

Avalanche Photo Diodeを用いた 大型BGO結晶での集光効率の測定

東京大学大学院理学系研究科
牧島中澤研究室

笹野 理

西岡博之、奥山翔、中澤知洋、牧島一夫、奥村暁(ISAS/JAXA,SLAC)

湯浅孝行(ISAS/JAXA)、山田真也(理研)、片岡淳(早大理工)

深沢泰司、花畑義隆、林数馬(広大理)

ほかHXI/SGDチーム

1. ASTRO-Hのアクティブシールド

•2014年打ち上げ予定のASTRO-H

- 軟X線撮像器 (SXI)
- 軟X線分光器 (SXS)
- 硬X線撮像器 (HXI)
- 軟ガンマ線検出器 (SGD)



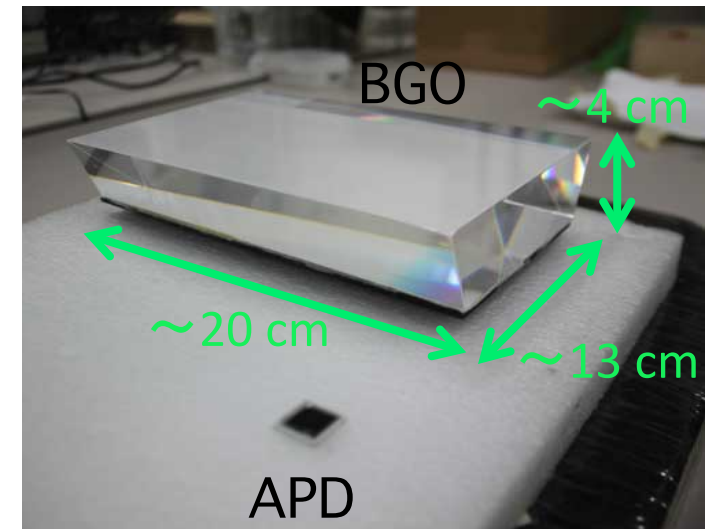
「すざく」HXDから継続してアクティブシールドを使用。

•ASTRO-Hでのアクティブシールド

- BGOを1x1 cm²のAPD一つで読み出し。
- HXI/SGDで計9種類大型BGO結晶を使用。

•BGO+APDアクティブシールドの長短所

- BGOの阻止能が非常に大きい。
- APDは小型でかつ低消費電力。
- BGOの屈折率が大きく、読み出しが困難。
- APDの受光面が小さい。



装置の動作環境-15°Cで、LDが100~150 keV以下が求められる。

2. BGOの集光効率測定

•実験の目的

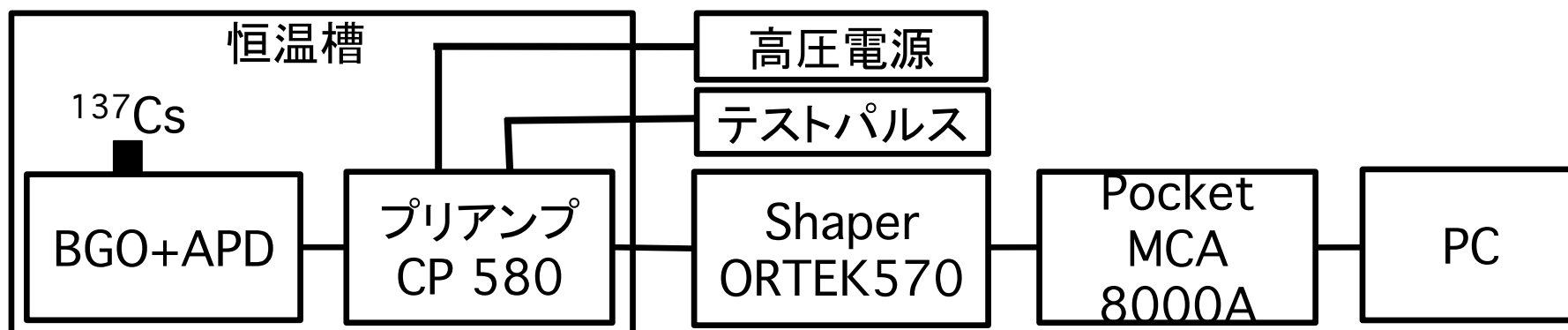
- 様々な大きさの結晶を測定し、大型BGO結晶での集光効率を評価。

•使用したBGOとAPD

- HXI/SGDの開発段階で購入した、様々な大きさの直方体結晶。
- 最小で1 cm³、最大で14x12x3.3 cm³の18通り、結晶を測定。
- APDは衛星搭載品と同じサイズのものを使用。

•実験セットアップ

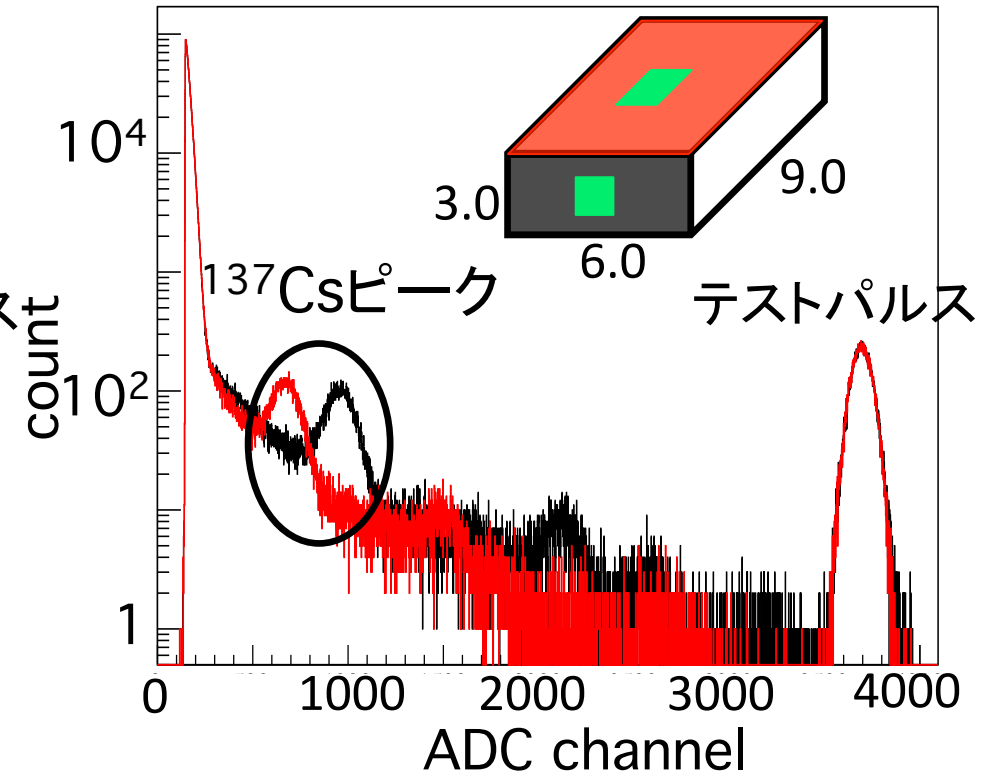
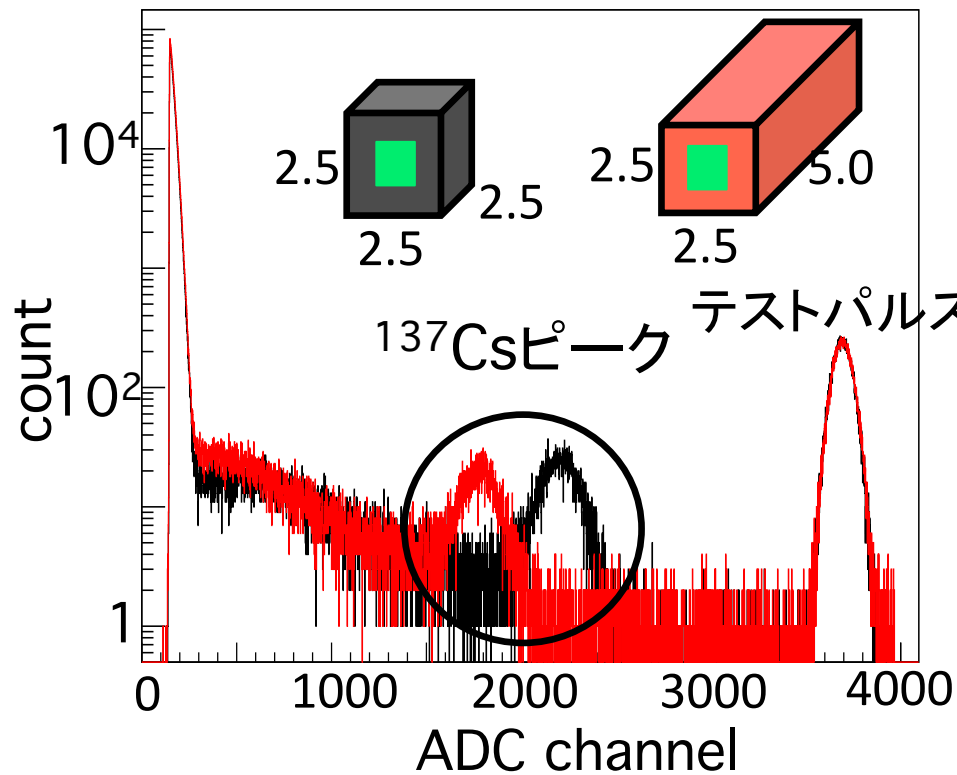
- BGOの反射材としてゴアテックスを使用し、光学グリスでAPDを接着。
- APDをゲイン50にするようにバイアス電圧(~400 V)をかけた。
- 恒温槽+20°Cの条件下で、線源¹³⁷Csの当てた測定を-15°Cに換算。



3. スペクトル

体積 V 依存性

APD取り付け面の面積 A 依存性



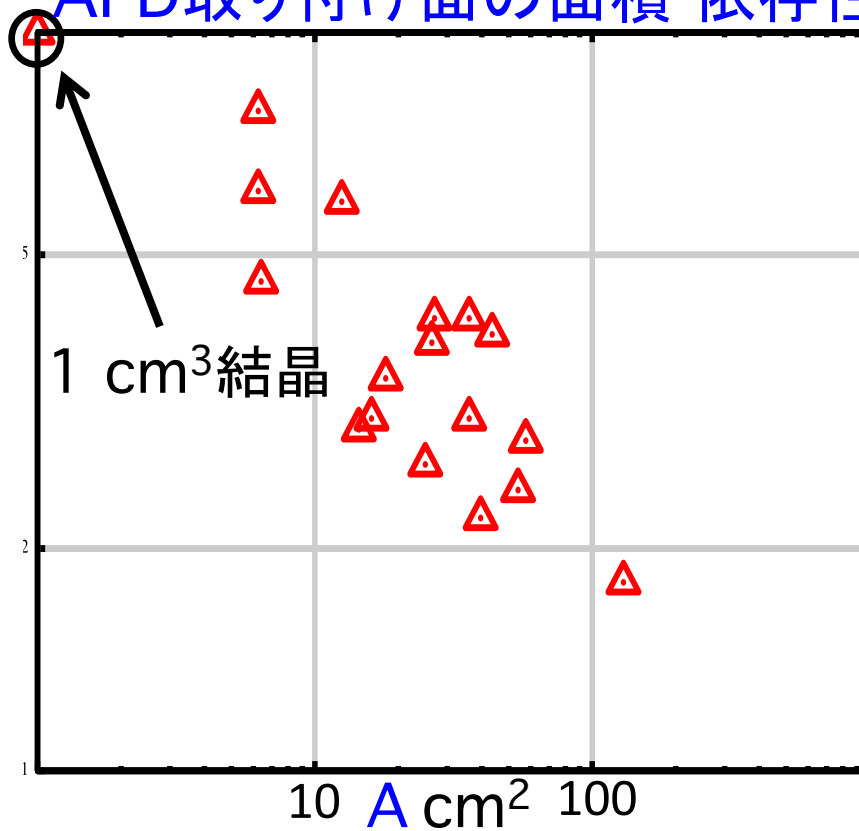
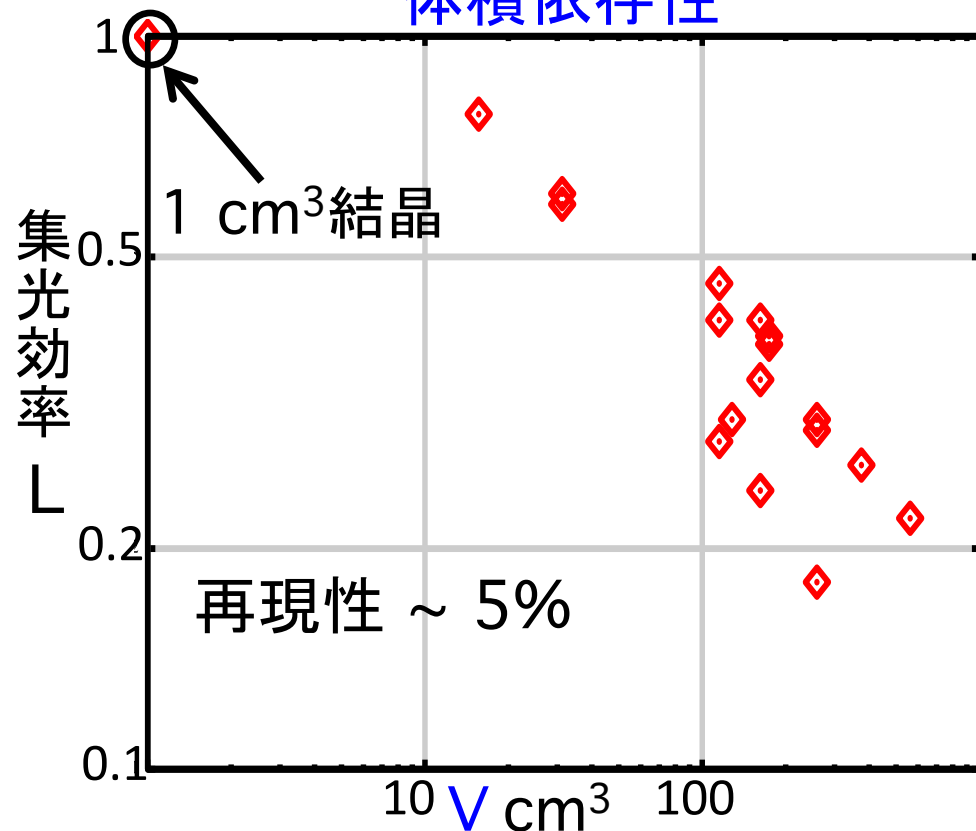
- 結晶の体積 V で集光効率が変化する。
- APDをつけるBGOの面の面積 A によっても変化する。
- 照射位置への依存性は5%以下。

4. 集光効率の寸法依存性

1 cm³結晶でのADCチャンネル値で規格化したものを集光効率Lとする。

体積依存性

APD取り付け面の面積依存性



- BGO結晶の体積が大きくなると
- BGOのより広い面から読み出すと



集光効率が下がる。

AとVが集光効率の変数と考えられる。

5. Monte-Carloシミュレーション

• 目的

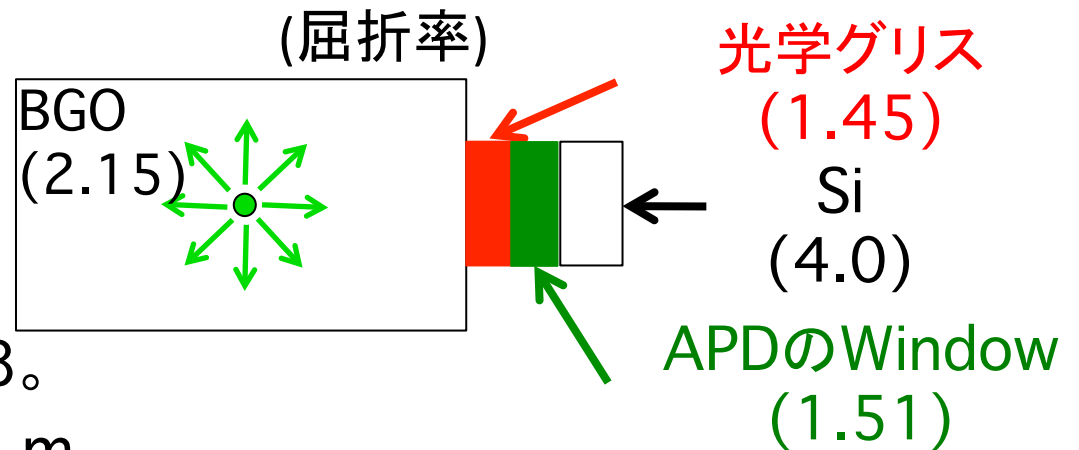
- 実験を補間し、集光効率に影響を及ぼす因子を探查する。
- HXI/SGDアクティブシールド設計指針を得る。

• 使用したソフトウェア

- Geant4 ver9.3 patch02

• 仮定した条件(実験を模擬)

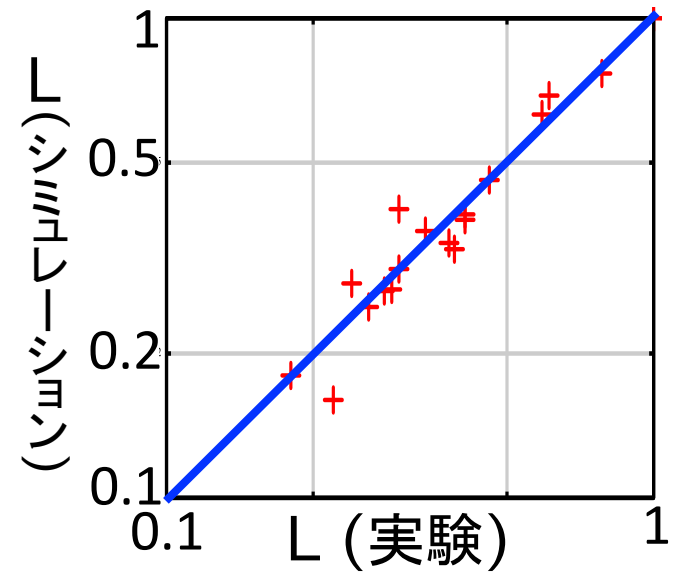
- 完全乱反射材、反射率0.98。
- BGO結晶の自己吸収長は4 m。
- 結晶の中心で等方的に光子を10万個発生。
- 実験と同様に、1 cm³結晶でAPDのSi部に入った光子の数で規格化。
- 1x1x1 ~ 20x20x20 cm³の範囲で結晶の大きさを変えた。



6. シミュレーション結果

• 実験vsシミュレーション

シミュレーション結果は実験で得られた集光効率をほぼ20%以内で再現。



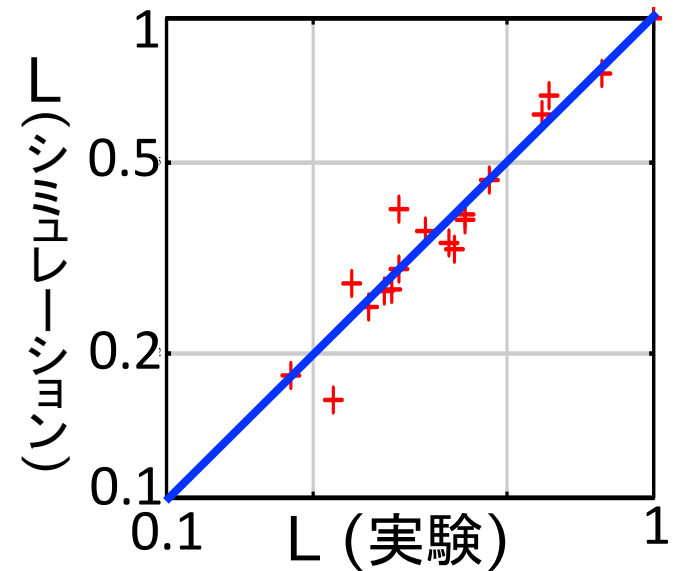
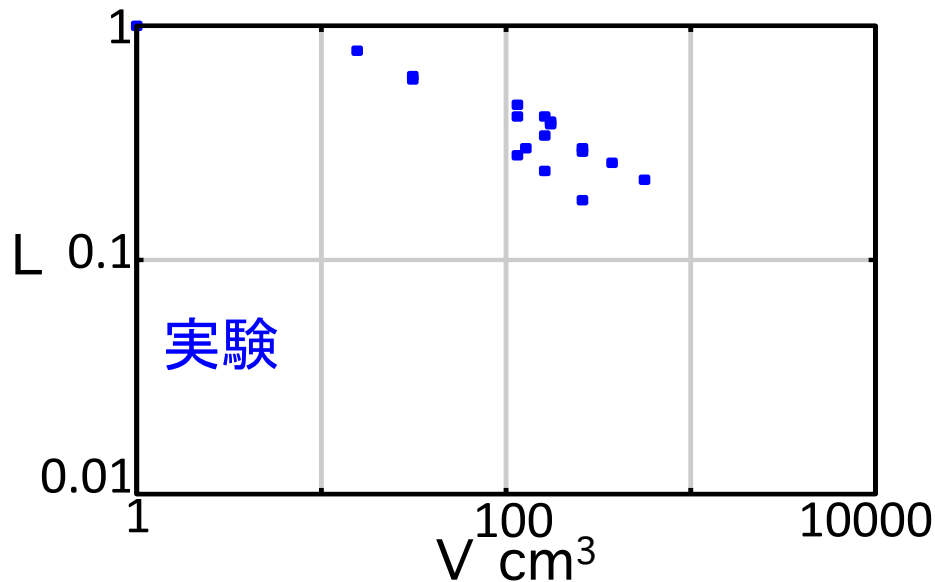
6. シミュレーション結果

• 実験vsシミュレーション

シミュレーション結果は実験で得られた集光効率をほぼ20%以内で再現。

• シミュレーションによる集光効率の理解

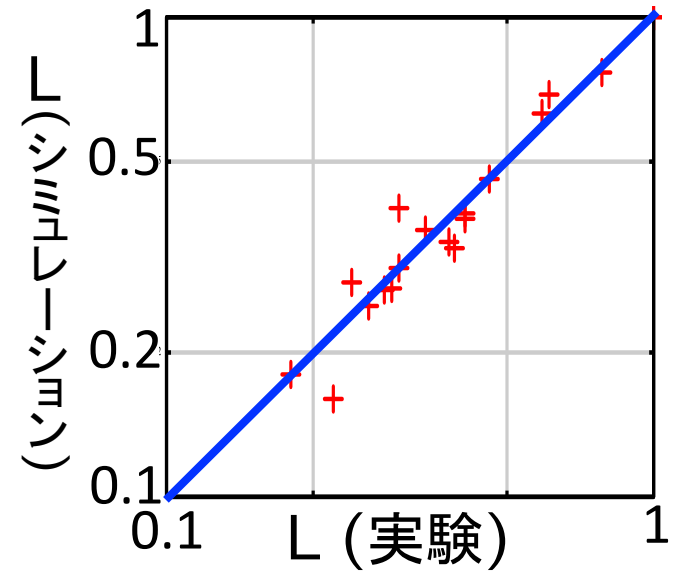
V、A依存性



6. シミュレーション結果

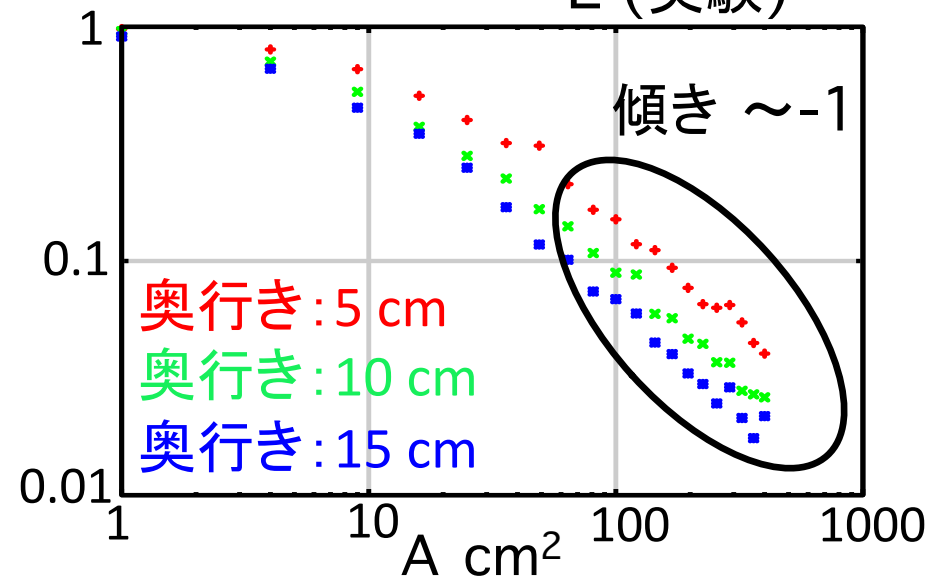
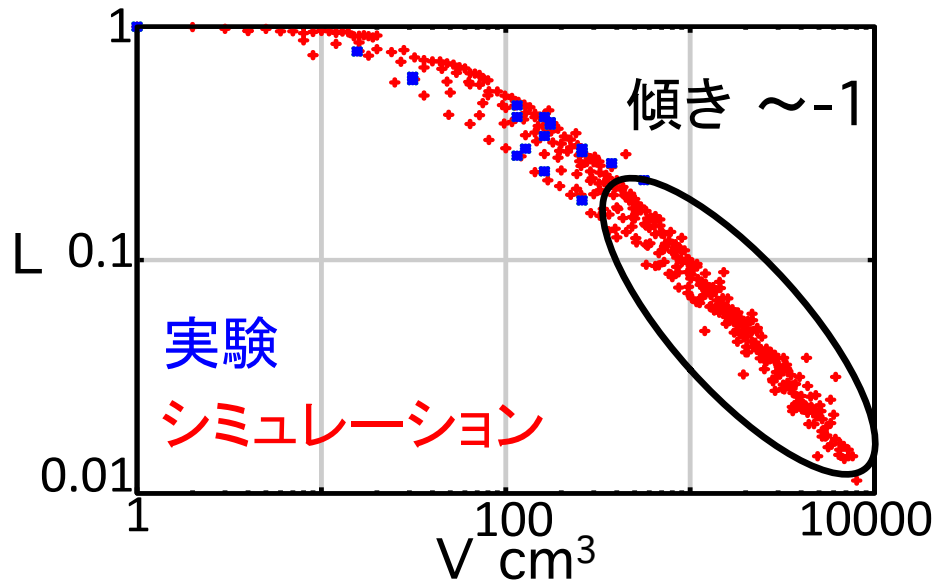
• 実験vsシミュレーション

シミュレーション結果は実験で得られた集光効率をほぼ20%以内で再現。



• シミュレーションによる集光効率の理解

V、A依存性



7-1. 集光効率の一般化への試み

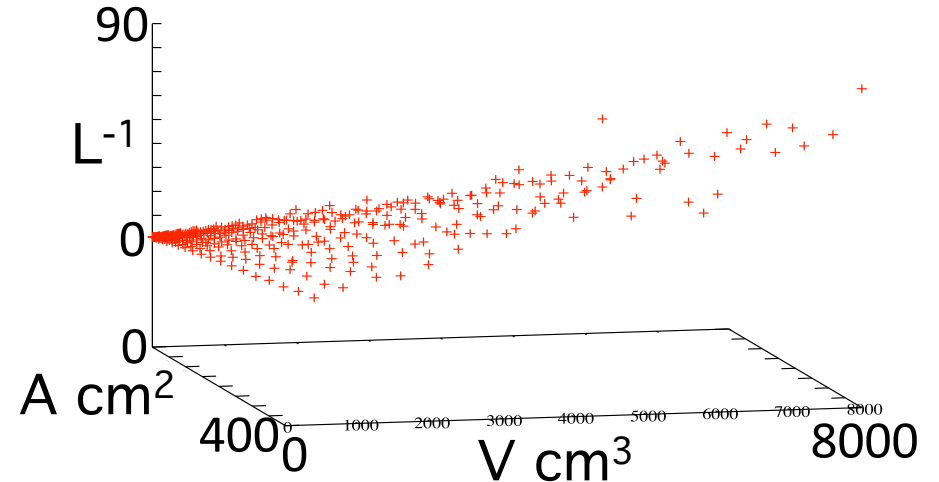
•シミュレーション結果を使い、 V と A で集光効率 L の解析式を導出。

- $L \propto (V+\text{const})^{-1}$
- $L \propto (A+\text{const})^{-1}$

以上の関係式から、

$$L^{-1} = V/a_1 + A/a_2 + a_3$$

$a_1 \sim 111 \text{ cm}^3, a_2 \sim 71.9 \text{ cm}^2, a_3 \sim 1$

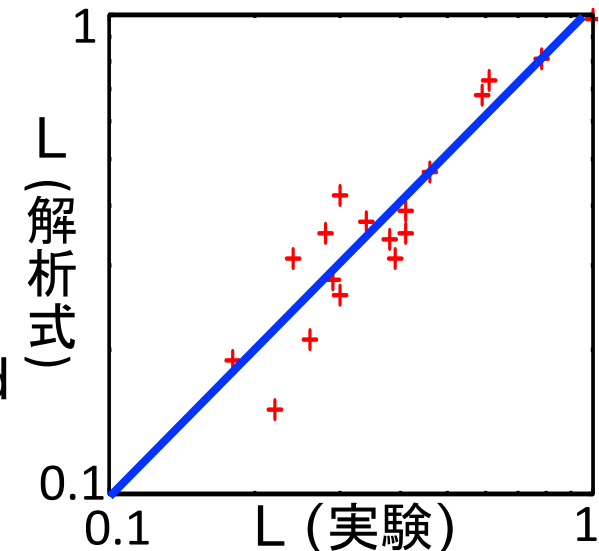


•解析式vs実験結果

- 実験結果と解析式はややばらつきがあるが、ほぼ25%以内で一致。

BGOでの集光効率の一般化に成功

Sasano, Nishioka et al., NIM-A, 2011, submitted



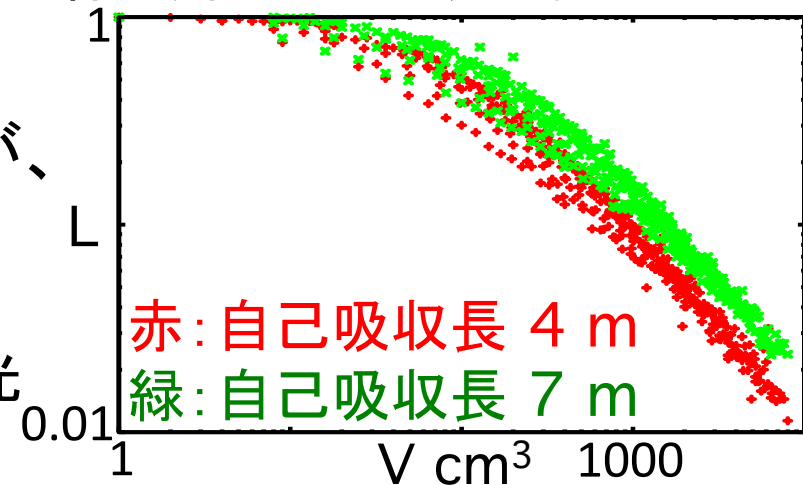
7-2. 結果の解釈とASTRO-Hへの適用

•解析式の解釈

- Aが大 → APDに入るのが難しく、数十回反射し、結晶内で吸収。
- Vが大 → 光子の平均的な走行距離が増え、結晶内で吸収。

•自己吸収長の改善

- 結晶内で全反射を繰り返す光子が、生き残ってAPDに到達する確率が高くなる。
- 4 mから7 mに改善した場合に、集光効率は約30%よくなる。



•HXI/SGDアクティブシールドのLDの予想と結果

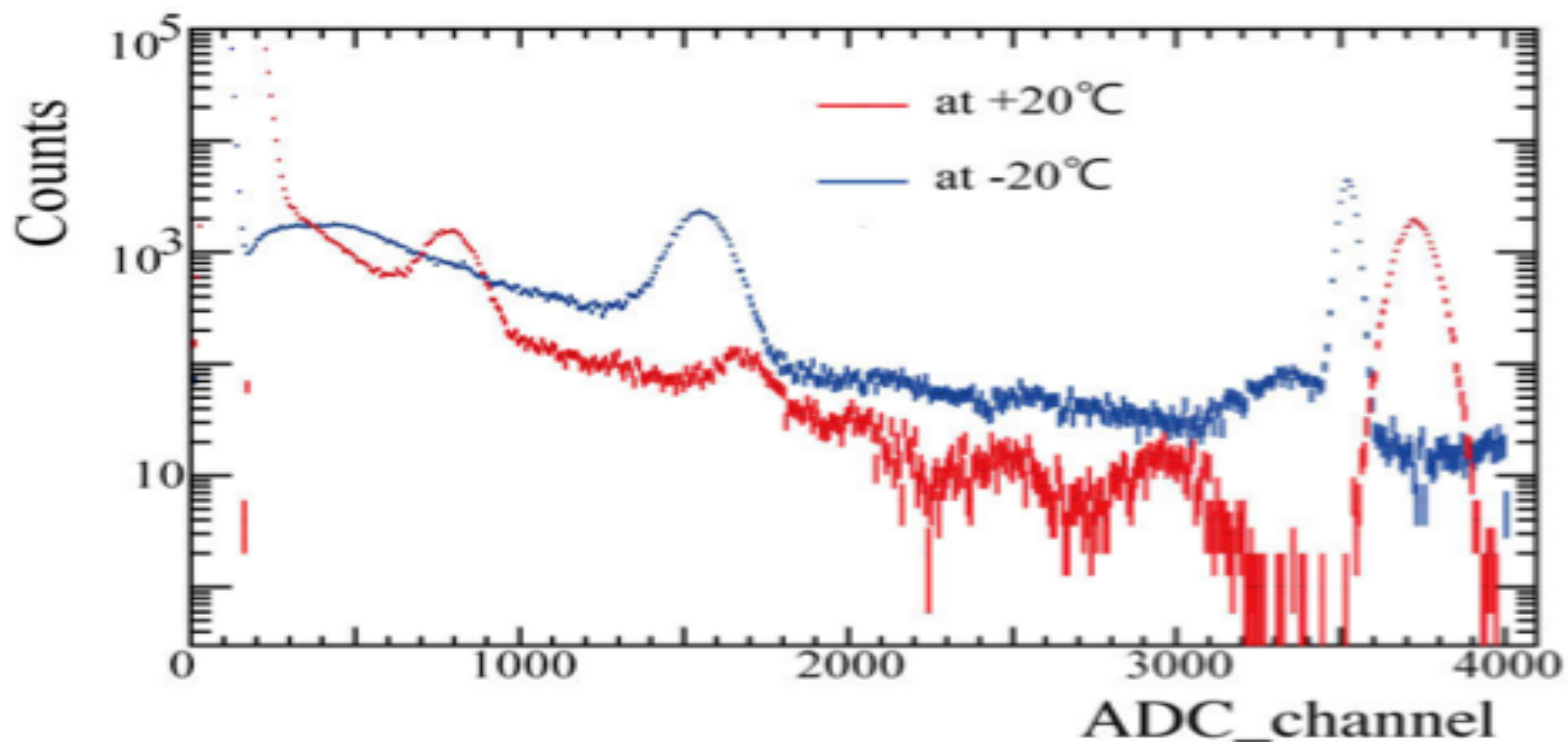
- シミュレーションから、LDは70~170 keVと見積もられた。
- 一番大きい結晶の試作品では、LDが140 keVであった。
- 大型結晶に良い結晶を使うことで、LDの目標が達成できる。

現時点で目標である-15°Cで、150 keV以下は達成できる目処。

8. まとめ

- 18通りの直方体BGO結晶のAPDで読み出しを行った時の集光効率を測定した。
- 集光効率に大きな影響を及ぼす二つのパラメータが体積 V および読み出し面のBGO面積 A であることを確認した。
- Monte-Carloシミュレーションを用いて実験結果をほぼ20%以内で再現した。
- 実験結果とシミュレーション結果からBGO結晶をAPDで読み出した時の集光効率を一般化した解析式を得た。
- シミュレーションをASTRO-Hに適用し、一番大型の結晶試作品でLDが140 keVとなり、性能目標を達成するめどを得た。

温度依存性



Temperature (°C)	light output of ^{137}Cs (ADC channel)	Energy resolution of ^{137}Cs (%)	Test pulse FWHM (ch)	LD (keV)
+20	788.4 ± 1.8	21.1	120.2	289.9
-20	1551.8 ± 0.8	11.1	51.8	62.3

-20°CでのLDは+20°Cに対して約1/5

三次元プロットのV,Aでの断面図

