



ダイポール磁場配位への 大強度低速陽電子ビームの入射と捕獲

マックスプランク・プラズマ物理研 (IPP)^A, ミュンヘン工科大 (TUM)^B,
ローレンス大^C, カリフォルニア大サンディエゴ校 (UCSD)^D
齋藤晴彦^A, J. Horn-Stanja^A, S. Nissl^A, M. Singer^B, E.V. Stenson^B, U. Hergenbahn^A, T. Sunn Pedersen^A,
M. Dickmann^B, C. Hugenschmidt^B, M.R. Stoneking^C, J.R. Danielson^D, and C.M. Surko^D

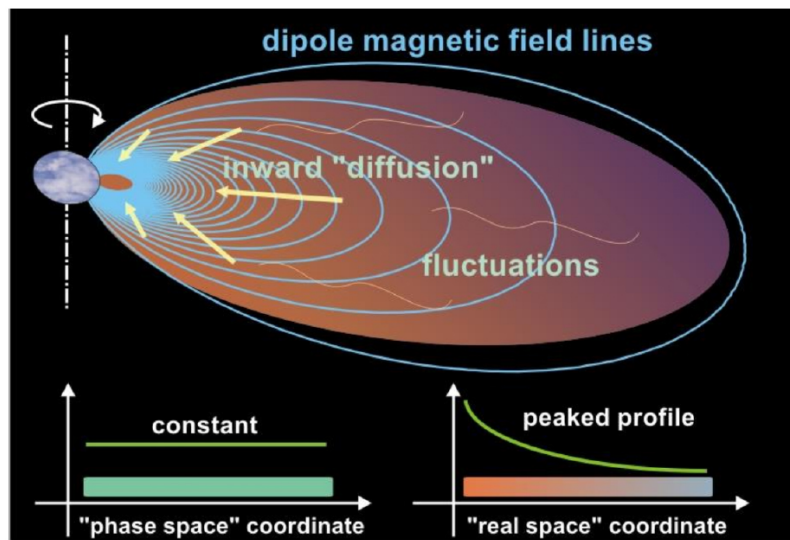
25aK608-3

物理学会第73回年次大会(2018年), 2018年3月25日, 東京理科大学

本講演の概要

- 研究背景：
磁気圏型ダイポール磁場配位によるプラズマ研究の展開
- 本研究の目的：
ダイポール磁場配位による電子陽電子プラズマ生成に向けた取り組み
- 陽電子を用いた具体的研究課題として、以下の成果について報告する
 - ダイポール磁場内への陽電子の**高効率入射**の実現
 - 入射した陽電子の**長時間閉じ込め**の検証
 - 高密度化を目指す上で重要となる**軌道圧縮**
 - 陽電子と電子のダイポール磁場中への**同時入射**
- まとめと今後の課題

- 「人工磁気圏」を用いたプラズマ研究
 - 惑星磁気圏の実験室研究 (terrella) や安定性等の基礎研究
 - 先進的核融合を可能にする**超高 β プラズマ**生成シナリオの検証**
 - **非中性プラズマ**の安定閉じ込めと**反物質プラズマ**への適用***
- 最近の実験研究例: Mini-RT, RT1 (東大), LDX (MIT), **APEX (IPP)**
- 極めて非一様な磁場中で荷電粒子群の良好な閉じ込めが実現される



- 大きな密度勾配に対して安定
- 低周波乱流が**内向き輸送**と**密度ピーク**を形成する特異な**拡散現象**
- 高 β プラズマ, 純電子プラズマ**
- 正準角運動量の保存により, **電荷符号に依存しない閉じ込め**が可能

- 電子-陽電子系を用いたペアプラズマ生成と物性の解明*
 - 等質量粒子から構成されるプラズマの特異な安定性**と波動特性***の検証
(高純度, 低質量の電子陽電子の使用, 高周波領域までの実験研究が可能)
 - 陽電子の大量捕獲: 反物質粒子の貯蔵配位, クラスタイオンやポジトロニウム(e^-/e^+ 「原子」)の大量生成とそのBose Einstein凝縮等の応用
 - 実験的には電子陽電子ペアプラズマは実現されていない
- 実現に向けた課題と, PAX/APEX計画で考える解決策
 - 大量の陽電子(10^{10} 程度)の蓄積が必要
標準的なNa-22線源やLINIACを用いた低速陽電子源では対応困難
 - ➔ 大強度低速陽電子源NEPOMUCとバッファガストラップの活用
 - 電子と陽電子双方のプラズマとしての同時捕獲
標準的な一成分非中性プラズマ用閉じ込め配位では困難
 - ➔ 非中性(純電子)プラズマで実績のあるダイポール磁場配位の適用

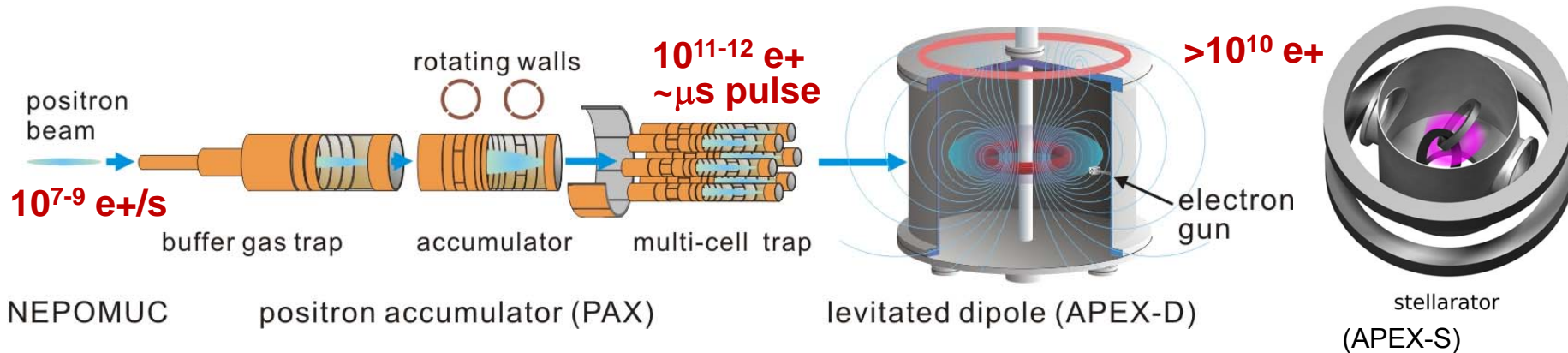
PAX/APEX*の全体計画：

NEPOMUC陽電子源** + 陽電子蓄積装置 + 超伝導ダイポール

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
 $10^9/s$ at 1 keV, $10^7/s$ at 20 eV



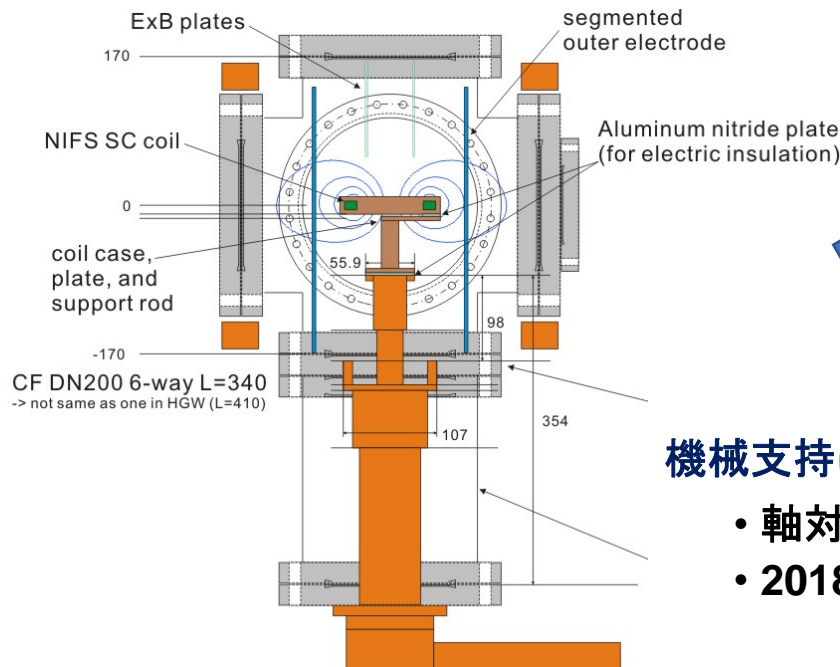
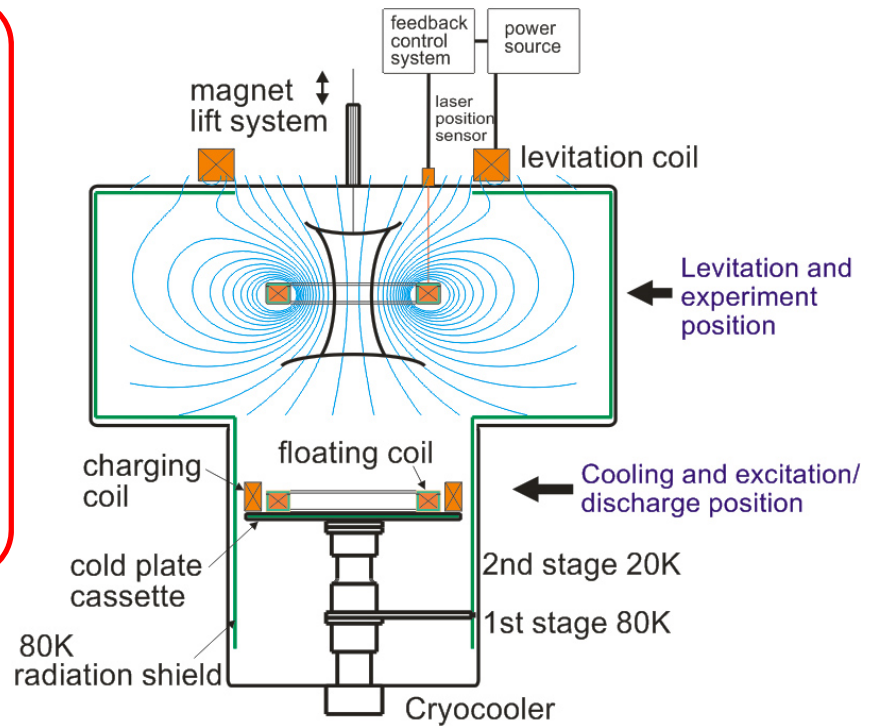
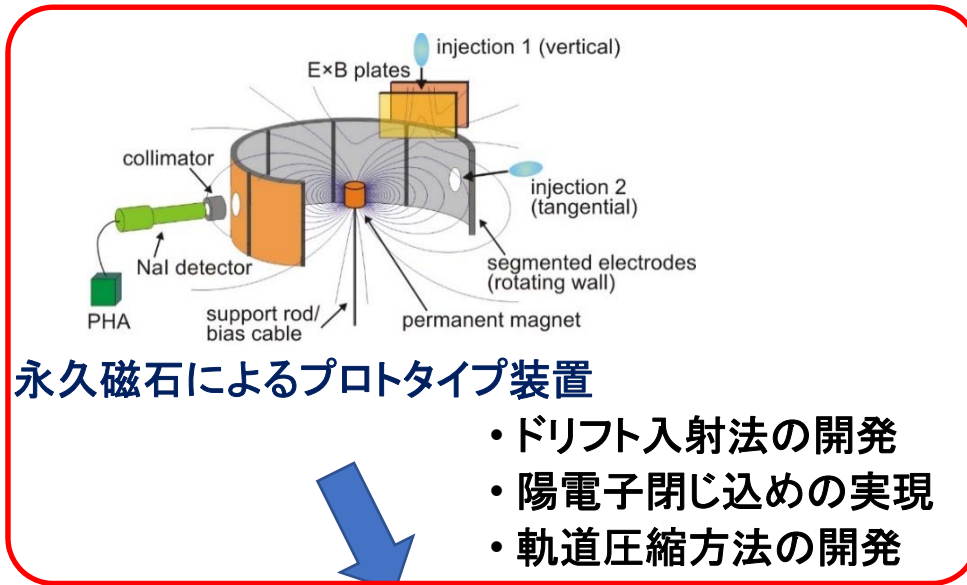
• Positron Accumulation eXperiment

- NEPOMUCからの陽電子を蓄積
- 多段バッファガス冷却とマルチセル***
- $10^{11-12} e^+$ (目標値) のパルス生成

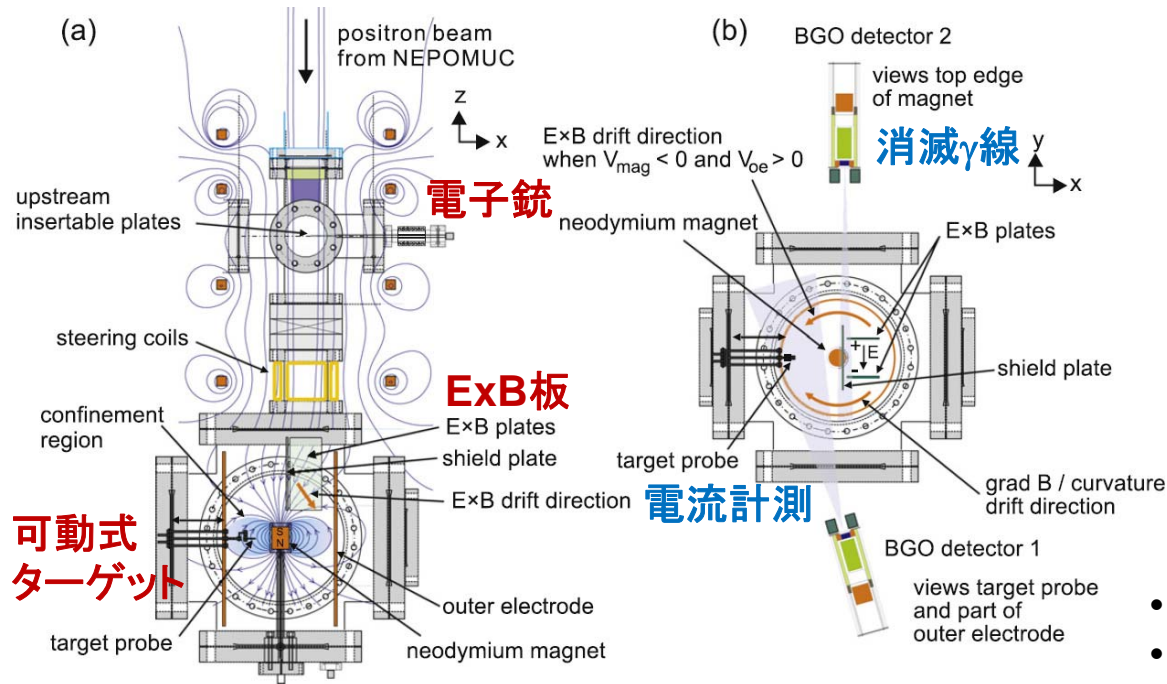
• A Positron-Electron eXperiment

- 電子と陽電子の同時閉じ込め
- ダイポール or ステラレータ
- 磁気面を横切る粒子入射法が重要

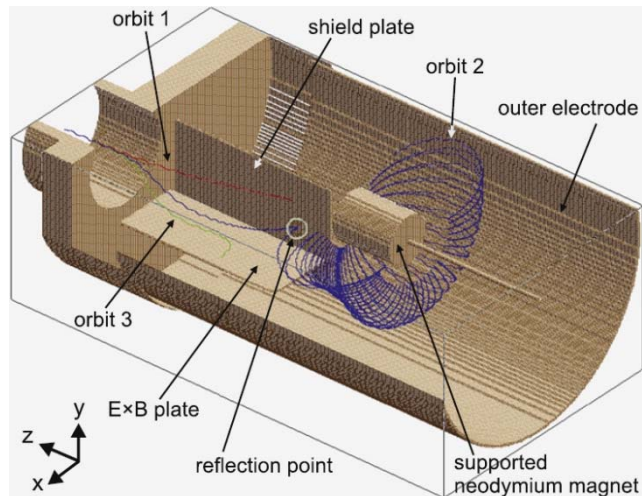
*2012 Pedersen+ New J. Phys.; **2012 Hugenschmidt+, New J. Phys.; ***2015 Danielson+, Rev. Mod. Phys.



永久磁石を用いたダイポールトラップを用いて、ペアプラズマ生成に向けた基礎実験を陽電子ビームを使用して進めている 7/12



- 機械的に支持したネオジウム磁石 (~0.6T)
- ExB shield plates, 回転電場電極
- target + BGO検出器 or 電流アンプ

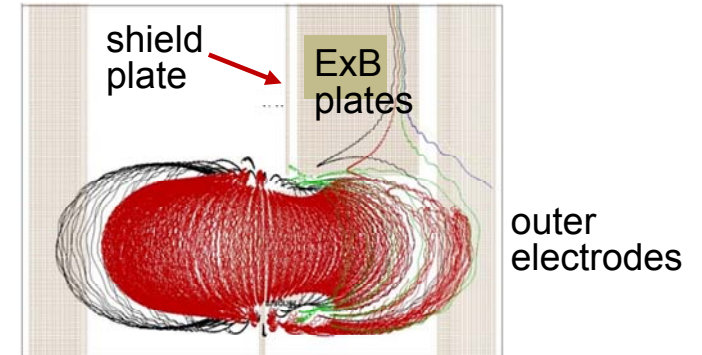


- 超伝導装置に先立ちプロトタイプ装置で実験開始
- 永久磁石の作り出すダイポール磁場
- 閉じた磁気面を持たない: 同時閉じ込めは不可能
- ダイポール磁場中への陽電子の入射とプラズマ生成を目指す基礎実験を進めている

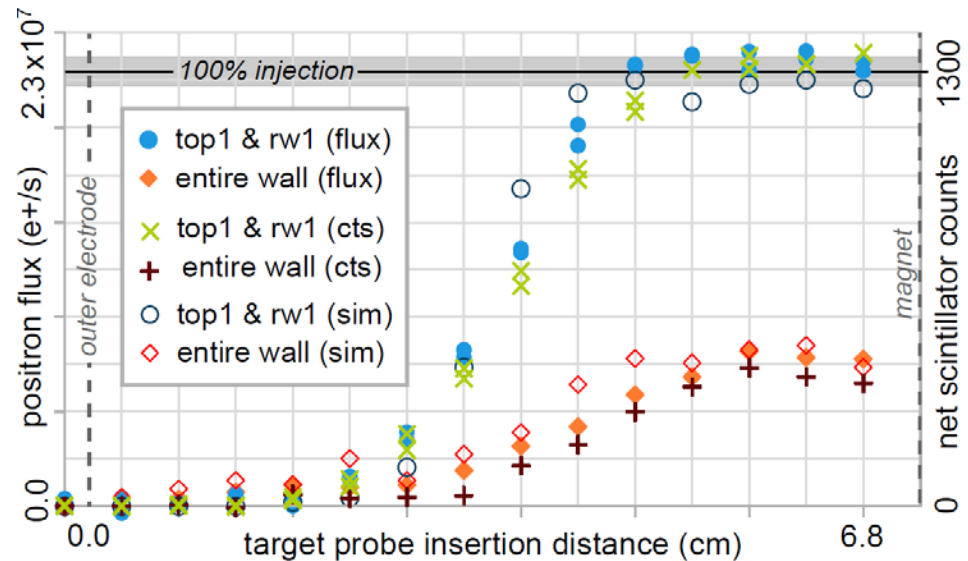
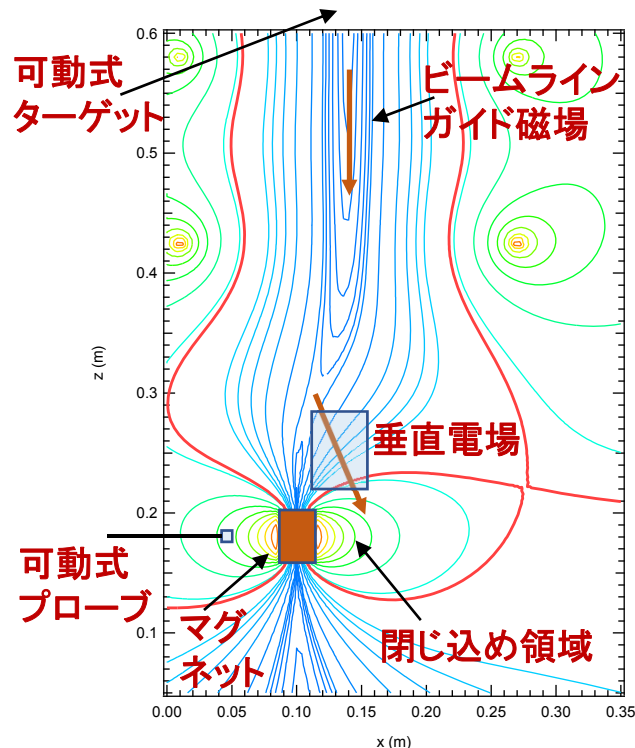
トロイダル系のダイポール磁場配位中への高効率の陽電子入射 8/12

E. V. Stenson+, to be submitted

- 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 $\sim 10^7\text{-}8$ e+/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 10^9 s
 - 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

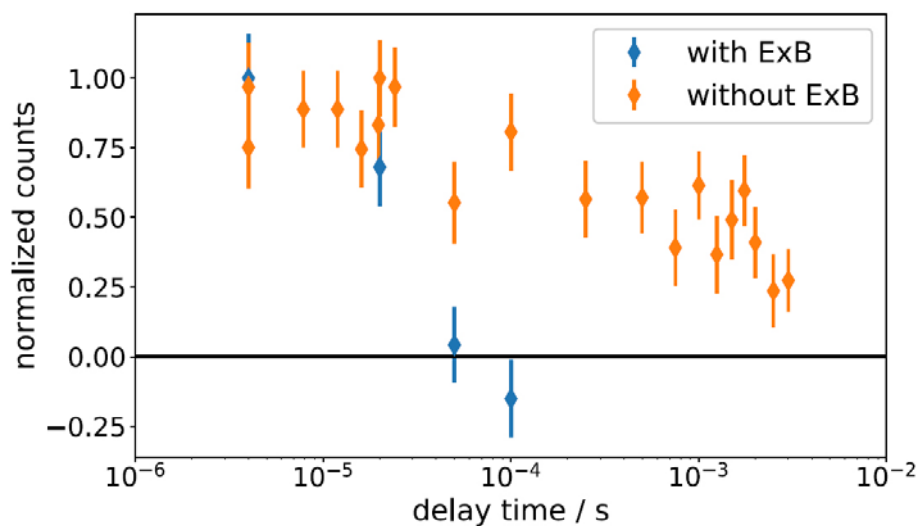


- 粒子軌道計算, 電極電位の最適化による損失低減

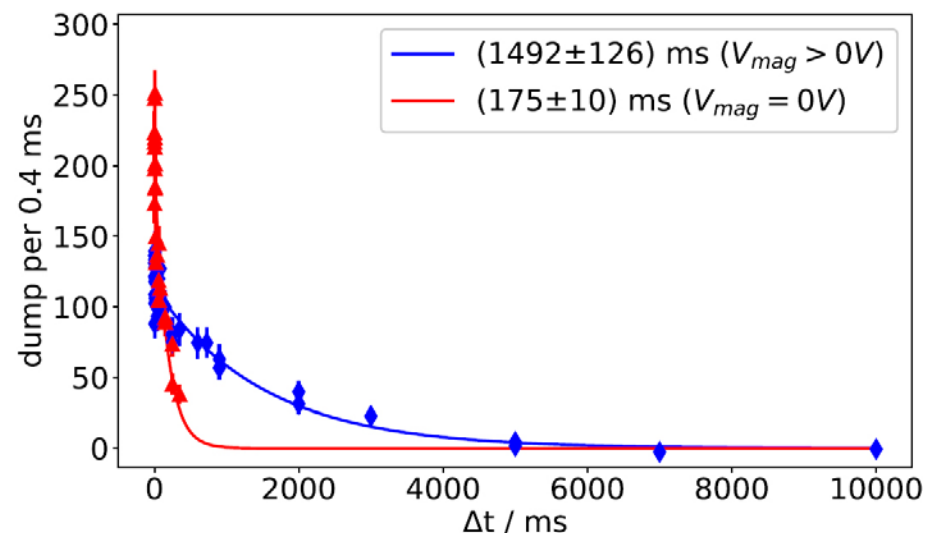
➡ 陽電子ビームをダイポール磁場に100%の効率で入射

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

- 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



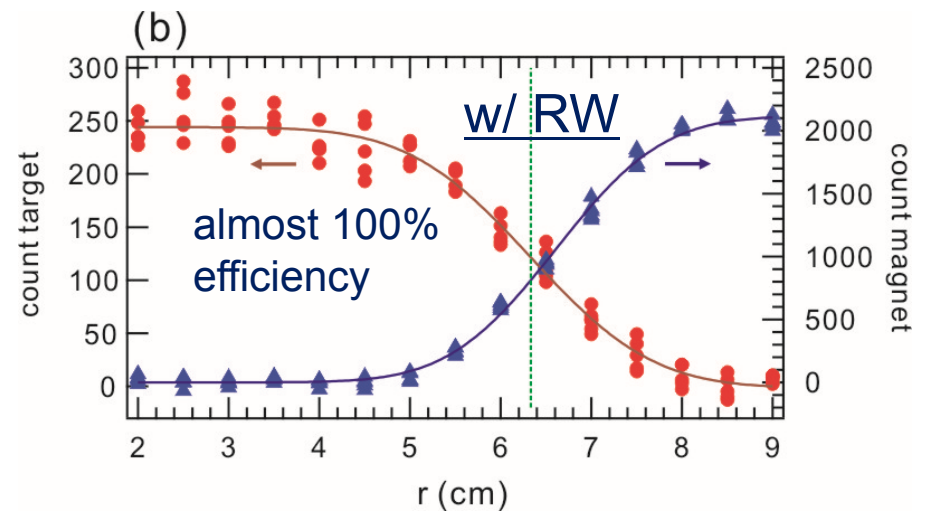
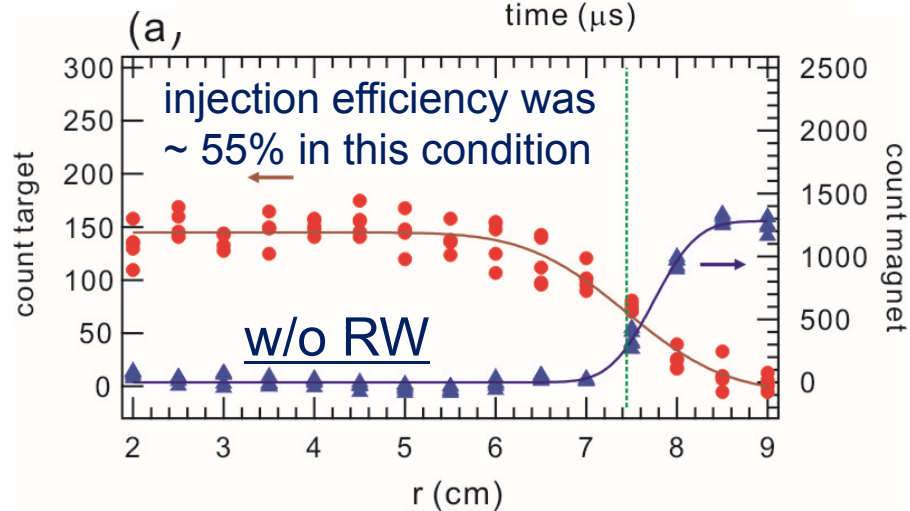
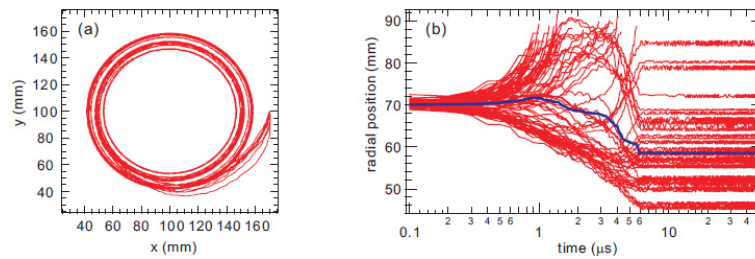
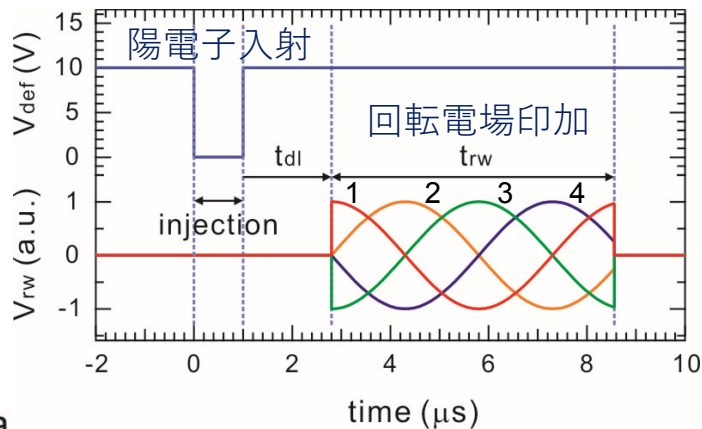
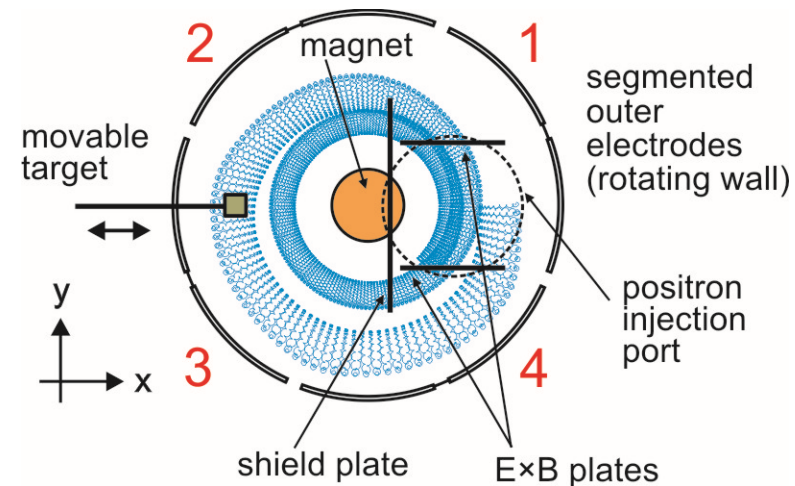
ExBドリフト板電圧のgatingが陽電子の閉じ込めに与える効果



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 10/12

- 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

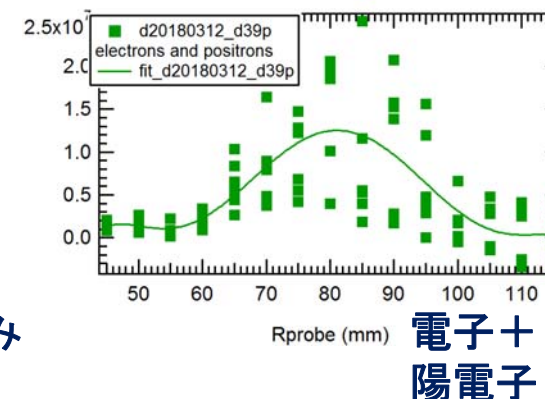
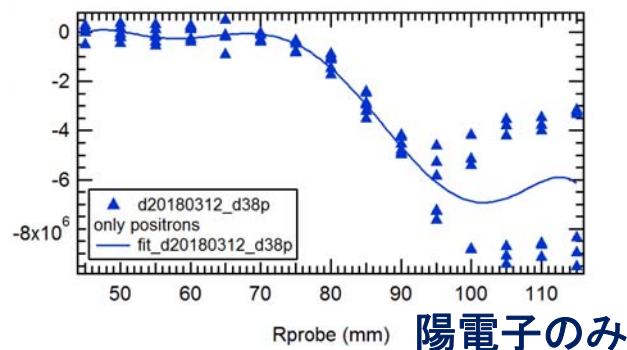
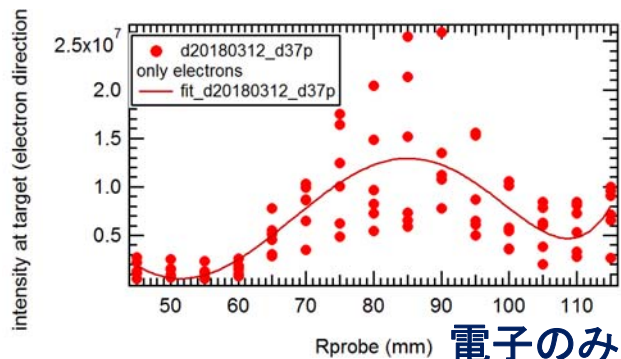


ダイポール磁場中への陽電子と電子の同時入射

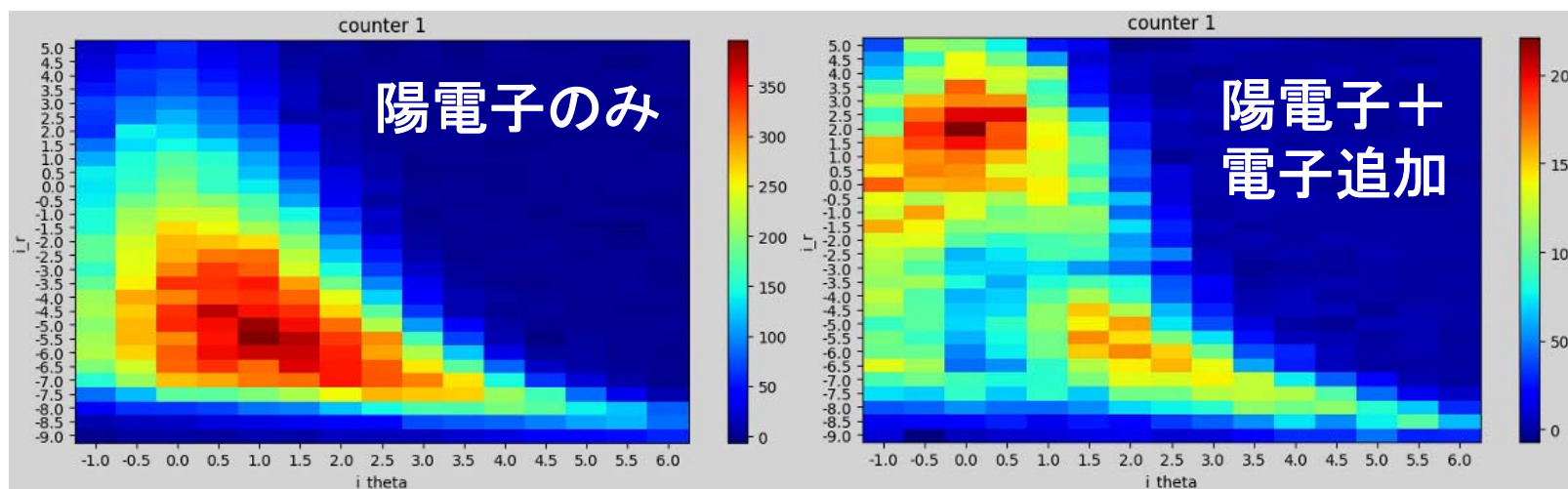
11/12

M. Singer+, to be submitted.

- 陽電子ビームの完全入射(効率100%)を維持しつつ、近接して配置した電子銃からダイポール磁場内に電子入射が可能な条件を確認した



- 電子入射時に、ターゲットに到達する陽電子が減少する領域が存在するセラミック部品のチャージアップの影響を疑っており、改善後再実験予定



まとめと今後の課題

- IPP*では, ダイポール磁場閉じ込めによる電子陽電子プラズマ生成の実現に向けた基礎研究と開発研究を段階的に進めている*
- 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
 - 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)