

修士論文

京都大学大学院 理学研究科

物理学・宇宙物理学専攻

物理学第二教室 原子核・ハドロン物理学研究室

土井 隆暢



目次

第 1 章	Introduction	3
1.1	宇宙での元素合成過程	3
1.2	トリプルアルファ反応	3
1.3	$^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}^*$ の断面積	4
1.4	本研究の目的	4
第 2 章	Experimental setup	5
2.1	OKTAVIAN	5
2.2	MAIKo TPC	5
2.3	中性子カウンター (液体シンチレータ)	6
2.4	中性子カウンター (金属箔)	6
2.5	中性子ビーム	6
第 3 章	Analysis	7
3.1	液体シンチレータの解析	7
3.2	MAIKo の解析	7
第 4 章	Conclusion and discussion	9
第 5 章	Acknowledge	11
参考文献		13

図目次

第 1 章

Introduction

1.1 宇宙での元素合成過程

宇宙での元素合成過程において、 ^{12}C は重要な役割を持っている。 ^4He までの原子核は水素の燃焼過程により合成される。しかし、質量数が 5 と 8 の安定な原子核が存在しないため、それらが合成されても直ちにより軽い核へ崩壊してします。そのため、質量数が 8 よりも思い原子核を合成することが出来ない。この問題は Fred Hoyle が予言した 3α の共鳴状態 (Hoyle 状態) によって解決された。 ^{12}C 原子核は 3 つの α の共鳴状態として、トリプル α 反応によって生成される。生成された $^{12}\text{C}^*$ のほとんどは再び 3α へと崩壊するが、一部は ^{12}C の基底状態へ γ 崩壊する。 ^{12}C 原子核はこのように生成され、さらに重い原子核が生成されていく。

1.2 トリプルアルファ反応

近年、高温高密度領域では陽子や中性子との散乱による脱励起で崩壊幅が増加することが示唆されている。
[1] これにより 2_2^+ や 0_1^+ への脱励起が増加し、トリプルアルファ反応が加速される。

^{12}C と中性子の反応レートは

$$r = N_n N_{^{12}\text{C}} \langle \sigma v \rangle \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1} \quad (1.1)$$

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}C の個数密度を表す。 σ は始状態 (g.s. または $Ex = 4.44\text{MeV}$) から Hoyle 状態 ($Ex = 7.65\text{MeV}$) へ励起する全断面積であり、 v は 2 粒子の相対速度である。相対速度が Maxwell 分布に従うとすると、 ^{12}C の中性子非弾性散乱では

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

となる。我々が考える反応は上記の逆過程なので、

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

となる。ここで、 I および I' は始状態 (g.s. または $Ex = 4.44\text{MeV}$) および終状態 (Hoyle 状態) のスピンである。 Q は -7.654MeV (g.s. からの場合) または -3.215MeV ($Ex = 4.44\text{MeV}$ からの場合) となる。 ^{12}C の中性子非弾性散乱による脱励起の寿命は

$$\tau_{n'n}(^{12}\text{C}^{\text{Hoyle}}) = (N_n \langle \sigma v \rangle_{n'n})^{-1} \text{ sec} \quad (1.4)$$

となる。

γ 崩壊の寿命 ($\tau_\gamma = 1.710 \times 10^{-13}$) との比を R とすると、

$$R = 6.557 \times 10^{-6} \times \rho_n T_9^{-1.5} C_{\text{spin}} \int \inf_0 \sigma_{nn'}(E)(E - Q) \exp(-11.605E/T_9) dE \quad (1.5)$$

と表される。 E は c.m. 系のエネルギー、 ρ_n は中性子の密度 (g/cm³)、 $\sigma_{nn'}(E')$ は断面積 (mb) である。 C_{spin} は g.s. からの場合 1、 $Ex = 4.44\text{MeV}$ からの場合 5 となる。式 (1.5) からわかるように、中性子によって脱励起する過程は特に温度に大きく依存する。 R と温度の依存性を図??に示す。

ただし、この計算に必要な中性子と ^{12}C との断面積のデータは図??にあるように、Hoyle 状態へのものが不足している。

1.3 $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*$ の断面積

1.4 本研究の目的

高温高密度環境では粒子と散乱することによって脱励起する過程の寄与が大きくなる。しかし、中性子との散乱断面積のデータは不足している。そこで、 $^{12}\text{C}^*$ から崩壊する低エネルギーの 3α を直接測定することで、 $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}^*$ の断面積を決定する。最終的には幅広い中性子の入射エネルギーでの測定が必要となるが、まずは 14MeV の中性子での測定を行う。

本論文では低エネルギー α 粒子の測定方法や得られたデータの形跡手法、断面積の決定方法について述べる。

第 2 章

Experimental setup

本実験では中性子ビームを ^{12}C 標的に入射し、崩壊した 3α を測定する。大阪大学強力 14MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN) を用いて中性子ビームを生成し、 μ -PIC based Active target for Inverse Kinematics (MAIKo) TPC を用いて荷電粒子を測定する。

2.1 OKTAVIAN

OKTAVIAN は大阪大学大学院工学研究科にある中性子発生装置である。中性子の発生には

$$t(d, {}^4\text{He})n \quad (2.1)$$

反応を用いる。この反応を用いることにより、およそ 14MeV の単色中性子を発生させることが可能となる。

コッククロフト・ワルトン型加速装置を用いることで、デューテリウムを加速しトリチウム標的に照射する。OKTAVIAN には連続照射ラインとパルスラインの 2 つのビームラインがある。パルスラインでは 1kHz–2MHz のパルス状のビームを照射することができる。ビーム電流は時間平均で 6.67pμA である。連続照射ラインでは連続的にビームを小差 h することができ、ビーム電流は 6.67pμA である。ビームの時間情報を用いて解析を行うことが可能となるが、パルスビームラインのトリチウム標的は実験室内にあり、コリメートされていない中性子を用いることになる。この場合、実験室の壁などに反跳した中性子がバックグラウンドになるため、本実験には適していない。そのため、この実験では連続照射ラインを使用する。連続照射ラインを用いる場合、重照射室においてデューテリウムビームをトリチウム標的に照射し、大実験室との間にある穴から中性子ビームの取り出しを行う。

2.2 MAIKo TPC

2.2.1 MAIKo TPC とは

TPC では荷電粒子の飛跡を 3 次元的に検出することが可能である。

こちら辺は omeg の proceedings に書いた文章をマネする。

^{12}C が崩壊して生成される α 粒子は主に数百 keV のエネルギーを持って放出される。そのため、このような低エネルギー粒子を検出することができるセットアップが必要となる。

2.2.2 検出ガスの決定

標的には炭素の含まれる炭化水素を用いる。この実験では低エネルギーの荷電粒子の飛跡を検出するため、飛跡が比較的長くなるエネルギーロスが小さいガスが適する。そこで、質量数が最も小さいメタン (CH_4) を用いた。また、ガスの圧力によって飛跡の長さが変化する。そこで、 α 粒子の検出効率がよくなるガス圧を求めた。

ガス圧はシミュレーションによって決定した。 ^{12}C と中性子との散乱を Kondo らの実験で求められた微分断面積の角度分布を用いて再現し、散乱後に ^{12}C が $Ex = 7.65\text{MeV}$ に励起し、 $^{12}C \rightarrow ^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^4\text{He} \times 3$ と崩壊する過程を考えた。この時、 α 粒子が持つエネルギーの分布は図??のようになる。このような粒子に対して

1. MAIKo の有感領域内 ($102.4\text{mm} \times 102.4\text{mm} \times 140\text{mm}$) で停止する
2. 飛跡の長さが 20mm 以上である

という条件の時に検出可能とすると、検出効率の圧力依存は図??のようになる。図??より、 75hPa 付近が最も検出効率が高いことが分かる。そこで、 50hPa 、 75hPa 、 100hPa の 3 通りでのオペレートを決めた。

2.2.3 ドリフトスピード

TPC の特性上、ドリフト電場方向のアクセプタンスは電子のドリフト speed に依存する。ドリフトケージの大きさ (140mm) を可能な限り使用するためには、MAIKo TPC の時間アクセプタンス ($10.24\mu\text{s}$) で 140mm となるようなドリフトスピード ($140\text{mm}/10.24\mu\text{s} \sim 0.0135\text{mm/ns}$) に調整する必要がある。

2.2.4 MAIKo 架台

中性子のバックグラウンドを低減させるため、実験装置は可能な限り取り出し穴に近づける必要がある。しかし、取り出し穴のあるは階段上にあるため、階段の上に実験装置を設置することとなる。

2.3 中性子カウンター (液体シンチレータ)

2.3.1 キャリブレーション

2.3.2 波形弁別

2.3.3 検出効率

2.4 中性子カウンター (金属箔)

2.5 中性子ビーム

2.5.1 コリメータ

2.5.2 ビーム量およびエネルギー

第 3 章

Analysis

3.1 液体シンチレータの解析

3.1.1 FADC の生データ

光電子増倍管から取得した波形データの一例を示す。

3.1.2 波形弁別 (n - γ discrimination)

液体シンチレータのデータの中には中性子による信号とガンマ線による信号とが含まれている。この 2 つの波形には違いがあるので、その波形の違いから識別することができる。

3.1.3 中性子のレート

中性子線源から放出される中性子の量は時間とともに変化する。

3.2 MAIKo の解析

3.2.1 機械学習

これまでは Hough 変換を使って解析を行ってきたが、高速に処理をするためにニューラルネットワークを用いた解析方法を開発した。

3.2.2 解析

第 4 章

Conclusion and discussion

第 5 章

Acknowledge

参考文献

- [1] Mary Beard, Sam M. Austin, and Richard Cyburt. Enhancement of the triple alpha rate in a hot dense medium. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 119, No. 112701, p. 5, 2017.