

超伝導ウィグラーによる高エネルギー放射光発生実験と陽電子生成

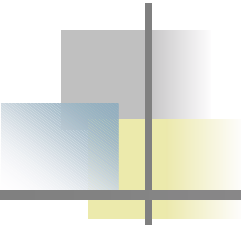
加速器部門 早乙女光一

恵郷博文、大石真也、大島隆、大橋裕二、川島祥孝、熊谷教孝、古寺正彦、
佐伯宏、佐々木茂樹、清水純、小路正純、高雄勝、高嶋武雄、高野史郎、
武部英樹、伊達伸、田中均、谷内友希子、田村和宏、張超、妻木孝治、
中村剛、野田隆、原雅弘、福井達、細田直康、馬込保、正木満博、増田剛正、
松井佐久夫、依田哲彦、米原博人

浅野芳祐、高城徹也

A. Batrakov、N. Mezentsev (Budker INP, Novosibirsk, Russia)

施設管理、周辺技術、安全管理室の方々にもご協力いただきました。



概要

目的

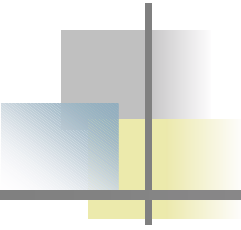
高エネルギー 電子蓄積リング (8GeV) に設置した
高磁場発生装置 (10T 超伝導ウィグラー : S C W) による
高エネルギー放射光 (γ 線、 $\sim$ MeV) の発生

→ 応用として、陽電子の新しい生成法、など

本日の内容

- これまでの経緯。
- 陽電子ビームについて。
- フェルミ面の測定について、少し詳しく。
(測定結果を鑑賞するために必要なおさらいを含めて。)
- ビーム試験について。

- | | |
|-----------|--|
| 1995年～ | SCW製作のための検討、設計、R&D (Budker INP、ロシア) |
| 1999年 | SCW完成 |
| 2000年1月 | SPring-8 に搬入（組立調整実験棟）、励磁試験、磁場測定 |
| 2001年11月～ | 冷却能力改善、設置に向けた検討と真空機器類の製作 |
| 2002年8月 | 蓄積リング5セル直線部に設置 |
| 2002年9月 | <u>1回目のビーム試験</u> (0.1mA)
電子ビームに対する影響を見た。
陽電子の観測を試みたが、うまくいかなかった。
(NaI のダメージ、S/Nの問題など。) |
| 2002年11月 | <u>2回目のビーム試験</u> (max. 0.91mA @ 9.5T)
放射線、熱負荷などの基礎データを取った。
放射光スペクトルを測定した。・・・データ解析中 |
| 2002年12月 | 蓄積リングより撤去、組立調整実験棟に移設。 |



陽電子ビームについて

- 普通の実験室では、ベータ崩壊するRI (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{13}F , ^{22}Na , ...) を使う。出てきた陽電子を減速させて（低速陽電子）使う。
陽電子数は 10^4 個/秒 程度。（がんばって 10^6 個/秒 程度。）
- KEKの低速陽電子実験施設では、電子線型加速器（50MeV、1kW）を使って、 $0.01\text{keV} \sim 60\text{keV}$ の陽電子ビームを作れる。
陽電子数は 最大で 10^8 個/秒。
（H15年度より本格的な共同利用開始予定とのこと。）
- 現在までの記録は 5×10^8 個/秒 らしい。（オランダの原子炉で。）
- ちなみに、SPring-8 蓄積リングで 1mA 蓄積したときの電子数は 3×10^{10} 個。
- 国内のユーザー組織としては「陽電子科学研究会」があり、150 名ほどが所属している。（事務局：東大兵頭研）

陽電子

- すべての素粒子には、対応する反粒子が存在する。

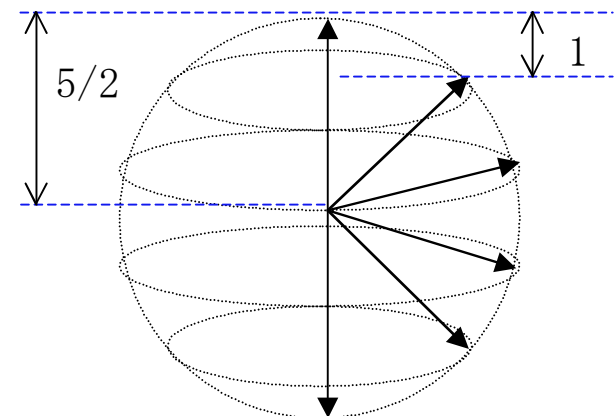
電子の反粒子は陽電子、光子の反粒子は光子自身、など。

- 陽電子の質量は電子と同じ： $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ ($\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$)
- 陽電子の電荷は正で、電子と反対： $+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- 電子、陽電子ともにスピンの自由度を持つ： $s = 1/2$
→ スピンの状態は $2s + 1 = 2$ 通り (up, down)

- スピンが半奇数 ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) の粒子
= フェルミ粒子またはフェルミオン
スピンが負でない整数 ($0, 1, 2, \dots$) の粒子
= ボース粒子またはボソン

→ 電子、陽電子ともにフェルミ粒子。

(参考) 例えば $s = 5/2$ の粒子
のスピンの状態



陽電子（つづき）

- 陽電子が物質中で電子と衝突すると、**対消滅**が起き、複数個の光子に変換する。

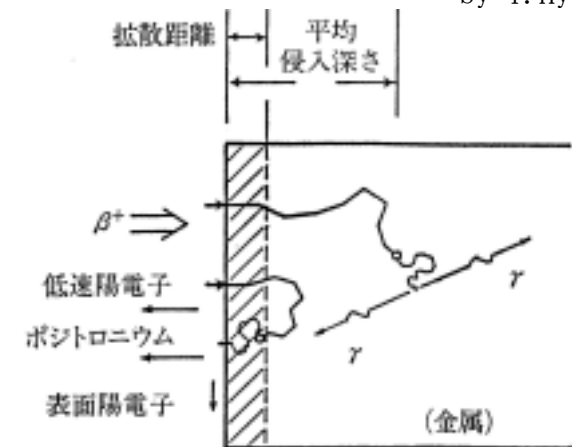
→ **ほとんどが2光子消滅**する。3光子消滅は、およそ $1/370$ 。

反対に、物質中に入射した光子から電子と陽電子が**対生成**することもある。

- 固体や液体に入射した陽電子は、電子と対消滅する前にエネルギーを失って、周囲との**熱平衡に達する**。これは、電子散乱やフォノン励起の確率のほうが、対消滅の確率より大きいため。典型的な浸入深さは 0.1mm のオーダー。

by T. Hyodo

- 表面付近で熱化したものは、消滅するまでの時間内に拡散して、再び表面にもどる確率が高い。その割合は、おおよそ 拡散距離／平均浸入距離 $\sim 10^{-4}$ 程度。



- 多くの金属では、熱化して表面にもどった陽電子は**再放出**される。ただし、一部は金属中の電子と束縛状態を作りポジトロニウムとして再放出される。また一部は、表面のポテンシャル井戸にトラップされる。

陽電子ビームでできること

2 光子角相関測定

- 陽電子は正電荷を持つので、イオン殻から離れようとする。
→ 最外殻電子（伝導電子や荷電子）と最もよく消滅する。
→ フェルミ面の研究に適する。

熱化した陽電子の運動量は、金属中の伝導電子の運動量に比べて無視できるほど小さい。

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2 \text{ (右図)}$$

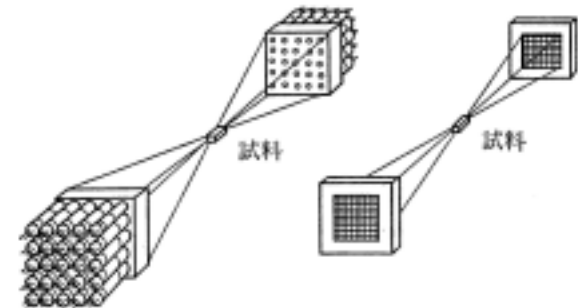
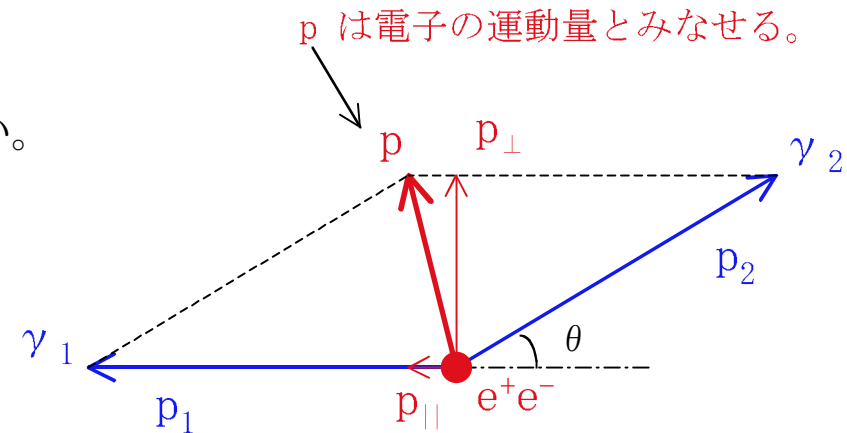
エネルギー・運動量の保存から

$$p_{\perp} = mc \theta \quad (mc = 0.511\text{MeV}/c)$$

→ 角度 θ の測定で、電子の運動量の情報が得られる。

また、 γ 線のエネルギーがドップラー効果によって 0.511MeV からずれる：

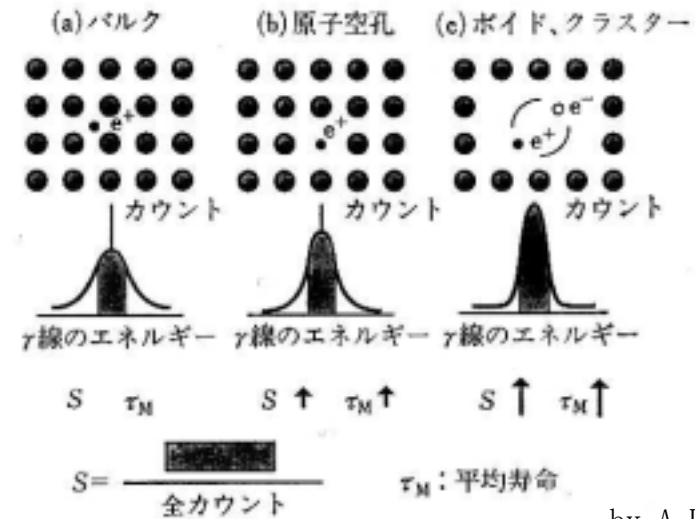
$$p_2 = mc - p_{\parallel}/2 \rightarrow \text{ドップラー拡がり測定}$$



陽電子ビームでできること（つづき）

ドップラー広がり測定

γ 線のエネルギースペクトルから
電子の運動量分布を測定する。

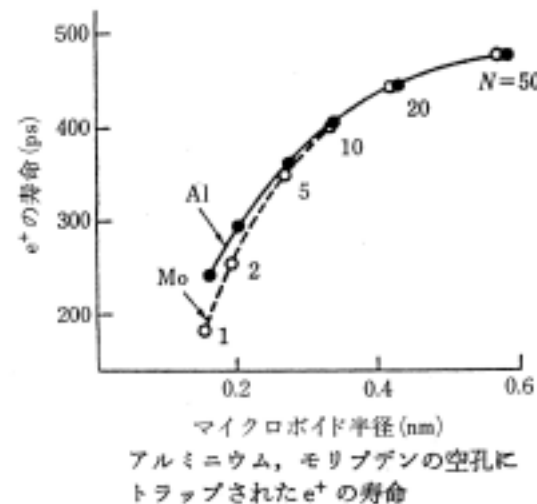


by A. Uedono

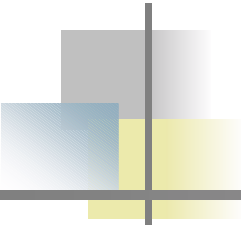
陽電子寿命測定

陽電子は正電荷を持つので、正電荷イオンが抜けた原子空孔型の格子欠陥にトラップされやすい。

トラップされた場所では、電子密度が低いので、陽電子の寿命が延びる。



by Y. Ujihira



陽電子ビームでできること（つづき）

陽電子顕微鏡

透過型：電子に比べて透過能が高い（イオン殻を避けて進む）ので、厚い試料が使える。

→ 初期の実験例が1例あるのみ。

再放出型：試料表面から再放出された陽電子を観測する。表面の原子空孔型欠陥にはトラップされて再放出されないので、欠陥の観察ができる。

→ 試験的には成功しているが、分解能が良くない。

走査型：スポット状の陽電子ビームを走査しながら、再放出された陽電子を観測する。

（分解能の限界は欠陥への捕獲距離で決まる：1 μm 程度。）

→ 現状？（稼働しているものがあるらしい。）

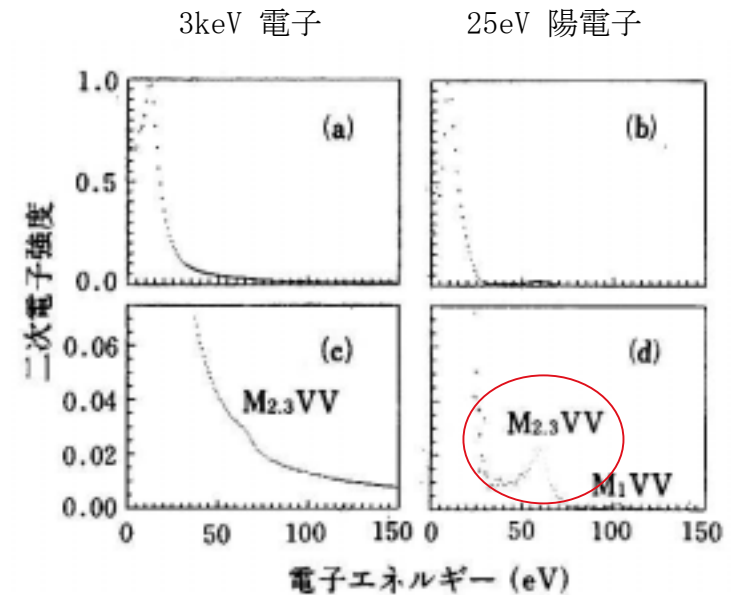
陽電子ビームでできること (つづき)

陽電子によるイオン化

固体中の内殻電子と対消滅

- 蛍光X線やオージェ電子の放出
- バックグラウンドの少ないオージェ電子スペクトルが得られる。

Cu (100) 面 by A.Weiss (1991)



陽電子断層撮影 (PET: Positron Emission Tomography)

放射性薬剤 (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F , ...) の投与。

- 陽電子の消滅で2本の γ 線が発生。
- 高速応答のシンチレータで同時計測して場所を特定。

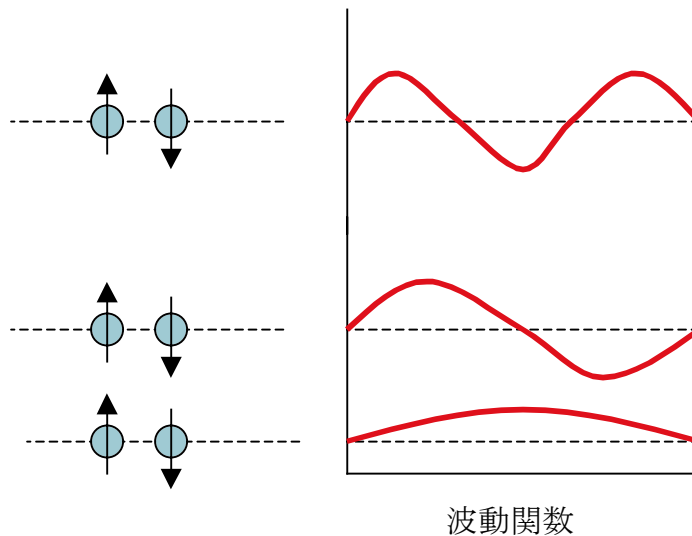
おさらい：フェルミエネルギー

電子は、パウリの排他原理に従う：

2つの同等なフェルミ粒子は、同じ量子状態を占めることはできない。

自由電子フェルミ気体・・・金属の性質を理解するためのモデル。

原子に最も弱く結びついた電子（伝導電子）は、金属の中を自由に動く。



電子は飛び飛びのエネルギー準位に、一番低いところから詰まっていく。

一番高いところがフェルミエネルギー。

$E_F = p_F^2/2m$ ：フェルミエネルギー

$p_F = \hbar k_F$ ：フェルミ運動量

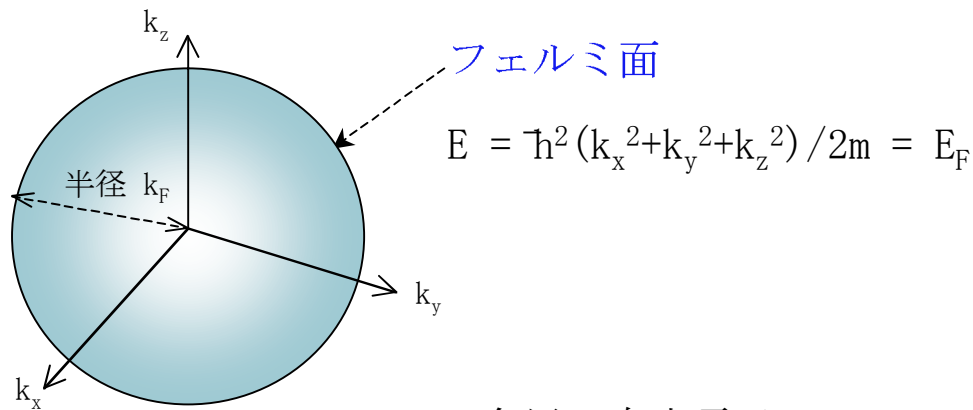
$k_F = (3\pi^2 N/V)^{1/3}$ ：フェルミ波数

N/V ：電子密度

$\hbar = h/2\pi$ 、 h ：プランク定数

おさらい：自由電子のフェルミ面

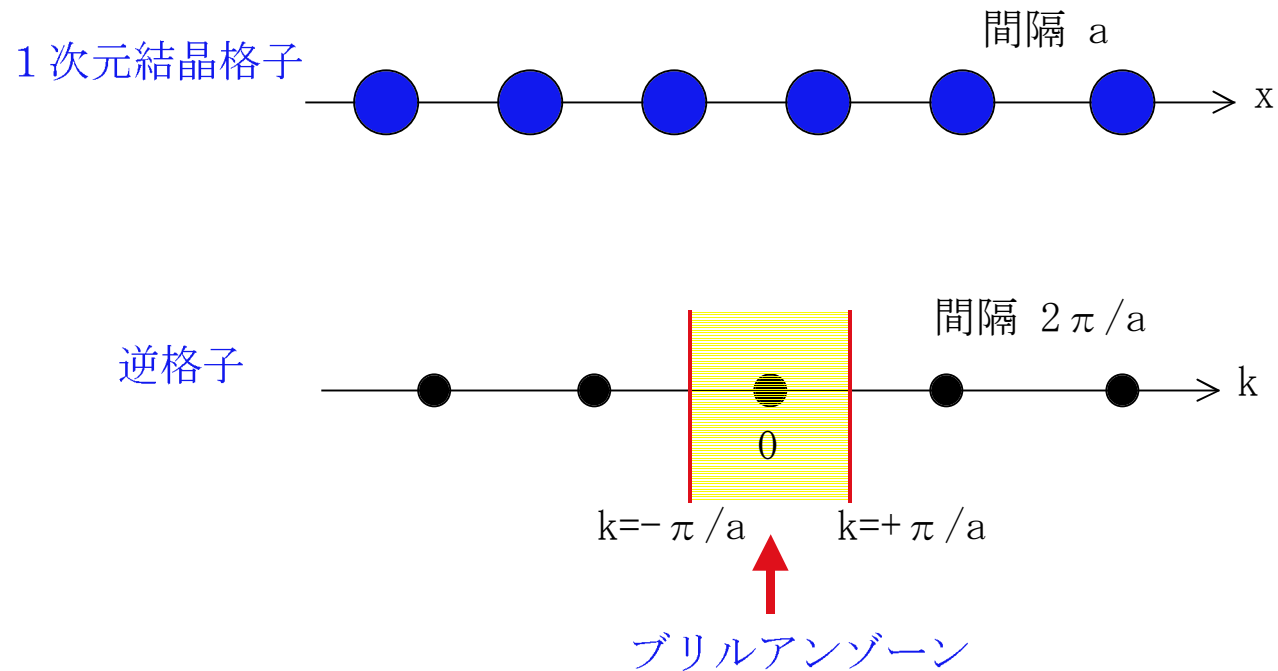
フェルミ面：波数 $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ の空間で、一定のエネルギー E_F を持つ面。



金属の自由電子フェルミ面のパラメータ（計算値）

金属	電子密度 [cm^{-3}]	波数 k_F [cm^{-1}]	速さ v_F [cm/s]	エネルギー E_F [eV]
Li	4.70×10^{22}	1.11×10^8	1.29×10^8	4.72
Na	2.65	0.92	1.07	3.23
K	1.40	0.75	0.86	2.12
Cu	8.45	1.36	1.57	7.00
Au	5.90	1.20	1.39	5.51

おさらい：結晶格子と逆格子

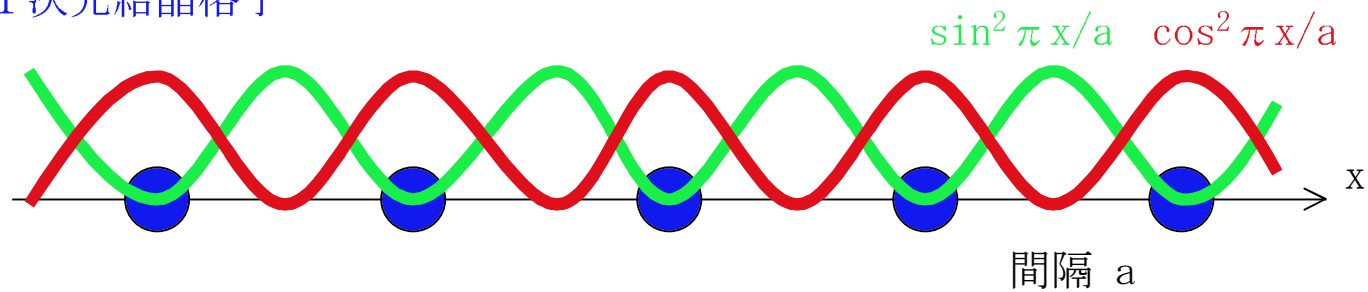


ブリルアンゾーンの境界での波数は $k = \pm\pi/a$

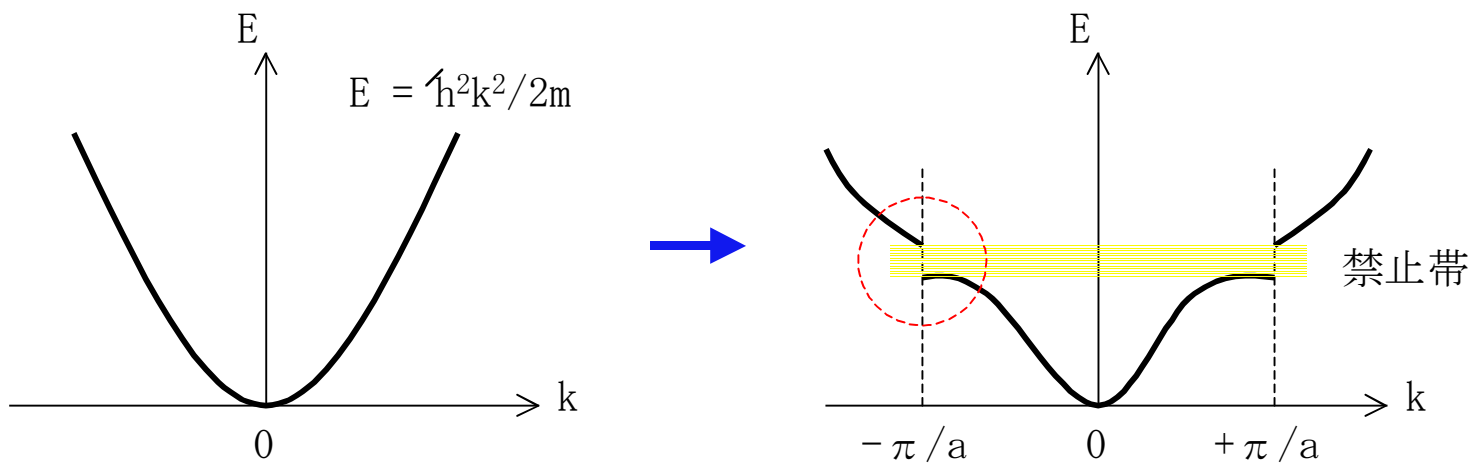
- 波長 $\lambda = 2\pi/|k| = 2a$
- ブラッグ反射を起こす。（ブラッグ条件： $2a \sin \theta = \lambda$ 、 $\theta = \pm\pi/2$ ）
- この波数の電子の運動（波動関数）は、進行波でなく、定存波で記述される。
- イオン殻の影響で、エネルギーギャップが生まれる。

おさらい：エネルギーギャップ

1次元結晶格子



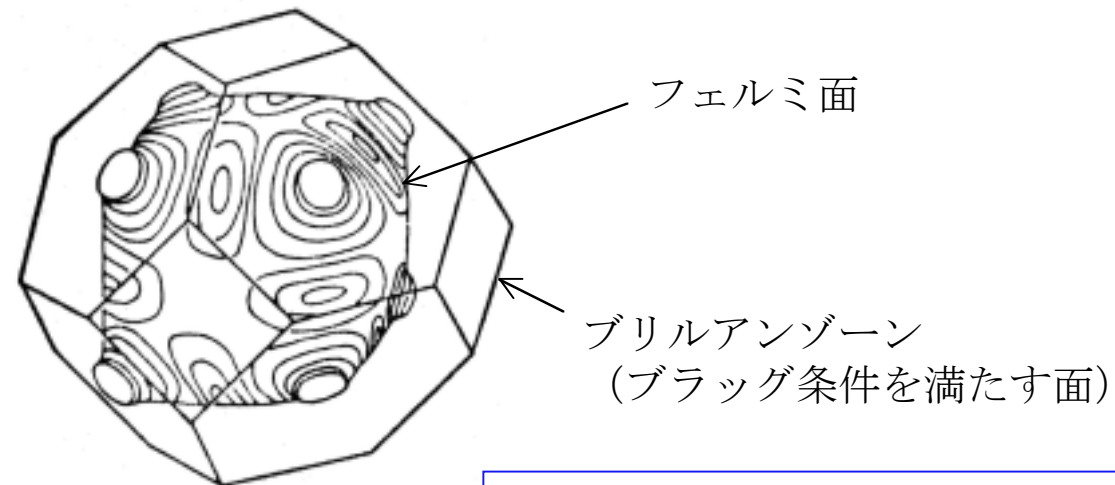
ブリルアンゾーン境界 ($k = \pm \pi/a$) で、2つのモードにポテンシャルエネルギーの差ができる。 → エネルギーギャップ



おさらい：銅のフェルミ面

銅の自由電子フェルミ球は、ブリルアンゾーン内に収まる。

しかし、実際にはゾーンの境界でエネルギーが下がり、**ネック（首）**が伸びる。

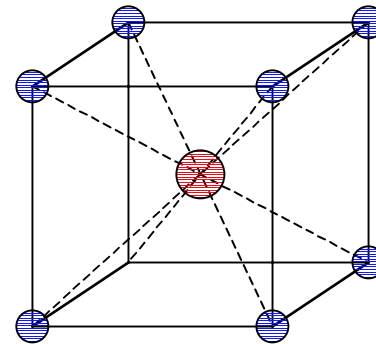


3次元の逆格子空間で、ある点（原点）とまわりの全ての点を線で結び、この線を垂直に2等分する平面を描く。これらの平面で囲まれる最小の領域が、第1ブリルアンゾーン。

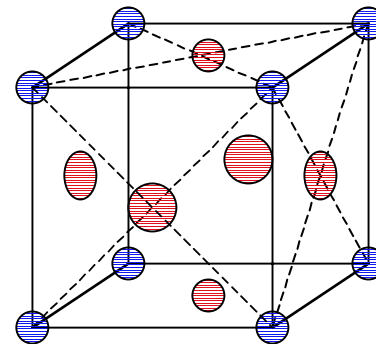
（1次元結晶格子の場合と同じ操作。）

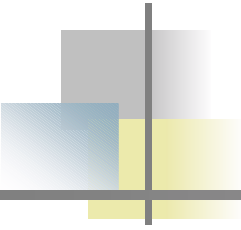
おさらい：格子形 (bcc と fcc)

bcc (body-centred cubic) : 体心立方



fcc (face-centred cubic) : 面心立方





陽電子によるフェルミ面測定の実例

“ Fermi Surface of Nanocrystalline Embedded Particles in Materials: bcc Cu in Fe ”
Y. Nagai, et.al., PRL **87** (2001) 176402

バルクな銅は fcc 構造を持つが、bcc 構造を持つ鉄の中に埋め込まれると、bcc 構造を示す。このときのフェルミ面を 2次元角相関法で測定した。

2D-ACAR: Two-Dimensional Angular Correlation of Annihilation Radiation
NCEP: Nanocrystalline Embedded Particles

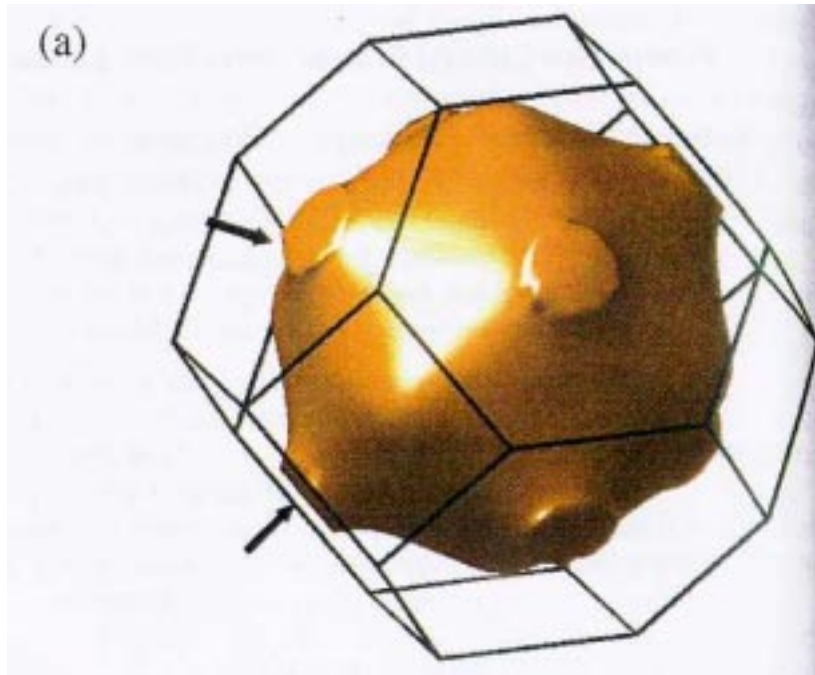
陽電子ビームは NCEP (= 埋め込まれた銅) の電子と選択的に消滅する。
→ バックグラウンドとなるホスト (= 鉄) からの情報が少ない。
→ NCEP のフェルミ面の測定が、高感度で行える。

試料: 高純度の鉄(4N)と銅(5N) → “arc melting” → Fe-1.0wt% Cu
→ “cold rolled to 0.3mm in thickness”
→ “heated to 825°C and kept for 4h”
→ “quenching into iced water”
→ “aged at 550°C for 0.1h”

陽電子によるフェルミ面測定の例（つづき）

バルクな銅(fcc)のフェルミ面

計算



実験：左図を上から射影して見た。

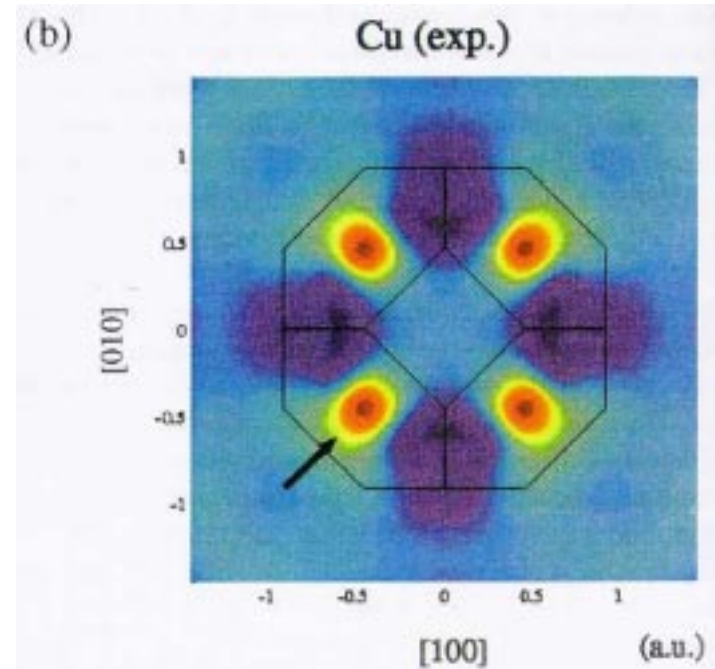


FIG. 2 (color). 3D plots of (a) the FS of bulk Cu (fcc structure) calculated by FLAPW calculations and (b) anisotropy of experimental 2D-ACAR projected along the [100] direction. The four peaks in the plot of the anisotropy correspond to the eight necks at the center of the $\{111\}$ Brillouin zone boundaries (L point); the marked peak (arrow) in (b) arises from the two necks (arrows) in (a). The color scale is determined so that dark red and dark blue are assigned to the top of the peaks and the bottom of the valleys, respectively.

陽電子によるフェルミ面測定の例（つづき）

バルクな鉄(bcc)と、銅 1% を含む鉄のフェルミ面

いずれも実験

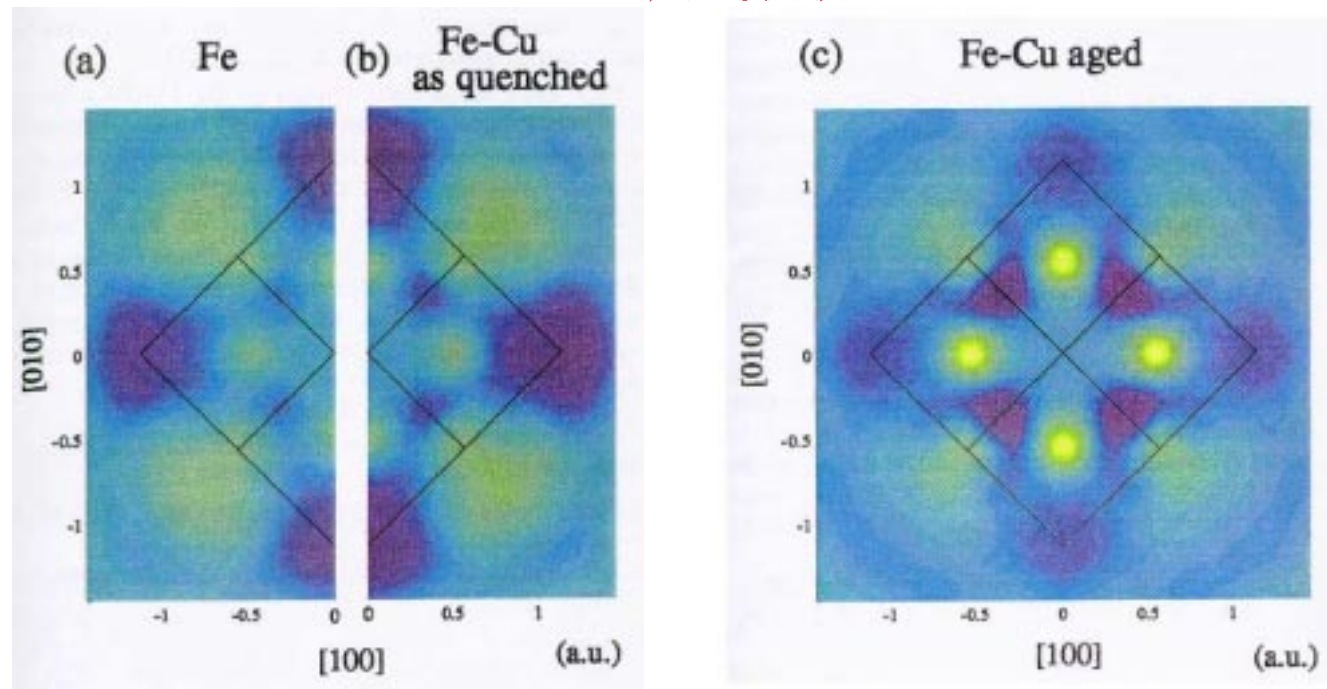


FIG. 3 (color). 3D plots of anisotropies of experimental 2D-ACAR projected along the [100] direction for (a) bulk Fe (bcc structure), (b) Fe-1.0 wt% Cu as quenched, and (c) Fe-1.0 wt% Cu aged at 550 °C for 0.1 h. The color scales are common to that of Fig. 2(b).

陽電子によるフェルミ面測定の例（つづき）

前ページ(a)と(c)の差 : bcc Cu のフェルミ面

実験

計算

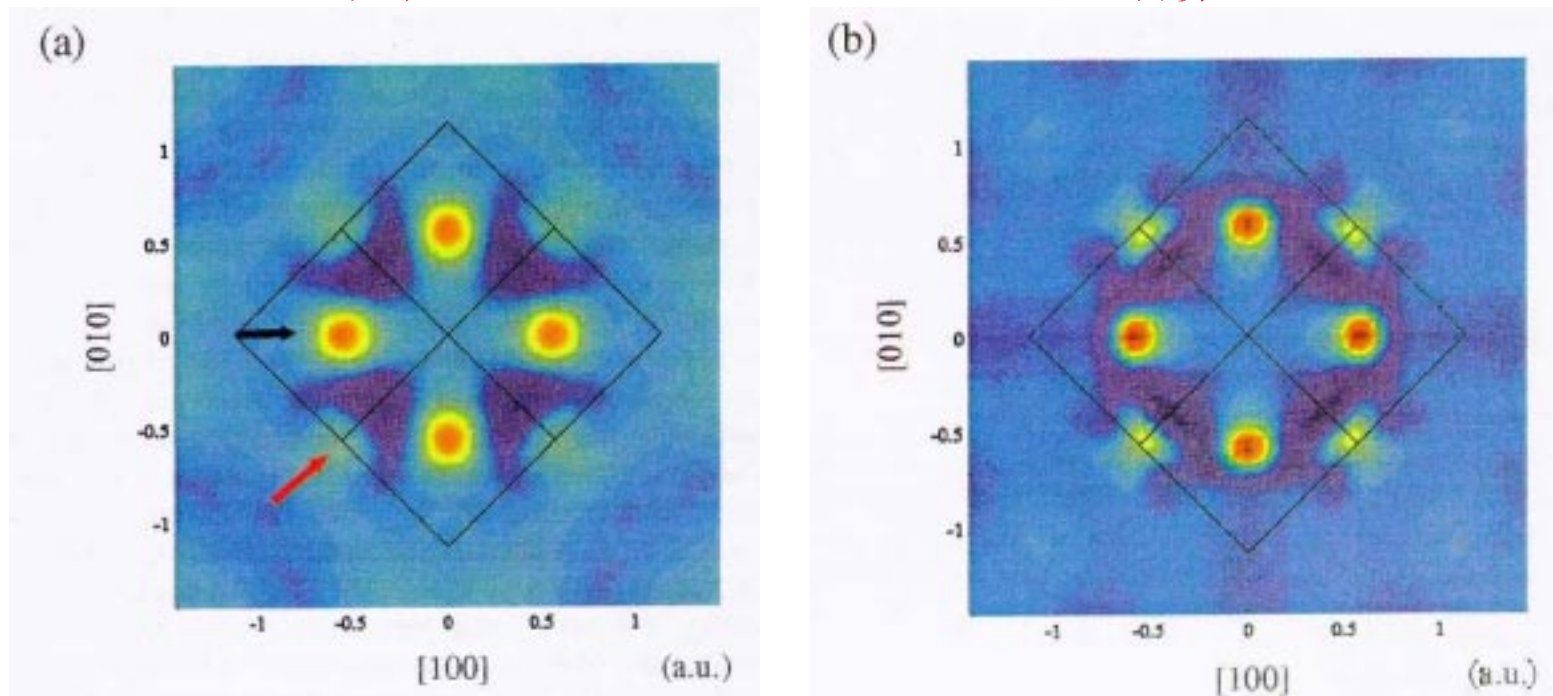
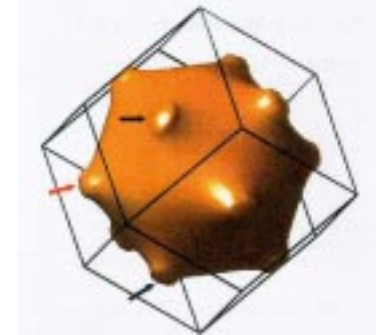
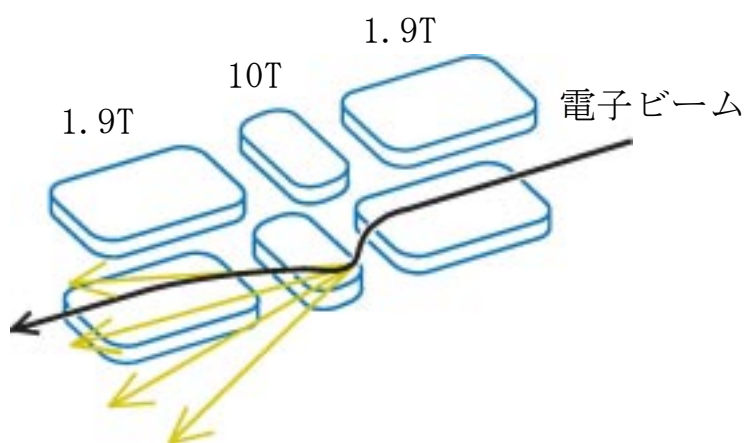


FIG. 4 (color). 3D plots of anisotropies of 2D-ACAR projected along the [100] direction for bcc Cu: (a) experimentally extracted and (b) calculated. The color scales are common to that of Fig. 2(b). The anisotropies have two kinds of peaks: one (black arrow) arises from the two necks marked by black arrows in Fig. 1 and the other (red arrow) arises from the neck marked by a red arrow in Fig. 1.



ビーム試験：超伝導ウィグラー



水平 $\sim \pm 25 \text{ mrad}$
垂直 $\sim \pm 25 \mu \text{ rad}$ for $1 \text{ MeV } \gamma$

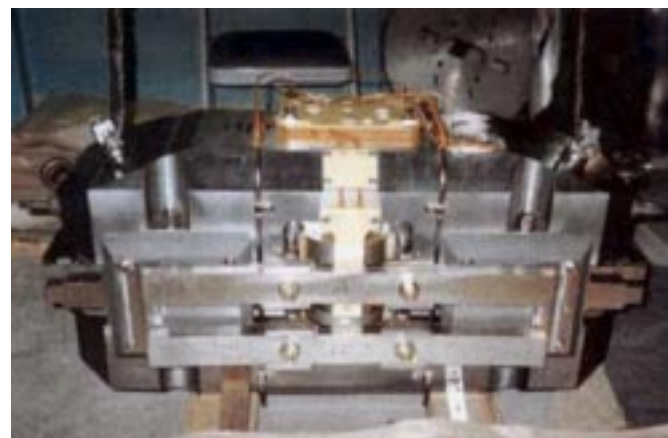


Critical Photon Energy

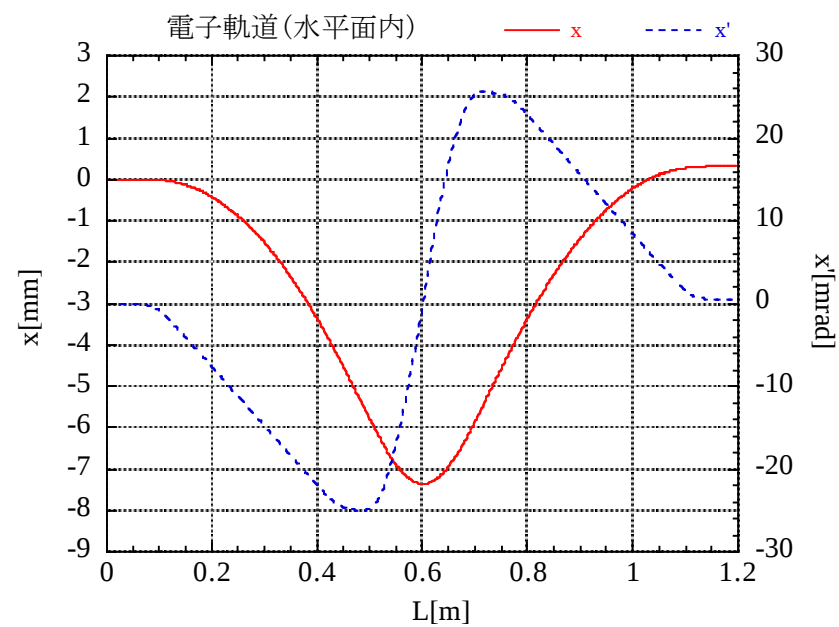
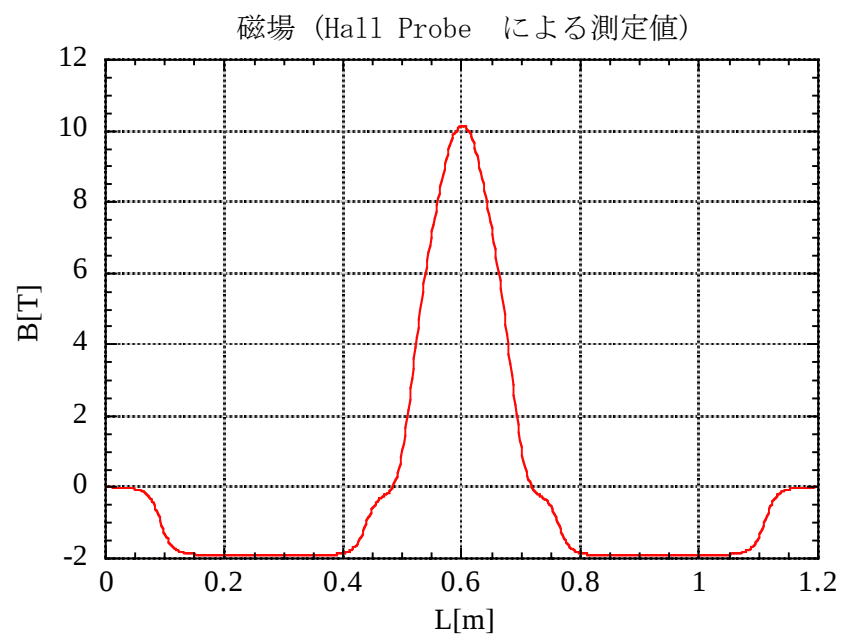
$$E_c = 3\hbar c / (2 (mc^2)^3) \times E^3 / \rho$$
$$= 0.43 \text{ MeV}$$

for $E=8 \text{ GeV}$, $B=10 \text{ T}$

パワーは $\nu_c = E_c/h$ 付近の
周波数域に放射される。



ビーム試験：磁場と電子軌道



ビーム試験：蓄積リング 5セル直線部に設置（2002年8月）

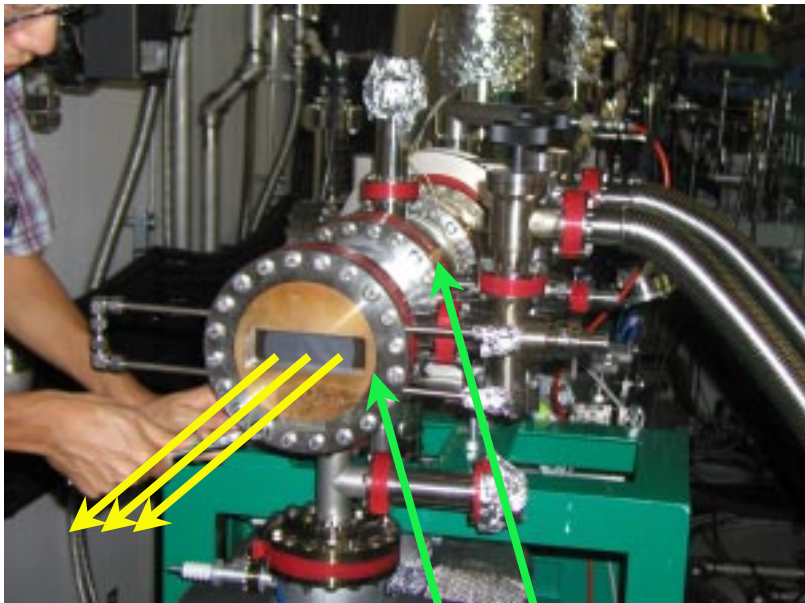
設置前



設置後



ビーム試験：放射光取り出し窓（2重窓）



Be 0.25mm厚

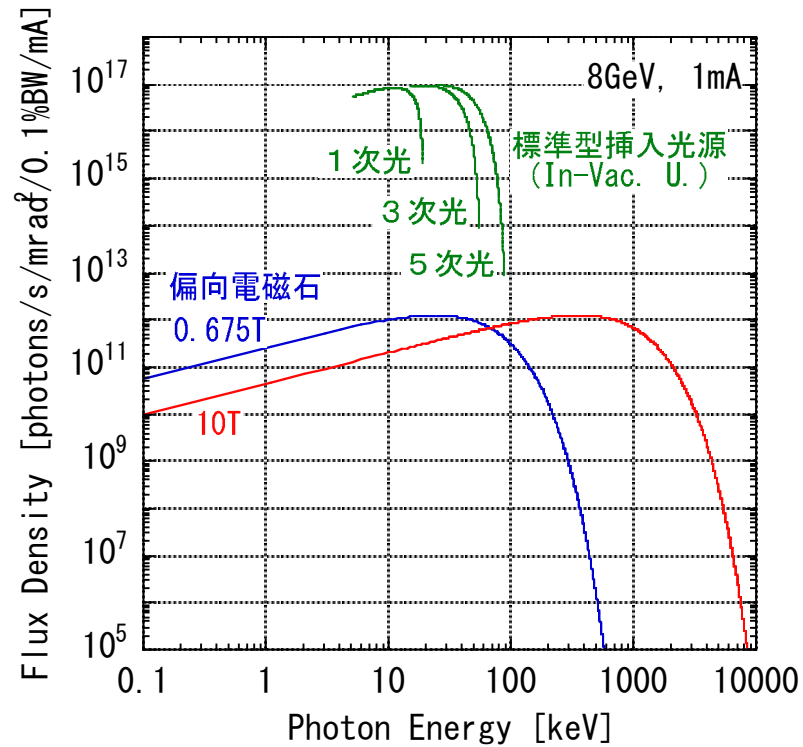
Al 3mm厚

鉛遮蔽

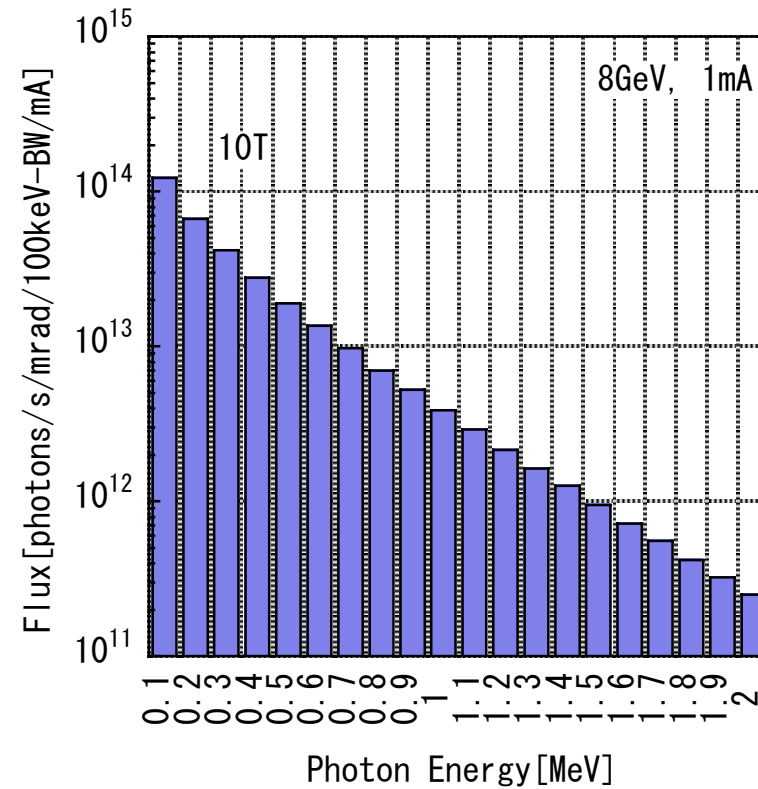


ビーム試験：10T 磁場で発生する放射光（ γ 線）のフラックス

フラックス密度の比較

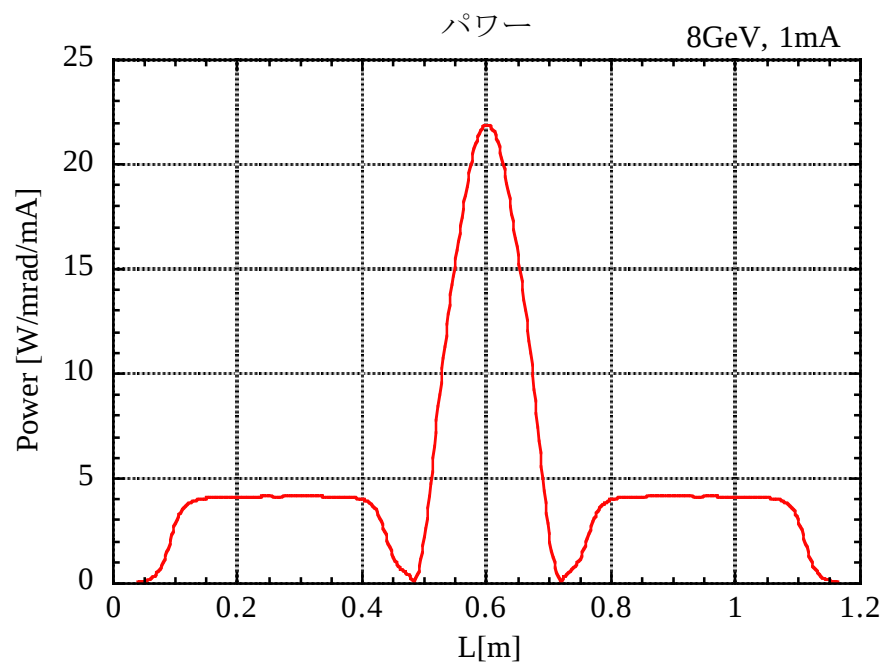


フラックス

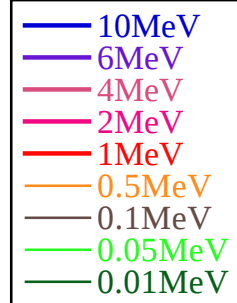
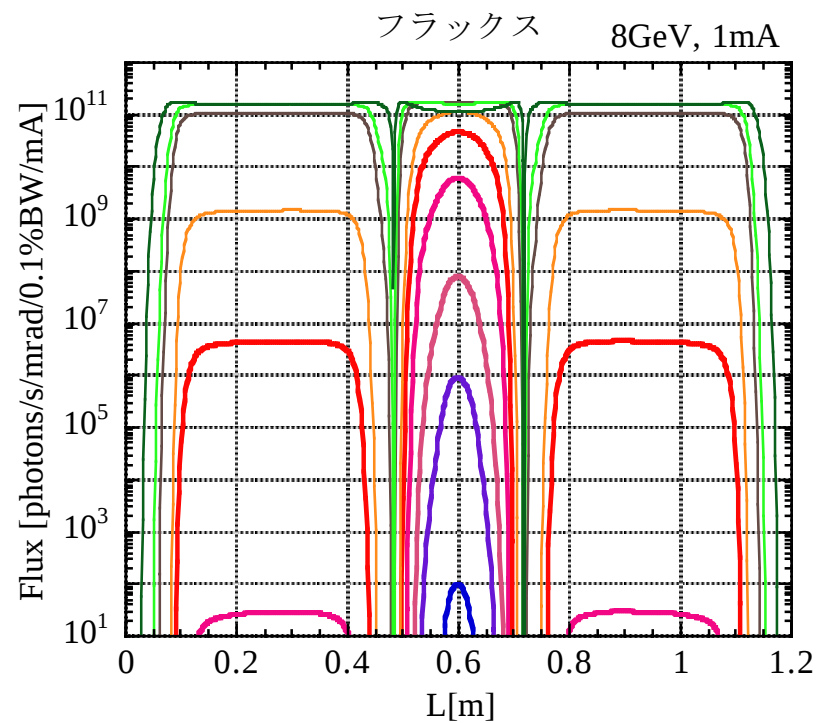


1MeV 以上の photon 数
= 1.5×10^{13} /s/mrad/mA

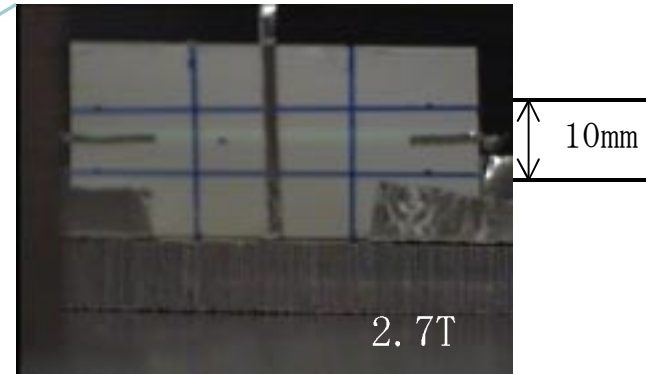
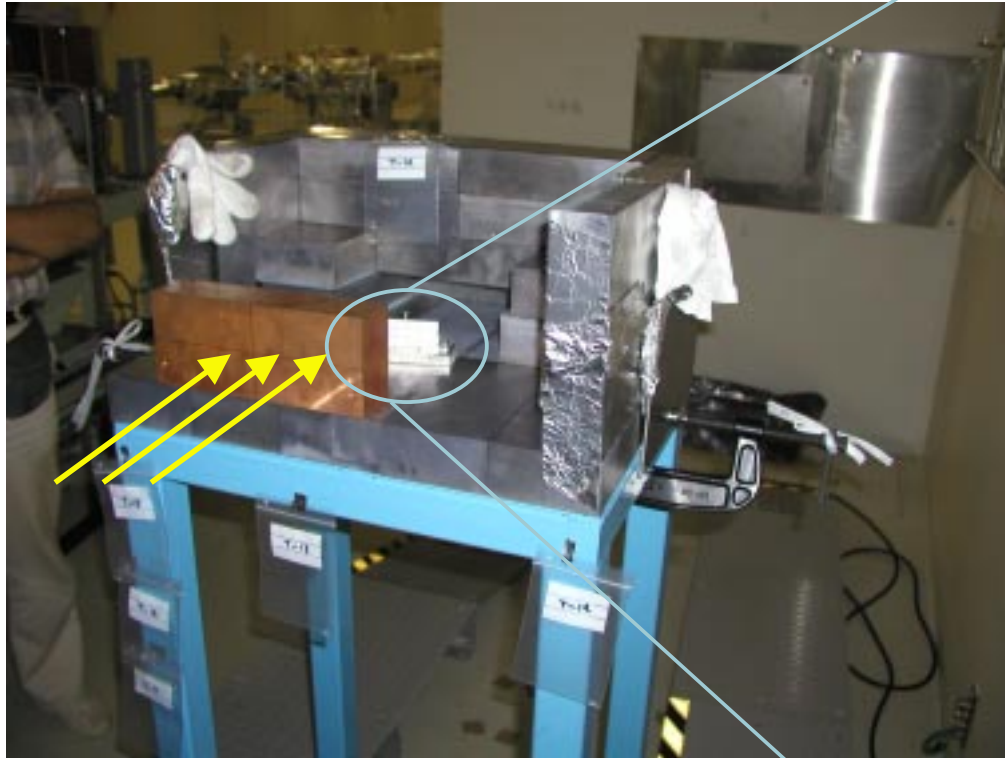
ビーム試験：放射パワーとフラックスの分布



Total: 1kW/mA



ビーム試験：発生した放射光



ビーム試験：アルミ窓による陽電子生成量の見積もり（計算）

磁場：10T

窓：Al 3mm

（発光点から 26.2m 下流）

放射光に対するアパーチャー：

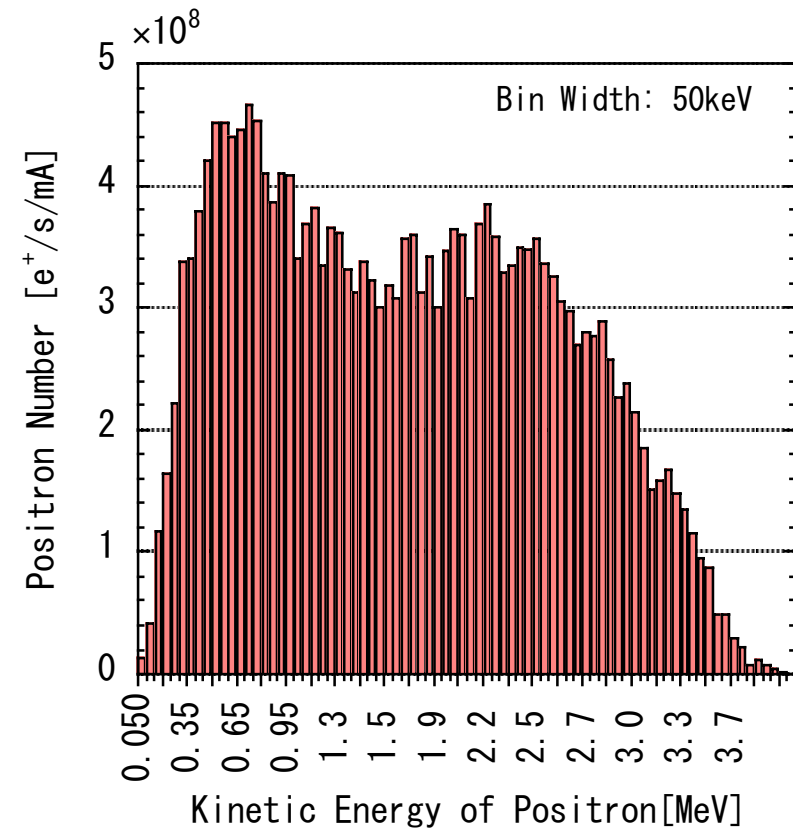
2.38mrad

$$\frac{\text{生成}e^+}{\text{入射}\gamma} = 7.1 \times 10^{-4} \text{ (計算)}$$

$$\frac{\text{放出}e^+}{\text{入射}\gamma} = 4.4 \times 10^{-4} \text{ (計算)}$$

→ 放出される陽電子数：

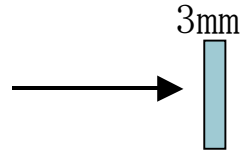
$$1.6 \times 10^{10} \text{ /s/mA (計算)}$$



今回のセットアップは、陽電子生成用に最適化されているわけではない。

ビーム試験：陽電子の収量を増やすには…（計算）

アルミ窓：



$$\text{放出}e^+/\text{入射}\gamma = 4.4 \times 10^{-4}$$

鉛プレート：



$$\text{放出}e^+/\text{入射}\gamma = 6.3 \times 10^{-4} \quad (t=2.0\text{mm})$$

$$= 1.3 \times 10^{-3} \quad (t=1.0\text{mm})$$

$$= 3.3 \times 10^{-3} \quad (t=0.5\text{mm})$$

薄過ぎると照射領域で損。そこで…

プレートを傾ける。



$$\text{放出}e^+/\text{入射}\gamma = 1.0 \times 10^{-2} \\ (t=0.1\text{mm}, 5\text{mrad})$$

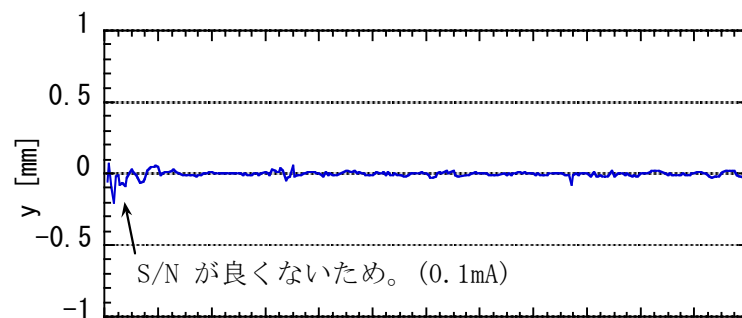
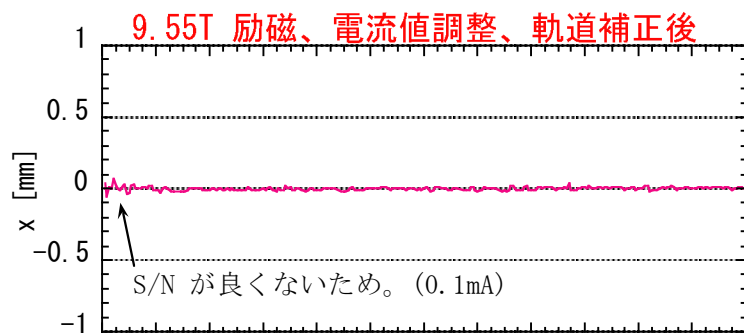
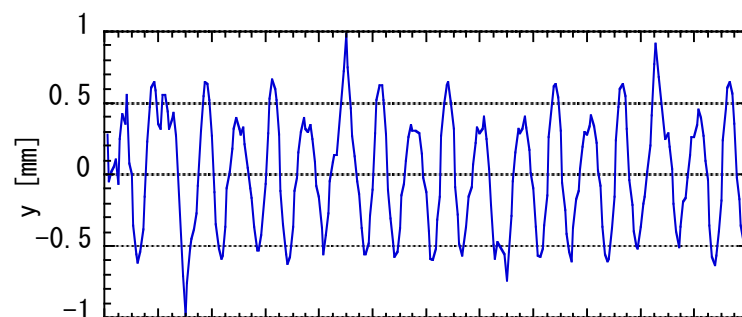
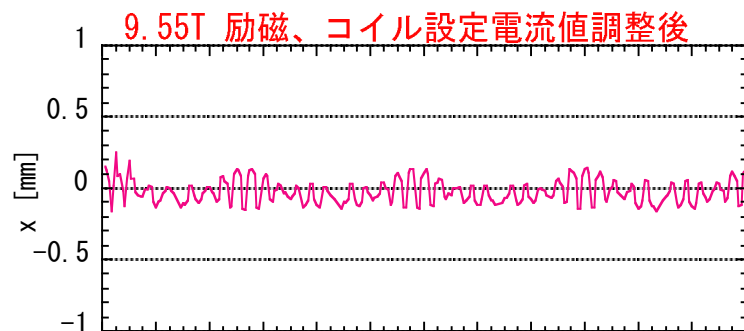
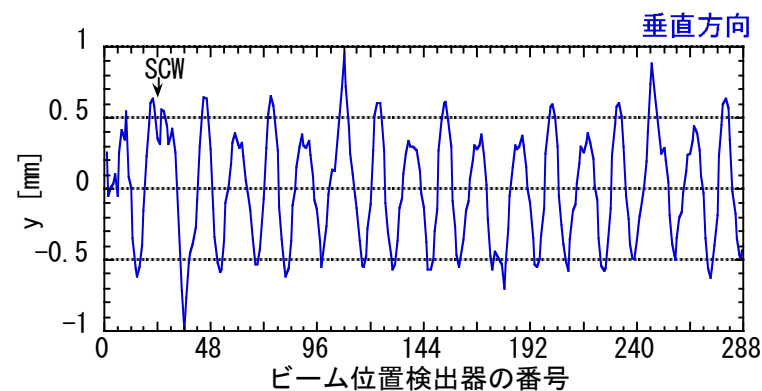
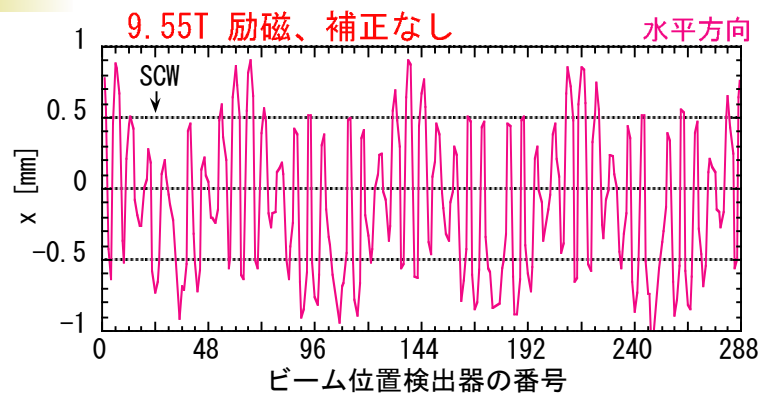
ただし、奥行きが大。

1MeV 以上の photon 数 $1.5 \times 10^{13}/\text{s/mrad/mA}$ を単純にかけると

$$\text{放出}e^+ = 1.5 \times 10^{11}/\text{s/mrad/mA}$$

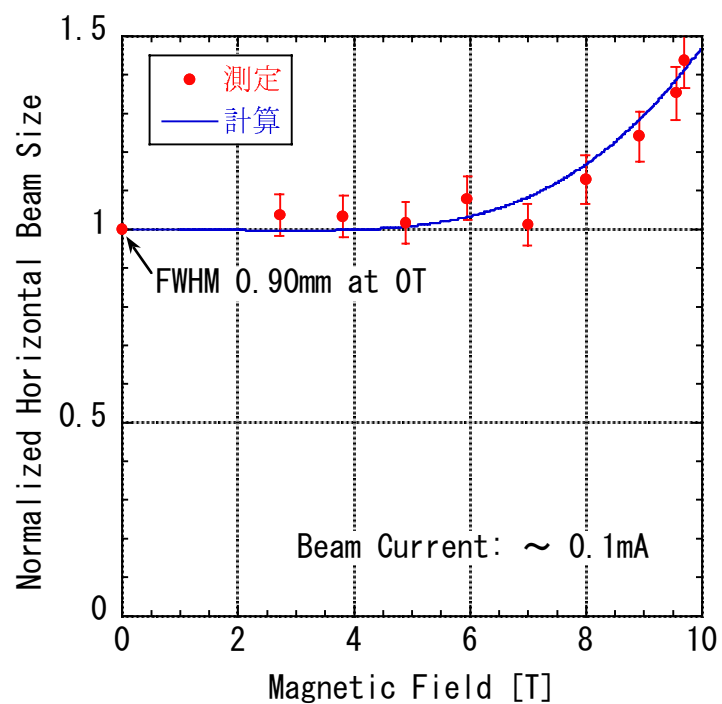
低速化で 10^{-4} 倍になったとしても $1.5 \times 10^7/\text{s/mrad/mA}$

電子ビームへの影響：誤差磁場による軌道の歪みとその補正

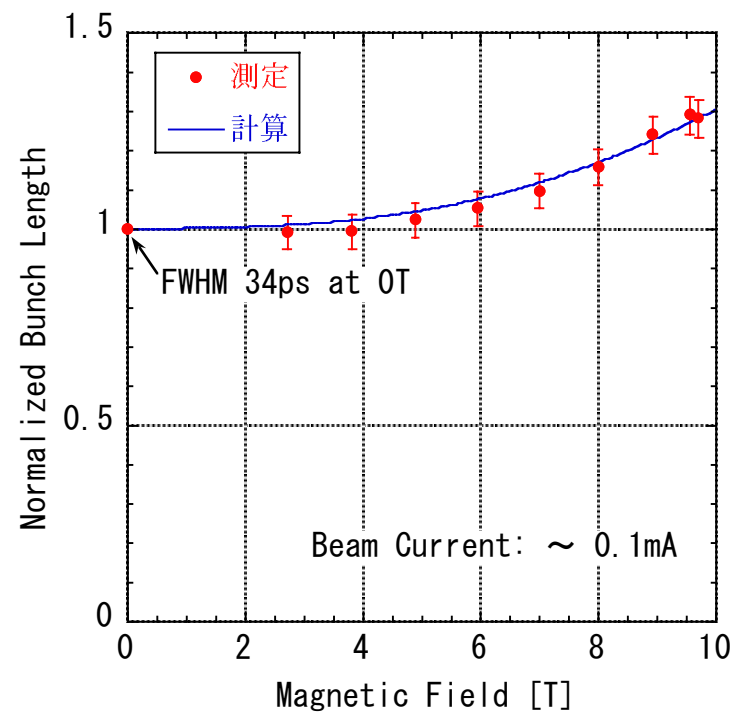


電子ビームへの影響：ビームサイズの変化

水平サイズ（入射部）

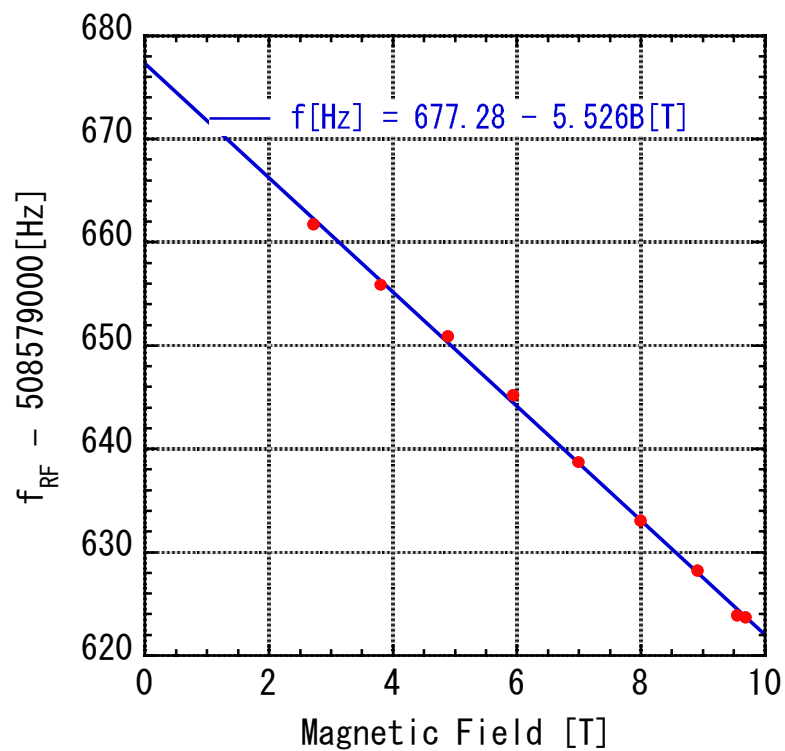


バンチ長

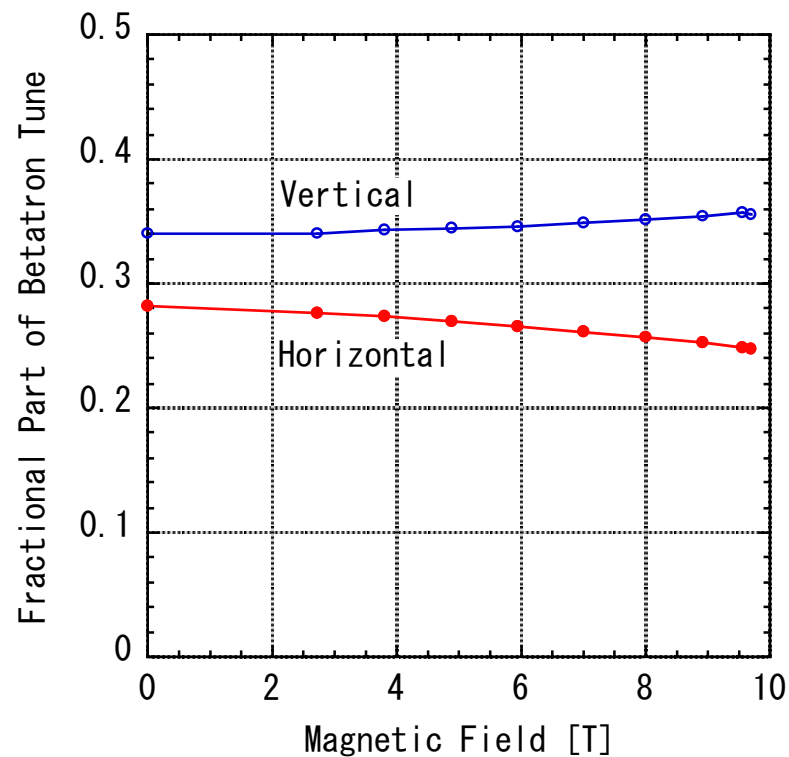


電子ビームへの影響：周長（RF加速周波数）とベータトロンチューン

周長



ベータトロンチューン

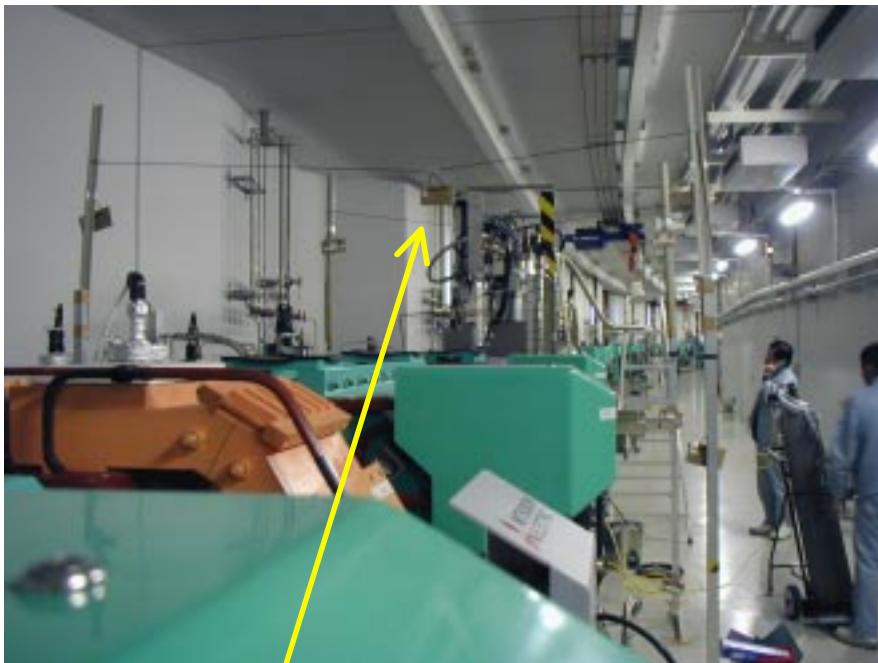


$$\Delta B = 10\text{T}$$

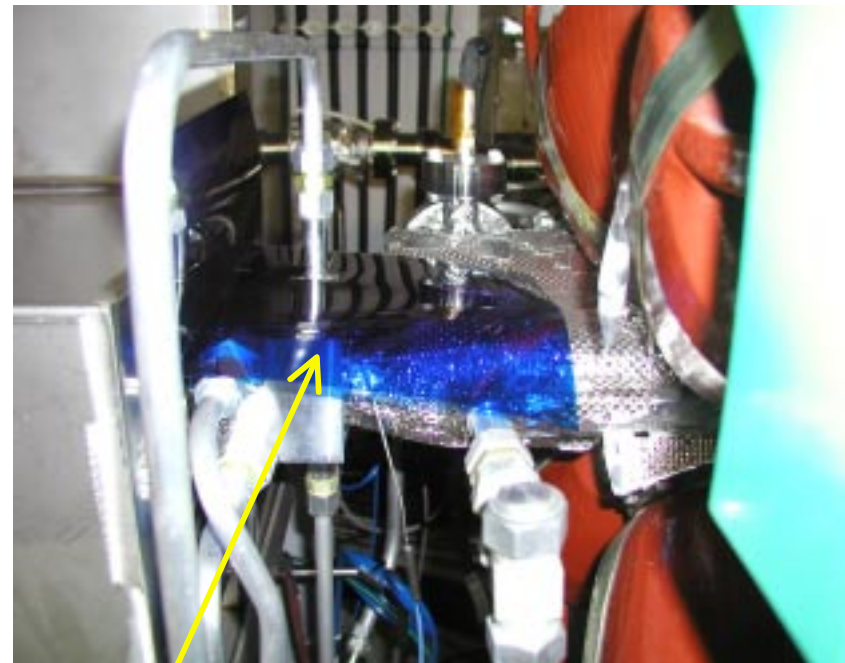
$$\rightarrow \Delta f_{\text{RF}} = -55\text{Hz}$$

$$\rightarrow \Delta L = +0.155\text{mm}$$

放射線量測定



TLD による測定



ガフクロミックによる測定

アブソーバ付近
 10^4Gy 以上 (0.9mAで約1時間)



宣伝：SCWミニワークショップ（3月24～25日、講堂） 仮プログラム

*** 陽電子利用 ***

陽電子ビームによるSi中イオン注入欠陥の研究：赤羽隆史（物質・材料研究機構）

Possible Experiments on Electron Positron Plasma：遠藤一太（広大）

非中性陽電子プラズマの形成とその応用：大島永康（東大）

陽電子ビームによる表面物性研究：河裾厚男（原研・高崎）

KEK 陽電子施設の紹介とSPring-8 への期待：栗原俊一（KEK）

気体および表面による陽電子散乱：末岡修（山口大）

産総研における高強度低速陽電子ビームの発生と利用：鈴木良一（産業技術総合研究所）

高分子材料への陽電子と放射光の利用：田川精一（阪大）

陽電子衝撃による内殻電子イオン化断面積：長嶋泰之（東大）

高エネルギー放射光からの陽電子発生に期待する：兵頭俊夫（東大）

陽電子励起脱離法の開発：藤浪真紀（東大）

Accumulation of e-p pairs as a possibility of laboratory studies of the astrophysical environments and of making an annihilation gamma-ray lasers：L.Tsintsadze（広大）

*** 高エネルギー放射光利用 ***

超伝導ウイグラー放射光による核反応研究の可能性について：宇都宮弘章（甲南大）

コンプトン散乱実験への応用：坂井信彦（姫工大）

1MeV領域 γ 線による ^{176}Lu 、 ^{180}Ta 核異性体の光核反応実験の提案：静間俊行（原研・光量子）

パリティ非保存実験について：藤原守（阪大RCNP）