

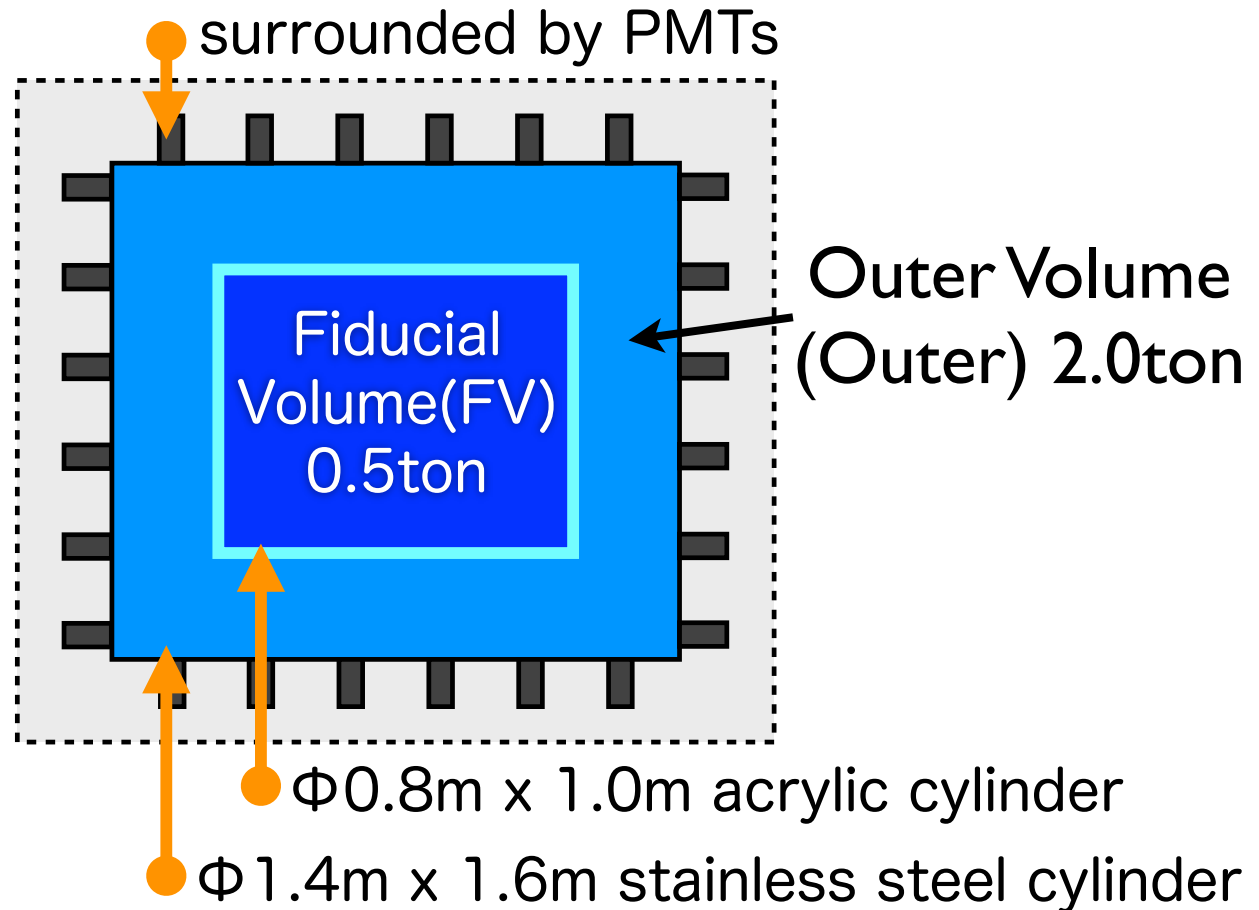
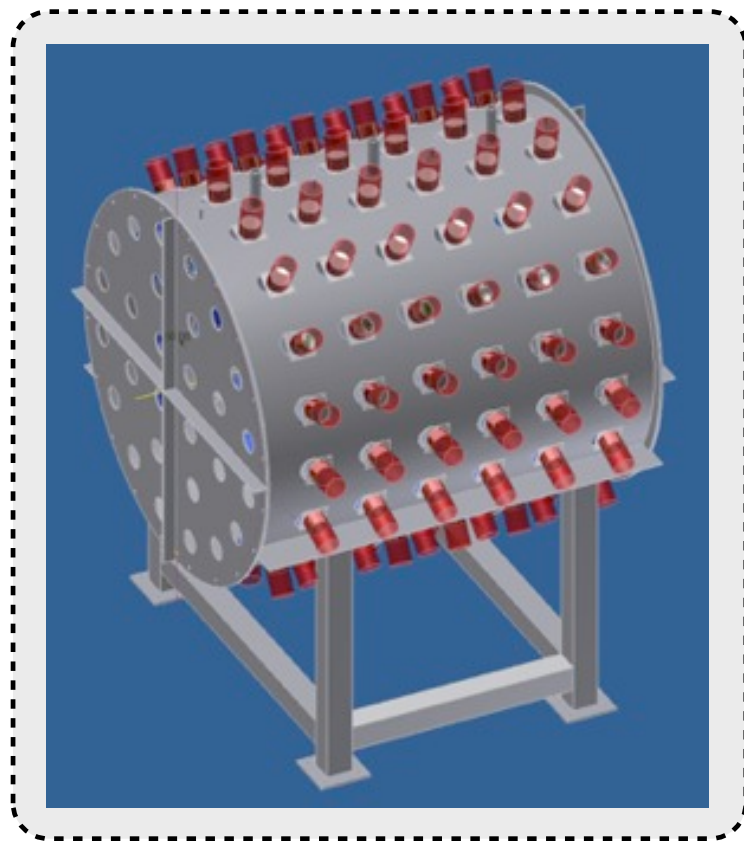
Mizuche Project MC study

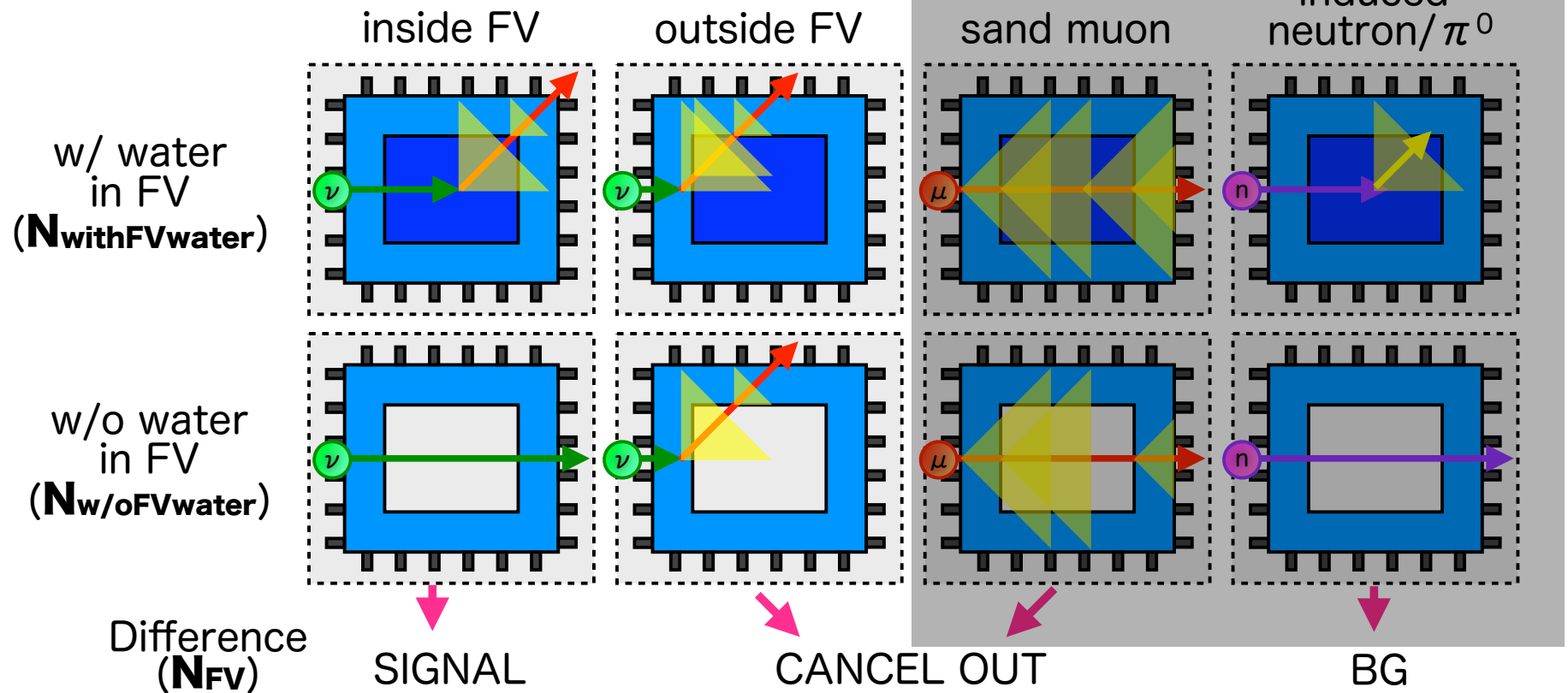
Mizuche Group

実験原理

Fiducial volume (FV)内で反応したニュートリノ数を、FVの水の抜き差しで、それらのイベント数の差を取って求める。

$$N_{FV}^{obs} = N_{Tank, w/FV water}^{obs} - N_{Tank, w/o FV water}^{obs}$$



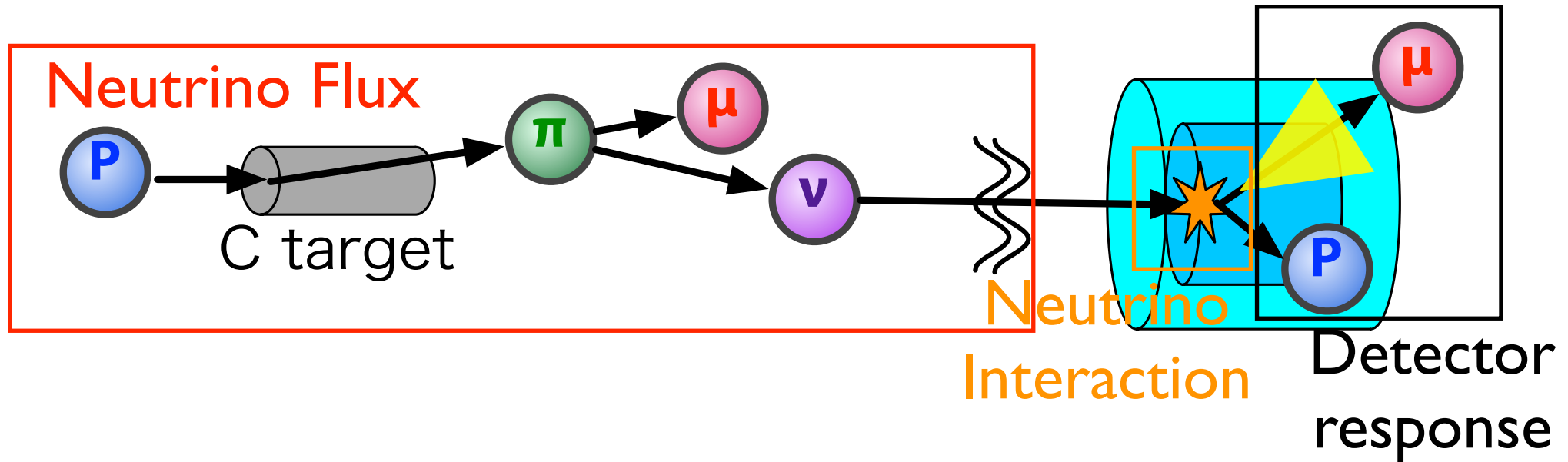


$$N_{w/FVwater}^{obs} = N_{FV}^{int} \times \epsilon_{FV} + N_{Outer}^{int} \times \epsilon_{w/FVwater}^{Outer}$$

$$N_{w/oFVwater}^{obs} = N_{Outer}^{int} \times \epsilon_{w/oFVwater}^{Outer}$$

- 水の抜き差しでFV内でのイベント数を求めるためには、Outer内でのイベントに対する検出効率が水あり・水なしの場合で一致する必要あり。

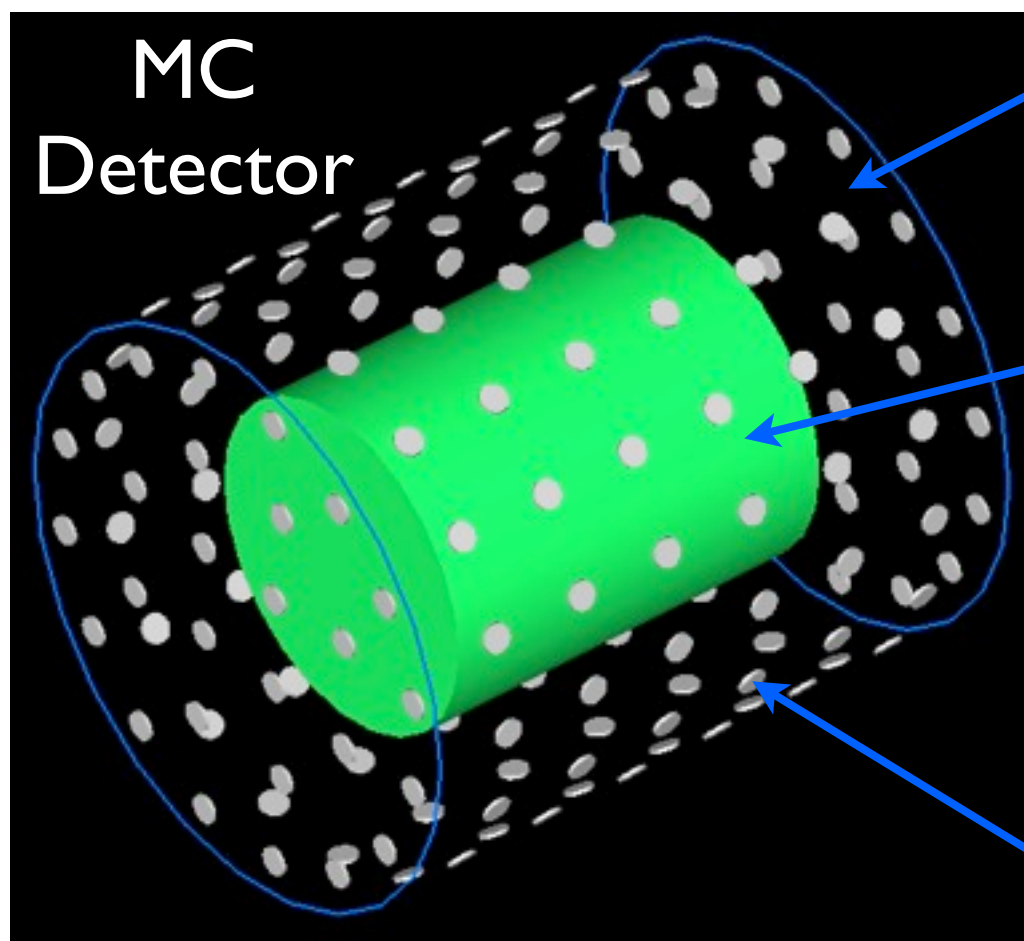
Overview of MC



- Neutrino Flux : ほぼタンクの場所でのFlux (正確なfluxは作成中)
- Neutrino interaction : Fluxを元にNEUTで水でのニュートリノ反応をシミュレート.
- Detector response : GEANT4で検出器を再現. 荷電粒子によるチェレンコフ光生成をシミュレート.

Detector MC : Geometry

- タンク、Fiducial volume (FV)のスペック、PMTの設置位置は実機スペックをGEANT4で再現.



タンク :
半径70cm, 長さ1.6m

FV(アクリルチューブ) :
半径40cm, 長さ1m, 厚さ
5mm, 8mm

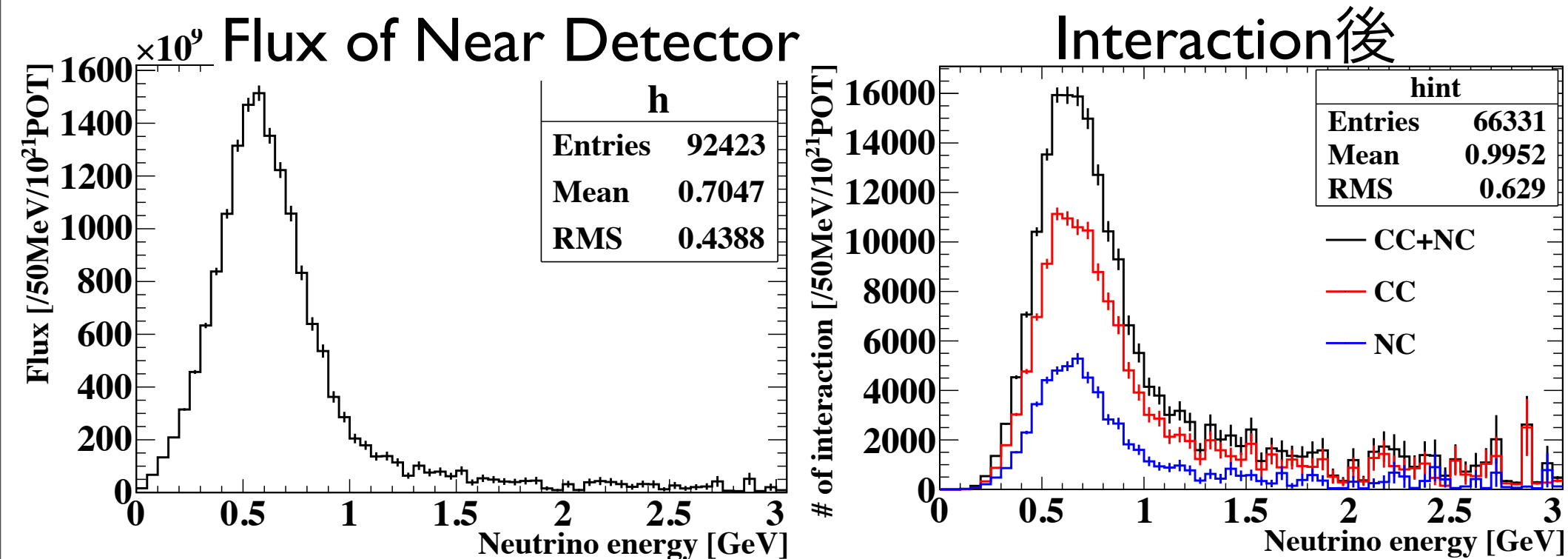
PMT × 164本 :
窓の半径3.5cm

Detector MC : setting

- 水・アクリル・空気の境界について
 - 境界は真っ平らな状態(乱反射しない)
 - 各物質に屈折率を設定.
 - 水：光の波長に依存して変化(1.34~1.36).
 - アクリル：一定値(1.49)
 - 境界での屈折率・反射率は簡単なモデル(Fresnel formula)を使用.
 - タンク内側では反射しない (現実にするかは要検討)
- PMTのQEは浜ホトのカタログ値を参照.

Neutrino interaction MC

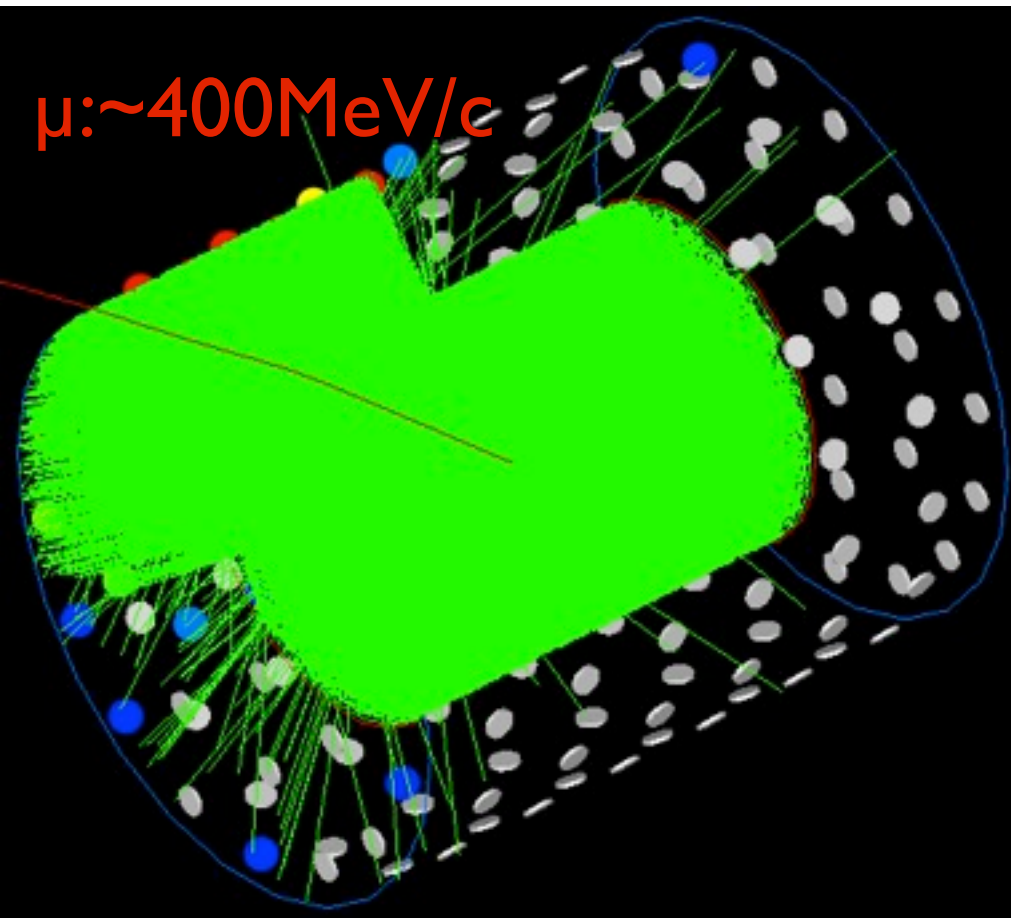
- 同じニュートリノ反応サンプルに対して、FVに水あり・なしの二通り。
- GEANT4でのニュートリノ反応点はタンクの水中で一様に分布させる。



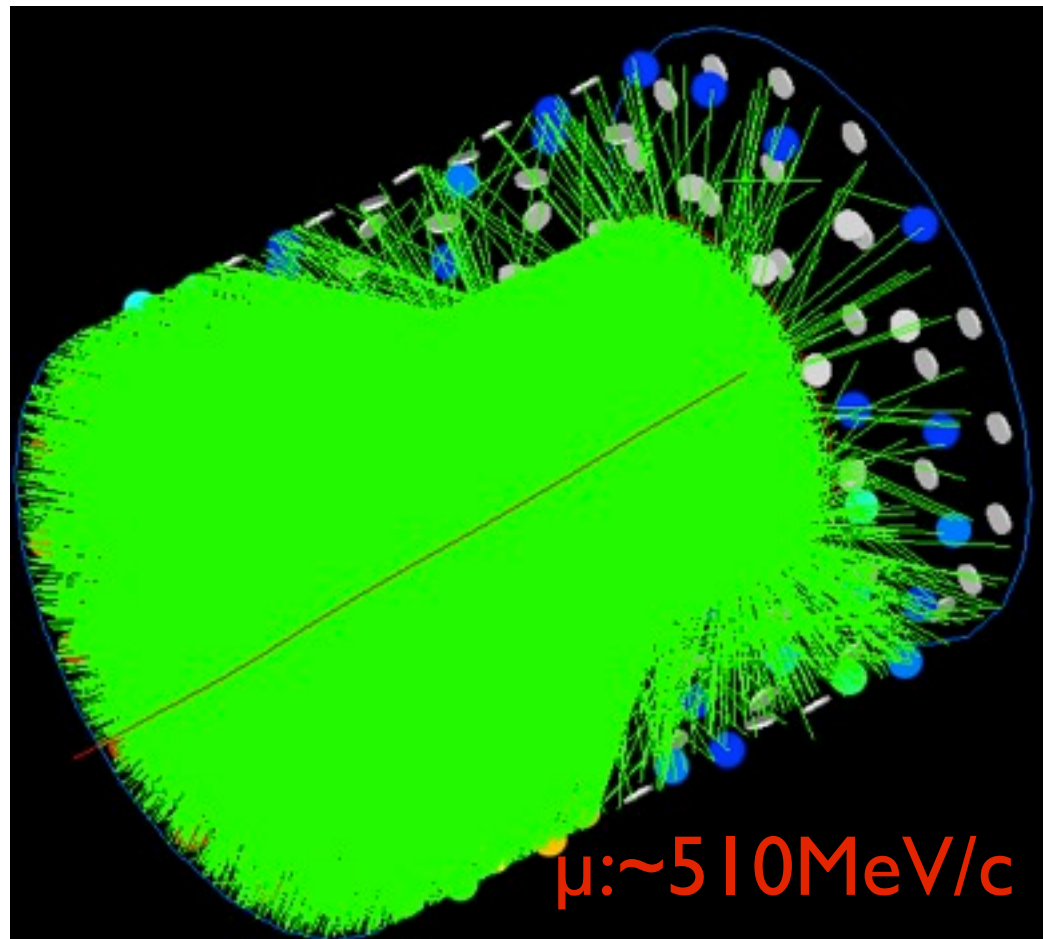
Event display (CCQE) : w/ FVwater

ν :0.54GeV, in FV

ν :0.56GeV, in Outer (上流)



Total p.e.=458

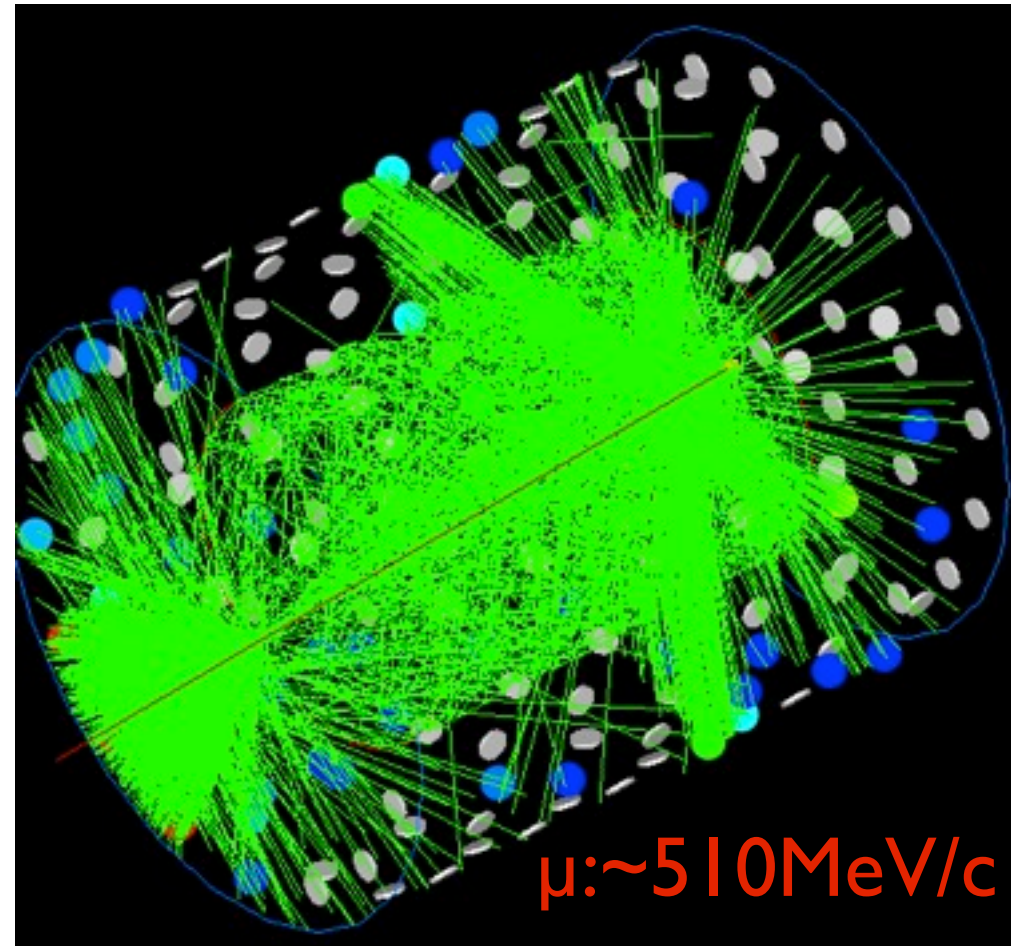


Total p.e.=860

Event display (CCQE) : w/o FVwater

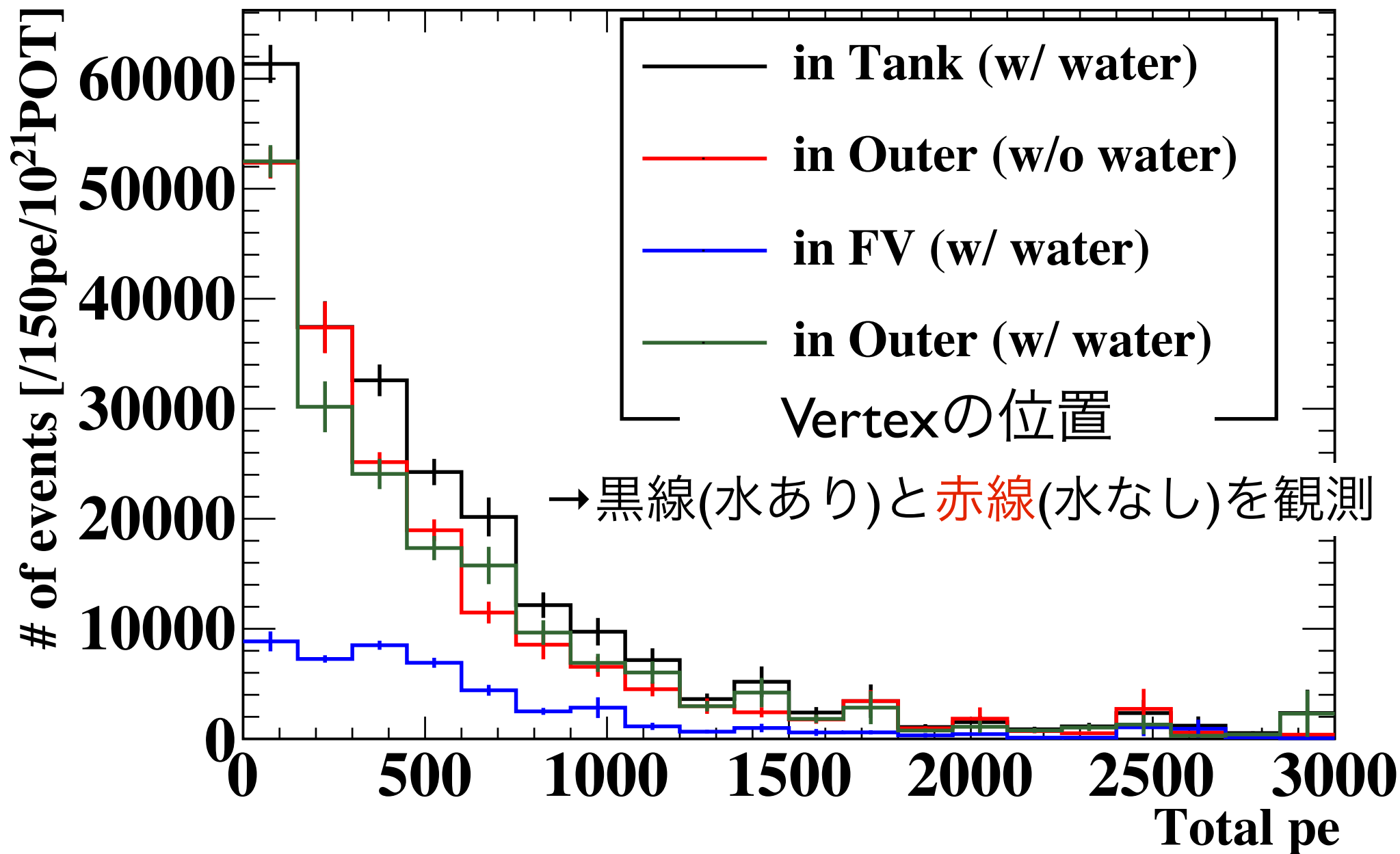
ν : 0.56 GeV, in Outer (上流)

FV内に水がないので、
Outer部分での反応のみ

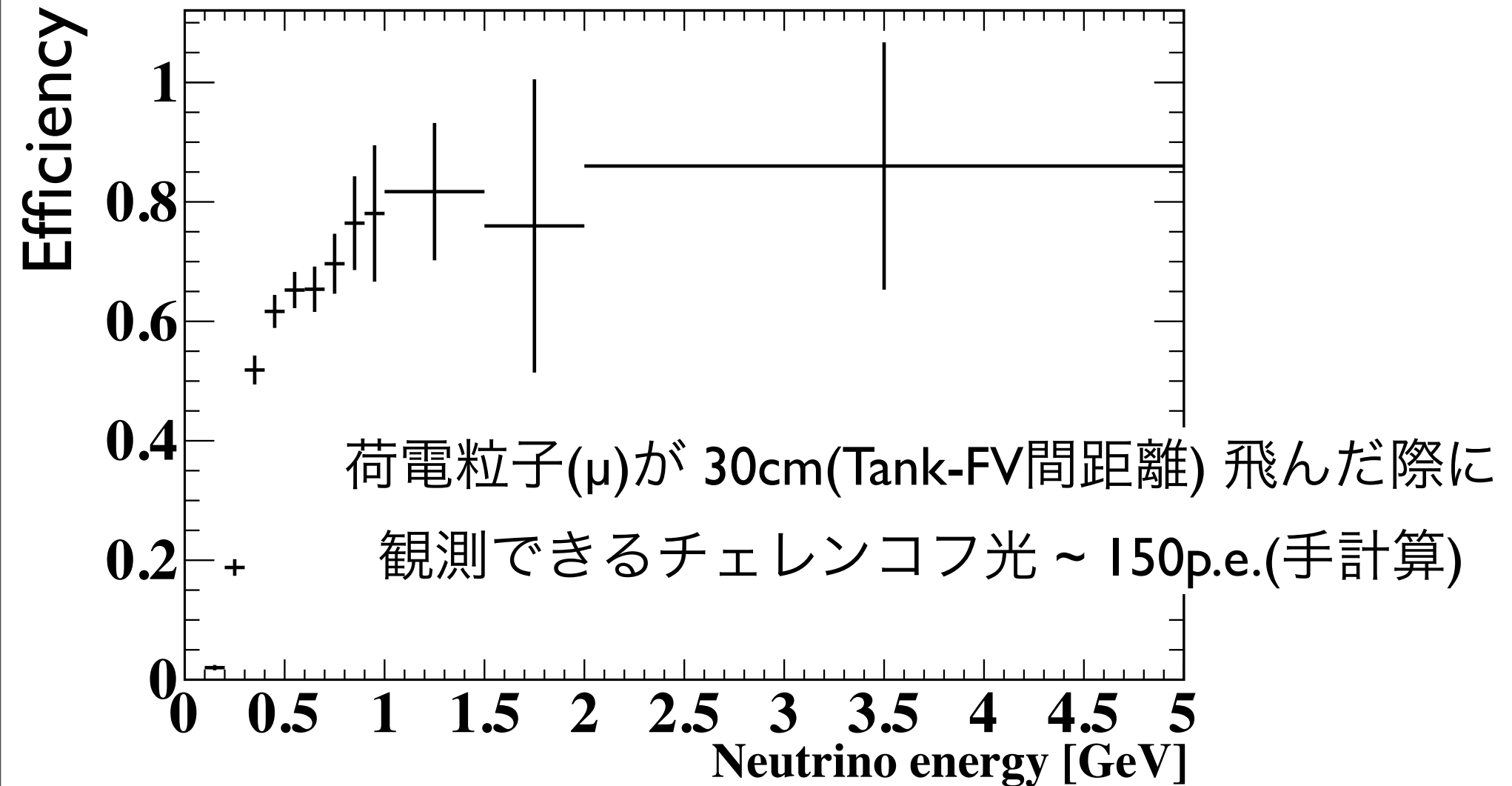


Total p.e.=273

Total p.e. distribution

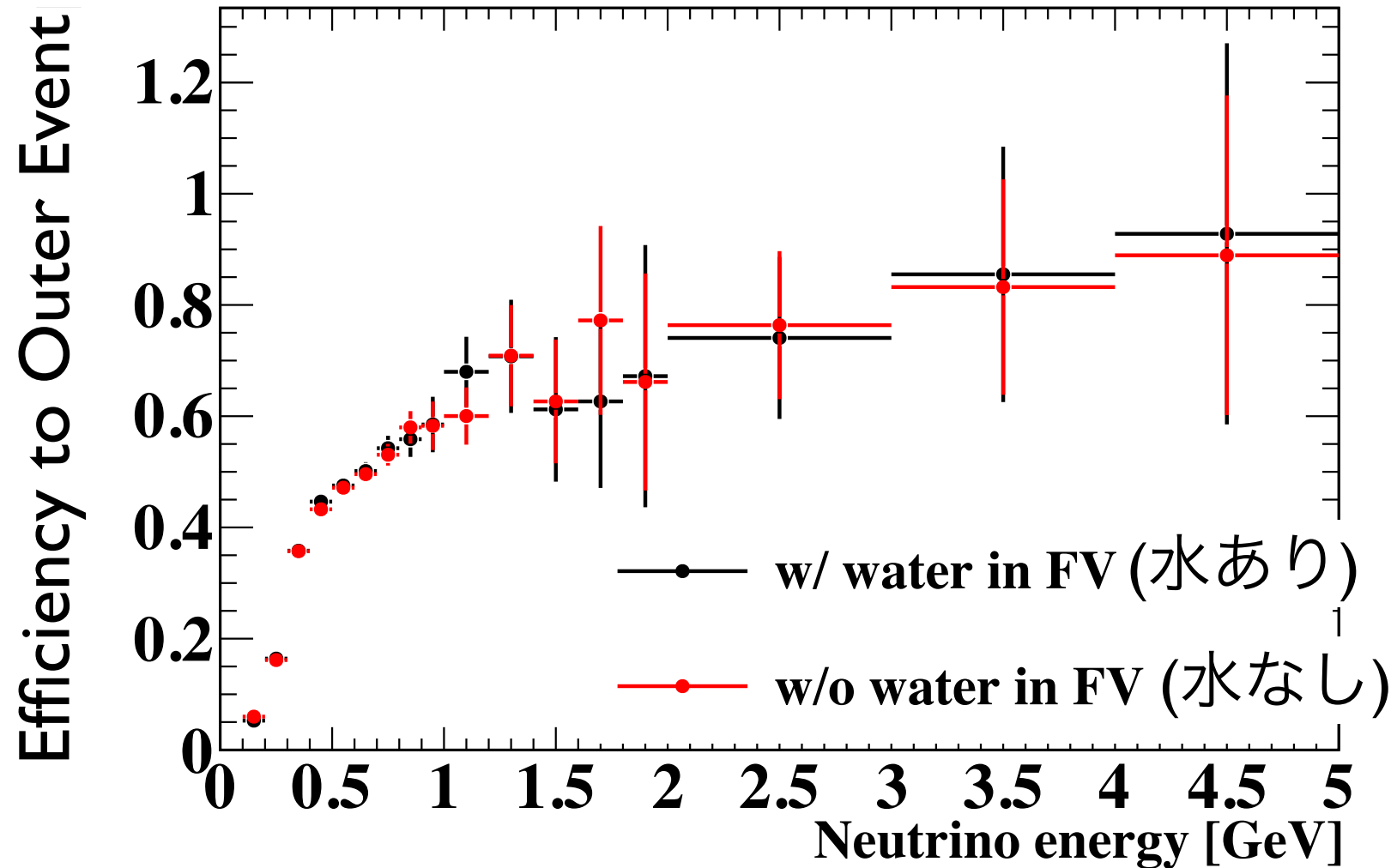


Efficiency (total p.e. > 150) to neutrino interacted **in FV** (CC+NC).



Total p.e. > 150 cut であれば、SKのefficiencyに近い

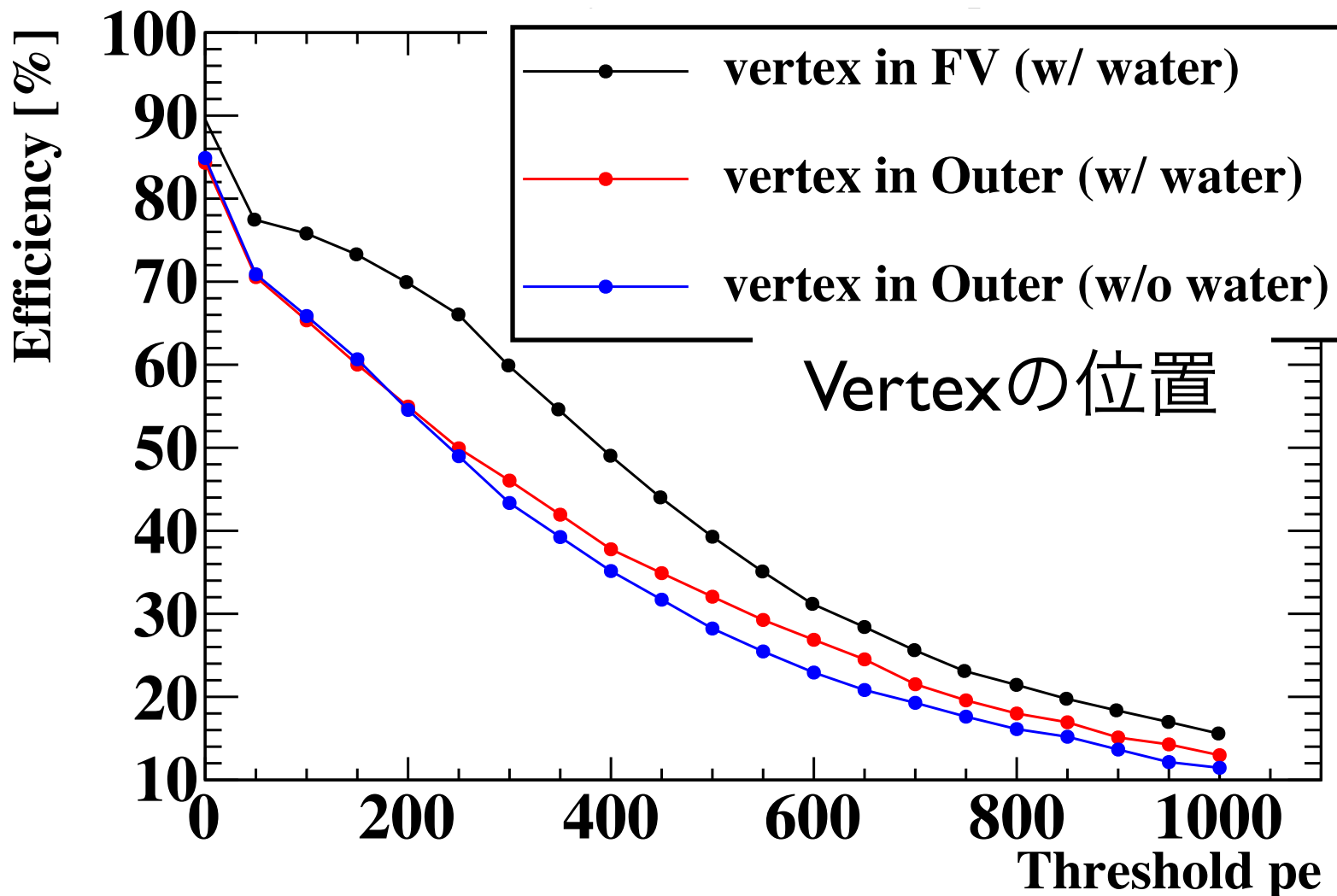
Efficiency (total p.e.>150) to neutrino interacted **in Outer** (CC+NC).



Total p.e.>150 のカットなら、Outerで反応したニュートリノの数は差し引きで上手く引ける。

Efficiency vs total p.e. threshold

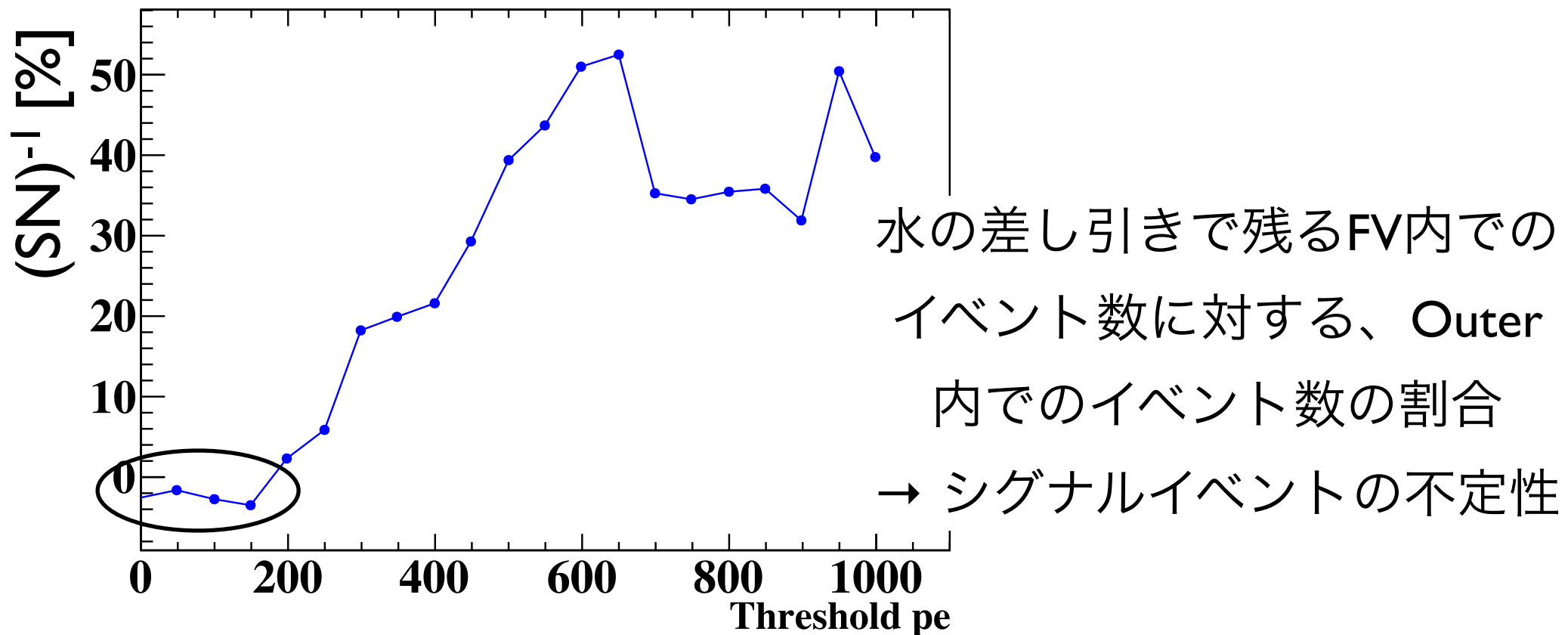
反応数に対する、threshold以上の光量が出るイベント数



低光量領域ではOuterでの検出効率是一致

Total p.e. > 150 cut の時、FVイベントに対する検出効率は~75%

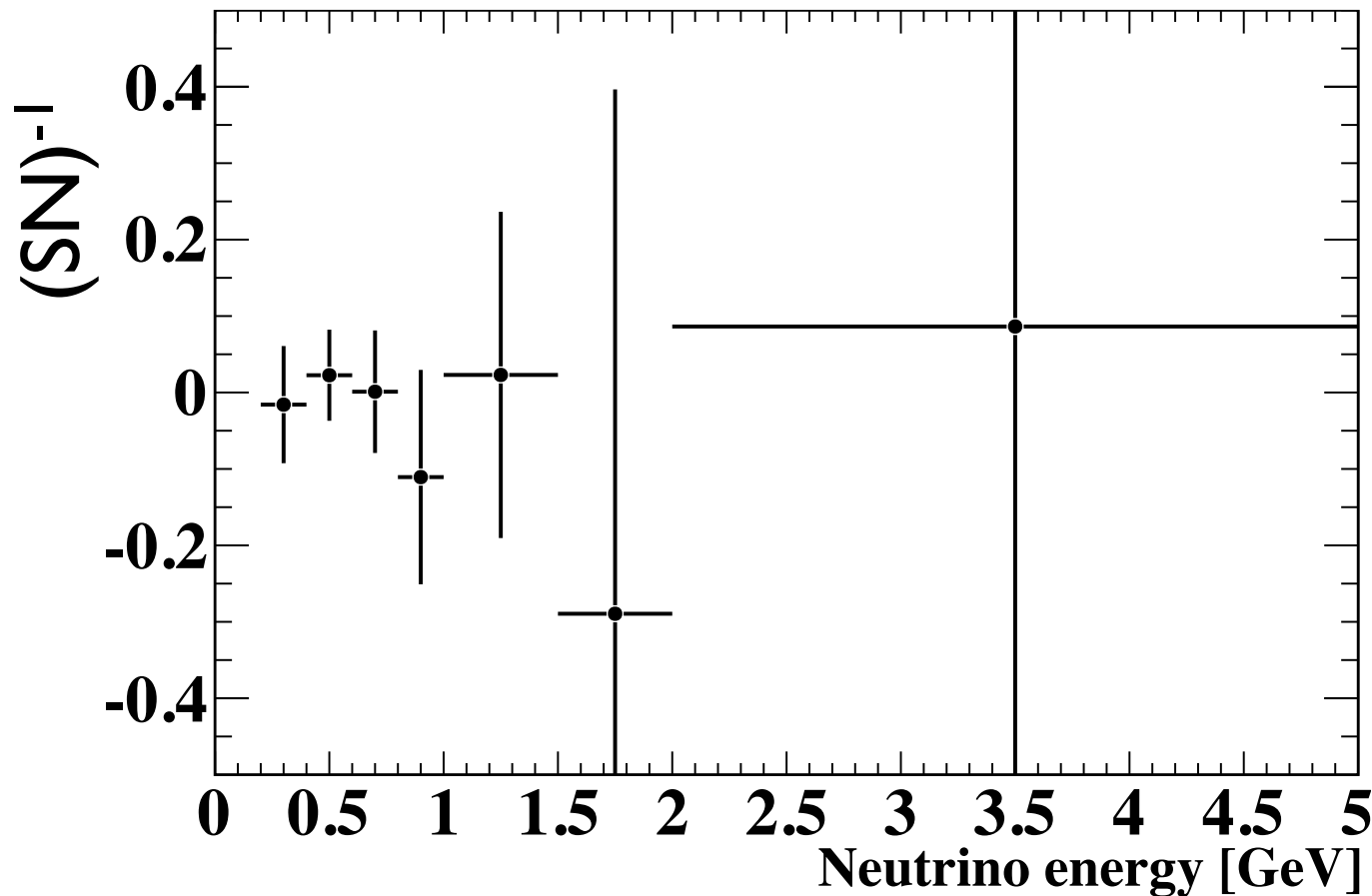
$(\# \text{ of remaining Outer events}) / (\# \text{ of remaining signal (FV events)})$



高いthresholdでは残ってしまうOuterイベント数が多くなる。
Threshold を低く設定すれば、高いSNでの測定が期待できる。
(現時点ではMCの統計足りない→統計を増やして確認中)

$(\# \text{ of remaining Outer events}) / (\# \text{ of remaining signal (FV events)})$

Total p.e. > 150 カット後の $(\text{SN})^{-1}$ のエネルギー依存性.

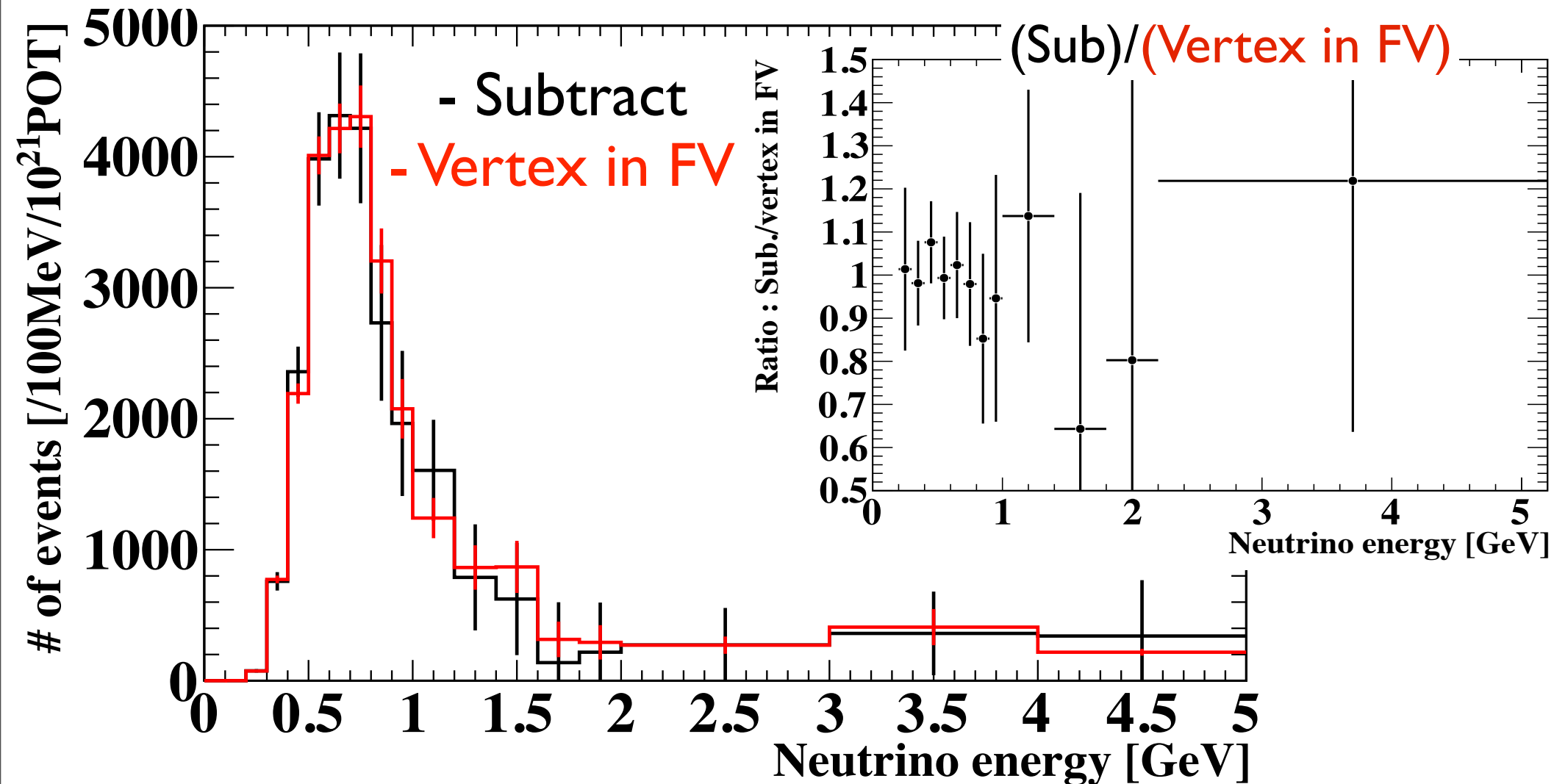


Big MC stat. error
(Due to low stat.)

At low energy region, $(\text{SN})^{-1} < 3\%$

Observed neutrino energy (CC+NC)

Total p.e.>150のカットで検出できるニュートリノのエネルギー



Subtract: 水あり・なしの差し引きで残るニュートリノ

of events [$/10^{21}$ POT]

CC+NC interaction

	Generate	Total pe > 150	Efficiency
# of events w/ FVwater	2.43E+05	1.53E+05	0.63
# of events w/o FVwater	1.94E+05	1.16E+05	0.60
# of events sub.	4.90E+04	3.70E+04	0.76
# of events generated in FV	5.05E+04	3.70E+04	0.73

of events sub =
(# of events w/ water) - (# of events w/o water)

of expected events / day

Assume 100kW $\sim 7.2 \times 10^{16}$ POT/hour (1 day=24hours)

Use this MC	Interactions/day in Tank	Observations/day in Tank
w/ FVwater	420 /day	264 /day
w/o FVwater	335 /day	200 /day

Summary of this study

- Total p.e. > 150 のカットを用いれば、Outerで反応したニュートリノに対する検出効率は一一致.
- FVで反応したニュートリノを高いSN($(\text{SN})^{-1} \sim 3\%$)で測定できる.
- 光量のスケールを含めた検出器の理解を深めるための手法について、こういったものが考えられるか.

検出器の理解の手法

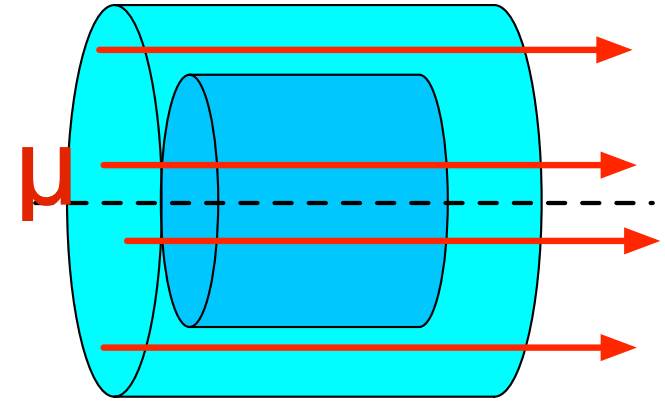
- 何をおさえるべきか
 - MCで予測される測定光量のスケール
 - 境界での反射・屈折 (水ありの場合と水なしの場合)など
- B2スペースでビーム起源の壁からのミュオン(ロックミュオン)を用いて上記のことが確認できることを示す.
- ロックミュオンレートの見積もり.
- MCからロックミュオンによる検出器の応答の予測.

ロックミュオンレート

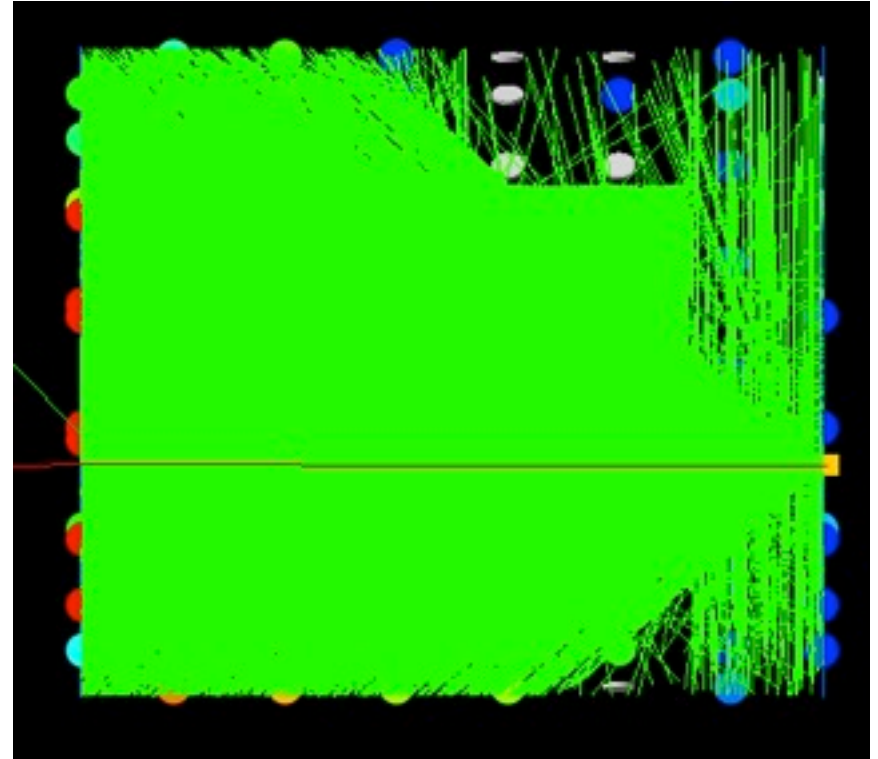
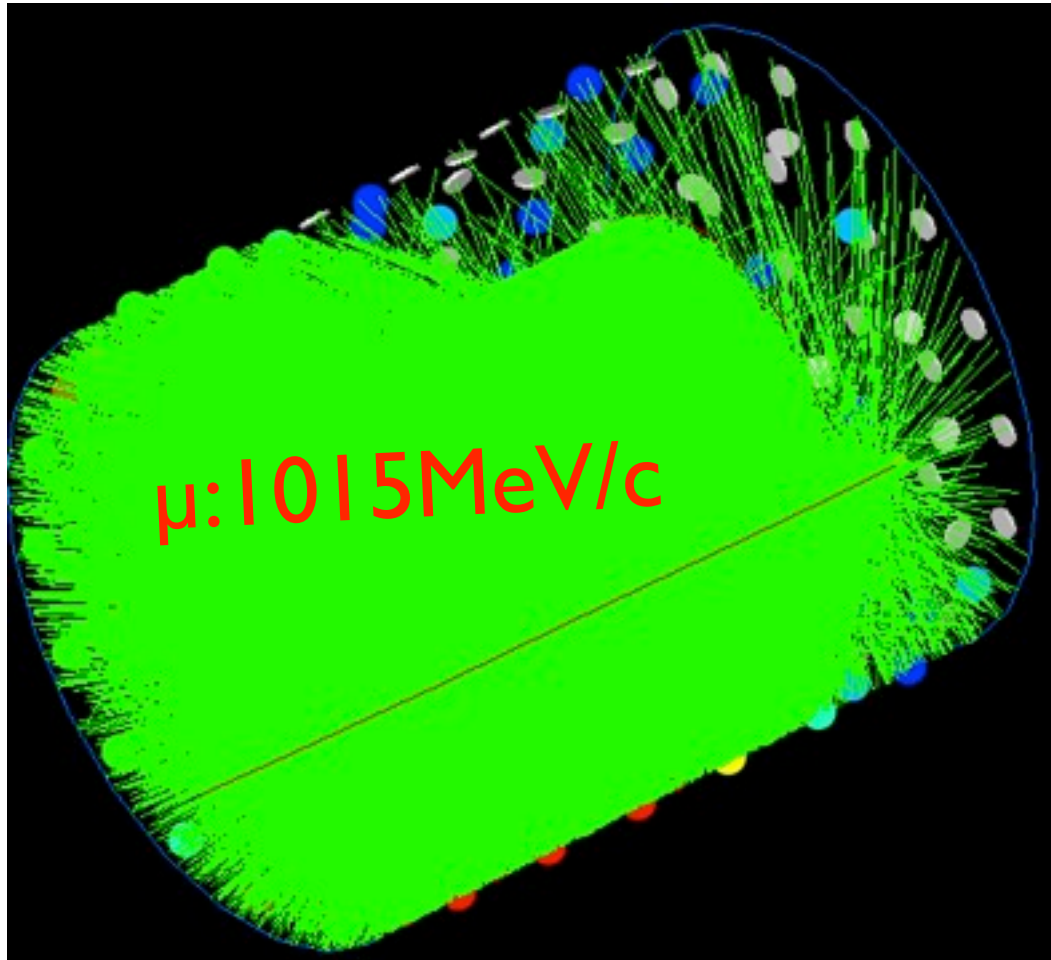
- INGRIDのニュートリノビーム測定のDataから見積もる.
 - トラッキングを行い、モジュール外から来た長いトラックを残す粒子を選ぶ.
 - $471800/3.26e19$ # of protons at all modules (ニュートリノイベントとほぼ同じくらい).
- INGRIDのロックミュオン検出効率 ~ 1 と仮定する.
- 面積比を用いてタンク上流から飛来するロックミュオンを見積もる → **92.7 muons/hour @100kW**
- 10時間で $\sim 1e3$ particles, 1週間で $\sim 1e4$ particles.

MC setting

- μ をタンク上流から打ち込む
- μ の条件
 - 運動エネルギー:450~1450 MeVの間で一様
 - 入射方向は、とりあえずタンク軸に平行に.
 - タンク上流の蓋上で一様に発生.
- タンクを貫通した μ のみを選択してプロット
- FV内に水あり・水なしの二通り
- Normalization : 927 muons (100kW × 10 hours)



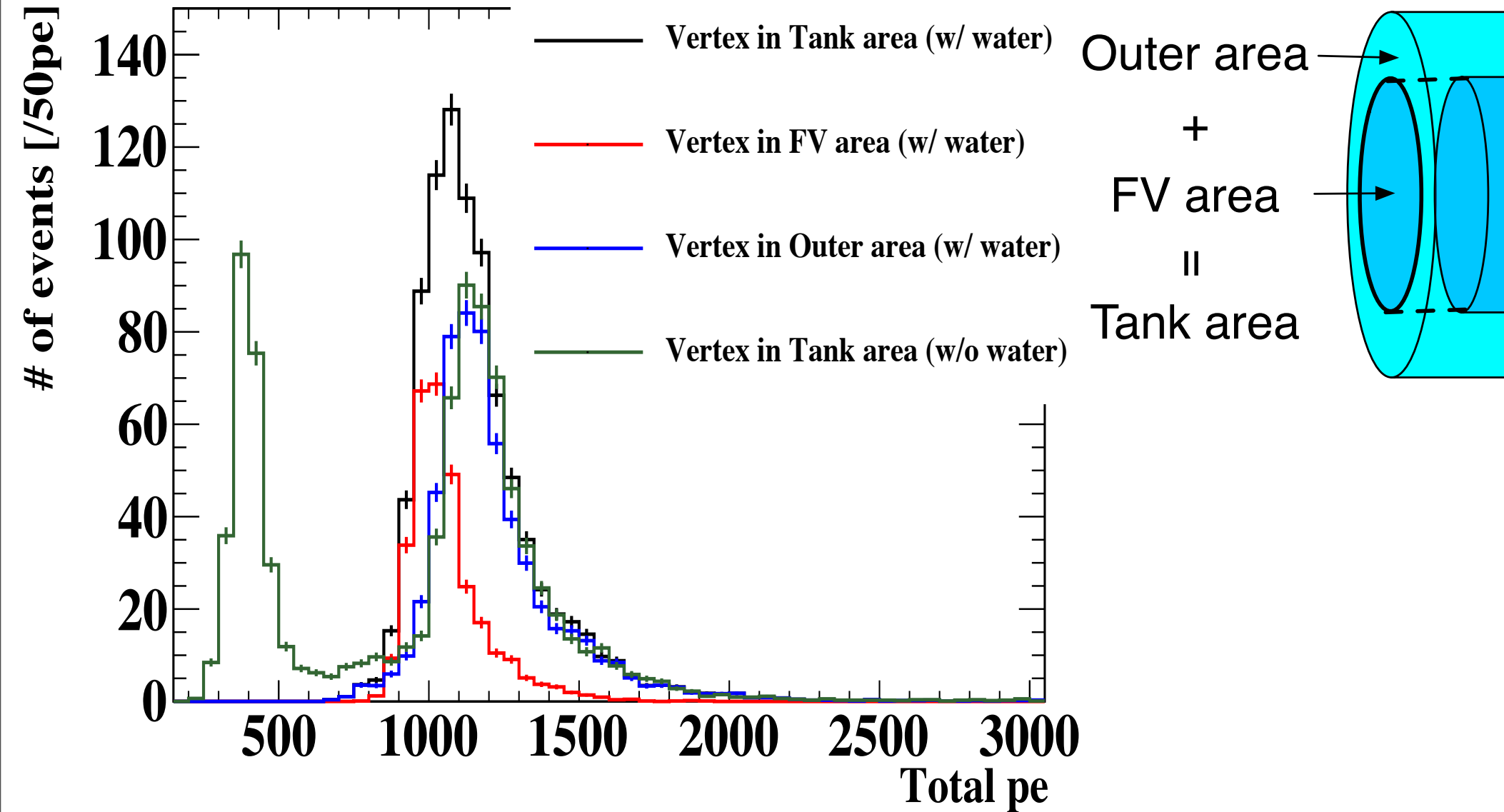
Sample of event (水あり)



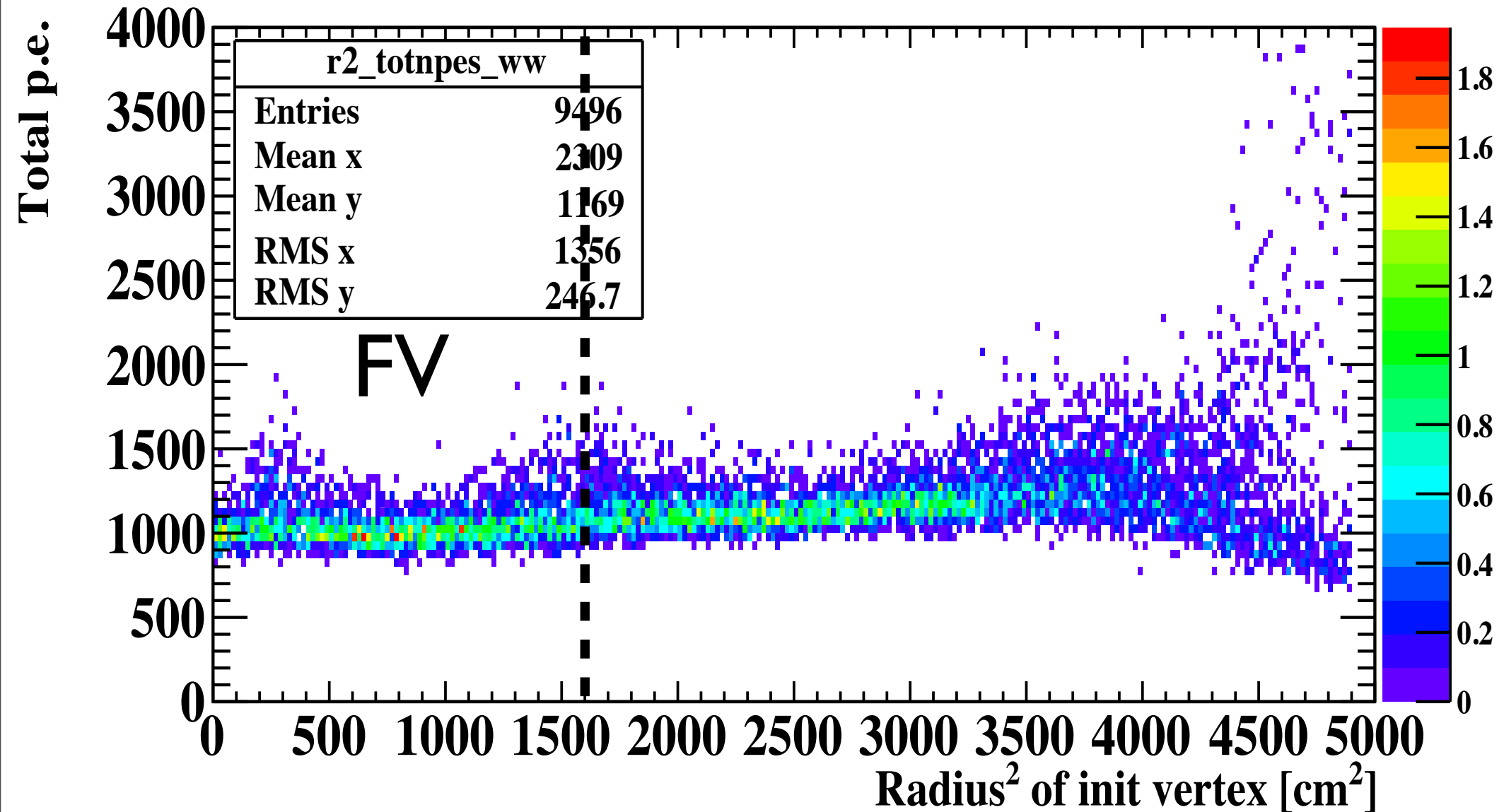
Total # of measured pe = 1148

Total p.e. (each categories)

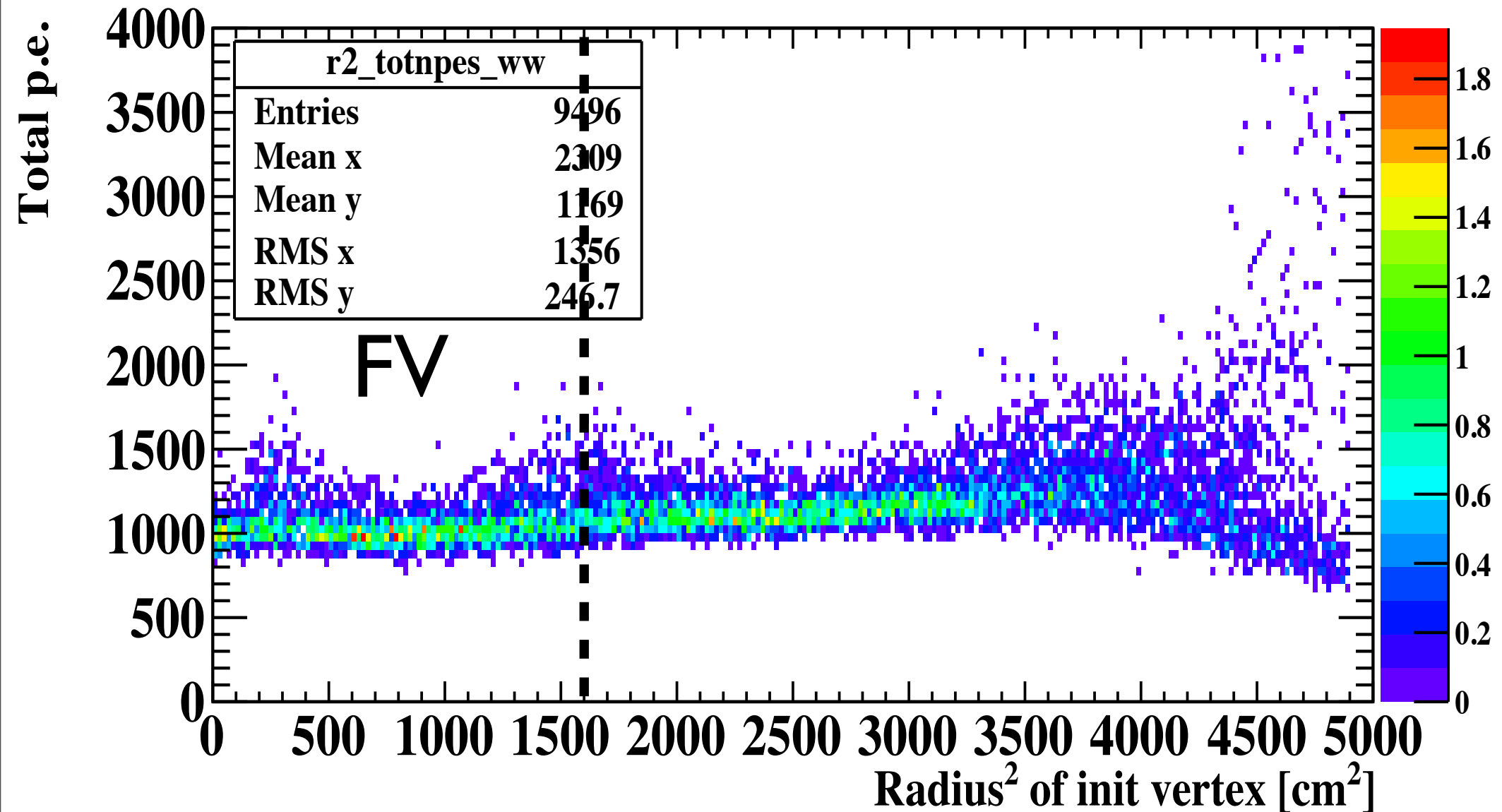
Total p.e. (with HIT threshold)



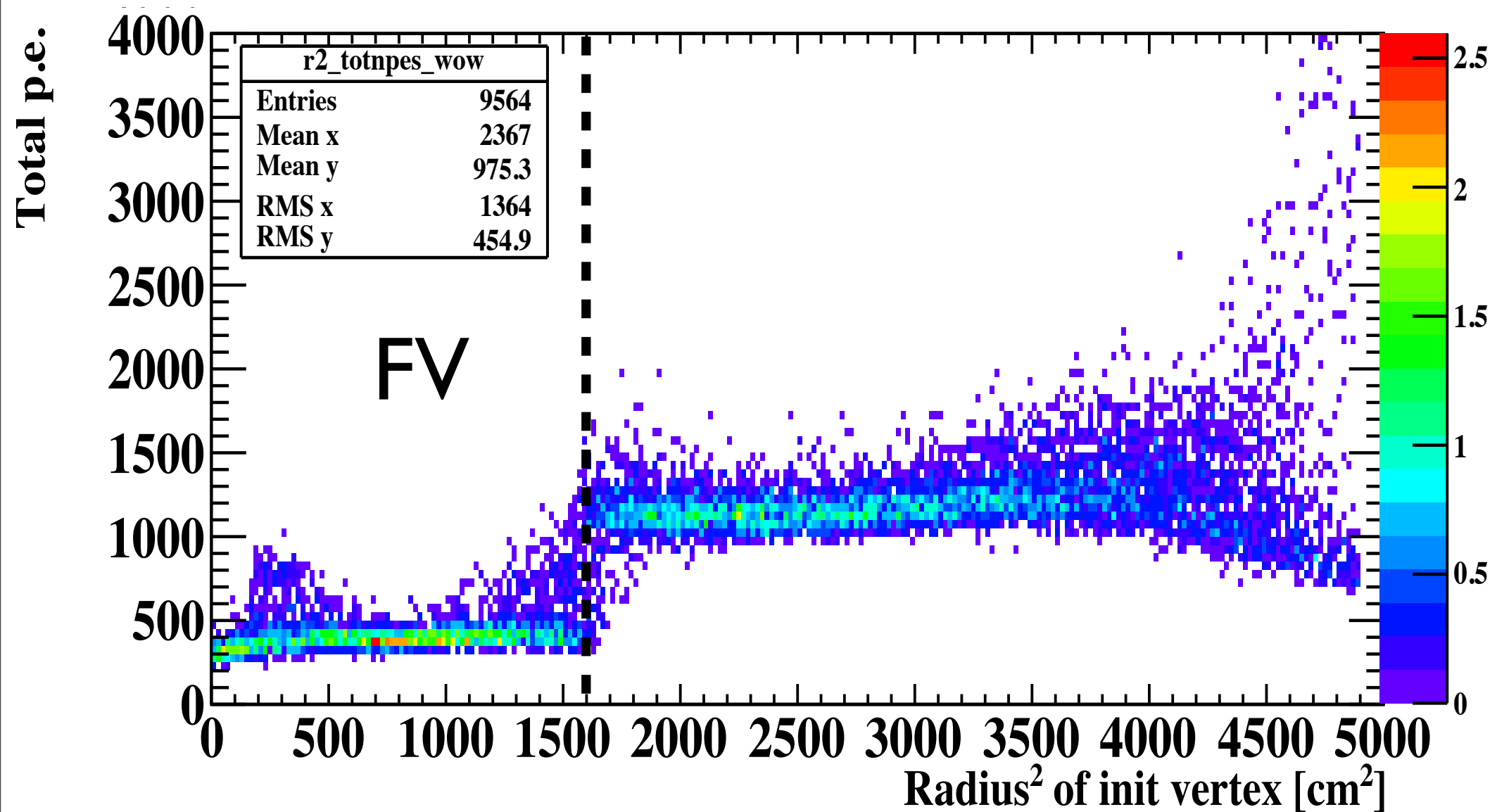
Total p.e. vs (Radius)² (w/ water in FV)



Total p.e. vs (Radius)² (w/o water in FV)



Total p.e. vs (Radius)² (w/o water in FV)



理解を深めるための手法

- 光量のスケール・境界面でのプロセスを含めた検出器の理解を行う.
- 中心からの距離を変えながら数点で測定し、その位置での光量を求める → エネルギースケールの調整. 検出器の応答の確認.
- トリガーをタンク中心に対して対角線上に置くことで、角度のついたミュオンに対する測定も行う.
- タンクの上流下流にトリガー(ホドスコープ)を設置。タンクを突き抜けるロックミュオンをトリガー.
- 具体的な案は検討中(なるべく既にあるものがよい.)

Back up

Calc # of gen. photons

$$\frac{dN_{photons}}{dL} \simeq 2\pi\alpha z^2 \sin^2\theta (\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1})$$

- μ : Mass = 106MeV/c²
- $\lambda_1, \lambda_2 = 270, 610\text{nm} = 2.03, 4.6\text{eV}$ (MC used)
- QE = 0.2 (constant)
- Mean coverage = 6.25% (PMT:164, constant)

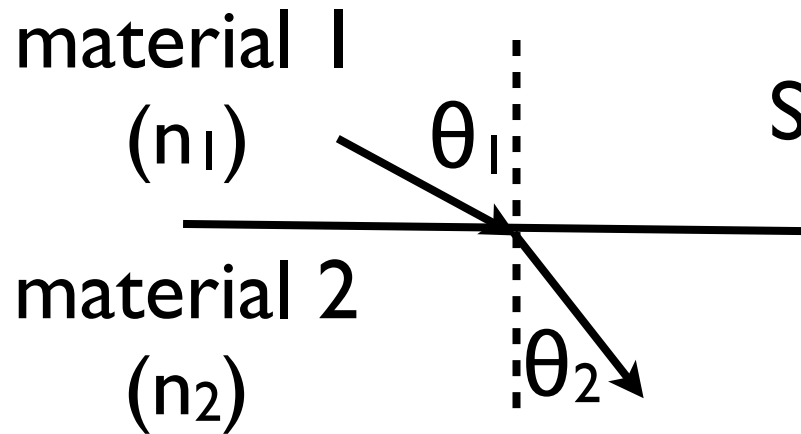
Cherenkov threshold (water:n=1.33)

particle	threshold momentum[MeV/c]
muon	120
pion	159
electron	0.57
proton	1069

μ mom. [MeV/c]	beta	$\cos\theta$	angle [deg]	Gen. photons [/cm]	Gen. pe [/cm]	Measure pe [/cm]
200	0.884	0.851	31.7	261	52.2	3.26
300	0.943	0.797	37.1	345	68.9	4.31
400	0.967	0.778	39.0	374	74.8	4.67
500	0.978	0.769	40.0	387	77.5	4.84
600	0.985	0.764	40.2	395	78.9	4.93
700	0.989	0.760	40.5	399	79.8	4.99
800	0.991	0.758	40.7	402	80.4	5.02

30cm path length → expect to measure 98~150 p.e.

Reflection probability



Snel's law: $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$

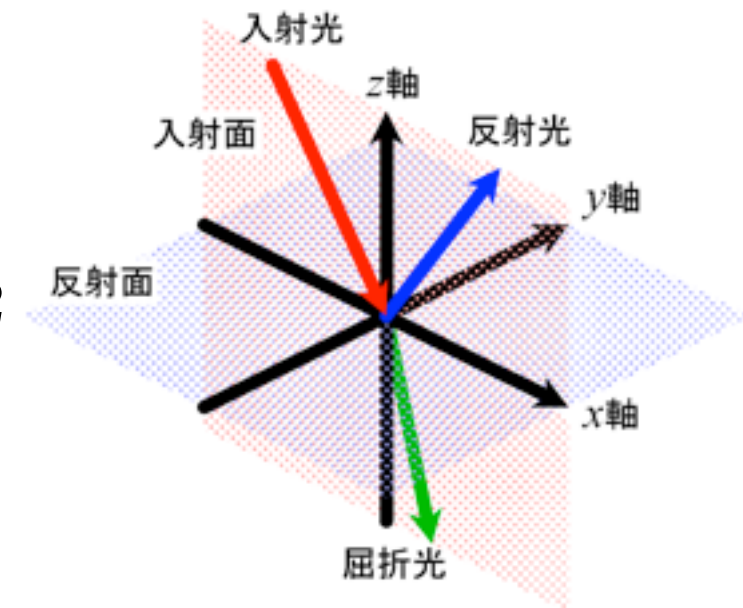
R_s : s波(入射面に垂直)の反射率

R_p : p波(入射面に平行)の反射率

Fresnel equations :

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos\theta_1 - n_2 \cos\theta_2}{n_1 \cos\theta_1 + n_2 \cos\theta_2} \right)^2$$

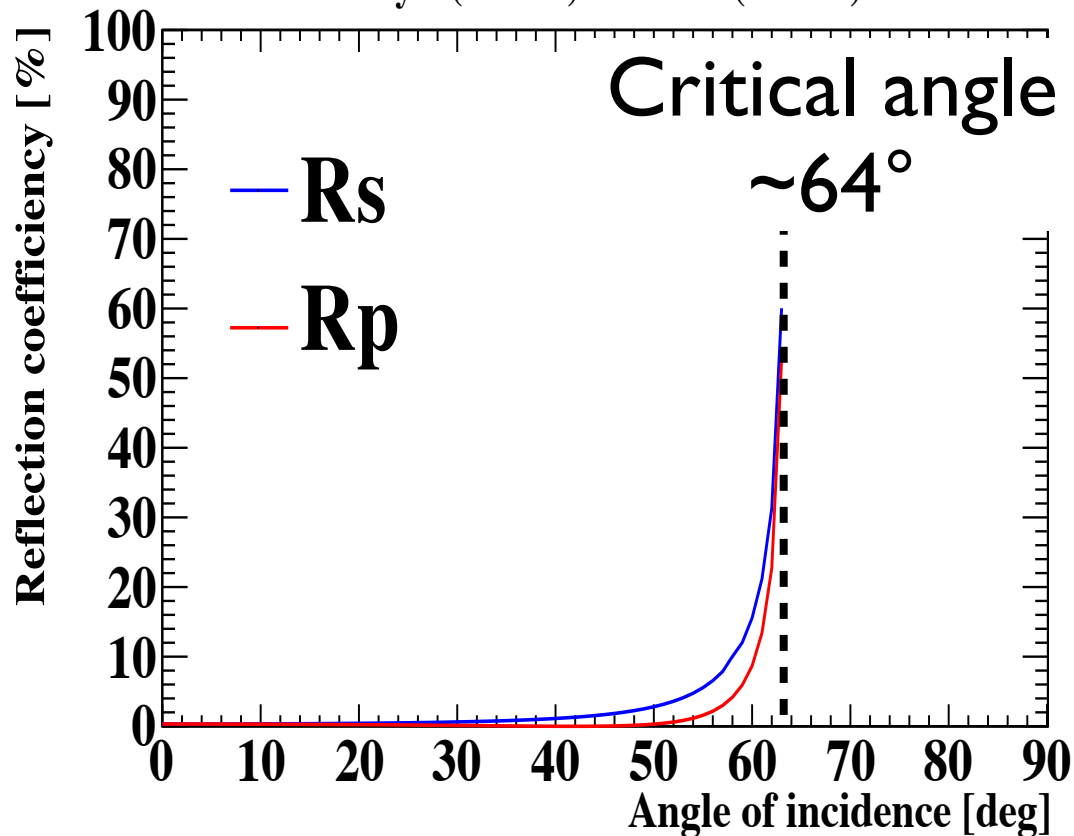
$$R_p = \left(\frac{n_1 \cos\theta_2 - n_2 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_2 + n_2 \cos\theta_1} \right)^2$$



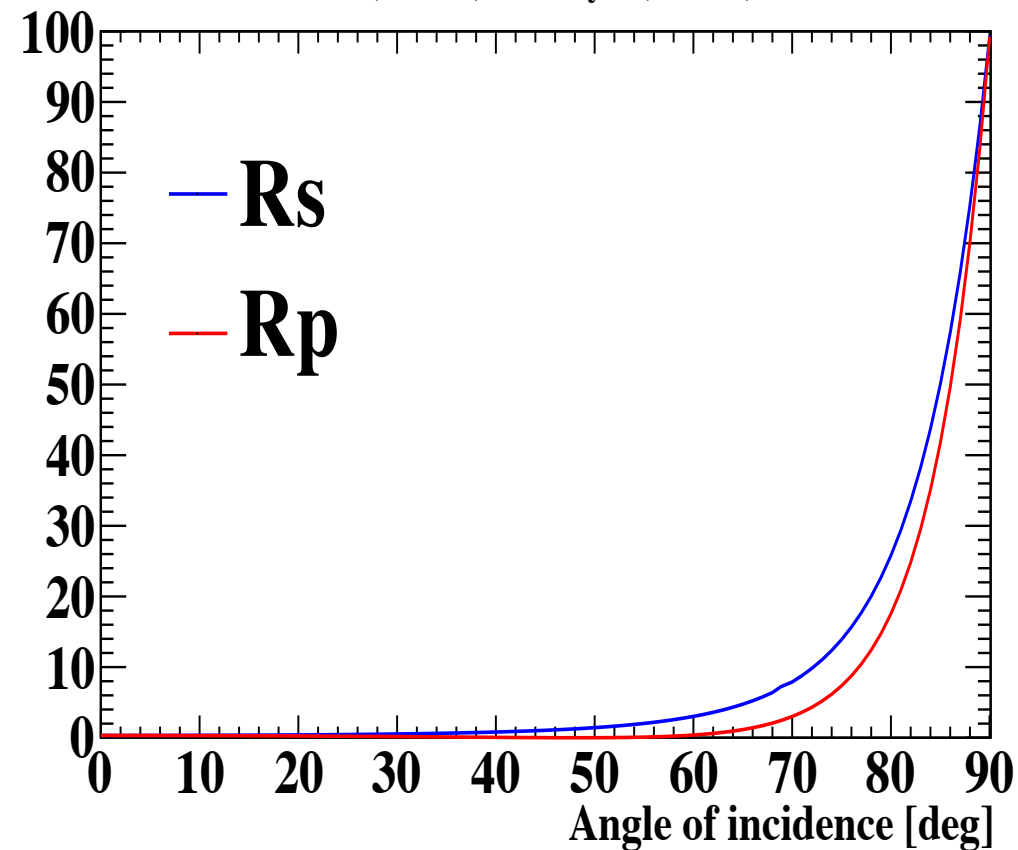
Reflection probability

Water : $n=1.33$, Acrylic $n=1.49$

Acrylic($n=1.49$) $\rightarrow$ Water($n=1.33$)

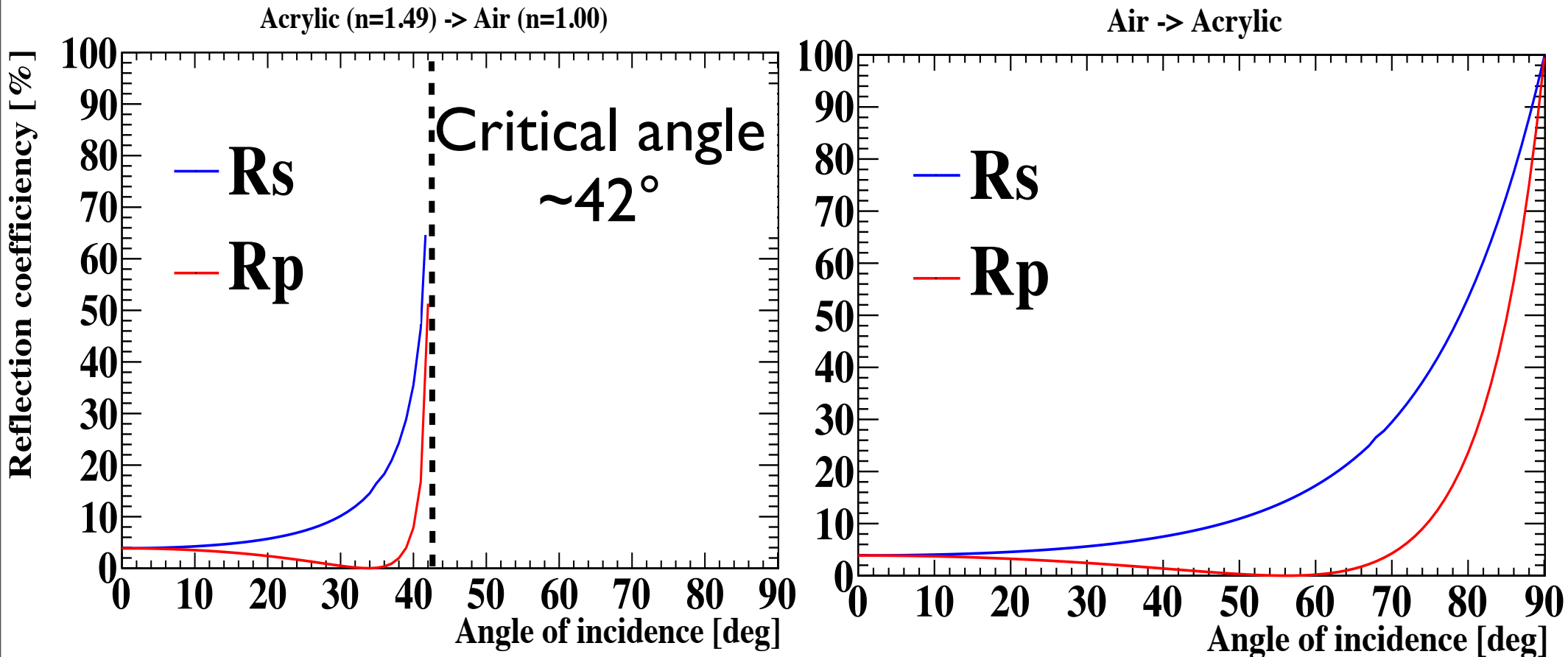


Water($n=1.33$) $\rightarrow$ Acrylic($n=1.49$)



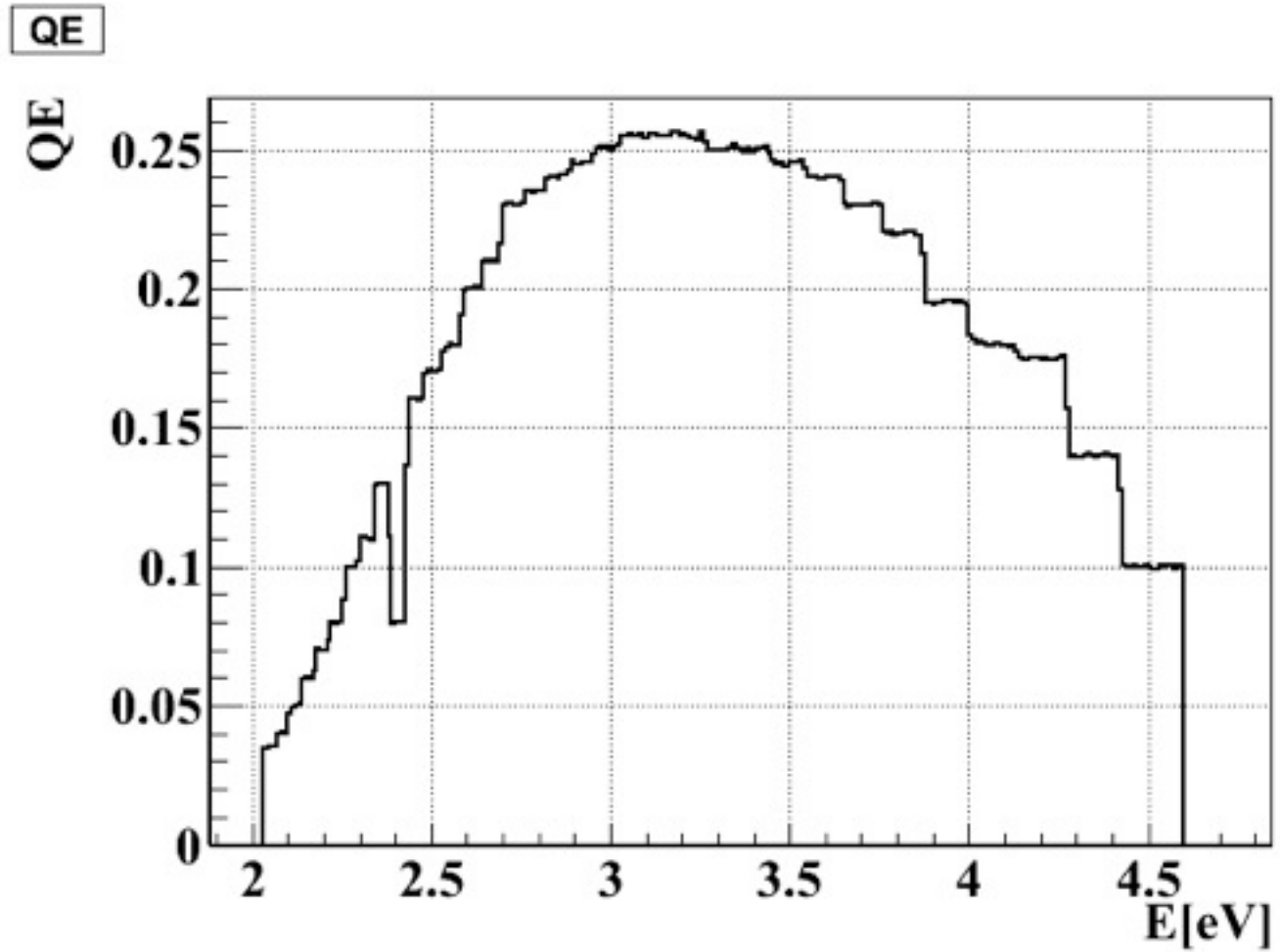
Reflection probability

Air : $n=1.00$, Acrylic $n=1.49$



PMT QE

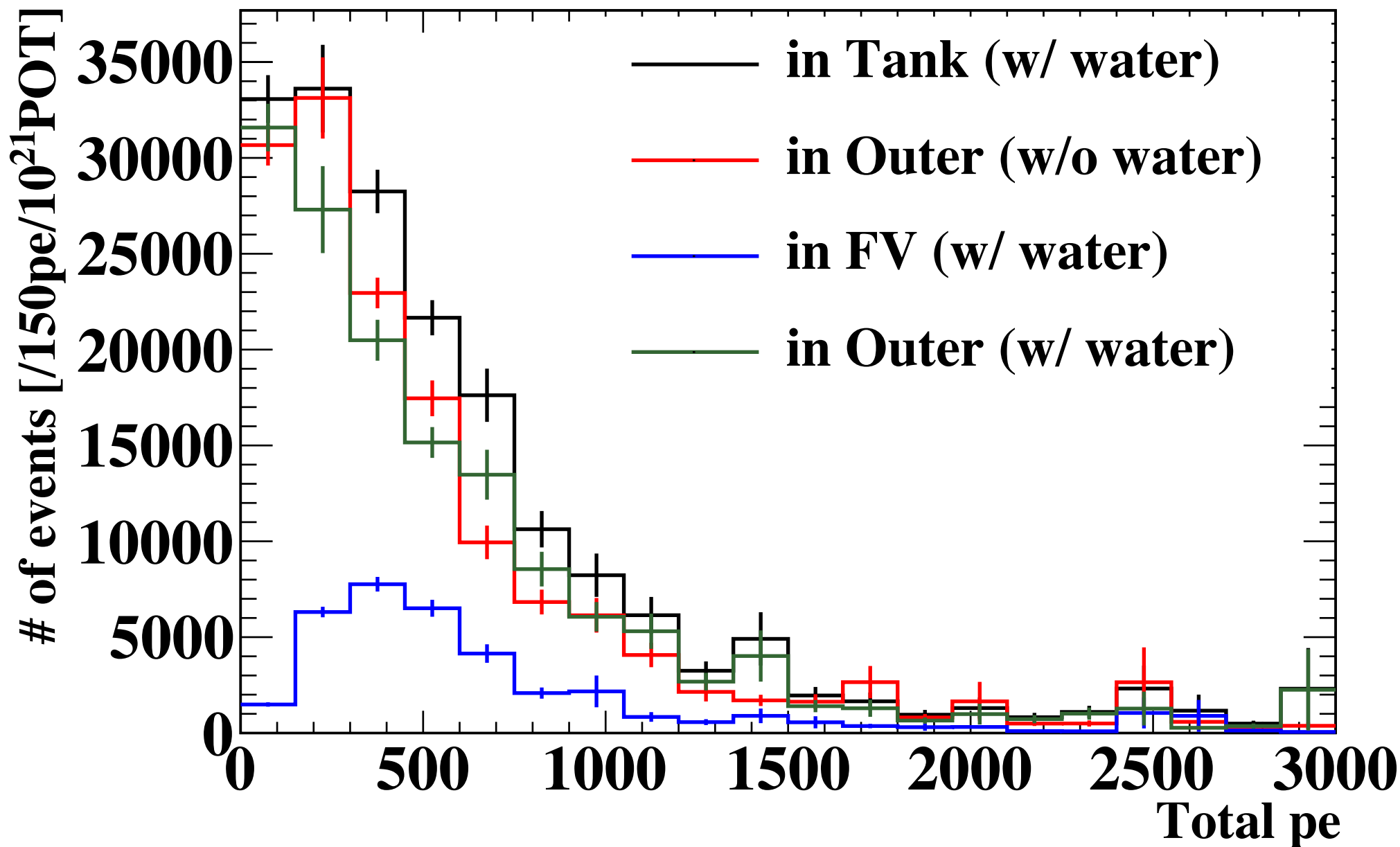
浜松ホトニクスのカatalogより



photon energy

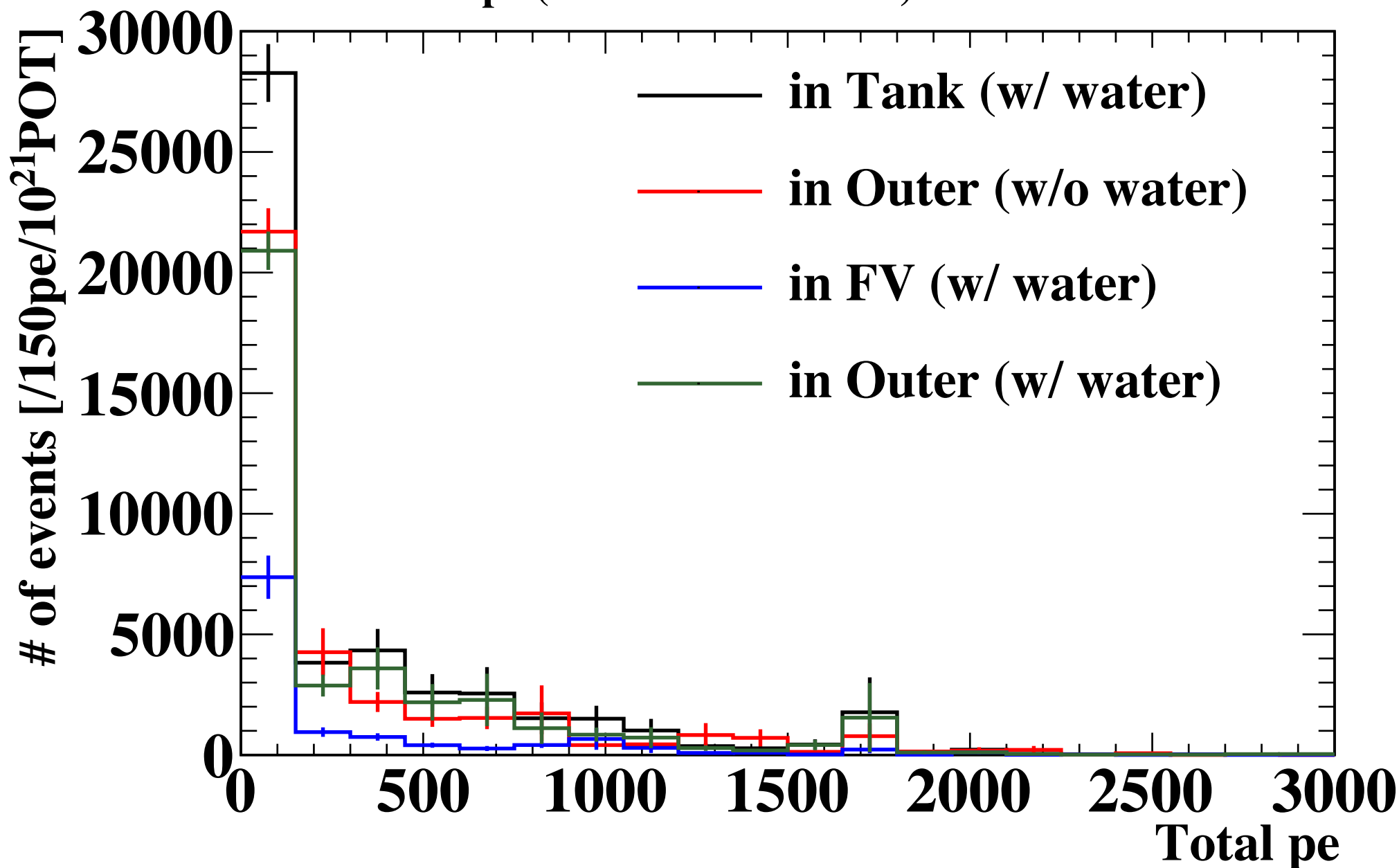
Total p.e. (CC)

Total pe (with HIT threshold) : CC



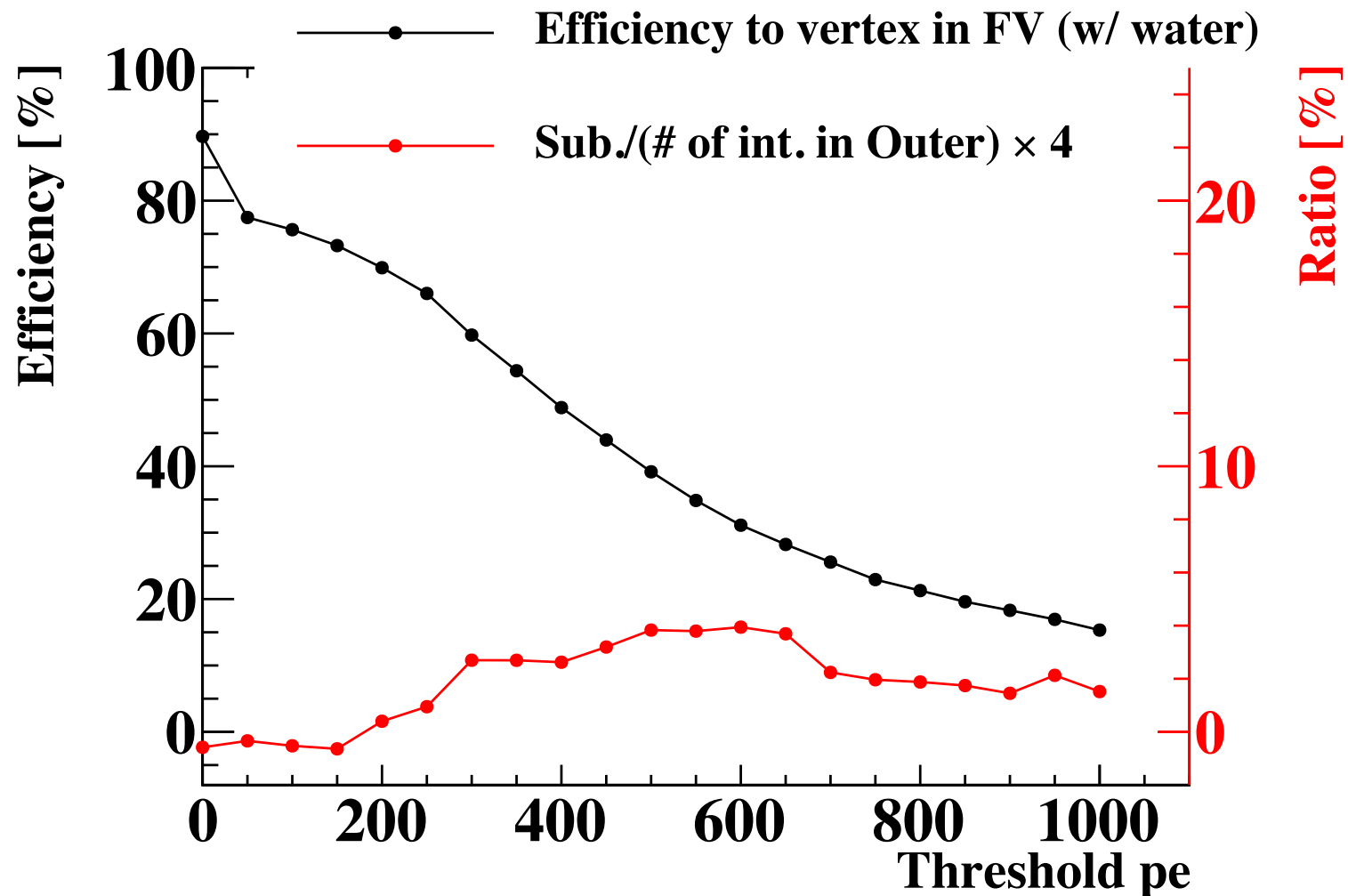
Total p.e. (NC)

total pe (with HIT threshold) : NC



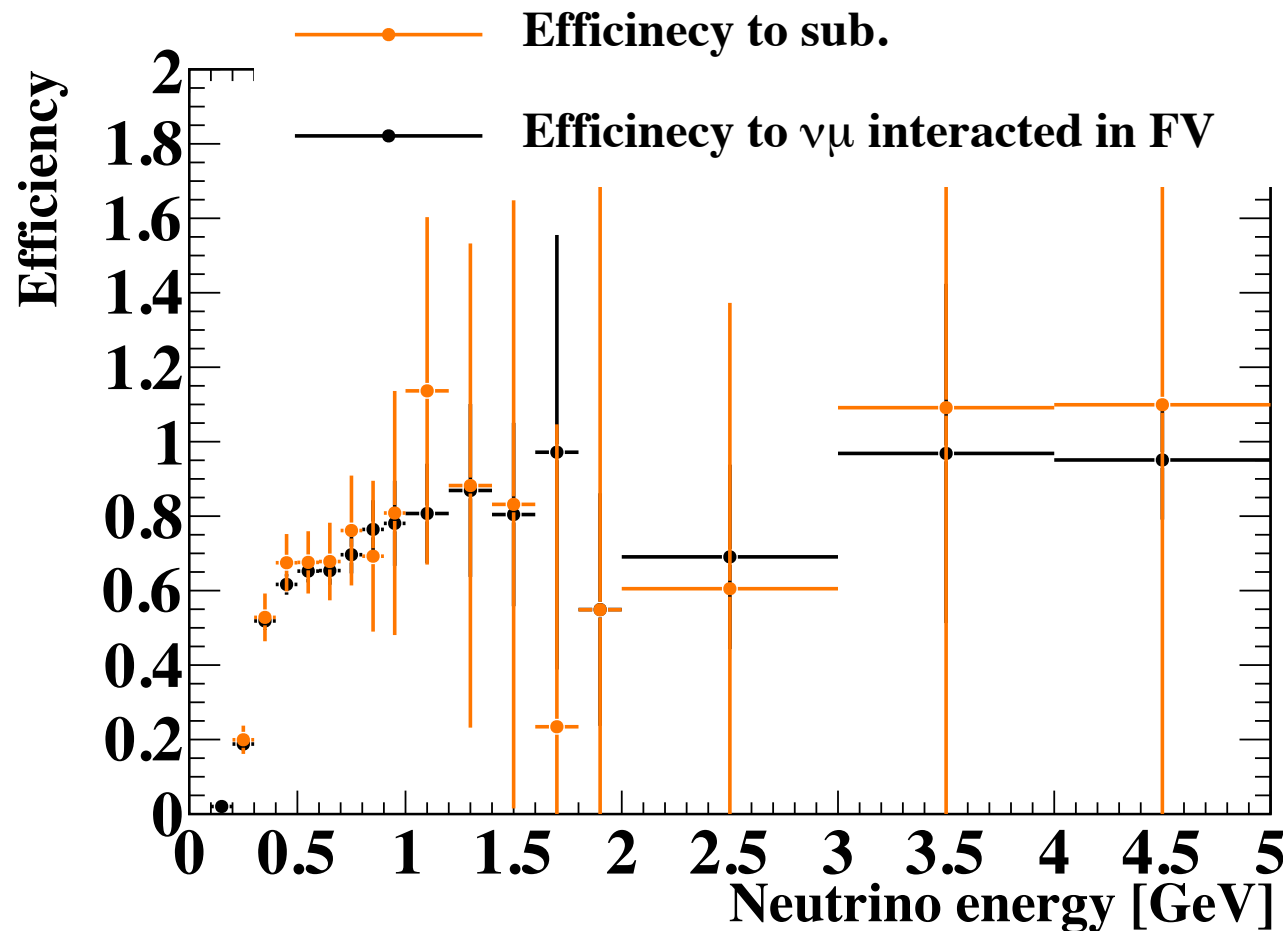
Efficiency vs Threshold total pe

FV内での反応に対する検出効率と、Outerで反応した内で差し引きして残る(Back ground)の割合



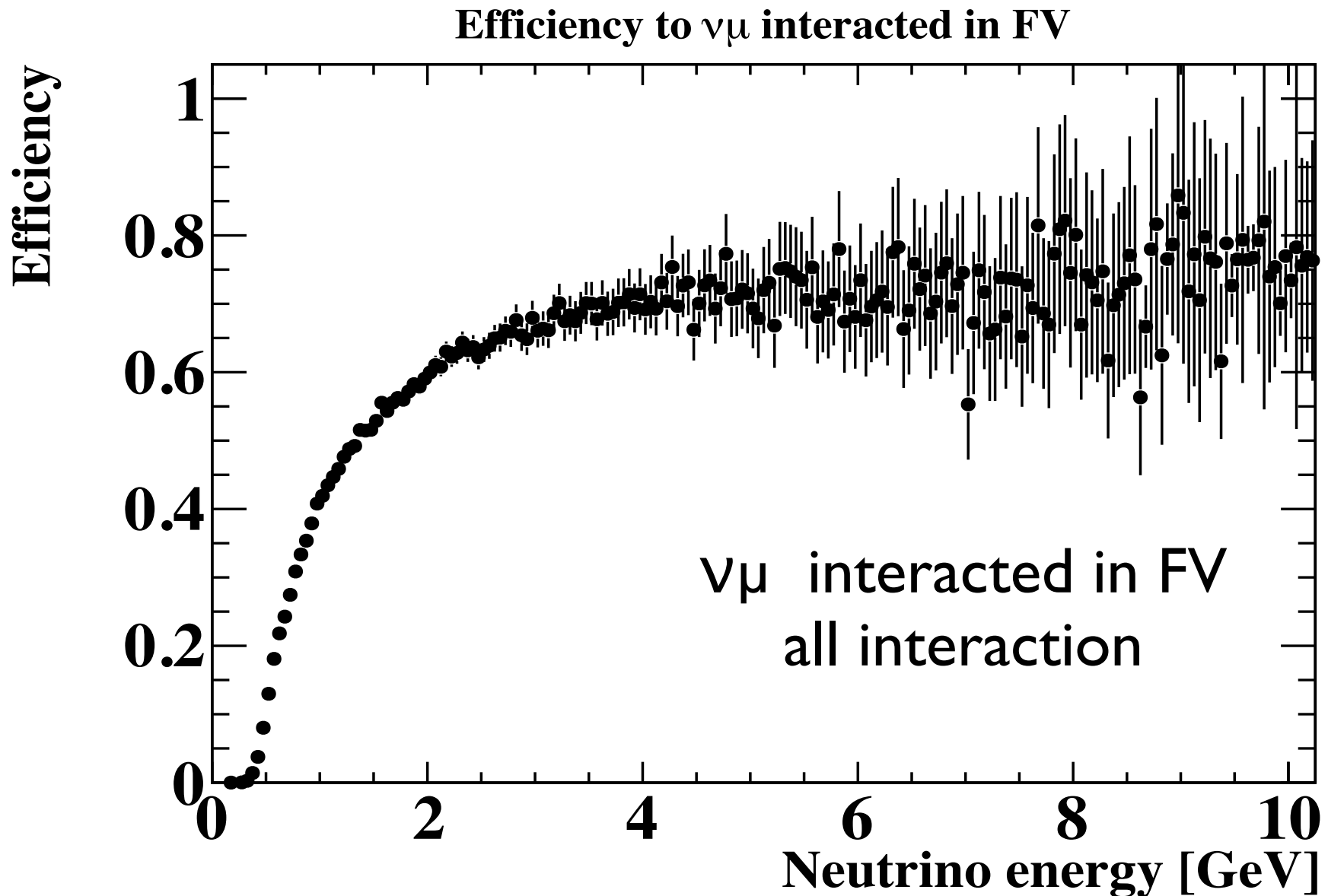
Efficiency (total p.e.>150) to signal neutrino

$$\epsilon_{Sub} = \frac{N_{with\ water}^{obs} - N_{without\ water}^{obs}}{N_{FV}^{int}}$$



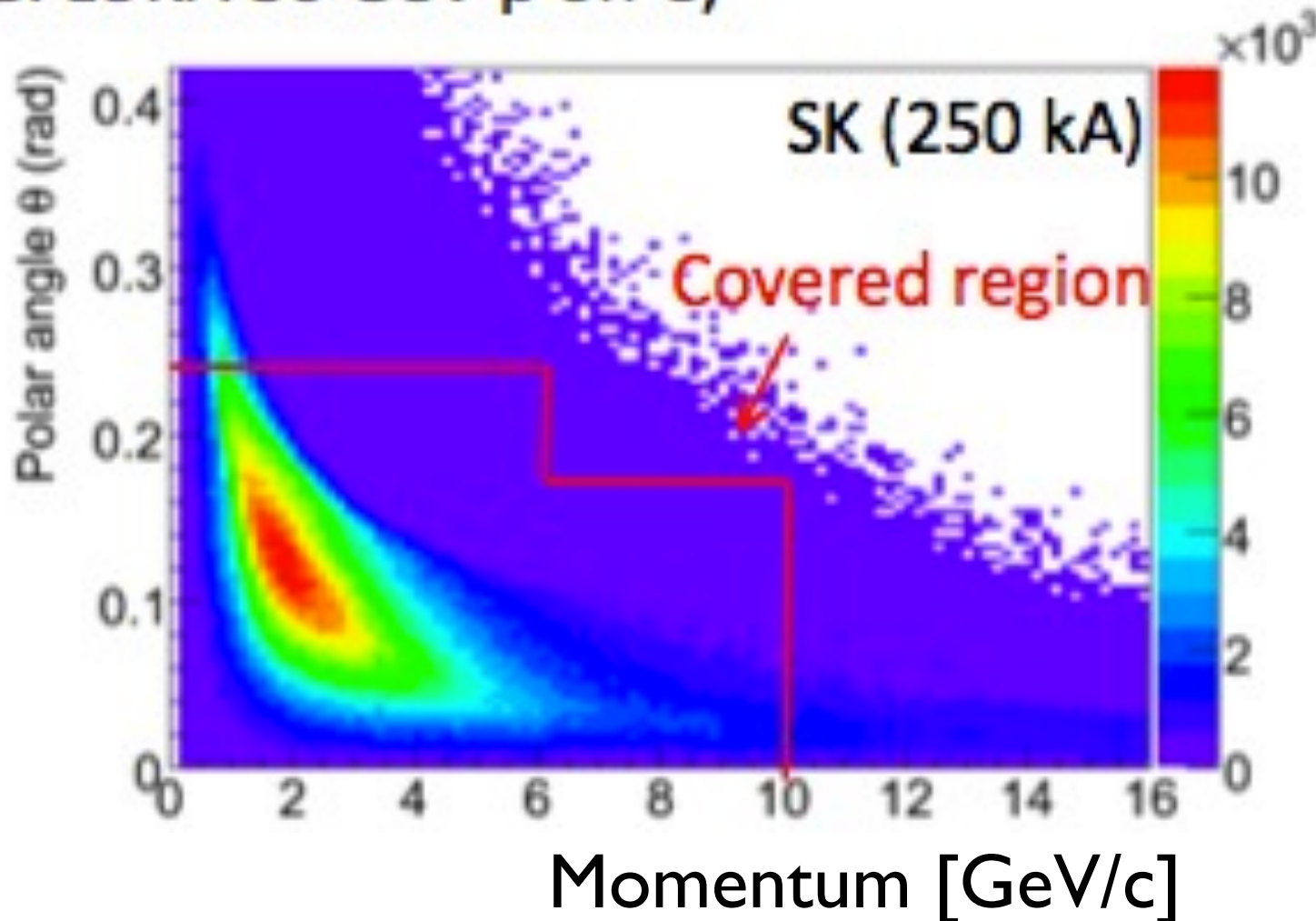
FV内で反応した
ニュートリノに対して、
Energy~0.3GeVから急激
に立ち上がる検出効率
が期待できる。

INGRID Efficiency



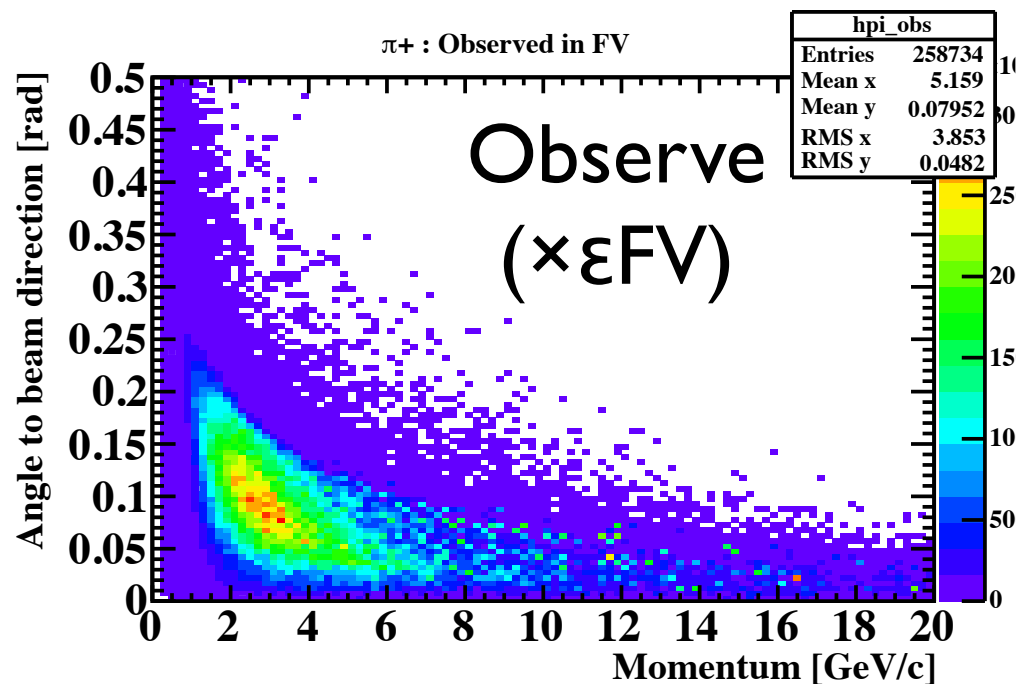
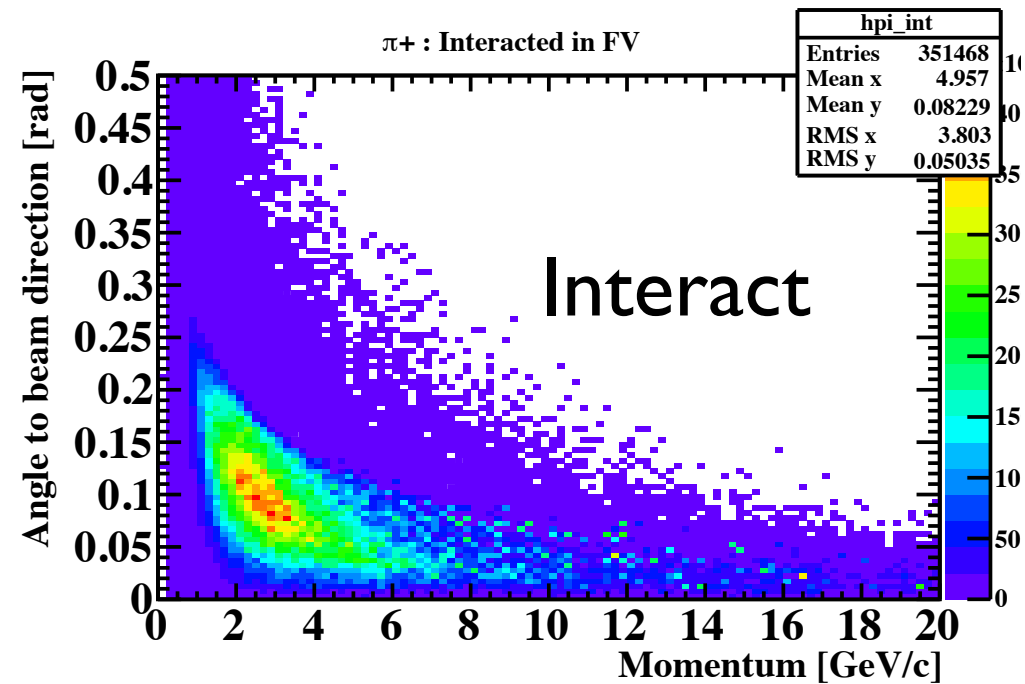
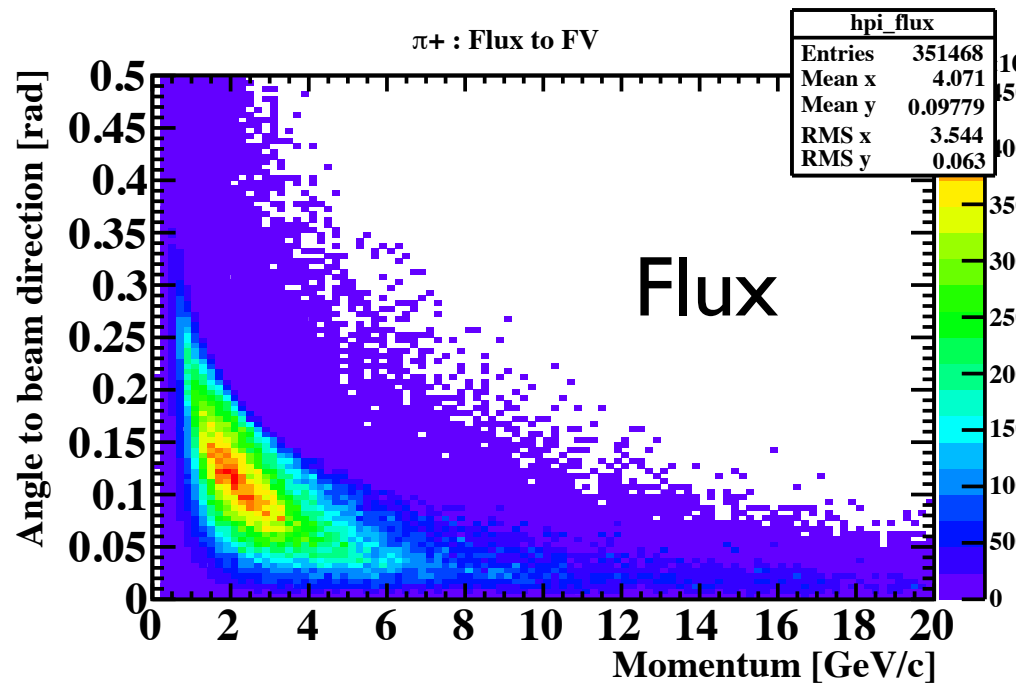
π^+ phase space of parents of neutrino to SK

Phase space of π^+ at primary interactions
(GFLUKA 30 GeV p on C)



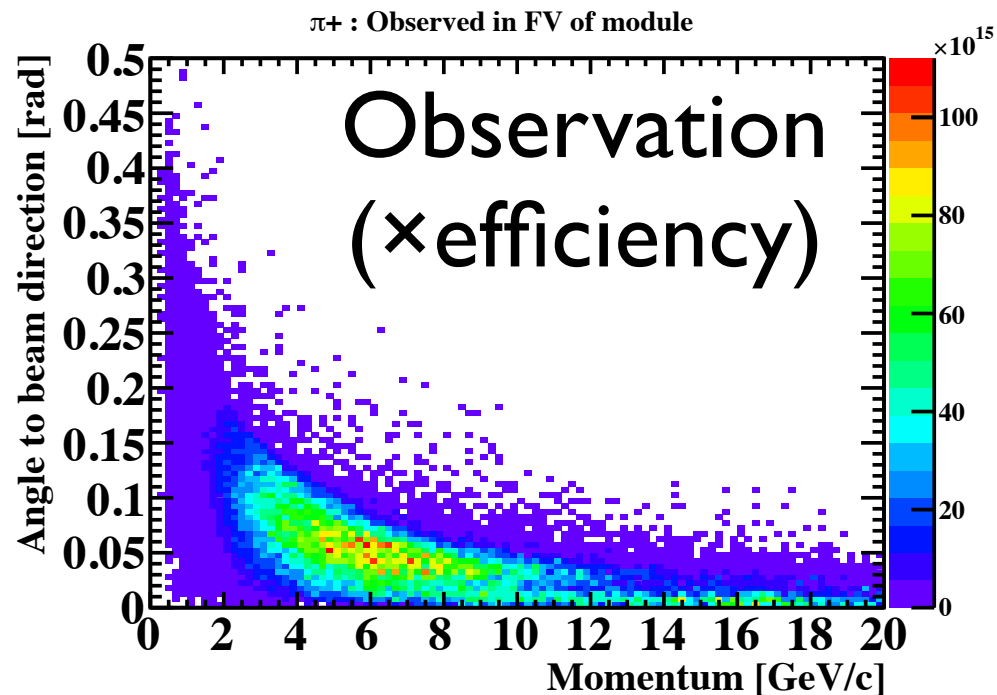
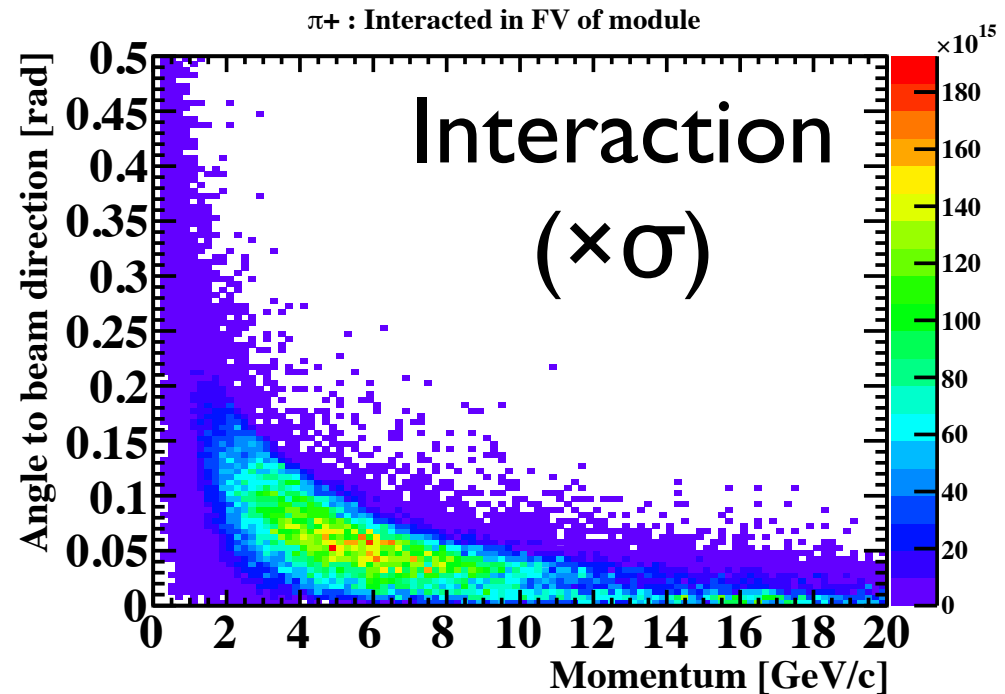
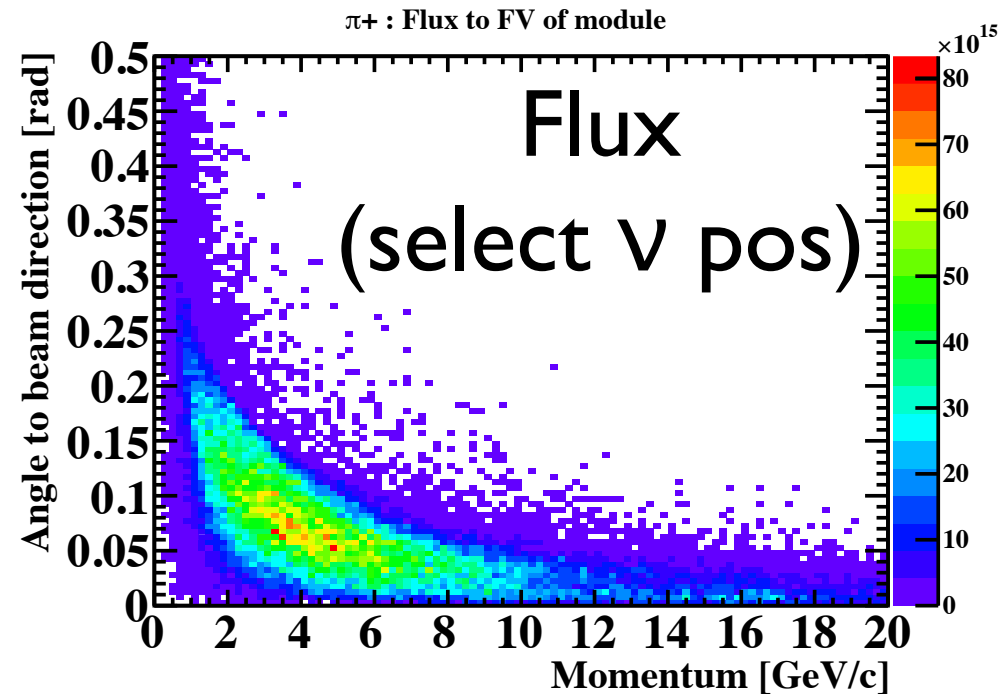
For all
neutrino
Flux

π^+ phase space of parents of neutrino to Mizuche



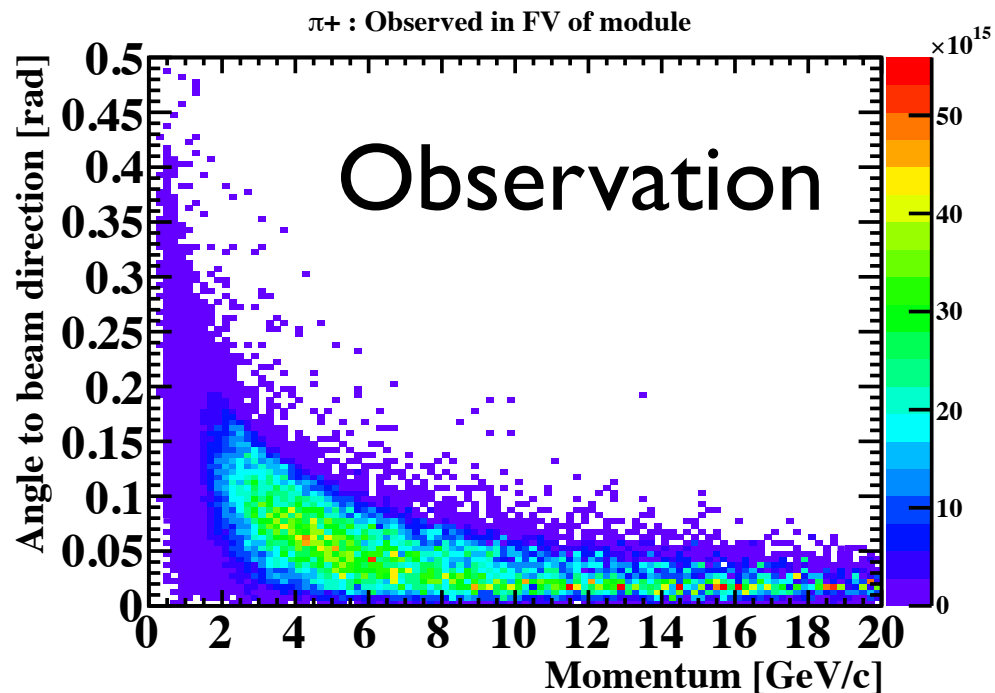
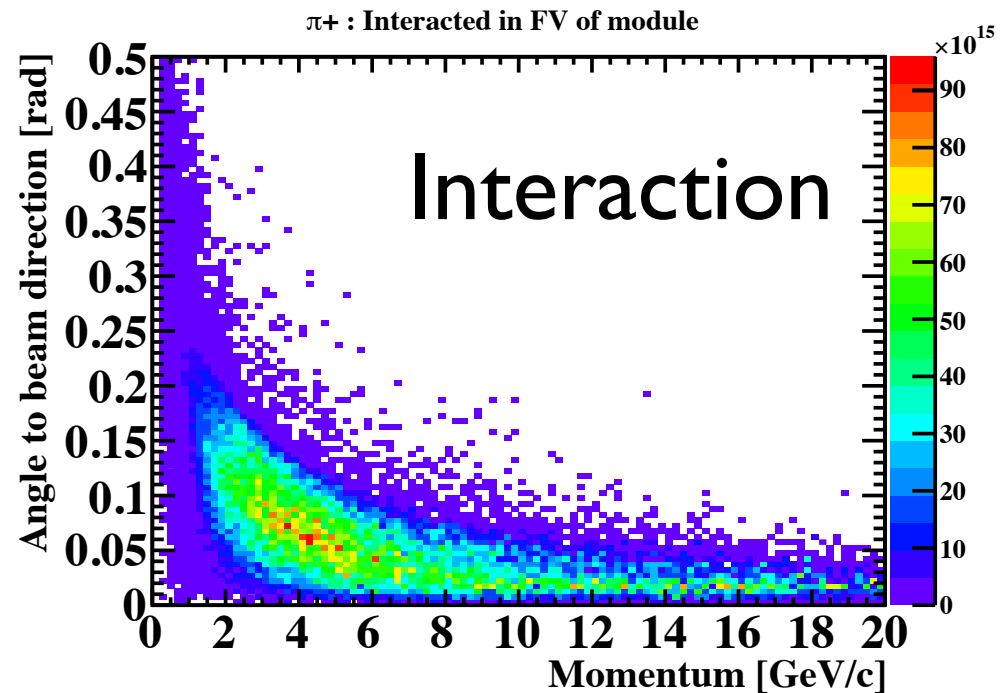
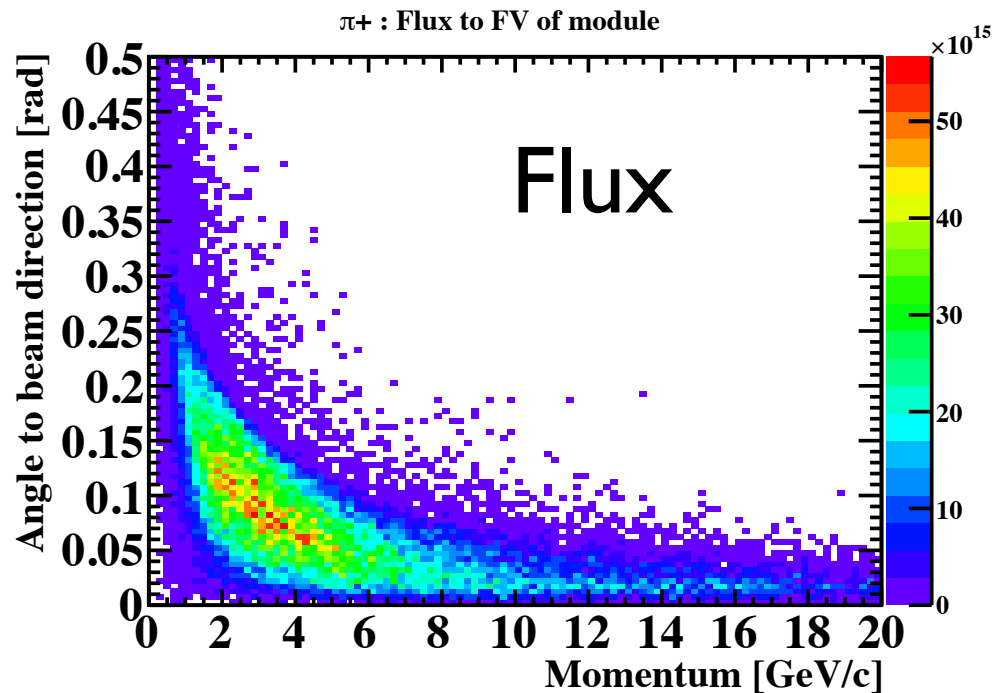
π^+ phase space

π^+ phase space of parents of neutrino to INGRID



π^+ : module 3

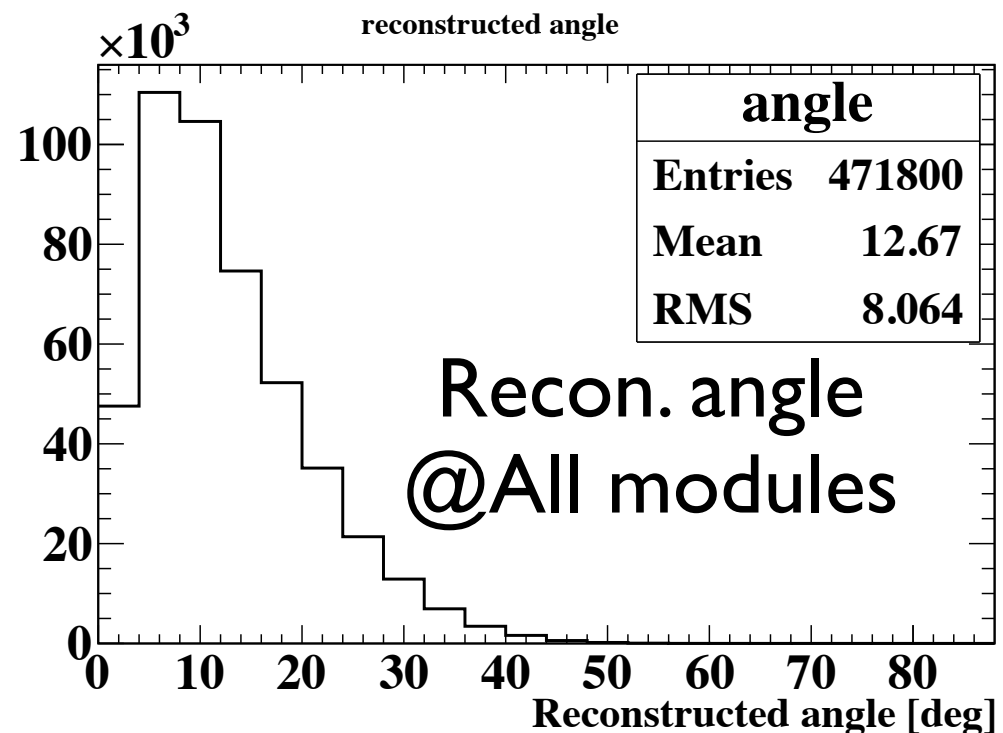
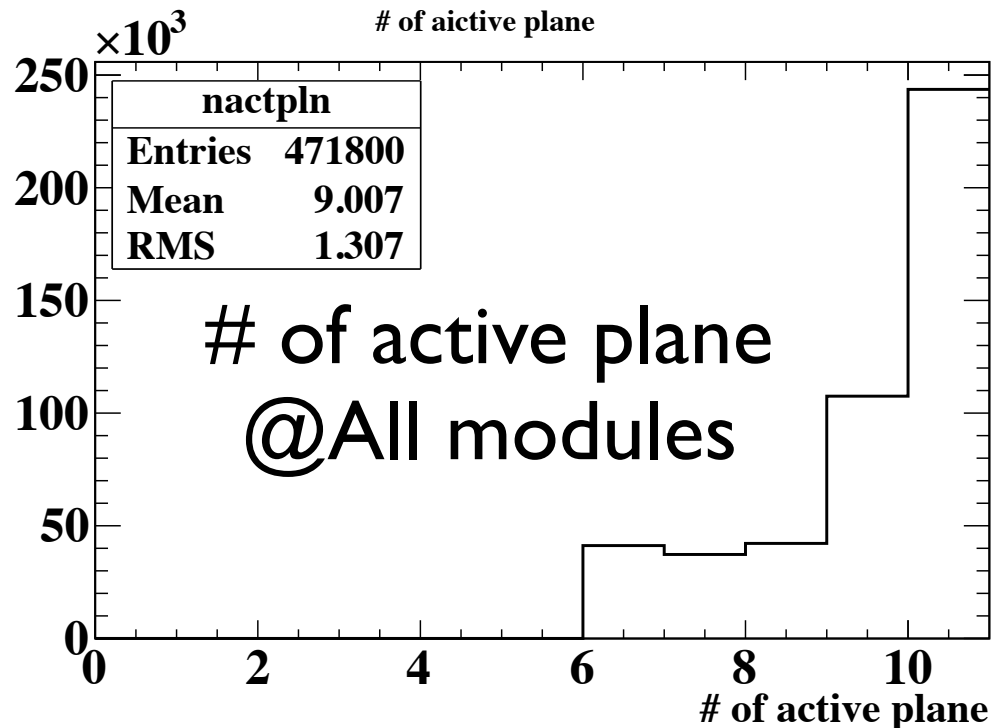
(InteractionとObservationの
縦の絶対値の単位は A.U.)



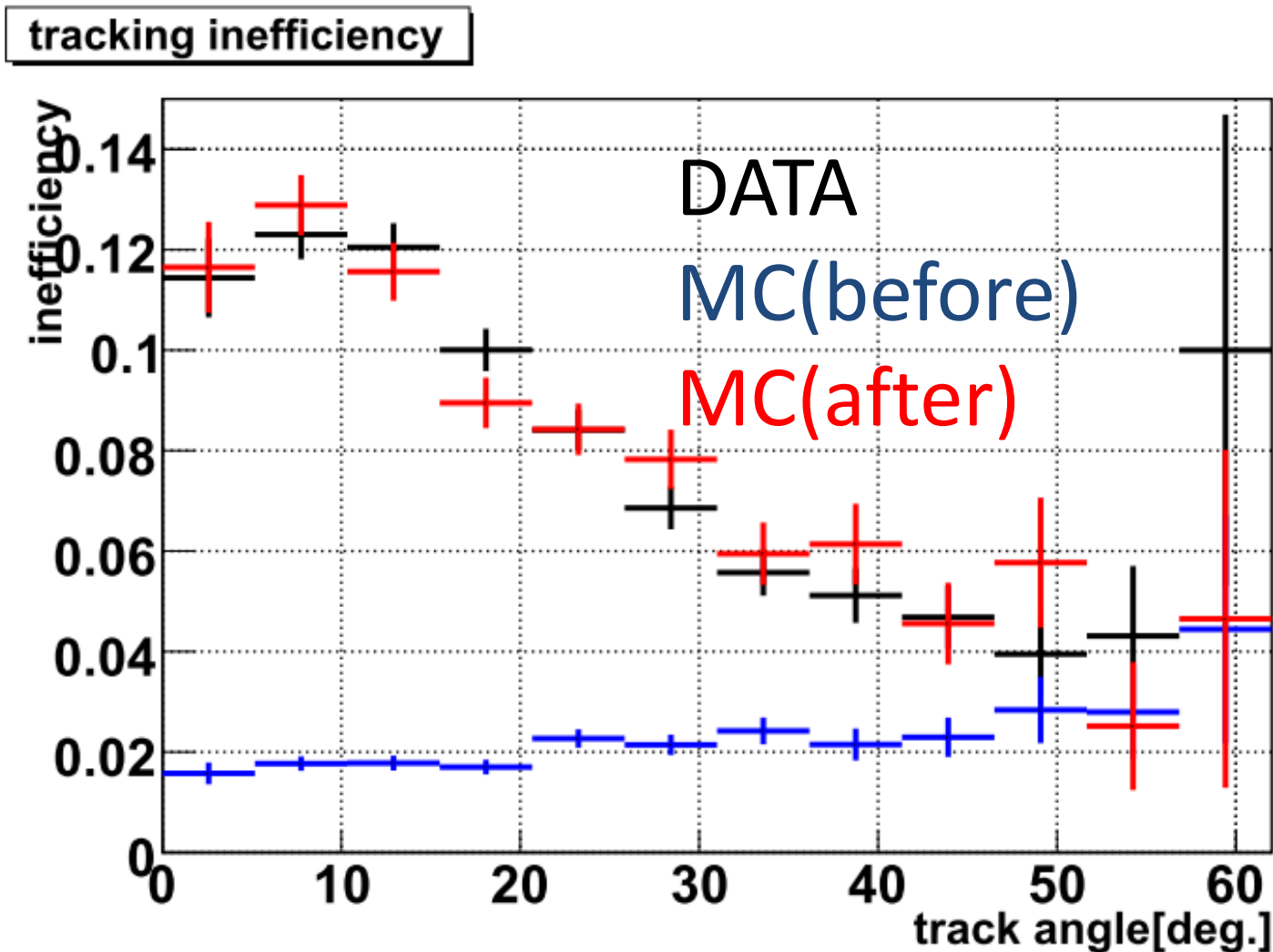
π^+ : module 0

Rock muon info.

- Analysis selection :
 - # of active plane ≥ 6 (means to penetrate more 5 Iron planes)
 - p.e. / layer > 6.5 (same as neutrino selection)
 - Reconstructed vertex is in the first plane.
 - Not upstream VETO cut (to select μ from the front)



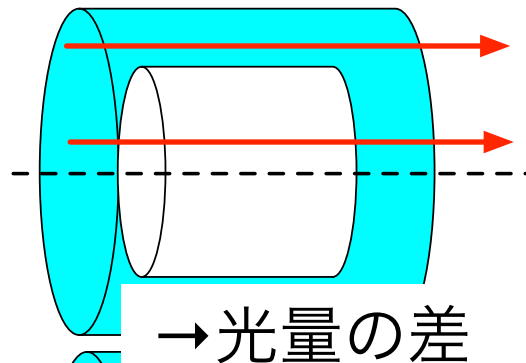
INGRID in-tracking efficiency



→ ~90% tracking efficiency at low angle.

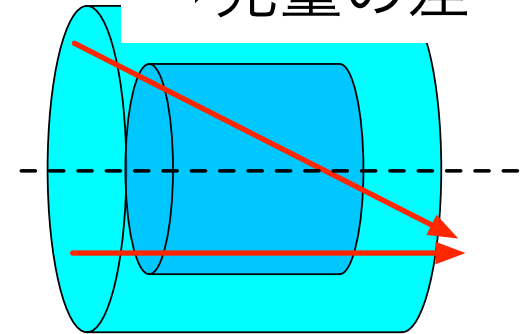
DataとMCの各(Radius)²での光量の比を取った際に、各点で一様に上下ずれている場合.

→ MCの光量のスケールがDataと違う. → 調整



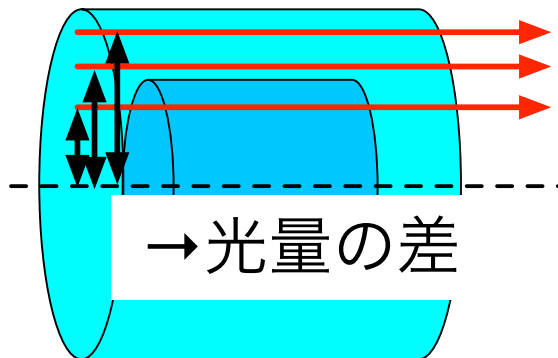
μ の水中の通過距離の違いによる光量の差がDataとMCで違う場合.

→ 境界面での反射・屈折率が変わると光量差が変化.MCのパラメータの確認・調整.

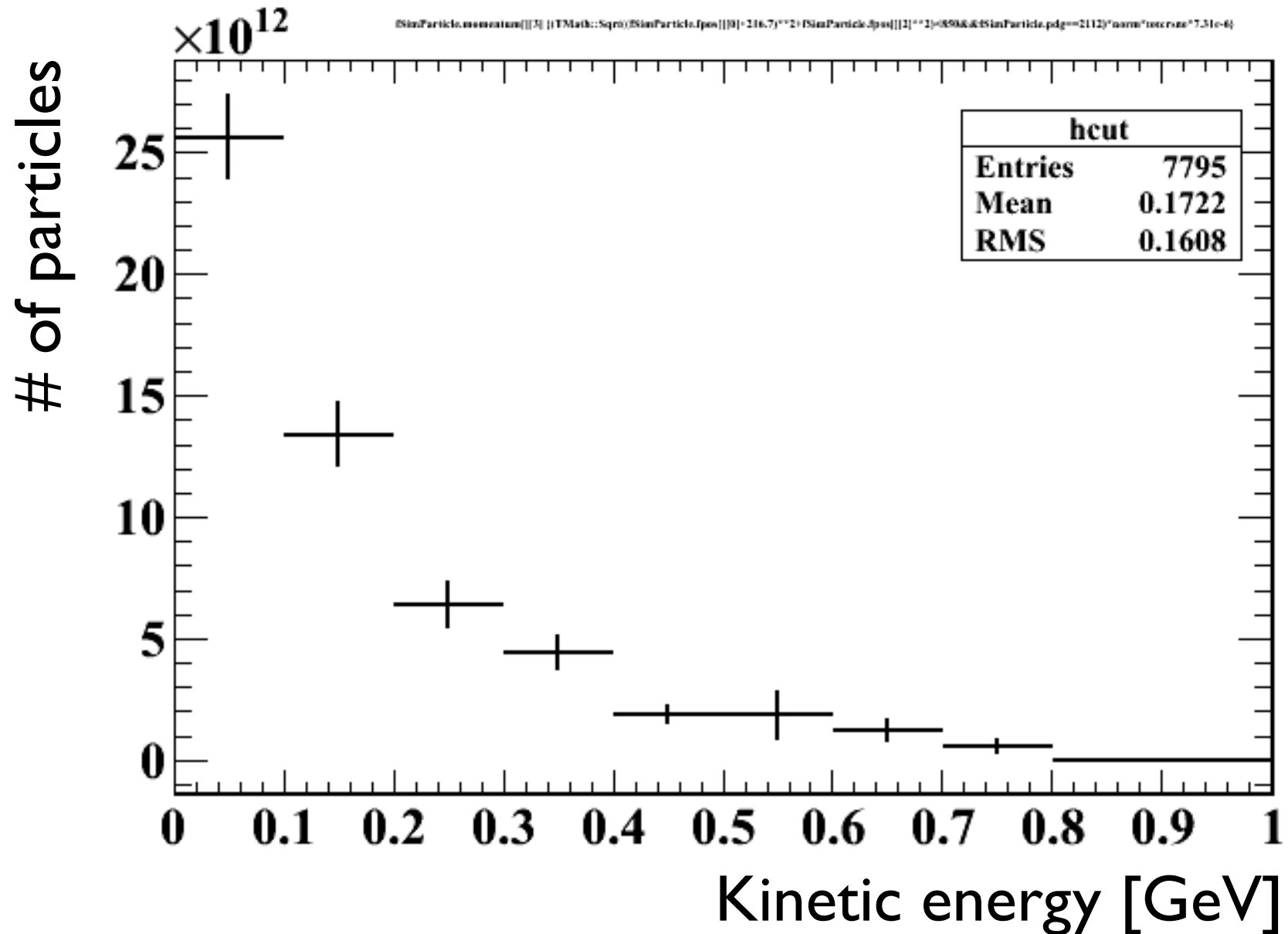


光量の(Radius)²依存の仕方がDataとMCで違う場合.

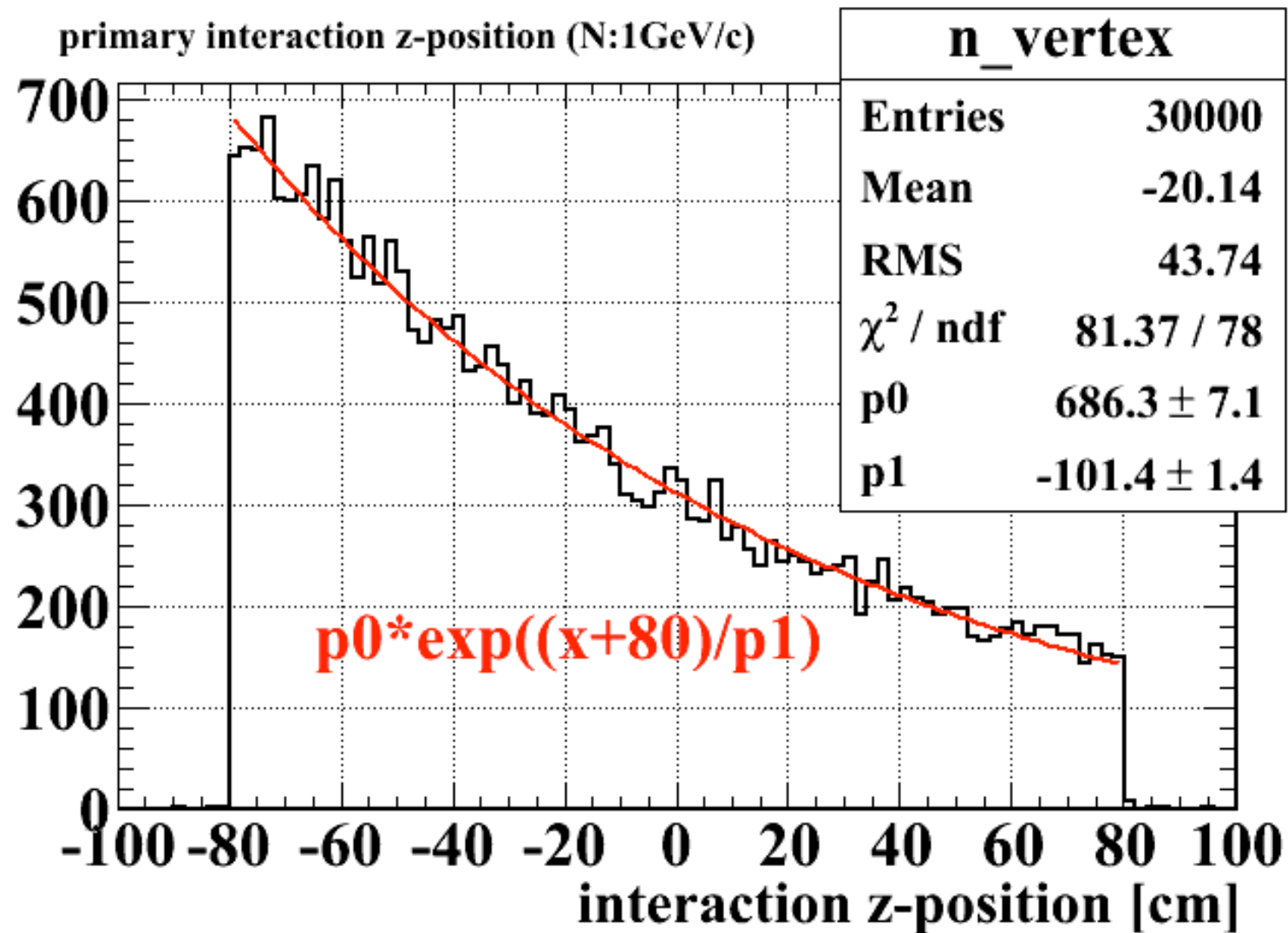
→ PMTと μ との距離(PMTとチェレンコフ光生成点との距離)によってアクセプタンスが異なる.MCでのこの応答をDataで確認.



壁でのニュートリノ反応で出てくる中性子の運動エネルギー

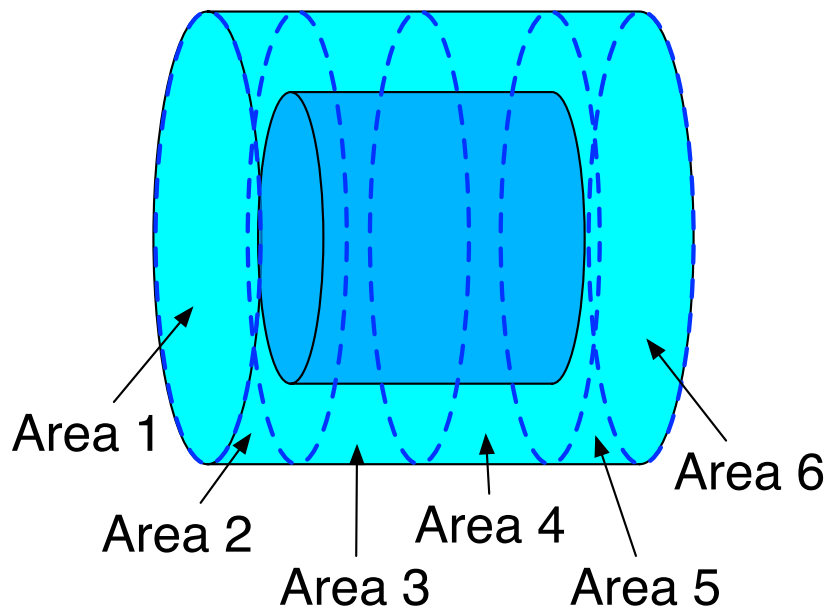


Range of 1 GeV/c neutron



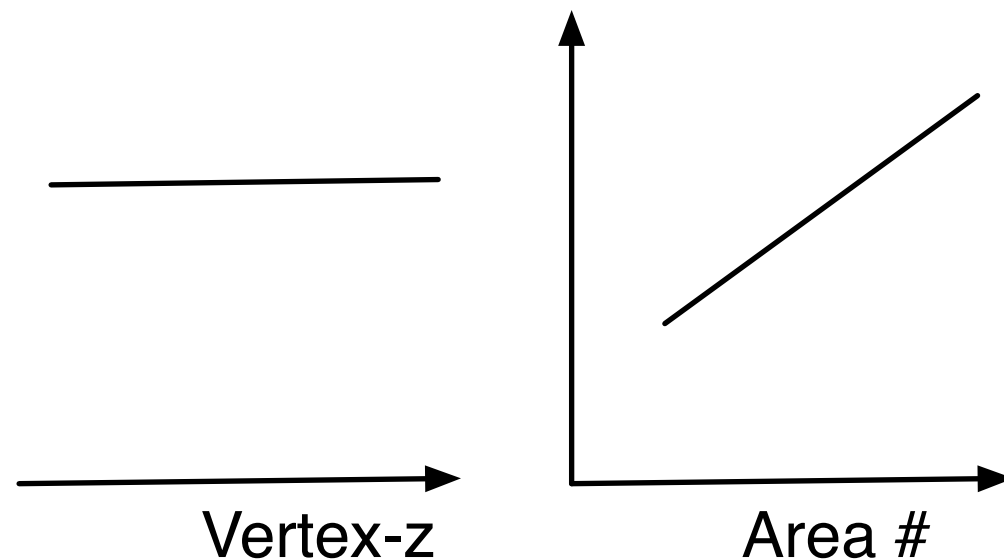
Total p.e. 以外の測定可能な量

- 水の差し引きでの測定で、上手くFV内で起きた反応だけを測定できることが期待できる.
- 測定量がTotal p.e. だけでは、実際にニュートリノビームのデータを取っている際に、何が測定できているのかわかりづらい.
- 他に測定できる量はないか



of neutrino

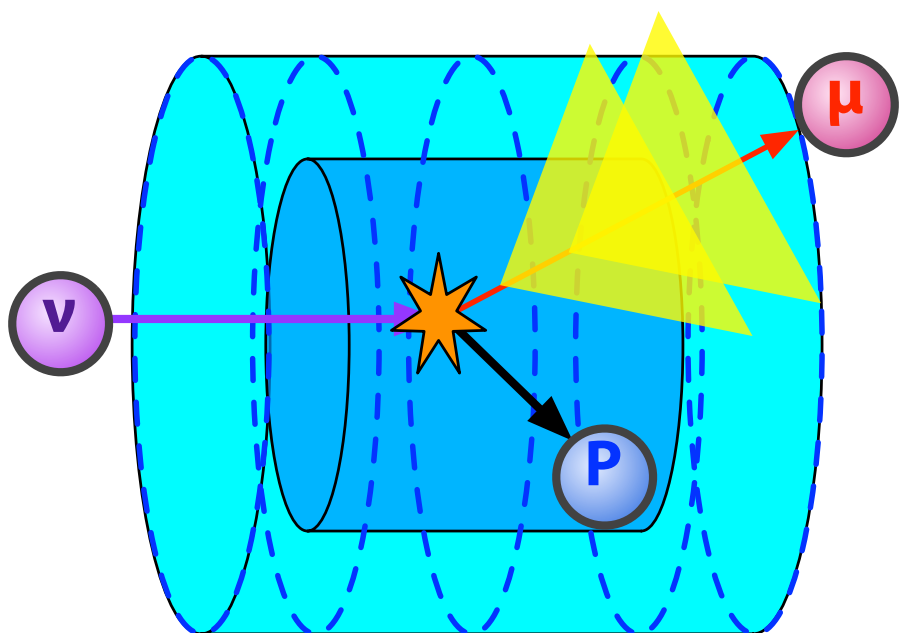
Area p.e.
/ Total pe



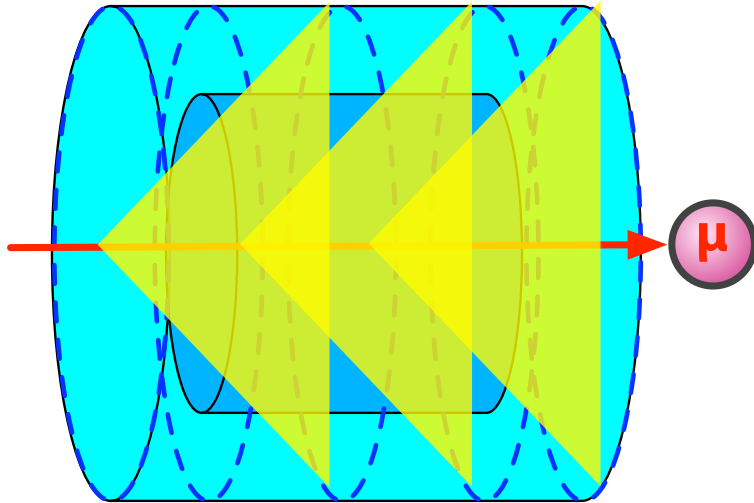
荷電粒子の大部分は前方に出るため、
下流のエリアの方が光量が多くなる。

Total p.e. > 150 のカットをかけた後
→ CCを選んでくれる。

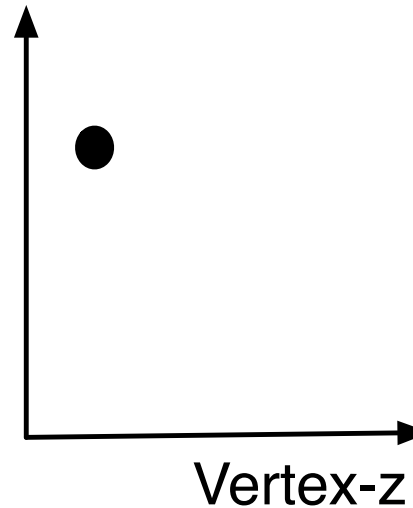
→ イベントトポロジーとして左のよ
うな場合がほとんどに



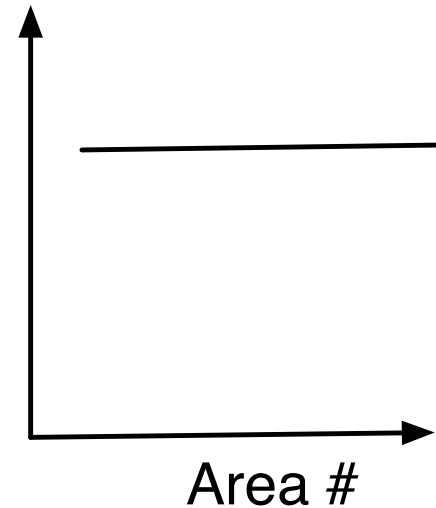
Sand muon



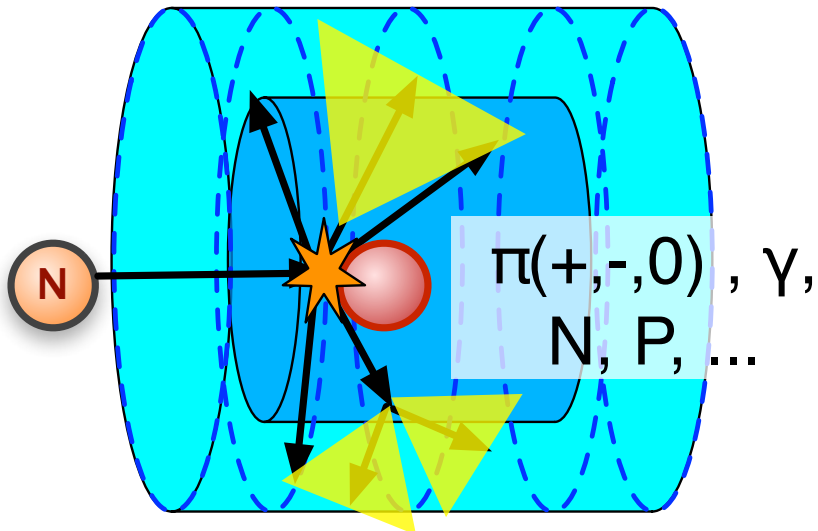
of particle



Area p.e.
/ Total pe



Neutrino from outside # of particle



of particle

