

# SK-Gd における 中性子検出を用いた ニュートリノ事象再構成手法

2022/2/21

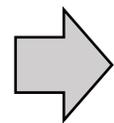
第28回 ICEPP シンポジウム

三木 信太郎 (東京大学 ICRR)

# ニュートリノ振動

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

フレーバー固有状態      質量固有状態



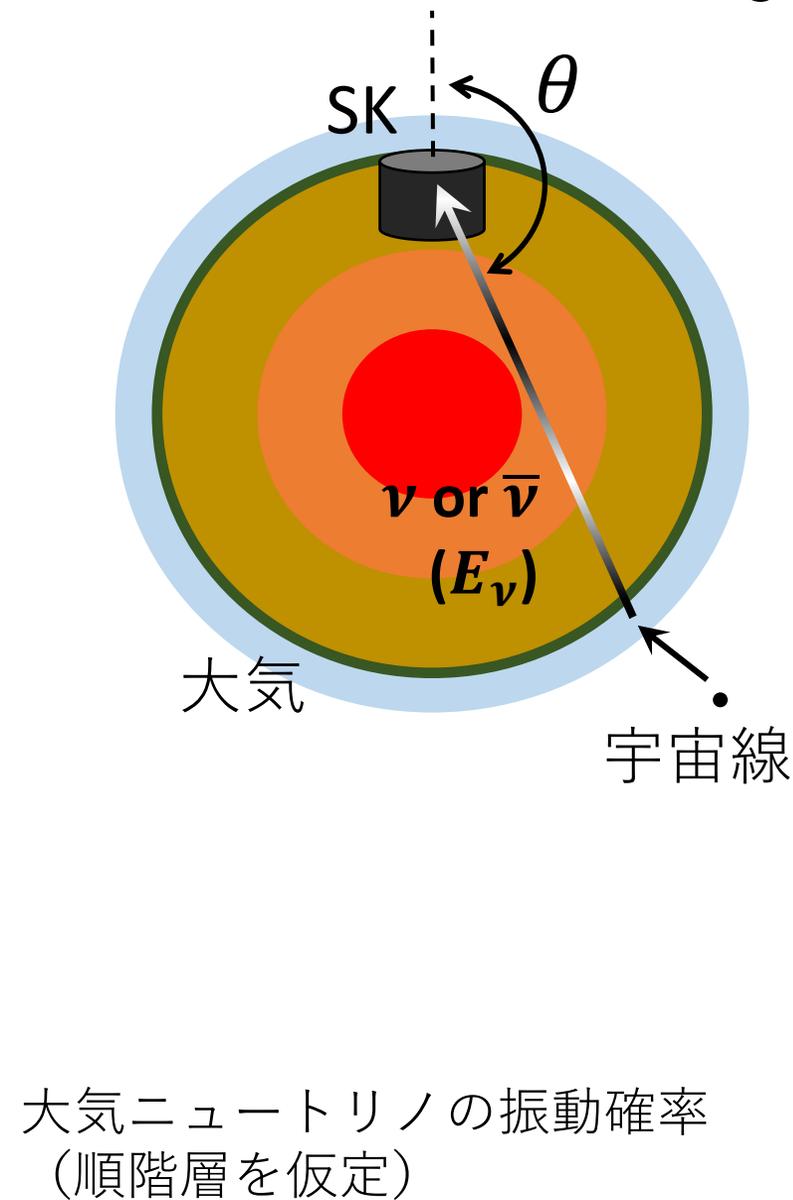
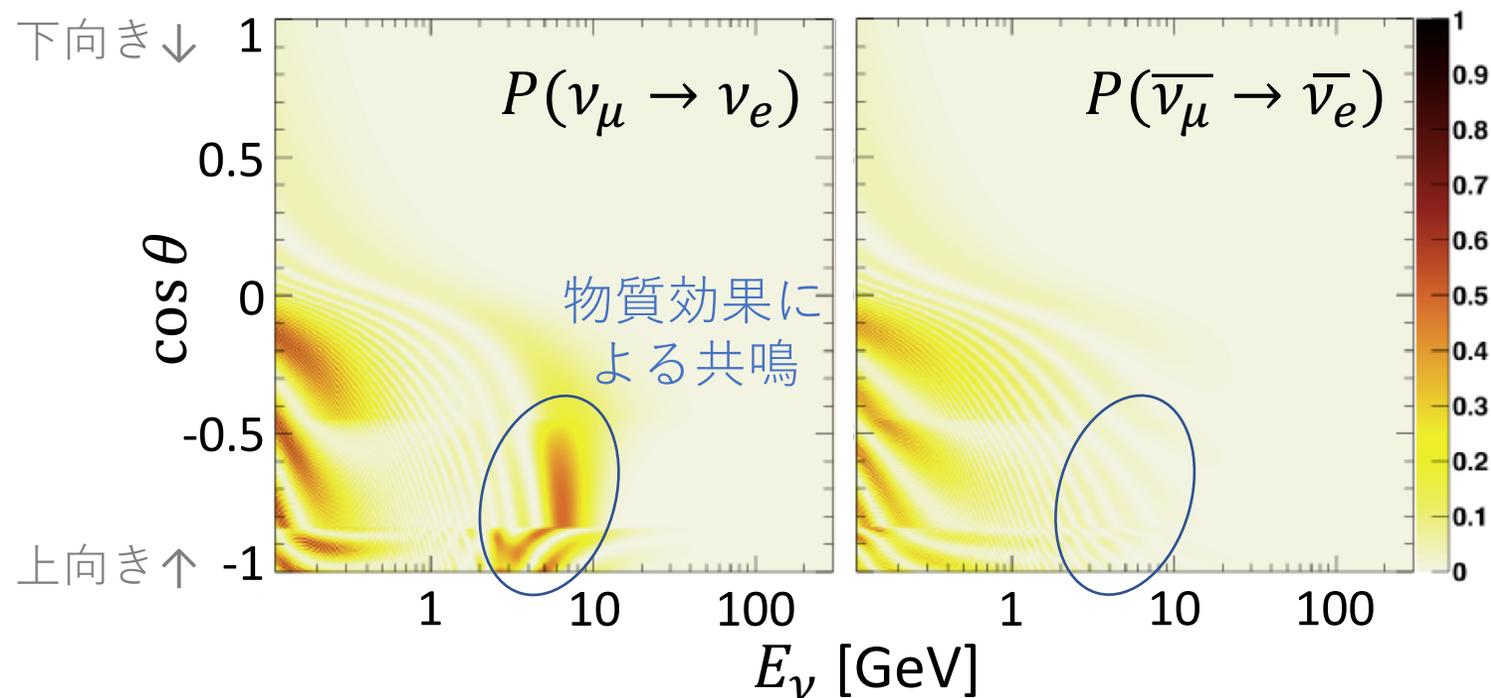
生成時と観測時で  
フレーバーが変わりうる  
(ニュートリノ振動)

振動パラメータに関する未解決問題：

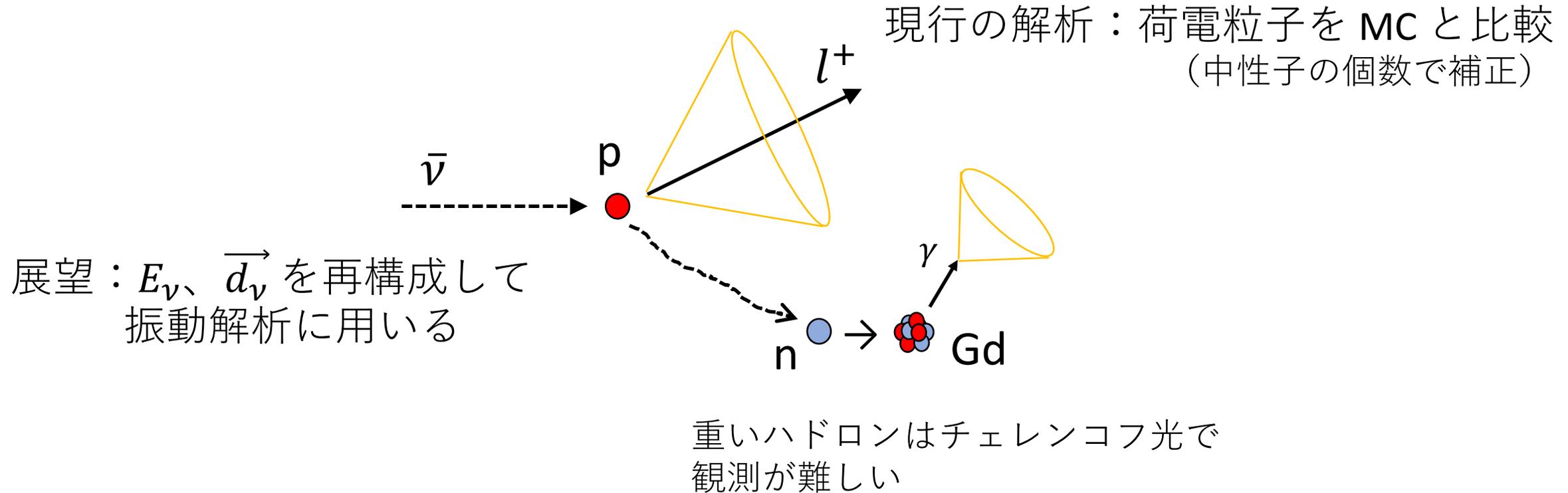
- ① 質量階層性 ( $m_1, m_2$  と  $m_3$  の大小) → 微小質量の起源
- ② CP 対称性の破れ → 物質・反物質非対称性
- ③  $\theta_{23}$  オクタント ( $\theta_{23}$  と  $\pi/4$  の大小) → 未知の対称性

# 大気ニュートリノ

- 大気ニュートリノの振動パターンの観測により、質量階層性の決定、 $\delta_{CP}$ 、 $\theta_{23}$  の測定を目指す。
- ニュートリノのエネルギー精度、入射方向精度、 $\nu/\bar{\nu}$  の識別が重要。



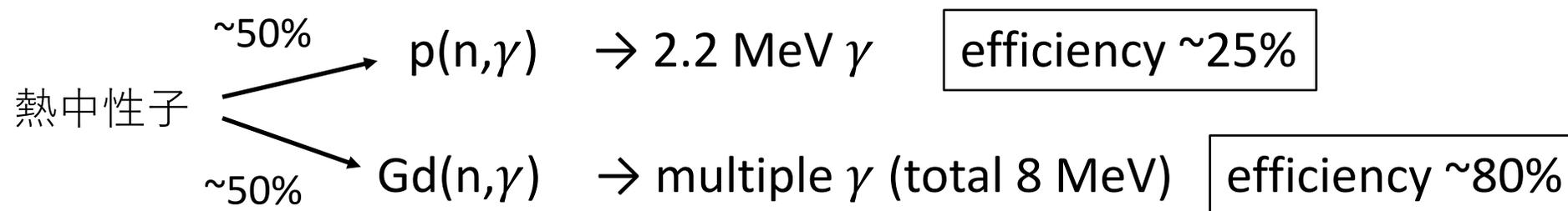
# 大気ニュートリノ解析での中性子の利用 4



今まで見ていなかった中性子の捕獲位置を用いて  
ニュートリノ自体を再構成する

# SK-Gd実験

Gd の導入により、中性子 検出効率が上昇 + 捕獲位置の再構成精度が向上

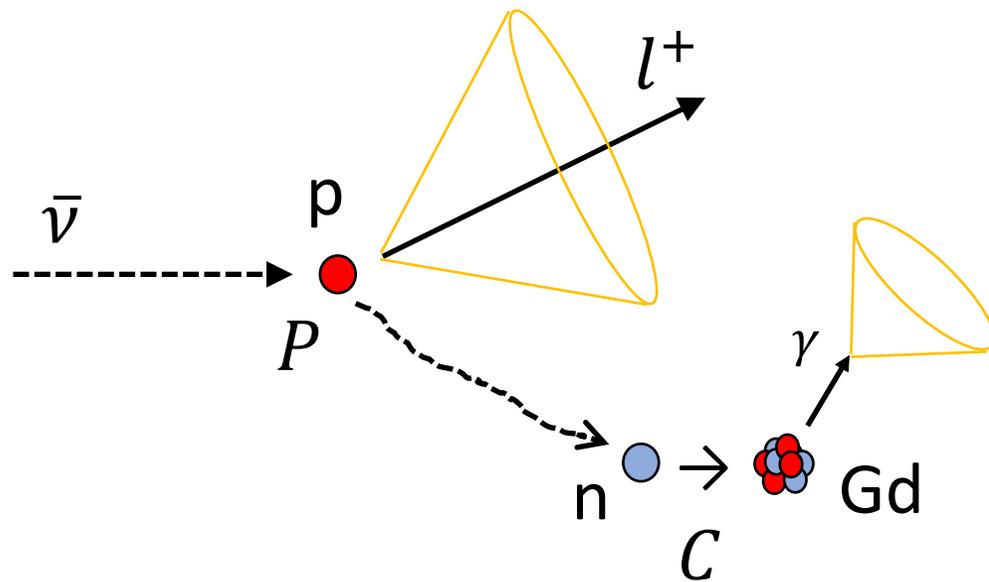


	2020年7月	2022年5月 (計画)	???	
Gd濃度	0% (純水)	0.011%	0.03%	0.1%
Gdに捕獲される割合 (= # of Gd captured neutrons / # of neutrons)	0%	50%	75%	90%
中性子検出効率 (= Gd ratio x 0.8 + (1 - Gd ratio) x 0.25)	25%	50%	65%	75%

Now

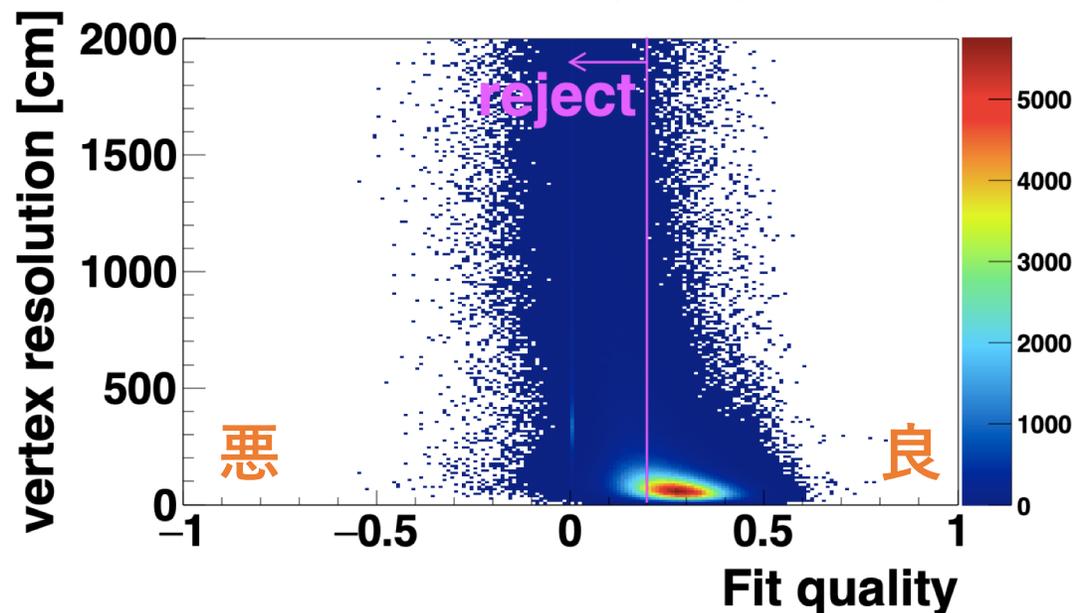
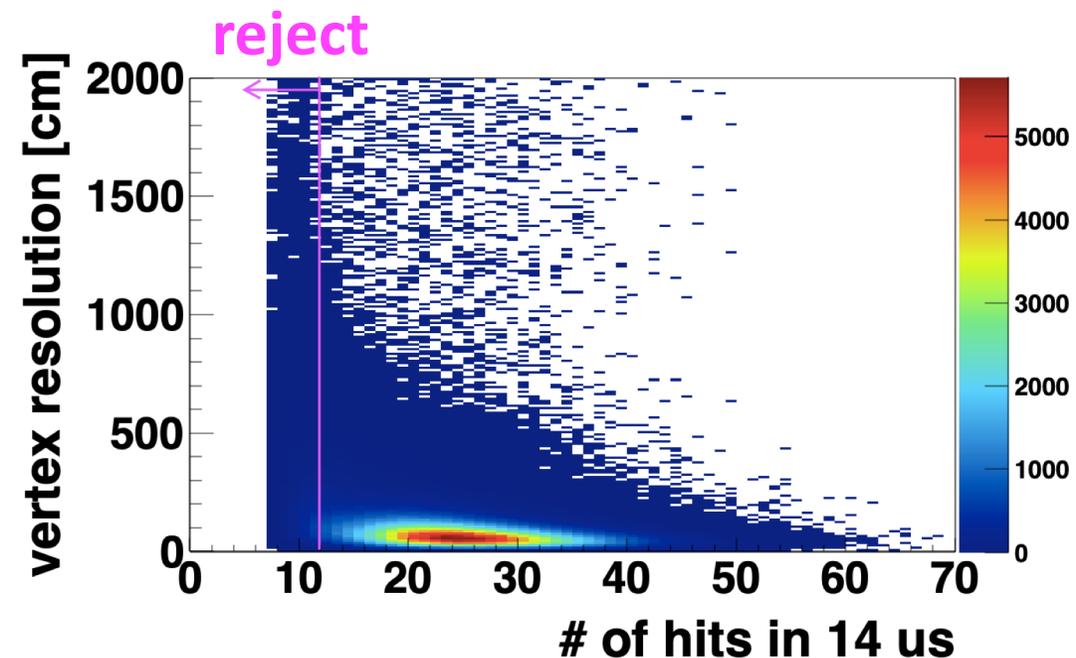
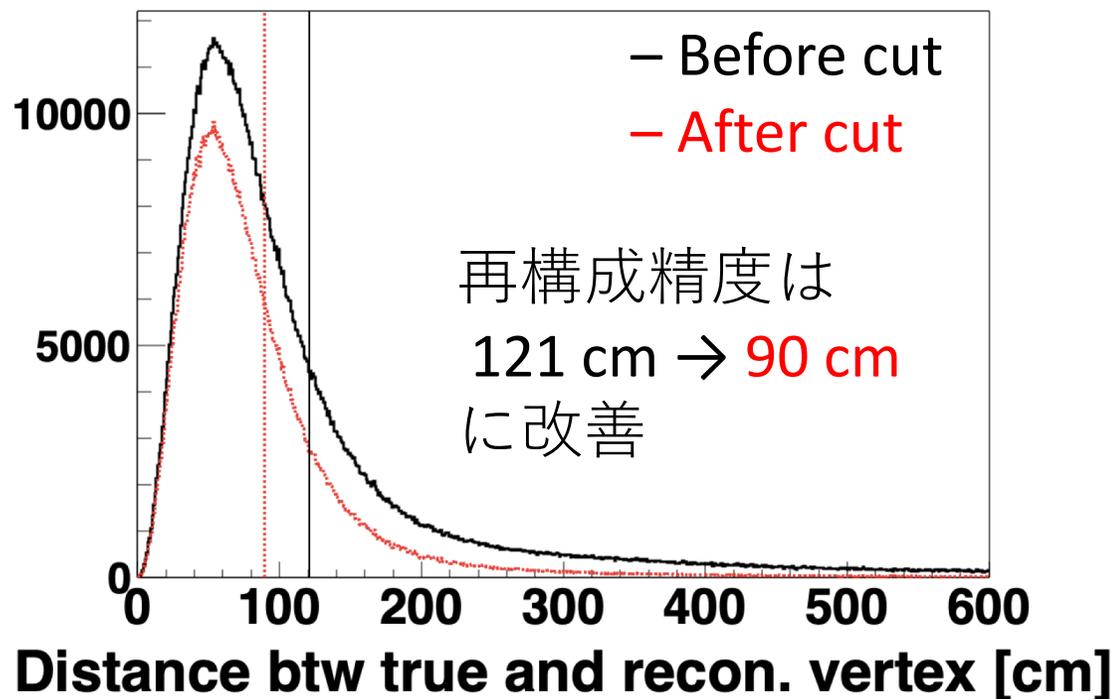
# 中性子位置を用いたニュートリノ再構成

- 中性子の変位  $\overrightarrow{PC}$  から運動量  $\vec{p}_n$  を見積もる。  
→ 荷電レプトンの情報と合わせて  $\vec{d}_\nu$  と  $E_\nu$  を再構成
- 現時点では MC のみを用いて再構成を開発・試験。



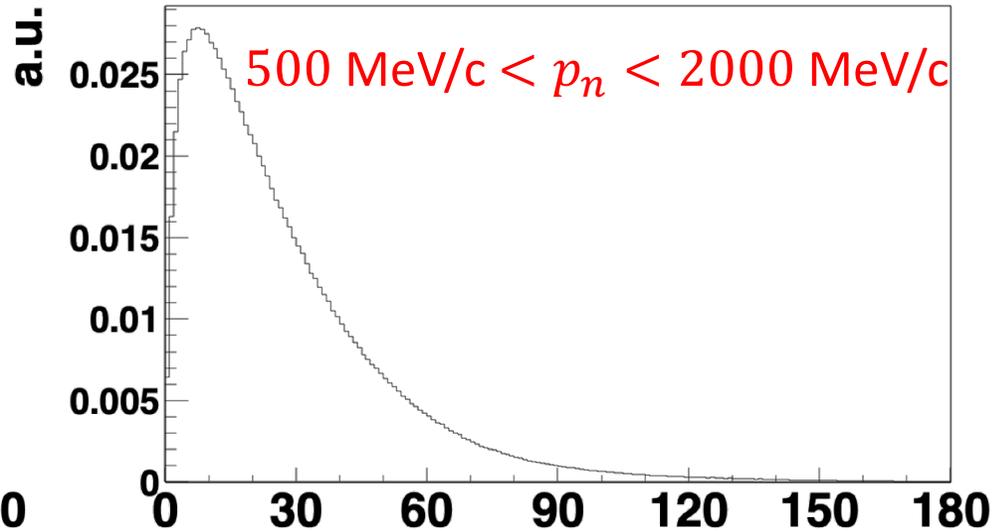
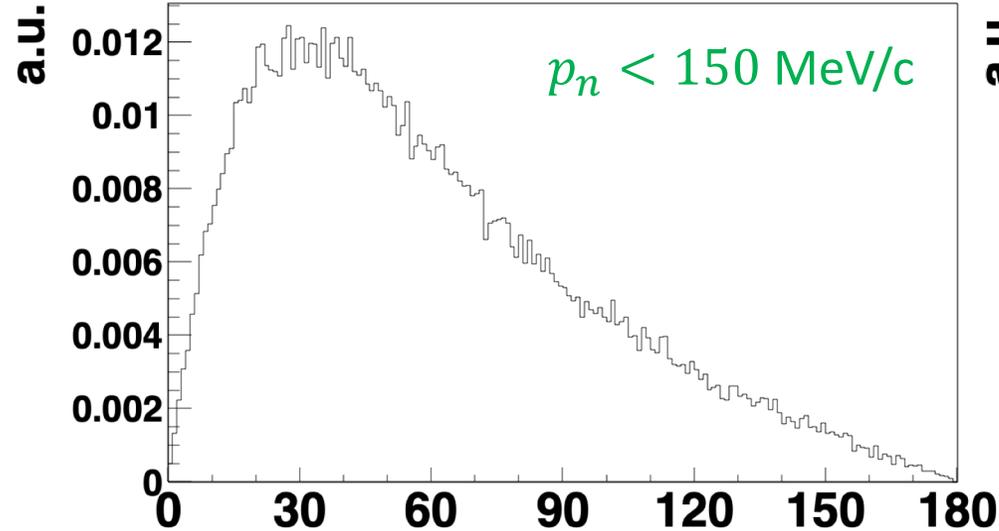
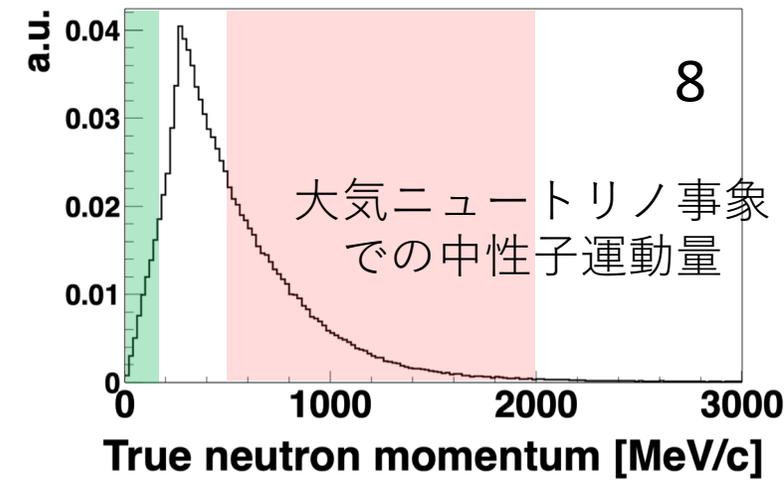
# 中性子信号の選択

- 大気ニュートリノ MC 中で、ニュートリノ反応の後  $[4 \mu\text{s}, 534 \mu\text{s}]$  で中性子信号を探索 (decay-e like なものは除く)
- 位置再構成精度の悪い 36% を除去



# 中性子の方向の推定

- 中性子 1個を生成したシミュレーションで生成方向と捕獲位置の相関を調査。



中性子の変位  $\overrightarrow{PC}_{\text{true}}$  と生成方向とのなす角

→ 中性子の生成方向は変位  $\overrightarrow{PC}$  と同じ方向だとする:  $\overrightarrow{p}_n \propto \overrightarrow{PC}$

# 中性子の運動量の推定

- 運動量の大きさ  $p_n$  は、距離  $|\overrightarrow{PC}|$  から推定。
- 中性子が複数検出された場合はベクトル和の大きさ  $|\sum \overrightarrow{PC}_i|$  を用いる。
- 2通りの変換を試行：

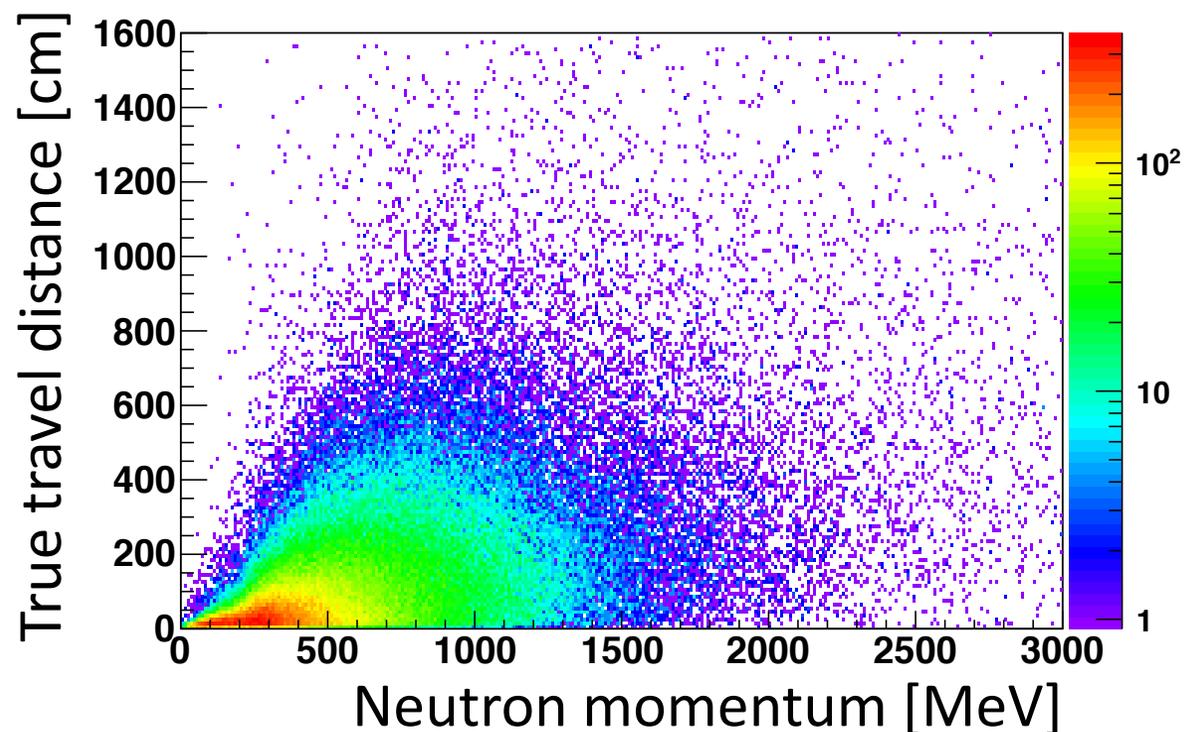
(linear)  $p_n \propto |\overrightarrow{PC}|$

$$p_n = a \times |\overrightarrow{PC}|$$

$$\text{if } p_n > u, \quad p_n = u$$

(log)  $\log p_n \propto |\overrightarrow{PC}|$

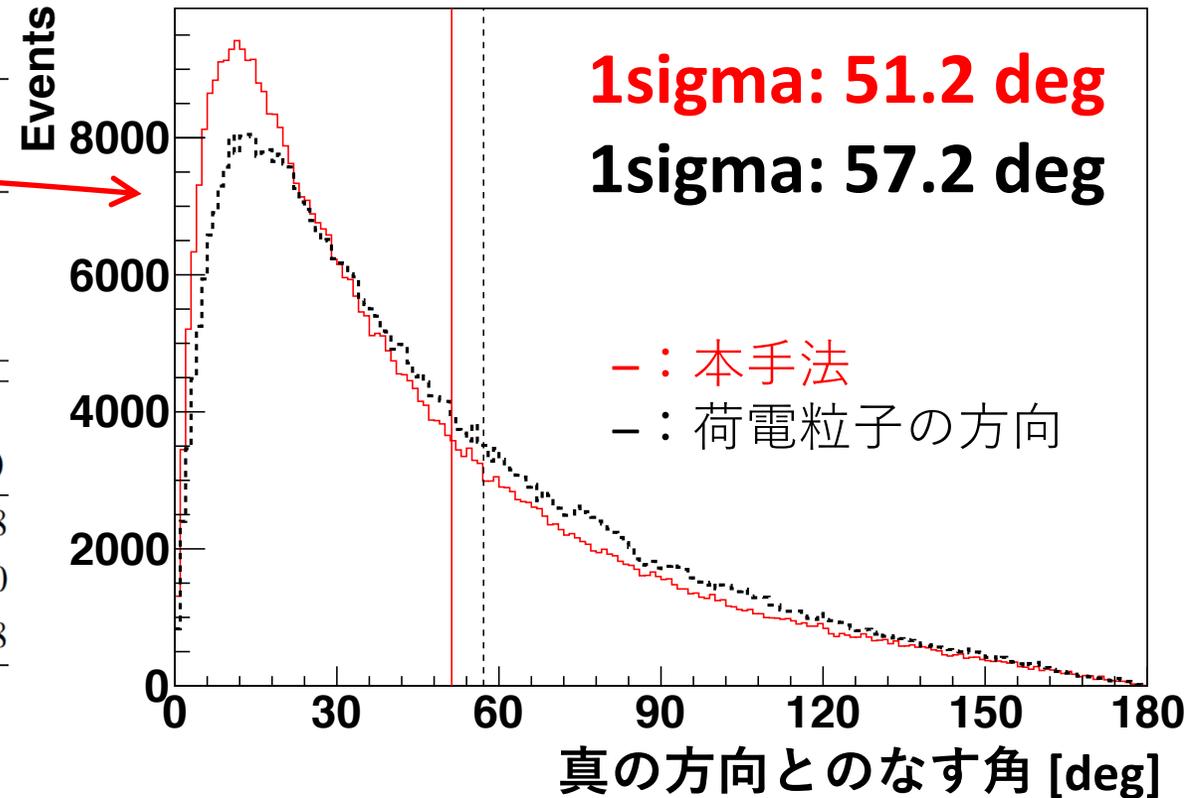
$$\log_{10} \frac{p_n}{p_0} = \frac{|\overrightarrow{PC}|}{b}$$



# ニュートリノ方向再構成

- $\vec{p}_\nu = \vec{p}_l + \vec{p}_n$  として再構成。
- チェレンコフリング1個の事象で、再構成精度が最良となるような変換パラメータを探索。

		a [MeV/c/cm]					
[度]		1	1.5	2	2.5	3	4
(linear)	$\infty$	51.8	51.5	51.8	52.8	54.0	56.8
	u [MeV/c] 1000	51.8	51.3	51.7	52.5	53.5	55.5
	700	51.8	<b>51.2</b>	51.5	52.0	52.8	54.2
		b [cm]					
[度]		1600	1400	1200	1000	800	600
(log)	100	52.8	52.7	52.5	52.2	52.0	51.8
	p <sub>0</sub> [MeV/c] 200	<b>51.2</b>	<b>51.2</b>	51.3	51.5	51.8	53.0
	300	52.5	52.7	53.0	53.7	54.8	56.8



2つの変換で同じ最良値

→ 具体的な変換の取り方に大きく依らない

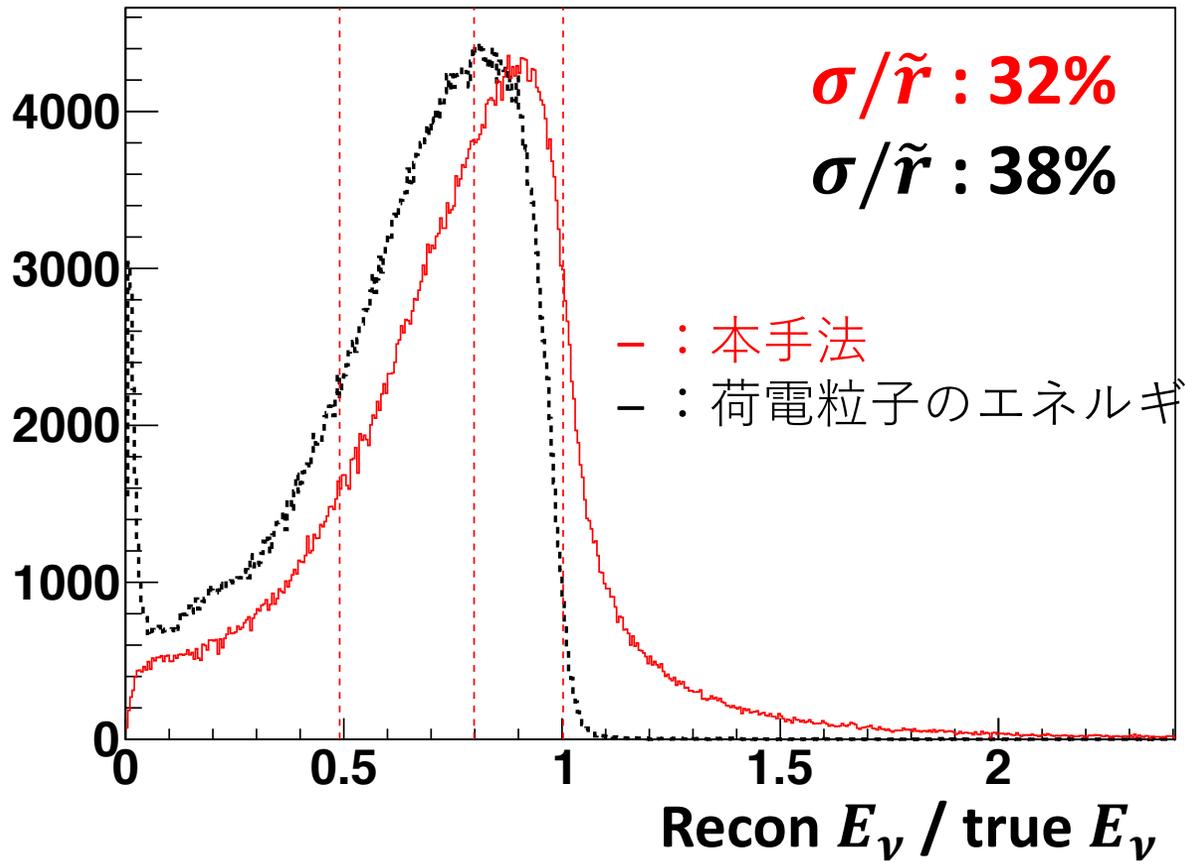
# ニュートリノエネルギー再構成

- $\vec{p}_n$  の大きさの情報のみを用いて  $E_\nu = E_l + K_n$  と再構成。
- 再構成されたエネルギーと真のエネルギーとの比の分布の、中央値  $\tilde{r}$  と幅  $\sigma$  との比  $\sigma/\tilde{r}$  を最小化する。

(linear)

[%]		a [MeV/c/cm]					
		1	1.5	2	2.5	3	4
	$\infty$	35	34	33	<b>32</b>	33	37
u [MeV/c]	1000	36	34	33	<b>32</b>	<b>32</b>	33
	700	36	35	34	33	33	33

Events



$\sigma/\tilde{r} : 32\%$   
 $\sigma/\tilde{r} : 38\%$

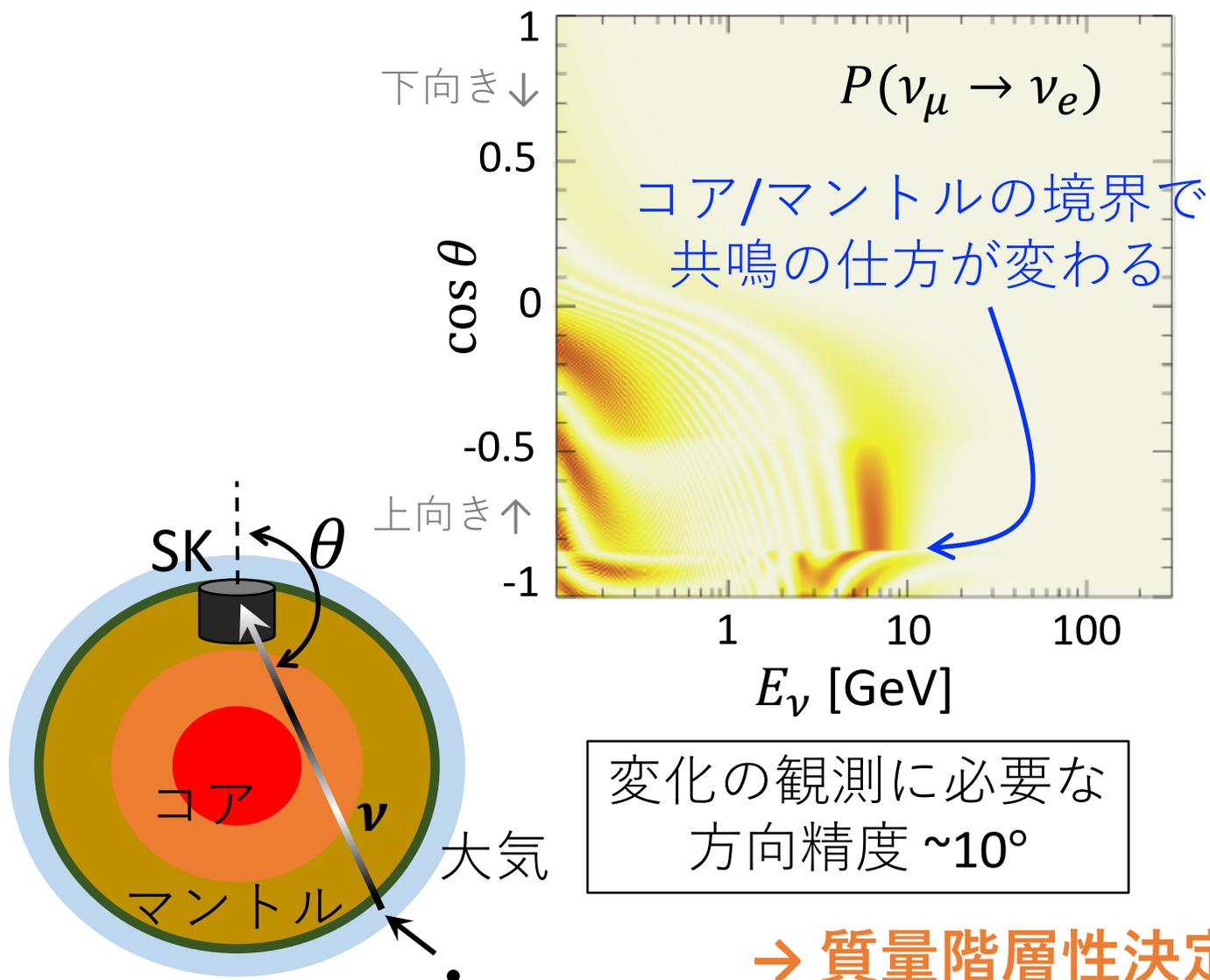
- : 本手法  
 - : 荷電粒子のエネルギー

(log)

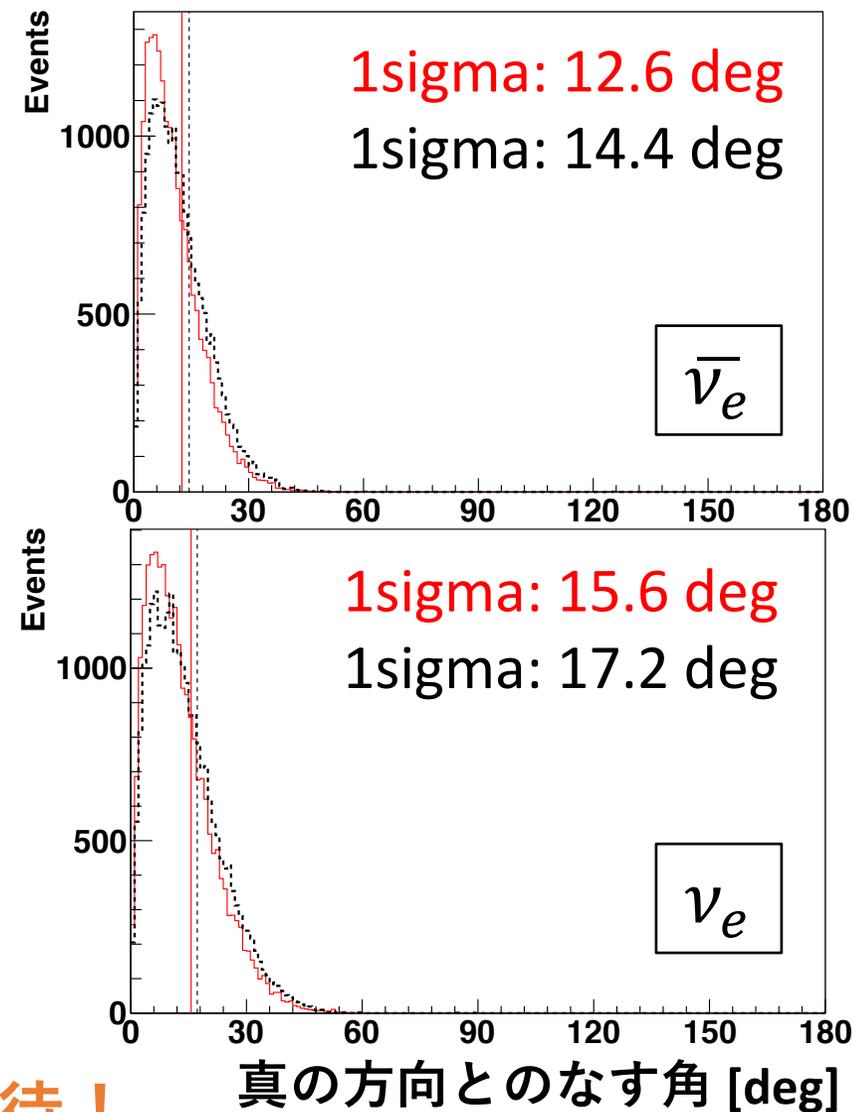
[%]		b [cm]			
		1600	1400	1200	1000
	100	37	37	36	36
p <sub>0</sub> [MeV/c]	200	35	35	34	34
	300	33	33	<b>32</b>	<b>32</b>

Recon  $E_\nu$  / true  $E_\nu$

# 振動解析への影響



$E_{\text{vis}} > 1.33 \text{ GeV}$  での方向精度

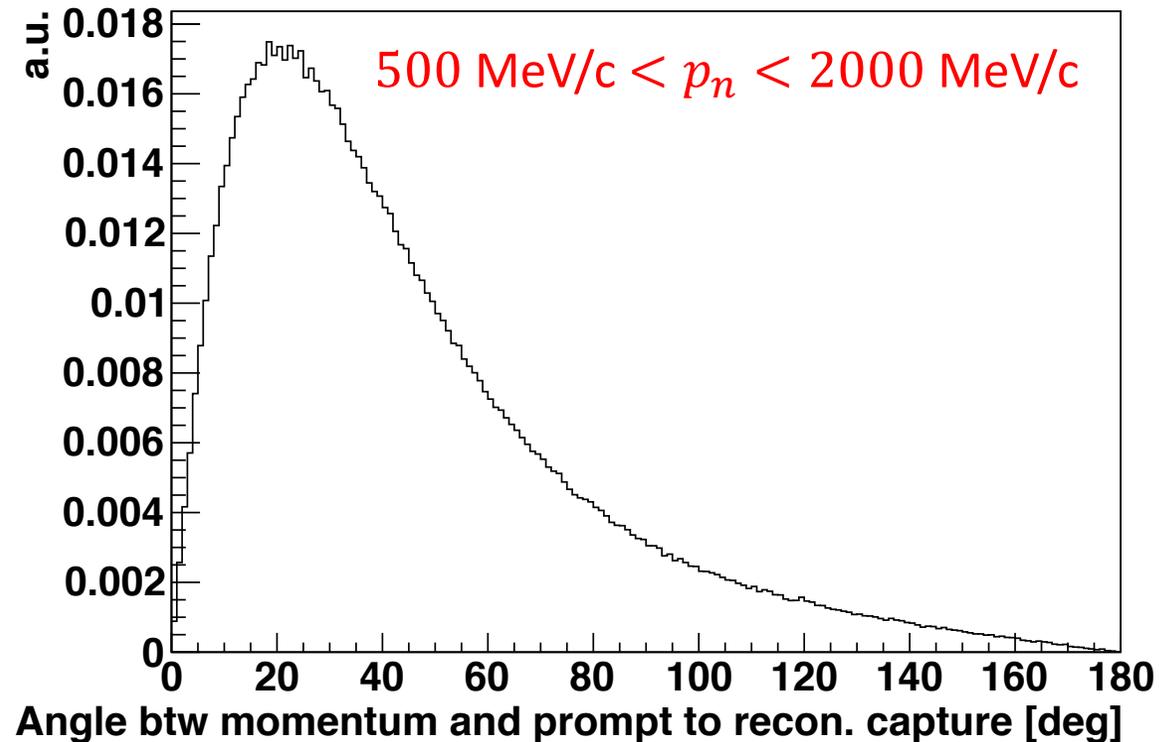
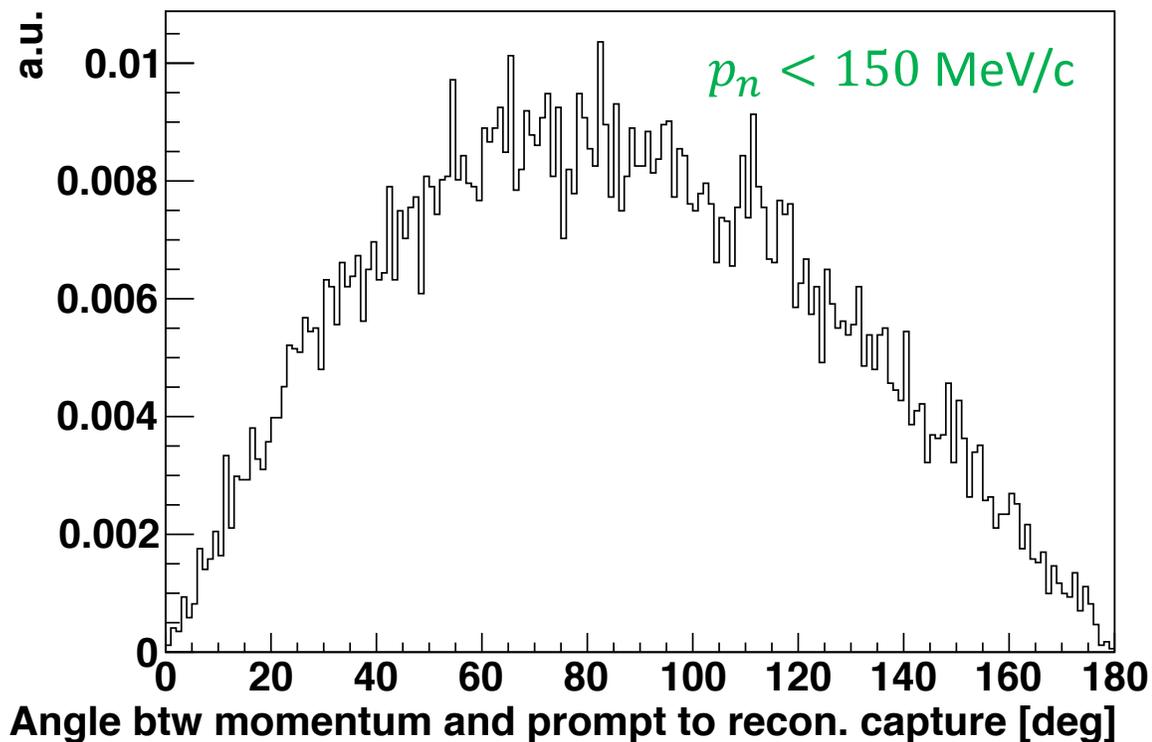


# 結論と展望

- 中性子の検出位置を用いた新たなニュートリノ再構成手法を構築した。
- 中性子の変位から運動量を見積もり、1リングのニュートリノ事象では  
方向精度は  $57.2^\circ \rightarrow 51.2^\circ$  、エネルギー精度は  $38\% \rightarrow 32\%$   
に改善した。この手法は1リング事象の39%に適用できる。
- 高エネルギーでの方向精度は、質量階層性決定の証拠を得るのに必要な精度に迫る。
- 1事象中の中性子の数を用いるとエネルギー精度がより高まる可能性。
- T2K 実験の加速器ニュートリノ事象を使って、実際のデータを用いた検証が可能。

Backup

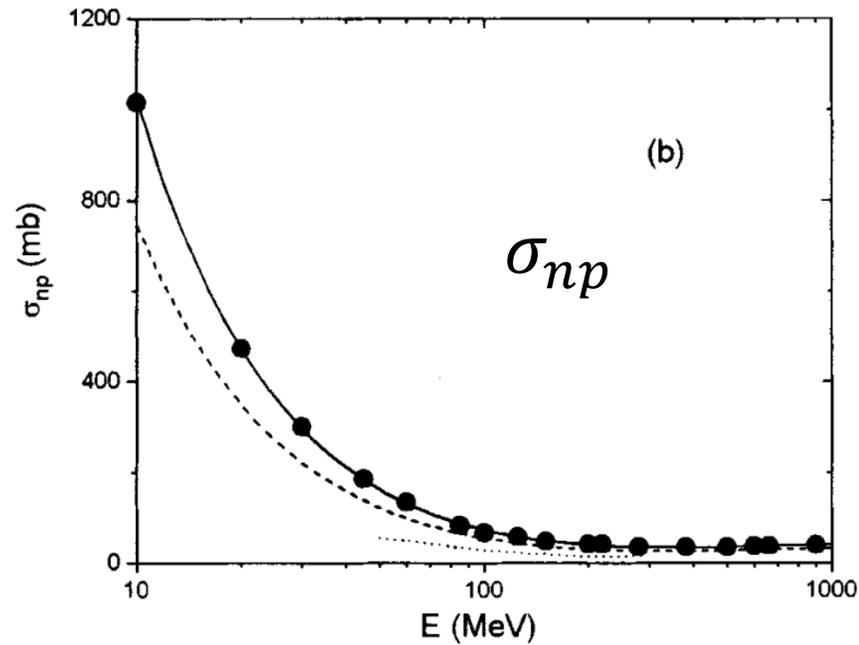
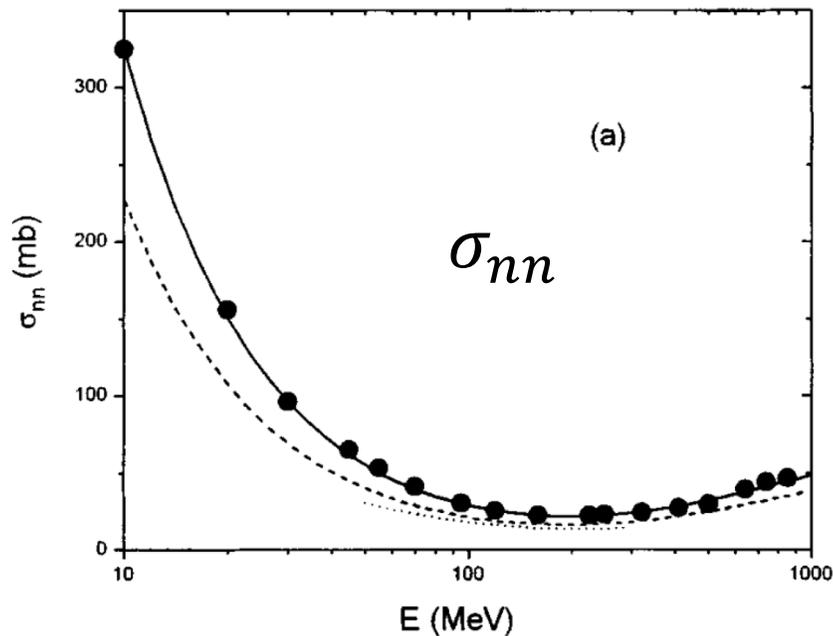
# 中性子の方向精度 (再構成位置で)



# 物理過程に基づいた変換

$$(\log) \log p_n \propto |\overrightarrow{PC}|$$

- 中性子が弾性散乱で失うエネルギー  $\propto K_n$
- 中性子と核子との反応断面積は  $p_n \gtrsim 300 \text{ MeV}/c$  ではほぼ一定  
 $\rightarrow$  中性子があるエネルギーにまで減速するまでに進む距離  
 $\propto$  散乱回数  $\propto \log K_n$



# 変換パラメータ

