

RCNP研究会「宇宙核物理実験の現状と将来」
大阪大学核物理研究センター 2014年8月8日



r過程核の (n, γ) 直接捕獲反応率の 測定計画

岩佐 直仁
東北大理

共同研究者: 久保野茂、西村俊二 (理研)、山口英斉、道正新一郎
(CNS)、橋本尚志 (IBS 韓国)、W. Liu, Z. Li (CIAE 中国)、
J. J. He (IMS 中国)



目的

鉄のピークより重い元素の約半分:r過程
r過程の経路、生成される元素量
半減期、反応率

(n,γ) 反応率測定

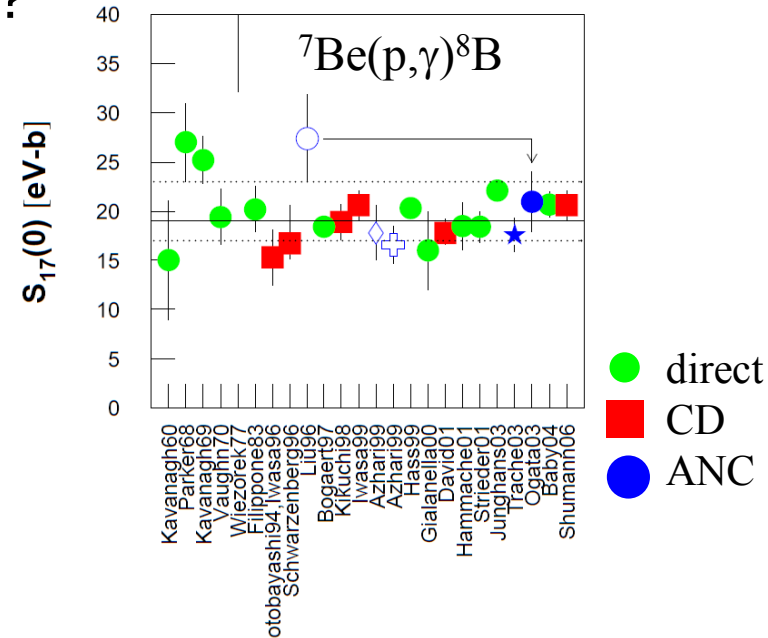
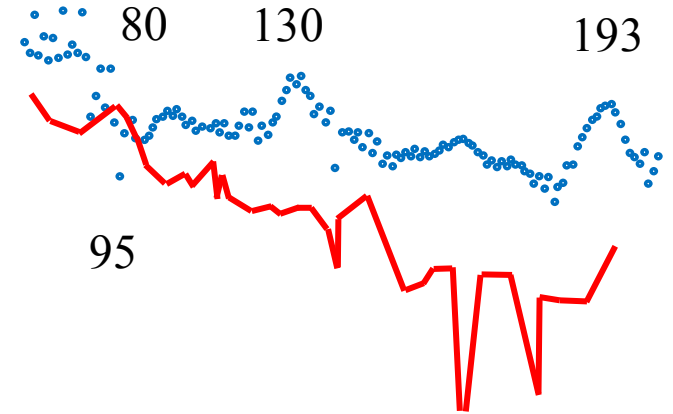
1. 直接測定 ← RIや中性子標的?
2. Coulomb分解(CD)法
3. 漸近的正規化係数(ANC)法
4. トロイの木馬(TJ)法 ← QF条件を満たす反応?

CD法:(p,γ),(n,γ)反応率は導出可能
 (n,2γ),(n,3γ)... 反応率は導出不能
 M2,E3/M4,E5/M5... 仮想光子数:少
 $\Gamma_{p(n)} \ll \Gamma_{\gamma}$ 導出可能。断面積:小

.....

ANC法で (n,γ) 反応率を導出

Arnould *et al.*, Phys. Rep.384,1 (2003)



ANC法による(n,γ)反応率の測定

◇ (d,p)反応による(n,γ) 反応率の導出

– 直接捕獲反応: ANC法

(n,γ) 反応

$$\sigma \propto C^2 |\langle W(r) | \hat{O}(r) | \psi(r) \rangle|^2 \quad C: \text{ANC}$$

(d,p) 反応

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto C^2 |\langle x_j(r) W(r) | V_{pn} | x_i(r) \rangle|^2$$

– 共鳴捕獲反応: ANC法? 検証はされていない。Spectroscopic factor $\rightarrow \Gamma_p$

(γ線測定 $\rightarrow \Gamma_\gamma$)

◇ Goriely等: r過程では直接捕獲反応が重要。
共鳴捕獲の寄与は中性子過剰領域で減少。

◇ これまでの実験的研究: 重い核を調べるには
統計が不十分。共鳴状態の分離には分解能
が十分でない。



TOHOKU
UNIVERSITY

${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn},\text{p}){}^{133}\text{Sn}$ for ${}^{132}\text{Sn}(\text{n},\gamma){}^{133}\text{Sn}$

K. L. Jones et al., Nature 465, 454-457 (2010).

Oak Ridge ${}^{132}\text{Sn}@640\text{MeV}+\text{CD}_2(0.16\text{mg}/\text{cm}^2)\rightarrow\text{p}(69-107^\circ \text{ lab.})$



Q 分解能 $\sim 0.4\text{MeV}$ (FWHM)

第2,4状態のスピパラリティの決定、ANCの導出

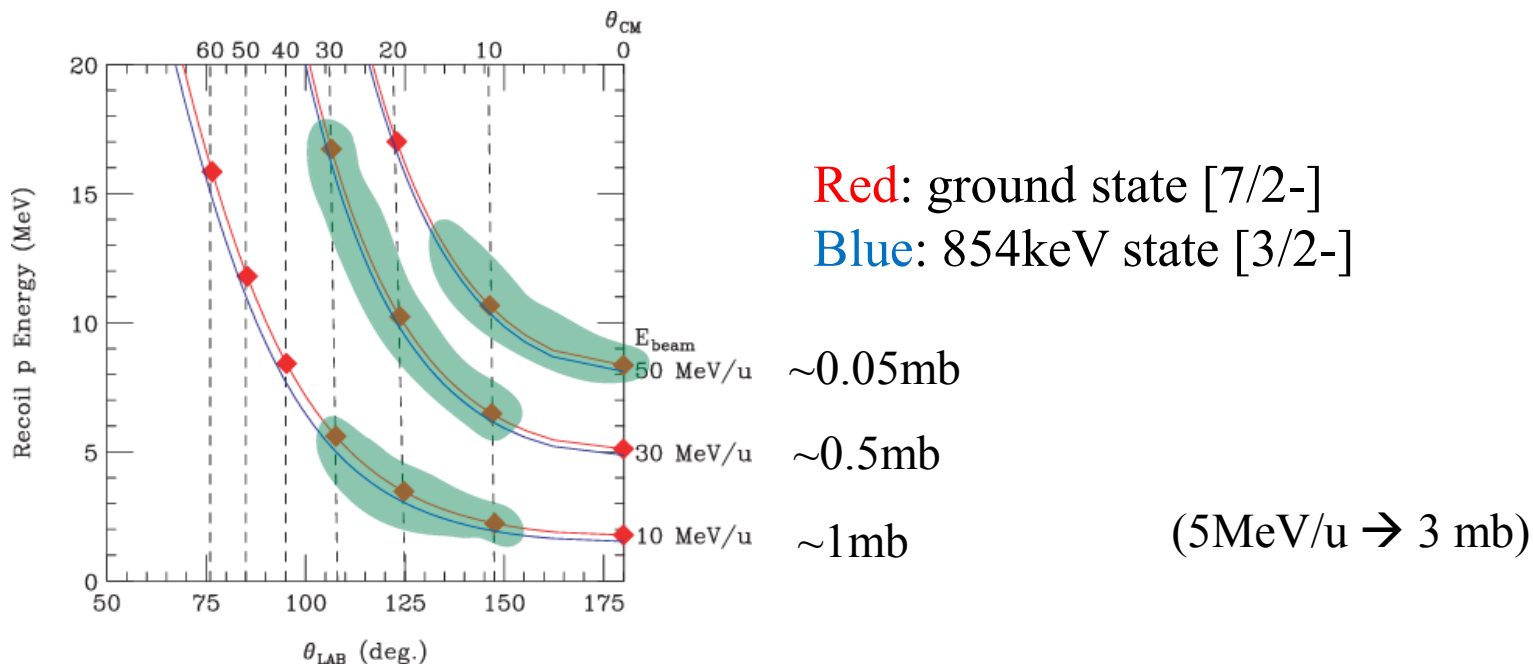
→ より良い実験装置での測定が必要

${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn}, p){}^{133}\text{Sn}$

- ◇ より高いエネルギーのビーム、厚い標的、良い分解能
- ◇ モンテカルロ計算: relativistic kinematic codeでevent生成
断面積の大きな領域($100\text{-}150^\circ$): 重心系で等方的に事象を発生。

入射ビームのエネルギー (T_b)

散乱陽子のエネルギー (T_p)、散乱角(θ_p)



${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn}, p){}^{133}\text{Sn}$

- ◇ ${}^{132}\text{Sn}(d, p){}^{133}\text{Sn}$: ${}^{133}\text{Sn}$ の 0, 0.854, 1.36, 1.56, 2.00MeV状態
- ◇ ${}^{133}\text{Sn}$ の運動エネルギー(T_{recoil}) は、 T_b, T_p, θ_p から計算。

$$Q = T_p + T_{\text{recoil}} - T_b$$

$$= T_p + \sqrt{P_b^2 - 2P_b P_p \cos \theta_p + P_p^2 + M_{\text{recoil}}^2} - M_{\text{recoil}} - T_b$$

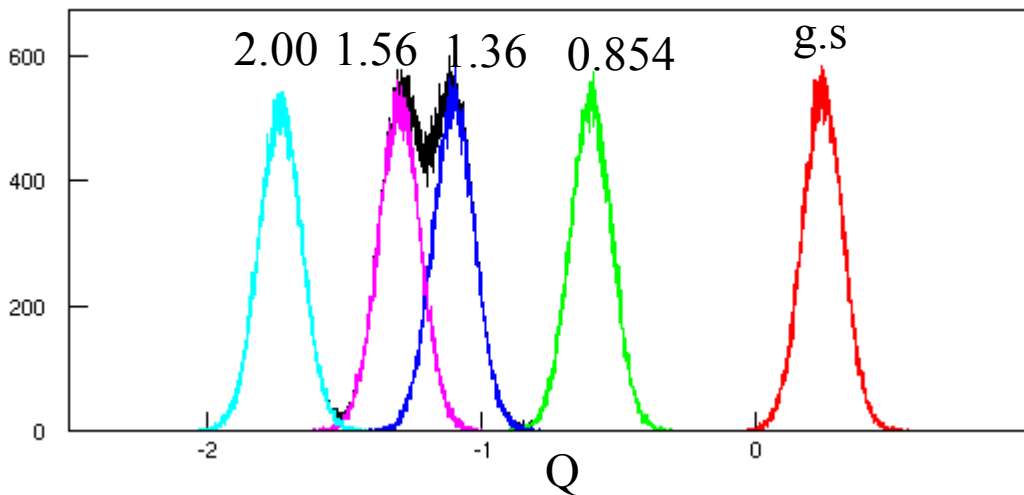
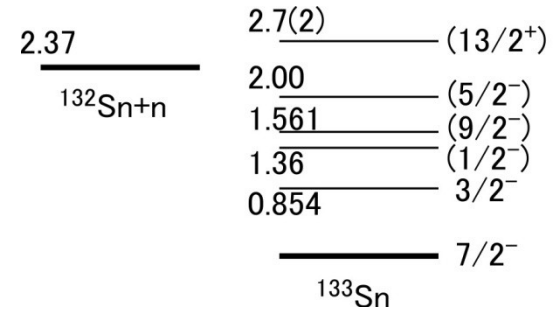
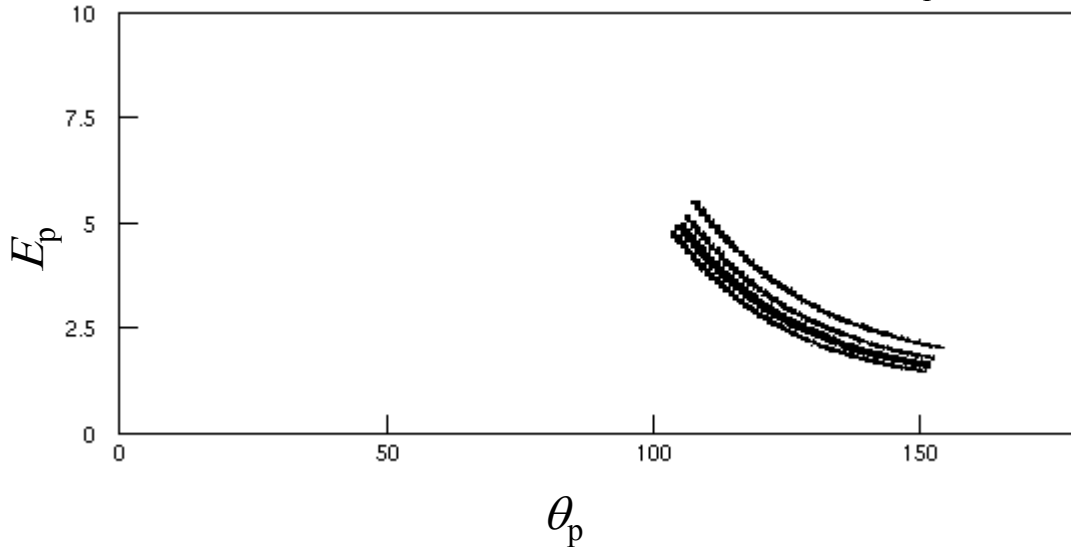
$$\approx T_p + \frac{M_n}{M_{\text{recoil}}} T_b - 2 \sqrt{\frac{M_n}{M_{\text{recoil}}} T_b T_p} \cos \theta_p \quad (\text{non-relativistic limit})$$

T_* : エネルギー (Beam, Proton, Recoil)
 M_* : 質量, p_* : 運動量, θ_p : 散乱角

- 最も分解能の悪い T_b と T_{recoil} の一部がキャンセル。 T_{recoil} を使うより、分解能が良い

${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn},p){}^{133}\text{Sn}$ @10MeV/u

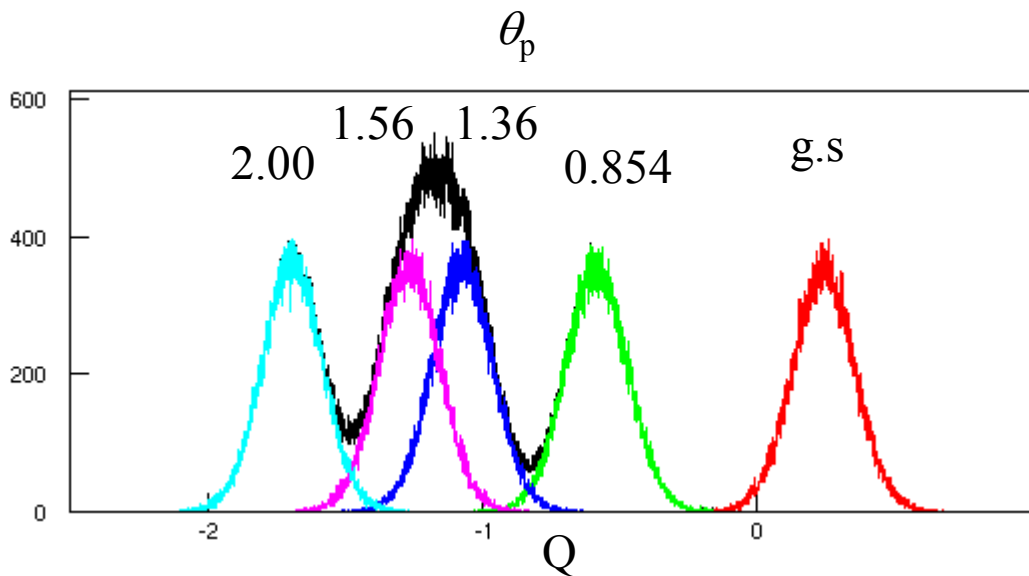
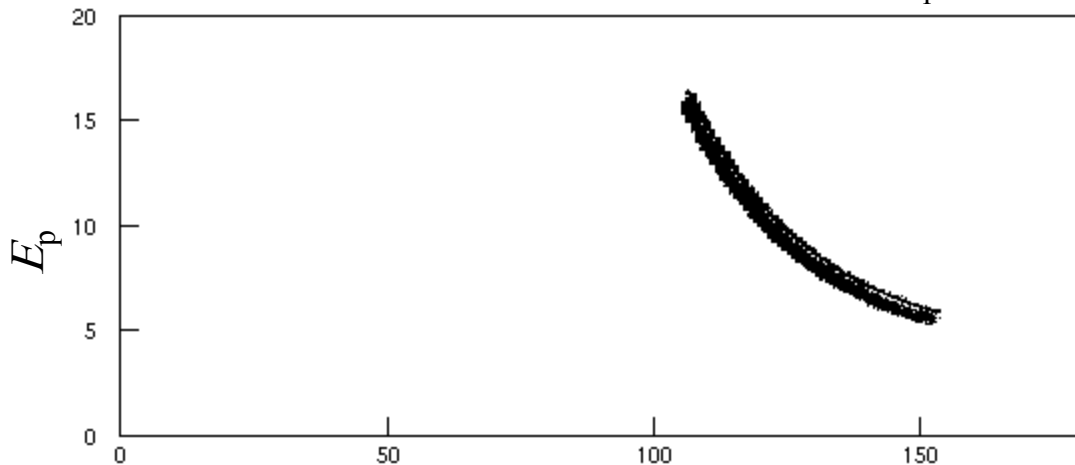
${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn},p){}^{133}\text{Sn}$ @10MeV/u $100 < \theta_p < 150$



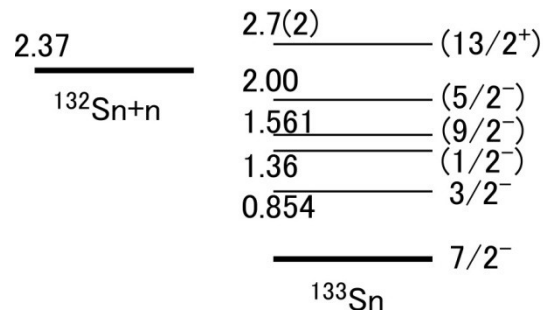
$\Delta T_p/T_p = 1\%$ (FWHM) $\rightarrow 0.030\text{MeV}$
 $\Delta\theta_p = 5\text{deg.}(\sigma)$ @proton $\rightarrow 0.015\text{MeV}$
 $\Delta T_b/T_b = 1\%$ (σ) @ ${}^{132}\text{Sn}$ $\rightarrow 0.066\text{MeV}$
 Q resolution $0.066\text{MeV}(\sigma)$
 $< 0.2\text{MeV}(\sigma)$ Jones *et al.*

${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn},\text{p}){}^{133}\text{Sn}$ @30MeV/u

${}^2\text{H}({}^{132}\text{Sn},\text{p}){}^{133}\text{Sn}$ @30MeV/u $100 < \theta_p < 150$



RIBFでのビーム生成が簡単



$\Delta T_p/T_p = 1\%$ (FWHM) \rightarrow 0.066 MeV
 $\Delta\theta_p = 5\text{deg.}(\sigma)$ @proton \rightarrow 0.045 MeV
 $\Delta T_b/T_b = 0.3\%$ (σ) @ ${}^{132}\text{Sn}$ \rightarrow 0.058 MeV
 Q resolution 0.113 MeV (σ)
 $< 0.2\text{MeV}(\sigma)$ Jones *et al.*

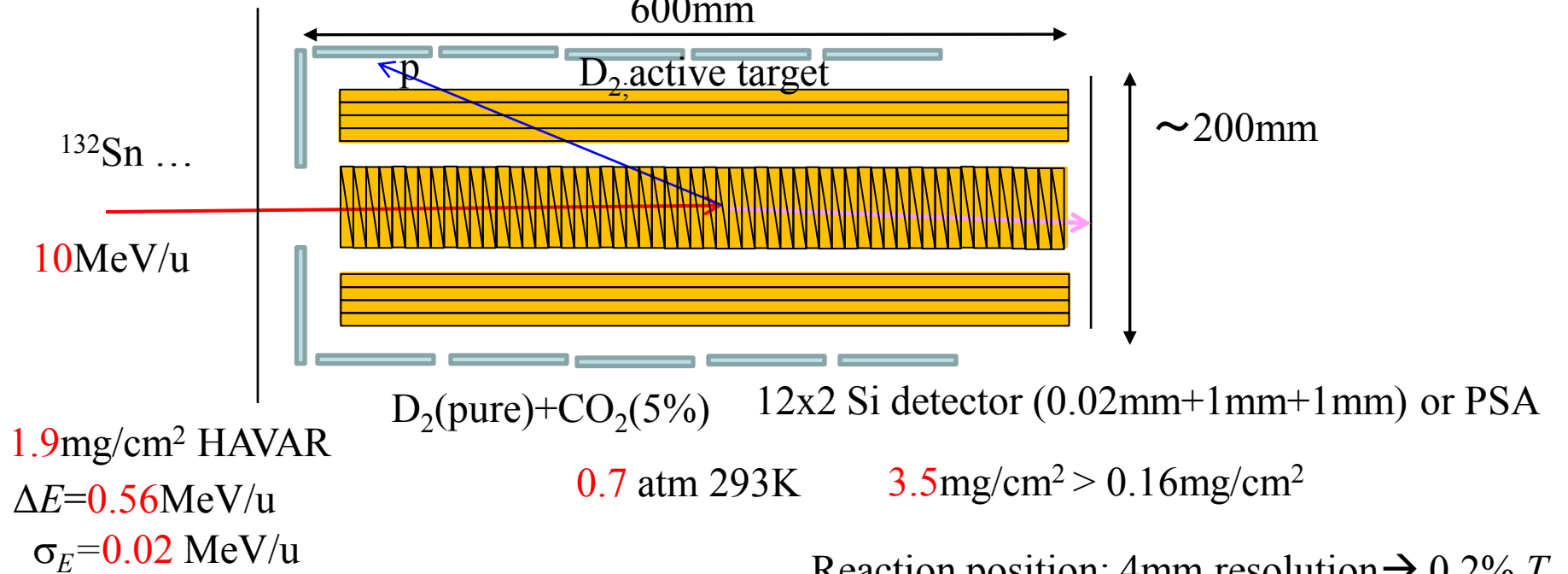
10 MeV/u より 2~3 倍悪い。
In flight separator でビームを作りやすい

実験装置

反応点での ^{132}Sn のエネルギーを 0.3~1% (σ)の精度で決定.

統計を上げるため厚い標的が必要

GEM-MSTPCを使った重水素アクティブ標的。反応点→反応時のエネルギー計算



$1.9\text{mg}/\text{cm}^2$ HAVAR

$\Delta E = 0.56\text{MeV}/u$

$\sigma_E = 0.02\text{MeV}/u$

膜のふくらみ

$8\text{mg}/\text{cm}^2$ 1.1 atm

40φ 1.2mm

Energy loss in D_2 gas

^{132}Sn : $2.0\text{MeV}/u @ 10\text{MeV}/u$ (20%)

straggling: $0.0051\text{MeV}/u$

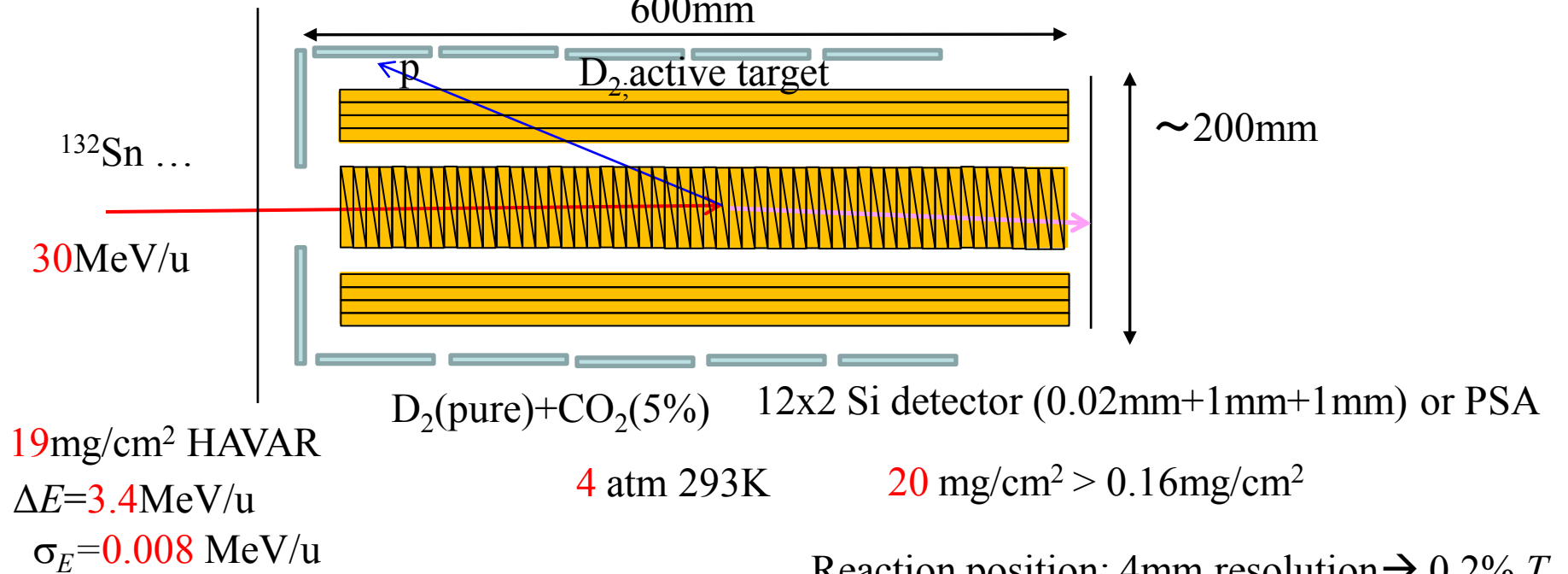
Proton: $0.05-0.12\text{MeV} @ 5-2\text{MeV}$

実験装置

反応点での ^{132}Sn のエネルギーを 0.2% (σ)の精度で決定.

統計を上げるため厚い標的が必要

GEM-MSTPCを使った重水素アクティブ標的。反応点→反応時のエネルギー計算



膜のふくらみ

8 mg/cm² 1.1 atm

40φ 1.2mm

Energy loss in D₂ gas

^{132}Sn : 7.0 MeV/u @ 30 MeV/u (23%)

straggling: 0.016 MeV/u

Proton: 0.11-0.4 MeV @ 16-5 MeV

生成量の見積もり

$^{238}\text{U}@345\text{MeV/u}$ 5pnA ($\rightarrow 100\text{pnA}$)

$\text{Pb}(3.7\text{mm}^t)+\text{Al}(3.6\text{mm}^t)+\text{PPAC}+\text{Si}+\text{PI}$ (BigRIPS@RIBF)

^{132}Sn @ $\sim 30\text{MeV/u}$ (3cm/% at F5 \rightarrow 0.03%/1mm)

^{132}Sn : 60cps ($\rightarrow 1.2\text{kcps}$), total $\sim 2.3\text{kcps}$ ($\rightarrow 46\text{kcps}$) LISE++

^2H target thickness 3.5, 20 mg/cm² at 10, 30 MeV/u

7.8 /day (156 /day) σ : 0.5mb, eff: 50% @30MeV/u

2.7 /day (55 /day) σ : 1.0mb, eff: 50% @10MeV/u

韓国で計画中のRAONでは、十数MeV/uの ^{132}Sn が 10^7cps 出る予定?

A. Chae, Sicily-East Asia workshop

まとめ

- ◇ $^2\text{H}(^{132}\text{Sn},\text{p})$ 反応を十分な統計かつ十分な分解能で測定可能な条件をMonte Carloシミュレーションで調べた。十分なQ分解能で測定するためには、反応点でのビームエネルギーを十分な精度で導出する必要がある。
- ◇ 反応点の測定可能な重水素アクティブ標的十分散焦点でのエネルギー測定 + 十分な強度のウランビーム → RIBFでの $^2\text{H}(^{132}\text{Sn},\text{p})$ 反応の測定は可能

30MeV/u : ANCが使えるかどうか既知の反応でテストする

陽子用pad: Backgammon (斜め入射に弱い) → ピクセル型、Delay line ?
アクティブ標的の設計中

RIKEN mini-workshop on radiative neutron capture reactions for r-process
Workshop on Low-Energy RI Beams and the Physics, Beijing, China
1st Sicily-East Asia workshop, Ortigia, Siracusa, Italy

研究計画

研究計画

重水素アクティブ標的の設計・delay line法のテスト

◇ >2015年度 アクティブ標的の作成、テスト

◇ >2016年度 30MeV/uビームによるテスト実験
(CYRIC/RCNP)

◇ >2018年度 ^{132}Sn 領域の(d,p)反応の測定 (RIBF?)
偶偶核(n, γ)

◇ 将来:<10MeV/u, 膜なし (differential pumping?),
Siの冷却 \rightarrow 50keV(σ) (?) 奇核(n, γ)