

Detection scheme for commissioning of Laser Compton Light Source

2014.4.14

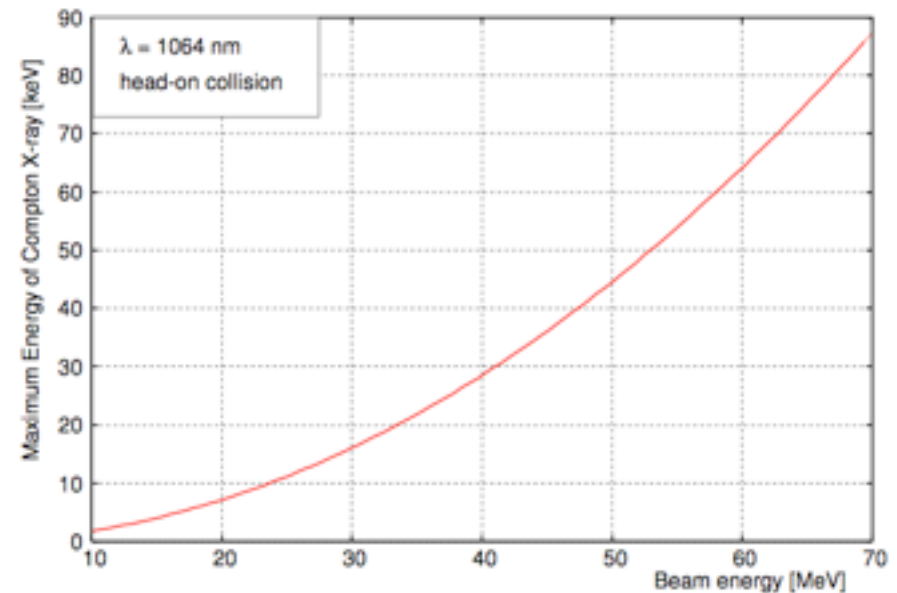
cERLコミッションング打ち合わせ
本田洋介

- 2014年度のcERL-LCLSの目標
 - 2014年度中に最初のInverse Laser Compton信号を確認する。
 - X線収量の絶対値は重視しない。(どのみちこの時点でのビームパワーでは線源としての実用性は無い。)
 - スケールして(ビーム電流、レーザーパワー、デュティなどの)議論が出来れば良い。
- というのも
 - 限られたビーム運転時間のなかで、他にも優先度のある事項がある。(高電荷運転調整、大電流化に向けて、等)
 - 最終的にはこれらがLCLSの性能を決めることになる。
 - 最終的に有用な光源を完成させるには、現時点ではできるだけ速やかにILCを実現して、終わるのが良い。
- ここで検討すること
 - 最初に信号を確認するという目的に適した検出系のセットアップ
 - 2015年1月~の運転の準備として、2014年5,6月の運転でやっておくべきこと
- 注
 - ここで使った図は、坂上氏の博士論文(2009)から切り貼りしたもの。

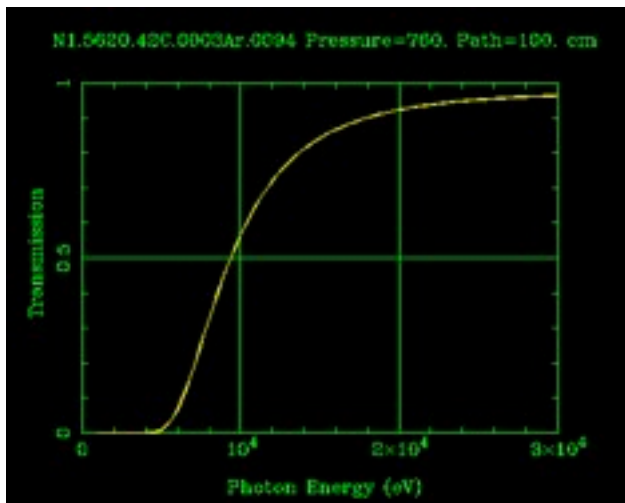
生成されるX線のエネルギー

- パラメータ(変更する可能性は無い)
 - 電子ビーム：E=20MeV ($\gamma=40$), レーザー： $\lambda=1064\text{nm}$, 衝突角18度
 - 生成されるX線は、最大7.0keV。
- X線エネルギーかなり低い。
 - 大気で1mとばすと、1/3になる。
 - アルミ窓0.2mmで、3%になる。
 - ベリリウム窓0.2mmなら、95%。
- 検出器
 - できるだけ真空でつながが
 - 交換したりしたいなら、Be窓で仕切る
 - Be窓は低エネルギーバックグラウンドカットにもなる

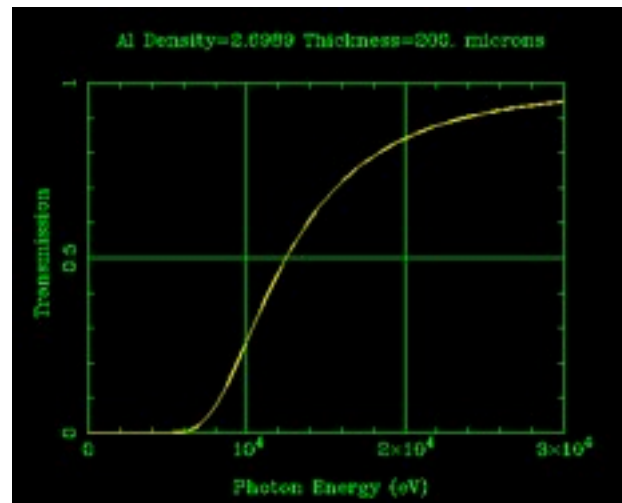
$$E_s = \frac{4\gamma^2 E_i}{1 + (\gamma\phi)^2}$$



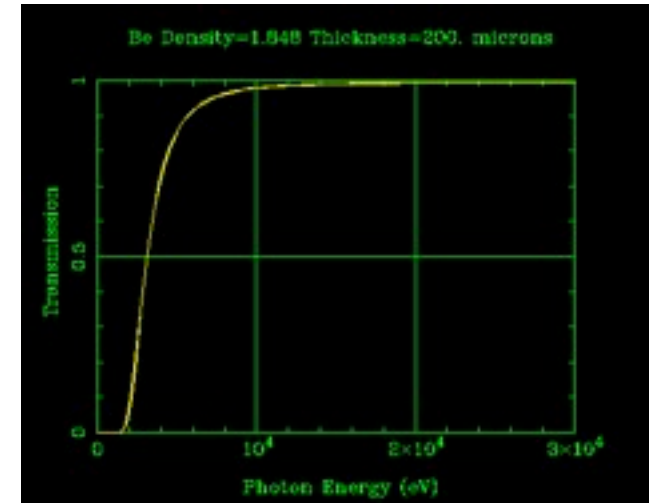
大気1m



アルミ0.2mm

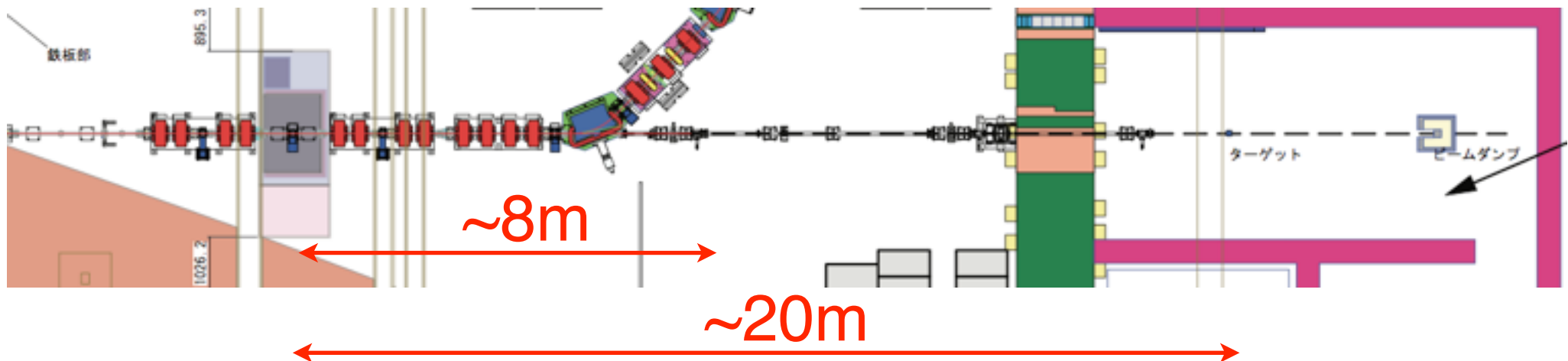
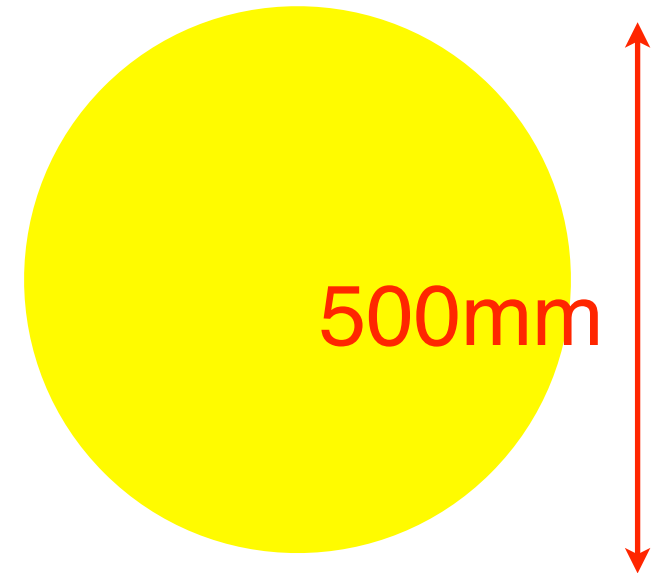
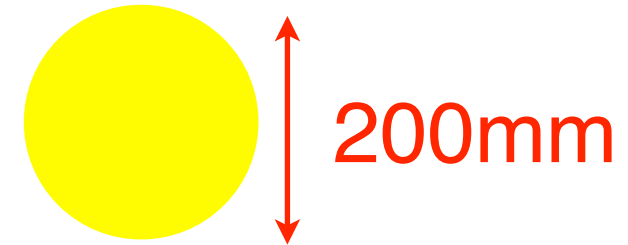


ベリリウム0.2mm



レイアウト

- X線の発散角は、 $1/r$ ($r=40$ なので、 25mrad)
 - $1/r$ のところでエネルギーは半減、全量の半分
 - 実質 $1/(2r)$ くらいか。
- 検出器を置く場所によって、 $1/(2r)$ サイズは、
 - 加速器室内できるだけ近くだと、距離8m。直径200mm。
 - 利用室内だと、距離20m。直径500mm。
- 検出器の径はどうせ10mm程度とすると、この一部しか捉えられない。近い方が、信号6.25倍
- ビーム軸は気にする必要は無い。



X線信号の概算

- LUCX(坂上博士論文)
- レーザー
 - 357MHz
 - 40kW (burst amp.)、0.1mJ/pulse
 - 7ps (fwhm)
 - $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
 - 20deg. crossing
- ビーム
 - 35MeV
 - 0.5nC/bunch
 - 5ps (rms)
 - 357MHz、100bunch/train
 - $200\mu\text{m}$ (H) \times $60\mu\text{m}$ (V)
- 検出
 - 25keV
 - 全散乱、10000 photons/train
 - 2.3m下流で5mm直径(1/14 γ)で。200ph/train
- cERL
- レーザー(赤城)
 - 162.5MHz
 - 40W, $\times 1000 = 40\text{kW}$ 、0.2mJ/pulse
 - 7ps (fwhm)
 - $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
 - 18deg. crossing
- ビーム
 - 20MeV
 - 0.001nC/bunch
 - 3ps (rms)
 - 1300MHz、1300bunch/train(1 μs train)
 - 実質162.5MHz(1/8だけが当たる)
 - $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$?
- 検出
 - 7keV
 - 全散乱、LUCXの1/100 (1 μs train)
 - 1ms trainとして、100000ph/train
 - 8m下流で直径30mmとすると、1/13 γ
 - 1ms trainとして、2000ph/train
 - 20m下流だと、その1/6.25
 - 1ms trainとして、300ph/train

バックグラウンド

- 前頁の信号見積もり
 - 2000ph/1ms-train (8m 加速器室内)
 - 300ph/1ms-train (20m 2次ビームライン)
- 最初、ベストの状態で当たらないとしても、1/10として、200 or 30ph/train
 - バックグラウンドさえ少なければ見つかるはず。
- cERLの場合のバックグラウンド
 - 有利な点
 - アークで落ちるはず(LUCXは直線、STFはシケインで大分おちた。)
 - RFガンと比べてカソード電圧低いので暗電流は小さいはず
 - ダンプから遠い。ダンプエネルギーが低い。
 - 不利な点
 - 信号に寄与しない無駄なバンチが7/8
 - 直線部長いが、ブレムスも $1/r$ で拡がるので、そんなに効かないはず
 - 信号エネルギーが低い

ビーム

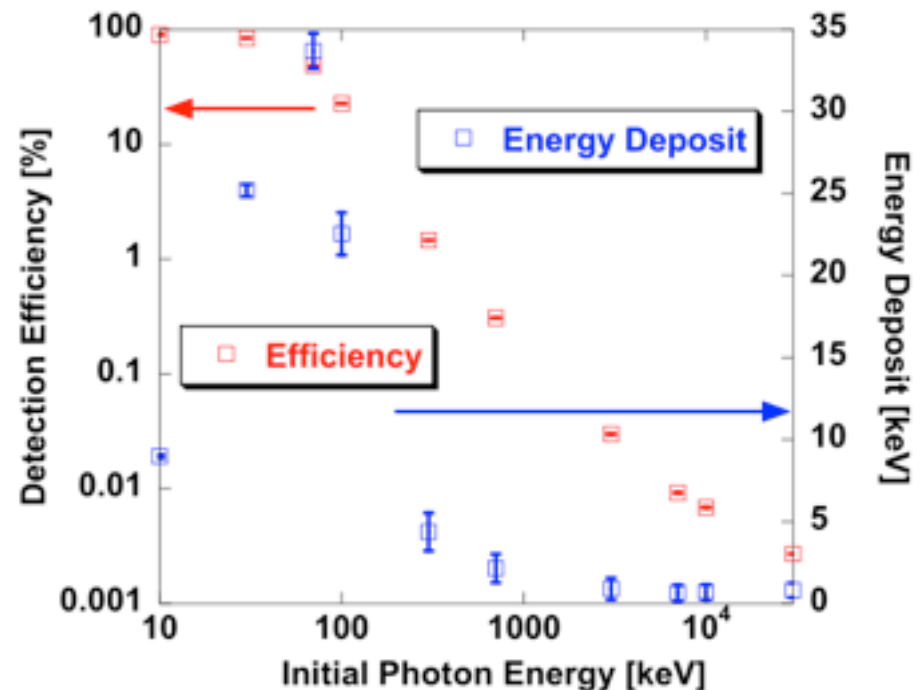
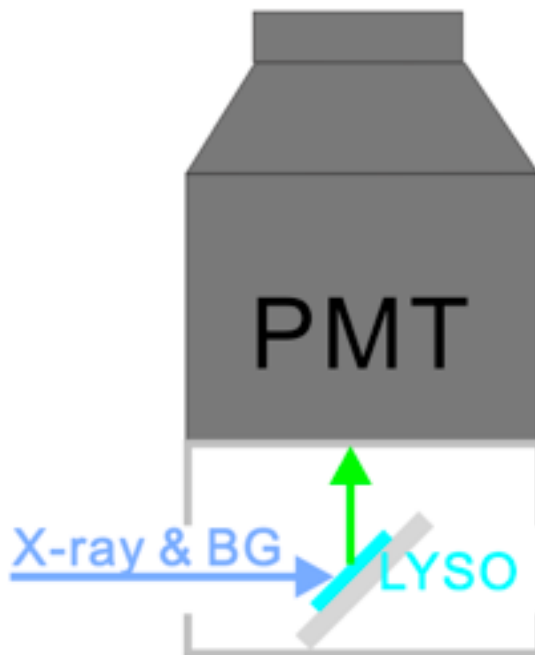
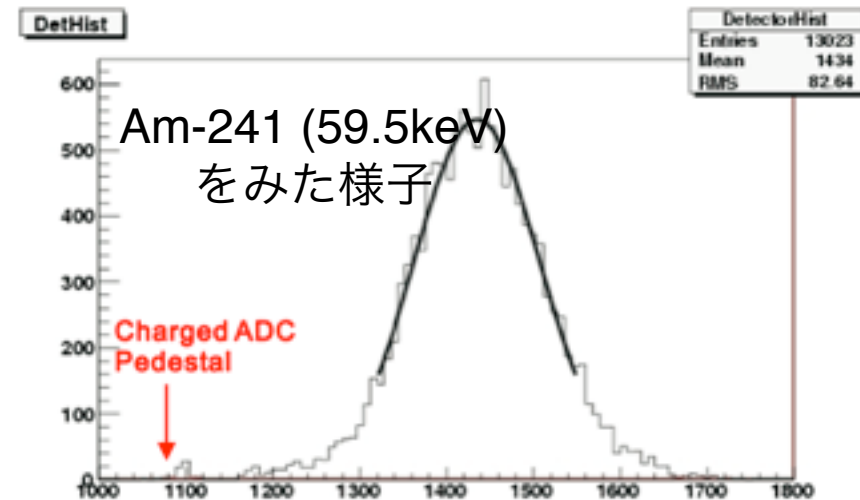
- 前頁の見積もりから、
 - 1pC/bunch, 1300MHz, 1ms
 - 1000nC/train。5Hz として、平均5 μ A、ほぼ今の制限と同等。
- 調整手順
 - (いつもの調整モード)1pC/bunch, 1 μ sで、スクリーンを使って調整
 - そのまま1ms-trainに変更して、変わっていないと信じる。
- ビーム側として調べる必要があること
 - BPM等の信号から、trainを延ばしても、軌道が変わっていないことを確認
 - 減速ビームが加速空洞を通過しても、軌道は影響を受けないことを確認
- ところで、
 - 絞る調整はどうか。
 - 衝突点のスクリーンモニタの分解能は定量的に物を言うには不十分。

測定時間の見積もり

- 1trainで有意に信号が有る場合と、無い場合で、検出のスキームは変わる。
 - 有る場合、ビームトリガ (こっちの方がやりやすい。ミニмумバイアス)
 - 無い場合、信号トリガ
- 前頁の見積もりから、
 - 1pC/bunch, 1300MHz, 1ms
 - 200 or 30 ph/trainの信号
- 統計
 - 360度(770ps)を、3psステップで埋めるとすると、250区分。
 - 各点10データとして、5Hzだと、10分。
 - これを位置スキャン100 μ mステップ、+-数点として、1時間。
 - レーザー強度が安定性
 - 常にピークにあればそれでよいが、
 - 100%強度が振動して、実効的に20%しかピークにいない、とかだと、
 - バックグラウンド
 - $S/N > \sim 1$ なら、10データもあれば十分。(1点で十分)
 - $S/N \sim 1/10$ なら、100データ必要。

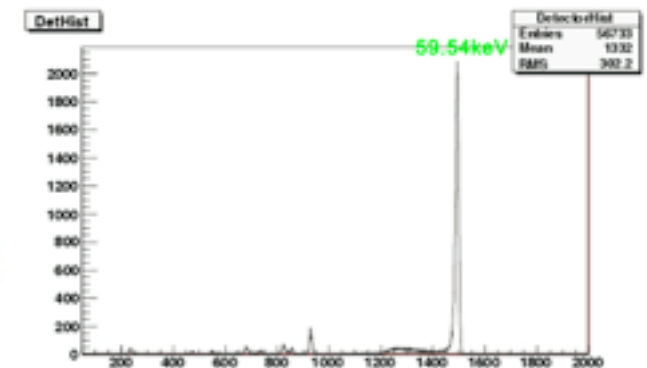
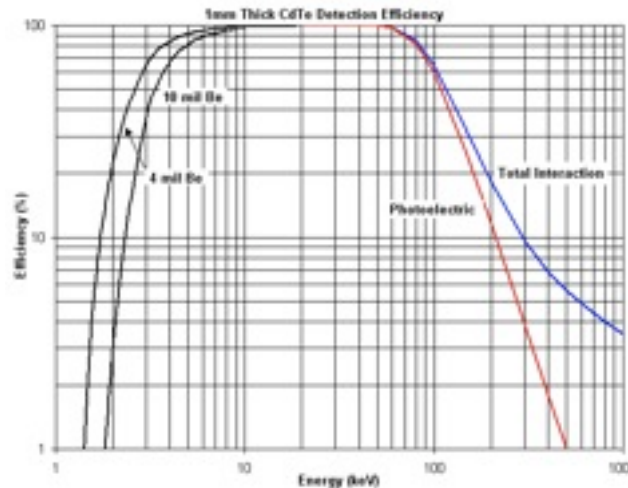
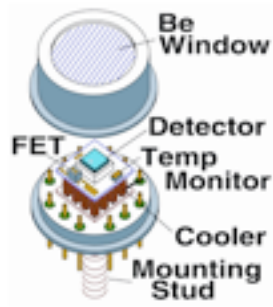
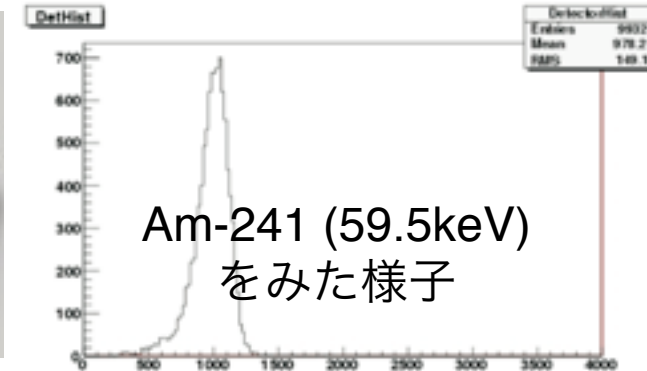
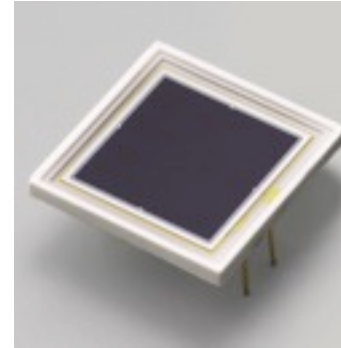
検出器(1)

- シンチレータ型の検出器
 - もともと、高エネルギー実験の経験のある人にとってはなじみがある
 - 大気中で出来るので、あれこれ改良がやり易い
 - 大きなサイズのものが出来そう
- 設計のポイント
 - 薄くすることで、高エネルギーバックグラウンドの感度を下げる
 - LYSO:Ceシンチレータ
 - 薄いものがカタログ製品としてある $150\mu\text{m}$
 - 時定数が短い (40ns)
 - 発光量が多い, 検出しやすい波長428nm (YAG:Ceの5倍)
 - PMTは軸から外してバックグラウンドを避ける



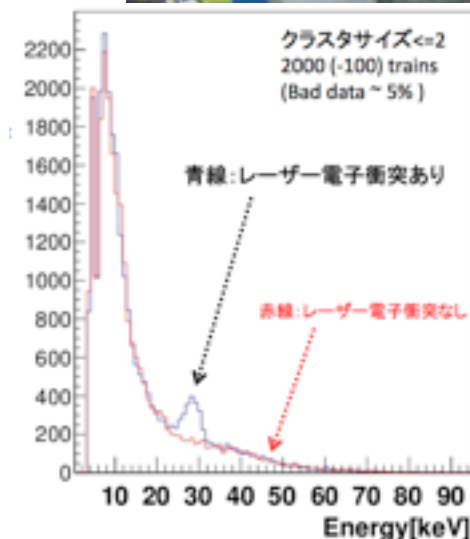
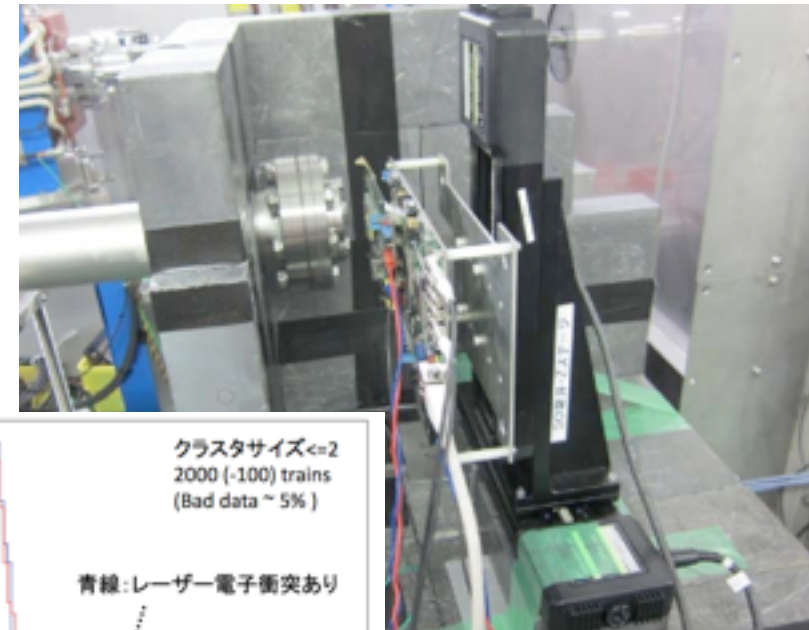
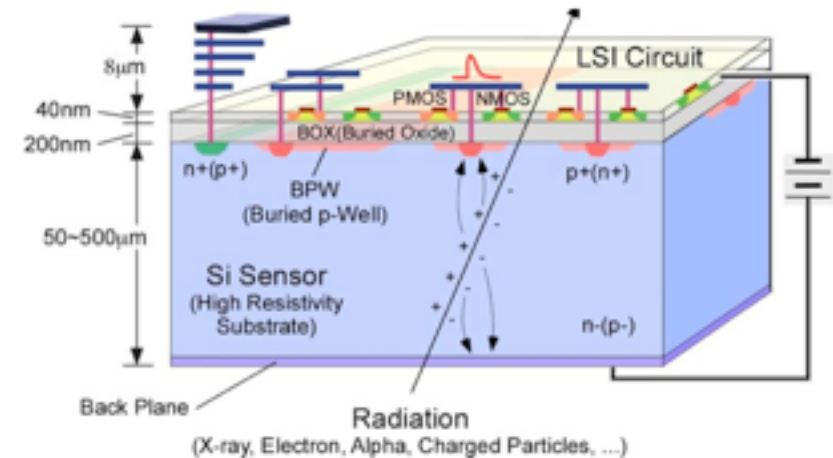
検出器(2)

- 半導体型の検出器
 - 検出効率ほぼ100%
 - シンチレータと比較して、バンドギャップ(eV)で定まる励起単位が小さいため、統計により分解能が良い。
 - 大きなサイズのものは難しい
 - 低ノイズのアンプが無いと、特長を活かせない
- 種類
 - Si-PIN (Hamamatsu S3204-08)
 - できるだけ大きなもの 18mm x 18mm
 - 大きいと暗電流も大きくなる
 - 低ノイズのチャージアンプ
 - LUCXではビームダンプ由来の中性子起源のバックグラウンドの影響が大きい
 - Cd-Te (Amptek XR-100T-CdTe)
 - サイズは小さい 3mm x 3mm
 - ペルチェクーラ付きの売り物がある
 - Siよりもっと分解能が良い



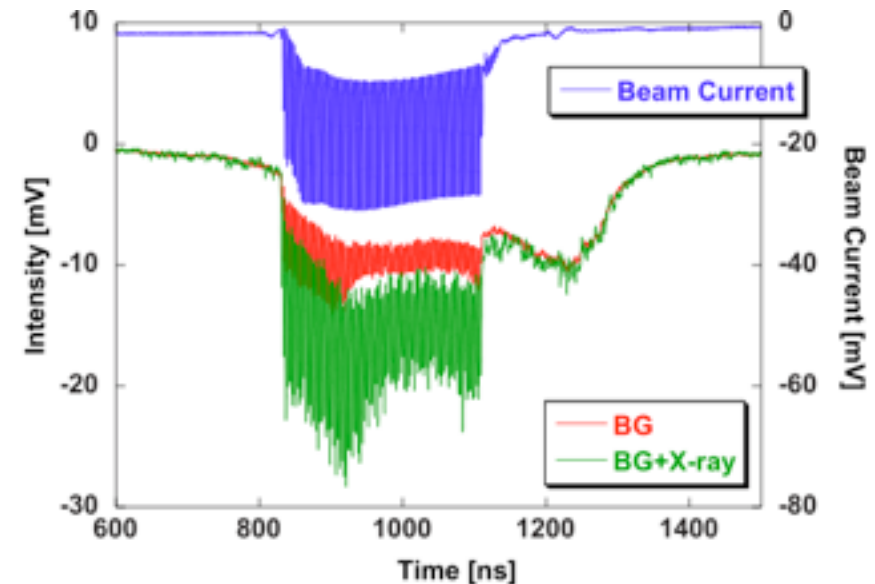
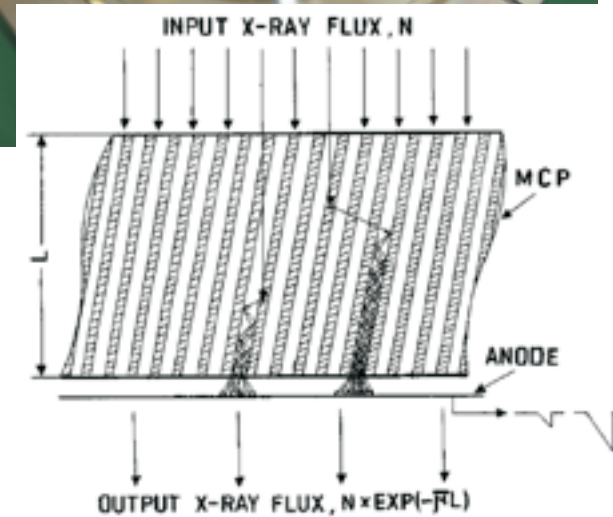
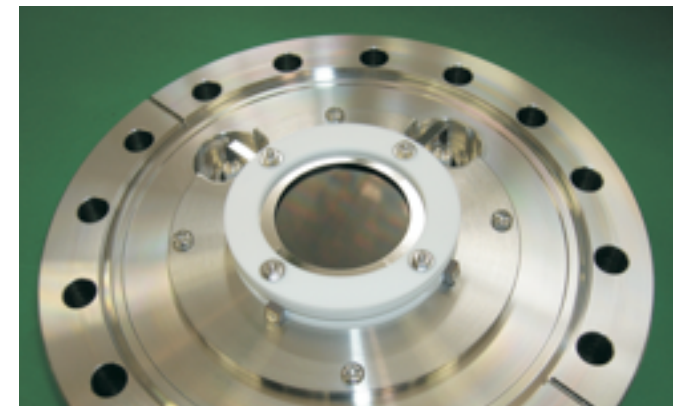
検出器(3)

- 半導体検出器を数多く並べる
 - 非常に小さな($17\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$)Si検出器が、
 - たくさん(832×512 ピクセル)ある。(いまのところ、まだ小さい。10mm程度のサイズ)
 - 個々のピクセルは小さいので、暗電流は小さい、バックグラウンドのレートも小さい。
 - 個々のピクセルはシングルフォトンカウントなので、エネルギー弁別が可能
 - 素子上で処理回路まで備えられている
- 複雑なゆえに
 - 読み出しサイクルが遅い
 - 加速器側のデータと同期読み出しができない
- 出てくるデータ
 - ピクセル毎のエネルギーの分布が得られる
 - X線エネルギーに対応するピークが見える。
 - バックグラウンドフリーだったはずだが、STFでは同期できていなかった(レーザー位相情報を無視して処理)、性能を活かせず。



検出器(4)

- 結局、真空中で扱う面倒さはあるものの、あまり考えずとも使えるものとして、Micro channel plate (MCP)
- 特長
 - 高エネルギーで感度が落ちる為、ある程度のエネルギー弁別性。
 - 増幅機能を持っているので、アンプを作る必要が無い。
 - それなりに大きい物が入手可能。
 - 時間分解能良い。
- Hamamatsu F2224-21
- 検出効率
 - スカスカなので効率は低い。10~50keVで5%
 - 検出効率は1か0かという意味ではなく、信号の大きさに相当
 - 高エネルギーで感度が下がる、例えば、662keVで0.21%
- 形状
 - 検出エリア 直径30mm
 - ICFフランジマウント済。(マウント無しの物も売っている。

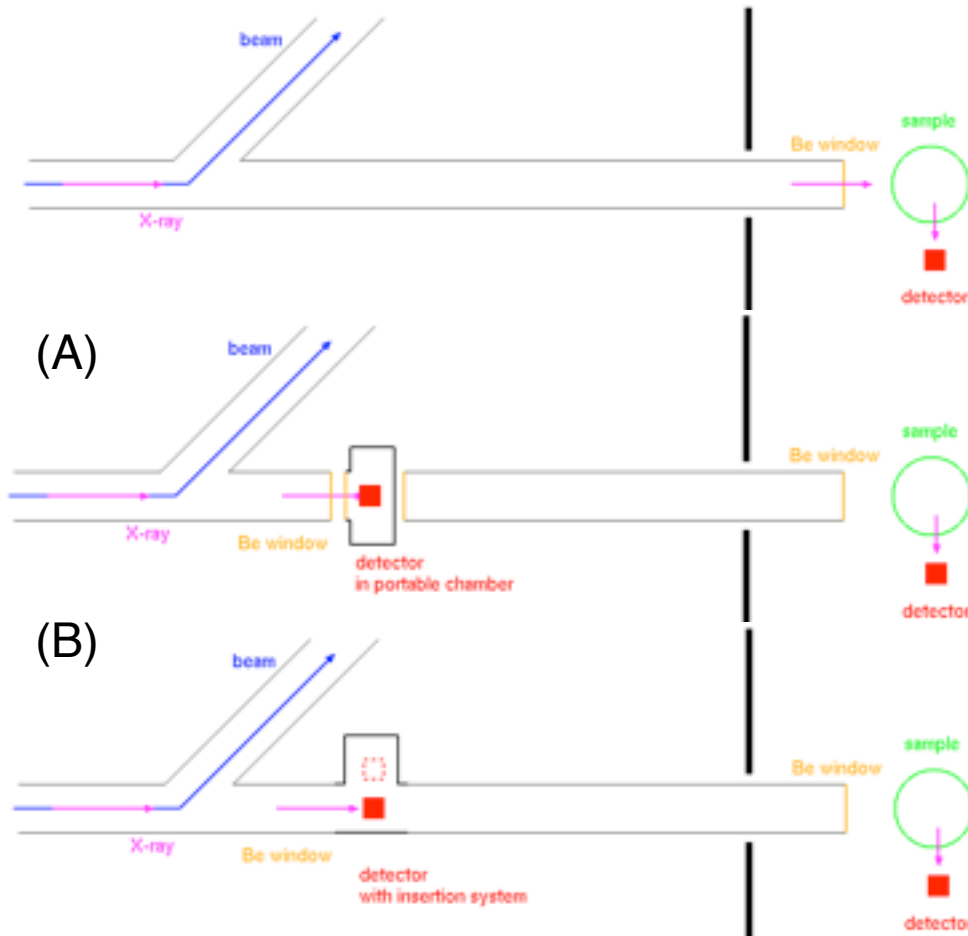


検出器まとめると

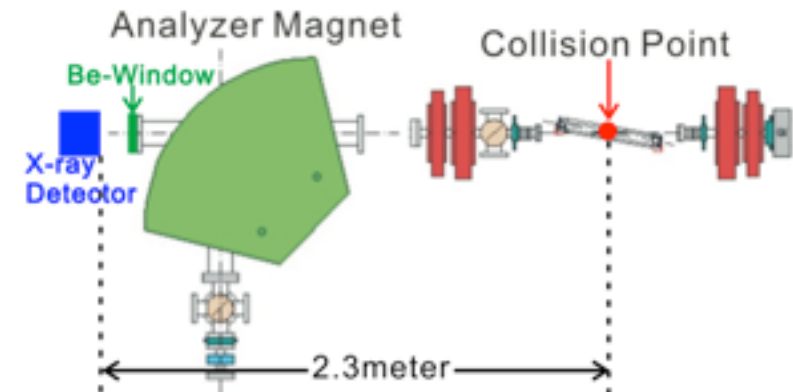
- 以上の検出器は、どれもX線信号は確認できている。
- 今の場合、信号が少なく、広がっていることから、サイズは必要だろう。
- 凝った事をやる余裕も無いだろう
- 良さそうな選択は、
 - MCP
 - ほとんど売り物
 - 真空関係を用意すれば良い。
 - 検出効率は5%なので、なんとなくもったいない。(とはいっても、検出しない訳ではなく、信号が小さいということ)
 - LYSO
 - PMTと組み合わせて装置として作る必要がある
 - 多数並べるなどして稼ぐ
 - 検出効率は~100%
- まあ、MCPでいいんじゃないの

検出器のセットアップ

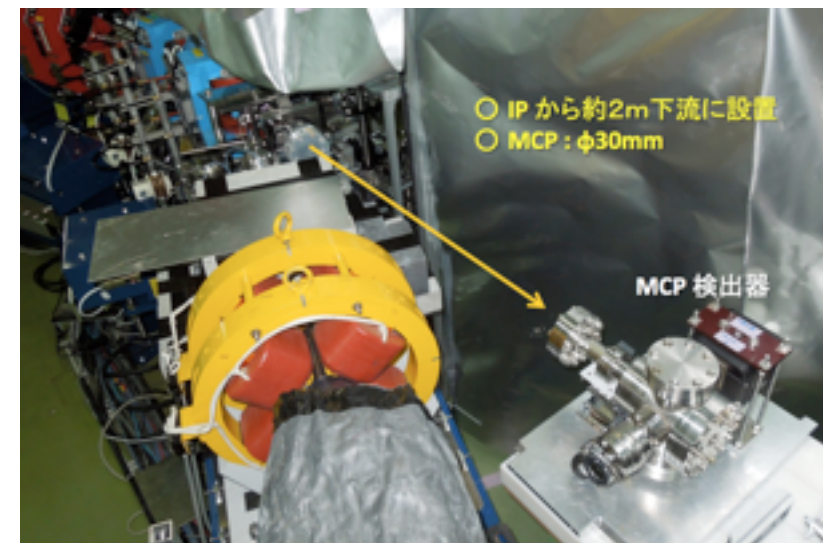
- はじめは、検出器を交換したり、あれこれやる可能性がある。
- MCPは真空中に設置しなければならない
 - 加速器のパイプにそのまま取り付ける(KIK)のも良いが、簡単に取り外してみたり出来ない。
 - MCPを小型のチェンバに仕込んで、Be窓で切り離し、ポータブルとする(LUCX, STF)。
- cERLの場合、2次ビームラインと両立するには、
 - ポータブルタイプを入れる隙間を用意する(A)
 - 抜き差しできるようにする(B)



LUCXでの様子

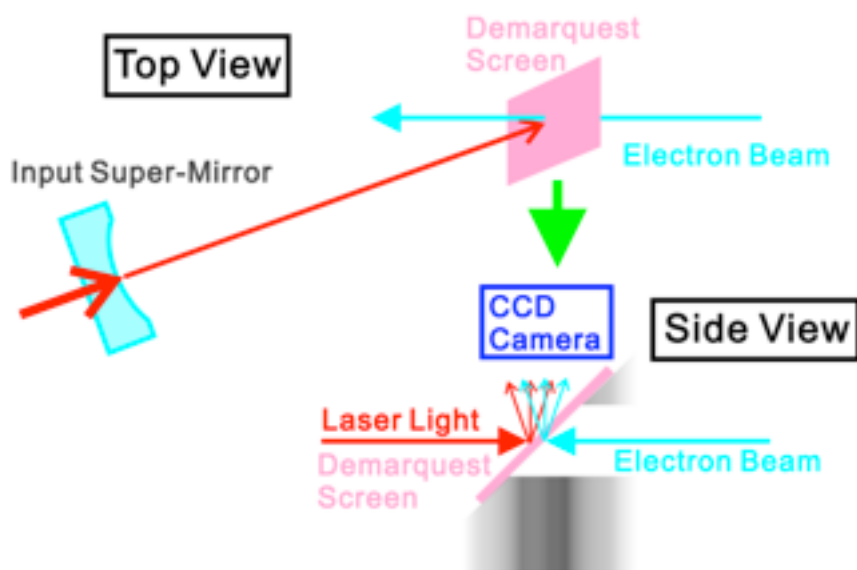


STFでの様子



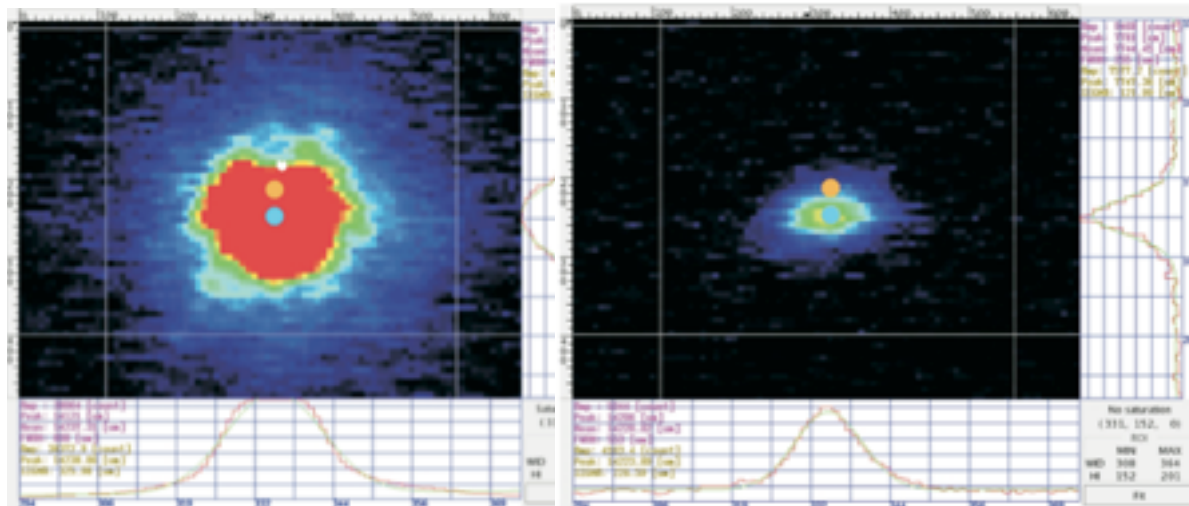
衝突条件の調整

- 電子バンチとレーザーパルスを衝突させるには、
 - 横方向の位置合わせ
 - 相対的なタイミング
 - 検出器とビーム軸の方向
- 実験時にスキャンするパラメータは1つでなければならない。(2パラメータのめくらスキャンは無理)
- 今回の場合
 - 横方向は、衝突点スクリーンモニターで、ビーム像とレーザー像を合わせる。これで最初に信号を見つけるのに十分。最適な状態の1/2とかにはなっている。
 - 斜め衝突なので、水平方向はずれていてもタイミングで見つかる。主に垂直方向。
 - タイミング。CWなので、1.3GHzの位相。これはスキャンする。(フリーラン)
 - 軸方向。1/rから考えて、ずれているはずがない。
- タイミングフリーランで、垂直方向に0.1mmステップとかで何点か動けば、最適条件が見つかるはず。



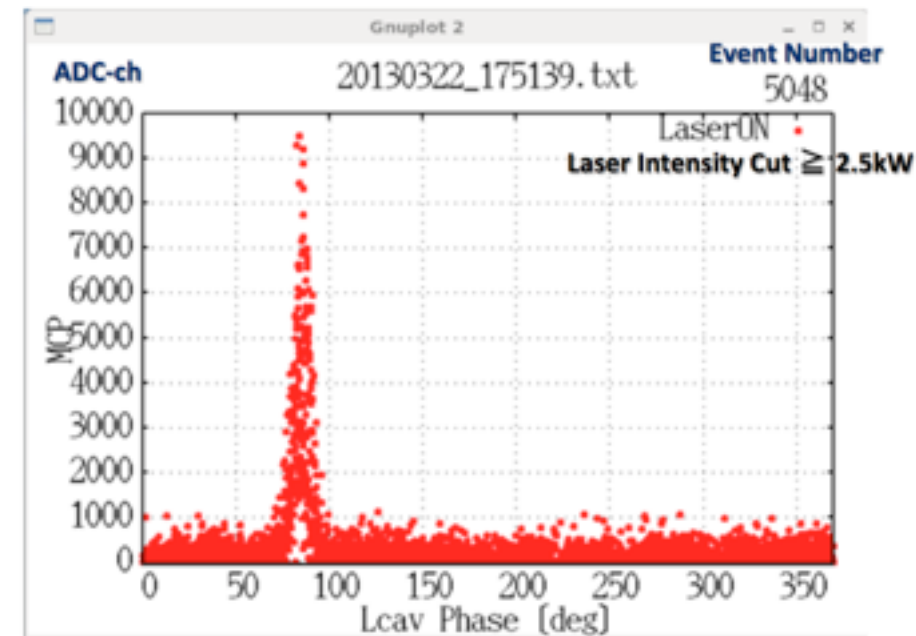
laser

beam



測定データ

- 測定時のレーザー
 - 強度は出来る限りピークに維持しようとするが、ふらつくかも。
 - 位相は、非同期(フリーラン)。
- 同期収集は必須。ビームトリガをだして、以下の物を同時に取得
 - 共振器内のレーザー強度 (共振器透過光フォトダイオード)
 - 電子ビーム関係
 - 強度
 - 位置
 - ビームとレーザーの位相
 - 基準1300MHzと、レーザー発振器の162.5MHzをx8した1300MHzの相対位相
 - 位相検出してI,Q
 - X線検出器信号
- 解析
 - レーザー強度(とビーム強度,位置)でカット
 - 位相と信号でスカッタプロット
 - 特定の位相でエクセスがある
 - STFではバックグラウンドフリー
 - レーザーが安定でバックグラウンドが少なければ問題無い
 - STFでは、レーザーの共鳴が維持できず、はじめ3点/1hourとかしかとれず、その間にビームがドリフトしたり
 - その後、レーザーの剛性を改良して、うまく行った。



まとめ

- レーザーがなんとかなっていれば良い
 - ミラーの問題
 - 40W, x1000、平均パワー40kW
 - ATFではkWでミラーの熱変形
 - 100ppm程度の損失がありそう。
 - 162.5MHz、ピクパワー0.2mJ/pulse
 - LUCXではこの付近のピークエネルギーでミラーダメージ
 - 今のところ、これまでは論外で、きれいな環境で組み立てすれば良さそうとの兆候だが。
 - 安定性
 - 最初は加速器との同期は無しでもなんとかなる。
 - パワーふらつき100%あってもよい、効率50%くらいならなんとかなる。