

NEUT: $n - C$ (非弾性散乱) の NPB&N2N チャンネルのイベント生成モデル

Y. Satou, Y. Makimura

August 31, 2024

Abstract

$n - C$ (非弾性散乱) の NPB&N2N チャンネル (Ch#6) のイベント生成モデルについて述べる。

1 はじめに

NEUT の反応チャンネルの六番目は、 $n - C$ 非弾性散乱の NPB&N2N 反応である。すなわち、陽子ノックアウト反応 (NPB)、及び中性子ノックアウト反応 (N2N) が取り扱われている。モデルとして想定されたこのチャンネルの全反応断面積、並びに、N2N 反応の部分断面積のエネルギー依存性を図 1 の、それぞれ、黒線と赤線で示す。

現代的な質量偏差値を用いて計算される、NPB 反応の Q 値は -15.96 MeV、閾値エネルギーは $E_n = 17.30$ MeV である。N2N 反応の Q 値は -18.72 MeV、閾値エネルギーは $E_n = 20.29$ MeV である。

2 NBP&N2N チャンネルの角度分布

このチャンネルでは散乱は $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow d + {}^{11}\text{B}$ 、もしくは $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow (nn) + {}^{11}\text{C}$ の二体散乱として取り扱われる。出射重陽子 (もしくは、 nn 系) の運動エネルギーが事後的に陽子と中性子 (あるいは二中性子) に一様乱数を振って分配される。散乱の角度 ($x = \cos \theta_{\text{cm}}$) 分布は $x = [0, 1]$ の区間の単調増加関数に取られる。この為に用意された断面積の重み関数 (dF/dx) とその定積分 (F)、及び前者の規格化は下記の通り。

$$\frac{dF}{dx} = 2x, \quad (1)$$

$$F = x^2, \quad (2)$$

$$\int_{0.0}^{1.0} \frac{dF}{dx} dx = 1.0. \quad (3)$$

図 2 に NPB チャンネルについて生成されたイベントのヒストグラム (黒点) と、式 (1) の単調増加関数 (実線) を示す。企図された通りのイベント分布が実現している事が見て取れる。

図 3 に、NPB チャンネルについて生成されたイベントの CM 系の角度 ($\cos \theta_{\text{cm}}$) 分布、実験室系の角度 ($\cos \theta_{\text{lab}}$) 分布、及び、陽子 (もしくは中性子) の実験室系で

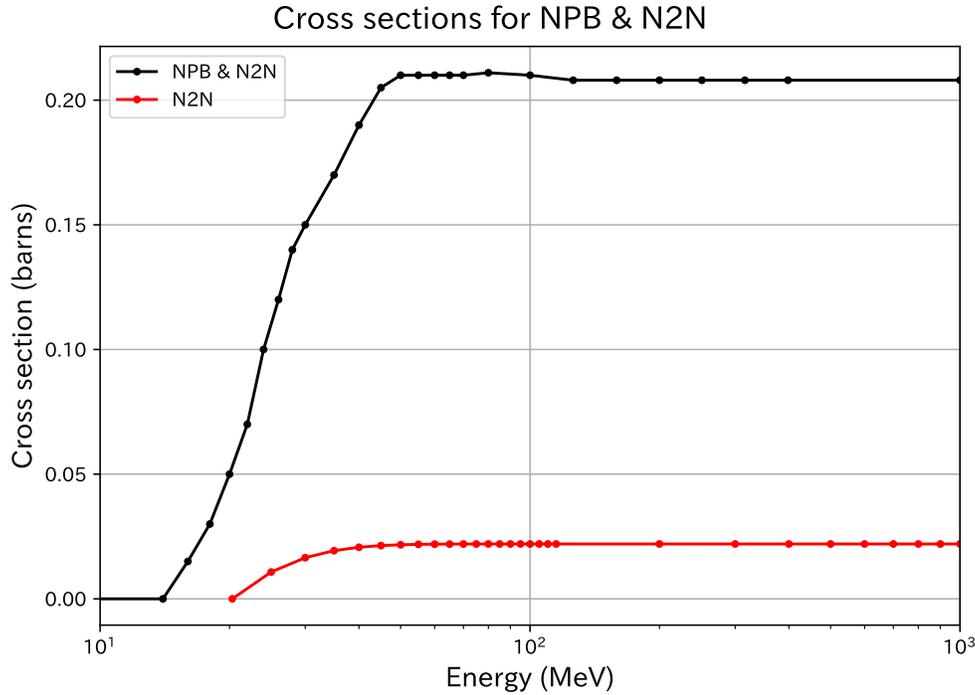


Figure 1: $n - C$ 非弾性散乱の NPB&N2N 反応チャンネル (Ch#6) について想定された断面積 (黒線：全断面積、赤線：N2N 反応の部分断面積) のエネルギー依存性。

のエネルギー分布を示す。陽子エネルギーの最高値は、想定したビームエネルギーの 200 MeV に達しない。これは、負の反応 Q 値の為である。参考の為、NPB チャンネルで想定された二体の運動学の $E - \theta$ プロット [E_d^{lab} (or $E(^{11}\text{B})^{\text{lab}}$) vs. θ_{cm}] を図 4 に示す。

3 N2N チャンネルのバグについて

NEUT では、断面積の重みに従って、NPB チャンネルと N2N チャンネルの振り分けがなされる。N2N チャンネルが選択された場合、プログラム中のコメントによれば、散乱中性子はそのまま FOLNUT サブルーチン内に留め、ロックアウト中性子は SECNUT サブルーチンで追跡する仕様となっている。ところが、手持ちのコードは、散乱中性子について、そのエネルギーを SECNUT のコール後に $w=0.$ とし、直後に FOLNUT を抜ける仕様となっていた。これは、バグと思われるので、goto 1000 ラインを挿入して ($w=0.$ 部を回避し)、引き続き FOLNUT 内で散乱中性子の追跡が継続される様、仕様を変更した。修正適用後の関連部分のソースを補遺 A に示す。

図 5 の左パネルに、 $E_n = 200$ MeV での、報告 [1] に述べたシンチレータに対する積分検出効率の発光量依存性を示す。上記 goto 1000 ステートメント無し、SECNUT 無しの場合 (黒線)、goto 1000 ステートメント無し、SECNUT 有りの場合 (緑線)、goto 1000 ステートメント有り、SECNUT 無しの場合 (青線)、及び、goto 1000 ステートメント有り、SECNUT 有りの場合 (赤線) のそれぞれの結果を示す。N2N チャンネルで二つの中性子の追尾を無効とする場合 (黒線) と他の場合は軽微だが検知可能な違いを有する。

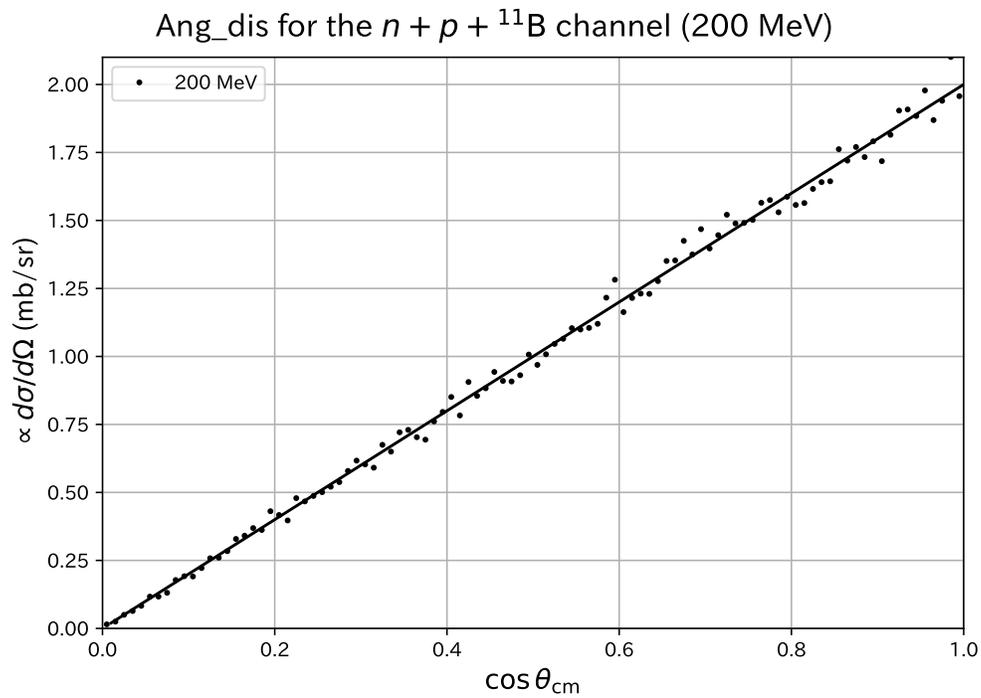


Figure 2: NPB チャンネルのイベントの角度分布。

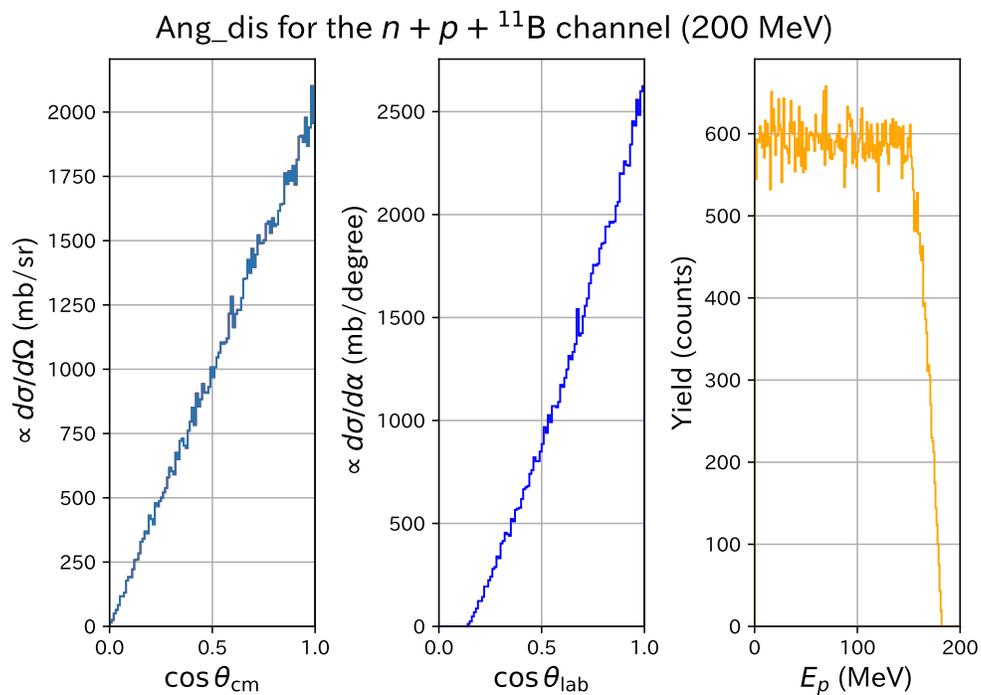


Figure 3: $E_n = 200$ MeV での NPB チャンネルについて得た、陽子（もしくは中性子）イベントの CM 角度分布、実験室系角度分布、及び、エネルギー分布。

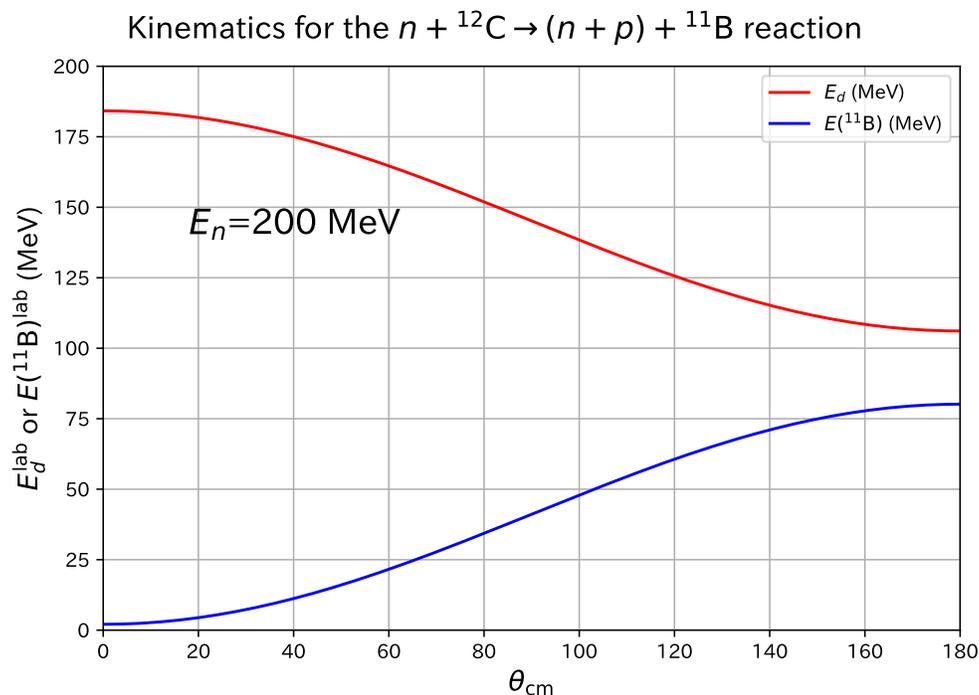


Figure 4: $E_n = 200$ MeV での $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow d + {}^{11}\text{B}$ 反応の運動学。 E_d^{lab} (or $E({}^{11}\text{B})^{\text{lab}}$) vs. θ_{cm} のプロット。

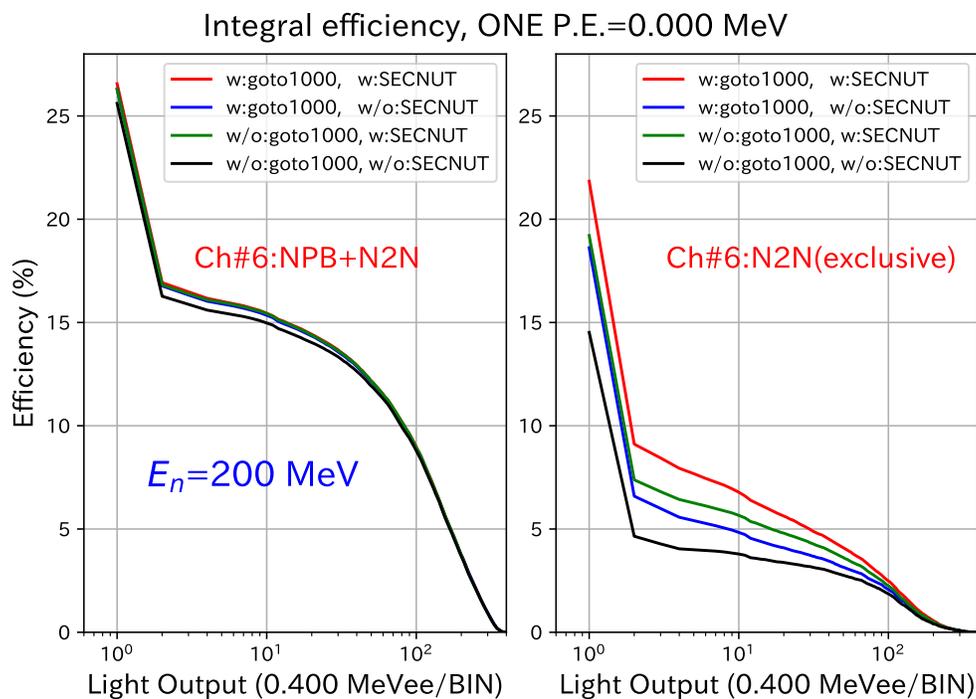


Figure 5: $E_n = 200$ MeV の中性子に対する厚さ 15 cm のプラスチックシンチレータの積分検出効率。Ch#6 における、散乱、反跳中性子の追尾の有無や、考慮するサブチャンネル (NPB&N2N or N2N only) を変えて得た結果。

図 5 の右パネルに、Ch#6 を全て (強制的に) N2N 反応に帰着させて得た同様の図を示す。散乱、並びに反跳中性子の追尾の度合いを段階的に上げるにつれて、積分検出効率が増大する様子が見て取れる。

A NPB&N2N チャンネルのソースコード (改変後)

```

C N+C--P+12B OCCURRED (REACTION CHANNEL 6)
  600 MS=6
C
C     NOTE THAT THE N2N CROSS SECTION IS GROUPED OR INCLUDED
C     IN THE CODE AS PART OF THE NPB CROSS SECTIONS
C
C     TO DETERMINE WHEN AN N2N OCCURS THE MONTE CARLO METHOD IS
C     USED ALONG WITH AN EMPIRICAL EXPRESSION WHICH SIMPLY REPRESENTS
C     THE SPARCE EXPERIMENTAL N2N CROSS SECTION DATA AVAILABLE
C
CC Test switch 2024.08.29 -----
   IF (E.LE.20.3) GOTO 9221
CC   goto 10222 ! Force the N2N channel
CC -----
C   CHOOSE NPB OR (N,2N)
   DUMMY=.022*(1.-EXP((20.3-E)/7.))/S(6)
C   THE CHOICE BETWEEN NPB AND N2N IS MADE IN THE FOLLOWING IF
C   STATEMENT USING THE EMPIRICAL EXPRESSION ABOVE WHICH GIVES THE
C   N2N CROSS SECTION IN BARNS ABOVE 20.3 MEV (THRESHOLD)
CC Test switch 2024.08.29 -----
   IF (DUMMY.GT.UNIRND(Y)) GO TO 10222
CC   goto 10222 ! Force the N2N channel
CC -----
C   START OF NPB-----
9221 DUMM1=10239.05+15.95
9224 CALL KINNR(RM1,RM2,RM5,DUMM1,E,SQRT(UNIRND(Y)),VB,WCM,PCM,COSLP,E)
   W=E*UNIRND(Y)
C   PROTON ENERGY UNIFORMLY DISTRIBUTED BETWEEN 0 AND MAX VALUE
C   IF RESCATTERED NEUTRON ASSUME SAME SCATTERING ANGLE AS PROTON
   COSL=COSLP
   ELT=EEQUIV(W,X,C,COSLP,1)
C   APPROX PCT N+C=N+P+B FOR RESCATTERED NEUTRON
   IF (UNIRND(Y).LE.0.1) GO TO 9220
   W=E-W
C   GIVE NEUTRON ENERGY NOT GIVEN TO PROTON
   GOTO 1000
C   EEQUIV RETURNS LIGHT OUTPUT FOR PROTON OF ENERGY EN
C   (NO NEUTRON RELEASED)
9220 CONTINUE
C   END OF NPB-----

```

```

      GOTO 950
C      (N,2N) , START OF-----
C      TREAT N2N SAME AS NPB KINEMATICALLY EXCEPT FOR THRESHOLD
10222 CALL KINNR(RM1, RM2, 1882.8, RM6, E, SQRT(UNIRND(Y)), VB, WCM, PCM, COSL, E)
      CALL SCATTR(C, COSL, 6.2832*UNIRND(Y), C1S)
      DO 9223 I=1,3
9223 X1S(I)=X(I)
      W=E*UNIRND(Y) ! First neutron energy.
      E=E-W          ! Second neutron energy.
CC -----
      CALL SECNUT(X1S, C1S, E, .1, EL, NS1S)
CC -----
CC Following goto 1000 statement seems to be necessary -----
CC not to diminish the first neutron. 2024.08.29 Y.Satou
      goto 1000
CC -----
C      FOLLOW ONE NEUTRON WITH SECNUT AND THE OTHER STAYS IN FOLNUT
C      (N,2N) , END OF-----
950 W=0.
      COSL=1.
C INCREMENT THE ELEMENT MS=1 TO 6 OF THE LIGHT OUTPUT ARRAY ELT
C CORRESPONDING TO THE CHANNEL OF INTERACTION, AND ELT(7), THE TOTAL
C LIGHT OUTPUT
1000 EL(MS)=EL(MS)+ELT

```

References

- [1] [Demonstrational calculations with neut \(Y.Satou, Y.Makimura\).](#)