

スーパーカミオカンデにおける 宇宙線ミューオン核破碎反応の シミュレーション評価

—日本物理学会 第81回年次大会（2026年）—

目黒希, 小汐由介, 原田将之^A,
for the Super-Kamiokande collaboration
岡山大理, 東大宇宙線研^A



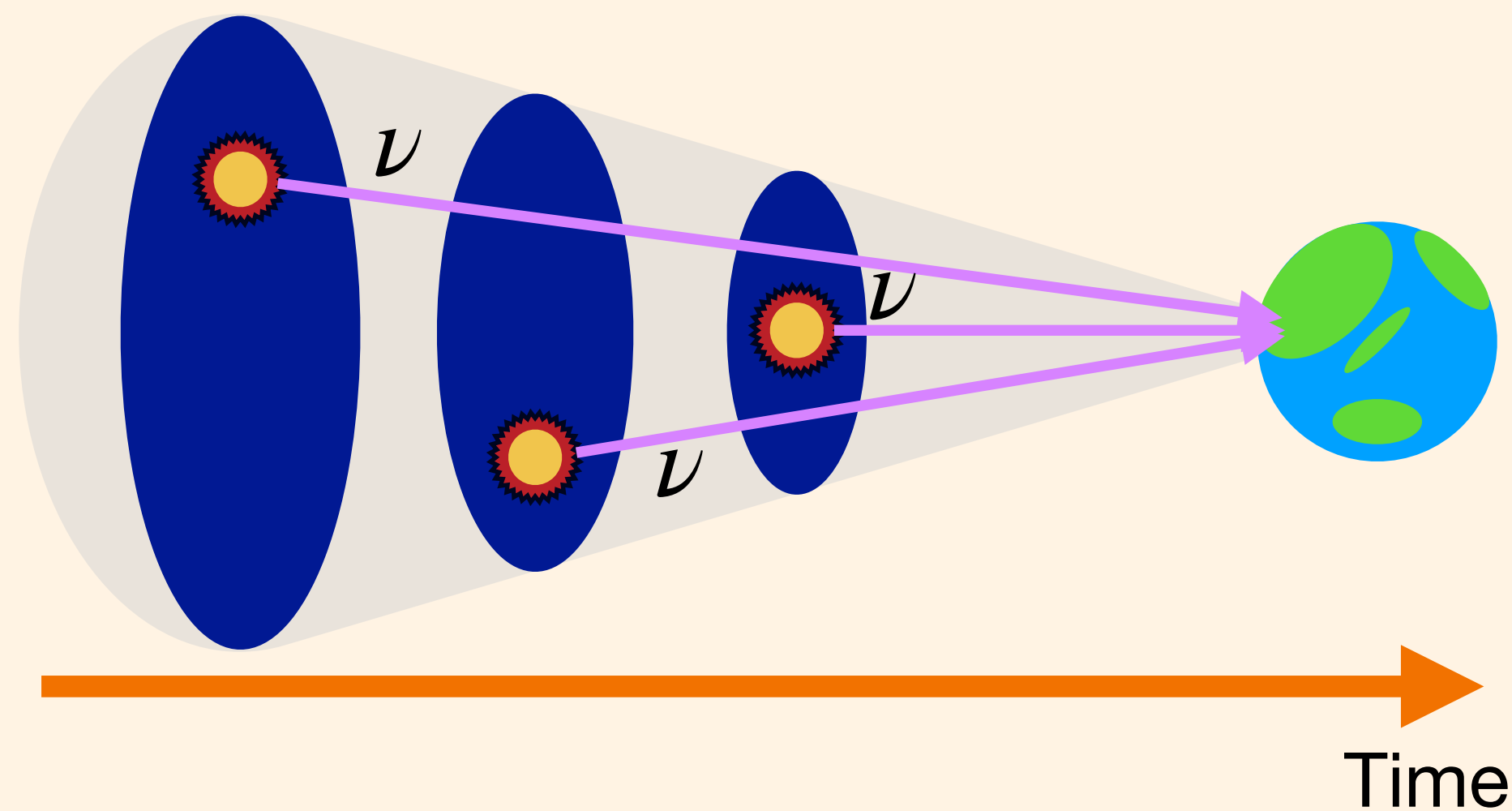
OKAYAMA
UNIVERSITY



超新星背景ニュートリノとその観測

超新星背景ニュートリノ (DSNB)

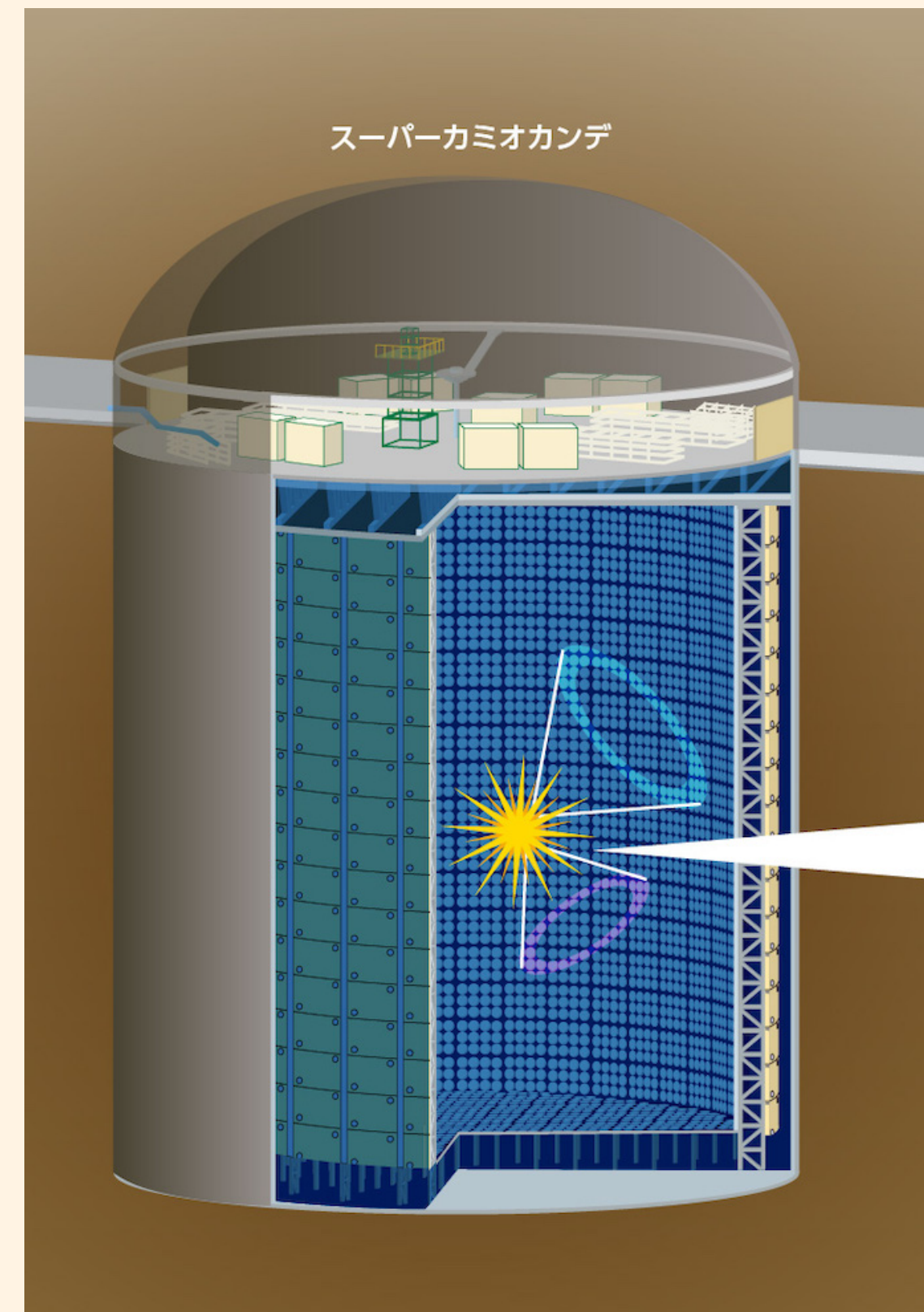
Diffuse **S**upernova **N**eutrino **B**ackground



宇宙誕生以来の重力崩壊型超新星が
放出したニュートリノの背景放射

スーパーカミオカンデ (Super-K)

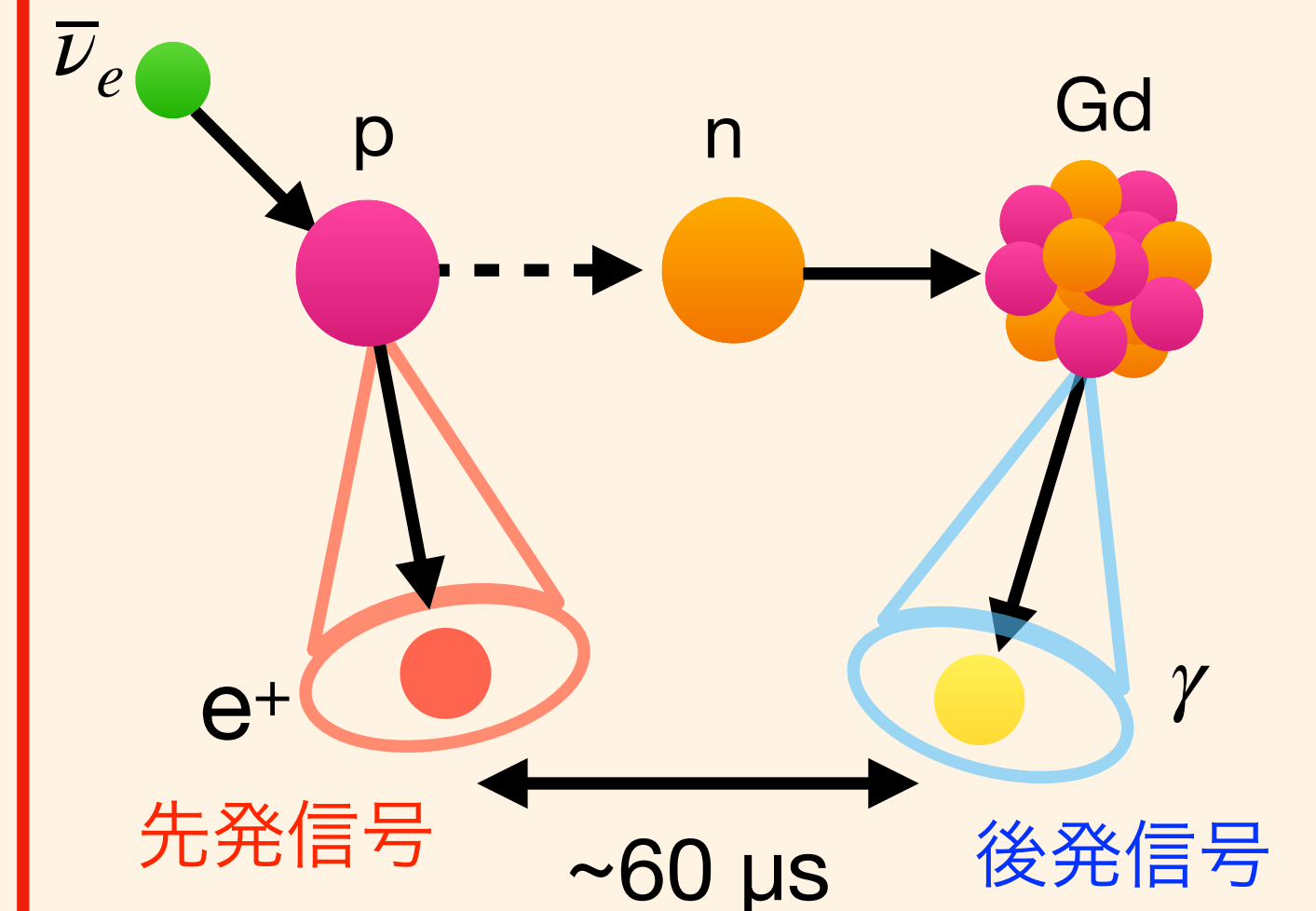
地下約1000m にある水チェレンコフ検出器



研究目的の1つ

DSNBの世界初観測

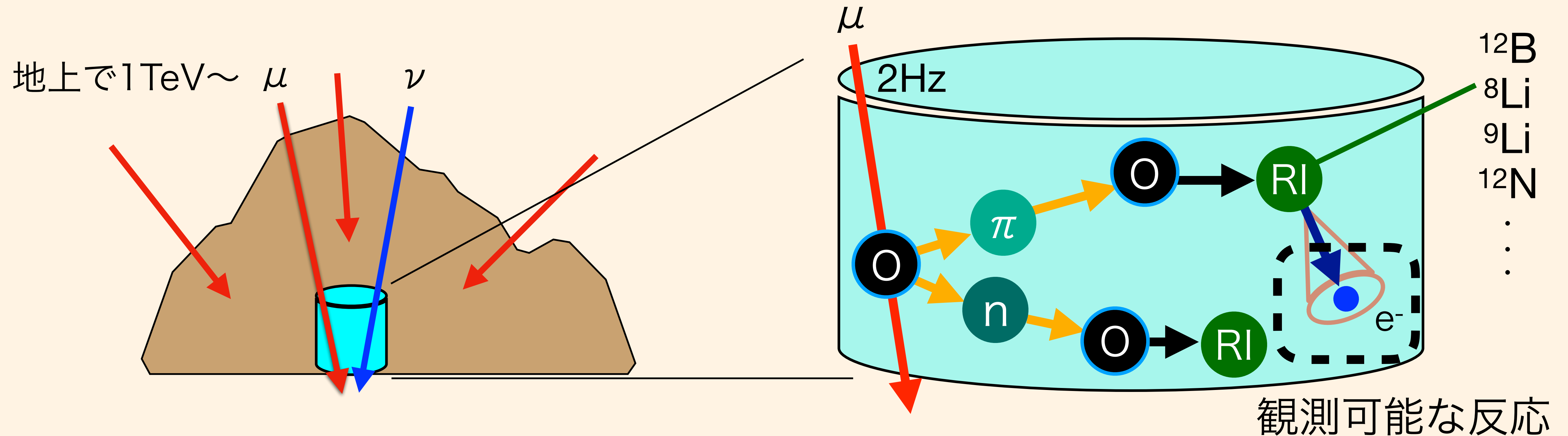
逆ベータ崩壊の同時遅延計測
反電子ニュートリノを検出



超新星爆発の頻度、星形成率などの情報が得られることが期待される

宇宙線ミュオン核破碎反応

- DSNB信号は非常に稀→背景事象の理解が重要
- 宇宙線ミュオンと水中の酸素原子核の相互作用により放射性同位体が生じ、その β 崩壊により信号が検出され、DSNB観測の背景事象となる



期待されるDSNB信号の 10^6 倍検出されるため、主要な背景事象である

研究目的

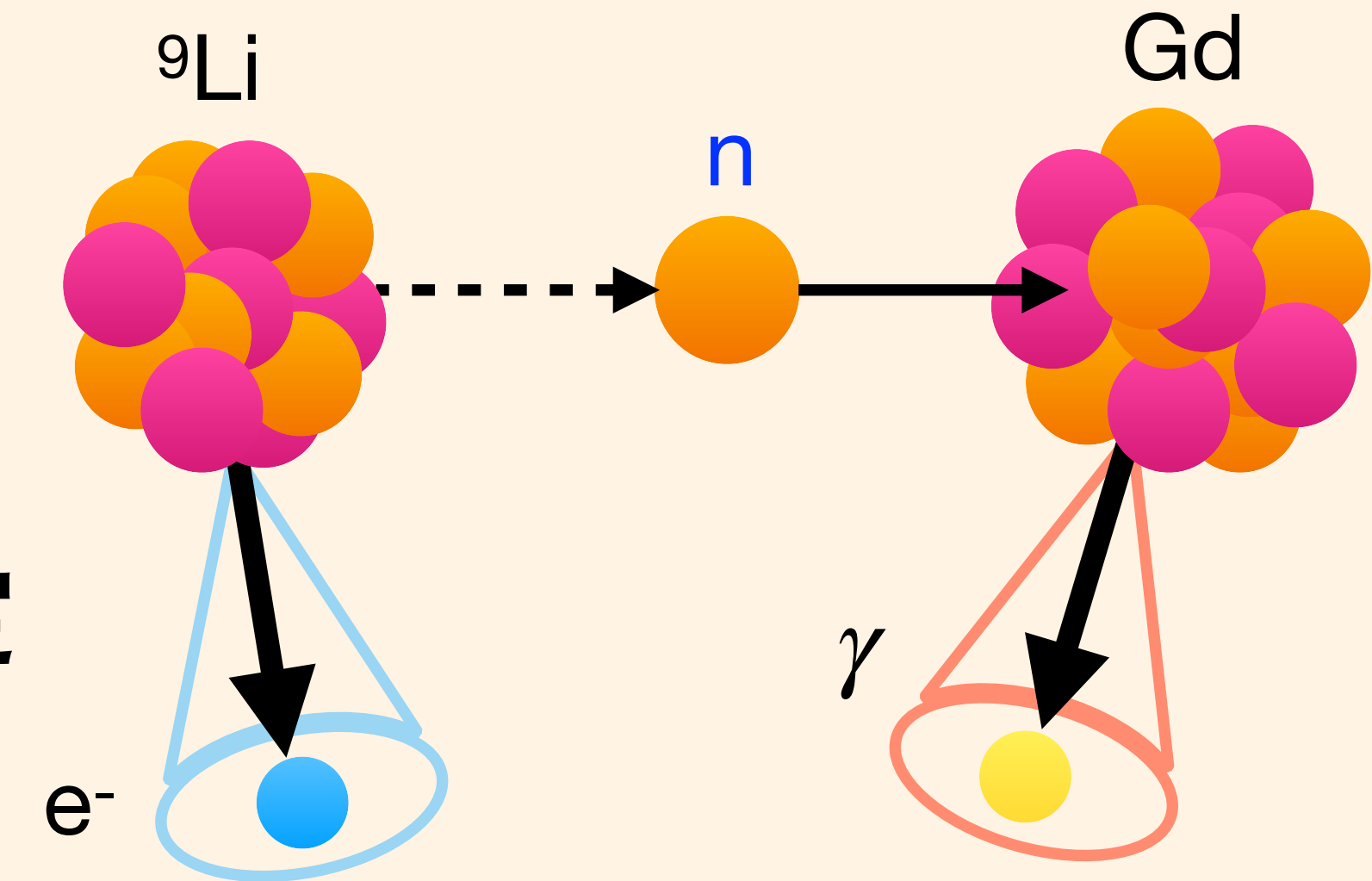
^9Li などの β 崩壊に伴い中性子を生成する同位体は除去しきれない
→残存量の見積もりが必要

- 信頼できるシミュレーションがなく、観測データを用いて残存量を見積もり

- 同位体の種類を判別できない
- 一部の同位体は統計量が少ない

→ミューオンとの時間相関以外を全同位体で同一と仮定

^9Li では残存量の見積もりに約30%の不定性



研究目的：同位体生成量の見積もり精度向上のためにシミュレーションを構築する

発表内容：単一のハドロンモデルでミューオンの同位体生成をシミュレート

ミューオンの同位体生成シミュレーション

- 観測データの相関を反映したミューオンの入射ファイルをinput
- ミューオンの輸送から同位体生成までをGeant4によりシミュレート
- PMTのヒット時間、電荷量からミューオン進行方向、飛跡長などを再構成

観測データに基づくミューオンを入射し、シミュレーション結果が観測データを再現しているか確認

Muon vector
(ミューオンの入射方向/入射位置/運動量)

Geant4

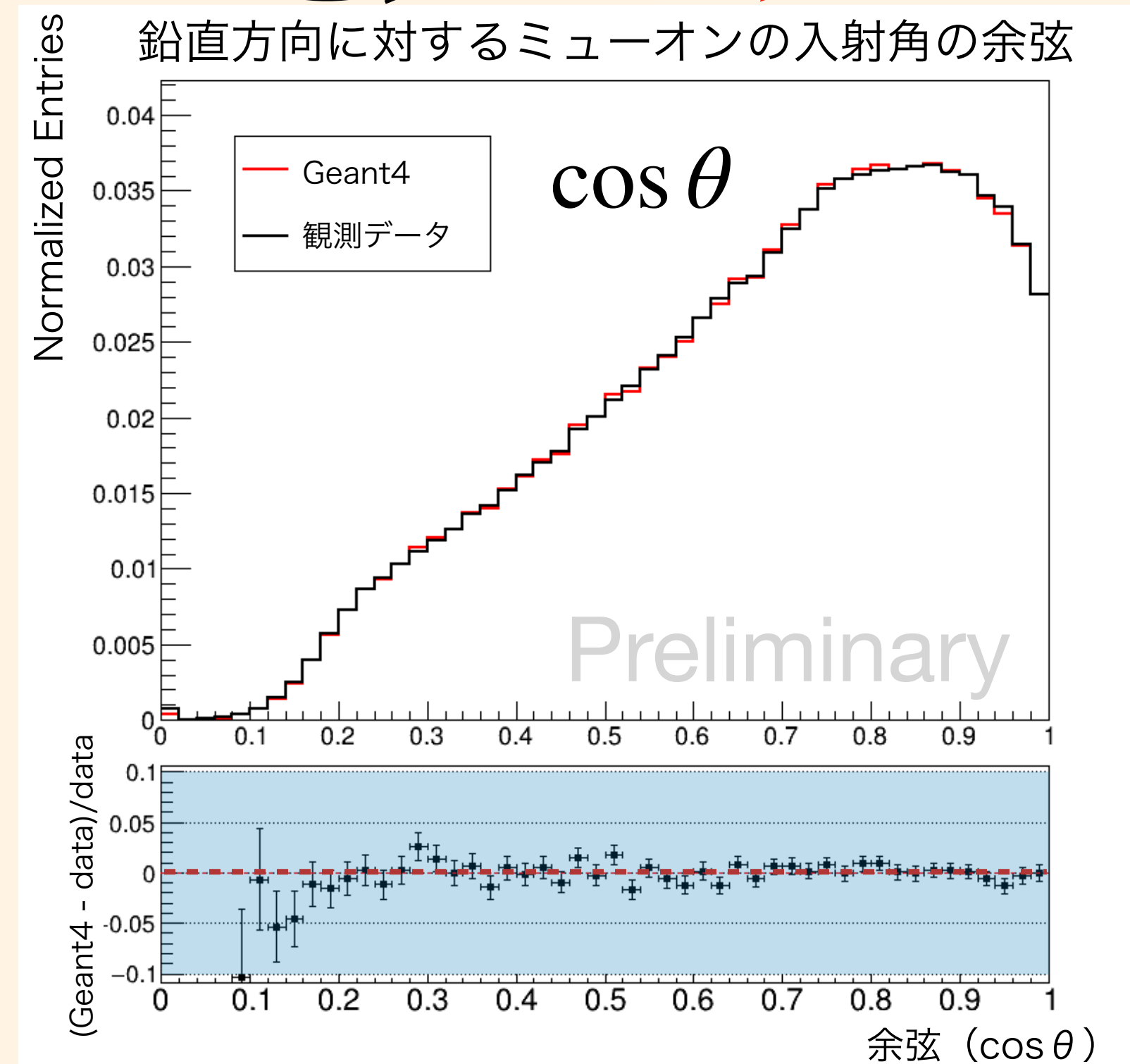
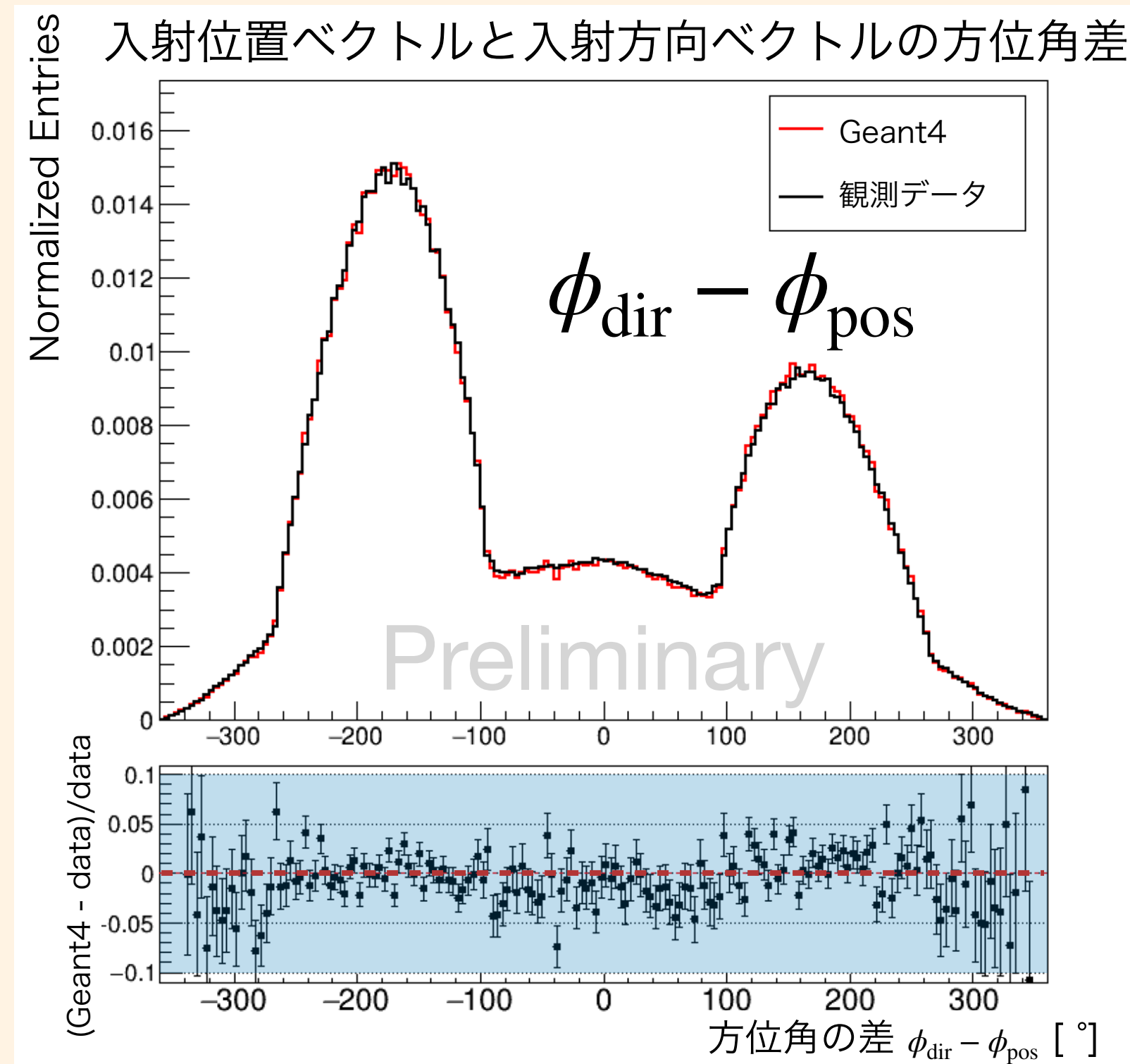
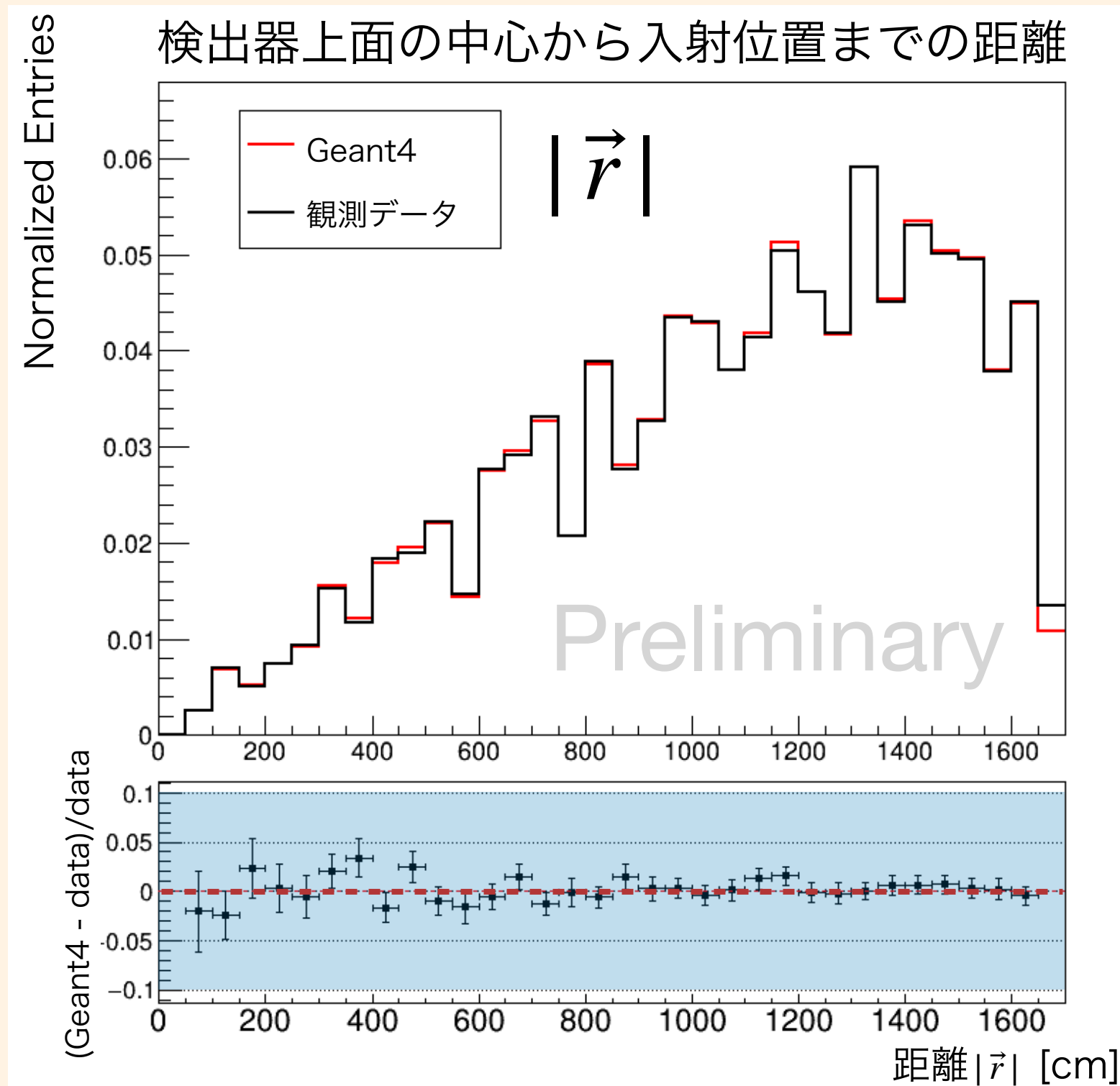
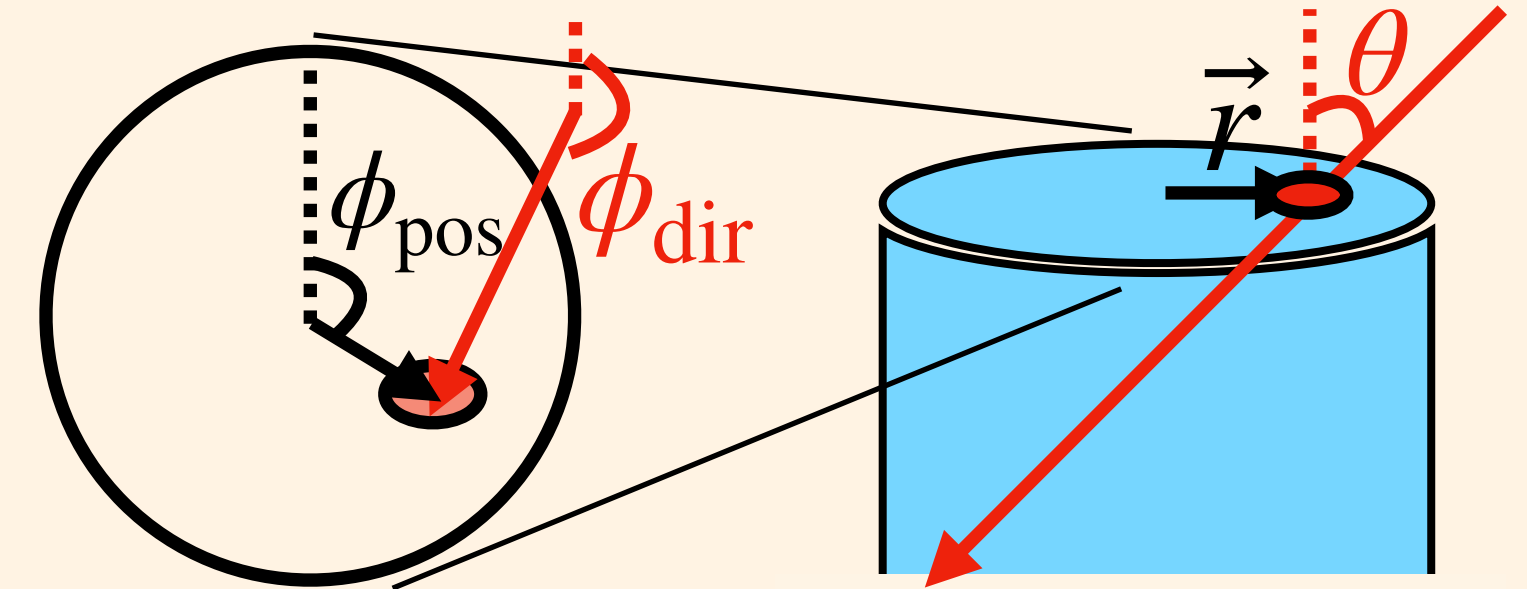
Geant4 output
(PMTヒットTQ/同位体情報など)

再構成ツール

再構成したoutput
(再構成された方向/飛跡長など)

同位体生成シミュレーション —muon vector—

観測データからミューオンの入射方向、入射位置、運動量を決定
以下の物理量の3次元相関に基づいて乱数を振り、各パラメータを決定
これらがシミュレーションのoutputとして反映されていることを確認

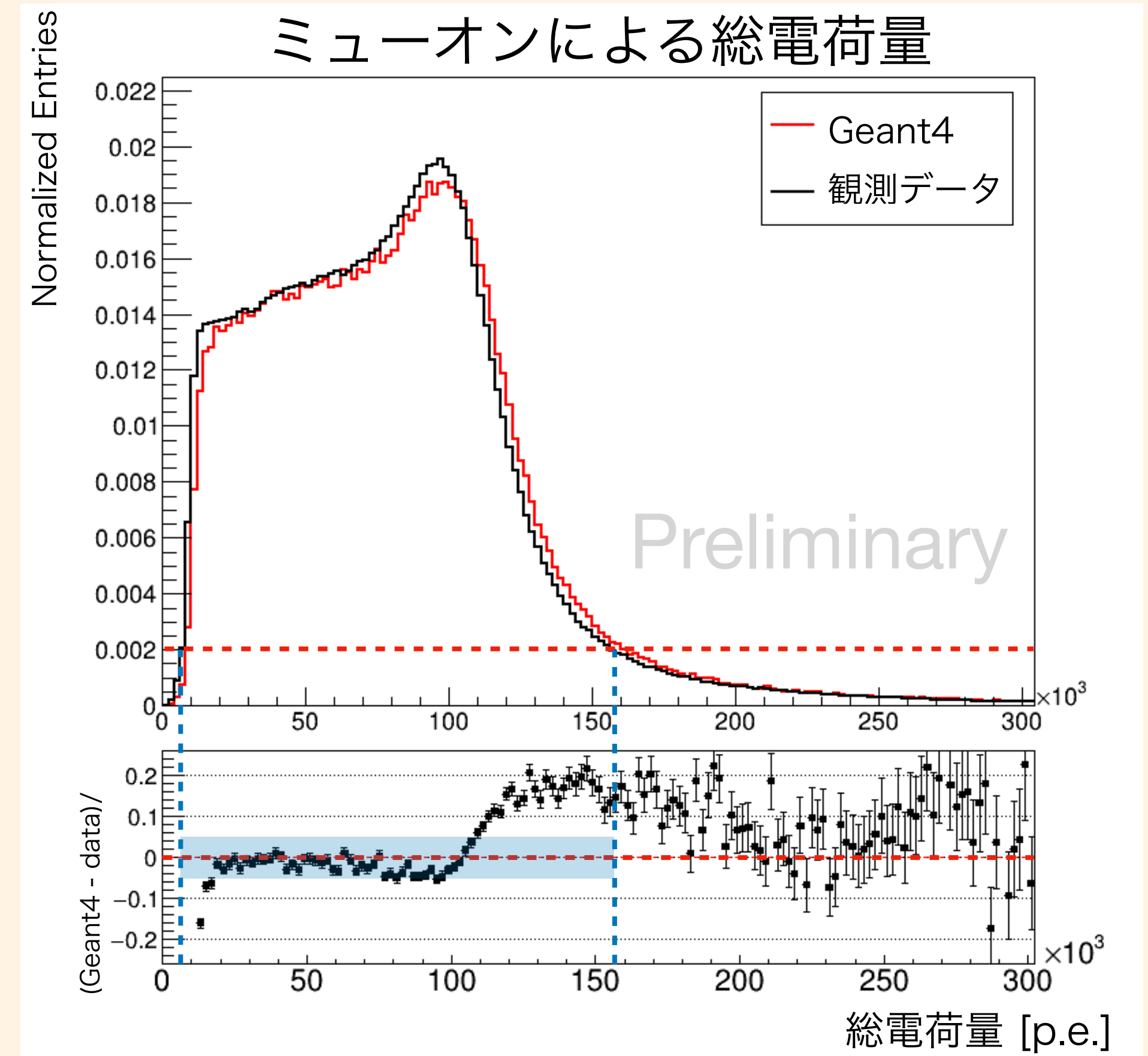
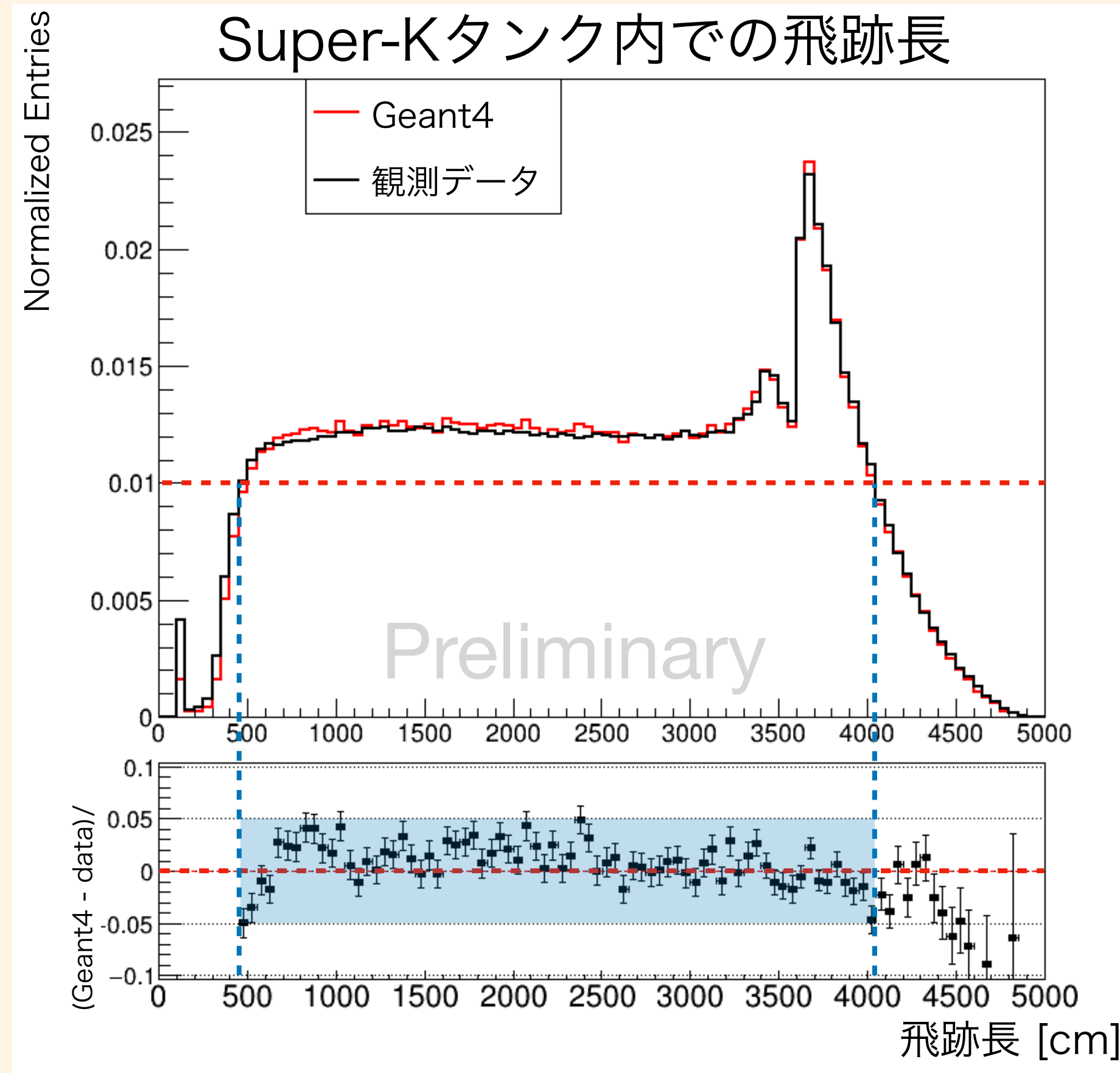


シミュレーションは概ね10%以内の精度で観測データを再現

シミュレーション結果 — 再構成情報 —

再構成したミューオンの飛跡長、総電荷量

占有率が全bin数の逆数以上の領域を「**主要領域**」と定義



再構成飛跡長は主要領域において観測データを**5%以内**で再現

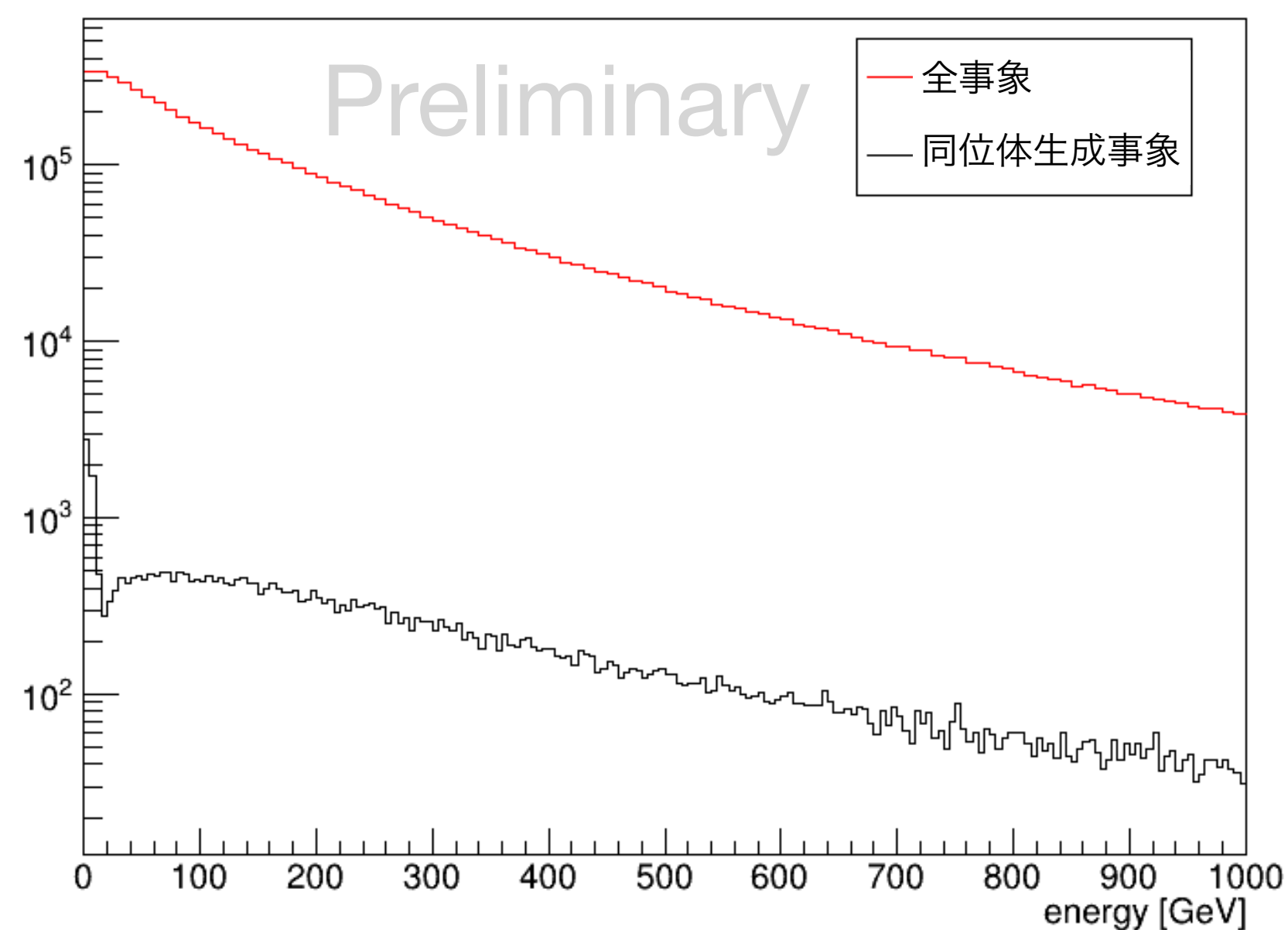
総電荷量は飛跡長と比べて再現精度が低い→今後検証が必要

シミュレーション結果 — 同位体生成 —

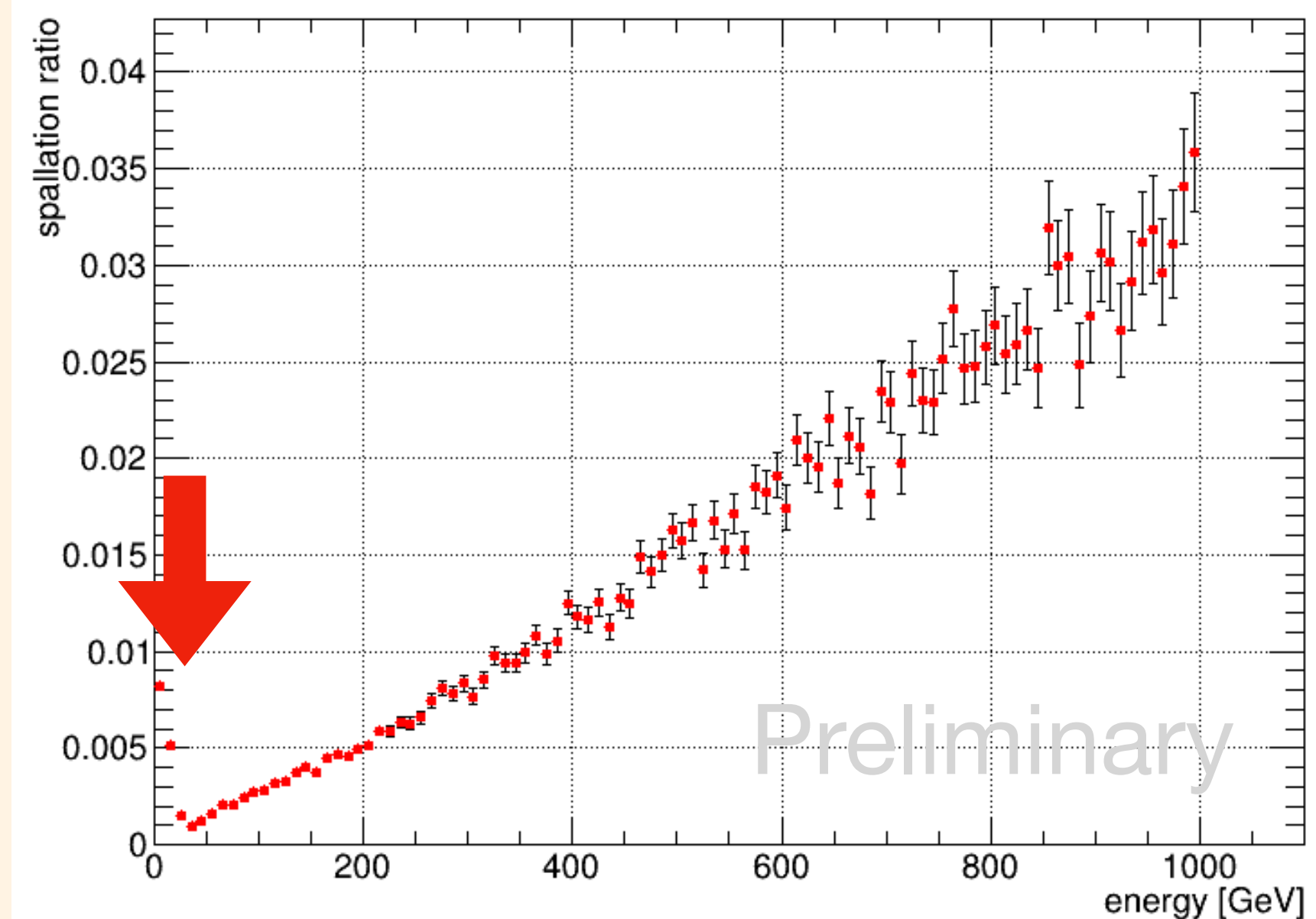
全ミューオンのうちどれくらいがSuper-Kで観測可能な同位体を生成するのか

- Super-Kで観測可能な同位体を生成する確率はミューオン全体の**約1.2%**
- この同位体生成の発生確率は**入射エネルギーに比例**
- 30GeV以下の領域で生成割合が多い→酸素原子核によるミューオン捕獲と考えられる

全ミューオンと同位体生成をしたミューオンのエネルギー



各エネルギーでの観測可能な同位体の生成確率



シミュレーション結果 — 同位体生成 —

シミュレーション結果から同位体yield
(ミューオン1本あたりの生成数) を計算

$$Y_i = \frac{N_i}{\rho L_{\text{total}}}$$

Y_i : 同位体 i のyield [$\mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$]

N_i : 同位体 i の生成数

ρ : 媒質の密度 [g/cm^3]

L_{total} : ミューオンの総飛跡長 [cm]

Muon vector
(ミューオンの入射方向/入射位置/運動量)

Geant4

Geant4 output
(PMTヒットTQ/同位体情報など)

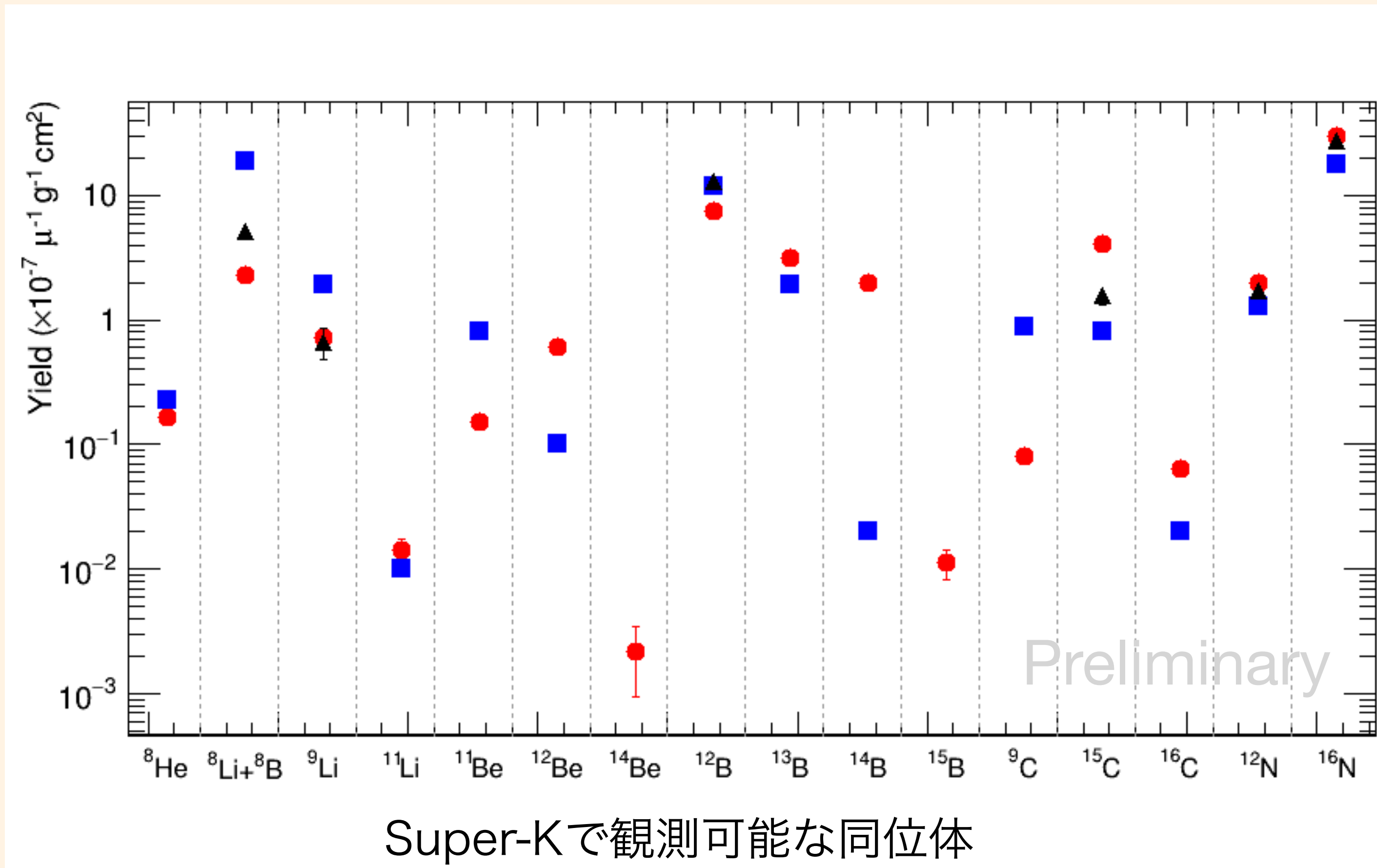
再構成ツール

再構成したoutput
(再構成された方向/飛跡長など)

シミュレーション結果

Geant4による同位体のシミュレーション結果および測定値との比較

$$Y_i = \frac{N_i}{\rho L_{\text{total}}}$$



● Geant4 yield

Geant4を用いて計算した今回の結果

■ FLUKA yield

Super-K外部のグループによる計算結果

S. W. Li and J. F. Beacom, Phys. Rev. C 89, 045801 (2014).

シミュレーションコードFLUKAで計算

天面から底面に抜けるミュオンのみ入射

▲ Super-K measurement

S. Locke et al., Phys. Rev. D 110, 032003 (2024).

FLUKA yieldと比較して、観測データの再現性に同位体間で差が見られる

→ハドロン相互作用の物理モデルを検証、同位体yieldを測定し比較

まとめと今後の展望

- Geant4を用いて宇宙線ミュオンによる同位体生成をシミュレート
- シミュレーションは主要領域において観測データの飛跡長を5%精度で再現
- 観測可能な同位体生成の発生確率は宇宙線ミュオン全体の約1.2%
- 同位体によっては文献値との比較結果が異なり、一部の同位体では大きな差がみられるため、物理モデルや測定結果との比較が必要

今後の展望

- ハドロン相互作用のモデルごとに同位体のyield比較
- ミュオンによる同位体の生成数を測定

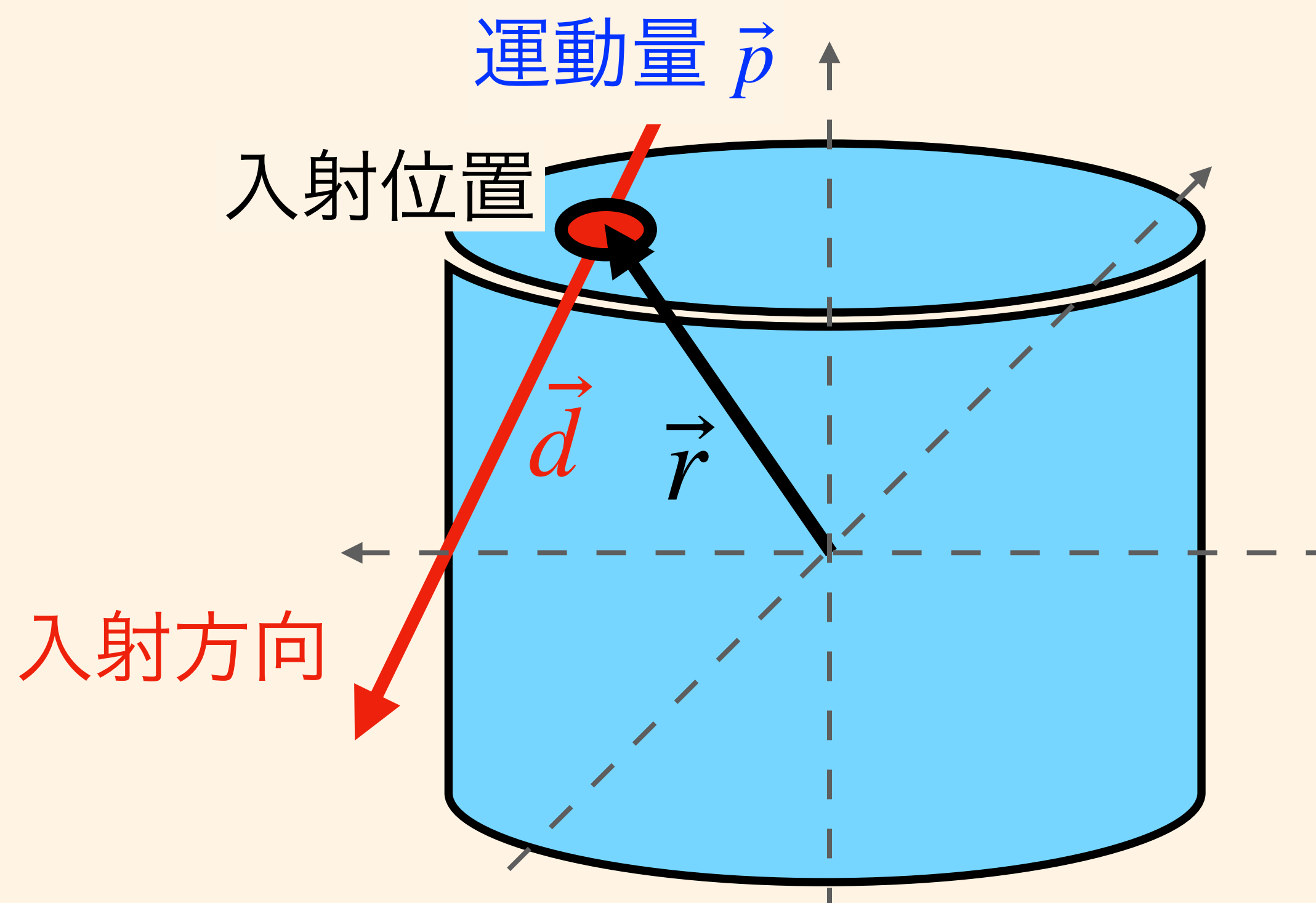
Back up

同位体カウント数・yield

Isotope	Geant4 count	Geant4 yield	FLUKA yield	Super-K Measurement
[$10^{-7} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$]				
^8He	224	0.17	0.23	—
$^8\text{Li} + ^8\text{B}$	3055	2.28	18.8	5.11
^9Li	962	0.72	1.9	0.67
^{11}Li	19	0.01	0.01	—
^{11}Be	202	0.15	0.81	—
^{12}Be	824	0.61	0.10	—
^{14}Be	3	0.002	—	—
^{12}B	9943	7.4	12	12.9
^{13}B	4164	3.1	1.9	—
^{14}B	2639	2.0	0.02	—
^{15}B	15	0.011	—	—
^9C	107	0.08	0.89	—
^{15}C	5494	4.1	0.82	1.57
^{16}C	86	0.06	0.02	—
^{12}N	2634	2.0	1.3	1.72
^{16}N	39798	30	18	27.3

Geant4シミュレーション

- ミューオン核破砕反応をGeant4を用いてシミュレート
- ミューオンの入射から水中での相互作用、同位体生成までを一貫して計算
- 観測データの相関を反映した物理量をもつ単一のミューオンを入射



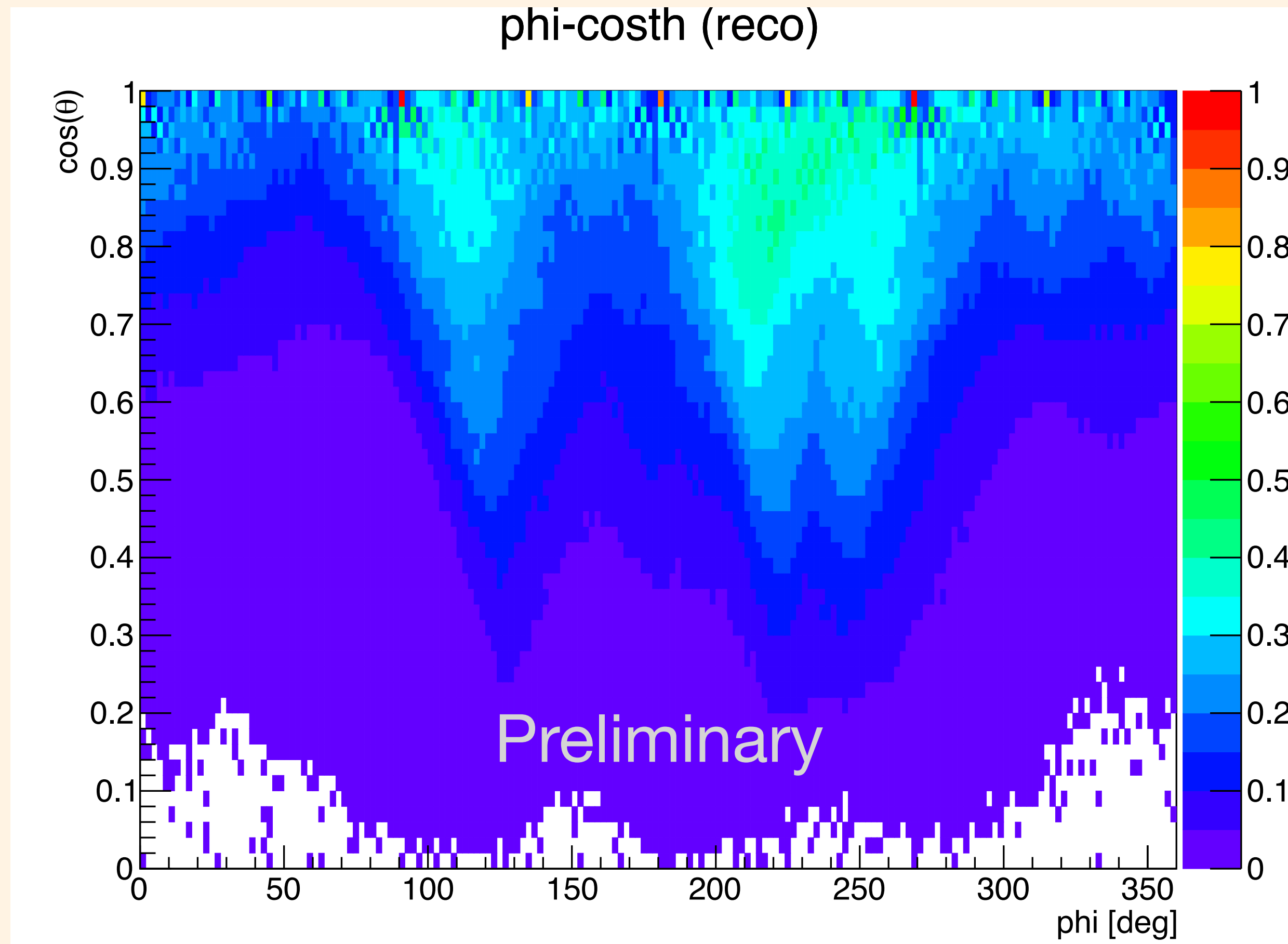
Muon vector
(ミューオンの入射方向/入射位置/運動量)

Geant4

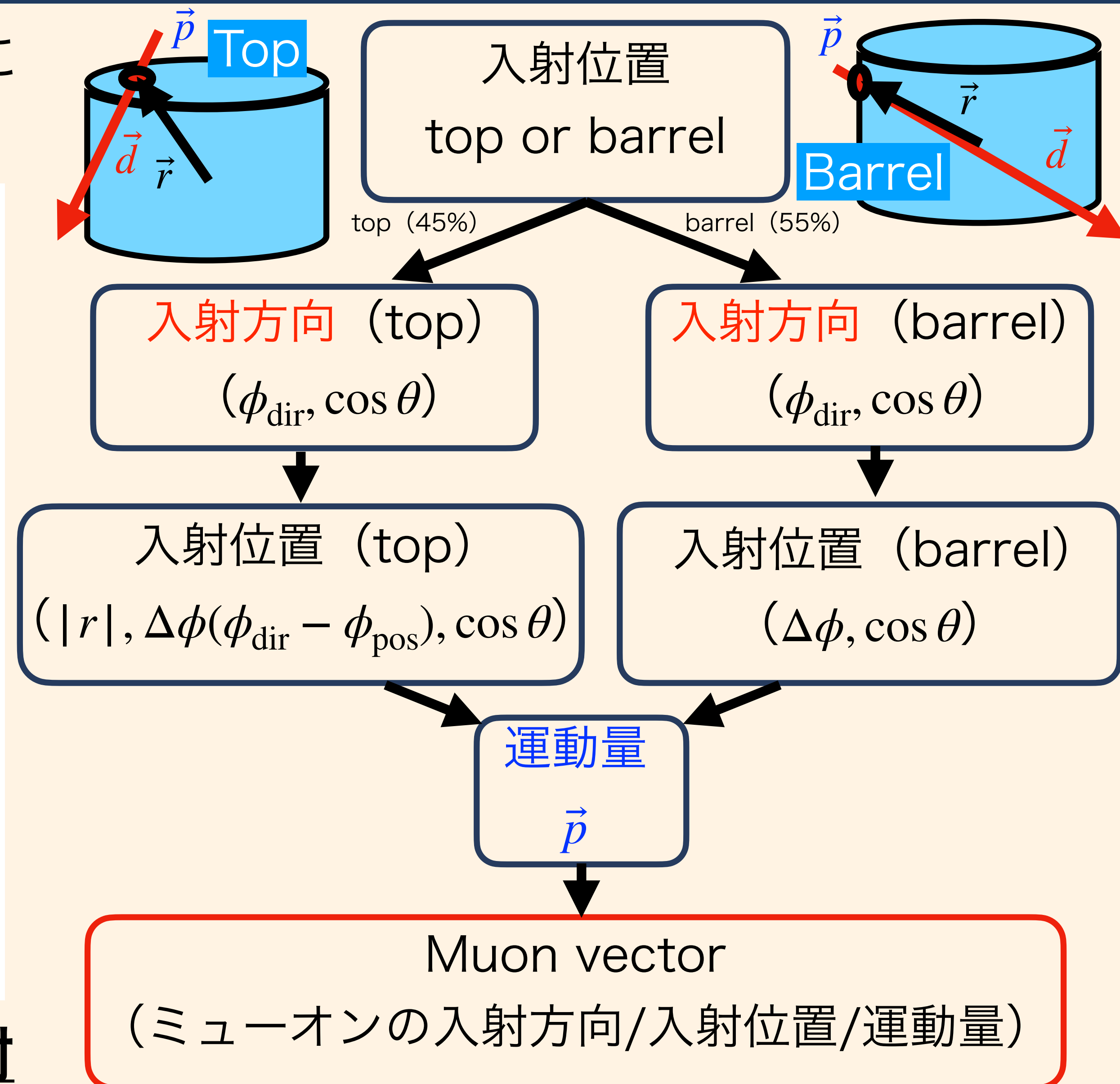
Geant4 output
(全電荷量/飛跡長/同位体情報など)

Muon vector

以下のような観測データの確率分布をもとに
各物理量を入射位置ごとに決定



観測データと相関のあるミュオンを入射



核破碎反応のGeant4シミュレーション

シミュレーション結果から同位体yield
(ミューオン1本あたりの生成数) を計算

$$Y_i = \frac{N_i}{\rho L_{\text{total}}}$$

Y_i : 同位体 i のyield $[\mu^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^2]$

N_i : 同位体 i の生成数

ρ : 媒質の密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$

L_{total} : ミューオンの総飛跡長 $[\text{cm}]$

Muon vector
(ミューオンの入射方向/入射位置/運動量)

Geant4

Geant4 output
(全電荷量/飛跡長/同位体情報など)

- 同位体の生成数
- 飛跡長

同位体yield

$$Y_i = \frac{N_i}{\rho L_{\text{total}}}$$

- Multiple spallation cut

高エネルギーのミューオンによるspallationでは
複数の同位体が作られることがあるという性質を利用したcut

- neutron cloud cut

ミューオン通過から約100 μ s 程度で spallation の発生点付近に
中性子のクラスターが発生することを利用したcut

核破碎反応の解析

現在は観測データを用いて解析

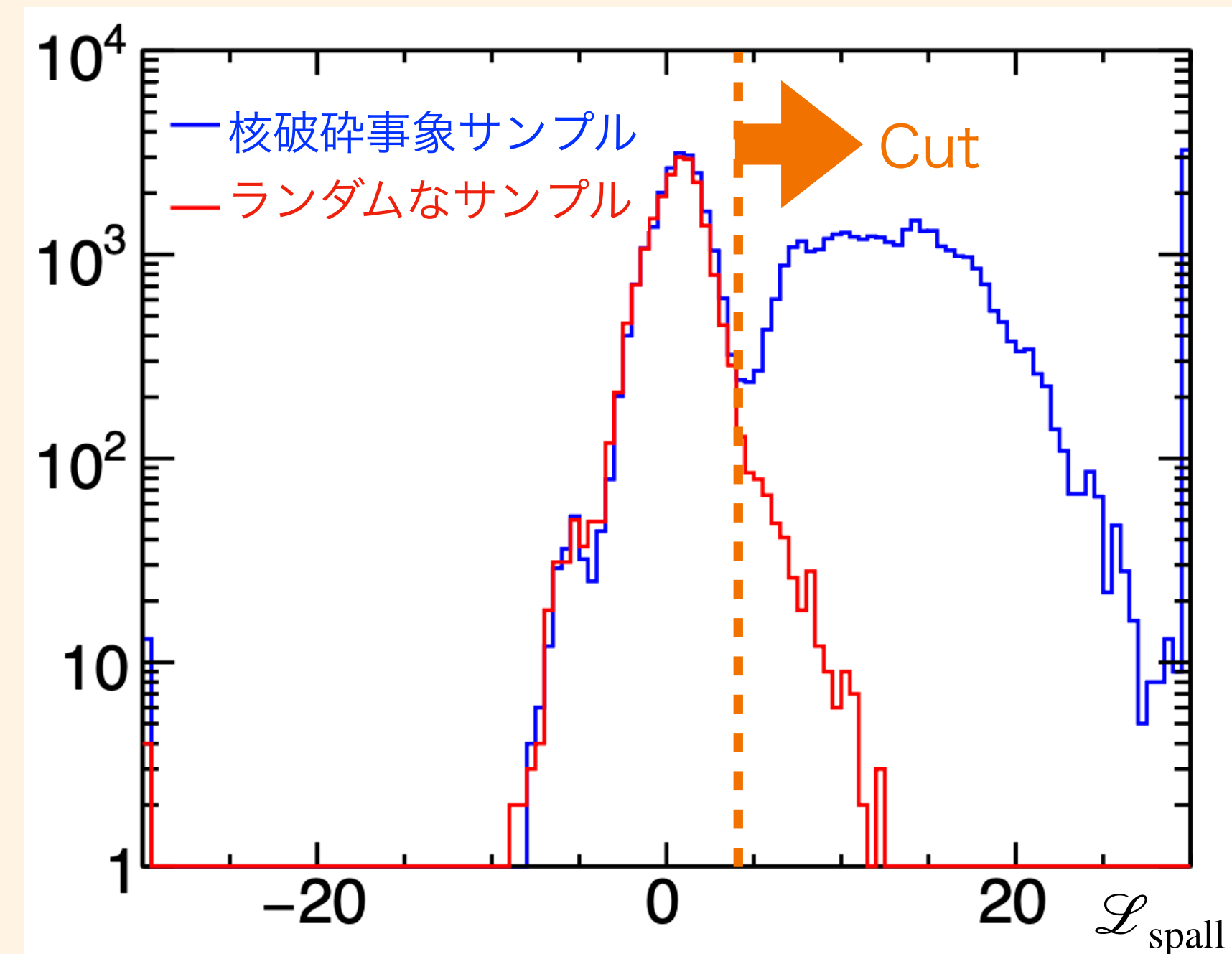
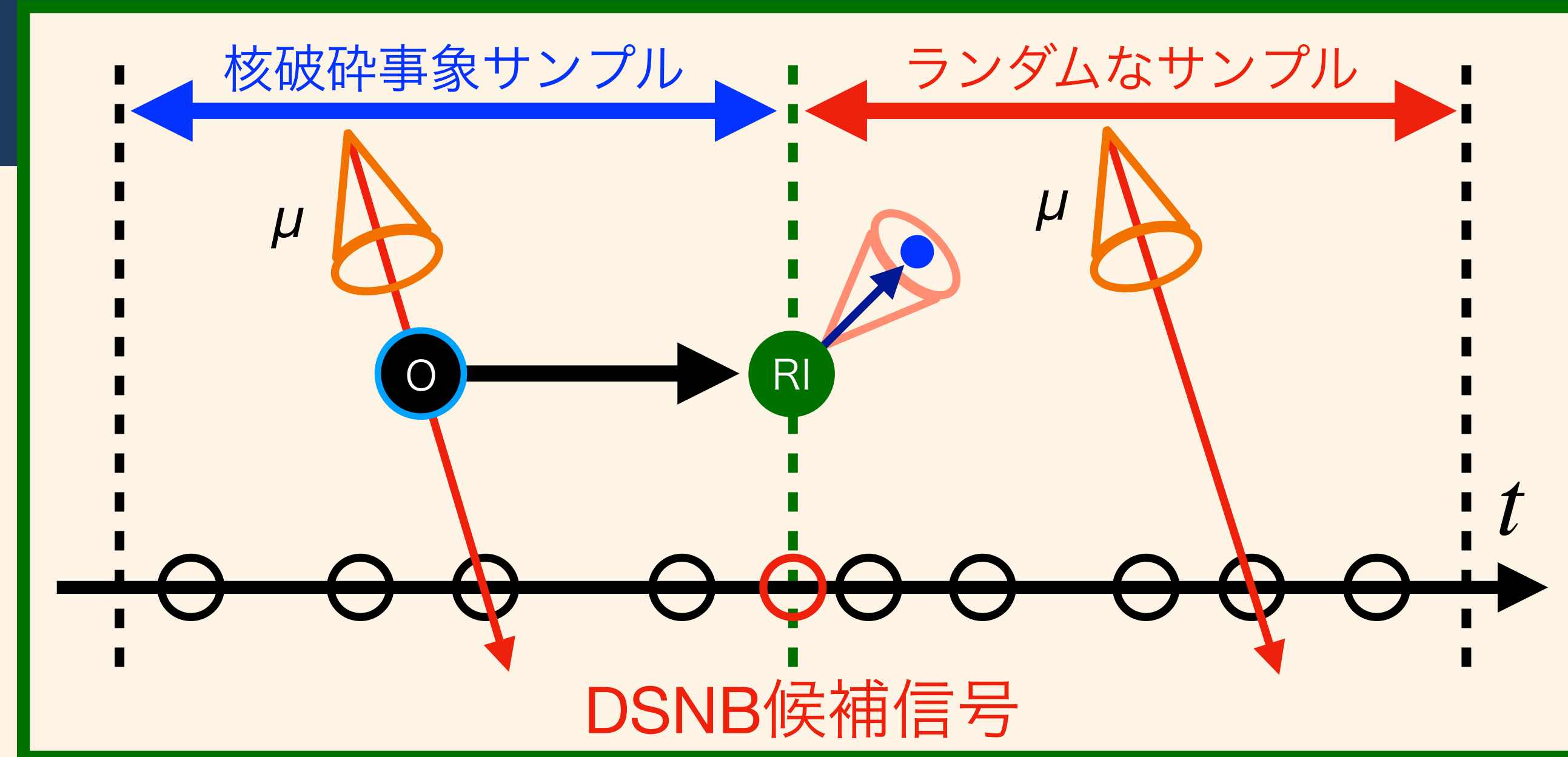
Likelihoodを用いる

$$\mathcal{L}_{\text{spall}} = \log \prod_i \left(\frac{\text{PDF}_{\text{spall}}^i(x)}{\text{PDF}_{\text{random}}^i(x)} \right)$$

$\text{PDF}_{\text{spall}}^i$: 核破碎事象サンプルの確率密度関数

$\text{PDF}_{\text{random}}^i$: ランダムなサンプルの確率密度関数

i : ミューオンとの時間差, 距離等の変数 i x : 変数



M. Harada, 博士論文, 岡山大学 (2023).

主なGeant4の原子核相反応モデル

BERT

- ・ **space-dependent**な核内カスケードモデル
- ・ 核子の**平均自由行程**に基づいて反応点を決定

BIC

- ・ **time-dependent**な核内カスケードモデル
- ・ 核子を初期配置し、**運動方程式**をに基づいて核子間の衝突を判定

INCL++

- ・ BICと同様の**time-dependent** な核内カスケードモデル
- ・ 標的核の質量数に依存した**反応終了時間**を設定
- ・ より実際の**原子核密度分布**に近い関数を使用

DSNBフラックス

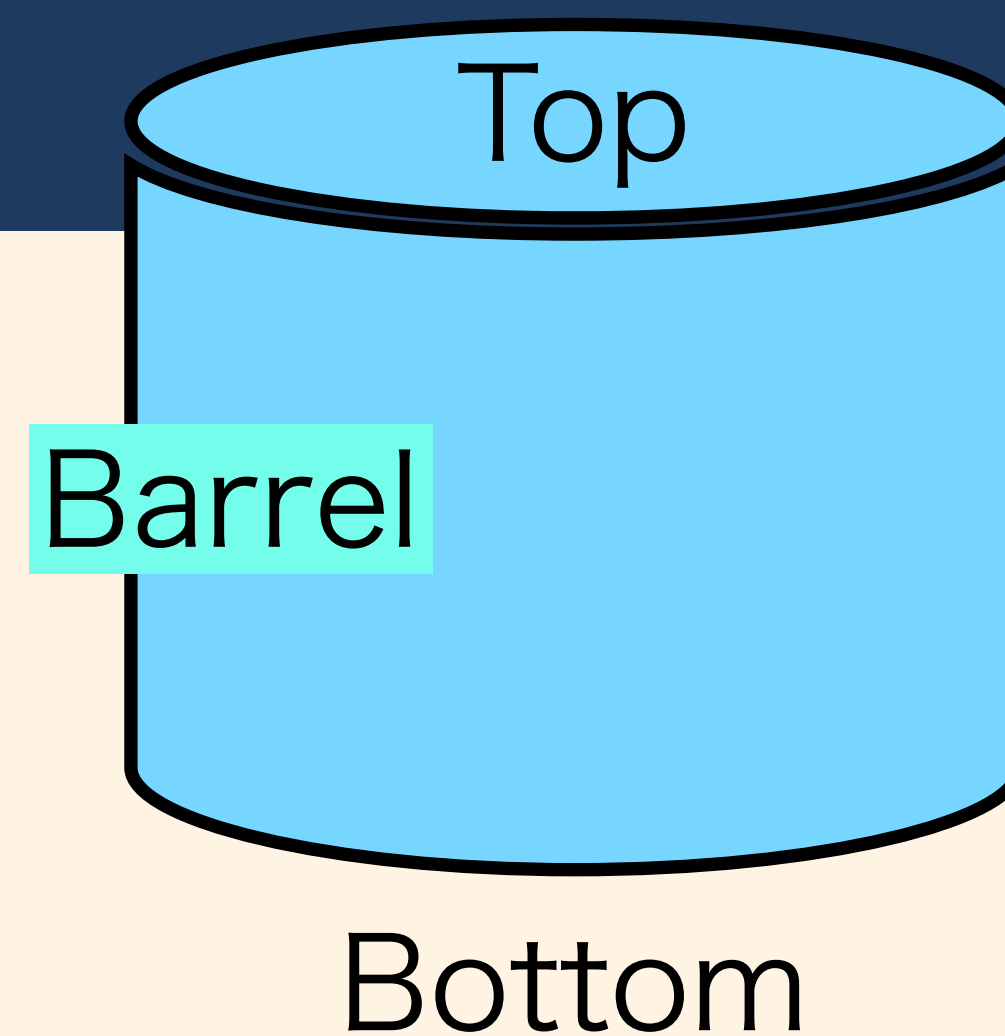
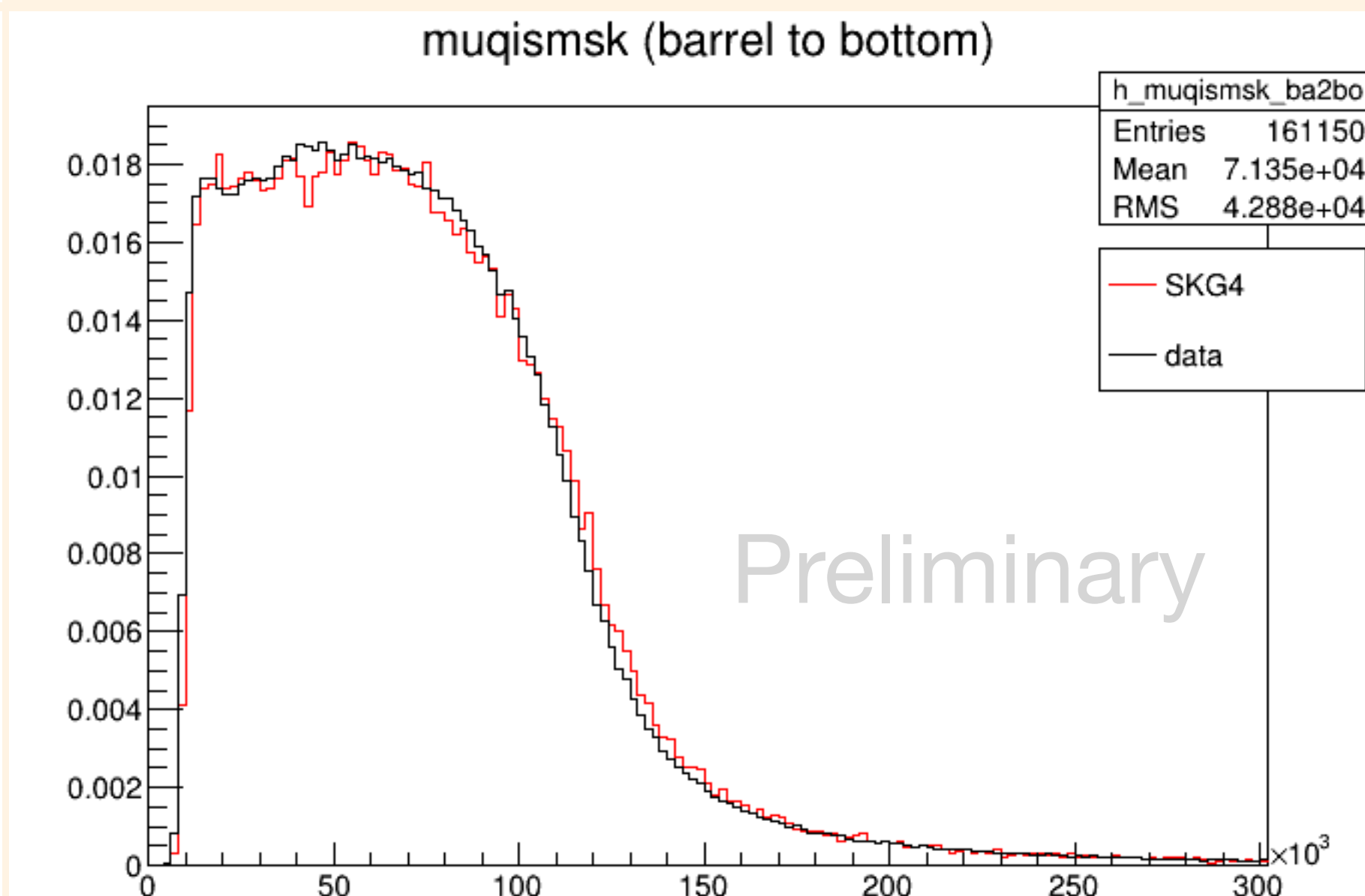
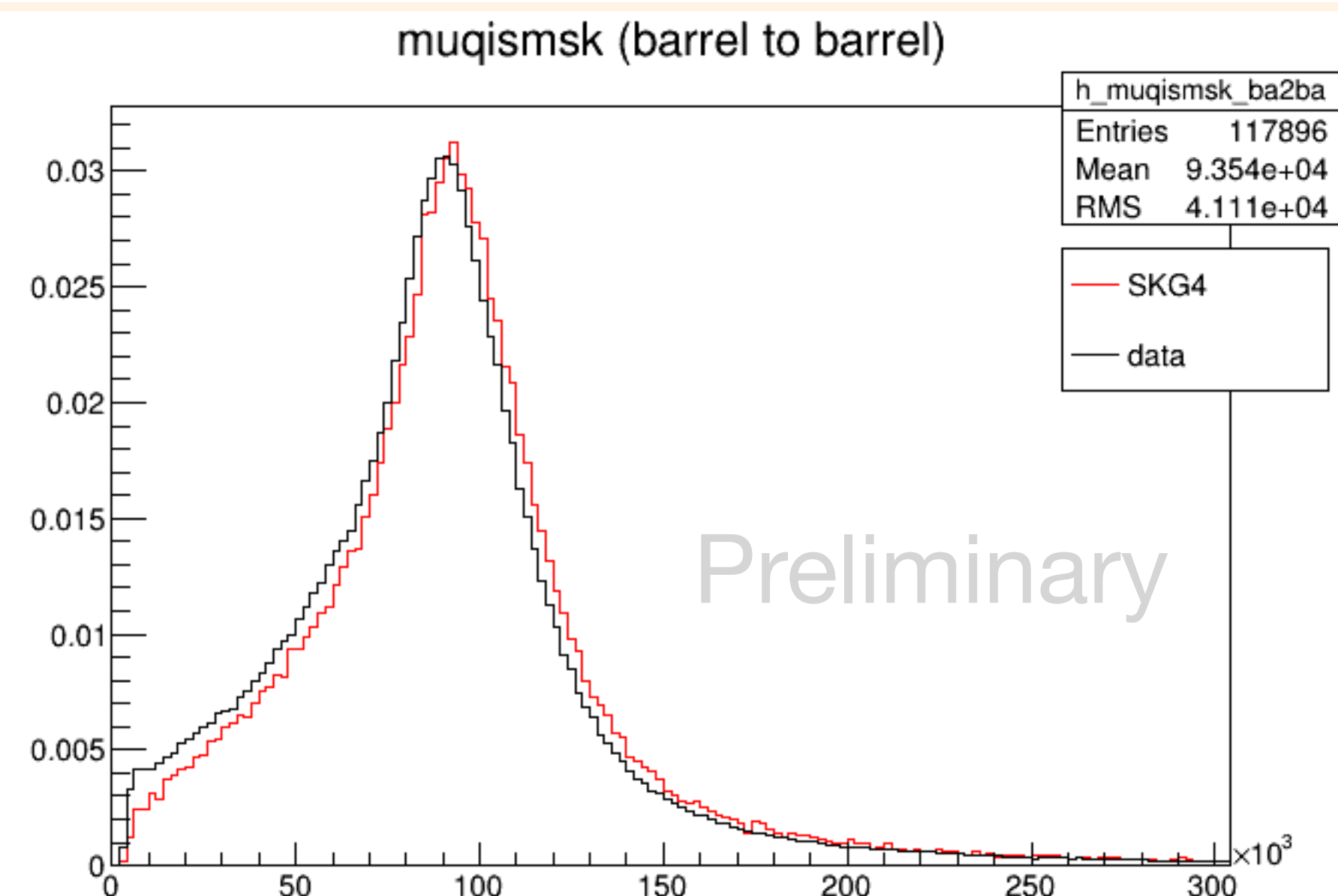
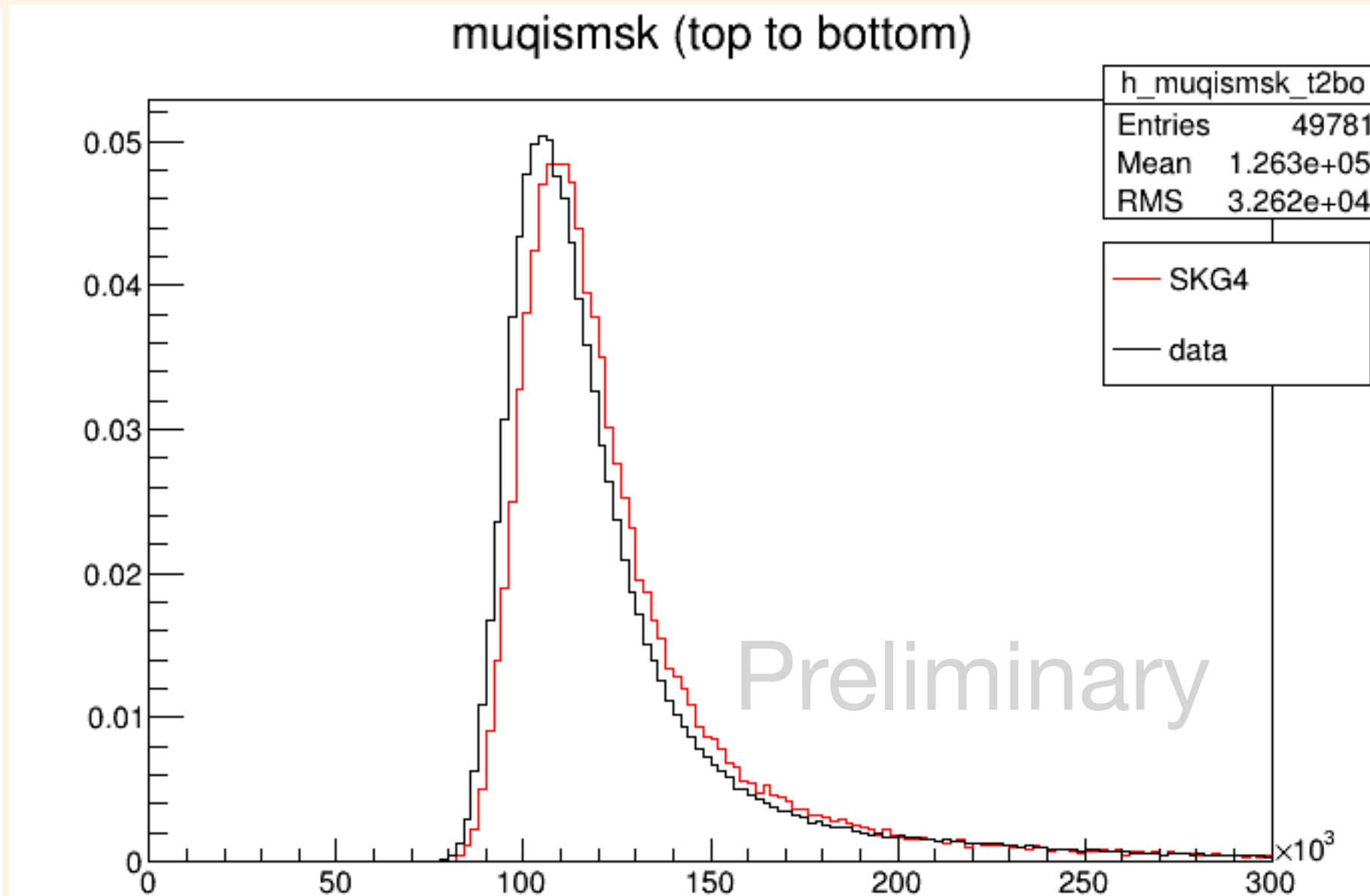
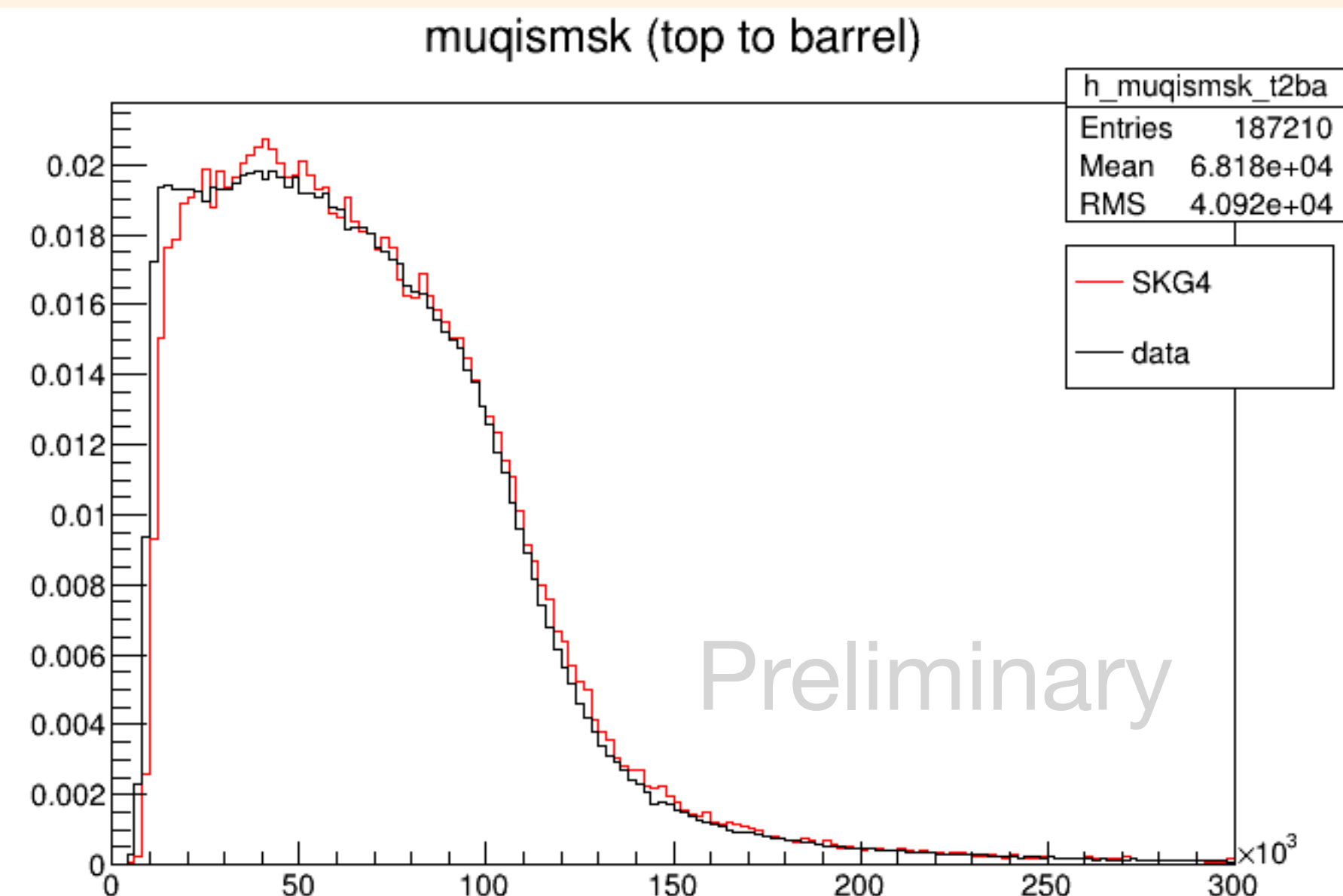
微分DSNBフラックス

$$\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^\infty \frac{dz}{H_0(1+z) \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

Energy spectrum of ν

$$\times \left[\underbrace{R_{CCSN}(z)}_{\text{CCSN rate}} \int_0^{z_{\max}} \underbrace{\psi_{ZF}(z, Z)}_{\text{Metallicity}} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \underbrace{\psi_{IMF}(M)}_{\text{Initial mass function of star}} \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM dZ \right]$$

全電荷量の入射パターンごとの図



COREPMT : CEの補正係数

Atmpd tune

COREPMT=0.896

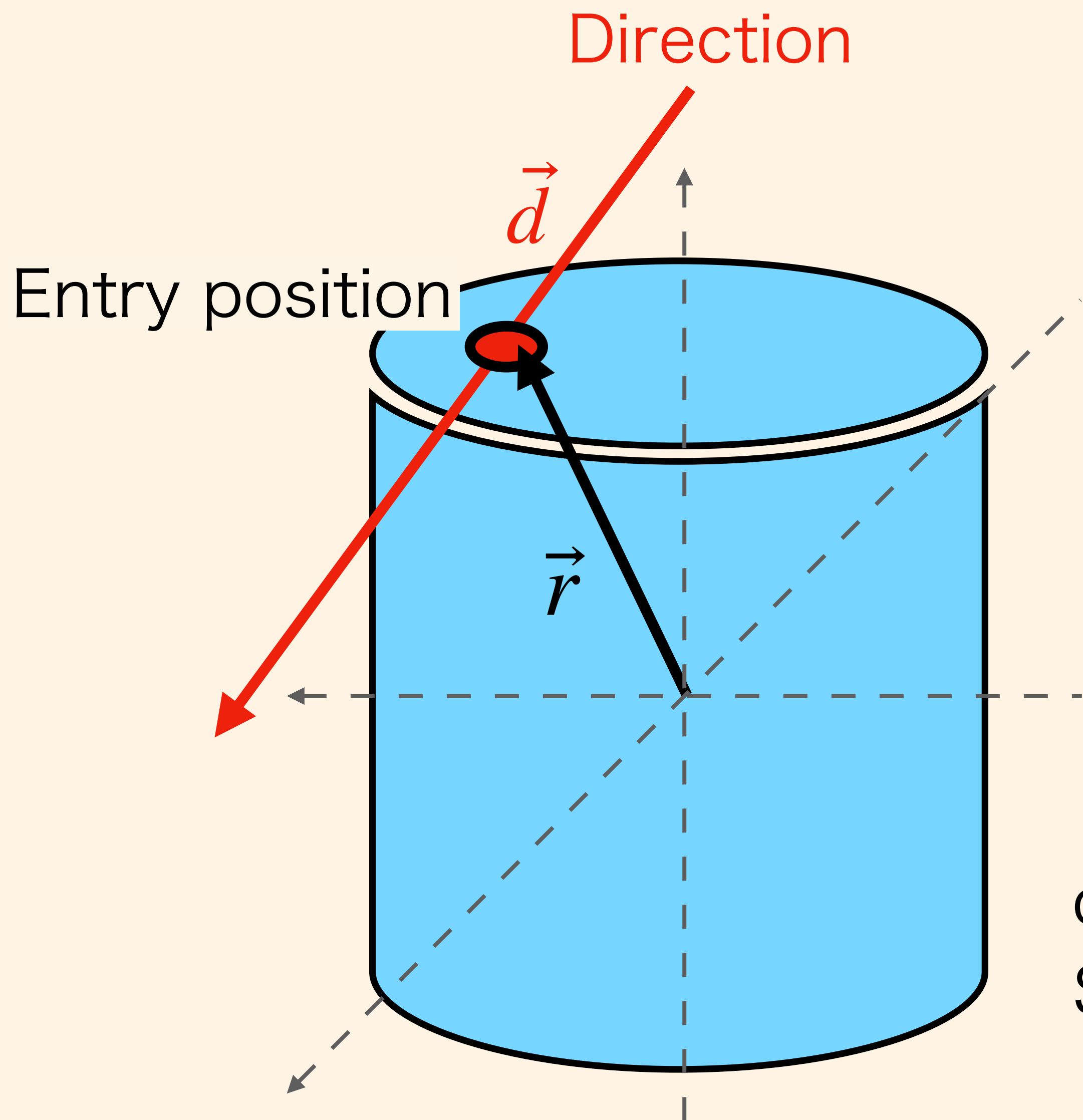
LOWE tune

COREPMT=0.908

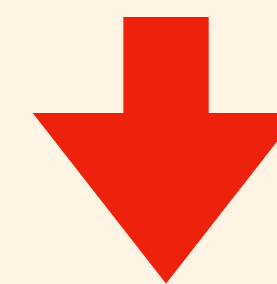
LOWE tuneを使用
→1.1%程度のずれ

Inputのvectorを修正

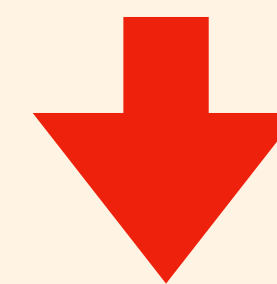
SKG4の結果をdataと合わせる



Muon vector
(direction/entry position/charge)



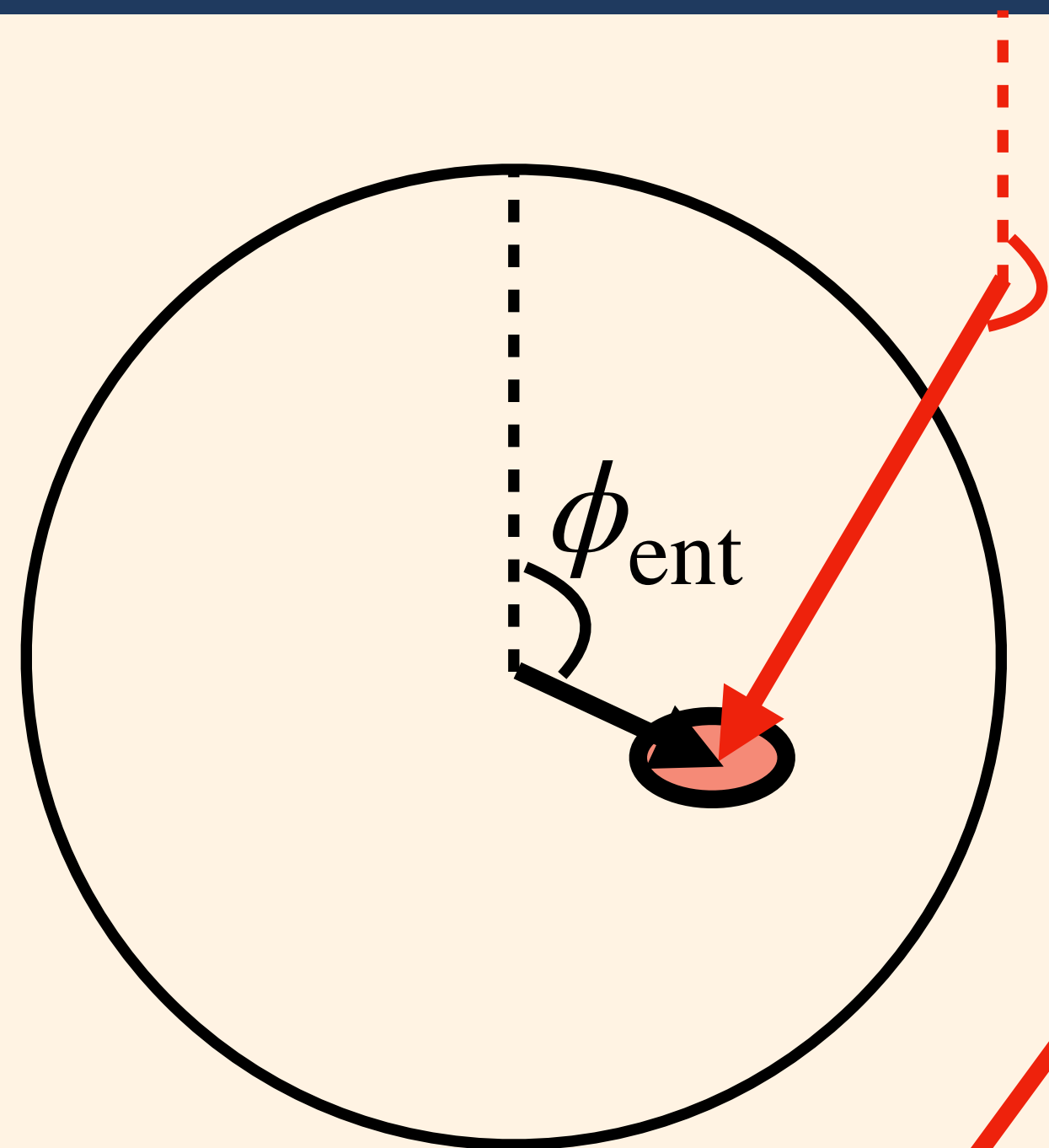
SKG4 output



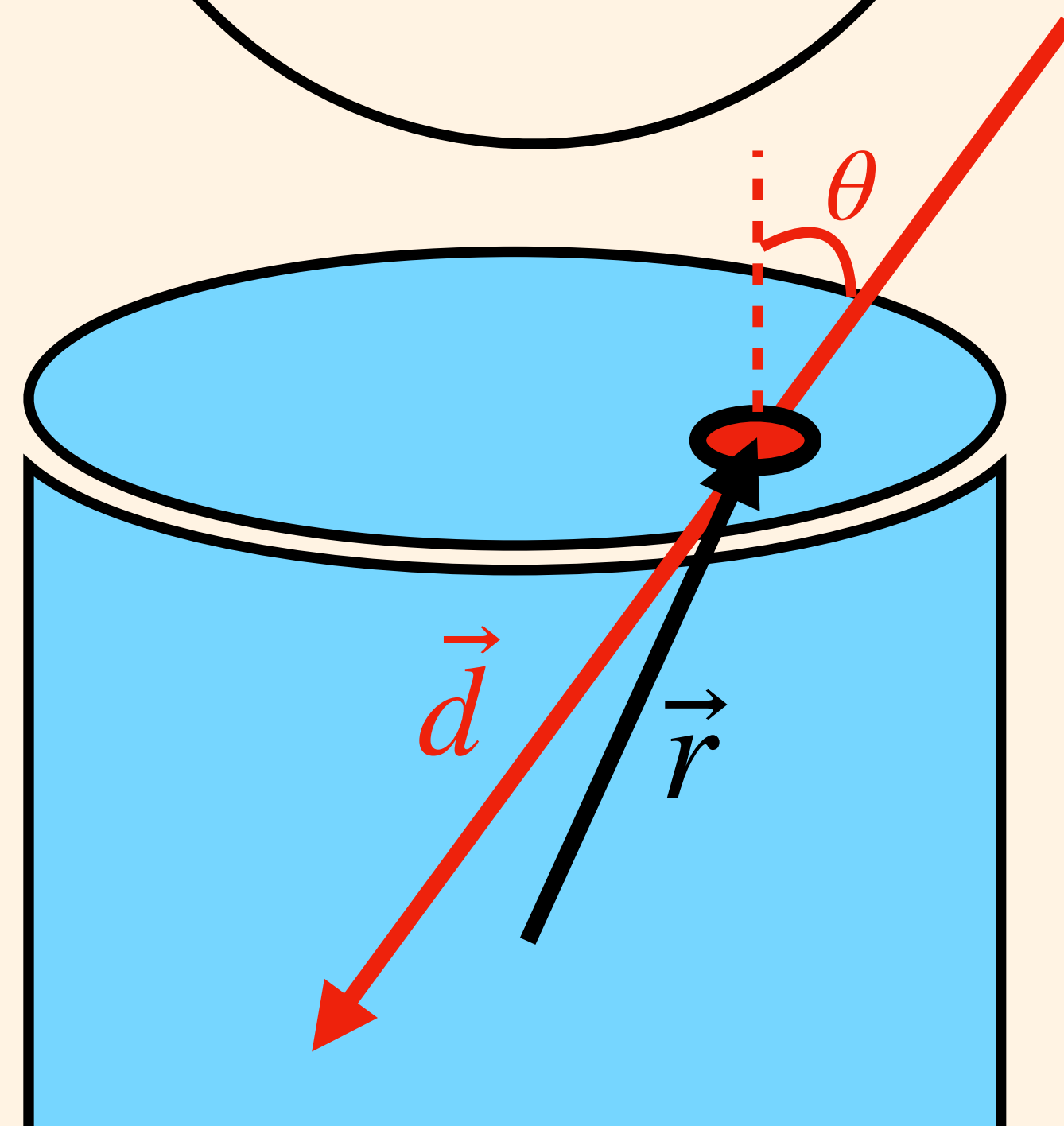
SKG4 mufit

dataを再現できるmuonが打ち込まれるように
SKG4 inputのvectorで相関をとることが必要

Inputのvectorを修正

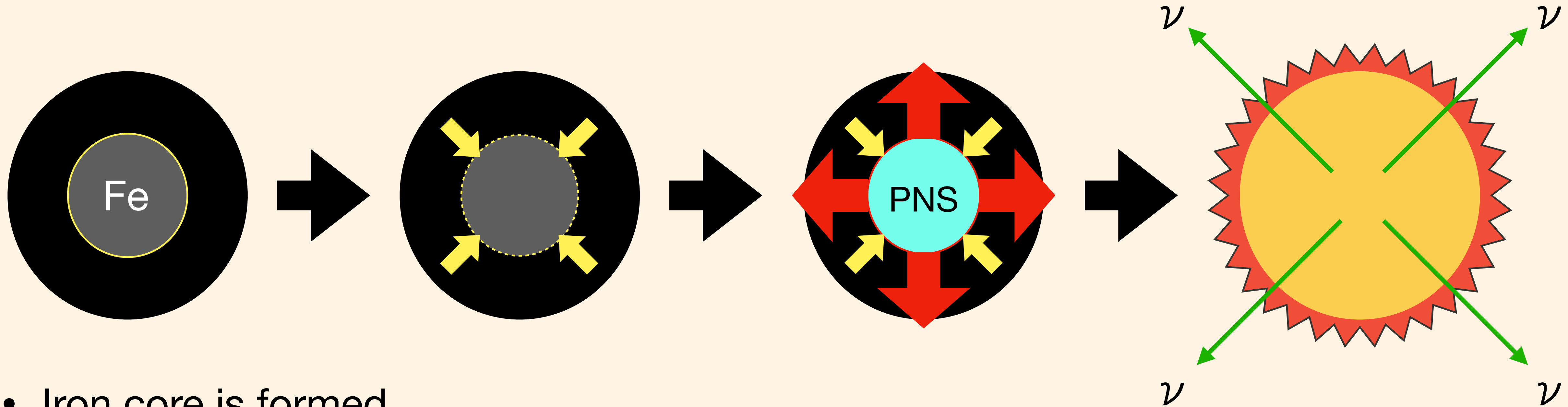


directionと $(|\vec{r}|, \cos \theta_{\text{dir}}, \Delta\phi(\phi_{\text{dir}} - \phi_{\text{ent}}))$ で
観測データと相関をとったvectorをinputして
シミュレーション



directionの天頂角が与えられたときの
directionとentry positionの位置関係を
方位角の差でみる

1 Supernova



- Iron core is formed
- Iron core undergoes gravitational collapse
- Proto-neutron star (PNS) bounce generates a shock wave
- Shock wave reaches the surface, causing a supernova explosion

Contains all types of neutrinos

Neutrinos carry away **99%** of the explosion energy

同位体yield比較

スーパーカミオカンデにおける主要な背景事象である ^9Li , ^{12}B , ^{16}N の結果を比較
スーパーカミオカンデの観測値に対するシミュレーションyieldの相対差

Geant4 (本研究)	Super-K measurements 1	Super-K measurements 2
^9Li	40.6%	7.0%
^{12}B	-36.7%	-42.6%
^{16}N	26.7%	8.6%

FLUKA	Super-K measurements 1	Super-K measurements 2
^9Li	272.5%	183.6%
^{12}B	-2.5%	7.5%
^{16}N	30.0%	51.7%

^9Li 、 ^{16}N はGeant4の方が測定値との差異は小さい