

酸素原子核の負ミューオン捕獲反応における中性子多重度の測定

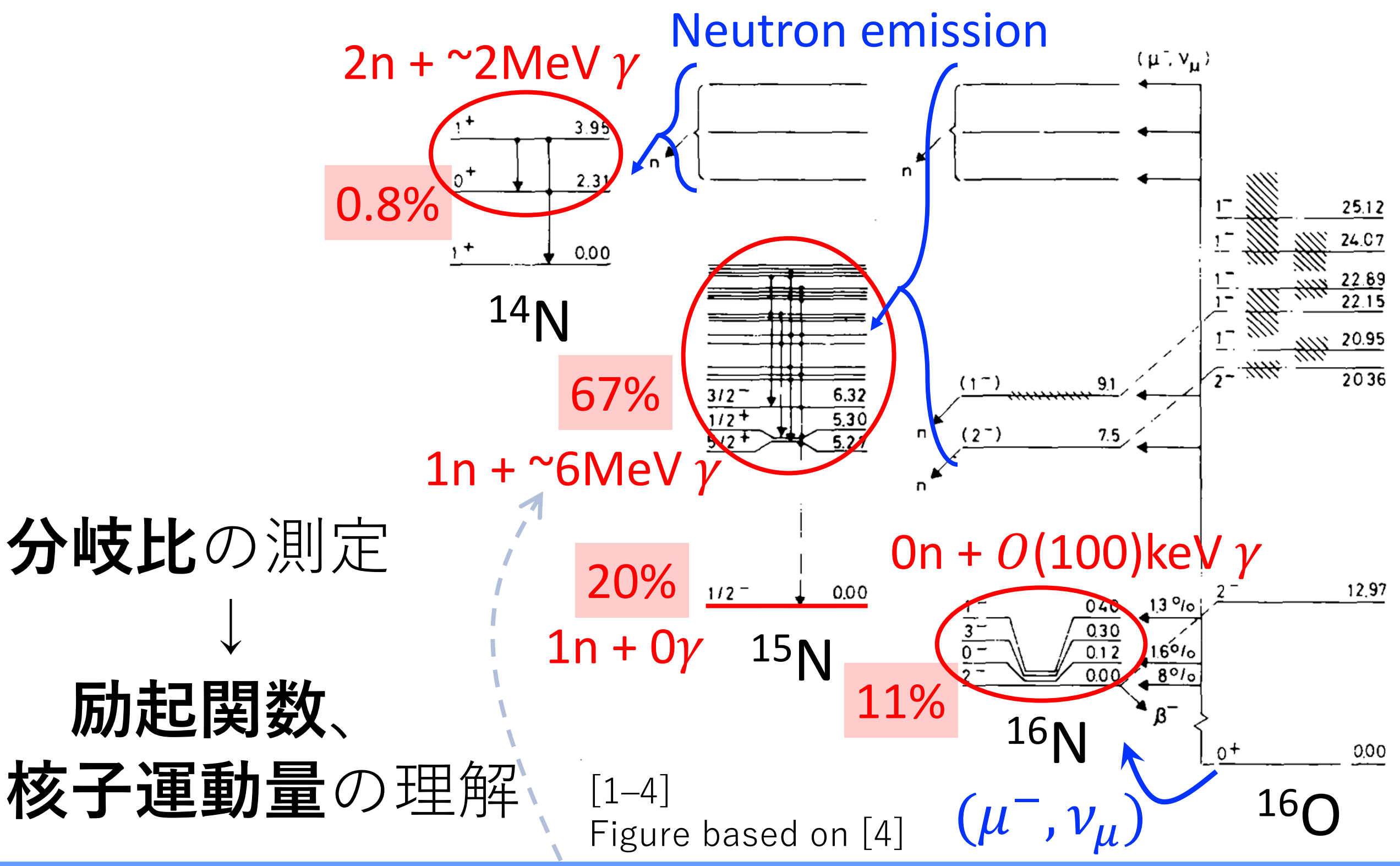
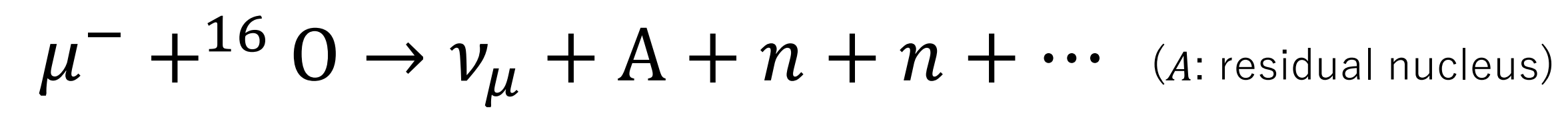
三木信太郎（宇宙線研究所 神岡施設）

arxiv: 2502.17002



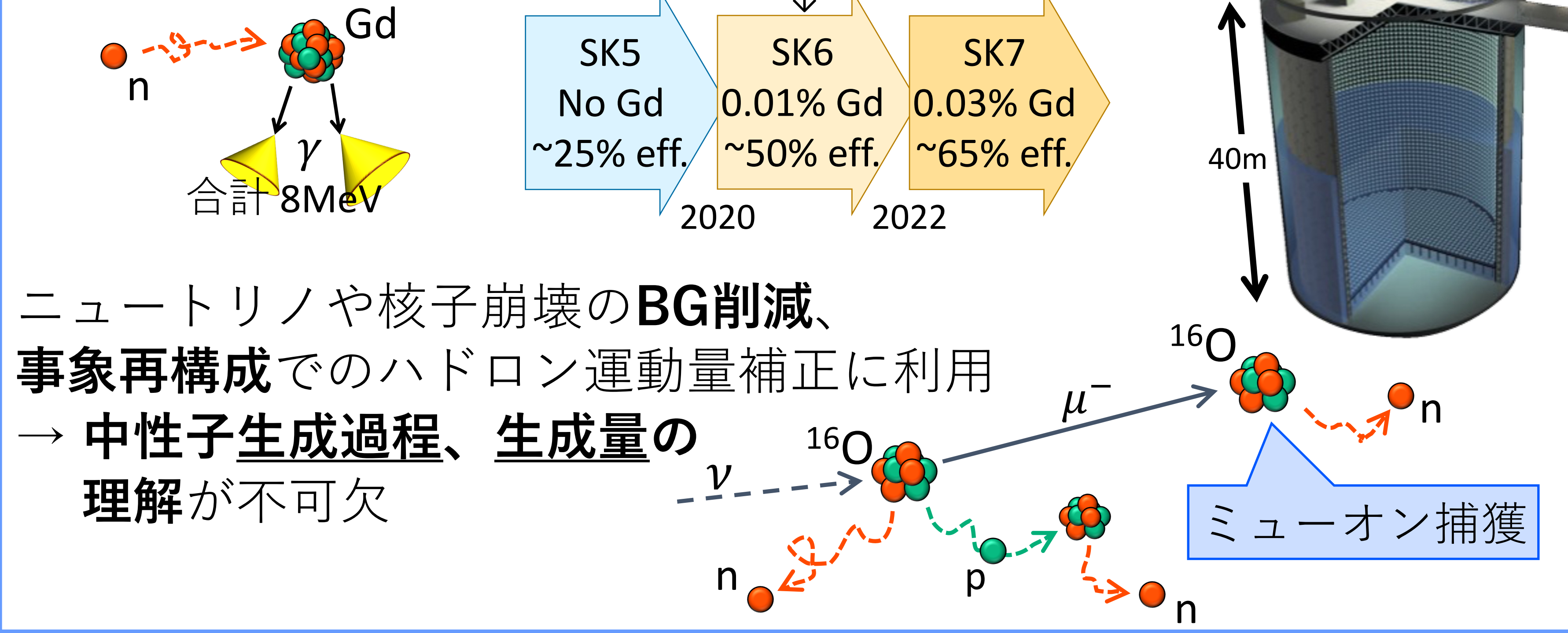
負ミューオン捕獲反応

μ^- は水中で18%が原子核 ^{16}O に捕獲される：



背景：SK-Gdでの中性子検出とその利用

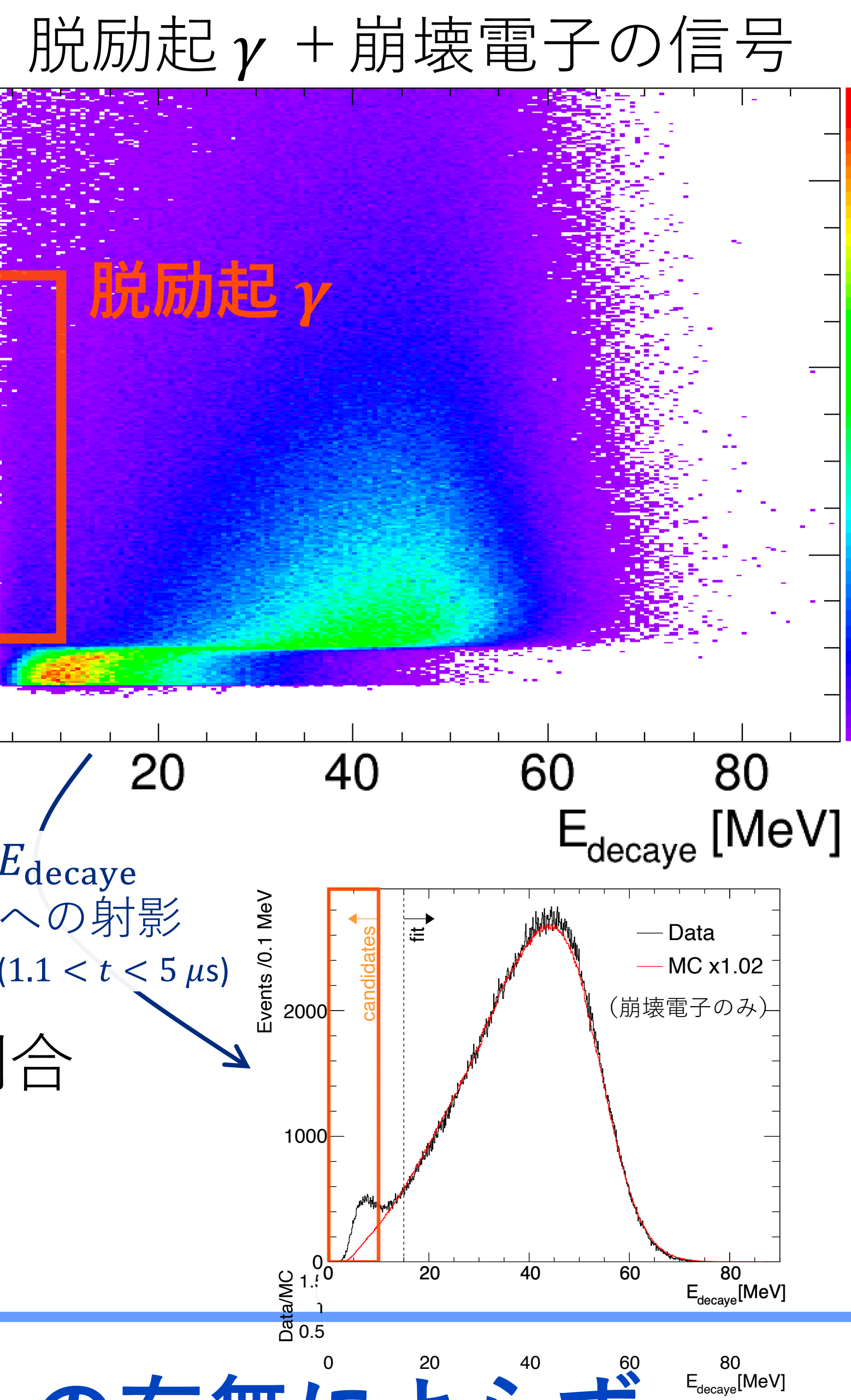
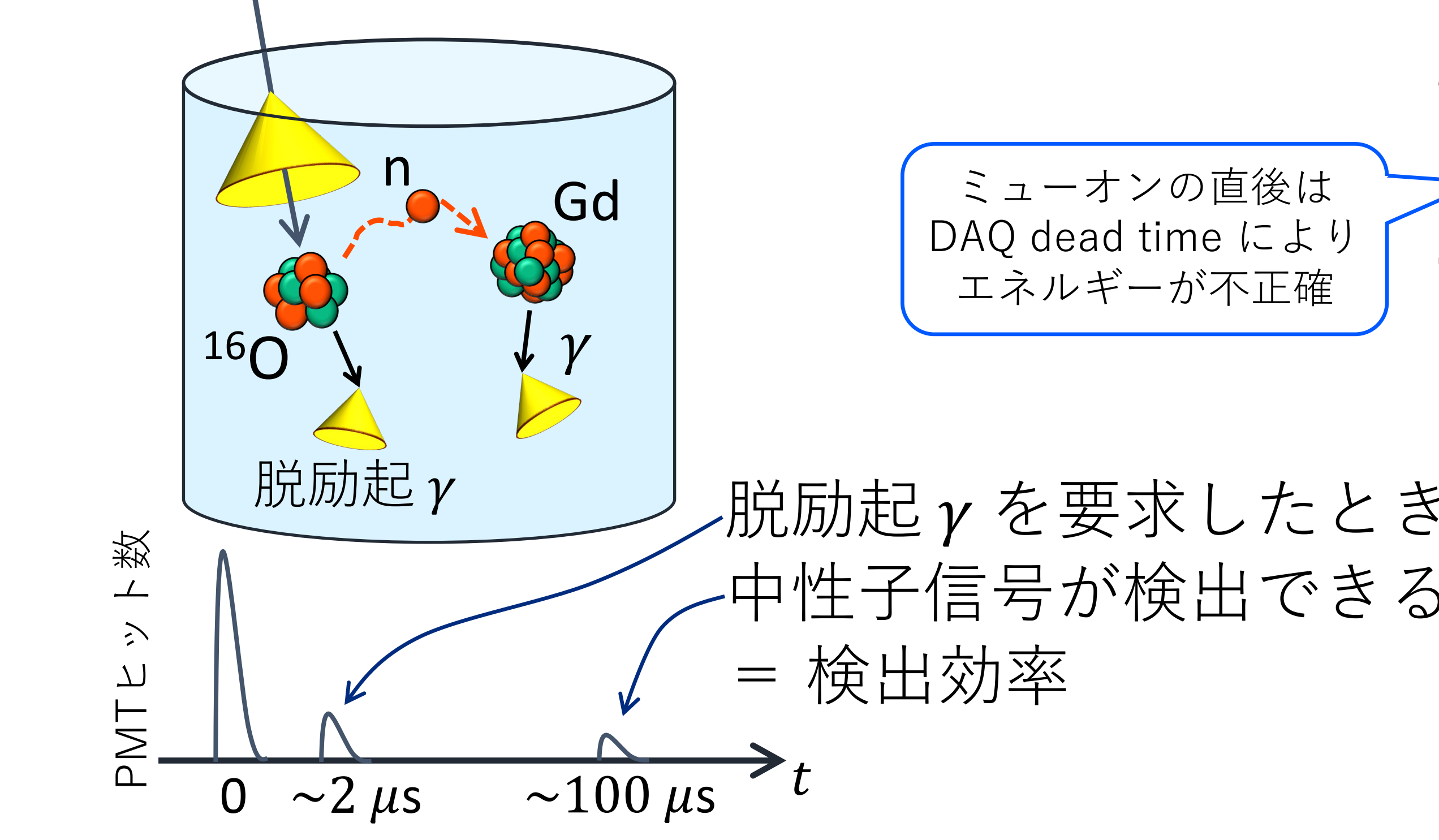
スーパーカミオカンデ (SK)：50 kton 水チェレンコフ検出器。
2020年にガドリニウム (Gd) を溶解し、
中性子検出効率が向上。



中性子検出効率の測定： $\mu^- + ^{16}\text{O} \rightarrow \nu_\mu + ^{15}\text{N} + n + \gamma$ をコントロールサンプルとして

原理
数MeV以上の γ を伴う捕獲過程は
ほとんどの場合中性子をちょうど1個出す

ミューオン源：検出器内で停止した
宇宙線ミューオン



Box 内の信号から
- 崩壊電子 (MCから推定)
- 中性子信号・その他定常BG
(時間によらない成分として)
の寄与を引く
= 脱励起 γ の数 N_γ

検出された中性子信号数 N_n
- 時間によらない成分
= 偽信号の寄与は差し引く
- $^{16}\text{O}(\mu^-, \nu nn)$ 反応の影響を
補正

$$\text{検出効率} = \frac{N_n}{N_\gamma} = 50.2^{+2.0}_{-2.1} \%$$

全立体角カバー！熱中性子まで一定！

中性子多重度の測定：今度は脱励起 γ の有無によらず

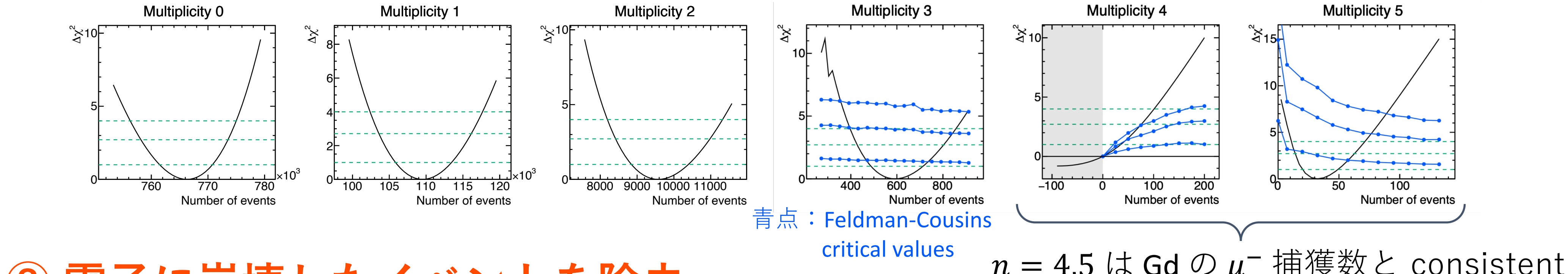
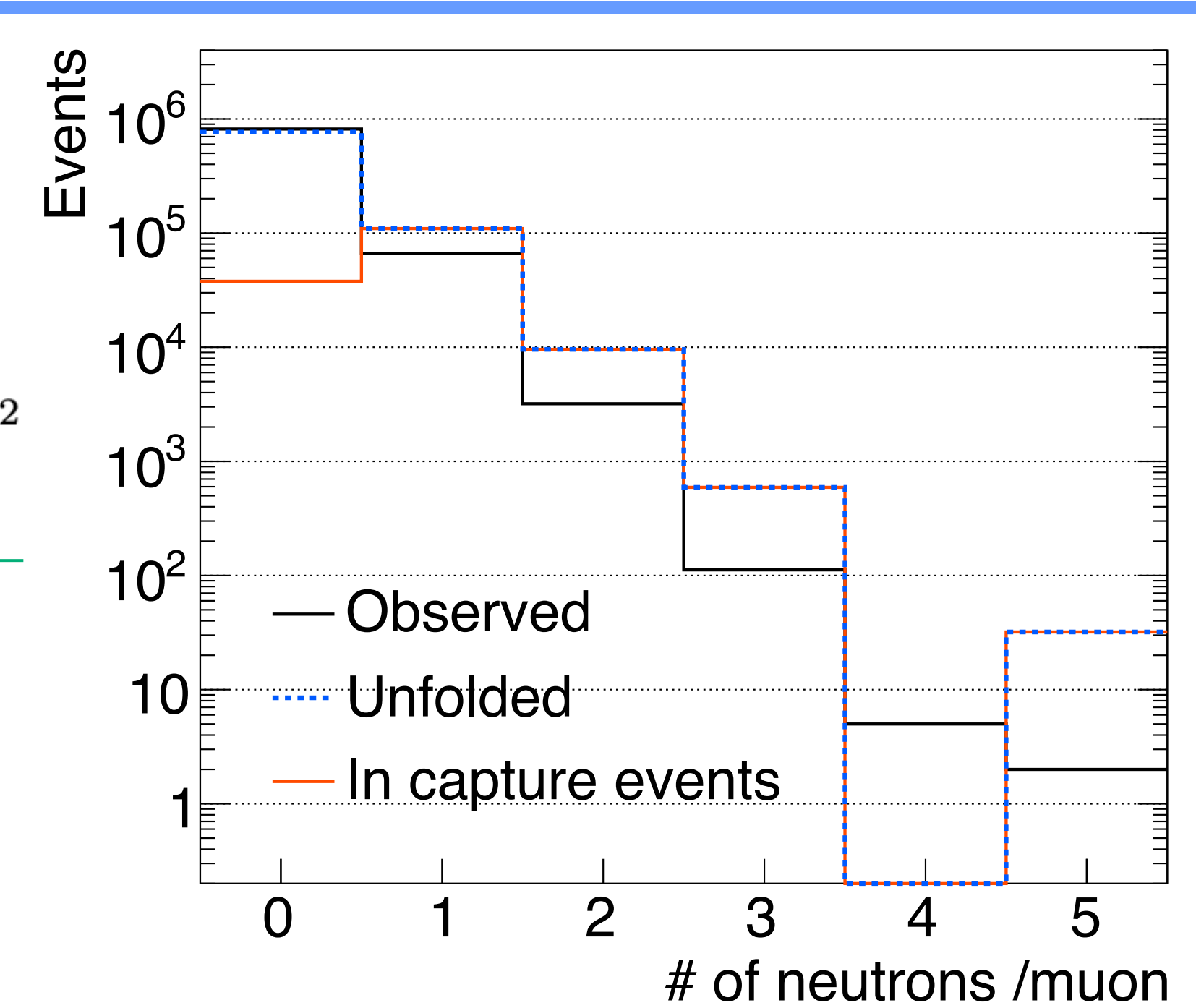
① 1ミューオンあたりの観測中性子数

明確な崩壊電子 ($E_{\text{decay}} > 15 \text{ MeV}$) があるイベントは除いた。

② χ^2 フィットで unfold した中性子数

$$\chi^2 = 2 \sum_{i=0}^5 \left(E_i(n) - O_i + O_i \log \frac{O_i}{E_i(n)} \right) + \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\sigma_\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{p - p_0}{\sigma_p} \right)^2$$

Poisson likelihood
 $E_i(n)$: 真の分布が n_i の場合の観測期待値
 O_i : 観測中性子数分布
Systematic errors
 ε : 検出効率
 p : 誤検出率
誤検出率 p の寄与: $E_i(n) = t_i(1-p) + \sum_{j=0}^{i-1} t_j p^{i-j}$
検出効率 ε の寄与: $t_i = \sum_{j=i}^{\infty} n_j C(j, i) \varepsilon^i (1-\varepsilon)^{j-i}$



③ 電子に崩壊したイベントを除去

ミューオン捕獲反応の全体数を
宇宙線の μ^+/μ^- 比 [5]、 μ^- の捕獲
確率 [1] から算出。
→ $n=0$ の事象を減らす

$$P(0) = 24 \pm 3\%, P(1) = 70^{+3}_{-2}\%, P(2) = 6.1 \pm 0.5\%, P(3) = 0.38 \pm 0.09\%$$

まとめ

- 負ミューオン捕獲反応における中性子多重度を SK-Gd で測定した。
- 中性子検出効率も、負ミューオン捕獲反応で脱励起 γ 線を要求したコントロールサンプルから測定した。

参考文献

- T. Suzuki, D. F. Measday, and J. P. Roalsvig, Physical Review C 35, 2212 (1987)
- D. F. Measday, Physics Report 354, 243 (2001)
- F. R. Kane *et al.*, Physics Letters B 45, 292 (1973)
- A. Van Der Schaaf *et al.*, Nuclear Physics A 408, 573 (1983)
- H. Kitagawa *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Physical Review D 110, 082008 (2024)