

Unity Physics Training

Magnetic Field Effects on the MV Dose Distribution

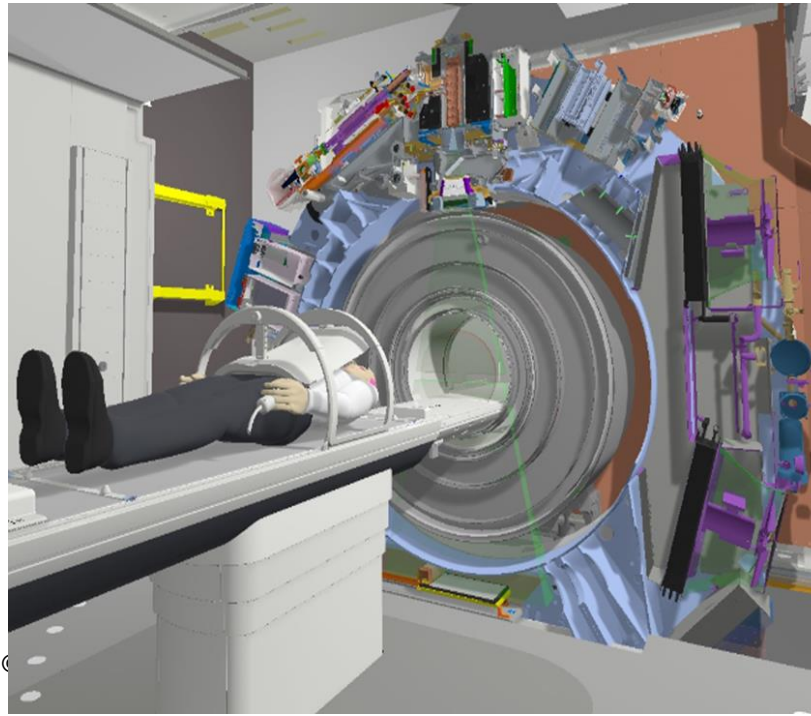
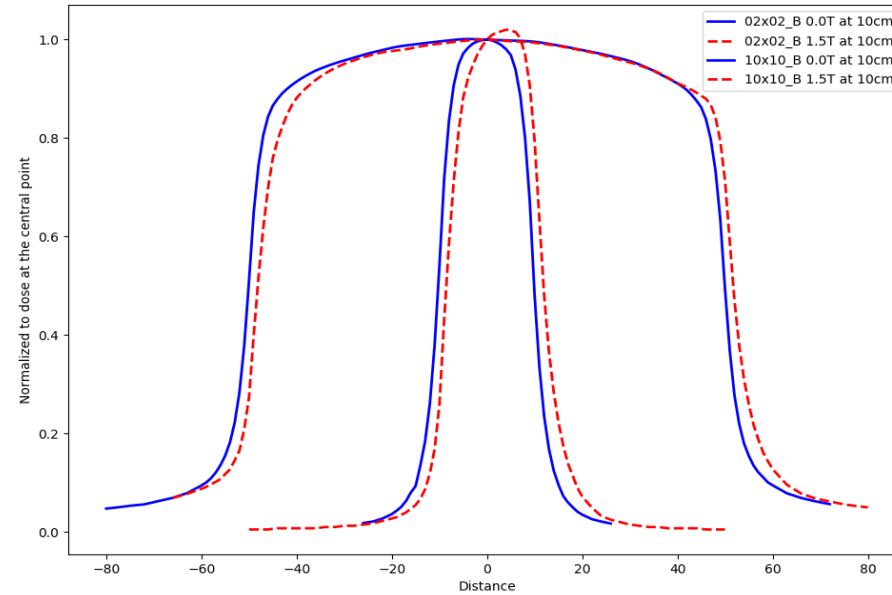
第2版：2021/6/30

E008222/01



Objectives

1. 磁場がビーム内の粒子にどのように影響するか、そしてそれが線量分布にどのように影響するかの理解
2. 磁場が検出器の応答にどのように影響するかの理解



Lesson Objectives

Basic Concepts:

- ローレンツ力
- ジャイロ半径
- 電子の及ぶ範囲

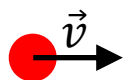


At the end of this section you will be able to discuss the basic concepts of how charged particles behave in a magnetic field.

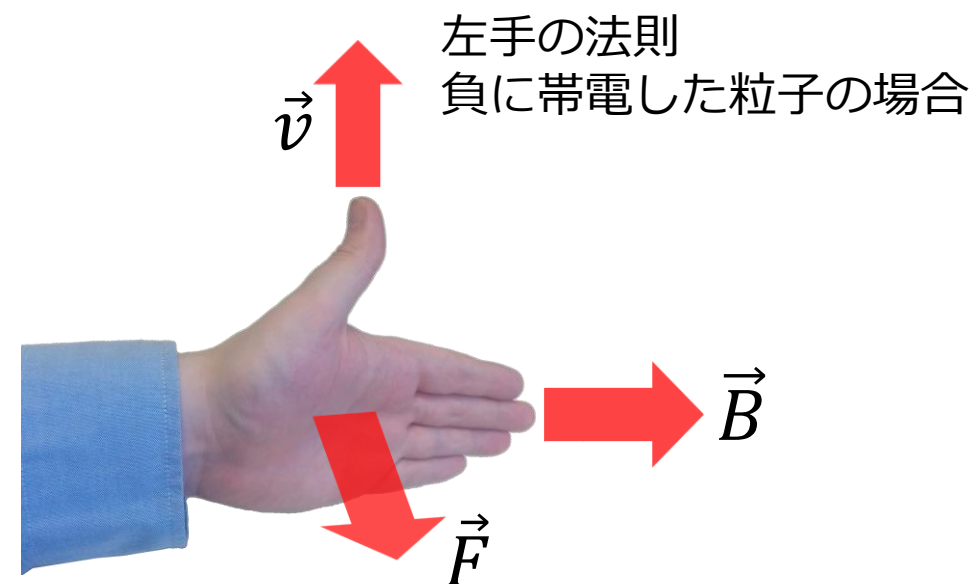
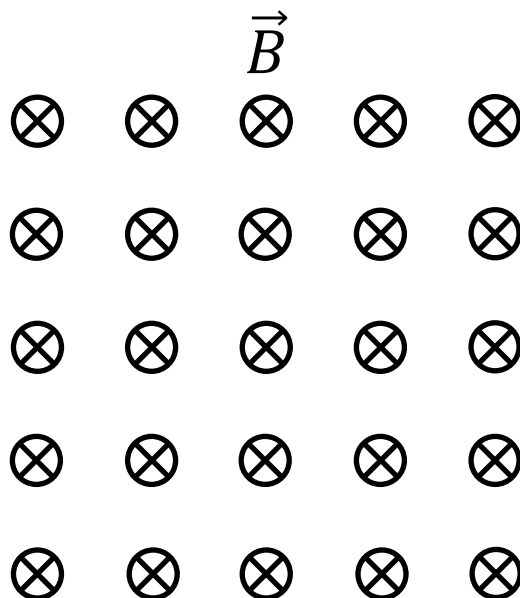
Basic Concepts

ローレンツ力

磁場中を移動する荷電粒子は、その速度と磁場の両方に垂直な方向に力を与える。



$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

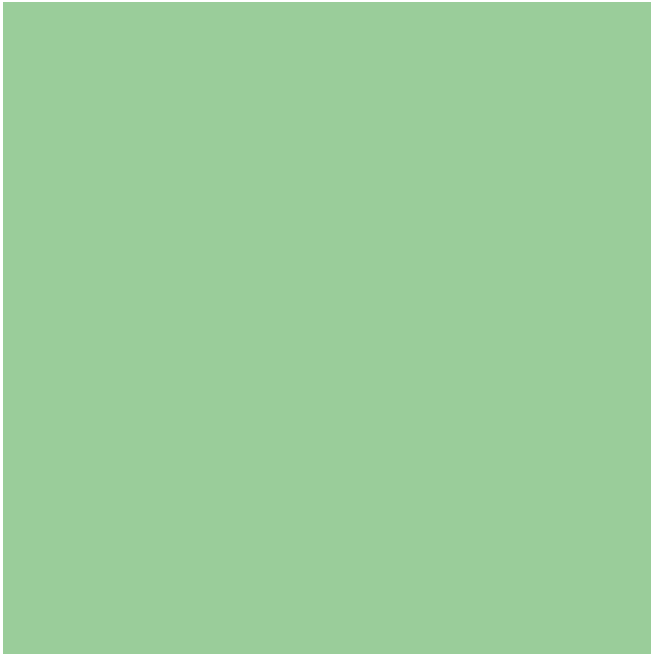


左手の法則
負に帯電した粒子の場合

Basic Concepts

ローレンツ力

No Magnetic Field

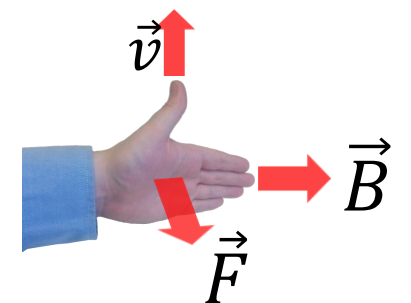


1.5 T Magnetic Field



電子(赤)は散乱し続ける。

ただし、それらの軌道はローレンツ力の影響を強く受ける。



この画像で磁場はどちらの方向に向いていますか？

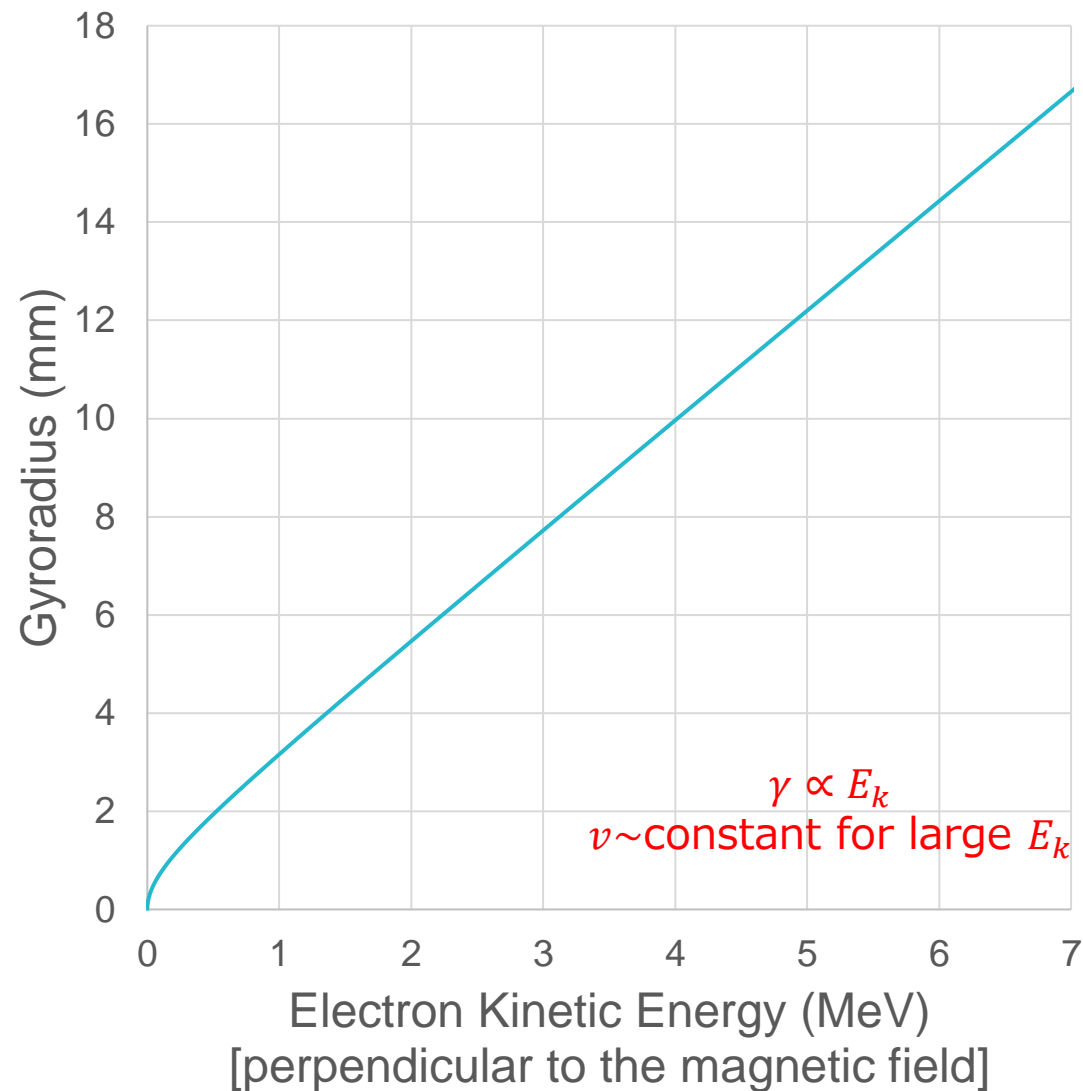
Basic Concepts

ジャイロ半径

回転半径 r_g (in the absence of scattering) は次の関数:

- 磁場の強さ B
- 磁場に垂直な方向の電子速度 v_{\perp}

$$r_g = \frac{\gamma m_0 v_{\perp}}{|qB|}$$



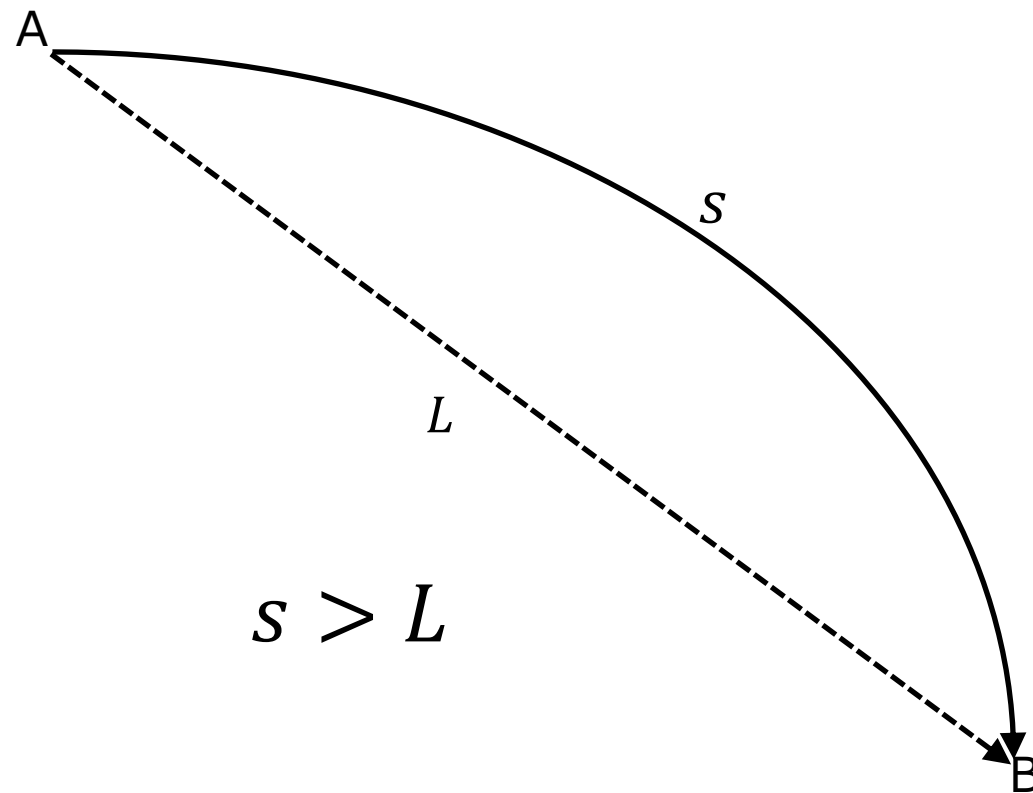
Basic Concepts

電子の及ぶ範囲

相互作用間の電子の軌道は磁場の中で曲がる。

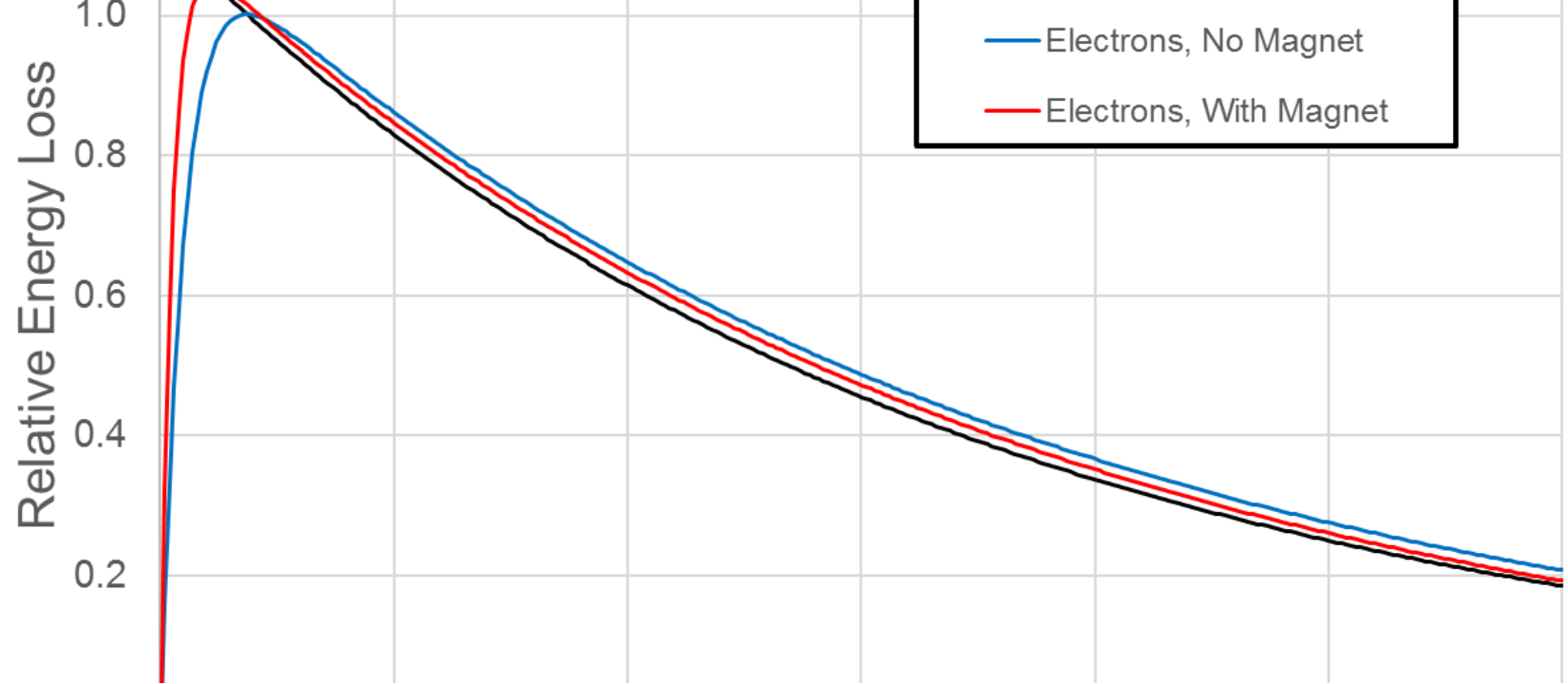
電子が長さ s の弧に沿って点Aから点Bに移動する場合、この経路は点Aと点Bの間の長さ L の直線経路よりも長くなる。

その結果、電子の線形範囲は磁場内で減少する。



線量分布

- 電子混入
- 深部線量分布
- 横方向の線量分布
- 不均質領域



At the end of this section you will be able to discuss how the magnetic field affects the dose distribution.

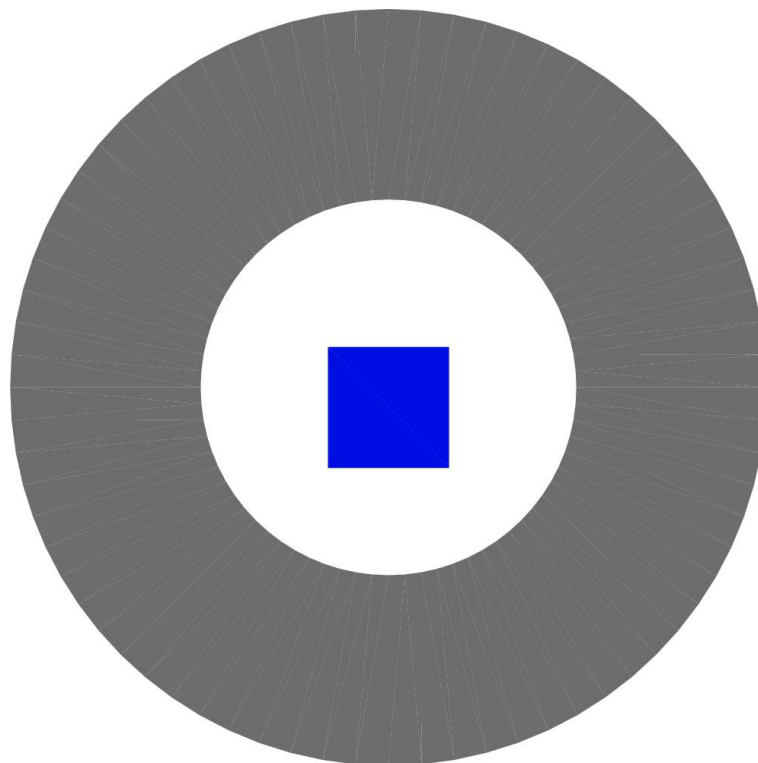
線量分布

電子混入

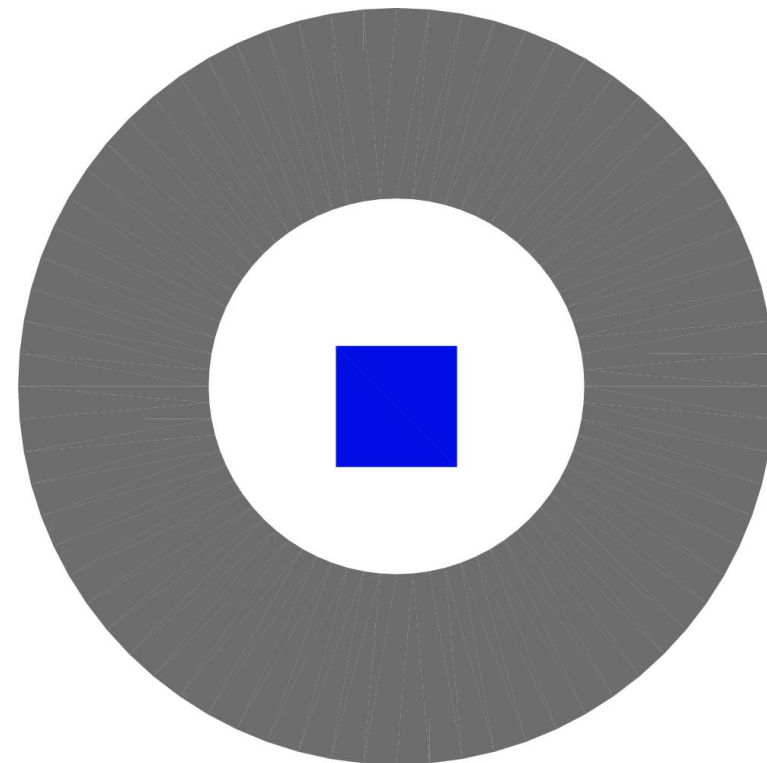
クライオスタットからの電子混入は
磁場によって一掃される。

表面線量の寄与が排除される。

患者に入射するビームは
本質的に純粋な光子線となる。



MAGNET OFF



MAGNET ON

線量分布

電子混入

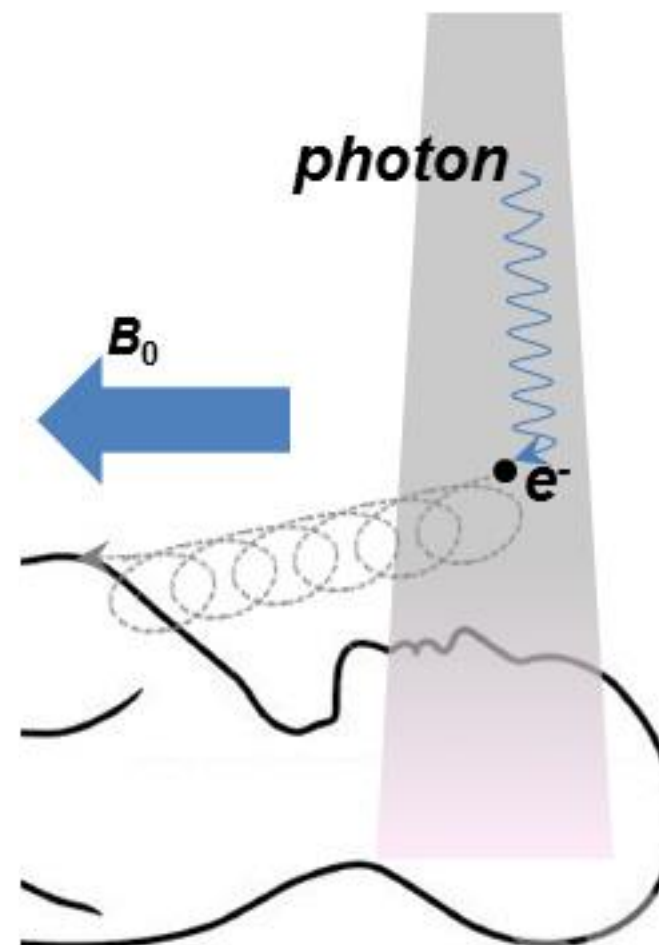
新しい形の電子混入がある。

Spiraling contaminant electrons (SCE)

横方向の速度成分とともに空気中で生成された、または患者から放出された電子は、照射する部位以外にらせん状にぶつかる可能性がある。

“大きな照射野の場合、SCE線量は散乱、漏れ光子からの線量と同じ大きさになる”

– Hackett et al.



Hackett et al. (2018) Phys. Med. Biol. 63 (9)

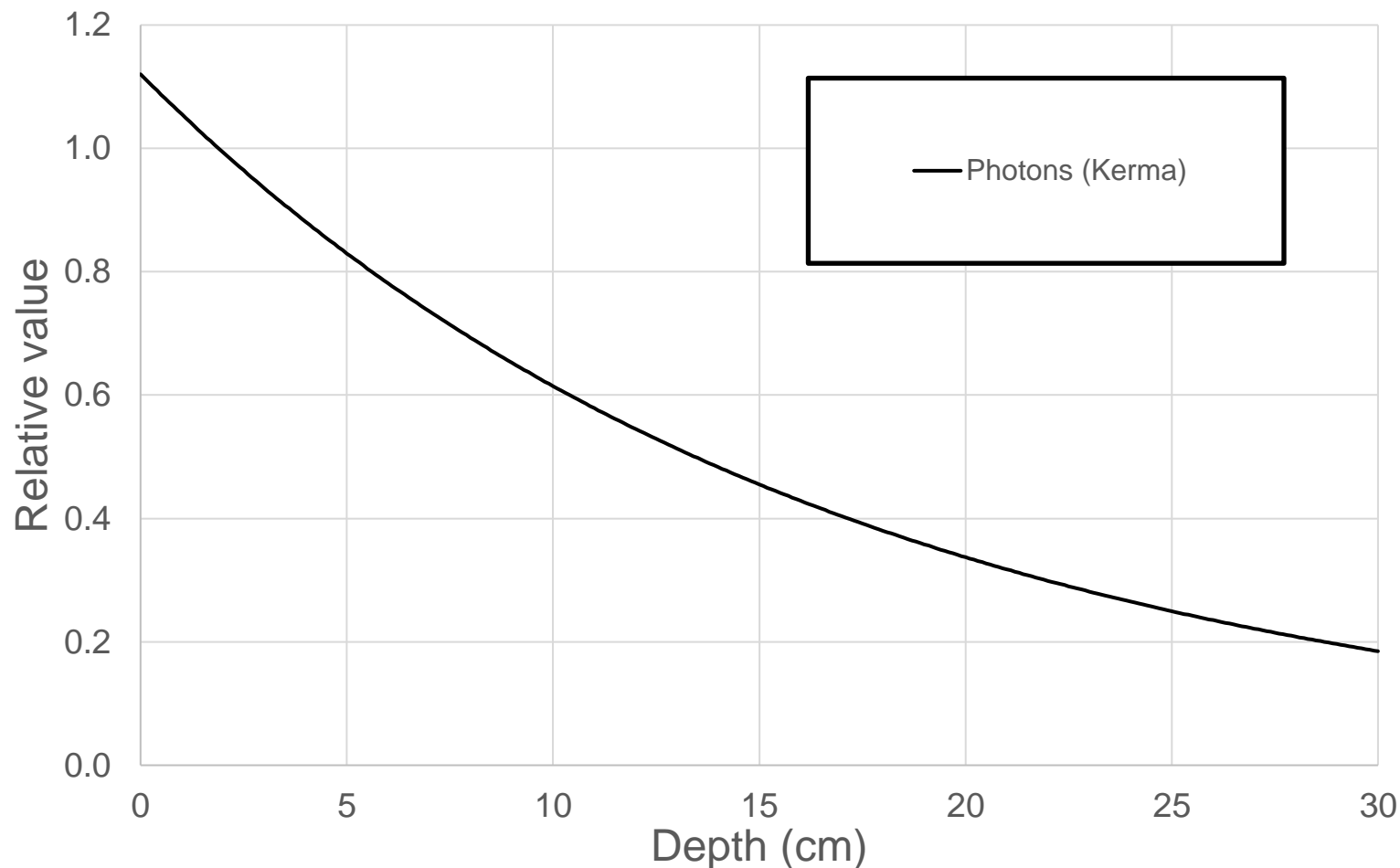
線量分布

深部線量

光子は影響を受けない。
(カーマは変更されない。)

電子の範囲が短くなると、線量曲線が
カーマ曲線に近づく。

- d_{max} をより浅い深さにシフトする。
- d_{max} での線量が増加する。

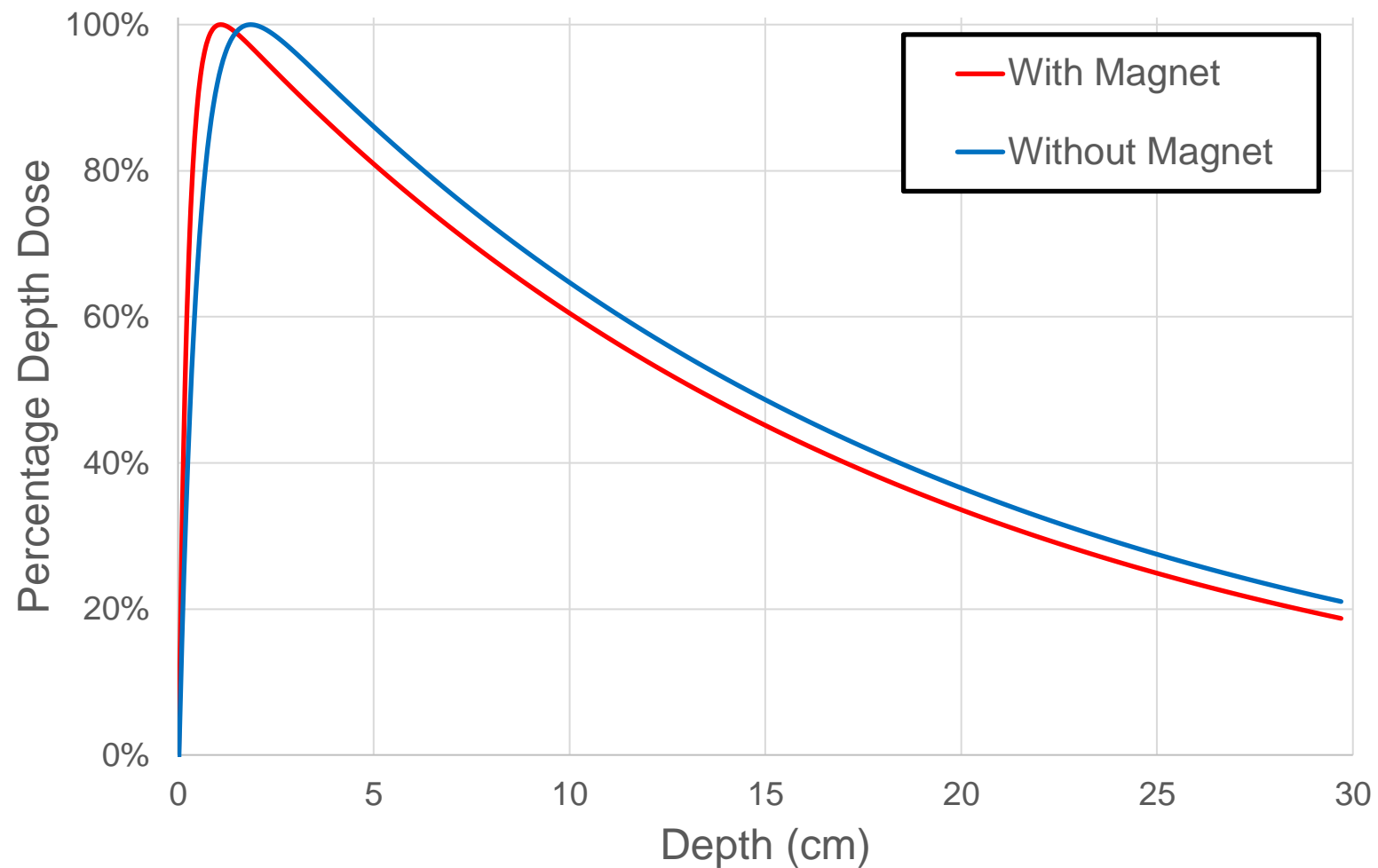


線量分布

深部線量百分率

PDDが磁場によって減少する。

これは、深さでの線量がわずかに変化だけで、主にdmaxでの線量が増加するため。

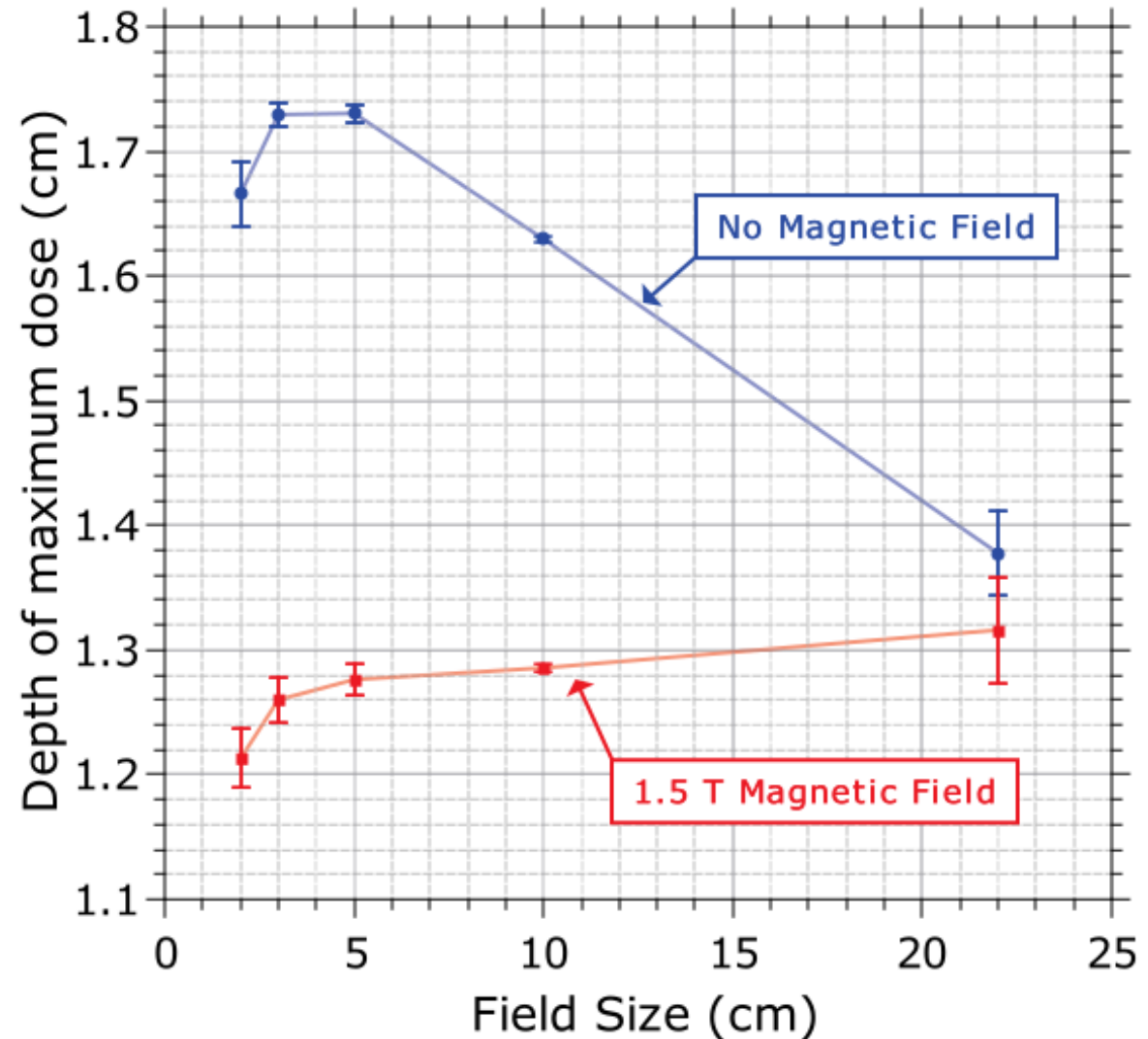


線量分布

最大線量深

d_{max} は磁場内では、照射野の大きさによる変化は小さい。

これは、ビルドアップ領域において電子混入の変動がないため。

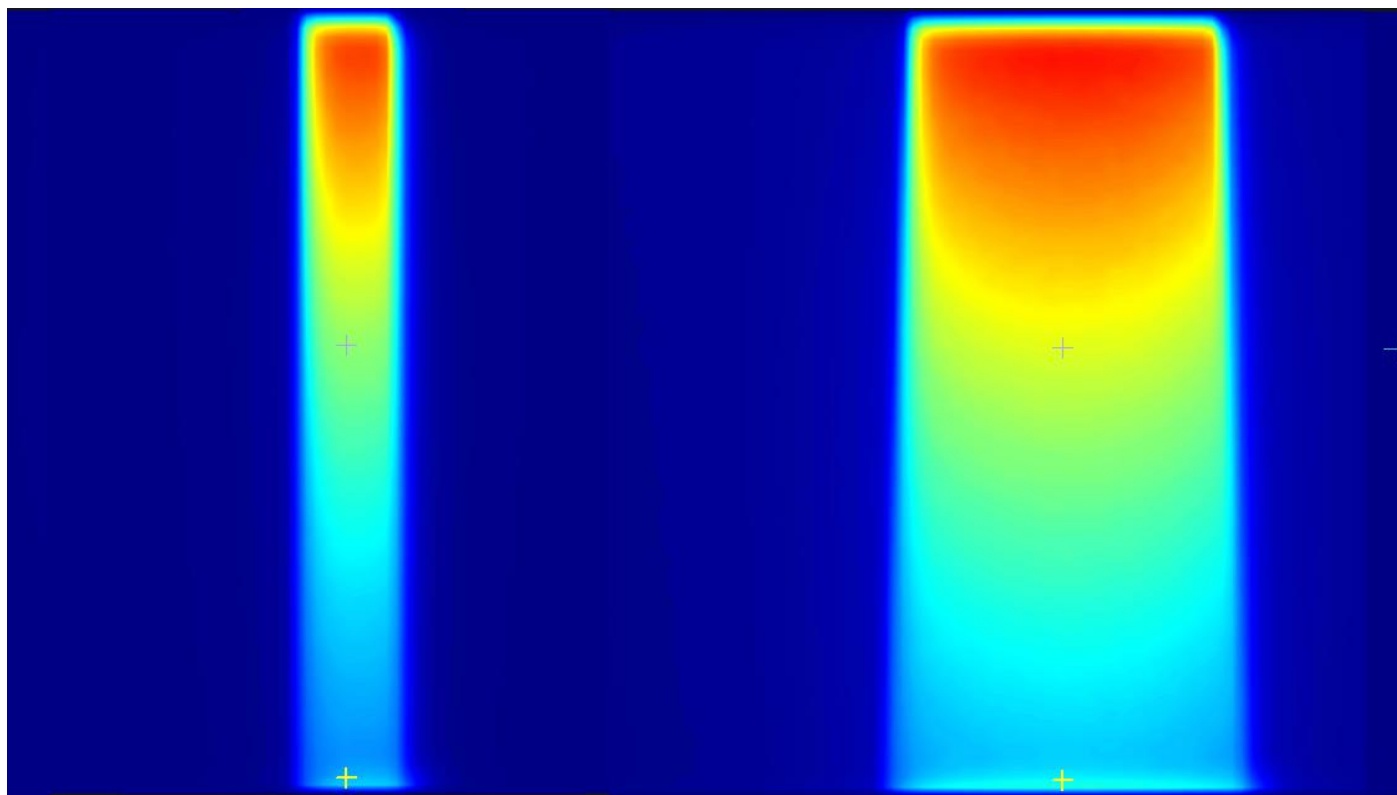


O'Brien et al. (2017) Med. Phys. 45(2) 884–897

線量分布

横方向の線量分布

電子はローレンツ力の働く方向に向かって偏向される。
これにより、線量分布が非対称になる。



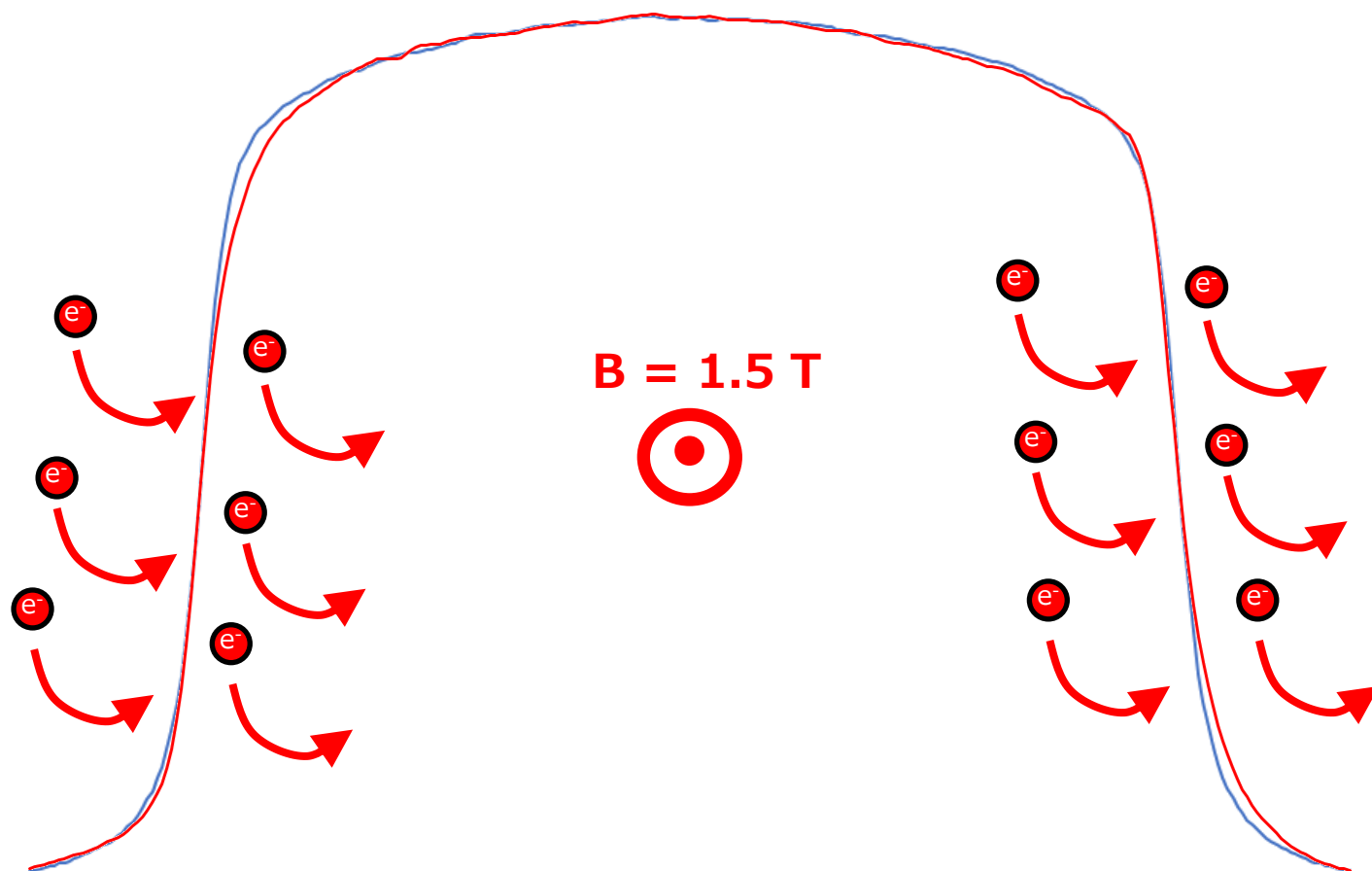
Monaco の計算
3x3 cm と10x10 cm

線量分布

横方向の線量分布

10 x 10 cm²クロスプレーンプロファイル (IEC X方向)

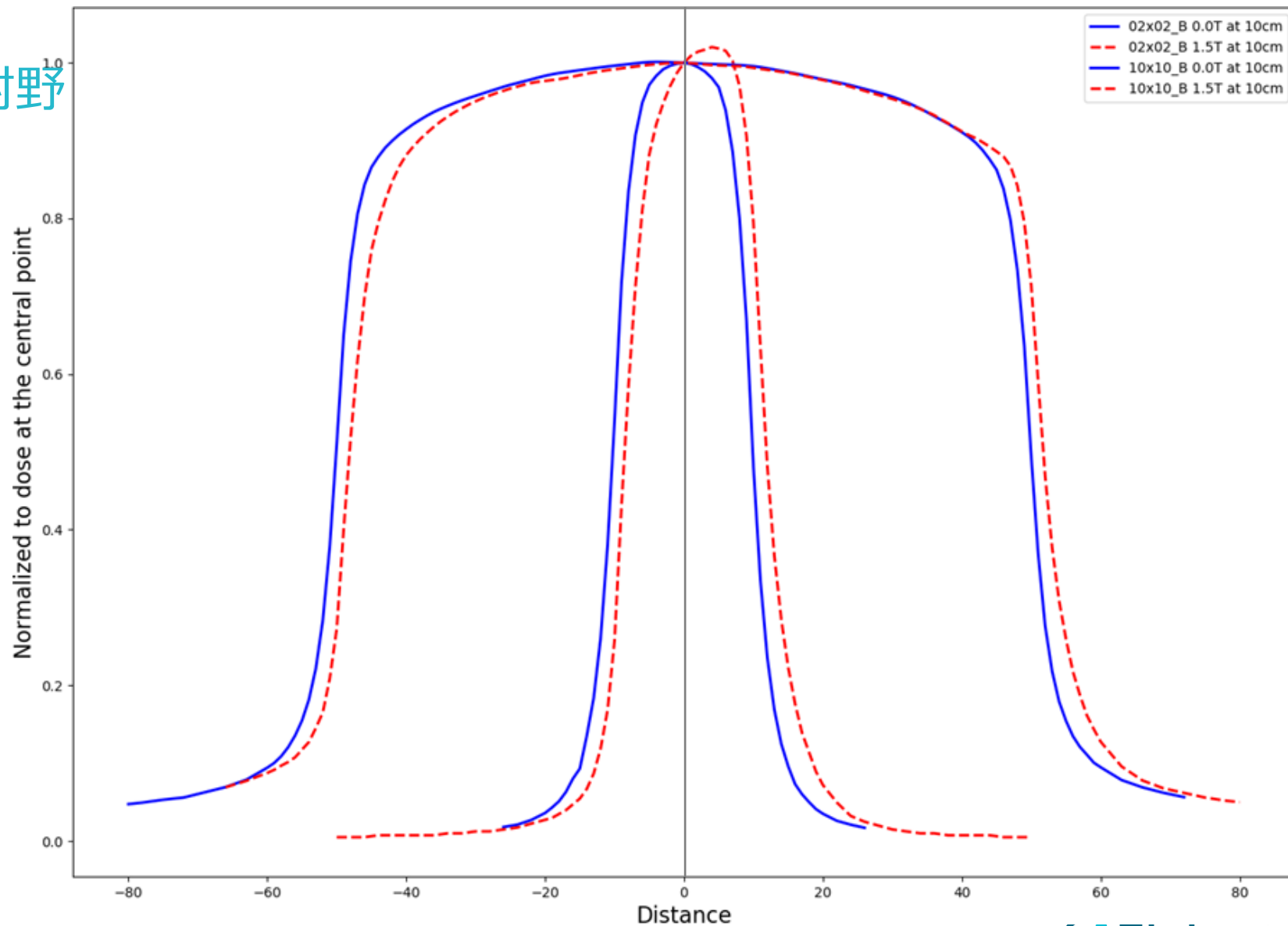
- Unityには-Y方向に1.5Tの磁場がある。
 - ローレンツ力は電子を優先方向に偏向させる (+ X) 。
 - 半影に非対称性を及ぼす。
 - プロファイルを約1.5mmシフトします*
- * 50%の線量ポイントの midpoint から測定



線量分布

横方向の線量分布 - 小照射野

- 非対称性は、小さな照射野で最も重要になる。
- ピーク線量は軸外になる。
- 中心軸に高線量勾配が存在する可能性がある。



不均質領域について

線量分布

不均質- Electron Return Effect

電子がある媒体から密度の低い別の媒体に移動すると、ループバックして最初の媒体に再び入る電子の数が増加する。



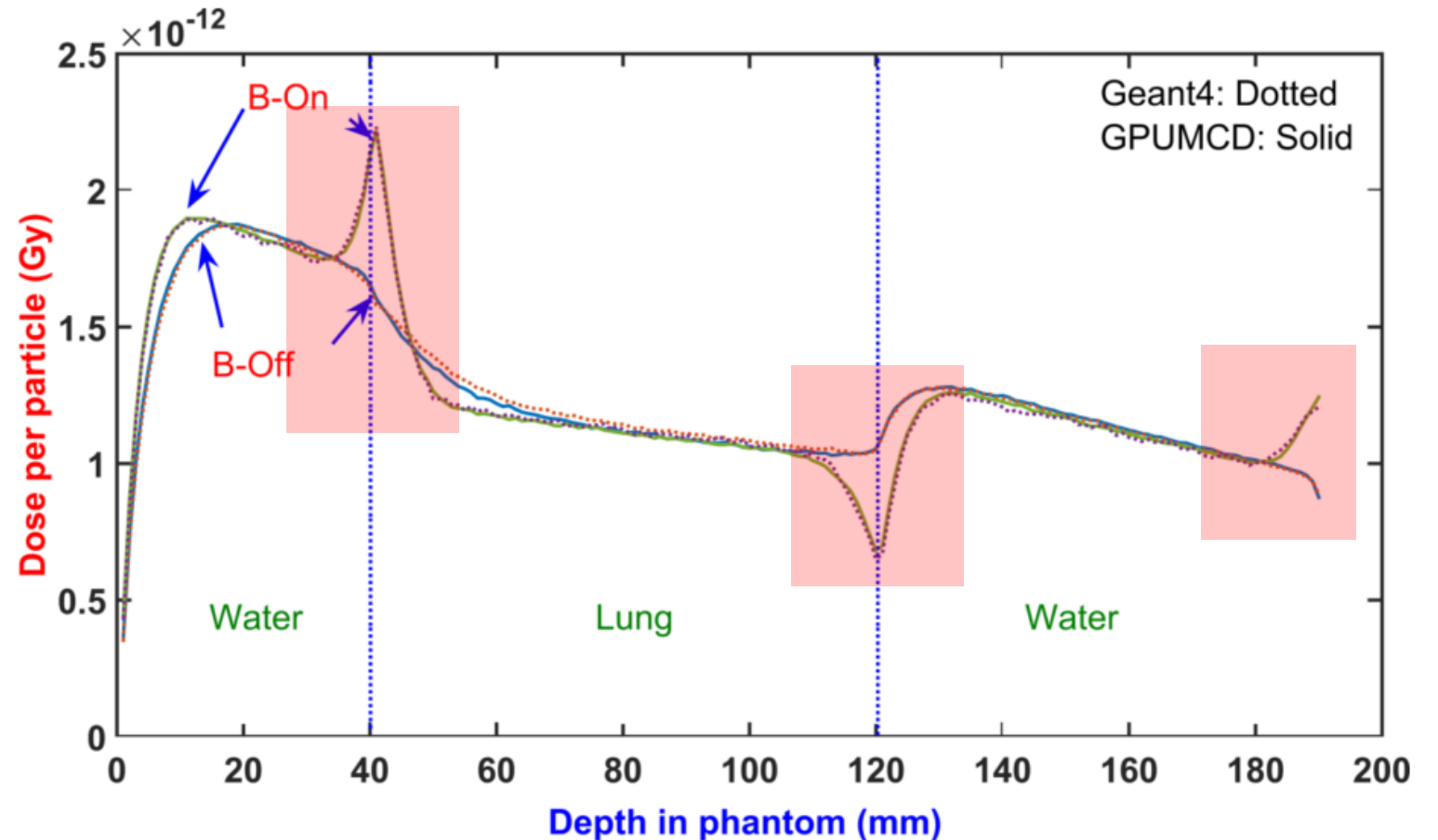
2番目の媒体の密度が最初の媒体よりもはるかに低い場合、戻る電子の数が増える可能性がある。これは、高媒体から低媒体への境界面での線量増強に繋がる。これは、Electron Return Effect (ERE) と呼ばれる。

線量分布

不均質- Electron Return Effect

EREの結果は以下の通りとなる:

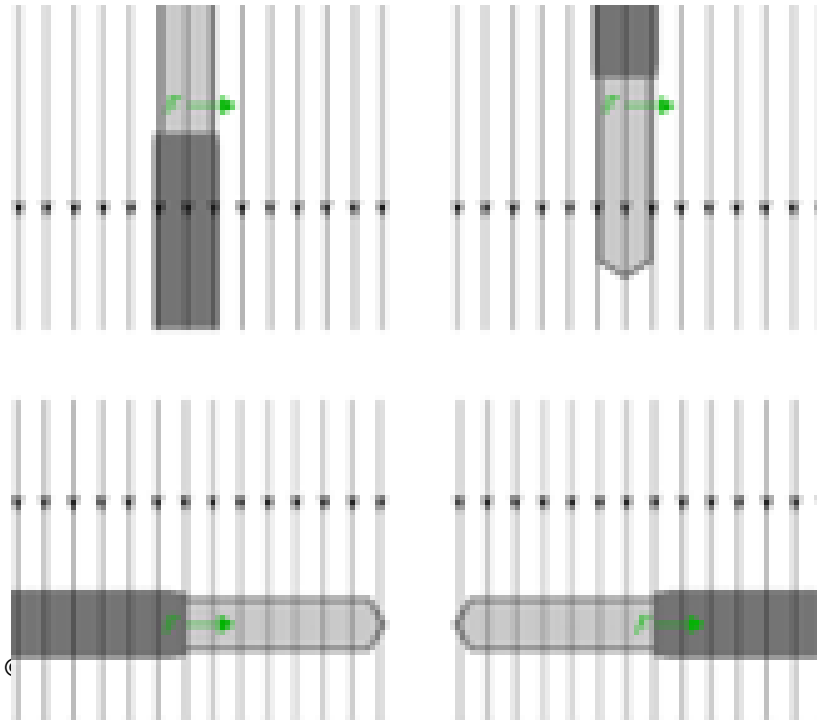
- 高密度から低密度に移行する際のホットスポット
(例: 組織/空気 境界面)
- 低密度から高密度に移行する際のコールドスポット
(例: 空気/組織 境界面)
- ビームが空気または低密度材料に出る場合の出口線量でのホットスポット



Ahmad et al., Med. Phys. 2016 43(2), 894-907

Detector Effects

- 電離箱検出器
- 半導体検出器
- アレイ検出器
- フィルム



At the end of this section you will be able to discuss how the magnetic fields affects commonly used detectors.

Detector Effects

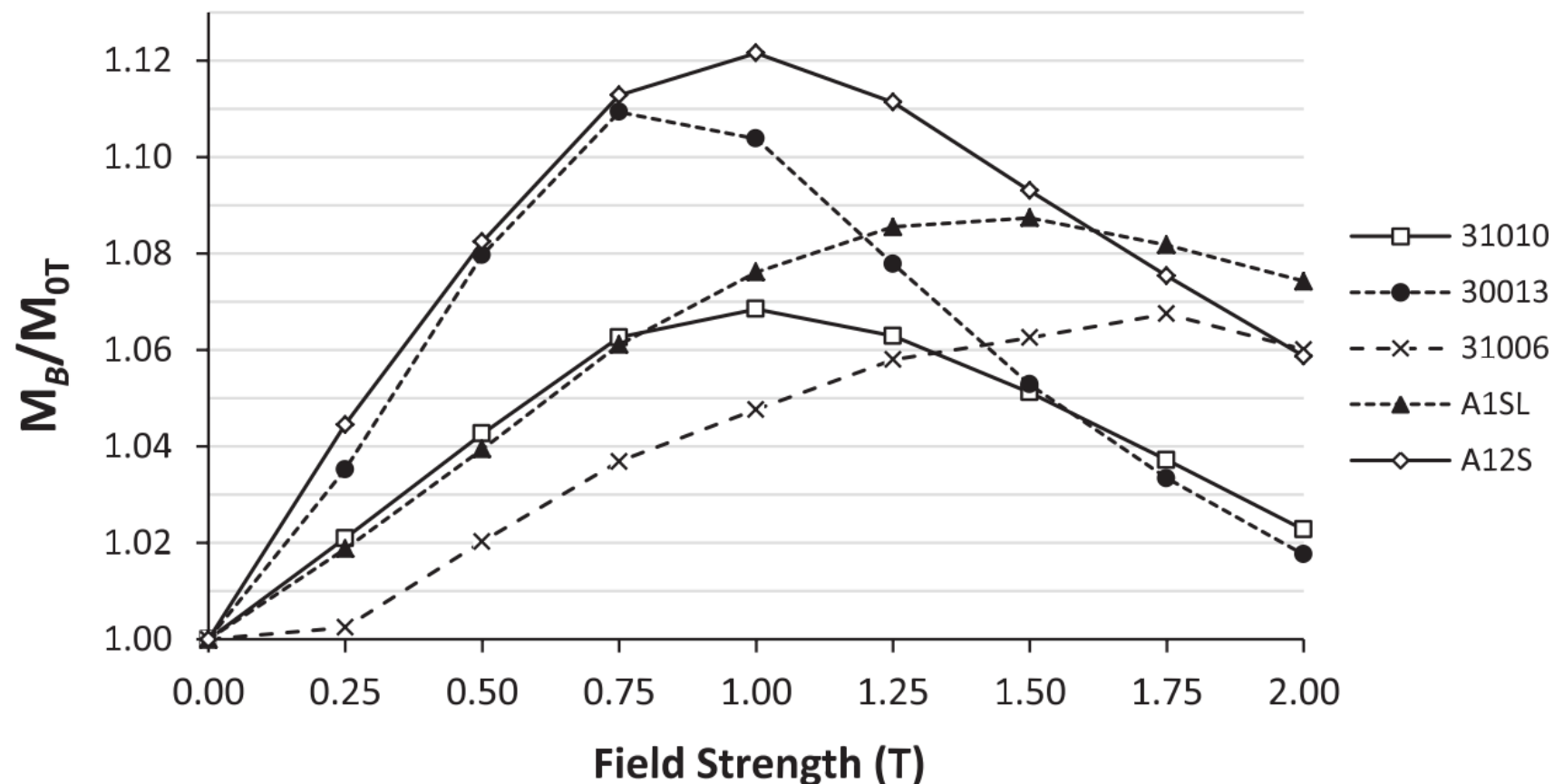
電離箱検出器

所与の線量に対する電離箱の応答は、磁場によって大幅に変化する可能性がある。

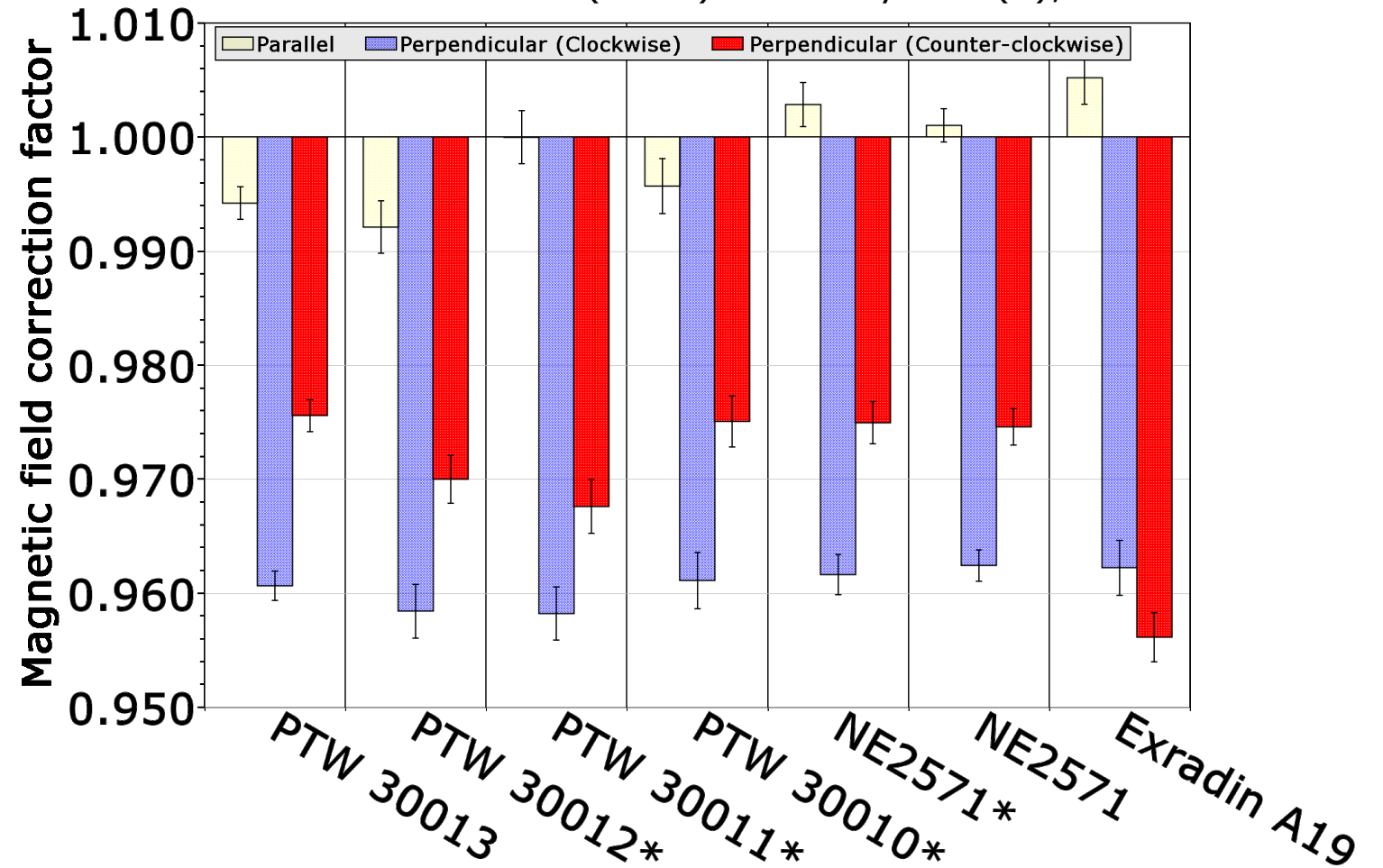
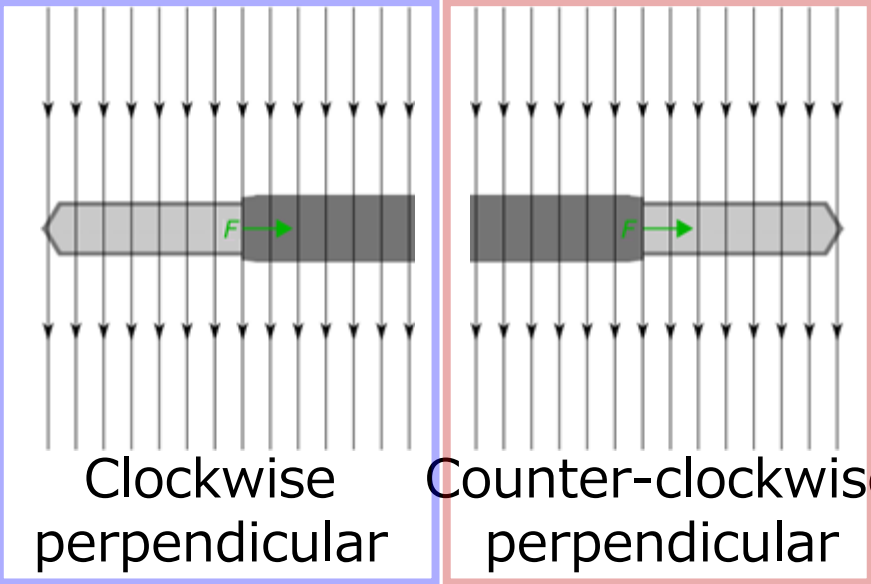
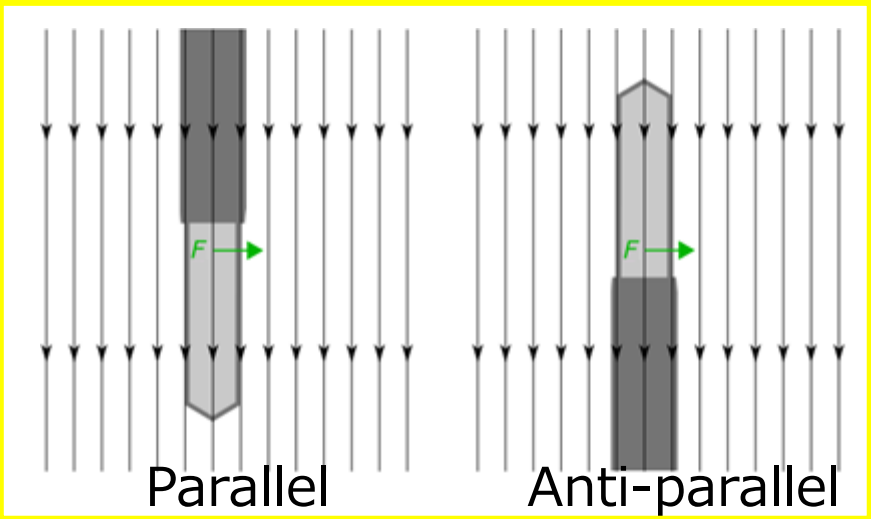
この応答は、

- 電離箱に依存
- 磁場強度に依存
- 向きに依存

場合によっては、ビーム品質に依存することがある。



Agnew et al. (2017) Phys. Med. Biol. 62, 1731



* modeled with waterproof sleeve

Detector Effects

電離箱検出器 - メカニズム

磁場は、電離箱の空気空洞内の電子の経路長を変化させる。

ローレンツ力により、電子は円を描くように移動し、電子飛跡ごとのエネルギー蓄積が変化する。

電離箱の応答は、湾曲した軌道に沿った空気空洞で検出可能なスペースに依存する。

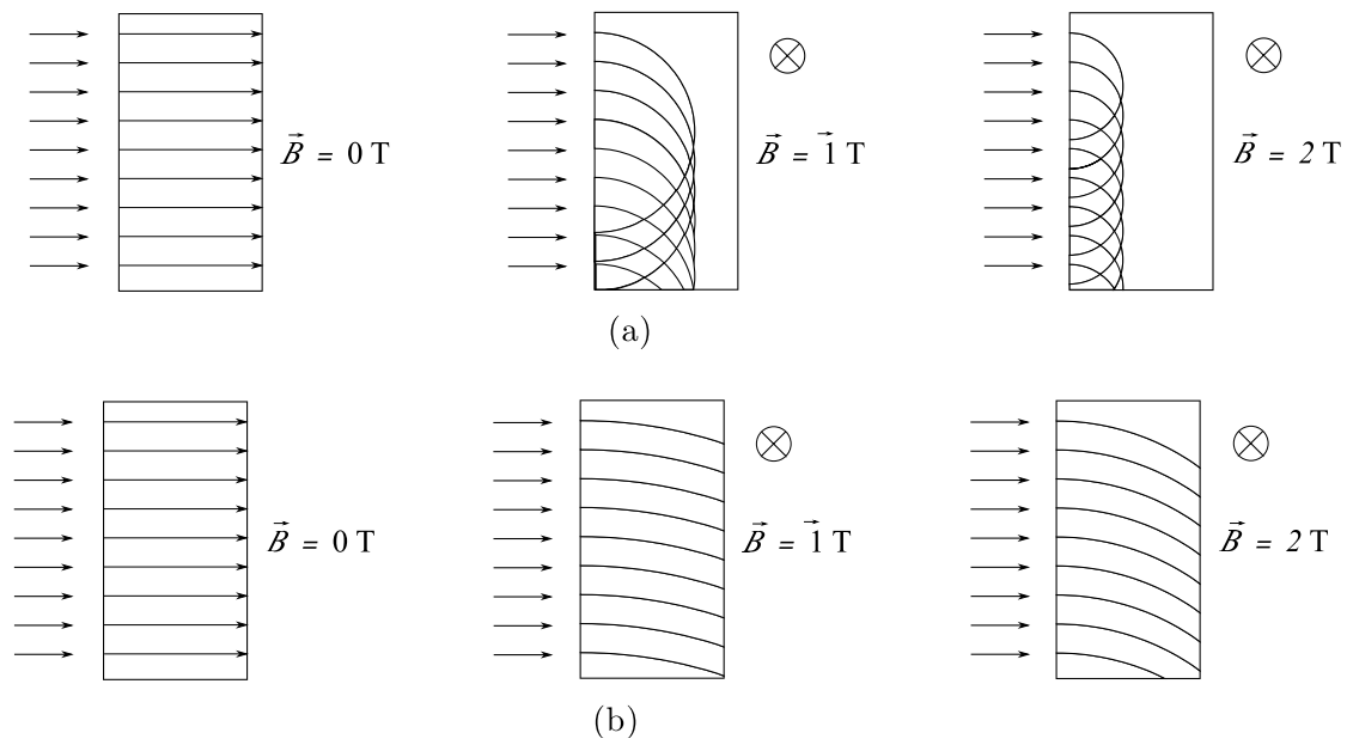


Figure 8. Schematic of the electron tracks depending on their own energy and the external magnetic field. Configuration I: (a) 1 MeV, schematic of the electron tracks at 0 1 and 2 T, (b) 6 MeV, schematic of the electron tracks at 0 1 and 2 T.

Meijsing et al. (2016) Med. Phys. 43(8), 4915–4927

Detector Effects

電離箱検出器 – Air Gap Effect

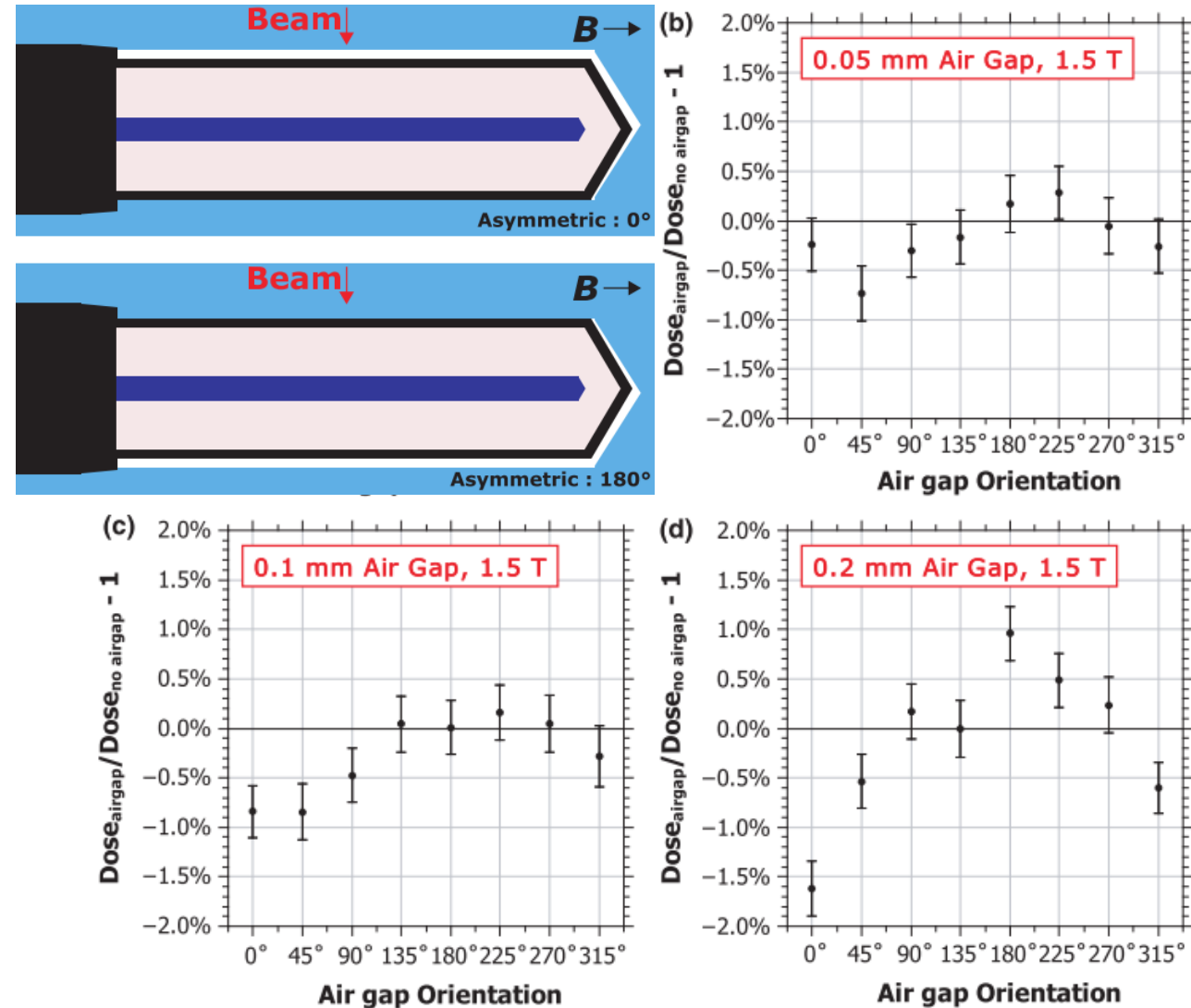
サブミリメートルのエアギャップ（0.1 mm程度）は、電離箱の応答に大きな影響を与える可能性がある。

これは、電離箱の回転がなどからなる周辺の空気量によって起こる。

固形水は注意して使用する必要がある！

リファレンス線量測定は水中で行う必要がある。

フィルムの測定にも影響を与える可能性がある。



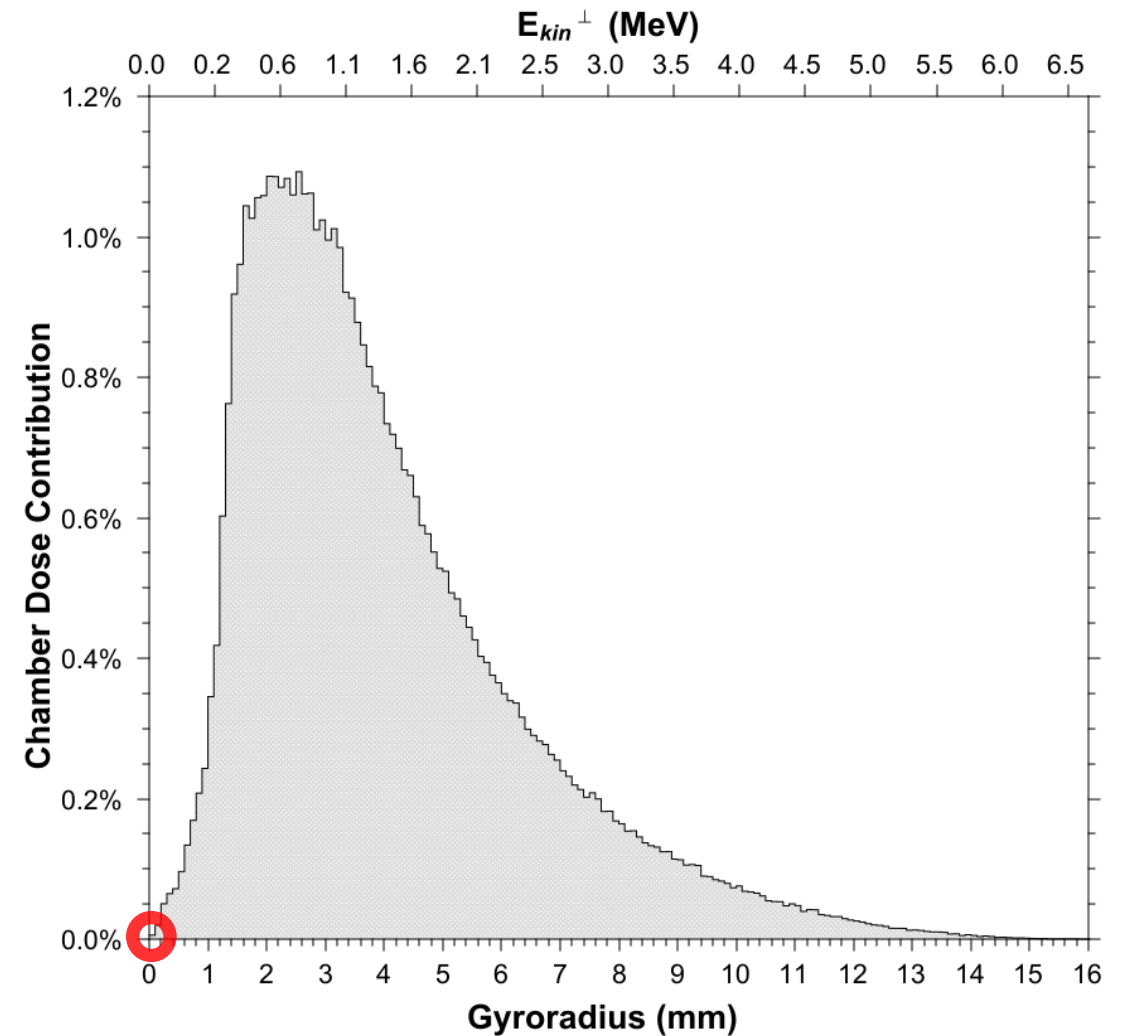
O'Brien and Sawakuchi, Med Phys 2017 44(7), 3830–3838

Detector Effects

電離箱検出器 – Air Gap Effect

この効果はEREによるものではありません。

1.5Tでの7MVビームの電子のジャイロ半径は大きすぎて、0.1mmのエアギャップでは大きな影響はない。



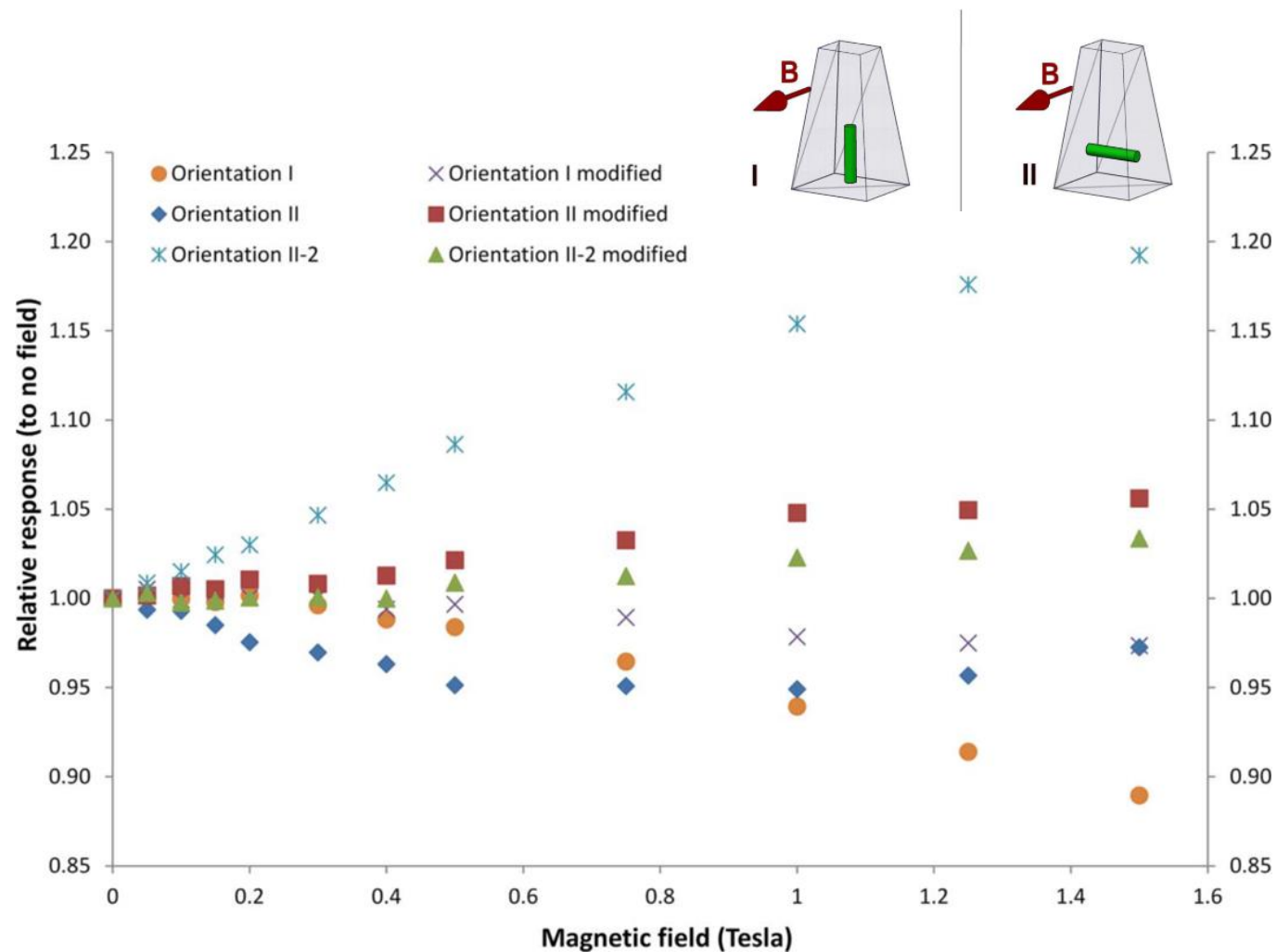
O'Brien and Sawakuchi, Med Phys 2017 44(7), 3830–3838

Detector Effects

半導体検出器

ダイオードとダイヤモンド検出器の応答も磁場の影響を受ける。

これは、磁場強度と検出器の向きにも依存する。



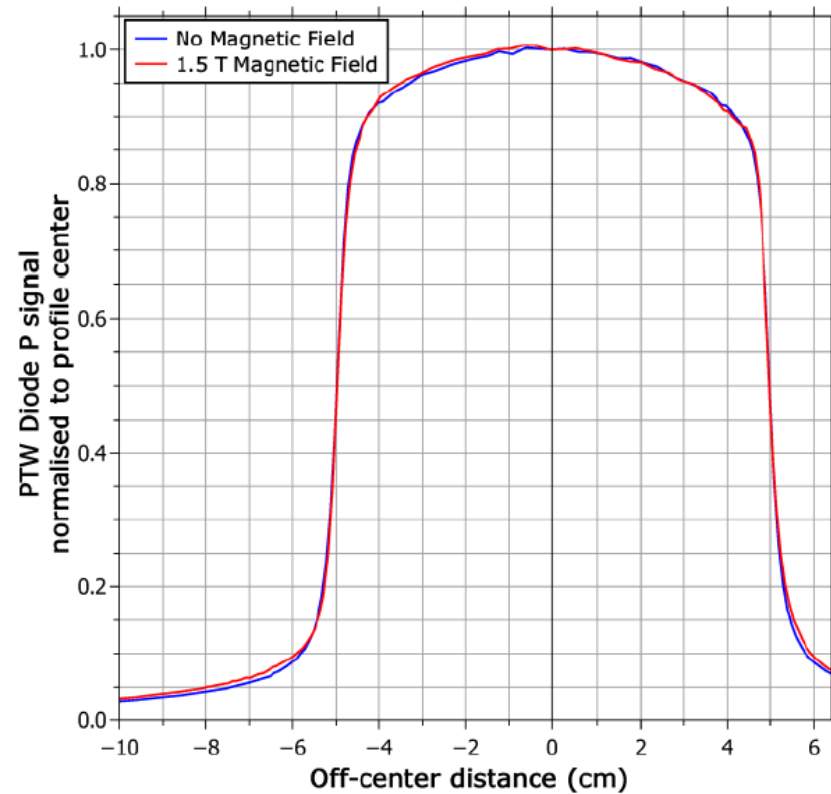
Reynolds et al. (2016) Med. Phys. 41(9), 92103

Detector Effects

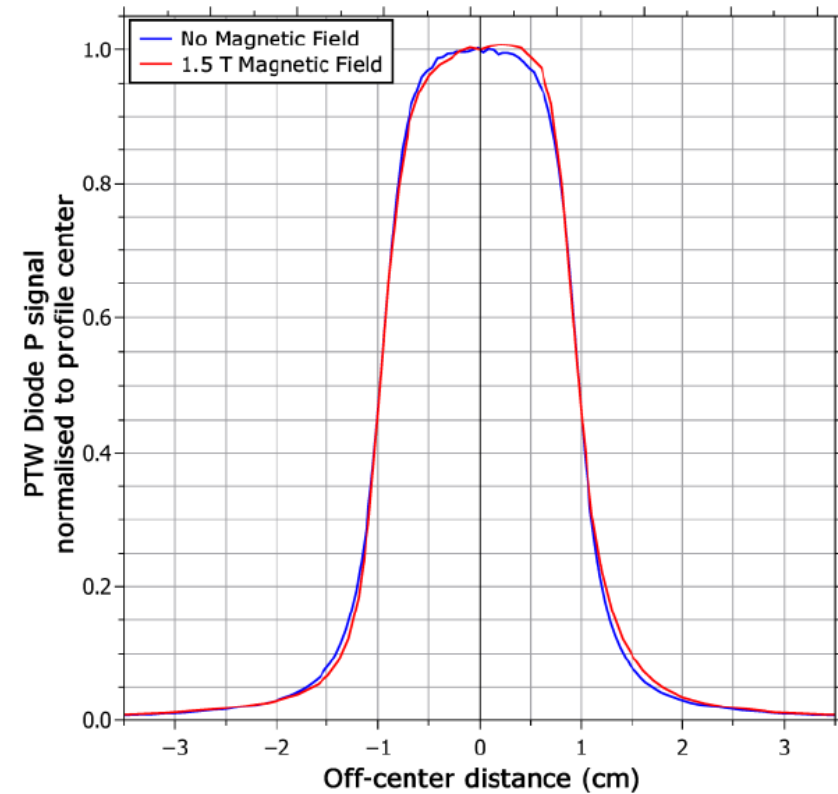
半導体検出器

シールドダイオードで測定されたプロファイル形状は、他の検出器で測定されたものとは異なる。

それらは、磁場なしで測定された形状により似ている。
(正確ではない)



(a)
 $10 \times 10 \text{ cm}^2$



(b)
 $2 \times 2 \text{ cm}^2$

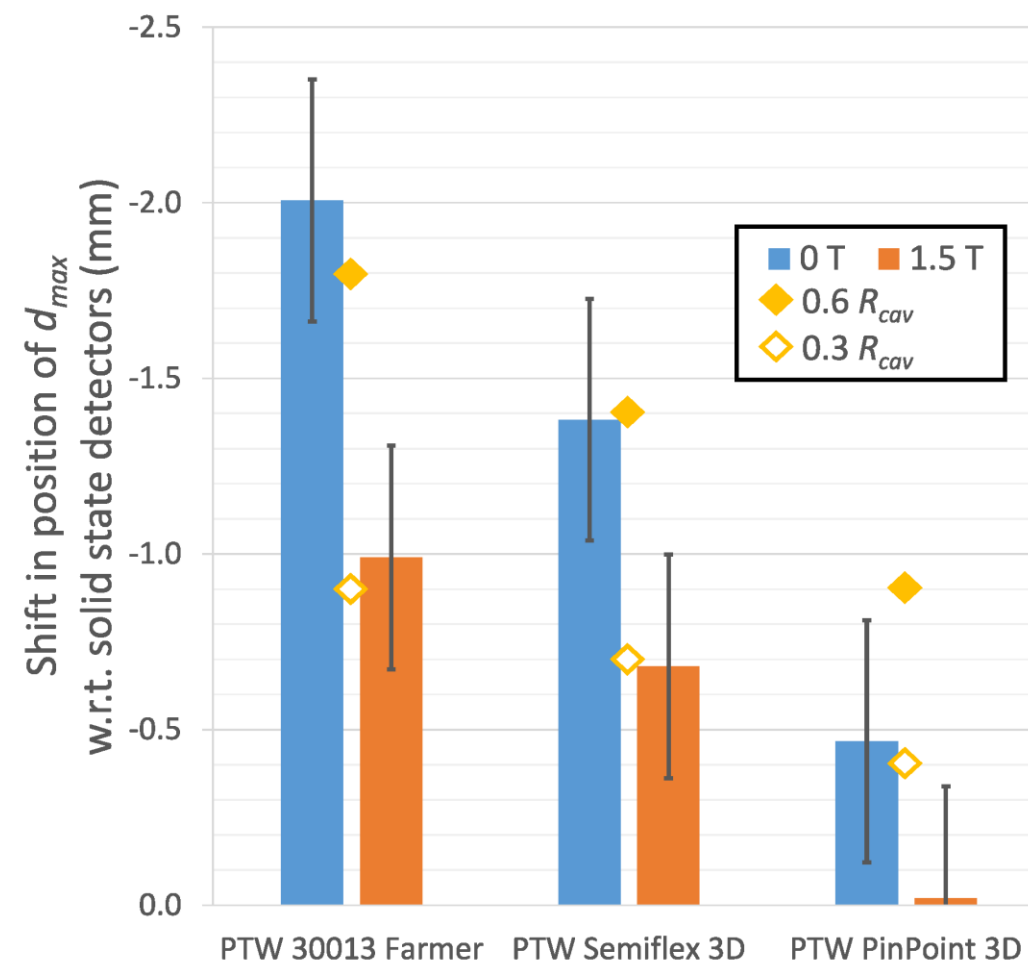
Detector Effects

有効な測定点

磁場はまた、電離箱の測定有効点をシフトする。

シフトは電離箱の中心に近づく。

1.5 Tでは、シフトは約半分に減少する。



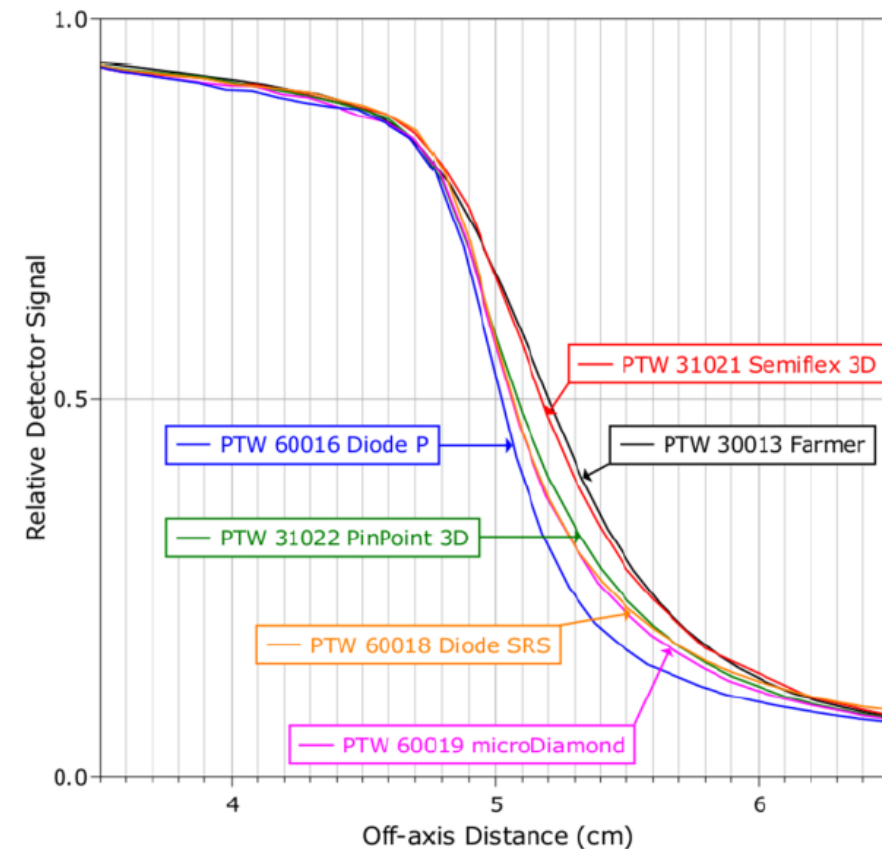
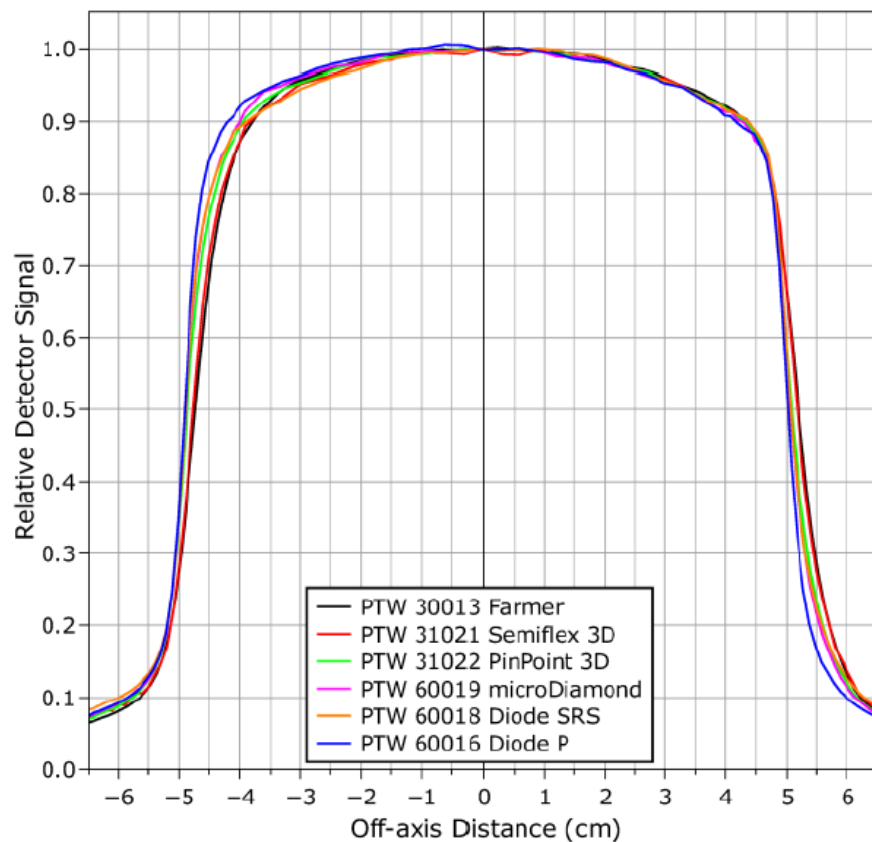
O'Brien et al. (2017) Med. Phys. 45(2) 884–897

Detector Effects

有効な測定点

シフトは検出器に依存する
～±1mmからの範囲

横方向のシフトも磁場によって引き起こされる。



O'Brien et al. (2017) Med. Phys. 45(2) 884–897

Detector Effects

アレイ検出器

重要な設計上の考慮事項：

- 電離箱またはダイオードを使用していますか？
 - 測定シフトの有効点は、使用する検出器の特性によって異なる。
 - ガンマ解析でDistance-to-Agreementに影響を与える可能性がある。
- シールドダイオードを使用していますか？
 - 線量が正しくない可能性がある。

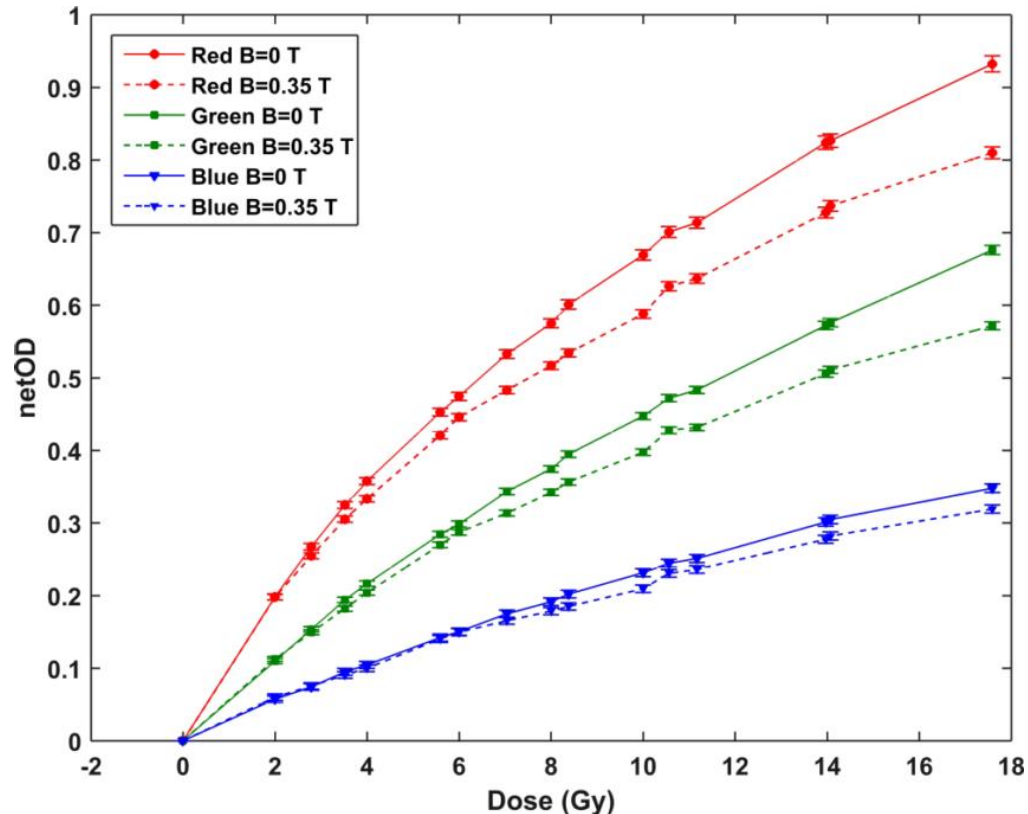
所有の機器の特徴を知ることが重要

Recommended reading:

- Smit et al. (2014) Performance of a multi-axis ionization chamber array in a 1.5 T magnetic field. Phys. Med. Biol. 59(7), 1845-55
- Gargett et al. (2015) Monte Carlo simulation of the dose response of a novel 2D silicon diode array for use in hybrid MRI-LINAC systems. Med. Phys. 42(2), 856-65
- Houweling et al. (2016) Performance of a cylindrical diode array for use in a 1.5 T MR-linac. Phys. Med. Biol. 61(3), N80-N89
- Ellefson et al. (2017) An analysis of the ArcCHECK-MR diode array's performance for ViewRay quality assurance. J Appl Clin Med Phys 18(4), 161-171

Detector Effects

フィルム



ラジオクロミックフィルムも磁場の影響を受ける。

左側のデータはGafchromic EBT2のもので、照射が磁場中で行われたかどうかによって、キャリブレーションカーブが異なる。

安全のために、磁場で照射されたフィルムに基づいてフィルムのキャリブレーションカーブを作成する必要がある。

Reynoso et al., Med. Phys. **43**(12), 6552–6556 (2016).

Thank you

