

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

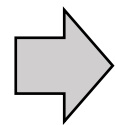
第28回 ICEPP シンポジウム

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



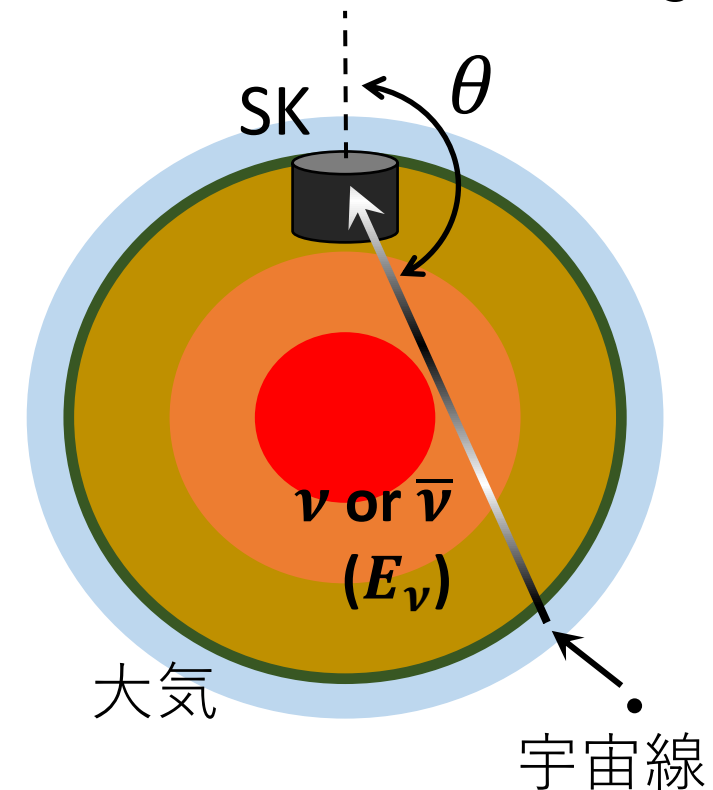
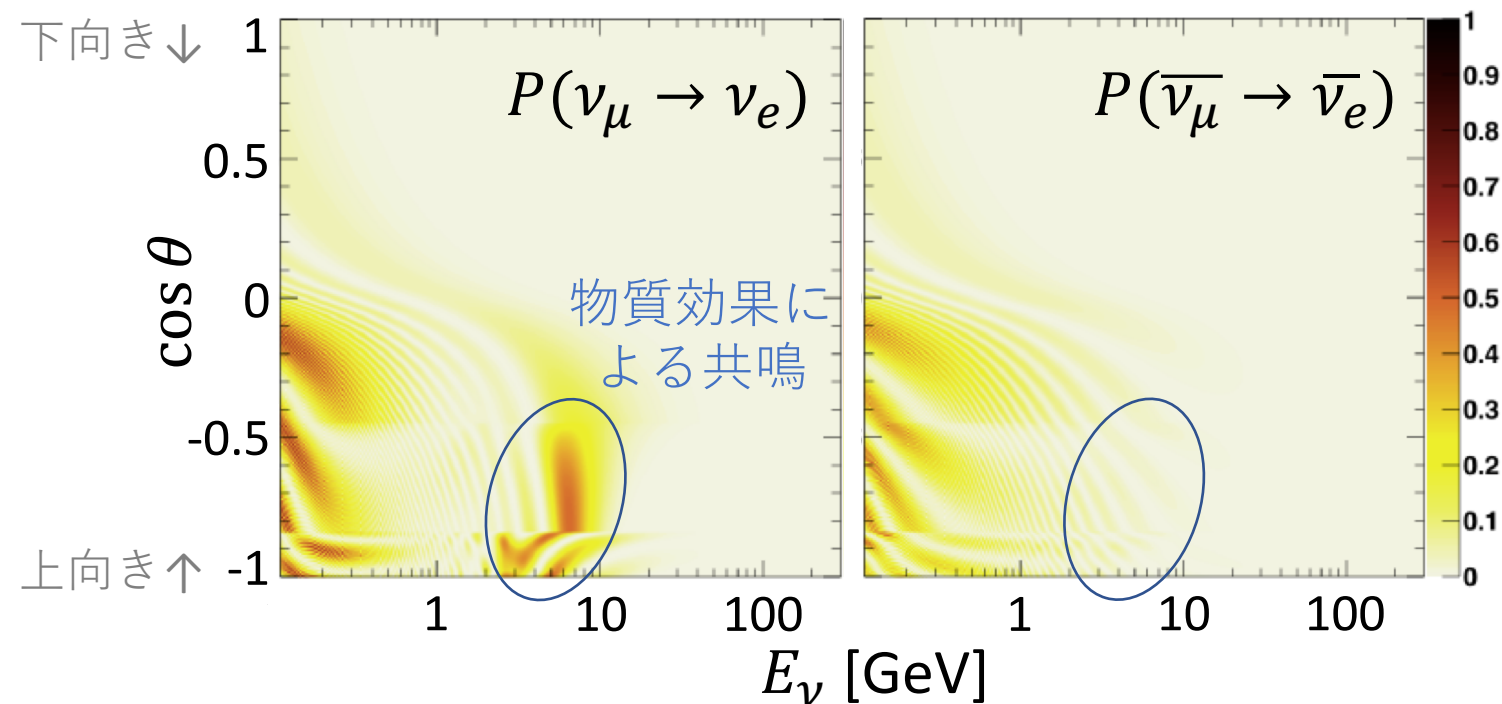
生成時と観測時で
フレーバーが変わりうる
(ニュートリノ振動)

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 θ_{23} オクタント (θ_{23} と $\pi/4$ の大小) → 未知の対称性

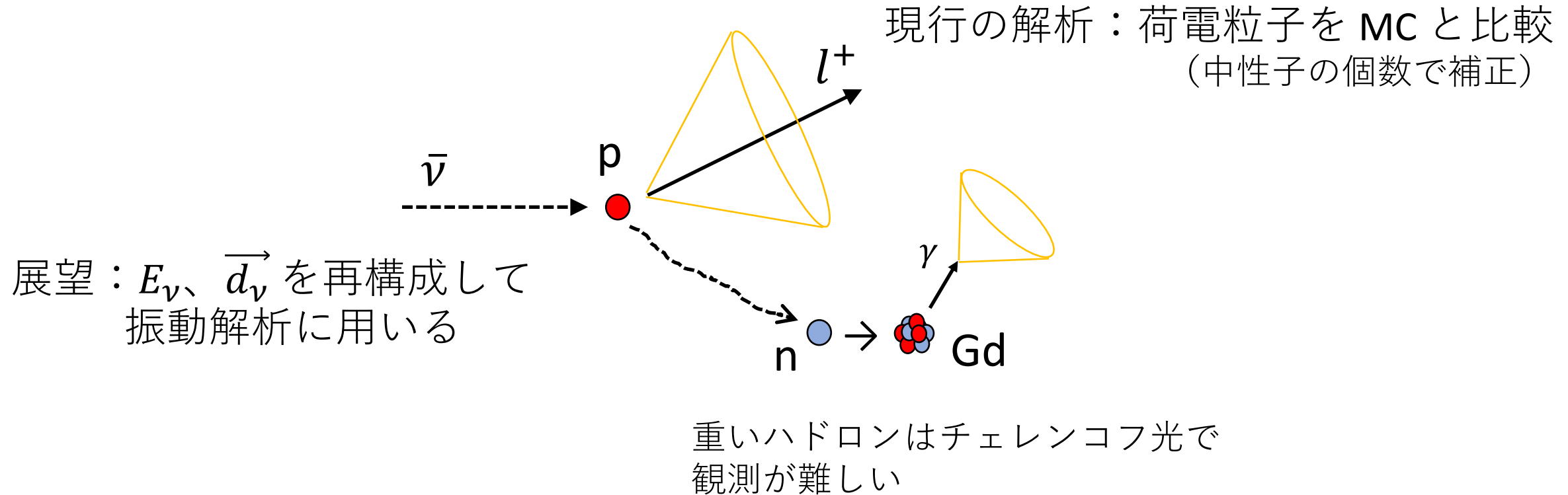
大気ニュートリノ

- 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、 δ_{CP} 、 θ_{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。



大気ニュートリノの振動確率
(順階層を仮定)

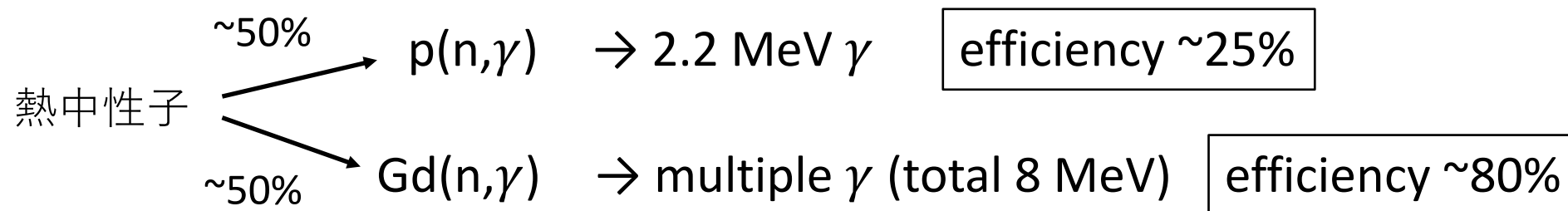
大気ニュートリノ解析での中性子の利用 4



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

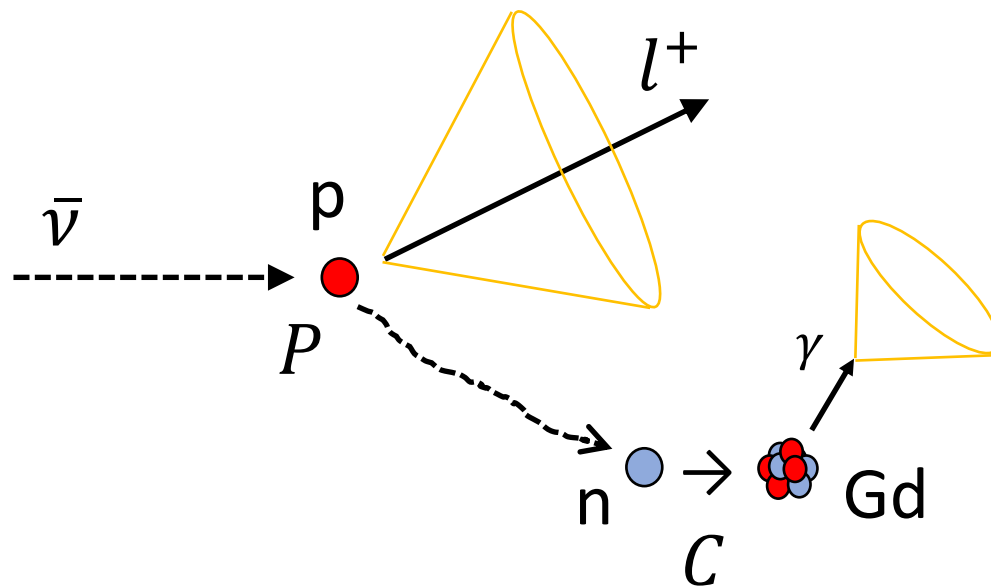


	2020年7月	2022年5月 (計画)	???	
Gd濃度	0% (純水)	0.011%	0.03%	0.1%
Gdに捕獲される割合 (= # of Gd captured neutrons / # of neutrons)	0%	50%	75%	90%
中性子検出効率 (= Gd ratio x 0.8 + (1 - Gd ratio) x 0.25)	25%	50%	65%	75%

Now

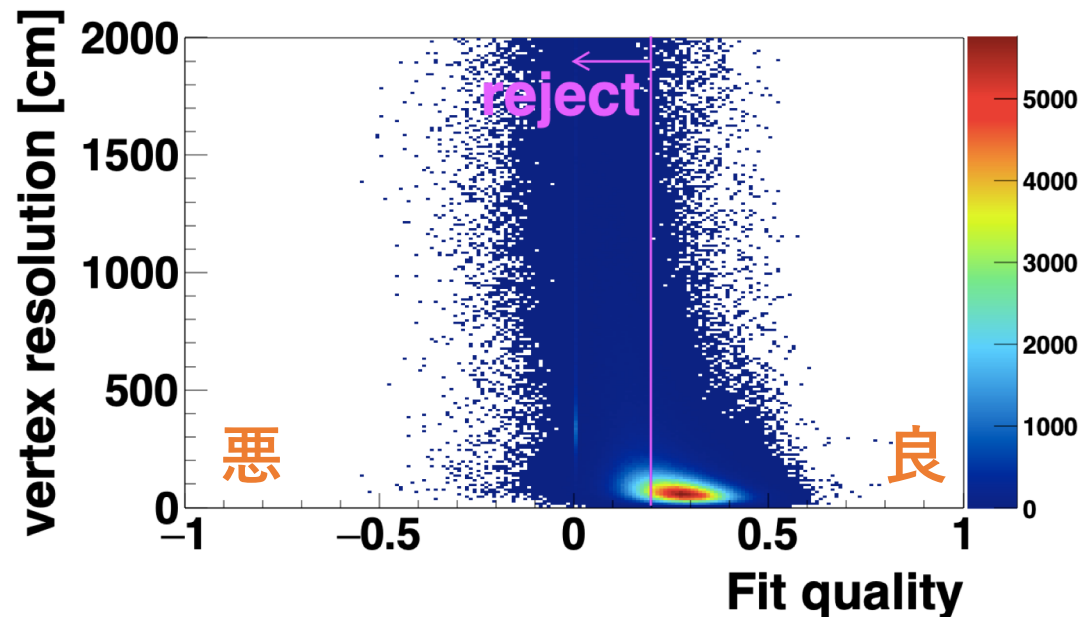
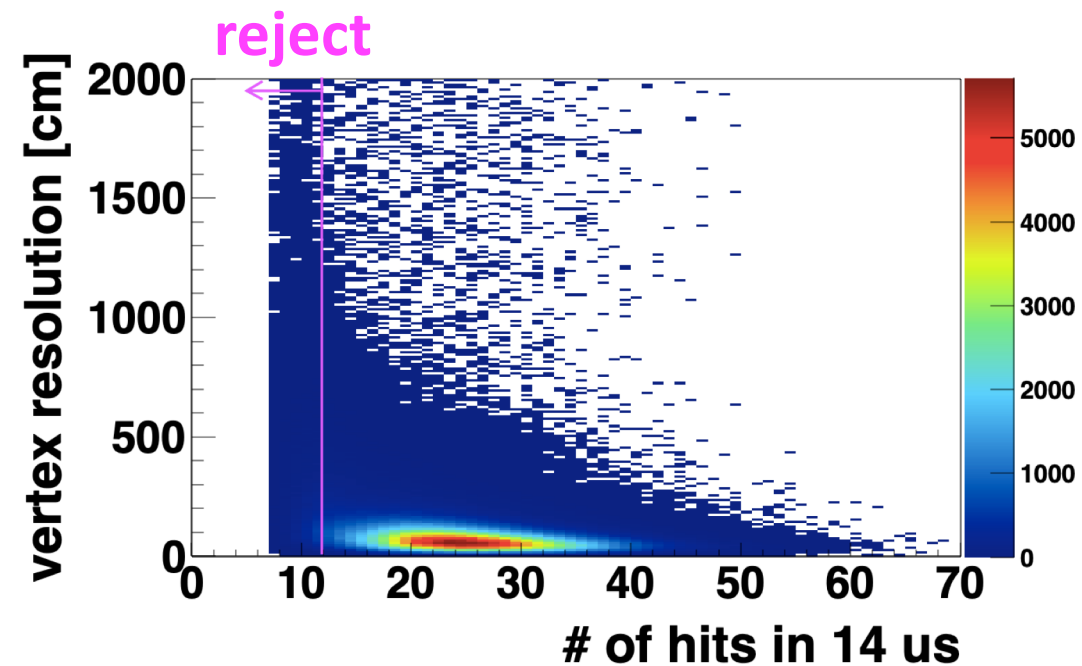
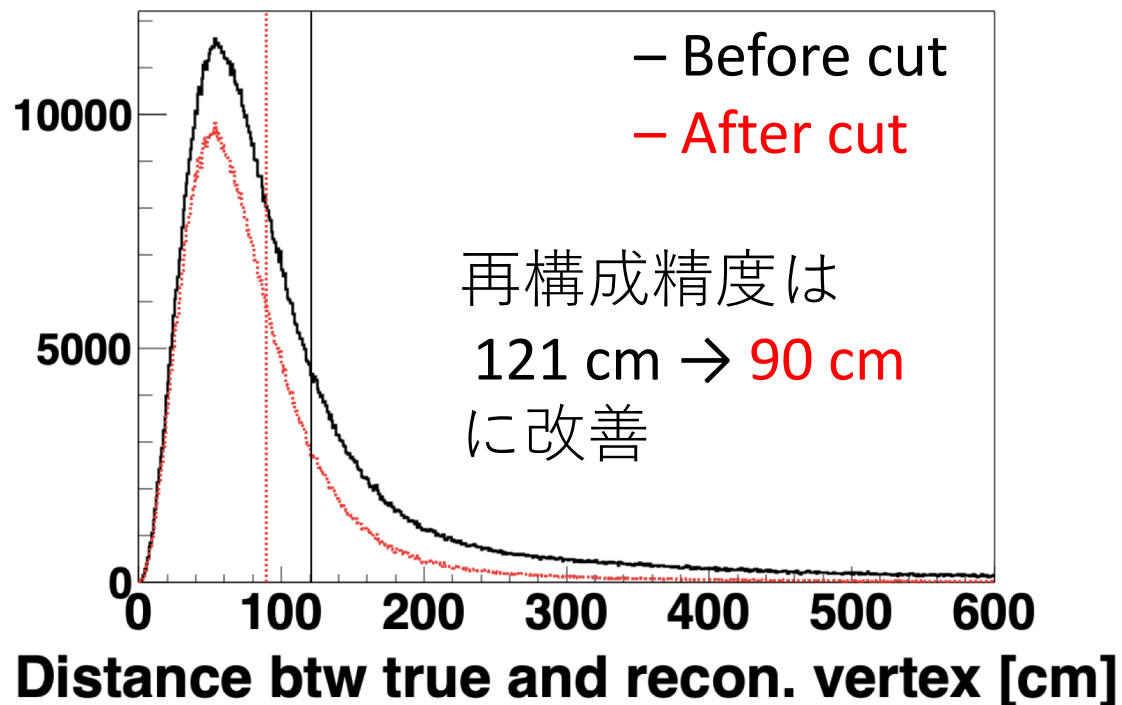
中性子位置を用いたニュートリノ再構成

- 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}_ν と E_ν を再構成
- 現時点では MC のみを用いて再構成を開発・試験。



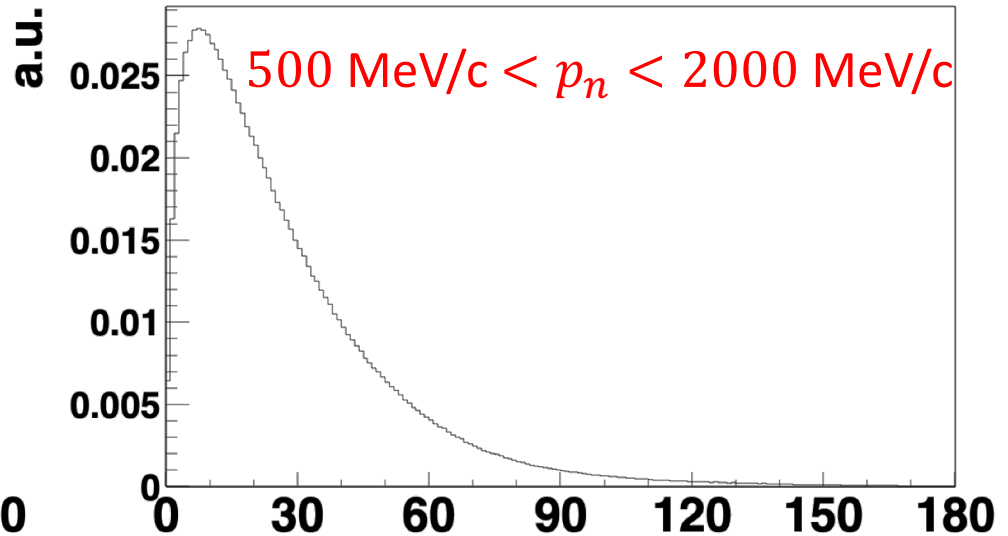
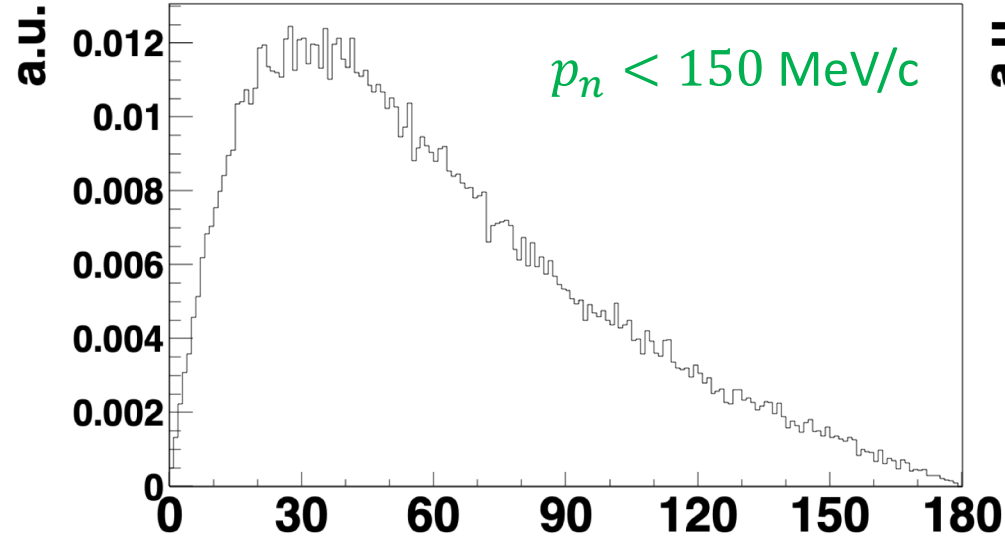
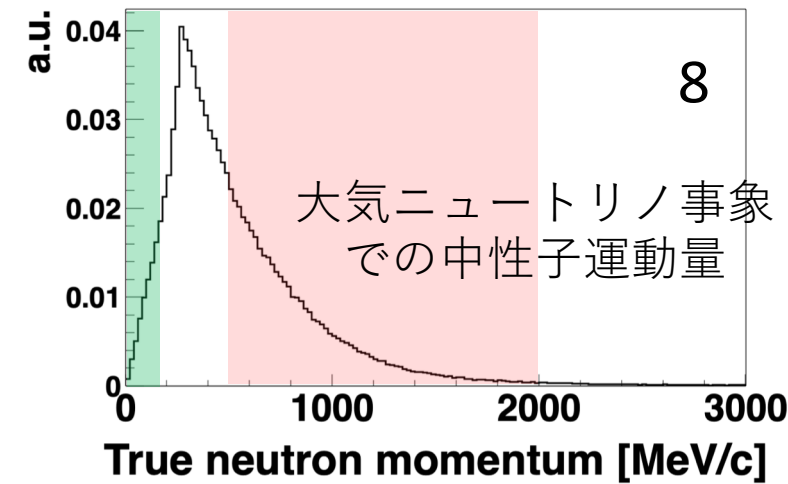
中性子信号の選択

- 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 \vec{PC}_{true} と生成方向とのなす角

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

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：

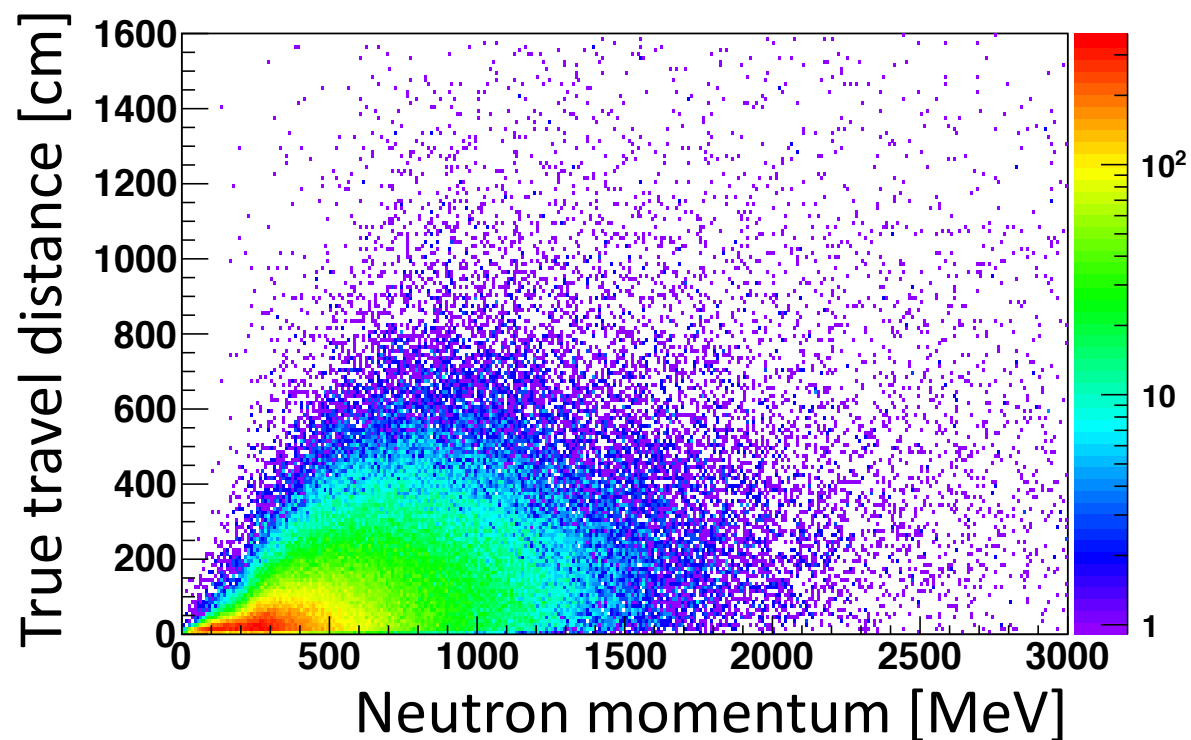
(linear) $p_n \propto |\overrightarrow{PC}|$

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

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

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

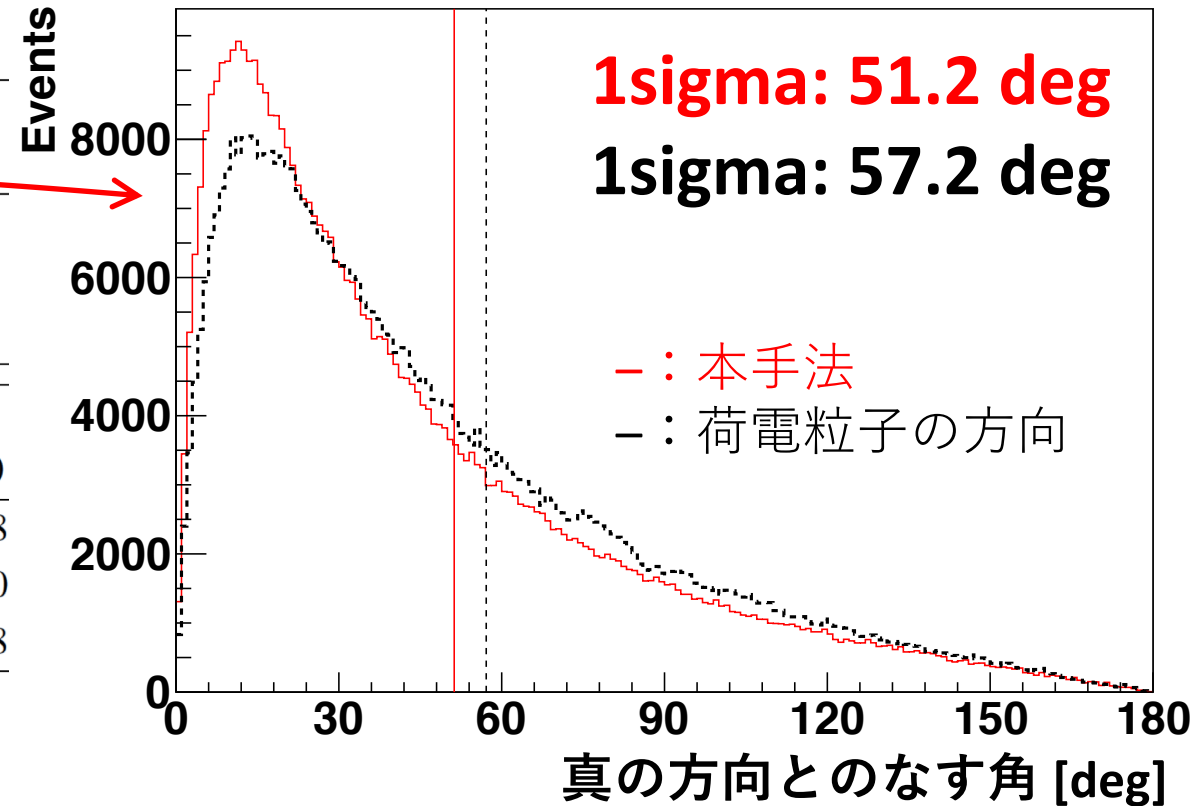
$$\log_{10} \frac{p_n}{p_0} = \frac{|\overrightarrow{PC}|}{b}$$



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。

[度]		a [MeV/c/cm]					
		1	1.5	2	2.5	3	4
(linear)	∞	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	51.2	51.5	52.0	52.8	54.2
[度]		b [cm]					
		1600	1400	1200	1000	800	600
(log)	100	52.8	52.7	52.5	52.2	52.0	51.8
	p ₀ [MeV/c] 200	51.2	51.2	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

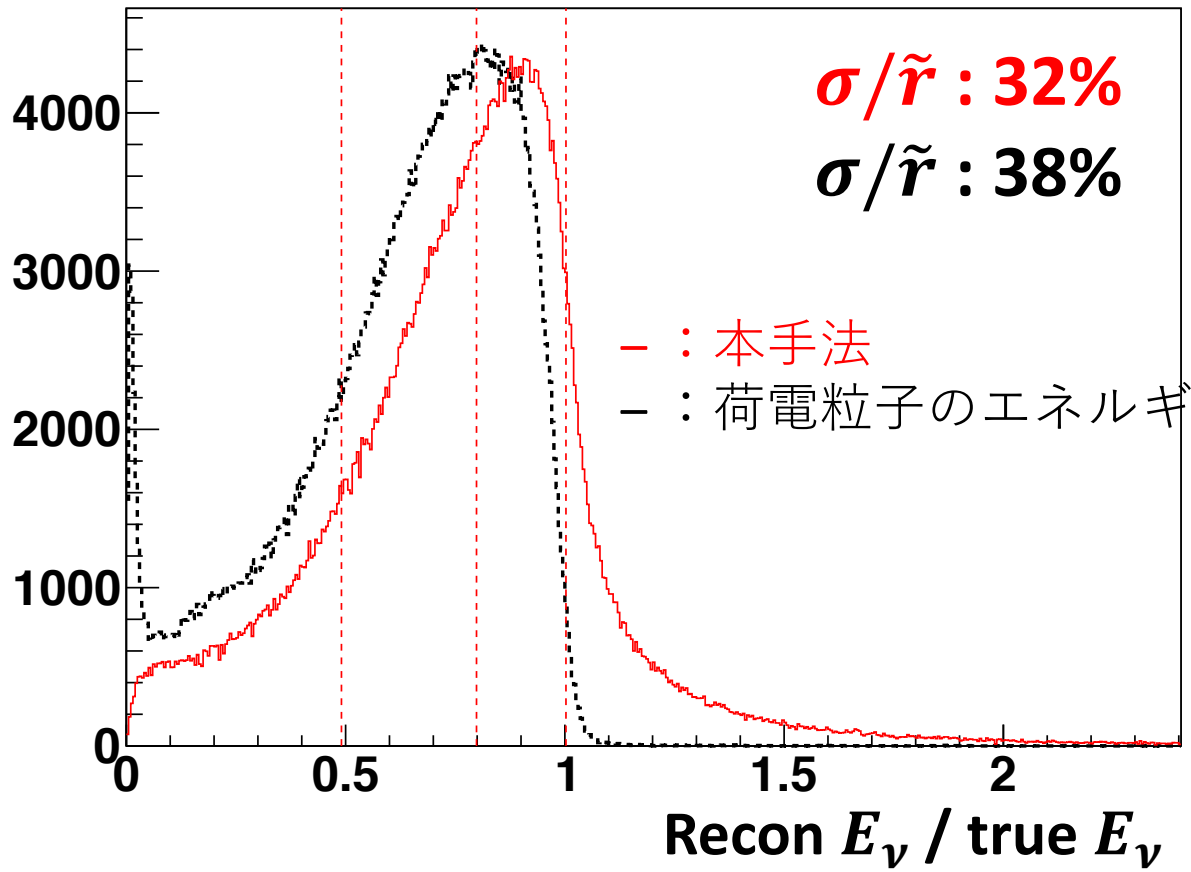
ニュートリノエネルギー再構成

- \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 σ との比 σ/\tilde{r} を最小化する。

(linear)

[%]		a [MeV/c/cm]					
		1	1.5	2	2.5	3	4
	∞	35	34	33	32	33	37
u [MeV/c]	1000	36	34	33	32	32	33
	700	36	35	34	33	33	33

Events

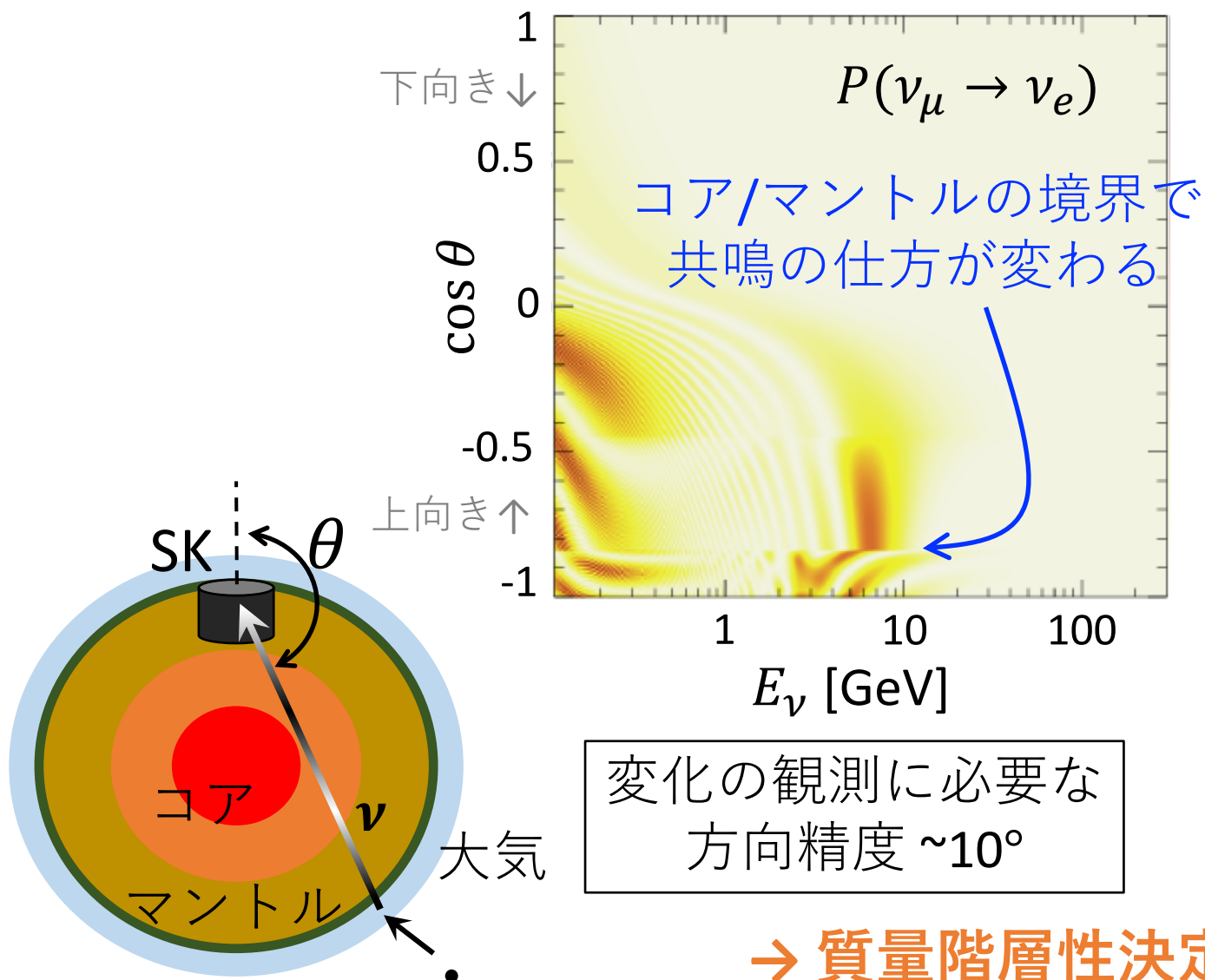


(log)

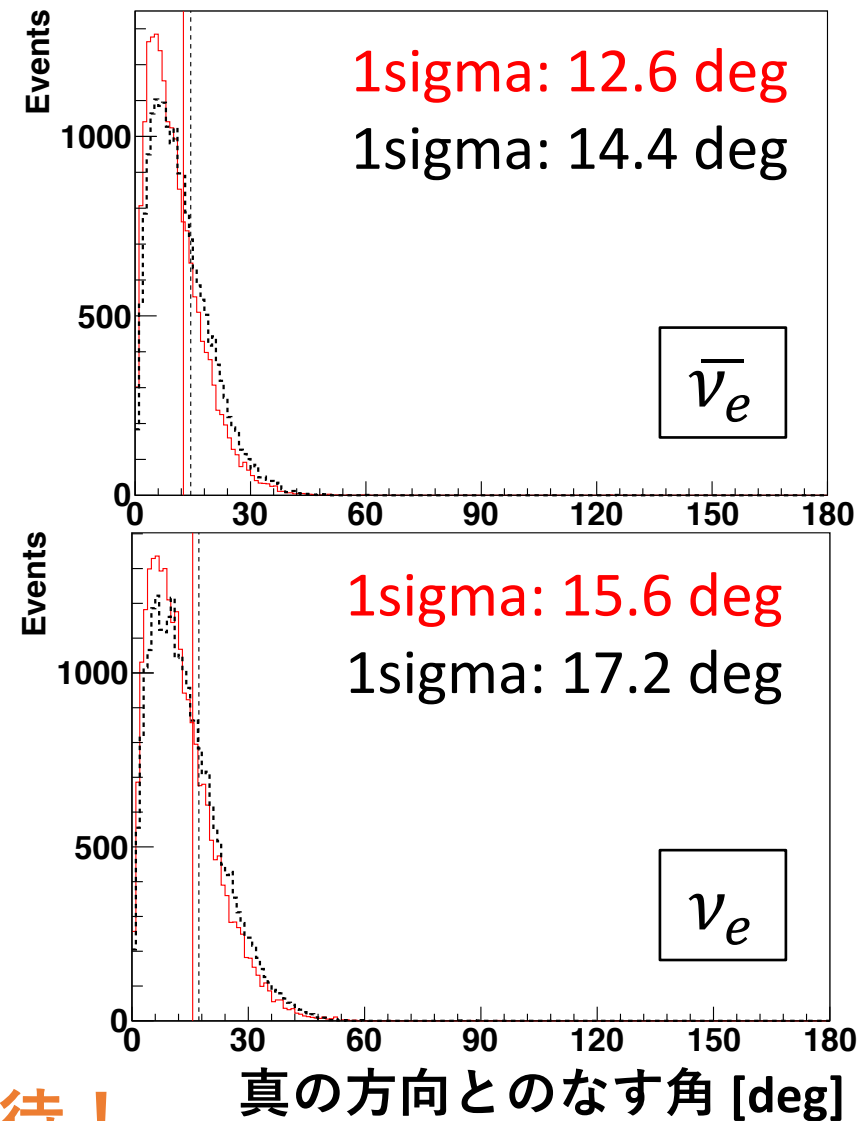
[%]		b [cm]			
		1600	1400	1200	1000
	100	37	37	36	36
p_0 [MeV/c]	200	35	35	34	34
	300	33	33	32	32

Recon E_ν / true E_ν

振動解析への影響



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



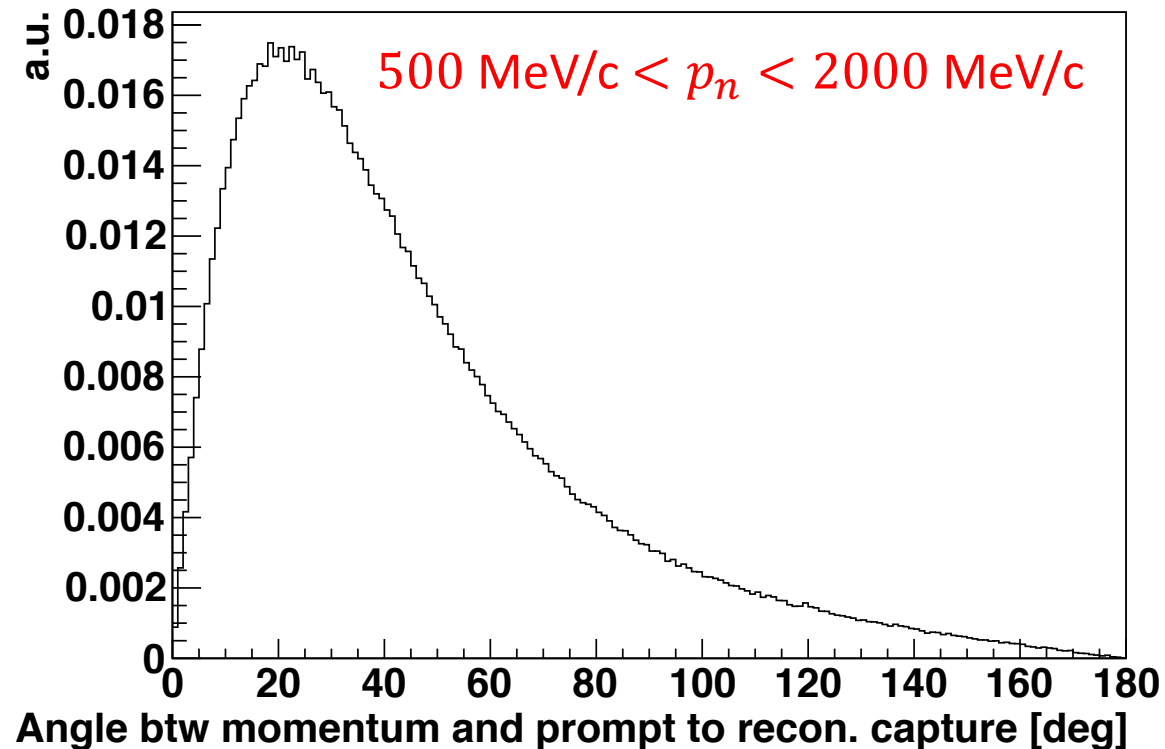
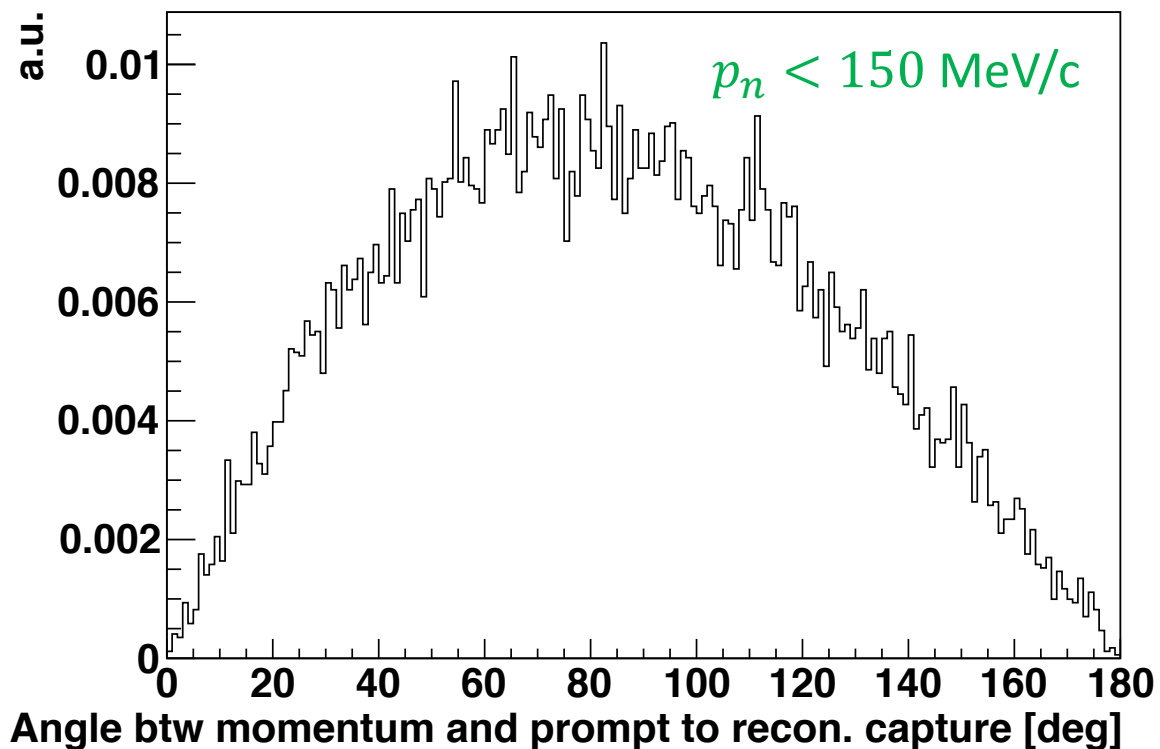
→ 質量階層性決定へ期待！

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

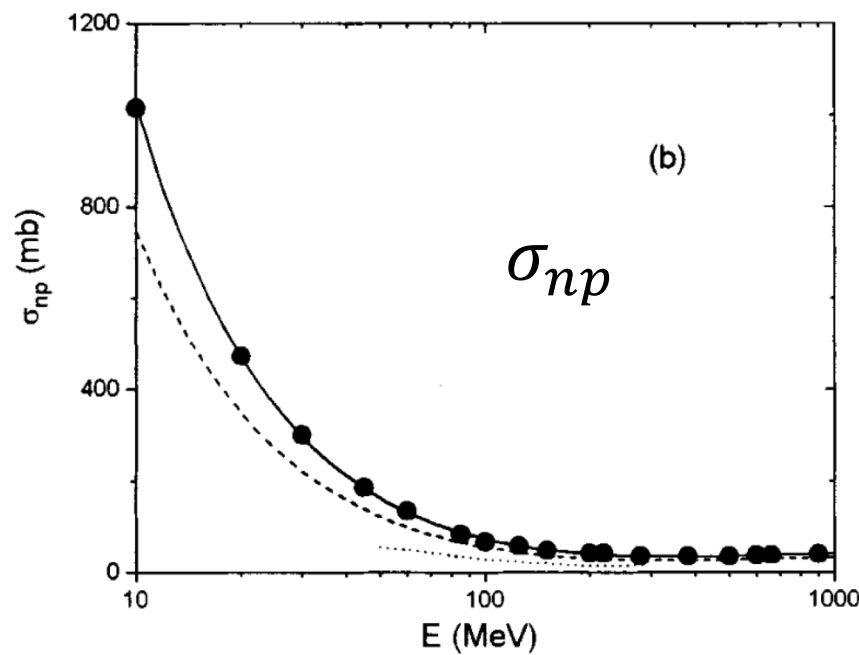
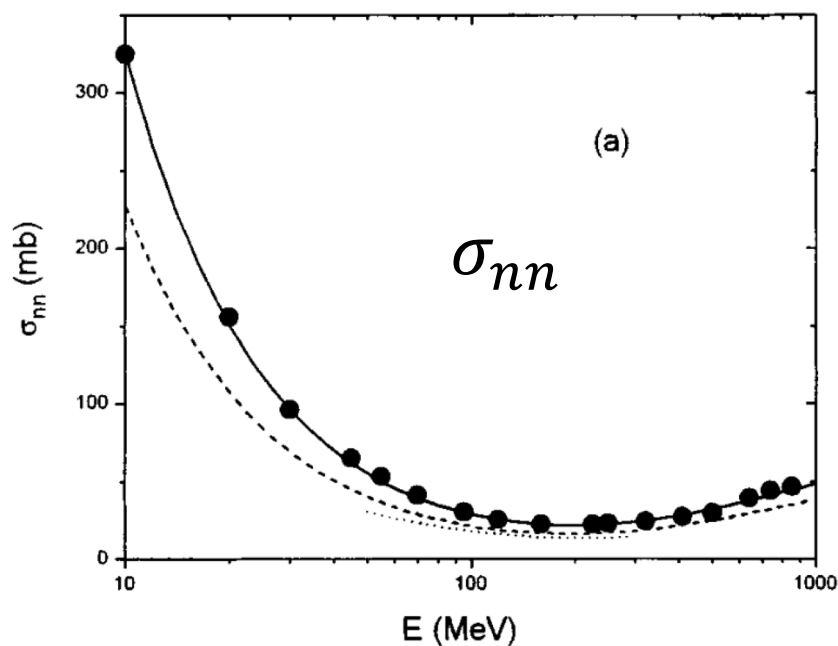
中性子の方向精度 (再構成位置で)



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

