

直線偏光 γ 線による 中性子角度分布

原子力機構/国立天文台

早川岳人

共同研究者

原子力機構 静間俊行 Christopher Angell

兵庫県立大 宮本修治 堀川賢 望月孝晏 天野壮

レーザー総研 李大治 井澤靖和 今崎一夫

東工大 千葉敏

甲南大 秋宗秀俊

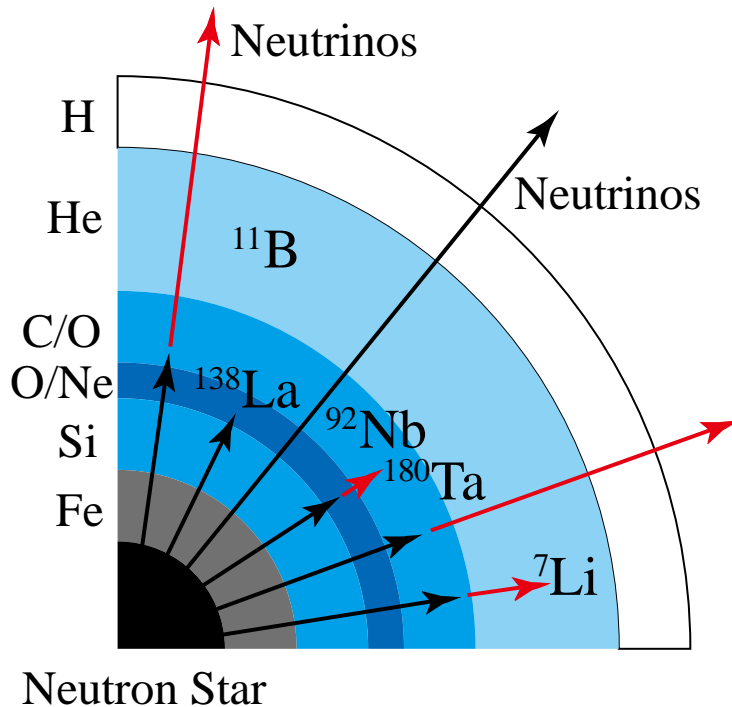
阪大 藤原守 緒方一介

国立天文台 梶野敏貴

Motivation

Supernova neutrino-process

S. Woosley, ApJ (1990) has proposed supernova neutrino-process as the origin of several heavy isotopes.



A. Heger, PLB (2005)

Calculation for several isotopes

^7Li , ^{11}B , T. Yoshida, PRL (2005,2006)

^{138}La , T. Hayakawa, PRC (2008, 2009)

^{180}Ta , T. Hayakawa, PRC (2010a, 2010b)

^{92}Nb , T. Hayakawa, APJL (2013)

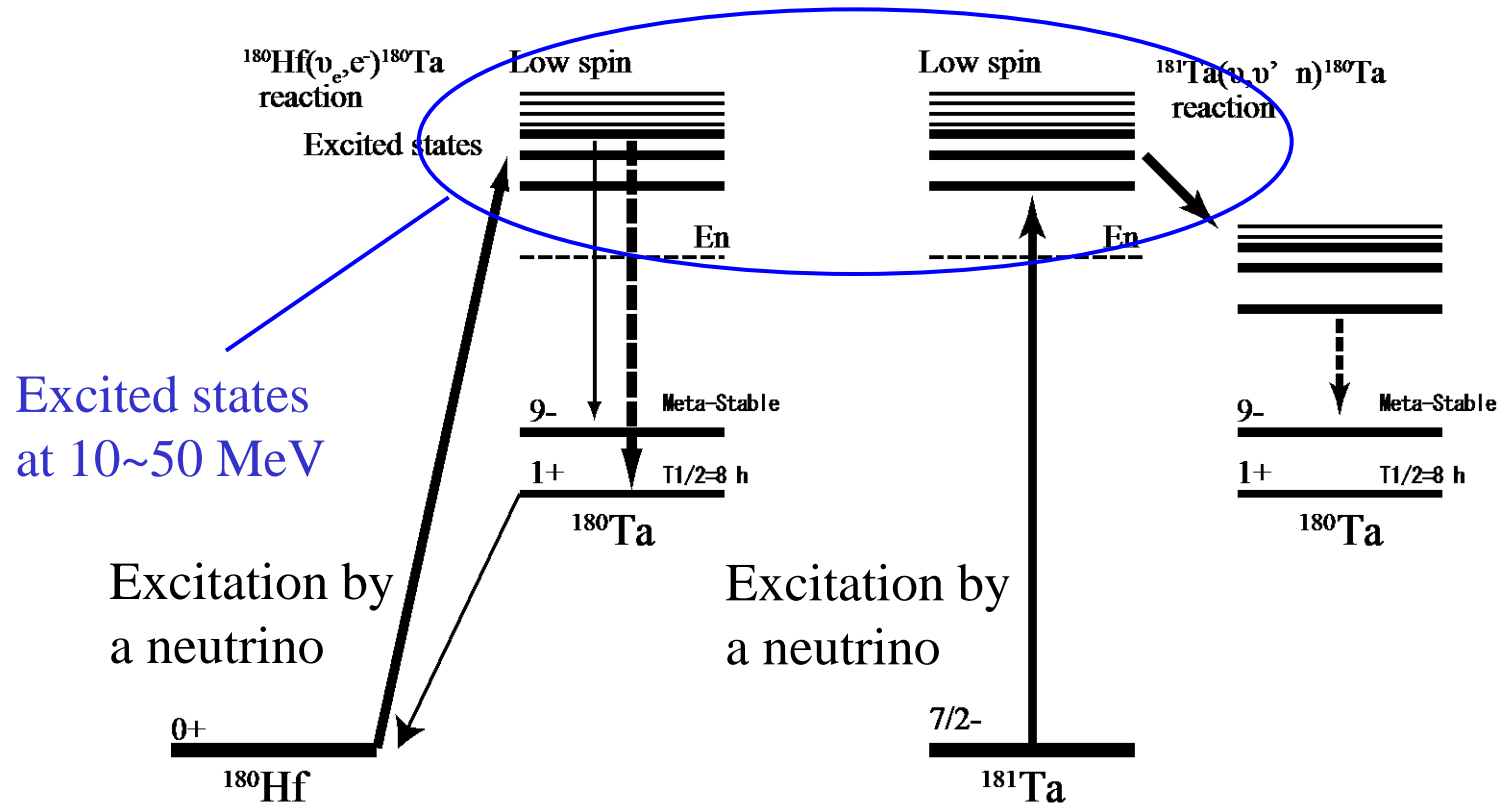
Neutrino-induced reactions produce new isotopes.

Neutrino-nucleus interactions are key physics.

Neutrino-nucleus interactions

Charged Current Reactions

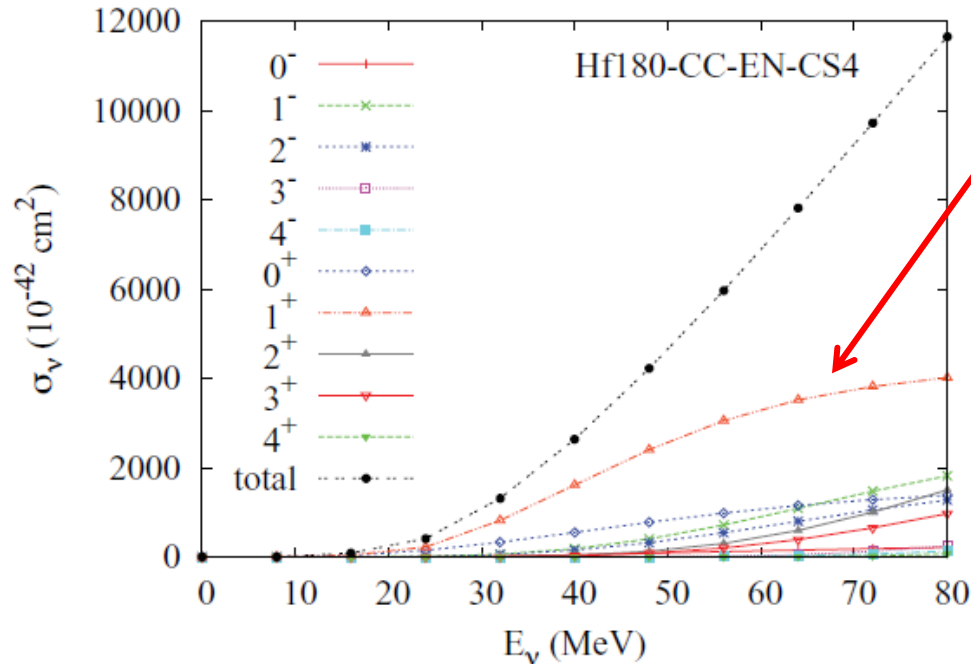
Neutral Current Reactions



It is almost impossible to measure directly neutrino-nucleus interactions for many isotopes and thus we should calculate it with nuclear structure models.

M1 strength

An example calculated by a QRPA model



1+ states (M1) are most important.

Experimental level density of 1+ states (M1 strength) help theoretical calculations !

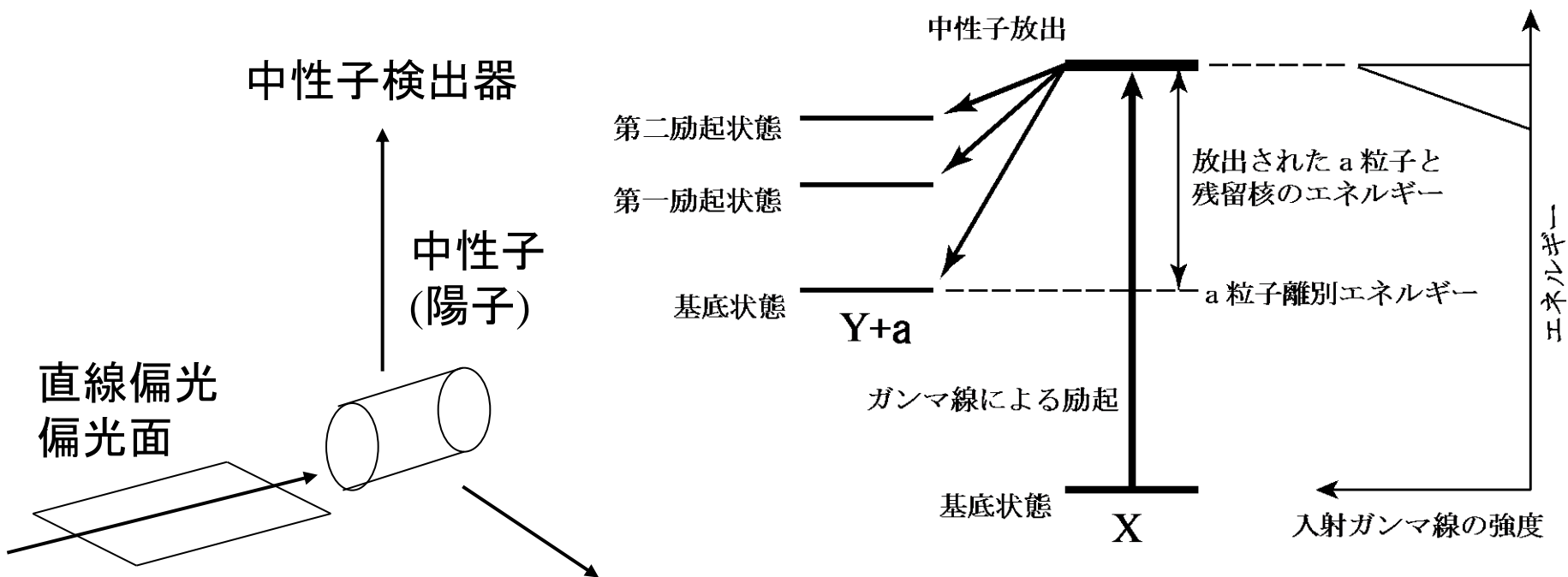
Other states are also populated via neutrino-induced reactions

Model calculations for nuclear structures are required even if many types of strengths are measured.

FIG. 2. (Color online) Cross sections by charged current reactions $^{138}\text{Ba}(\nu_e, e^-)^{138}\text{La}^*$ and $^{180}\text{Hf}(\nu_e, e^-)^{180}\text{Ta}^*$ for $J_\pi = 0^\pm \sim 4^\pm$ states. Transition matrix elements are calculated by the QRPA, Eq. (4).

M. Cheoun, et al., Phys. Rev. C82, 035504 (2010)

直線偏光 γ 線による (γ, n) 反応



直線偏光ガンマ線を用いれば、角度分布からM1/E1強度が出せるのではないか？

1957年の理論的予言： 直線偏光した γ 線による中性子の角度分布

IL NUOVO CIMENTO

VOL. V, N. 1

1° Gennaio 1957

On γ -Polarization Effects in Photonuclear Reactions.

A. AGODI

Istituto di Fisica dell'Università, Centro Siciliano di Fisica Nucleare - Catania

(ricevuto l'8 Settembre 1956)

Summary. — A detailed derivation is given of the most general angular distribution of photonucleons consistent with the conservation principles for angular momentum and parity. Its azimuthal dependence, when photons are linearly polarized, is discussed, with particular emphasis on the physical information obtainable without using any model for the reaction or the nucleus.

ビーム軸に対して $\theta=90^\circ$ のとき、 Φ の角度分布が $a+b\sin^2\Phi$

過去の実験

(polarized γ , p)反応による実証

${}^3\text{H}(p,\gamma){}^4\text{He}$ 反応で直線偏向 γ 線を生成して、
 ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{C}$ の角度分布を測定

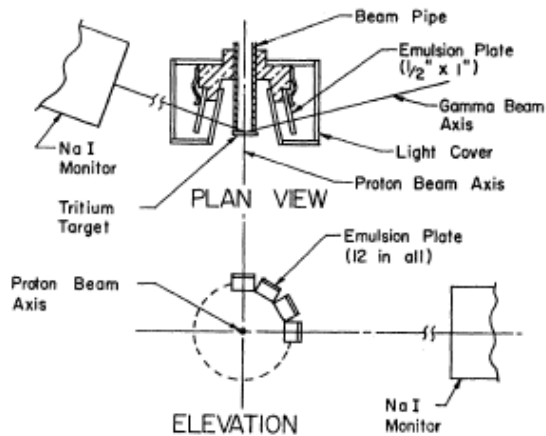


Fig. 2. Diagram of the experimental apparatus.

Agodi then shows that

$$\alpha = (-)^{\sigma} \frac{(2|L1:L1)}{(2|L1:L-1)} \frac{a_2}{a_0},$$

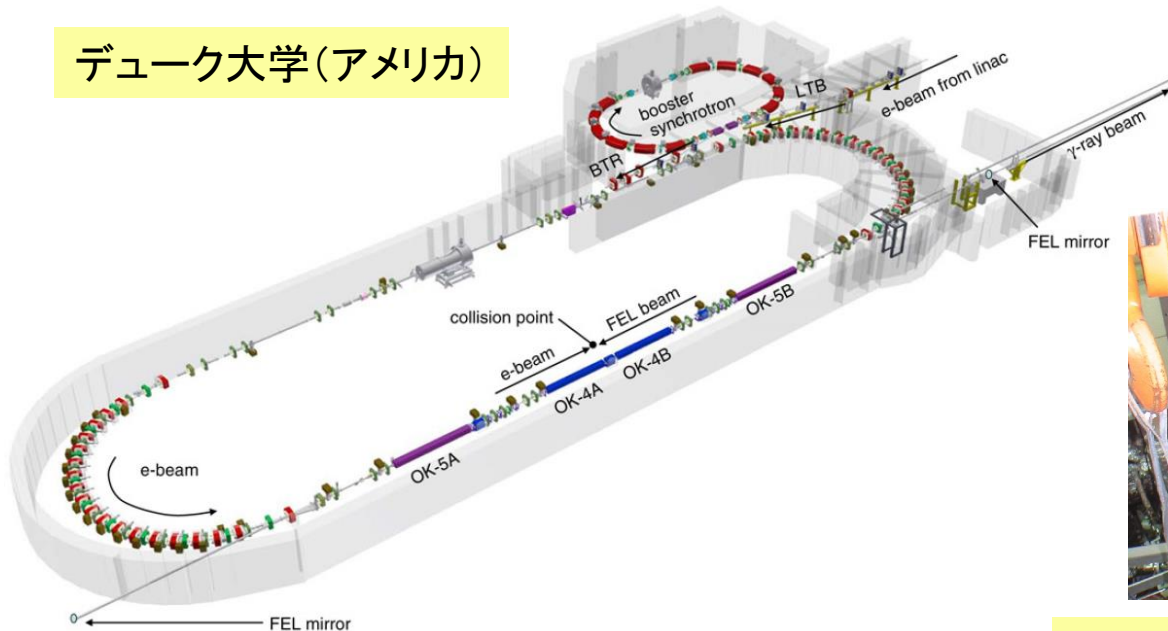
where σ is zero for magnetic and 1 for electric multipole, L is the angular momentum of the multipole, and the parentheses are Clebsch-Gordan coefficients as used by Agodi, which reduce to

$$\alpha_{E1} = -a_2/a_0, \quad \alpha_{E2} = a_2/5a_0, \quad \text{and} \quad \alpha_{M1} = a_2/a_0.$$

E.M. Kellogg and W.E. Stephens, PR, 149, 798 (1966)

世界のMeV領域のレーザーコンプトン散乱 γ 線のユーザー利用施設

デューク大学(アメリカ)



産業技術総合研究所(つくば市)

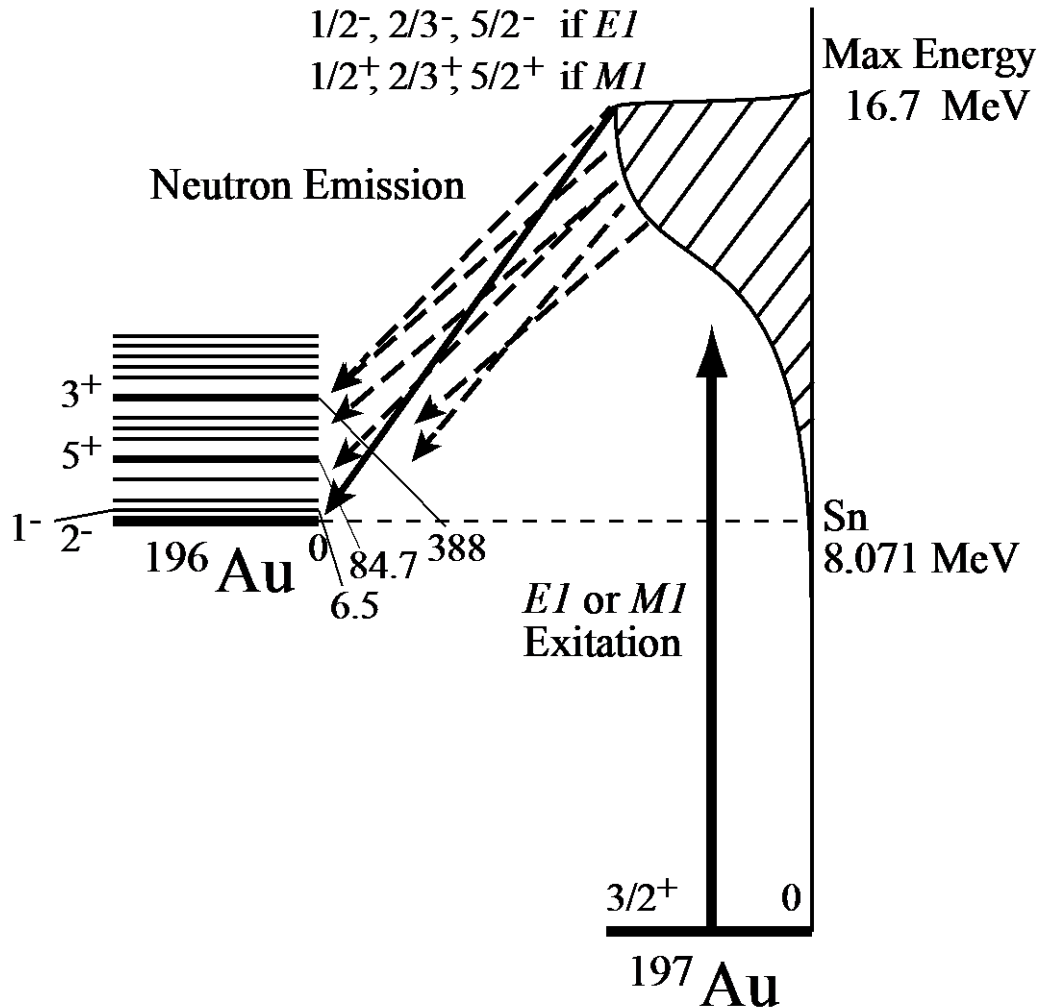
東日本大地震のため閉鎖



ニュースバル

現在稼働中のユーザーファシリティは2か所のみ

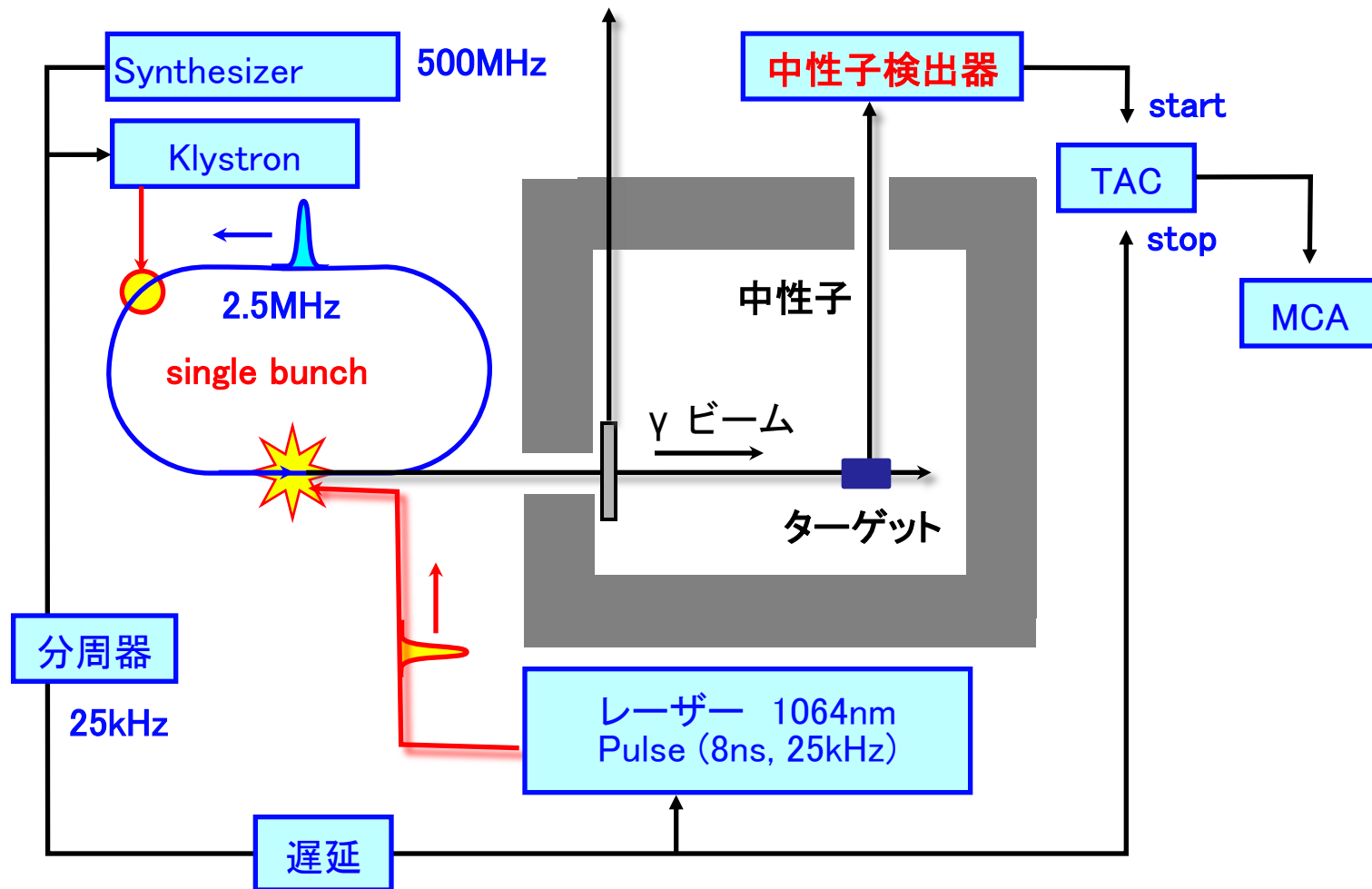
Level scheme of ^{196}Au



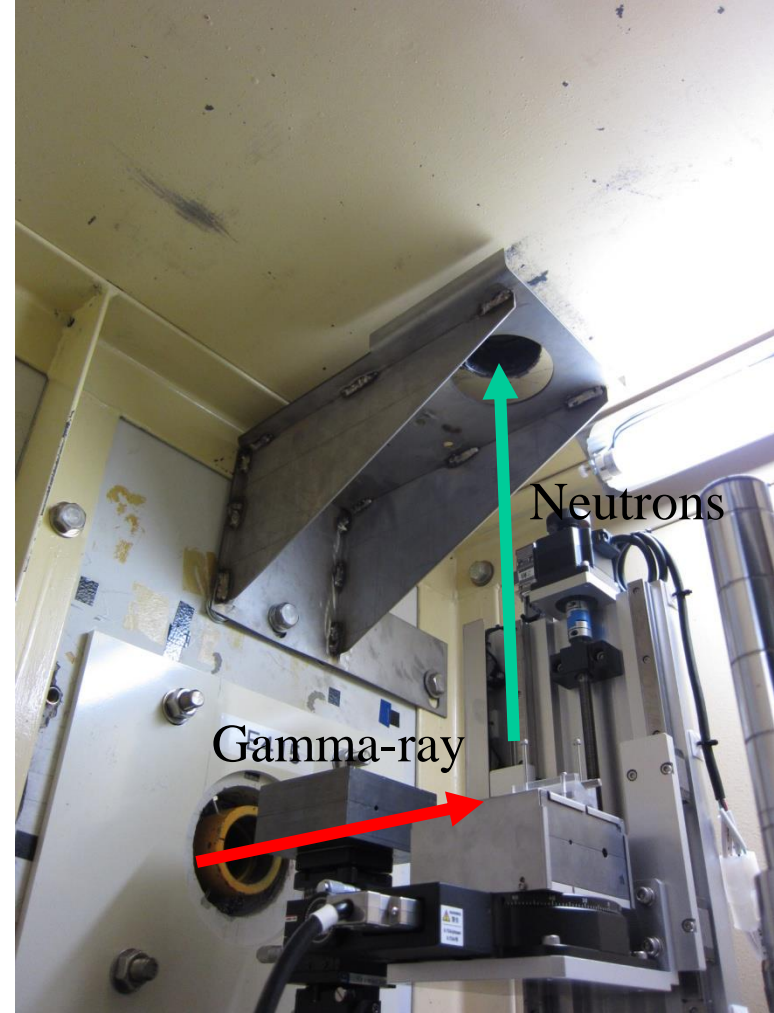
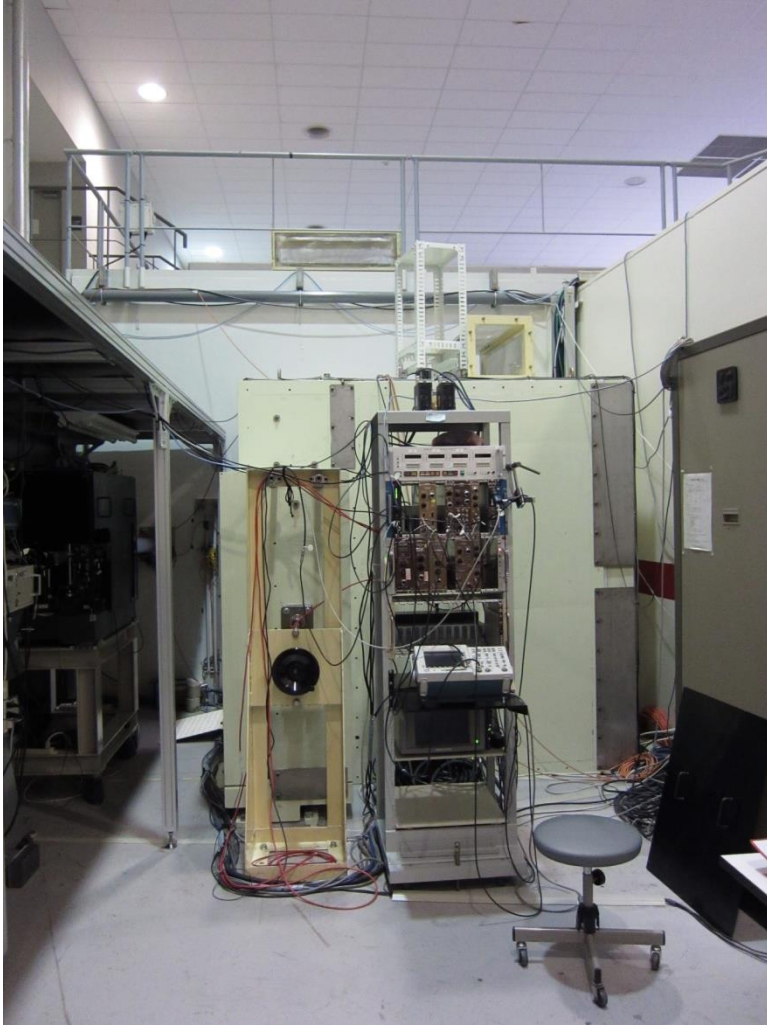
中重核では状態密度が高くなって、非対称性が測定できないのでは？

TOF測定

フラックス計測

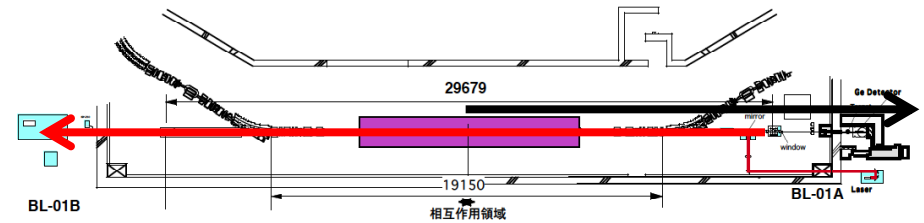
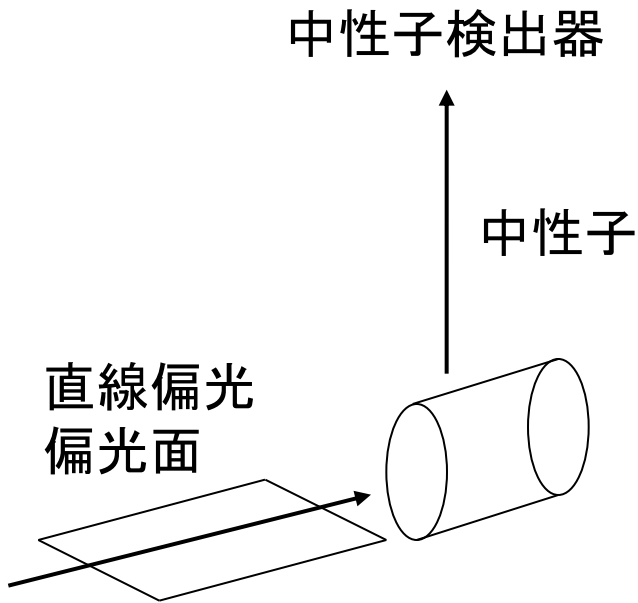


実験室



直線偏光面の変更

- ミラーが偏光面を変える可能性がある

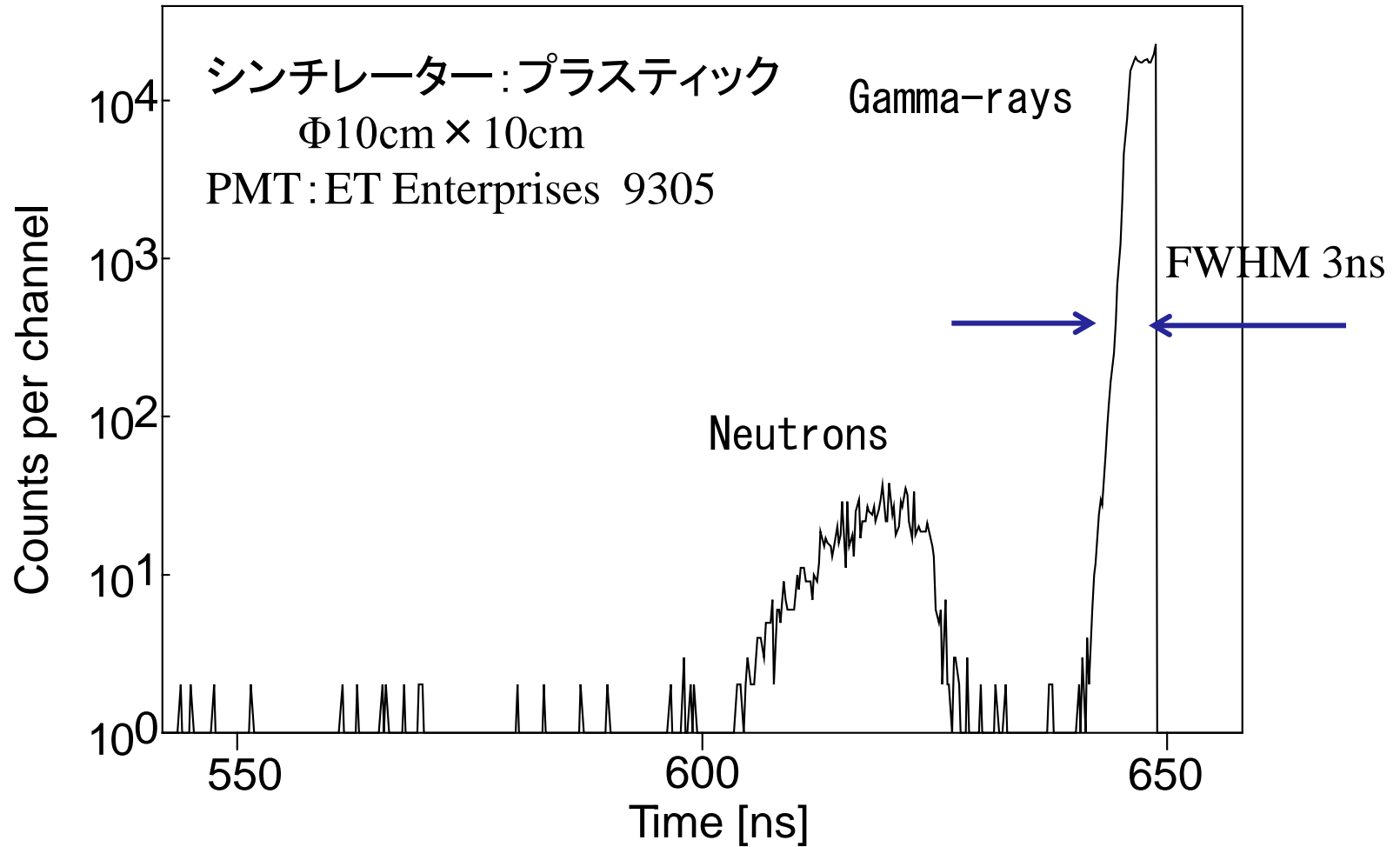


レーザーを散乱後にリングの外に導き、
直線偏光面を確認

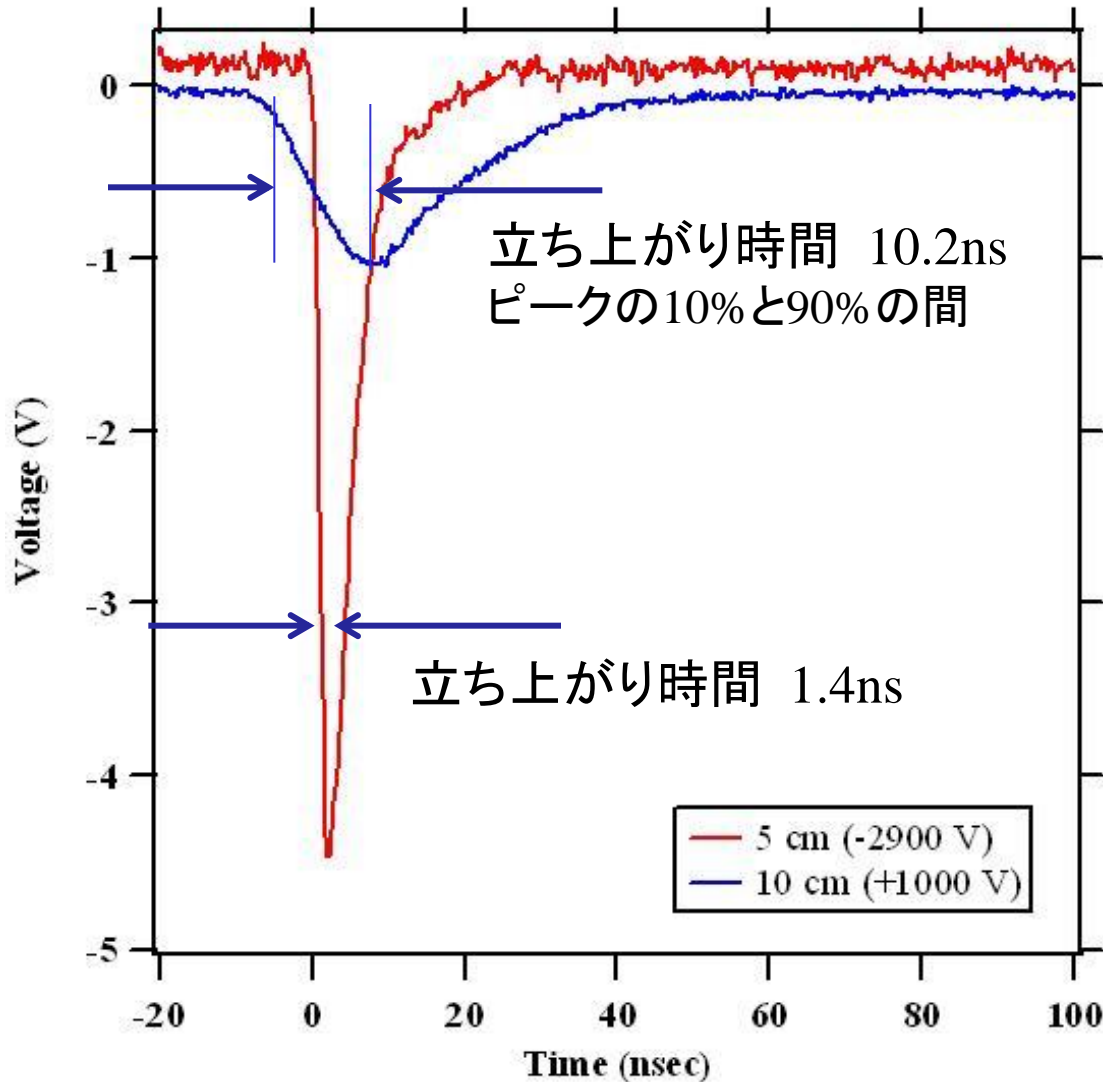
レーザーを散乱ポイントからミラー
なしで蓄積リングの外に

レーザーの直線偏光面を変更

Auの中性子TOF

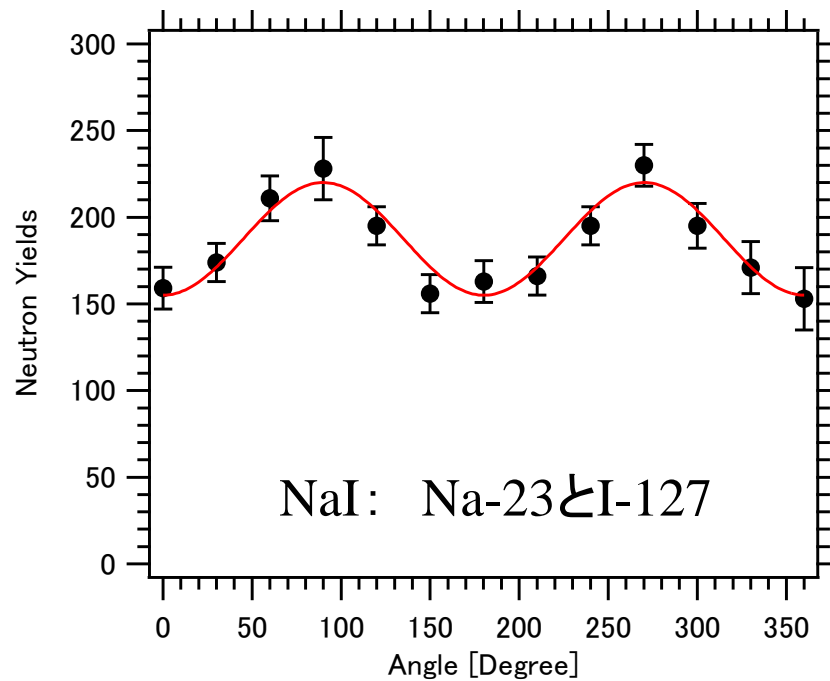
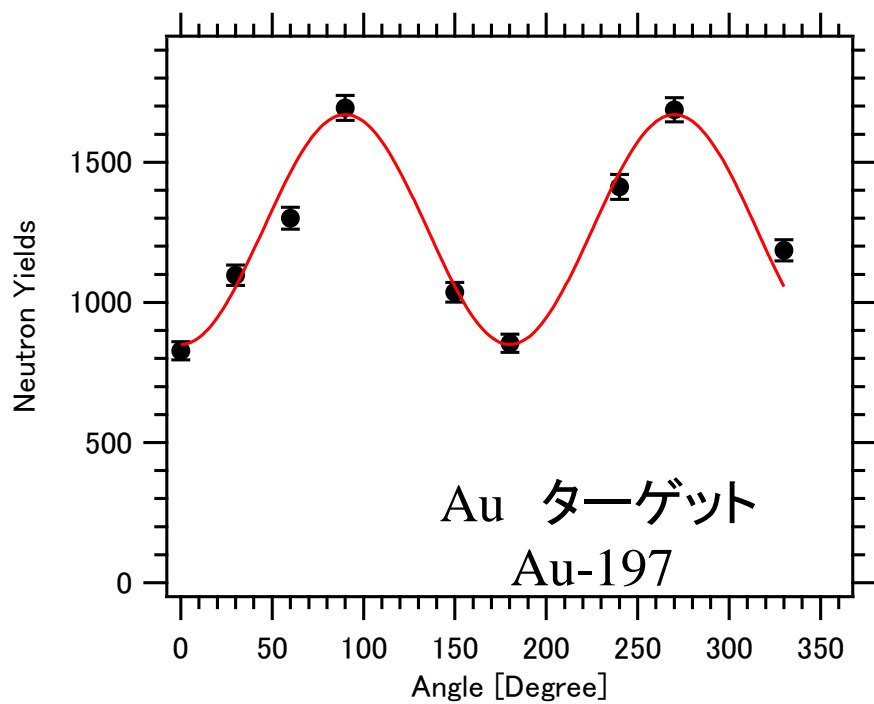


時間分解能

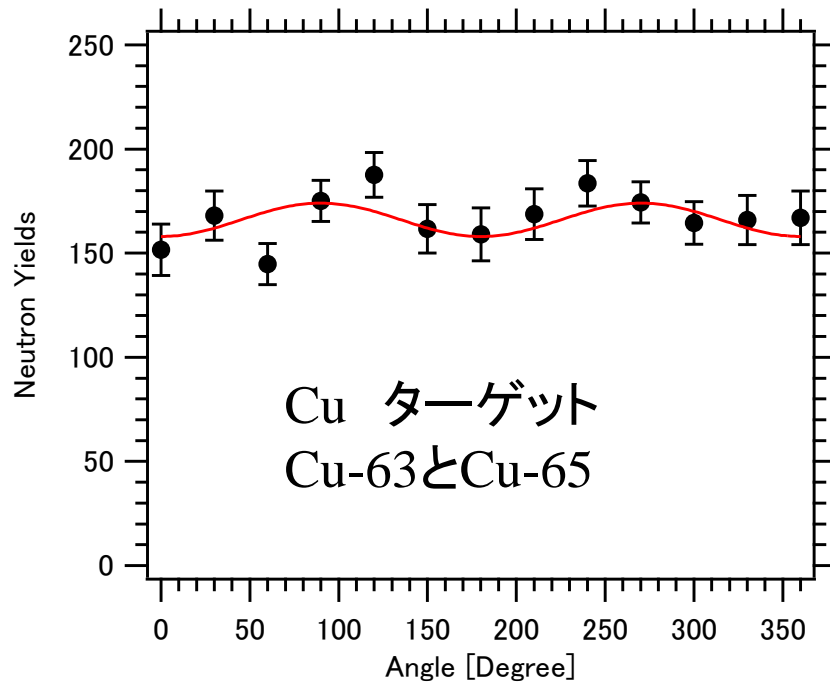


γ 線に対する
レスポンスを比較

実験結果



実験結果2



3種類のターゲット
(5種類の核種)

Au-197

Na-23 + I-127

Cu-63 + Cu-65

全て

$a + b \cdot \sin^2 \Phi$

で再現できる！

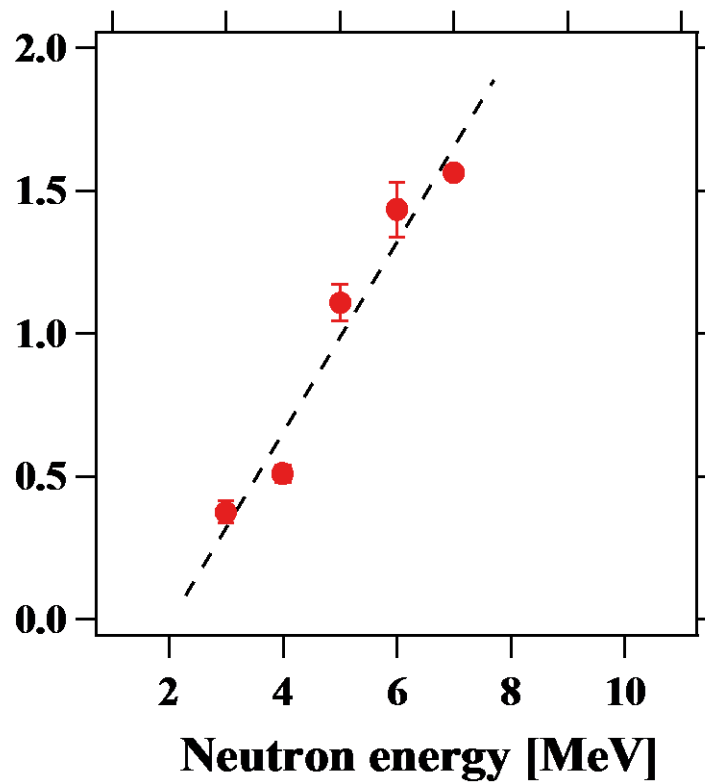
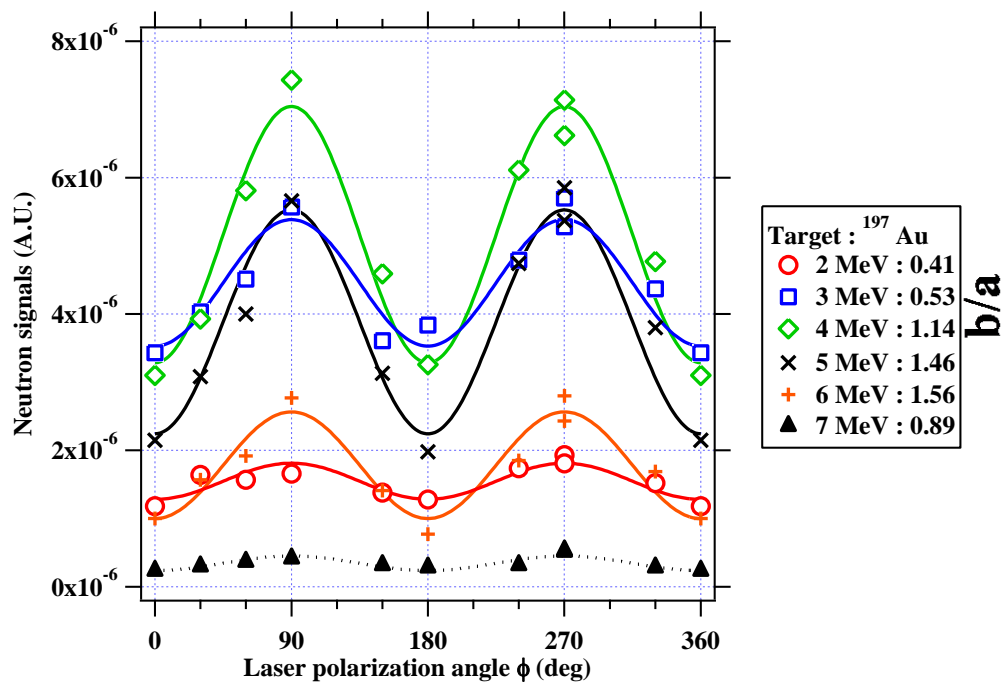
Question

Why the anisotropy for Gold is the maximum ?

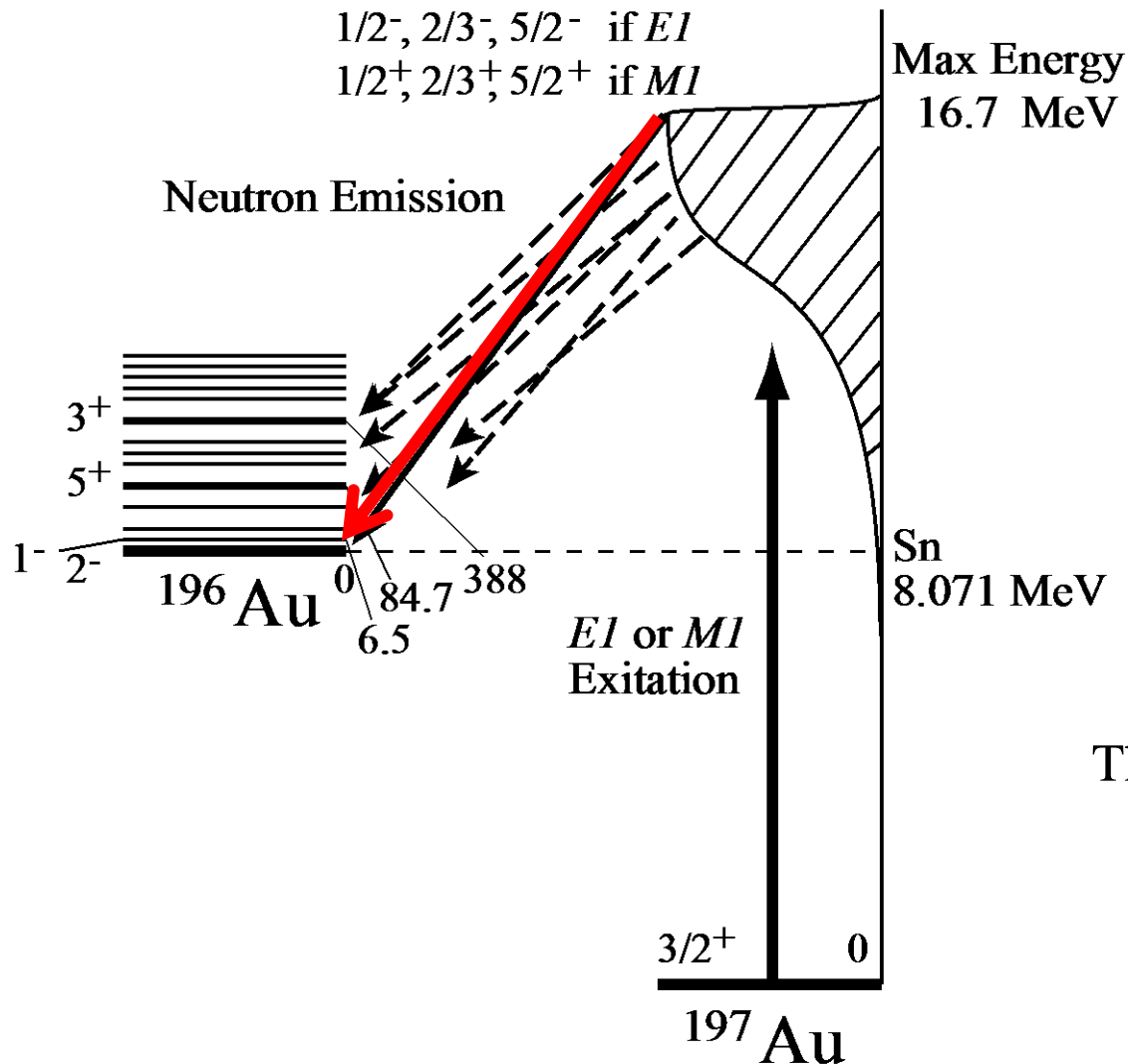
In the heavy nuclei, level density becomes high and anisotropy may vanish.

However, the measured result is opposite with this prediction.

非対称性のエネルギー依存性



Level scheme of ^{196}Au

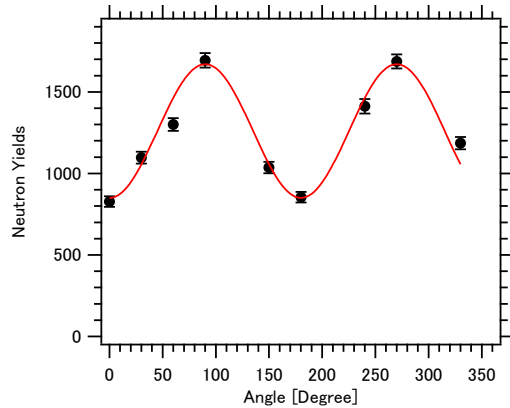


The highest neutron is the transition from the highest excited state to the ground state. Thus, the anisotropy is clearly observed.

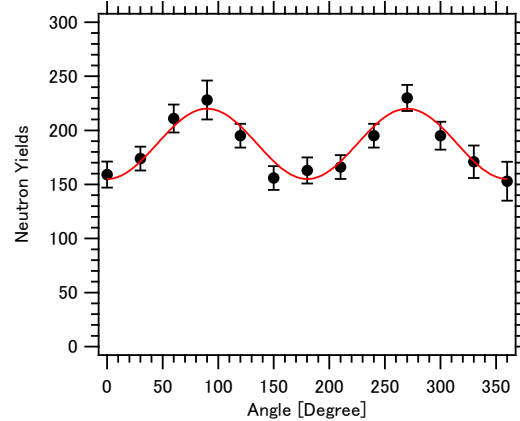


The energy gate is effective !

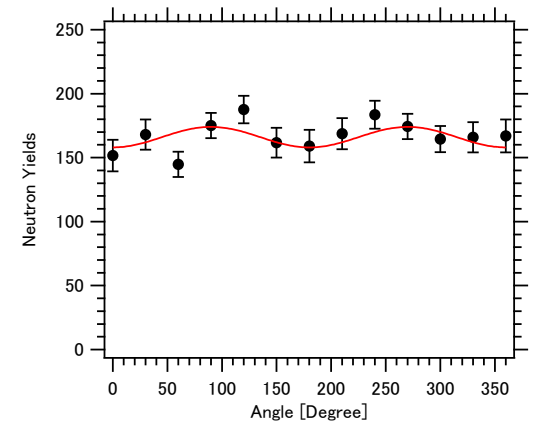
非対称性の質量依存性



Au $Z=79$
Ns=8.1 MeV



I $Z=53$
Ns=9.1 MeV



Cu $Z=29$
Ns=10 MeV (^{63}Cu)
9.9MeV(^{65}Cu)

Z 小

中性子離別エネルギー 大

中性子最大エネルギー 小

非対称性は、高エネルギー中性子の割合に起因していると推測される

K. Horikawa, et al. to be published in Phys. Lett. B (2014)

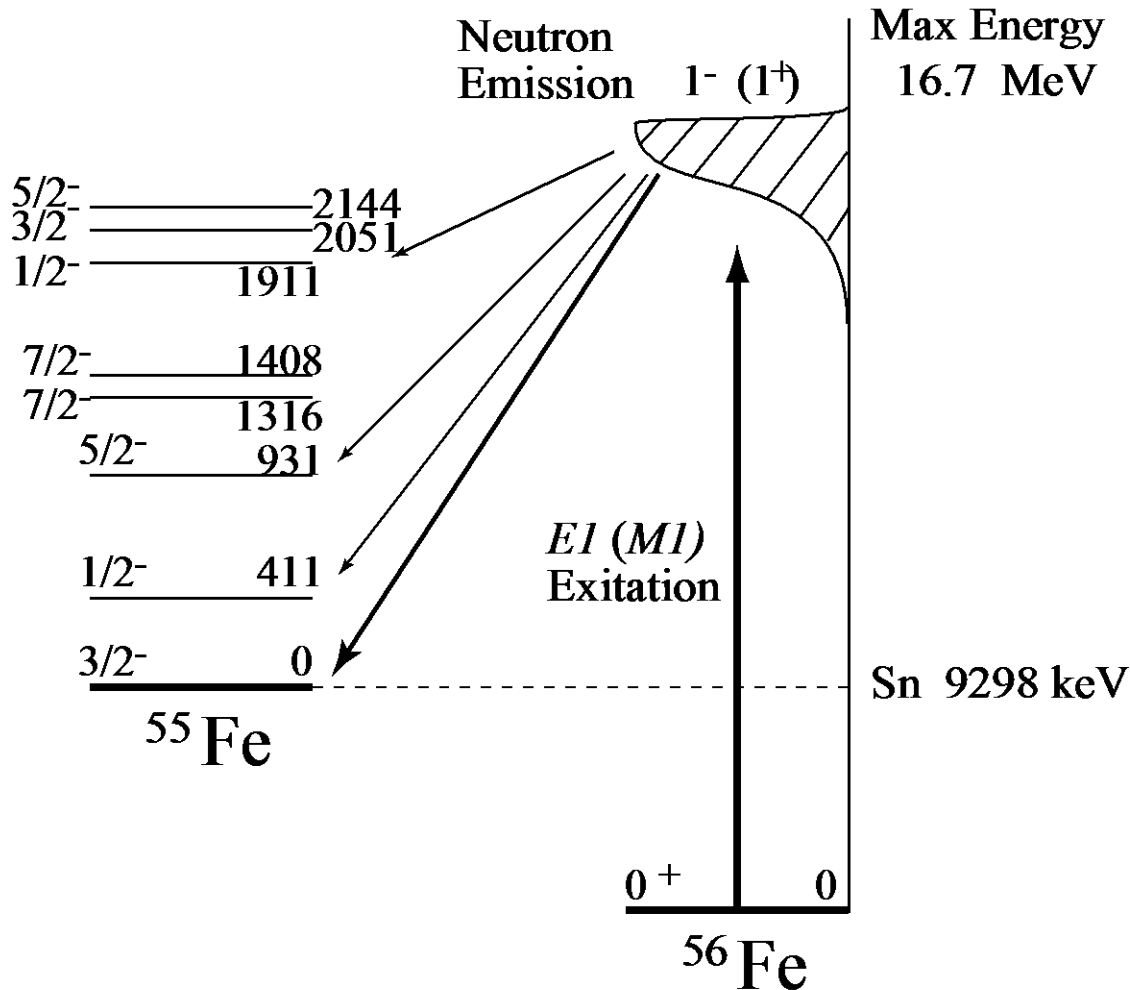
E1/M1 ratioをどう引き出すか？

- 始状態、終状態が同じ場合、 b/a の符号がE1とM1で逆になるはず
- Sin関数の性格上、 $\Phi=0$ 度と90度の比を求めればよい
- $\Theta=90$ 度以外は不明
- 核構造とどう結びつけるか？



緒方さんとの
共同研究

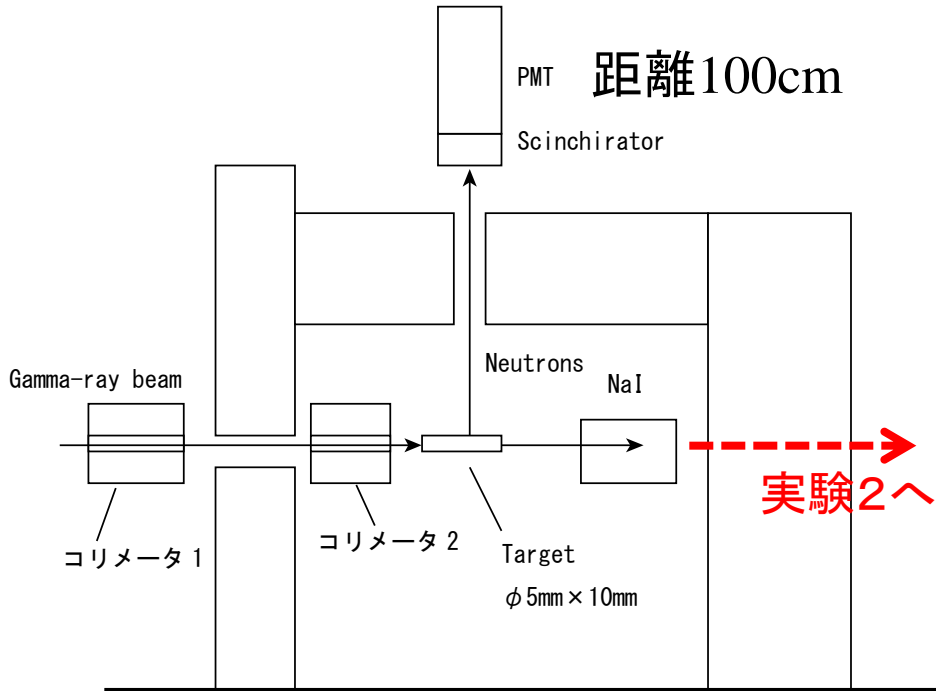
偶偶核 ^{56}Fe の実験



- 偶偶核
- 数十g必要
- ^{55}Fe の第一励起状態は411keV
- 超新星爆発では鉄コアのニュートリノ透過率に有益な情報

^{56}Fe 実験レイアウト

実験1 側面から

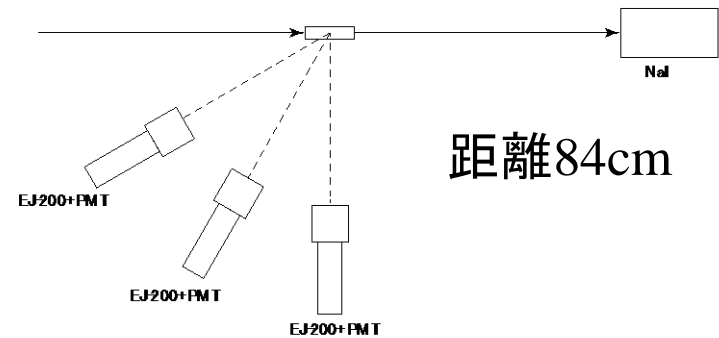


直線偏向面を変えて測定

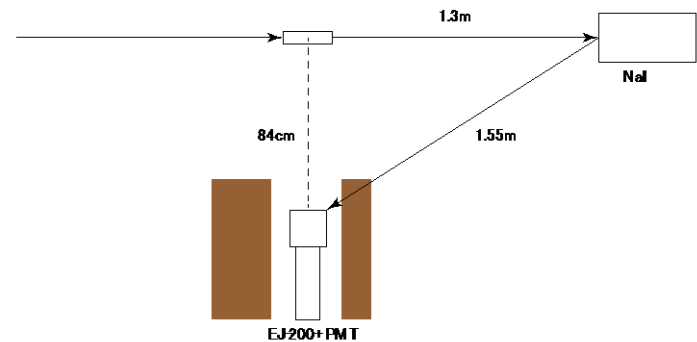
鉄ターゲット $\Phi 10\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。

実験2 (GACKO)

上面から



側面から

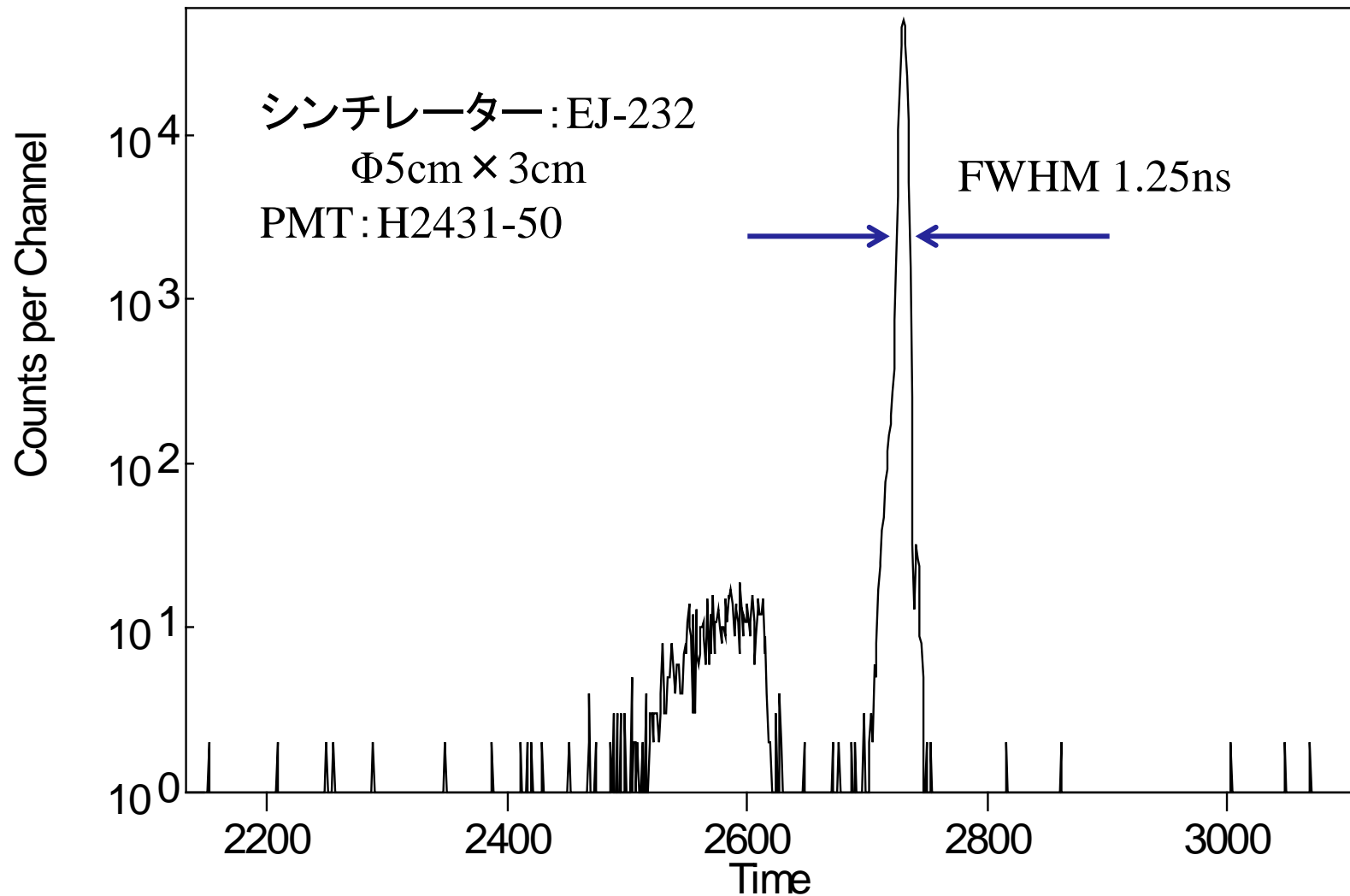


⊙方向の角度分布を同時に測定

シンチレーターの特性

	EJ-200	EJ-232
Light Output, % Anthracene	64	55
Scintillation Efficiency, photons/1 MeV	10,000	8,400
Wavelength of Max. Emission, nm	425	370
Rise Time, ns	0.9	0.35
Decay Time, ns	2.1	1.6

56FeのTOF 実験1



誤差

- ガンマ線のパルス幅 60ps
- 回路のジッター 1ns
- 検出器の時間分解能 1ns以下
- 検出器の厚さ/飛行時間距離 3% ~ 1ns
- ターゲット中での中性子の散乱 小さい
- 入射ガンマ線のエネルギー幅 ~ 3MeV !



入射ガンマ線のエネルギー幅を500keV程度にすれば($dE/E \sim 3\%$)、 ^{56}Fe の分解能可能

まとめ

1. LCSガンマ線の長所の一つは、直線(円)偏光が可能な点
2. 直線偏光ガンマ線による(γ, n)反応は1957年に理論的に予言されていたが、最近まで忘れられていた。
3. ニュースバルで中性子角度分布を計測して、理論的予言を検証
4. 終状態を決めるために、 $dE/E \sim 3\%$ 以下のLCS γ 線ビームを使えば、M1/E1 ratioを決めることができる(^{56}Fe の場合)。
5. $dE/E \sim 1\%$ 以下の次世代LCS γ 線(T-REX、ELI-NP、ERL-LCS)等が完成すれば、非常に有効な手法になるだろう。