



${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha){}^8\text{Be}^*(p){}^7\text{Li}$ 反応を用いた
ビッグバン元素合成における
 ${}^7\text{Be}$ 分解反応 ${}^7\text{Be}(n, p_1){}^7\text{Li}^*$ の研究

岩佐 直仁

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

石川竣喜, 榊原昂浩, 小湊和也, Deepika Guru, 朝田晃世(東北大学),
久保野茂、西村俊二(理研), 西尾勝久, 牧井宏之, R.Orlandi,
廣瀬健太郎(原子力機構), 川端貴裕(大阪大学),
早川勢也(東京大学CNS),

Motivation

◇ Big Bang 模型: 宇宙の膨張, 背景輻射, Big Bang元素合成 (BBN)

始原的 ^2H , ^3He , ^4He はBBN模型の予想値と一致

^7Li は予想値の1/4~1/3倍しかない(宇宙リチウム問題)

^7Li 生成過程

(1) $t(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$, $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$ ほとんどは $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$ で分解

(2) $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be} \xrightarrow{\text{EC}} ^7\text{Li}$ ビックバン後の ^7Be 電子捕獲で生成(主な過程)

もし、BBN模型で ^7Be 分解反応を過少評価→BBN直後の ^7Be の予想値が減少

→ ^7Li 問題が解決する方向に進む

	BBN predictions	observations
$^2\text{H}/^1\text{H}$	$(2.45 \pm 0.05) \times 10^{-5}$	$(2.53 \pm 0.04) \times 10^{-5}$
$^3\text{He}/^1\text{H}$	$(1.07 \pm 0.03) \times 10^{-5}$	$(0.9 \sim 1.3) \times 10^{-5}$
$^4\text{He}/^1\text{H}$	0.2484 ± 0.0002	0.2449 ± 0.0040
$^7\text{Li}/^1\text{H}$	$(5.61 \pm 0.26) \times 10^{-10}$	$(1.58 \pm 0.31) \times 10^{-10}$

M, Pospelov, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci 60, 539 (2010)
Figure 1

${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ 反応

◇ ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$:最も重要な ${}^7\text{Be}$ 分解反応の1つ

BBN模型で使用している反応率 (Descouvemont 2004)

Koehler等の反応断面積の直接測定 <13.5keV

逆反応 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ からの推測値 (~2MeV)

⇒ ${}^7\text{Be}(n,p_1){}^7\text{Li}^*$ は2を除いて無視

(測定値は $E_n \leq 60\text{eV}$ のみ, $E_n(2^-)=13\text{keV}$)

n_TOFグループの直接測定 <325keV (2018)

十分な統計精度での測定結果 <33keV

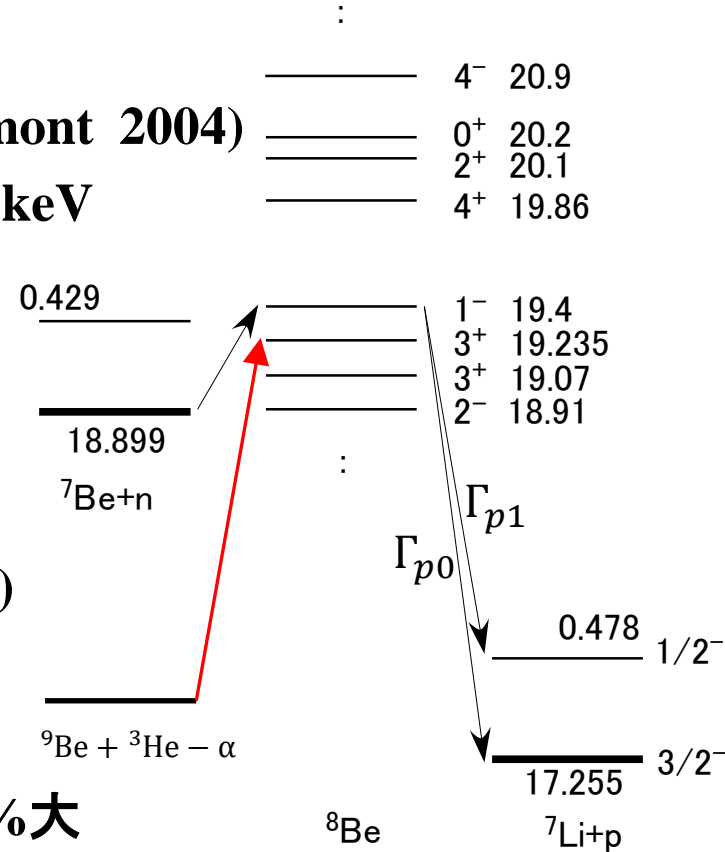
逆反応からの推測値 (~2MeV)が必要

低エネルギーでKoehler等の結果より35-40%大

厚い標的: ${}^7\text{Be}(n,p_1){}^7\text{Li}^*$ 反応は分離して測定できなかった。

逆反応から ${}^7\text{Be}(n,p_1){}^7\text{Li}^*$ 反応率を導出するためには、 Γ_{p1}/Γ_{p0} が必要

${}^9\text{Be}({}^3\text{He},\alpha)$ 反応で ${}^8\text{Be}$ の励起状態を作り、 ${}^7\text{Li}$ の基底状態と励起状態に崩壊する事象を測定する実験を行った。





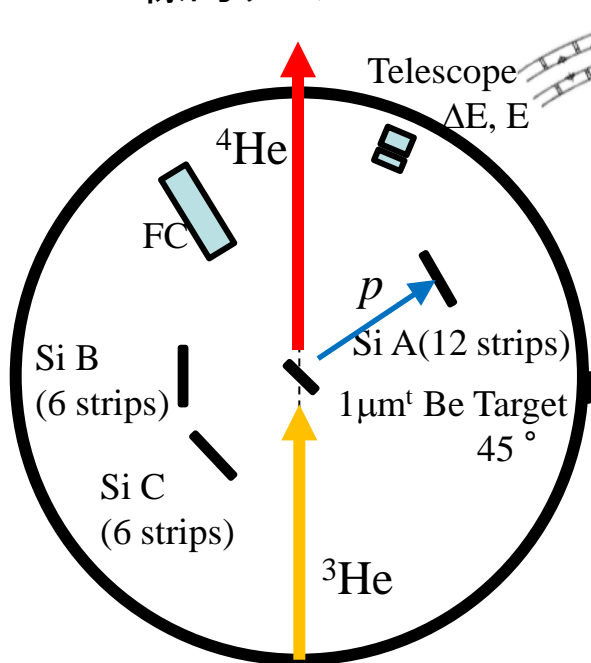
TOHOKU
UNIVERSITY

実験

日本原子力研究開発機構タンデム加速器施設

高分解能磁気分析装置 ENMA

標的チェンバー

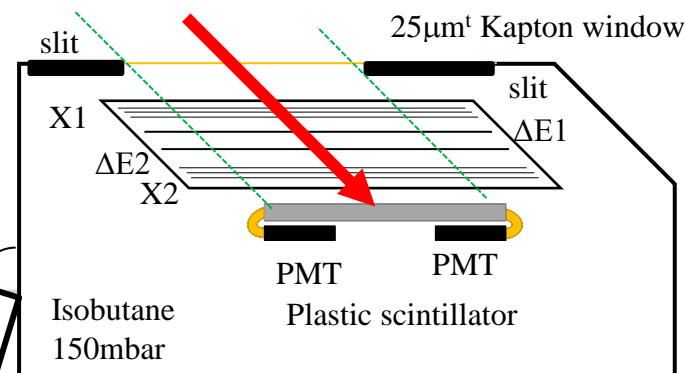


Si : $60 \times 60 \times 0.3 \text{ mm}^3$
 Si-A: 120mm $45-73^\circ$
 Si-B: 120mm $76-104^\circ$
 Si-C: 120mm $121-149^\circ$

^3He @ 30MeV

テレスコープ 22.5°
 $8\text{mm}\phi$ 250mm
 $\Delta E: 0.15\text{mm}$,
 $E: 3\text{mm}$

焦点面チェンバー



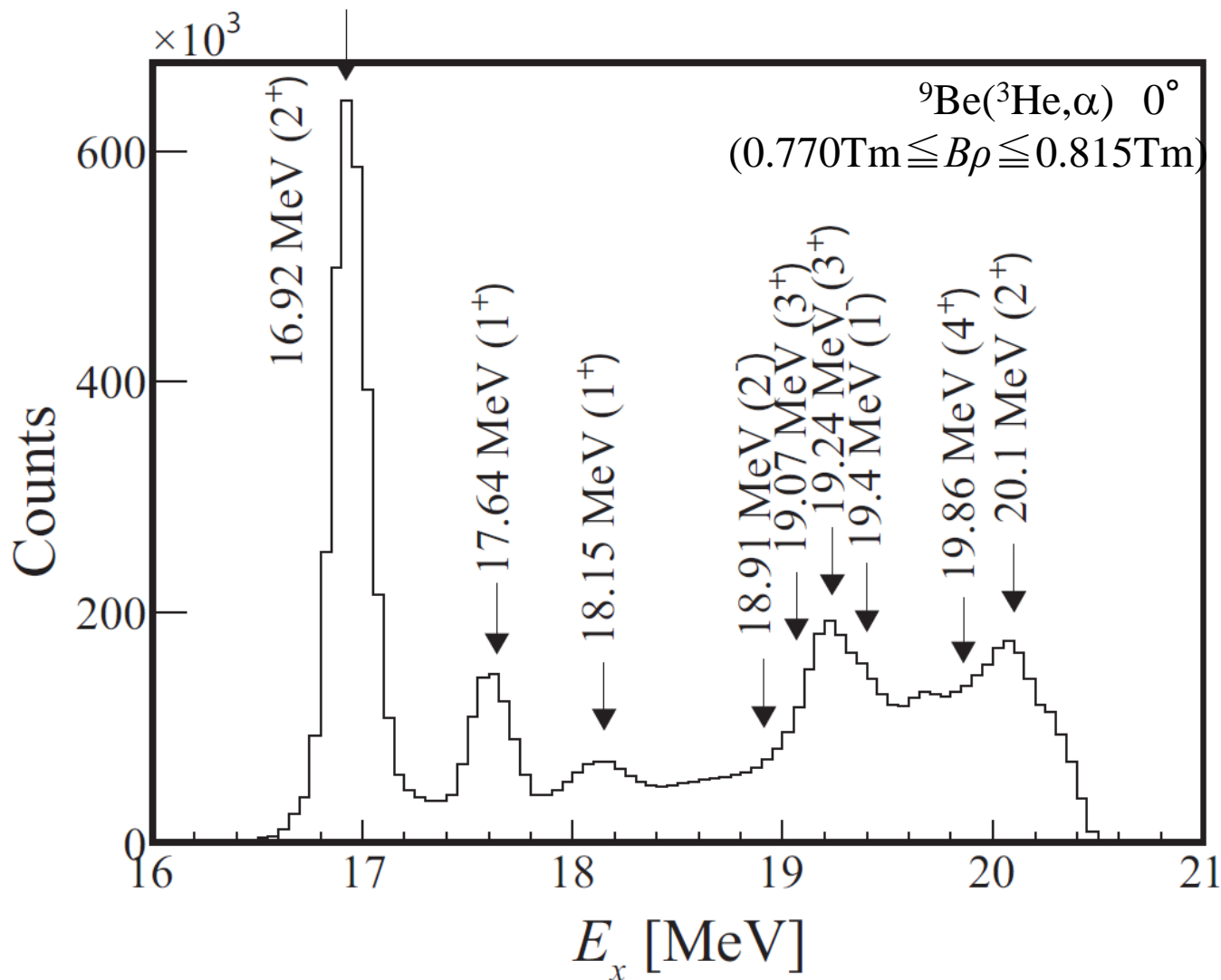
X1: $3 \times \text{NiCr wire } (15\mu\text{m } \phi)$
 X2: $3 \times \text{NiCr wire } (15\mu\text{m } \phi)$
 $\Delta E1, \Delta E2$: Au-W wire ($25\mu\text{m } \phi$)
 Plastic Scintillator + $2 \times \text{PMT}$
 HV: cathode: -800V, X1: 950V,
 X2: 950V, $\Delta E1: 750\text{V}$, $\Delta E2: 750\text{V}$



TOHOKU
UNIVERSITY

^8Be 励起エネルギースペクトル

◇ $^9\text{Be}(^3\text{He},\alpha)$ 反応で放出された α の $B\rho \rightarrow ^8\text{Be}$ の励起エネルギー



16.92MeV(2^+)

$\Gamma=74.0\text{keV}$

17.64MeV(1^+)

$\Gamma=10.7\text{keV}$

エネルギー

分解能

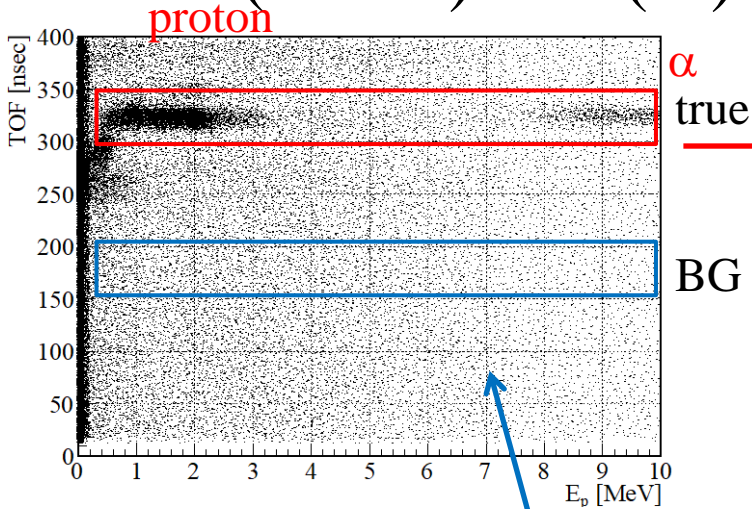
80keV(σ)



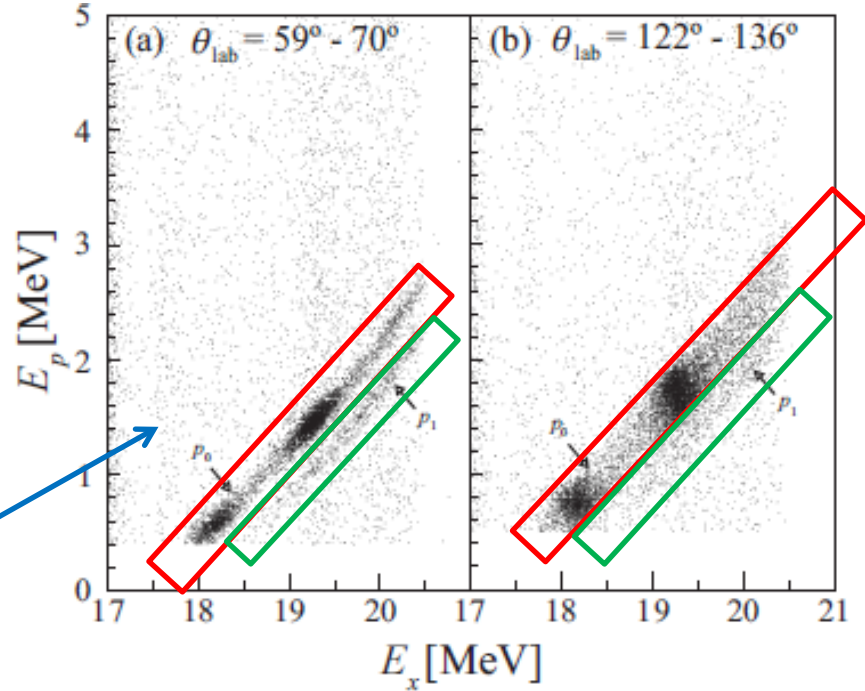
TOHOKU
UNIVERSITY

^8Be 励起エネルギー vs 崩壊陽子のエネルギー

◇ TOF(Si-Pla) vs E(Si)



Accidental coincidence



Accidental-coincidence-event
subtraction: true-BG

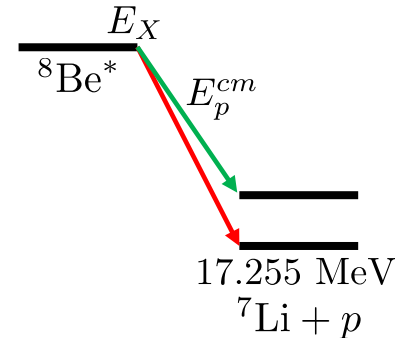
E_x : 100keV bin

$30\text{MeV } ^4\text{He} \rightleftharpoons ^4\text{He } \sim 30\text{MeV}$

$^8\text{Be}^* \sim 0.2\text{MeV}$

$180 \pm 20^\circ$

$$E_p^{lab}, \theta_p^{lab}, \frac{d^3\sigma^{lab}}{d\Omega^2 dE_x} \rightarrow E_p^{cm}, \theta_p^{cm}, \frac{d^3\sigma^{cm}}{d\Omega^2 dE_x}$$



g.s.

陽子の角度分布

- $\theta_1 = 59 - 70^\circ$ (SiA 1-6)
- $\theta_2 = 48 - 59^\circ$ (SiA 7-12)
- $\theta_3 = 90 - 104^\circ$ (SiB 4-6)
- $\theta_4 = 122 - 136^\circ$ (SiC 1-3)
- $\theta_5 = 136 - 150^\circ$ (SiC 4-6)

Legendreの多項式

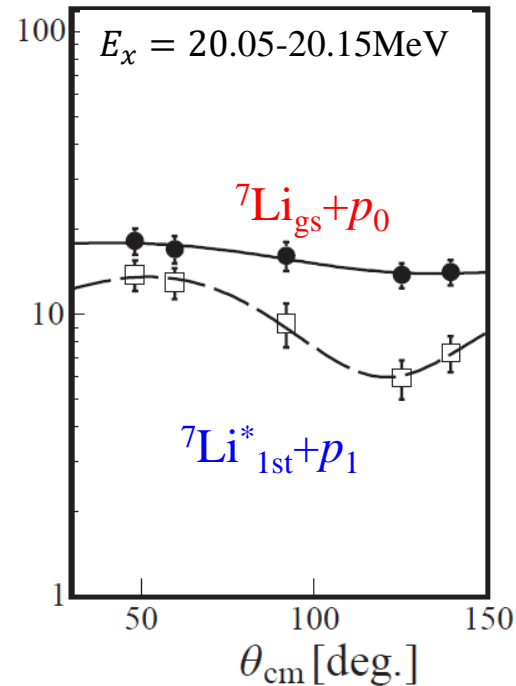
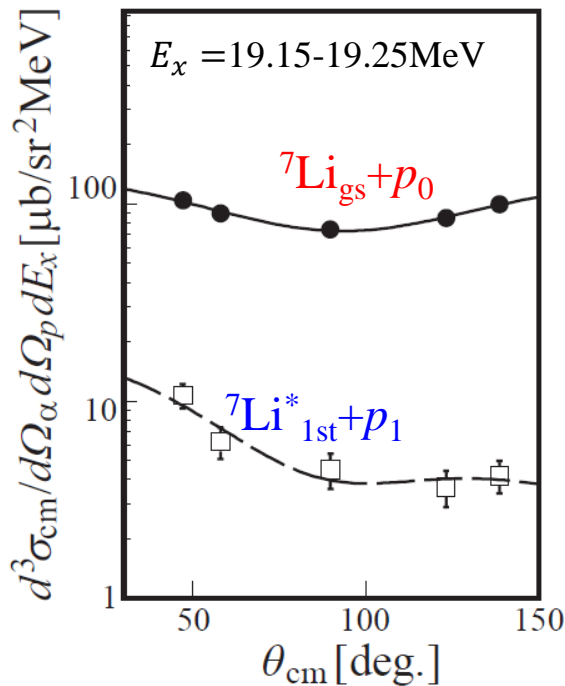
$$\frac{d^3\sigma^{cm}}{d\Omega_\alpha d\Omega_p dE_x} = \sum_{L=0}^{l_{max}=3} A_L P_L(\cos\theta_p^{cm})$$

$l_{max}=3$ を採用

崩壊陽子の全立体核で積分

$$\frac{d^2\sigma^{cm}}{d\Omega_\alpha dE_x} = \int \sum_{L=0}^3 A_L P_L(\cos\theta_p^{cm}) d\Omega_p$$

l_{max} を変更してフィットした結果、 $l_{max} = 3$ にしたことによる誤差は<10%.



Conclusion

- ◇ ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha){}^8\text{Be}^*(p){}^7\text{Li}$ 反応を測定し、BBNでの ${}^7\text{Be}$ 分解反応 ${}^7\text{Be}(n, p){}^7\text{Li}$ で重要な ${}^8\text{Be}$ の18.91~20.1MeV共鳴状態の Γ_{p1}/Γ_{p0} を調べた。
- ◇ 18.91MeV状態は過去の実験結果より大きな $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p0}=64 \pm 44\%$ が得られた。
- ◇ 19.24MeV: $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p0}=3.4 \pm 1.9\%$, 20.1MeV: $\Gamma_{p1}/\Gamma_{p0}=0 \pm 22\%$
BBNのエネルギー領域で反応率を0.1-0.5%大きくする。
 ${}^7\text{Li}$ 問題を解決するには不十分
- ◇ 19.4MeV状態は大きな影響を与えるので、 Γ_{p1}/Γ_{p0} を求める実験を計画している。