

PHITS による高エネルギー中性子検出器の応答特性評価と画像解析による反跳陽子の散乱角検出法について

天造 秀樹* 真鍋 夏樹* 藤田 智樹*

Evaluation of Response Function for TMS High-Energy Neutron Detector by Using PHITS Monte Carlo Code and the algorithm searching for a first recoil-proton on captured image

Hideki TENZOU, Natsuki MANABE, Tomoki FUJITA

Synopsis

Recoil proton method has potential to develop the high-energy neutron detector with good efficiency. Tetramethylsilane (TMS) has 12 hydrogen numbers per a molecule. Recoil proton method needs the information about scattering angle of recoil proton in order to analyze the incident neutron energy. We have a plan to use IIT cameras to obtain its scattering angle by means of capturing scintillation images in a NaI (TI) detector. Neutrons over 100 MeV cause non-elastic reaction between incident neutron and a target proton, neutron-nucleus reaction and transportation of generated ions by nucleus-spallation. PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) Monte Carlo simulator can simulate all those reactions and save all information of reactions to hard disk as a file with a binary format. In this report, we calculated energy spectrum distribution in the TMS detector for up to 400MeV incident neutron by using PHITS. We estimated energy spectra for different mediums H₂, NaI (TI), MgH₂ and CH₄ to compare with TMS. We also describe our new algorithms to find scattering angles simulated by PHITS code and compared with a conventional Hough method. We confirmed elastic collisions in TMS up to 400 MeV so that TMS is the most suitable for the material of recoil proton generator. We also show that our new algorithm can find correct scattering angles most fast.

1. 緒言

100MeV から 500MeV の高エネルギー中性子を生成する加速器の遮蔽設計ではシミュレーションによる中性子の断面積データの整備が重要となるが、高エネルギー領域では中性子は物質の透過力が高く、実験データが不十分である。そのため検出効率の高い高エネルギー中性子検出器の開発が待たれている。

当研究室では、平成 16 年度から高検出効率の高エネルギー中性子検出器の開発を試みている。TMS は常温で液体、水素の数密度が大きいという利点を持ち、中性子と弾性散乱される確率が高いため、一次元反跳陽子法に適している。前年度は TMS 中での反跳陽子の飛程をベテ・プロッホの式により求めた。TMS の断面積データから中性子の平均自由行程を求め、500MeV 中性子に対する検出器のサイズを見積もった。しかしながら、

前年度は入射中性子と陽子の弾性散乱を仮定しており、非弾性散乱と相対論的扱い、原子核との衝突反応や生成粒子の輸送による影響を考慮していない。一方、PHITS モンテカルロ計算コード¹⁾はこれらの反応を非常によく再現することのできるシミュレーションコードである。

また、当研究室では画像解析により中性子と弾性散乱した反跳陽子の飛跡をカメラで撮影し、画像解析することで中性子のエネルギーを求める方法を考えている。わずかなシンチレーション光を撮影するので画像には多くのノイズが入ることが予想される。また、生成粒子によるカスケード散乱も考慮しなければならない。

そこで、本研究では PHITS を用いて、400MeV の入射中性子と水素のみの衝突を模擬し、非弾性散乱と相対論的効果による中性子エネルギースペクトルへの影響を調べることにした。さらに水素を多量に含む MgH₂、TMS、CH₄ に 100MeV の中性子

*電子工学科

を入射させて生成した反跳陽子から中性子エネルギースペクトルを解析することで、適した材質を見つけることを本研究の目的としている。

また、そのときのシミュレーション結果を用いて、図1のように反跳陽子の軌跡を含むノイズ画像の中から最初の散乱角を高速に検出するアルゴリズムを開発することにした。

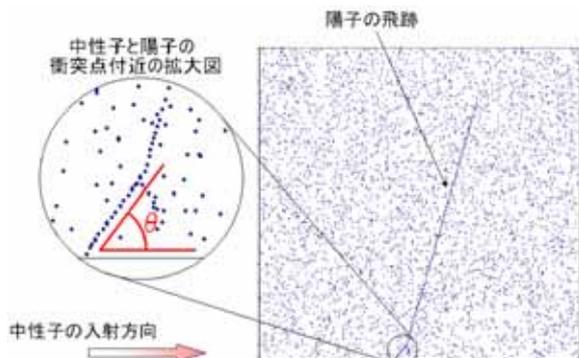


図1. 散乱角の検出

2. 反跳陽子法

入射中性子を E_n 、中性子と弾性衝突した陽子はその全エネルギーを E_p 、散乱角を θ として古典的運動学に従い、計算すると以下に示される式で表される。

$$E_n = \frac{E_p}{\cos^2 \theta} \quad (1)$$

相対論的扱いをした弾性衝突の場合²⁾、以下に示される式で表される。ただし、この場合のエネルギーは静止質量を含む全エネルギーである。

$$E_n \cdot MC^2 = E_n \cdot (E_n - E_p - MC^2) - \sqrt{(E_n^2 - M^2C^4) \cdot \{(E_n - E_p - MC^2)^2 - M^2C^4\}} \cdot \cos\theta + (E_n - E_p - MC^2) \cdot MC^2 - M^2C^4 \quad (2)$$

E_n についてあらわに解くことは困難であるが、反跳陽子のエネルギー E_p と散乱角 θ を測定することで E_n を求めることが可能である。

3. テトラメチルシラン

反跳陽子ターゲット媒質を比較した表を表1に示す。TMSは常温で液体であるため、メタンのように液体窒素以下まで冷却するシステムが不要である。水素の数密度が大きく、中性子と弾性

散乱される確率が高い。また、シリコン原子が含まれているあるため、密度が大きく反跳陽子を停止させるまでの距離(飛程)が小さい。このため、検出器をコンパクトにできる可能性を持つ。

表1. 反跳陽子ターゲット媒質の比較

分子	水素の数密度 × 10 ²² [n/cm ³]	液相温度[度]
水素(H ₂)	4.2	-223 ~ -217
メタン(CH ₄)	5.1	-147 ~ -117
TMS(CH ₃) ₄ Si	5.3	-99 ~ 27

4. PHITS

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)は高エネルギー重イオンの輸送計算を行える計算コード¹⁾である。計算は無限媒質を想定して半径400cm、長さ400cmの円筒形状においてZ軸方向に中性子を底面中心に入射させた。散乱はZ軸入射方向10cm以内の領域で生成された粒子に対して解析を行うことにした。図2に示すように計算結果は物理反応が起こるたびにすべてバイナリーファイルで出力した。Fortranでイベント抽出プログラムを作成し、対象とするイベントの解析を行った。

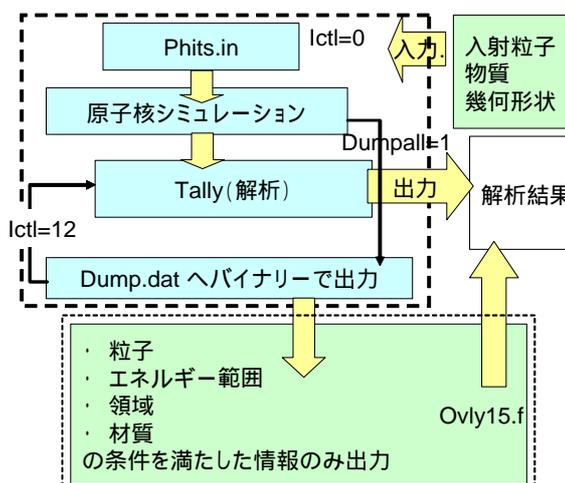


図2 PHITSを用いた解析方法

5. 画像解析による反跳陽子法

当研究室ではこれまで、電離電子を用いた反跳陽子法を使っていた。この方法では、測定装置や回路が複雑になる上、電離電子を均一な電界でドリフトさせる技術などの課題があった。そこで今回

から、シンチレータを通過した陽子の飛跡上に生じるシンチレーション光を撮影した画像を基に反跳陽子の散乱角を求める方法を採用した。

6. 半円検索法

新たに考案した半円検索法の原理を図 3 に示す。まず中性子の入射方向側 (図 3 の左側) から順に直線の始点となる点を探していく。これを仮の始点と呼ぶことにする。この仮の始点を中心とした、ある半径 r の半円内の領域で最も近い次の点を探していく。もし次の点が見つからなければ新しい仮の始点に移動する。もし次の点が見つければその点へ移り、その点を現在の点と呼ぶ。そして現在の点の近くにある次の点を検索するが、この時仮の始点から現在の点を結ぶ直線から大きくはずれた点を検出してしまわないようにするため、現在の点を中心とした扇形の面内を検索する。以上のことを繰り返していき、仮の始点から現在の点を結ぶ長さ L が設定値を超えれば、それらの点群を直線とみなす。また、図 3 の左側のように、次の点が見つからず途切れてしまった場合は最後の点を終点とし、仮の始点から終点までの長さが設定値を超えない場合は、新しい仮の始点を探す。もし超えていれば直線とみなす。

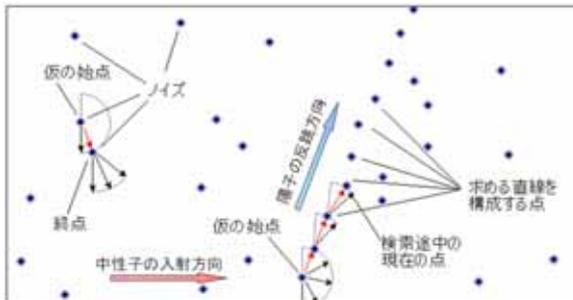


図 3 半円検索法の原理図

7. 計算結果

7.1 (n,p) の非弾性散乱について

ターゲットに液体水素を用い、200MeV と 400MeV の中性子を入射させた。このときの反跳陽子と散乱余弦の自乗値との関係を図 4 の (a) と (b) にそれぞれ示す。古典的取り扱いをすれば式 (1) に従い、図中の点線で表される直線上となる。一方、相対論的な扱いを行った場合、図中の実線のようにゆるやかな曲線となる。両者を比較したとき、200MeV のときには 45 度付近で最大 1% 程度

の差でほぼ直線上にある。しかし、400MeV では 5% ほどの差となって現れることから 200MeV 以上では相対論的な扱いを行わなければならないことがわかる。また、この曲線上の点はすべて弾性散乱によるイベントであり、それ以外は非弾性散乱イベントと考えられる。このことより 400MeV では非弾性散乱による影響が 2% 程度あることがわかった。

7.2 媒質

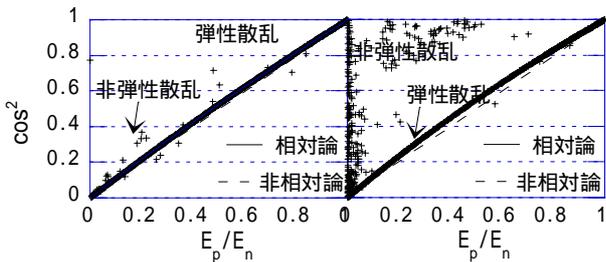
異なる 4 つの媒質に 100MeV の中性子を入射させたときの反跳陽子の応答を調べた。式 (1) に従い、反跳陽子の散乱角と角度から中性子のエネルギーに変換したときのエネルギースペクトルを図 5 に示す。水素化マグネシウムは水素の数密度は高いが、分子中に含まれる陽子と中性子の数が大きいので、フラグメントが多く、弾性散乱のイベント数が相対的に少ない。次に水素数密度の高い TMS は水素化マグネシウムに比べ、水素以外のカーボンやケイ素原子の中、中性子、陽子は少ないためフラグメントが少なくかつもっとも弾性散乱数が多い。メタンは、水素の数密度は少ないが、全質量数も同様に少ないため、フラグメントは他の材質に比べて少ない。水素原子のみで構成された液化水素は水素の数密度は少ないがフラグメントは発生していない。

7.3 半円検索法

従来用いられている Hough 変換³⁾ と今回考案した半円検出法を比較検証した。Hough 変換とは画像中の各点を座標変換し、元の仮想した一本の直線上にのる点の数を数え、その数が多いほど直線とみなす手法である。比較のために陽子の多重散乱を考慮することのできる PHITS によって図 6 のように 5 種類の陽子の飛跡のシミュレーションデータを作成した。DATA1 はカスケード散乱が起こり陽子の飛跡が分岐している場合、DATA2, DATA3 はカスケード散乱が起きていない場合、DATA4 は複数の飛跡が同時に発生した場合、DATA5 は飛跡が短い場合のデータである。

この飛跡データを用いて、どの程度のノイズ密度まで散乱角の検出に成功するかを調べて比較したのが図 7 である。なお、今回の計算では半円検出方のパラメータである直線の長さ L と半円の半径 r はそれぞれ 35 ピクセルと 8 ピクセルに

設定してある。耐ノイズ密度は半円検出法が Hough 変換より最小で 3.2 倍、最大で 5 倍大きくなった。また計算時間の面でも半円検出法は、Hough 変換がノイズ密度 4000 の画像を変換するのと同じぐらいのスピードで、ノイズ密度 25000 の画像から最初の反跳角を検出することができた。図 8 は半円検出法による検出前と検出後の画像である。最初の散乱角のみが検出されていることがわかる。



(a) 200MeV 入射 (b) 400MeV 入射
図 4 (n,p)非弾性散乱による影響

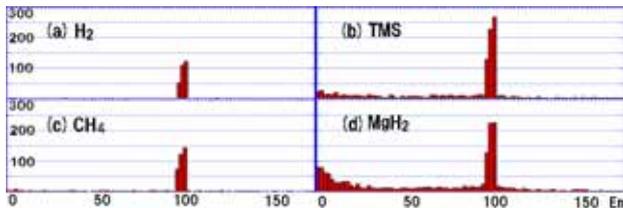


図 5 反跳陽子の散乱角とエネルギーから求めた入射中性子エネルギースペクトル。横軸は中性子エネルギー

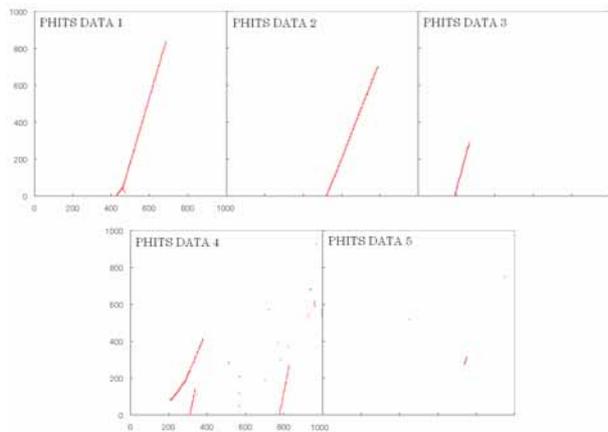


図 6 PHITS による反跳陽子軌跡

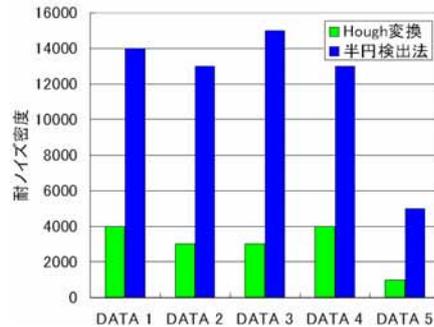


図 7 検出に成功した時のノイズ密度の比較

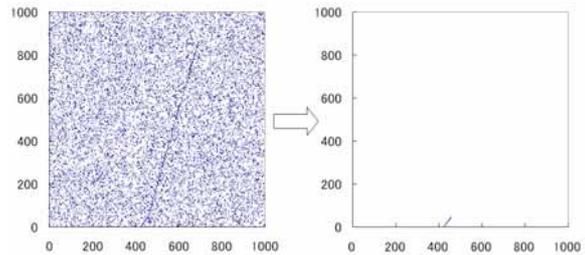


図 8 半円検出法による検出前と検出後の画像 (DATA 1, ノイズ密度 14000 の場合)

8. まとめ

本研究では PHITS を用いて、衝突による影響を模擬し、400MeV の入射中性子と水素の非弾性衝突による影響は 2% ほどであり、無視できる程度であった。400MeV さらに水素を多量に含む MgH₂、TMS、CH₄ に中性子を入射させて生成した反跳陽子から中性子エネルギースペクトルを解析することで、これらの中で TMS が最も適した材質であることがわかった。また、PHITS により模擬した反跳陽子の散乱データを基に半円検出法と Hough 変換を比較した。半円検出法が多くのノイズの中で散乱角を高速に検出することに成功した。

参考文献

- 仁井田浩二: *PHITS User's Manual Ver2.00*
- B. Povh 等: *素粒子・原子核物理入門*, Springer
- 石立喬: *Hough 変換による画像からの直線や円の検出*, <http://codezine.jp/a/article.aspx?aid=153>