

^{12}C 原子核における稀ガンマ崩壊 モード探索のためのテスト実験

京大理 津村 美保

京大理, 阪大RCNPA^A, 理研仁科セ^B, 東北大CYRIC^C, 宮崎大工^D,
九大理^E, 甲南大理^F, 和歌山大医^G, 岡山大理^H

川畑貴裕, 足立智, 馬場辰雄, 古野達也, 石井佑季, 村田求基,
小林史治, 延與佳子, 民井淳^A, 橋本尚志^A, 畑中吉治^A, 松田洋平^A,
三木謙二郎^A, 岩本ちひろ^A, 伊藤健^A, 三浦正季^A, 銭廣十三^B, 久保野茂^B,
伊藤正俊^C, 安藤峻^C, 前田幸重^D, 坂口聡志^E, 秋宗秀俊^F, 藤村寿子^G, 王岩^H

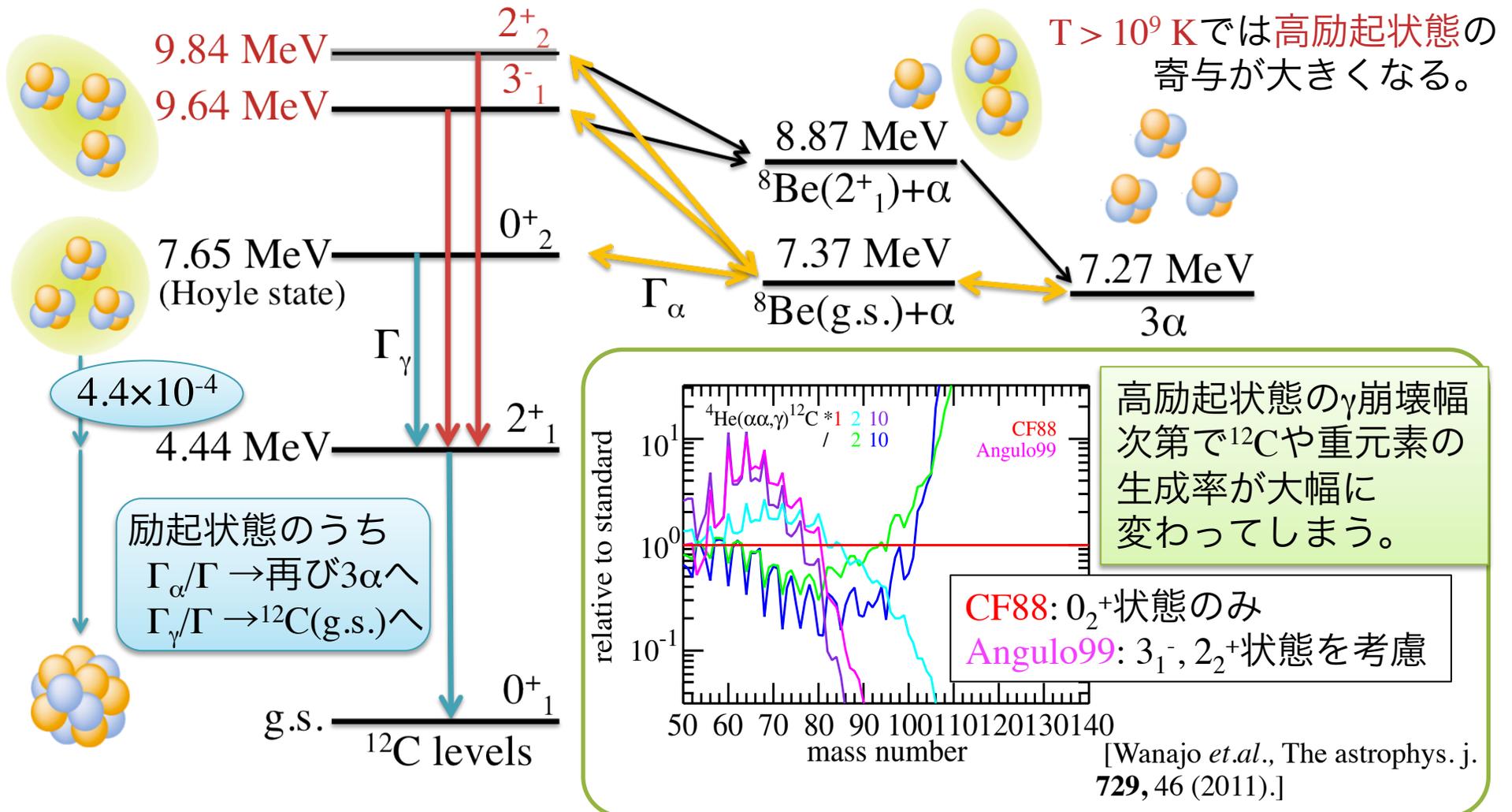
Table of contents

- ◆ Introduction
 - ◆ 宇宙における ^{12}C の合成
 - ◆ 3_1^- 状態の γ 崩壊確率
- ◆ Experimental procedure
 - ◆ 逆運動学反応による測定手法
 - ◆ 実験セットアップ
 - ◆ シミュレーション
 - ◆ S/Nの向上のために
- ◆ Results of the test experiment
 - ◆ 励起エネルギースペクトル
 - ◆ pと ^{12}C の相関を利用したゲート
 - ◆ 3_1^- 状態, 1_1^+ 状態の γ 崩壊確率
- ◆ Summary

Introduction

宇宙における ^{12}C の合成

^{12}C などの重い元素の合成では、トリプル α 反応が重要な役割を担っている。



高励起状態の γ 崩壊確率は未だわかっていない。

3_1^- 状態の γ 崩壊確率の測定を計画

3₁⁻状態のγ崩壊確率

3₁⁻状態のγ崩壊確率は10⁻⁷以下と非常に小さく、測定は難しい。

	全崩壊幅 Γ	γ崩壊幅 Γ_γ	γ崩壊確率 Γ_γ/Γ
下限値	34(5) keV	0.31(4) meV	9.1×10^{-9}
上限値		14 meV (1σ C. L.)	4.1×10^{-7}

Direct decay
(3₁⁻ → 0₁⁺)
電子散乱の
データから

上限値を求めた過去の実験

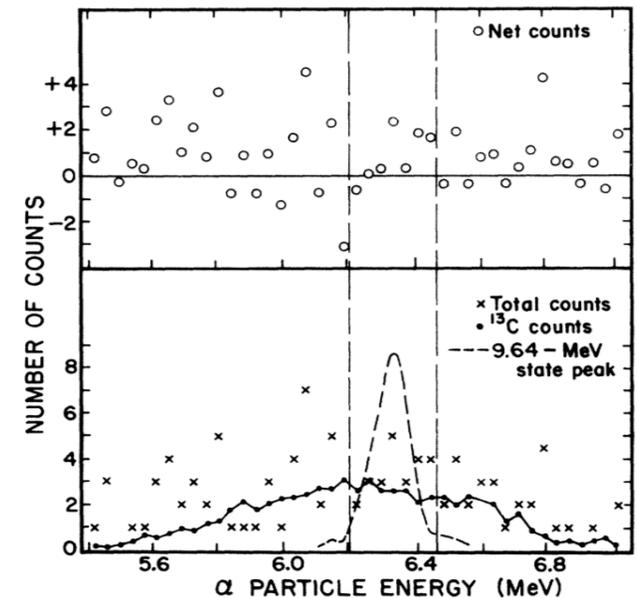
¹²C(α, α'¹²C)反応による測定

[D. Camberlin *et al.*, Phys. Rev. C **10**, 2 (1974).]

同位体濃縮された ¹²C標的中の¹³Cの
バックグラウンドが大きな問題となった。



¹²Cビームなら¹³Cは入ってこない!



¹²Cをビームとした逆運動学反応 H(¹²C, p¹²C)による実験を計画。

Experimental procedure

逆運動学反応による測定手法

逆運動学反応 $H(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} p)$ で p と ^{12}C を同時計測することにより、 γ 線を測定することなく γ 崩壊確率を決定する。

γ 崩壊確率 Γ_γ / Γ

$$\frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} = \frac{\gamma\text{崩壊イベント数}}{\text{全励起イベント数}}$$

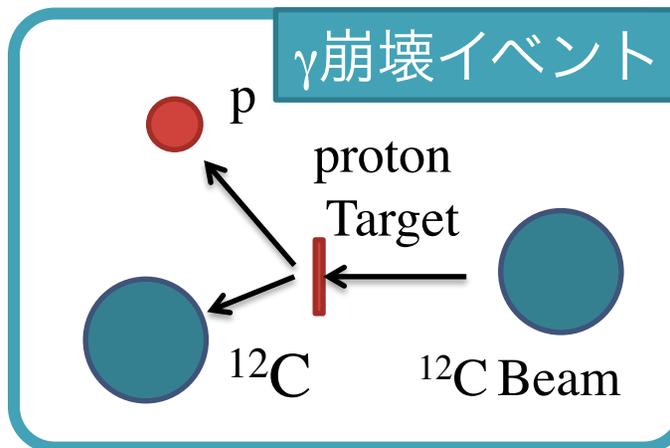
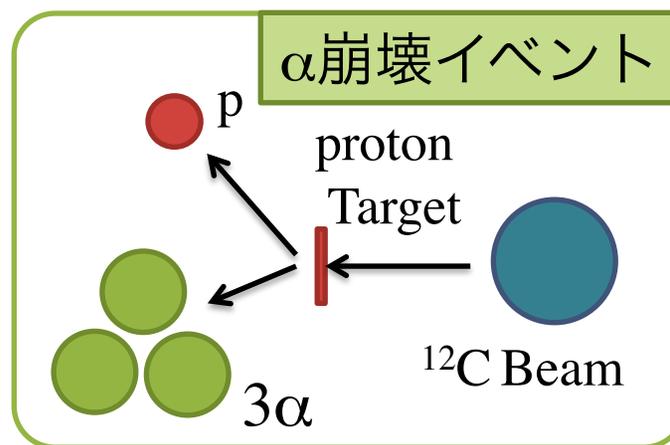
全励起イベント数

反跳陽子のエネルギーと角度から ^{12}C の励起エネルギースペクトルを作成
励起状態を同定

γ 崩壊イベント数

α 崩壊したものは α ,
 γ 崩壊したものは ^{12}C として飛来する。
 ^{12}C として検出されたイベントの
数を数える

全励起イベント



実験セットアップ

大阪大学核物理研究センター サイクロトロン施設で測定を行う。

反跳陽子側(全励起イベント数)

Si+CsI (cover 30° - 41°)

➔ 陽子を選択、 ^{12}C の励起エネルギー
全イベント数を決定

Si \rightarrow pの反跳角度
CsI \rightarrow pのエネルギー

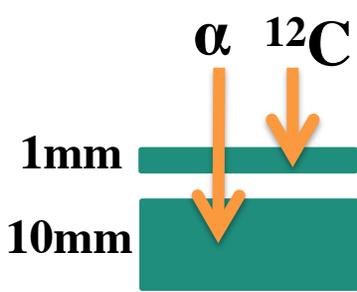
VDC \rightarrow 散乱 ^{12}C の運動量・角度
Plasticシンチ \rightarrow ^{12}C と α のPID

散乱 ^{12}C 側(γ 崩壊イベント数)

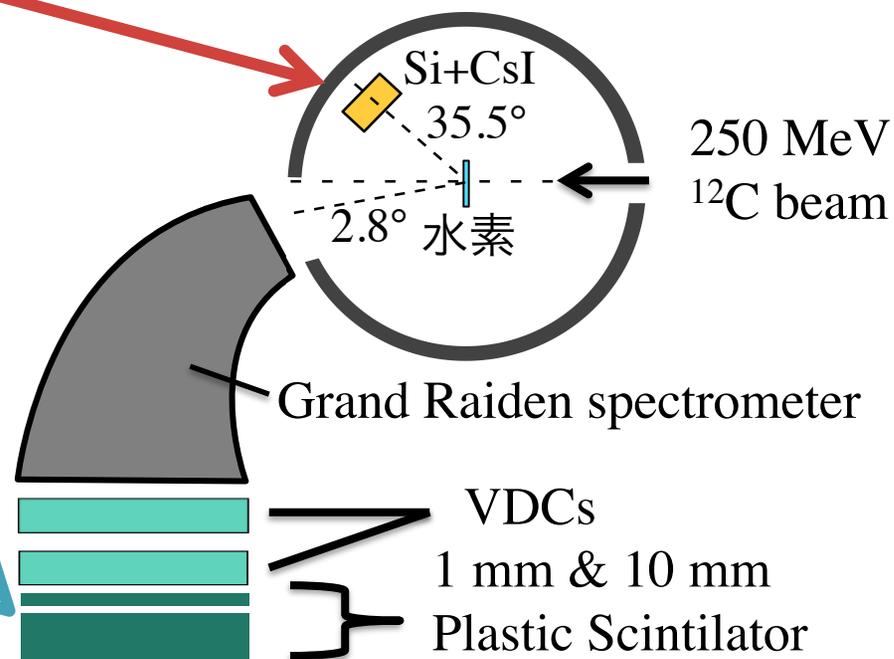
Grand Raiden spectrometer
& VDC & プラスチックシンチ

➔ γ 崩壊イベントを選択

α ^{12}C α のみが
1mmのシンチを
貫通できる
 \rightarrow anti-coinを
 ^{12}C のtriggerに



The diagram shows two particles, labeled α and ^{12}C , with arrows pointing downwards. They pass through a thin green layer labeled '1mm' and then a thicker green layer labeled '10mm'. The α particle is shown as a single arrow, while the ^{12}C particle is shown as a double arrow, indicating it passes through both layers.



シミュレーション

以下のような実験条件を考慮してモンテカルロシミュレーションを行った。

Beam

エネルギー: 250 MeV (20.8 MeV/u)
強度: 0.1 pA
エネルギー拡がり: 0.2 MeV (sigma)
角度拡がり: 2 mr (sigma, in-plane)
スポットの大きさ: 0.5 mm (sigma)

Target: 固体水素標的 0.5 mm
(0.0763 g/cm²)

Si+CsI detector

設置角度: 35.5°
標的からの距離: 125 mm
エネルギー分解能: 0.3 MeV (sigma)

Grand Raiden spectrometer

設置角度: 2.8°
アクセプタンス: ±14 mr (Horizontal)
±35 mr (Vertical)
 $\Delta p/p = \pm 2\%$

Focal plane detector

固有の角度分解能: 2 mr (sigma, Horizontal)
4 mr (sigma, Vertical)
焦点面の物質質量: 60 mg/cm²

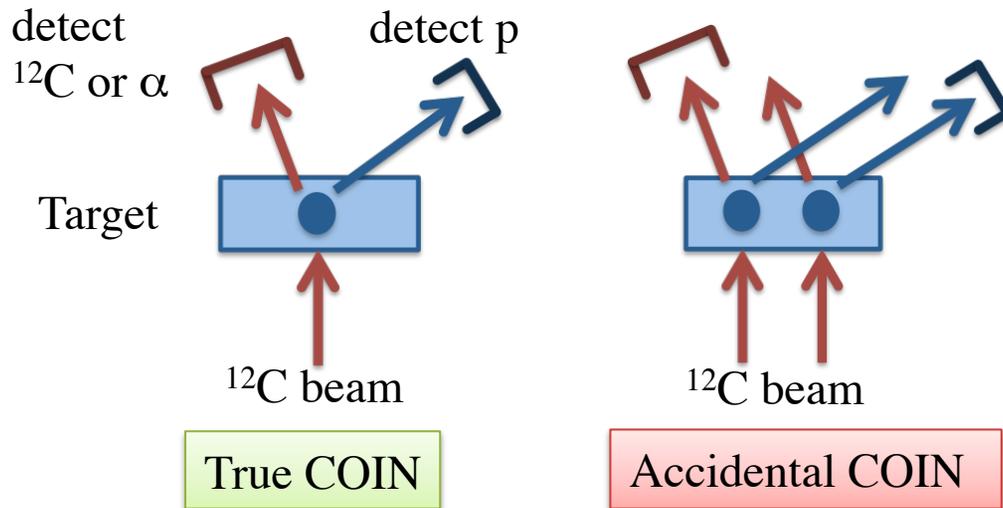
10日間のビームタイムで見込める収量

	J^π	Γ	Γ_γ	Γ_γ/Γ	イベント数
上限値	3^-_1	34 (5) keV	14 meV	4.1×10^{-7}	2.1×10^3
下限値			0.31 ± 0.04 meV	9.1×10^{-9}	46

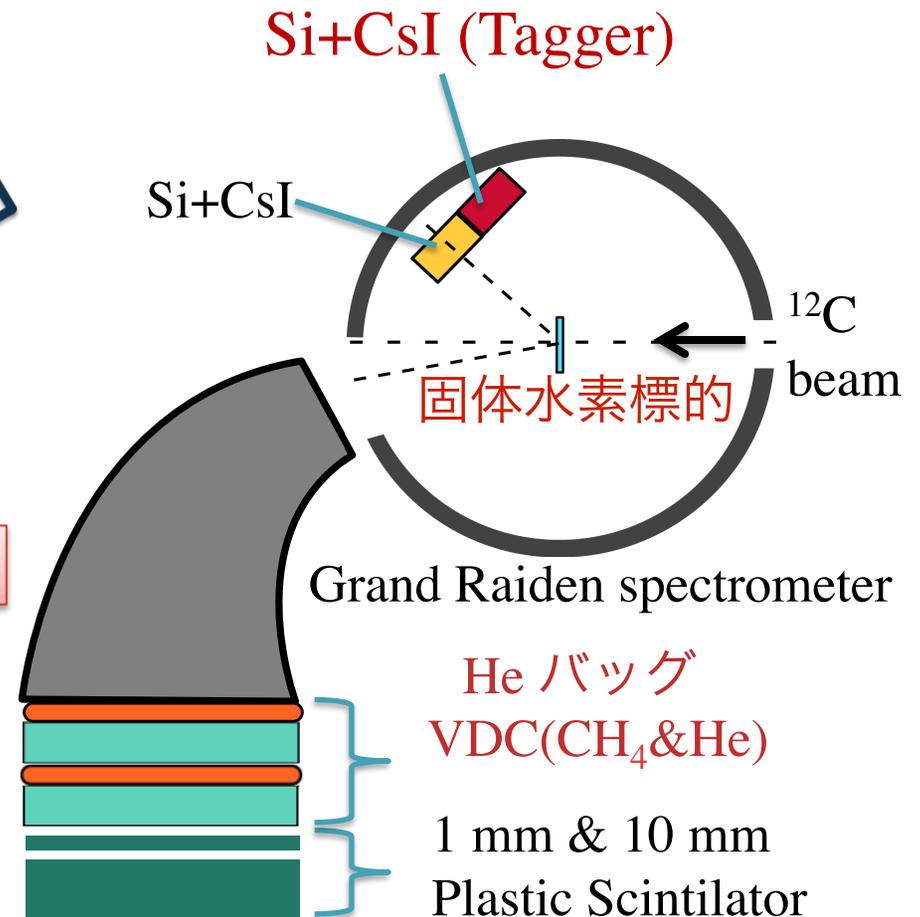
S/Nの向上のために

確率 10^{-7} 以下のレアイベントに迫るには、S/N比を良くすることが必要不可欠。
最も重要な問題となるのは、accidental coin イベントをいかに取り除くか。
何も対策しなければ S/Nは1/250以下。

❖ accidental coin イベントとは



- 標的中の不純物の削減→固体水素標的
- 水素によるAccidental イベントの除去
→ Si+CsI (Tagger)の導入
- 散乱の方位角の相関から→ ϕ ゲート
- 放出された γ 線のエネルギーについての相関から→ γ ゲート



Results of the test experiment

テスト実験で確認したいこと

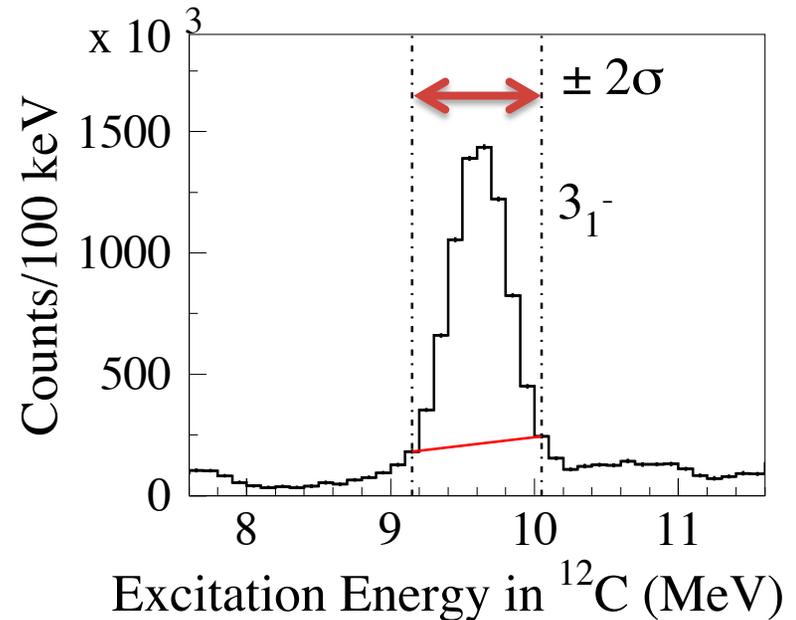
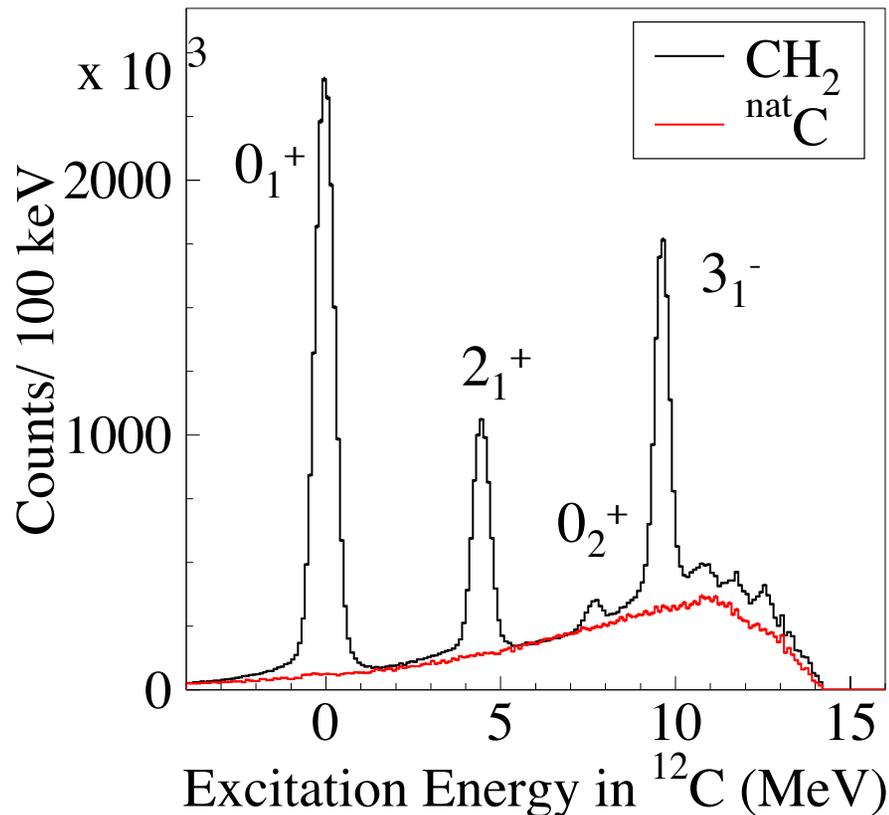
- γ 崩壊確率を決定する方法として、逆運動学的手法が有効かどうか
- γ 崩壊確率 10^{-7} 以下である 3_1 -状態を探索するにあたって、バックグラウンド/アクシデンタルはどの程度問題になるか?

未知のバックグラウンドはないか?

- CH_2 標的とC標的による測定を行う
- バックグラウンドを除去するために導入する Tagger, ϕ gate, γ gate の効果

励起エネルギースペクトル (全励起イベント数)

SiCsI検出器から得られた ^{12}C の励起エネルギーから、励起状態を同定。



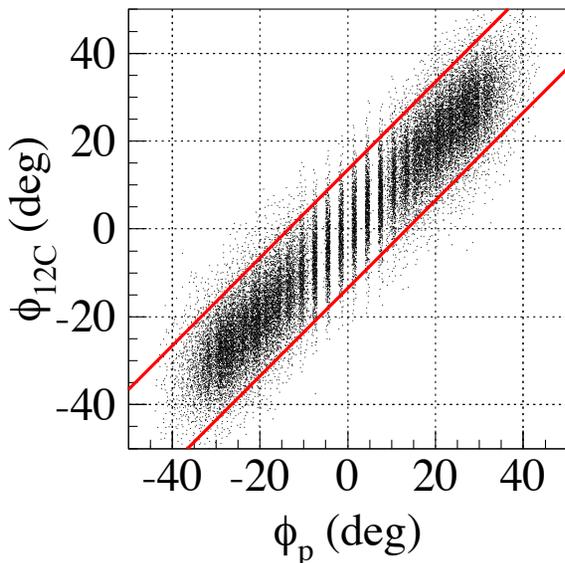
励起エネルギー分解能 $\sigma=220$ keV
 2σ の幅でのイベント数を数える。

γ 崩壊確率の分母となる全励起イベント数は、 3_1^- 状態について8時間の測定で $5.904(35) \times 10^6$ イベント得られた。

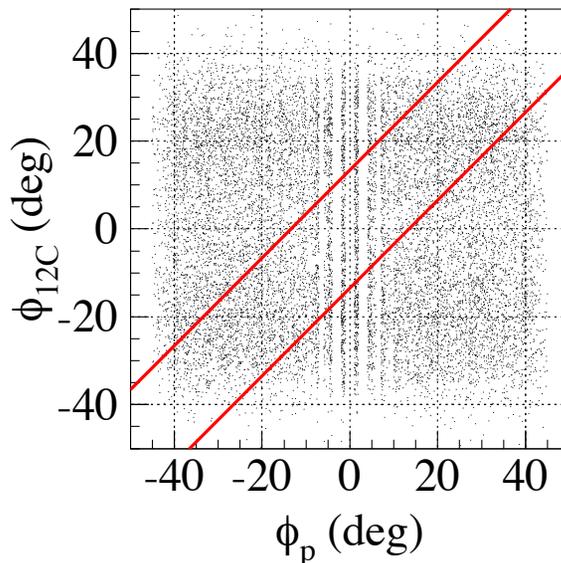
反跳陽子と散乱 ^{12}C の 散乱の方位角 ϕ の相関

シミュレーション

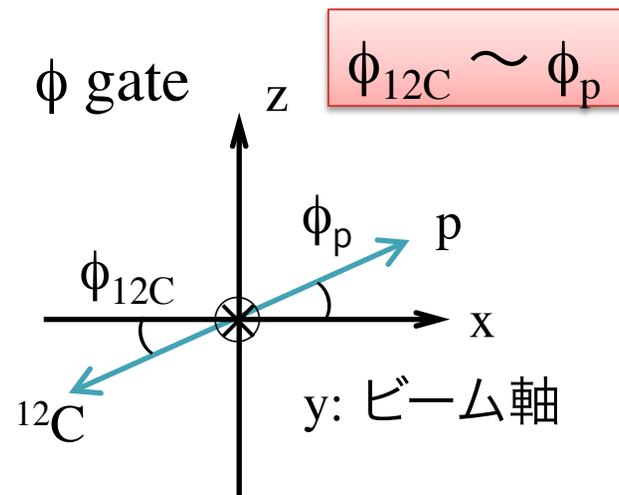
True



Accidental



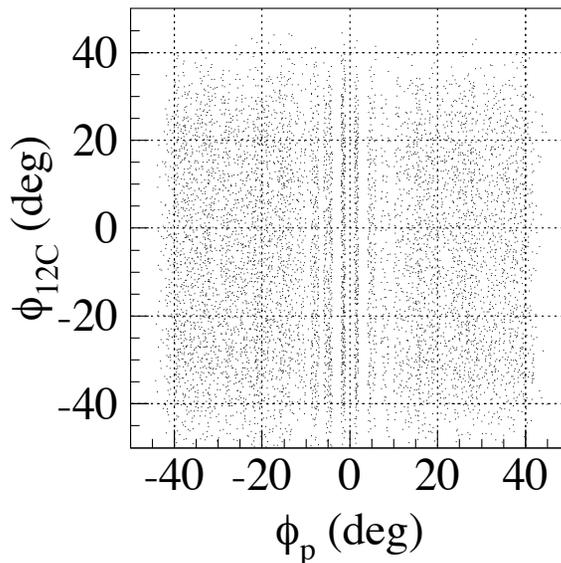
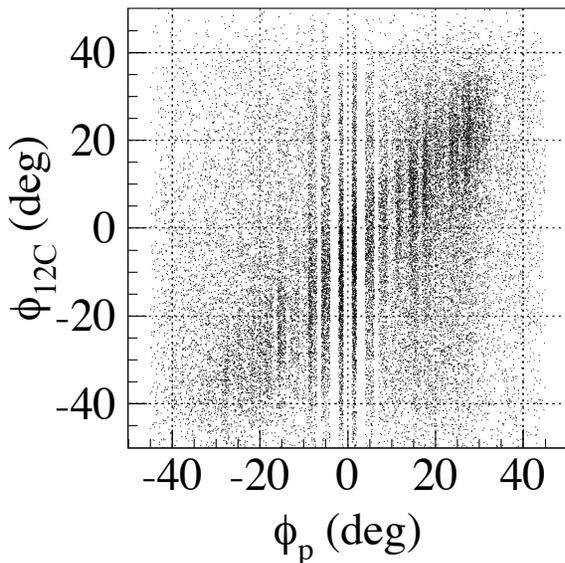
ϕ gate



ゲート幅はシミュレーションで
 3_1^- 状態の $\phi_{12\text{C}}$ の 2σ の幅とした。

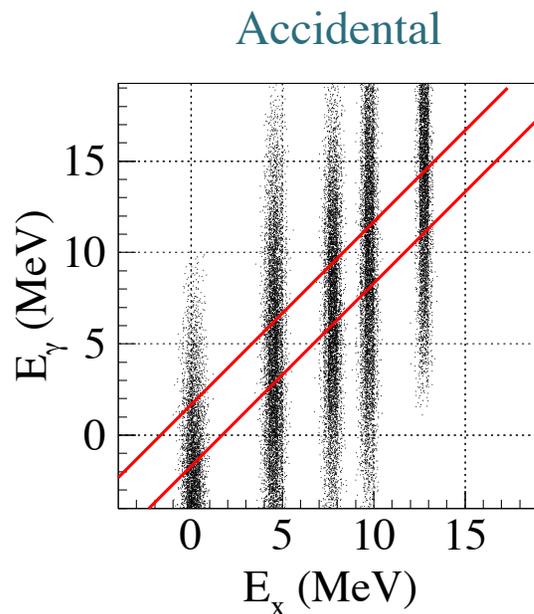
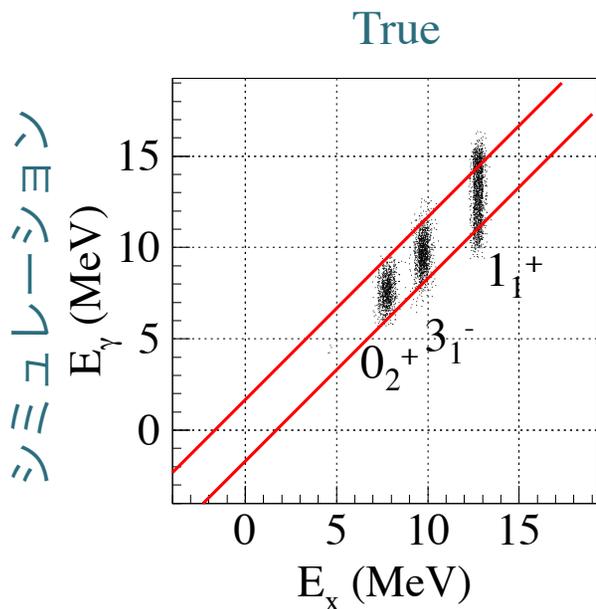
ϕ gateのEfficiencyは
シミュレーションから

実験データ



励起状態	Acc.	True
3_1^- (9.64MeV)	0.304	0.961
1_1^+ (12.71 MeV)	0.348	0.867

励起エネルギーと 放出された γ 線のエネルギーの相関

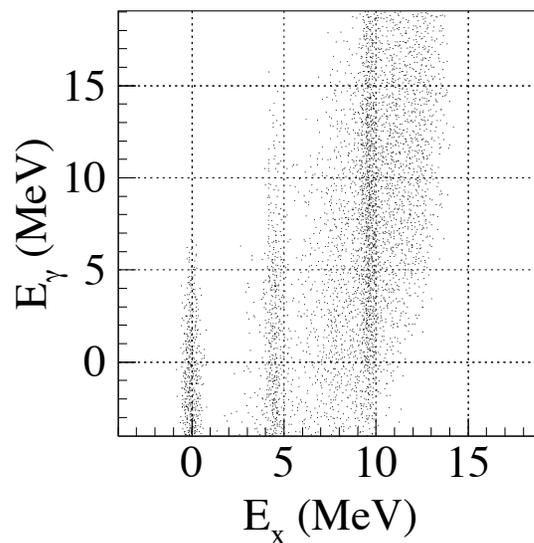
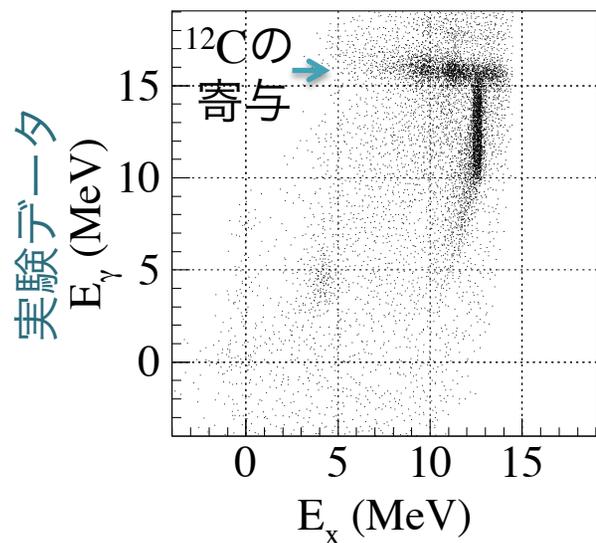


γ gate

$$E_x \sim E_\gamma$$

$$= E_{\text{beam}} - E_p - E_{12\text{C}}$$

ゲート幅はシミュレーションで
 3_1^- 状態の E_γ の 2σ の幅とした。



ϕ & γ gateのEfficiencyは
シミュレーションから

励起状態	Acc.	True
3_1^- (9.64MeV)	0.062	0.918
1_1^+ (12.71 MeV)	0.078	0.569

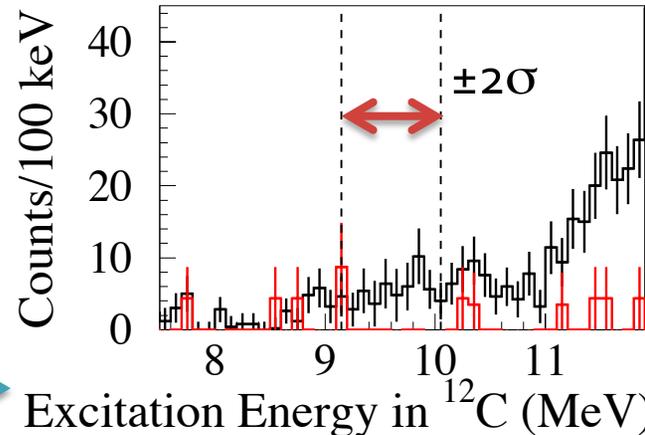
3₁⁻(9.64 MeV)状態のγ崩壊確率

3₁⁻(9.64 MeV)状態を探索するにあたり、未知のバックグラウンドはないか？

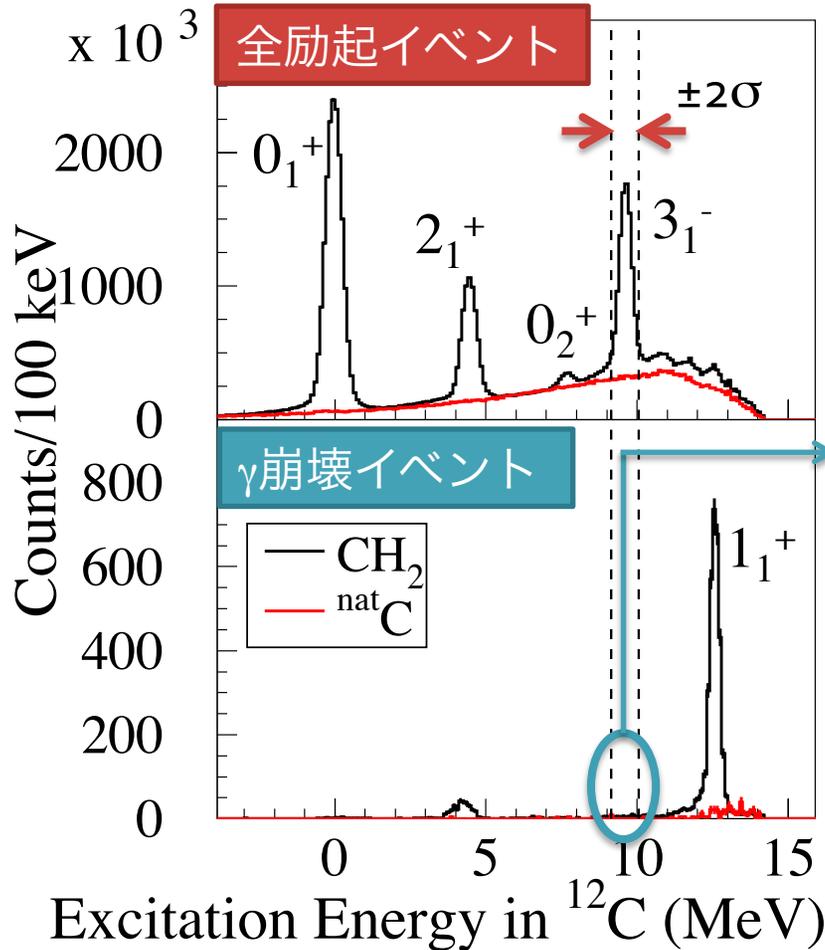
全励起イベント数

励起エネルギー分解能 $\sigma=220$ keV
 $\pm 2\sigma$ の幅で数えると、 $5.904(35) \times 10^6$ events

γ崩壊イベント数



全励起イベントと同じ幅で
48(12) events



γ崩壊確率の感度は

$$\frac{48}{5.904 \times 10^6} \div (0.439 \times 0.918 \times 0.981) = 2.0(5) \times 10^{-5}$$

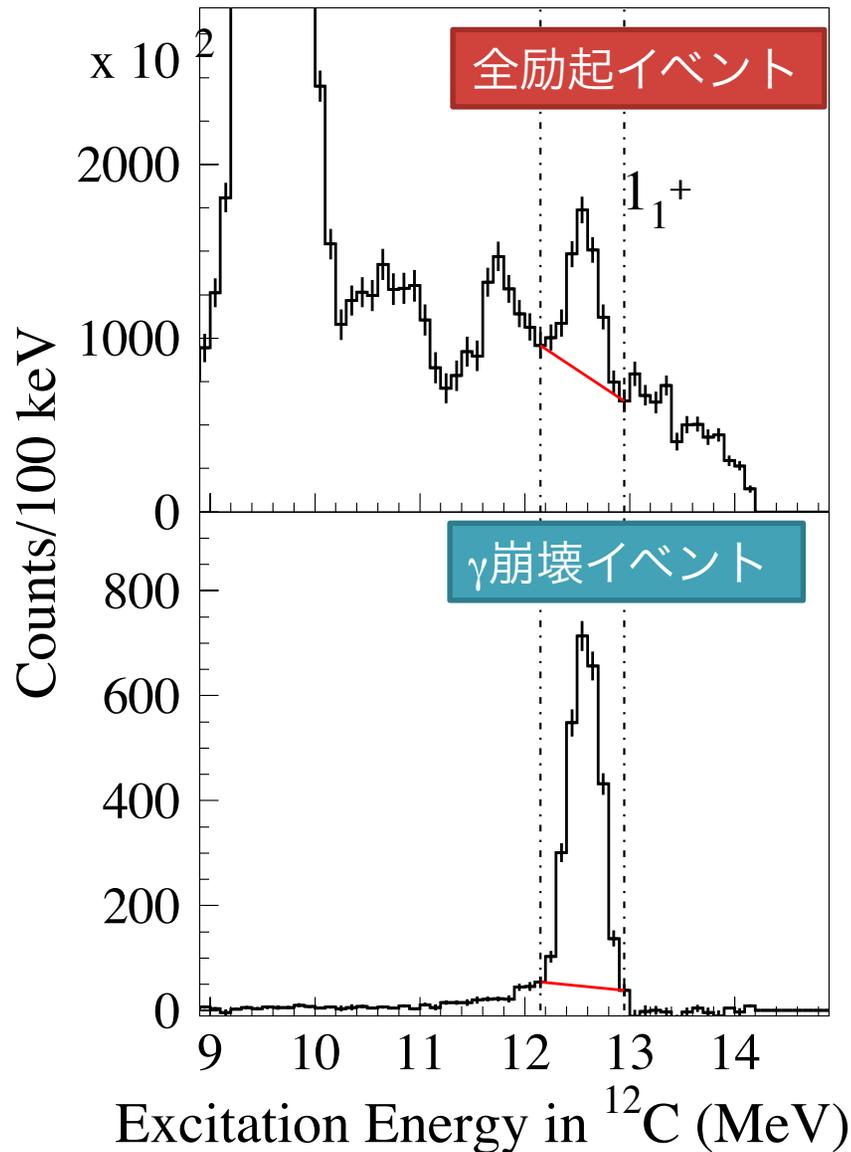
幾何学的効率

φ & γ gateの効率

VDC tracking効率

γ崩壊確率 10^{-7} 以下の3₁⁻状態を探索するには現状の感度は不十分。連続的なBGの起源を確かめる必要あり。

1_1^+ (12.71 MeV)状態の γ 崩壊確率



1_1^+ 状態については、測定から
 γ 崩壊確率を求めることができる。

幾何学的効率 0.716,
 ϕ & γ ゲート効率 0.569
VDC 効率 0.981 を考慮すると

$$\frac{2569}{3.098 \times 10^5} \div (0.716 \times 0.569 \times 0.981) = 2.07(6) \times 10^{-2} \quad (\text{誤差は統計誤差のみ})$$

すでに知られている値

全崩壊幅 Γ	γ 崩壊幅 Γ_γ	γ 崩壊確率
18.1(28) eV	0.40(5) eV	$2.21(7) \times 10^{-2}$

F. Anzenberg-Selove, Nucl. Phys. A 506, 158 (1990).

γ 線を測定せずに、逆運動学的手法で
 γ 崩壊確率を求めることができた。

Summary

- ^{12}C の 3_1^- 状態の γ 崩壊確率を測定する実験を計画。
 - 逆運動学反応 $\text{H}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} p)$ における p と ^{12}C の同時計測によって、 γ 線を測定せずに γ 崩壊確率を決定する。
- CH_2 と C 標的を用いたテスト実験の結果、現在の γ 崩壊確率の感度は $2.0(5)\times 10^{-5}$
 - 連続的なバックグラウンドの起源を探る必要あり。
- 1_1^+ 状態の γ 崩壊確率は $2.07(6)\times 10^{-2}$
 - 誤差の範囲で知られている値と一致。
 - 逆運動学的手法が有効であることが分かった。
- 今後、Accidentalイベントの除去のために導入したTaggerの効果について解析を進める予定。