

高速点火実験における全反射ミラー を用いたX線画像計測

大阪大学レーザーエネルギー研究センター
持山智浩、白神宏之、藤岡真介、藤原隆史、古賀真理子

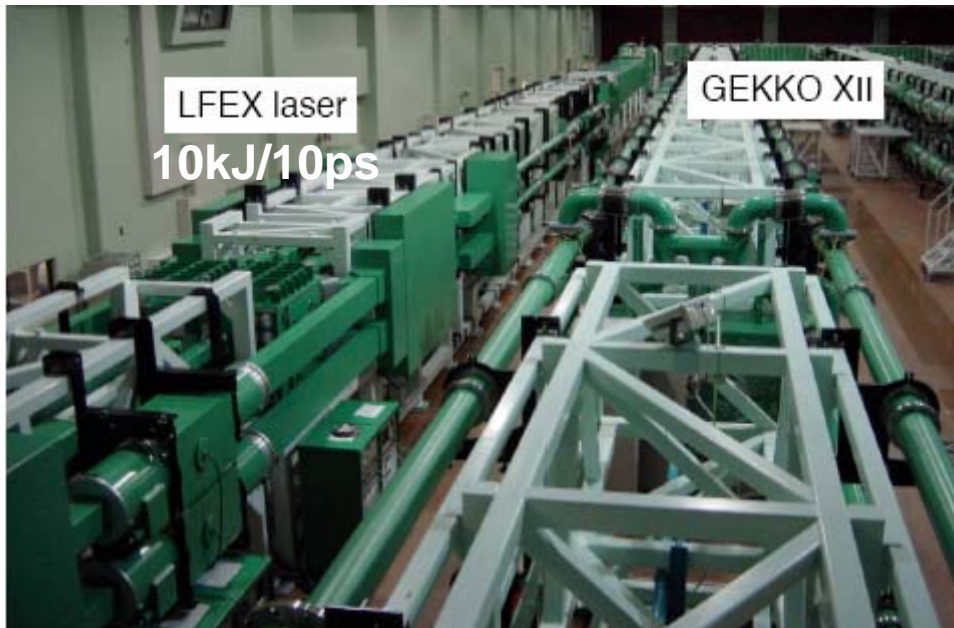
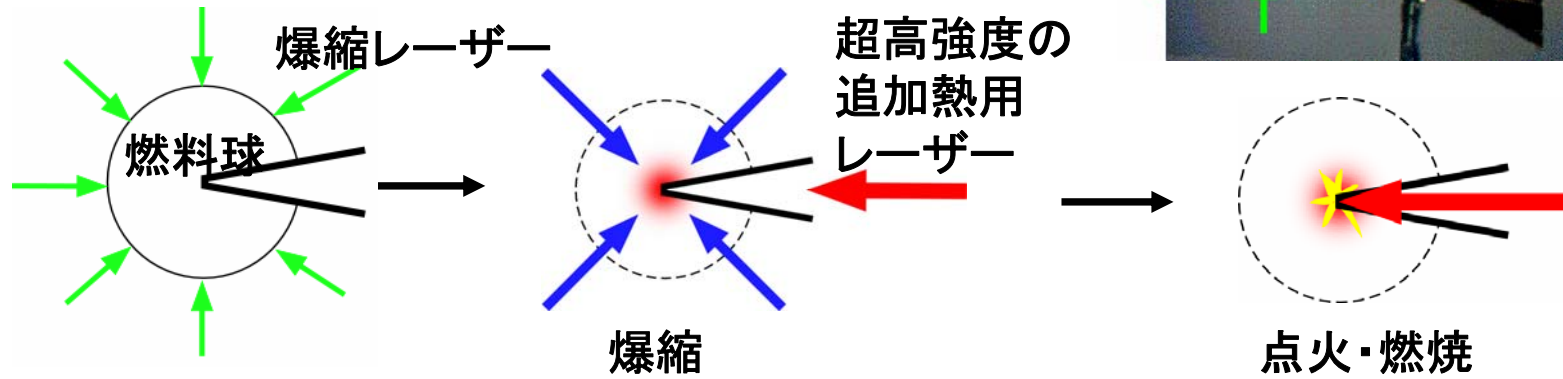
アウトライン

- 研究背景・目的
- 全反射ミラー計測器
- 遮蔽体・ミラーの仕様
- まとめ・今後の展開



実験背景・目的

高速点火慣性核融合

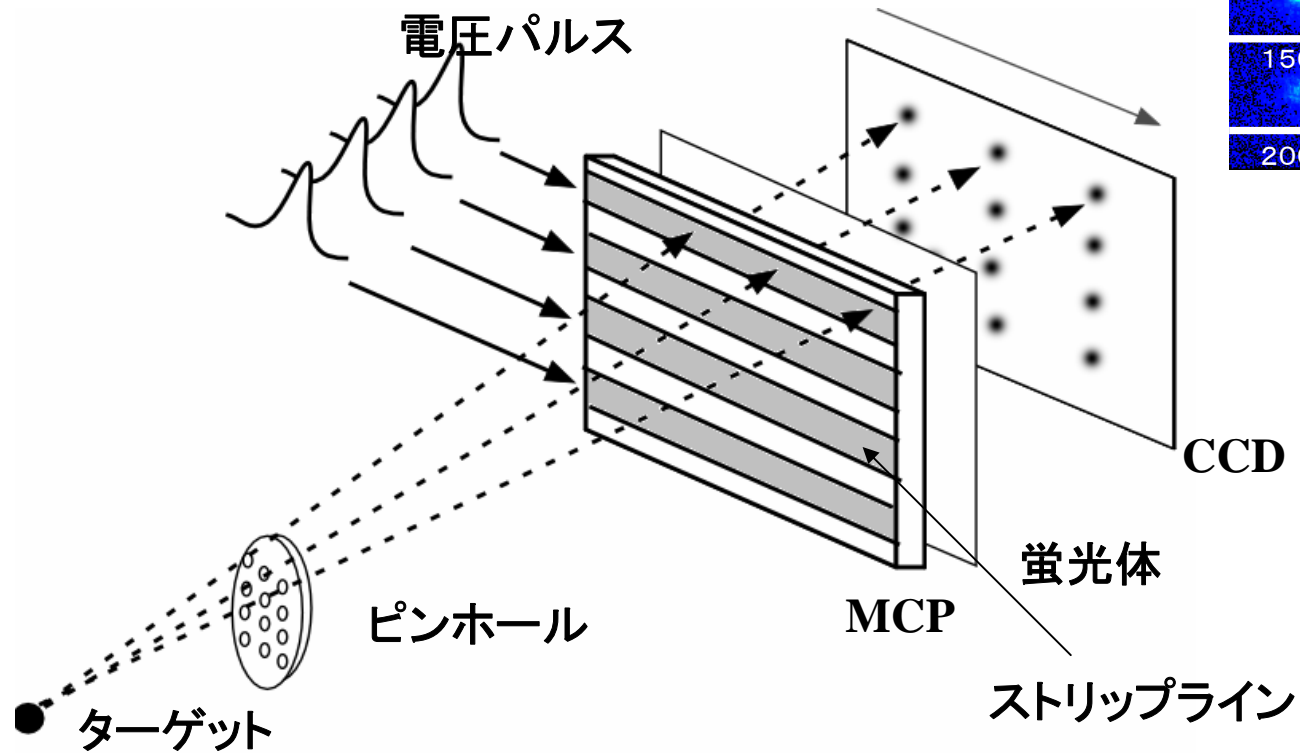


X線フレーミングカメラを用いた爆縮
ダイナミクス計測

追加熱レーザーによって生成された
電子によって発生する高エネルギー
X線がノイズとなり計測を困難にして
いる

計測器

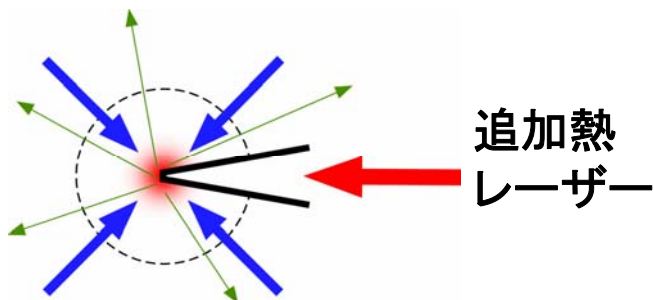
X線フレーミングカメラ(XFC)



ピンホールアレイを通ったX線は光電子増倍素子(MCP)に入射する。MCP部は電圧パルスが印加された部分だけが反応して電子を増倍するため、ストリップラインの端からパルスを印加して伝播させると、パルスの伝播した瞬間のX線画像がライン上に光電変換されることになる。

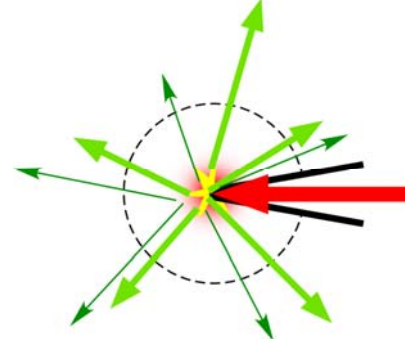
問題点

自発光X線(数keV)



加速・圧縮

高エネルギーX線(~数MeV)



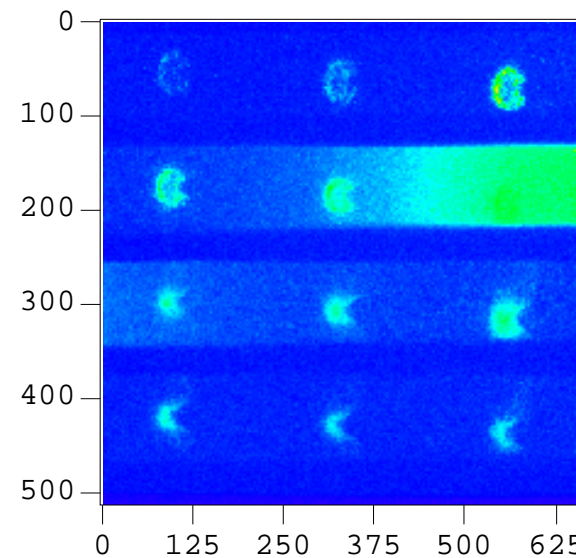
点火・燃焼

高速点火では金コーンに超高強度レーザーを照射することによって高速電子を発生させ、コアを過熱する。

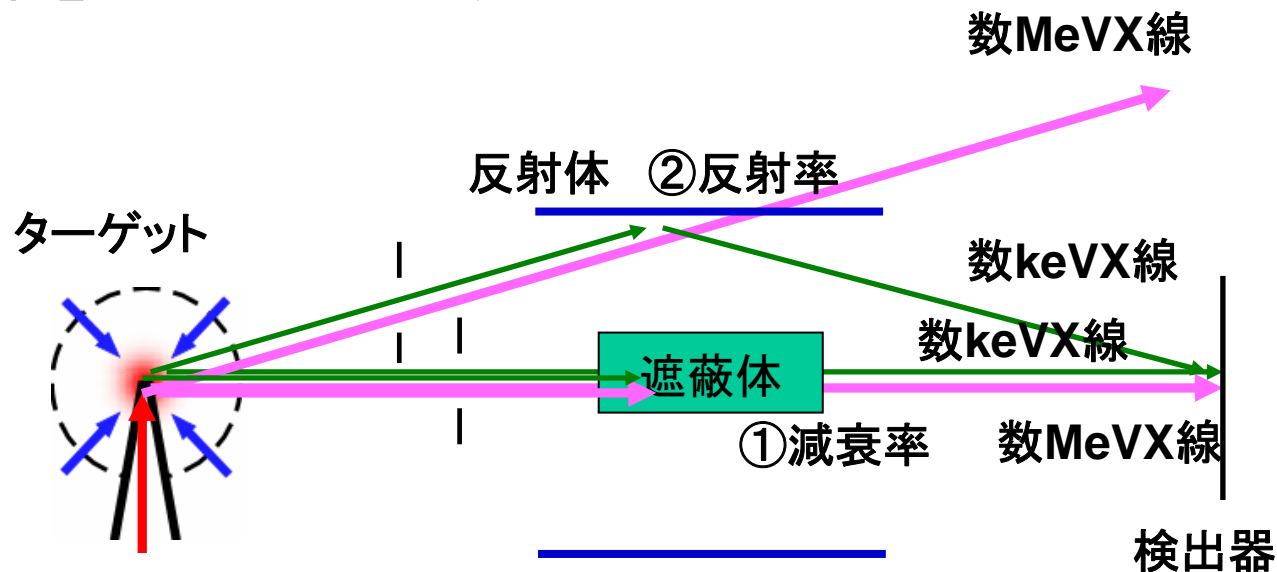
この高速電子がプラズマ中を運動する際、制動放射により大量のX線を放出される。



直接光を計測することは困難



反射体を用いた計測手法

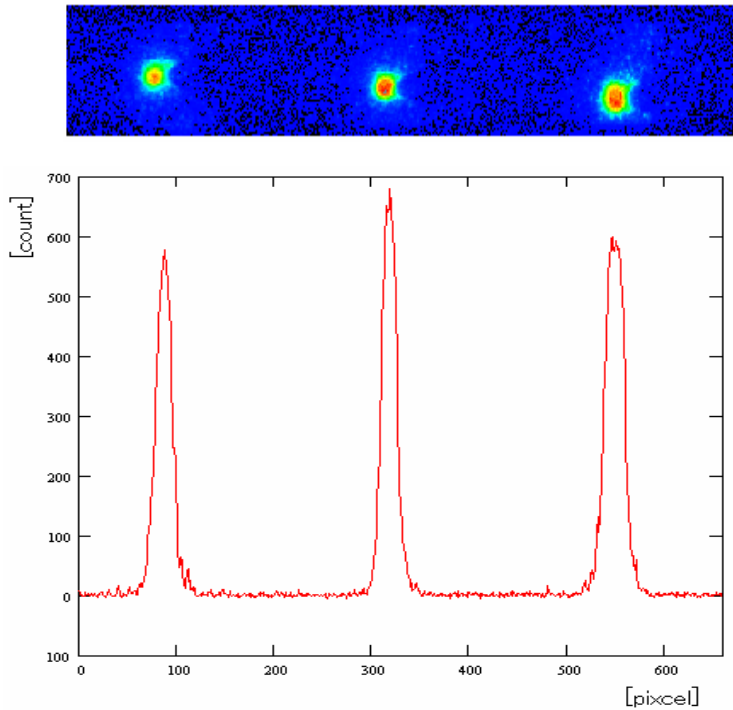


遮蔽体→ダイレクトに検出されるはずの自発光X線(低エネルギーX線)とノイズとなる高エネルギーX線の両方をカットする

反射体→自発光X線(1~3.2keV)を反射させる
(スペクトル幅を持ったX線を高効率で反射させるために全反射ミラーを用いる)

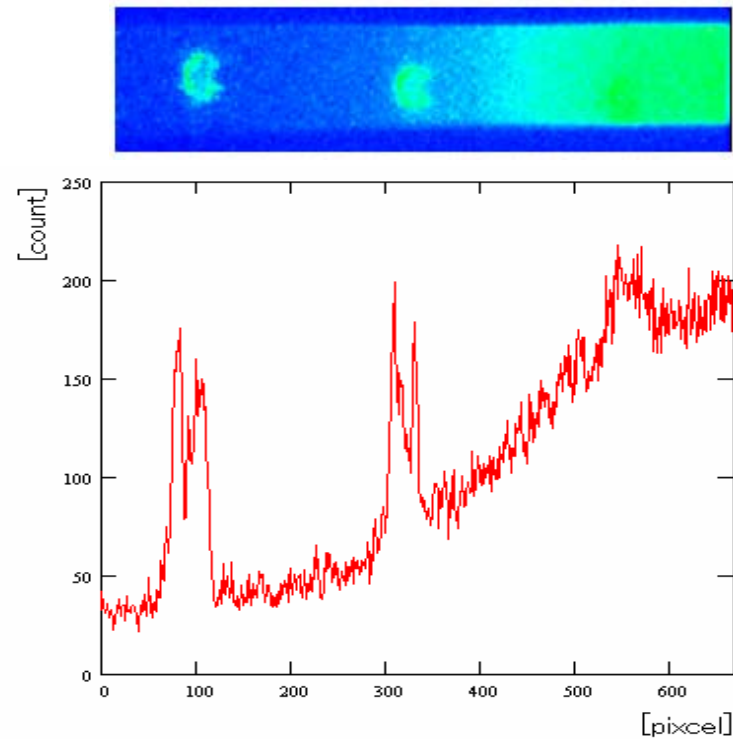
遮蔽体と反射体の仕様について考える

計測に必要なS/N比から決まる遮蔽体と反射体の要求性能



PW無し最大圧縮時(暗電流ノイズ15)
 $S/N=628/15 \doteq 40$

十分な計測をするためにはS/Nが10程度必要



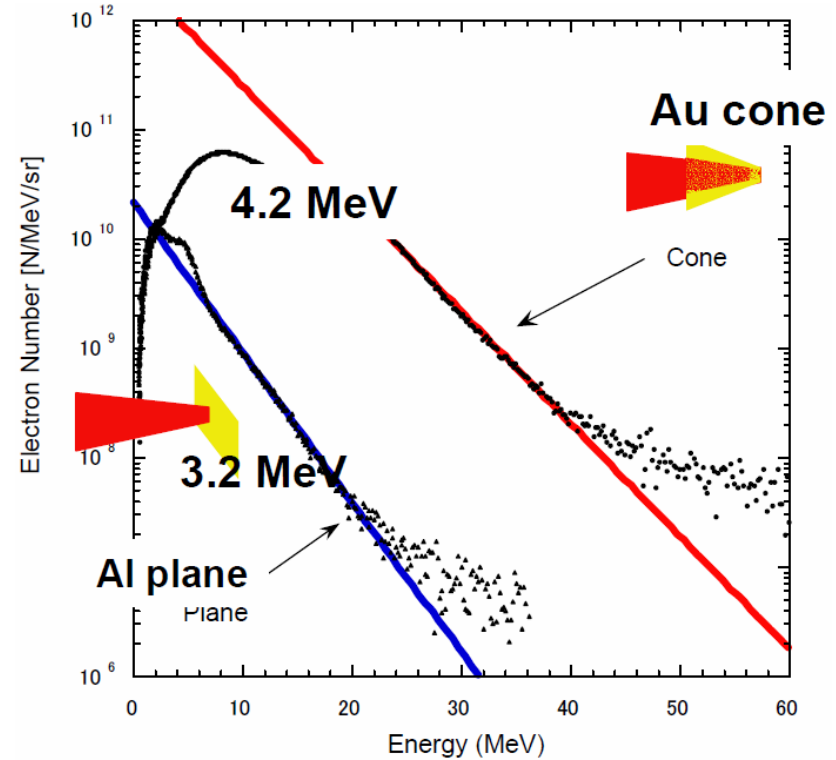
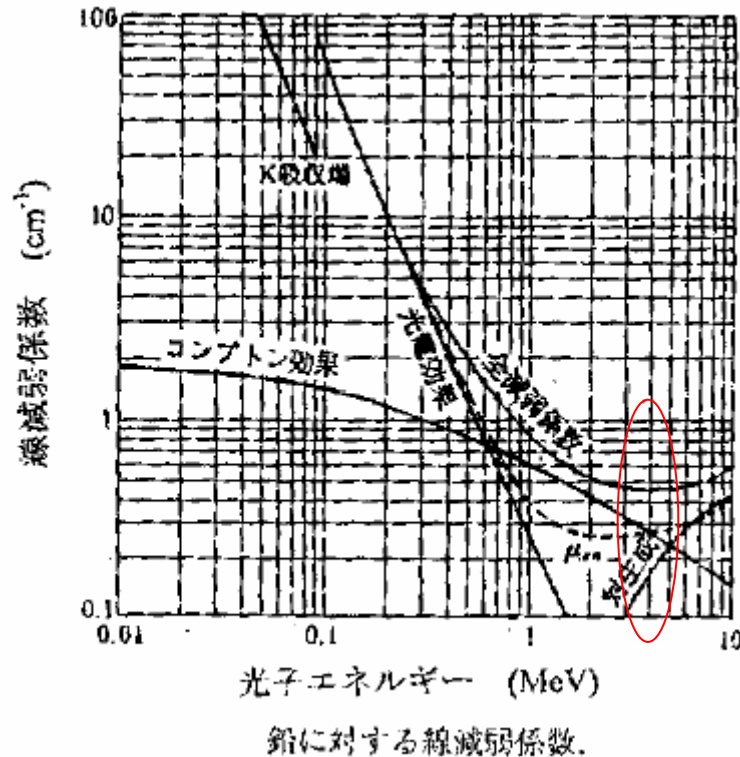
LFEXレーザー照射時、従来の約40倍の
 発光が予測される

$$S/N = \frac{628 \times R}{\sqrt{(200 \times 40) \times X + 15^2}} \doteq 10$$

必要条件 { 減衰率X: 2.5×10^{-2} 以上
 反射率R: 30%以上

遮蔽体の仕様

4.2MeVの高エネルギー電子が発生する
 →同程度のエネルギーまでの制動放射X線
 が発生する



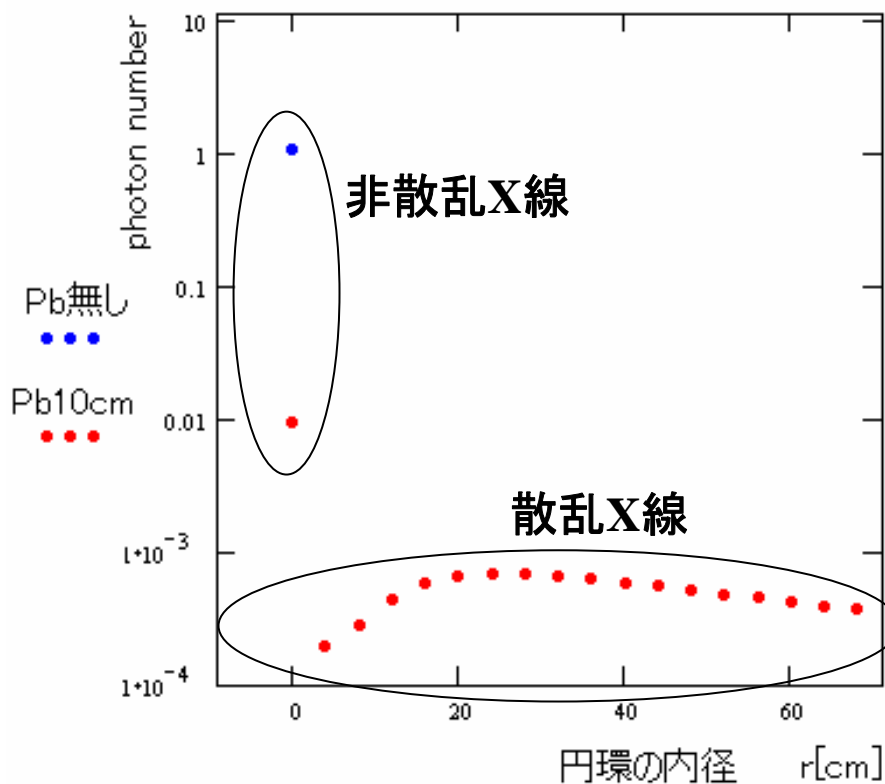
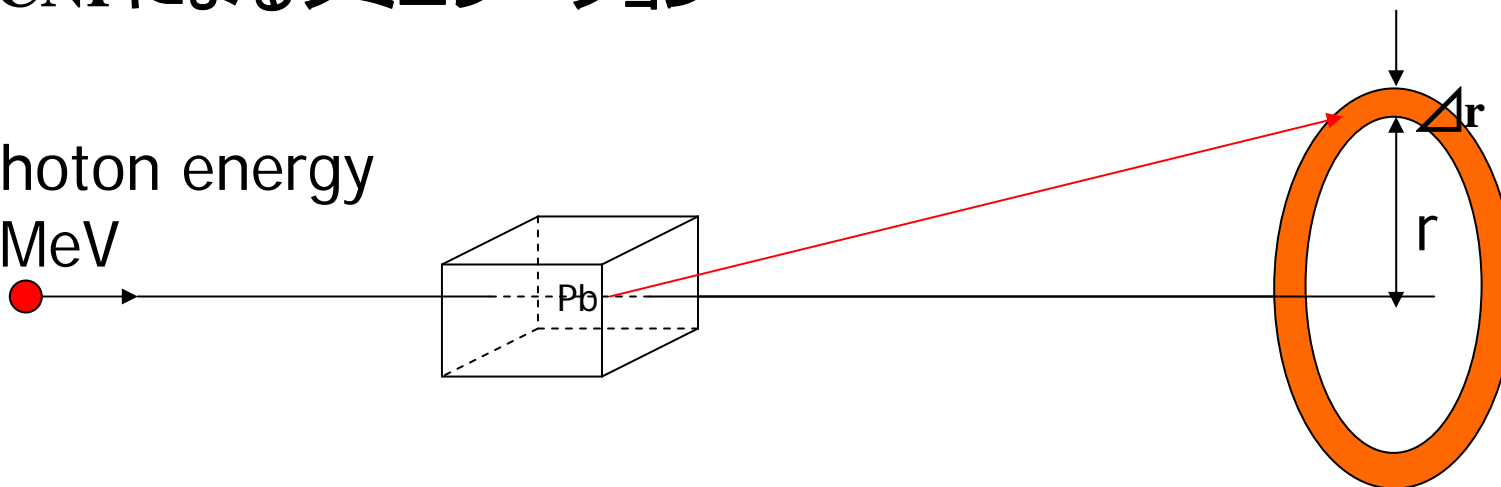
このエネルギー領域では主に
 コンプトン効果が支配的

↓

コンプトン散乱されたX線がCCDに
 入射してノイズとなる可能性がある

MCNPによるシミュレーション

photon energy
4MeV

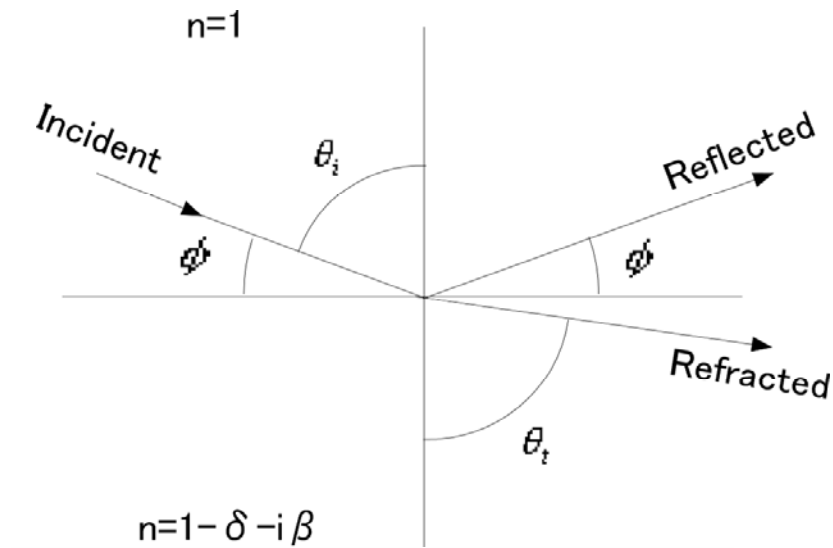


散乱成分がCCDに入射するのは
 $r < 1.3$ [cm]以下の場合

コンプトン散乱されたX線はCCDには
ほとんど入射してこない
(非散乱X線が重要になってくる)

↓
非散乱成分を100分の1に落とす
には鉛10cmが必要となる
(条件クリア)

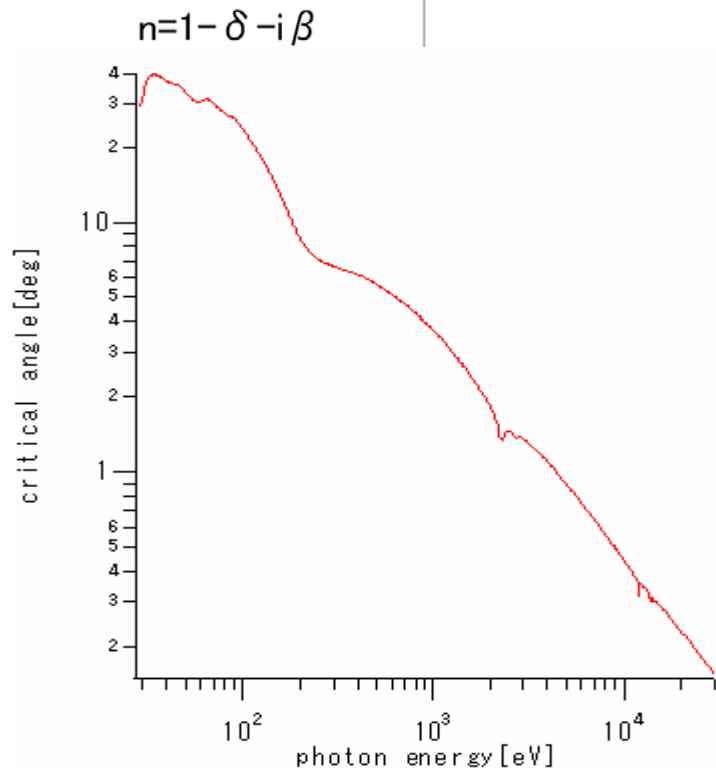
全反射ミラーでのエネルギー弁別の原理



光が屈折率の異なる二つの物質の境界に入射すると反射(トムソン散乱)と吸収が起こる

入射光子のエネルギーで決まる臨界角 (critical angle、 ϕ_c)より浅い視射角 ϕ で入射するそのスペクトルに対しては高い反射率を得ることが出来る

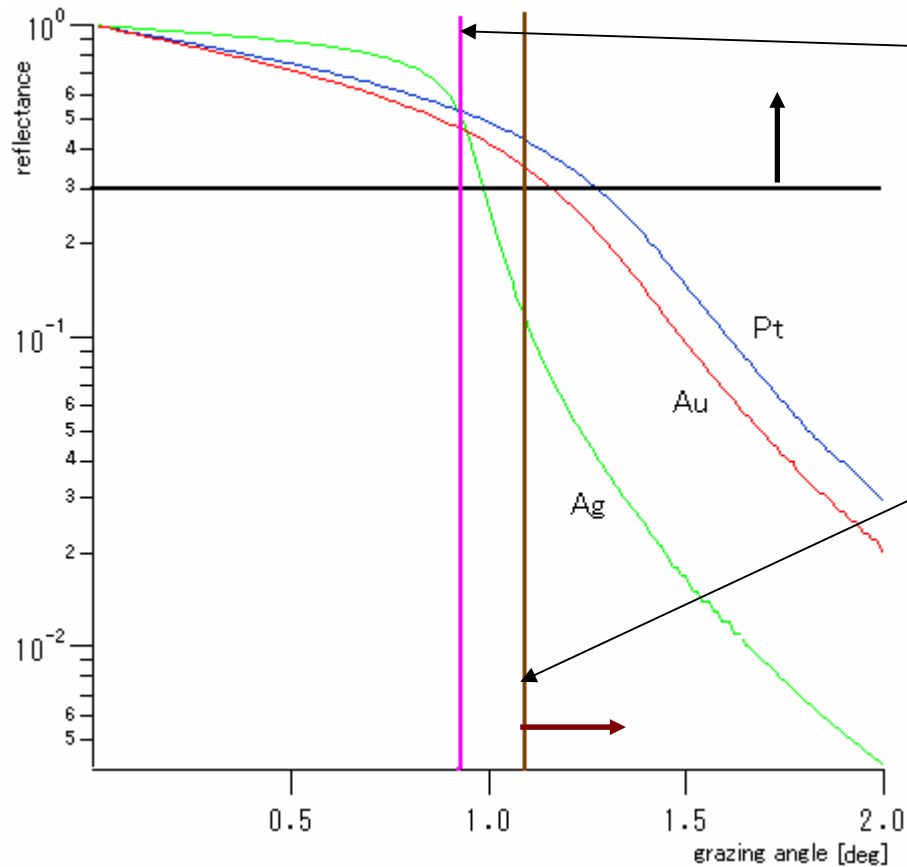
$$\text{臨界角 } \phi_c \doteq \sqrt{2\delta}$$



臨界角は一般的に高エネルギー領域になるにつれ小さくなる

ある視射角 θ で入射したスペクトルを持つ X線はこの視射角 θ より大きい臨界角を持つ低エネルギー成分だけが高度な反射率を得る

反射体の仕様



0.9[deg]以下の視斜角ではAgが良い
0.9[deg]以上は視斜角ではPtが良い

反射率30%以上

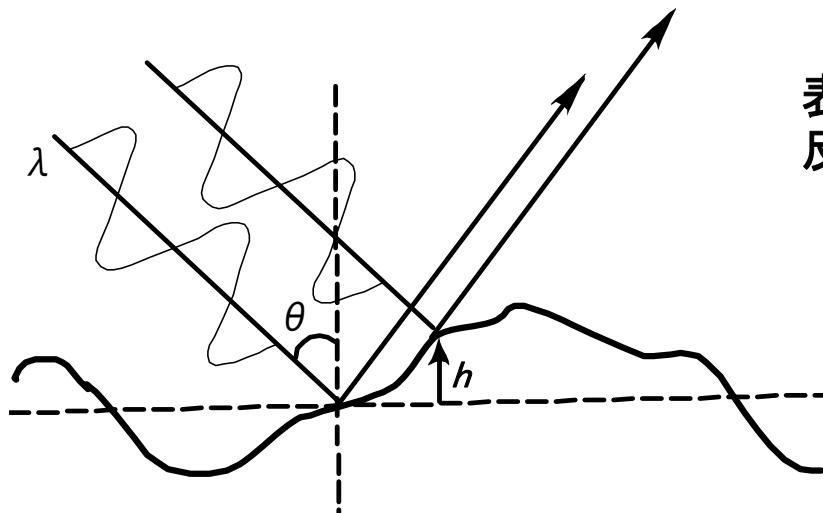
鉛を2つのミラー間に配置させるためには
視斜角を1.1度以上にすることが必要

1.1 [deg]以上で反射率が最も高い
白金を使用する

1.1[deg]で反射率30%以上を達成
している(条件クリア)

3.2keVのX線に対する反射率の角度依存性

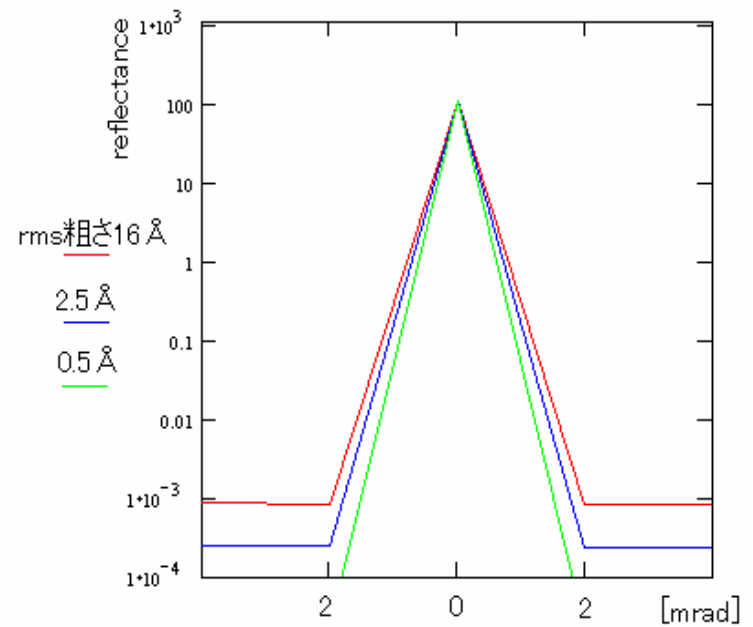
ミラー仕様2 表面粗さ



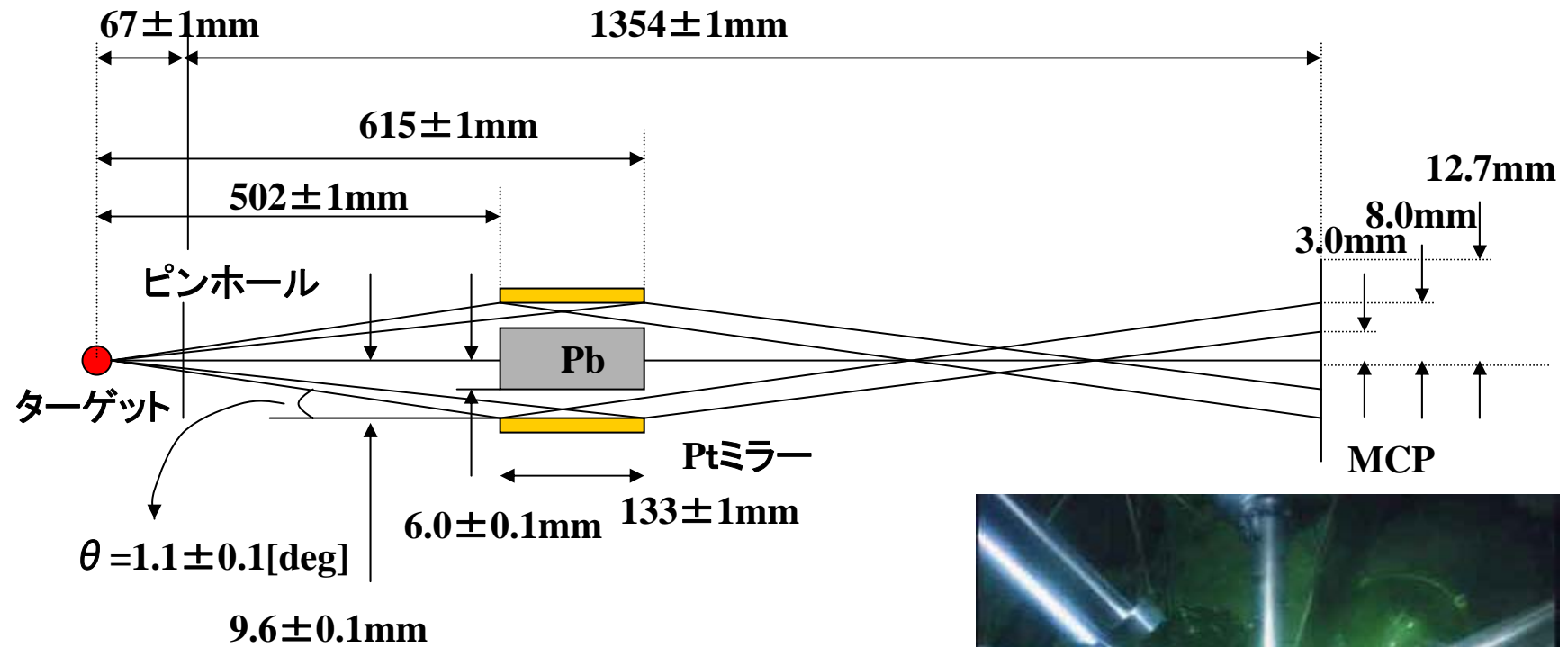
表面粗さによって正反射方向を中心に
反射X線は広がるため、反射率が低下する

表面粗さrms16 Åの白金ミラーを用いると
反射率は40%

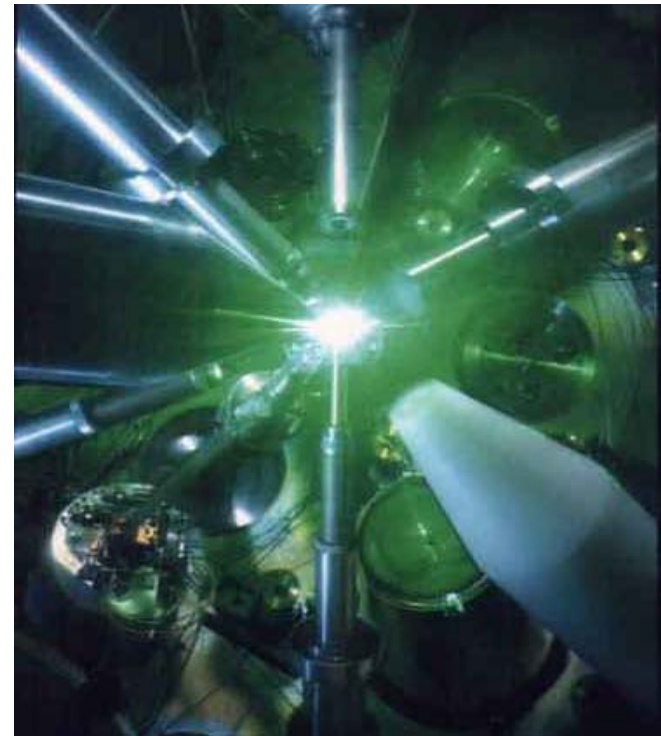
信号量は約2/5になる



基本設計



- 決定パラメーター
- ①鉛10cm
 - ②Ptミラー
 - ③自発光X線のミラーに対する視射角 1.1 [deg]

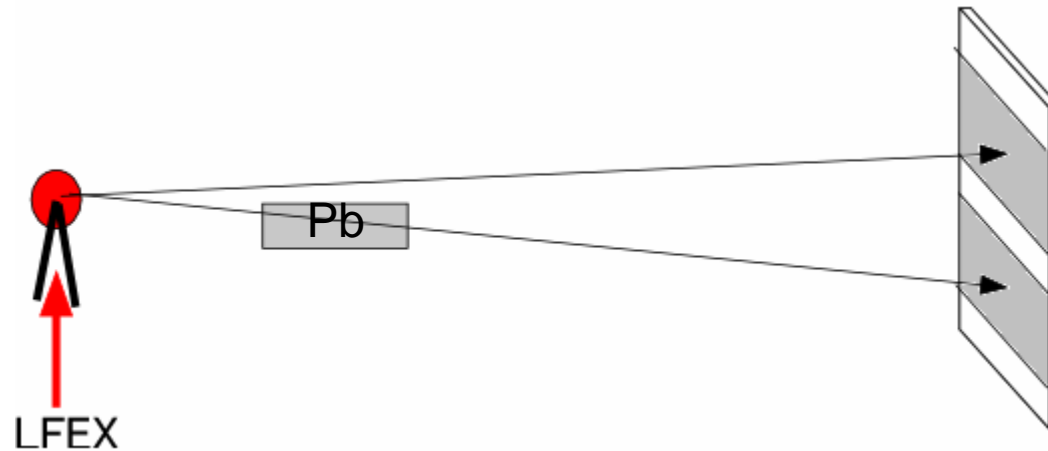


まとめ

- ・高速点火実験において困難となっていたダイナミクス計測を行うために全反射ミラーを用いた手法を提案した
- ・必要となる鉛と反射ミラーの仕様を決定し計測器の基本設計を行った

今後の展開

- ・7月~8月頃のLFEXの出力調整実験で鉛の遮蔽の能力テスト実験



- ・来年年明け頃予定されているLFEXを用いた高速点火実験で全反射ミラー付X線フレーミングカメラを用いた計測を行う