

中性子検出効率計算コード NEUT

(非束縛共鳴準位探索実験に向けての覚書 - 9)

佐藤義輝

平成 15 年 12 月 1 日

概要

多重中性子検出用ホドスコープのデザイン研究において、中性子検出効率計算コード NEUT が使用可能かどうかを検討した。NEUT の動作確認状況と合わせて結果を報告する。

abstract

Feasibility of using the neutron efficiency code NEUT for simulation studies of a multi-neutron detection system has been considered. The results are presented, along with those from operation check of NEUT.

1 はじめに

単一、もしくはそれ以上数の中性子を検出し断面積を測定する原子核実験では、達成できる測定量の正確さは検出器の中性子検出効率についての知識の不十分さのためしばしば制限をうける。とりわけ複数個の中性子の検出を伴う測定においては、真の同時検出事象と、一つの中性子が二つ、もしくはそれ以上の数の検出器で散乱することによって生じる偽の同時検出事象（クロストーク事象）とを正しく区別することが断面積の決定には欠かせない。こうした複数個の中性子の検出を伴う測定において、クロストーク事象を特定し排除するために、過去において、運動学的な側面 [1, 2, 3]、並びに検出器の配置に関する側面 [4] からの考察が行われ、様々な方法論が提唱された [5]。これらの方法論をテストし、また、特定の検出器系にみあった新たな方法論を模索する上で、モンテカルロ計算コードの助けをかりる必要がある。こうしたコードとしての使用の可能性を探る目的で、Cecil の論文 [6] において詳述された中性子検出効率計算コード NEUT の動作確認を行った。結果を報告する。

2 Cecil の論文の計算結果の再現性の確認

中性子は電荷をもたないので、そのエネルギーの一部、または全部を何らかの核反応によりシンチレーション材をイオン化し励起することのできる荷電粒子へ移行する過程を経てはじめて検出が可能となる。中性子検出効率計算コード NEUT では、こうした核反応として次の七つのチャンネルが考慮される：

1. ${}^1\text{H}(n, n)$

2. $^{12}\text{C}(n, n)$ (nondiffractive)
3. $^{12}\text{C}(n, n)^{12}\text{C}^*(2^+; 4.44 \text{ MeV})$
4. $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$
5. $^{12}\text{C}(n, n3\alpha)$
6. $^{12}\text{C}(n, np)^{11}\text{B}$ and $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ or $^{12}\text{C}(n, p)^{12}\text{B}$ and $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$
7. $n + \text{C}$ diffractive elastic scattering

NEUT はこれら七つの反応の全断面積を入力として受け付ける。今回用いた断面積のエネルギー依存性を図 1 に示す。文献 [6] の図 1 の再現性は良いといえる（ただし、文献 [6] の図 1 には $^{12}\text{C}(n, n)$ 弾性散乱 (nondiffractive) のデータは記載されていない）。

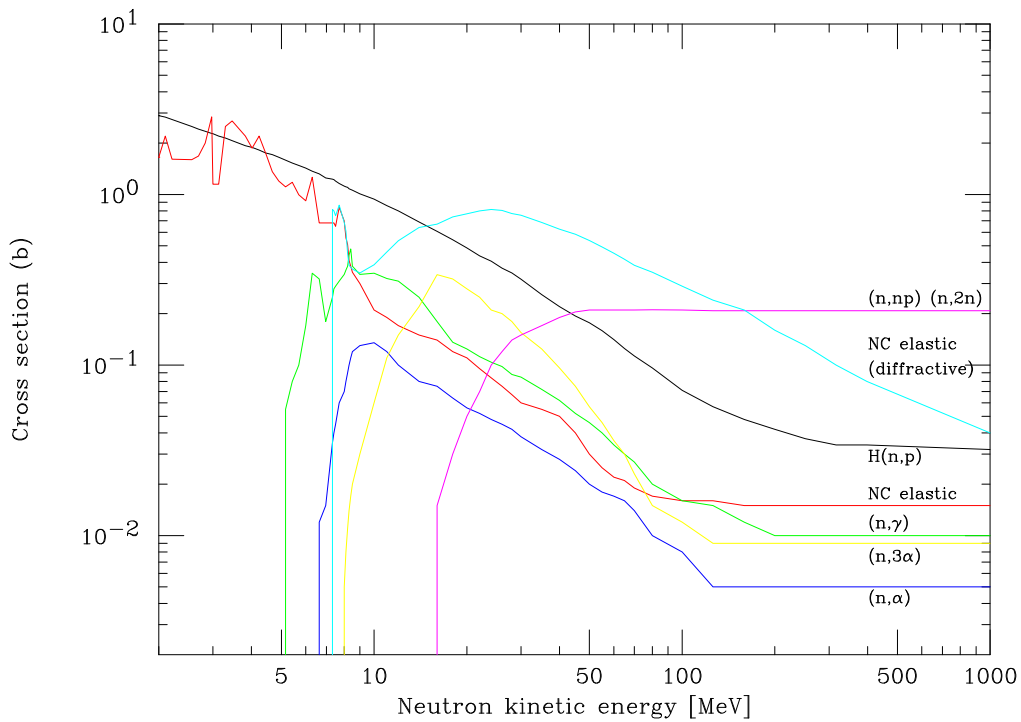


図 1: 中性子 - 炭素散乱の七つの反応チャンネルにおける全断面積のエネルギー依存性。中性子検出効率計算コード NEUT で用いられる。

Cecil の論文 [6] では、様々な形状のプラスチックシンチレータに対して中性子検出効率がモンテカルロ計算により求められ、文献値と比較された。ここでは、その計算の再現性を確かめるため NEUT を用いて同様の計算を行った。同文献 [6] において計算されたシンチレータの種類、性質（密度と H/C 比）、及び形状を表 1 にまとめる。

中性子検出効率はスレッシュホールド設定値の関数でもある。Cecil の論文 [6] では、スレッシュホールド設定値は全て絶対的な光収率を表す MeVee 単位で表されている。定義により 1 MeVee

の光を発生する放射線のエネルギーは、高速電子では 1 MeV である。荷電重粒子の場合、光収率は電子線の場合に比べて減少するので補正をする必要がある。その補正のため同文献 [6] では次の光応答関数が用いられた。

$$T_e = a_1 T_p - a_2 [1.0 - \exp(-a_3 T_p^{a_4})] \quad (1)$$

NE-102 ならびに NE-213 シンチレータの陽子に対する光応答のパラメータ値を表 2 に、また、同パラメータを用いて計算される発光量の陽子エネルギー依存性を図 2 と図 3 に示す¹。

表 1 に記した各設定について NEUT を用いて検出効率を計算した。結果をエネルギーの関数として図 4、図 5、及び図 6 に示す。これらの図は対応する Cecil の論文 [6] の図 2、図 3、及び図 4 と概ね良く一致している。これより、文献 [6] で示された計算を NEUT を用いて正しく再現できることが確認された。

表 1: 文献 [6] において計算されたシンチレータの種類、性質（密度と H/C 比）、及び形状。

シンチレータ	密度 (g/cm ²)	H/C 比	図番 文献 [6]	半径 (インチ)	厚み (インチ)
C-H	1.032	1.000	図 2a	11.811	5.906
NE-102	1.032	1.104	図 2b	2.022	2.000
PILOT-Y	1.032	1.104	図 2c	3.000	6.000
NE-102A	1.032	1.104	図 2d	1.398	5.984
NE-102A	1.032	1.104	図 3a	5.906	11.260
NE-102	1.032	1.104	図 3b	2.500	12.000
NE-102	1.032	1.104	図 3c	3.500	3.000
NE-110	1.032	1.104	図 3d	7.650	10.630
NE-228	0.710	2.110	図 4a	2.022	2.000
NE-224	0.877	1.330	図 4b	—	17.717
NE-213	0.874	1.213	図 4c	2.500	1.496
NE-213	0.874	1.213	図 4c	2.362	2.205

表 2: NE-102、及び NE-213 シンチレータの、陽子に対する光応答関数のパラメータ値。

シンチレータ	a_1	a_2	a_3	a_4
NE-102	0.95	8.0	0.1	0.90
NE-213	0.83	2.82	0.25	0.93

¹文献 [6] に記載のパラメータは文献 [7] からの転載である。文献 [7] では、しかしながら、式 1 のパラメータ a_3 に対応するパラメータ (a_2) の符号が誤っているので注意が必要。

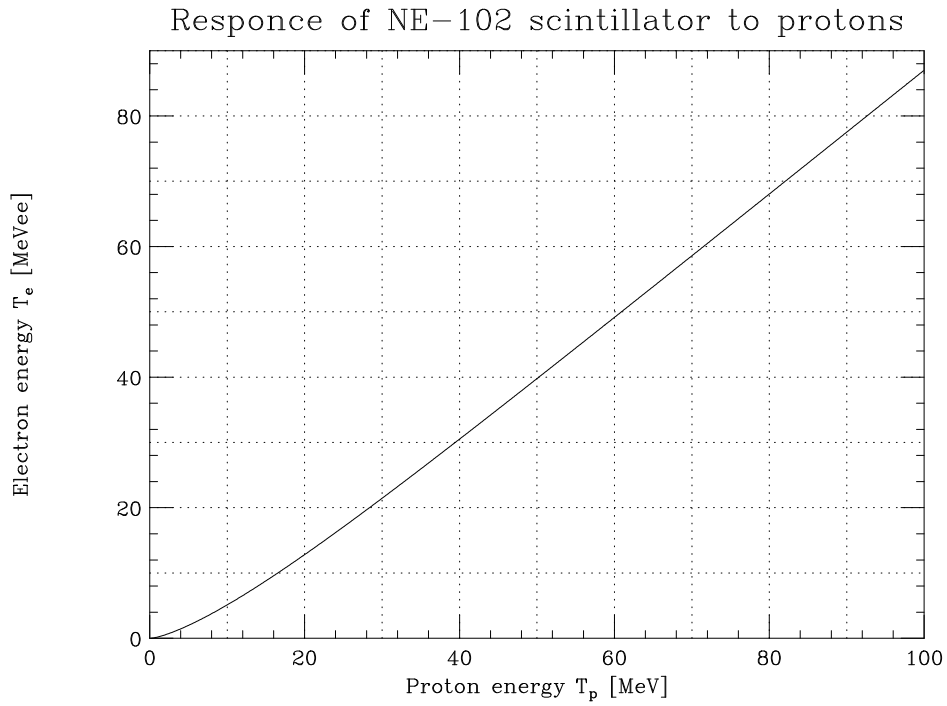
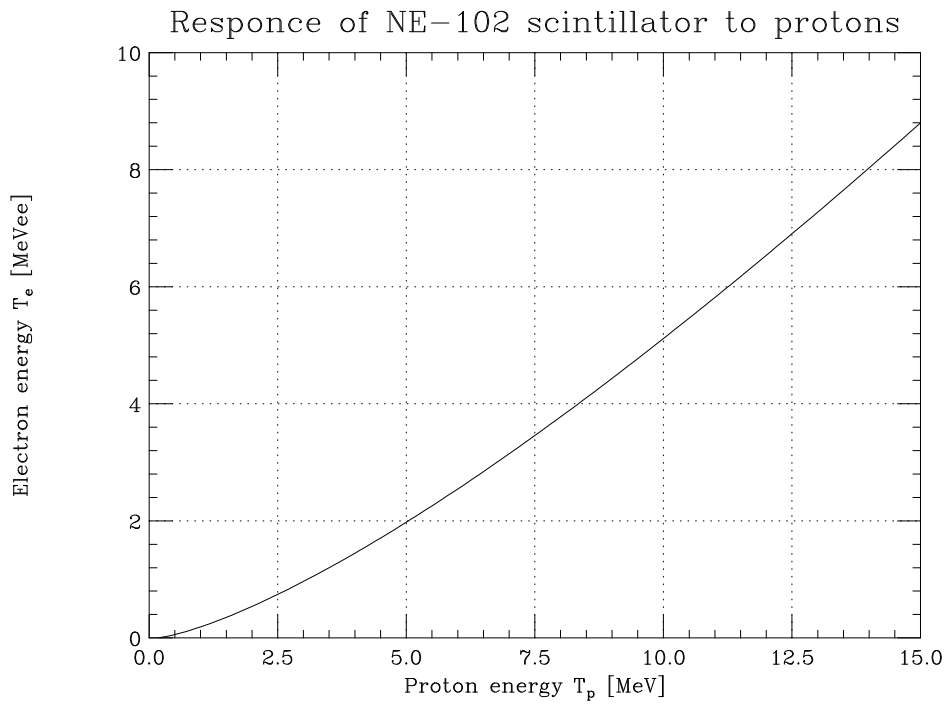


図 2: NE-102 の陽子に対する光応答のエネルギー依存性。

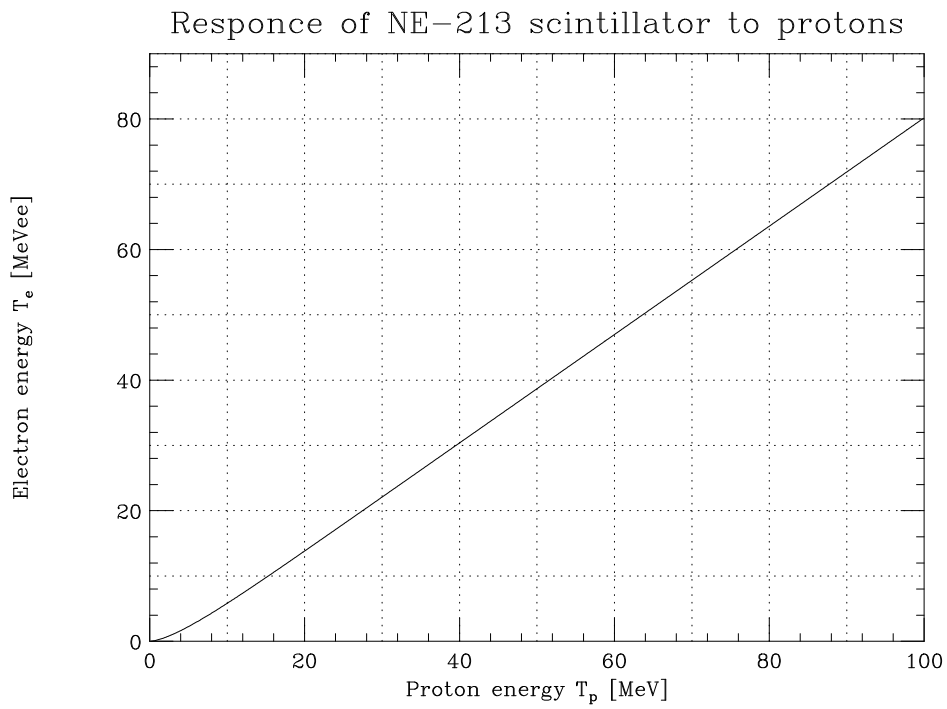
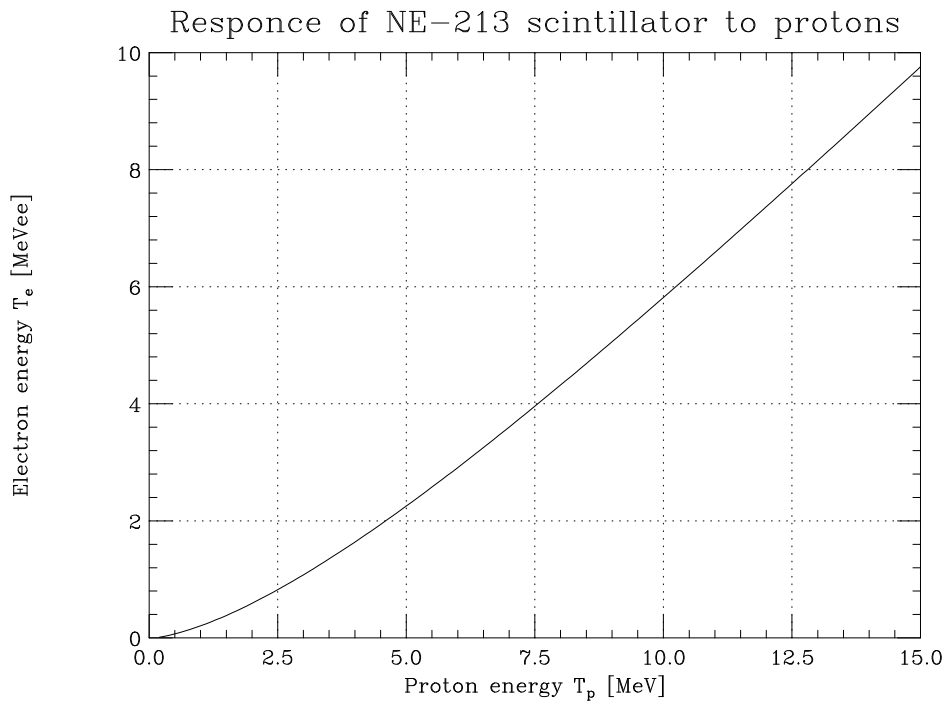


図 3: NE-213 の陽子に対する光応答のエネルギー依存性。

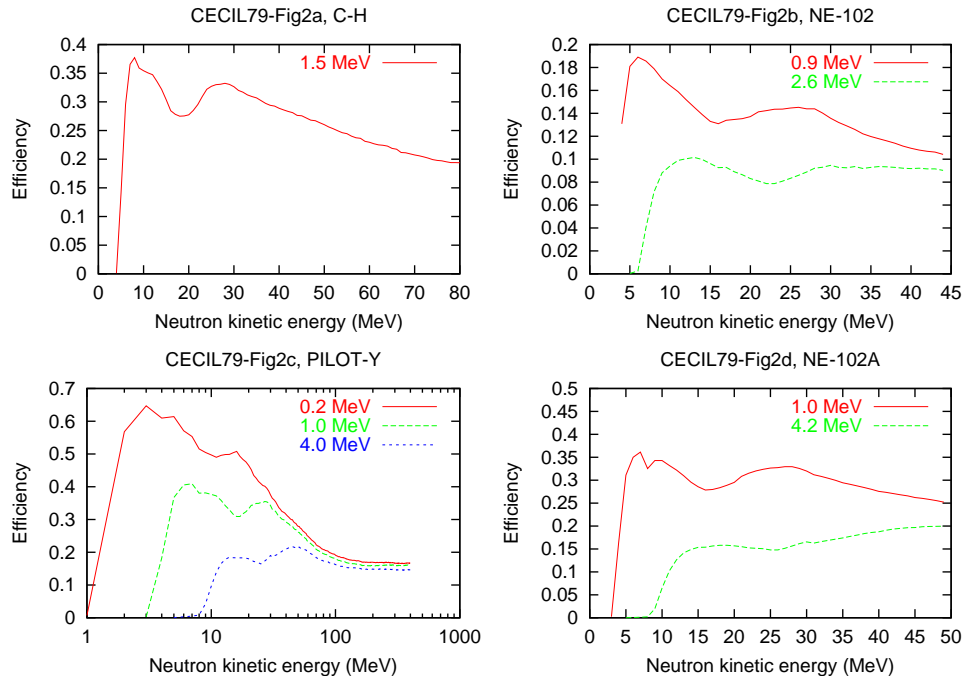


図 4: 中性子検出効率計算コード NEUT を用いて計算したプラスチックシンチレータに対する検出効率のエネルギー依存性。Cecil の論文 [6] の図 2 に対応。

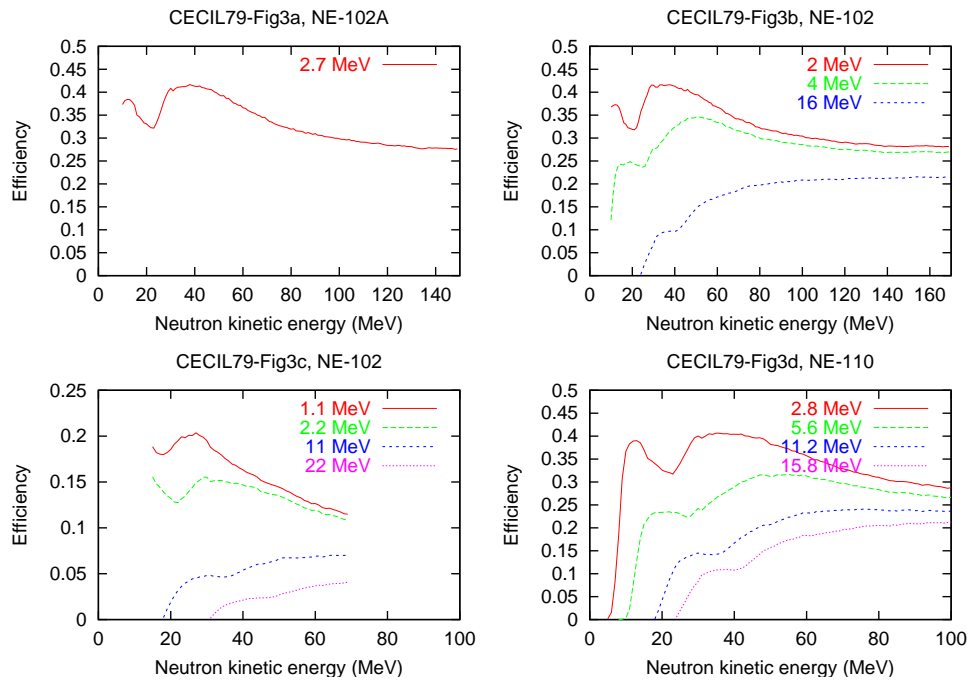


図 5: 中性子検出効率計算コード NEUT を用いて計算したプラスチックシンチレータに対する検出効率のエネルギー依存性。Cecil の論文 [6] の図 3 に対応。

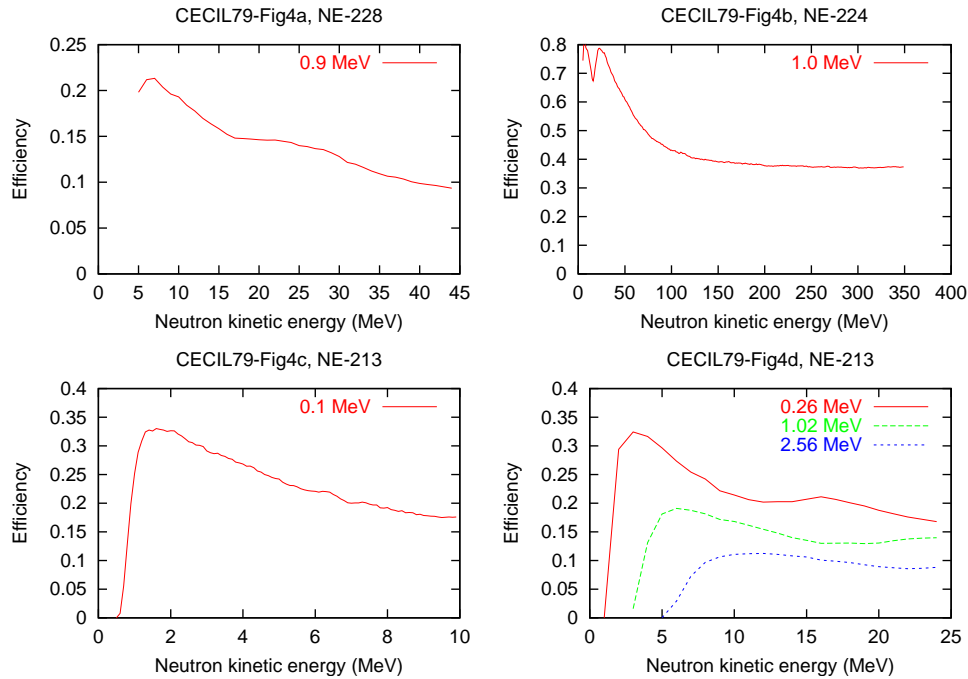


図 6: 中性子検出効率計算コード NEUT を用いて計算したプラスチックシンチレータに対する検出効率のエネルギー依存性。Cecil の論文 [6] の図 4 に対応。

3 チャンネル毎の光出力スペクトルと積分波高スペクトル

大きさが横 200 cm、高さ 6 cm、奥行き 6 cm のプラスチックシンチレータ (NE-102) の中心に 70 MeV の中性子が入射した場合について、NEUT を用いて検出効率を計算した。得られたチャンネル毎の光出力スペクトルと積分波高スペクトルを、それぞれ図 7 と図 8 に示す。光出力スペクトルにおいて、炭素から陽子や中性子が放出される場合を取り扱う六番目チャンネルが 40 MeV 近辺までの領域で発光スペクトルに主な寄与を与える。積分波高スペクトルにおいては同チャンネルは 20 MeV 近辺までの領域において最も大きな寄与を示すが、それよりも高いエネルギー領域では中性子と陽子の弾性散乱が支配的となる。光出力、並びに積分波高スペクトルにおいて、中性子と陽子の弾性散乱は全領域で大きな寄与を示す。中性子と炭素の弾性散乱で発光がほとんど得られないのは、炭素の得る反跳エネルギーが小さくまた光の減衰が大きい為である。ただし、この反応チャンネルで散乱した中性子がさらに別の散乱を起こし検出される場合があるので、こうした場合を経由してこの弾性散乱チャンネルは全体的な中性子検出効率に影響を与えると予想される。その他の反応チャンネルは発光量が 20 MeVee 以下の領域でのみ検出効率に寄与する。

4 中性子飛行経路の追跡

中性子検出効率計算コード NEUT では、次の三つの条件の内いずれか一つが満たされるまでシンチレータ中での中性子飛行経路が追跡される。

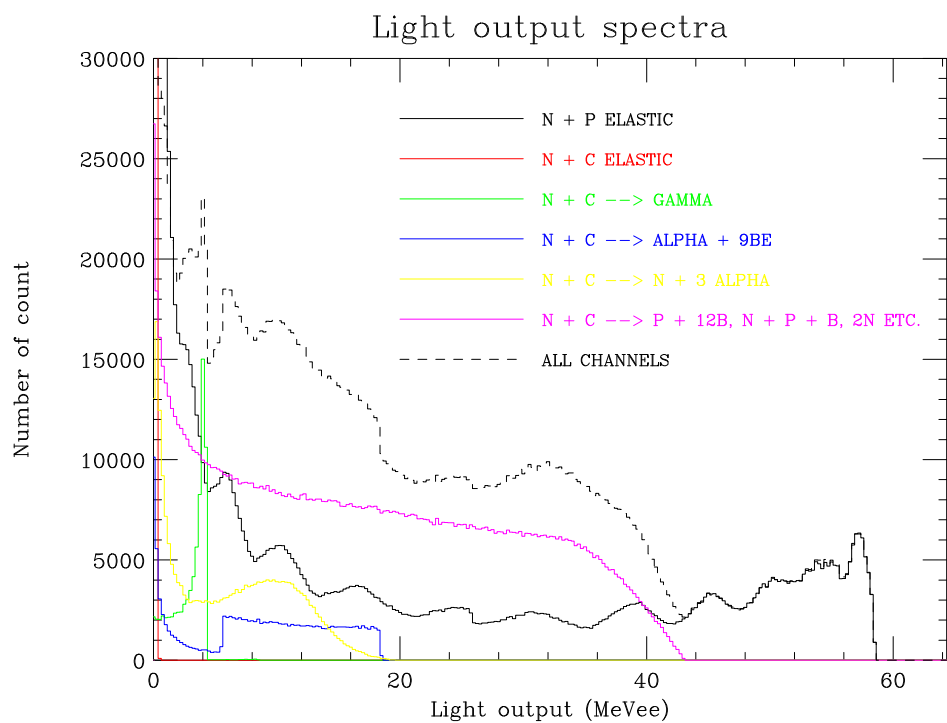


図 7: チャンネル毎の光出力スペクトル。70 MeV の中性子が NE-102 シンチレータに入射した場合の計算結果。

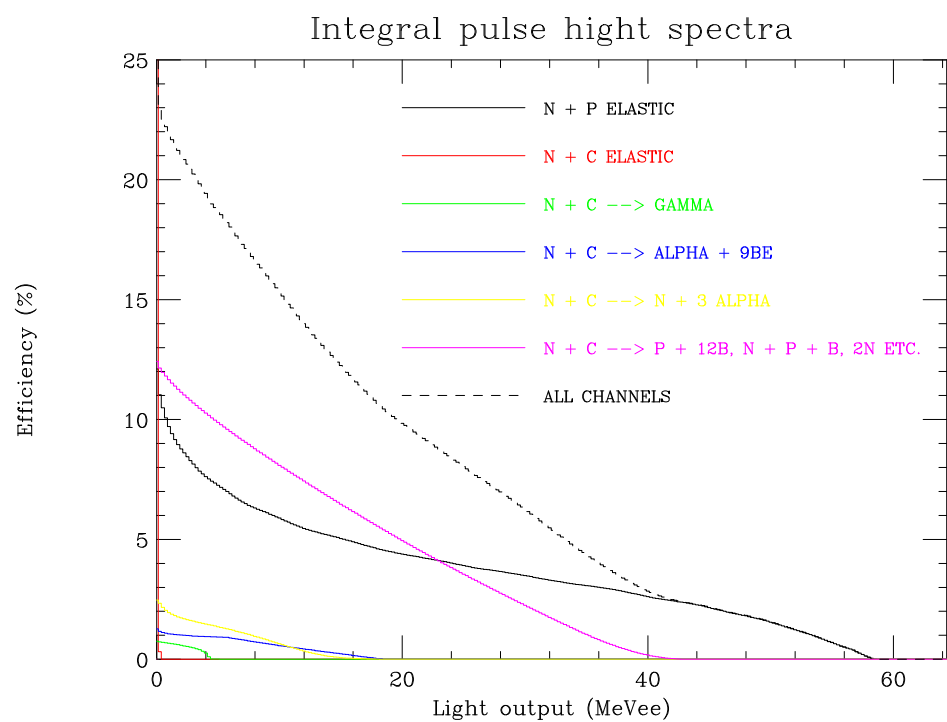


図 8: チャンネル毎の積分波高スペクトル。70 MeV の中性子が NE-102 シンチレータに入射した場合の計算結果。

1. 中性子がシンチレータから飛び出す
2. 中性子エネルギーが指定した値（典型的には 0.1 MeV）よりも小さくなる
3. 散乱回数が指定した値（典型的には 10 回）よりも多くなる

シンチレータ中での各反応点における、中性子の位置、方向、エネルギー、発光量、発光時間といったパラメータは出力ファイルに記録可能である。この情報をもとに中性子飛行経路の視覚化を試みた。

NEUT は、デフォルトの設定では、直方体型か円柱型のシンチレータのみが取り扱い可能である。分割化されたシンチレータの場合にも適用可能かどうかを探るため、今回の計算において距離を隔てて設置される二つのシンチレータを想定し、ソースコードに変更を加えた。各シンチレータの大きさは横方向が 200 cm、縦方向が 150 cm、厚さが 12 cm である。シンチレータ間の距離は 226 cm である。中性子は検出器の中心に検出器面に対して垂直に進入するものとした。中性子がシンチレータから飛び出す場合、飛行経路の終点は、最後の反応点での平均自由行程をもとに乱数を振って決められる次の（仮想的な）反応点とした。二つのシンチレータ間の領域では中性子の損失はないものとした。従って、片方のシンチレータから飛び出した中性子の次の反応点までの距離が、中性子はそのシンチレータを横切る距離と他方のシンチレータを横切る距離の和より小さい場合は、他方のシンチレータ中で次の反応が生じるものとし、飛行経路の追跡が続行された。

NEUT を用いて計算された中性子の飛行経路の例を図 9 に示す。図 9 より、一方の検出器で散乱された後に他方の検出器に入射し、そこでさらに散乱が発生する場合のあることがわかる。こうした多重散乱は、一中性子の検出においてはスペクトルの歪曲をもたらす。また、二中性子の検出においては、さらにクロストーク事象の源となる。多くの場合、多重散乱は入射側（Z 座標値の小さい側）のシンチレータから出射した中性子が下流側のシンチレータで再度反応して生じている。しかしながら、下流側から上流側に戻る経路をたどる多重散乱も、頻度は高くはないものの存在する。

5 まとめ

今回、中性子検出効率計算コード NEUT を多重中性子検出用ホドスコープのシミュレーション研究に使用可能かどうかを検討した。NEUT は (1) 中性子エネルギーが 100 MeV 以下の領域において、発光に関与する多数の中性子誘起反応が取り扱われている、(2) Cecil の論文 [6] に示された計算結果を良く再現する、(3) 中性子飛行経路の追跡機能を有している、といった特徴を備えており、こうしたシミュレーション研究に使用可能であると思われる。今回検討外としたが、各散乱での発光量や発光時間に基づく検出・非検出の判定基準をテストしたり、入射中性子のプロファイル情報を加味したりすることは容易に実行可能であろう。今後さらに検討を進める上での克服課題は、(1) 現実的なシンチレータの分割化に柔軟かつ迅速に対応する為のコードの見直し、(2) 中性子誘起反応の全断面積、並びに微分散乱断面積の精密化、(3) 誘起されて発生する複数の中性子に対する飛行経路追跡機能の向上、といった項目であろう。

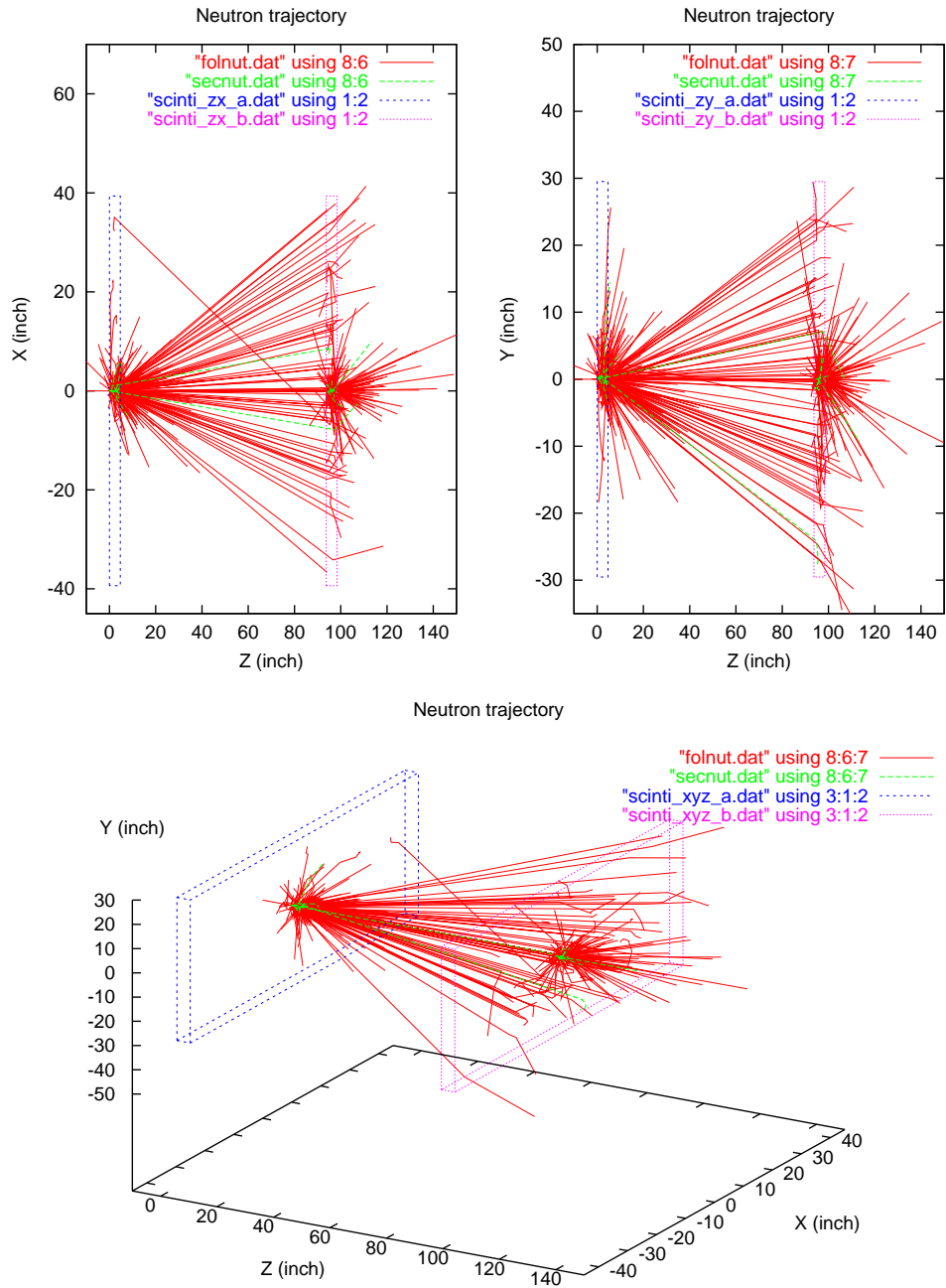


図 9: NEUT を用いて計算された中性子の飛行経路。赤線は入射した中性子の飛行経路を、緑の線は $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ 反応によって発生した中性子の飛行経路を表す。

参考文献

- [1] N.Colonna et al., Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4190.
- [2] R.Gentner et al., Z. Phys. A343 (1992) 401.
- [3] J.Wang et al., Nucl. Instr. and Meth. A397 (1997) 380.
- [4] J.Pluta et al., Nucl. Instr. and Meth. A411 (1998) 417.
- [5] F.M.Marques et al., Nucl. Instr. and Meth. A450 (2000) 109.
- [6] R.A.Cecil, B.D.Anderson and R.Madey, Nucl. Instr. and Meth. 161 (1979) 439.
- [7] R.Madey et al., Nucl. Instr. and Meth. 151 (1978) 445.