

Fe-57 を用いた 太陽アクシオン検出実験 II

2005/9/12 (@大阪市立大)

難波俊雄

東京大学素粒子物理国際研究センター

アクシオン

- QCD における「強い CP 問題」
 - アクシオン模型により自然に解決
 - 付随して、南部-ゴールドストーンボソン: 「アクシオン」
- アクシオン
 - 結合の強さ ($g_{a\gamma\gamma}$ 、 g_{aNN} 等) は質量 (m_a) に比例
 - (主に $g_{a\gamma\gamma}$ を用いて) 種々の実験手法で検出が試みられてきたが未発見
 - (もし存在するのであれば) 非常に弱い結合を持つのであろう

理論的不定性あり

太陽アキシオンと検出原理

S.Moriyama PRL 75(1995)3222

- $g_{a\gamma\gamma}$ 由来の熱的輻射 (種々の実験)
 - この実験では g_{aNN} 由来のアキシオン輻射を狙う
-
- 太陽中の ^{57}Fe が熱的に励起
 - 脱励起の M1 遷移でアキシオン生成
 - 熱運動による幅 $\sim 5\text{eV}$
 - 地上にて ^{57}Fe を用意
 - アキシオンによって励起された ^{57}Fe の脱励起をとらえる

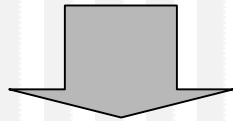


対象領域と期待されるレート

- 比較的重いアクシオンが対象: $m_a \cong 10\text{eV} \sim 1\text{keV}$
 - cf. 世の中のメジャーな実験
 - CAST (cern group)、東大: $g_{a\gamma\gamma}$ 、太陽アクシオン、 $m_a < 1\text{eV}$
 - ADMX (US 連合): $g_{a\gamma\gamma}$ 、暗黒物質アクシオン、 $m_a \approx 1\mu\text{eV} \sim 10\mu\text{eV}$
- この領域の g_{aNN} に対しての既存の制限
 - J/ ψ の崩壊から: $m_a < \sim 6\text{keV}$
 - 同様な太陽 ^{57}Fe アクシオン実験から: $m_a < 745\text{eV}$
- 見たい領域 ($m_a = 100\text{eV}$) にアクシオンがあれば、
 - ^{57}Fe 太陽アクシオンの地上での流束: $\Phi \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - ^{57}Fe 1g あたりの励起レート: $R \sim 10^2 \text{ day}^{-1} \text{ g}^{-1}$

検出器デザイン

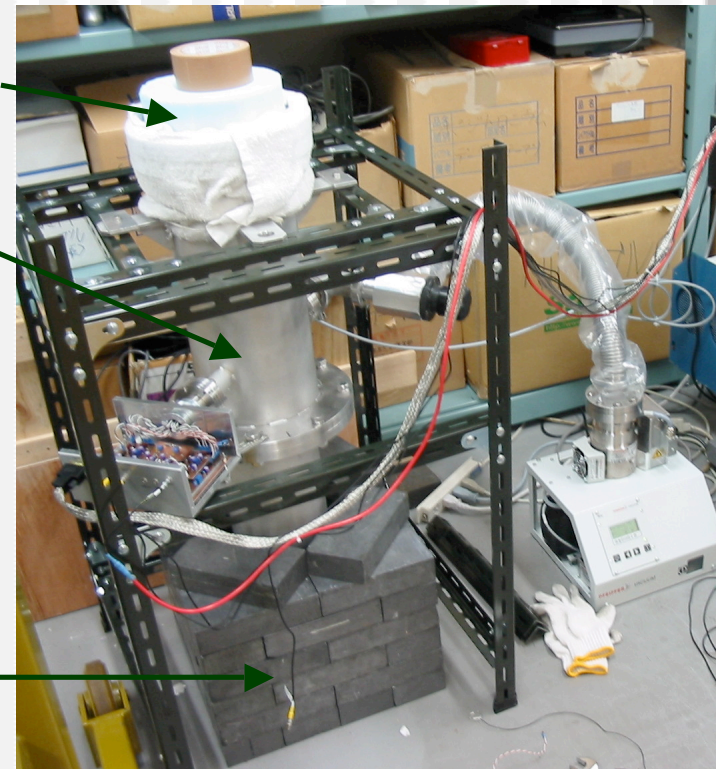
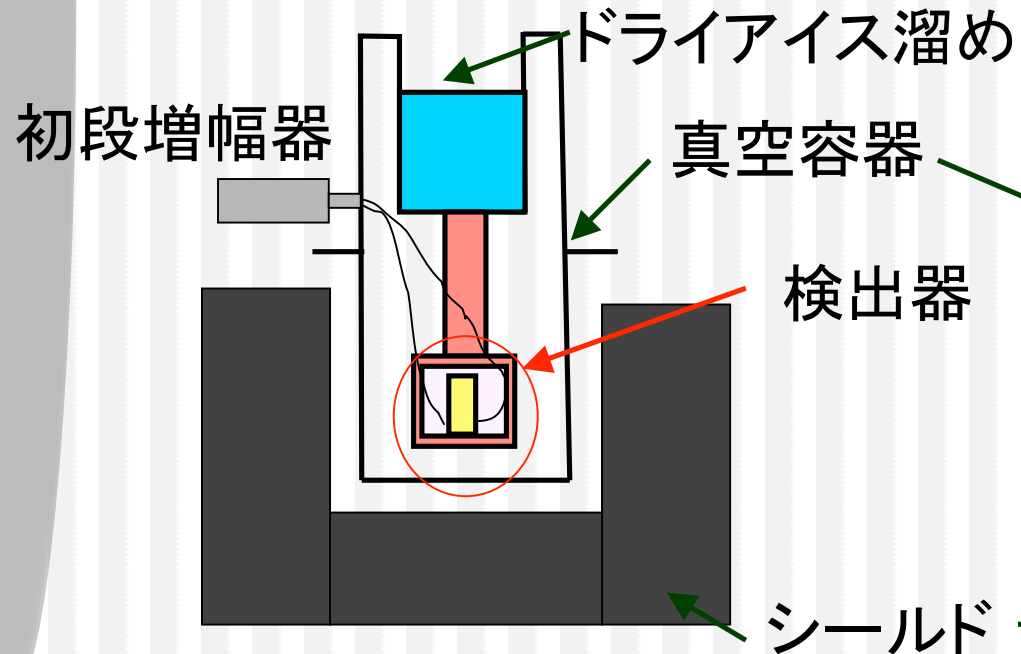
- ・ 必要な条件
 - ^{57}Fe から放出された 14.4 keV γ 線を高い検出効率で検出できること
 - エネルギー分解能が良いこと
 - 低バックグラウンドであること



- エンリッチした ^{57}Fe 薄膜を使用
- 普通の鉄 (^{57}Fe : 2.2%) の測定で BG さっぴき
- 大面積シリコン PIN フォトダイオードを冷却して使用

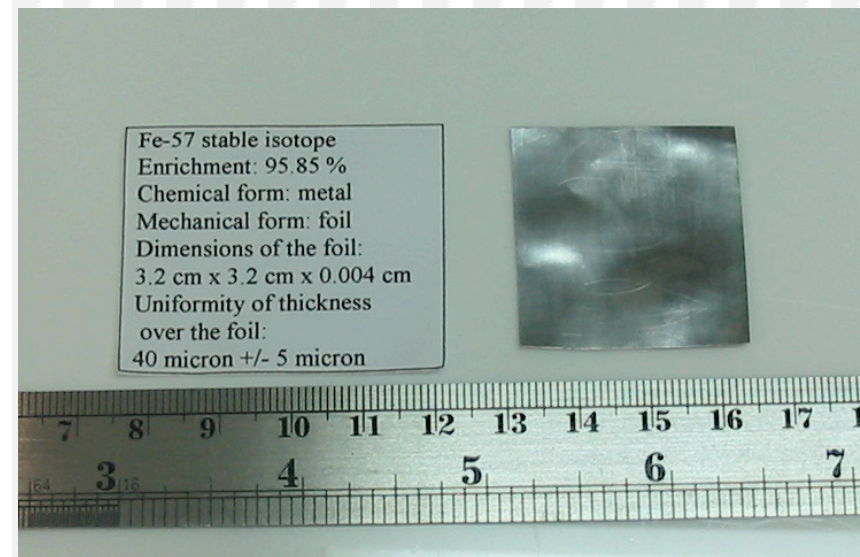
実験セットアップ (1)

- ドライアイスで冷却して使用 (-80°C)
- 鉛 10cm、銅 1cm でシールド



実験セットアップ (2)

- ^{57}Fe ホイル
 - 95.85% エンリッチ
 - 3.2cm 角
 - 厚さ $(40 \pm 5) \mu\text{m}$
 - 質量 320mg
 - cf. att. length = $20 \mu\text{m}$ (@ 14.4keV)



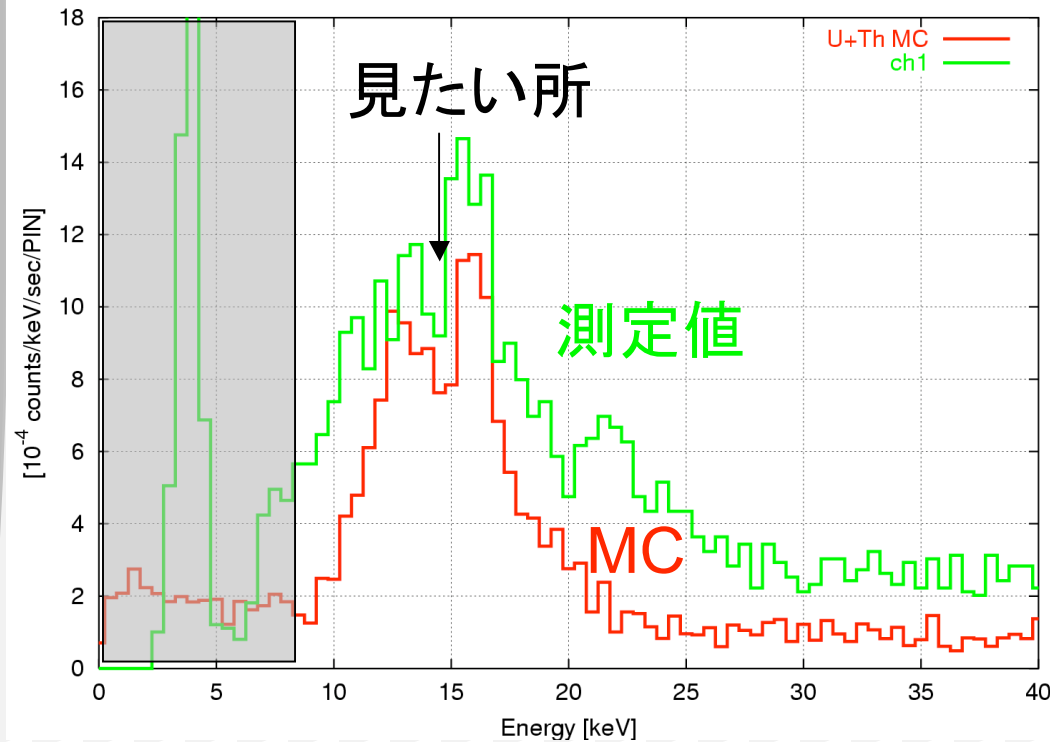
実験セットアップ (3)

- 大面積シリコン PIN フォトダイオード
 - Hamamatsu S3584-06
 - 受光領域: 2.8cm×2.8cm
 - 厚さ: 500 μ m
 - $C_t = 200$ pF
 - 2枚で鉄ホイルを挟む
 - 自作増幅器にて測定



ただし、そのまま使うと、

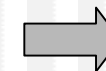
- PIN フォトダイオードベース中のウラン、トリウム系列が**大問題!!!** (前回のトーク)



ベース中の U/Th 値

- U: 0.36 Bq/PIN
- Th: 0.11 Bq/PIN

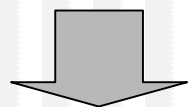
今回、ベースを低 BG セラミックに変更



どこまで減ったかは後ほど、、、

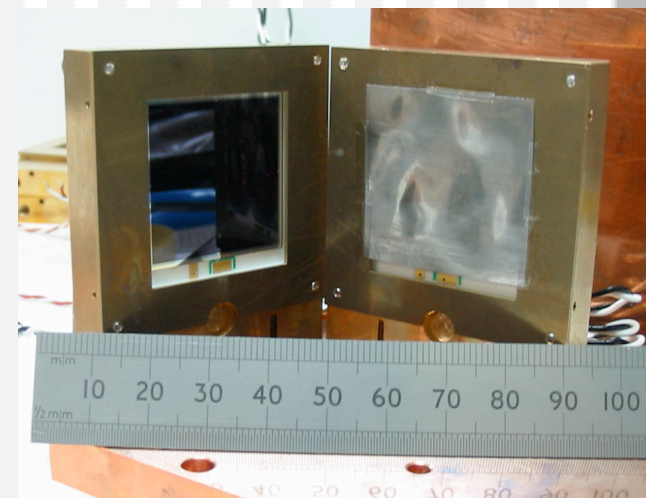
14.4keV γ 線検出効率

- □28mm、 $t_{35\mu\text{m}}$ (211mg) の鉄中での吸収
 - 吸収長 $20\mu\text{m}$
- 鉄に対する検出器のアクセプタンス
 - 両側 2mm の距離、有感領域 □28mm
- フォトダイオードの検出効率
 - 垂直入射に対して $>65.1\%$ (前回のトーク)
 - ⇒ 空乏層厚 $>385\mu\text{m}$
または表面不感層 $<36\mu\text{m}$



最悪値を用いて Geant4 にて計算

検出効率 $> 14.8\%$

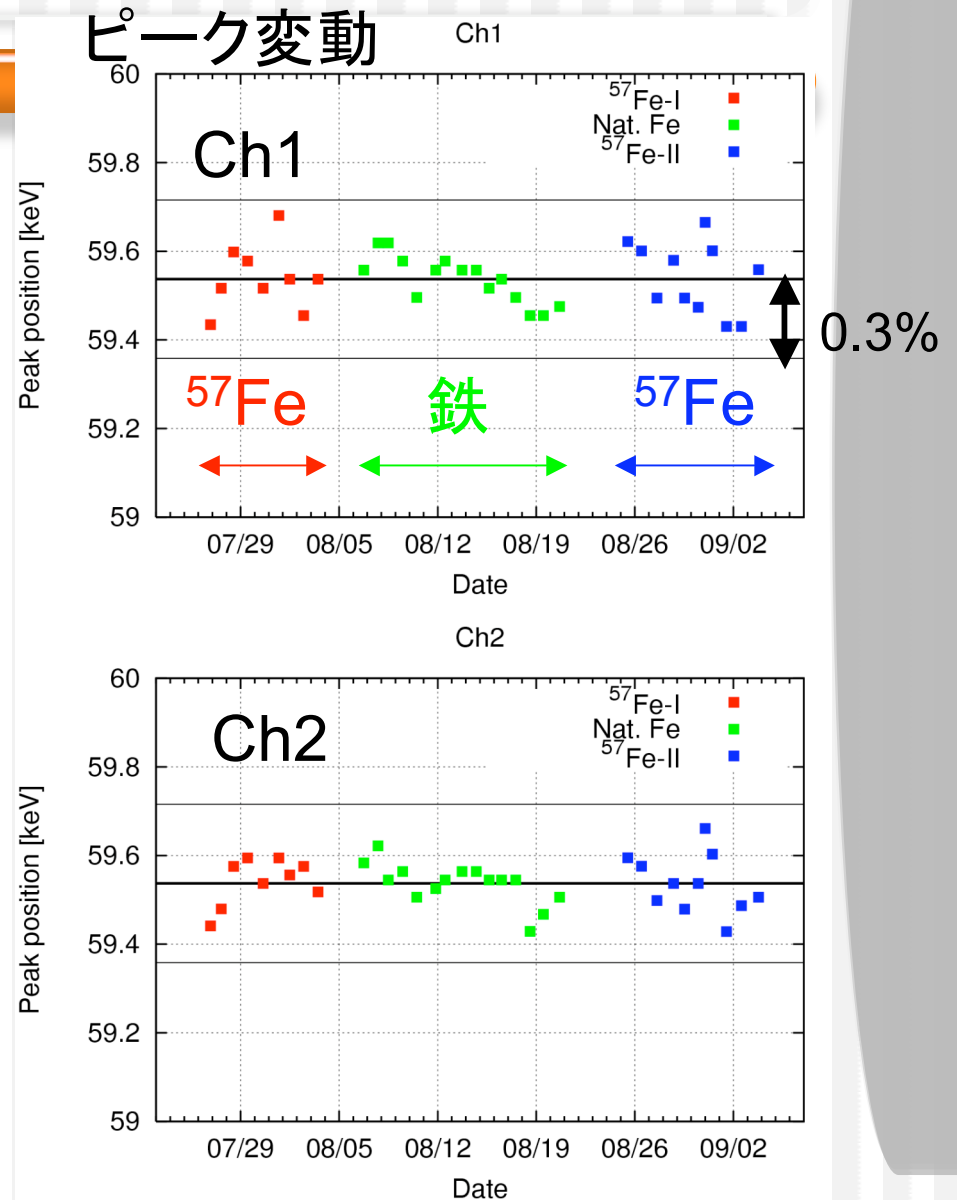
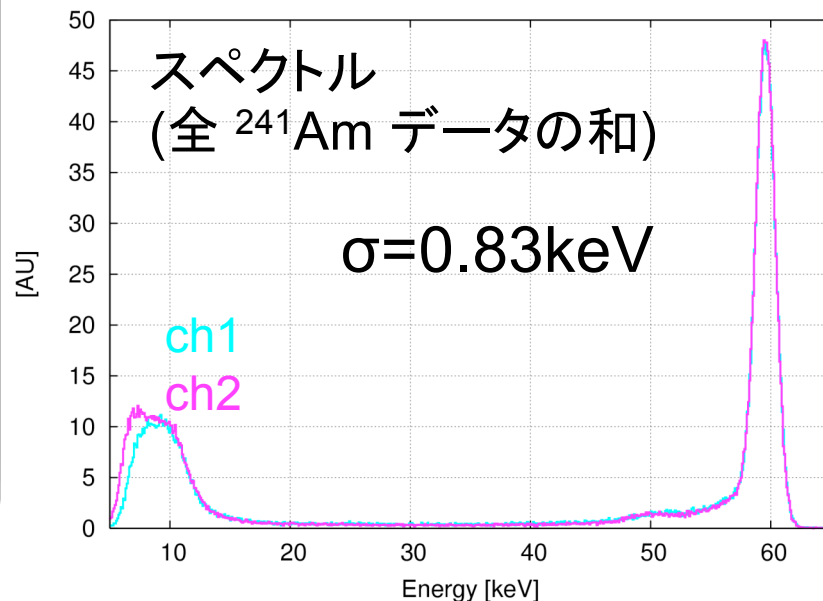


太陽アクシオン測定

- 測定期間: 2005/7/26 ~ 2005/9/3
 - ^{57}Fe 測定 I: 6.176 日 (7/27~8/3)
 - 普通の鉄測定: 11.99 日 (8/6~8/20)
 - ^{57}Fe 測定 II: 7.744 日 (8/25~9/3)
- 全測定期間を通じて、
 - 同じ PIN フォトダイオード、増幅器を使用
 - 検出器ホルダー温度: (198 ± 1) K
 - 初段 FET 温度: (212 ± 1) K

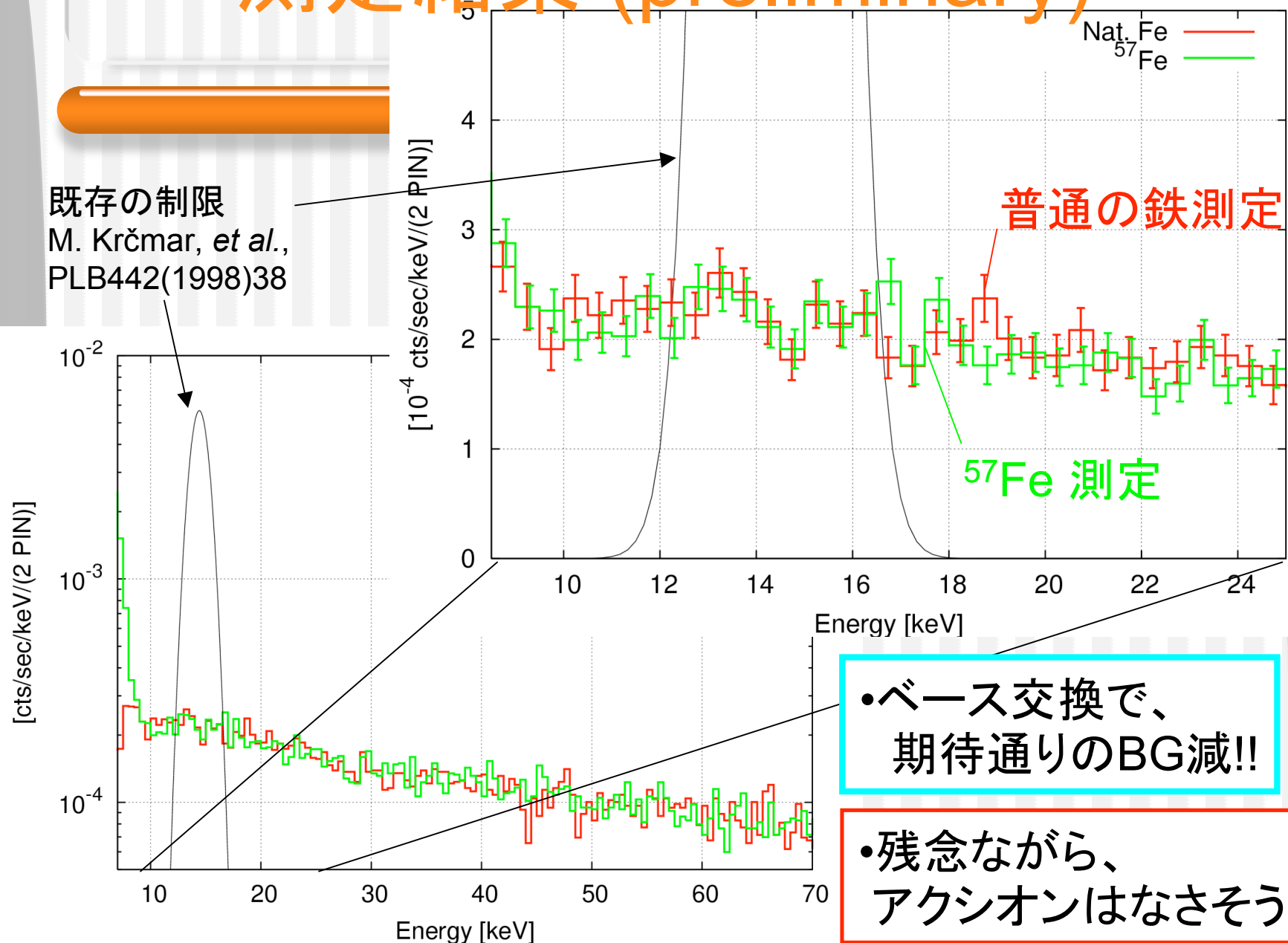
ゲイン較正 (preliminary)

- ^{241}Am の γ 線を照射
(59.5keV、 $\sim 0.3\text{Hz/PIN}$)
- 毎日、 $\sim 2\text{hours/day}$
- 変動は $\pm 0.3\%$ 以下



測定結果 (preliminary)

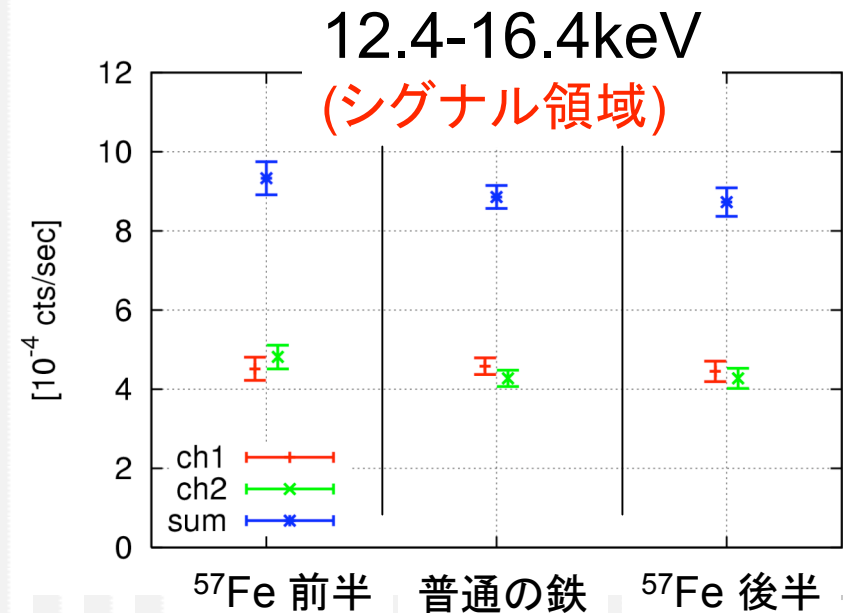
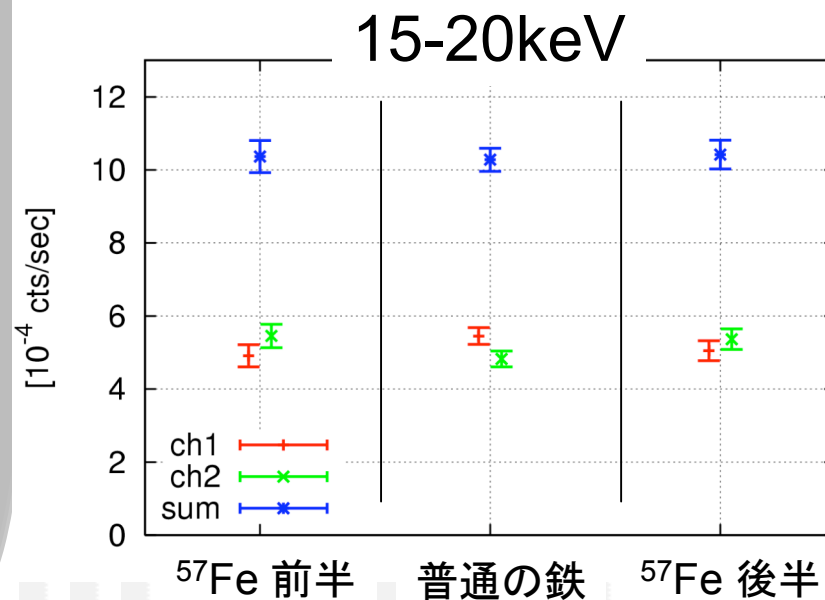
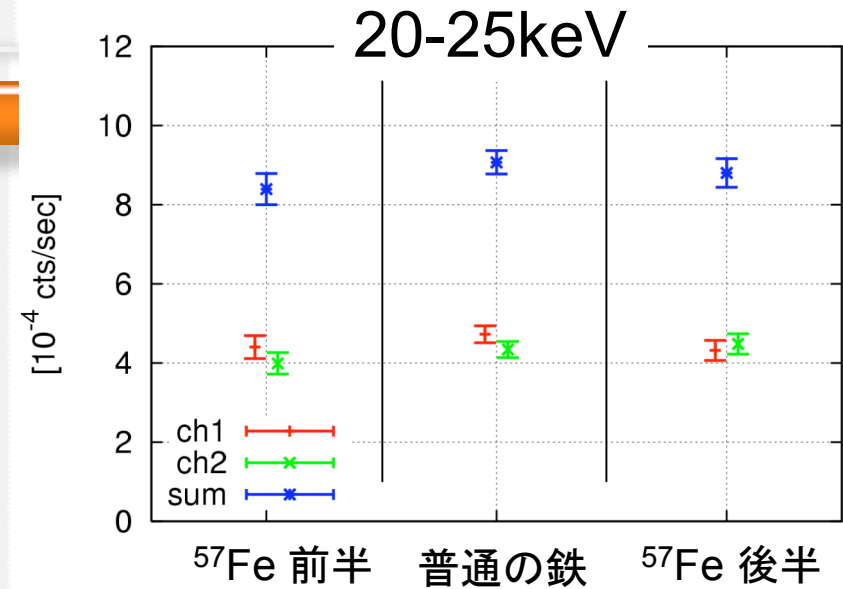
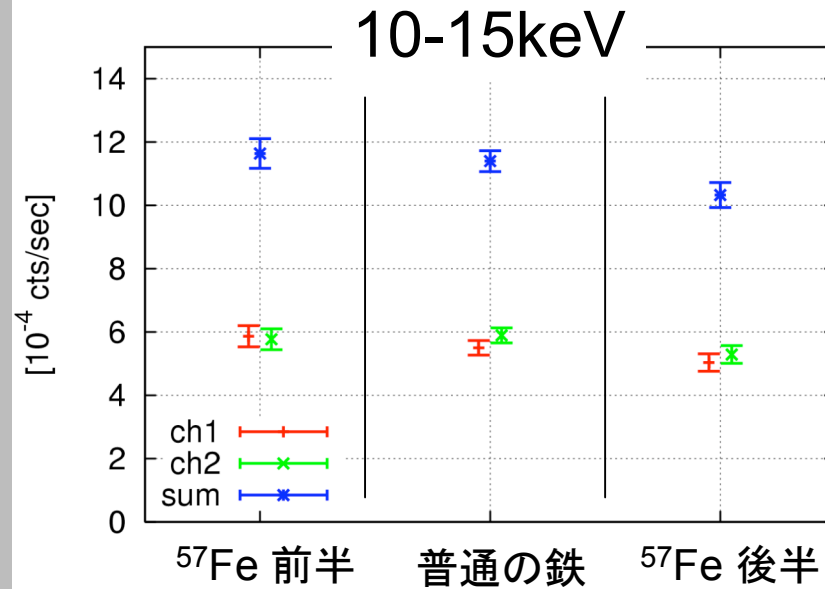
既存の制限
M. Krčmar, *et al.*,
PLB442(1998)38



•ベース交換で、
期待通りのBG減!!

•残念ながら、
アクションはなさそう

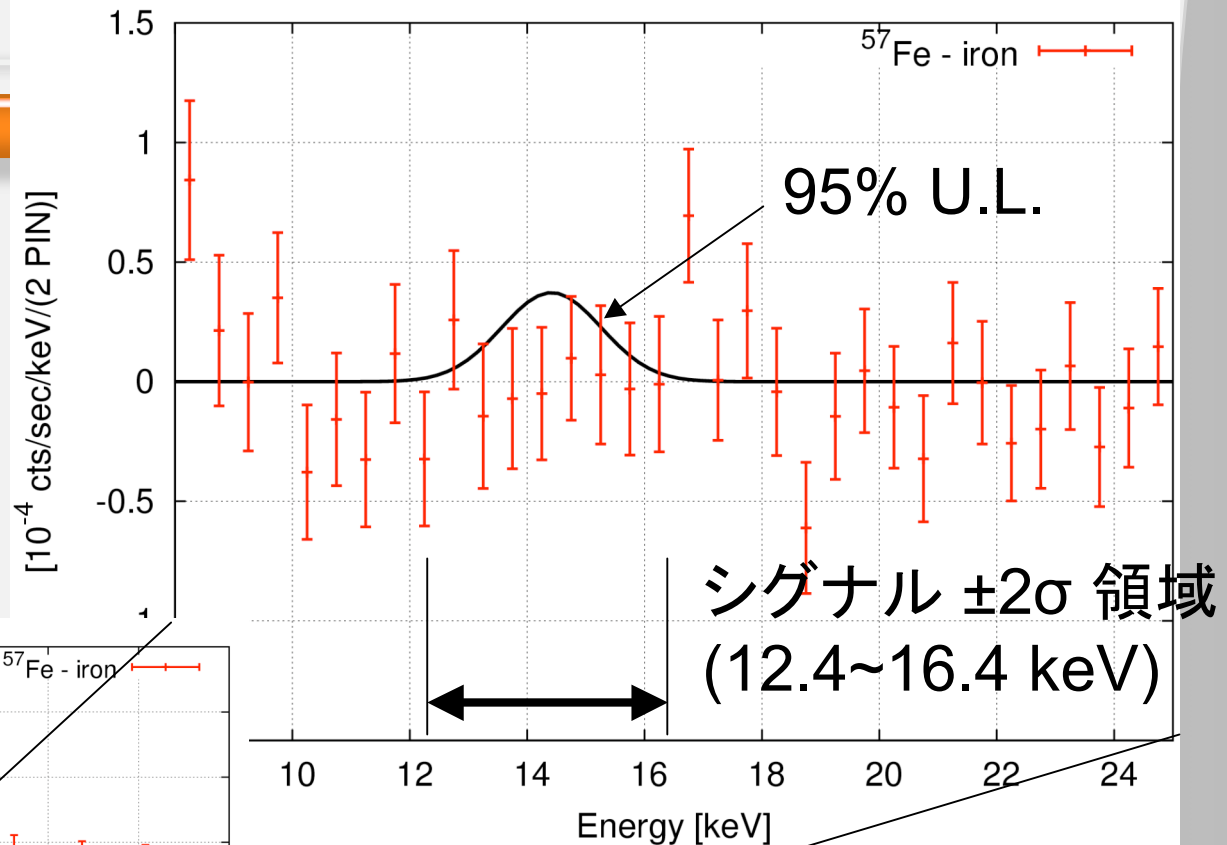
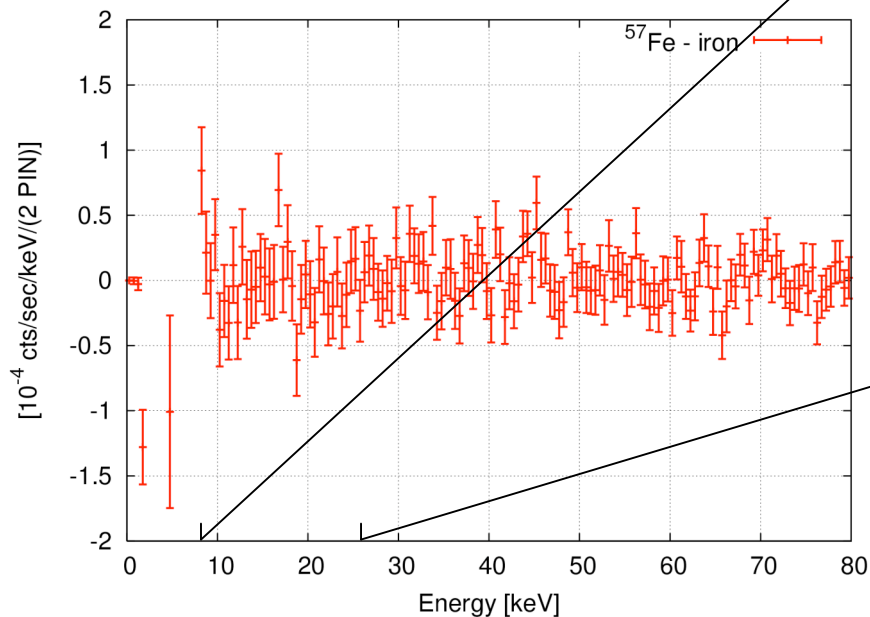
測定毎の変動 (preliminary)



さっぴき (preliminary)

(^{57}Fe)—(普通の鉄)

アクシオン起源の
シグナル抽出



12.4~16.4keV において、
単純にイベント数の差から
 $(1.37 \pm 3.99) \times 10^{-5} \text{ cps}$

^{57}Fe イベントへのリミット (preliminary)

- 観測された 12.4~16.4keV のカウントレート:
 $(1.37 \pm 3.99) \times 10^{-5} \text{ cps}$
- 14.4keV $\pm 2\sigma$ のシグナル領域: ピークの 95.45% 含有
- 95% (上 5%) の信頼区間: 1.645 σ
- ^{57}Fe の存在量の差分: $211\text{mg} \times (0.958 - 0.022) = 197\text{mg}$
- 14.4keV の検出効率: 14.8%
- 14.4keV 脱励起時の γ 線放出比: 0.105

以上より、 ^{57}Fe 中で起きた 14.4keV 励起の上限値は、

$$N_{\text{ex}} < 2.35 \times 10^3 \text{ event/day/g (95\% C.L.)}$$

(cf. これまでの制限 $N_{\text{ex}} < 3.4 \times 10^5 \text{ event/day/g}$)

二桁以上の改善

アクシオンへのリミット (preliminary)

- 期待される励起レート (PRL75(1995)3222)

$$N_{\text{ex}} = 3.0 \times 10^2 \text{ day}^{-1} \text{ kg}^{-1} \left(\frac{10^6 \text{ GeV}}{f_a} \right)^4 C^4$$

$$m_a = 1 \text{ eV} \frac{\sqrt{z}}{1+z} \frac{1.3 \times 10^7}{f_a / \text{GeV}}$$

($z=0.56$ 、 $S=0.5$ の仮定のもと、 $C=-0.2716$)

$$f_a > 1.44 \times 10^4 \text{ GeV}, m_a < 216 \text{ eV} \text{ (95\% C.L.)}$$

(cf. これまでの制限 $m_a < 745 \text{ eV}$)

まとめ

- アクシオンと核子との結合を利用して、太陽アクシオン探索実験を行った
- 実験には、 ^{57}Fe の薄膜と大面積シリコン PIN フォトダイオードを用いた
- PIN フォトダイオードのベース部分の交換により、低バックグラウンド化に成功した
- 既存の実験の二桁以上上の感度で、約 1 ヶ月の測定を行ったが、アクシオンらしきイベントは見つからなかった
- $z=0.56$ 、 $S=0.5$ の仮定の下で、preliminary ながら
 $m_a < 216 \text{ eV (95\% C.L.)}$ の上限値を得た