

磁気圏型装置における 陽電子閉じ込め実験の初期結果

東大新領域

齋藤晴彦, 吉田善章, 矢野善久, 森川惇二, 三上季範, 笠岡紀和, 坂本渉

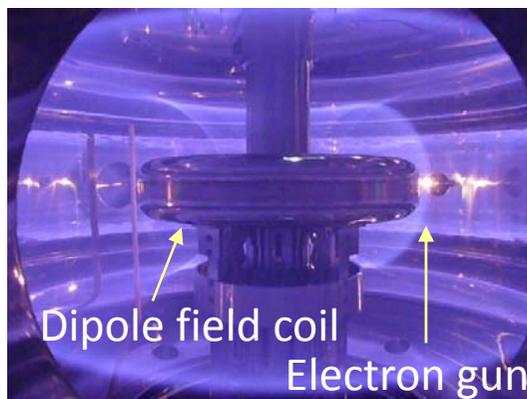
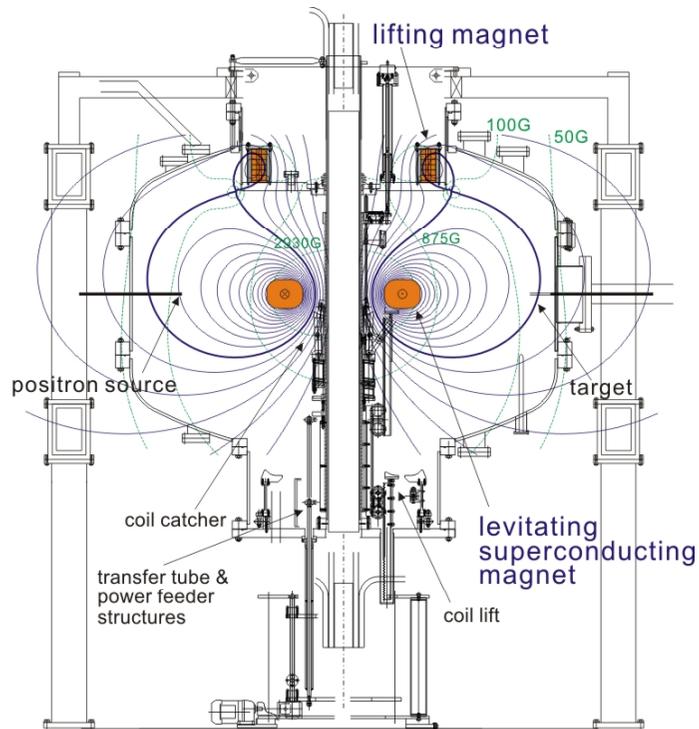
- 目次
1. 研究背景:磁気圏型配位における非中性プラズマ
 2. 本研究の目的
 3. 磁気圏型配位中の陽電子の挙動と入射方法の検討
 4. 入射実験の初期結果
 5. まとめと今後の課題



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

研究背景：磁気圏型配位における非中性プラズマ

2/10



RT-1のrz断面と磁気面の可視化

- RT-1: dipole磁場による「磁気圏型配位」
 - 磁気浮上させた超伝導マグネットを使用
 - 内向き輸送と高性能プラズマの自己組織化*
 - トロイダル磁気面配位：
静電場を使用しない非中性プラズマ閉じ込め**
 - ➔ 高エネルギー粒子, 異なる電荷の同時捕獲
 - 高効率の反物質プラズマの捕獲
 - 電子-陽電子のペアプラズマの実験室研究
 - 先行研究: トロイダル電子プラズマの安定生成
 - 内向き輸送による剛体回転構造の形成
 - 300秒以上の安定な閉じ込めを実現
- 純電子 ⇒ 純陽電子 ⇒ 電子・陽電子混合

*2010 Yoshida et al., PRL 104, 235004. **1999 Yoshida et al., in NNP Phys. III.

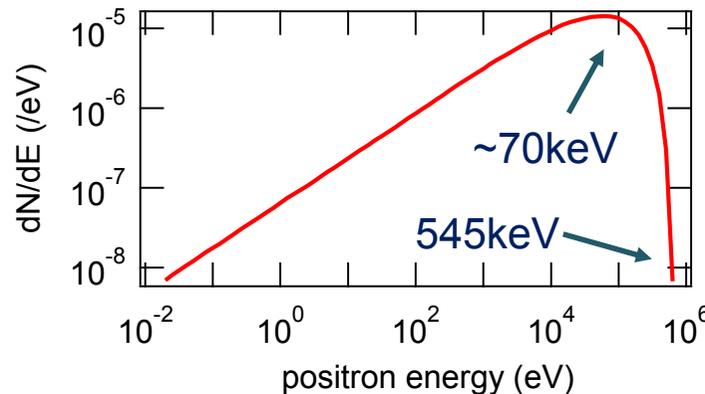
本研究の目的

3/10

- 安定な閉じ込めに先立ち、磁気面を横切り陽電子を入射する必要がある

- 入手可能なビーム強度が極めて弱い
- 初期に高エネルギー： Na22の場合，最大0.545MeV

(減速材の効率は $\sim 10^{-4}$ 以下，1GBqの線源を使用しても，減速後は $10^5/s \sim fA$)



Na22線源からの陽電子のエネルギー分布

プラズマ自身の揺動を介した内向き輸送は，線源からの入射初期には困難

→ 線源からRT-1への陽電子の直接入射方法の確立が必要

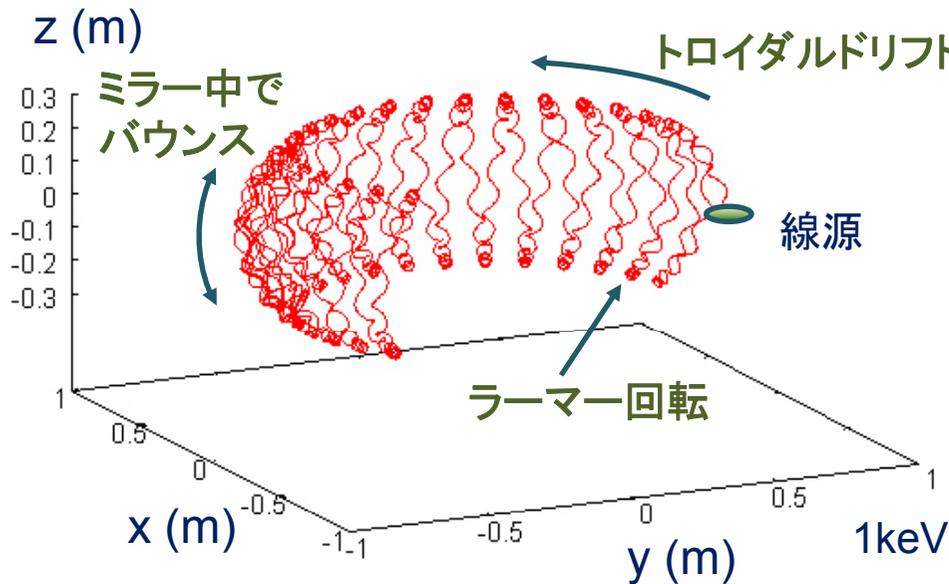
- 軌道解析により，磁気圏型装置中の陽電子の挙動と入射方法を調べる
- 消滅 γ 線の計測による，RT-1の陽電子の径方向分布の特定(初期結果)

磁気圏型配位中の陽電子の運動

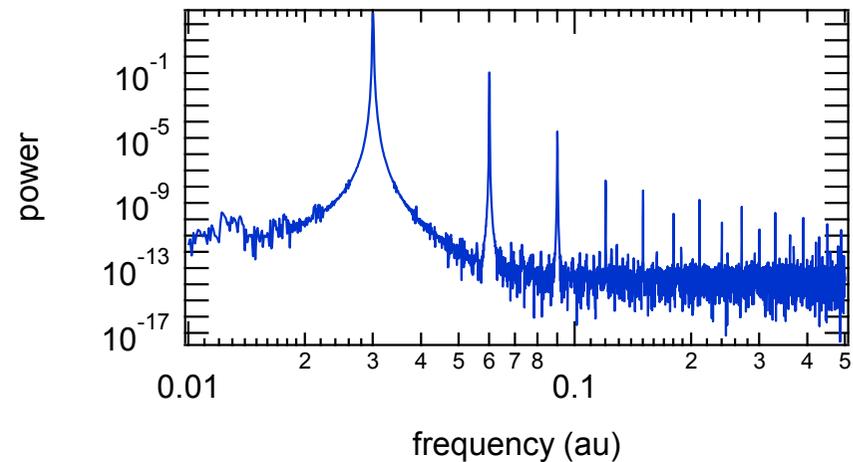
- 軸対称なDipole磁場中の磁化荷電粒子の軌道(低エネルギー)
 - 周期運動3つの重ね合わせ: ラーマー回転, バウンス, ドリフト
 - 対応する作用の μ , J , Ψ が断熱不変量となり, 系は可積分で周期的運動

$$\mu = v_{\perp}^2 / B \quad J = \int v_{\parallel} ds \quad \Phi = \int B dS$$

➔ 入射陽電子は1周回後に必ず線源に戻り再結合, 長い閉じ込めは不可能
 (軌道長は高々数十m, 飛行時間は~10 μ s以下)



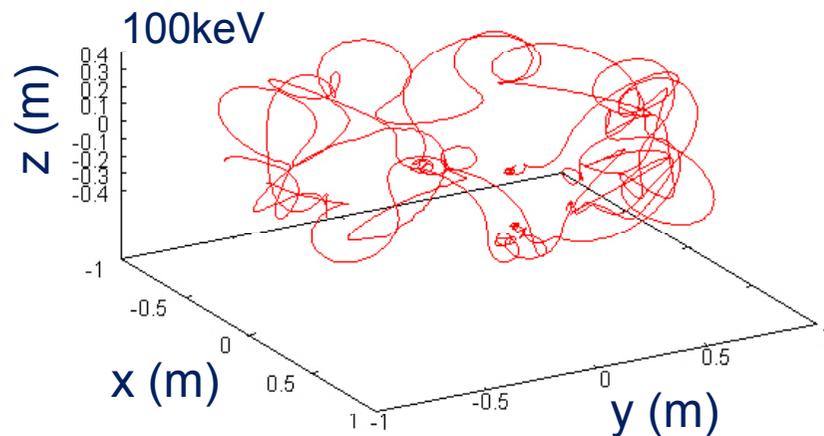
RT-1の低エネルギー陽電子の典型軌道



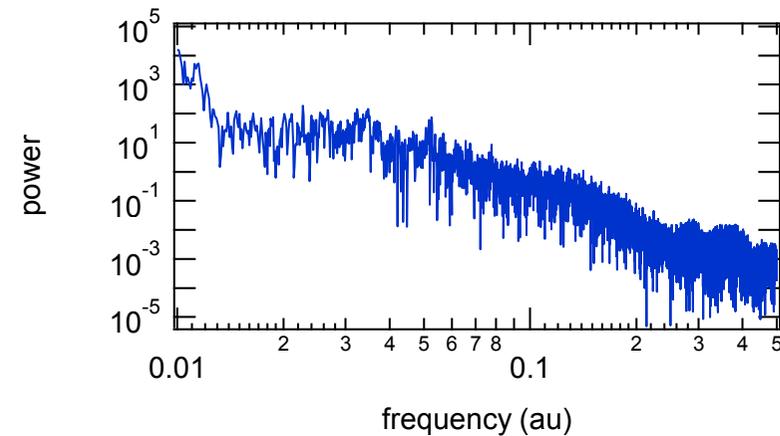
粒子の位置座標の周波数スペクトル

磁気圏型配位中の陽電子の運動(つづき)

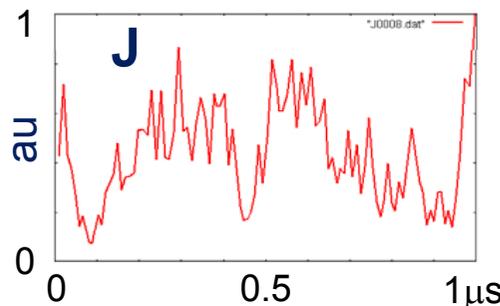
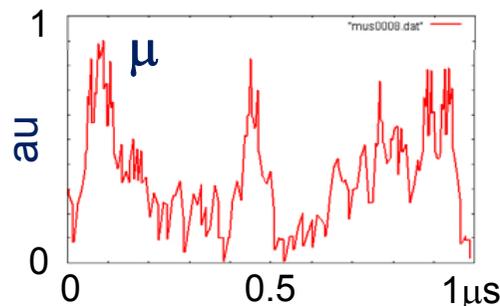
- 高エネルギーの荷電粒子の軸対称系での軌道
 - μ , J が断熱不変量となるのは, 粒子が低エネルギーで磁化した場合のみ
 - 一般には, 保存量は**エネルギー**と**正準角運動量**の2つ: **非可積分**
 - ラーマー回転とその他の運動のカップリングで, **軌道はカオス的**となる*



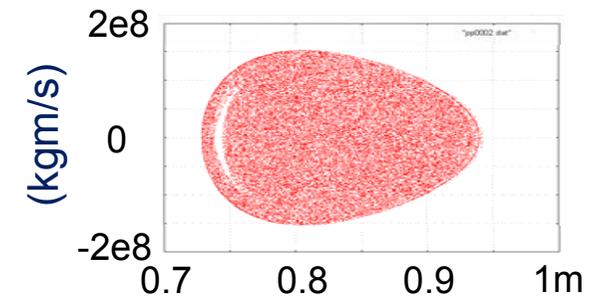
RT-1の高エネルギー陽電子の典型軌道



周波数スペクトル: 周期性が失われる



100keVの陽電子の μ と J の時間変化: 不変量でない



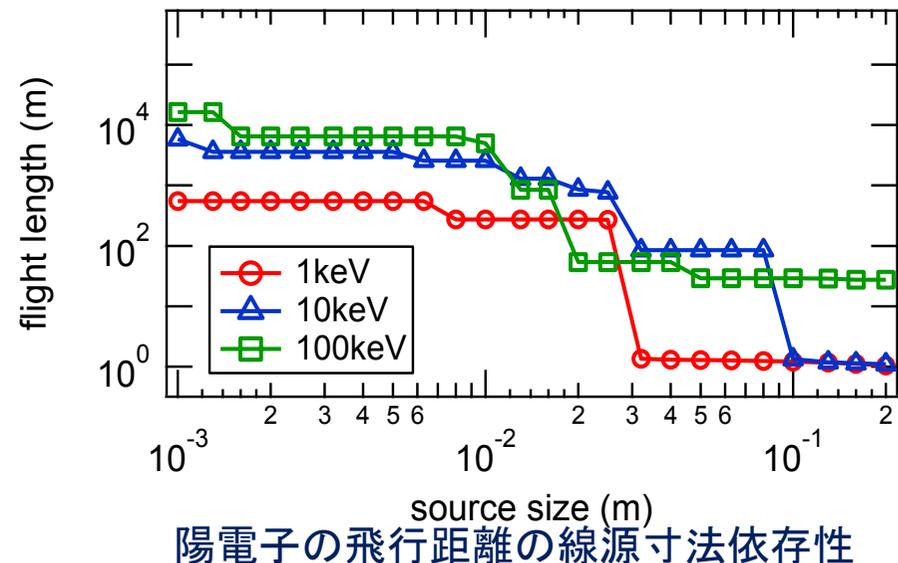
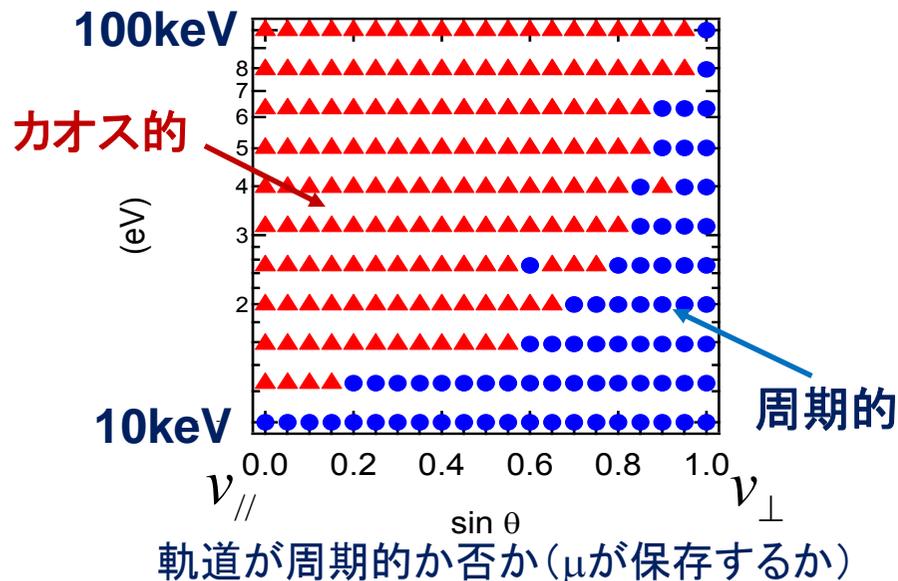
ポアンカレプロット(r-Pr)

*1990 Murakami, Sato, Hasegawa, Phys. Fluids B2, 715.

RT-1でカオス軌道を取る陽電子の割合と軌道長

非周期的な軌道： 線源での再結合までの自由行程が比較的長い

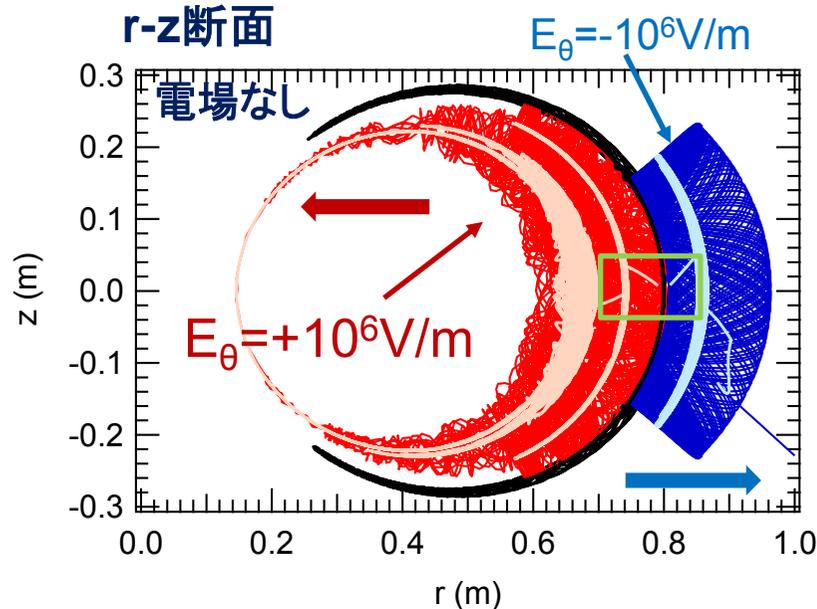
- 陽電子の軌道がカオス的軌道となる条件
 - 10keV程度以上の陽電子で, 水平入射に近い時に不規則的
 - RT-1では, Na22からの入射陽電子の約60%がカオス的軌道
(線源からのエネルギー分布と等方的な入射方向を仮定した計算結果)
- カオス的軌道を取る陽電子の自由行程
線源寸法が~1cmの時, 周期的軌道の場合と比較して10倍程度以下
→ これだけでは閉じ込めは困難, より効率的な入射法が必要



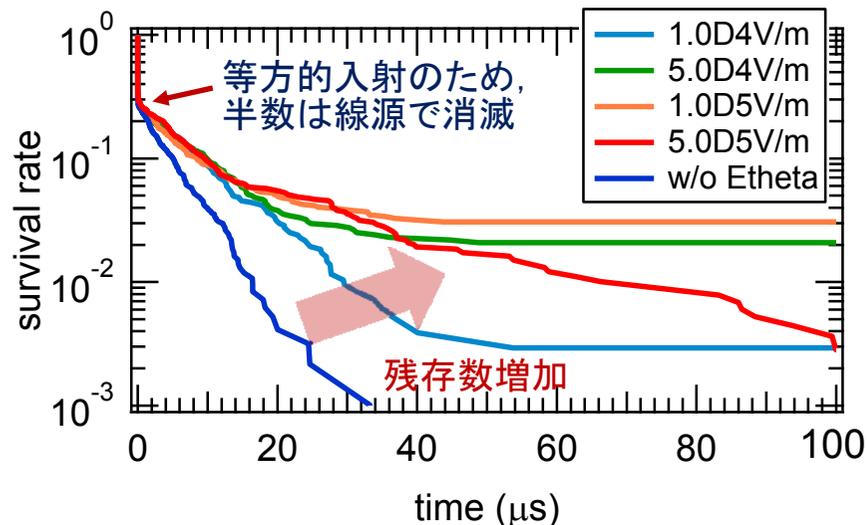
陽電子の飛行距離の線源寸法依存性

磁気面を横切る陽電子入射：外部電場の使用

7/10



粒子軌道と案内中心の投影図



Na22からの等方入射後、消滅しない陽電子の割合

- 系が非軸対象：正準角運動量は非保存

→ 磁気面を横切る粒子輸送が可能

- 線源付近で θ 方向に電場を印加

- 案内中心はr方向に移動
- 線源から分離した軌道を取る

- DC電場による陽電子生存数の増加

- 電場印加により内向きに輸送され、閉じ込め領域に進入する軌道を取る
- 最大で3%程度の陽電子は、線源に戻らない周回軌道に入る

大型の1GBq線源 $\Rightarrow 3 \times 10^7 / \text{s}$

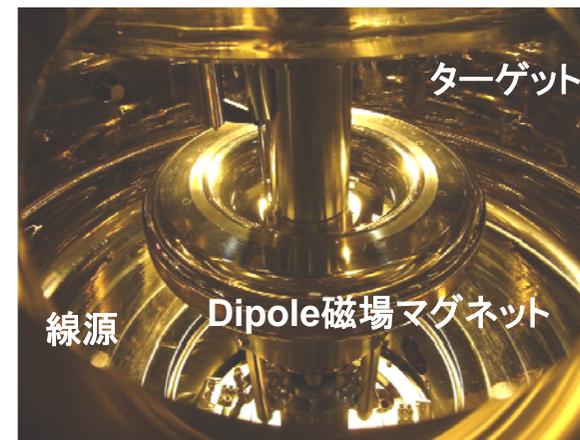
平均閉じ込め時間300秒で $N \sim 10^{10}$

100eVでデバイ長は装置寸法以下

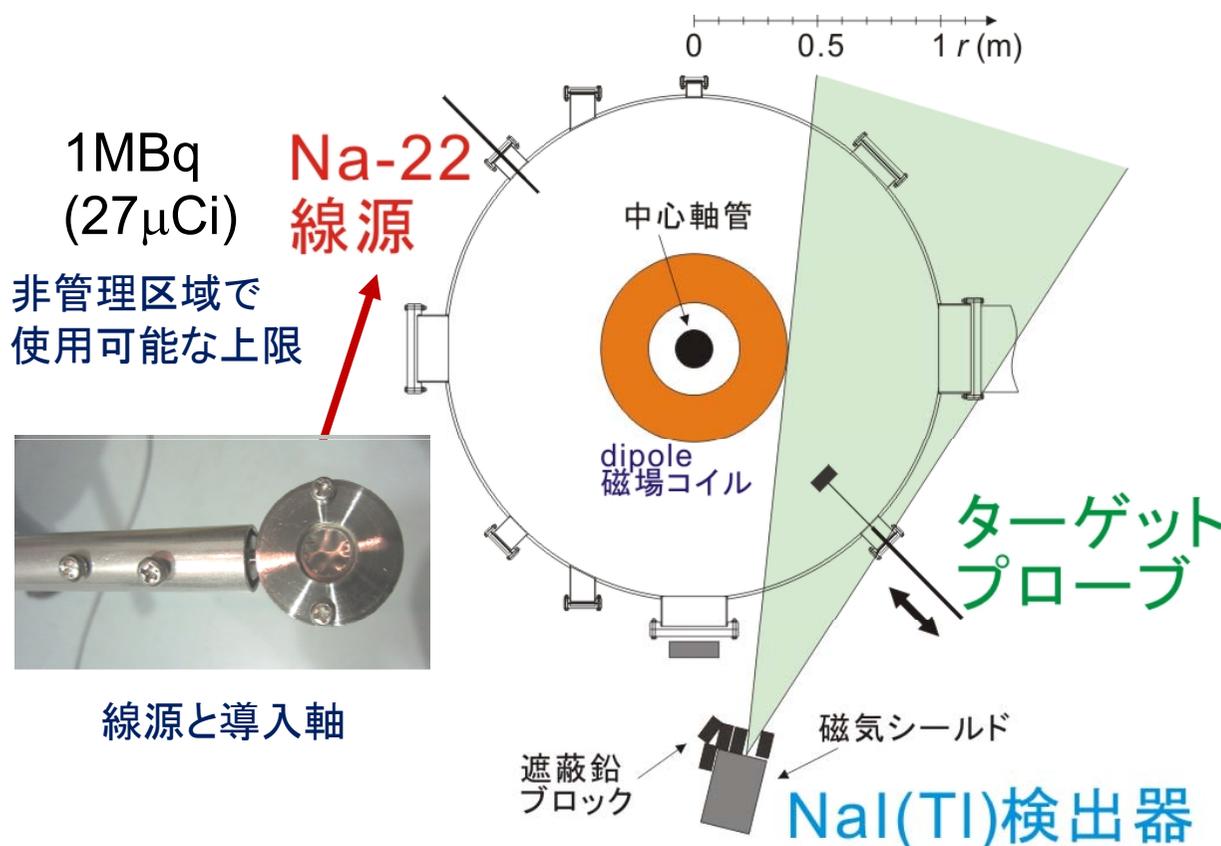
小型(1MBq)線源によるRT-1への陽電子入射試験

8/10

- 磁気圏型配位の陽電子の挙動を実験的に検証
 - 線源から装置内への入射が可能か
 - ターゲットまで予想通りの到達が可能か



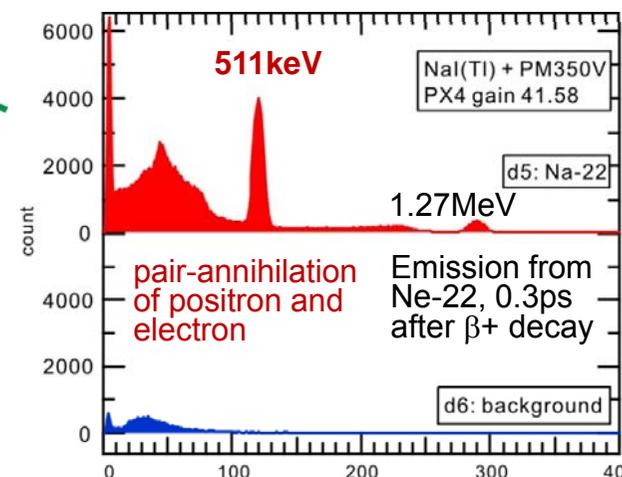
RT-1内部



線源と導入軸

ターゲット上での陽電子の
消滅 γ 線をシンチレータで計数

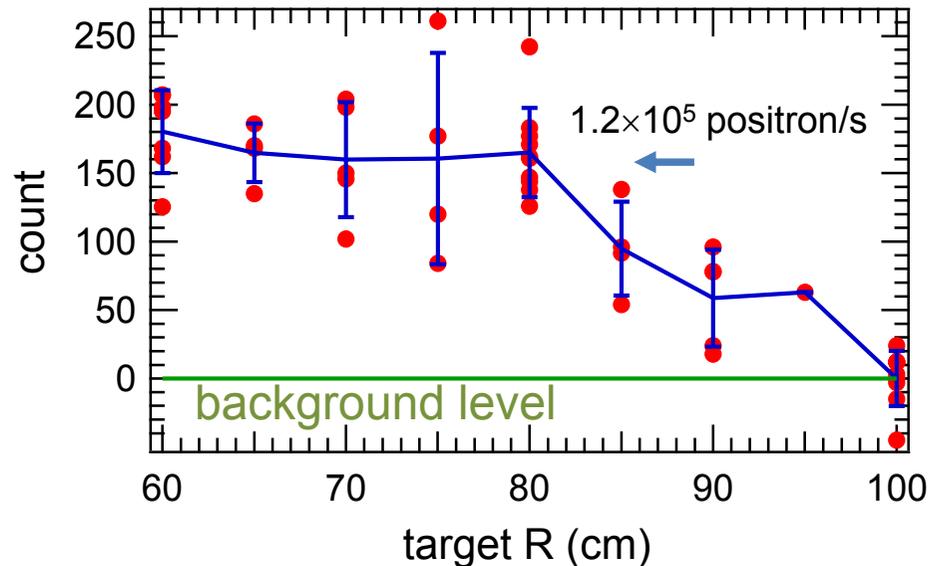
⇒ 波高分析



線源を直接観測時の波高分布

ターゲットで消滅する陽電子の径方向分布

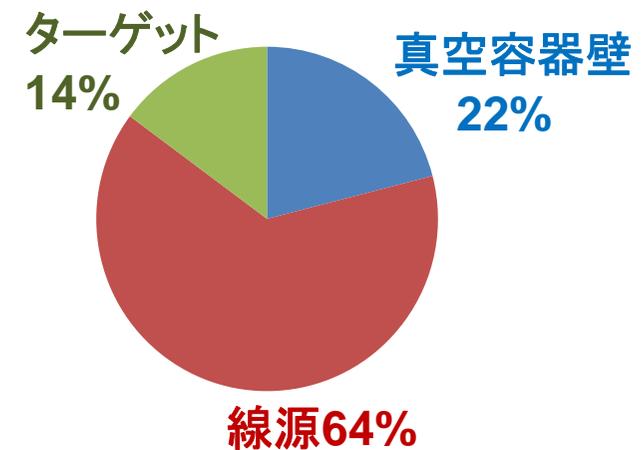
9/10



1カウント= 4.9×10^5 の消滅陽電子
(立体角とシンチレータの検出効率,
真空容器の透過率を考慮)

511keVの陽電子消滅 γ -ray count数のターゲット位置依存 (線源 $r=80\text{cm}$, 600s)

- 1MBq (27 μCi)のNa22線源からの陽電子の13% (120,000 /s) が, ターゲットへと到達する軌道に入射された
- 検出数は, エネルギー分布と入射方向を考慮した軌道計算結果とほぼ一致している
- 電場印加の効果の検出には至っていない (陽電子カウントのs/nの問題)



陽電子の消滅位置の計算結果

まとめと今後の課題

10/10

まとめ

- RT-1のDipole磁場配位中の陽電子の挙動を調べ、入射方法を検討した
 - 線源からの約60%の陽電子はカオス的な軌道を取る(μ 及びJが非保存)
 - 電場により系の対称性を壊す事で、磁気面を横切る径方向輸送が発生
 - 最大で3%程度の効率で、線源と再結合しない閉じ込め領域へと入射可能
- 1MBqのNa22線源とシンチレータ検出器を使用した入射実験を開始した
 - 約10%の陽電子が線源を離れターゲットに到達(軌道計算と一致)
 - 電場印加の効果の検出には至っていない(小数成分の検出が困難)

今後の課題

- 陽電子の長時間閉じ込めの実現
 - 陽電子入射のための電場印加方法の最適化(DC電場, RF電場 $\omega \sim \omega_d, \omega_b$)
 - 消滅 γ 線の位置計測の高精度化と効率向上(コインシデンス, ターゲット位置)