

14aK309-10



# 回転電場を用いたダイポール磁場中の 陽電子軌道の径方向圧縮

東大<sup>1</sup>, マックスプランク・プラズマ物理研 (IPP)<sup>A</sup>, ミュンヘン工科大 (TUM)<sup>B</sup>,  
ローレンス大<sup>C</sup>, カリフォルニア大サンディエゴ校 (UCSD)<sup>D</sup>

齋藤晴彦<sup>1 A</sup>, J. Horn-Stanja<sup>A</sup>, S. Nissl<sup>A</sup>, M. Singer<sup>B</sup>, E.V. Stenson<sup>B</sup>, U. Hergenbahn<sup>A</sup>, T. Sunn Pedersen<sup>A</sup>,  
M. Dickmann<sup>B</sup>, C. Hugenschmidt<sup>B</sup>, M.R. Stoneking<sup>C</sup>, J.R. Danielson<sup>D</sup>, and C.M. Surko<sup>D</sup>

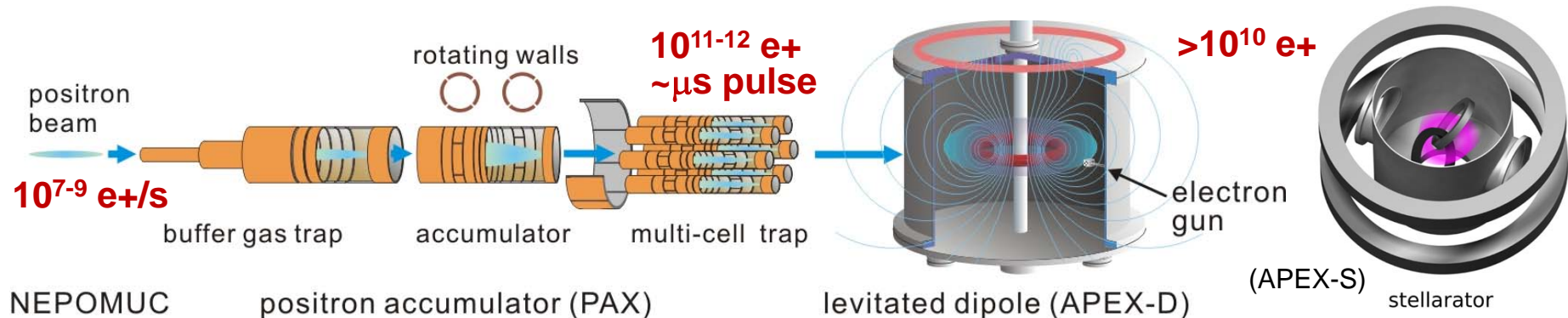
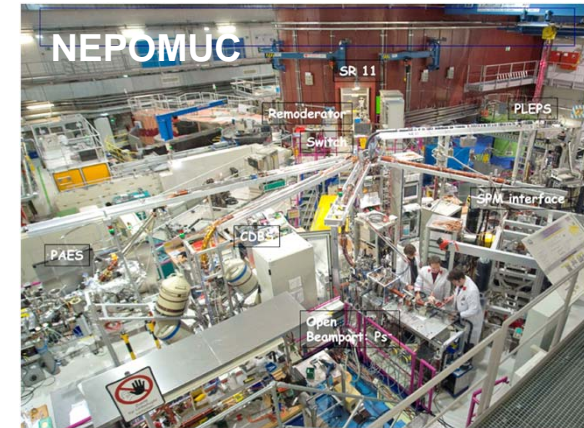
物理学会第74回年次大会, 2019年3月14日, 九州大学

APEX\*では、ダイポール磁場配位と大強度陽電子源を活用して、磁場閉じ込めによる電子陽電子ペアプラズマ生成を目指している

NEutron-induced  
POsitrion source MUniCh

高速中性子を利用した  
低速陽電子施設

定常陽電子ビームを生成  
 $10^9/s$  at 1 keV,  $10^7/s$  at 20 eV



NEPOMUC

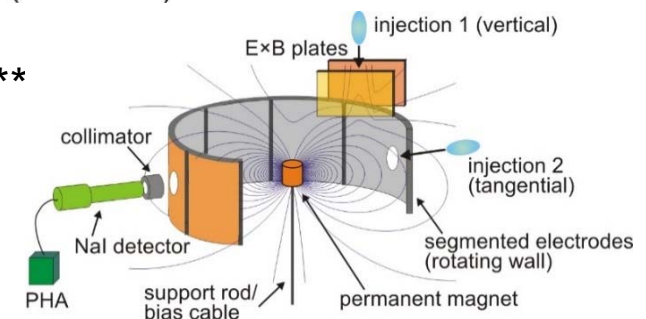
positron accumulator (PAX)

levitated dipole (APEX-D)

(APEX-S)

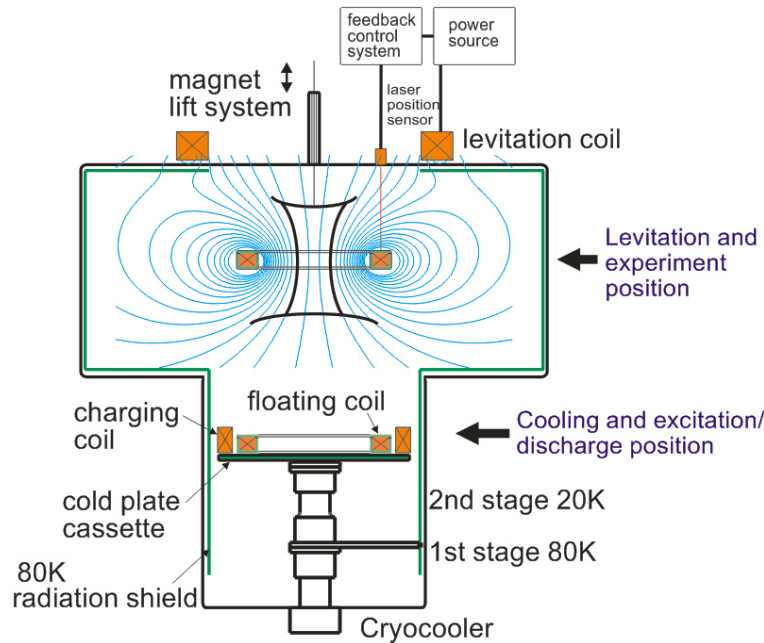
stellarator

- 超伝導コイルに先立ち、永久磁石ダイポール装置で実験\*\*
- ビームラインから陽電子を無損失入射\*\*\*
- 陽電子の1秒以上の閉じ込め\*\*\*\*



\*2012 Pedersen+ New J. Phys., \*\*2015 Saitoh+, New J. Phys., \*\*\*2018 Horn-Stanja+ PRL, \*\*\*\*2018 Stenson+ PRL

# 陽電子の高密度化や電子との同時入射を実現するために、 入射した陽電子ビームの空間分布制御法を開発する必要がある

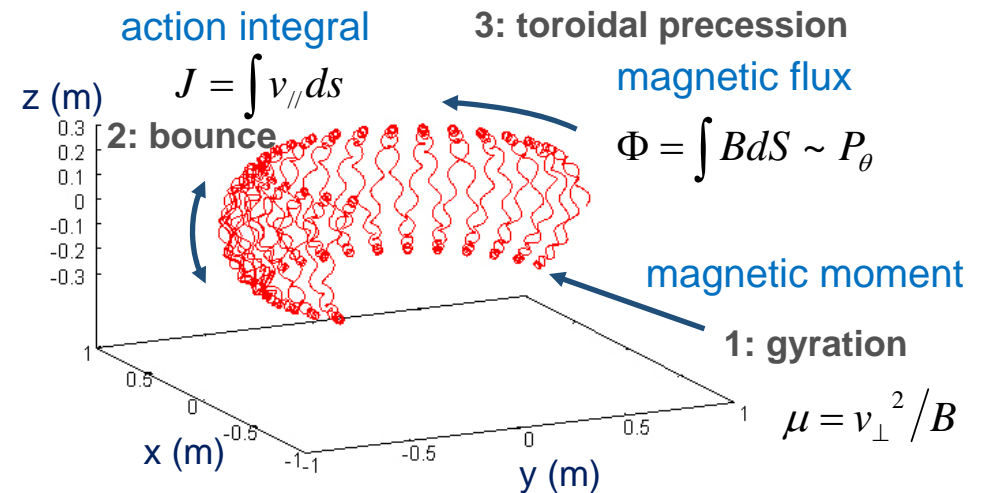


## ● 陽電子の空間分布制御(特に圧縮)の重要性

- 入射直後の損失の抑制
- 強磁場領域での高密度化の達成
- 陽電子に加え電子ビーム入射を行う上で、高速で自由度の高い制御が必要となる

- 径方向の閉じ込めは正準角運動量保存
  - 入射や圧縮には、その非保存化が必要
  - 空間的, 時間的な非対称性の導入
  - その間のビームの損失を抑制する必要

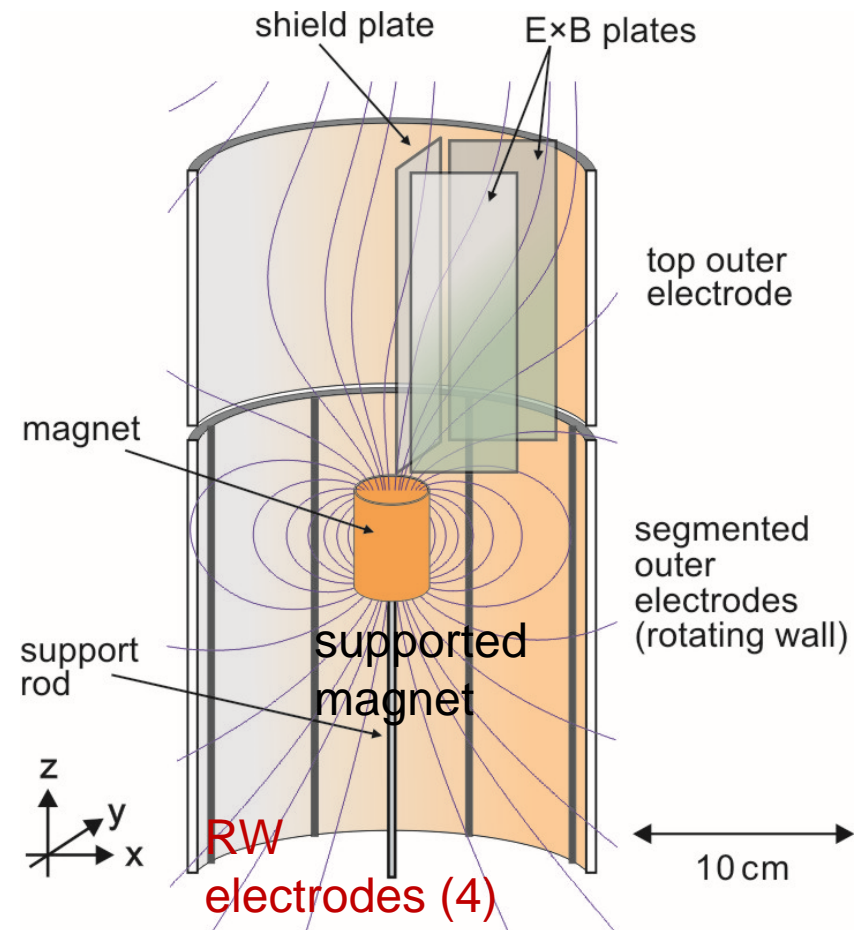
「内向き輸送」よりも早い時間スケールで、効果的な軌道の圧縮が必要



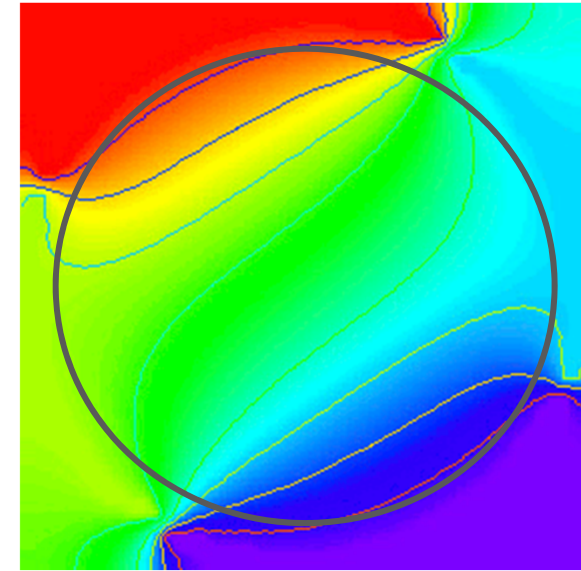
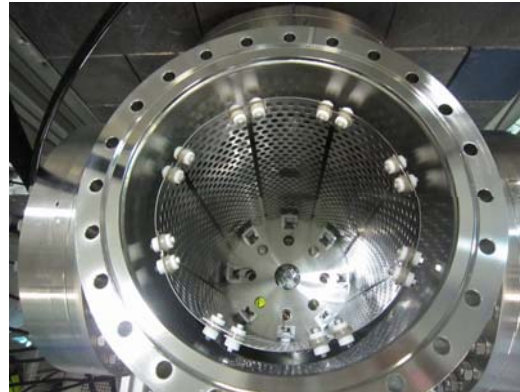
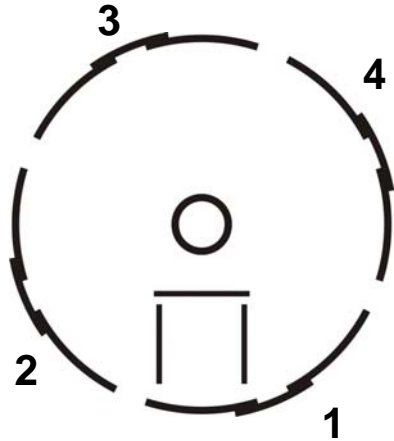
# 本研究の目的: 回転電場型の外部電場印加を用いた, ダイポール磁場中で陽電子の軌道圧縮の効果を軌道解析により調べ, 実験的に検証する

- 永久磁石ダイポールに, 周回方向に分割した電極を導入している
- 粒子軌道解析により, 効果的な軌道圧縮の方法を調べる.
- NEPOMUCにおける陽電子実験により, 「回転電場」印加による径方向圧縮や, 損失抑制の効果を明らかにする.

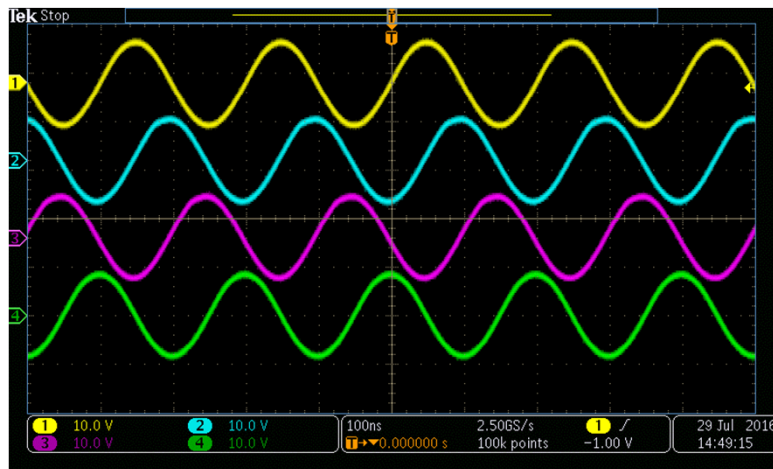
ビームの温度拡がりを考慮した上で, Buneman-Boris法による粒子軌道追跡



トロイダル方向 (cross-fieldとなる方向) に4分割した電極を適用して位相の異なる正弦波を印加する事で回転電場を発生する



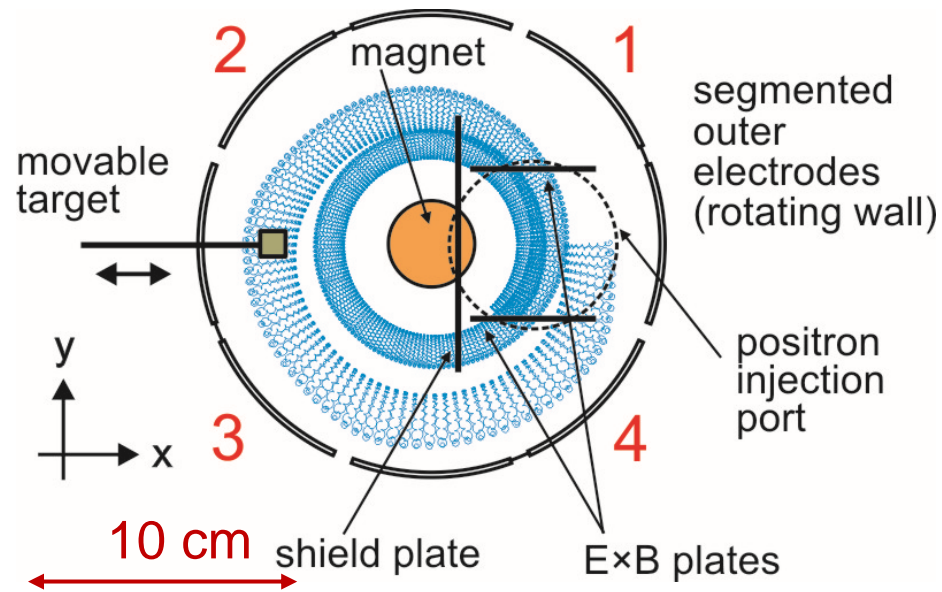
- 8 toroidally-segmented electrodes, this time used as 4-segmented electrodes



- トロイダル方向に8分割した電極 (2個ペアで結合し, 4電極として使用)
- 位相の異なる正弦波を印加して, 閉じ込め領域に回転電場を生成する
- 計算では閉じ込め領域の回転電場電極と磁石表面のみ考慮

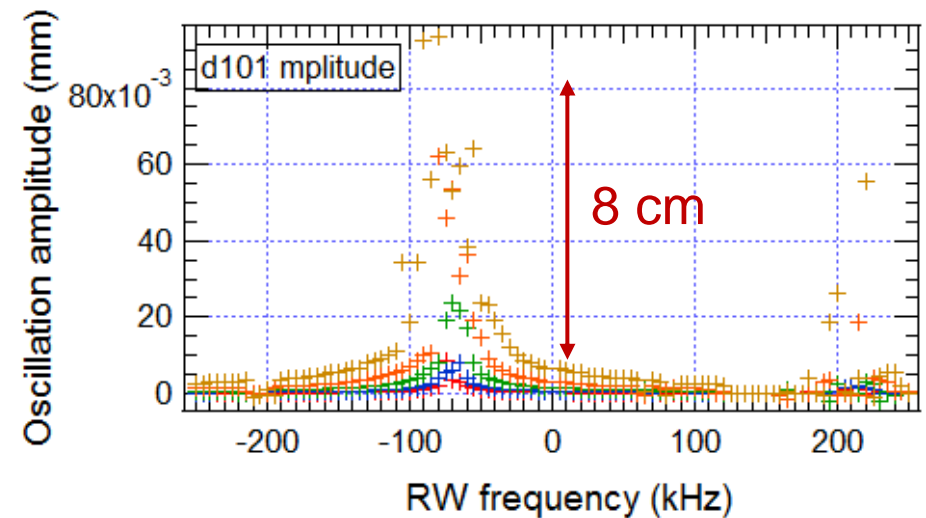
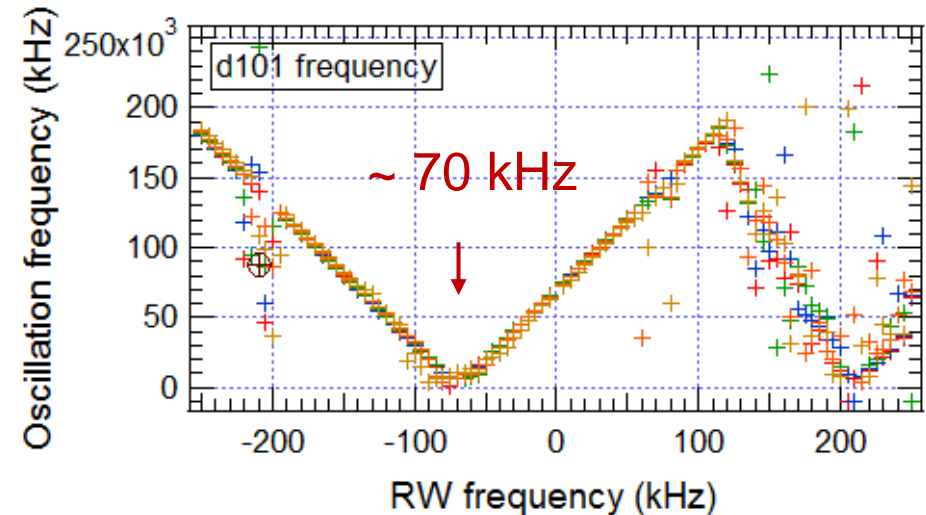
- Sinusoidal waves with phase difference

ダイポール磁場中で陽電子に低速（粒子のトロイダル周回周波数程度）の回転電場を印加して、軌道のモジュレーションを圧縮に利用する

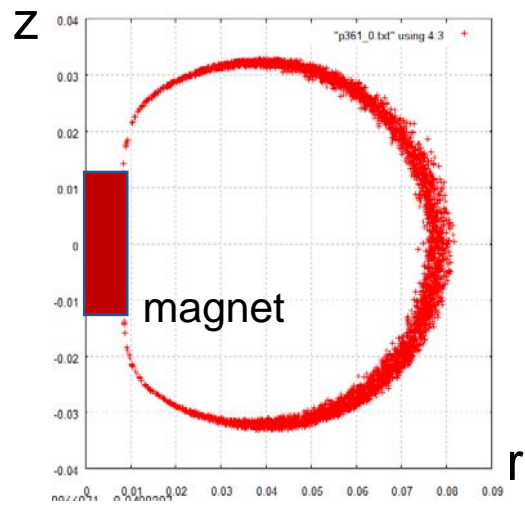


- 粒子のトロイダル周回周波数程度で共鳴的なモジュレーションとなり、装置寸法程度の振幅でr方向に振動する

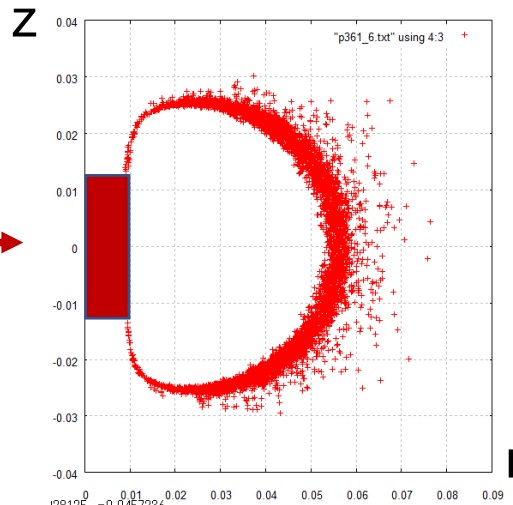
- gyromotion: 28 MHz - 280 MHz
- vertical bounce motion: order of MHz ~ 10 MHz
- toroidal precession motion: order of 10-100 kHz- (without E)



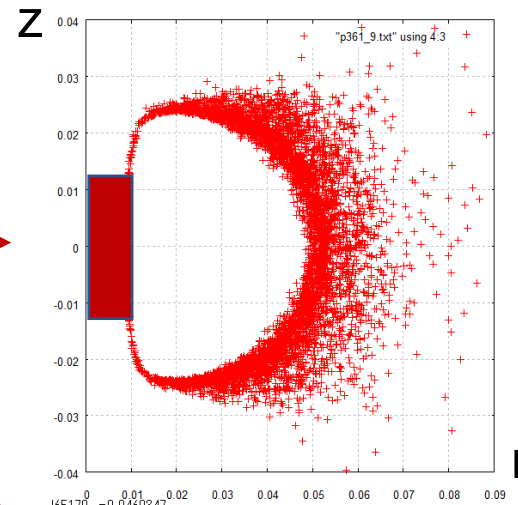
# 実験条件のビーム(温度拡がり1eV程度, ビーム径1mm程度)に対して, 単一周波数の回転電場により全体の径方向への圧縮が実現される



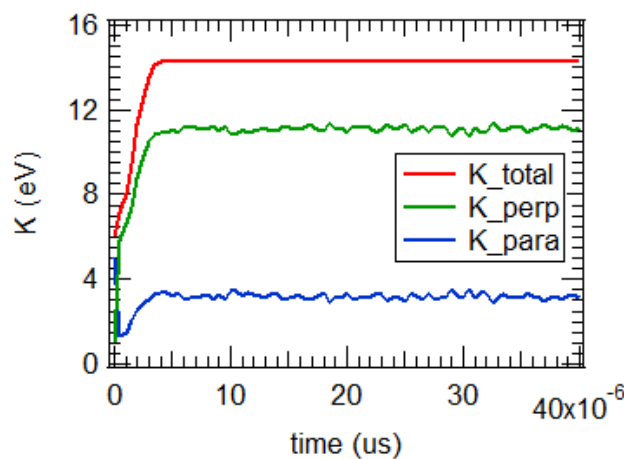
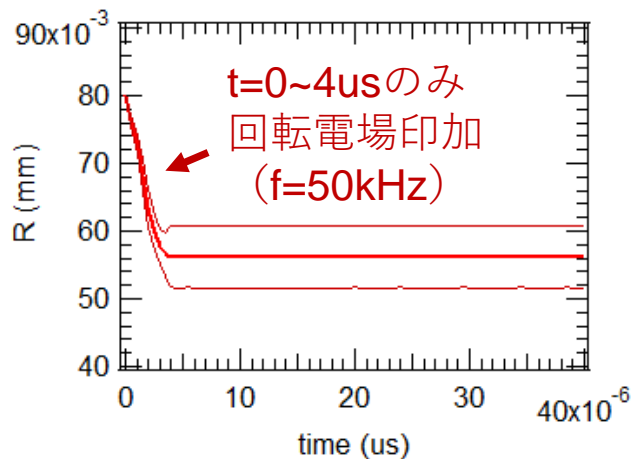
閉じ込め領域の外周部, 障害物に接触して損失が多い



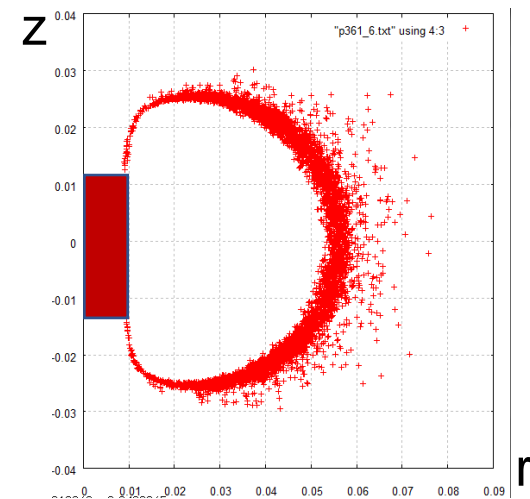
比較的安定な強磁場領域 に向かい移動する



電場印加を継続した場合は, 外側への損失が増大する

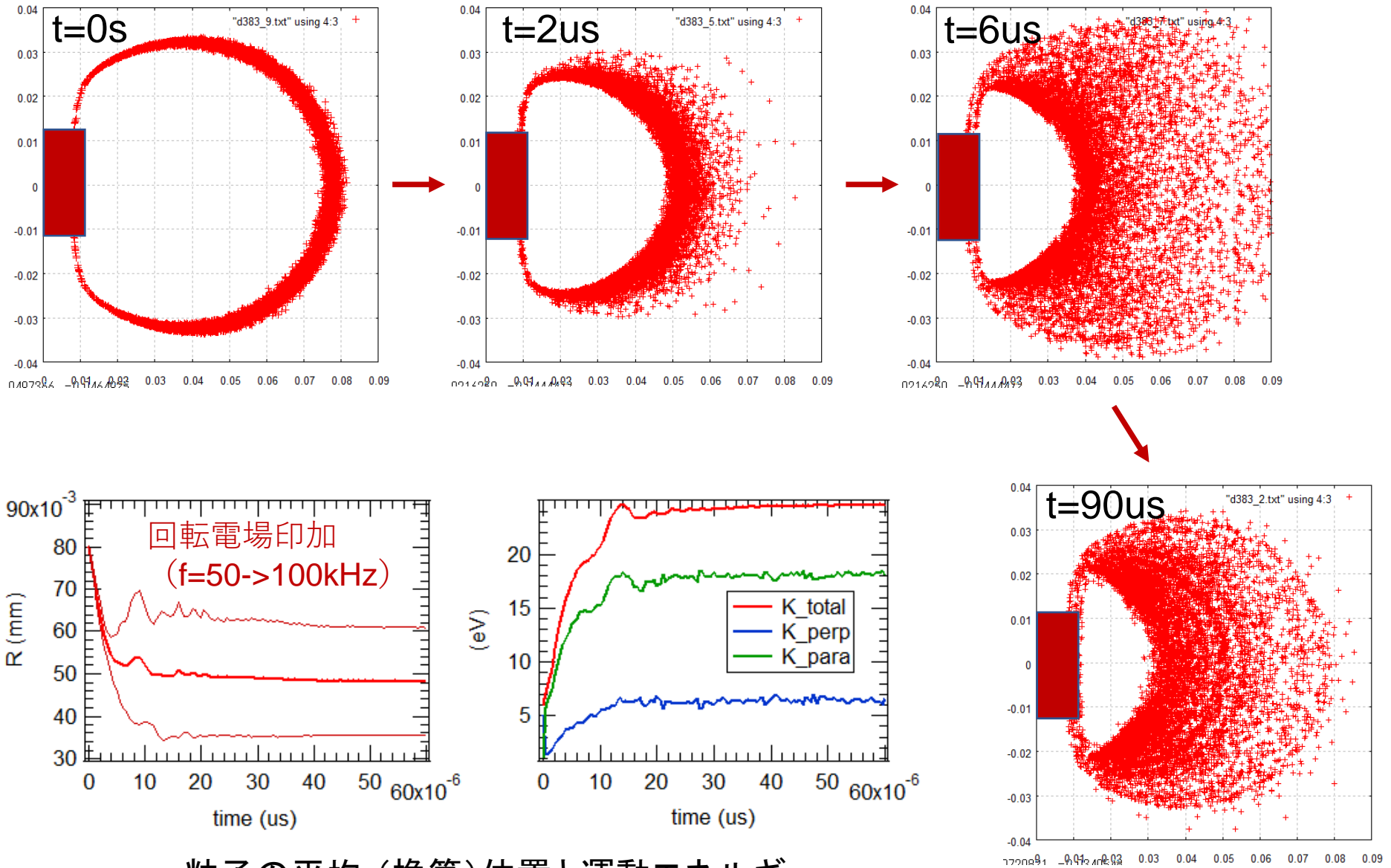


粒子の平均r(換算)位置と運動エネルギー



電場オフで圧縮状態を維持

# 回転電場の周波数をランプアップする事で、さらに強磁場領域への ビーム分布の移動が実現される

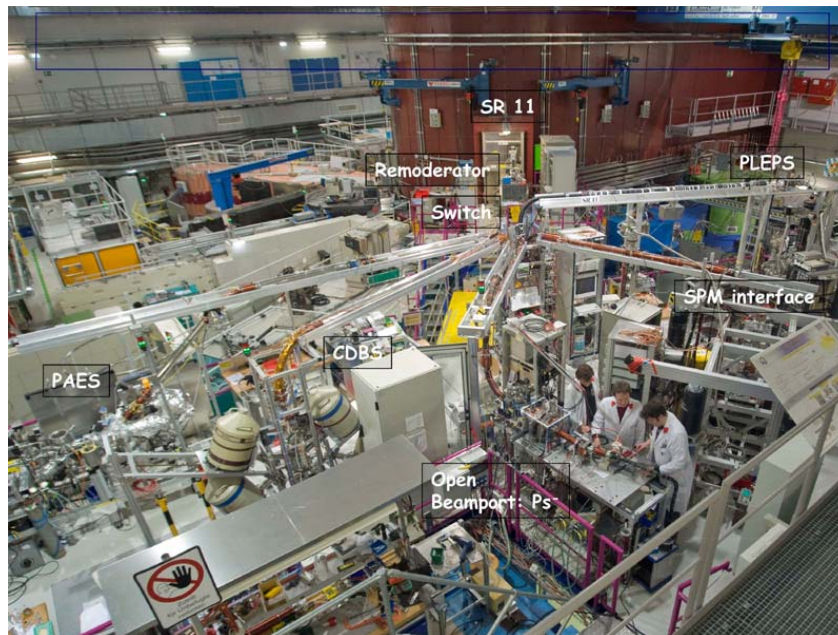




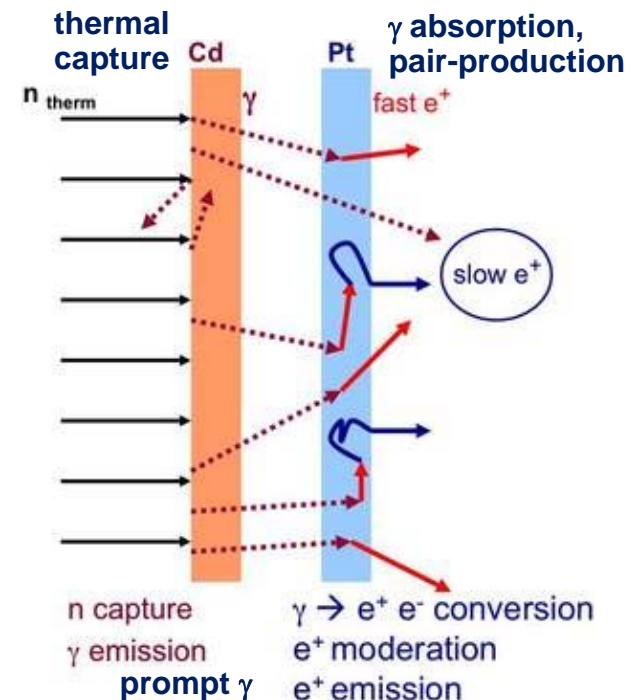
# Experiment at world's strongest slow positron source NEPOMUC

NEPOMUC (NEutron-induced POsitrone source MUniCh)\*

- FRM II @ Technische Universität München (20 MW neutron source reactor)
- DC moderated beams,  $10^9/s$  at 1 keV,  $10^7/s$  at 20 eV, still under improvement



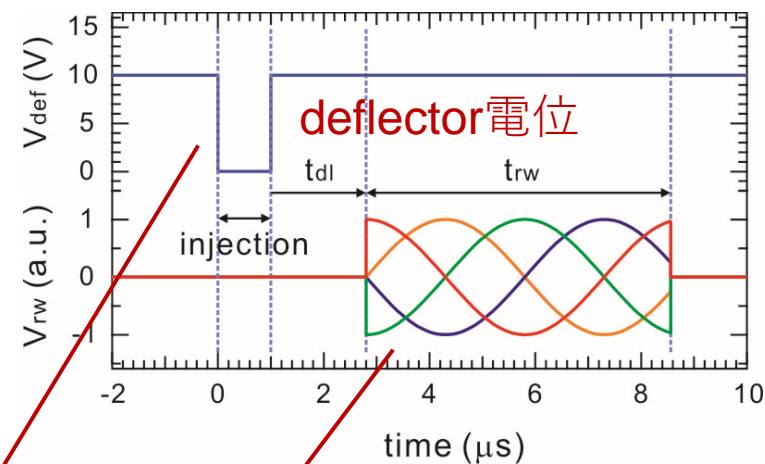
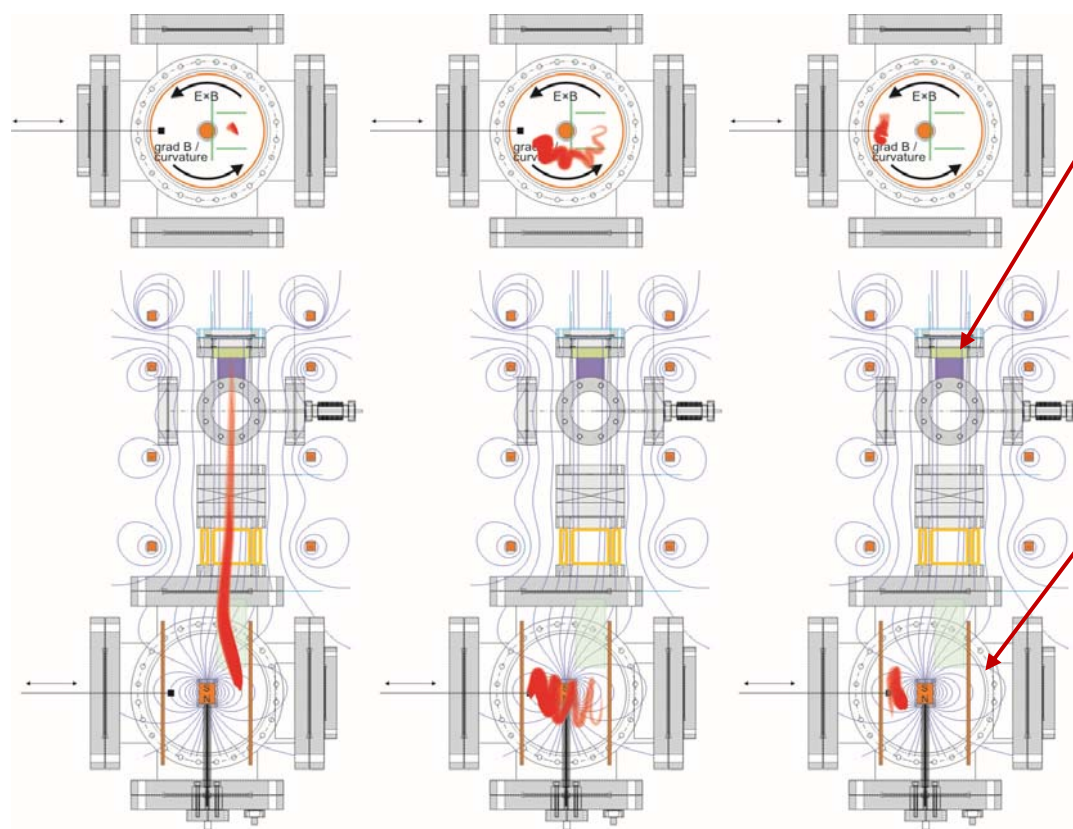
NEPOMUC Hall at FRM II, Garching b. München



\*2012 C. Hugenschmidt+, New J. Phys. **14**, 055027.

# 回転電場がビームの入射過程に与える影響を分離するために、陽電子ビームをパルス入射し、閉じ込め配位内部で回転電場を印加する

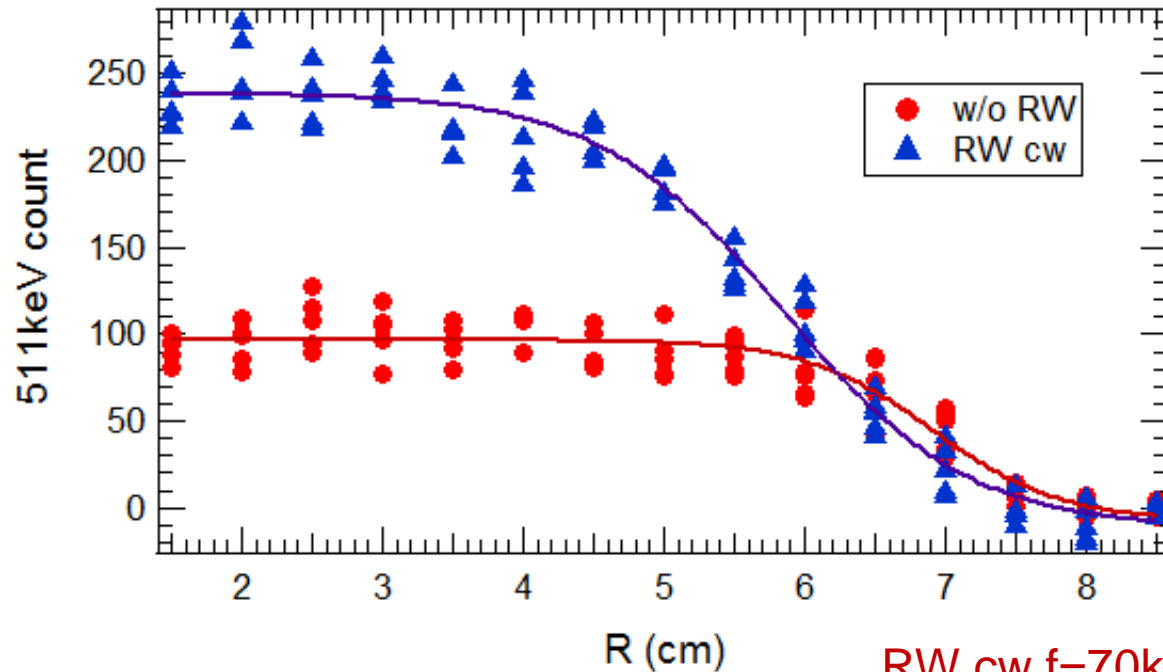
- NEPOMUCは定常陽電子源  
(将来的には、蓄積装置からのパルス化予定)
- 定常陽電子ビームの使用時、回転電場は入射条件に影響を与え初期分布を変化させ、閉じ込め領域での影響の評価が困難



回転電場電極電位

- 入射と閉じ込めを分離
- ビームを1usのパルス化
- 陽電子が閉じ込め領域に到達後、回転電場を印加

回転電場を印加する事で、径方向分布の強磁場側へのシフトと  
周辺部での陽電子損失の抑制が観測された



RW cw  $f=70\text{kHz}$ ,  $V_{pp}=10\text{V}$

$R = 0\text{ cm}$ : 中心軸,  $9\text{cm}$ : RW電極

補足陽電子のカウント : 96 -> 239

ビーム中央位置 : 6.9cm -> 5.8cm

- ダイポール磁場の閉じ込め領域内で、陽電子ビーム位置が強磁場側にシフト
- RWによる粒子損失は軽微であり、圧縮による損失抑制の効果の方が大きい

## 本研究のまとめと今後の課題

- 電子陽電子ペアプラズマ生成を目指すAPEXでは、プロトタイプダイポール装置において、陽電子の損失なし入射(効率100%)と、長時間閉じ込め(1秒程度)が実現され、基礎研究を進めている。
- 陽電子を強磁場領域へ輸送する閉じ込め領域でのmanipulationは、プラズマプラズマ状態を実現する上で、また電子との同時閉じ込めの上で重要である。
- 荷電粒子が磁気面上に捕獲されるダイポール磁場において、陽電子の軌道圧縮を実現するために、回転電場の印加により系の対称性を時間的・空間的に破る事で、磁気面を横切る内向き輸送が駆動される。
- 単一粒子の軌道解析(ビームの温度等のパラメータを含む)により、回転電場により効果的な径方向圧縮が可能である事を示した。
- NEPOMUC陽電子源においてプロトタイプ装置による実験を行い、径方向の軌道圧縮と損失の抑制が可能である事を確認した。
- パラメータの最適化とより長時間の輸送の効果検証、また超伝導ダイポール装置での陽電子実験への適用が今後の課題となる。