

次世代の暗黒物質探索実験に向けた液体キセノンの近赤外発光の研究 ～高精度なスペクトル技術の応用と今後の展開～

谷山天晴^A, 中村正吾^A, 山口貴大^A, 吉本圭佑^A, 笠見勝祐^B, 斎藤究^B, 佐々木慎一^B, 春山富義^B, 三原智^B, 森山茂栄^C
横浜国立大学^A, 高エネルギー加速器研究機構^B, 東大宇宙線研^C

概要

液体キセノンは優れたシンチレータとして、暗黒物質探索実験の検出器に用いられてきた。検出器の拡大が進む中、暗黒物質の信号とバックグラウンドの信号をさらに弁別できれば、検出器をより高感度化できる。液体キセノンは既知の真空紫外の発光に加えて、近年では近赤外の発光も報告されており、それらの発光の強度比や時間特性で粒子弁別ができる可能性がある。そこで我々は近赤外領域の感度が高い冷却CCDカメラを使用して、液体キセノンの近赤外発光スペクトルを高精度に測定する準備を進めている。また真空紫外領域に感度のある冷却CCDカメラも新たに導入し、真空紫外から近赤外までの幅広い波長領域において高精度なスペクトル測定の利用できるようになった。今回はこれらの研究の進捗と、今後の展開について報告する。

背景

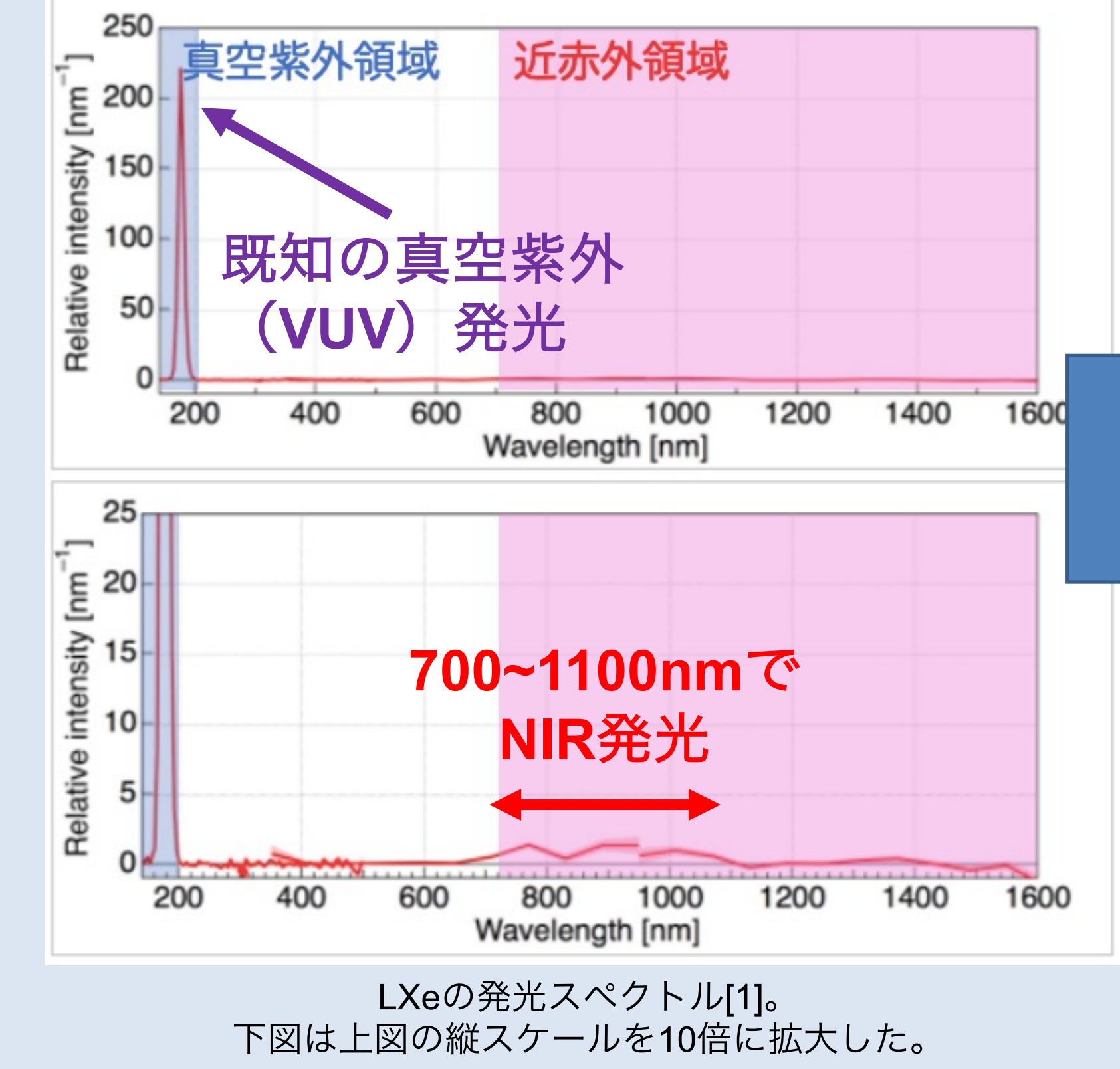
① 液体キセノン (LXe) と暗黒物質探索

■ LXeの使用量が増加

- 暗黒物質粒子との相互作用のイベントレートの増加
- 環境放射線によるバックグラウンドの増加

→ 暗黒物質粒子とバックグラウンドをより高精度に弁別する方法があると有効

② LXeの近赤外 (NIR) 発光



LXeのNIR発光の研究

■ LXeのVUV発光とNIR発光の強度相関や時間相関

- 入射粒子の違いでこれらの相関に変化が現れる？
- 暗黒物質粒子とバックグラウンドの粒子弁別に利用可能？

■ LXeのNIR発光の精密測定の計画

1. 発光波長の測定

Princeton Instruments, SP2358i + Teledyne Princeton Instruments, PIXIS256E

分光器 + 冷却CCDカメラ

- 長時間露光で微弱光を測定可能 → 最長2時間
- CCDセンサの冷却でノイズ低減 → 0.0072 e-/pixel/sec @ -75°C
- 一度に幅広い波長スペクトルを測定可能

2. 発光時間特性の測定

HAMAMATSU, S13371 + Bee Beams, BBTX-112

MPPC + デジタイザ

- 光子計数用の素子MPPCで測定
- バンドパスフィルタと組み合わせで特定の波長の光のみ測定
- 5Gサンプリングの高速デジタイザ
- LXeを貯める容器にMPPCを直接取り付けて冷却しノイズ低減

研究の進捗

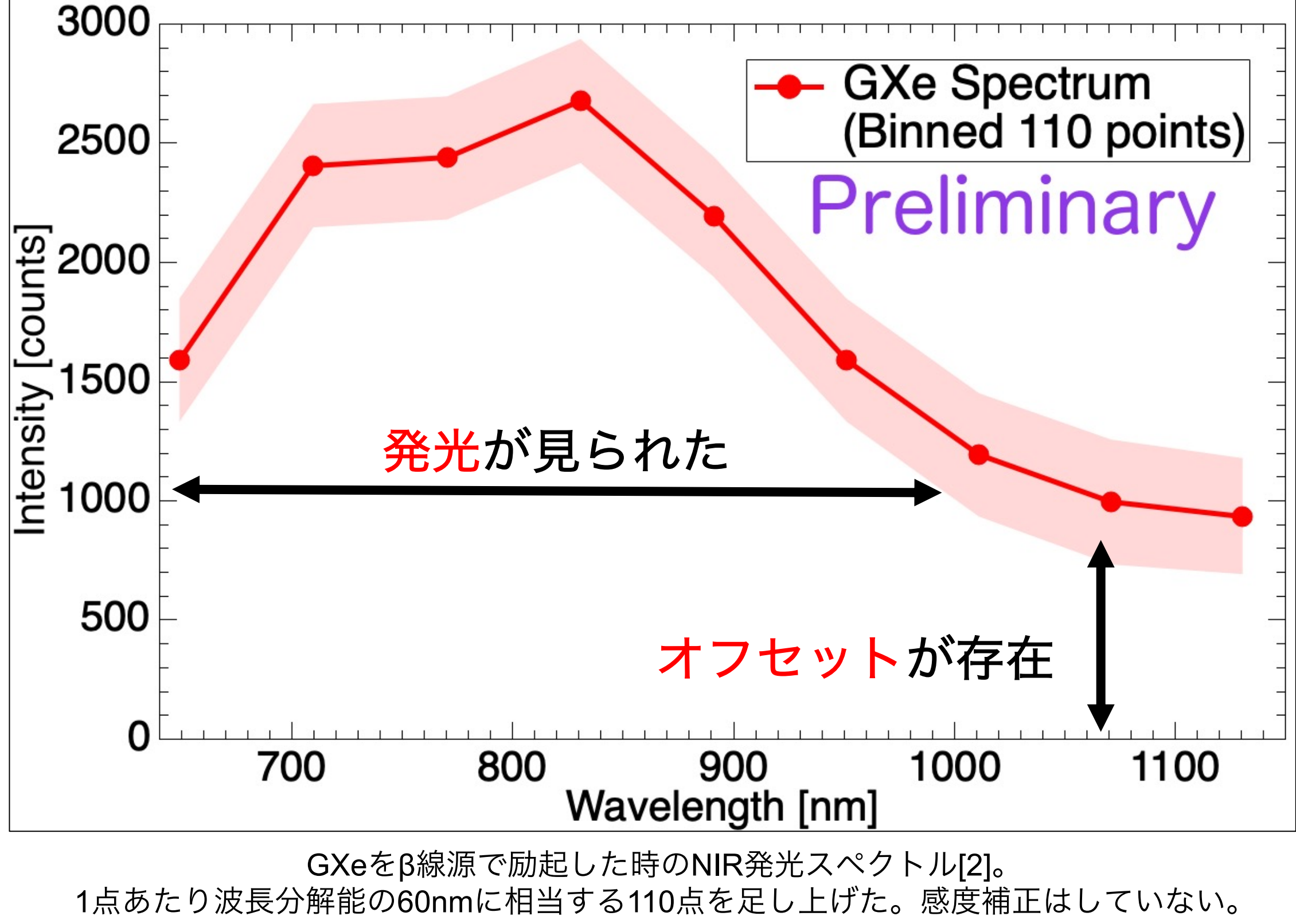
LXeの前に気体キセノン (GXe) のNIR発光スペクトルを測定

- 冷却の必要がなくすぐに測定可能
- 気体でNIR発光が見られれば、液体でも同様に見える見込みが立つ

GXeの圧力	
測定時間	1,920 s × 100回
スリット幅	3 mm
回折格子	150 G/mm - 800 nm blaze
波長分解能	60 nm
フィルタ	580 nm longpass

30μm厚のSUS箔をはんだ付けしたβ線入射用の窓

測定結果



- GXeのNIR発光スペクトル測定

 - スリット幅を狭めてより高分解能で測定
 - 光学系の影響を考慮した感度補正
- LXeのNIR発光スペクトル測定

 - Xe容器周りの真空中に晒さずに線源を窓に近づける機構の製作
 - 放射線種の違いでスペクトルに変化が現れるか確認

高精度なスペクトル測定技術の応用

① チェレンコフ光の発光スペクトル測定

スリット幅	
回折格子	150 G/mm - 800 nm blaze
波長分解能	60nm
フィルタ	580 nm longpass

冷却CCDカメラ (PIXIS256E)

入射スリット

20 cm

90Sr

ロングパスフィルタ

20cm

18cm

分光器 (SP2358i)

β線がアクリルに入射して発生するチェレンコフ光

- 露光時間に比例して発光量が増加
- 580~900nmに渡る連続した発光スペクトル

→

- 理論的な計算で求めたチェレンコフ光の発光スペクトルと合うかどうか確認
- LXeのVUV領域でも測定可能？ (シンチレーション光+チェレンコフ光)
- LXeのチェレンコフ光が暗黒物質探索実験の検出器に与える影響の議論

② VUV領域で有感の冷却CCDカメラの導入

石英キセノンフラッシュランプ (XeFL)

分光器 (VM502S)

冷却CCDカメラ (PIXIS-XO)

特注のアダプタ

- 新しい冷却CCDカメラのPIXIS-XOを導入
- 窓材のVUV領域における透過率測定が可能 → XENONnTに使用するITO膜のVUV透過率測定
- 様々な物質のVUV発光スペクトルの測定が可能

■ XeFLのVUV発光スペクトルを測定

1340px × 100px

スリット幅	
回折格子	1200 G/mm H-UV
波長分解能	0.04 nm
フラッシュ回数	200回
中心波長	180 nm
真空の圧力	3.3×10 ⁻² Pa

上の画像の1340個の各列における100個の素子の値を全て足し上げて求めた発光スペクトル。

VUV領域用のPMTで測定したXeFLのVUV発光スペクトル。

まとめと展望

- 次世代の暗黒物質探索実験に向けて冷却CCDカメラやMPPCのような半導体光センサを導入し、液体キセノンのNIR発光の精密測定を進めている。
- 気体キセノンをβ線で励起することでNIR発光スペクトルを測定できた。液体キセノンでも同様の測定を行うために準備を進めていく。
- 分光器と冷却CCDカメラを用いた高精度なスペクトル測定技術は、様々な研究で応用できる可能性があり、今後も細かい調整や追加の測定を行なっていく。

[1] 小野隼人 他, “液体キセノンの赤外発光の測定-3”, 日本物理学会第71回年次大会, (東北学院大学, Mar. 2016) 21aCA-8.
※本研究はJSPS科研費 J25287055, 19H05805および東大ICRR共同利用研究の助成を受けています。