ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 I

橋立佳央理[1,4], 周 健治[1,4], 山田 恭平[1], 石田 明[1], 難波 俊雄[2],
浅井 祥仁[1], 五神 真[1], 田島 陽平[3], 蔡 恩美[3], 吉岡 孝高[3], 大島 永康[4],
オローク ブライアン[4], 満汐 孝治[4], 伊藤 賢志[4], 熊谷 和博[4],
鈴木 良一[4], 藤野 茂[5], 兵頭 俊夫[6], 望月 出海[6], 和田 健[7] , 甲斐健師[8]

東大理[1], 東大素セ[2], 東大工[3], 産総研[4], 九大GIC[5], KEK[6], 量研[7] , 原子力機構[8]

Introduction

- ポジトロニウムのボース・アインシュタイン凝縮(Ps-BEC)を目指すためには低温(>10 K)で密度の高いポジトロニウムが必要(~10^{17} cm^{-3})である.
- 高密度のPsは、陽電子ビーム(1.5x10^{8} e^{+}/ 50 ns bunch, 5 keV, ϕ5 mm, polarized) の輝度を高めて入射することで得る.
- 専用の陽電子輝度増強システムを作るにあたって、まずは産総研で試作された磁気集束レンズを使って、KEK-SPFで陽電子集束実験を行った.
- 将来の実験のため、実験結果をシミュレーションで再現することを試みた.

Psは電子と陽電子の束縛系である

ポジトロニウム(Ps)

- Psは電子と陽電子の束縛状態
- 最もかんたんな反物質を含む系

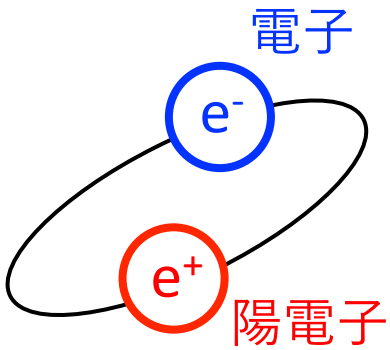
→基礎物理学検証に有用

ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)

- 低温高密度で、ほとんどの粒子が同じ量子状態を占める
- 原子のレーザー状態

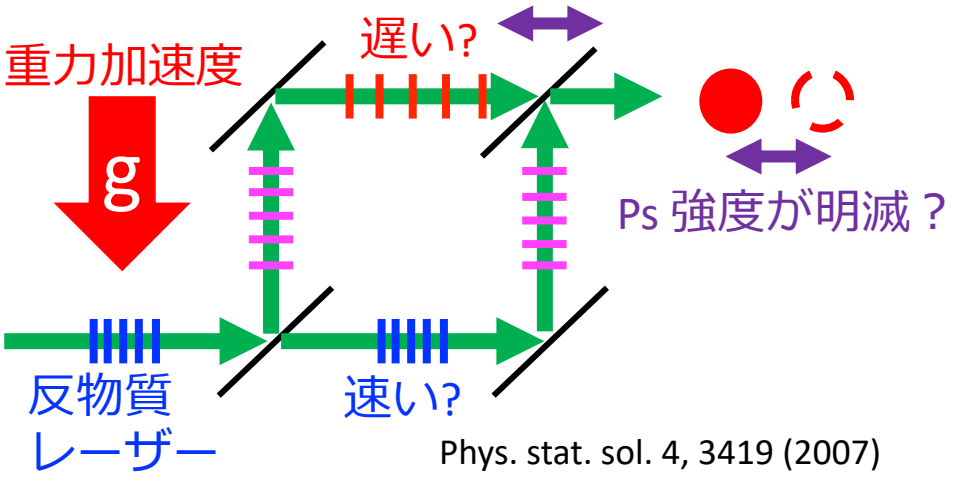
Ps-BECの実現

- 反物質を含む系のBECは実現していない
- Psが軽いため、転移温度が高い



Ps-BECの応用

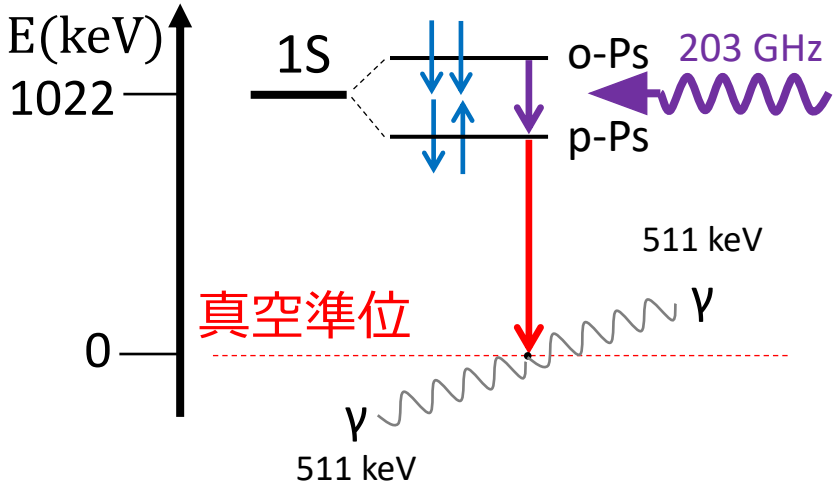
1. **反物質に働く重力を原子干渉計を用いて測定する**



Phys. stat. sol. 4, 3419 (2007)

- 反物質に働く重力効果、物質e^-・反物質e^+の非対称性をBECの特徴を用いて原子干渉計で検証

2. **511 keV ガンマ線レーザー**



Phys. Rev. A 92, 023820 (2015)

- レーザー状態のPsの崩壊により Ps-BEC(原子のレーザー)→ γ線レーザー
- 従来のX線の10倍短い波長 →微細構造プローブ

2つの課題: Psの高密度化と高速冷却

最大の問題

Psは寿命が142 nsと短い

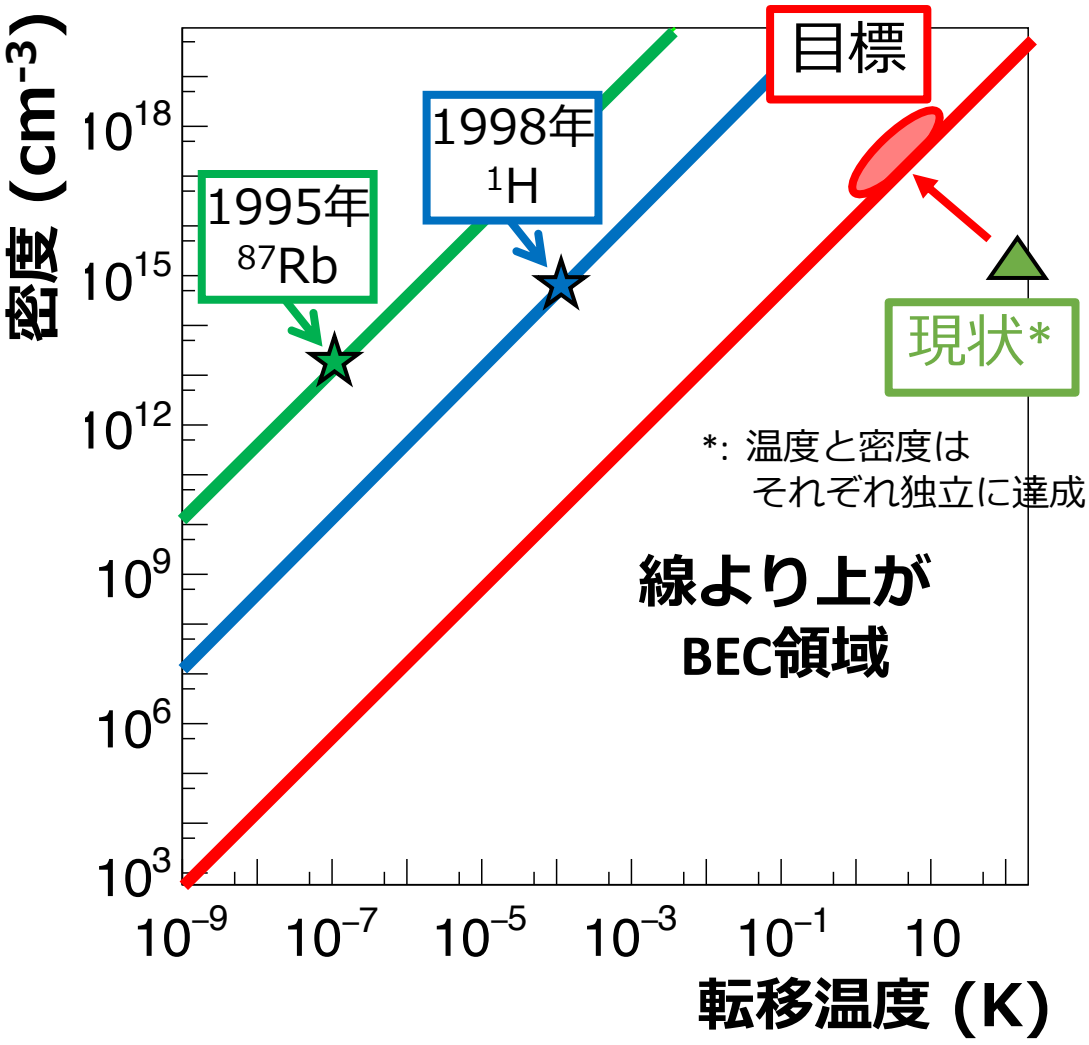
2つの課題

1. 瞬間的な高密度Psの生成

   10^{17} cm^{-3} in < 50 ns

2. Psの高速冷却

   < 10 K in ~300 ns



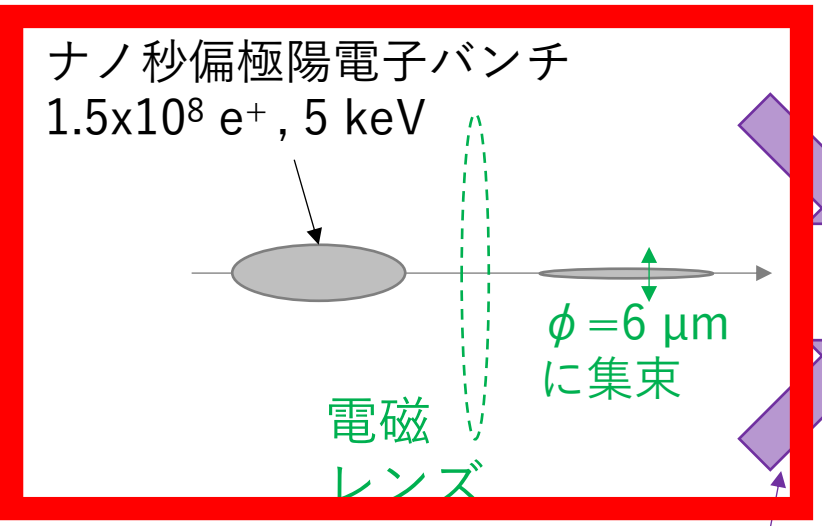
* : S. Mariazzi *et al.* Phys. Rev. Lett. 104, 243401 (2010)

* : D. Cassidy *et al.* physica status solidi 4, 3419 (2007)

Psを高速に冷やす新しい方法を提案
空孔中でレーザー冷却

K. Shu *et al.* J. Phys. B 49, 104001 (2016)

- ナノ空孔中のPsに紫外レーザー照射
- 熱化過程とレーザー冷却を併用

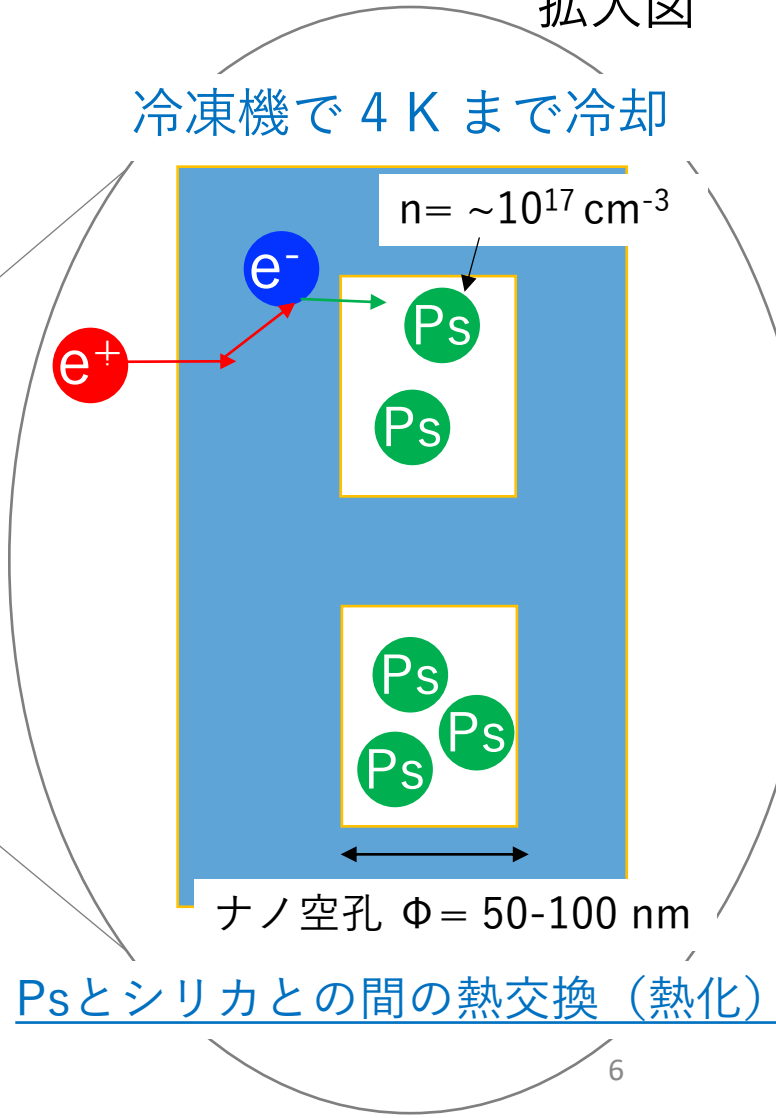


入射する陽電子の
密度を高めることについて話す

243nm
紫外レーザー

2. Ps レーザー冷却
(1S-2P Lyman-α遷移を使用)

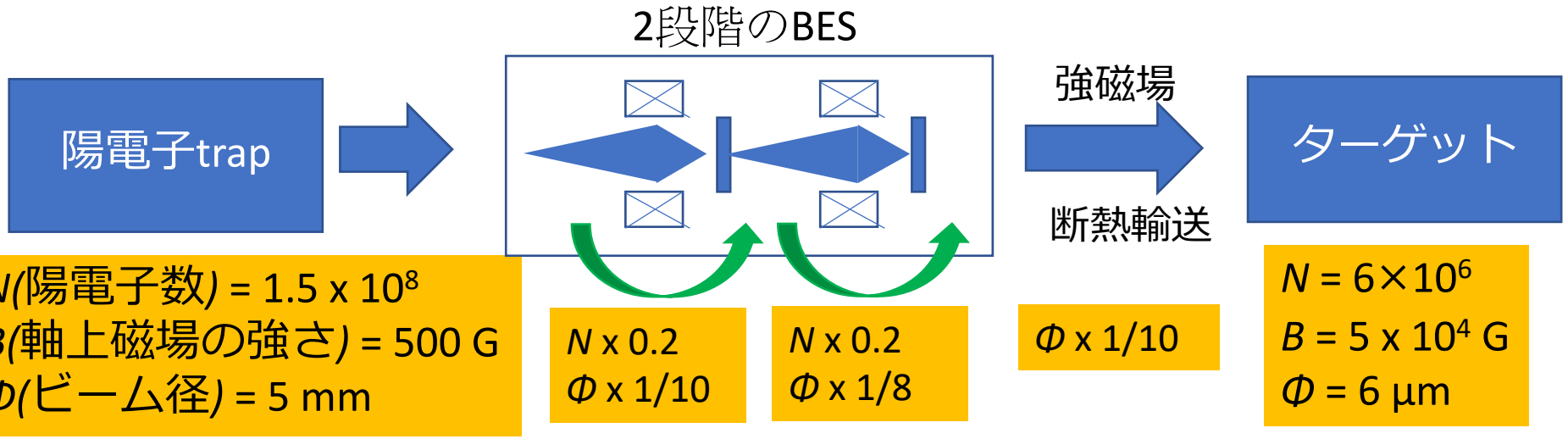
拡大図



1. Psとシリカとの間の熱交換（熱化）

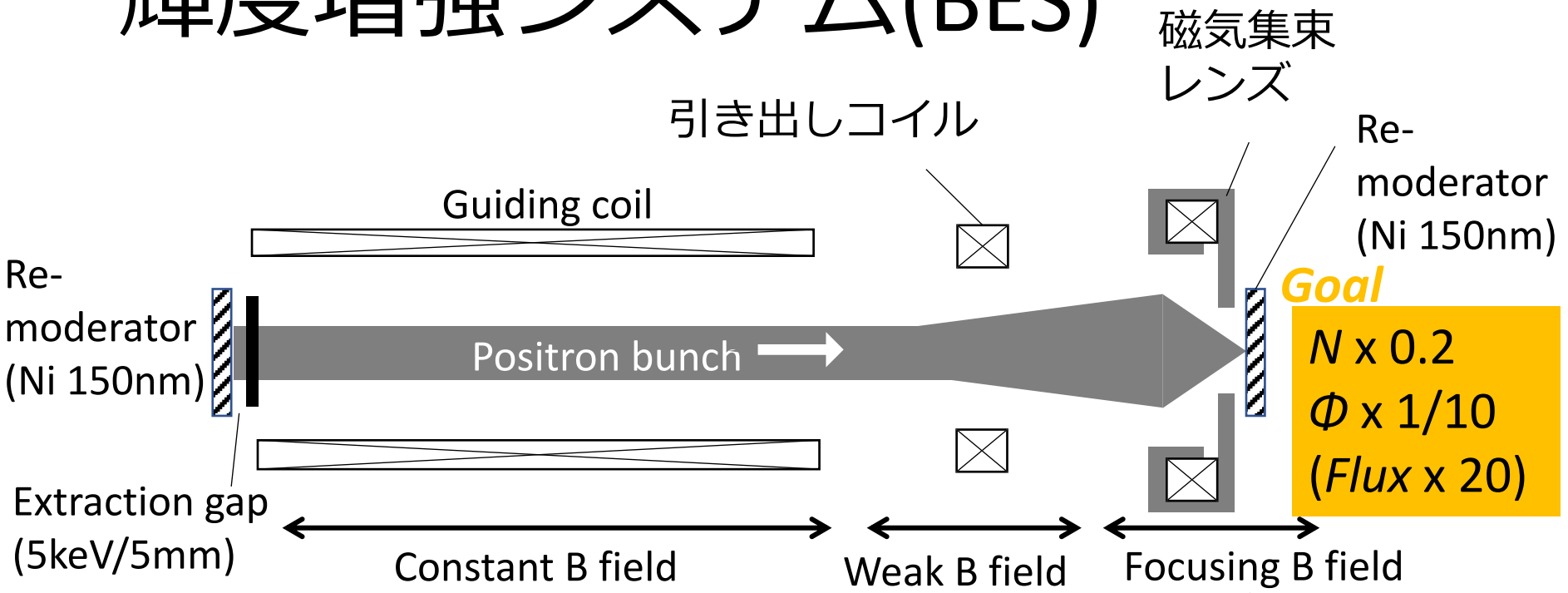
密度の高いPsを得るための手法

陽電子trapによる陽電子の蓄積→
2段階の 輝度増強システム(BES)による輝度増強→
強磁場で断熱輸送し集束

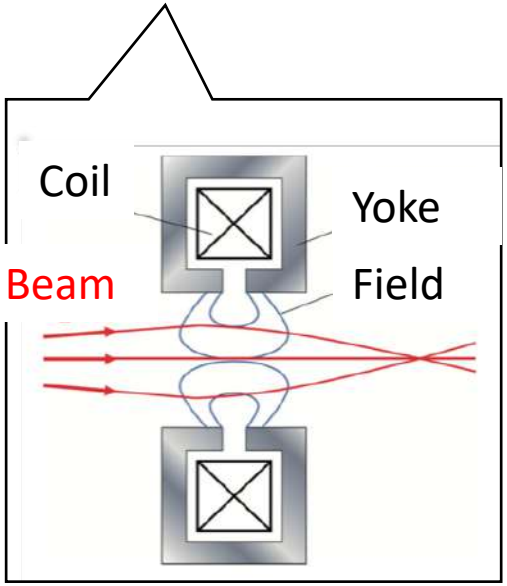


(1)空間電荷制限電流 、(2) Brillouin flow 、(3) 空間電荷効果入れたビーム径方程式について考慮し、この手法で十分な密度を達成(N. Oshima, ICPA-18)

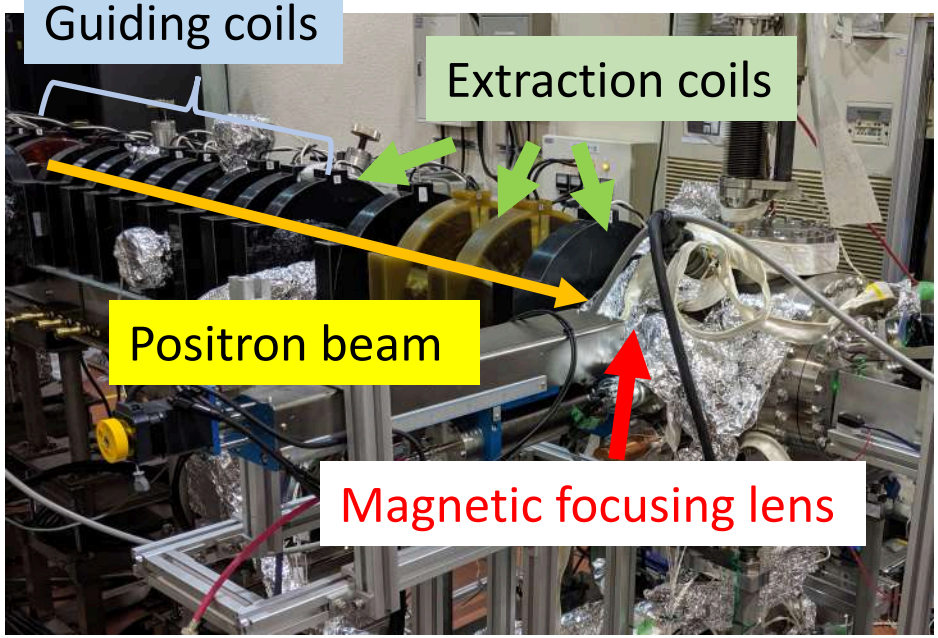
輝度増強システム(BES)

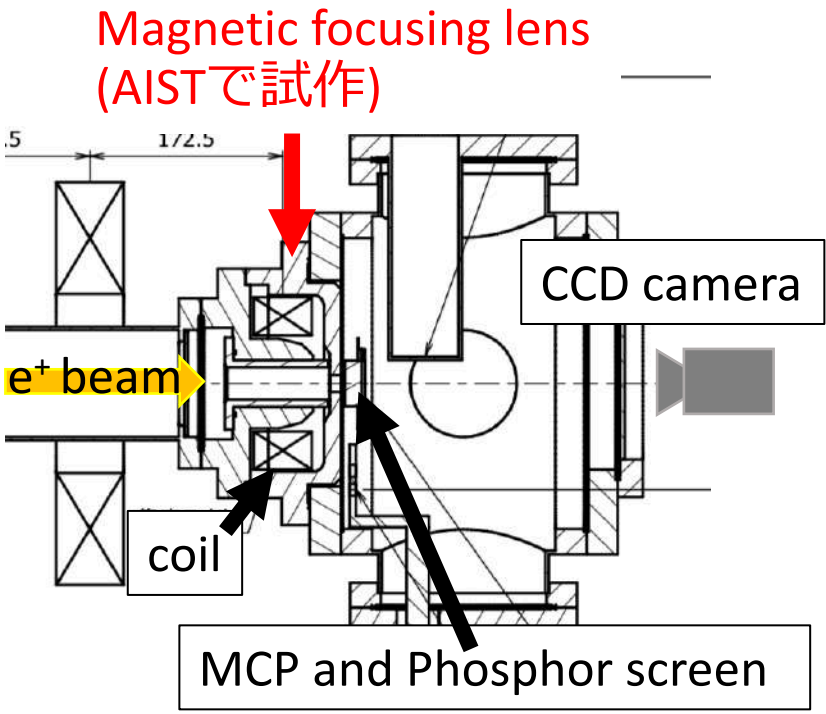


1. 低速陽電子はソレノイドコイルによって断熱的に輸送される
2. 引き出しコイルによって弱い磁場に引き出される
3. 磁気集束レンズによって集束される
4. remoderatorは次の段階への陽電子源となる



KEKでの陽電子集束実験





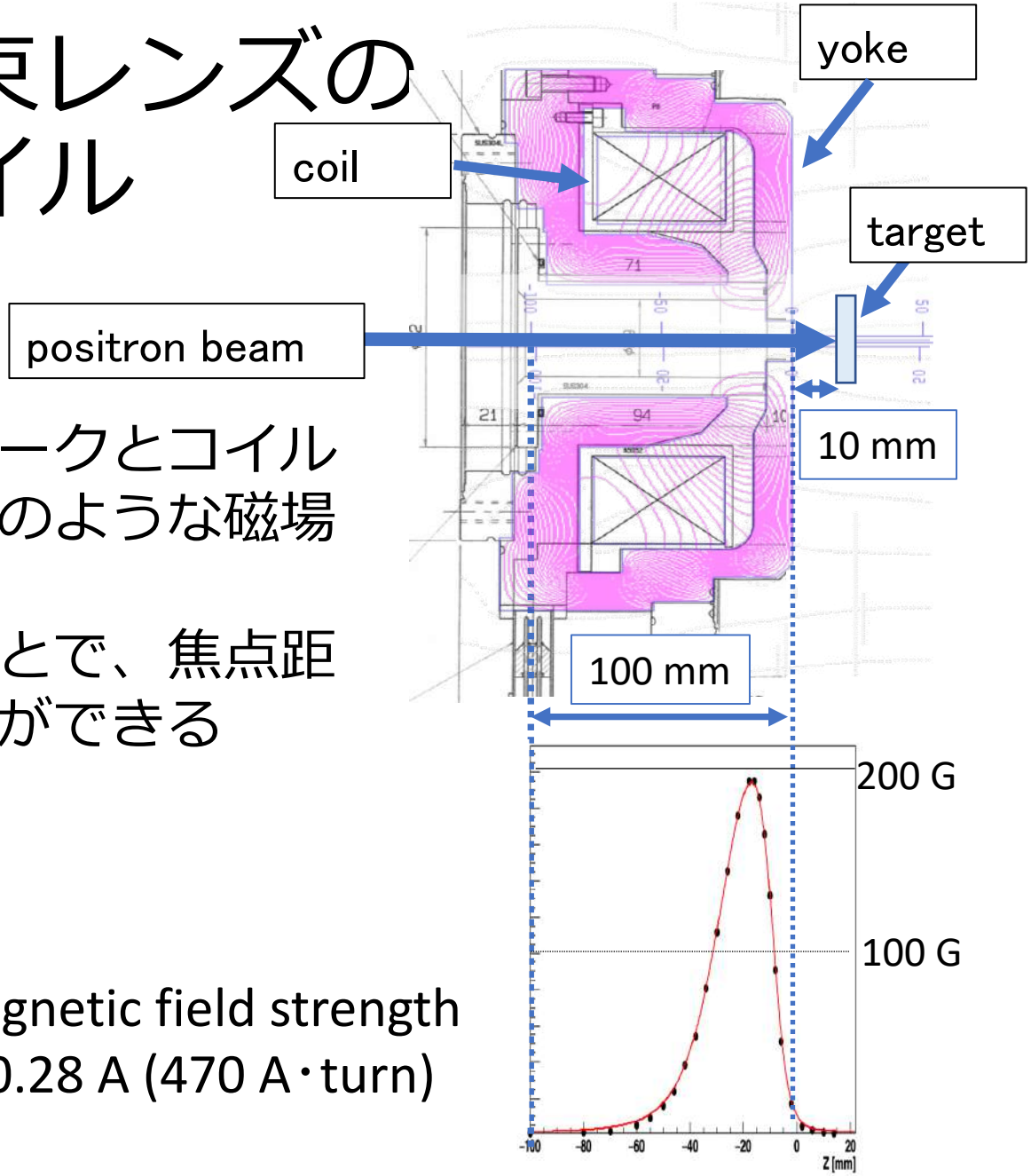
Beam profiles

- Energy : 5keV
- Intensity : $5\times10^5\ e^+/s$
- Pulse repetition : 50 Hz
- Pulse width : 16 ns

CCDカメラで、MCP/phosphor screenの画像を撮って集束したビームを観察した.

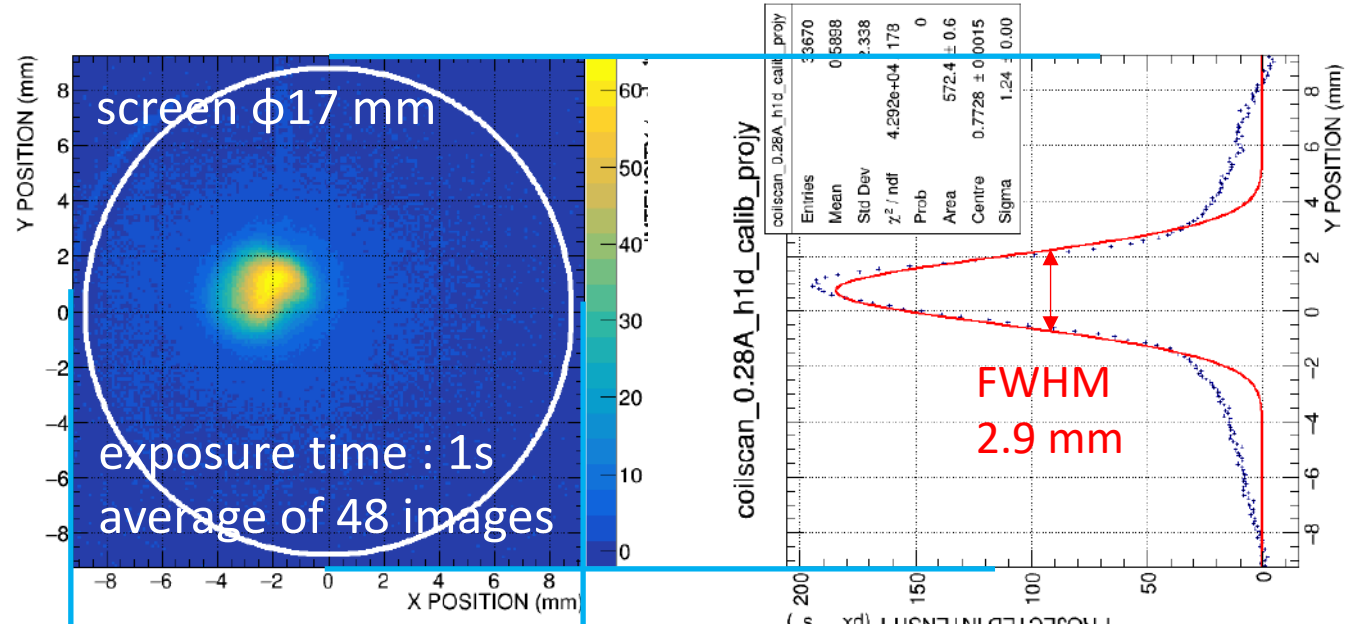
使用した陽電子集束レンズのプロファイル

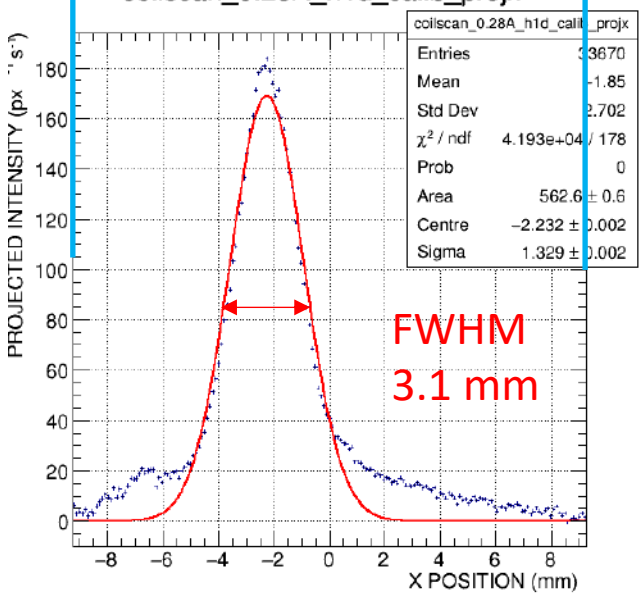
- 集束レンズはヨークとコイルからなり、下図のような磁場を作る
- 電流を変えることで、焦点距離を変えることができる

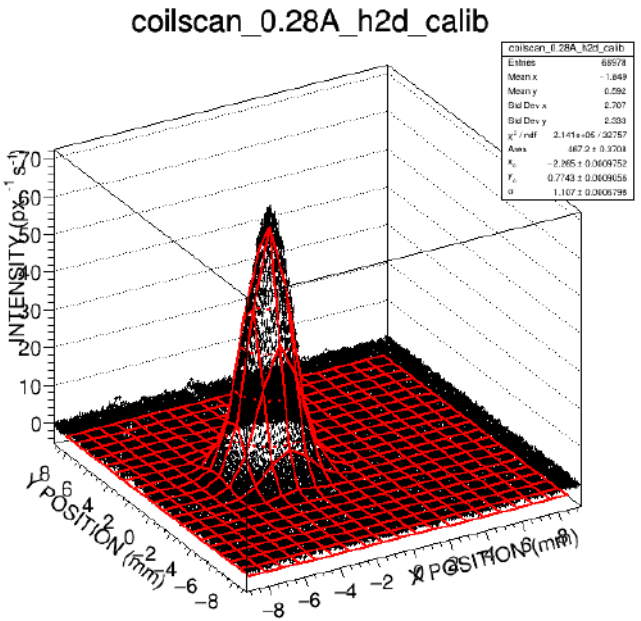


Magnetic field strength
at 0.28 A (470 A･turn)

CCDカメラで撮影したbeam profile　@0.28 A (470 A･turn)



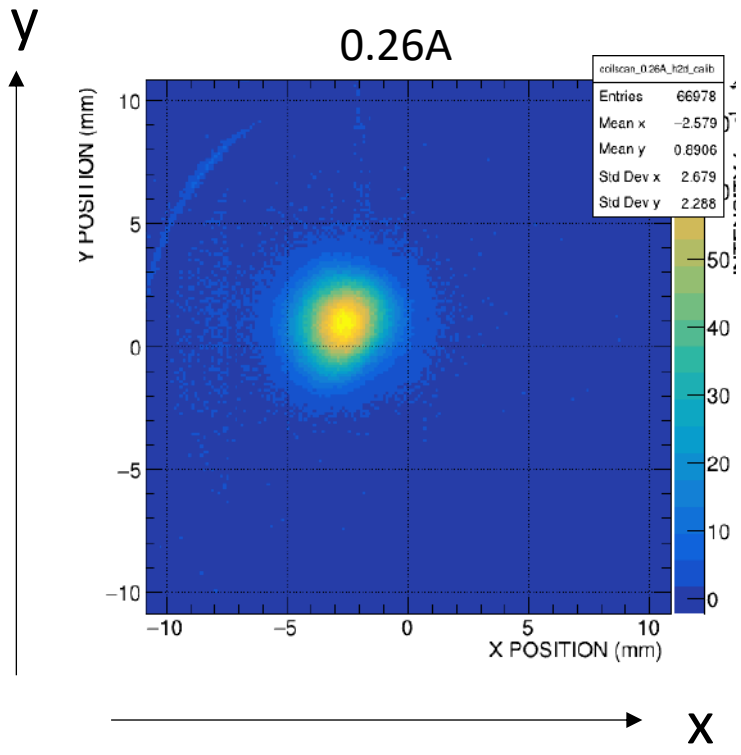


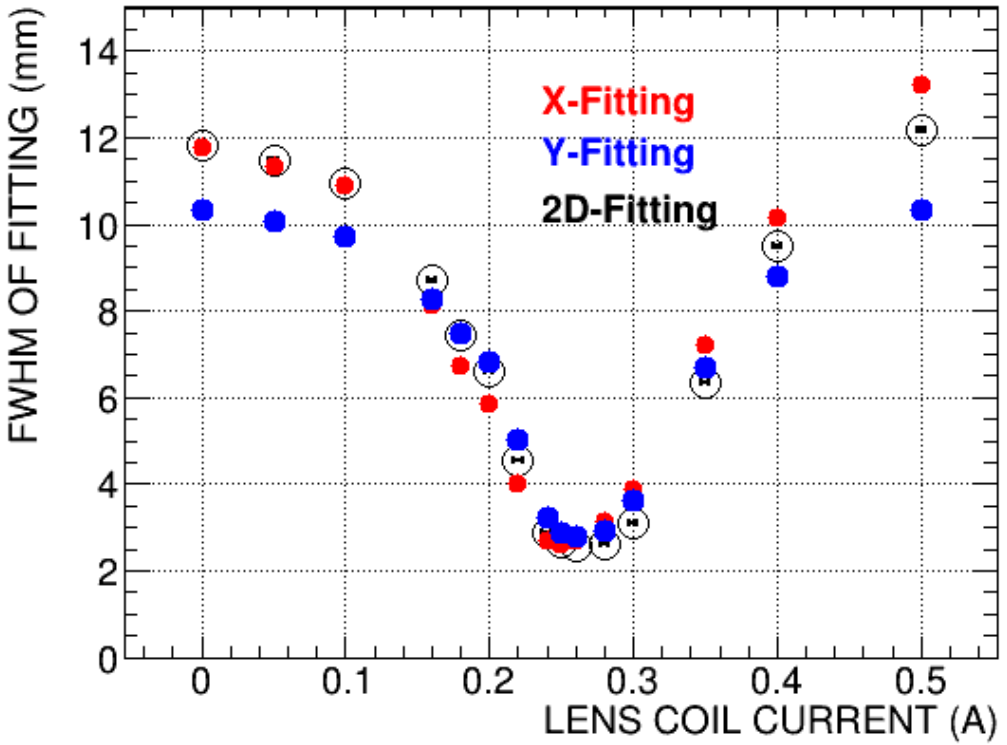


これから、このビームのFWHMをビーム径とする. また, スクリーン上の陽電子profileの積分を陽電子ビームのintensityとする

ビーム径はlenscoil電流=0.25~0.26 Aの時最小で2.6 mm だった

CCD image

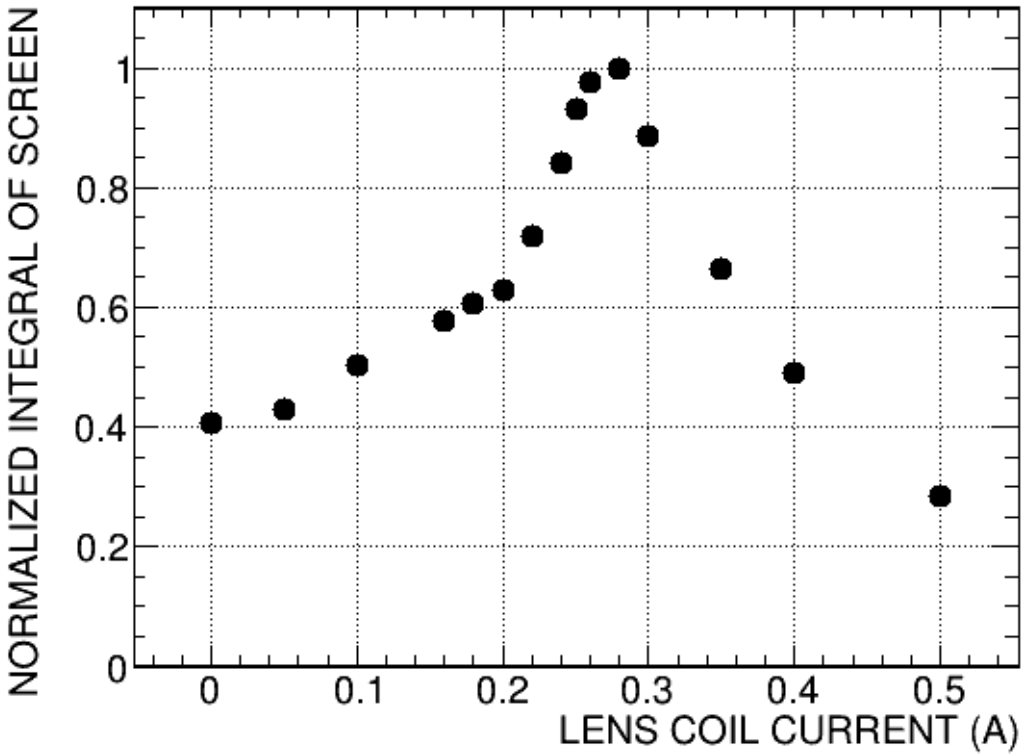




- 最小ビーム径

: x direction: 2.6 mm (@0.25 A)
y direction: 2.8 mm (@0.26 A)
2D-fitting: 2.6 mm (@0.26 A)

到達した陽電子数はlenscoil電流=0.28Aの時最大だった



- 1つ前のスライドより、陽電子ビームは磁気集束レンズに流した電流が0.25~0.26Aの時最も集束するが、screenに到達する量は0.28Aで最大

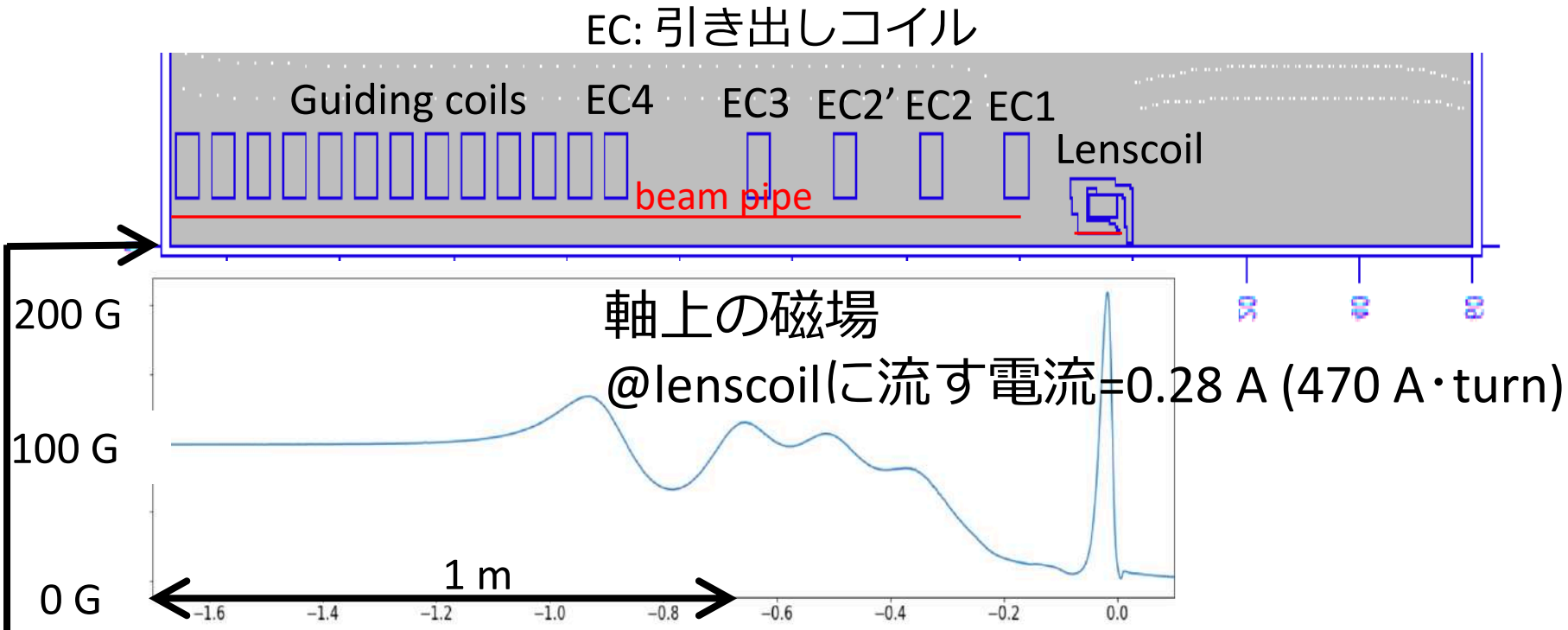
Simulation

- 初期ビーム径、横方向運動量広がり、平均ビームエネルギーをfree parameterとし、これらを調整してビーム径、intensityをシミュレーションで再現することを試みる
- これによって、KEKのbeam profileを理解する

シミュレーションには、以下のソフトを使った

- **Poisson Superfish**: ロスアラモス国立研究所が開発した、静電磁場のシミュレーションを行うソフトウェア
- **General Particle Tracer (GPT)**: Pulser Physics社が開発した、電磁場中の荷電粒子の軌道を計算するソフトウェア

シミュレーションで入れたジオメトリ

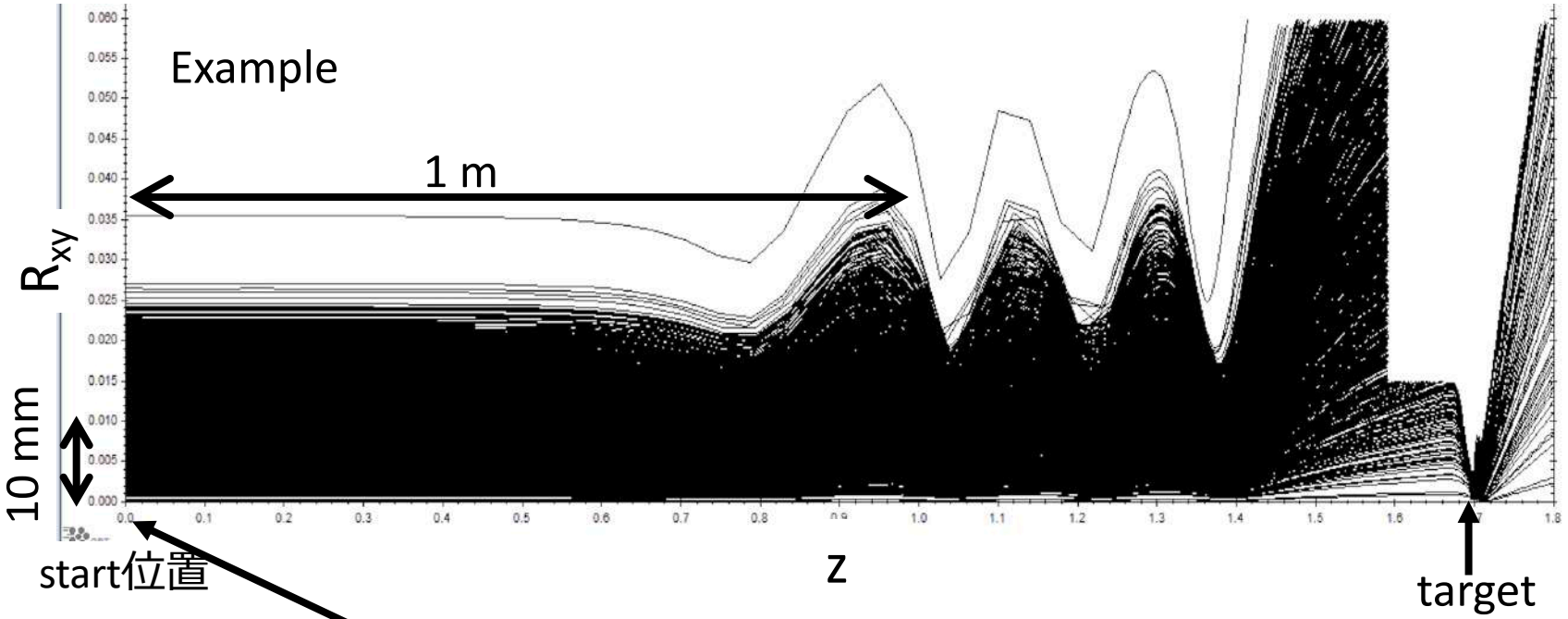


軸上の磁場
@lenscoilに流す電流=0.28 A (470 A･turn)

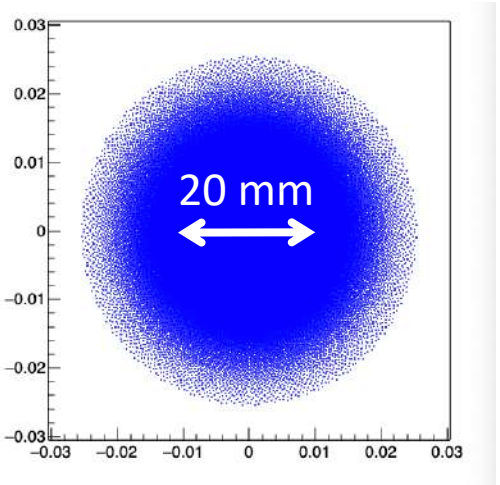
パラメータ (tuned values)

- 初期ビーム径(ϕ20 mm)
- 横方向運動量広がり (120 eV)
- 平均ビームエネルギー (4.9 keV)

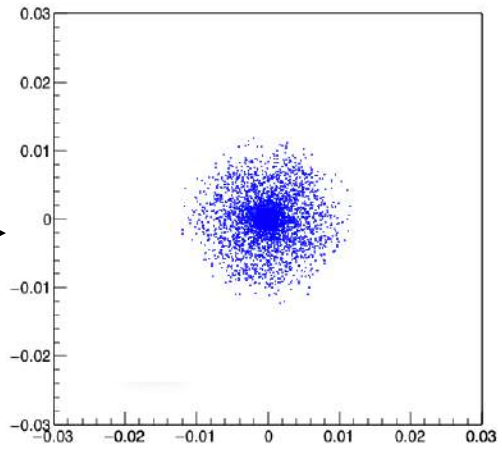
得られた陽電子の軌道とbeam profile



初期ビーム profile (ガウシアンを仮定)

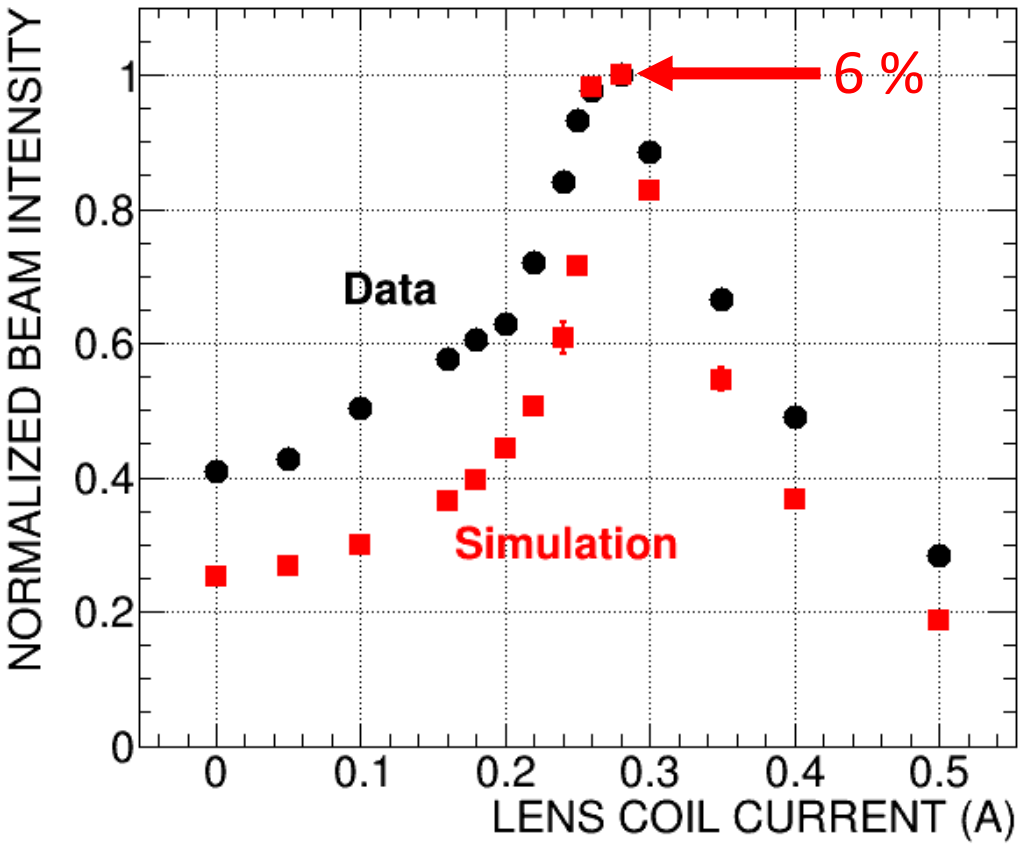


start位置での beam profile



target位置での beam profile

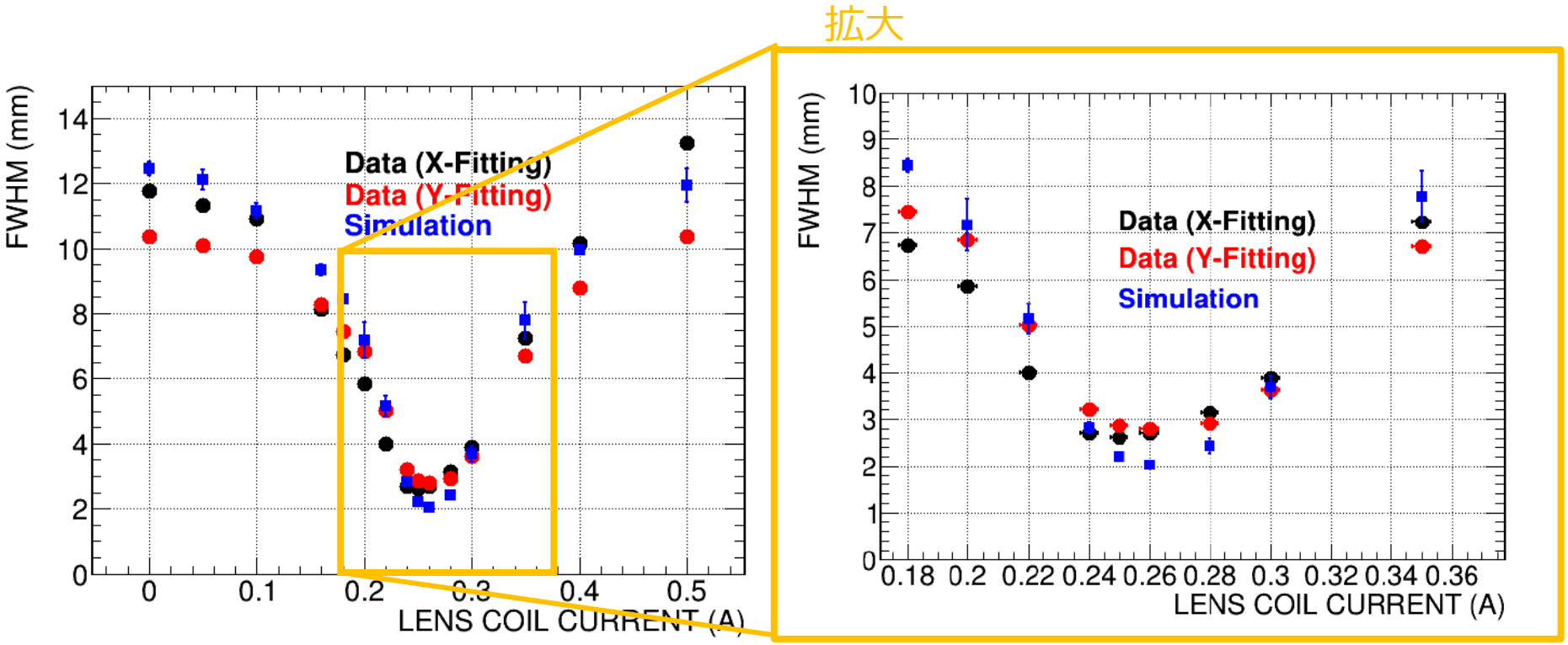
シミュレーションでintensityを概ね再現できた



0.28 Aで規格化

- 0.28 A付近ではデータを概ね再現できた
- シミュレーションによると、初期ビームのうち6%の陽電子しかスクリーン上に到達しないことになる
- このとき、fluxは現在の輝度増強システムで3.5倍になることがわかる(目標は20倍)

ビーム径をシミュレーションで概ね再現できた



- シミュレーションでビーム径を概ね再現できた
- 0.26 A付近でシミュレーションのほうがより集束されている

シミュレーションのまとめ

- シミュレーションで実験結果を概ね再現でき、得られたパラメーターは
  - 初期ビーム径(ϕ20 mm)
  - 横方向運動量広がり (120 eV)
  - 平均ビームエネルギー (4.9 keV)

であった

Summary

- Ps-BECを実現するための陽電子輝度増強システムの開発を行っている.
- KEK-SPFにて、産総研で試作された磁気集束レンズで陽電子集束実験を行った.
- これによりビーム径は2.6 mmに集束された.
- シミュレーションにより概ね実験を再現でき、得られたbeam パラメータは:
  平均 ビームエネルギー= 4.9 keV, 横方向運動量広がり = 120 eV, 初期ビーム径 = 20 mm.
- シミュレーションにより、集束することでbeam fluxは3.5倍になったと分かった(目標は20倍).
- 現在は試作されたレンズを使っているので、より性能の良いレンズを設計する.