

ダイヤモンド検出器の 暗黒物質方向探索への応用

筑波大学数理物質系

梅本篤宏

第2回新学術地下宇宙若手研究会

2021/11/25-26 神戸

ダイヤモンドの物性と粒子検出器として

バンドギャップ	5.47 eV
密度	3.52 g/cc
屈折率	2.42
熱伝導率	900- 2000 (W/m/K)
ϵ 値	11.8 – 13.1 (eV)
移動度 電子 (正孔)	4500 (3800) cm/V · s
絶縁耐圧	10E+07 V/cm

過去に荷電粒子に対して感度を持つことは報告されている。

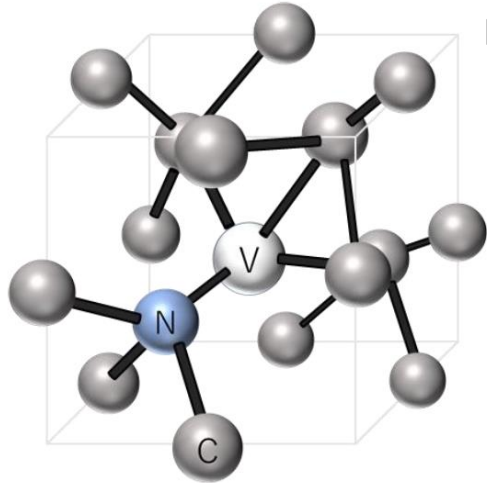
- 半導体検出器として 59.5 keV γ 線(Am241)を検出。エネルギー分解能 3.8 keV 1)
- α 線(5 MeV)と β 線(1MeV)のシンチレータ発光を可視光域で検出 2)
- 高放射耐性を生かした高エネルギー実験への応用検討。ピクセル検出器など 3)

1) S. Hirano 博士論文 (2021),

2) P. J. Dean et al., Proc. Phys. Soc. 76 670 (1960)

3) Dirk Meier, CVD Diamond Sensors for Particle Detection and Tracking, CERN, (1999)

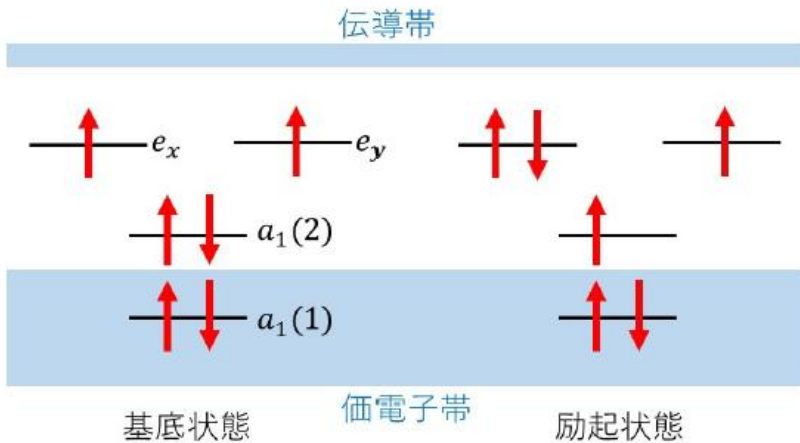
ダイヤモンド Nitrogen Vacancy (NV)center



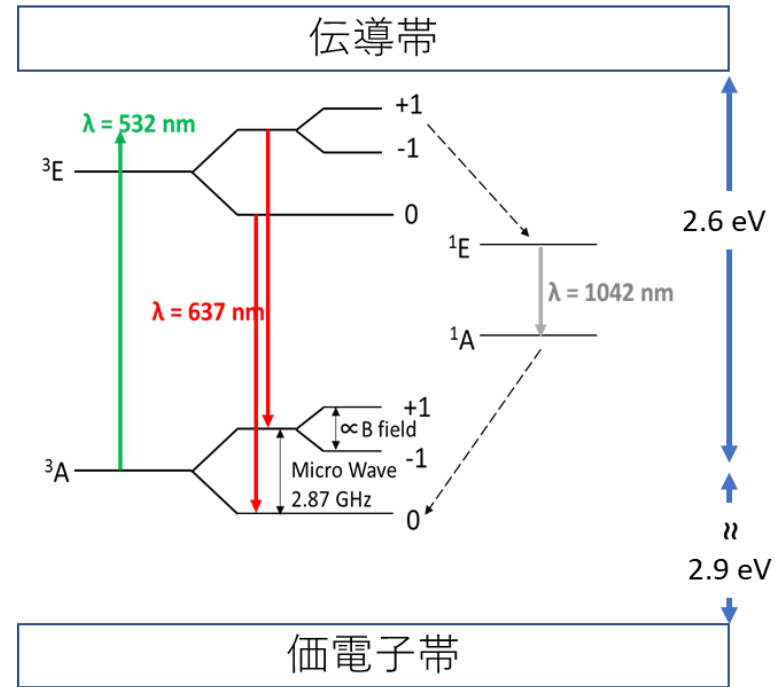
NV center の結晶構造の模式図

炭素原子を置換した窒素原子と隣接する空孔からなる欠陥。

電子を各炭素から1つ、窒素から2つ、周囲から1つ捕獲。
スピン量子数 $S=1$, 磁気量子数 $m=0, m=\pm 1$ の3重項状態。



NV center の電子準位の模式図



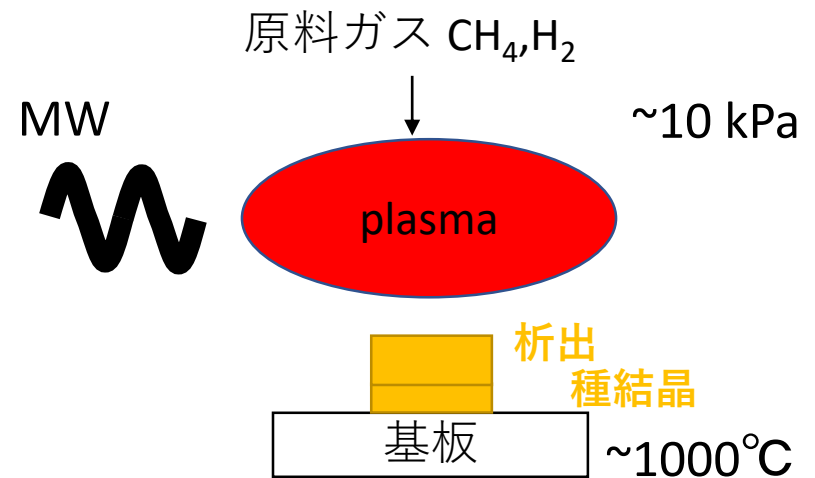
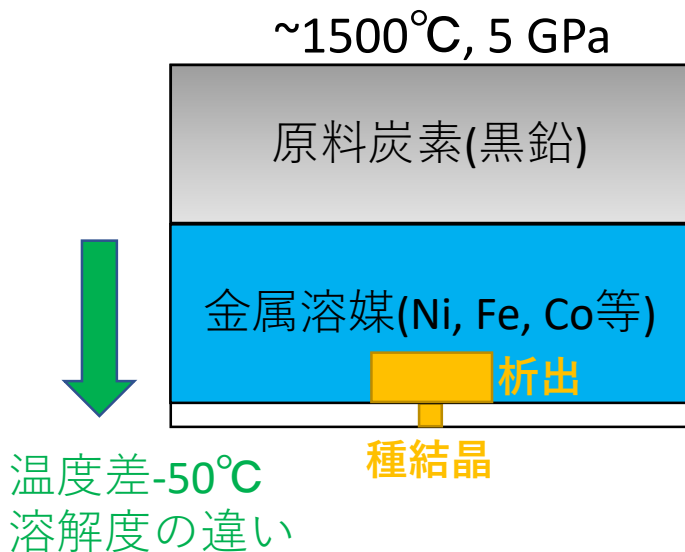
磁場、圧力によって量子状態が変化。室温・可視光で読み取り可能。
量子センサー・量子コンピュータへの応用研究が進められている。

ダイヤモンド(NV center)作製方法

- 合成ダイヤモンドの研究は1950年代より開始
- High Pressure High Temperature (HPHT) と Chemical Vapor Deposition(CVD)

HPHT : 天然ダイヤの生成条件を再現

CVD : マイクロ波でプラズマ化した炭素を積層



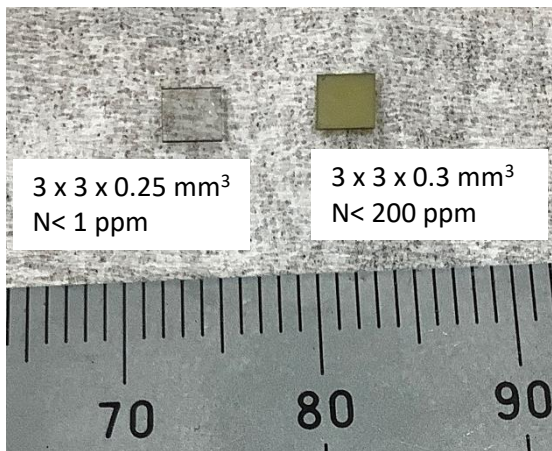
産総研などでダイヤモンド作製可能。購入は Element six(E6), 並木精密宝石など。

NV center はダイヤモンド作製時の窒素混入やイオン注入、電子ビームで形成。
高密度になると $\sim 100\text{ ppm} = 10 / (10\text{ nm})^3$ のNV center を含む。 Phys RevB. 80. 115202 (2009)

NV center の光学特性

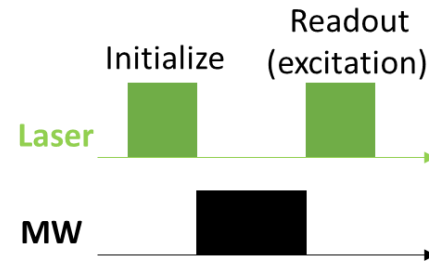
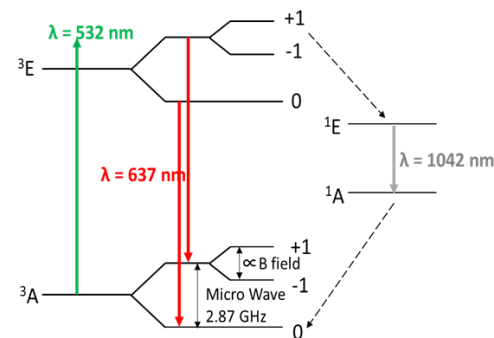
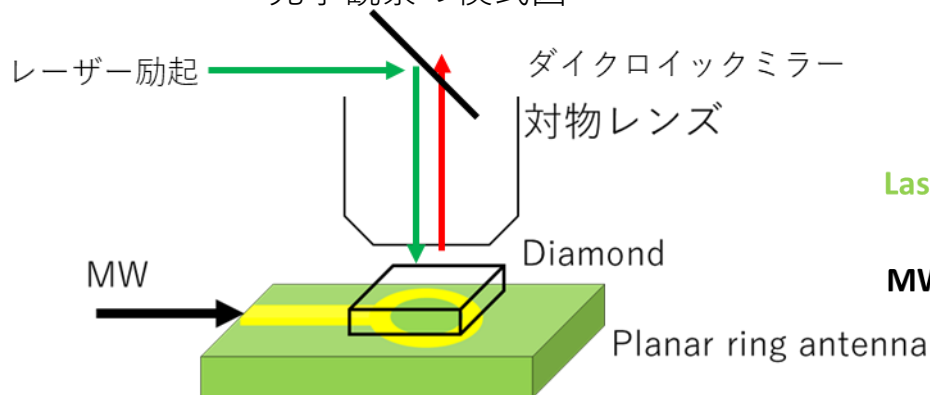
CVD

HPHT



E6社製のダイヤモンドを使用。色は窒素不純物量。
1000°C, 2hours のアニーリングでNV center を形成。
1000→常温の冷却を2分で行うことで欠陥も形成。

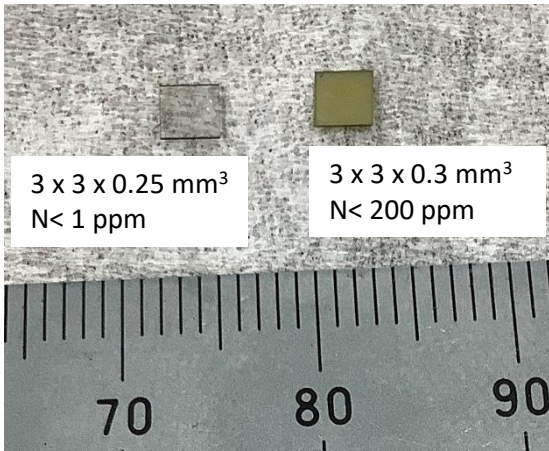
光学観察の模式図



NV center の光学特性

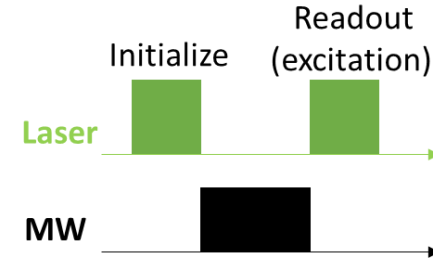
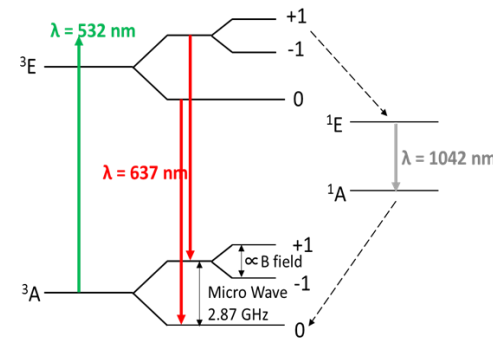
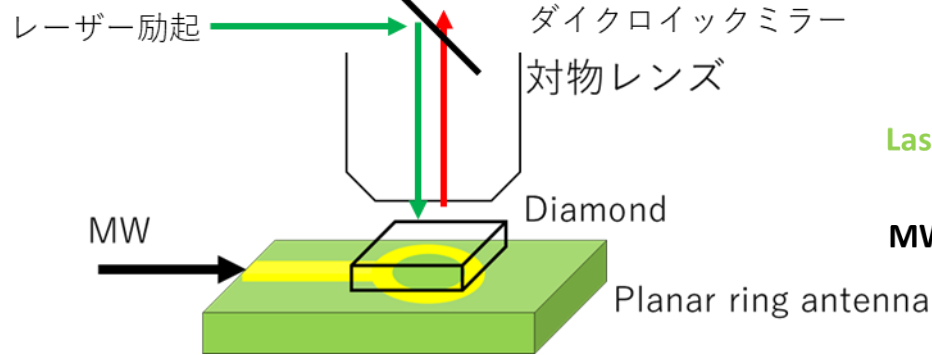
CVD

HPHT

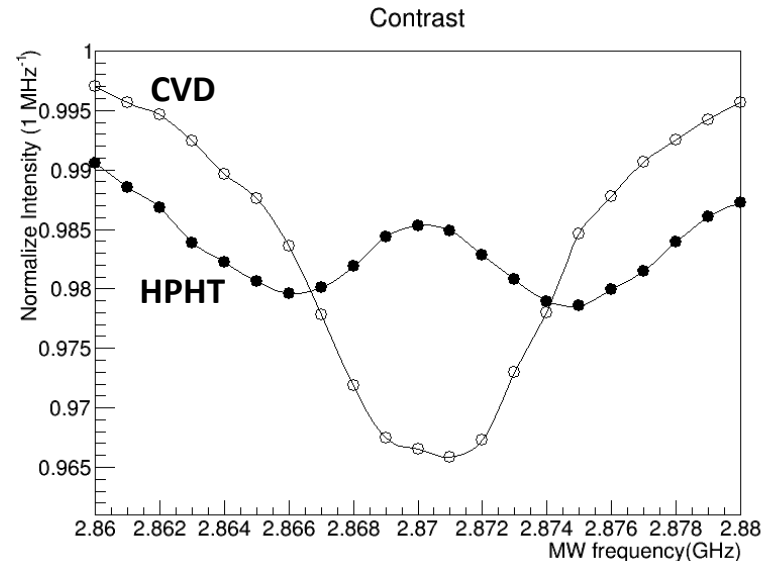
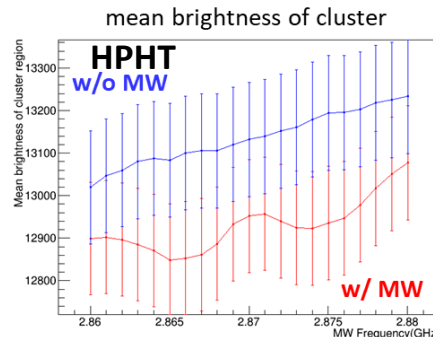
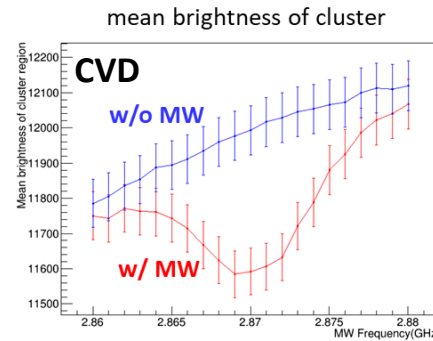
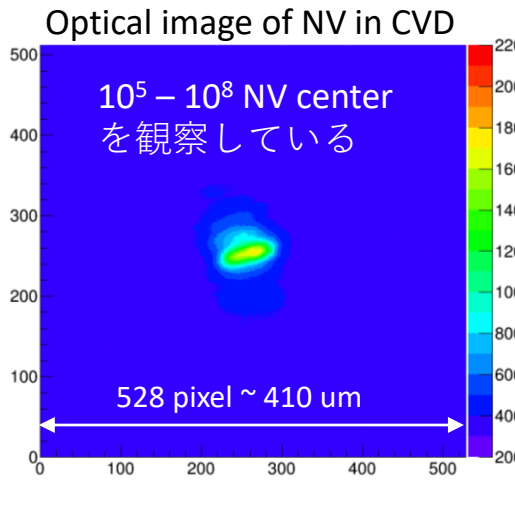


E6社製のダイヤモンドを使用。色は窒素不純物量。
 1000°C, 2hours のアニーリングでNV center を形成。
 1000→常温の冷却を2分で行うことで欠陥も形成。

光学観察の模式図



x10 の対物レンズで集団的なNV center の挙動を測定

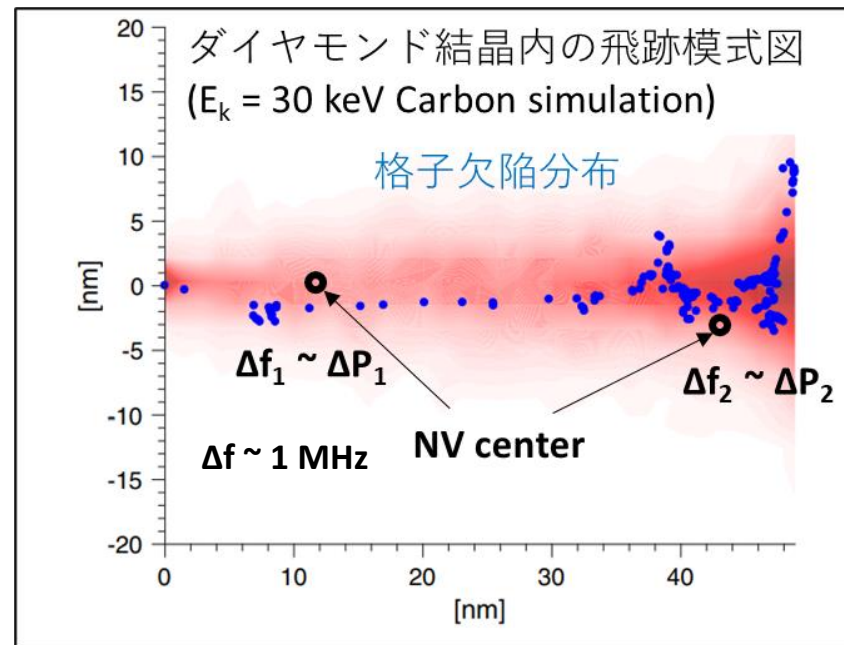
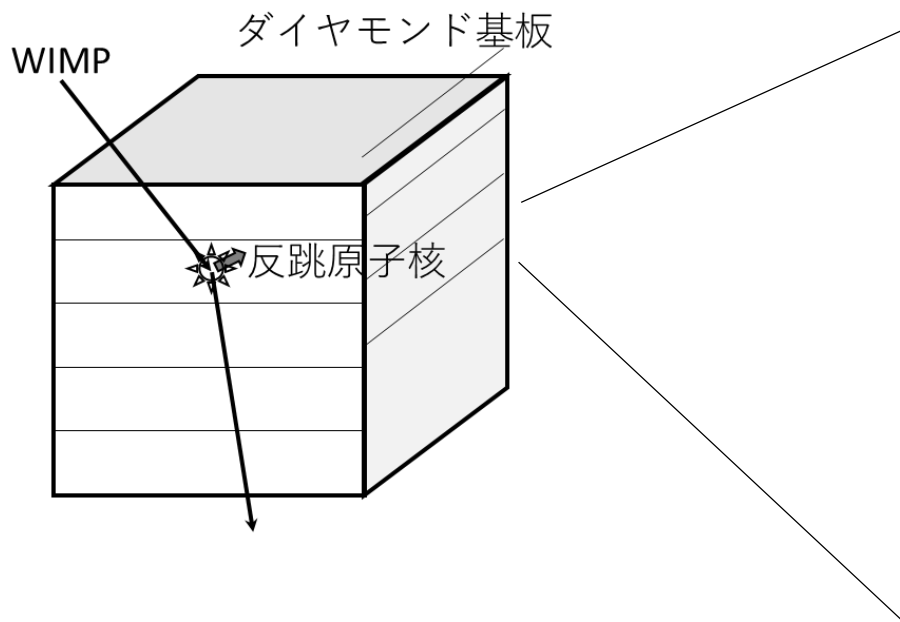


窒素不純物の多いHPHTでは、冷却の際に生じる欠陥も多く格子ひずみの影響が見える

暗黒物質方向探索の概要

Ronald Walsworthらが提案
Phys. Rev. D 96 (2017)

ダイヤモンド基板をスタックしたものを用意。
粒子検出器としての特性とNV centerの特性を用いて飛跡方向の検出を目指す。



①粒子検出器としての特性を生かして
反応したダイヤモンド基板を特定。

②反跳炭素による格子欠陥の並びをNV
centerを圧力センサーとして読み取る。

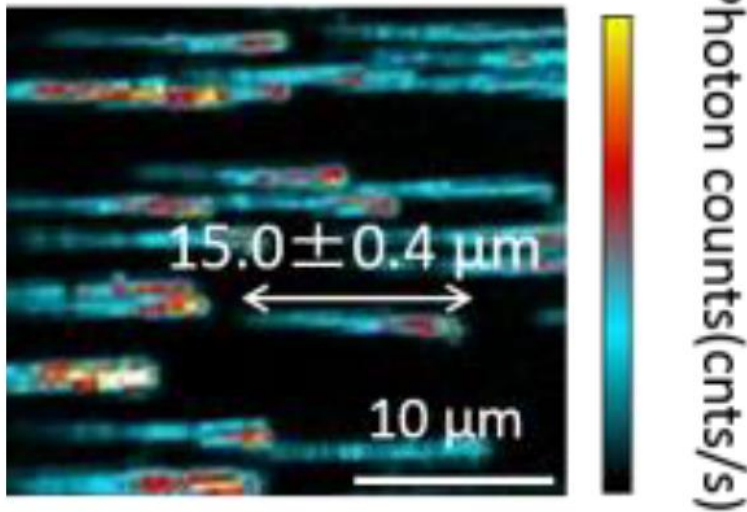
NV center を用いた粒子飛跡方向検出

群馬大、高崎研が重イオンによる格子欠陥をNV centerの並びとして検出。

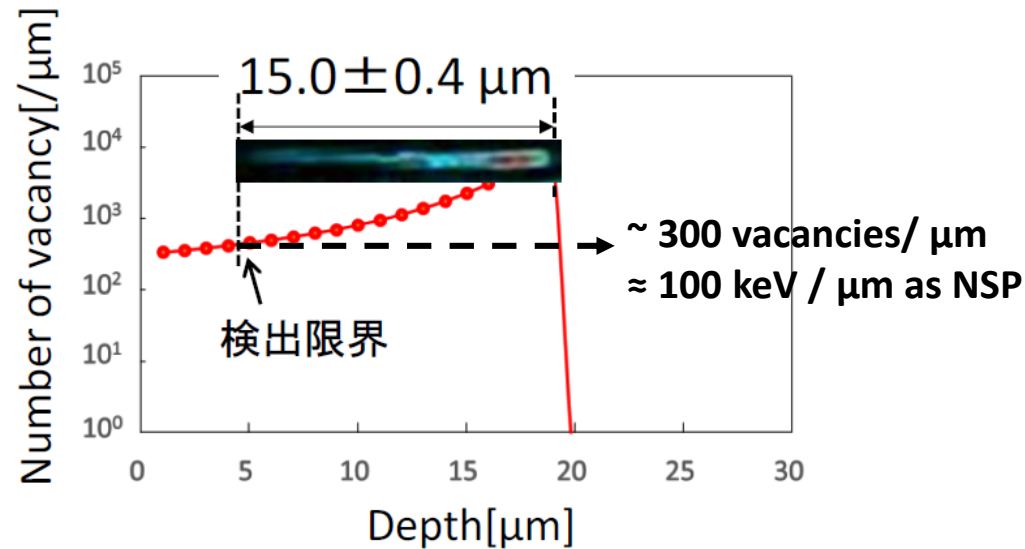
⇒新たに生じた格子欠陥と結晶中の窒素で新たにNV center を生成し発光点を読み取る

春山盛善 群馬大学修士論文(2016)

Os 490 MeV イオン飛跡の光学像



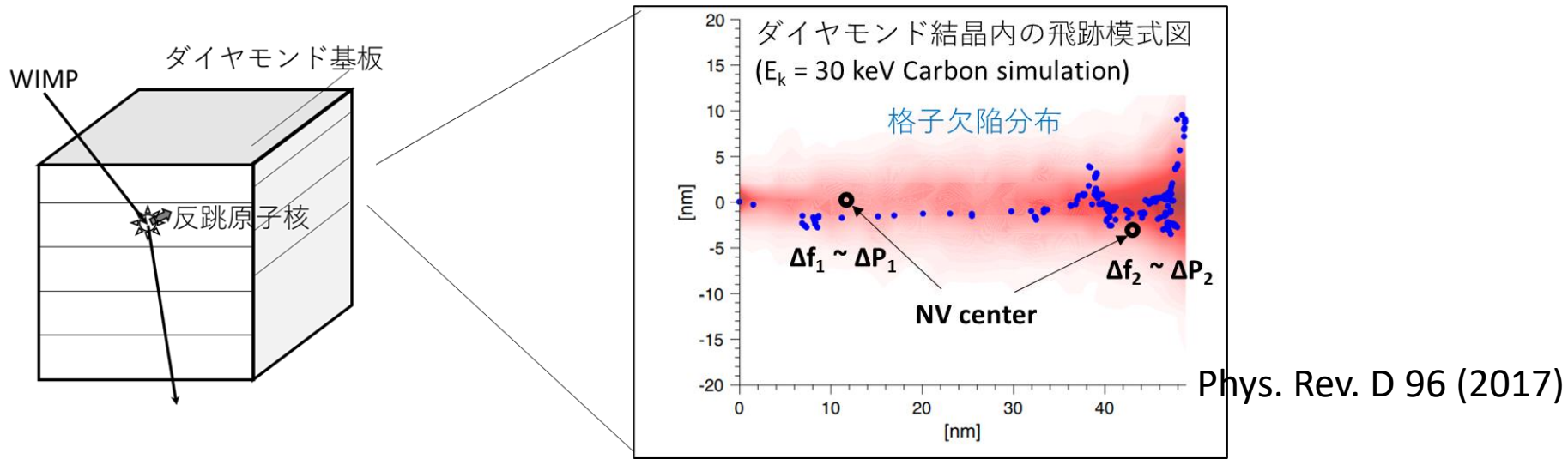
生成欠陥数期待値と飛跡の検出閾値



暗黒物質による反跳原子核信号に対しても応用が期待。

⇒格子欠陥の並びから NV center を生成させ、さらに圧力センサーとして機能させて高分解能な飛跡情報の取得。

暗黒物質方向探索に向けた開発要素



- ① ダイヤモンドをシンチレータ+ボロメータとして機能させ位置検出+粒子識別
- ② $E < 100$ keV の炭素による格子欠陥に対しても NV 生成でTracking

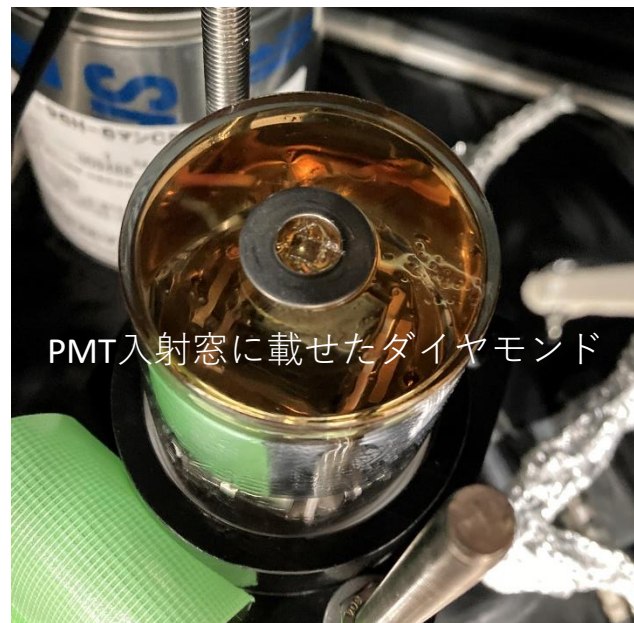
上記課題を解決できれば、暗黒物質の方向探索への応用が可能。

現在行っている研究内容

- ナノスケールの飛跡・単一NV center を検出するための共焦点顕微鏡開発
- NV center を用いた粒子飛跡方向検出の実証(重イオン照射)
- 粒子検出器(シンチレータ、ボロメータ)としての実用化
- 暗黒物質方向探索に適したダイヤモンド開発(窒素不純物量など)

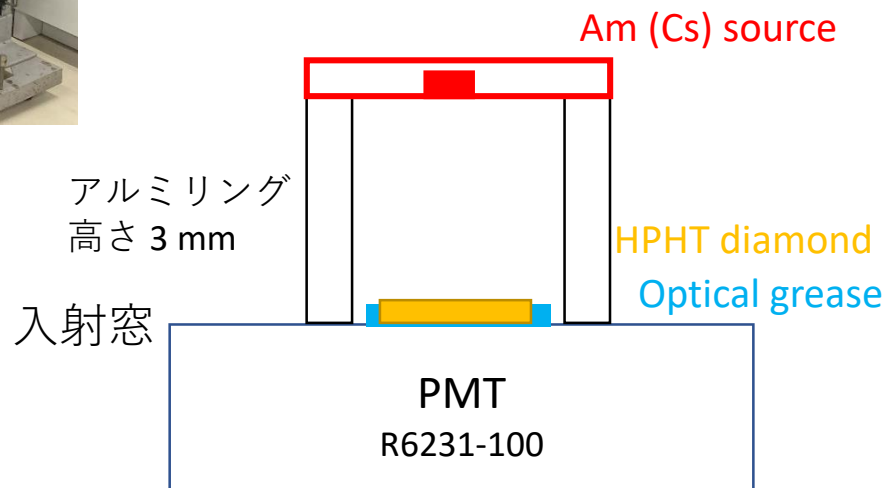
シンチレータ検出器としての性能評価

筑波大学 飯田崇史助教授に協力していただき荷電粒子に対する発光を測定



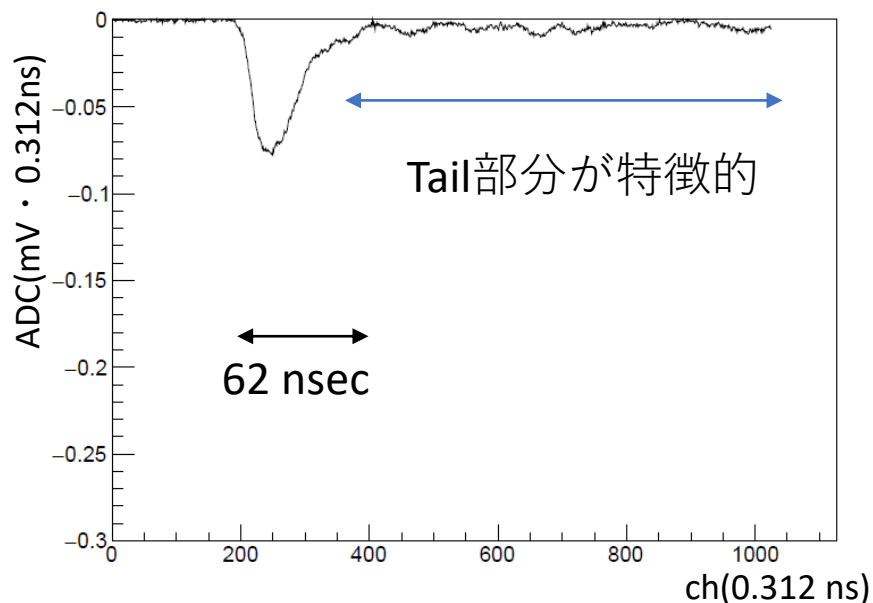
照射体系の断面模式図

α 線(Am)と γ 線(Cs)をアニーリング後のHPHT Diamond ($3 \times 3 \times 0.3 \text{ mm}^3$) に照射。
バイアルカリ光電面のPMTで可視光域の発光を見てみた。

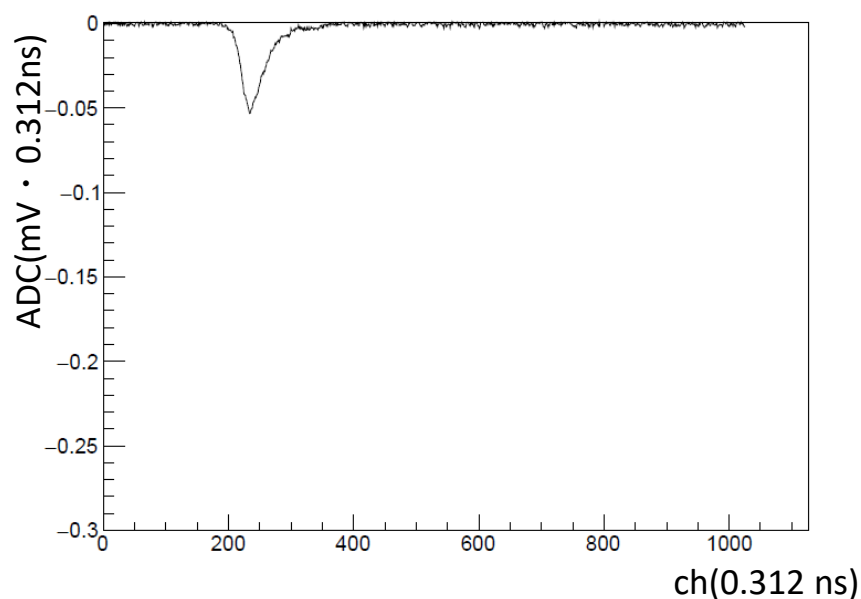


α 線(Am) 照射で検出された波形

α 線事象っぽい波形



コンタミノイズっぽい波形



- 40 mV でトリガー
- 0.312 ns/ch でデータ取得

減衰時間が短く、発光量も小さい。

ダイヤモンドがPMTに比べて小さいので、PMTで反応するようなノイズも多い

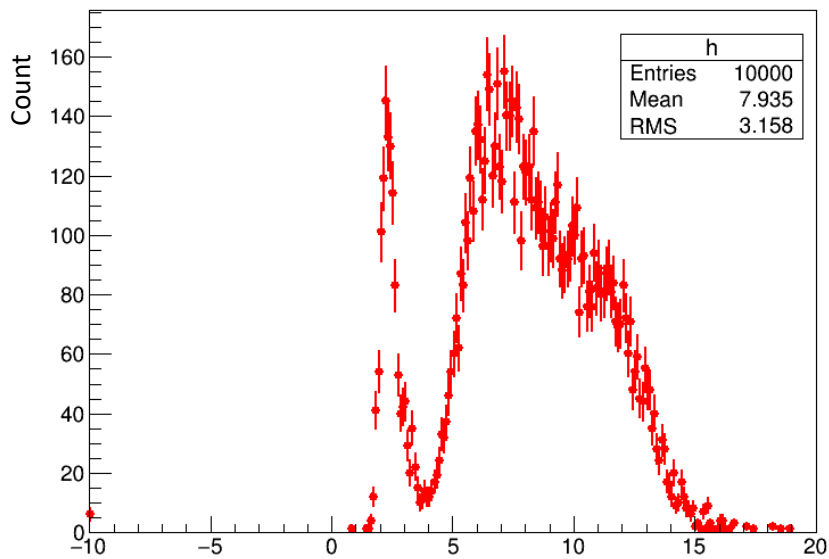
解析パラメータ

ADCTotal : 立ち上がり(3 mV を超えた点)から最後のチャンネルまでのADCの積算量

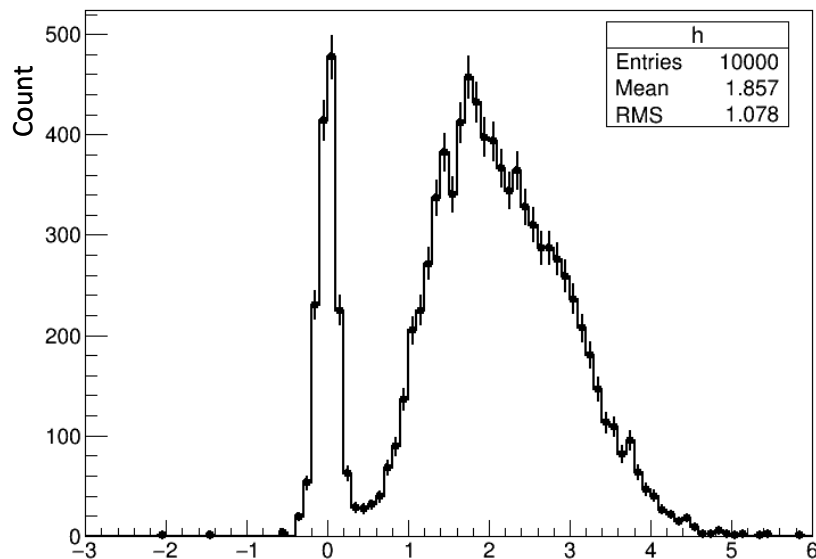
ADCTail : ch = 400 から最後のチャンネルまでのADCの積算量

α線(Am)のデータ解析

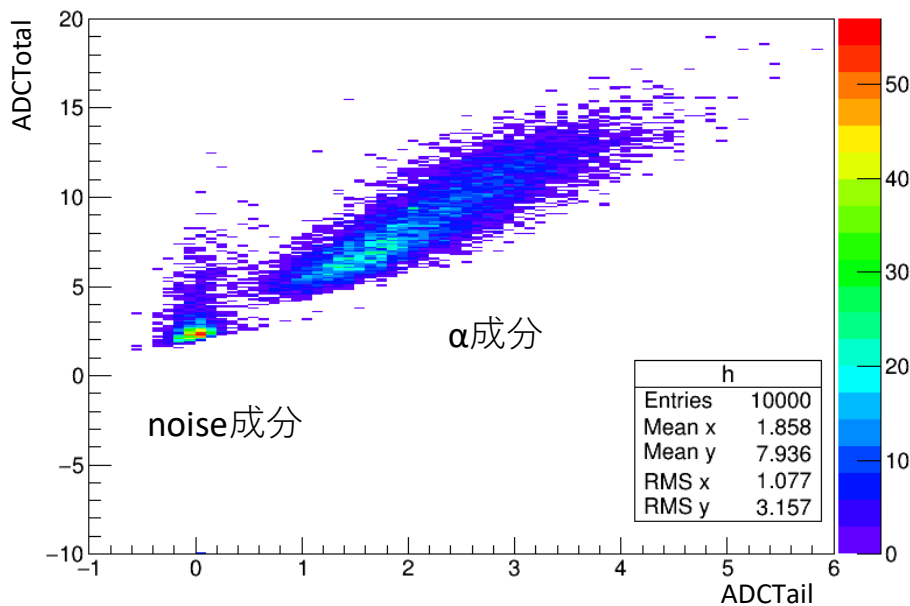
ADCTotal



ADCTail



ADCTotal:ADCTail



2成分のピークを観測。ノイズとα線に相当

適当な閾値でカットしたときの事象数

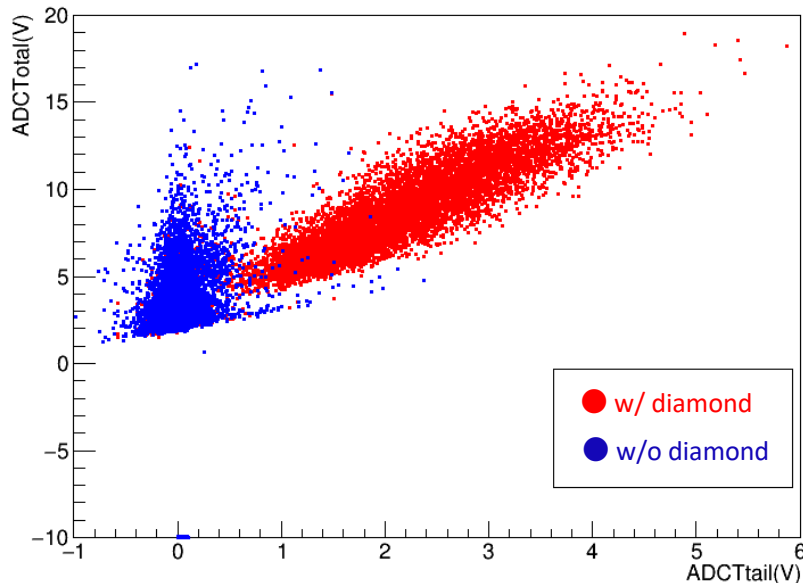
ADCTotal \geq 4 V : 8708 events

ADCTail \geq 0.5 V : 8460 events

ADCTotal \geq 4 V かつ ADCTail \geq 0.5 V
: 8447 events

BG測定との比較

Am α 40 mV



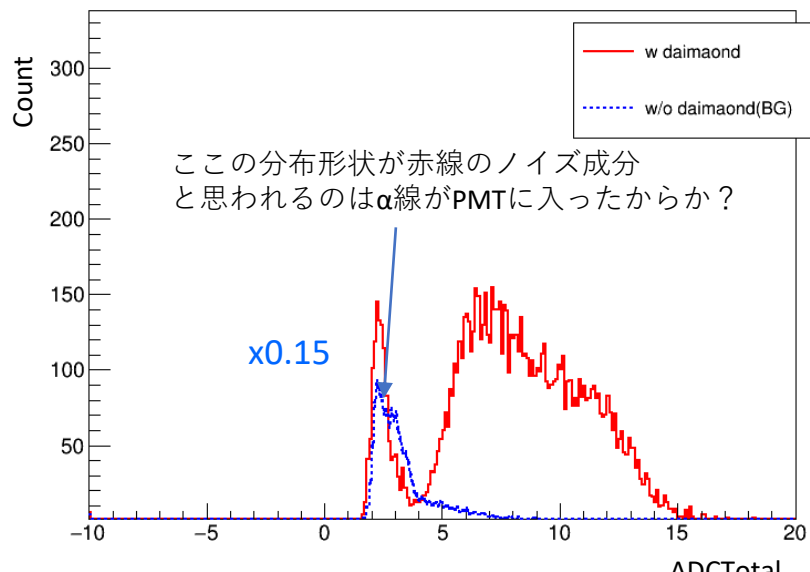
Diamond有り無しの条件で結果を比較。

ADCTotal, ADCTail の大きな成分はやはり α 線事象。

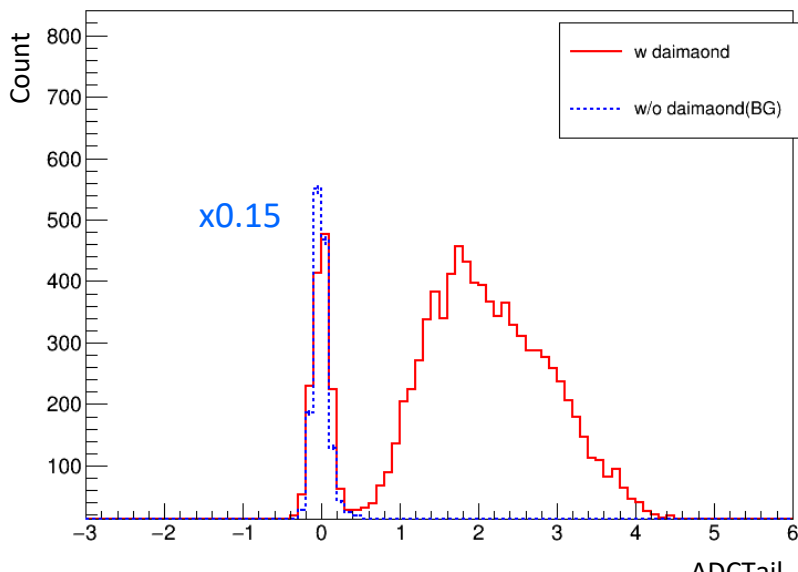
自分たちのセットアップでも α 線の発光を確認。

下の2つの図はBG測定の方を0.15倍Scale
(前頁の α 相当の事象数が $\sim 8500/10000$ だったので)

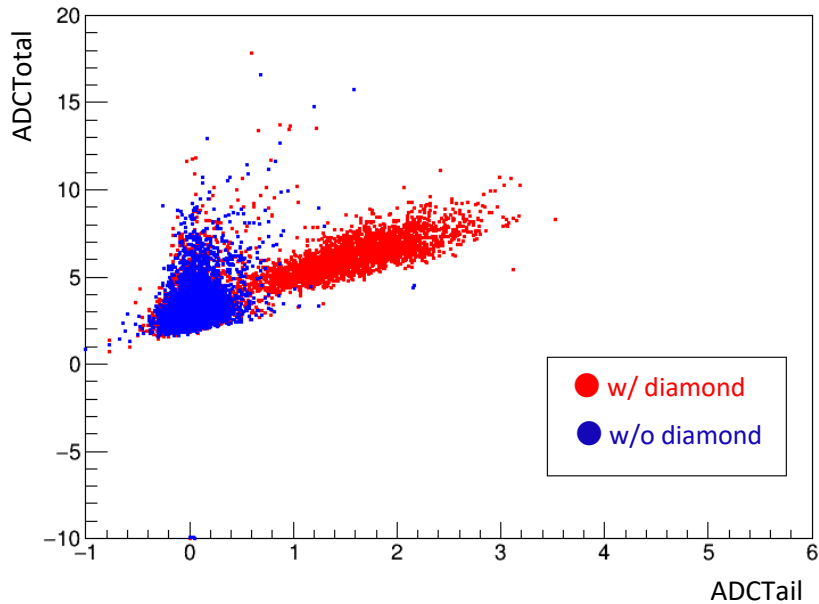
Am α 40 mV ADCTotal



Am α 40 mV ADCTail



γ 線(Cs)の場合



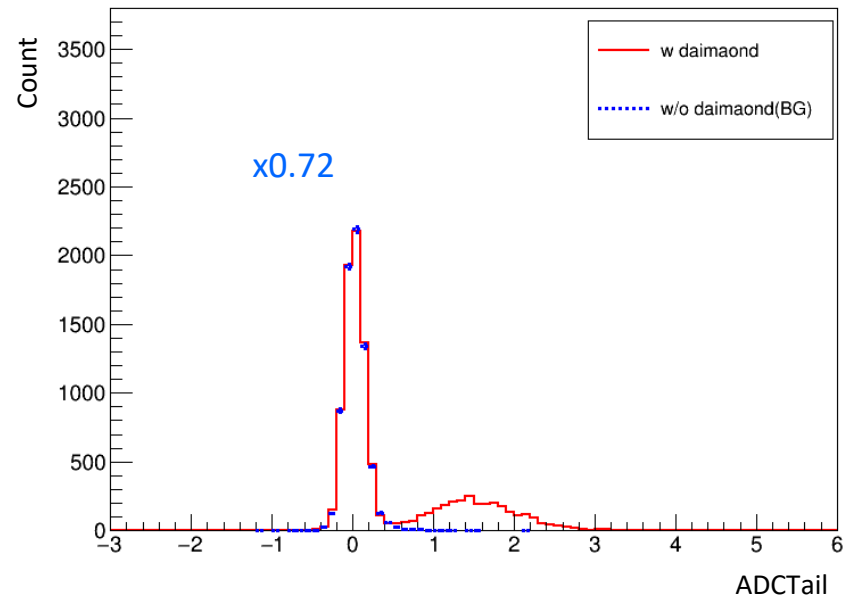
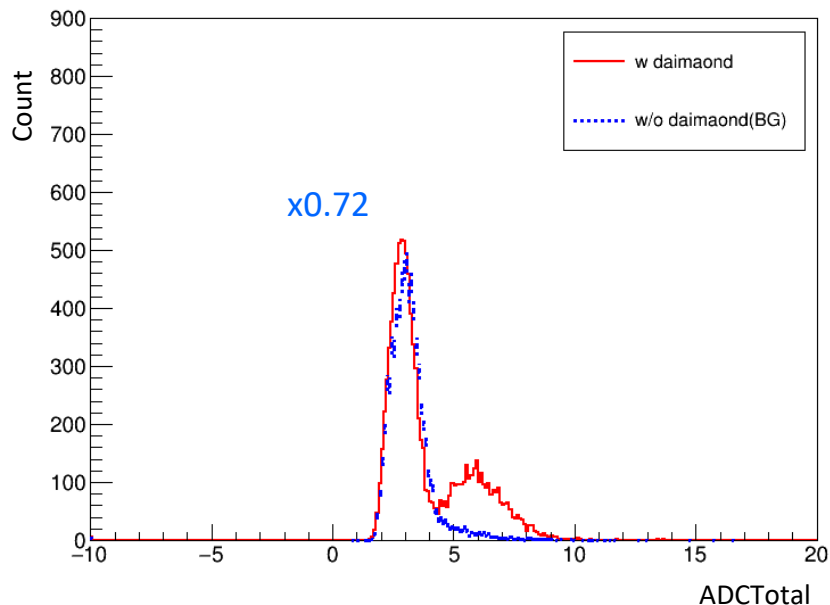
Diamond有り無しの条件で結果を比較。

γ 線(Cs)による発光も検出できている。

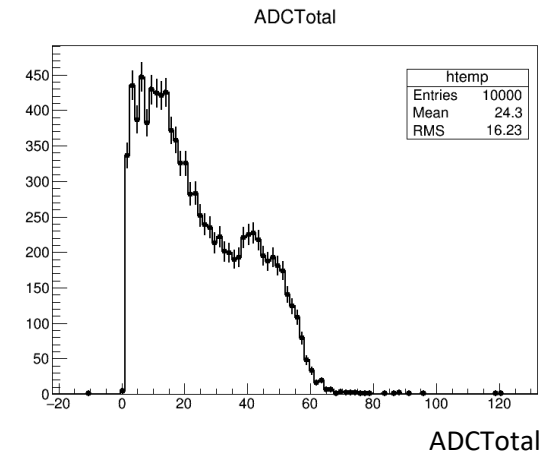
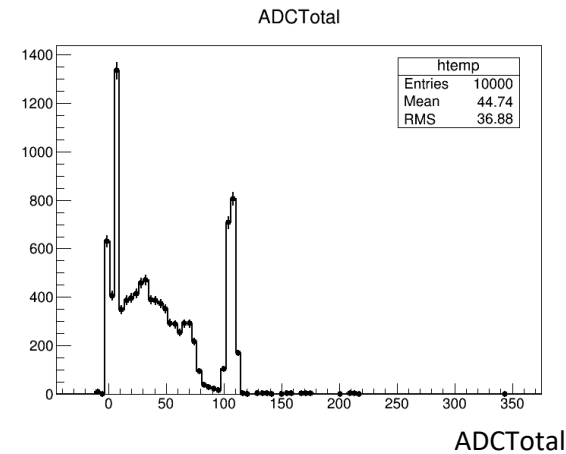
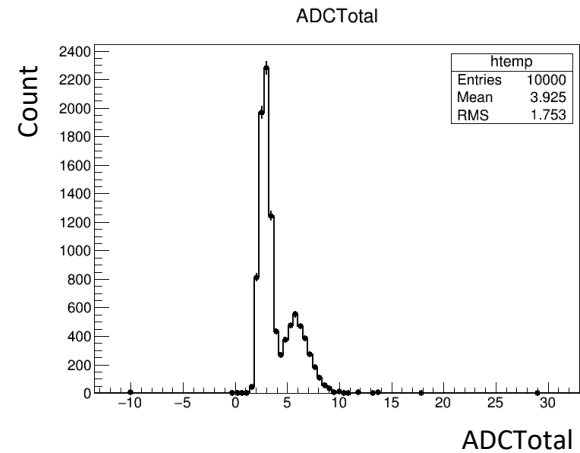
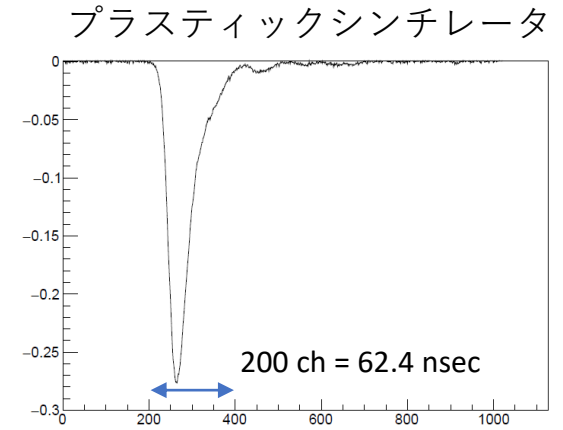
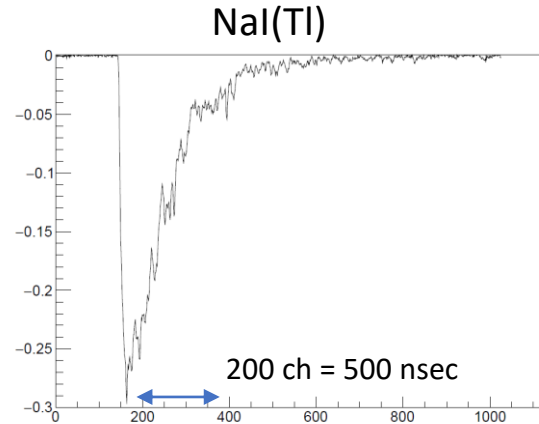
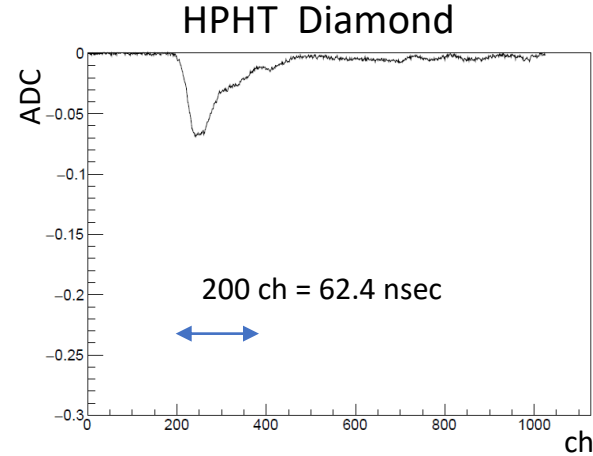
下の2つの図はBG測定の方を0.72倍Scale.
左図の赤点で 2785事象が以下のカットを満たす。
ADCTotal \geq 4 V かつ ADCTail \geq 0.5 V

ADCTotal

ADCTail



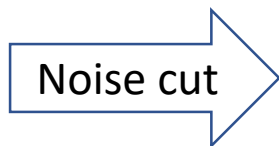
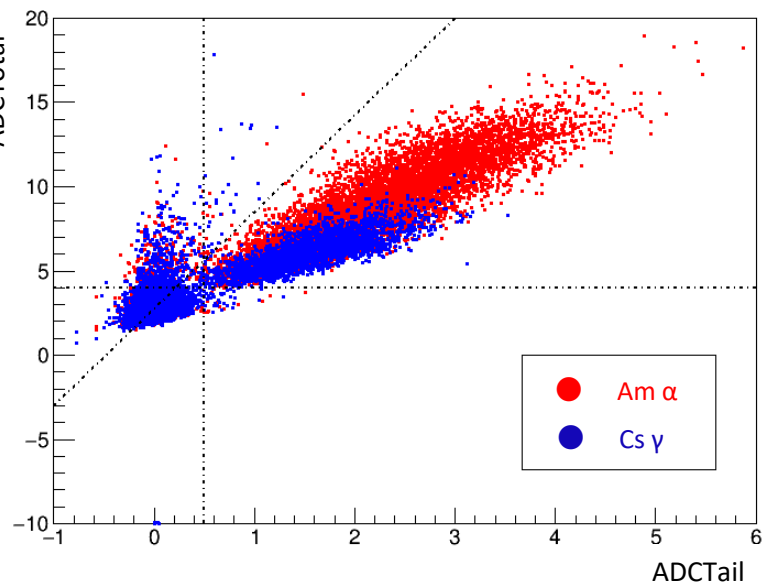
他のシンチレータとの比較(Cs線源)



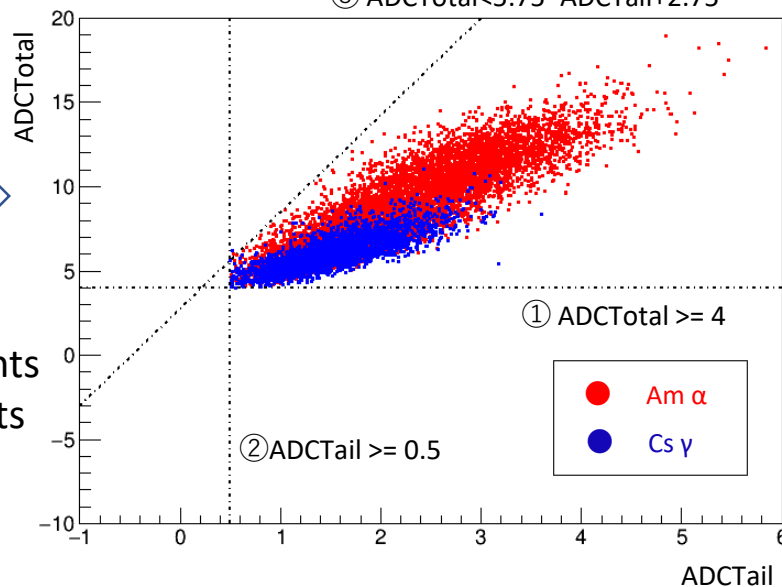
同じ実験セットアップで測定したデータ。
ダイヤモンドの発光速度は有機に近い。発光過程は分子(窒素, NV)起因か。
発光量は ADCTotal の比較から、プラスチックの1/10程度 (~ 1000 pe/MeV)

ダイヤモンドでの α 線(Am)と γ 線(Cs)の比較

③ $ADCTotal < 5.75 * ADCTail + 2.75$

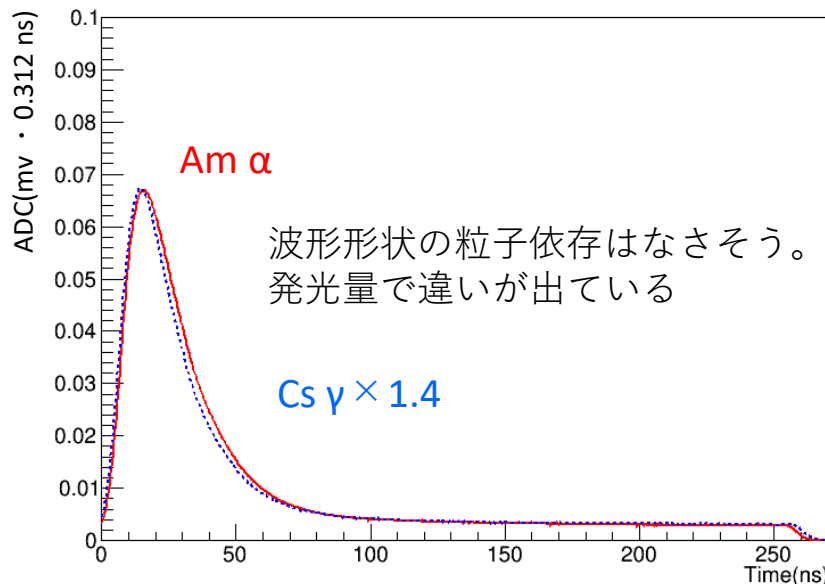
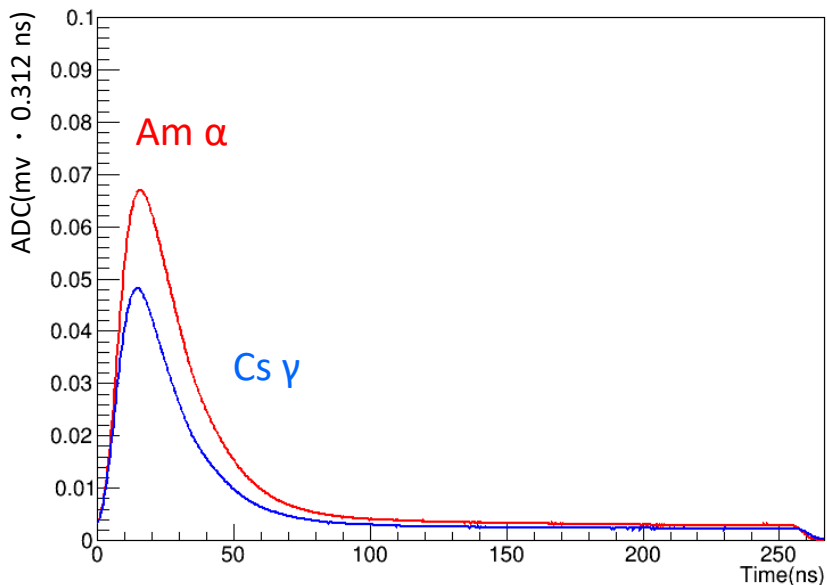


Cut後の事象数
Am α : 8433 events
Cs γ : 2754 events



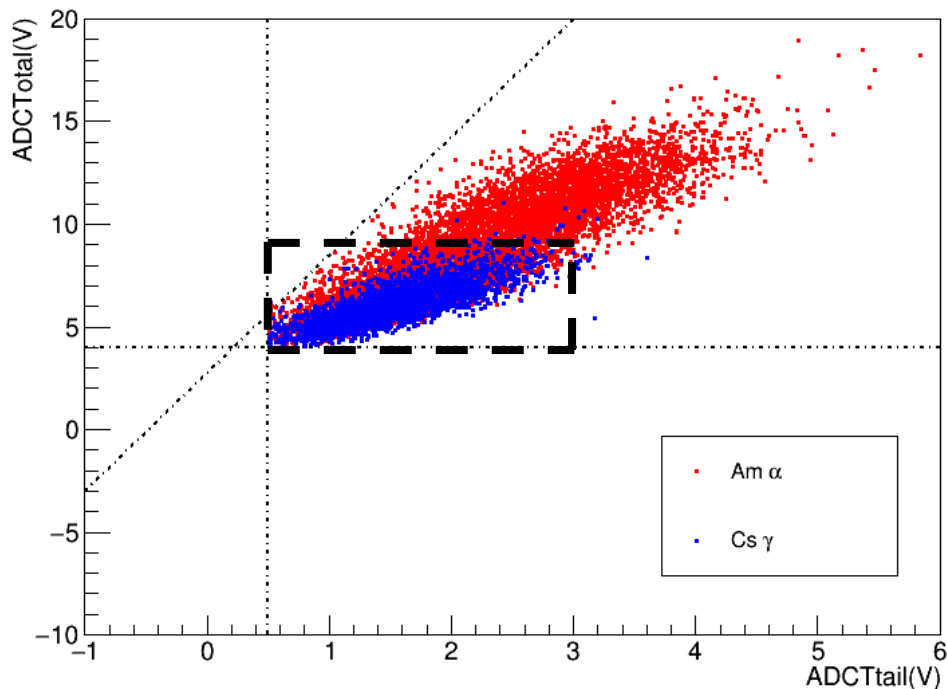
Noise cut後の事象で見た平均波形
Average pulse shape

左図のCsのピーク高さがAmに合うように縦方向に規格化
Average pulse shape



波形形状の粒子依存はなさそう。
発光量で違いが出ている

Am α と Cs γ の識別



左のボックス内
をCs γ like な事象とすると
44%の α 事象を生き残したまま
 γ 事象を約99%除去できる

	ボックス内 事象数(全事象に対する割合)	ボックス外 事象数(全事象に対する割合)	全事象
Am α	4702 (55.8%)	3732 (44.2%)	8433
Cs γ	2715 (98.6%)	39 (1.4%)	2754

シンチレータ—研究の今後の予定

- 検出すべき発光波長の決定。可視光域以外で強い発光が存在するかを蛍光分光光度計による測定で見積もる。(発光過程の理解にもつながる)。
- 位置決定能力の評価。数cm角のダイヤモンドに対してMPPCなどの光検出器で発光位置が特定できるかを試す。
- 粒子識別と検出効率について。中性子による反跳原子と電子事象。

暗黒物質方向探索についての予定

- 今年度残りで共焦点顕微鏡開発と、シンチレータ開発に関してもある程度の完遂を目指す。ボロメータとしての評価も開始できれば。
- 2022年度はNV center による飛跡検出の評価を進める。重粒子線(Xe, Fe, Ar, Carbon)の飛跡に対し、検出可能な飛跡長や dE/dx , 厚み方向に対する光学像の違いを定量化。またシンチレータ+ボロメータの評価、検出器構造検討。
- 2023年度は中性子を用いた暗黒物質探索のデモンストレーションを行う。結果の理解ができれば、地上で試験的に暗黒物質方向探索を行う。

まとめ

- ダイヤモンドによる暗黒物質探索実験について述べた。
- NV center を用いた超解像な飛跡検出の可能性や、シンチレータなどの粒子検出器としての実績があることから、暗黒物質方向探索への応用は十分に期待できる。
- 今後も暗黒物質を検出するための研究を推進する。