

第 1 章

はじめに

1.1 宇宙での元素合成

身の回りには多種多様な物質が存在しており、これらの物質は全て原子から構成されている。現在の地球には水素（原子番号 1）からウラン（原子番号 92）までの元素が天然に存在している。原子は更に小さい原子核と電子から構成されており、原子核は陽子と中性子で構成されることが知られている。原子核に含まれる陽子の数が元素の原子番号となる。現在までに天然と人工を合わせて 118 種類の元素が確認されている。しかし、原始の宇宙では物質は存在せず、エネルギーの塊であったと考えられている。宇宙が膨張し温度が下がるにしたがって、陽子と中性子が生成された。その後、原子核反応を起こすことで様々な原子核が合成された。宇宙の初期には、水素とヘリウムと僅かな軽元素しか合成されなかったと考えられている。これは、質量数 (A) が 5 と 8 の原子核に安定な原子核が存在しないことに由来する。初期の宇宙では陽子や中性子が融合して原子核が大きくなっていくが、 $A = 5$ と 8 の原子核が生成してもすぐに $A = 4$ 以下の軽い原子核に分裂してしまうのである。

宇宙に存在する元素のうち殆どが水素であるため、生まれたばかりの恒星は水素を主成分とする。重力により収縮し中心温度が 10^7 K を超えると、陽子（水素）同士が連鎖的に反応するようになる (pp チェイン)。pp チェインでは図 1.1 に示した 3 つの系列が重要とされる。どの系列も最終的に 4 つの陽子から 1 つの ^4He 原子核 (α 粒子) が生成される。pp チェインのように粒子（陽子や ^3He など）が順番に一つずつ原子核に吸収される反応では、 $A = 5, 8$ の壁を超えることはできない。この壁を超えるためには $A = 4$ 以下の原子核から $A = 9$ 以上の原子核が直接生成されなければならない。

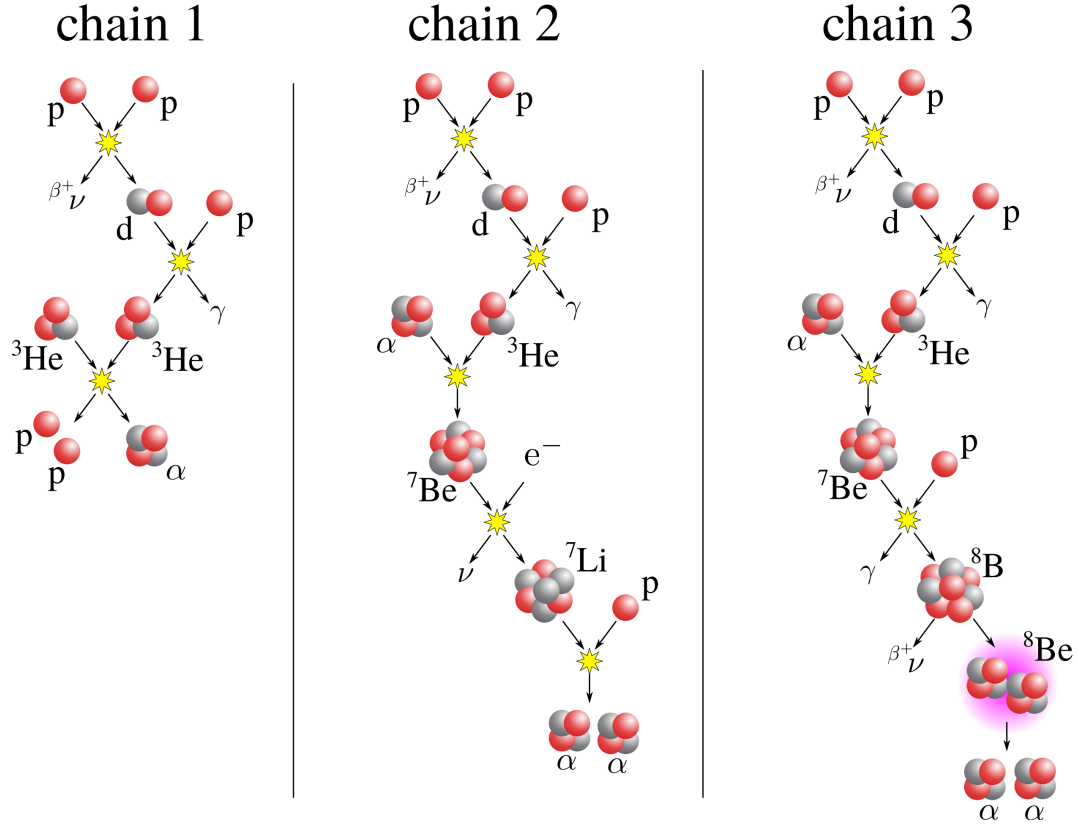


図 1.1: 代表的な pp チェイン. pp チェインでは 4 つの陽子から 1 つの α 粒子が生成される.

pp チェインにより α 粒子が十分に生成された恒星では水素よりも重い α 粒子がより恒星の中心に集まり He コアを生成する. He コアが重力により圧縮され温度が約 10^8 K に達するとヘリウム燃焼が始まる. He コアには十分な量の α 粒子が存在するため, 図 1.2 のように 2 つの α 粒子から 2α クラスター状態である ${}^8\text{Be}$ が合成され, さらに, ${}^8\text{Be}$ が崩壊するより早くもう 1 つの α 粒子が融合して ${}^{12}\text{C}$ の励起状態 (${}^{12}\text{C}^*$) が生成される反応が起こる. このときに作られる ${}^{12}\text{C}^*$ の多くは Fred Hoyle が予言した 3α 粒子の共鳴状態 (Hoyle 状態, $E_x = 7.65 \text{ MeV}$, 0_2^+) [?] となる. ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$ が γ 線を放出し脱励起することで安定な ${}^{12}\text{C}$ 原子核になる (図 1.2 左). この 3 つの α 粒子から ${}^{12}\text{C}$ が直接合成される反応はトリプルアルファ反応と呼ばれる. トリプルアルファ反応が恒星中で起こることで $A = 4$ から $A = 12$ へと直接移るため, $A = 5, 8$ の壁を乗り越えることができ, さらに重い O や Si などの合成へ進んでいく. そのため, トリプルアルファ反応は宇宙元素合成において重要な原子核反応の 1 つである.

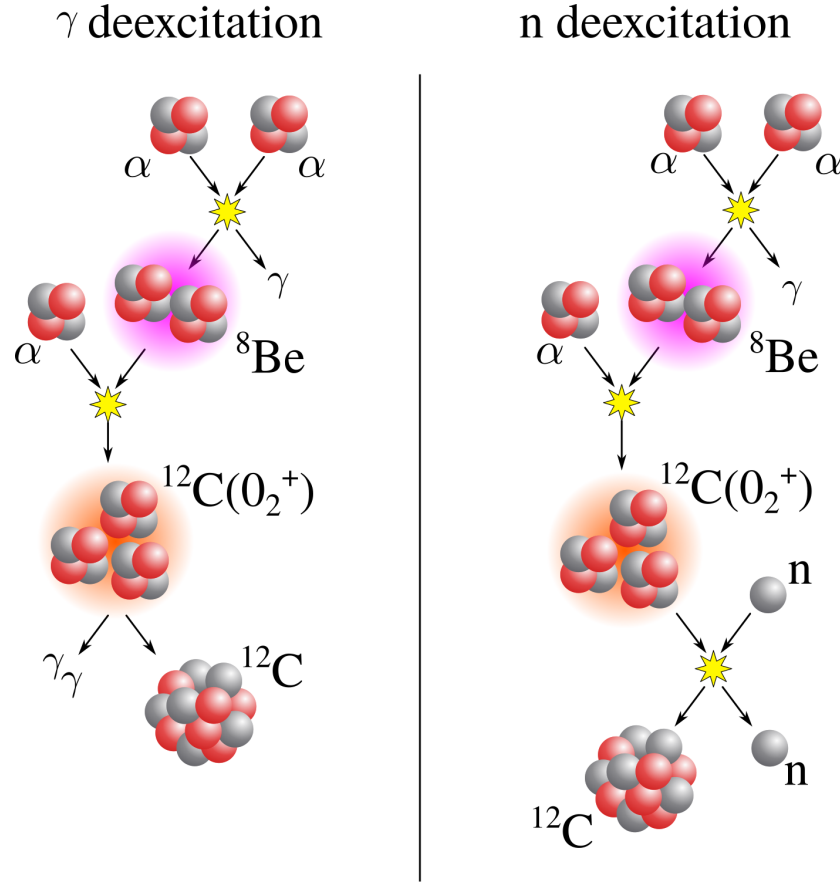


図 1.2: トリプルアルファ反応. 左は γ 線を放出して脱励起するルート, 右は中性子との非弾性散乱により脱励起するルートを表す.

1.2 高密度環境下でのトリプルアルファ反応

通常, トリプルアルファ反応で生成された 3α 共鳴状態は図 1.2 の左のように γ 線を放出することによって脱励起し, ^{12}C の基底状態 (g.s.) になる. 近年, 高密度環境下では γ 線による脱励起以外に, 図 1.2 (右) のように粒子 (陽子, 中性子, α 粒子など) との非弾性散乱による脱励起の反応率が増加することが指摘されている [?]. これにより 0_2^+ 状態から g.s. や 2_1^+ ($E_x = 4.44$ MeV) への脱励起が増加し, トリプルアルファ反応が劇的に促進されると考えられている. 粒子の中でも中性子は電荷を持っておらず, クーロン斥力を受けないで反応することができるため, 特にトリプルアルファ反応を促進する効果大きい.

$^{12}\text{C}(0_2^+)(n', n)^{12}\text{C}$ 反応の体積当たりの反応率は

$$r = N_n N_{^{12}\text{C}} \langle \sigma v \rangle \quad (1.1)$$

で与えられる．ここで、 N_n は中性子の個数密度、 $N_{^{12}\text{C}}$ は $^{12}\text{C}(0_2^+)$ の個数密度を表す． σ は中性子との散乱により始状態 (0_2^+) から g.s. または 2_1^+ 状態へ脱励起する全断面積であり、 v は中性子と ^{12}C の相対速度である．相対速度が Maxwell 分布に従うとすると、 $^{12}\text{C}(0_2^+)(n', n)^{12}\text{C}$ では、

$$\langle \sigma v \rangle_{n'n} = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{kT} \right)^{3/2} \int_0^\infty E' \sigma_{n'n}(E') \exp(-E'/kT) dE' \quad (1.2)$$

となる． T は温度、 μ は換算質量、 $\sigma_{n'n}$ は $^{12}\text{C}(0_2^+)$ の中性子非弾性散乱断面積である．ここで上記の逆過程である $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ を考えると、

$$\langle \sigma v \rangle_{nn'} = \left(\frac{2I' + 1}{2I + 1} \right) \exp(Q/kT) \langle \sigma v \rangle_{n'n} \quad (1.3)$$

という関係にある．ここで、 I および I' はそれぞれ始状態 (g.s. または 2_1^+) および終状態 (0_2^+ 状態) のスピンである． Q は -7.65 MeV (始状態が g.s. の場合) または -3.21 MeV (始状態が 2_1^+ の場合) となる． $^{12}\text{C}(0_2^+)$ の中性子非弾性散乱による脱励起の寿命は

$$\tau_{n'n} [^{12}\text{C}(0_2^+)] = (N_n \langle \sigma v \rangle_{n'n})^{-1} \quad (1.4)$$

となる．

中性子非弾性散乱による脱励起の寿命と γ 線による脱励起の寿命 ($\tau_\gamma = 1.710 \times 10^{-13}$ s) との比を R とすると、式 (1.2), (1.3), (1.4) から

$$R = 6.557 \times 10^{-6} \times \rho_n T_9^{-1.5} C_{\text{spin}} \int_0^\infty \sigma_{nn'}(E) (E - Q) \exp(-11.605E/T_9) dE \quad (1.5)$$

と表される． E は重心系 (c.m. 系) の閾値からのエネルギー ($E = E' + Q$)、 ρ_n は中性子の質量密度 (g/cm^3)、 $\sigma_{nn'}(E)$ は断面積 (mb)、 T_9 は温度 ($\times 10^9$ K) である． C_{spin} は反応が g.s. からの場合 1、 2_1^+ からの場合 5 となる．式 (1.5) において中性子の部分を陽子や α 粒子に置き換えることで、他の粒子による脱励起の寿命を求めることができる．式 (1.5) からわかるように、粒子との非弾性散乱によって脱励起する寿命は温度に大きく依存する．Beard らによる各粒子の密度が $10^6 \text{ g}/\text{cm}^3$ のときにおける R と温度の依存性の計算結果 [?] を図 1.3 に示す． $\rho = 10^6 \text{ g}/\text{cm}^3$ という高密度下では γ 線による脱励起に対して、粒子による脱励起の寄与が大きくなることが分かる．特に、中性子による寄与は γ 線による寄与の 40–100 倍ととても大きい．また、温度が低い領域でも大きいことが分かる．

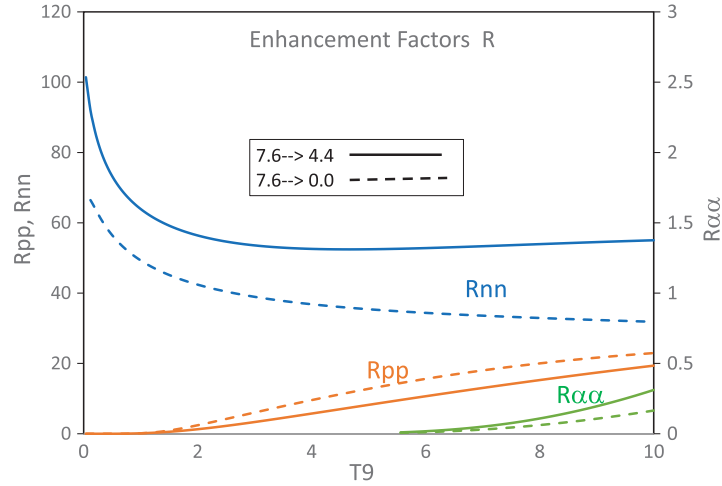


図 1.3: γ 線による脱励起の寿命と粒子散乱による脱励起の寿命の比 [?].
 R_{nn} , R_{pp} , $R_{\alpha\alpha}$ はそれぞれ中性子, 陽子, α 粒子と散乱した際の寿命の比を表す.

$\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$ のような高密度環境は宇宙の何処にあるだろうか. 一つの候補として超新星爆発が考えられる. $10\text{--}30 M_{\odot}$ 程度の大質量星は, 重力崩壊を起こして星の一生を終える. 重力崩壊の際に恒星の中心にある鉄コアの温度が急激に上昇する. 極めて高い温度では高エネルギーの光子によって鉄コアの原子核が陽子や中性子に分解される. また, 密度が非常に高いため式 (1.6) のように陽子が中性子へ変わる電子捕獲反応が起きる.



すると, 恒星の中心に原始中性子星が形成される. 重力によって中心に降ってくる物質は原始中性子星によって跳ね返され, 超新星爆発が起きる. 崩壊前の恒星が持っていた重力エネルギーが熱エネルギーに変換されるので, 原始中性子星の温度は 10^{10} K に達する. 跳ね返った物質が膨張することで温度が下がっていき, $7 \times 10^9 \text{ K}$ ほどになると 2 つの陽子と 2 つの中性子が融合し α 粒子が合成される. このとき, α 粒子と中性子が高密度かつ高温で存在する環境ができるのである.

1.3 測定を行うべき中性子のエネルギー

式 (1.5) から分かるように寿命の比 R を計算するためには, 中性子と ^{12}C の非弾性散乱断面積 $[\sigma_{nn'}(E)]$ のエネルギー分布が必要となる. 特に, 式 (1.5) から分かるように R が 0_2^+ 状態の励起エネルギーからのエネルギーに指数関数で依存しているので, 0_2^+ 状態へ励

起させることができる中性子エネルギーの閾値付近における断面積が重要となる．基底状態からの励起を考えると，重心系のエネルギーでは， $E = 7.65 \text{ MeV}$ ， ^{12}C の静止系における中性子のエネルギーでは $E_{\text{lab}} = 8.35 \text{ MeV}$ である．図 1.4 [?] は ^{12}C と中性子（上）または陽子（下）の各実験室系エネルギーにおける非弾性散乱断面積のエネルギー分布を示す．点で示される値は測定値，実線で示される値は TALYS による理論計算値を表す．図 1.4 (上) から分かるように， $E_{\text{lab}} = 8\text{--}17 \text{ MeV}$ の領域における g.s. \rightarrow Hoyle 状態の中性子の測定値がない．そのため，このエネルギー領域での $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ の断面積の測定が必要となる．

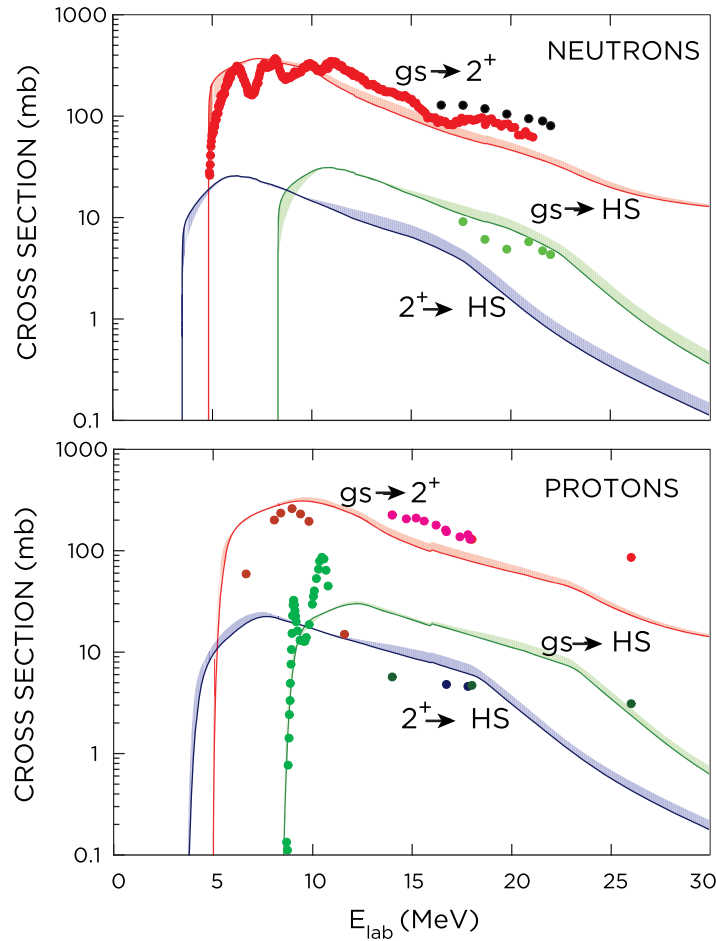


図 1.4: ^{12}C と中性子 (上段) および陽子 (下段) との非弾性散乱断面積 [?]. 実線は TALYS [?] を用いた理論計算，点は測定値を表す．

本研究ではその第一歩として $E_n = 14 \text{ MeV}$ の中性子を用いて断面積の測定を行い， $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積測定の実現可能性を確認する． 14 MeV は式 (1.7) に示す

デューテリウムとトリチウムの反応（DT 反応）を用いて生成可能なエネルギーである．この反応は 2 体反応であるため，放出角度により中性子のエネルギーが一意に決まる．

$$d + t \rightarrow \alpha (3.5 \text{ MeV}) + n (14 \text{ MeV}) \quad (1.7)$$

単色エネルギーの中性子を用いることで，中性子のエネルギー測定を行う必要が無くなる．ITER [?] などの核融合炉ではこの DT 反応を用いて質量エネルギーを取り出す．核融合炉の中で生成される 14 MeV の中性子は構造材の原子核と反応し損傷させるため，構造材の中に多く含まれる炭素との反応が詳しく調べられている [?, ?]. $^{12}\text{C}(n, n' + 3\alpha)$ 反応の全断面積は 209 mb，分岐比は表 1.1 の通りである．また，微分断面積の角度分布を図 1.5 に示す．これらの測定値と本研究での測定値を比較することによって測定方法の妥当性を確認することが可能となる．単色エネルギーの中性子を生成可能であること，他データと測定結果の比較が可能であることの 2 点より，測定方法の検証として 14 MeV の中性子ビームを用いて $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積の測定を行う．

表 1.1: $^{12}\text{C}(n, n' + 3\alpha)$ 反応のチャンネルとその分岐比 [?]. ^{12}C の励起状態から 3α に， ^9Be の励起状態から 2α に崩壊する．

Reaction channel	Branching ratio (%)
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(7.65 \text{ MeV})$	4
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(9.64 \text{ MeV})$	33
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(10.3 \text{ MeV})$	16
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(10.84 \text{ MeV})$	6
$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*(11.83 \text{ MeV})$	4
$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}^*(1.68\text{--}3.05 \text{ MeV})$	24
$^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}^*(4.7 \text{ MeV})$	13

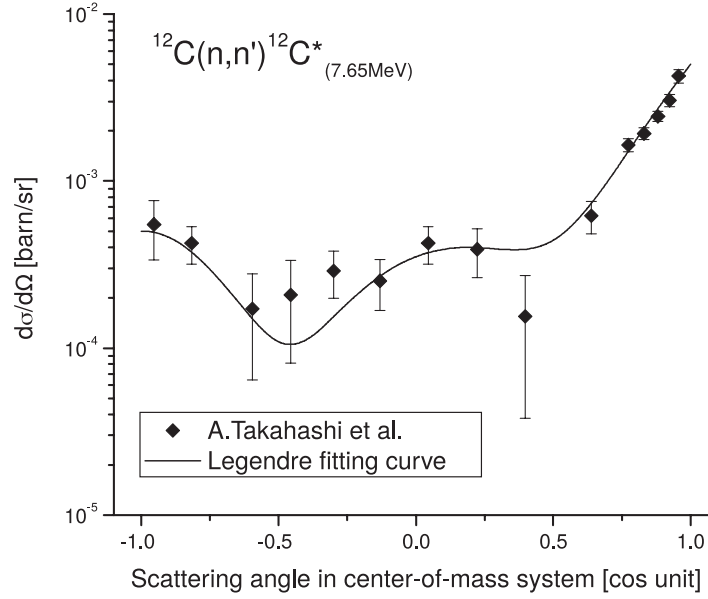


図 1.5: $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ の微分断面積の角度分布 [?].

1.4 測定に用いる実験装置

$^{12}\text{C}(0_2^+)$ から崩壊して生成した 3 つの α 粒子を測定することで、断面積を決定する。図 1.5 の微分断面積で散乱し、励起した $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から α 粒子が等方的に崩壊すると仮定すると、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子は図 1.6 に示すエネルギーの分布を持つ。ここでは、エネルギーによらずに同じ微分断面積を仮定した。横軸は入射中性子のエネルギー、縦軸は崩壊後の α 粒子のエネルギーである。図 1.6 から中性子のエネルギーに関わらず α 粒子のエネルギーは約 0.1 MeV が最頻値となっていることが分かる。1 MeV より大きい領域は重心運動と同じ方向に放出された α 粒子がブーストされエネルギーが大きくなったものと考えられる。一方、重心運動と異なる方向に放出された α 粒子は、あまりブーストされずに典型的には励起エネルギーと 3α 崩壊閾値の差分を 3 等分したエネルギー ($0.38 \text{ MeV} \div 3 \sim 0.1 \text{ MeV}$) を持つ。図 1.5 から分かるように $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応では前方散乱の断面積が大きく、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ が重心運動方向と異なる方向に散乱される確率が高い。そのため、 α 粒子はあまり重心運動によってブーストされる効果を受けずに、中性子のエネルギーに関わらず 0.1 MeV 付近で最大となる。図 1.7 は中性子のエネルギーが 14 MeV のときの分布である。図 1.7 の塗りつぶし部分は最大値を中心に全体の 8 割となる領域を示しており、0–0.6 MeV の範囲である。このような低エネルギーの α 粒子を効率よく検出するためには、標的中で α 粒子が停止しないようにしなければならない。例えば、

500 keV の α 粒子ではおよそ $350 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素箔標的で停止してしまう．更に低いエネルギーの α 粒子も検出しようとするすると，更に標的を薄くしなければならない．このような低エネルギー粒子の測定には，検出器そのものが標的となるアクティブ標的が有効である．

図 1.8 は α 粒子の実験室系での角度分布である．横軸は入射中性子のエネルギー，縦軸は α 粒子の入射中性子の運動方向に対する角度を表す． α 粒子のエネルギー分布と同様に入射中性子のエネルギーにあまり依存していない．図 1.9 は入射中性子が 14 MeV のときの角度分布である．図 1.9 の塗りつぶしは最大値を中心に全体の 8 割となる領域を示しており， $7.5\text{--}75.1^\circ$ である．このような広い角度に放出される 3 つの α 粒子すべてを効率的に検出するためには大立体角を覆う検出器が必要となる．

このような要求を満たす検出器として検出ガスを散乱標的として用いる time projection chamber (TPC) が有効である．TPC は荷電粒子のトラックを検出することができるガス検出器であり，ALICE 実験 [?] や LEPS2 [?] などで広く用いられている．アクティブ標的 TPC を用いることで，低エネルギー荷電粒子を大立体角で検出することが可能となる．近年，不安定核実験のために CAT [?] や AT-TPC [?] などアクティブ標的を用いた TPC が開発されている．その 1 つとして我々が開発した MAIKo (μ -PIC based active target for inverse kinematics) TPC [?, ?] がある．近年，RCNP で MAIKo TPC を用いて低エネルギー α 粒子を測定する実験 [?] が行われた．MAIKo TPC を用いることで低エネルギーの α 粒子を大立体角で検出することができる．本研究では MAIKo TPC を用いて $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応を測定することを目指す．

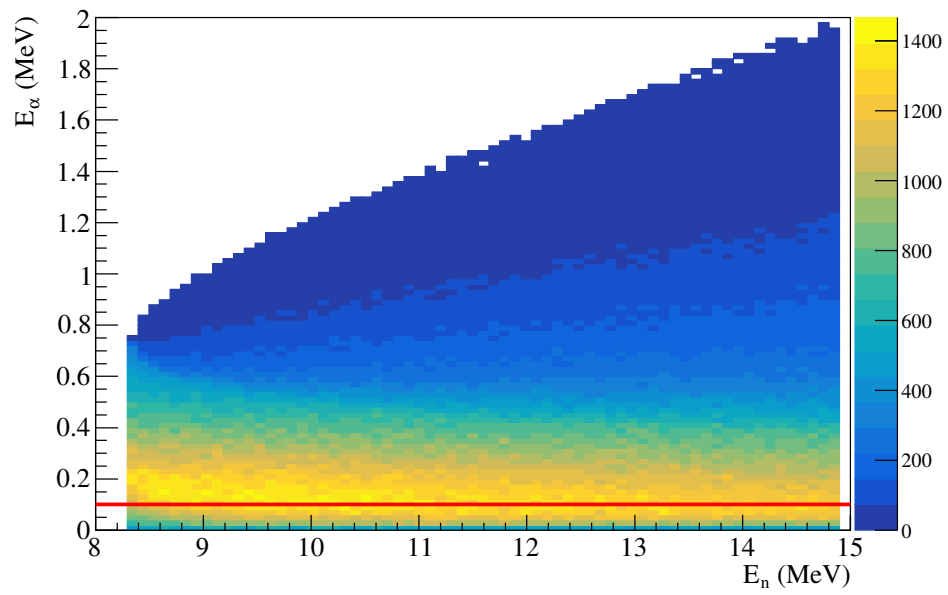


図 1.6: $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子のエネルギー分布. 横軸は入射中性子のエネルギー, 縦軸は崩壊後の α 粒子のエネルギーである. 赤い実線は $E_\alpha = 0.1$ MeV を表す.

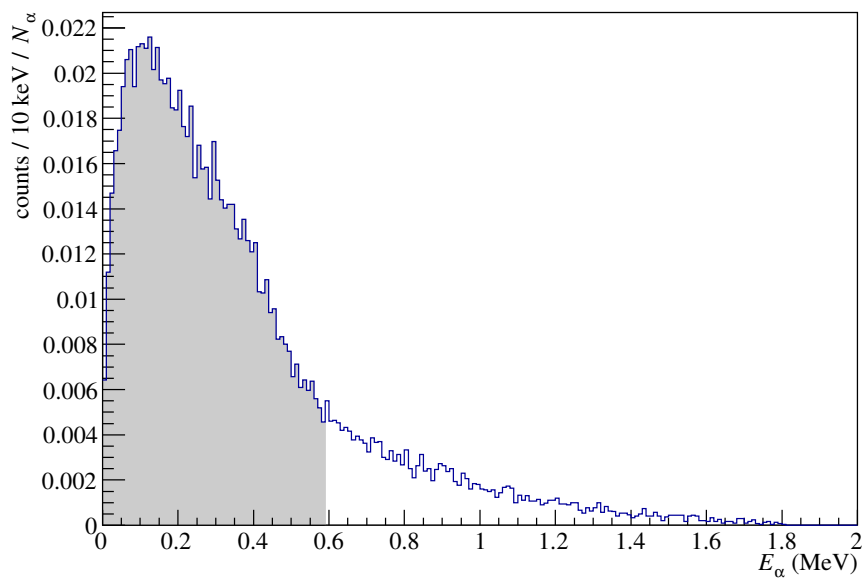


図 1.7: $E_n = 14 \text{ MeV}$ のときの, $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子のエネルギー分布. ^{12}C から放出される 3 つの α 粒子すべての分布を表している.

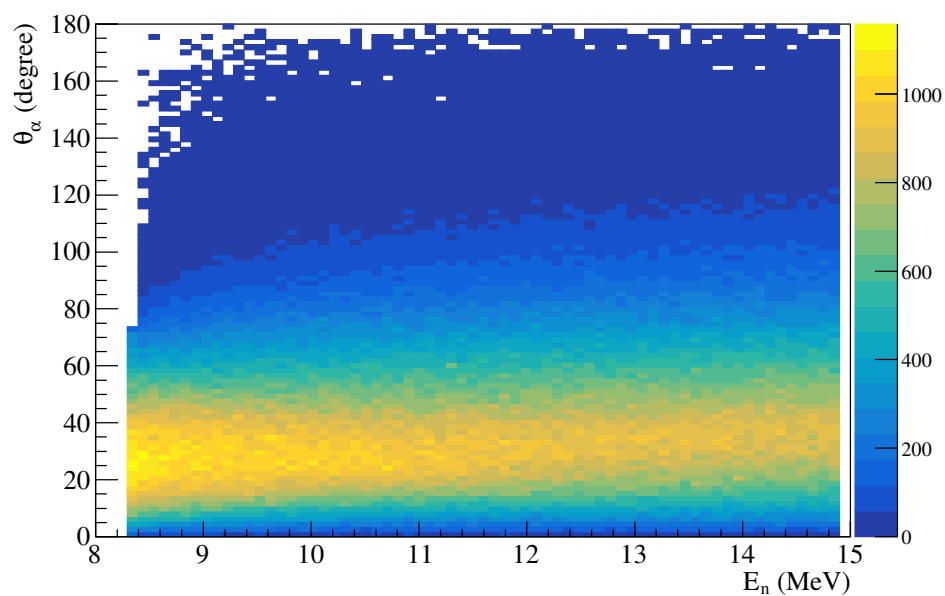


図 1.8: $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子の角度分布.

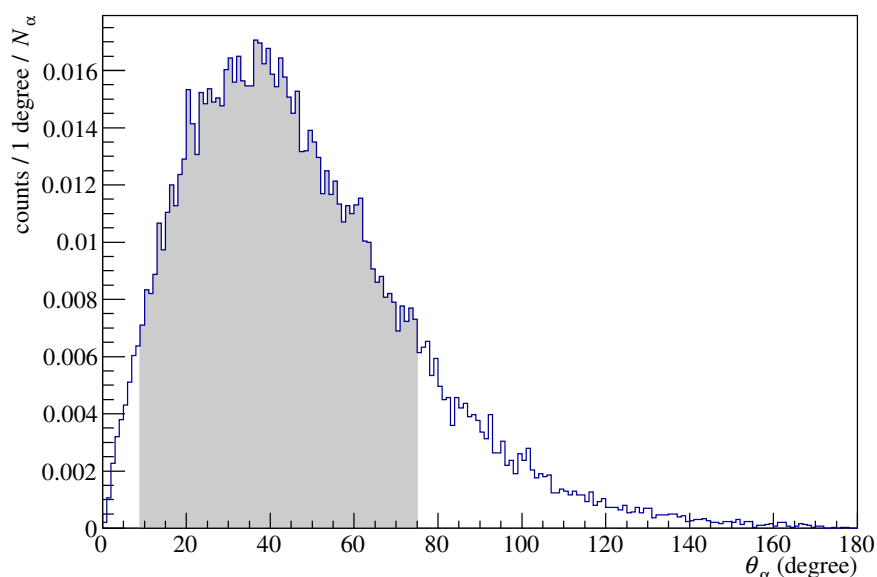


図 1.9: $E_n = 14 \text{ MeV}$ のときの, $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から放出された α 粒子の角度分布. ^{12}C から放出される 3 つの α 粒子すべての分布を表している.

1.5 本研究の目的

$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の断面積測定は, 低エネルギーの α 粒子を検出する必要がある. 1.4 節で述べたように, MAIKo TPC を用いれば効率的に 3 つの低エネルギー α 粒子を検出することが可能となる. しかし, 崩壊してできた α 粒子が持つ運動エネルギーは広がりを持ち, 数十倍違うこともある. そのため, より効率的に全ての粒子を測定するための条件を検討する必要がある. MAIKo TPC では使用する検出ガスの種類, 圧力, 電圧等の多くのパラメータを調整することができる. 本研究では効率的に α 粒子を検出することができる検出ガスの候補を複数選出し, α 線源を用いて性能試験を行う. それらのガスについて中性子との散乱で ^{12}C 原子核が 3 つの α 粒子に崩壊するイベントをシミュレートし, MAIKo TPC から得られるであろう画像を生成する. シミュレーションで生成した画像に対して解析を行い, 検出効率, エネルギー分解能, 角度分解能を評価する. 評価結果から実験で用いる検出ガスを決定する. また, 正しく解析を行える割合やこの測定方法で期待される収量の評価を行い, 実験の実現可能性を検討する.