

# 研究用原子炉ニュートリノを使った 研究の可能性2

大阪大学核物理研究センター  
梅原さおり

Umehara, Saori

RCNP, Osaka University

[umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp](mailto:umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp)

吉田斉、嶋達志、伏見賢一、裕隆太、小川泉

# 概要

- 福井研究炉を用いたニュートリノ実験
  - 短基線ニュートリノ測定
    - ステライルニュートリノ測定
  - 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル測定
    - 振動実験でのニュートリノスペクトルの異常調査
    - 低エネルギー領域(1.8MeVあたり)測定のためには
      - 環境バックグラウンド低減
      - バックグラウンドの少ない検出器構築
        - Neutrino-4実験を参考に
  - ニュートリノ原子核反応実験

# 原子炉ニュートリノスペクトル

## □ 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトルモデル

### ■ 総和計算

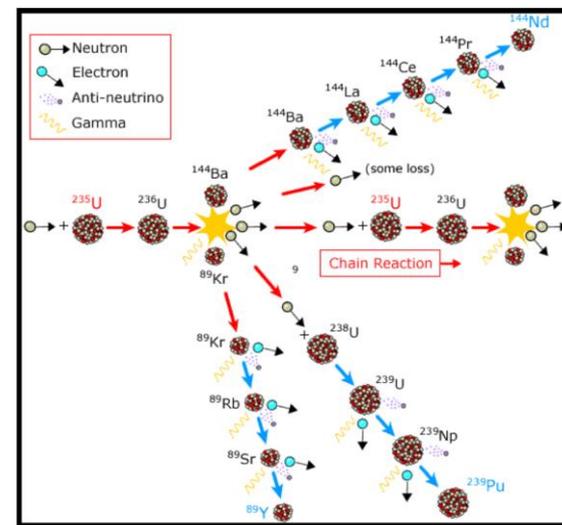
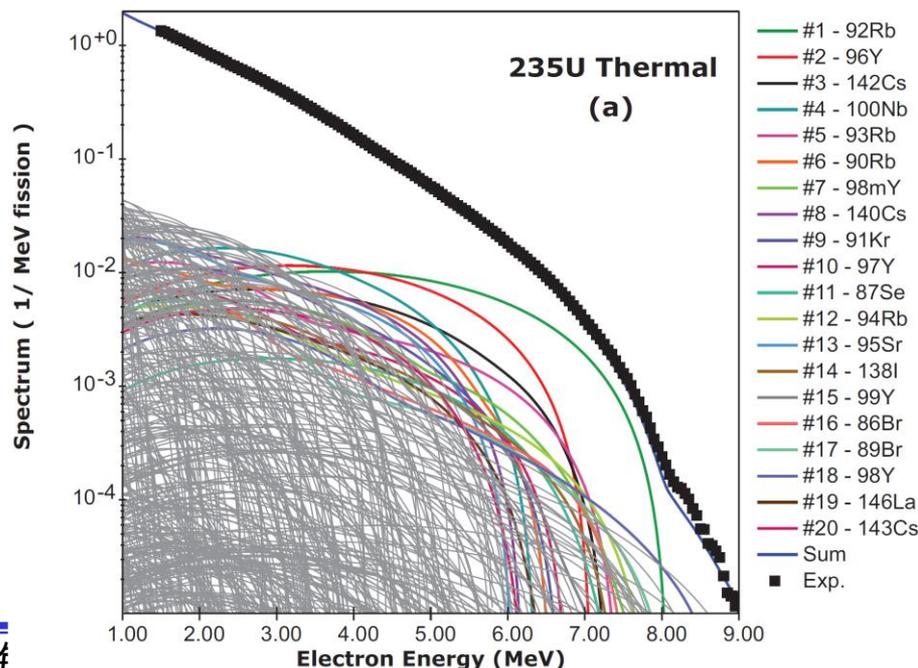
■ 核分裂生成物からの寄与を足し合わせ

### ■ ILLデータ

■ 測定電子エネルギースペクトルから足し合わせ

## □ スペクトルモデルの違い

■ 大きくはない。



From TAUP2021 slide by Cecile Jollet

総和計算によるスペクトルとILLデータによるスペクトルに大きな違いはないが。。

A. A. Sonzogni et al, PRC 91, 011301(2015)

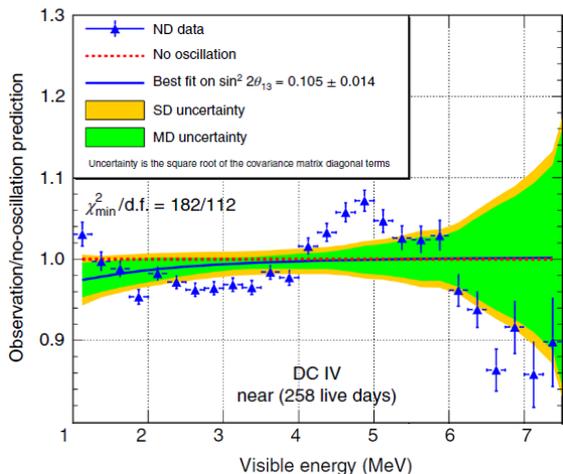
# モデルとの比較

From TAUP2021 slide  
by Cecile Jollet

- 独立の原子炉反ニュートリノ測定(短距離実験)
  - すべてにおいて4-6MeVで事象の増加(~20%)が観測
  - 2-3MeVで数%事象の減少も観測??

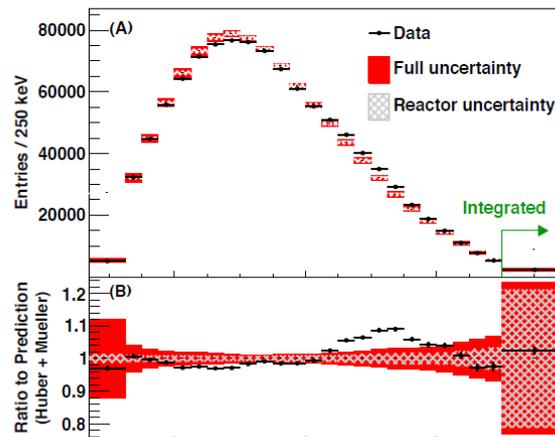
## Double Chooz

*Nature Phys.* 16 (2020) 5, 558-564



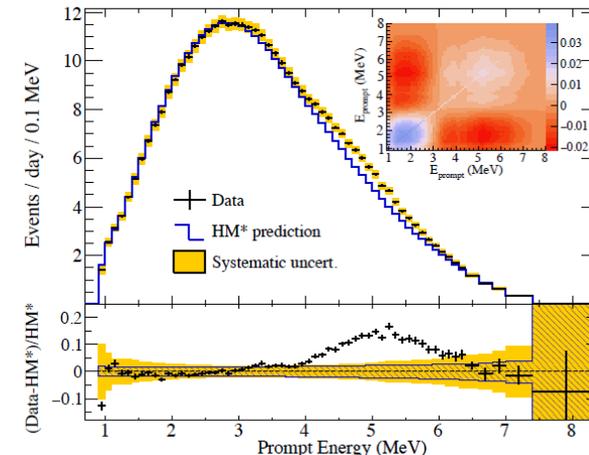
## Daya Bay

*Chin.Phys.C* 41 (2017) 1, 013002



## RENO,

*arXiv:2010.14989v2*



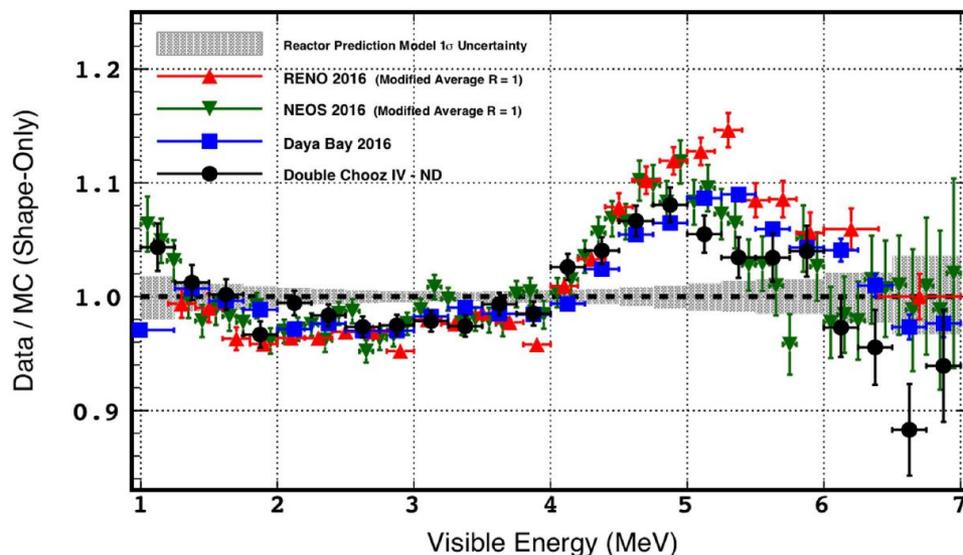
	Double Chooz	Daya Bay	RENO
距離(m)	400m	365m	290m
原子炉電力	8.5GW	17.4GW	16.8GW
検出器質量	8トン	2x2x20 トン	16トン

- ステライルニュートリノ? 原子炉ニュートリノスペクトル?

# モデルとの比較

From TAUP2021 slide  
by Cecile Jollet

- 独立の原子炉反ニュートリノ測定(短基線実験)
  - すべてにおいて4-6MeVで事象の増加(~20%)が観測
  - 2-3MeVで数%事象の減少も観測??



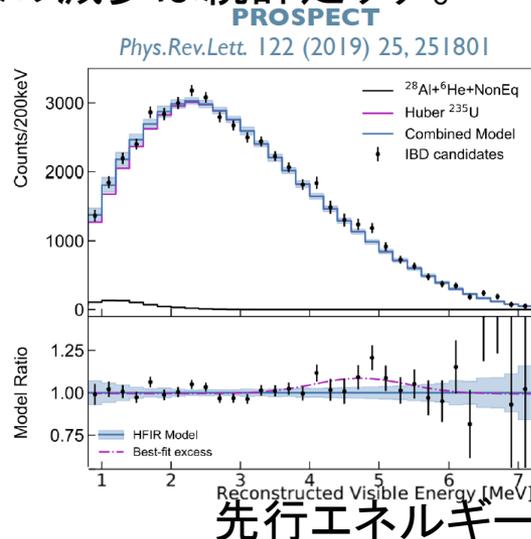
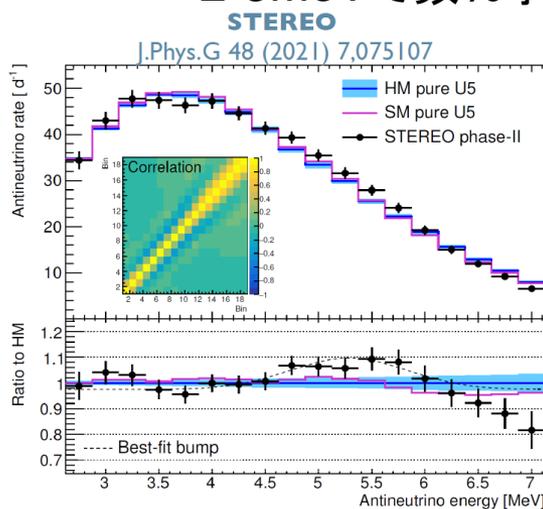
	Double Chooz	Daya Bay	RENO
距離(m)	400m	365m	290m
原子炉電力	8.5GW	17.4GW	16.8GW
検出器質量	8トン	2x2x20 トン	16トン

- ステライルニュートリノ? 原子炉ニュートリノスペクトル?

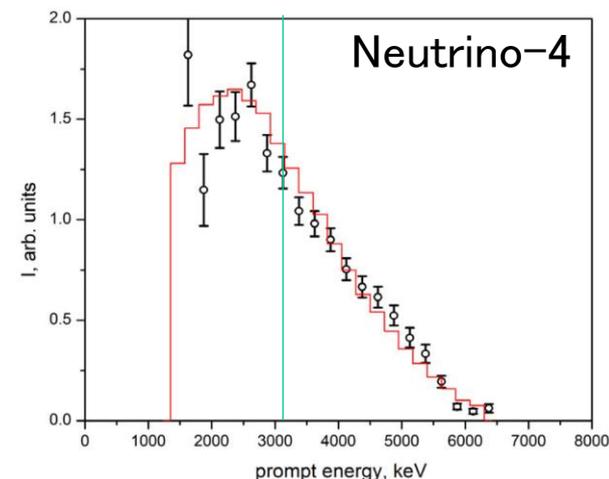
# モデルとの比較

From TAUP2021 slide  
by Cecile Jollet  
PRD 104, 032003(2021)

- ❑ 独立の原子炉反ニュートリノ測定(超短距離実験)
  - 4-6MeVで事象の増加、あるとはいえない。(～2σ)
  - 2-3MeVで数%事象の減少は統計足りず。



$$E_\nu = E_{\text{prompt}} + 0.8\text{MeV}$$



	STEREO	PROSPECT	Neutrino-4	本検出器
距離(m)	9-11m	7-12m	6-12m	最小2.5m
原子炉電力(S)	58MW	85MW	100MW	10MW
検出器質量(S)	2.4トン	4 トン	1.4トン	フルで3.5トン
閾値(S&N)	2.8MeV	1.8MeV	～3.8～MeV	---
測定 S/N	0.9	0.8	0.3	---

# 原子炉反ニュートリノ測定

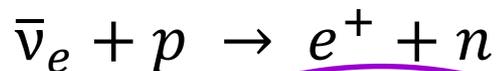
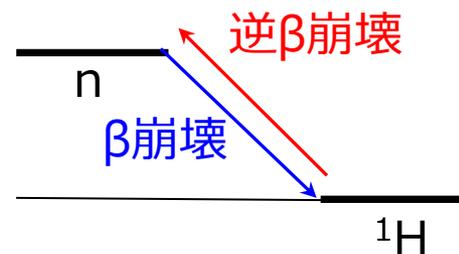
## □ 逆ベータ崩壊(IBD:Inverse Beta Decay)

遅延同時信号

先行信号:  $2 \times 511 \text{keV} + e^+ \text{エネルギー}$   
↓  $\sim 40 \mu\text{sec}$

遅延信号:  $\sim 8 \text{MeV}$

陽子逆ベータ崩壊での測定の場合  
IBDの閾値:  $\bar{\nu}_e$  エネルギー  $1.8 \text{MeV}$   
(ベータ崩壊Q値が小さい核が低閾値)



γ線(511keV)

先行信号  
 $\sim 10 \text{cm}$

$\bar{\nu}_e$

γ線(511keV)

p

n

(n, γ)

Gd

全8MeV

$\sim 50 \text{cm}$

遅延信号

γ線

γ線

γ線

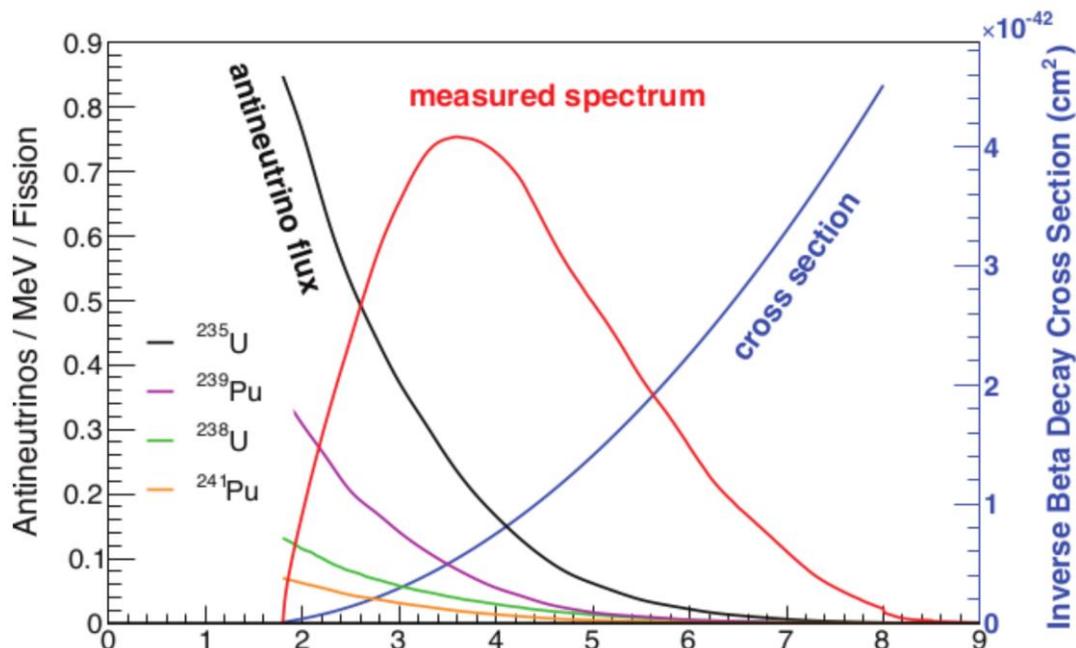
# 原子炉反ニュートリノ測定

From TAUP2021 slide  
by Cecile Jpllet

- 陽子逆ベータ崩壊を用いた場合
  - 観測できる反ニュートリノスペクトル
    - 閾値は1.8MeV
    - 低エネルギーは散乱断面積が小さい
    - 高エネルギーは、ニュートリノフラックスが小さい
    - 結果、~4MeV(visibleエネルギーで~3MeV)が感度がよい

陽子逆ベータ崩壊の場合  
の観測できるスペクトル

別の原子核を使えば？



# 観測できるエネルギー閾値

## □ 逆ベータ崩壊を使用する場合

### ■ 崩壊後の核のQ値が小さいほど低い

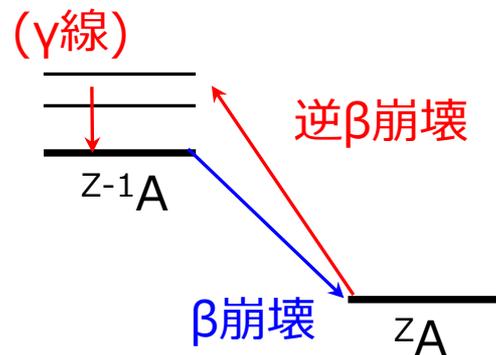
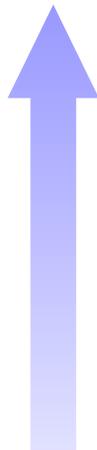


Table 2. Candidates of target for terrestrial antineutrino det

Target	$E_{th}$ [MeV]	Reaction Rate [TAU*]	Saturated P/T ratio	$N_T^{**}$ [kg]
$^{187}\text{Os}$	1.025	$6.3 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-25}$	$5.6 \times 10^{13}$
$^3\text{He}$	1.041	2.1	$1.2 \times 10^{-27}$	27000
$^{107}\text{Ag}$	1.055	$3.3 \times 10^{-7}$	$9.7 \times 10^{-29}$	$6.3 \times 10^{12}$
$^{131}\text{Eu}$	1.098	$1.2 \times 10^{-9}$	$4.6 \times 10^{-30}$	$2.5 \times 10^9$
$^{93}\text{Nb}$	1.114	$7.3 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-30}$	$2.5 \times 10^{13}$
$^{171}\text{Yb}$	1.119	$9.1 \times 10^{-3}$	$8.2 \times 10^{-31}$	$3.6 \times 10^8$
$^{14}\text{N}$	1.179	$7.5 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-31}$	$3.6 \times 10^{11}$
$^{79}\text{Br}$	1.181	$1.9 \times 10^{-7}$	$5.7 \times 10^{-31}$	$7.8 \times 10^{12}$
$^{35}\text{Cl}$	1.190	$3.7 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-34}$	$1.8 \times 10^{10}$
$^{135}\text{Ba}$	1.227	$1.6 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-31}$	$1.7 \times 10^{15}$
$^{155}\text{Gd}$	1.268	$1.5 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-32}$	$2.0 \times 10^{10}$
$^{33}\text{S}$	1.271	$1.2 \times 10^{-2}$	$3.8 \times 10^{-32}$	$5.3 \times 10^7$
$^{169}\text{Tm}$	1.374	$3.2 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-33}$	$1.0 \times 10^9$
$^{121}\text{Sb}$	1.409	$6.7 \times 10^{-2}$	$9.4 \times 10^{-33}$	$3.5 \times 10^7$
$^{185}\text{Re}$	1.454	$7.1 \times 10^{-3}$	$6.6 \times 10^{-32}$	$5.0 \times 10^8$
$^{199}\text{Hg}$	1.475	$9.1 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-34}$	$4.2 \times 10^9$
$^{175}\text{Lu}$	1.490	$1.8 \times 10^{-2}$	$9.2 \times 10^{-33}$	$1.9 \times 10^8$
$^{177}\text{Hf}$	1.519	$9.2 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-33}$	$3.7 \times 10^8$
$^{64}\text{Zn}$	1.600	$7.6 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-33}$	$1.6 \times 10^8$
$^{141}\text{Pr}$	1.602	$3.3 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-33}$	$8.2 \times 10^9$
$^{113}\text{In}$	1.608	$9.2 \times 10^{-6}$	$5.9 \times 10^{-33}$	$2.4 \times 10^{11}$
$^{161}\text{Dy}$	1.613	$1.9 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-34}$	$1.6 \times 10^{10}$
$^{77}\text{Se}$	1.712	$4.0 \times 10^{-3}$	$8.1 \times 10^{-34}$	$3.7 \times 10^8$
$^{153}\text{Eu}$	1.827	$5.8 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-34}$	$5.1 \times 10^9$

低閾値



高閾値

必要となる検出器サイズ  
=小さいほどよい

$^1\text{H}$ の場合で $4.6 \times 10^6$

現実的な検出器サイズではな  
かなかない

・ $^3\text{He}$ とか $^{33}\text{S}$ ?

まずは陽子逆ベータ崩壊で  
やってみる。

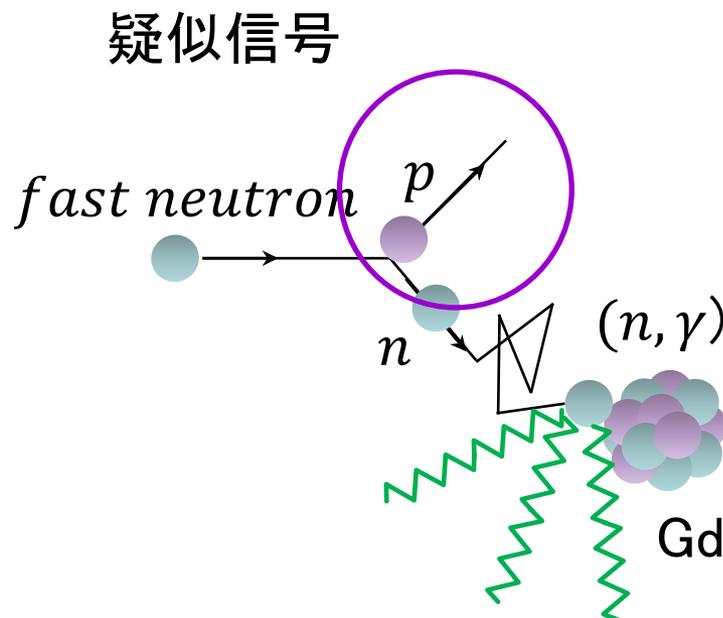
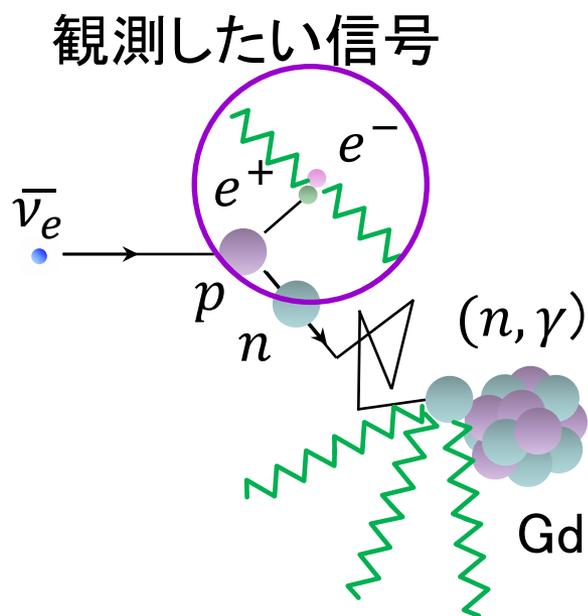
陽子の場合 →

M. Kobayashi and Y. Fukao,  
Geophysical Research Letters 18 (1991) 633

# 福井研究炉でニュートリノスペクトル

- 一般的超短距離反ニュートリノ測定
  - (場所が足りないので)遮蔽材は十分ではない。
    - 高速中性子BGが低減できていないのでは??
  - 大きな検出器にできない
    - 検出器内部起源の事象が偶然同時計数のバックグラウンドに
  - Neutrino-4の場合
    - 先行信号エネルギーで使えるデータは3MeV以上

# バックグラウンド事象



	反ニュートリノ信号	疑似信号	偶然同時計数事象
先行信号	ガンマ線+陽電子	陽子	$^{40}\text{K}$ や $^{208}\text{Tl}$ のガンマ線
遅延信号	$\text{Gd}(n, \gamma)$	$\text{Gd}(n, \gamma)$	$^{40}\text{K}$ や $^{208}\text{Tl}$ のガンマ線

\*Neutrino-4実験の場合、先行信号3.3MeV以上では、影響はない。  
 ( $\bar{\nu}_e$ エネルギーで4.1MeV以上は測定できる。)

# 福井研究炉でニュートリノスペクトル

## □ 一般的超短距離反ニュートリノ測定

■ 大きな検出器にできない

■ 検出器内部起源の事象が偶然同時計数のバックグラウンドに

Neutrino-4の場合の

先行信号エネルギーが1.5-9MeV

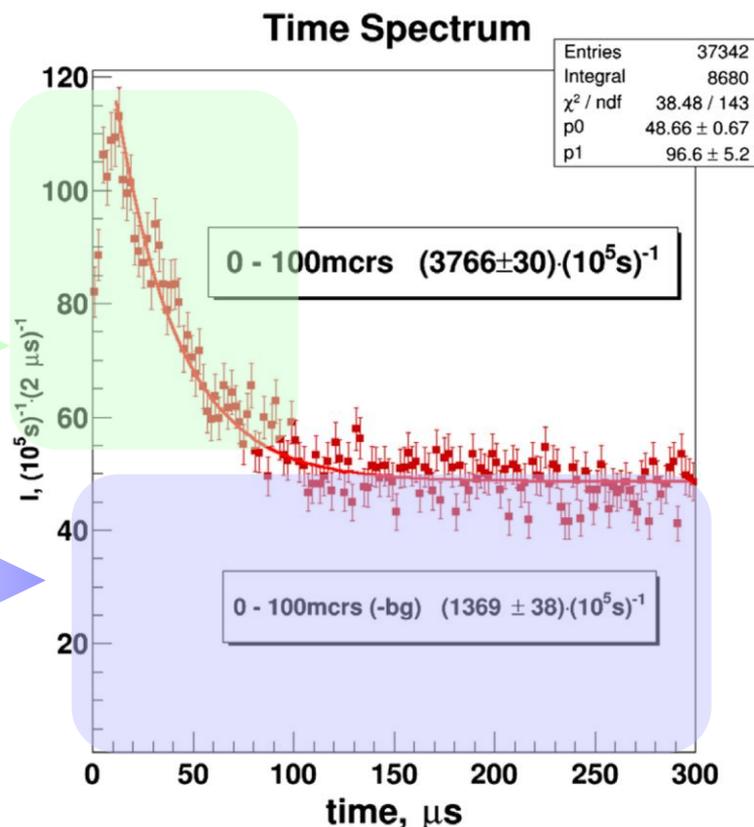
遅延信号エネルギーが1.5-12MeV

の事象の時間差スペクトル

中性子由来の事象  
(ニュートリノもバックグラウンドも含む)

偶然同時計数事象  
(そもそも中性子ではない。たぶん膨大な環境ガンマ線)

バックグラウンドレベルが高い(中性子・環境ガンマ線)と、低エネルギー測定は難しい



# バックグラウンド低減

- 中性子バックグラウンド
  - 主な起源は原子炉と宇宙線

起源	原因	
原子炉由来中性子	高速中性子遮蔽が弱い	高速中性子に効果的な <b>遮蔽材</b>
宇宙線由来中性子	宇宙線(ミュオン)が検出器物質を核破砕 →中性子発生	<b>宇宙線</b> 信号を完全に捕まえる →宇宙線を捕まえるための検出器を設置

- **遮蔽材**
  - 地下低バックグラウンド測定をする時ならすべて水で遮蔽する。
  - 原子炉までの距離は伸ばしたくないので、**効率よい遮蔽材**を欲しい。
- **宇宙線(ミュオン)**信号をタグできるとベターできる
  - **ミュオン**+原子核→破砕原子核+**中性子(バックグラウンド)**

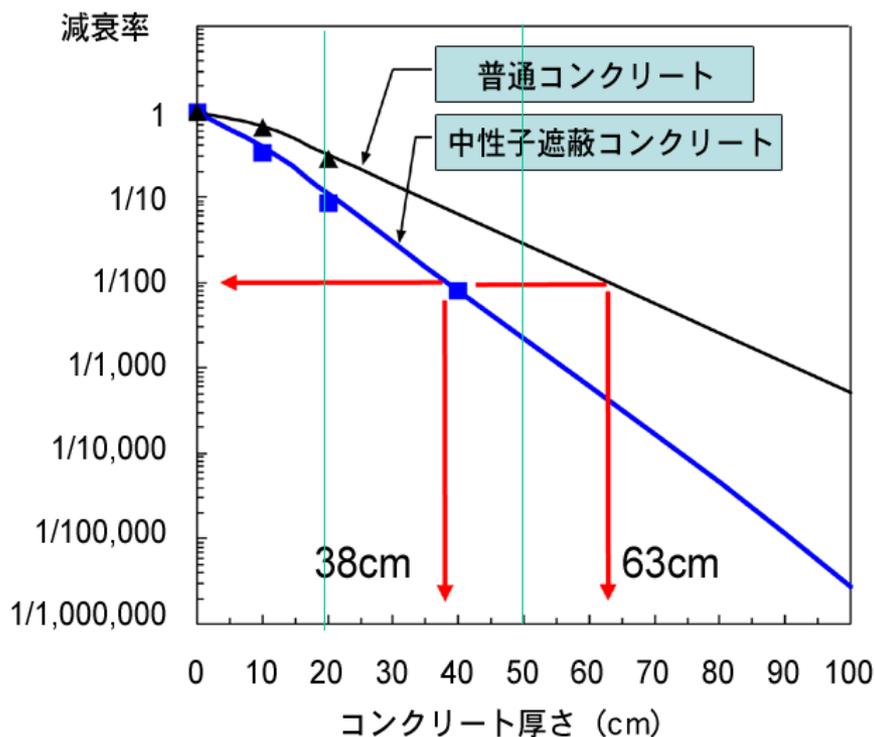
# 中性子遮蔽材

## □ コンクリート遮蔽材

$^{252}\text{Cf}$ での減衰率

普通コンクリ: 20cmで1/3、50cmで1/30

遮蔽コンクリ: 20cmで1/10、50cmで1/500



<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2007/sepoct/neutronsshield.html>

## □ 水より効率よい遮蔽材

$^{252}\text{Cf}$ での減衰率

ポリエチレン: 20cmで1/20

水: 20cmで1/5

ふつうのコンクリ: 20cmで0.8、50cmで1/5

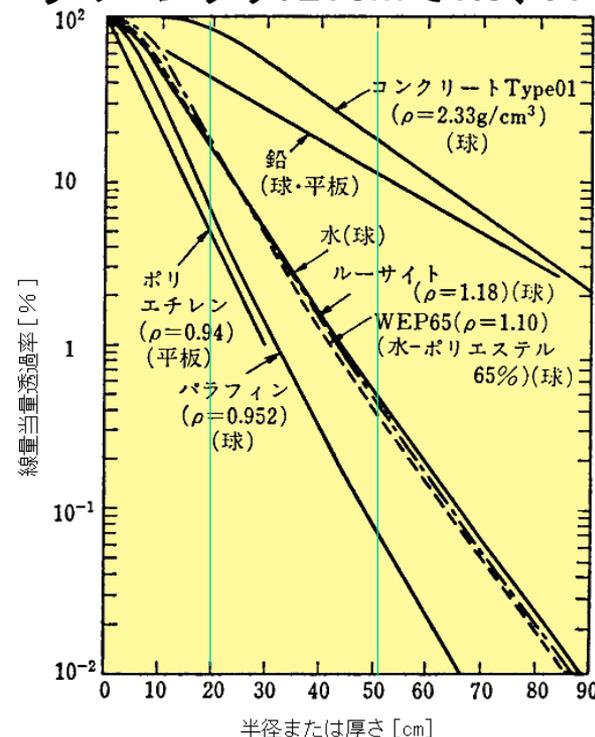
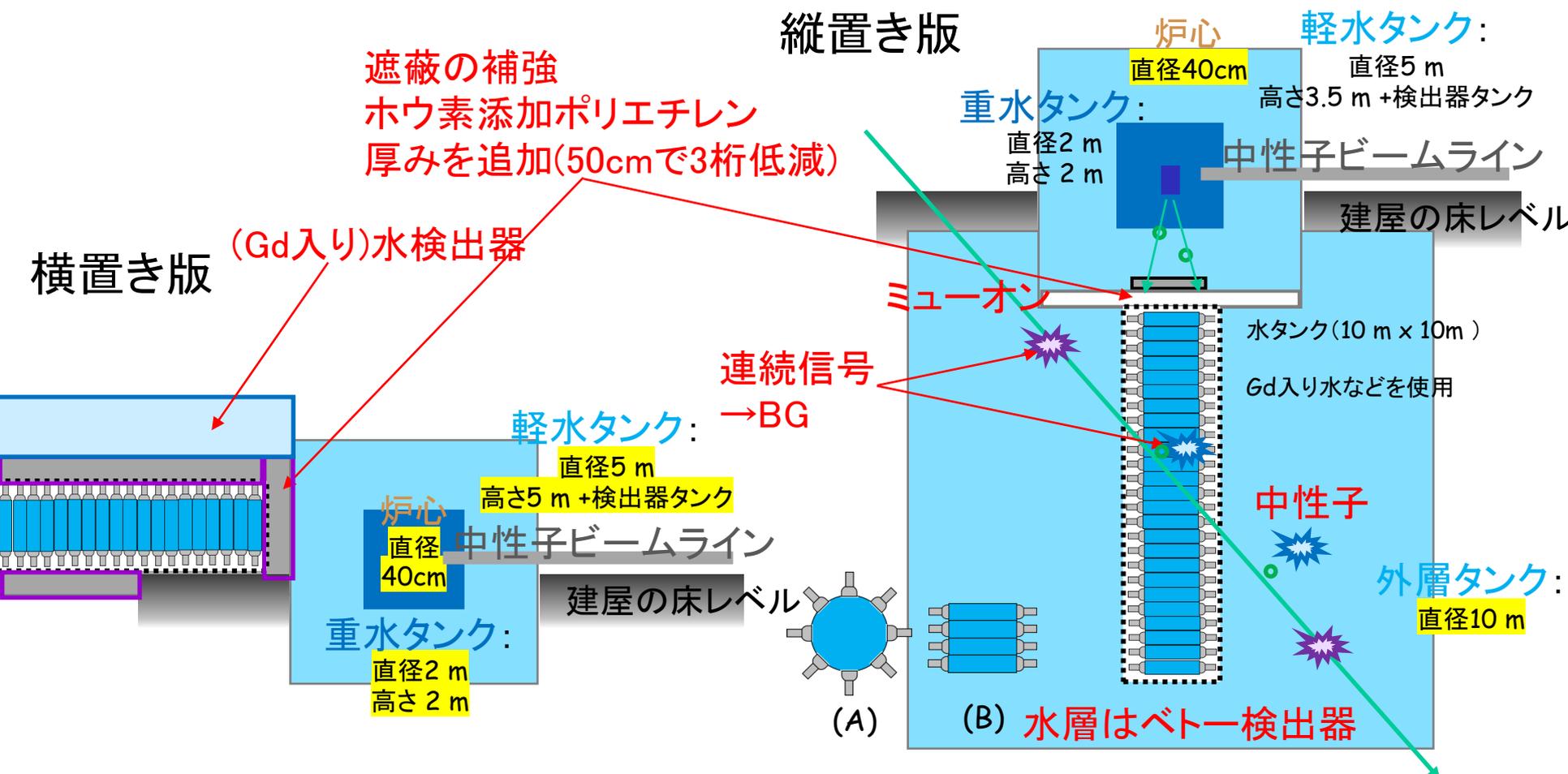


図4 球および平板状各種遮蔽体中での $^{252}\text{Cf}$ 中性子の線量当量減衰曲線

[出典] 日本アイントープ協会: アイントープ便覧改訂3版、丸善(1995年4月)、p.426

# 中性子バックグラウンド低減

- 反ニュートリノエネルギースペクトル測定のために
  - 低エネルギー領域から高エネルギー領域まで: 2MeV~8MeV



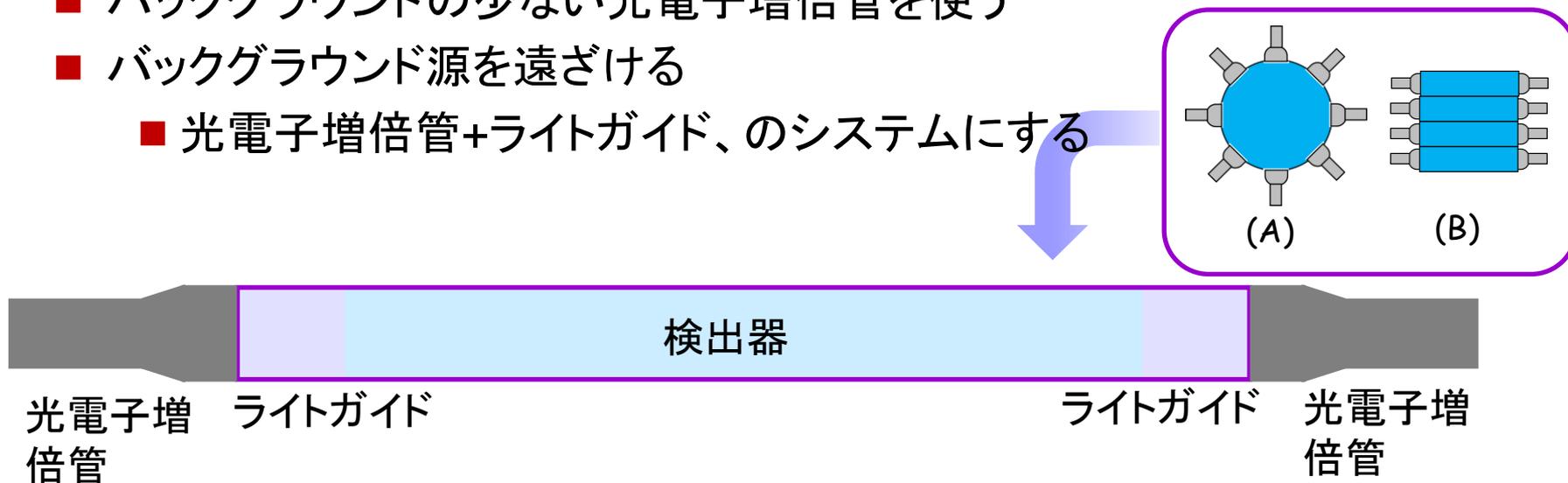
# 環境ガンマ線

## 環境ガンマ線事象

起源	原因	
原子炉等検出器外部	ガンマ線遮蔽が弱い	鉛遮蔽
検出器内部	・光電子増倍管等や液体シンチレータ内部の放射性不純物	・放射性不純物の少ない素材を使う ・バックグラウンド源を遠ざける

## 検出器内部バックグラウンド低減

- バックグラウンドの少ない光電子増倍管を使う
- バックグラウンド源を遠ざける
  - 光電子増倍管+ライトガイド、のシステムにする

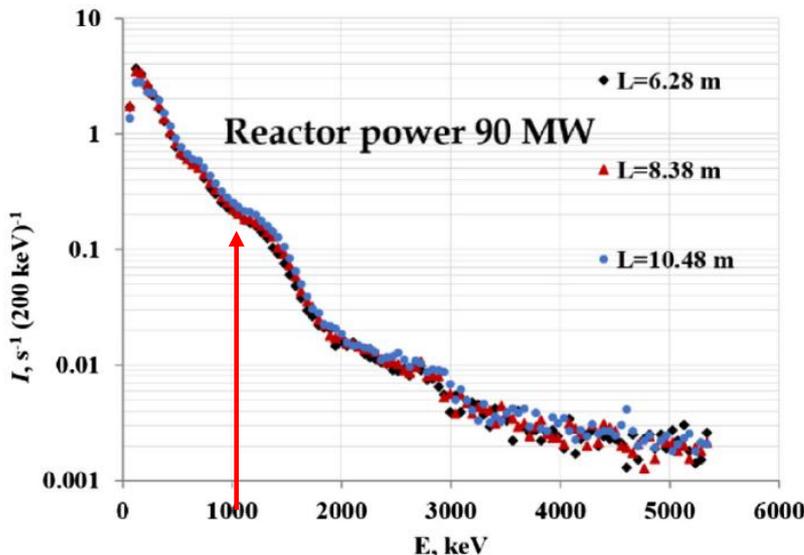


# 環境ガンマ線

## □ 環境ガンマ線事象

### ■ 光電子増倍管を遠ざける

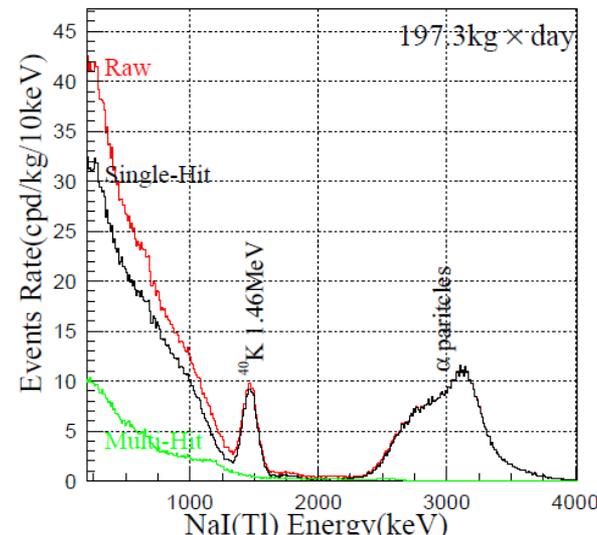
## Neutrino-4 のNaI 測定



16cnt/keV/day/kg @ 1MeV(5.3kgのNaIと考えて)  
 1.6cnt/keV/day/kg @ 2MeV

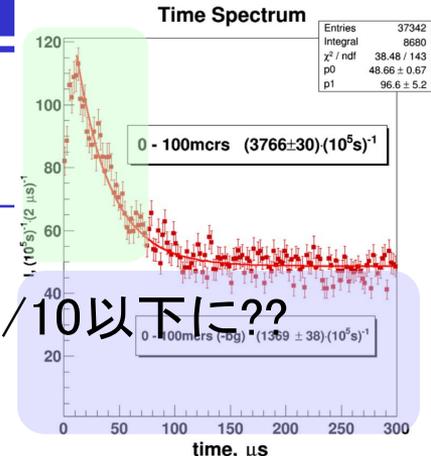
1/10ぐらい  
 減少できそう

## ライトガイドありのNaI測定



<1cnt/keV/day/kg @ 1MeV  
 <0.1cnt/keV/day/kg @ 2MeV

検出器構造を検討することで1.8MeV付近ニュートリノ  
 スペクトル測定をめざす



紫の部分が1/10以下に??

# まとめ

- 福井研究炉を用いたニュートリノ研究
  - ステライルニュートリノ探索
    - 超短距離でのニュートリノ振動実験
    - 4トンサイズの検出器、~10mレベルの遮蔽材
  - 原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル測定
    - 振動実験でのニュートリノスペクトルの異常調査
    - 低エネルギー領域測定 & S/N比改善のためには
      - バックグラウンドの少ない検出器構築
        - 検出器 $\gamma$ 線バックグラウンド低減
        - 遮蔽で高速中性子低減
        - 中性子タグ
      - 実現可能性についてはサイトの事前バックグラウンド調査が必要
  - ニュートリノ原子核反応実験