



ダイポール磁場配位を用いた陽電子捕獲と ペアプラズマ生成に向けた試み

東大^柏¹, マックスプランク・プラズマ物理研 (IPP)², ミュンヘン工科大 (TUM)³,
ローレンス大⁴, カリフォルニア大サンディエゴ校 (UCSD)⁵
齋藤晴彦¹², J. Horn-Stanja², S. Nissl², M. Singer³, E.V. Stenson³,
U. Hergenhausen², T. Sunn Pedersen², M. Dickmann³, C. Hugenschmidt³,
M.R. Stoneking⁴, J.R. Danielson⁵, and C.M. Surko⁵

京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工へ応用」2018年12月6日

Members and collaborators of PAX/APEX*

Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP), DE

Thomas Sunn Pedersen

Per Helander

Uwe Hergenrohn

Juliane Horn-Stanja*

Holger Niemann

Stephan Nißl*

Norbert Paschowski

Haruhiko Saitoh* (2018年9月まで)

Ernst Moritz Arndt Universität Greifswald, DE

Lutz Schweikhard

Gerit H. Marx

Lawrence University, US

Matthew R. Stoneking

Technische Universität München (TUM), DE

Christoph Hugenschmidt

Marcel Dickmann

Christian Piochacz

Eve V. Stenson*

Markus Singer*

Sebastian Vohburger

University of California, San Diego, US

Clifford M. Surko

James R. Danielson

NIFS, JP

Nagato Yanagi

Toshiyuki Mito

The University of Tokyo, JP

Mini-RT (Yuich Ogawa) and

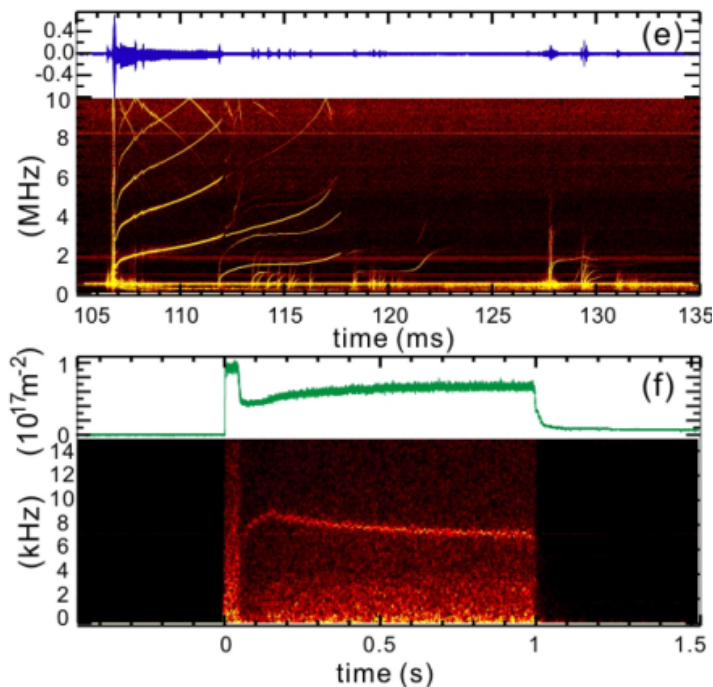
RT-1 (Zensho Yoshida)

*Garching team 100% working for the project

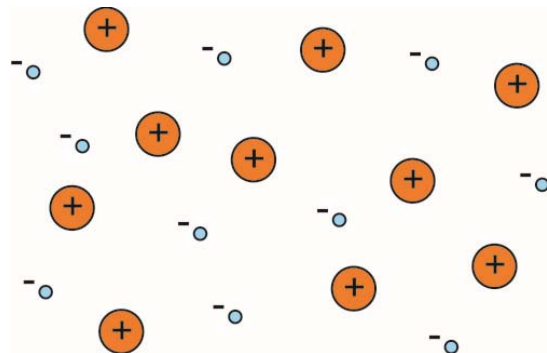
*Work supported by European Research Council (T. Sunn Pedersen ERC-2016-ADG), Germany Research Society (DFG), Max Planck Institute for Plasma Physics, NIFS Collaboration Research Program, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), and the UCSD Foundation



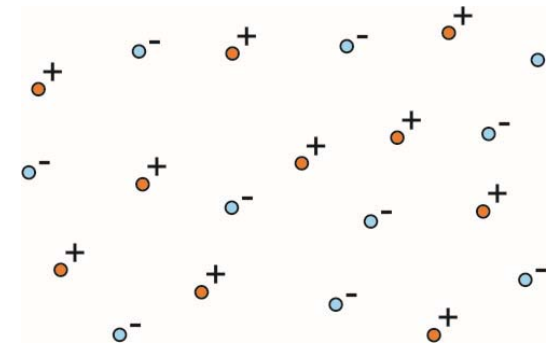
等質量の電子と陽電子から構成される「ペアプラズマ」は、通常のイオン電子プラズマとは異なる新しい物理現象を示す



通常のプラズマの波動現象の例



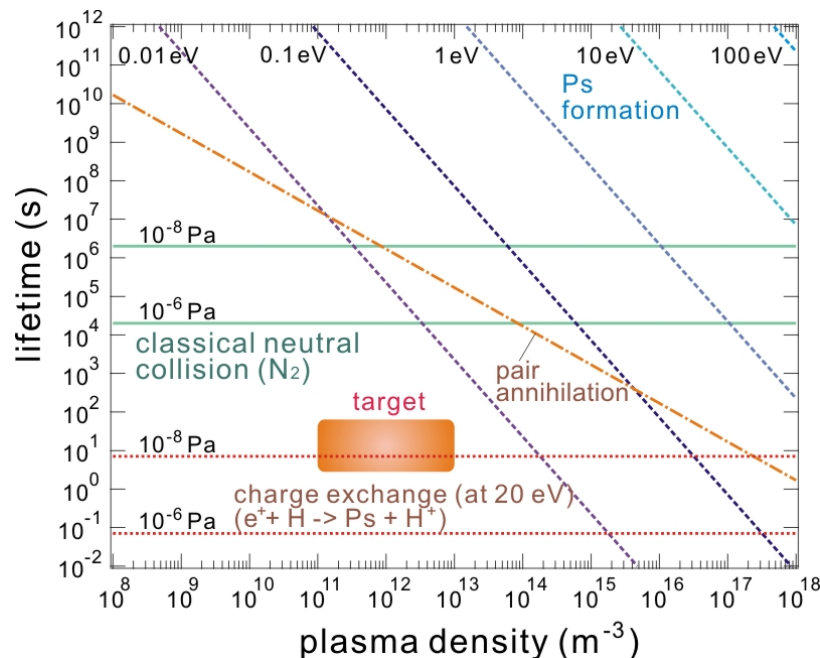
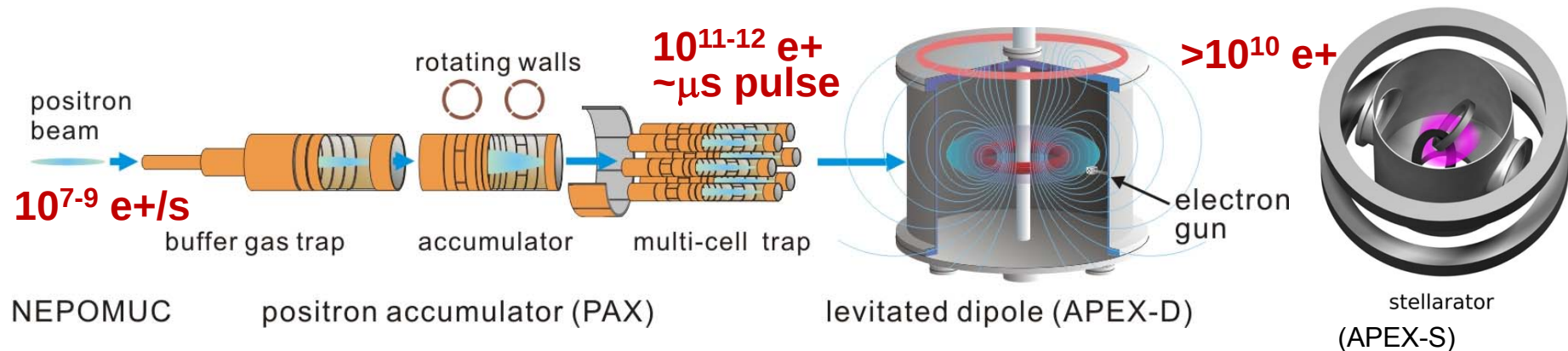
「通常」のイオン電子プラズマ



電子陽電子のペアプラズマ

- 荷電粒子群の作り出す**集団現象**は、**プラズマ物理**の分野の中心的研究課題となっている
 - 宇宙や実験室プラズマに観測される**波動現象**
 - プラズマの存在を規定する各種の**不安定性**
基礎プラズマ, トカマクやヘリカル等の核融合プラズマ
- 通常, プラズマ構成粒子の質量に大きな非対称性
 - イオン-電子系**では質量比が1000倍以上
 - 波動や安定性の特性に本質的に影響を与える
 - 「ペアプラズマ」は、通常とは異なる物理を持つ
パルサー磁気圏等の天体現象, リコネクション現象との関連
多くの理論研究にもかかわらず, 実験的には実現されていない

大強度低速陽電子源とダイポール磁場配位を用いる事で、 磁場閉じ込めによる電子陽電子プラズマ生成を目指している



e⁺ and e⁺/e⁻ lifetimes set by several processes

- Small **Debye length** is needed in order to observe **collective phenomena**

Target: $n_e > \sim 10^{11} \text{ m}^{-3}$, $T_e \sim 1 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_D < 2 \text{ cm}$

- A large number of cold positrons must be trapped with electrons simultaneously

1. trapping of e⁺/e⁻ as plasmas
this is not realized in linear traps

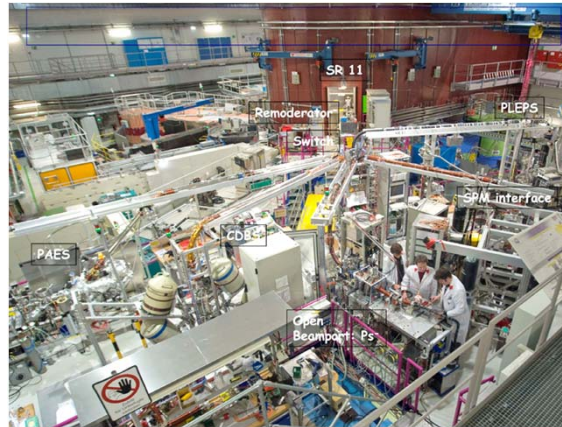
2. total e⁺ number of $N \sim 10^{10}$ is needed

大量の低速陽電子が必要(プラズマ以外の利用?)

ミュンヘン工科大学のNEPOMUCのopen beam portにおいて、 永久磁石を用いた小型装置による実験を実施している



FRM II reactor at MLZ,
Garching bei München



NEPOMUC e⁺ source



Open beam port of NEPOMUC

NEutron-induced
POsitron source MUniCh

高速中性子を利用した
低速用電子施設

定常陽電子ビームを生成

up to 10^9 /s at 1 keV

~ 10^7 /s at <20 eV

W/SiCリモデレータ

Energy (eV)

Method 1 (e^+ /s)

5^a

$2.3(2) \cdot 10^7$

12

—

22

$6.5(6) \cdot 10^7$

400

$5.4(1) \cdot 10^8$

1000^c

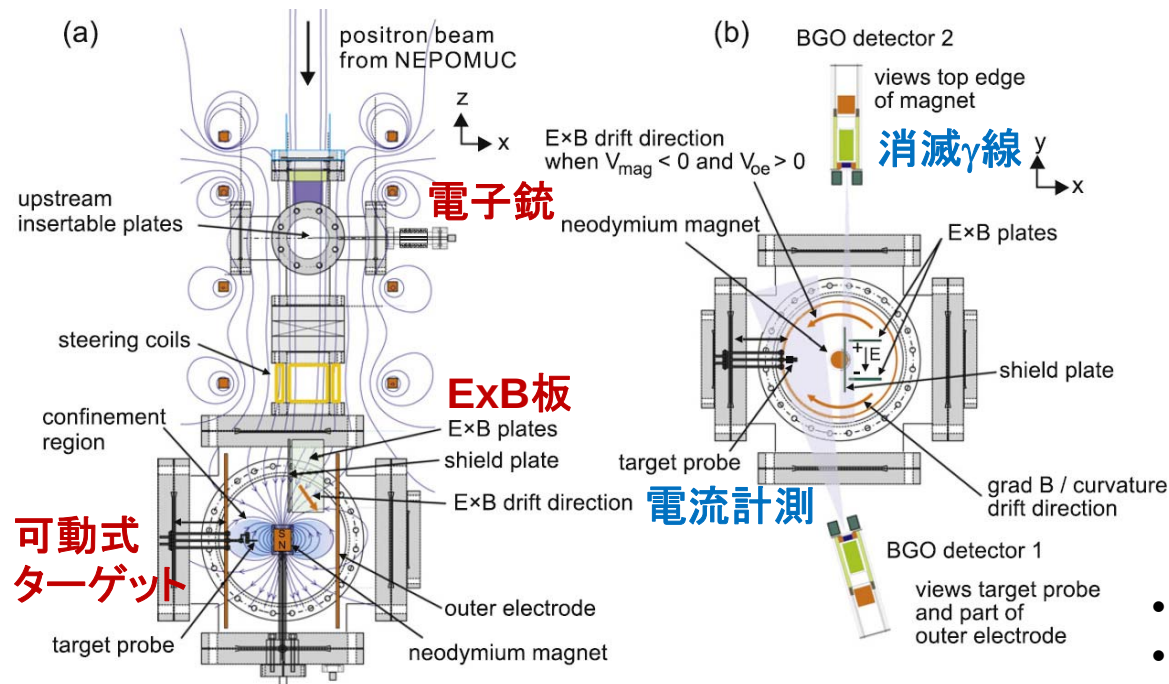
$1.2(1) \cdot 10^8$

1000^d

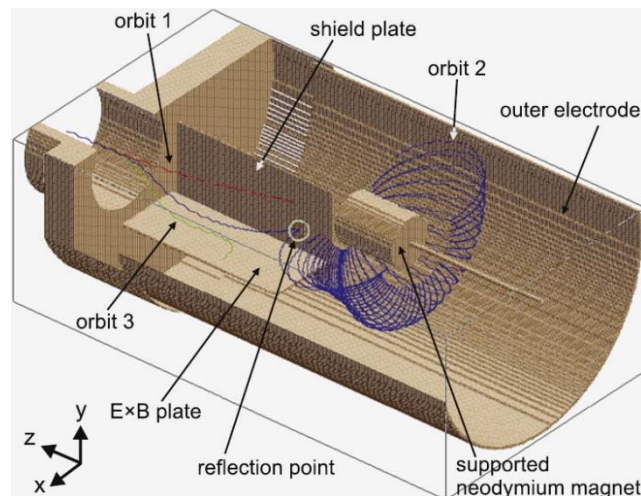
$3.0(1) \cdot 10^8$

2016 Stanja+ NIMA

永久磁石を用いたダイポールトラップを用いて、陽電子の入射と閉じ込めに関する基礎実験を陽電子ビームを使用して実施した



- 機械的に支持したネオジム磁石($\sim 0.6\text{T}$)
- ExB shield plates, 回転電場電極
- target + BGO検出器 or 電流アンプ



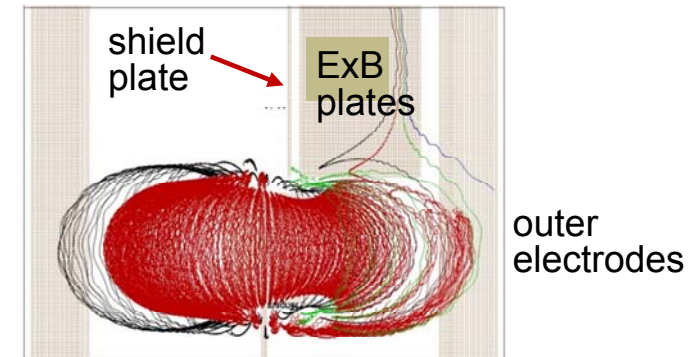
- 超伝導装置に先立ちプロトタイプ装置で実験開始
- 永久磁石の作り出すダイポール磁場
- 閉じた磁気面を持たない: 同時閉じ込めは不可能
- ダイポール磁場中への陽電子の入射とプラズマ生成を目指す基礎実験を進めている

トロイダル系のダイポール磁場配位中への高効率の陽電子入射

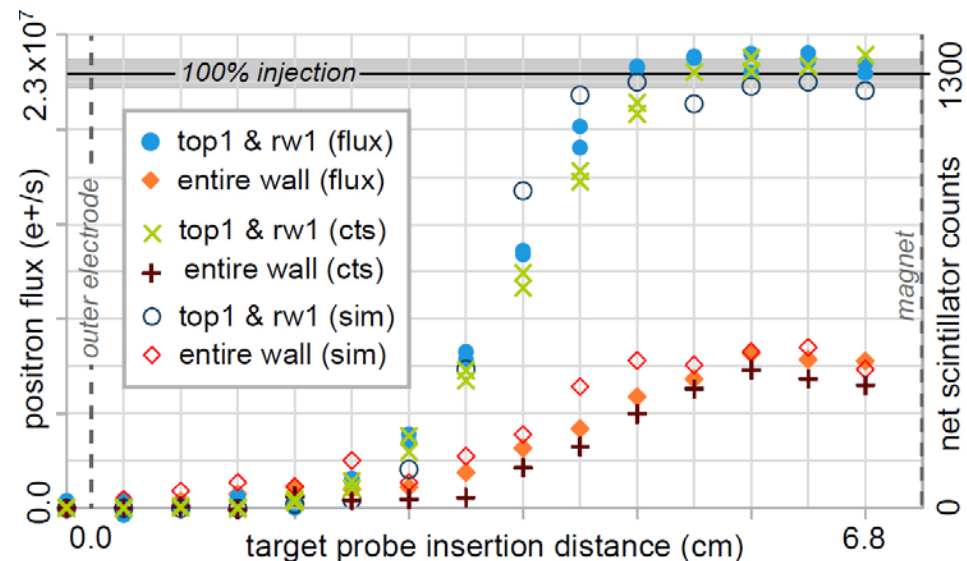
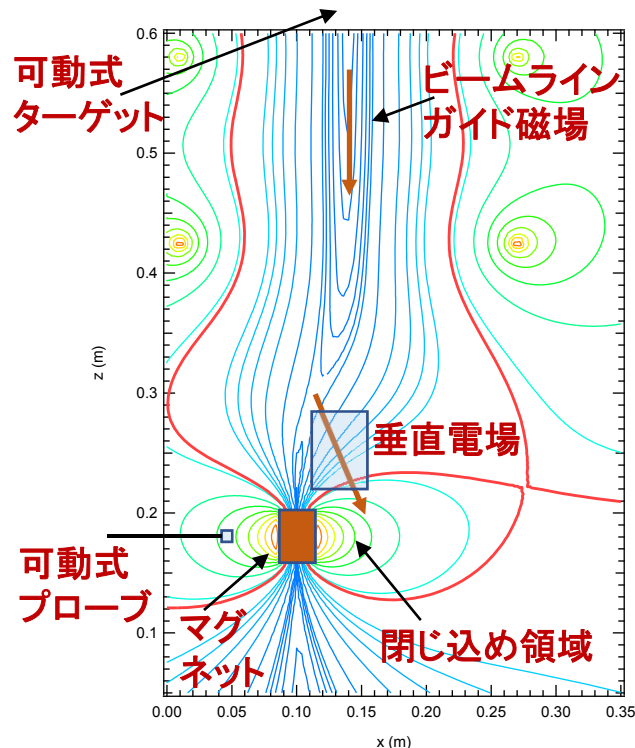
E. V. Stenson+, PRL, accepted

- 陽電子プラズマ生成を目指す上で入射効率が重要
 - ・ビーム $\sim 10^7\text{--}8\text{ e}^+/\text{s}$, 蓄積装置(初期値) $\sim 10^9$
 - ・要求される陽電子数は少なくとも 10^9s
- ビームラインから磁気面を横切る入射が必要
 - ・セパトリクスを越えたドリフトが必要
 - ・ビームライン $5\text{mT} \ll$ マグネット $\sim 0.6\text{T}$

➡ 垂直電場を印加しExBドリフトによる入射*



マグネットや壁への損失なく周回軌道を取る陽電子の軌道計算例



- 粒子軌道計算, 電極電位の最適化による損失低減

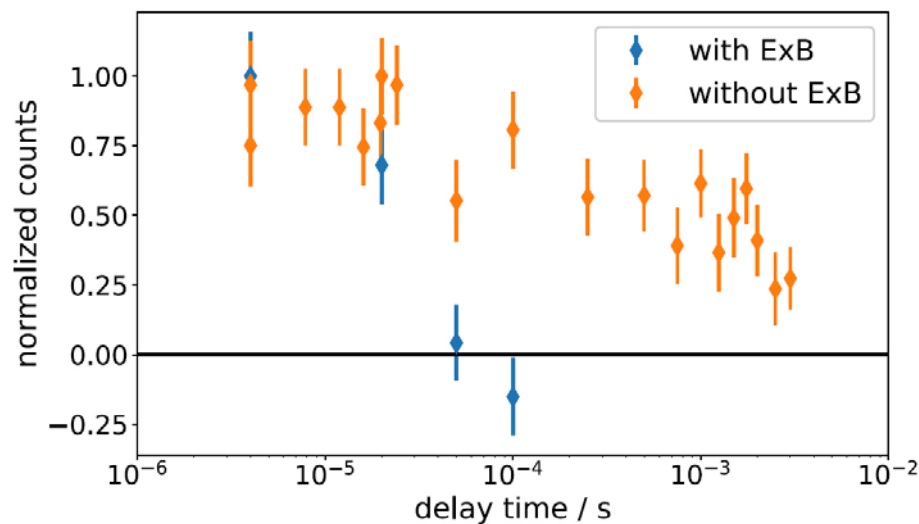
➡ 陽電子ビームをダイポール磁場に100%の効率で入射

*別の手段: Ps Rydberg原子の光電離 2012 Pedersen+

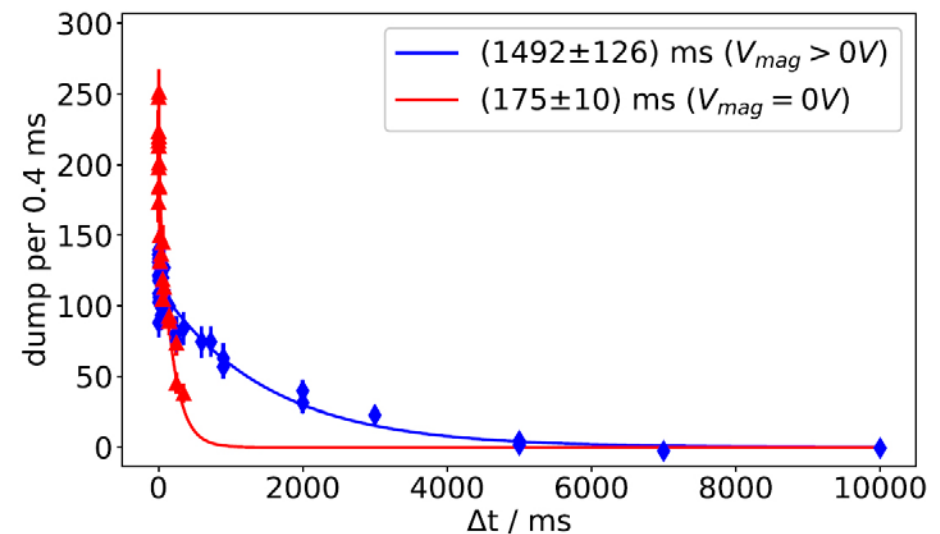
ダイポール磁場中で陽電子の長時間閉じ込めを実現

J. Horn-Stanja+, PRL, accepted

- ドリフト入射によりダイポール磁場中に輸送, 補足された陽電子の閉じ込め時間
- 閉じ込め時間は系の対称性に大きな影響を受ける
 - ExBドリフト板電圧をgating(閉じ込め中に接地) $\tau \sim 0.1\text{ms} \rightarrow \sim 10\text{ms}$ に改善
 - その他の入射用電極電位もgating $\rightarrow \tau \sim 100\text{ms}$ 中性衝突によるロスコーン内への移動
 - マグネットを正バイアスしミラー損失を抑制 $\rightarrow \tau \sim 1\text{s}$
- ビームラインからの非対称磁場の効果やマグネットの着磁精度等が閉じ込めの上限を決定している可能性が高い



ExBドリフト板電圧のgatingが陽電子の閉じ込めに与える効果

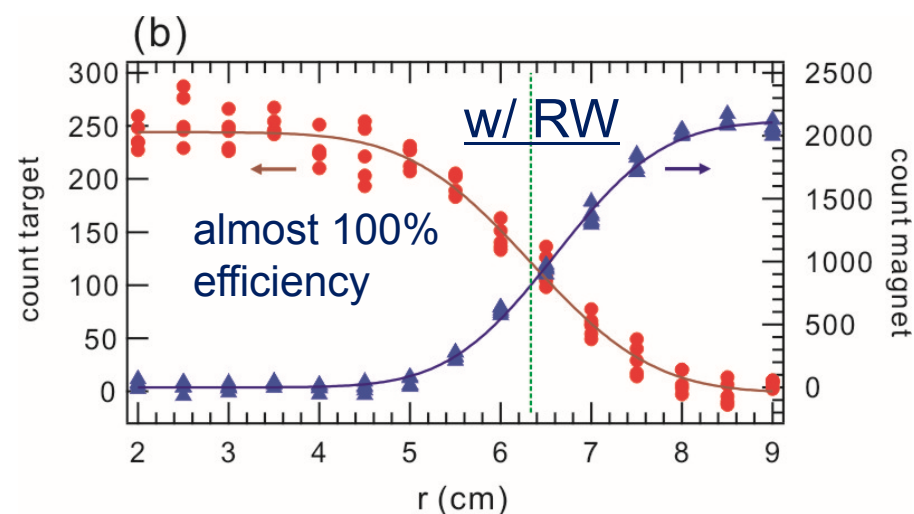
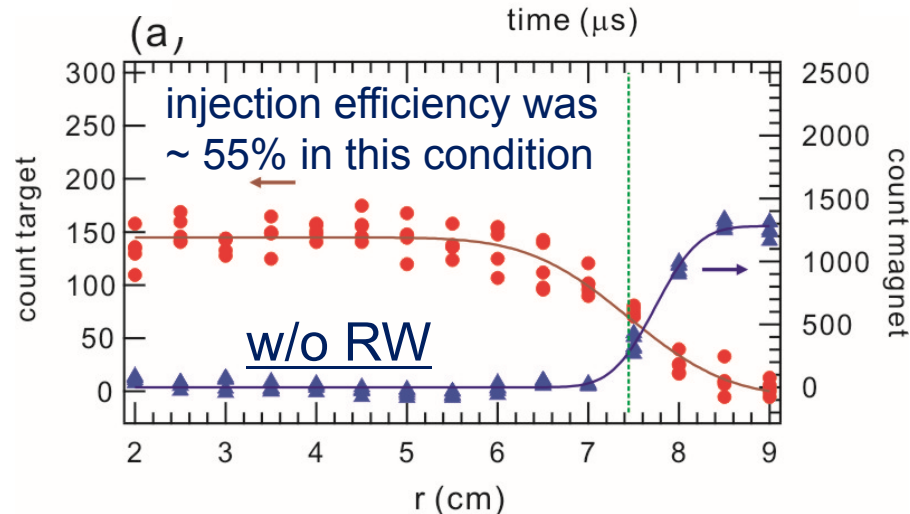
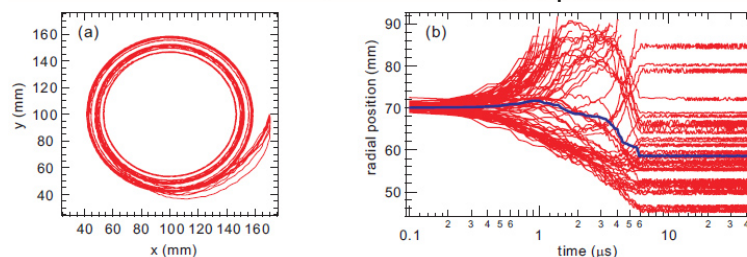
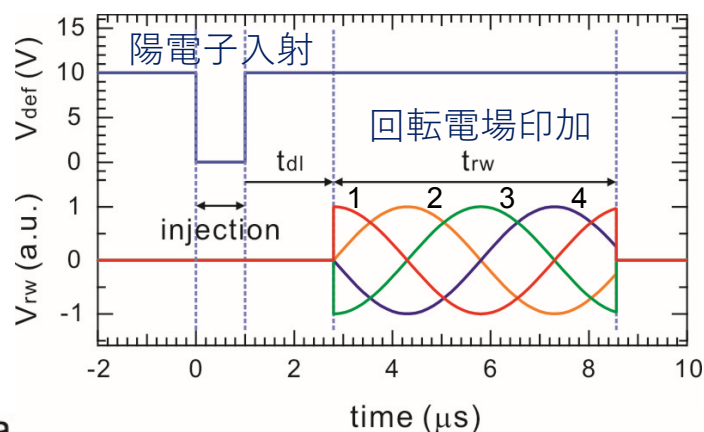
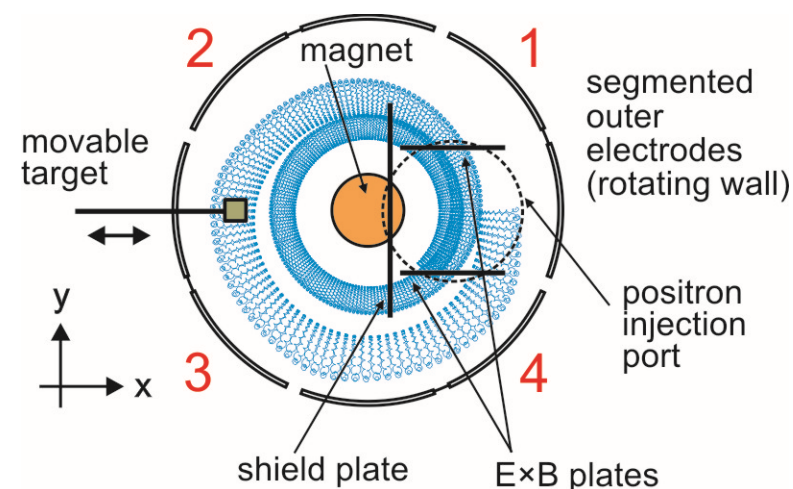


マグネットの正バイアスによる陽電子の閉じ込め時間の改善

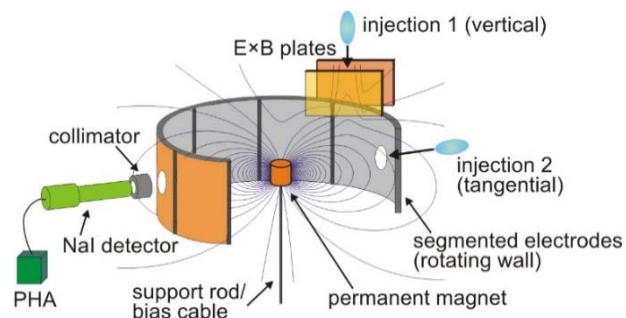
回転電場の印加によるダイポール磁場中での陽電子の軌道圧縮

- 陽電子の高密度化が重要
- 磁気面を横切る輸送には非対称性が必要
- 分割電極による「回転電場」を印加
- 短時間で軌道のモジュレーション

➡ 多数粒子の軌道圧縮と入射効率の上昇

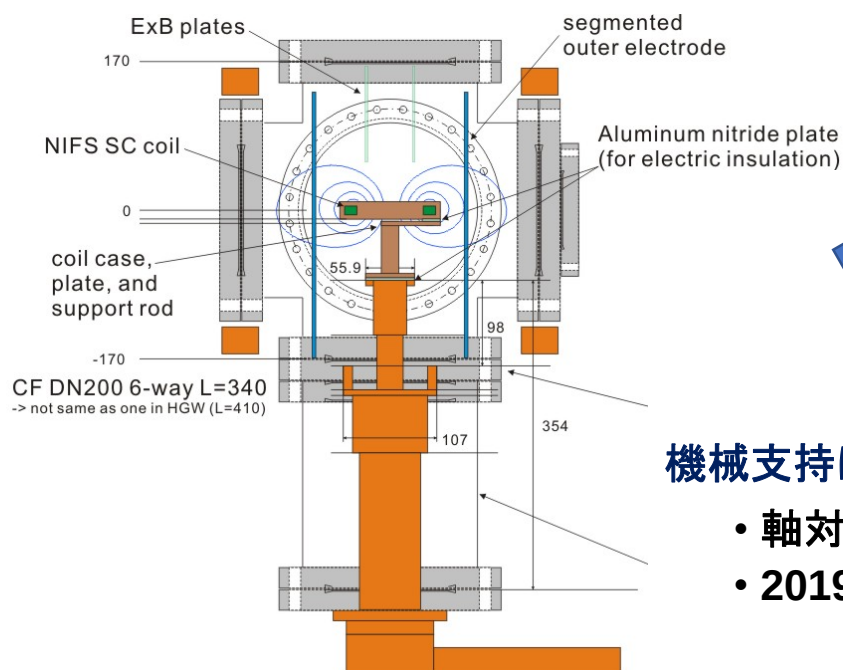


今後のダイポール磁場装置の開発段階と解決課題



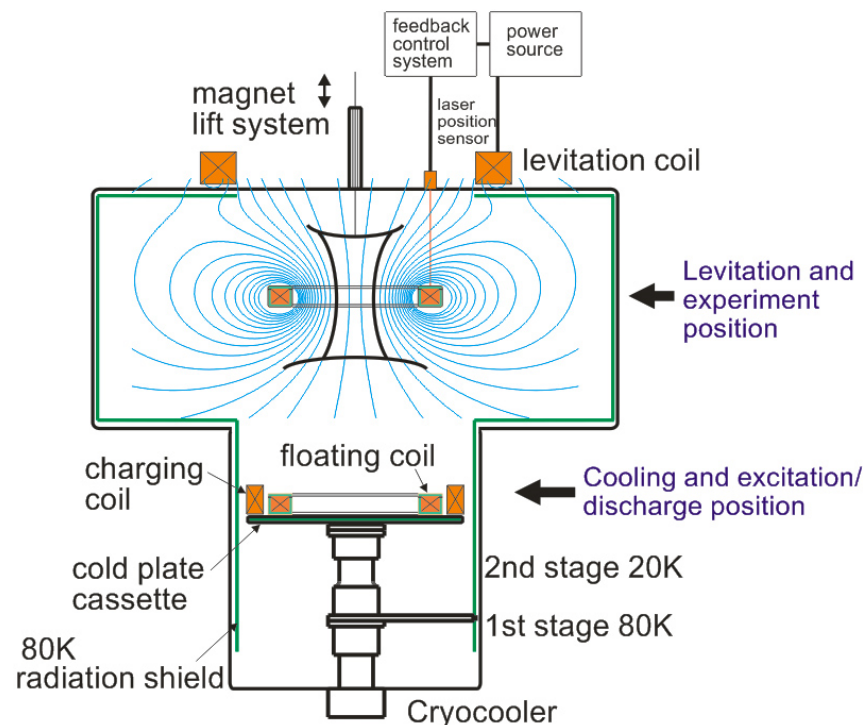
永久磁石によるプロトタイプ装置

- ドリフト入射法の開発
- 陽電子閉じ込めの実現
- 軌道圧縮方法の開発



機械支持による超伝導コイル装置

- 軸対称系を維持した入射方式の開発と閉じ込め
- 2019年前半に運転開始予定



磁気浮上超伝導コイル装置

- 電子と陽電子の同時閉じ込め
- コイル製作と浮上系動作確認
- 2019年後半までに完成予定

陽電子を用いた反物質プラズマ研究の現状と今後の課題

- 大強度陽電子源とダイポール磁場閉じ込めを利用して、反物質プラズマ（電子陽電子プラズマ）の実現に向けた基礎研究と開発を進めている*

Phys. Rev. Lett. Editors' suggestions, 2018 December

- 陽電子ビームラインにおいてプロトタイプ装置を用いた実験を実施し、ダイポール磁場配位で陽電子プラズマを生成する上で基礎的な知見を得た
 - ・ 陽電子ビームをダイポール磁場の閉じ込め領域に効率100%で入射
 - ・ 陽電子群を約1秒間閉じ込め（中性粒子衝突によるロスコーン内への移動）
 - ・ 回転電場印加による強磁場領域への陽電子軌道の圧縮を実証
 - ・ ドリフト法により、ダイポール磁場内に電子と陽電子の同時入射を実現
- 今後の課題
 - 供給される陽電子数, 捕獲を実現した陽電子数, 共に不足している
 - ・ 超伝導ダイポール装置（機械支持→磁気浮上）による陽電子閉じ込め
 - ・ 陽電子蓄積装置からのバンチ化ビームを用いた陽電子プラズマの生成
 - ・ 蓄積, 入射, 電子との同時閉じ込めシナリオの検討

*ミュンヘン工科大, Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, ローレンス大, UCSD, 東京大, 核融合科学研究所との共同研究

**European Research Council, Deutsche Forschungsgemeinschaft, 科研費, NIFS（一般共同研究）