



会議のトピックス (I)

日本原子力学会「2021年春の年会」

企画セッション (核データ部会主催)

先端データサイエンスの核データへの適用

2021年3月19日 13:00 ~ 14:30 オンライン開催

(1) 機械学習技術を用いた Si 検出器の波形解析による粒子識別

大阪大学 大学院理学研究科
物理学専攻 原子核実験研究室

坂梨 公亮

sakanashi@ne.phys.sci.osaka-u.ac.jp

川畑 貴裕

kawabata@phys.sci.osaka-u.ac.jp

京都大学 大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 原子核ハドロン物理学研究室

藤川 祐輝

fujikawa@nh.scphys.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

原子核散乱実験では陽子 (p) や重陽子 (d)、 ^4He (α) など様々な粒子が放出されるため、これらの粒子種別を識別すると同時に、大立体角をカバーして高効率で放出粒子を測定できる検出器が必要である。エネルギー分解能の良好な Si 半導体検出器は大規模高エネルギー素粒子実験から小規模の低エネルギー原子核実験に至るまで広く荷電粒子の測定に用いられており、近年では 6 インチのウェハーから製造した大面積検出器が商業的に流通している。我々のグループでは、読み出し電極の分割により位置測定を可能にした Si ストリップ検出器を用いて、原子核反応から放出される数 MeV 以下の低エネルギー荷電粒子の測定に取り組んでいる。

Si 半導体検出器に荷電粒子が入射すると、同じエネルギーの粒子であっても種類によって停止する深さ、励起される電子・空孔対の空間分布が異なるため、検出器からの出力信号の

波形が変化すると期待される。そこで、我々は波形解析による粒子識別技術の開発を試みている。Si 半導体検出器で測定されたエネルギーと電流信号の最大値の相関から粒子識別する手法は従来からも用いられており、数十 MeV 以上のエネルギーを持つ重イオンに対し一定の成功を収めているが、3 MeV 以下の低エネルギー粒子の識別に成功した事例は報告されていない。これは、粒子エネルギーの低下とともに粒子識別能が低下するため、複雑に変化する波形を電流信号の最大値という一つの観測量に集約する従来手法の限界である可能性がある。そこで、我々は、近年発展の著しい機械学習技術を導入し、信号波形の持つ入射粒子についての情報を劣化させることなく多次元解析することによって、従来手法の限界を超えた新しい低エネルギー荷電粒子技術の確立を目指している。

2. Si 半導体検出器の出力波形特性

Si 半導体検出器では、放射線が P 型半導体と N 型半導体の接合面に生じた空乏層へ入射された際に励起される電子・正孔対を逆バイアス電場によって収集することにより放射線のエネルギーを測定している。Si 半導体検出器の製造過程では、PN 接合面を形成するために、N 型 (もしくは P 型) のバルク半導体の表面に P 型 (N 型) 不純物を高濃度でドーピングする。不純物をドーピングした面を Junction 面と呼び、その反対側の面を Ohmic 面と呼ぶ。PN 接合面付近では電子が P 型側へ移動して空乏層が生じるが、電子が流入した P 型側は負に帯電し、電子が流出した N 型側は正に帯電するため、検出器内部では不均一な電場が形成される。このとき、不純物濃度は Ohmic 側において低いので、電荷は Ohmic 側に薄く深く分布し、内部電場は Ohmic 側において弱く、Junction 側において強くなる。放射線が入射した際には、電荷の読み出しが早くなる Junction 側において優れた時間分解能が期待できるため、Si 半導体検出器を用いた荷電粒子測定では、Junction 面から荷電粒子を入射させることが一般的である。一方で、検出器内部における電子・正孔対の分布の違いから粒子識別を行うには、内部電場の弱い Ohmic 面から荷電粒子を入射させることが有利である。

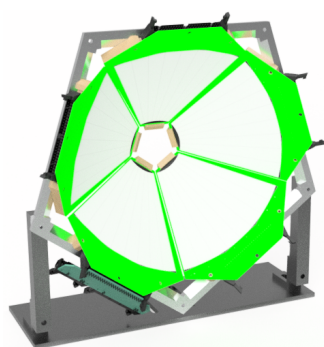


図 1 SAKRA 検出器

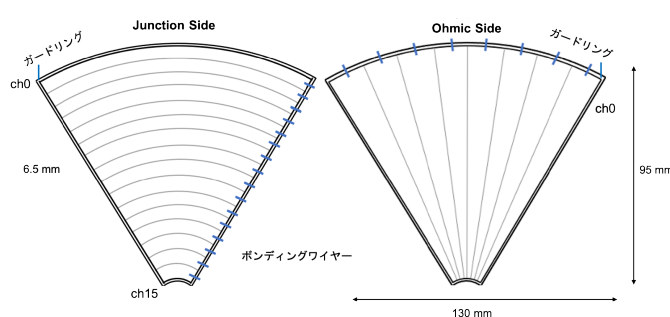


図 2 Micron Semiconductor 社製 Si 半導体検出器 Design MMM の読み出し電極構造

現在、我々は図 1 に示す大立体角荷電粒子検出器 SAKRA の開発を行っている。SAKRA 検出器は、Micron Semiconductor 社製の Si 半導体検出器 (Design MMM) 5 枚からなる。それぞれの Si 半導体検出器は、厚さ $500\text{ }\mu\text{m}$ で扇型の有感領域 (内径 32.6 mm、外径 135.1 mm) を持つ。この検出器は図 2 に示すように、Junction 面の読み出し電極が同心円状に 16 分割、

Ohmic 面の読み出し電極が放射状に 8 分割されており、24 チャンネルの信号を読み出すことにより $16 \times 8 = 128$ ピクセルの解像度で荷電粒子の入射位置を決定することができる。SAKRA 検出器の開発には、中性子ドーピング (NTD) 法を用いて製造された N 型バルク結晶から製造された検出器を用いる。結晶の一様性に優れた NTD 検出器は、電子・正孔対分布の変化が出力波形に反映されやすく粒子識別能に優れると期待される。

我々は、Si 半導体検出器の出力波形特性を調べ、粒子識別能を評価するために 3 MeV の p 、 d 、 α を用いてテスト実験を実施した。神戸大学海事科学部・タンデム静電加速器を用いて加速した $p \cdot d$ ビームを金箔膜標的で散乱させたのちに Si 半導体検出器の Ohmic 面へ入射させた。また、 ^{148}Gd から放出される 3.18 MeV の α 粒子を検出器へ直接入射させた。検出器からの出力信号を電荷積分型前置増幅器 (Mesytec・MPR-16) へ入力して処理したのちに、500 MHz Flash ADC (CAEN V1730SB) を用いて $8 \mu\text{s}$ 間 (4096 サンプル) の波形を取得した。取得した波形を図 3 に示す。 p 、 d 、 α の三種類の粒子に対し立ち上がり時間が異なることが分かる。そこで、信号が最大波高の $m\%$ から $n\%$ へ立ち上がる時間を $T_{m-n\%}$ と定義して、 p 、 d 、 α に対する $T_{5-80\%}$ の分布を調べたところ図 4 を得た。

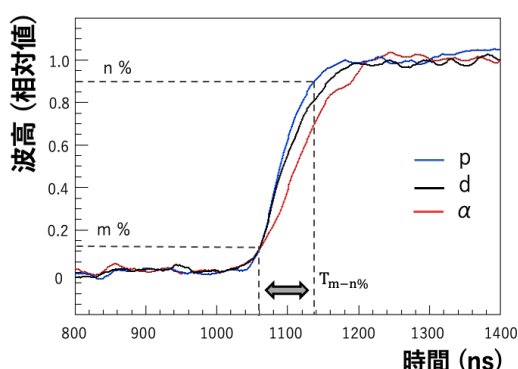


図 3 3 MeV の p 、 d 、 α 粒子に対する電荷積分型前置増幅器からの出力波形

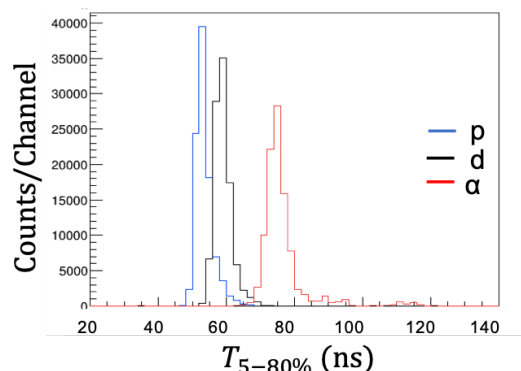


図 4 3 MeV の p 、 d 、 α 粒子に対する電荷積分型前置増幅器からの出力信号の立ち上がり時間 $T_{5-80\%}$ の分布

粒子 x に対する立ち上がり時間の平均値を $T_{5-80\%}^x$ 、立ち上がり時間分布の標準偏差を σ_x とおき、粒子識別能を評価するために分離度を $R_{x/y} = |T_{5-80\%}^x - T_{5-80\%}^y| / 2(\sigma_x + \sigma_y)$ と定義した。Si 半導体検出器の Junction 面から読み出した信号について、分離度のチャンネル依存性を図 5 に示す。チャンネルの面積が小さくなるにつれて分離度が向上していることがわかる。チャンネル 2 において分離度が他のチャンネルの傾向から逸脱しているのはチャンネルの個性によるものと思われる。

さらに、分離度の向上を図るために、立ち上がり時間よりも粒子識別に有効な特徴量の探索を行った。Flash ADC で取得した波形データ x_i に対して長さ L のデジタルフィルター $y_i = \left(\sum_{k=1}^L x_{i+k} \right) / L - \left(\sum_{k=-L}^{-1} x_{i+k} \right) / L$ を導入して微分操作を行い、微分された信号の振幅 $A_{\max}$ とフィルター長 L の相関を調べたところ、図 6 に示すように $L = 20$ で分離度が最大となり、 α と p に対して $R_{\alpha/p} = 4$ 、 α と d に対して $R_{\alpha/d} = 2.8$ の分離度を達成した。分離度 $R = 2.8$ は、2 種類の粒子が同数入射した場合の誤認率に換算すると、わずか 0.25% に相当する高い分離度である。

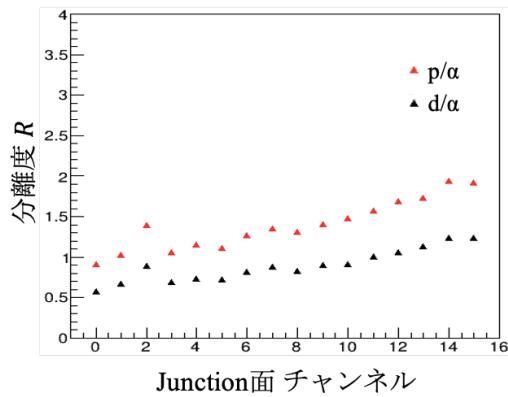


図 5 3 MeV の p, d, α 粒子に対する信号の立ち上がり時間 $T_{5-80\%}$ における分離度のチャンネル依存性

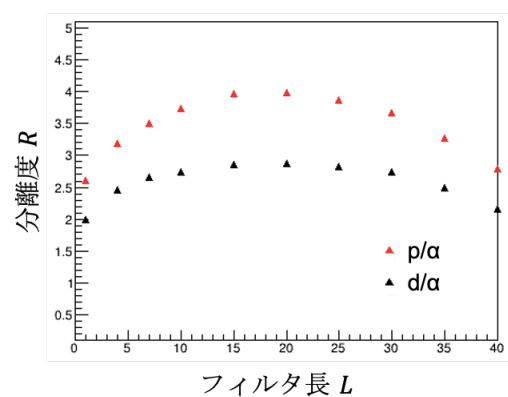


図 6 3 MeV の p, d, α 粒子に対して $A_{\max}$ を用いて粒子識別を行った場合の分離度 R とフィルター長 L の相関

3. 低エネルギー荷電粒子の粒子識別

連続エネルギー分布を持つ低エネルギー荷電粒子に対する粒子識別能を評価するために、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにおいて追加の測定を行った。930 型 AVF サイクロトロンを用いて加速した 85.9 MeV の ^{11}B ビームを炭素標的に照射し、核破砕反応から放出された粒子を検出器へ入射させた。500 μm 厚の Si 半導体検出器の前面に、同じ形状で 100 μm 厚の別の Si 半導体検出器を設置し、この検出器を透過した荷電粒子について、前面の検出器で測定されたエネルギーと後面の検出器で測定されたエネルギーの相関を用いて、あらかじめ粒子識別を行った。そのうえで、後面の検出器単独の波形解析で正しく粒子識別できるかどうかを検証した。各種の粒子に対する $A_{\max}$ と粒子エネルギーの相関を図 7 に示す。3 MeV 以上の比較的高いエネルギーでは水素同位体 [p, d , 三重水素 (t)] と α 粒子が高精度で分離されているが、エネルギーの低下とともに分離能が減少し、2 MeV 付近では $A_{\max}$ を用いた分離が限界に近づいていることが見て取れる。粒子識別のための特徴量として探索した $A_{\max}$ ではあるが、Si 半導体検出器の出力波形がもつ情報を微分波形の振幅という一つの変数に縮約して解析する手法の限界が露呈しているものと思われる。そこで、我々は、近年発展の著しい機械学習技術を導入し、信号波形のもつ入射粒子についての情報を劣化させることなく多次元解析することによって、粒子識別能を向上させることを試みた。

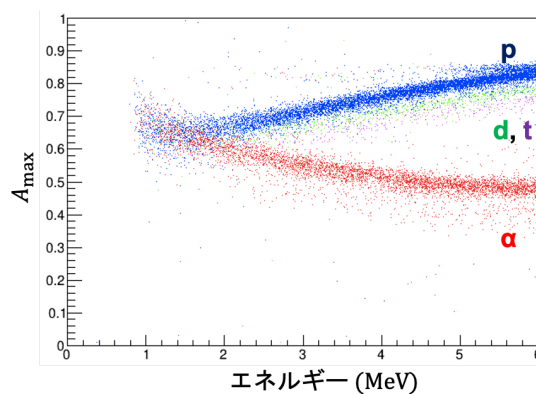


図 7 p, d, α 粒子に対する $A_{\max}$ とエネルギーの相関

4. 機械学習技術を用いた粒子識別

図 8 に、今回用いた学習モデルを示す。波形データの学習には、画像解析で実績のある Convolutional Neural Network (CNN) を採用した。CNN では入力データに対し複数のフィルタを適用して特徴量の抽出を行う。このとき、入力データの特徴を再現するようにフィルタが最適化されるため、前節で紹介した手動解析のように人間が粒子識別に有効な特徴量を探索しなくとも、自動的に、かつ、複数の特徴量を組み合わせて粒子識別を行うことができる。今回の解析では、4096 サンプル取得した波形データのうち、信号の立ち上がり前後の 1000 サンプルを切り出して入力層 1 (Input Layer 1) へ与えた。さらに、Si 半導体検出器の複数のチャンネルを同時に解析できるよう、粒子を検出した Ohmic 面と Junction 面のチャンネル番号を入力層 2 に与え、波形データを解析した CNN の出力とともに全結合層へ接続した。最終的には、出力層から入力データが p あるいは α 粒子である確率を出力させ、確率が大きい方を学習モデルによる粒子種別の判定結果とした。この判定結果を実際の粒子種別と比較し、判定精度が向上するよう学習を繰り返した。

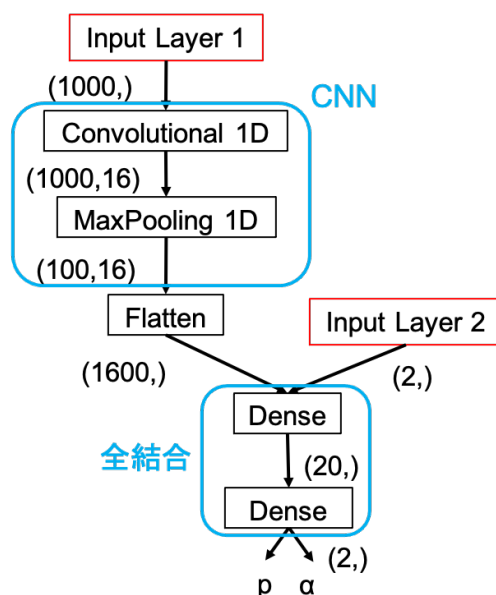


図 8 粒子識別に用いた学習モデル

図 9 に、 2 ± 0.05 MeV の p と α 粒子に対する機械学習と手動解析による粒子識別の正答率を Junction 面のチャンネルごとに示す。機械学習を導入することで、全てのチャンネルにおいて正答率が系統的に向上することがわかった。チャンネル 2 はリーク電流が大きく、他のチャンネルと波形の振る舞いが異なることが確認されたため、今回の学習からは除外したものの、手動解析においては、チャンネルごとに特徴量 $A_{\max}$ とエネルギーの相関を調べ、粒子種別を判定するための閾値を設定する必要があったのに対し、機械学習では異なるのチャンネルのデータを一括して取り扱うことが可能となり、データ解析の労力を大きく軽減することができた。もっとも粒子識別能の高かったチャンネル 15 における正答率とエネルギーの関係を図 10 に示す。機械学習は、粒子識別の難しい低エネルギー粒子に対して識別能を改善し、1.8 MeV の低エネルギー粒子に対しても約 95% の識別精度を実現できた。

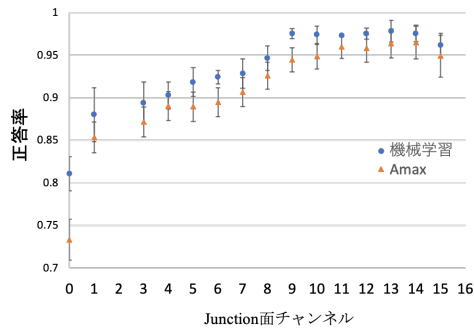


図9 機械学習と手動解析による p と α 粒子の識別精度のチャンネル依存性

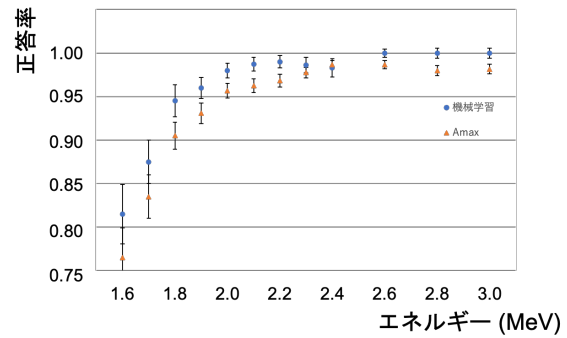


図10 Junction 面のチャンネル 15 における機械学習と手動解析による p と α 粒子の識別精度のエネルギー依存性

5. おわりに

本稿では、我々の研究グループが取り組んでいる Si 半導体検出器の波形解析による粒子識別技術の開発について紹介した。機械学習を導入することにより、データ解析の労力を大きく軽減するとともに、識別精度を向上させることに成功した。今回は 1 枚の Si 半導体検出器を用いて測定を行ったが、本年 6 月には日本原子力研究開発機構のタンデム加速器施設において 5 枚の Si 半導体検出器を組み上げた SAKRA 検出器のフルセットアップを用いた性能評価試験を行うことを予定している。