

一般セッション(口頭講演) | 2 放射線：2.2 放射線物理一般・放射線応用・発生装置・新技術

■ 2023年9月22日(金) 9:00 ~ 12:00 | 会 A305 (熊本城ホール)

[22a-A305-1~11] 2.2 放射線物理一般・放射線応用・発生装置・新技術

渡辺 賢一(九大)

9:00 ~ 9:15

[22a-A305-1] 重粒子線の核電荷変換断面積測定(1) 核反応モデルによる計算との比較

○濱田 真吾¹、三島 竜綺¹、岩崎 洋亮¹、安田 仲宏¹ (1.福井大)

9:15 ~ 9:30

[22a-A305-2] 重粒子線の核電荷変換断面積(2) 100 MeV/n以下の領域

○三島 竜綺¹、濱田 真吾¹、岩崎 洋亮¹、安田 仲宏¹ (1.福井大)

9:30 ~ 9:45

[22a-A305-3] 重粒子線の核電荷変換断面積測定(3) 核破砕片の放出角度

○岩崎 洋亮¹、三島 竜綺¹、濱田 真吾¹、安田 仲宏¹ (1.福井大)

◆ 英語発表

9:45 ~ 10:00

[22a-A305-4] New explanation for the nature of the nucleus, its structure and isotopes creation

○Gh. Saleh¹ (1.Saleh Research Centre)

◆ 奨励賞エントリー

10:00 ~ 10:15

[22a-A305-5] 機械学習を用いた注入イオンの飛程の予測

○南川 英輝¹、手塚 智哉²、土田 秀次² (1. (株) イオンテクノセンター、2.京大院工)

◆ 奨励賞エントリー

10:15 ~ 10:30

[22a-A305-6] 宇宙線イメージングのためのGPUによる高速シミュレーションの開発

○(M1)中野 健斗¹、北川 暢子¹、森島 邦博¹ (1.名大理)

◆ 奨励賞エントリー

10:45 ~ 11:00

[22a-A305-7] Blenderを用いた宇宙線イメージングのシミュレーション手法の開発

○児玉 滉人¹、中野 健斗¹、北川 暢子¹、森島 邦博¹ (1.名大理)

11:00 ~ 11:15

[22a-A305-8] 重イオンビームに対するTimePix3を搭載したハイブリッドピクセル半導体検出器の性能評価

○伊藤 尚輝¹、幸村 孝由¹、清水 康行¹、藤澤 海斗¹、高橋 忠幸^{2,3}、長澤 俊作^{2,3}、米田 浩基⁴、中澤 知洋⁵、大熊 佳吾⁵ (1.東理大創域理工、2.東大カブリIPMU、3.東大理、4.University of Würzburg、5.名大理)

11:15 ~ 11:30

[22a-A305-9] 並列化手法によるMC線量計算アプリケーションの比較

○(D)吉田 順一¹、村上 晃一²、岡田 勝吾²、尼子 勝哉²、佐々木 節² (1.総研大、2.高エネ研)

11:30～11:45

[22a-A305-10] 赤方偏移に基づく放射線位置検出のファイバ端面反射率の影響

○(M1)森本 翔貴¹、濱崎 拓也¹、堤 康宏¹ (1.近大院総理工)

11:45～12:00

[22a-A305-11] 赤方偏移に基づく位置検出のしきい値依存性～理論的検討～

○(M1C)濱崎 拓也¹、森本 翔貴¹、堤 康宏¹ (1.近大院総理工)

重粒子線の核電荷変換断面積測定(1) 核反応モデルによる計算との比較

Measurement of total charge changing cross section for heavy ion beams (1)

Comparison with calculation based on nuclear reaction models

福井大学¹, 濱田 真吾¹, 三島 竜崎¹, 岩崎 洋亮¹, 安田 仲宏¹

Fukui Univ.¹, Shingo Hamada¹, Ryuki Mishima¹, Yosuke Iwasaki¹, Nakahiro Yasuda¹

E-mail: ms220871@g.u-fukui.ac.jp

重粒子線の核反応断面積の情報は、がん治療における治療計画や宇宙飛翔体での遮蔽計算などに重要な情報である。近年、ドイツ重イオン研究所 (GSI) により 103 の論文に掲載された測定データがデータベースにまとめられた[1]。ここでは、1) 測定手法が異なる実験毎にデータにばらつきがあること、2) 比較的低いエネルギー領域 (100 MeV/n) において実験データが少ないこと、3) 実験データと核反応モデルによる計算結果に系統的な差異があることが指摘された。

我々は、このデータベースを活用し、実験データと計算結果の系統的な差異が、検出器の測定条件 (検出しきい値、角度依存性、飛程) を考慮していないことに起因している可能性があることを確認した。

図 1 に Ne+Al の入射+標的システムにおいて、核電荷変換断面積の計算結果と実験データの比較を示す。誤差付きの点が過去に行われた実験データを表している。黒の線が測定条件を考慮していない計算結果、赤の線が考慮した計算結果を示す。測定条件を考慮することで実験データと計算結果の差異が小さくなっていることが分かる。一方で測定条件を考慮しても計算結果が変化しない入射+標的システムも存在した。

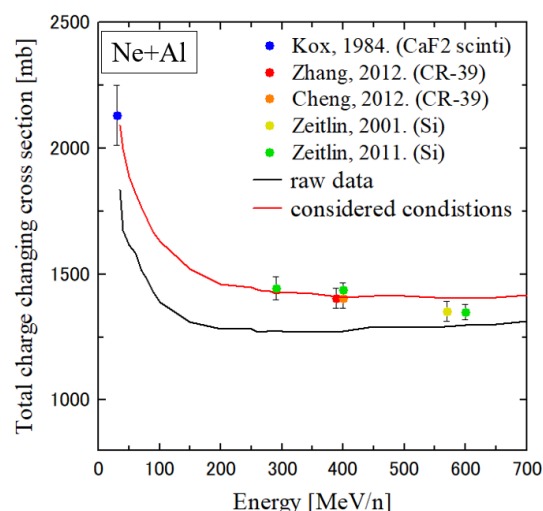


Fig.1 Comparison of total charge changing cross section, experimental data with simulation (Ne+Al system).

本研究では、複数の入射+標的システムにおいて、核反応モデルによる計算を行い、入射粒子の反跳角度の分布を得た。その結果、図 2 に示すように Ne を入射粒子とした場合、標的が軽い場合に反跳角度が小さいこと、標的が比較的重い場合には大角度で入射粒子が反跳されることにより、検出器の角度アクセプタンス (赤の領域) の影響を受けて、これが核電荷変換断面積の計算結果に影響している可能性を示した。

【参考文献】

- [1] F. Louoni et al., New Journal of Physics, 23, 101201, 1-23, 2021.

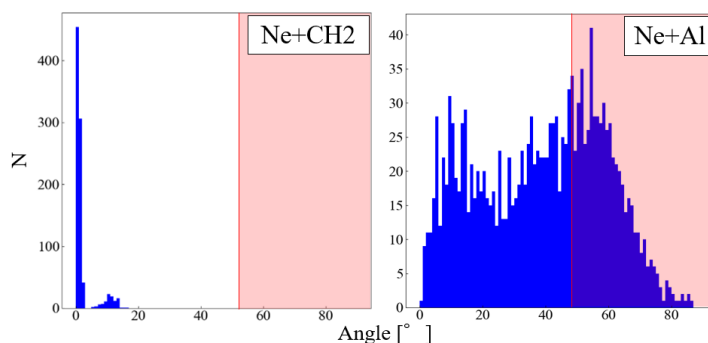


Fig.2 Emission angle of Ne+CH2 and Ne+Al systems.

重粒子線の核電荷変換断面積測定(2) 100 MeV/n 以下の領域

Measurement of total charge changing cross section for heavy ion beams (2)

Region below 100 MeV/n

福井大¹ ◯三島 竜綺¹, 濱田 真吾¹, 岩崎 洋亮¹, 安田 仲宏¹

Fukui Univ.¹ ◯Ryuki Mishima¹, Shingo Hamada¹, Yosuke Iwasaki¹, Nakahiro Yasuda

E-mail: ms230841@u-fukui.ac.jp

炭素線治療において、患者体内に照射された炭素線は、がん患部に到達するまでに、ある確率で核破砕反応が起こり、入射粒子より軽い核である破砕片を生成する。これによるがん患部周辺の正常細胞への影響を正確に予測することができていない。入射炭素粒子の電荷が変化する確率を表す物理量である「核電荷変換断面積」などの実験データが不足しており、核反応モデルの評価が行えていないためである[1]。どの核反応モデルが最も実験値を再現するかを決定するために、これまで実験の困難さからデータの少ない入射粒子のエネルギーが 100 MeV/n 以下の領域の核電荷変換断面積を測定し核反応モデルによる断面積の予測結果と比較することを目的とした。

若狭湾エネルギー研究センターと放射線医学総合研究所の加速器において、CR-39 検出器を重ね合わせ、それぞれ 55 MeV/n と 290 MeV/n の炭素線を照射した。エッチング後に検出器の表裏両面に現出した飛跡の幾何学的情報を顕微鏡測定し、それぞれの飛跡の電荷を同定した[2]。入射炭素が核破砕反応を起こした数を決定することで、核電荷変換断面積を推定し、統計誤差および系統誤差を評価した。

図 1 に、入射粒子のエネルギーと核電荷変換断面積の関係を示す。本研究の測定結果(赤点)は、過去の研究結果(緑点)と矛盾しないことを確認した。加えてデータの少ないエネルギー領域での測定結果を初めて示すことができた。また、3つの核反応モデルによる核電荷変換断面積の予測結果(黒線)と比較し、おおむね再現することが示された。しかしながら、統計量が理由で3つの予測結果のうちどれが最も実験を再現するかの断定には至っていない。今後、統計量を数倍程度に増やしてこの問題を解決する予定である。

【参考文献】

- [1] F. Luoni, et al., New J. Phys, 23, 101201, 1-23, (2021).
- [2] N. Yasuda, et al., J. Phys. Soc. Jpn, 78, 142-145, (2009).

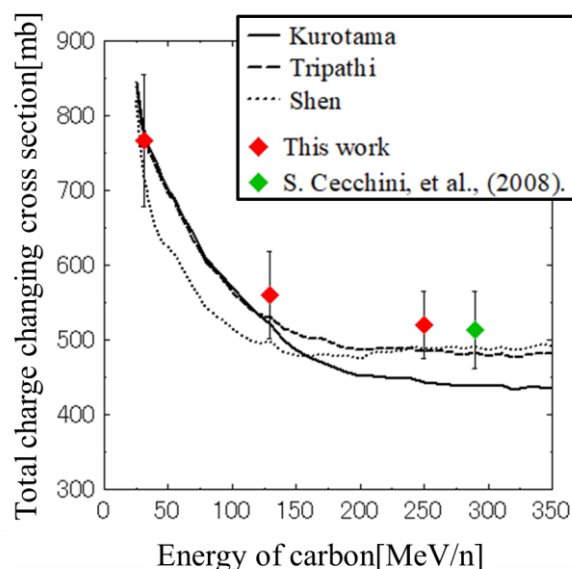


Fig. 1 Comparison of total charge changing cross section, experimental data with simulation(C+CR-39).

重粒子線の核電荷変換断面積測定 (3) 核破砕片の放出角度

Measurement of total charge changing cross section for heavy ion beams (3)

Emission angle of fragments

福井大¹, °岩崎 洋亮¹, 三島 竜綺¹, 濱田 真吾¹, 安田 仲宏¹

Fukui Univ.¹ °Yosuke Iwasaki¹, Ryuki Mishima¹, Shingo Hamada¹, Nakahiro Yasuda¹

E-mail: ha200205@g.u-fukui.ac.jp

重粒子線がん治療の分野では、体内に入射した粒子が核破砕反応を起こし、生成された破砕片が正常細胞にコントロール不可能な被ばくを与えてしまうことが知られている。破砕片による被ばくを推定するために、核破砕反応が起きる確率（核電荷変換断面積）や破砕片の放出角度の測定が必要である。重粒子線の核破砕反応では一度に複数の破砕片が放出される場合があり、これらを同時計測することが破砕片の放出角度のデータが極端に少ない一因である[1]。核反応モデルのベンチマークの観点からも系統的な測定による実験データの蓄積が待たれている。

我々は、同時に放出される複数の破砕片を測定するために CR-39 検出器を用いて測定を行ってきた。CR-39 検出器は、標的と重ね合わせて実験に用いることが可能なため、比較的大角度で放出された破砕片の電荷と角度を精密に測定することができる。

図 1 に示すように、炭素線 (33 MeV/n) が 3 つの α 粒子に崩壊した事象に着目し、CR-39 検出器の表面・裏面を同一の顕微鏡視野内で追跡測定することで放出角度を 0.01 度程度の精度で測定可能であることを示した。図 2 には、これまでに得られている $C \rightarrow 3\alpha$ 反応候補である 59 事象の反応点からの α の放出角度分布を示した。今後、このような事象を増やすことで、 $C \rightarrow 3\alpha$ 反応、 $C \rightarrow Be + \alpha \rightarrow 3\alpha$ 反応のような、原子核内の動力学を反映した知見が得られることが期待される。核反応モデルをベンチマークする際の新しい情報になりうると考えている。

【参考文献】

[1] L. Sihver, et al., Radiat. Meas., 48, pp. 73–81, (2013).

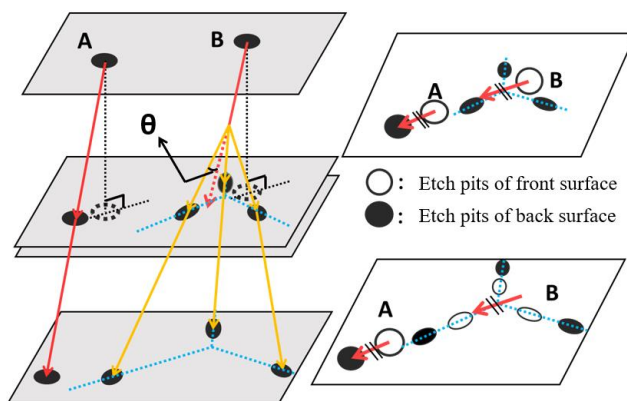


Fig.1 Schematic drawing of fragmentations.

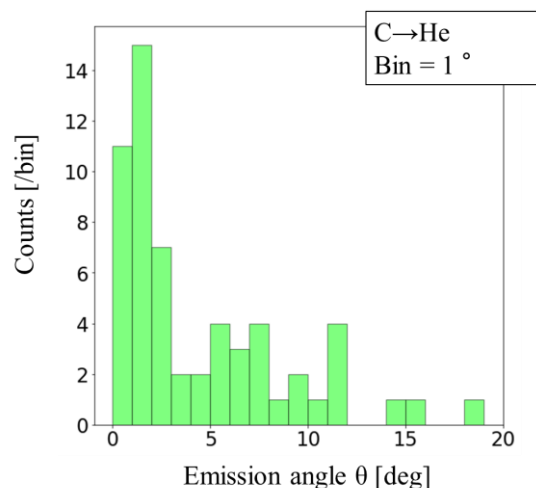


Fig.2 distribution of emission angle of in 33MeV/n.

New explanation for the nature of the nucleus, its structure and isotopes creation

°Gh. Saleh, Saleh Research Centre

E-mail: postmaster@saleh-theory.com

All we know, stars have the greatest mass in the universe, and about 90% of the mass of stars are hydrogen. In the fusion reactions of stars, hydrogen is converted to helium that produces light and energy of stars. Then it is enough to add a neutron and a proton to the helium nucleus to create heavier elements nuclei. On the other hand an electron and a proton are needed to produce a neutron in the fusion reaction. Based on the principle of having the highest symmetry and equilibrium in the nucleus, we probe the shape of the nuclei of the elements that could explain all possible isotopes.

機械学習を用いた注入イオンの飛程の予測

Prediction of range of implanted ions using machine learning

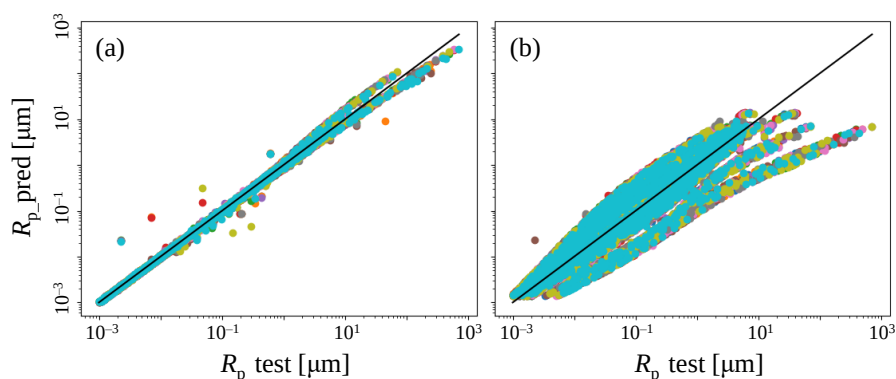
株式会社イオンテクノセンター¹, 京大院工² °南川 英輝¹, 手塚 智哉², 土田 秀次²

Ion Technology Center Co., Ltd.¹, Kyoto Univ.², °Hideaki Minagawa¹,

Tomoya, Tezuka², Hidetsugu Tsuchida², E-mail: minagawa@iontc.co.jp

イオン注入技術は、半導体デバイスの製造において欠かすことのできない技術である。近年の半導体需要の増加に伴い、研究開発においては試作コスト削減のためにも高精度なシミュレーションが重要となっている。現在広く使われている SRIM などのモンテカルロシミュレーションでは、数々の実験結果から得られた阻止能を用い、入射イオンの散乱過程やエネルギー損失過程に基づいて注入イオンの分布を計算している。しかし化合物標的では、阻止能データの不足により、実験結果と計算結果がずれるといった問題も報告されている[1]。本研究では機械学習によって、阻止能が未知の条件に対しても、注入イオンの飛程を予測可能なモデルを作成し、その予測において重要となるパラメータを明らかにすることを目的とする。

機械学習に使用する説明変数は、入射エネルギー (E_0)、入射イオン及び標的の原子番号 (Z_1, Z_2)、質量数 (m_1, m_2)、標的の密度 (ρ)、標的化合物の構成原子間の質量数の差 (m_d) の7つとし、目的変数は注入イオンの飛程 (projected range: R_p) とした。図に、カーネルリッジ回帰 (KRR : Kernel Ridge Regression) モデルによる学習結果から予測した R_p とテストデータの相関を示す。(a)では、7つ全ての説明変数を用いて計算し、(b)では入射イオンの原子番号及び質量数以外の変数を用いて計算した。図より、高精度の予測には入射イオンの原子番号及び質量数の2つの変数が必要であることがわかった。さらに、標的の情報に関わる変数がない場合においても、予測精度が下がることが分かり、入射イオンのエネルギーに加えて、入射イオン及び標的の原子番号または質量数が必要であることが判明した。発表では他の機械学習モデルによる評価や、標的を化合物に限定した場合との比較から、飛程の予測において重要となる変数の組み合わせについて議論する。



図：テストデータと予測値の相関

(a)全ての説明変数を用いた結果、(b)入射粒子に関わる変数がない場合の結果

[1] K. Jin, Y. Zhang, H. Xue, Z. Zhu, W.J. Weber, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B 307 (2013) 65–70.

宇宙線イメージングのための GPU による高速シミュレーションの開発

Development of GPU-Based Fast Simulation for Cosmic Ray Imaging

名大理¹, [○](M1)中野 健斗¹, 北川 暢子¹, 森島 邦博¹

Nagoya Univ.¹, [○]Kento Nakano¹, Nobuko Kitagawa¹, Kunihiro Morishima¹

E-mail: nakano.kento.y8@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. 緒言

宇宙線イメージングとは、観測した宇宙線ミュオンの本数や到来方向を用いて、ミュオンが通過してきた物質の積算密度を可視化できる技術である。可視化したい構造物の 3D モデルを用いてシミュレーション画像を作成し、実際の観測データと比較すれば、構造物内の空間等を検知する事ができる。

ミュオンが通過してきた物質の積算密度をシミュレーションで可視化するためには、任意の方向において“ミュオンが対象物を通過した距離(path length)”を計算する必要がある。従来は、対象物の 3D モデルを Geant4 に読み込ませ、仮想粒子が通過した距離を各方向で取得して path length を求めており、この方法では数十秒から数分の実行時間が必要であった。本シミュレーションでは、GPU の並列処理能力を利用して、全方向の 3D モデルの全ての面までのそれぞれの距離を計算することで、path length を従来法より高速に計算することが出来た。

2. 実験方法など

90 度の視野角を任意の幅で区切り、3D モデルの全ての面に対して、それぞれの面が各区切り方向に存在するかどうか、また存在した場合のカメラの座標から面までの距離を求める。カメラの座標から特定の 3D モデルの面までの距離は、代数計算を使用して比較的簡単に求めることができるので、この計算を GPU の各スレッドに並列処理させることで、全ての面までの距離を高速に計算出来る。各面には表裏の情報が含まれるので、図 1 の

ように、全ての裏面までの距離の合計から、全ての表面までの距離の合計を引くことで、path length を求めることができる。

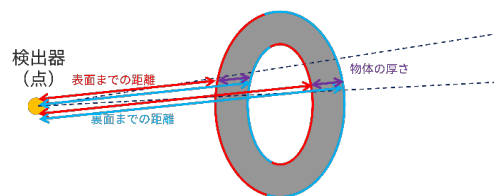


図 1. 検出器から 3D モデルまでの path length を求める方法

3. まとめ

本シミュレーションでの実行時間を図 2 に示す。横軸には 90 度の視野角を各方向に区切った数を bin として表し、縦軸には path length 計算にかかる時間と、それに加えてファイル入出力などその他にかかる時間を表す。この評価では、115,640 の面を持つモデルを使用した。bin の数が増えると、面との距離計算をその分行うことになるので、必要時間が増えていく。しかしそれでも従来法の実行時間に比べて大幅に高速化できた。

今学会では、シミュレーション開発と、その活用事例を紹介する。

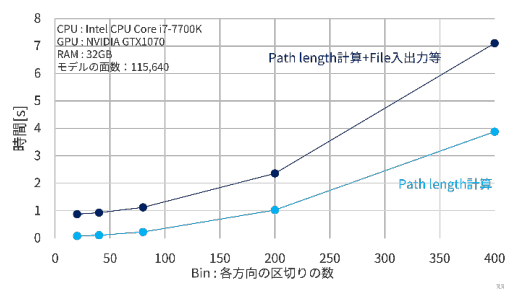


図 2. 本シミュレーションでの実行時間

Blender を用いた宇宙線イメージングのシミュレーション手法の開発

Development of a simulation for cosmic-ray imaging with Blender

名大理¹, [○](M2)児玉滉人¹, (M1)中野健斗¹, 北川暢子¹, 森島邦博¹

Nagoya Univ.¹, [○]Hiroto Kodama¹, Kento Nakano¹, Nobuko Kitagawa¹, Kunihiro Morishima¹

E-mail: kodama.hiroto.f7@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. 緒言

宇宙線イメージングとは、観測対象を透過した宇宙線ミュオンの到来方向の分布を宇宙線検出器により測定することで、ミュオンが通過してきた物質の積算密度を可視化する技術である。可視化したい構造物の 3D モデルを用いてシミュレーションし、実際の観測データと比較をすれば、構造物内の未知空洞等を検知することができる。現在、3DCG ソフト(Blender)を用いたシミュレーション手法及び未知空洞の 3 次元推定手法を開発している。今回は、その現状について報告する。

2. 実験方法など

ここでは、以下の 2 つのプログラムを実装する。Ⅰ.観測前に、得られるデータ予測するシミュレーションプログラム。Ⅱ.観測後に、Ⅰのシミュレーション結果と観測データを比較して、未知空間の 3 次元的位置を 3D モデル上に表示するプログラム。

Ⅰのシミュレーションでは、ミュオンの方向分布を得るために、“ミュオンが対象物を通過した距離(path length)”を任意の方向において計算する。従来は、3DCG ソフトで作成した 3D モデルを Geant4 などの既存のシミュレーションプログラムで読み込んで実行しているが、本手法はモデル作成からシミュレーションまでをひとつの 3DCG ソフトで完結させるものであり、3D モデルを変形させながら様々な条件で計算するなど、従来よりも自由度の高いシミュレーションが可能となる。

本手法は、以下のような 3 つの工程により構成される。①検出器を始点として任意の方向に、3D モデルを貫くような斜角柱を作成する(Fig.1)。

②斜角柱と 3D モデルの共通部分を抜き出す。③共通部分の体積を求め、その体積から換算される物質内のミュオンの path length を算出する。

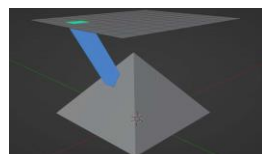


Fig.1) Oblique prism through 3D model of the pyramid

Ⅱの未知空洞 3 次元推定では、複数箇所に設置した検出器の観測データから視野角度ごとに算出した path length とⅠでのシミュレーション結果で相違のある場所を、検出器の位置情報を基に特定する。

本手法は、以下のような 3 つの工程により構成される。①宇宙線モデルを用いて観測データの Flux を path length に変換する。②変換した path length とⅠのシミュレーション結果を比較する。③path length の結果に相違があった bin の可視範囲を blender で表現する。

3. まとめ

Ⅰのシミュレーションにより、ギザの大ピラミッドを模擬した四角錐モデルの底面中央に検出器を設置した場合に期待される path length 分布を求めた結果を(Fig.2)に示す。今後は、時間的に変化するモデルにも対応できるように改良を進める。Ⅱの 3 次元推定に関しては、現在開発中であり、今後は観測された未知空洞の位置・形状の推定精度を検証する予定である。

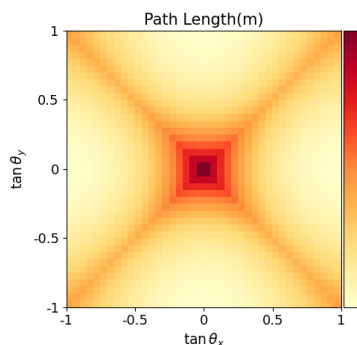


Fig.2) Result of path length simulation (I) at a viewing angle of 90°

重イオンビームに対する TimePix3 を搭載した ハイブリッドピクセル半導体検出器の性能評価

Performance Evaluation of a Hybrid Pixel Semiconductor Detector with TimePix3 for Heavy Ion Beams

東理大創域理工¹, 東大カブリ IPMU², 東大理³, University of Würzburg⁴, 名大理⁵

○伊藤尚輝¹, 幸村孝由¹, 清水康行¹, 藤澤海斗¹, 高橋忠幸^{2,3},

長澤俊作^{2,3}, 米田浩基⁴, 中澤知洋⁵, 大熊佳吾⁵

Tokyo University of Science¹, Kavli IPMU², The University of Tokyo³, University of Würzburg⁴, Nagoya University⁵

Naoki Itoh¹, Takayoshi Kohmura¹, Yasuyuki Shimizu¹, Kaito Fujisawa¹, Tadayuki Takahashi^{2,3},

Shunsaku Nagasawa^{2,3}, Hiroki Yoneda⁴, Kazuhiro Nakazawa⁵, Keigo Okuma⁵

E-mail: 6223506@ed.tus.ac.jp

【研究背景・目的】

TimePix 検出器は、ピクセル幅が $55\mu\text{m}$ のピクセルを 256×256 個を持つ半導体センサーと、欧州の CERN が開発した TimePix と呼ばれる特定用途向け集積回路 (ASIC) で構成されているハイブリッド型の半導体検出器である。TimePix シリーズの 1 つである TimePix3 は 1.56 ns の時間分解能を持ち、ToT(Time-over-Threshold)モードで入射放射線のエネルギー情報を取得し、ToA(Time-of-Arrival)モードで到来時間を取得することができる。

また、TimePix 検出器は 3 次元的に荷電粒子の飛跡とエネルギー情報を識別でき、X 線や γ 線のイメージングだけではなく、宇宙線や加速器からの荷電粒子の到来方向、フラックスの測定に使うことができる。小さく、軽量なため、超小型衛星を用いた宇宙線観測や国際宇宙ステーションでの環境計測への応用が期待されている。

しかし、数 100 MeV/n の大きなエネルギーを持つ荷電粒子が入射することで発生する電荷雲は、数 100 ピクセル以上に広がり、1 つのピクセルで収集される電荷の数が数 MeV 相当を超えると、そのピクセルで記録される ToT の値が極端に小さくなる、「volcano effect」が生じる。そのため、重イオンのフラックスの正確な測定を行うためには、TimePix 検出器の応答を正確に知ることが必要である。

【研究内容】

今回、我々は放射線医学研究所の HIMAC を用いて $500\mu\text{m}$ の空乏層を持つ TimePix3 に対して 500 MeV/n の ^{56}Fe と 350 MeV/n の ^{12}C のイオンビーム照射実験を行った (Fig.1)。

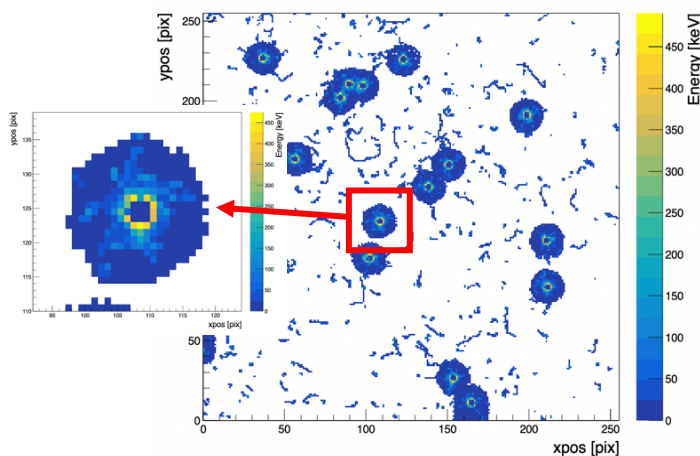


Fig.1 クラスタ中心のピクセルのエネルギーデポジットが非常に小さくなり、火山の火口のような描像(volcano effect)が確認された ^{56}Fe のイベント

この実験の結果を受けて、数 100 MeV/n に加速された重イオンに対する応答を定量化するとともに、それを ^{241}Am から放射される約 5.5 MeV の α 線に対する応答と比較した。本講演では、これらの実験から得られた TimePix3 の荷電粒子に対する応答の評価結果についての詳細を報告する。

並列化手法による MC 線量計算アプリケーションの比較

Comparison of parallelization methods for MC dose calculation applications

総研大¹, 高エネ研² ○(D)吉田 順一¹, 村上 晃一², 岡田 勝吾², 尼子 勝哉², 佐々木 節²

SOKENDAI¹, KEK²,

○Junichi Yoshida¹, Koichi Murakami² Shogo Okada², Katsuya Amako², Takashi Sasaki²

E-mail: yoshijun@post.kek.jp

モンテカルロ法は、放射線の影響の定量的な理解のために広く使われている。本研究では、いくつかのモンテカルロコードに関して、線量計算アプリケーションの並列化手法の違いによる計算速度および計算リソースの使用量について調査した。モンテカルロ法を用いた線量計算は高精度に計算できる一方で、計算時間が長大になることが問題である。そのため、モンテカルロ法の並列化の試みは古くから様々な手法が試されてきた。本研究においては、代表的なコードがサポートする異なる手法間の比較を行う。

Geant4, PHITS, EGSnrc という 3 つの代表的なモンテカルロコードを利用し、水中での X 線による線量分布を計算するアプリケーションの開発を行った。それぞれのコードは異なる並列化手法をサポートしており、並列化手法の違いによる性能の得失を調べることで、アプリケーションに最適なコードの選択につなげることが出来る。

並列化手法には、メモリ共有型と非メモリ共有型の 2 種類の手法がある。非メモリ共有型では、複数のプロセスを同時に実行することで並行に計算を行う。複数のプロセスを同時に実行するため、メモリ使用量は使用するプロセス数に単純に比例する。一方メモリ共有型では、複数のスレッドを同時に実行することで並列に計算を行う。線量計算を行う際に必要なジオメトリ、反応断面積等の共通のデータを各スレッドで共有することで、メモリ使用量を削減することができる。

本研究で利用した Geant4 および PHITS は、両方の手法が利用できる一方、EGSnrc は、非メモリ共有型の手法のみ利用が可能である。Geant4 と PHITS は、メモリ共有型のマルチスレッド計算を行うことも可能であるが、その実現手法が異なっている。3 つのコードに関して利用可能な並列手法をそれぞれ試み、その計算性能および計算リソースの利用量に関して報告を行う。

計算には、CPU : Intel Xeon Gold 6226R CPU(物理コア 16 理論コア 32), OS : Ubuntu 22.04.02 LTS を搭載した PC を使用した。50 cm × 50 cm × 150 cm の空気で満たされた空間中に、31 cm × 31 cm × 30 cm の水ファントムを作成し、X 線を照射した場合の水ファントム中の三次元の線量分布を計算する。Geant4, EGSnrc, PHITS のそれぞれから得られた線量分布を比較し、実装されている物理モデルによる線量分布の差異について検証する。計算速度は 1 ヒストリー (イベント) /秒と定義しマルチスレッド実行、マルチプロセス実行の場合についてそれぞれ計測した。計算速度とメモリ使用量はプロセス数・スレッド数毎に計測を行い、並列化手法における計算速度の向上率とメモリ使用量について報告する。

赤方偏移に基づく放射線位置検出のファイバ端面反射率の影響

The effect of fiber end reflectance on position detection based on the redshift of scintillation light

近大院総理工, [○](M1)森本 翔貴, (M1)濱崎 拓也, 堤 康宏

Kindai Univ., [○](M1)Yasuki Morimoto, (M1)Takuya Hamasaki, Yasuhiro Tsutsumi

E-mail: 2333340481a@kindai.ac.jp

1. はじめに

ファイバベースの放射線位置検出器は、主に飛行時間法 (ToF 法) に基づいている。この方法では、ファイバの両端に光検出器を設置する必要がある。近年、シンチレーション光の赤方偏移を利用した位置検出器が提案されている^[1]。この方法では、光検出器をファイバの片端のみに設置することができるため、様々な応用が期待される。しかし、ファイバ端でのシンチレーション光の反射の影響について、これまで検討されていなかった。

本研究では、赤方偏移に基づく位置検出器において、ファイバ端面における反射率と校正曲線の関係を実験的に明らかにする。

2. 実験方法

図 1 に赤方偏移に基づく位置検出器の校正曲線測定系を示す^[1]。受光部と反対側のファイバ端面の反射率を変化させるため、ファイバ端面を①黒塗り(反射率小)②空気中にむき出し(反射率中)③反射鏡接触(反射率大)の三条件で実験した。線源(⁹⁰Sr)の位置 z を変えながら、各 SiPM 出力電圧信号の波高値 $V_1(z)$ および $V_2(z)$ を測定し、次式で定義される位置検出の指標 $E(z)$ を計算した。

$$E(z) = V_1(z)/(V_1(z) + V_2(z)) \tag{1}$$

なお、SNR 向上のため、同時測定を行った^[2]。同時測定のしきい値、すなわちオシロスコープのトリガ電圧は3.1 mVとした。

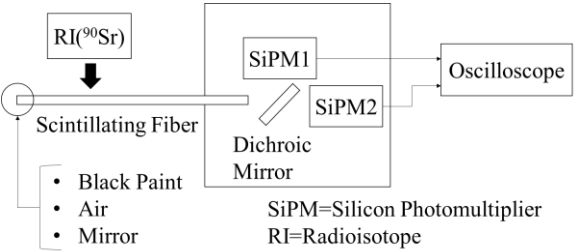


図 1 校正曲線測定系

3. 結果および考察

図 2 に各端面条件に対する校正曲線 E の測定結果を示す。丸点、十字点、三角点はそれぞれ、

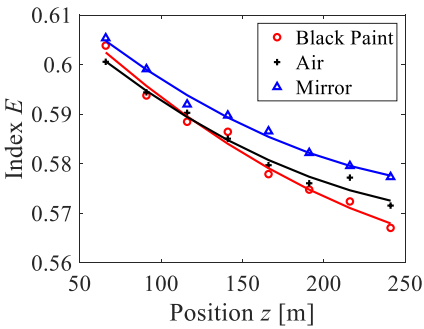


図 2 端面反射率に対する校正曲線

ファイバの端面を①黒塗り②空気中にむき出し③反射鏡接触としたときの測定結果である。また、線はそれらの 2 次の近似曲線である。端面反射率が大きいほど、 E の値が大きくなり、遠端での距離に対する傾きが小さくなっている。これは次のように考えられる。SiPM で検出される光子数は、発生位置から直接 SiPM 側に向かって検出される直接検出光子と、一度ファイバ端面で反射された後に SiPM で検出される反射検出光子の和である。直接検出光子は、 z が大きいほどファイバ伝搬距離が長くなるため、 z に対して E を減少させる。対して、反射検出光子は z が大きいほどファイバ伝搬距離が短くなるため、 z に対して E を増加させる。端面での反射率が低い場合、直接検出光子の影響が大きい。ゆえに、 E は z に対して大きく減少している。一方、端面での反射率が大きい場合、反射検出光子の影響が大きくなる。ゆえに、 E は z に対して緩やかに減少している。

4. まとめ

赤方偏移に基づいた位置検出器の校正曲線のファイバ端面反射率の影響について調べた。反射率が大きいほど同一位置での校正曲線の値が大きくなり、位置に対する傾きが緩やかになることを明らかにした。

参考文献

[1] Y. Ojima et al., Opt. Lett., **48**(5), 1260 (2023).
[2] 森本他：第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-D411-8 (2023).

赤方偏移に基づく放射線位置検出器のしきい値依存性～理論的検討～



Threshold dependence of position-sensitive detector based on redshifts

: A theoretical model

近大院総理工 ^{○(M1C)}濱崎 拓也, ^(M1)森本 翔貴, 堤 康宏

Kindai Univ., ^{○(M1C)}Takuya Hamasaki, ^(M1)Yasuki Morimoto, Yasuhiro Tsutsumi

E-mail: 2333340478g@kindai.ac.jp

1. はじめに

近年、赤方偏移に基づく放射線位置検出法が提案されている。この方法は測定器をファイバ片端に集約でき、その応用が期待されている。この測定法は同時測定のしきい値に依存することが実験的に明らかにされている[1]。しかし、理論的な検討はされていない。

本研究ではこの測定法のしきい値依存性の理論モデルを提案する。

2. 理論

赤方偏移に基づく放射線位置検出器の構成[1]の理論モデルを考える。シリコン光電子増倍管 SiPM1 および SiPM2 の光子検出確率 $P_1(z)$ 、 $P_2(z)$ はそれぞれ式(1)および式(2)となる[2]。

$$P_1(z) = C_1 \int_0^\infty S_{em}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} R(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$P_2(z) = C_2 \int_0^\infty S_{em}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} T(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ここで $S_{em}(\lambda)$ はシンチレーションファイバの発光スペクトル、 $\alpha(\lambda)$ はファイバ減衰係数、 $R(\lambda)$ および $T(\lambda)$ はそれぞれダイクロイックミラーの反射率および透過率、 $\eta(\lambda)$ は SiPM の検出効率、 C_1 および C_2 はファイバ-SiPM 間の空間結合効率である。放射線による発生光子数が N のとき、SiPM1 および SiPM2 での検出光子数がそれぞれ N_1 および N_2 となる確率 $P(N_1, N_2)$ は式(3)となる。

$$P(N_1, N_2) = \frac{N! P_1^{N_1} P_2^{N_2} (1 - P_1 - P_2)^{N - N_1 - N_2}}{N_1! N_2! (N - N_1 - N_2)!} \quad (3)$$

それぞれの SiPM で検出される光子数がしきい値 N_{Th} 以上のときのみ計測する場合を考える。このとき、それぞれの SiPM での検出光子数の期待値 $\langle N_1 \rangle$ 、 $\langle N_2 \rangle$ は式(4)となる。

$$\langle N_i \rangle = \sum_{N_i=N_{Th}}^N \left(N_i \sum_{N_j=N_{Th}}^N \frac{P(N_1, N_2)}{\sum_{N_1=N_{Th}}^N \sum_{N_2=N_{Th}}^N P(N_1, N_2)} \right) \quad (4)$$

ただし、 $i = 1, 2$ に対して $j = 2, 1$ である。

位置検出の指標 E の期待値は式(5)で表せる。

$$\langle E \rangle = \frac{\langle N_1 \rangle}{\langle N_1 \rangle + \langle N_2 \rangle} \quad (5)$$

3. 数値計算

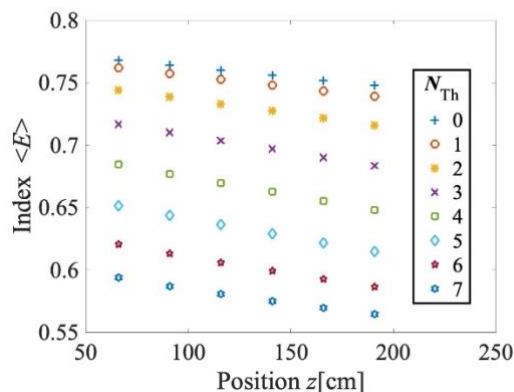


図 1 指標 E の期待値の計算結果

文献[1]の実験を想定して提案モデルで計算を行なった。図 1 に指標 $\langle E \rangle$ の計算結果を示す。同一の検出光子数のしきい値 N_{Th} では線源位置 z に対して指標 $\langle E \rangle$ は単調減少している。文献[1]の実測結果と同様に N_{Th} が増加するほど同一位置 z での指標 $\langle E \rangle$ は減少している。

4. まとめ

赤方偏移に基づく放射線位置検出器の構成の指標 E の期待値の理論モデルを提案した。提案モデルで指標 $\langle E \rangle$ のしきい値依存性を数値計算した。計算結果は実測結果[1]と同様の傾向を示した。

参考文献

[1] 森本翔貴他: 第 70 回応用物理学会春季学術講演会予稿集, 18a-D411-8(2023).

[2] T. Hamasaki et al: ComEX. **11**, 448 (2022).