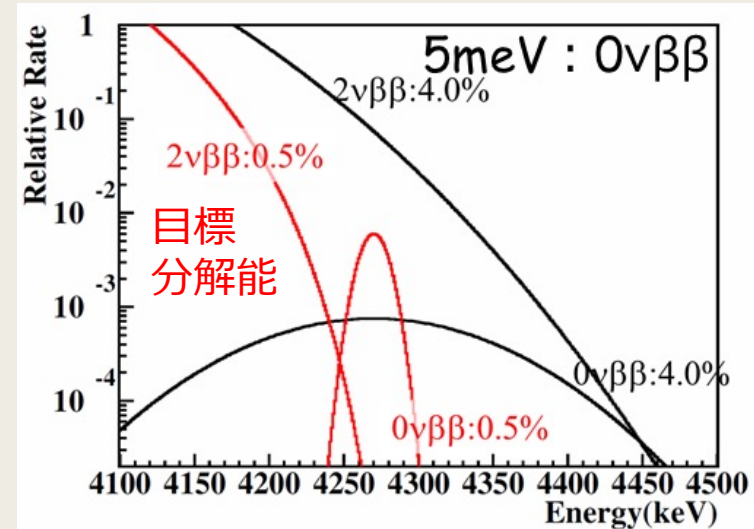


機械学習による
CAF₂シンチレーションボロメーター
のエネルギー分解能改善

大阪大学 M1 白井竜太

研究動機

- CANDLES 実験では、 ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測を目指している
- エネルギー分解能が悪い検出器では $2\nu\beta\beta$ 崩壊がBGとなり感度が悪化する

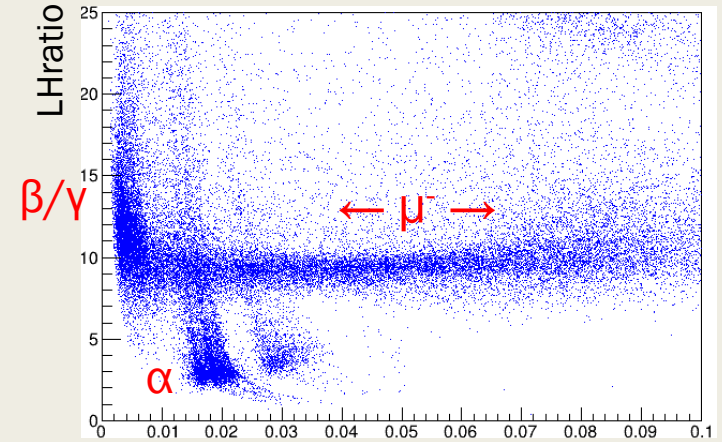
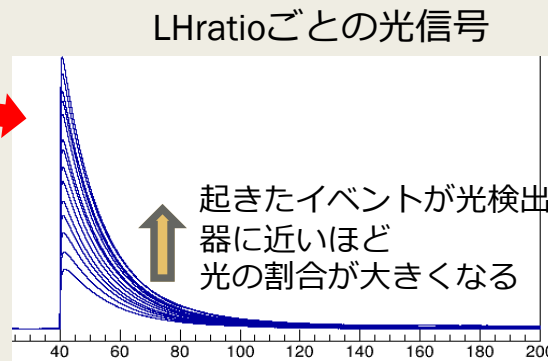
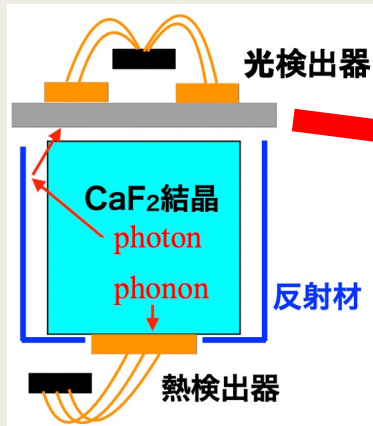


→その影響を排除するため、エネルギー分解能の優れた検出器が必要(右図)

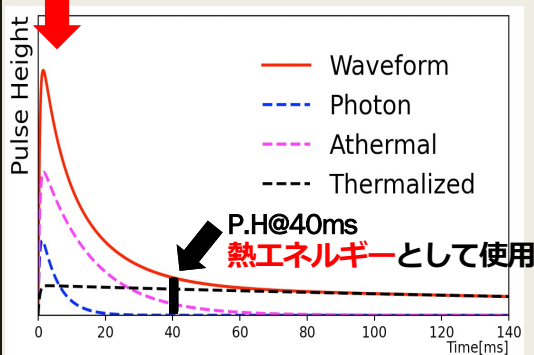
- 開発中の CaF₂シンチレーティングボロメータの目標のエネルギー分解能は4.3MeVにおいて0.5%である

→しかし現在は目標のエネルギー分解能を達成していない

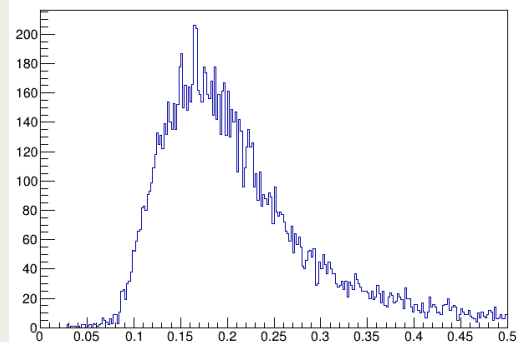
CaF₂シンチレーティングボロメータ



40msにおける熱信号波高

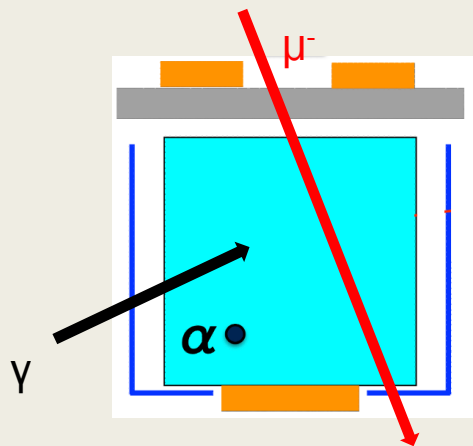


最大波高を用いた α 事象スペクトル



- 熱信号の構成要素のうち、光子とフォンの波高には結晶内位置依存性がある
→影響排除のため40msでの波高をエネルギー値として使用
- 結晶内の同一位置における事象についてはエネルギー分解能が非常に良い(0.3%)
→位置依存性を除去できれば分解能が向上
- 同一イベントの光信号と熱信号の波高の比(LHratio)から α 事象が弁別できる
- α 事象は単色であることから、まずは α 事象について、機械学習によるエネルギー分解能の改善を目指す

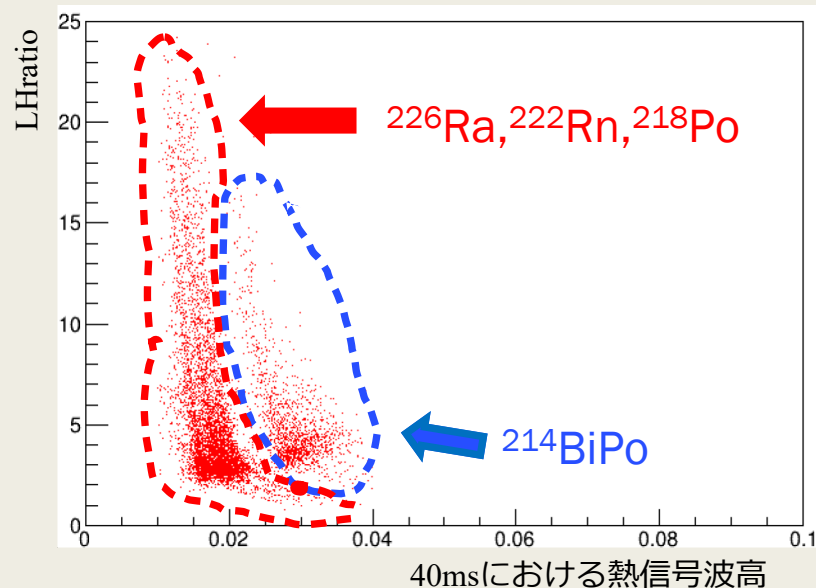
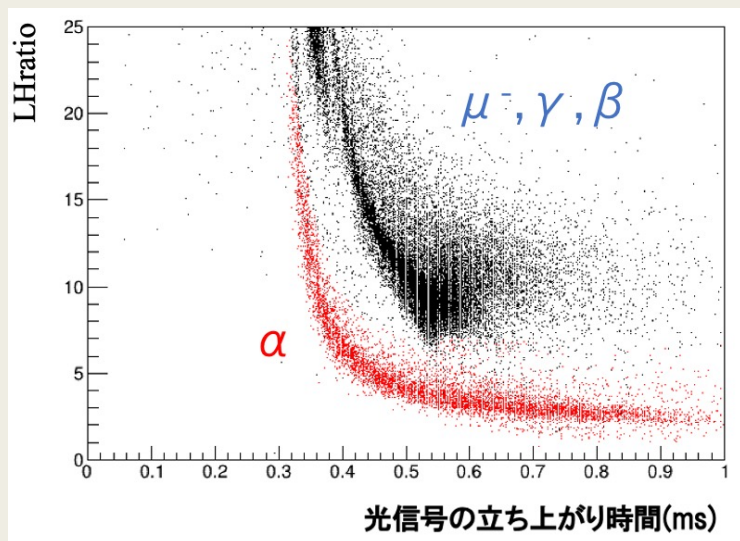
粒子弁別



μ^- は広い範囲にわたって相互作用を起こすため結晶内位置依存性がない(LHratioが一定)

α, γ は位置により光子と熱エネルギーの割合が変化する(LHratioが広く分布する)

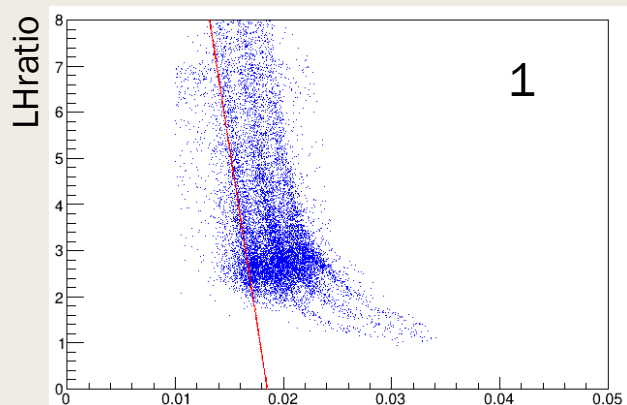
また、 α はクエンチング効果により熱エネルギーの割合が大きくなる(LHratioが小さくなる)



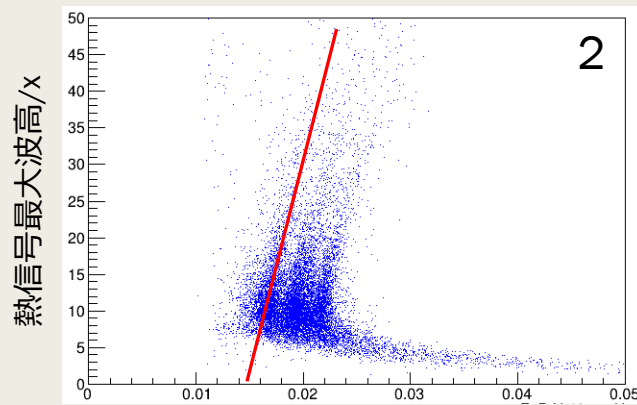
エネルギースペクトル作成

1. 蛍光量/熱量のバラつき(結晶内位置依存性)
2. 熱量検出器に吸収されるphotonのバラつき(結晶内位置依存性)
3. 熱信号波形の時定数のバラつき

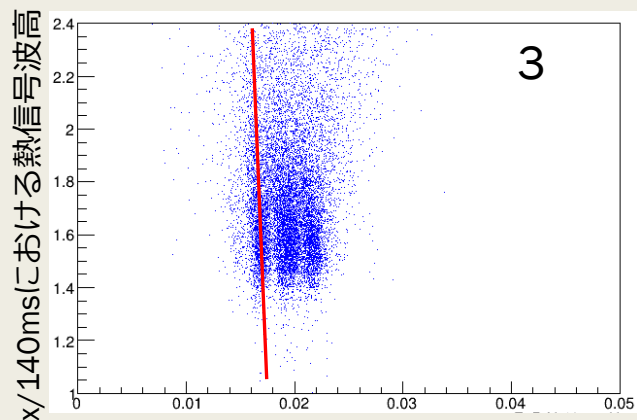
これらの影響を直線フィッティングにより補正



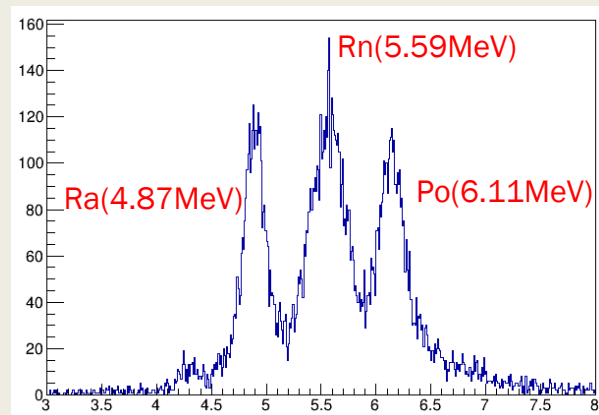
40msにおける熱信号波高



40msにおける熱信号波高*補正係数



40msにおける熱信号波高*補正係数

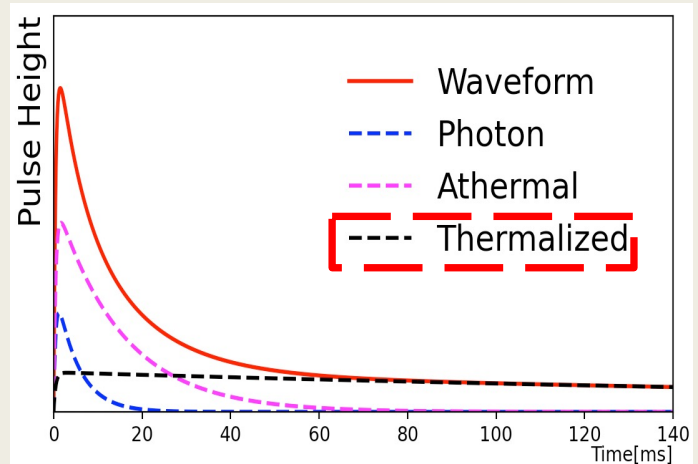


エネルギー[MeV]

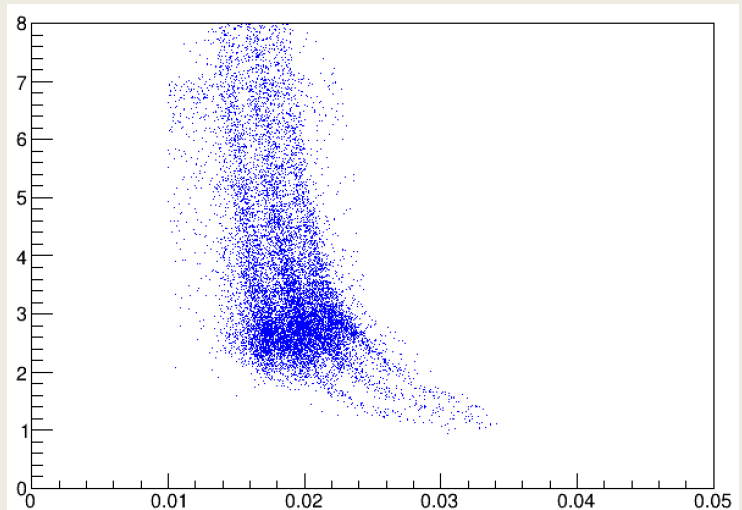
フィッティングによる分解能改善

- 波形を3成分でフィッティングし、熱化部分(黒破線)の40msにおける波高を使用

→位置依存性のある2成分を除去



フィッティング前

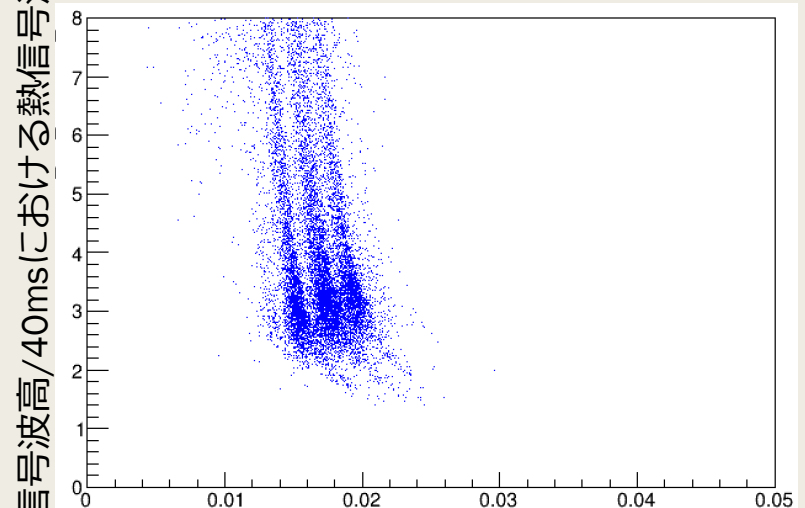


40msにおける熱信号波高

分解能3.4%



フィッティング後



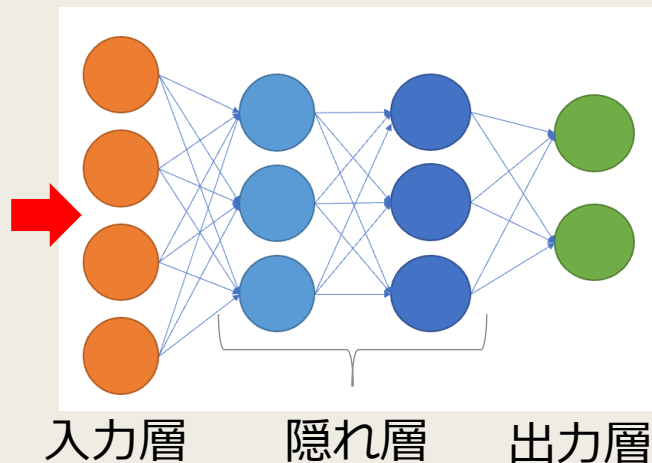
光信号波高/40msにおける熱信号波高(熱化)

40msにおける熱信号波高(熱化)

分解能2.1%

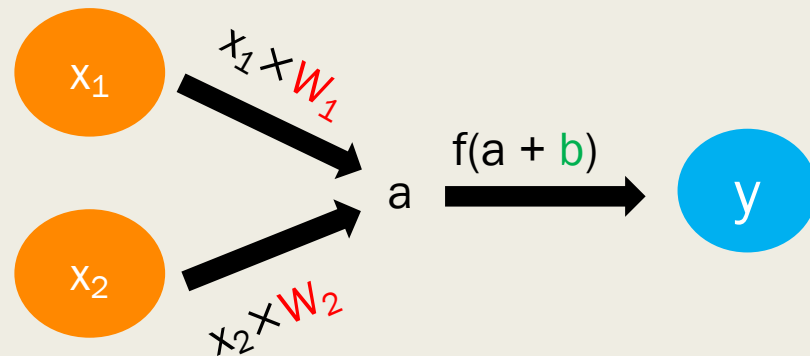
ニューラルネットワーク

熱・光の波形データ

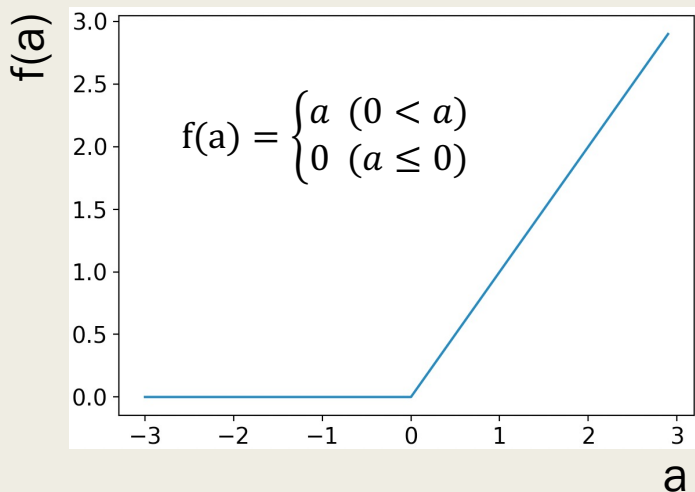


→ **エネルギー**

f...活性化関数
モデルの表現力を上げるために使われる

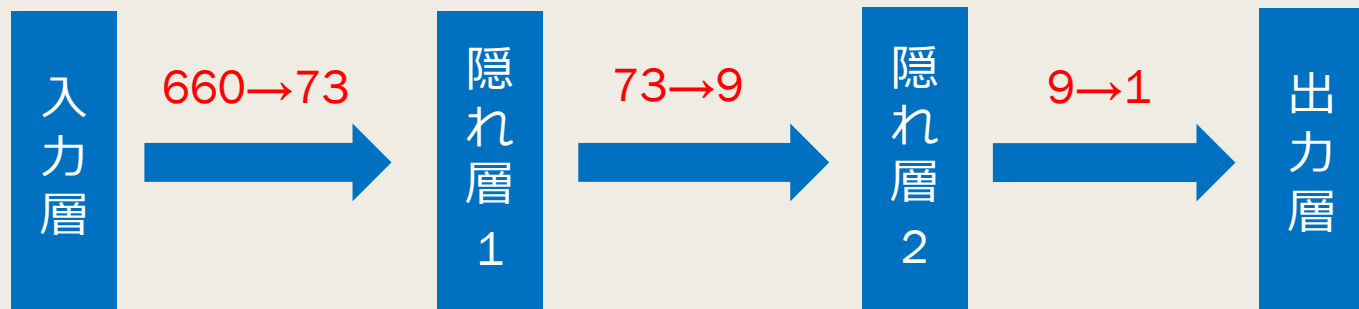


ReLU関数



ニューラルネットワークは入力に対し、**重み** W と**バイアス** b を**教師データ**を元に最適化することで求めたい出力(今回の場合はエネルギー)を得る
教師データの半分を訓練データとして学習に、残り半分を学習の正当性のテストデータに使用する

入力データ及びネットワーク作成



ノード数660

熱・光の波形データ

ノード数73

ノード数9

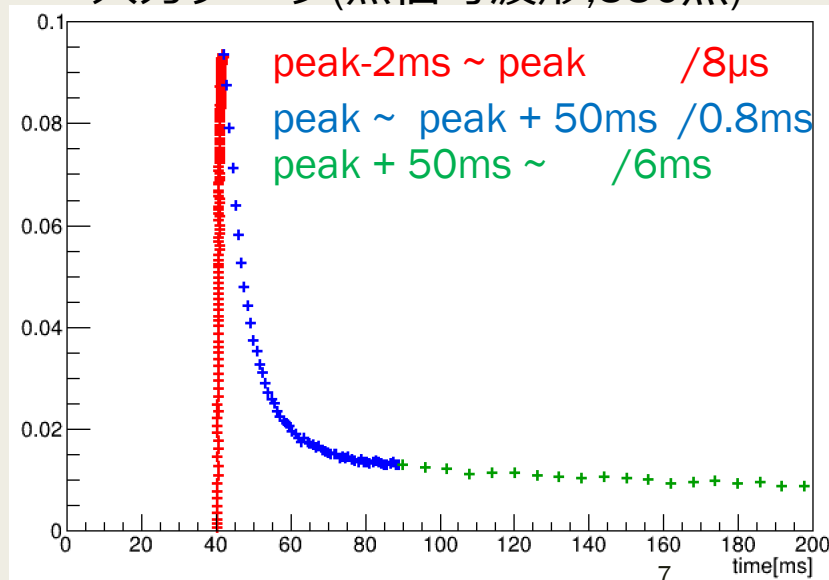
ノード数1

エネルギー

入力として、光子,フォノンとその熱化等の構成要素が関連する前半部分のデータを多く使用

熱信号波形の配列と光信号波形の配列を結合して入力とする

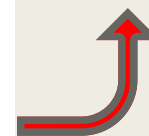
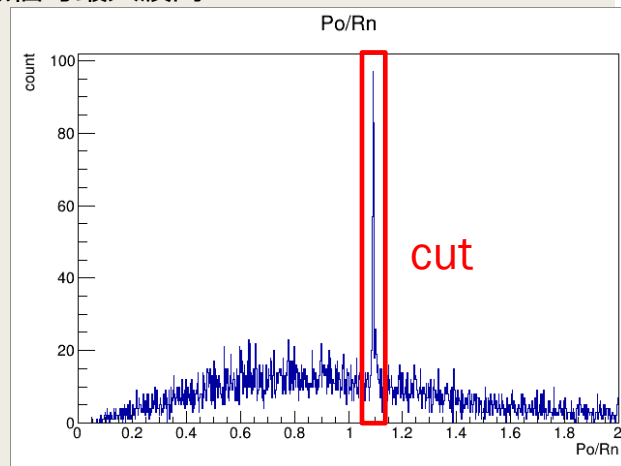
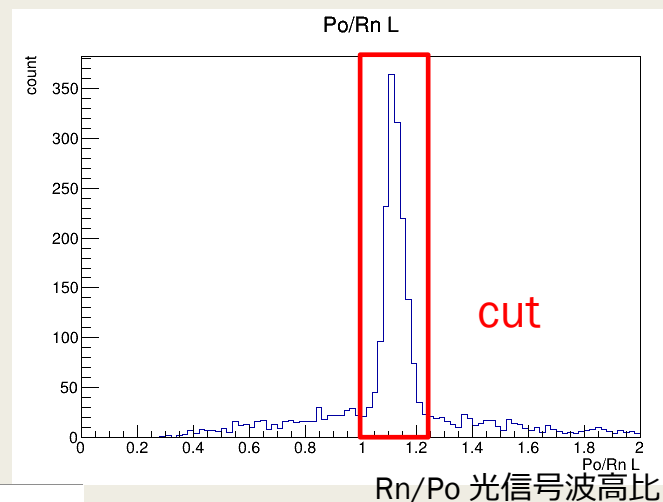
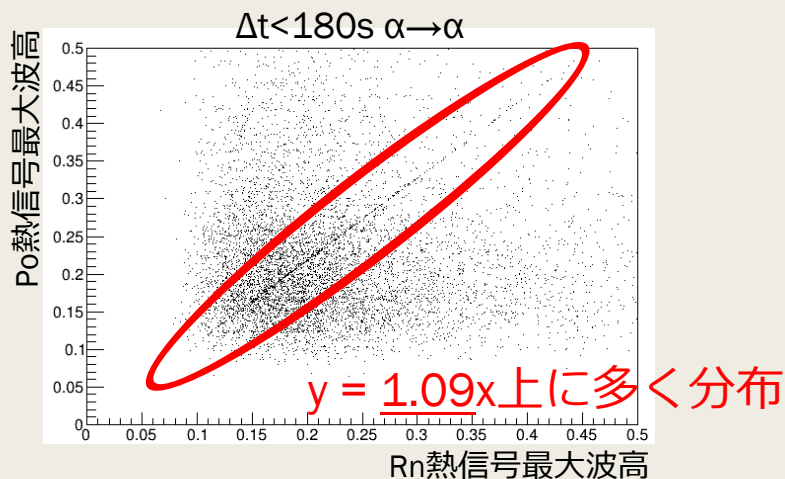
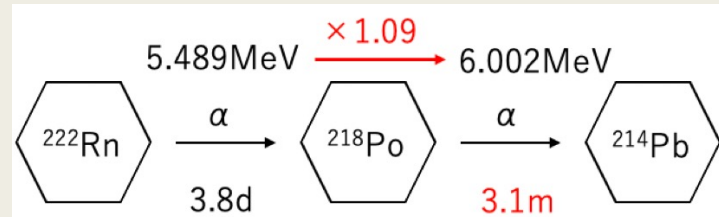
入力データ(熱信号波形,330点)



結晶内同一位置事象選択

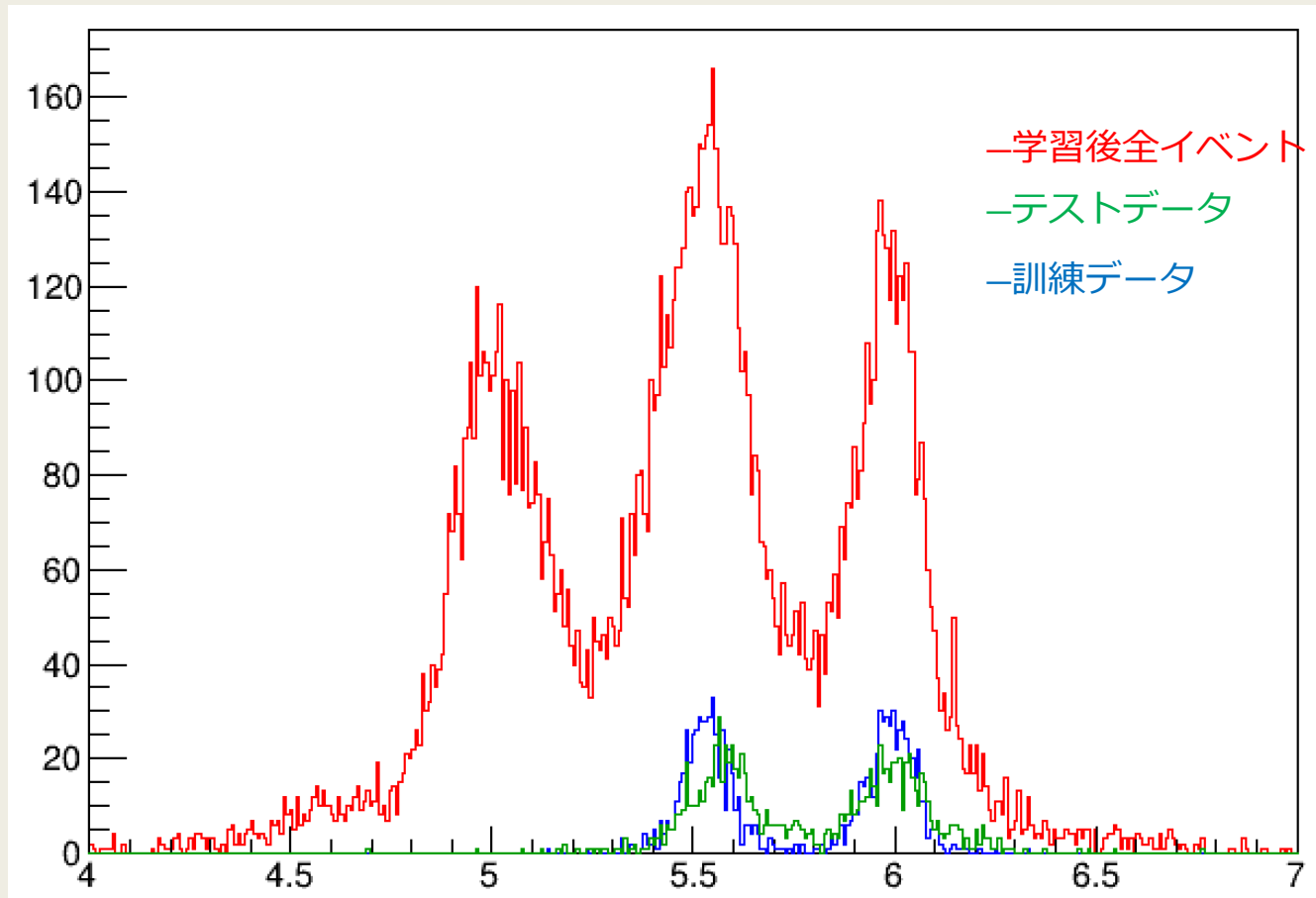
正確な教師データ作成のため同一位置での事象を特定し、Rn,Poのデータとする

^{218}Po の半減期が3.1分であることを利用すると同一位置事象を特定できる



熱の波高比についてcut
→ 光の波高比についてもcut

Rn, Poを教師データとした学習結果



Rn, Poの教師データからRaのピーク自体は再現できているもののエネルギーのずれ(4.78MeV→5MeV)が大きい

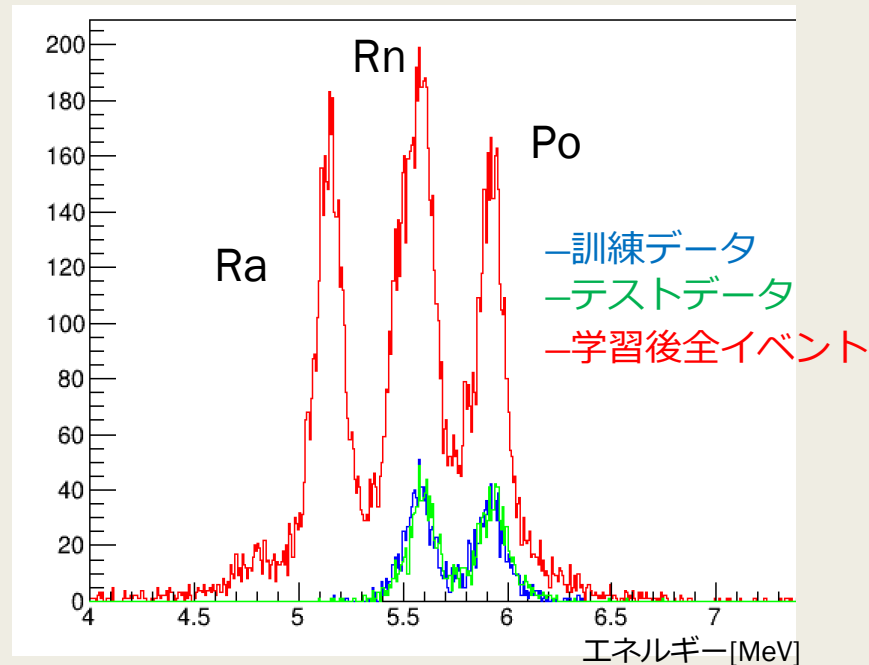
特徴量を入力としたNN

全結合NNでは入力の順番を考慮しないため、信号の立ち上がり時間等、波形入力では考慮できない量の特徴量として入力としたNNを作成、以下の特徴量として使用

- ◆ 熱/光信号の最大波高
- ◆ 熱/光信号の10,20,30,40msにおける波高
- ◆ 熱/光信号の波高比
- ◆ 熱信号の熱化パートにおける40msと140msの波高
- ◆ 熱/光信号の立ち上がり時間
- ◆ 熱/光信号のスタート時間の差

特徴量を入力としたNN

教師データとして、結晶内同一位置事象のRn, Poを使用



Raのピークは再現できたもののエネルギーの再現ができていない
(Ra . . . 4.78MeV→5.15MeV)

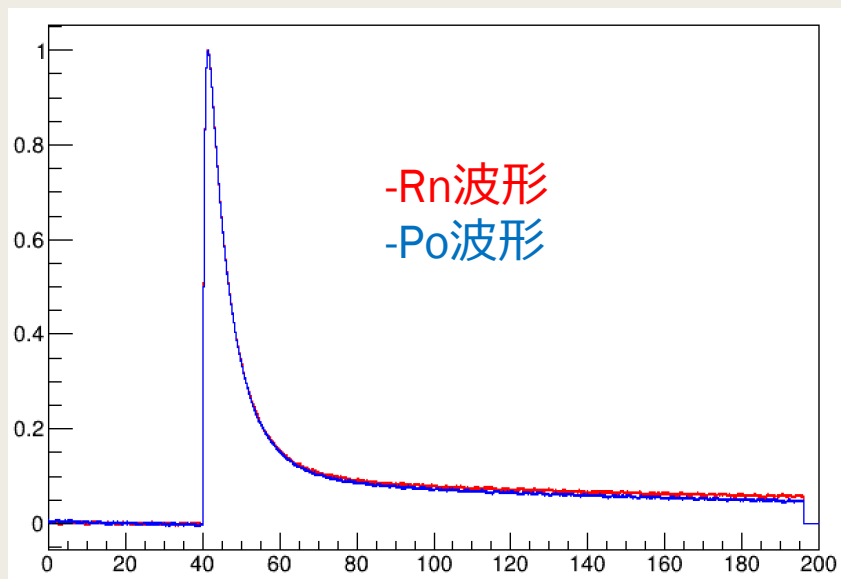
教師データが二点だと特徴を十分に学習できない可能性

波形の相似を利用した教師データによる学習

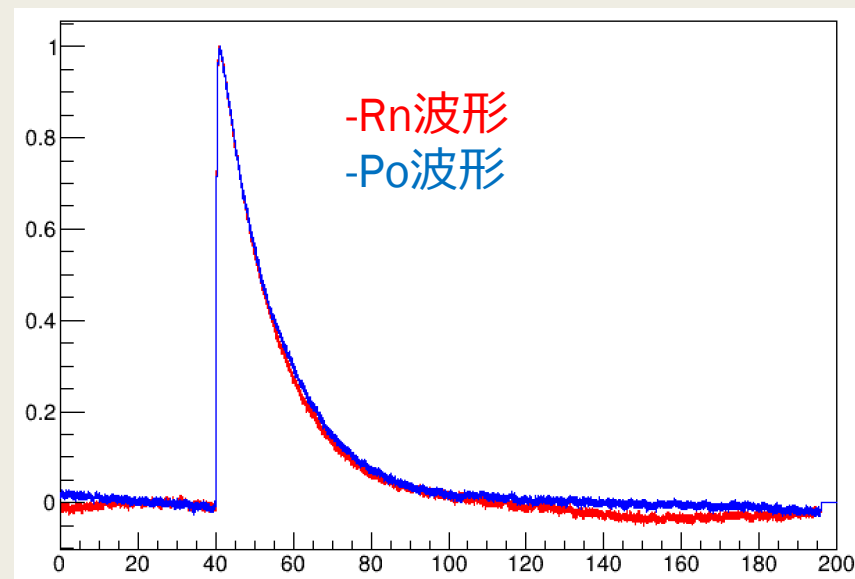
同一位置事象は波形がほぼ相似であり、**エネルギー**に比例することがわかっているため、同一位置事象の波形を定数倍し、教師データとして使用

(Rnデータを $n/5.49$ 倍することで n [MeV]のデータとして扱う等)

同一位置事象(Rn, Po)熱信号

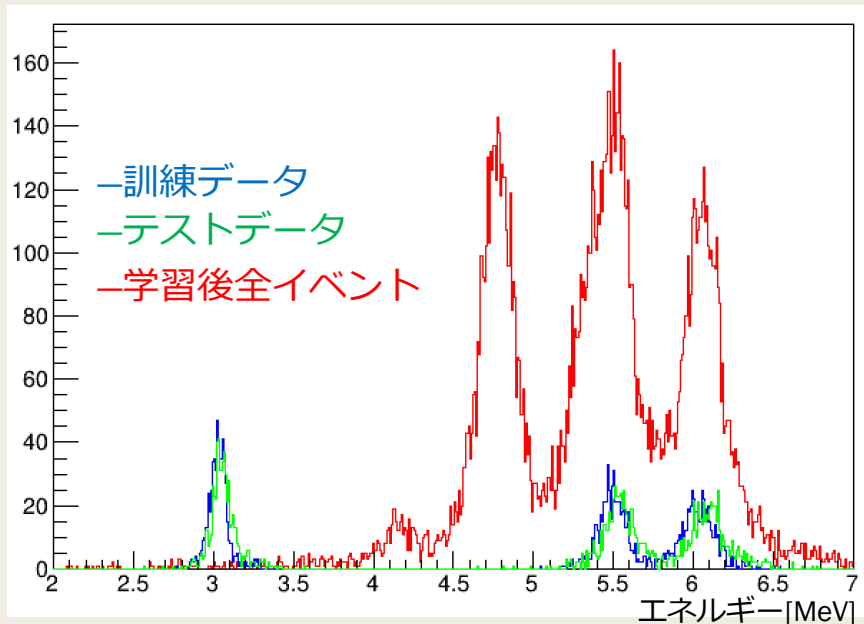


同一位置事象(Rn, Po)光信号



波形の相似を利用した教師データによる学習

E = 3MeVとなる教師データを用いた学習



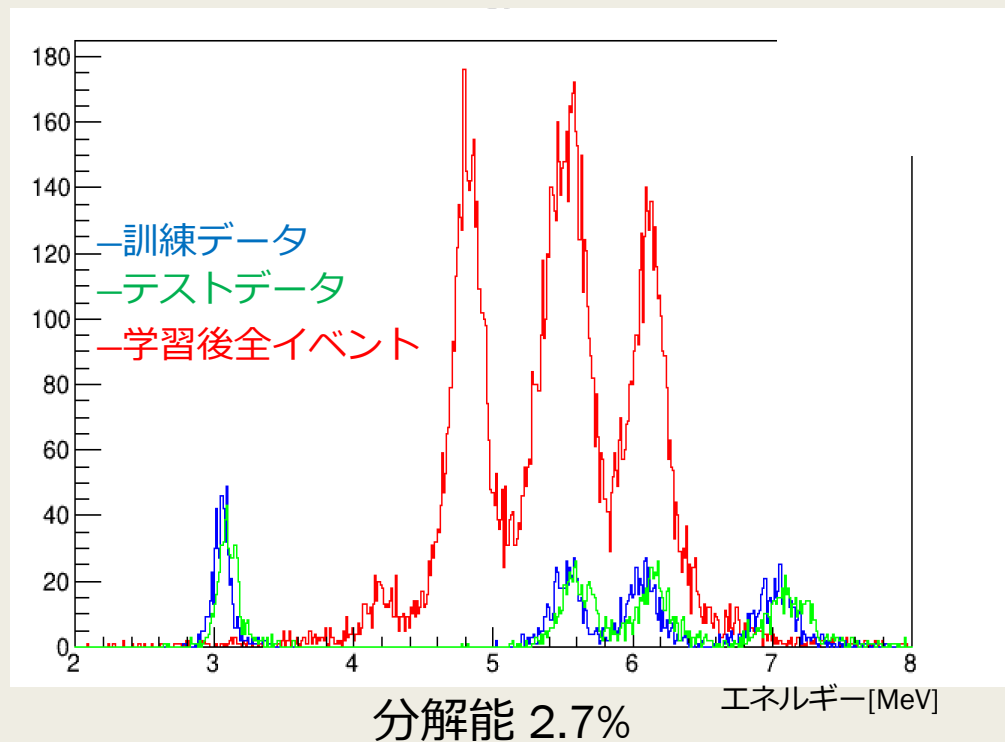
E	mean	分解能(σ)
1	4.69803	2.61%
2	4.69496	2.58%
3	4.77554	2.47%
4	4.78542	2.59%
7	4.83113	2.46%
8	4.84871	2.58%
9	4.82806	2.61%
10	4.77669	2.71%
11	4.74823	2.84%
12	4.83824	2.77%

分解能 2.47% mean = 4.77554

Raのピークおよびエネルギーが再現

波形の相似を利用した教師データによる学習

E = 3MeV, 7MeVとなる教師データを用いた学習

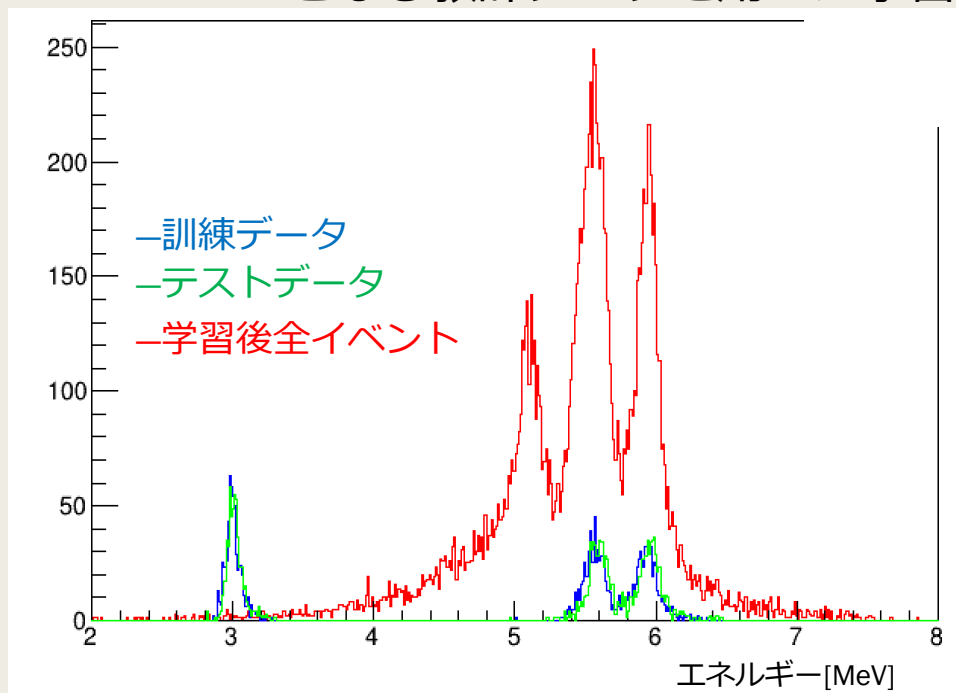


E = 3MeV, 7MeVをそれぞれ単独で与えた場合に比べて分解能は悪化
クエンチングによる影響で光信号が単純な比例関係になっていないことが
原因として考えられる

波形の相似を利用した教師データによる学習

特徴量に関しても同様に教師データを作成

E = 3MeVとなる教師データを用いた学習



Raのエネルギーが誤って学習されている

波形入力において捉えていた重要な(時系列とは無関係な)特徴量を見逃している可能性がある

まとめ

- $0\nu\beta\beta$ の観測には優れたエネルギー分解能の検出器が必要
- CaF_2 シンチレーティングボロメータの分解能改善に機械学習を導入
- 同一位置事象を定数倍した教師データを用いることでRaのエネルギーを再現できた
- 時系列要素を含む学習がうまくいっていない
- 波形を入力とした学習ではエネルギーを再現できたものの、特徴量では再現できなかったことから、見落としている重要な特徴量が存在している可能性がある

今後

- エネルギー決定に使われている特徴量の調査
- クエンチング効果による光信号の波高変化を考慮した教師データ作成