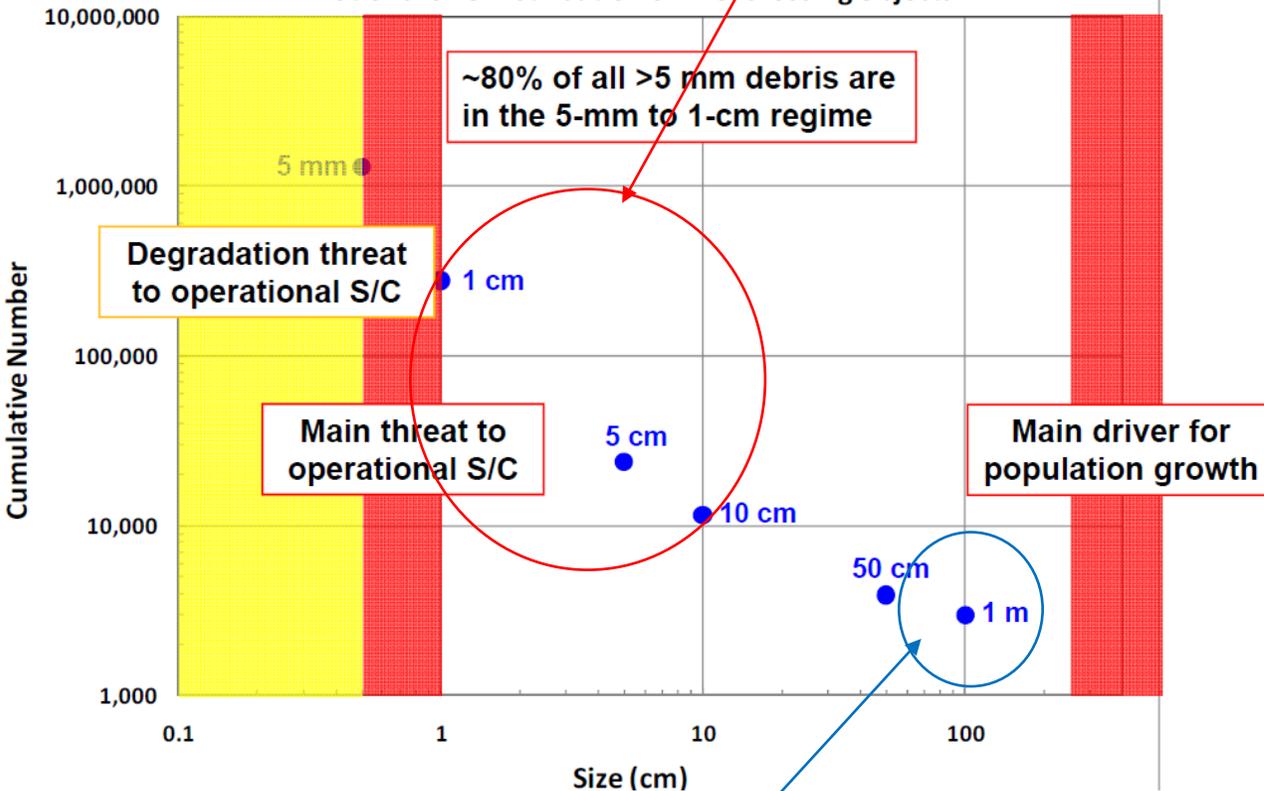


Active Space Debris Removal

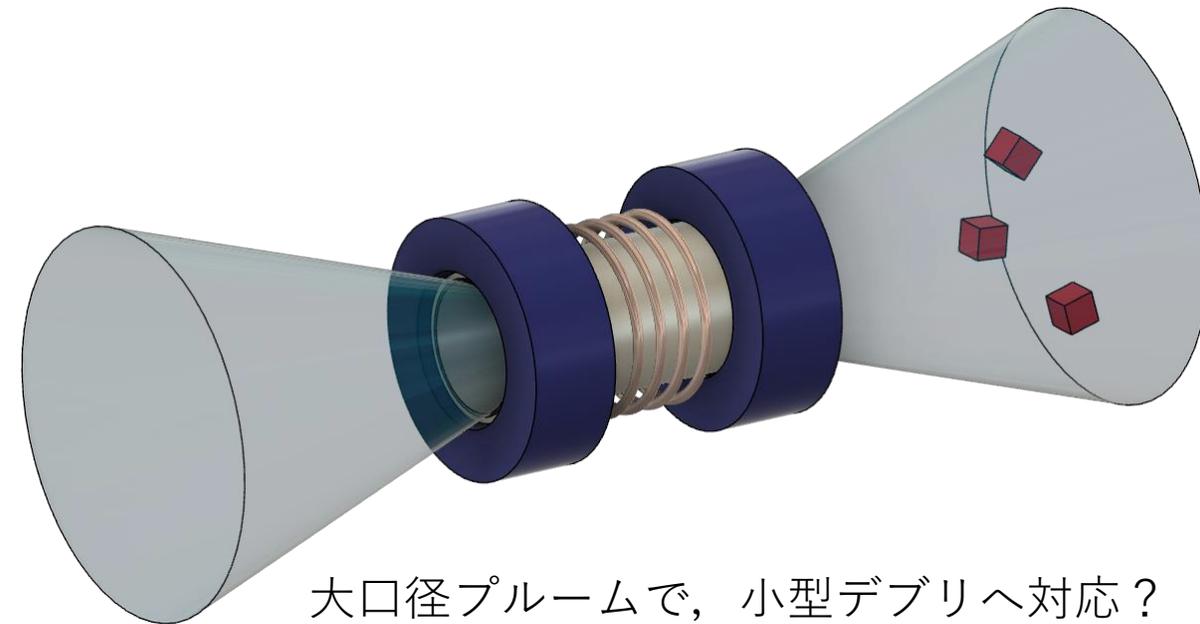
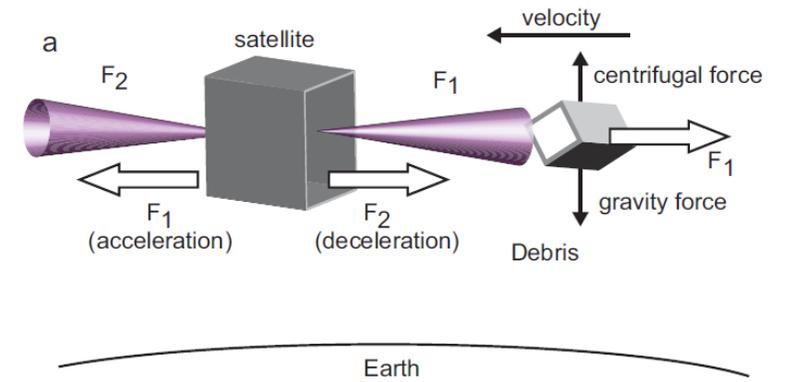
Takahashi et al., Sci Rep 2018

衛星運用に深刻な被害
観測が困難

Notional Size Distribution of LEO-Crossing Objects

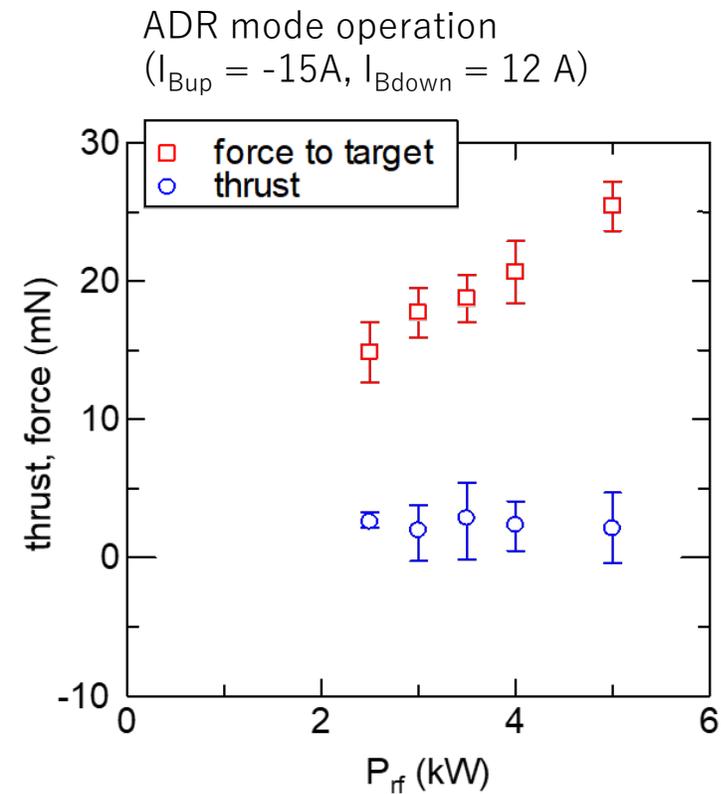
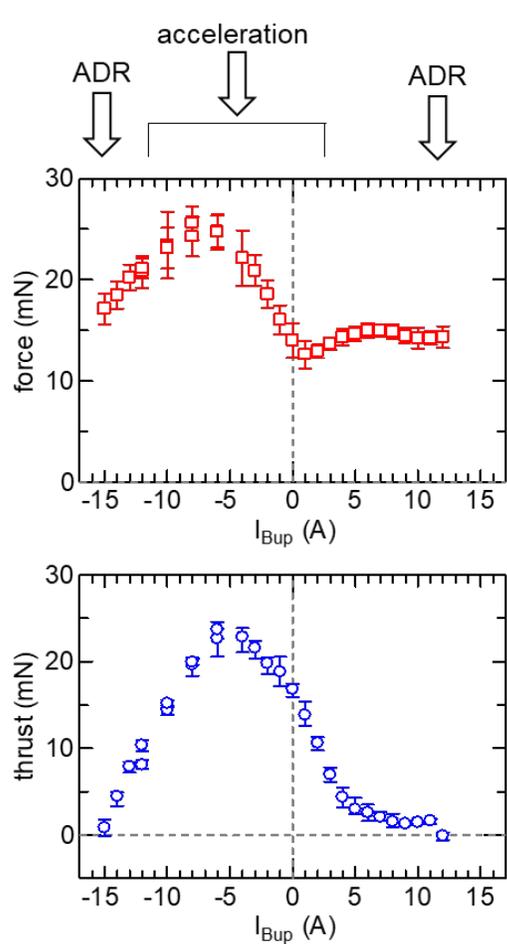
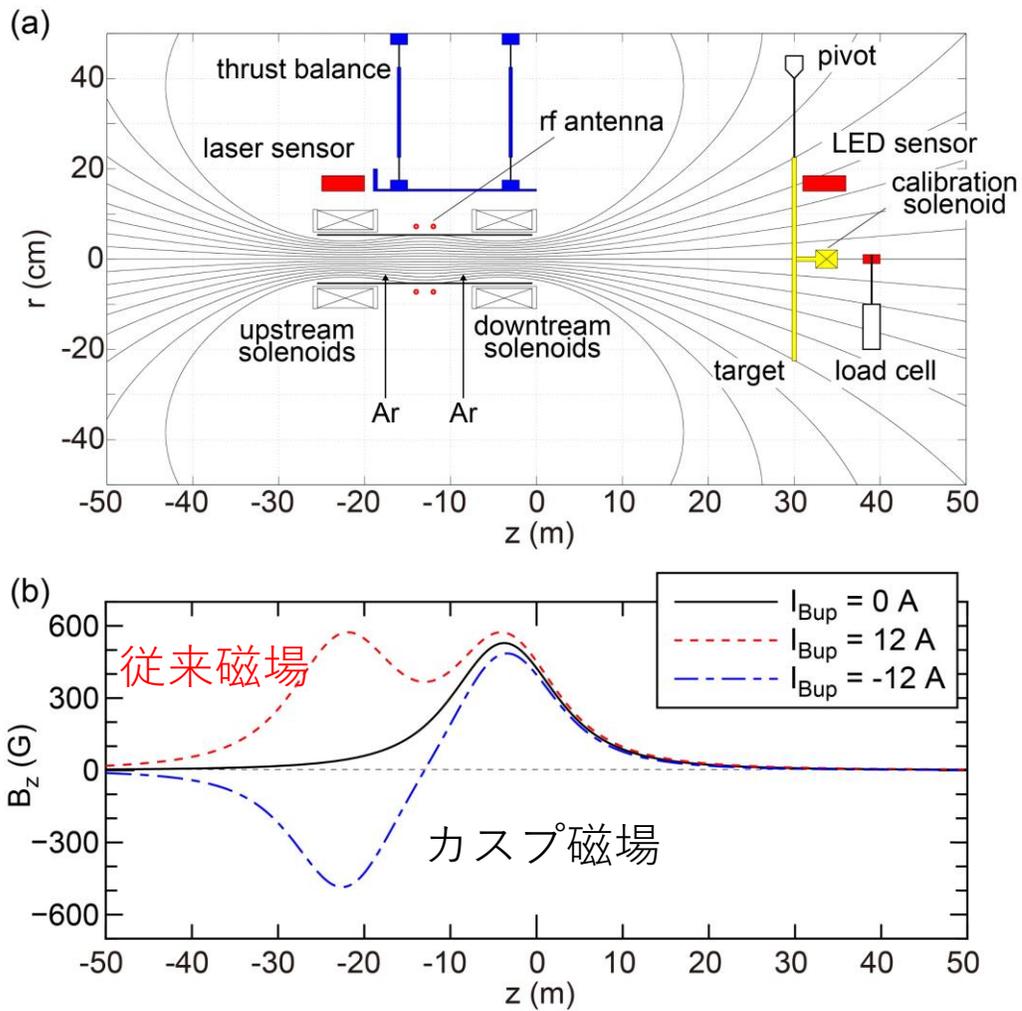


デブリ衝突による 1-10cm デブリの発生
(ケスラーシンドローム)



大口径プルームで、小型デブリへ対応？

直近の実験



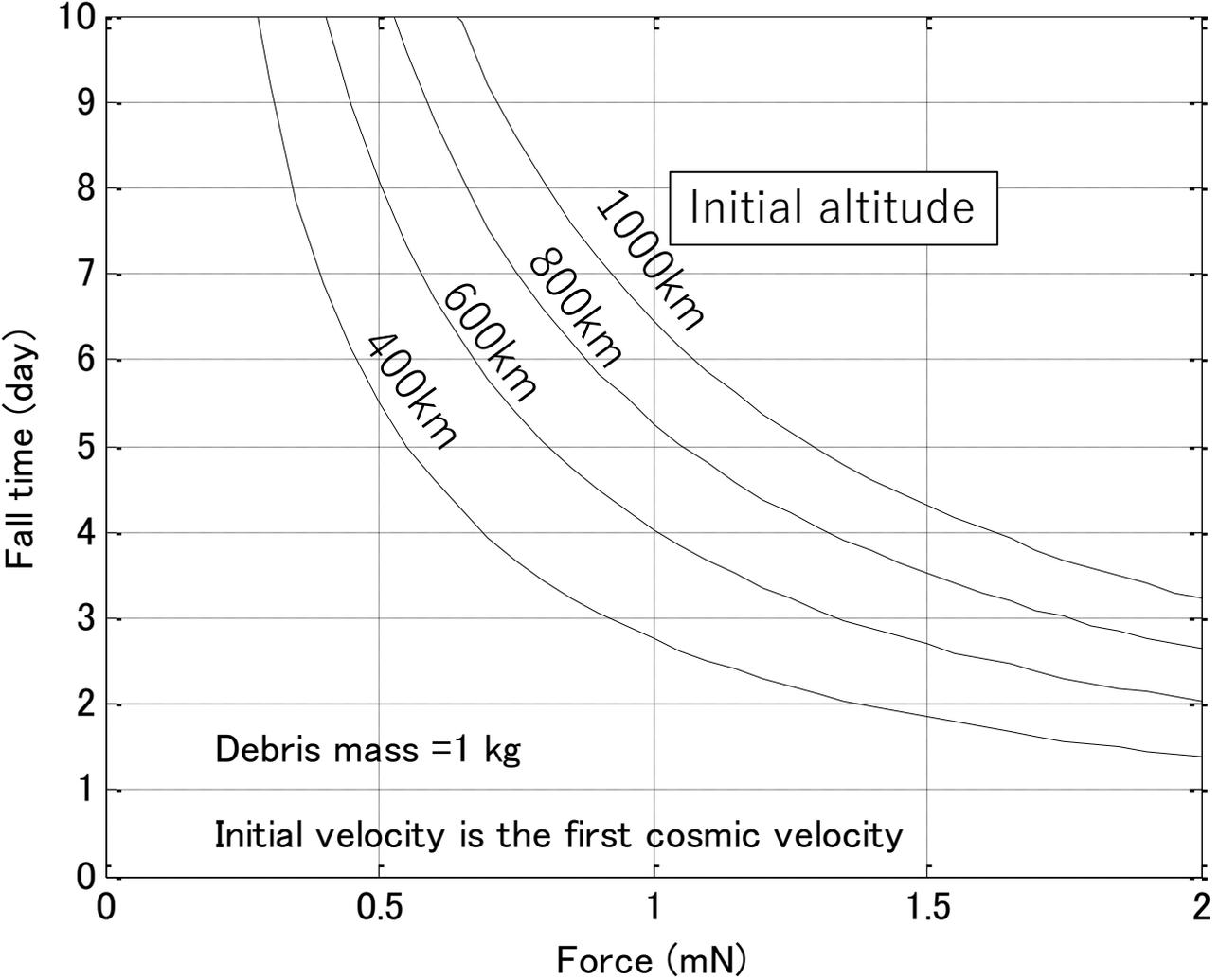
5kWの運転で、直径 45cm のターゲットに25mNの減速力



減速力の力密度は、 $F/S = 0.15$ N/m²

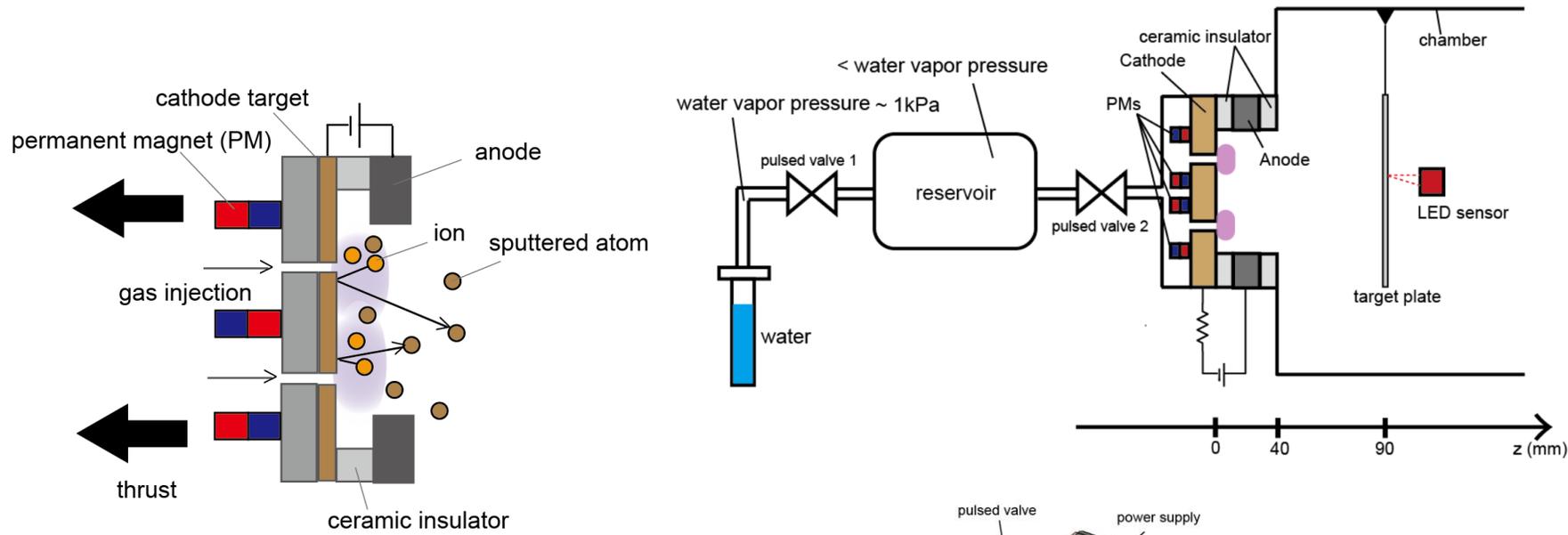
デブリ落下時間の見積 (大気摩擦は無視)

10cm x 10 cm x 10 cm, 1kg質量のデブリを仮定

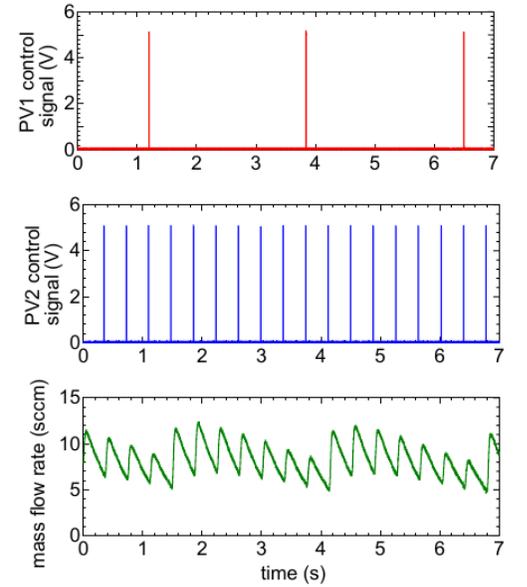


- ✓ 0.5-1mN程度の減速力で、数日~10日でデブリ除去可能 (大気摩擦でさらに短縮が予想)
- ✓ プラズマ照射面積 10cm x 10cmに1mNの力を与えるには、プラズマ流の力密度は 0.1 N/m² が必要

Magnetron sputtering thruster



Shimizu and Takahashi, under review



スパッタリングによる推進

- ✓ 中和器フリー
- ✓ 単一DC電源で動作可能

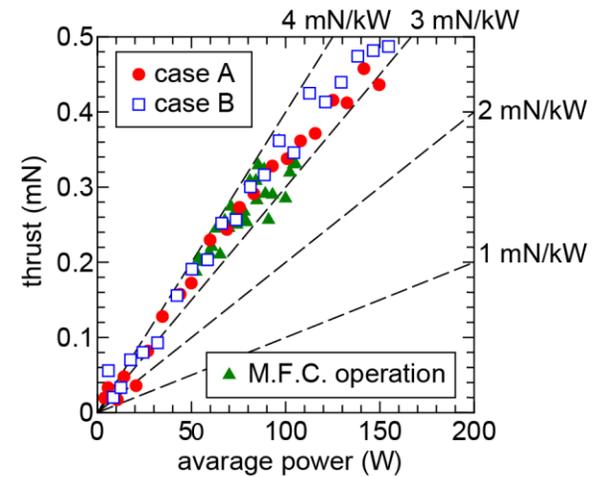
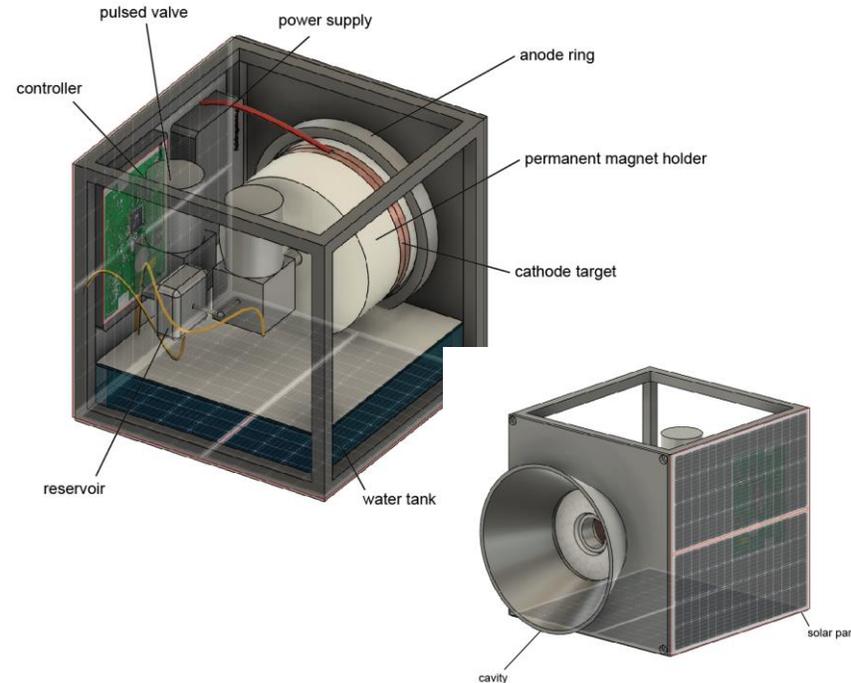
Takahashi and Miura, APL2021

水燃料

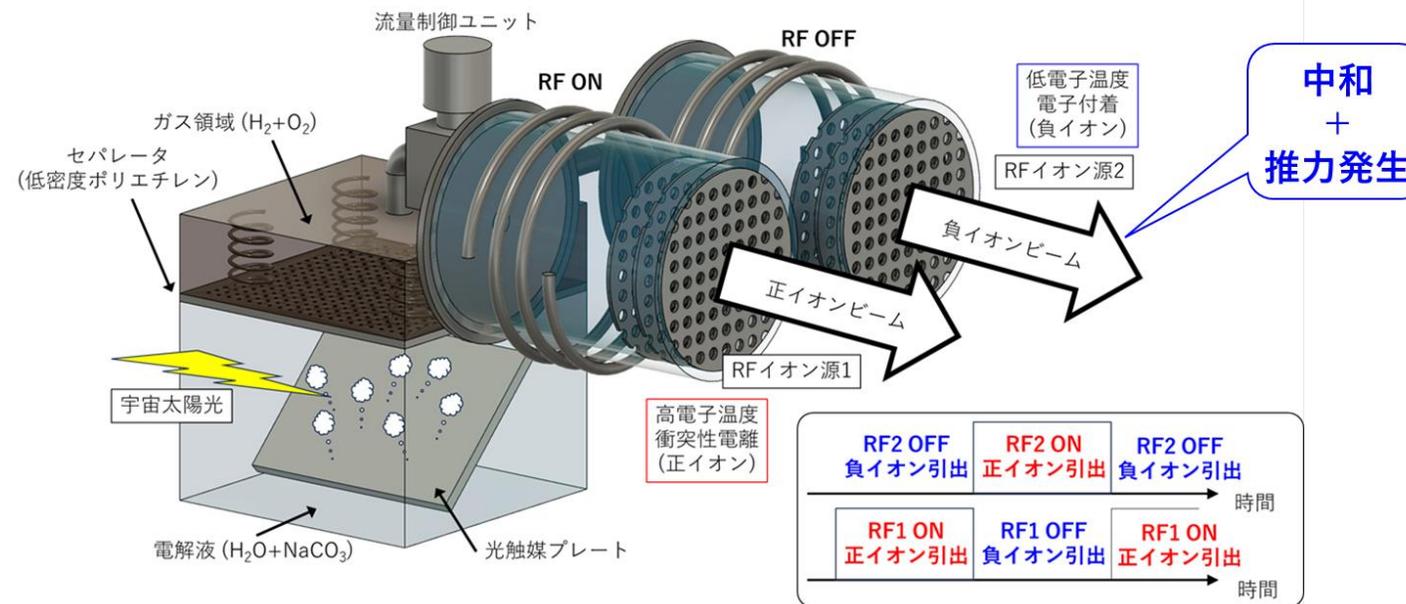
- ✓ 液体燃料
- ✓ 高圧タンク不要
- ✓ 安全性

+

Shimizu and Takahashi, Acta Astronaut. 2023



Water-fueled Positive-Negative Ion thruster



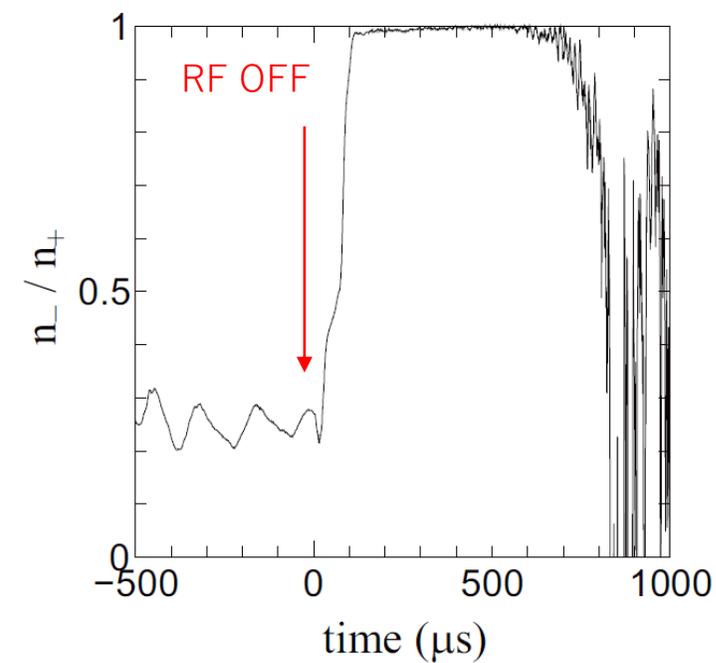
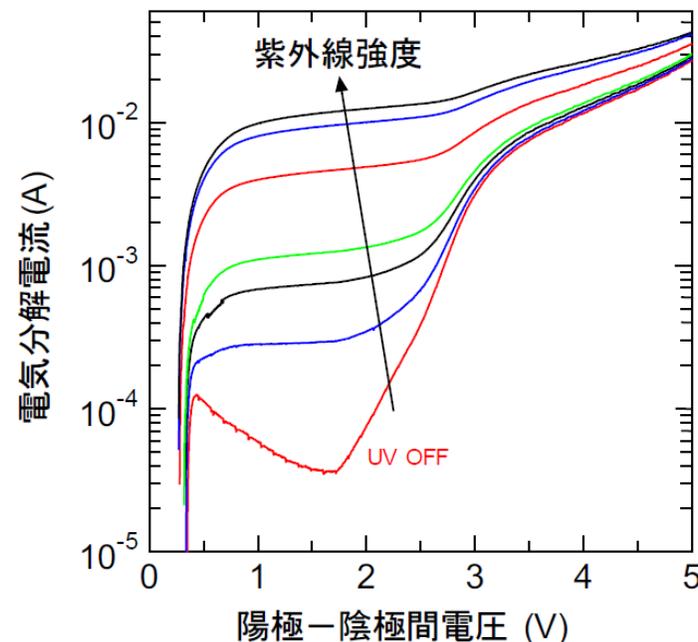
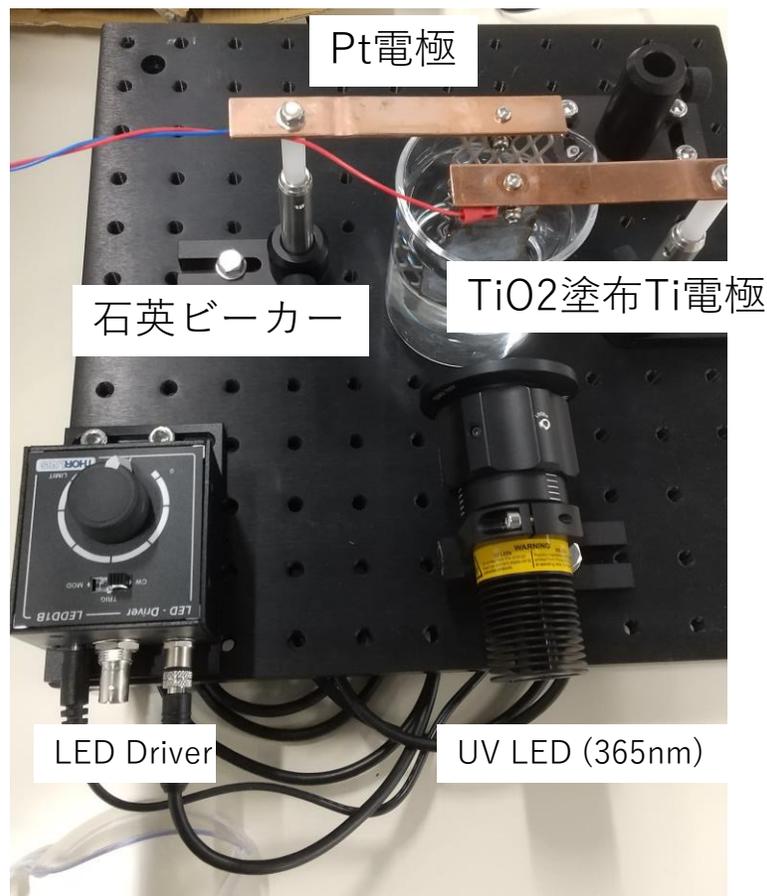
H₂+O₂プラズマからの正負イオンビーム引き出しによる大推力化の限界突破

- ・ 水からの水素・酸素ガス生成とガス制御系 (従来使用されていない宇宙紫外太陽光の活用)
- ・ 光触媒による水分解反応の促進・高効率化 (材料科学との融合)
- ・ パルス変調型正負イオン源 (高周波プラズマ技術の活用)
- ・ ビーム引き出し電極系 (核融合加熱用ビーム技術の活用)
- ・ 高周波電源系, 小型ビーム引き出し電源系 (パワーエレクトロニクス技術の活用)
- ・ 電気推進システム構築 (宇宙工学との融合)

Water dissociation, negative ion production

ICPプラズマにおける酸素負イオンと正イオンの密度比計測結果

田村侑真, R5年度卒業論文



課題

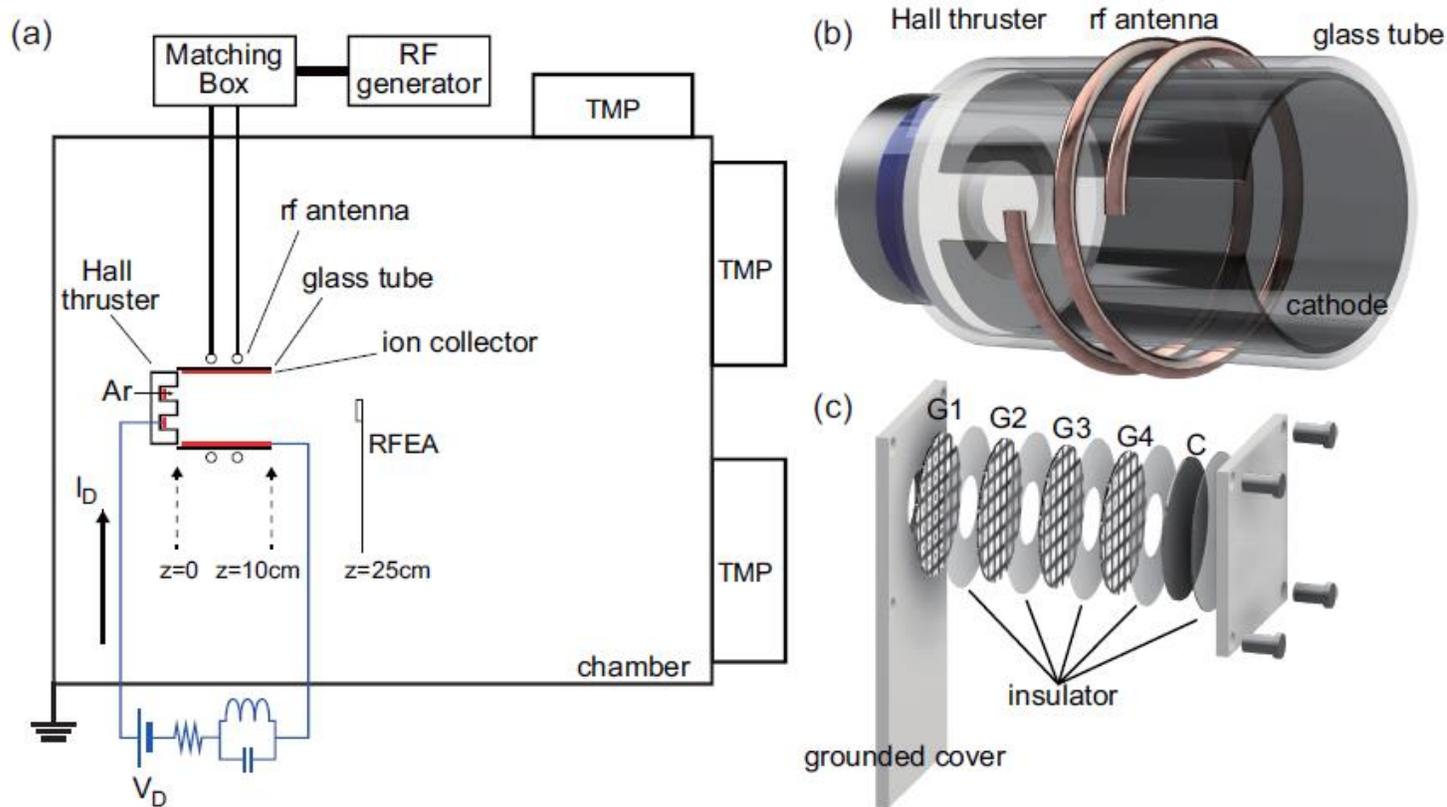
紫外線強度の定量評価
波長依存性の評価
宇宙太陽光との比較とスケージング

課題

精密制御可能なRF電源のインストール
ビーム引き出し系の設計
ビーム引き出し用パルス電源設計

紫外線照射による電気分解電流の増大を予備実験で確認
(TiO₂を塗布しない場合は, 電流の変化は観測されない)

Tohoku-JAXA collaboration (RF Hall thruster)

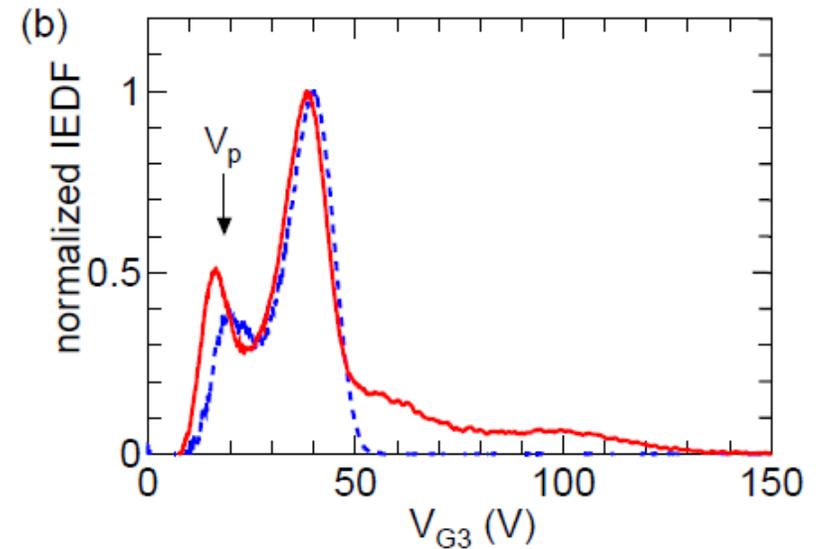
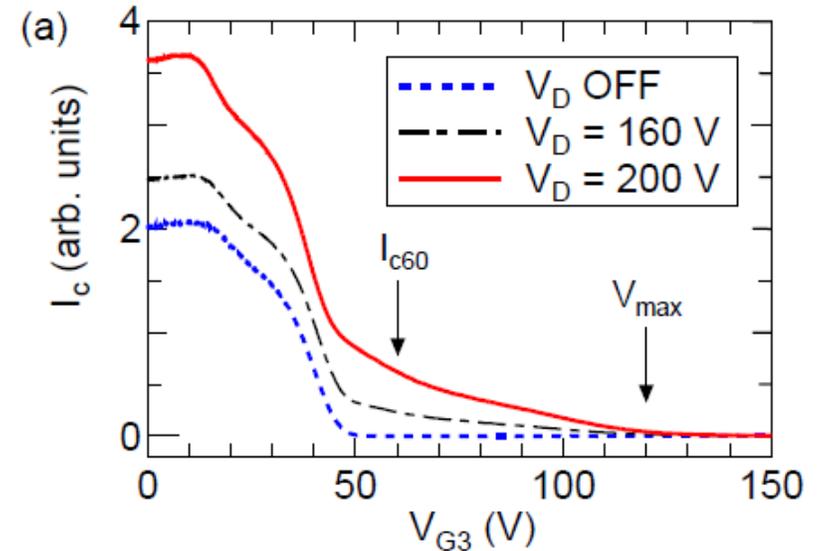


Alternative propellant Hall thruster (Water, Iodine, etc...)

Toward a Xe-free Hall thruster

To overcome the neutralizer lifetime issue

Electron extraction from the rf source
Neutralizer electrons from the rf source



Tohoku-DLR (ドイツ航空宇宙局) collaboration

機動性, プラズマ計測器の自由度が高い

宇宙模擬環境の実現

プラズマ診断, 推力予備評価

推進機性能評価, 地上実証試験



東北大学 スペースチャンバー
【内径1.5m, 長さ4m (改良中)】

磁気ノズルダイナミクス
高周波アンテナ開発
宇宙機用の電力制御器
ガス供給系
高周波システム開発



DLRスペースチャンバー
【内径5m, 長さ12m (稼働中)】

Kick off the engineer model development
日本学術振興会 二国間交流事業 (JSPS-DAAD)

2024.4.9-5.3 DLR研究者が東北大で実験
2024.9頃 Tohoku研究者がDLRで実験

RF generator and HiPIMS power supply (Lab model to Commercial products)

Laboratory proto-type



Specifications

- ✓ One or two rf generators
(500W, 200W & 200W, or 200W & 100W)
- ✓ Frequency of 40 ± 3 MHz
- ✓ Automatic matching control (within 10 msec)
- ✓ Constant net power control (stabilize the discharge)
- ✓ Output terminal : SMA, BNC, N-type, or M-type

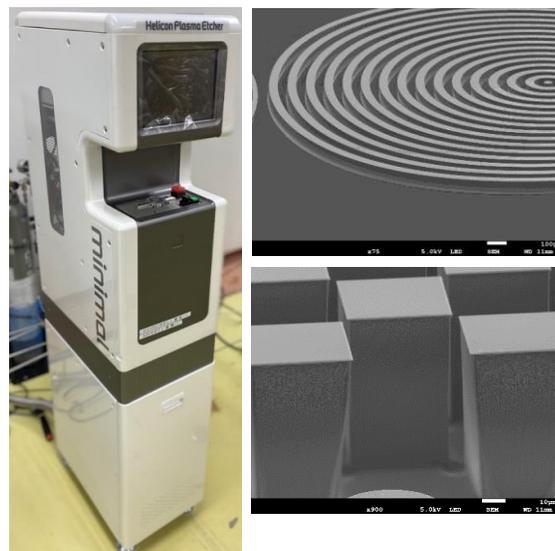
Commercial model

(mounted on plasma etcher)



F-tuning RF generator

ミニマルヘリコンエッチャー



高橋和貴, 他, 出願済み

HiPIMS power supply

ミニマルスパッタ装置 (誠南工業) に搭載



現在国内企業と共同研究展開の協議中

高橋和貴, 原史朗, 出願・権利化済み

Collaborations

Academic, Space Agency

海外機関

オーストラリア国立大学
ドイツ航空宇宙局
ソウル大学・韓国大学
オークランド大学

国内機関

産業技術総合研究所
ミニマルファブ推進機構
宇宙航空研究開発機構
横浜国立大学 鷹尾研
横浜国立大学 伊里研
筑波大学
核融合研

Industry

テクニカルアドバイザー

東京エレクトロン
オプトラン
ハイブリッジ
ナノテクノロジーインスツルメンツ

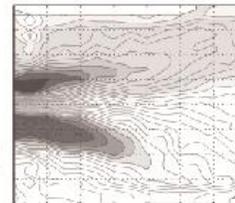
共同開発協議中

シチズン
アルバックテクノ

共同研究・開発実施中

オプトラン
和泉テック
誠南工業
リコー
JSOL

PDPL

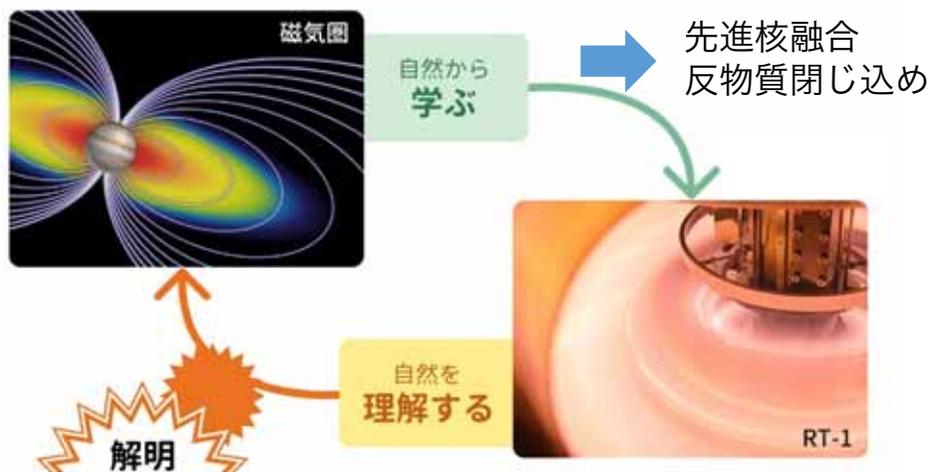


Plasma Dynamics and Propulsion Laboratory, Tohoku University

プラズマ装置学（ダイポールによる学際研究）

ユニット目標に掲げられたコンセプトより：

- ・ プラズマ物理と集団現象の理解に基づき、荷電粒子群の制御と応用を実現する
- ・ 研究分野の持つ知見をテクノロジードライバとして、新たな研究機会を創出する
- ・ 融合研究を推し進め新手法を提案し、自然科学の深化と新展開を追求する



コーラス放射現象
の実験室研究

ダイポール磁場配位を活用して、

1. 電子・陽電子プラズマの実現と物性解明：
捕獲陽電子数の飛躍的増大と集団現象
の最初の観測、装置開発の進展
2. 磁気圏プラズマの波動現象の実験室研究：
ホイッスラーモード・コーラス放射の発生
条件の理解

ダイポール磁場配位によるプラズマ研究の展開

1987 Hasegawa, Comm Plasma Phys. Contr. Fusion

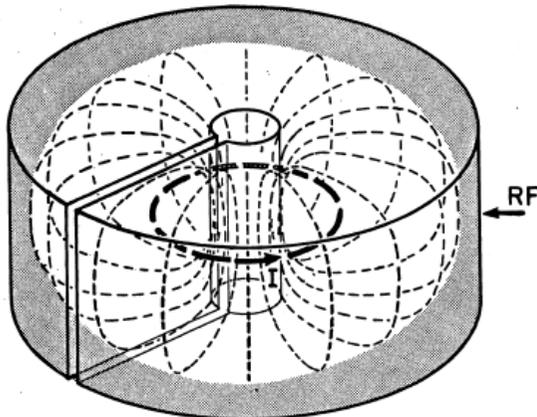
磁気浮上超伝導コイルにより, 惑星磁気圏と類似のプラズマ環境を実現

ひさき衛星 (AXA)webより



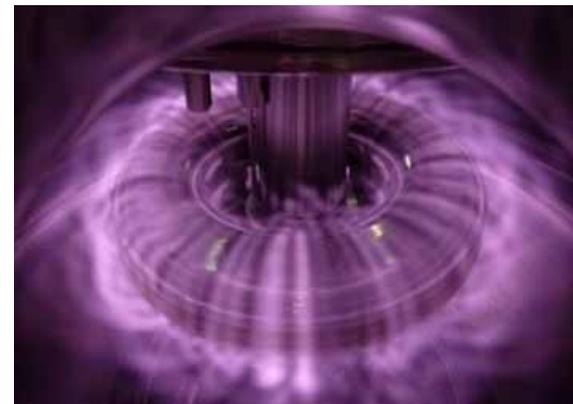
高速流を持つ高 β プラズマ

"Dipole Fusion" by Hasegawa



内向き拡散・加熱: D-D or D- 3 He

東大RT-1, MIT LDX



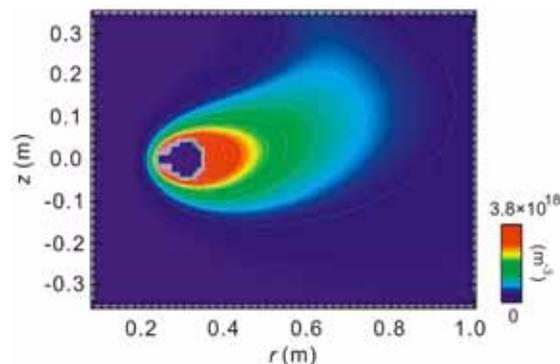
2013 Yoshida+ PPCF
2010 Boxer+ Nature Phys.

● 超伝導コイル磁気浮上



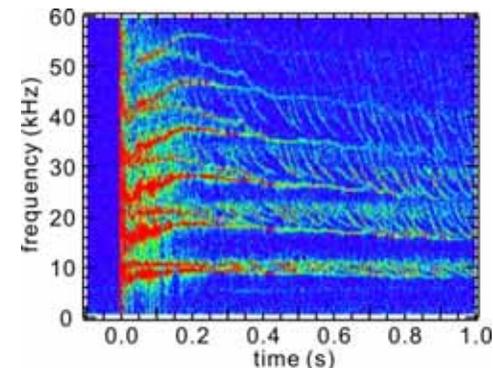
2013 Ogawa, Mito, Yanagi+ 低温工学
2006 Yoshida+ Plasma Fusion Res.

● 先進核融合/磁気圏現象



2022 Kenmochi, Nishiura+ Nucl. Fusion

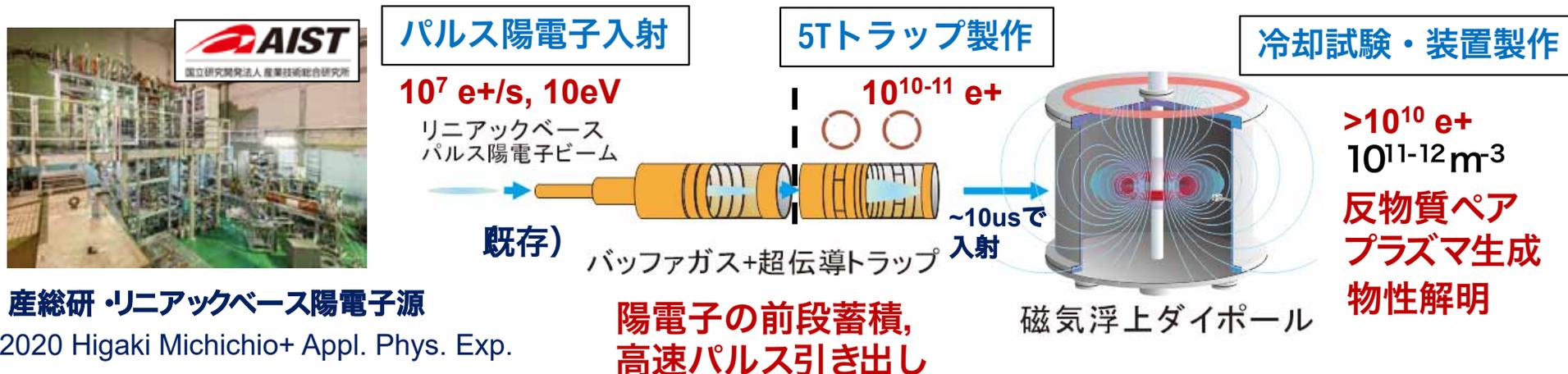
● トロイダル非中性プラズマ



2010 Yoshida+ Phys. Rev. Lett.

1. 磁気浮上ダイポールとパルス陽電子源による電子・陽電子プラズマ計画

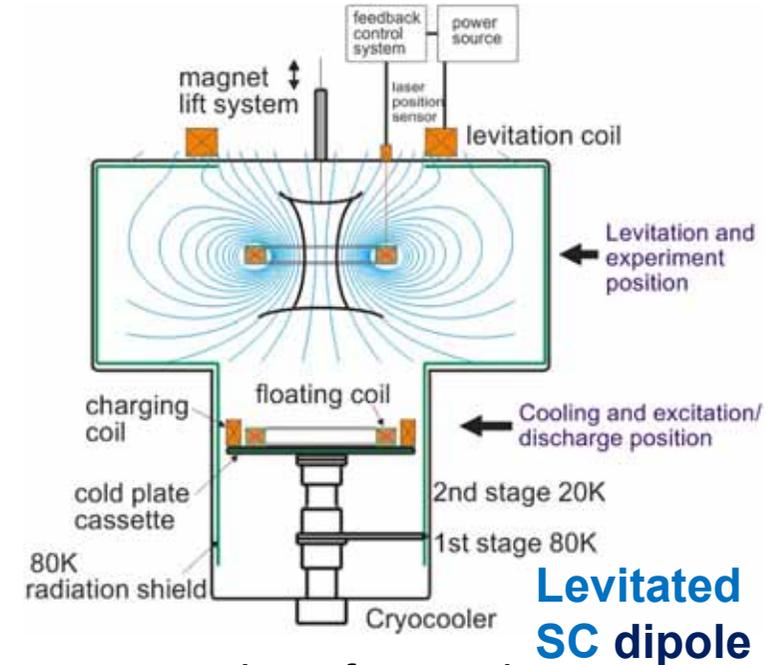
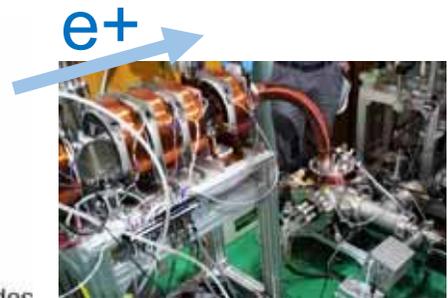
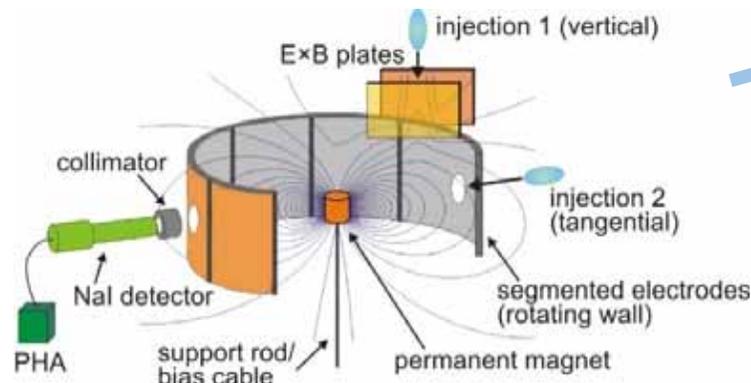
● ペアプラズマ計画の全体像



低エネルギー陽電子と電子のダイポール磁場による閉じ込めを提案し研究を進めている

- ペアプラズマ ($m_{e^+} = m_{e^-}$) は特異な波動特性と安定性を示す
 - ➡ 理論が先行し実験的に未検証の諸性質の理解 基礎プラズマ物理)
- 電子・陽電子プラズマ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や各種の不安定性, 構造形成
- 実験的に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, 反水素実験等への波及効果

電子・陽電子プラズマ実現のための各要素の開発研究の進展 (2023年度)



永久磁石ダイポールで大量陽電子蓄積の実現

- drift injection (100% efficiency)
- positron trapping (~1s): 1000 e+ so far
- experiment with buffer gas trap: 1e5 e+
numerical orbit analysis of their dynamics

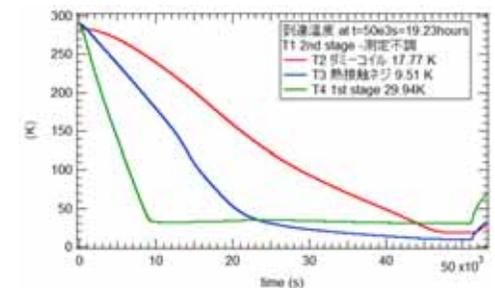
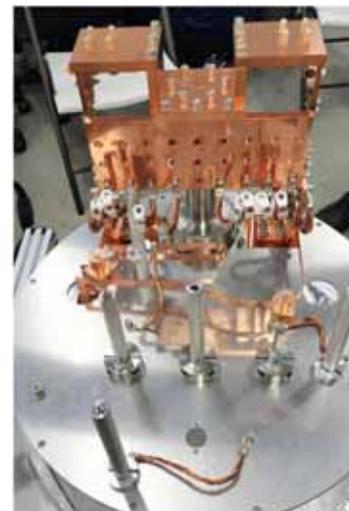
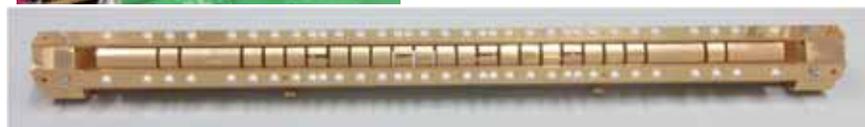
- simultaneous trapping of e+ and e-
- SC coils and levitation system
- new injection scheme is needed



陽電子数の更なる増大を実現する超伝導トラップの導入 (産総研ビームライン)

- 60cm homogeneous B region

Linear e+ accumulator with 5T SC magnet



磁気浮上装置の要素試験の完了と設計

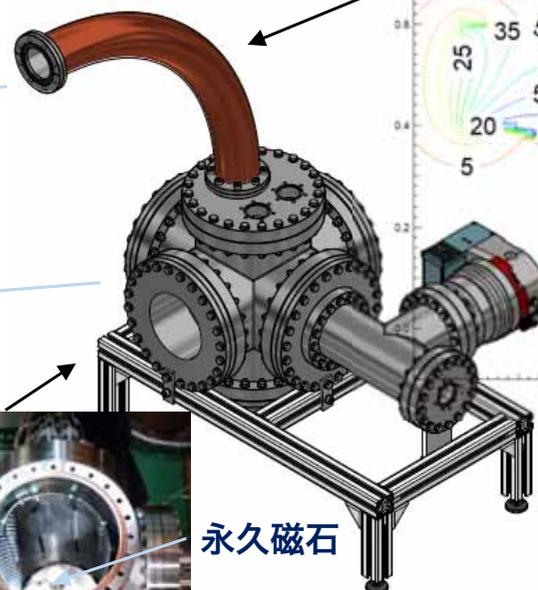
- cooling without He gas
- design of compact levitated dipole

永久磁石ダイポールへのパルス陽電子入射実験@産総研

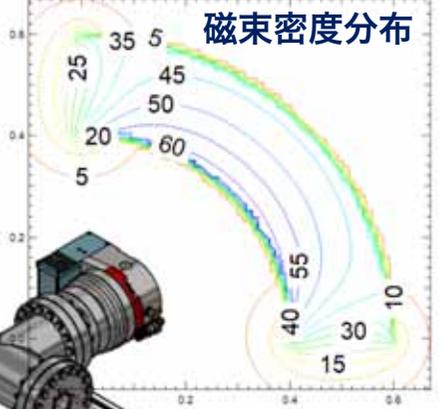
- 産総研+広島大学のライナック+バッファガストラップ陽電子源に, IPP/東大の永久磁石ダイポールトラップを接続 $\sim 10^5 e^+ / \text{pulse}$
全量を捕獲できれば従来の100倍程度の捕獲数 プラズマ条件の達成はまだ困難)
- ガイド磁場 (+ ステアリングコイル) + E x Bドリフト入射 先行研究で実績)



e^+



B~50 Gaussでビーム輸送



永久磁石

ダイポール
トラップ

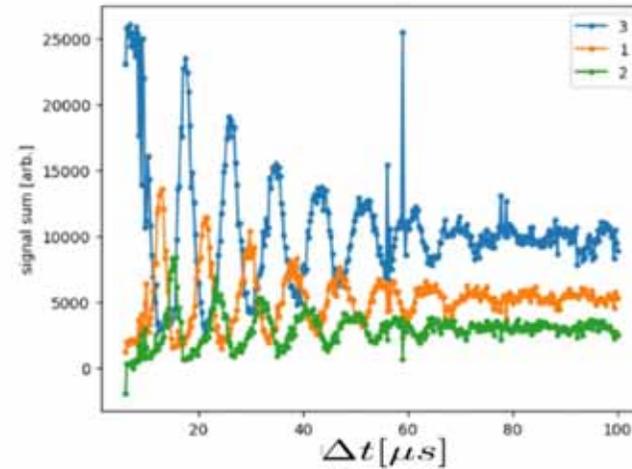
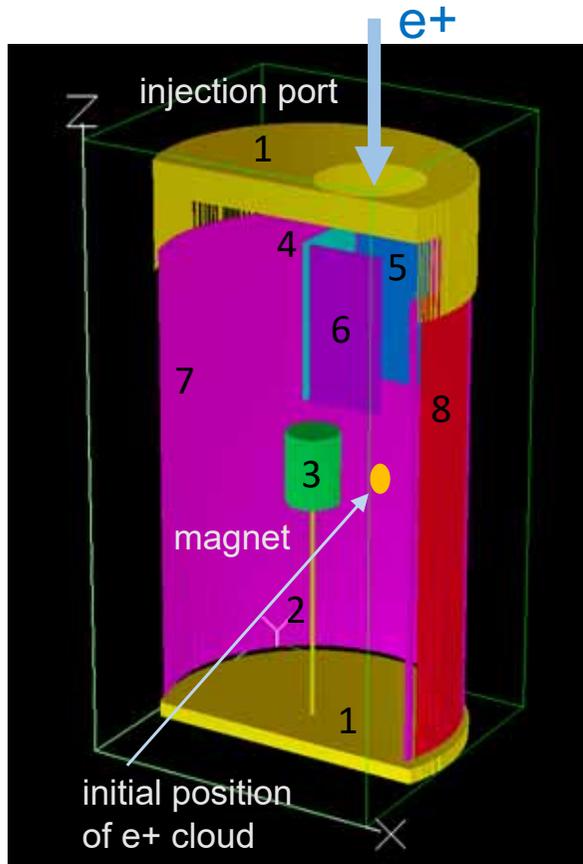


2023年の入射実験

入射後の一様化の時間発展, 閉じ込め時間の実験解析

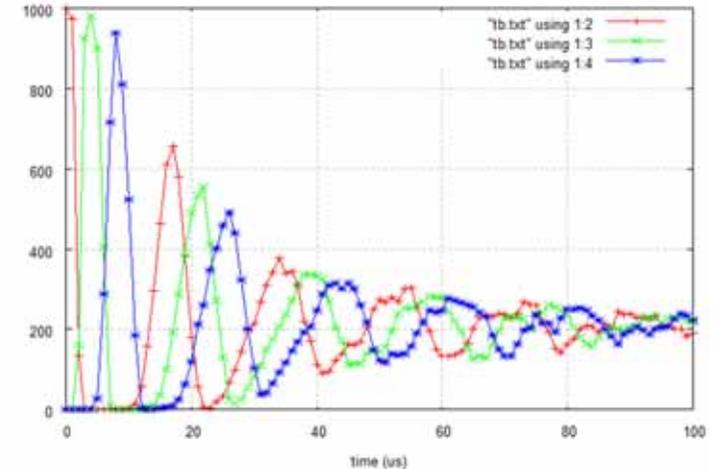
本研究では入射後の陽電子軌道を追跡し閉じ込め特性を評価

陽電子ビームの高效率入射とトロイダル方向への一様化を観測



消滅ガンマ線の観測結果

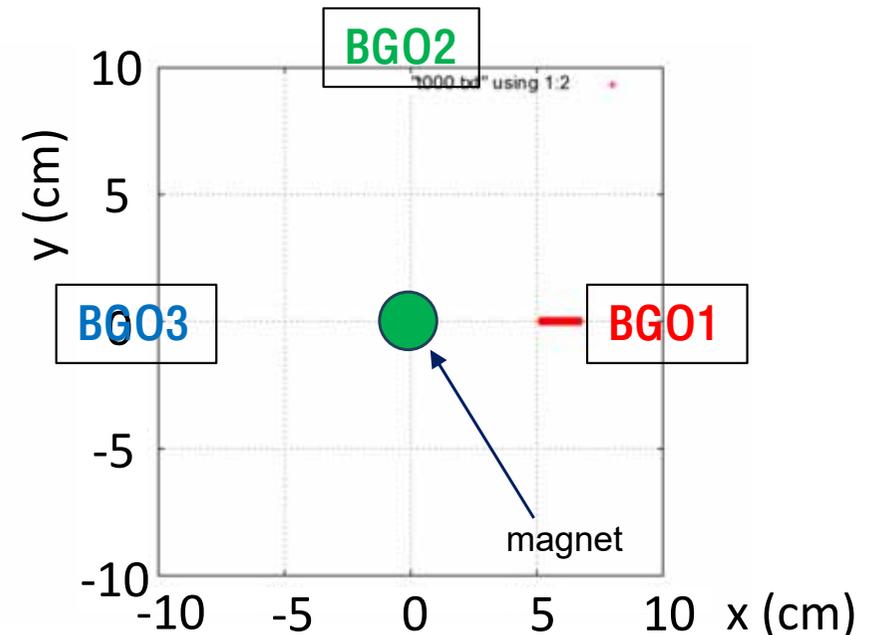
入射後初期の振動が時間的に減衰し、より長時間の信号強度の減衰に移る



観測される消滅ガンマ線の計算値

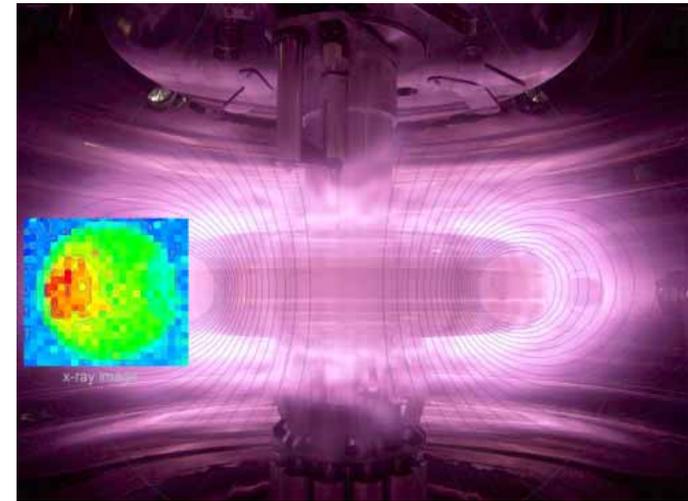
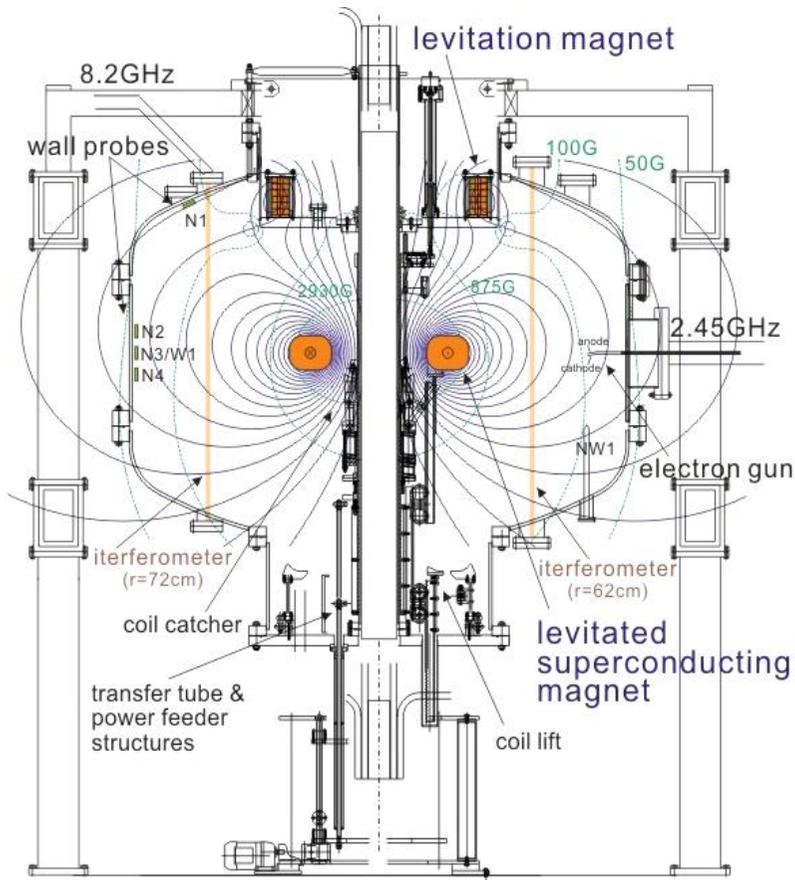
トロイダル方向一様化の過程で各検出器に入射するカウント

- 10^5 個の陽電子 (従来の100倍以上) を高效率で入射し永久磁石ダイポールに捕獲
- 現状ではプラズマ状態に達していないが、トロイダル方向一様化の過程を観測
- 蓄積装置と磁気浮上装置の稼働により、プラズマ化と電子との同時捕獲が見込まれる



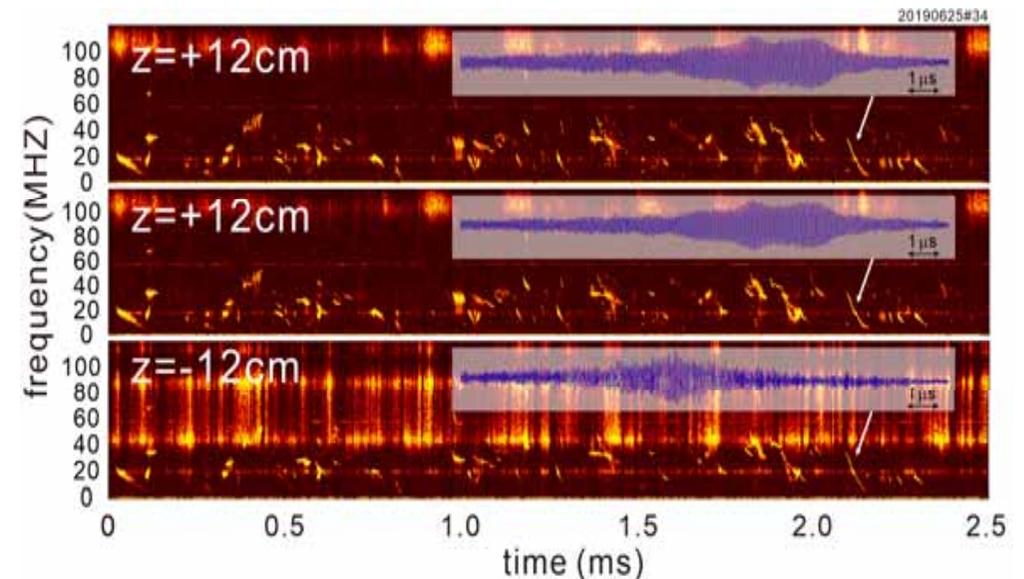
軌道計算例 装置上面からの投影200us)

2 磁気浮上ダイポールで観測されるジオスペースと共有のホイッスラーモード・コーラス放射について、2023年度には発生条件の理解等に進展が得られた



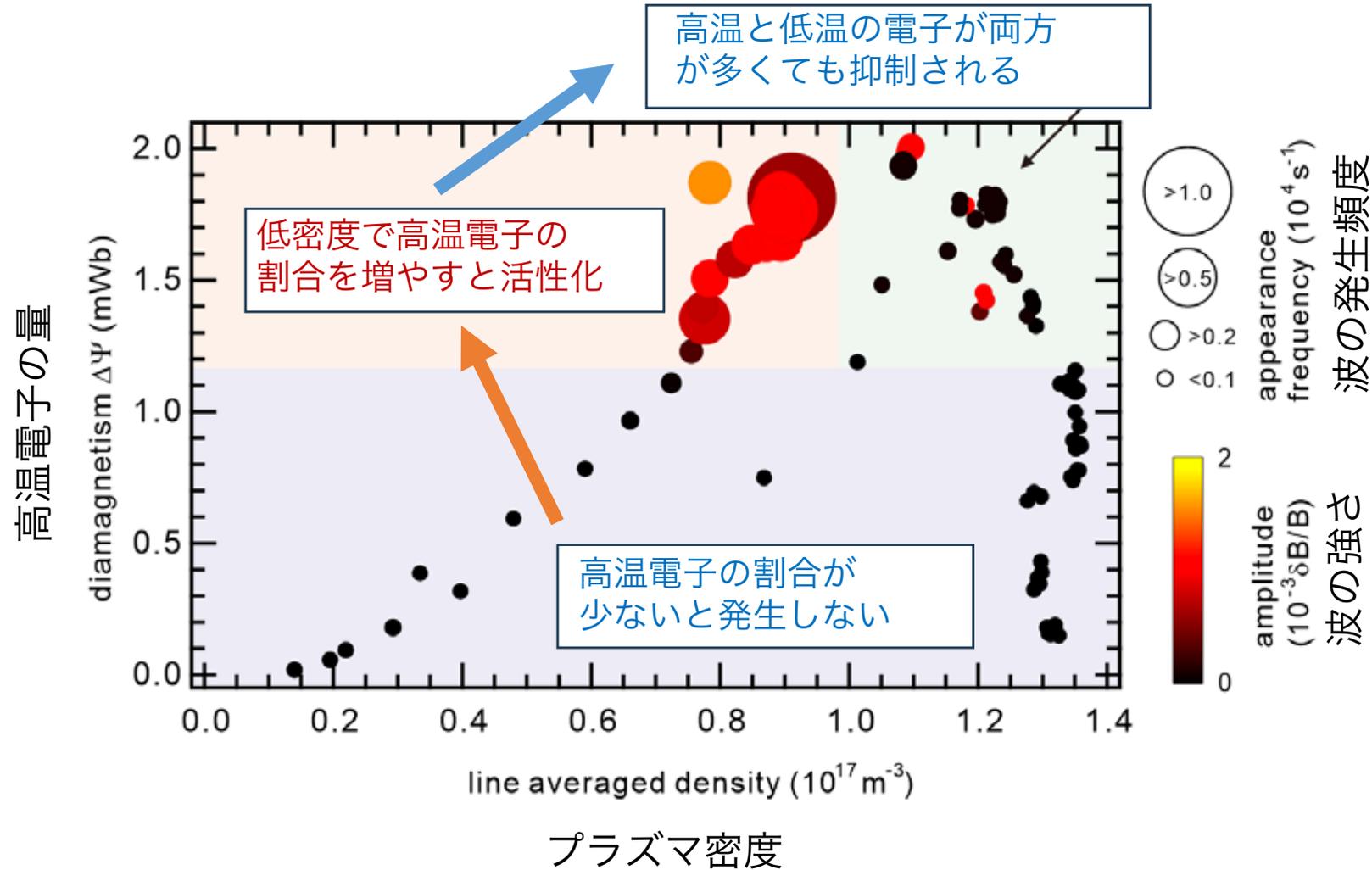
高温電子(10keV以上)による高 β 状態

- 惑星磁気圏型「ダイポール磁場配位
- コーラス放射の特徴と合致するコヒーレントな波をRT-1で観測
- Local $\beta \sim 100\%$, $N_e \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$ の高温電子プラズマで発生



ホイッスラー波の自発励起 ($f_{ce} \sim 140 \text{ MHz}$)
これまで主に磁気浮上時のプラズマで観測

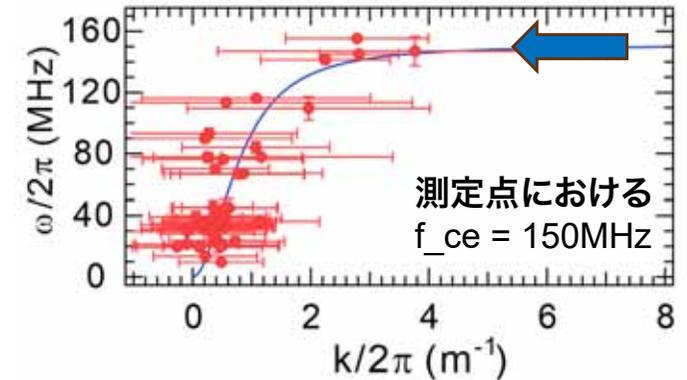
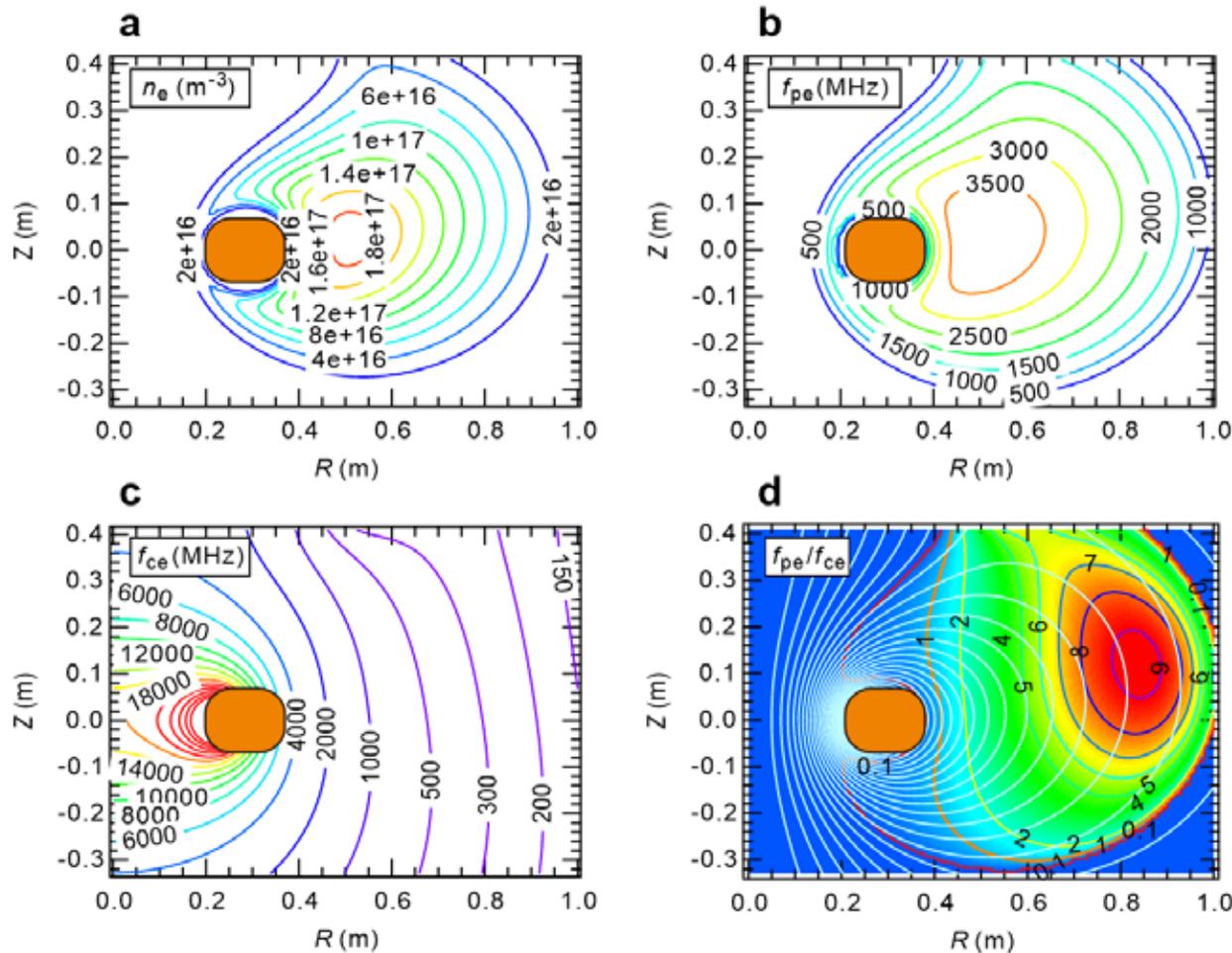
発生条件の理解の進展



- 高温電子を持つプラズマがコーラス放射を自発励起
 - 更に冷たい電子成分が増えるとコーラス放射は抑制される
- コーラス放射が出現する条件は、理論予測と基本的に一致している

密度分布の再構成と伝搬可能領域から得られた発生領域の情報

- 主にコア部分を計測する干渉計に加え周辺部情報を追加した密度再構成



弱磁場領域の f_{ce} を上回る周波数は観測されない

RT-1のプラズマでは
磁気圏と同様に広い範囲
で $f_p/f_c > 1$ であり
ホイッスラーは伝搬可能

周波数の観測結果と合わせて、発生領域に関して

「RT-1ダイポールのコーラス放射は、弱磁場の周辺部に局在して発生する」
ことを支持する結果であり、強磁場領域ではホイッスラーは発生していない

まとめと今後の課題

- 陽電子実験をNIFS, 東大, 産総研, 広島大, IPP, ミュンヘン工科大の共同で実施しており, ダイポールに捕獲した陽電子数の飛躍的向上を得た
- $e^+ \sim 10^5$ は, BGTから供給される陽電子数による限界であり, プラズマ条件は満たさないが, トロイダル方向に一様な陽電子雲形成過程が観測された
- 入射陽電子数の1000倍程度の向上を目指すため, 5T超伝導マグネットの導入を終え, 電極群による純電子実験を開始している
- 小型磁気浮上ダイポールは2024年の完成を見込んでおり, 10^8 を上回る大量陽電子の蓄積と電子との同時捕獲が今後の目標である.
- 核融合プラズマとジオスペース現象に共通の波動粒子相互作用に注目して, ホイッスラーモード・コーラス放射の実験室研究を実施している
- 発生条件や密度分布の再構成から発生場所を探る実験を進めており, 粒子加速の直接計測を計画している

2024年5月8日 @ NIFS

ミュオン科学 (2023年度の進展)

Vacuum Polarization

Self Energy

中部大学 岡田信二

Negative muon

2023年度の進展

1. ミュオン原子の精密分光

- 詳細な解析を進め印刷公表
- 2023年5月にプレスリリース

PHYSICAL REVIEW LETTERS **130**, 173001 (2023)

Proof-of-Principle Experiment for Testing Strong-Field Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms: High Precision X-Ray Spectroscopy of Muonic Neon

T. Okumura^{1,*}, T. Azuma^{1,†}, D. A. Bennett², I. Chiu³, W. B. Doriese², M. S. Durkin², J. W. Fowler², J. D. Gard², T. Hashimoto⁴, R. Hayakawa⁵, G. C. Hilton², Y. Ichinohe⁶, P. Indelicato⁷, T. Isobe⁸, S. Kanda⁹, M. Katsuragawa¹⁰, N. Kawamura⁹, Y. Kino¹¹, K. Mine¹⁰, Y. Miyake⁹, K. M. Morgan^{2,12}, K. Ninomiya³, H. Noda¹³, G. C. O'Neil², S. Okada^{14,‡}, K. Okutsu¹¹, N. Paul⁷, C. D. Reintsema², D. R. Schmidt², K. Shimomura⁹, P. Strasser⁹, H. Suda⁵, D. S. Swetz², T. Takahashi¹⁰, S. Takeda¹⁰, S. Takeshita⁹, M. Tampo⁹, H. Tatsuno⁵, Y. Ueno¹, J. N. Ullom², S. Watanabe¹⁵ and S. Yamada⁶

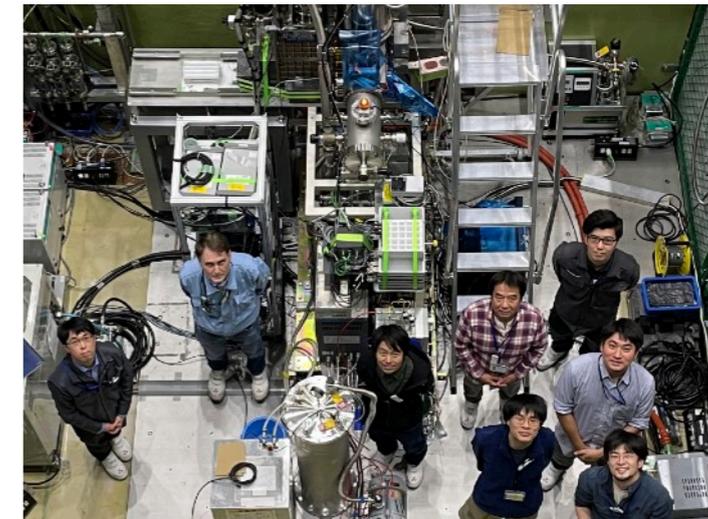
(Received 8 December 2021; revised 10 February 2023; accepted 10 March 2023; published 27 April 2023)

2023年5月10日

量子電磁力学をエキゾチック原子で検証
—ミュオン特性X線エネルギーの精密測定に成功—

2. ミュオン分子の精密分光

- 2023年初旬にデータ収集
- **ミュオン触媒核融合**に関連する重要なデータが得られた

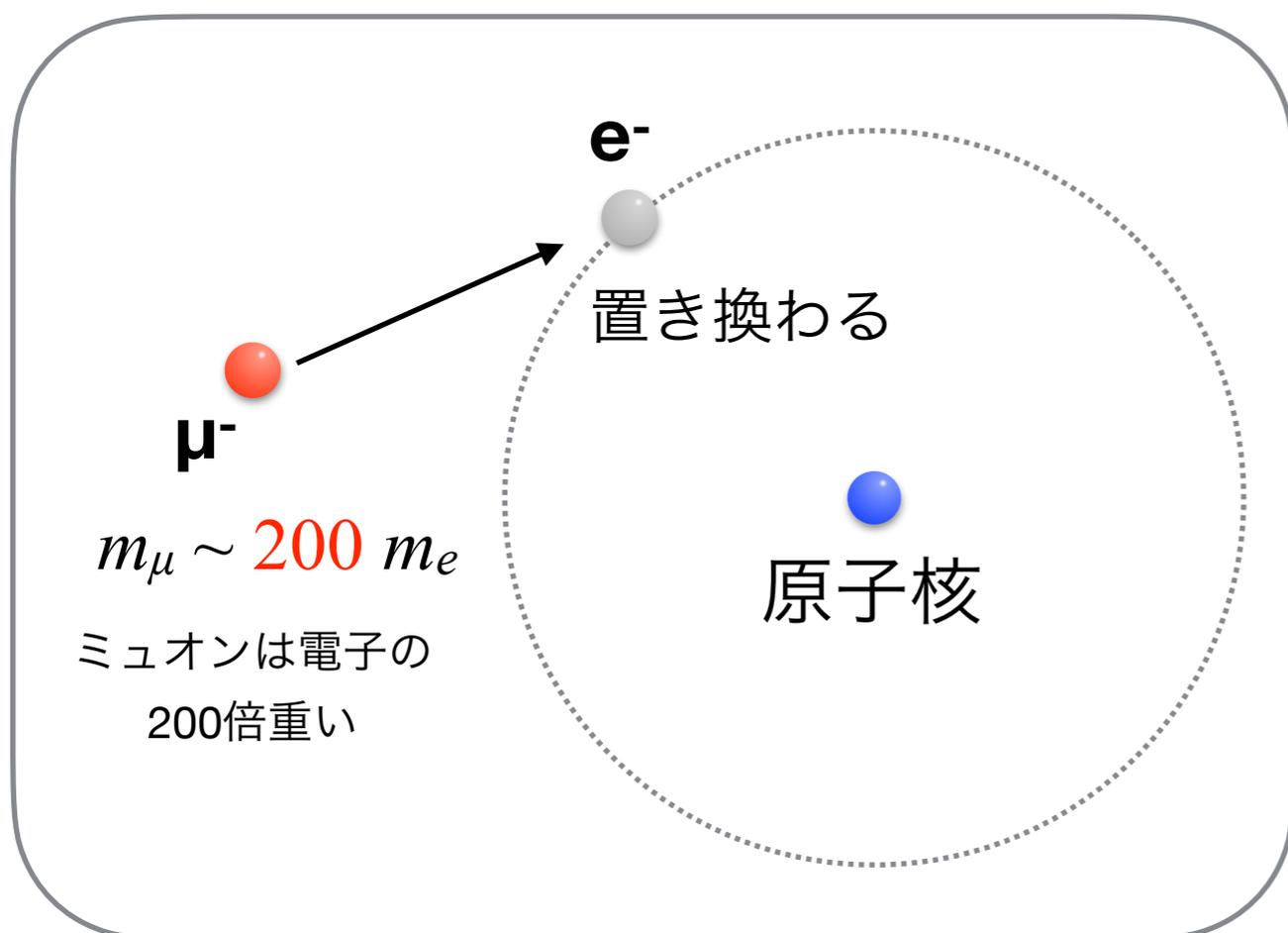


1. ミュオン原子の精密分光

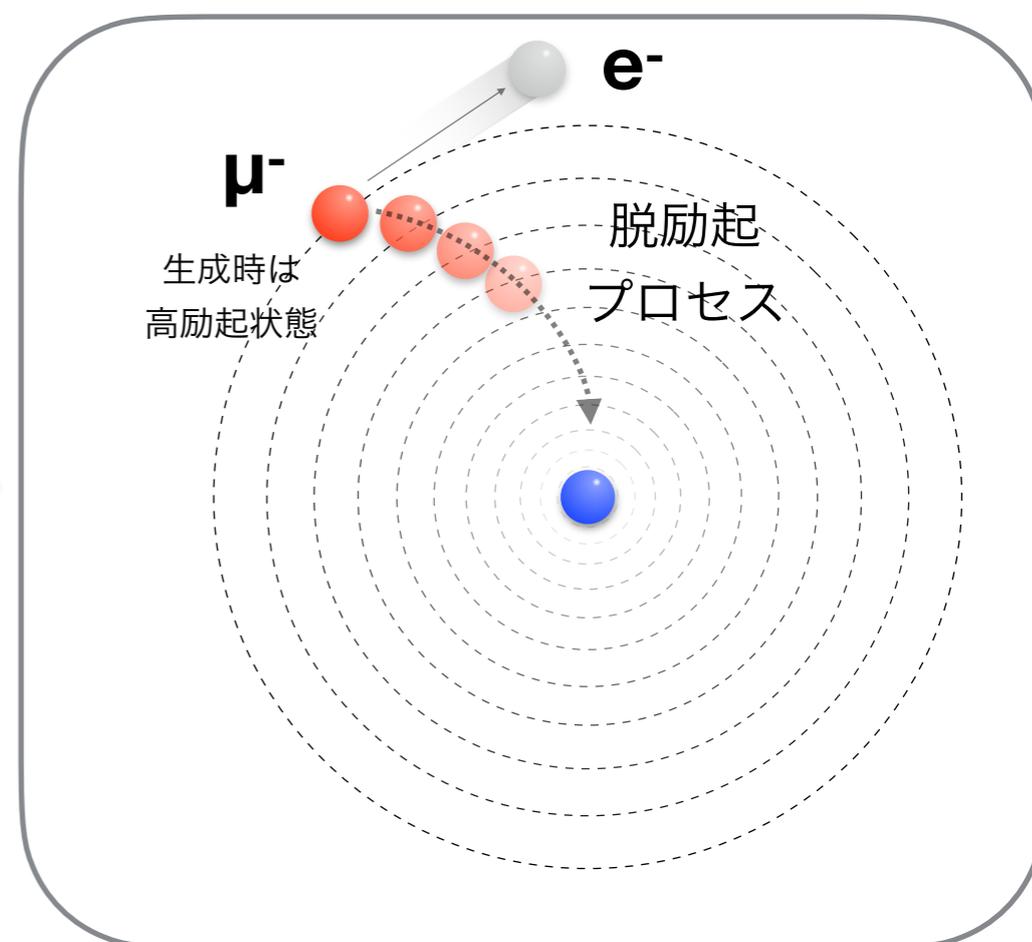
ミュオン原子

「**負電荷ミュオン**」は、電子と置き換わることで「**ミュオン原子**」が形成される

通常のアトミ



ミュオン原子



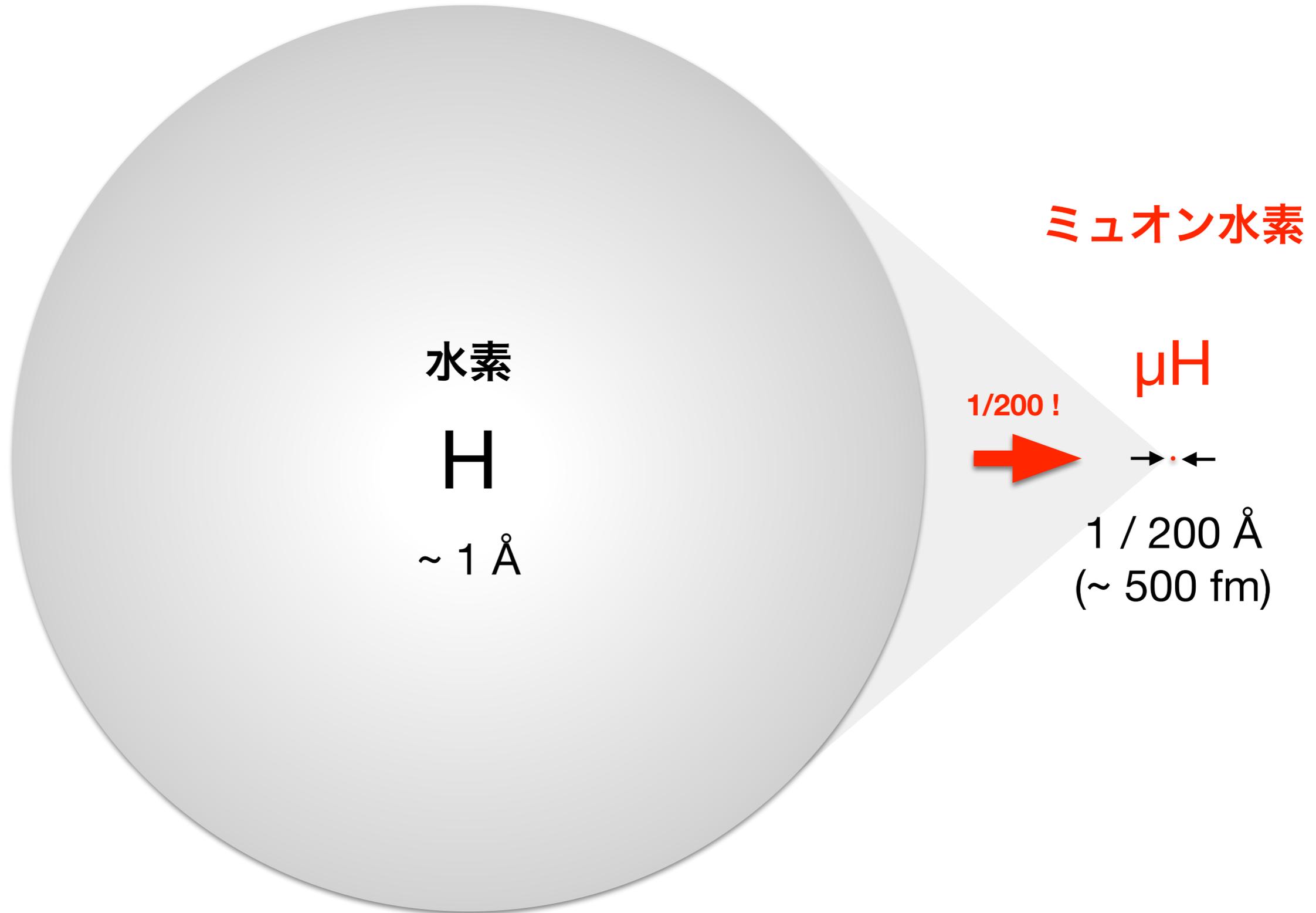
ボーア半径 : $R \propto \frac{m_e}{m_{\mu^-}^*}$ (換算質量に反比例)

x 1 / 200倍

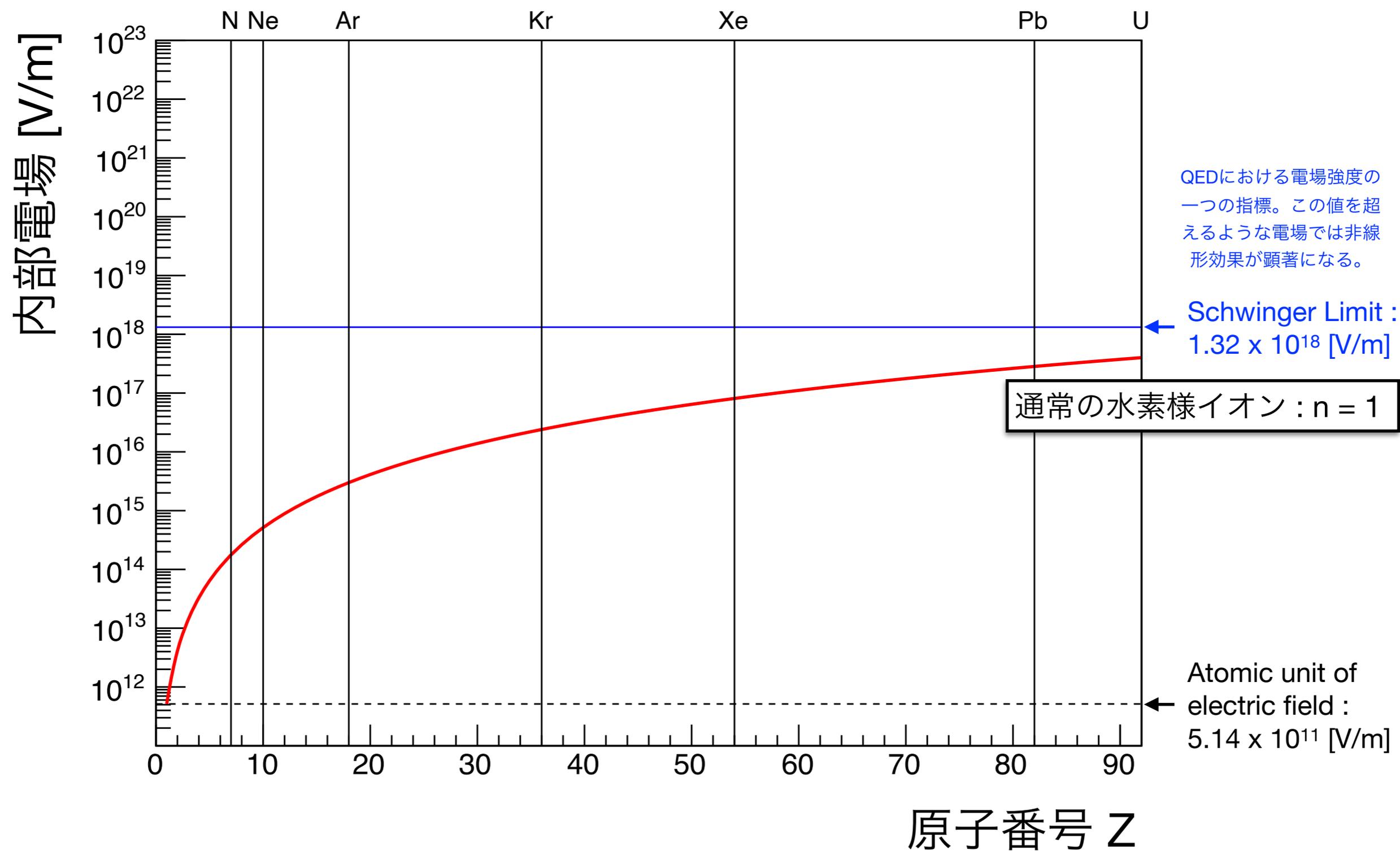
X線エネルギー : $E \propto \frac{m_{\mu^-}^*}{m_e}$ (換算質量に比例)

x 200倍

ミュオン水素の大きさイメージ ⁵

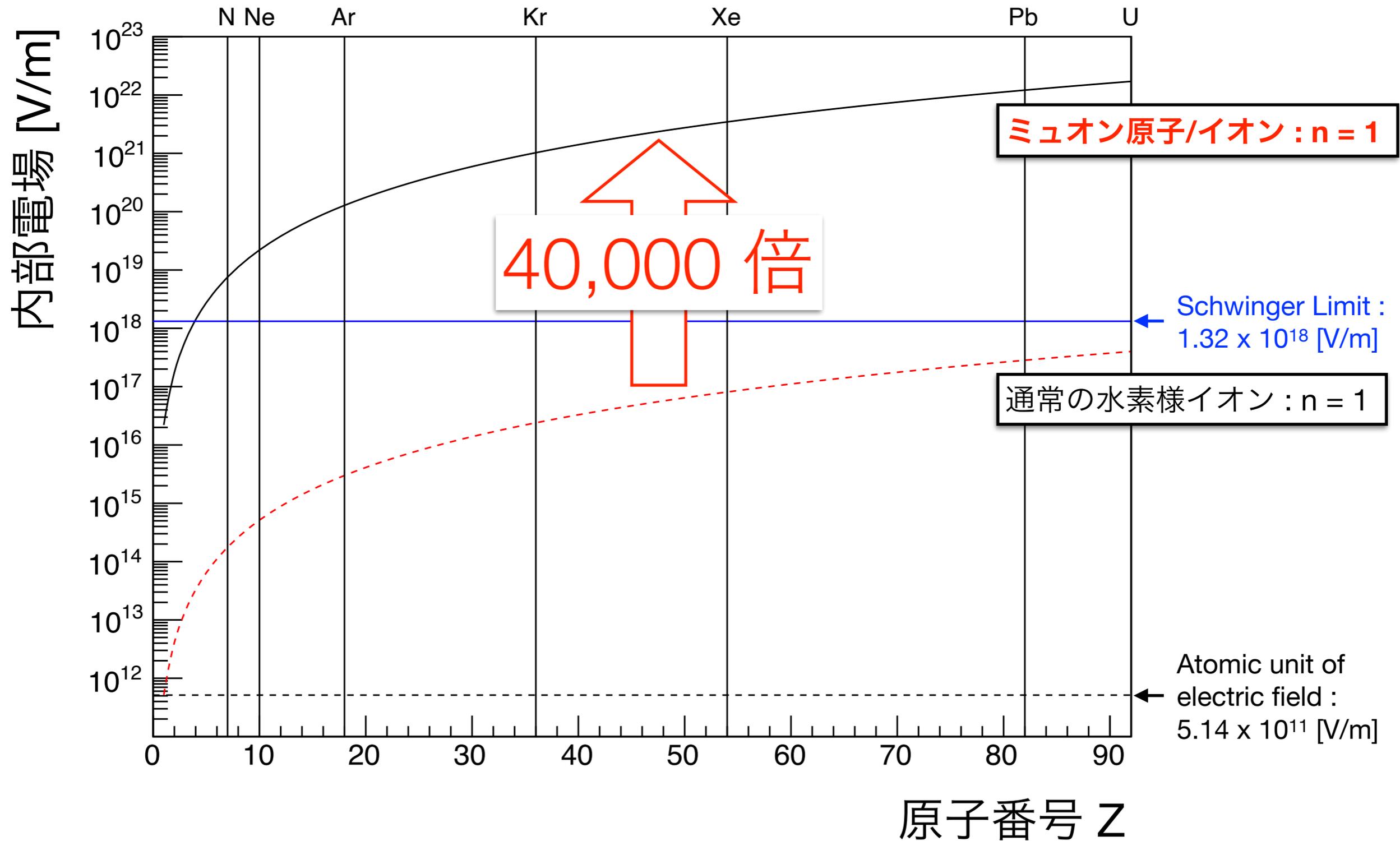


内部電場 $\propto Z^3$



束縛負ミュオンが感じる内部電場 $\propto \left(\frac{m_{\mu}^*}{m_e}\right)^2$ ⁷

200² 倍!



ミュオン原子精密分光



- 脱励起過程で放出される「**ミュオンX線**」の精密分光により、ミュオン原子の遷移エネルギーを正確に決定
- μ -原子核間の**超強電場環境におけるQED検証**を行う
- μNe 原子5-4 X線 (~ 6 keV) の高精度測定に成功 (**Proof-of-Principle実験**, PRL130, 173001(2023)←今回の結果)
- 今後、より高エネルギーX線が測定可能な検出器を導入して、Schwinger Limit 超の強電場でのQED検証を予定 (μAr 4 \rightarrow 3 X線 ~ 44 keV)。 **2024年2月、Feasibility test 実験をに実施**した。

2. ミュオン分子の精密分光

ミュオン分子

世界最小の
分子！

μpp

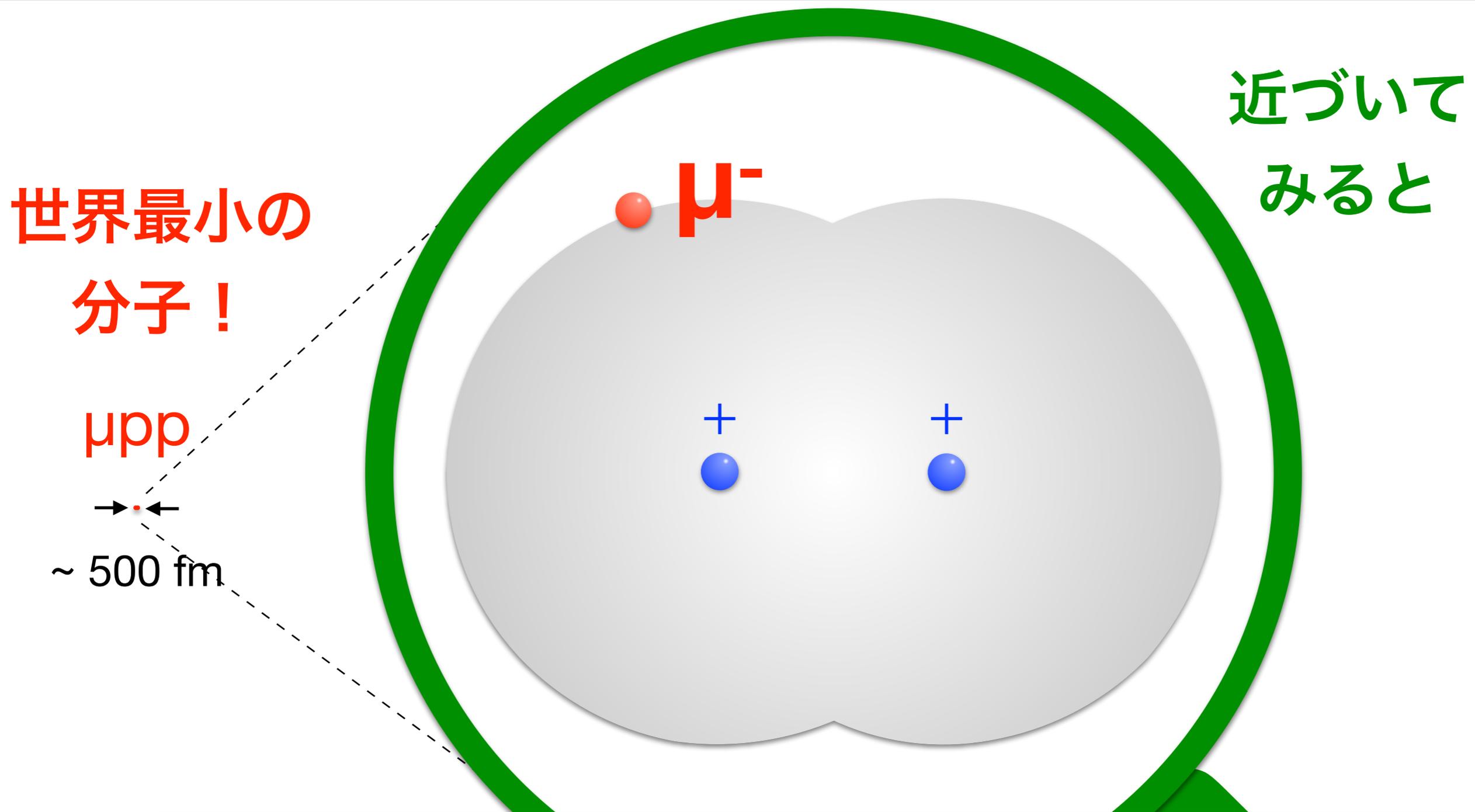
$\rightarrow \cdot \leftarrow$

~ 500 fm

「ミュオン原子」だけでなく
「ミュオン分子」も作れる！

H_2

ミュオン分子



世界最小の
分子！

μpp

~ 500 fm

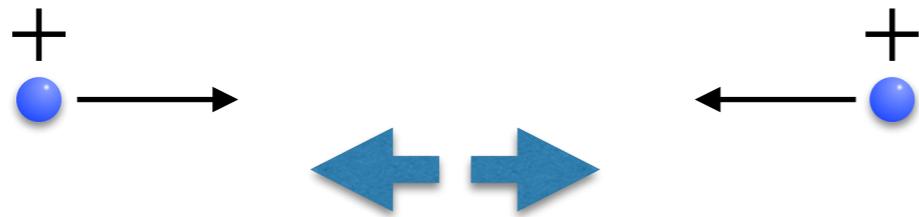
近づいて
みると

普通はプラス電荷同士で近づくことの出来ない
2つの原子核が、普通ではあり得ない程近づく！

核融合

熱核融合

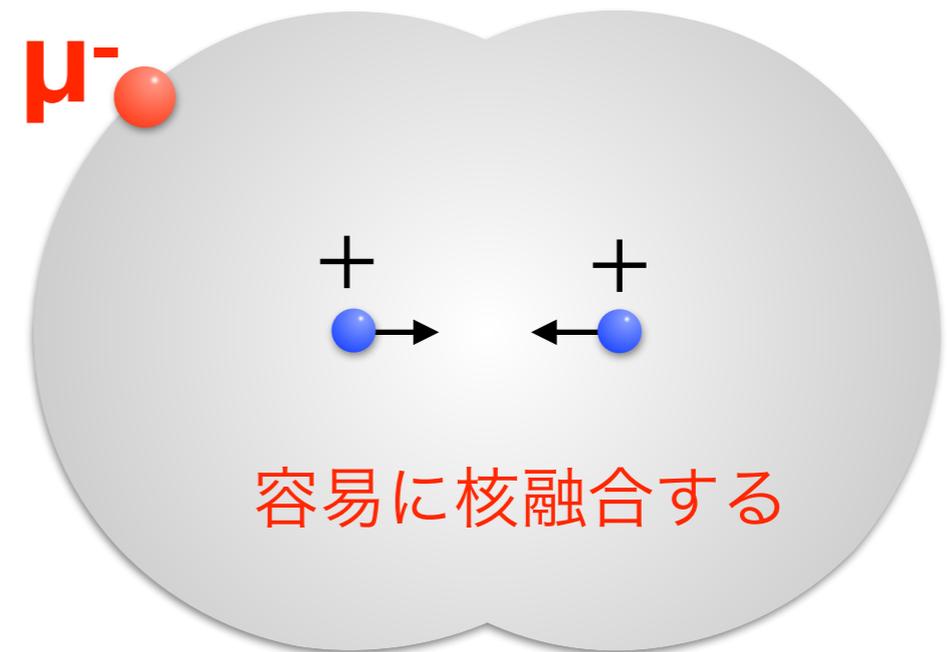
数億°Cのプラズマ中で
激しい衝突



電磁力による
大きな反発

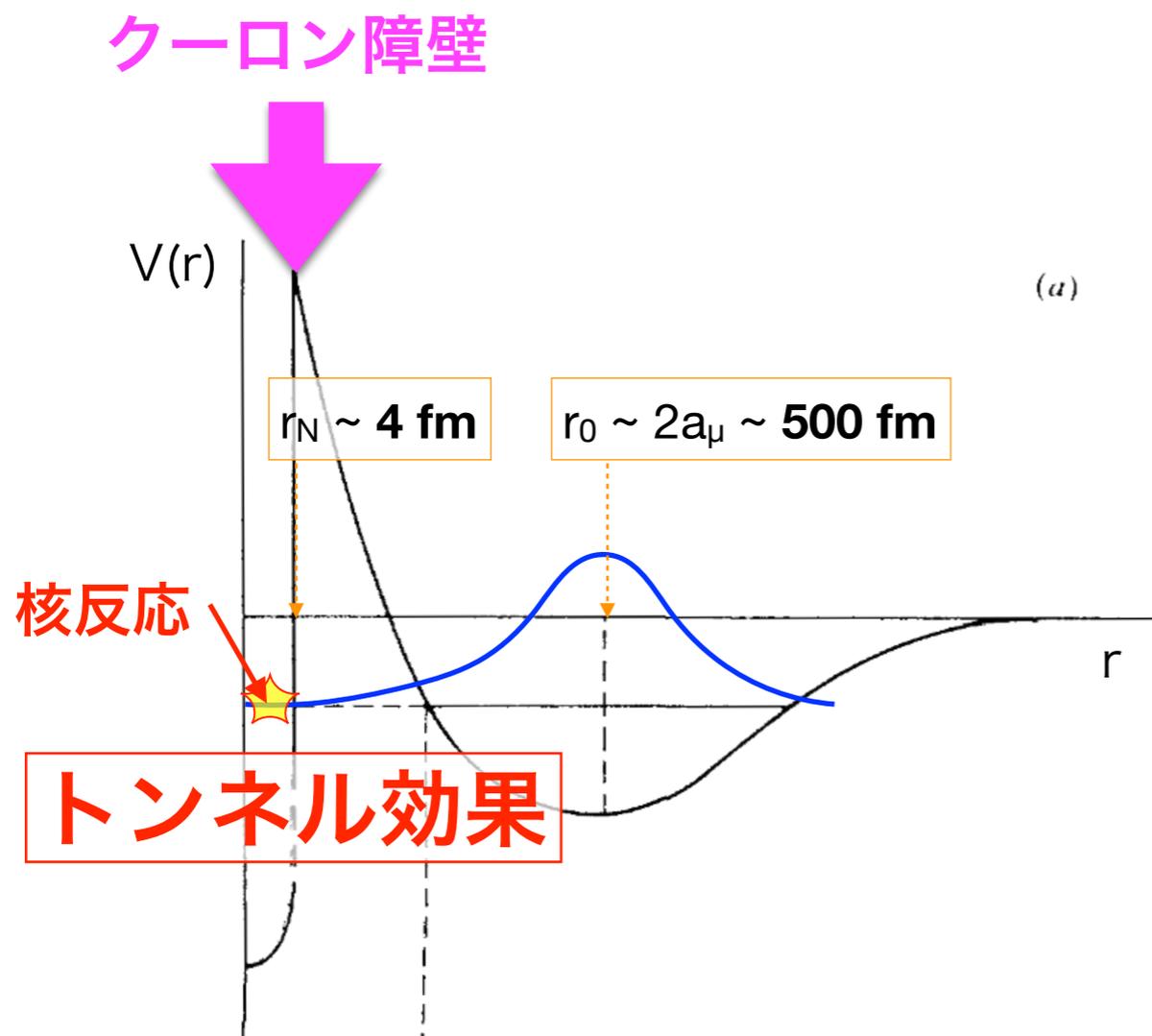
ミュオン核融合

原子核は互いに接近しやすい



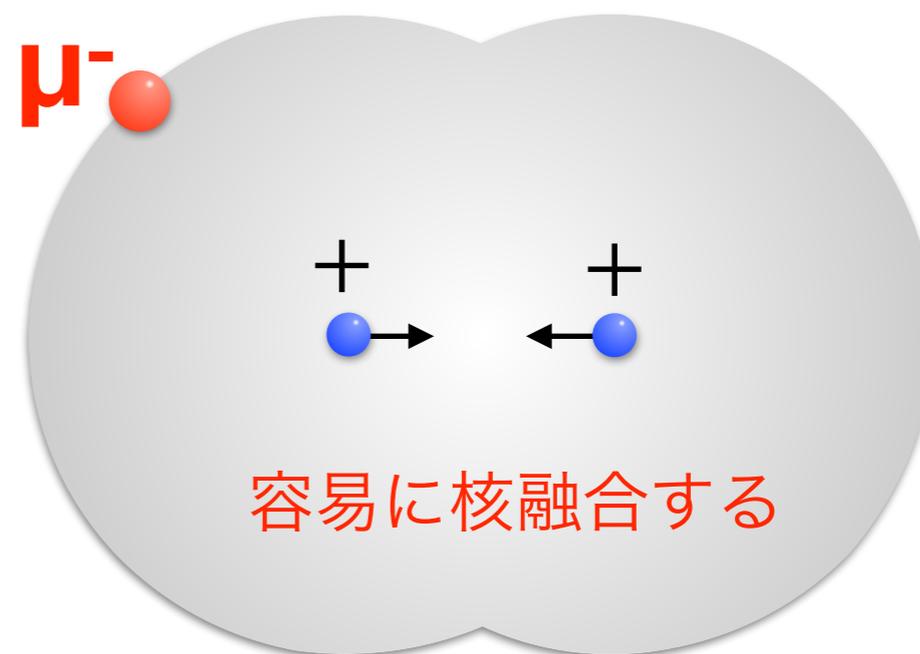
ミュオン分子のサイズまで
電磁気力による反発なし

核融合



ミュオン核融合

原子核は互いに接近しやすい

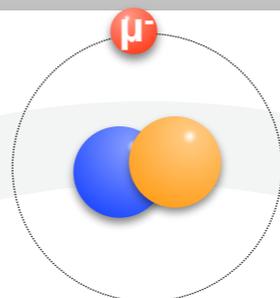


ミュオン分子のサイズまで
電磁気力による反発なし

ミュオン触媒核融合

面白いことに、これは、連鎖反応を引き起こす！

注：200倍拡大図



ミュオン原子

10⁻⁸ s

ミュオン水素原子は中性で原子半径が小さく他の原子核に近づきやすい

注：200倍拡大図



ミュオン分子

10⁻¹² s

ミュオンの寿命より十分速い！

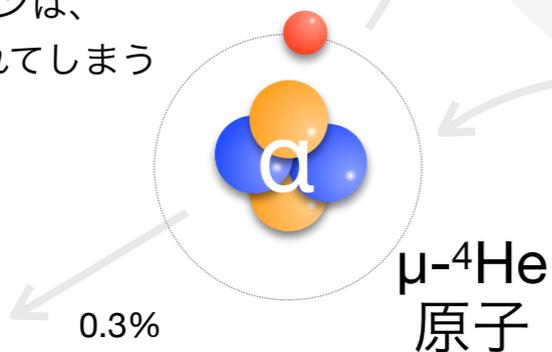
ミュオンを“触媒”とする核融合サイクル

核融合後に再放出されるミュオン → 再び同じサイクルを繰り返す



通常のアトミ

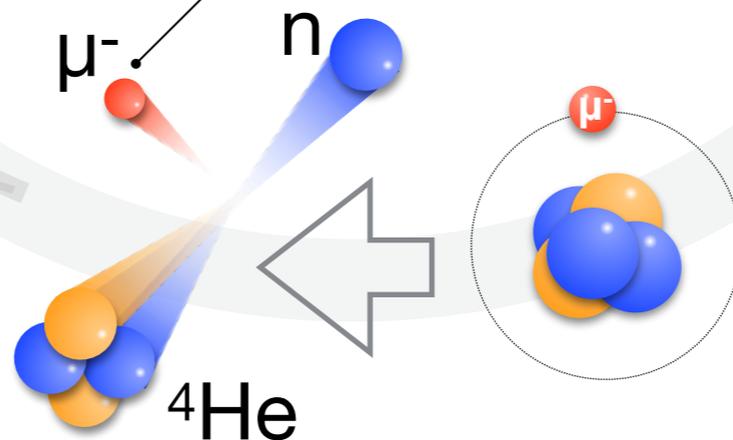
一部のミュオンは、サイクルから外れてしまう



0.3%

μ-⁴He アトミ

99.7%

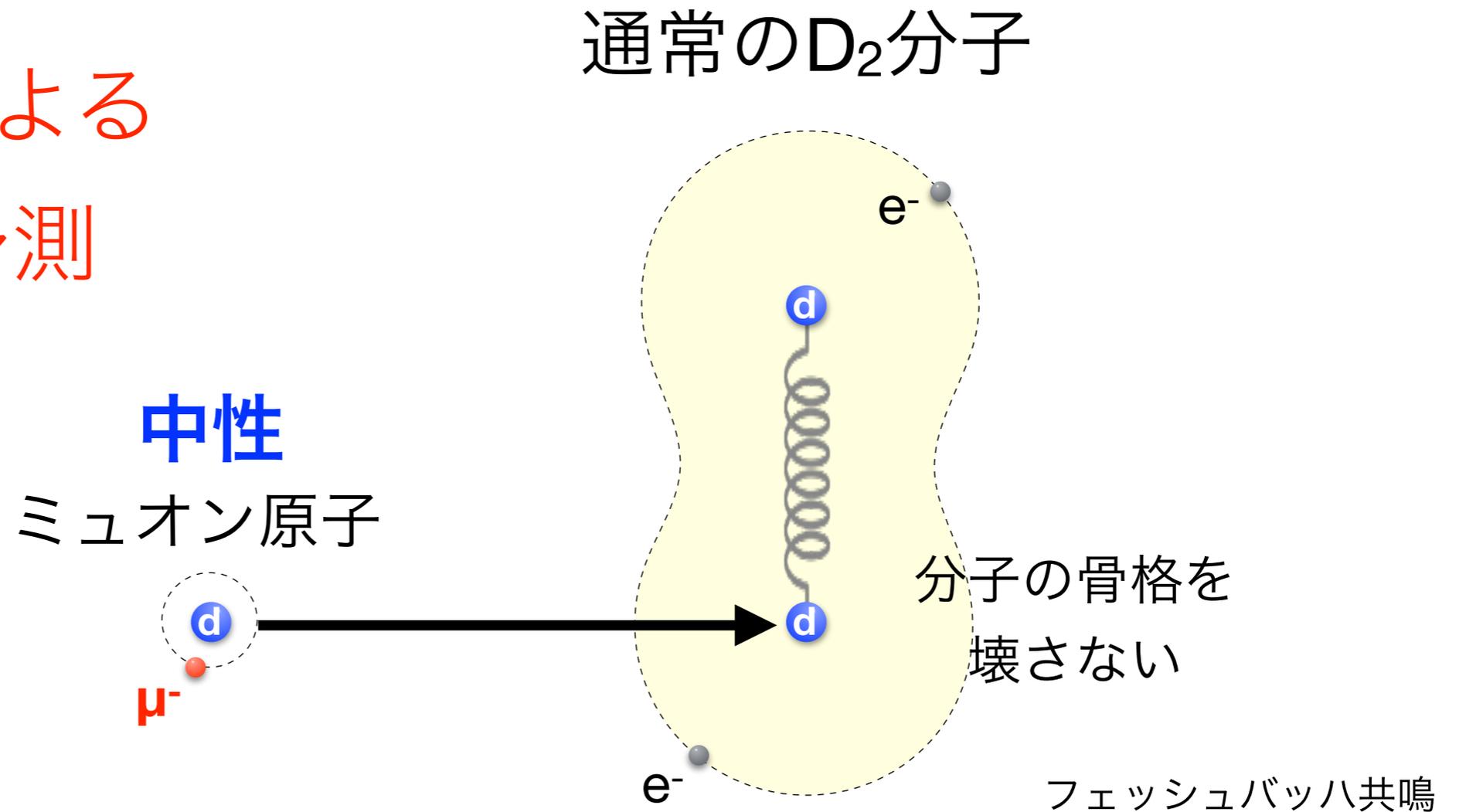


⁴He

サイクルはミュオンの寿命 (2.2 x 10⁻⁶ s) が尽きるまで続く

ミュオン分子はどのようにつくられるか？

Vesmanによる
理論的予測

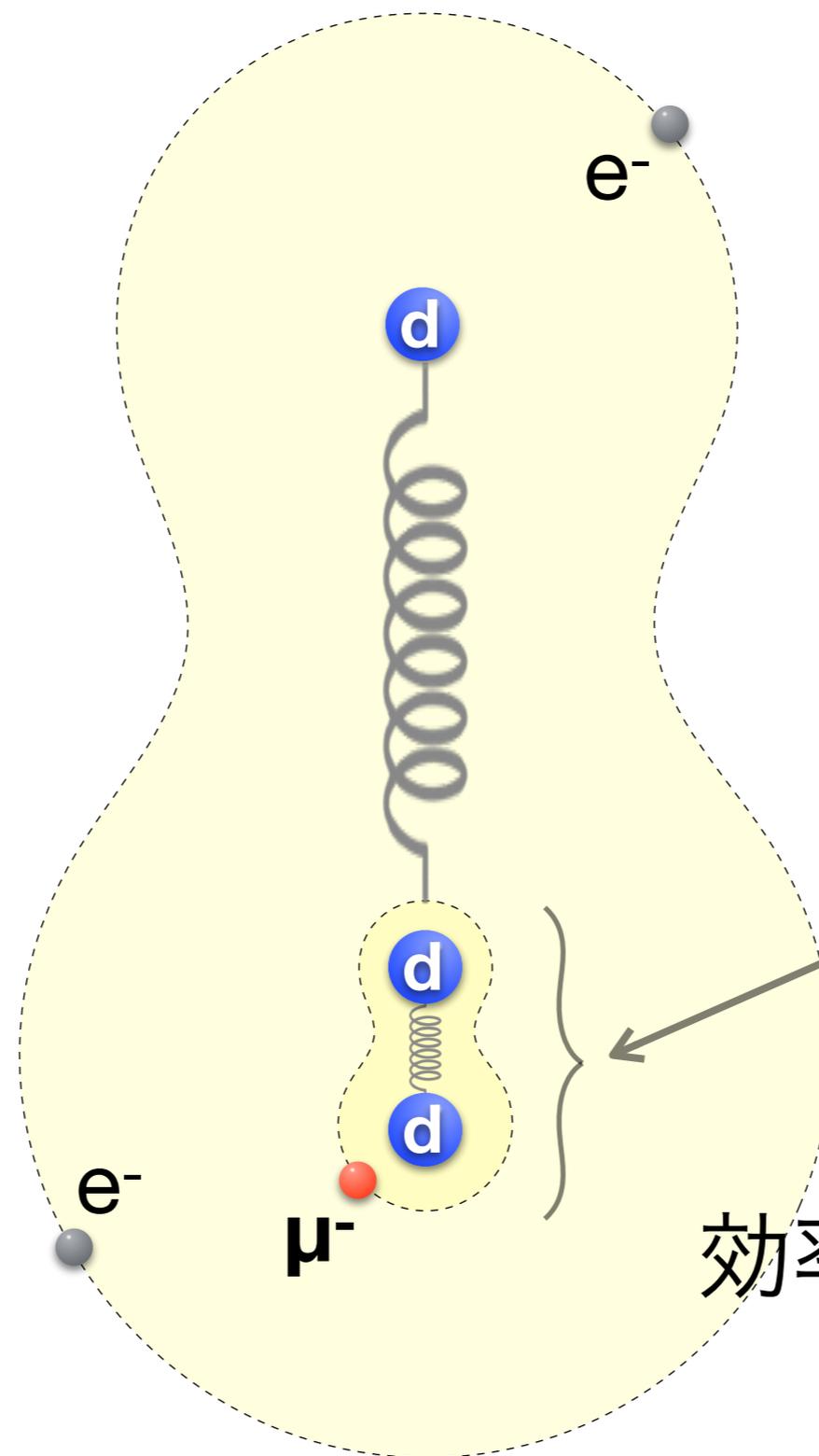


ミュオン原子が通常の水素分子に“そっと”(分子の骨格を破壊せずに)衝突した場合、
dd μ 分子生成の余剰エネルギー(とd μ の衝突エネルギー)は、D₂分子の振動回転励起
エネルギーとして渡される。⇒ 共鳴的に生成：Vesman機構

分子中の分子

Theoretical
prediction

マトリョーシカ
のような分子

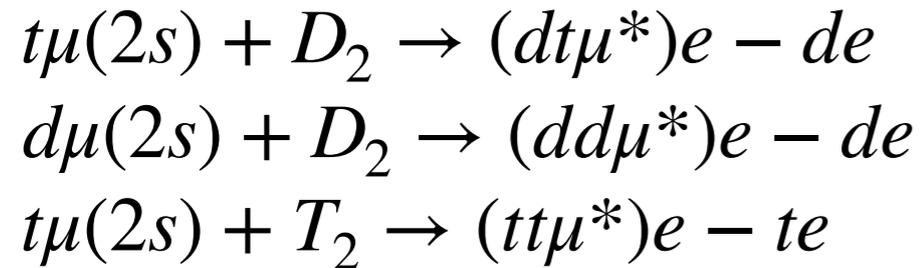


ddμ 分子

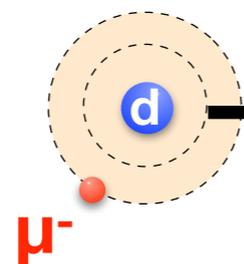
電荷+1の**擬似原子核**
として働き、分子内
に分子を形成する。

効率的に生成できる！

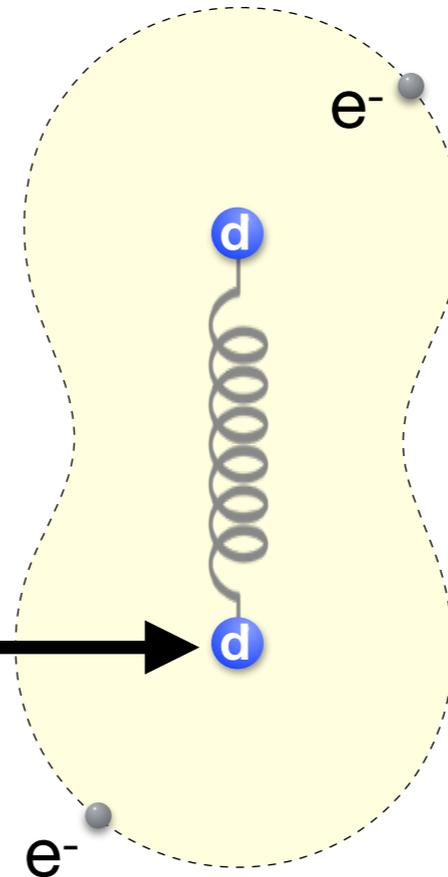
2s状態のミュオン原子から生成？



ミュオン原子
2s 状態



D₂分子



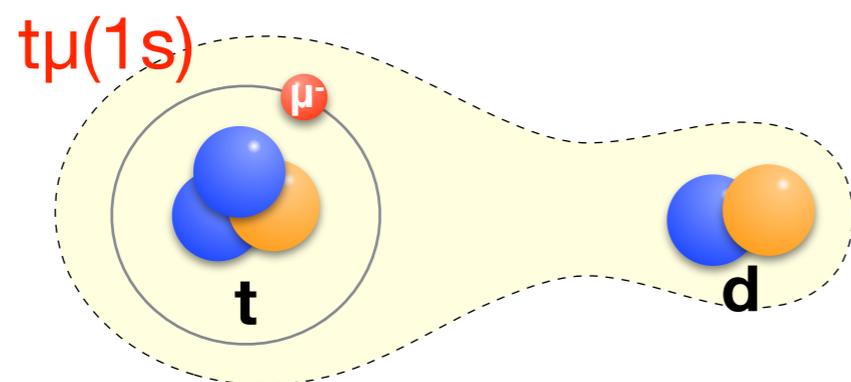
同様に「ミュオン分子(2s)共鳴励起状態」
も形成されるはず

しかしこれまでの μ CFの議論に於いて明示的に取り入れられていなかった。

基底状態と励起状態

基底状態

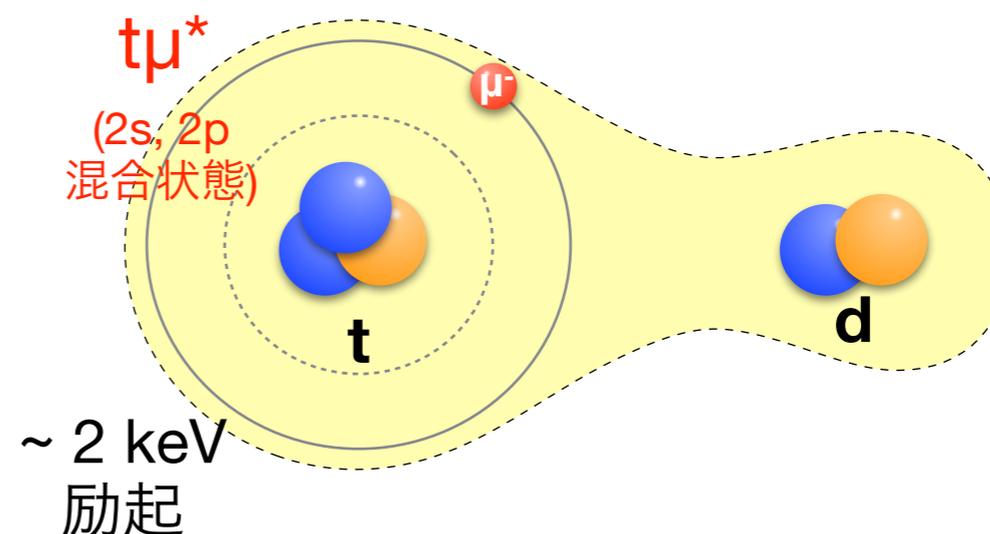
$dd\mu$



すぐに**核融合**を
引き起こす

励起状態

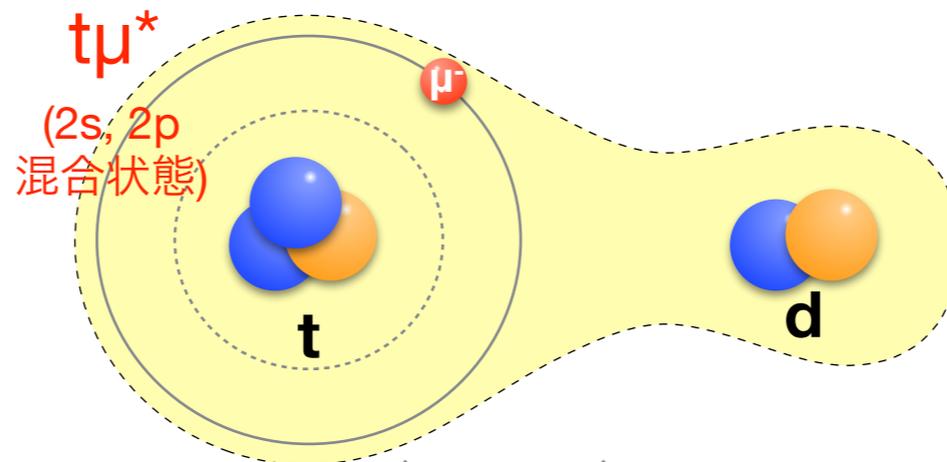
$dd\mu^*$



核融合せず
すぐに**解離**する

励起分子の解離過程

- 準安定励起分子
- サイズ $\sim 10^{-12}$ m
- μ が一方に局在した構造



X線の精密測定で分子共鳴状態の研究が可能

(しかし測定が難しい為測定例なし)

無輻射

輻射

X線

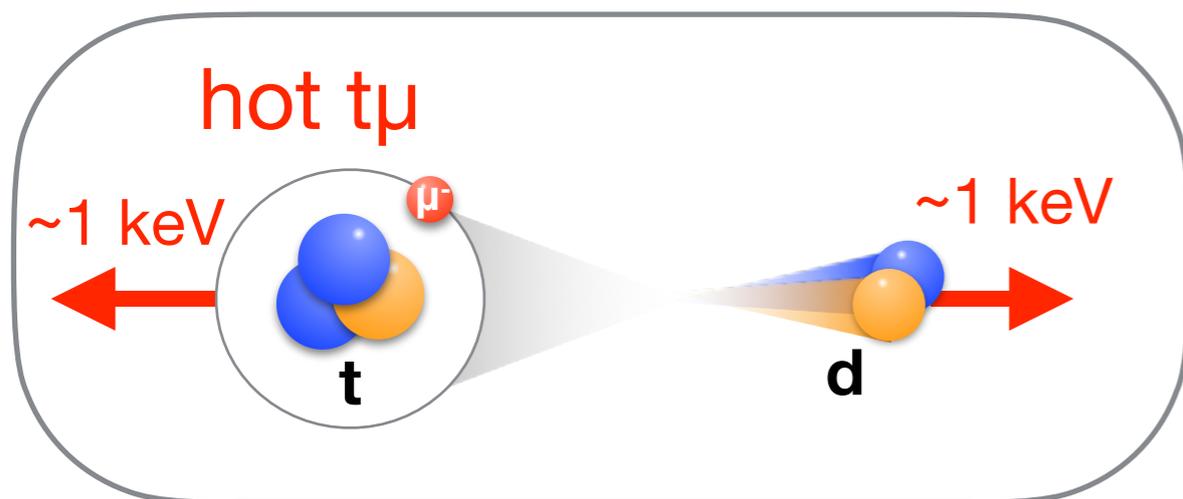
1.7 ~ 2 keV

hot $t\mu$

~ 1 keV

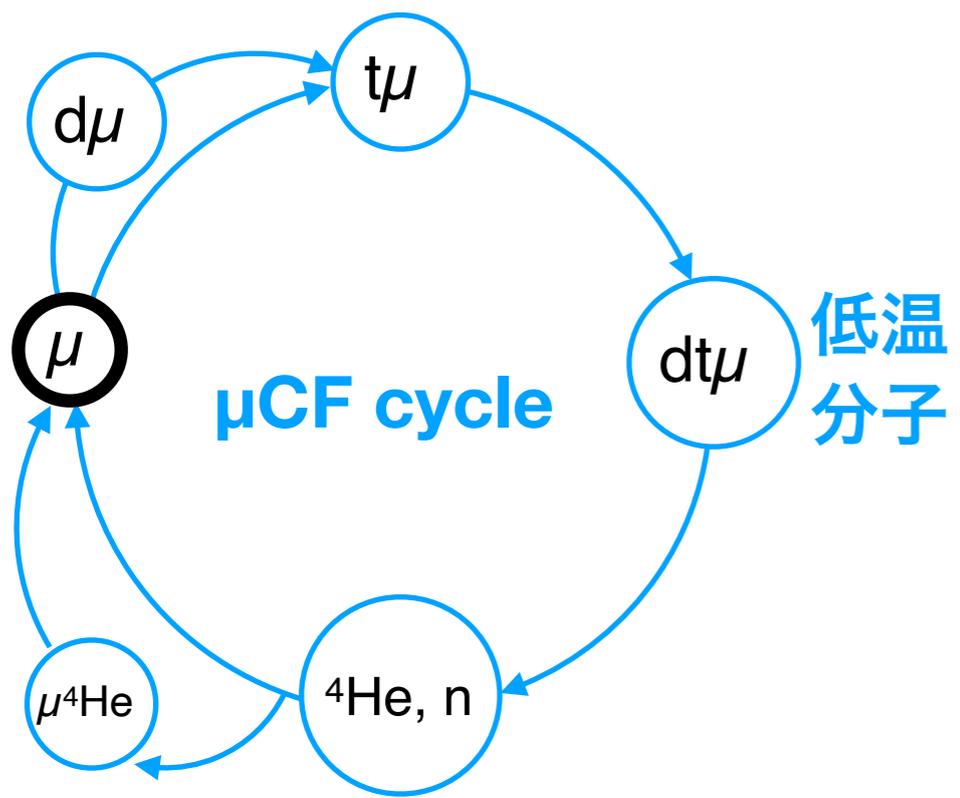
~ 1 keV

持ち出す
エネルギーは低い

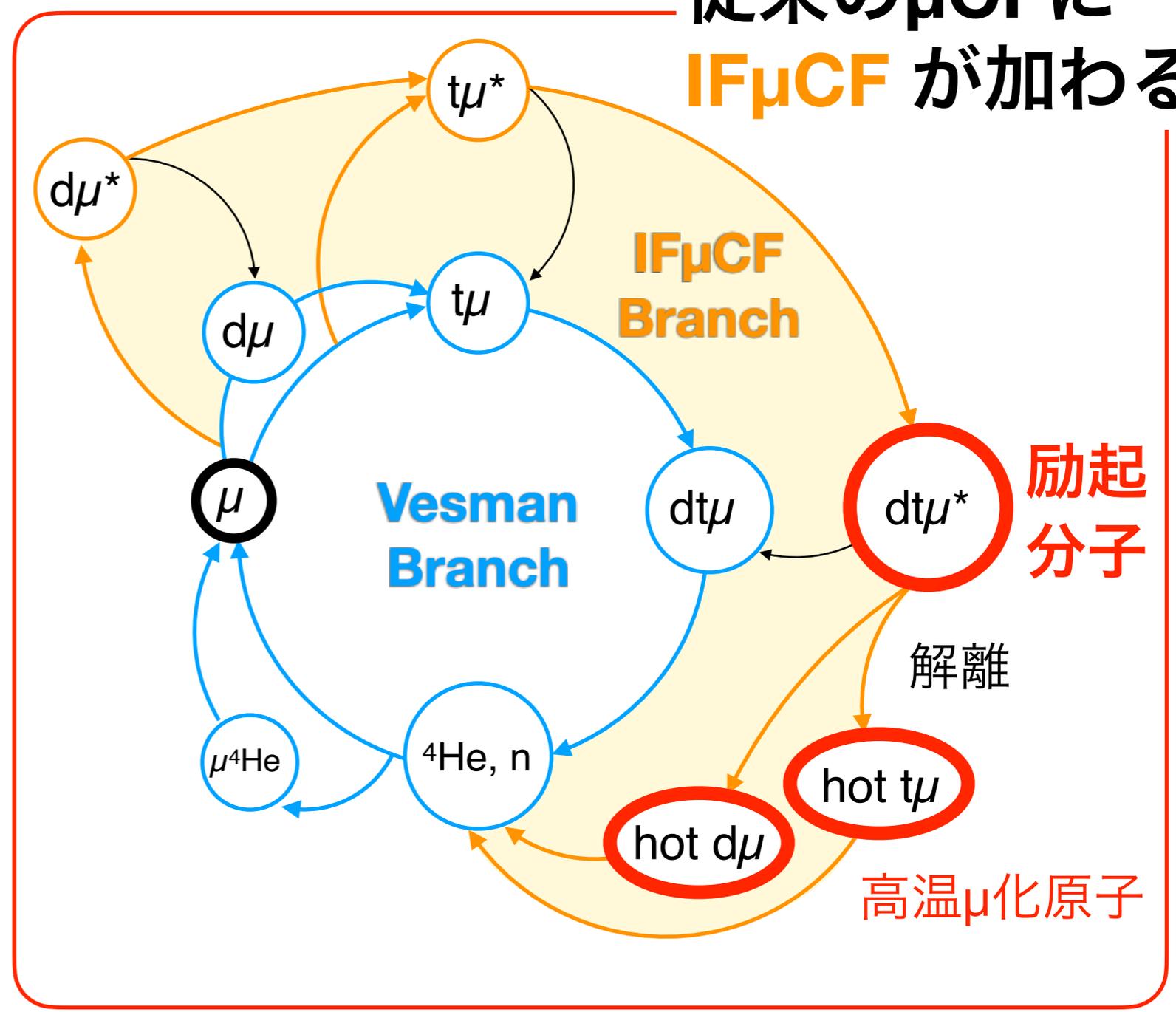


「励起分子」を考慮した μ CFサイクル

従来の μ CFサイクル
(Vesman model)



従来の μ CFに
IF μ CF 加わる



(サイドパスモデル)

励起分子 $dt\mu^*$ の重要性が示された

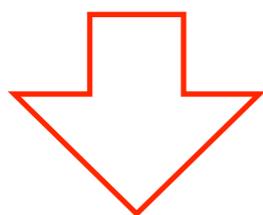
断熱近似を脱却した新しい少数多体系計算: $(dt\mu^*)e \rightarrow$ 電子も含めた4体計算

μ CFレートの
温度依存性
理論・実験
不一致問題

理論
(点線)

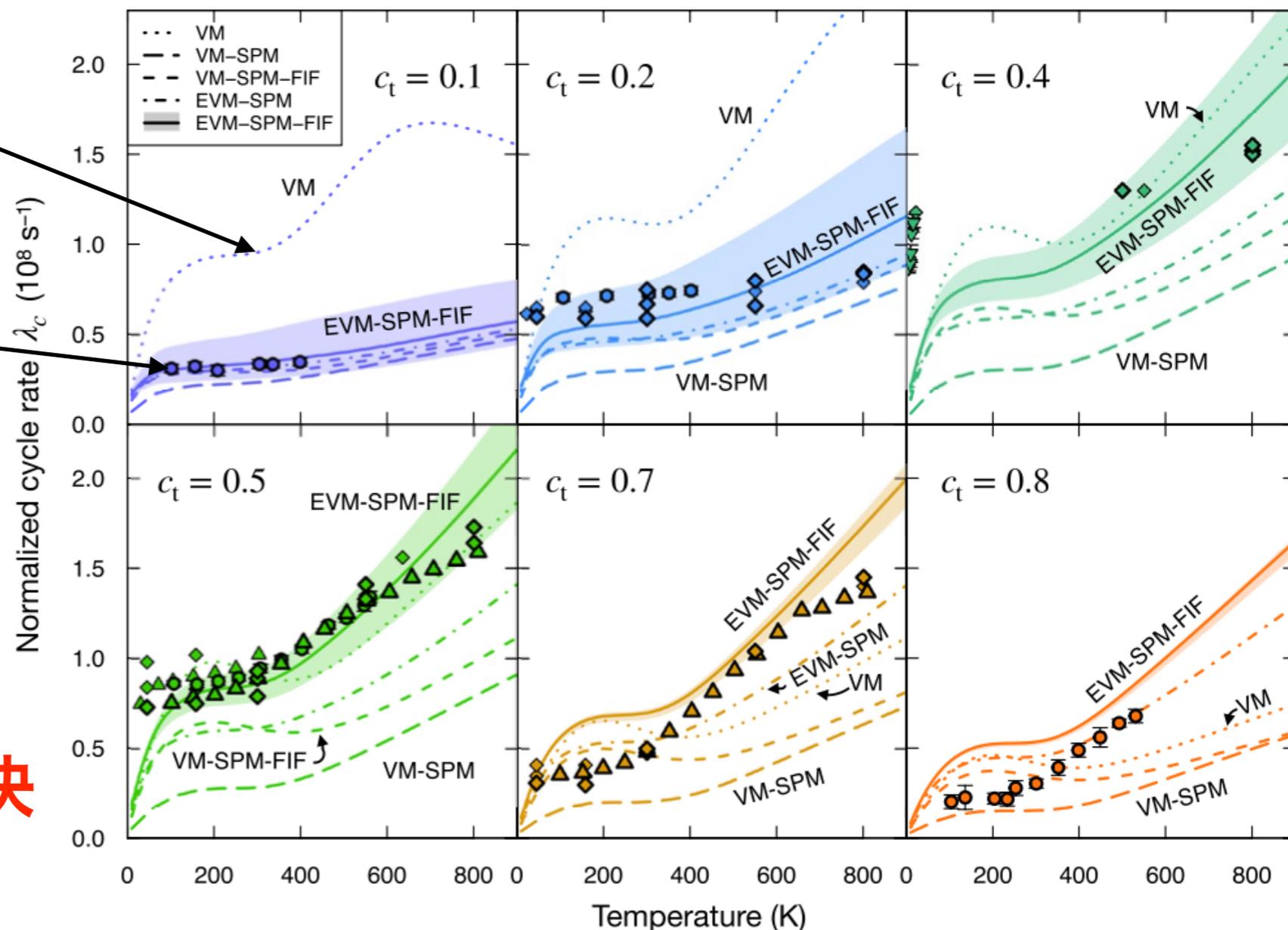
VS.

実験
(プロット)



$dt\mu^*$ の解離を經由し
 $d\mu/t\mu$ 分布が変化。

理論と実験の矛盾を解決



2022年4月16日 論文公表

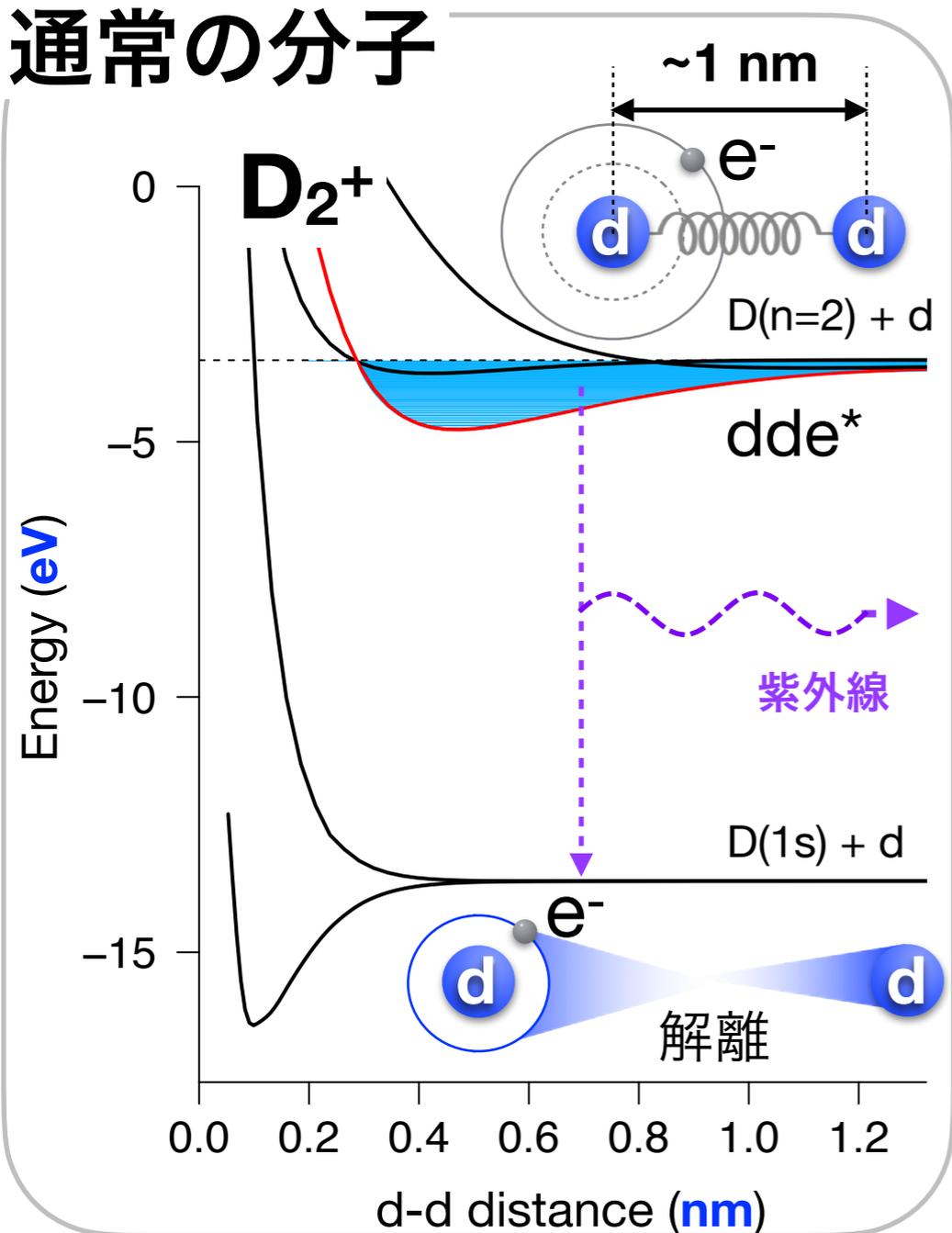
T. Yamashita et al., Sci. Rep.12 (2022) 6393

→ しかし、励起分子の直接的な存在の証拠は無かった

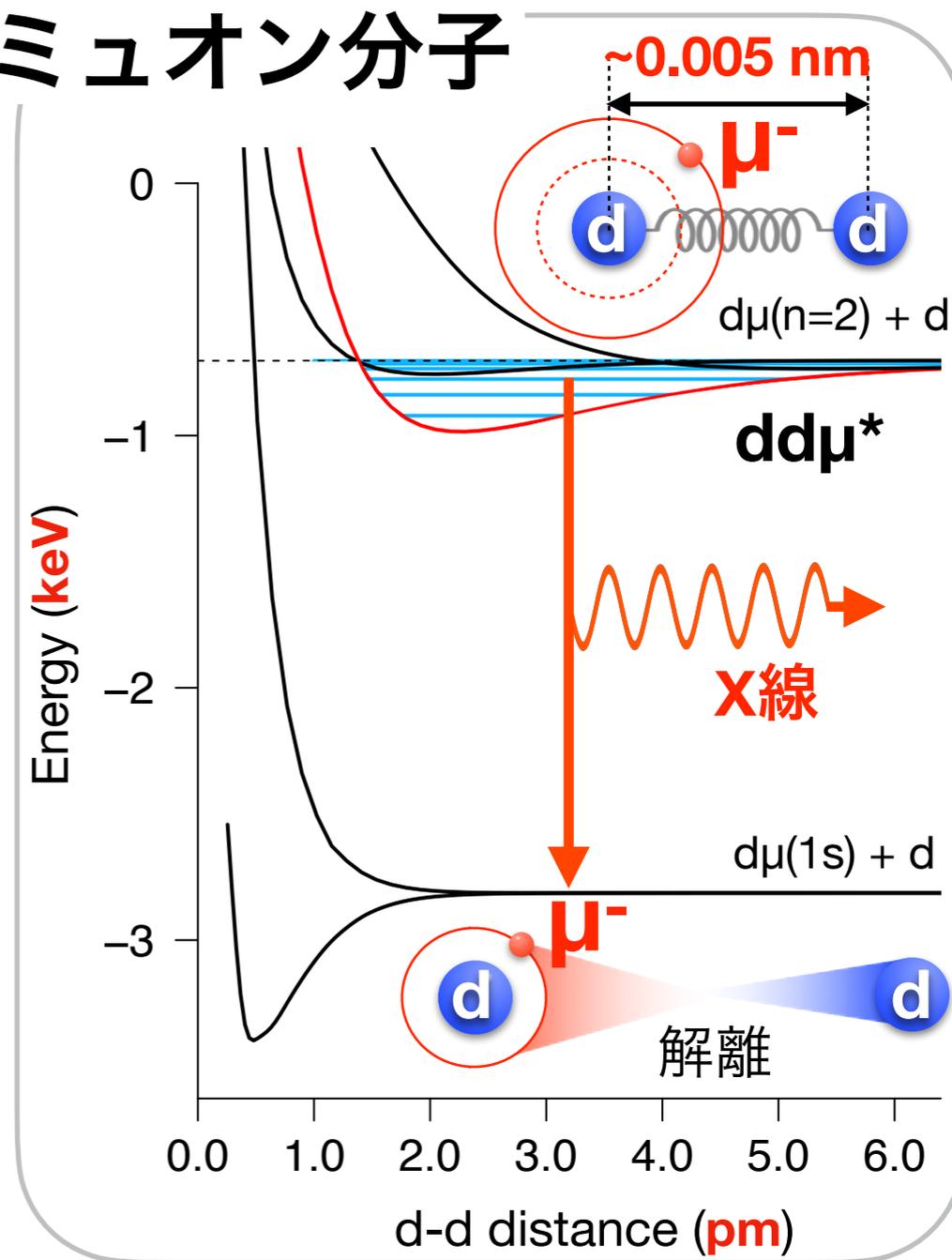


ミュオン分子からのX線測定を目指す

通常分子



ミュオン分子

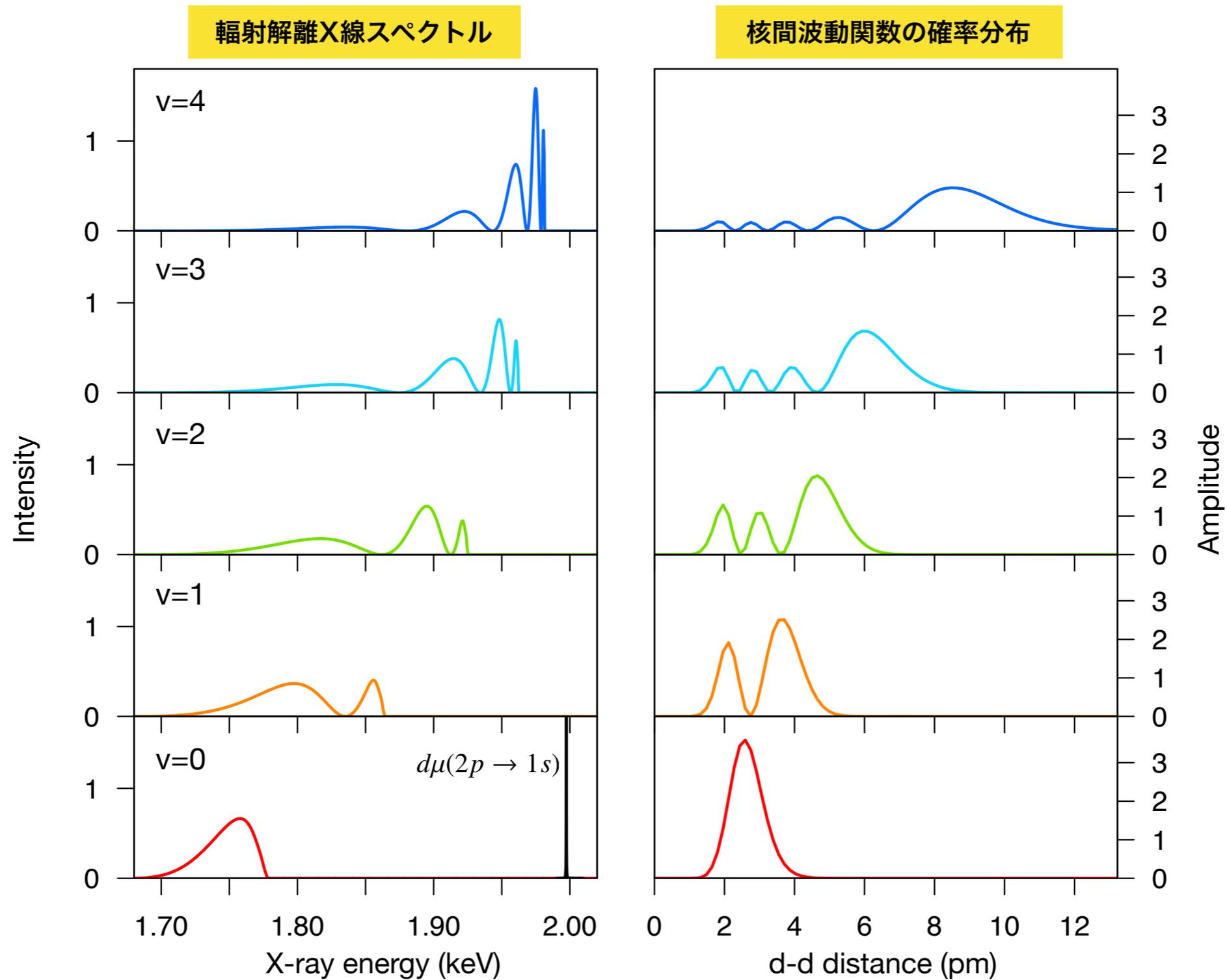


- 核間距離 **1/200倍**
- エネルギー **200倍**
- dとμの質量が近く断熱近似成立しない
- d d μ*は零点振動が大きく準位間隔が疎

ミュオン分子 分光研究

- ➔ 理論：原子核と重い負電荷粒子の運動を同時に解く厳密な少数多体系計算
- ➔ 実験：ミュオンビーム中のX線測定において非常に高いエネルギー分解能が要求される。

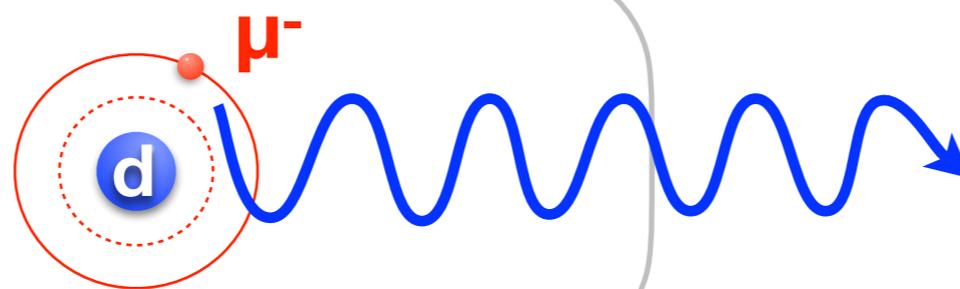
輻射解離スペクトル



波動関数の形状を反映した、特徴的なX線エネルギーが期待される

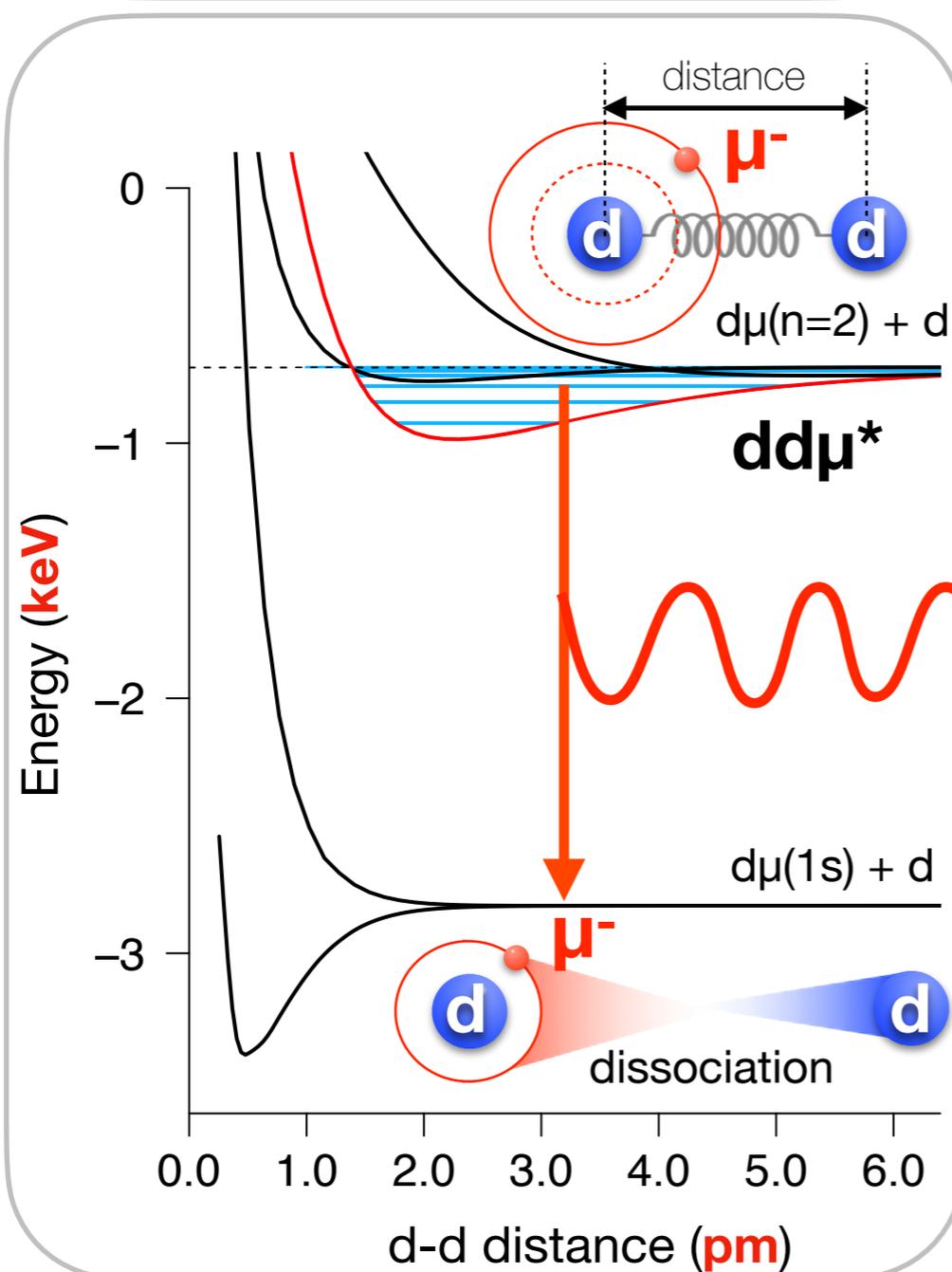
測定の難しさ

ミュオン
原子



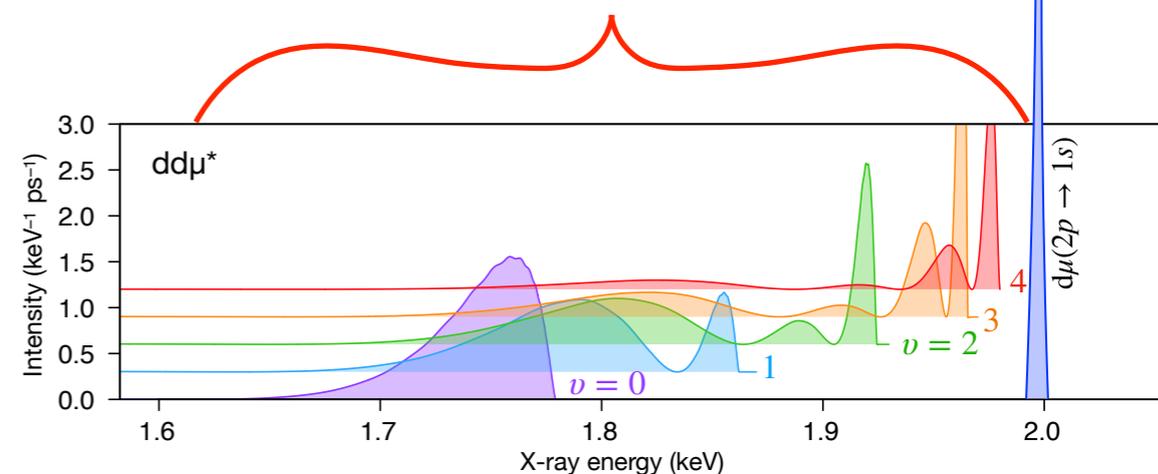
X-ray : 2 keV
intense & sharp peak

ミュオン
分子

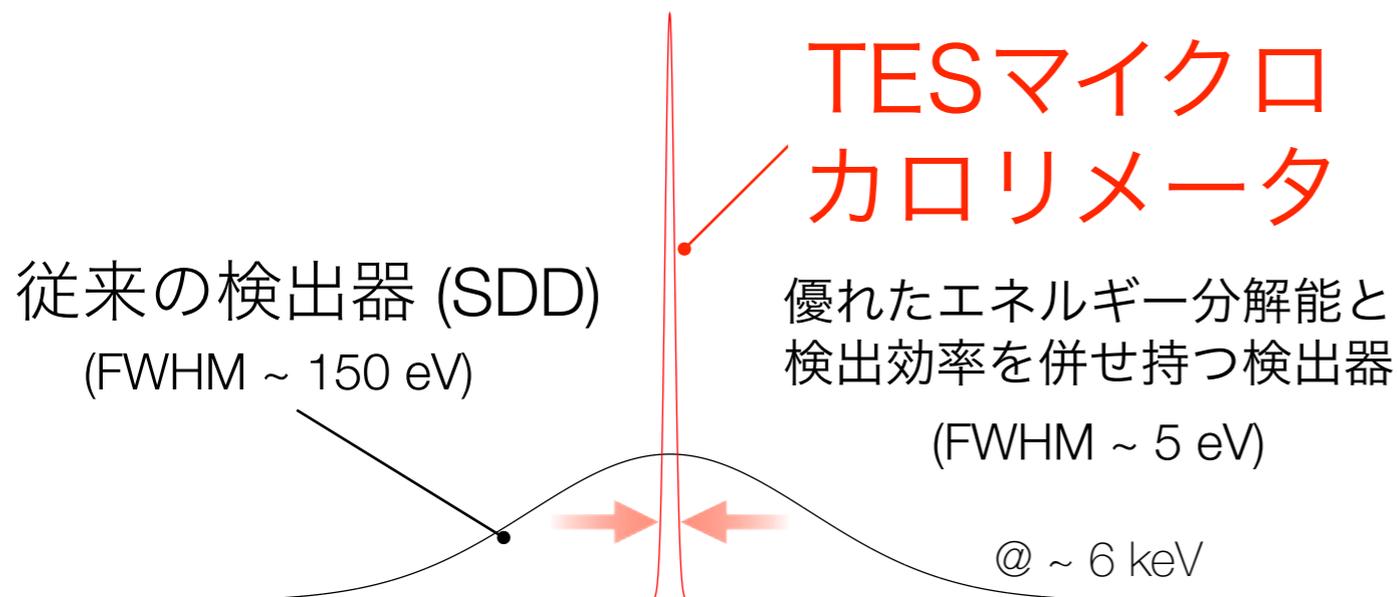


従来の半導体検出器の分解能では分離できない
(~数100 eV)

X-ray : 1.7 ~ 2 keV
low-intense & broad structure

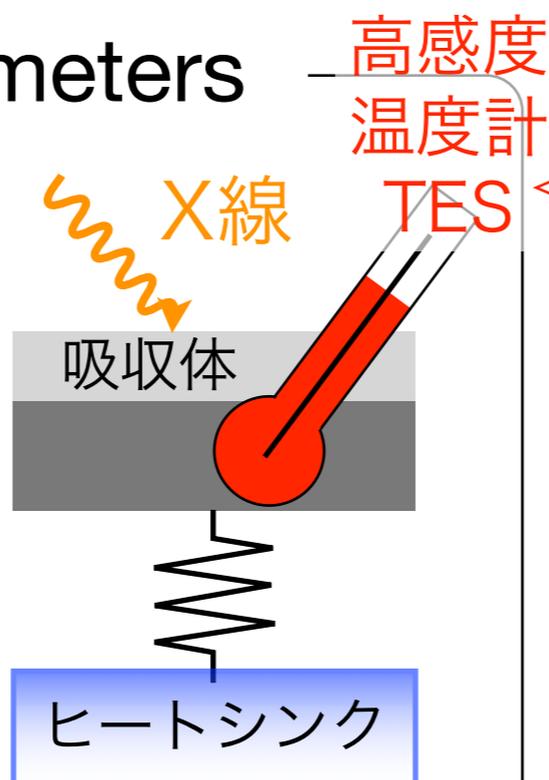


多素子TES型マイクロカロリメータ

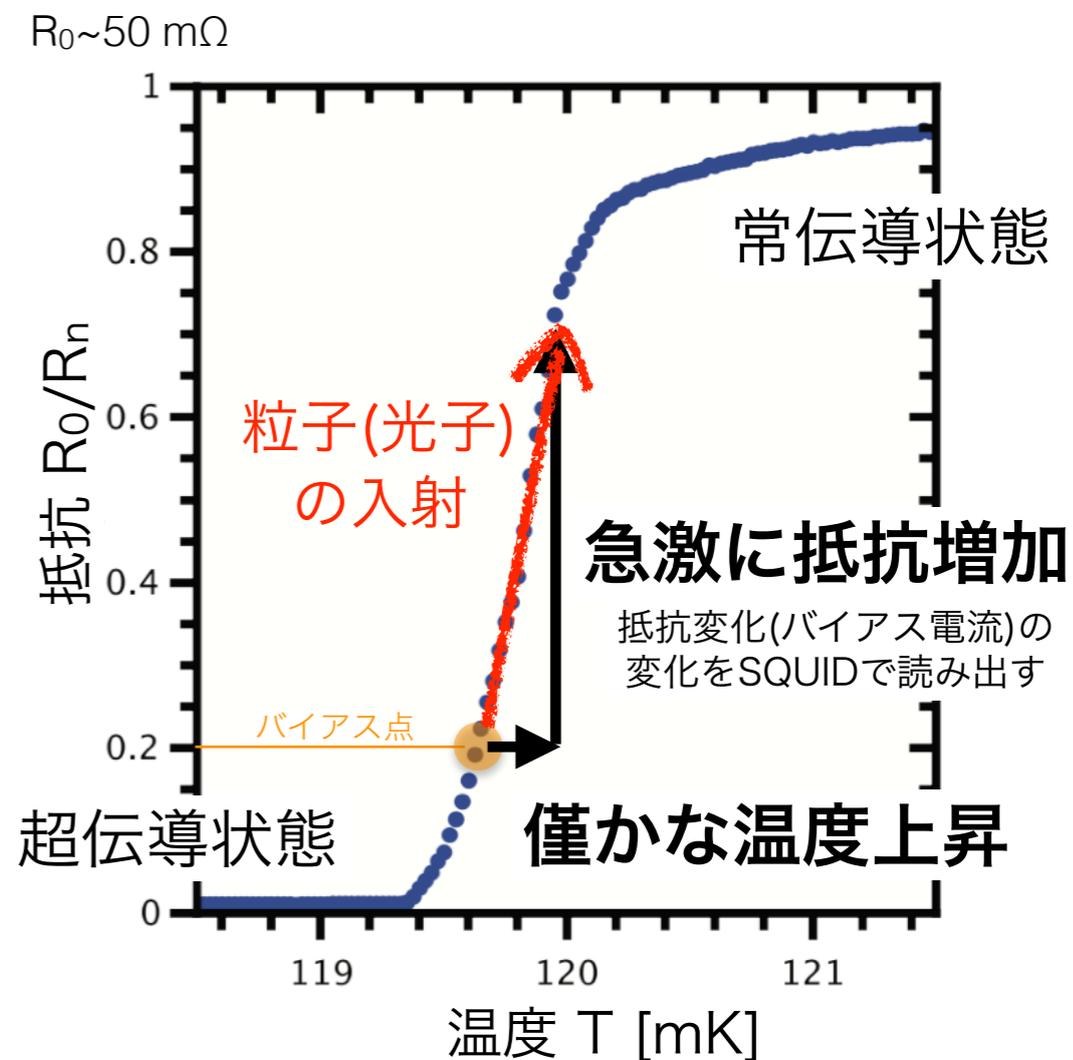


TES microcalorimeters

1. 入射粒子が吸収体に吸収される
2. エネルギー ΔE はフォノンに変換
3. 僅かな温度上昇を高感度温度計 TES で測定する



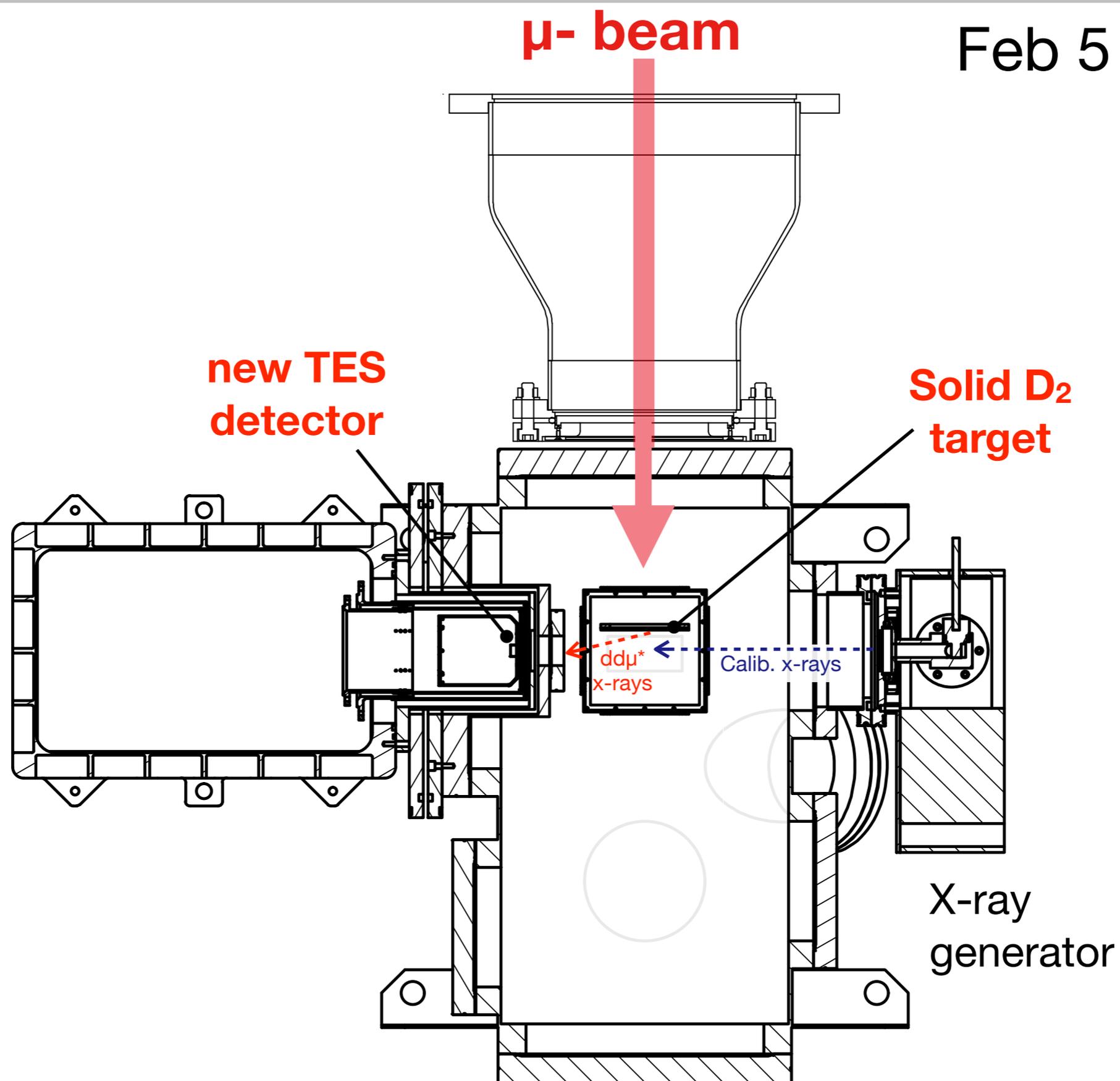
Transition Edge Sensor



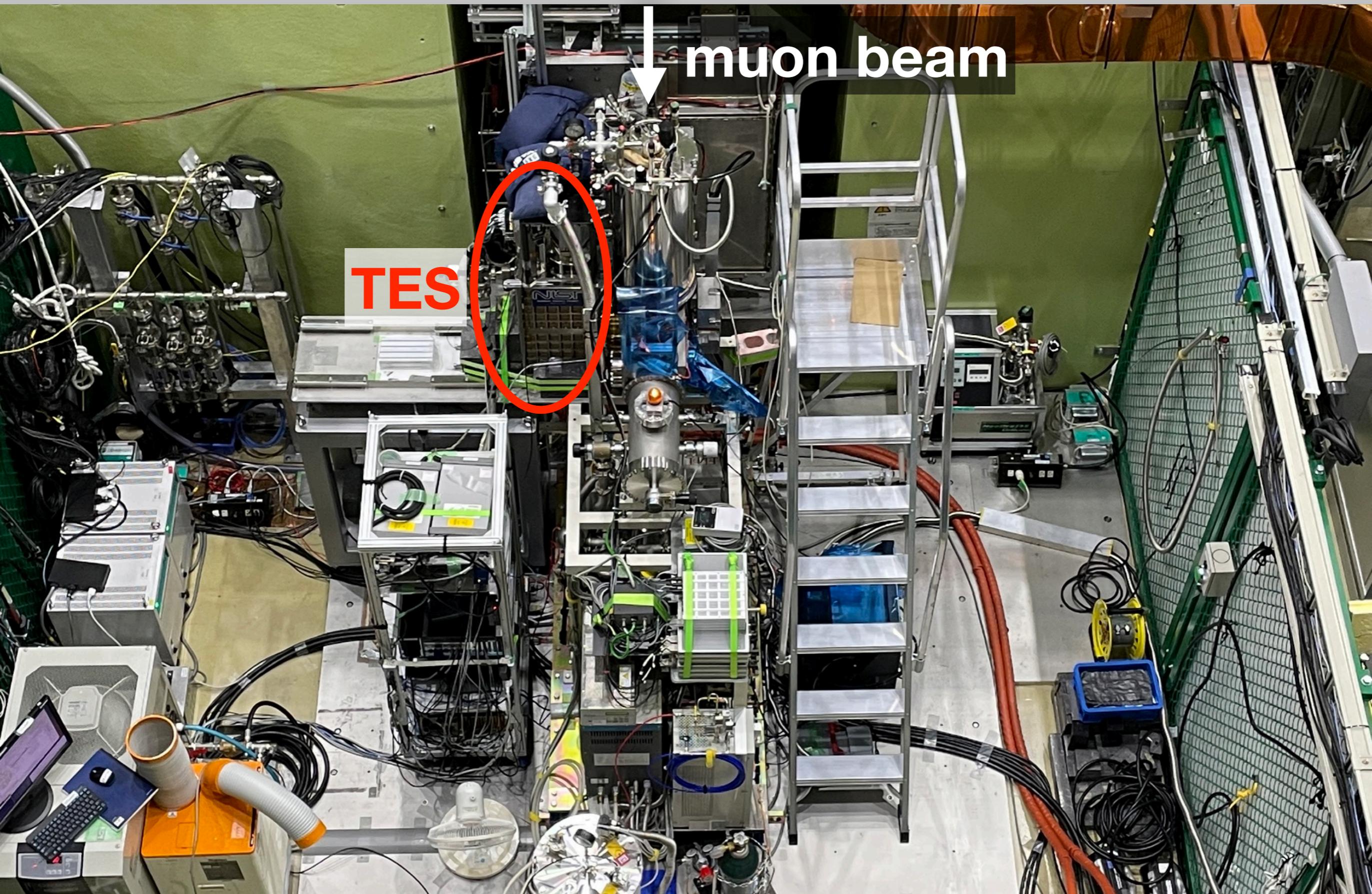
高分解能を実現 ($\Delta E / E \sim 10^{-3}$)

固体D₂標の実験 (2023)

Feb 5 - 11, 2023



実験エリア (J-PARCミュオン施設)



↓ muon beam

TES

The world's first muonic molecule high-precision X-ray spectroscopy

Preliminary

まとめ

Summary & Outlook

(1) 「ミュオン原子X線精密分光」

✓ μ -原子核間の超強電場環境におけるQED検証

✓ μ Ne原子5-4 X線 (~6 keV) の高精度測定に成功 → published : PRL130, 173001(2023)

(2) 「ミュオン“分子”X線精密分光」

✓ μ CF過程における複雑な量子力学的動力学の解明 (理論 : Sci. Rep. 12, 6393 (2022))

✓ **世界初の高精度ミュオン分子X線分光に成功**

- ◎ 「ミュオン科学」 : 特に **μ CF素過程に関する研究** に大きな進展があった
- ◎ 一方で、 μ CFの学理的研究から**応用・実用を見据えた研究**に向けて検討を推進
 - ➡ エネルギー増幅率向上 (サイクル数増加 & ミュオンコスト低下)
 - ➡ コンパクトな核融合の実現へ → ミュオン科学・技術 (ミュオニクス) を牽引

