

講演番号 14aT3-4

スーパーカミオカンデ実験における Geant4ベースのシミュレーション性能評価

酒井 聖矢 (岡山大理)

他 Super-Kamiokande Collaboration

2021年3月14日 日本物理学会 第76回年次大会

1. スーパーカミオカンデ・SK-Gd実験
2. 研究目的・先行研究
3. 結果
4. まとめ

スーパーカミオカンデ(SK)

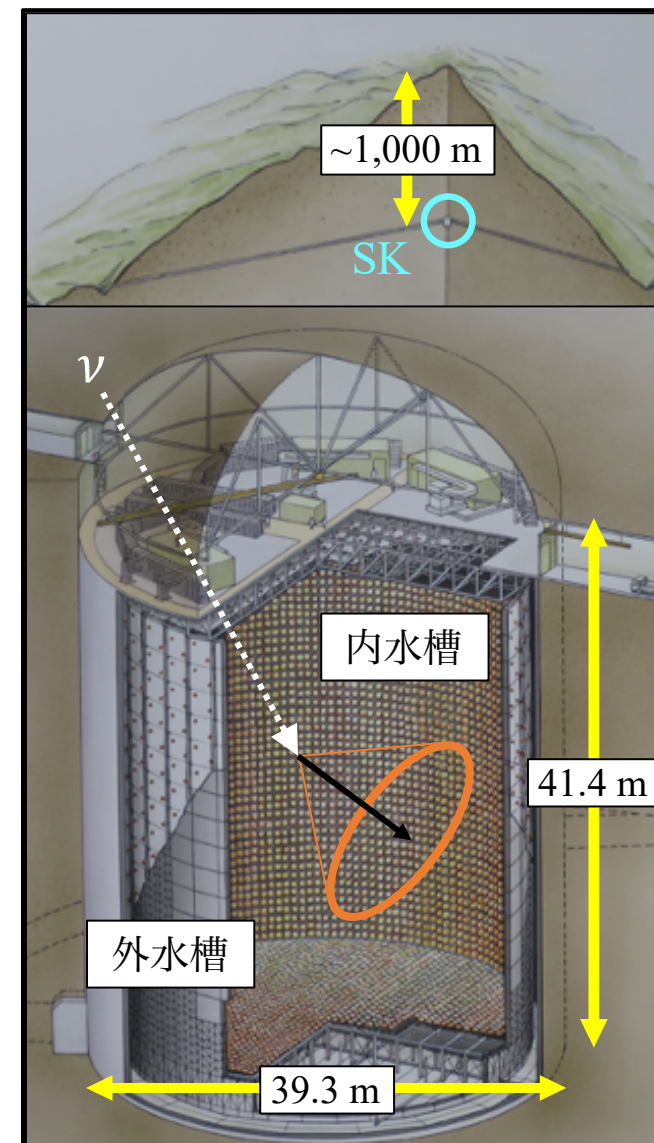
- 岐阜県飛騨市の地下1,000 mにある大型水チェレンコフ検出器
- 1996年に観測開始
- 5万トンの超純水で満たされた円筒形水タンクと光電子増倍管(PMT)から構成
- 内水槽(20インチPMT 11,129本)

ニュートリノ反応により荷電粒子から放出された**チェレンコフ光**をPMTで検出

→ 荷電粒子の情報を再構成

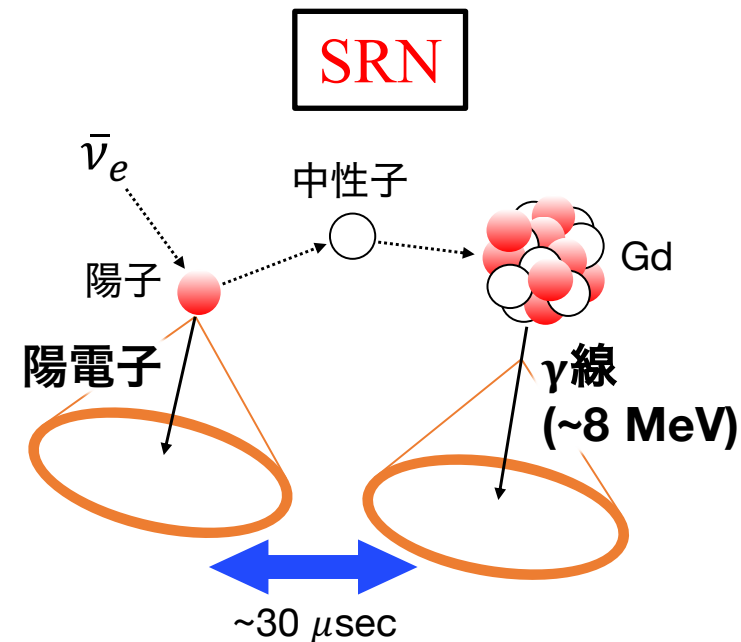
- 外水槽(8インチPMT 1,885本)

→ 宇宙線ミュオンなどの事象識別

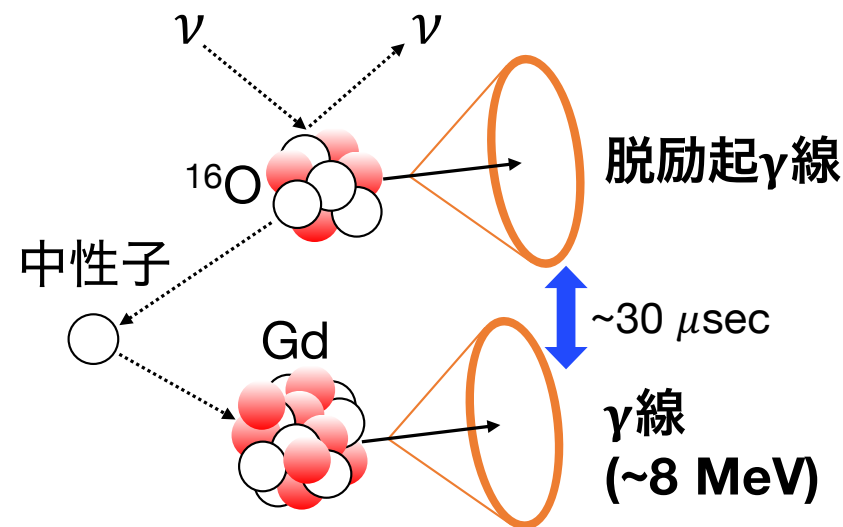


SK-Gd実験：超新星背景ニュートリノ (SRN) の世界初観測を目指す実験

- SKの超純水中に(最終的に)質量濃度0.2%の硫酸ガドリニウムを溶解
 - 中性子を約90%の確率で同定
 - SRNと背景事象を識別
- SK-Gd実験でも識別できない事象
 - 大気ニュートリノ背景事象 など
 - 事象数の正確な見積もりが必要



大気ニュートリノ背景事象



目的： SRN探索における大気ニュートリノ背景事象の見積もりをGeant4ベースのシミュレーション(**SKG4**)で行う

- SKのシミュレーションは今までGeant3ベース(**SKDETSIM**)
 - 低エネルギー中性子の正確な輸送モデル、Gdの熱中性子捕獲からの γ 線放出の高精度なモデルが導入されていなかった
 - 今後約10年でのSK-Gd実験における検出器シミュレーションの管理・維持を考え、SKG4を構築

	シミュレーション	使用言語	物理モデル
SKDETSIM	Geant3	Fortran	更新終了
SKG4	Geant4	C++	最新

先行研究：チェレンコフ光子の放出数と検出数 6

- SKG4を使用するためには、SKG4の性能を詳しく理解する必要がある

→ SKDETSIMとSKG4を用いた物理モデルの比較

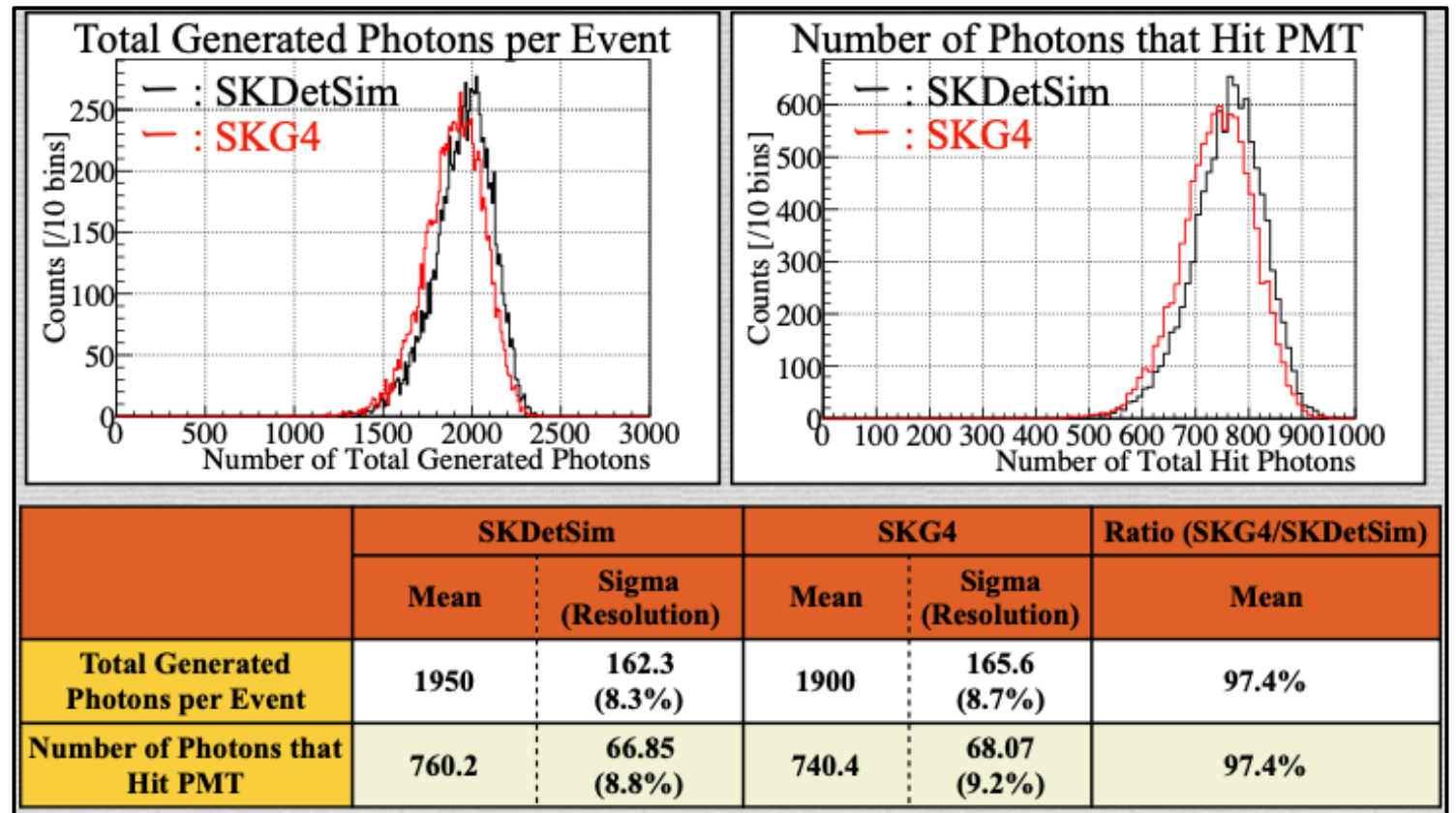
- タンク中心から下向きに電子 (10 MeV)を10,000回入射

→ チェレンコフ光子の放出数と検出数を比較

- 分布は基本的に一致

- 平均値に2%程度の違い

→ 屈折率の取り扱いの違いによって光子の放出数が変化



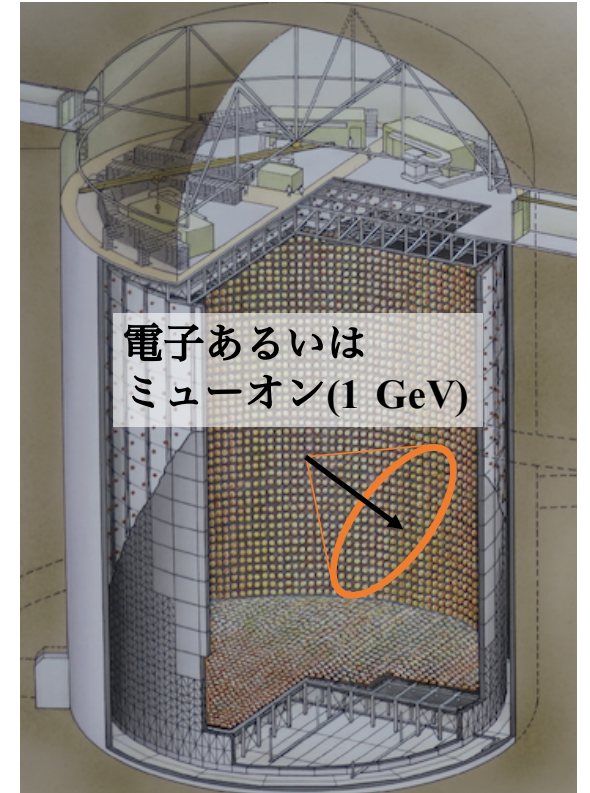
(日本物理学会 2018年秋季大会にて萩原さんが報告)

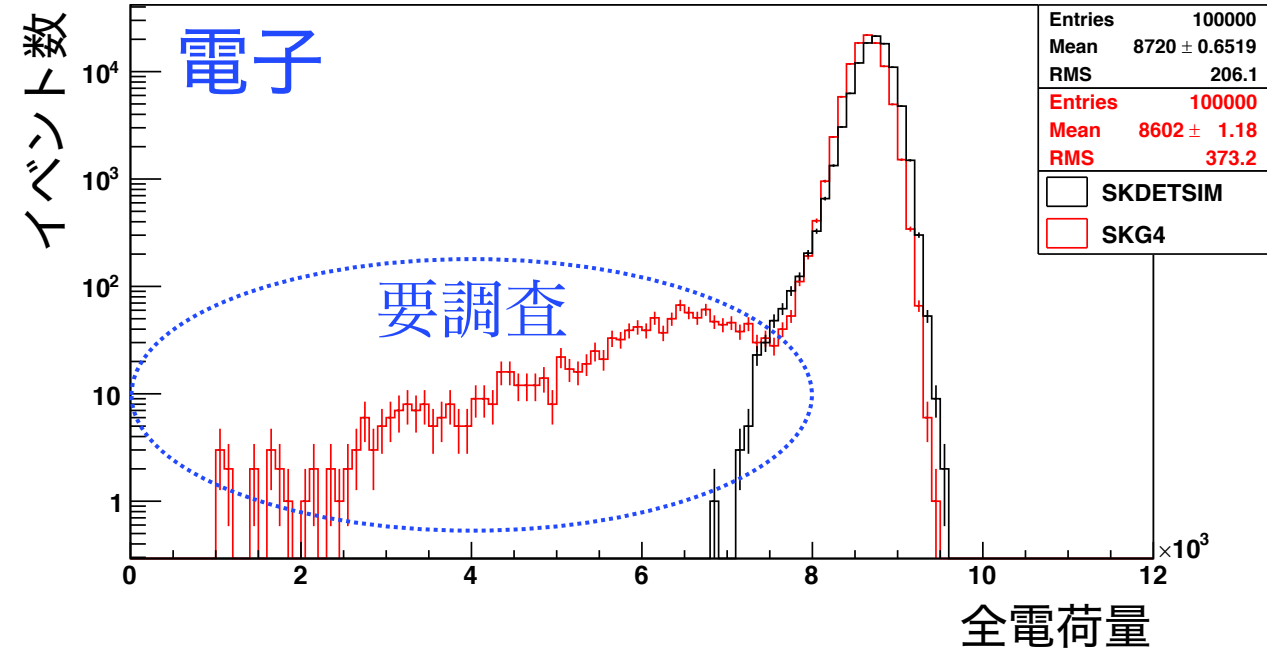
- これまでは低エネルギー(~ 10 MeV)の荷電粒子で比較
- 大気ニュートリノ背景事象を見積もることが目的
- 大気ニュートリノ反応で発生する荷電粒子は高エネルギー(GeV-TeV 領域)
→ まず1 GeVの電子・ミュオンを用いて基本的な分布を作成・比較

粒子	電子, ミュオン
運動エネルギー	1 GeV
位置	タンク中心 ((0, 0, 0) m)
方向	ランダム
イベント数	100,000

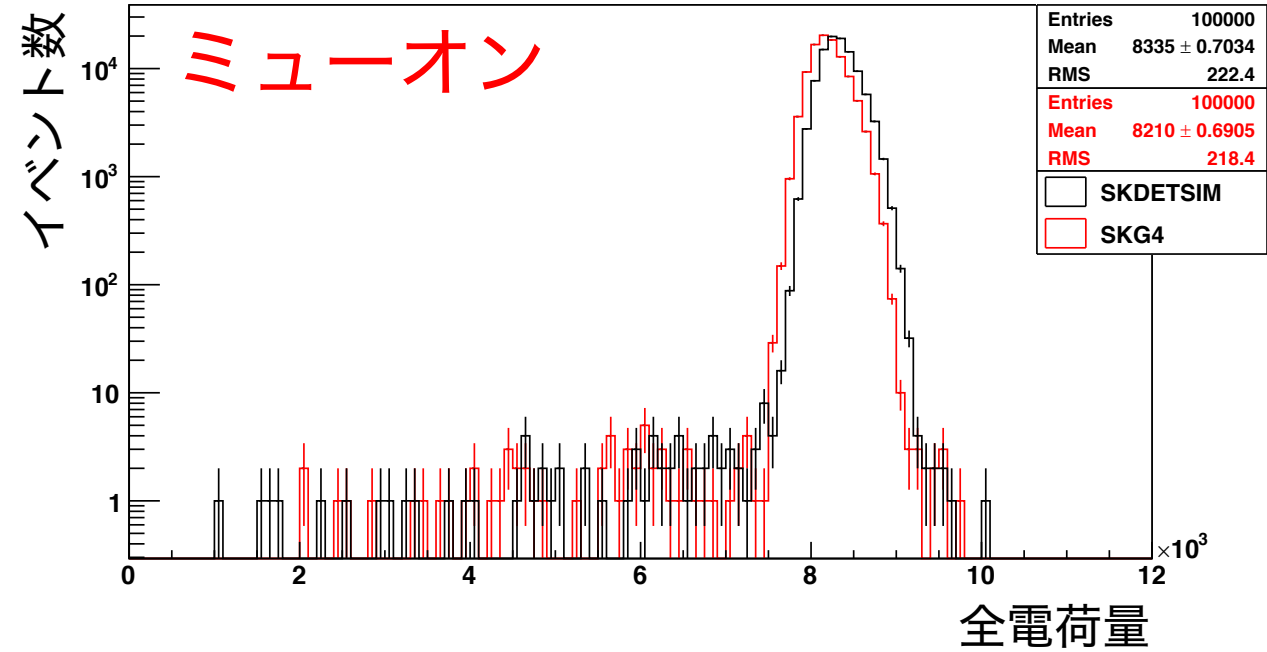
作成した分布

- 全電荷量(PMTが捉えた信号の大きさの総和)
- 運動量
- チェレンコフリング数
- PID(粒子弁別)





	SKDETSIM	SKG4
平均値	8720	8602

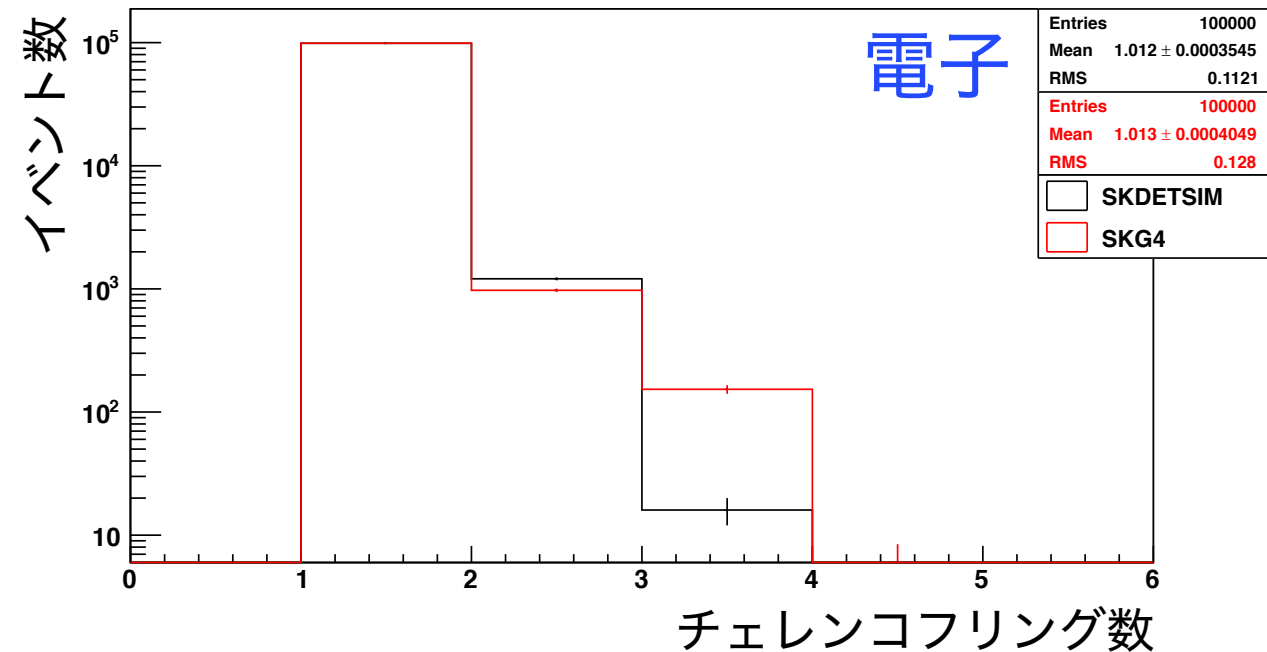


	SKDETSIM	SKG4
平均値	8335	8210

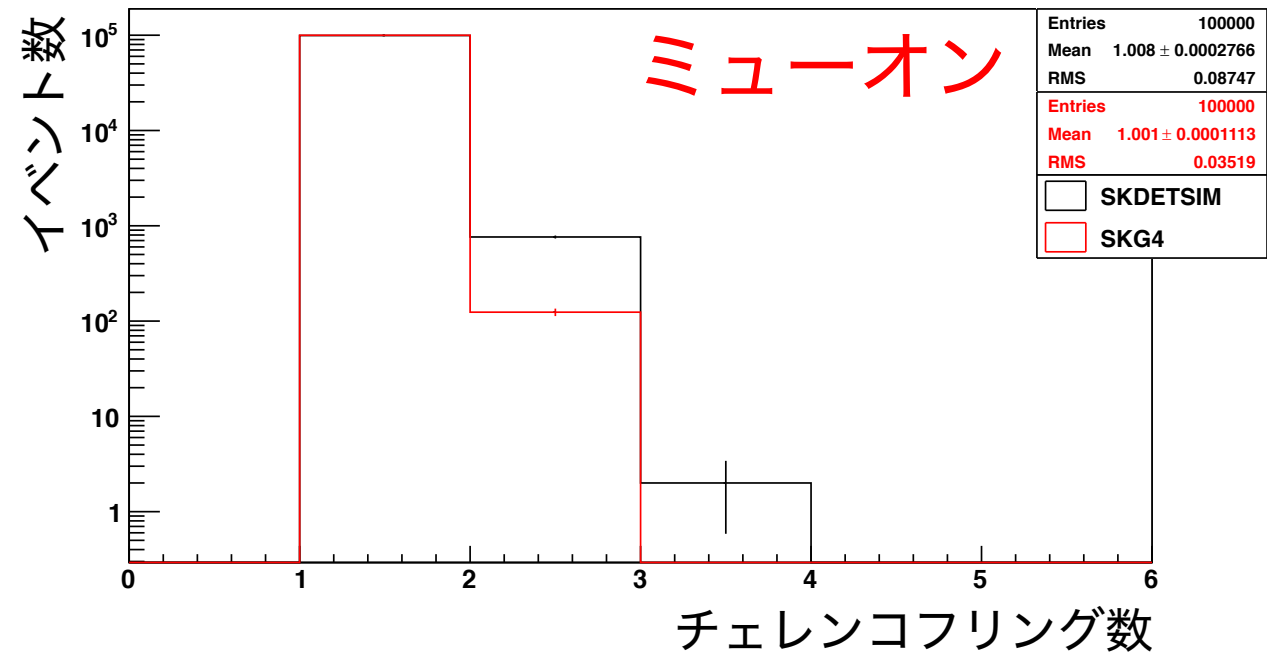
- 平均値は2%以内で一致

→ チェレンコフ光子数の違い(先行研究の結果)と同様の傾向

チェレンコフリング数

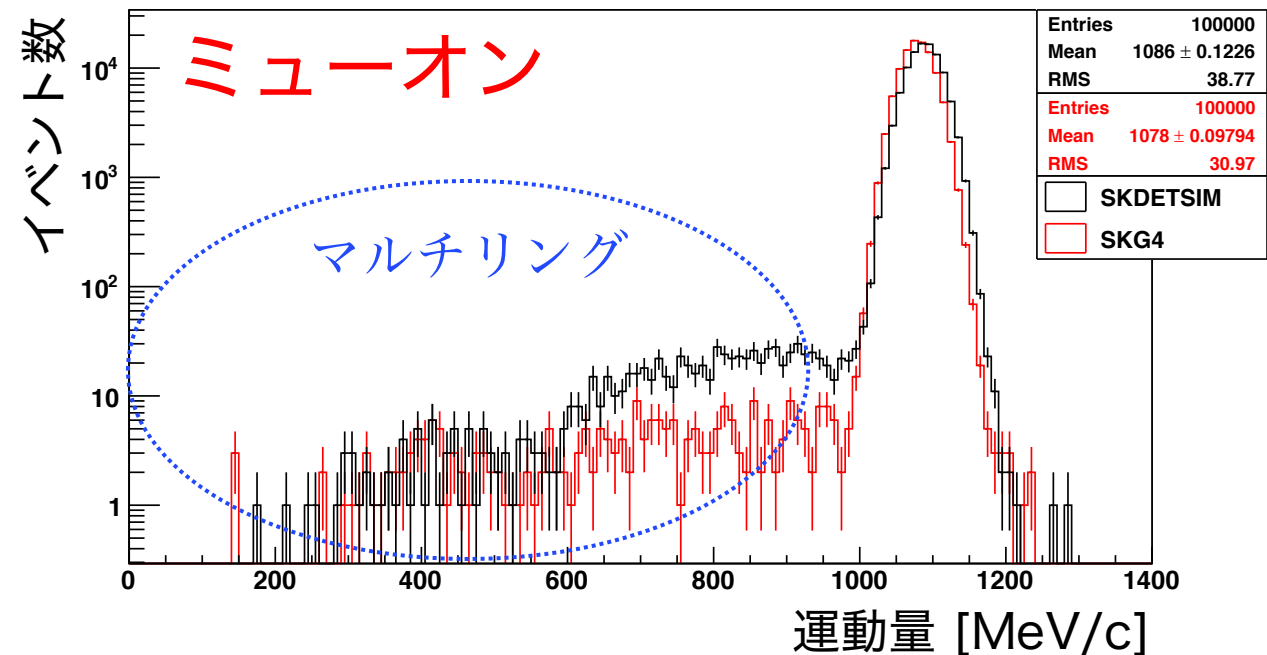
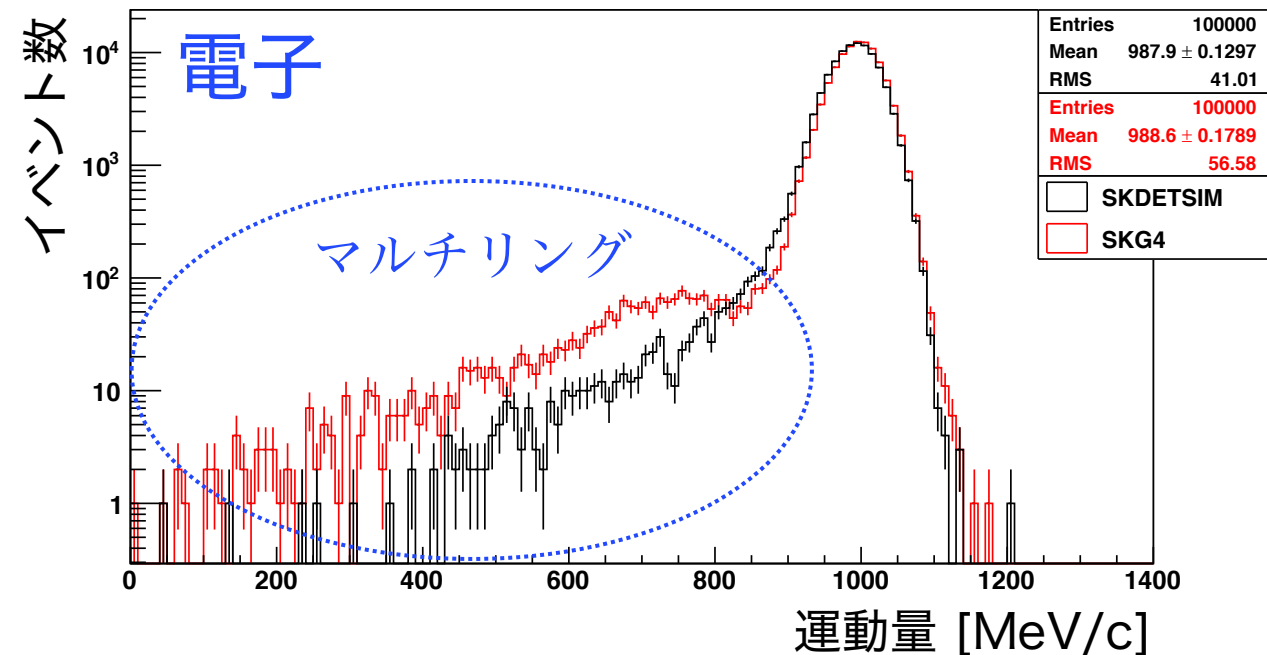


数	0	1	2	3	4	5
SKDETSIM	0	98776	1208	16	0	0
SKG4	0	98866	974	153	6	1



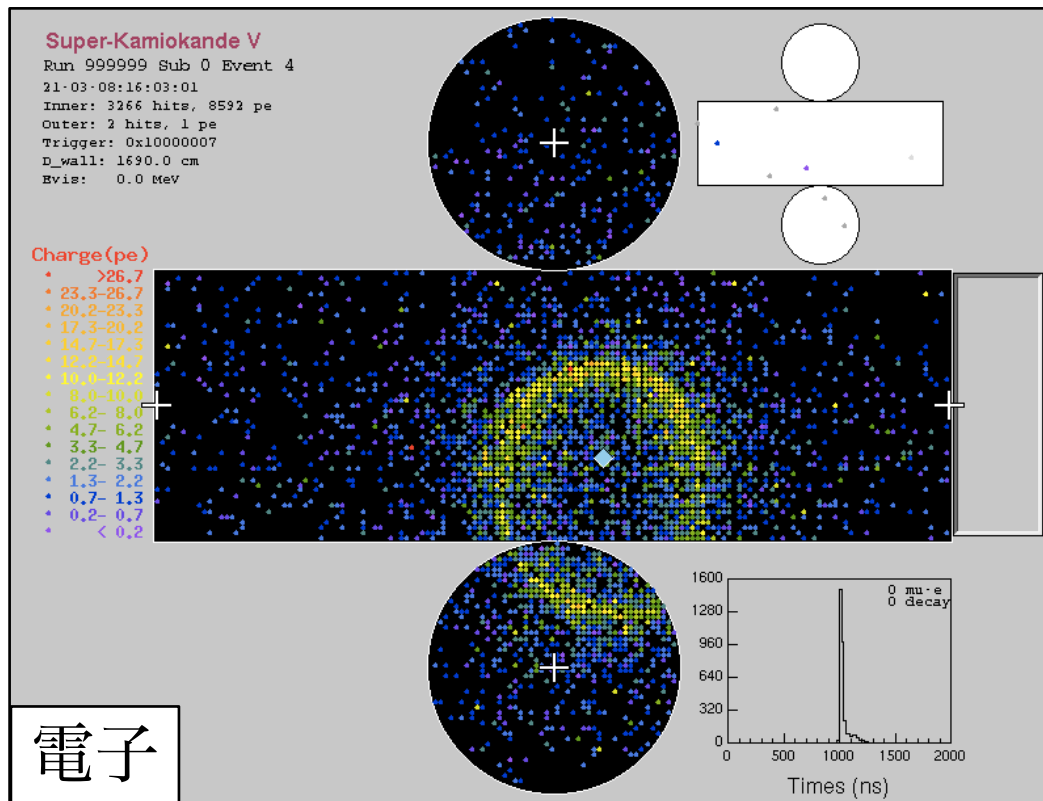
数	0	1	2	3	4	5
SKDETSIM	0	99235	763	2	0	0
SKG4	0	99876	124	0	0	0

- 1リングの数は合っているが、マルチリングの数に若干の違い → 今後調査

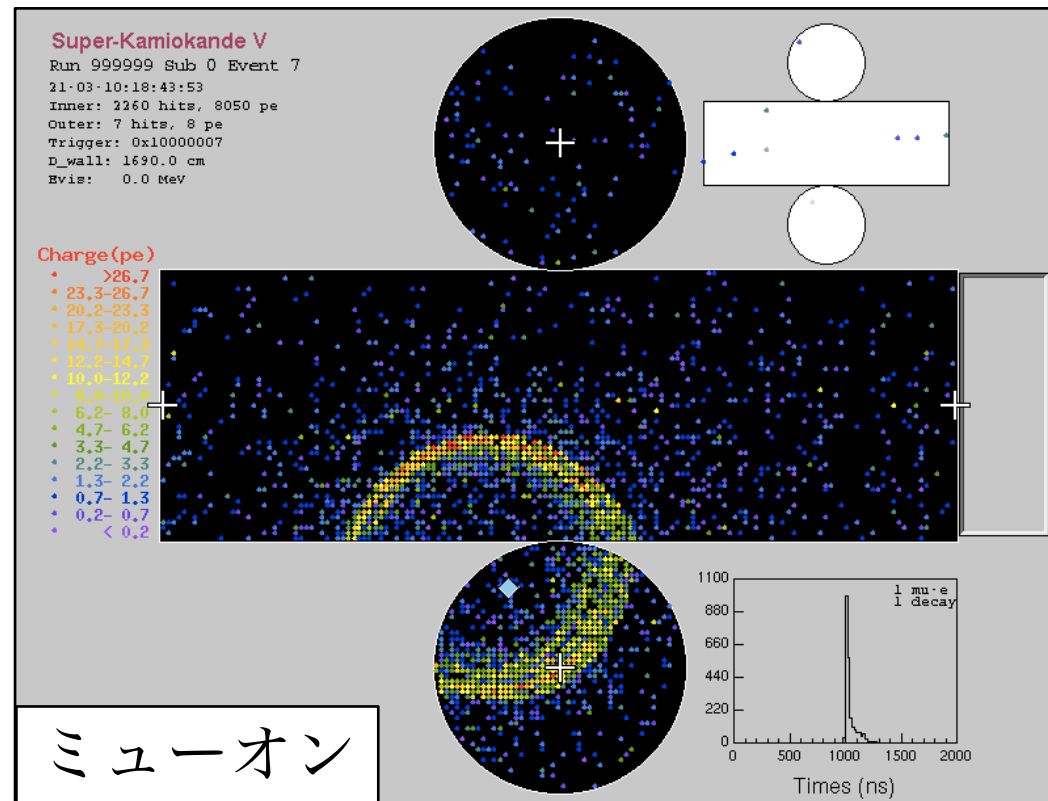


- 光量が一番大きいチェレンコフリングから再構成された運動量
→ マルチリングの事象は運動量の小さい領域に分布
- ピーク位置は合っている

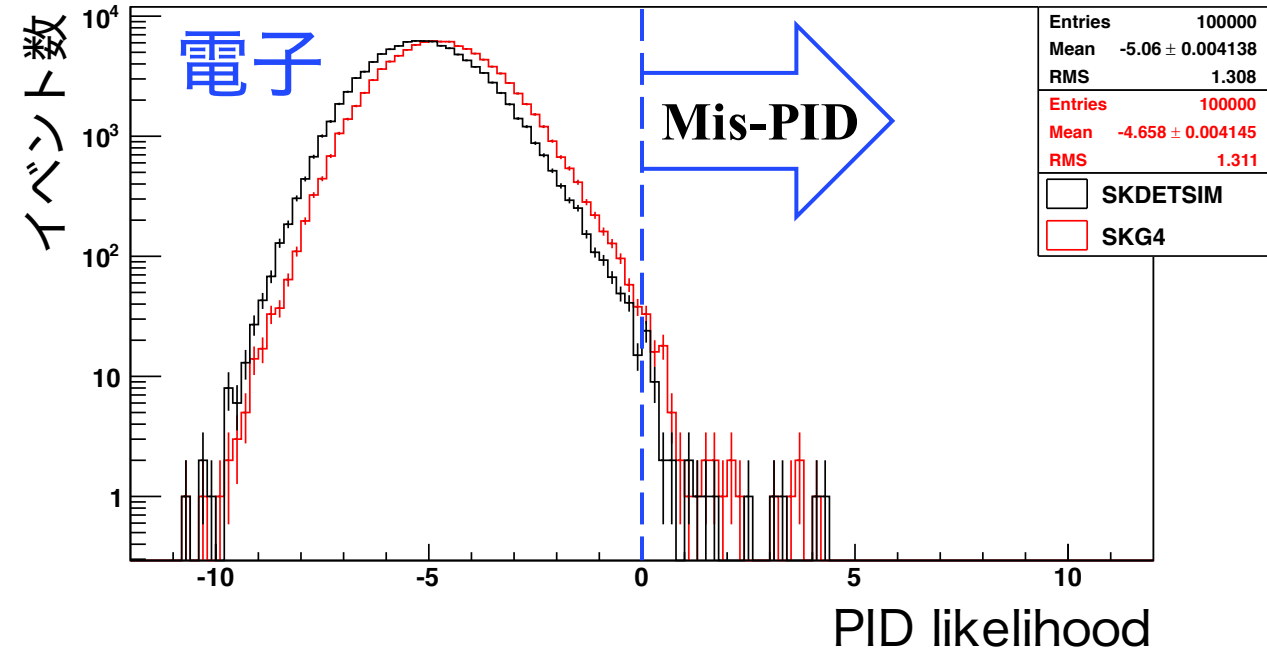
- Likelihoodを用いてPID(粒子弁別)を行う



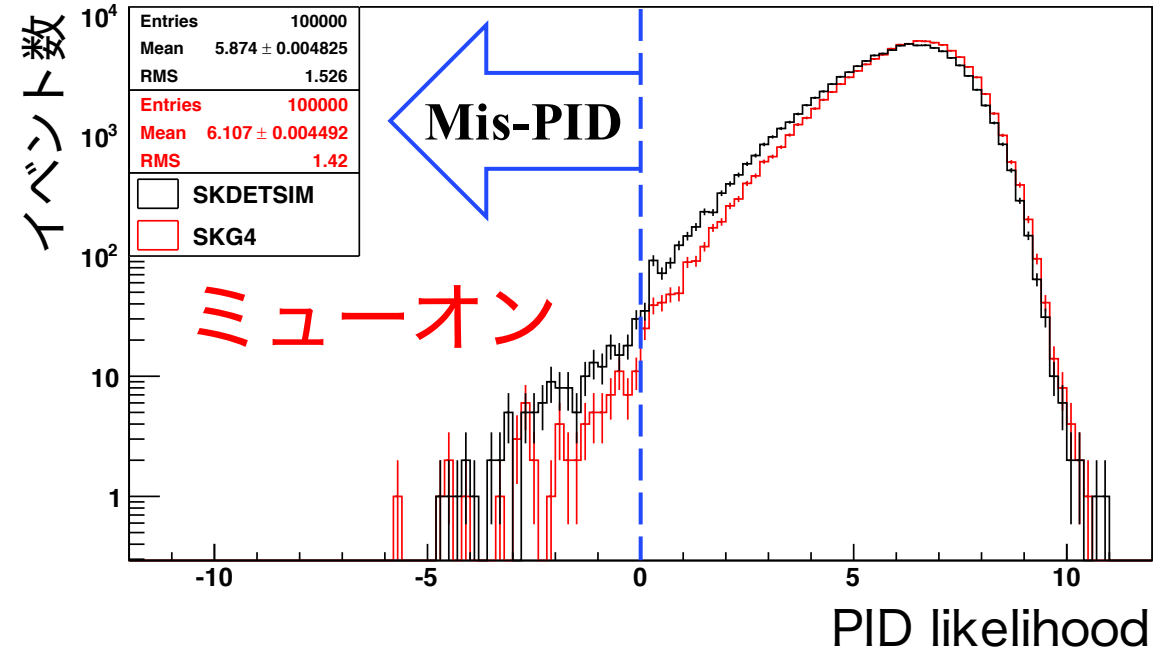
電子 → ぼやけたリング



ミュオン → くっきりとしたリング



	SKDETSIM	SKG4
Mis-PID	47 (0.047%)	89 (0.089%)



	SKDETSIM	SKG4
Mis-PID	177 (0.177%)	76 (0.076%)

- SKG4でも大きなMis-PIDは無い
- PID likelihood分布に若干の違い → 今後調査

- 現在SKはSK-Gd実験によるSRNの世界初観測を目指している
- SK-Gd実験でも識別できない事象については事象数の正確な見積もりが必要

目的：SRN探索における大気ニュートリノ背景事象の見積もりをSKG4で行う

- SKDETSIMとSKG4において1 GeVの電子・ミューオンを用いて基本的な分布を作成・比較
→ 全ての分布において大きな違いは無い

今後の予定

- SKDETSIMとSKG4のtracking methodや事象再構成のコードを確認し、若干の違いを理解する
- 他のエネルギーおよび粒子についても比較する
- 大気ニュートリノのシミュレーションをSKG4で行う
→ 大気ニュートリノ背景事象を見積もる

Back Up

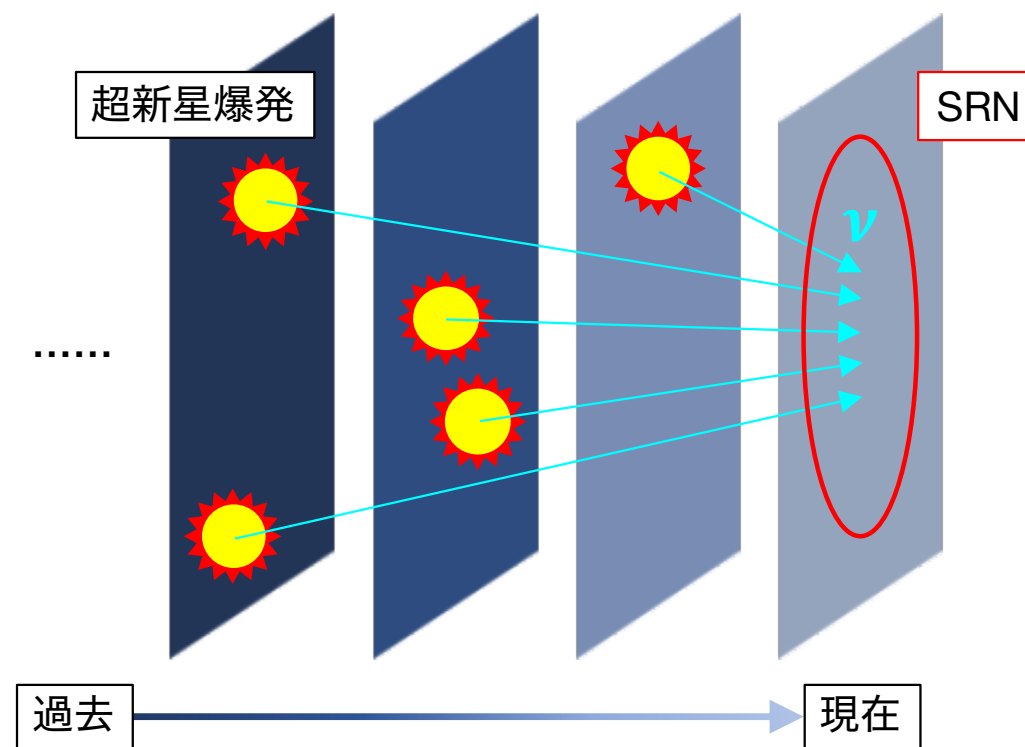
SRN : 過去の超新星爆発ニュートリノの重ね合わせ

- エネルギーフラックスが個々の爆発からのニュートリノ放出量や宇宙全体での爆発発生率に依存

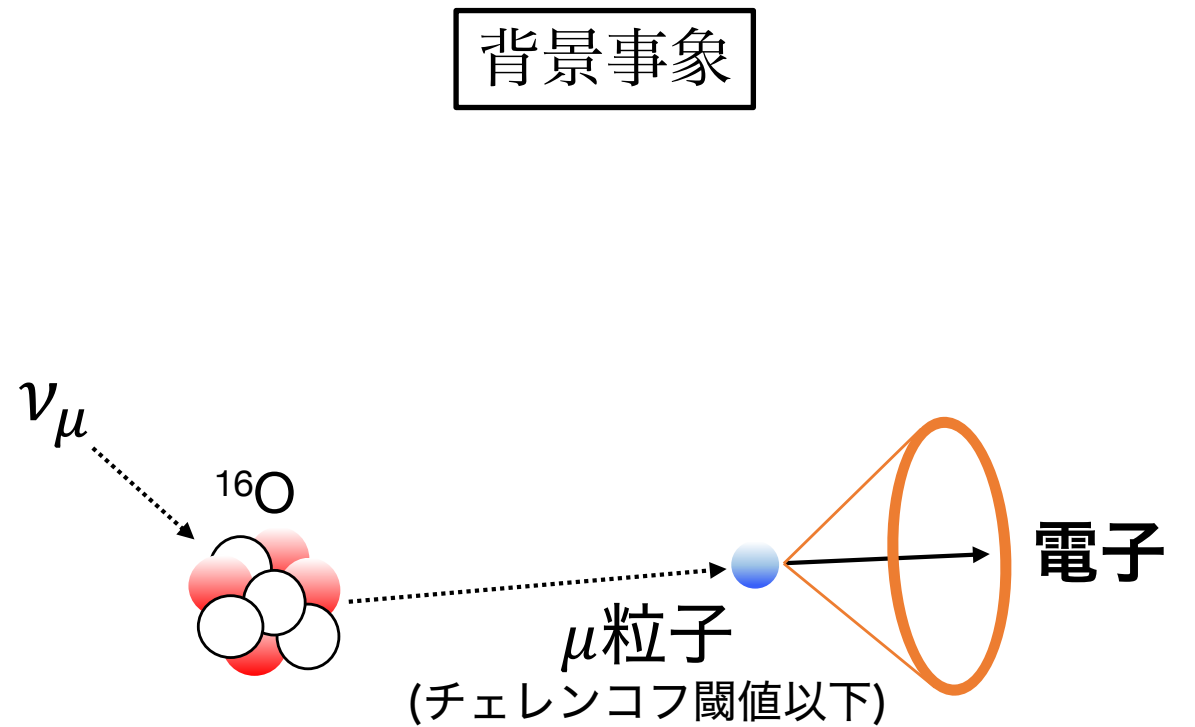
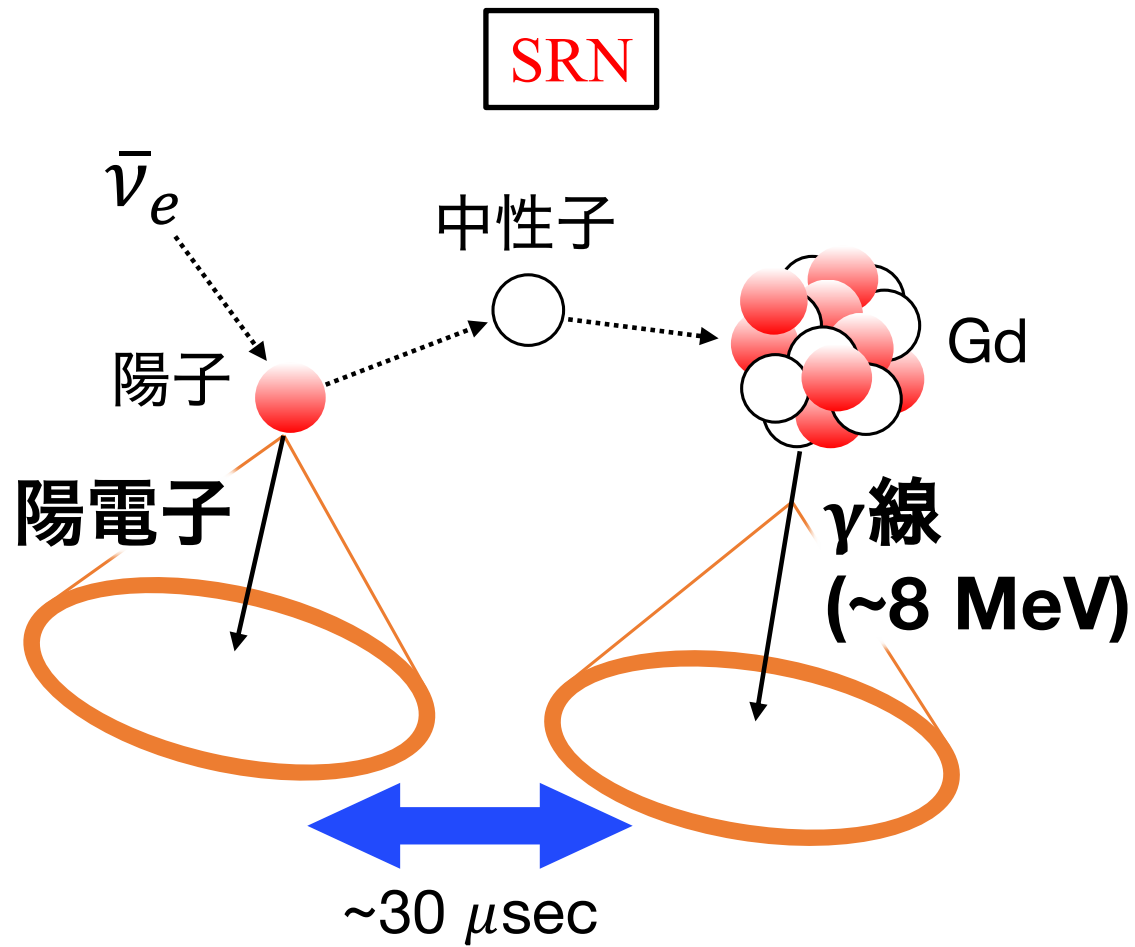
SRNの観測



超新星爆発機構や星形成の歴史に対する理解が格段に進む



現在スーパーカミオカンデ(SK)ではSRNの世界初観測を目指している

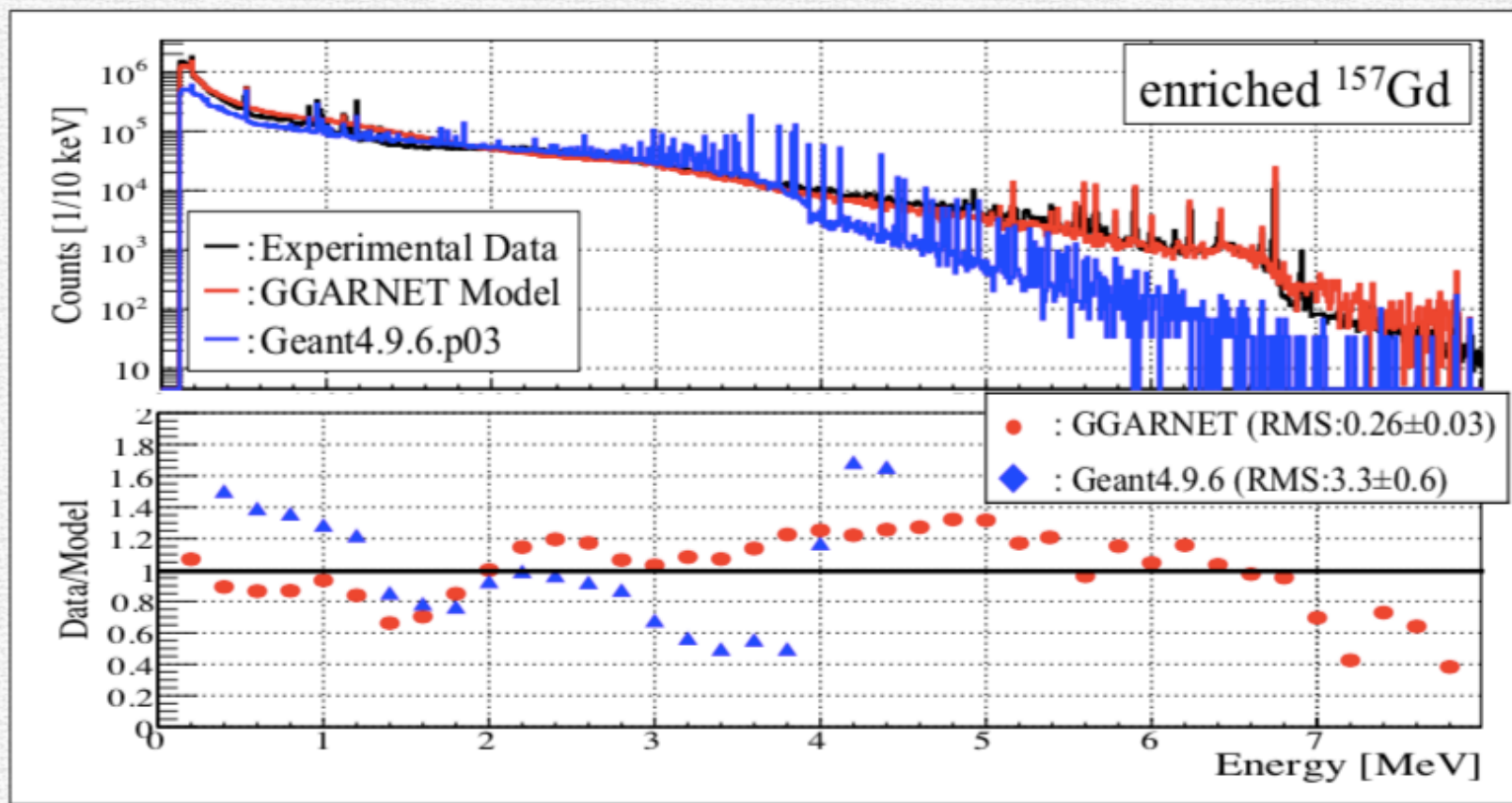


Geant4では、様々な物理リストを使用することが可能である。SKG4ではスーパーカミオカンデ実験に適したモデルを選択しなければならない。現在は以下の物理リストを使用している。

Electromagnetic	G4EmLivermore	Livermore Data Tableを利用した低エネルギー用リスト
Optical	G4Optical	光学光子のための物理リスト(チェレンコフ放射, etc.)
Decay	G4Decay	放射性崩壊の物理リスト(β^- , etc.)
Stopping	G4Stopping	ミュオンの静止崩壊を記述する物理リスト
Hadron Elastic	G4HadronElasticPhysicsHP	低エネルギー(<20 MeV)中性子まで計算できるハドロン弾性散乱に関する物理リスト
Hadron Inelastic	G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP	Geant4.10.0からFTFP_BERTがデフォルトリストとなっている。低エネルギー中性子計算を追加した物理リスト

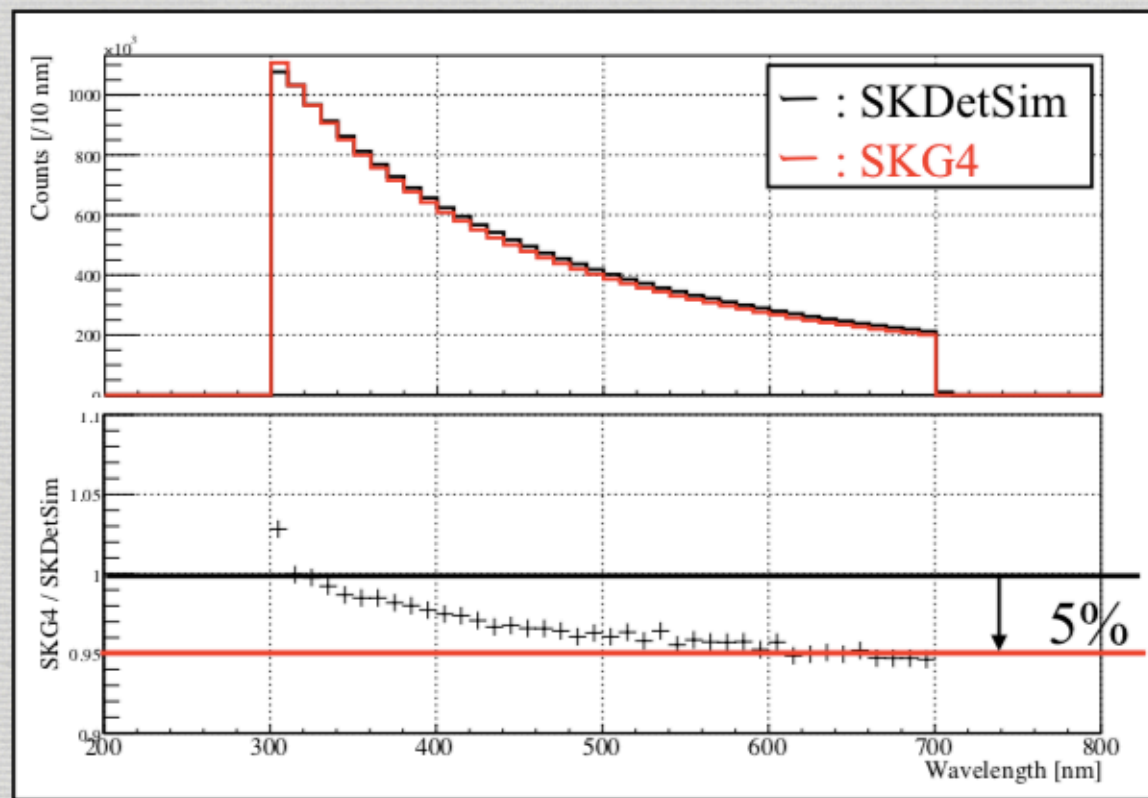
(日本物理学会 2018年年次大会にて萩原さんが報告)

J-PARC/MLFに設置されたANNRI検出器を使用して、Gd(n, γ)反応からの γ 線を詳細測定した。その結果を使った高精度なモデル(GGARNET)が開発された。



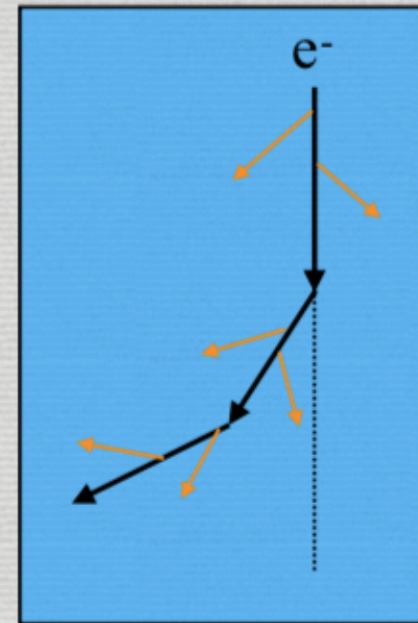
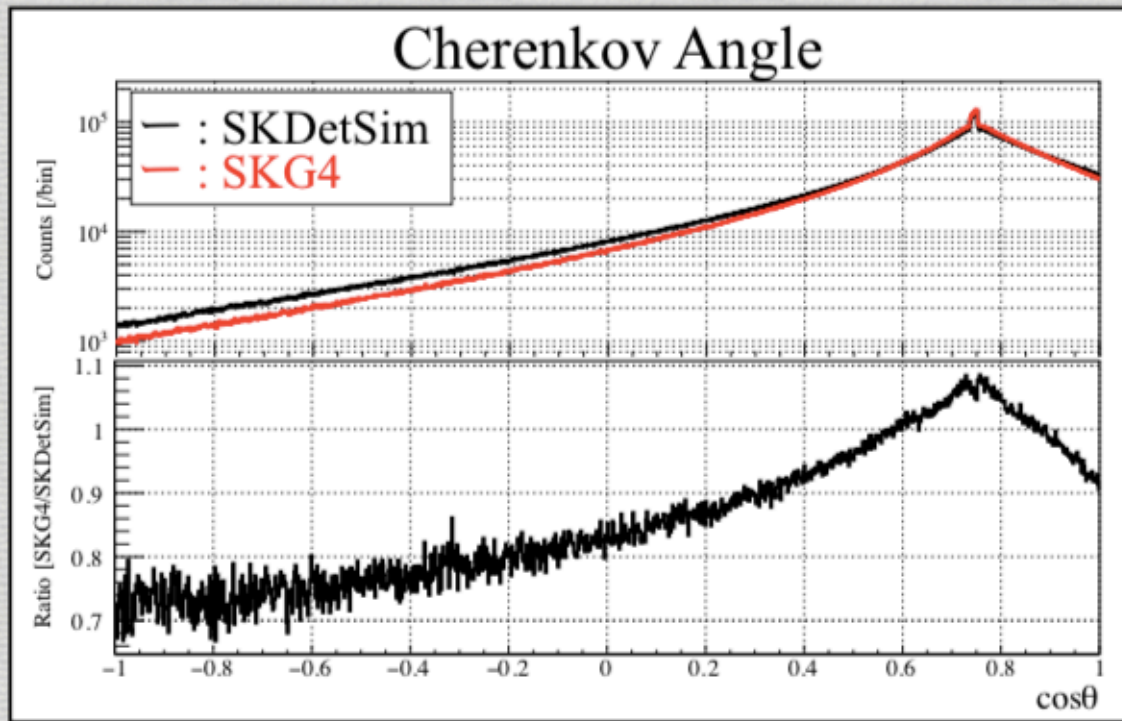
(日本物理学会 2018年年次大会にて萩原さんが報告)

電子から放出される光子の波長分布。波長の長い領域で約5%の差が出た。
SKG4では屈折率は波長依存している。しかし、SKDetSimでは屈折率の一部
で一定値を使用している。



(日本物理学会 2018年秋季大会にて萩原さんが報告)

鉛直下向き(0, 0, -1)とチェレンコフ放射との成す角をプロットした。電子のMultiple Scatteringによる違い (Geant3とGeant4のモデルの差) が高角度領域で見られる。



(日本物理学会 2018年秋季大会にて萩原さんが報告)

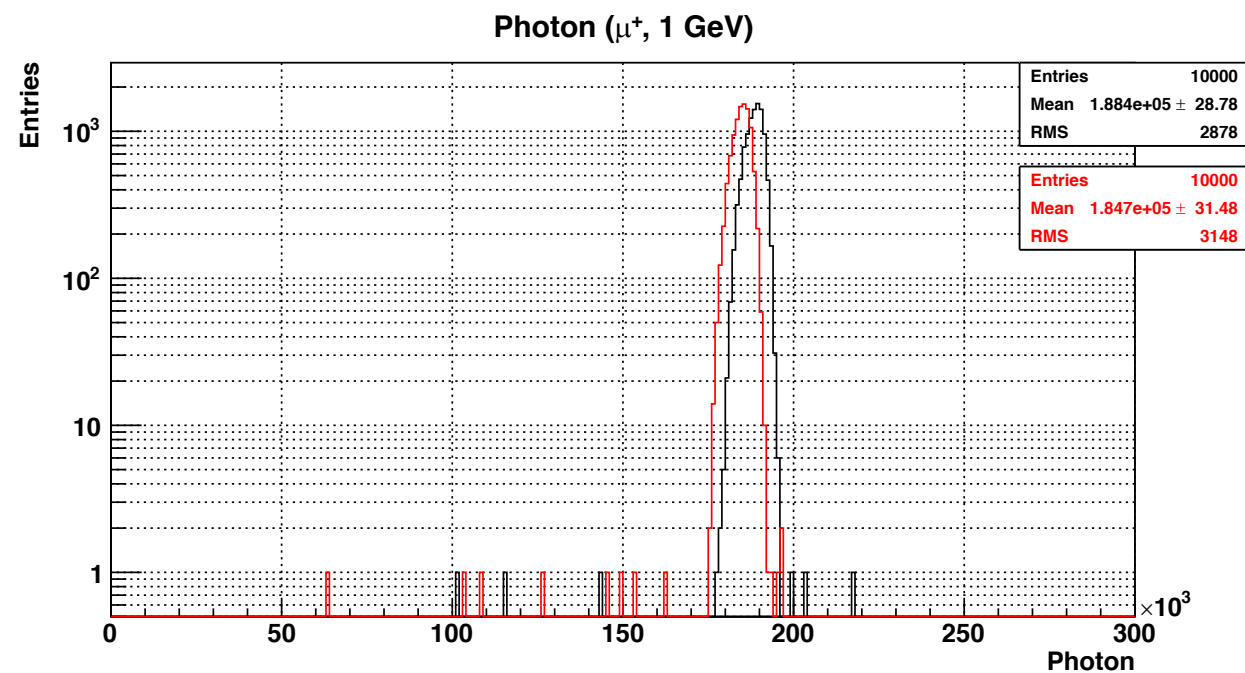
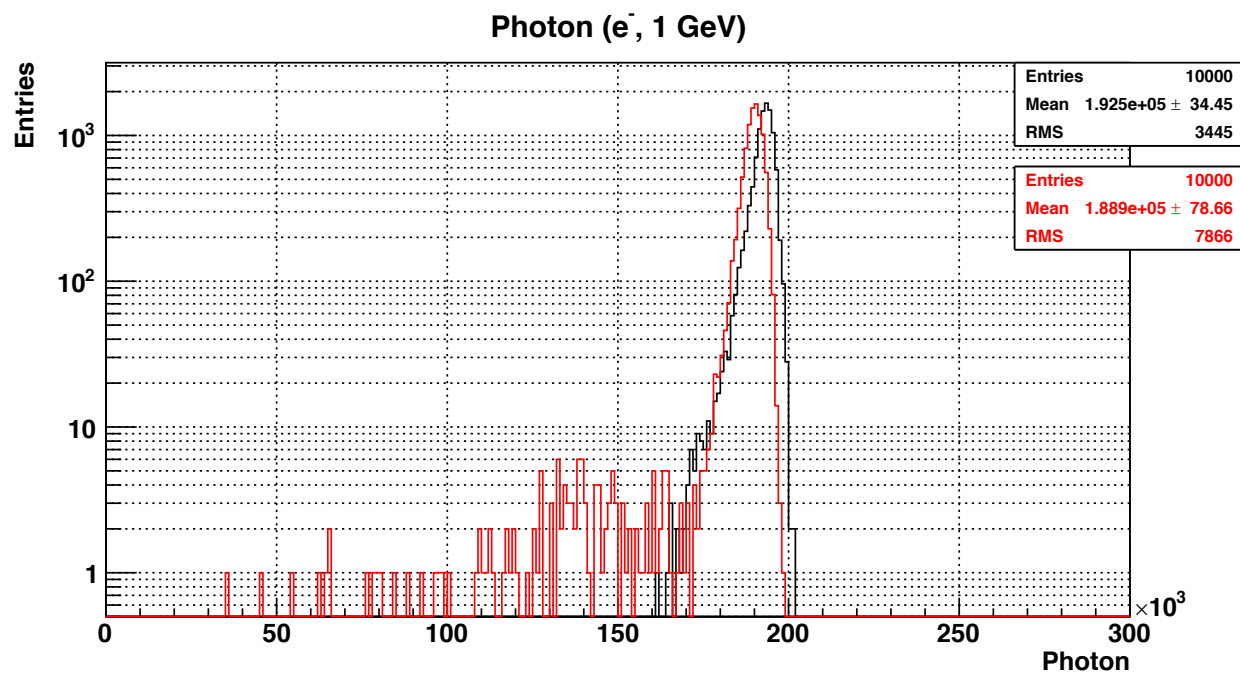
チェレンコフ光子の放出数

- 平均値は2%以内で一致

→ チェレンコフ光子数の違い(先行研究の結果)と同様の傾向

	SKDETSIM	SKG4
Mean	1.925×10^5	1.889×10^5

	SKDETSIM	SKG4
Mean	1.884×10^5	1.847×10^5

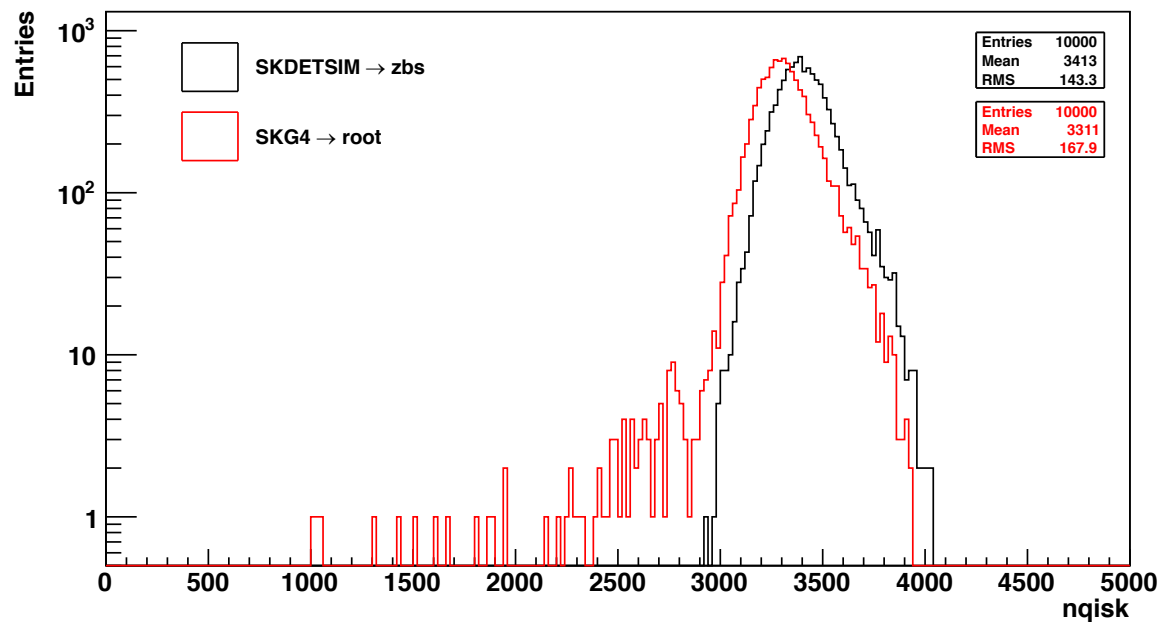


- 電子のMultiple Scatteringによる違い
→ 電子で平均値の差が広がる

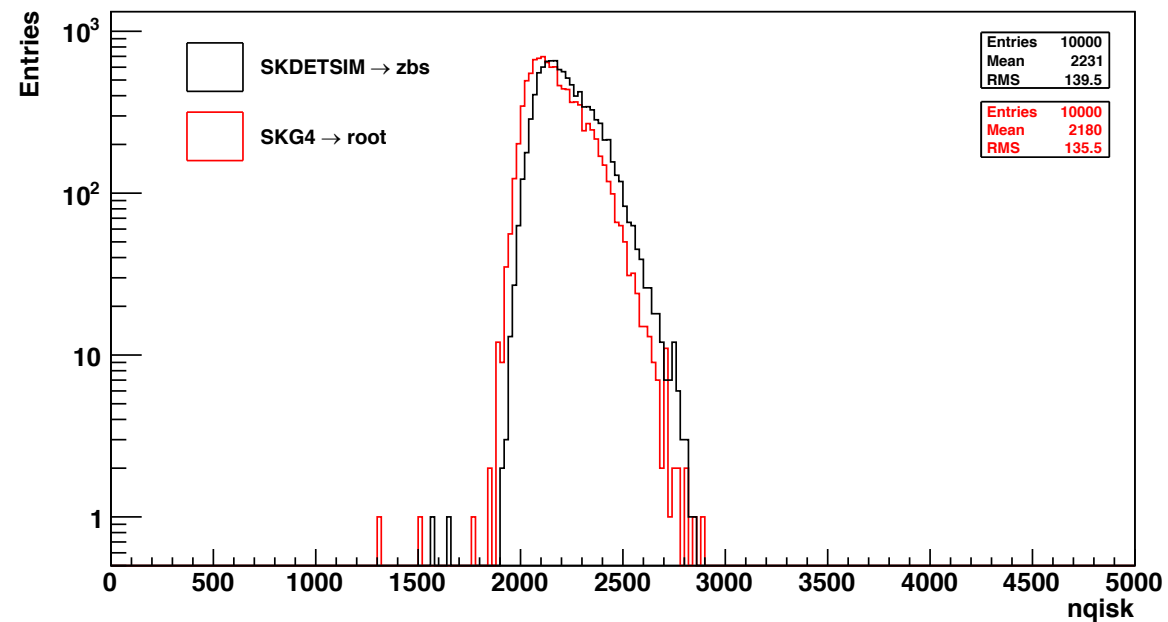
	SKDETSIM	SKG4
Mean	3413	3311

	SKDETSIM	SKG4
Mean	2231	2180

NQISK (e^- , 1 GeV)



NQISK (μ^+ , 1 GeV)

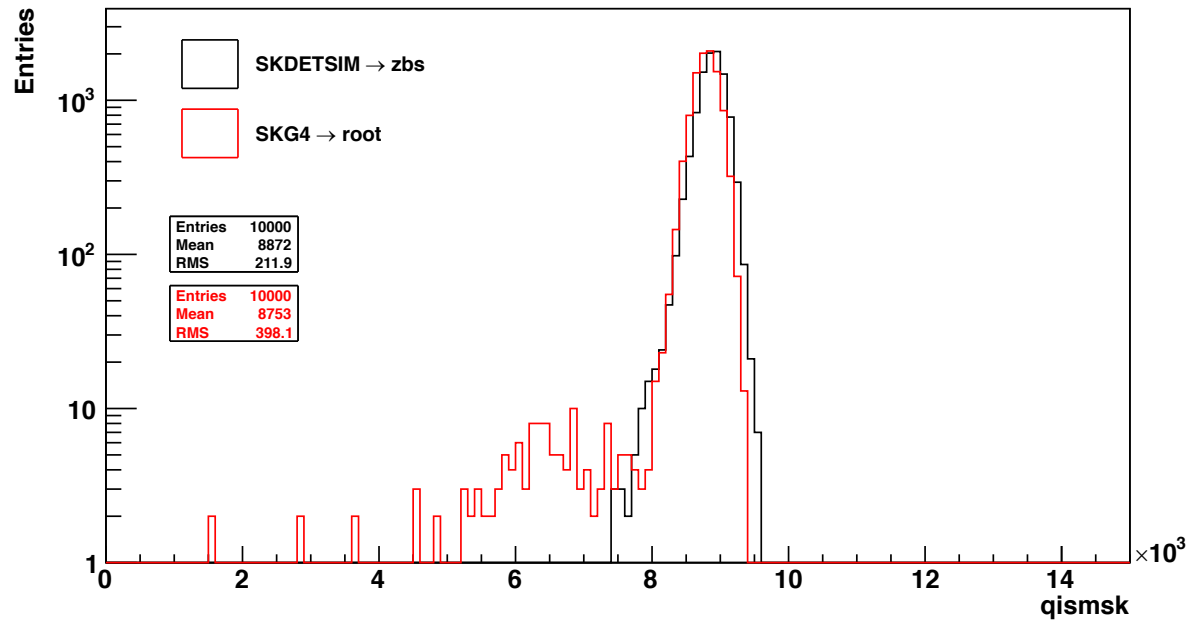


- 平均値は2%以内で一致
 → チェレンコフ光子数の違い(先行研究の結果)と同様の傾向

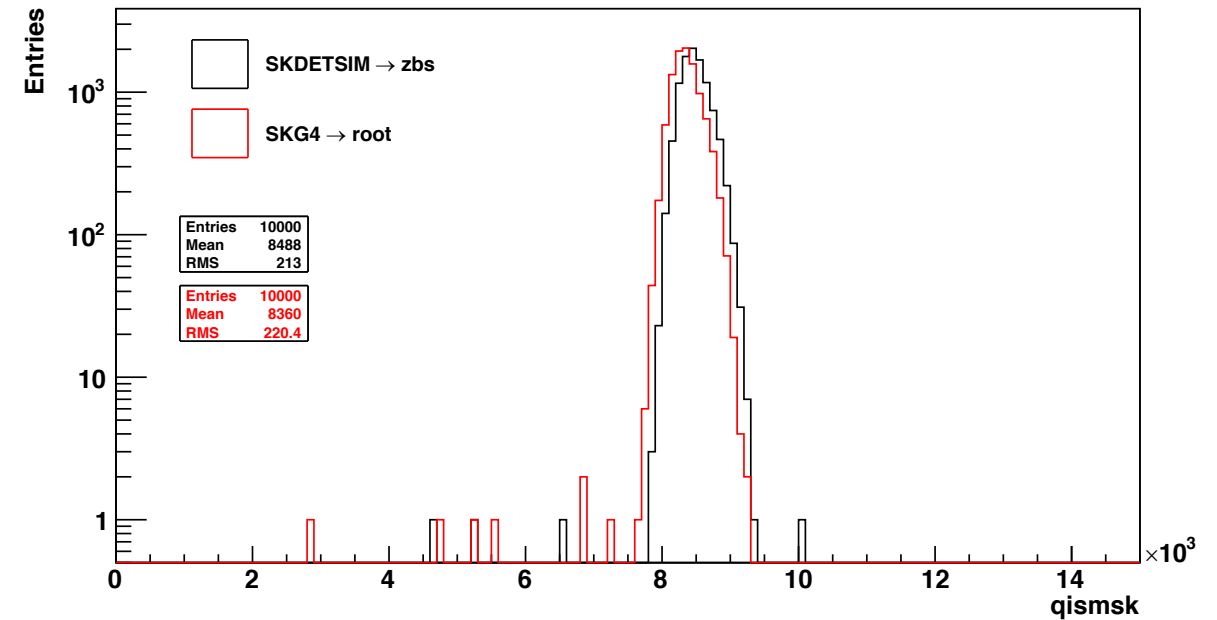
	SKDETSIM	SKG4
Mean	8872	8753

	SKDETSIM	SKG4
Mean	8488	8360

QISMSK (e^- , 1 GeV)



QISMSK (μ^+ , 1 GeV)



- 位置・方向再構成、メインリングの見積もり
反応したPMTの時間情報 → 位置を再構成
再構成した位置から反応したPMTに向かう単位ベクトルの和 → 大まかな方向を再構成
再構成した大まかな方向 → メインリングを見積もる
- チェレンコフリング数
再構成した位置と方向 → Likelihoodを用いてチェレンコフリング数を決定
- PID
リングパターンとチェレンコフ光の放出角度 → e-likeか μ -likeかを決定
- 正確な位置再構成(1リング事象のみ)
e-likeあるいは μ -likeであることを想定した上でのリングパターン → 正確な位置を再構成

- 運動量

チェレンコフリングの内部で検出された電荷 → 各リングの運動量を決定
(電荷から運動量への変換はシミュレーションと検出器較正に基づいて決定)

- チェレンコフリング数の補正

低運動量のリングや他のリングと被っているリング → 棄却

- 崩壊電子の探索

ミューオン事象に付随する電子事象を探索

- π^0 の探索

1リングのe-likeな事象の中から、上記の再構成手法を用いて π^0 事象を探索

- 1つの電子事象で期待される*i*番目のPMTでの光電子数

$$q_i^{\text{exp}}(e) = \alpha_e \times Q^{\text{exp}}(p_e, \theta_i) \times \left(\frac{R}{r_i}\right)^{1.5} \times \frac{1}{\exp(r_i/L)} \times f(\Theta_i) + q_i^{\text{scatt}}$$

α_e : 規格化因子

r_i : チェレンコフ光発生点から*i*番目のPMTまでの距離

θ_i : 荷電粒子の方向とチェレンコフ光の方向がなす角度

L : 水中での光の減衰長

$f(\Theta_i)$: 光子の入射角 Θ_i に依存するPMTの有感面積の関数

R : 16.9 m

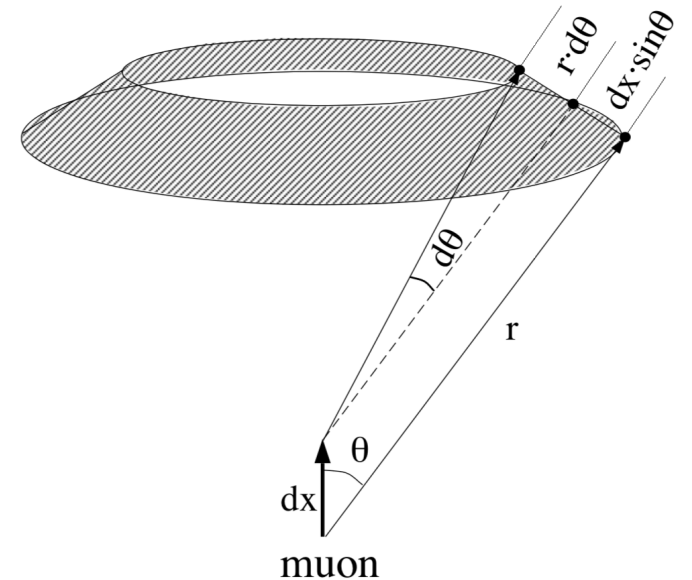
$Q^{\text{exp}}(p_e, \theta_i)$: チェレンコフ光の放出角度と電子の運動量に依存する1つの電子事象で期待される光電子数の分布 (シミュレーションから得られる)

q_i^{scatt} : 散乱光子によって期待される*i*番目のPMTでの光電子数

- 1つのミュオン事象で期待される*i*番目のPMTでの光電子数

$$q_i^{\text{exp}}(\mu) = \left(\alpha_\mu \times \frac{\sin^2 \theta_{x_i}}{r_i \left(\sin \theta_{x_i} + r_i \cdot \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=x_i} \right)} + q_i^{\text{knock}} \right) \times \frac{1}{\exp(r_i/L)} \times f(\Theta_i) + q_i^{\text{scatt}}$$

- α_μ : 規格化因子
- x : ミュオンの飛跡長
- x_i : チェレンコフ光子が*i*番目のPMTに向かって放出されるミュオンの飛跡長
- θ : x 移動したミュオンによるチェレンコフ光の放出角度
- θ_{x_i} : x_i 移動したミュオンによるチェレンコフ光の放出角度
- q_i^{knock} : ノックオン電子によって期待される*i*番目のPMTでの光電子数 (シミュレーションから見積もられる)



- n番目のリングにおけるリングパターンのLikelihood

$$L_n(e \text{ or } \mu) = \prod_{\theta_i < (1.5 \times \theta_c)} \text{prob} \left(q_i^{\text{obs}}, q_{i,n}^{\text{exp}}(e \text{ or } \mu) + \sum_{n' \neq n} q_{i,n'}^{\text{exp}} \right)$$

- q_i^{obs} : i番目のPMTで観測された光電子数
- $q_{i,n}^{\text{exp}}(e \text{ or } \mu)$: 1つの電子事象あるいはミューオン事象で発生したn番目のリングで期待されるi番目のPMTでの光電子数 (前ページ参照、n番目のリングの方向や光子の放出角度を変えてLikelihoodの値が最大となるように最適化)
- $q_{i,n'}^{\text{exp}}$: n'番目のリングで期待されるi番目のPMTでの光電子数 (荷電粒子の種類は想定していない)

$$\text{prob}(q_i^{\text{obs}}, q_i^{\text{exp}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(q_i^{\text{obs}} - q_i^{\text{exp}})^2}{2\sigma^2}\right) & (\text{for } q_i^{\text{exp}} > 20 \text{ p.e.}) \longleftarrow (\sigma : q^{\text{exp}} \text{の分解能}) \\ \text{Probability obtained by the probability density distribution} \\ \text{function based on the convolution of a single p.e. distribution} \\ \text{and a Poisson distribution (for } q_i^{\text{exp}} < 20 \text{ p.e.)} \end{cases}$$

- リングパターンのLikelihoodを χ^2 に変換 $\rightarrow P_n^{\text{pattern}}(e \text{ or } \mu)$ を計算

$$\chi_n^2(e \text{ or } \mu) = -2 \log L_n(e \text{ or } \mu) + \text{constant}$$

$$P_n^{\text{pattern}}(e \text{ or } \mu) = \exp \left(- \frac{(\chi_n^2(e \text{ or } \mu) - \min[\chi_n^2(e), \chi_n^2(\mu)])^2}{2 \sigma_{\chi_n^2}^2} \right)$$

$\sigma_{\chi_n^2}$: χ^2 分布の分解能 ($\sigma_{\chi_n^2} = \sqrt{2N}$ と見積られる、 N は計算で使われたPMTの数)

- $P_n^{\text{angle}}(e \text{ or } \mu)$ を計算

$$P_n^{\text{angle}}(e \text{ or } \mu) = \exp \left(- \frac{(\theta_n^{\text{obs}} - \theta_n^{\text{exp}}(e \text{ or } \mu))^2}{2 (\delta\theta_n)^2} \right)$$

θ_n^{obs} : 再構成されたn番目のリングの光子の放出角度

$\delta\theta_n$: フィッティングエラー

$\theta_n^{\text{exp}}(e \text{ or } \mu)$: 期待されるn番目のリングの光子の放出角度

(電子あるいはミューオンを想定して再構成された運動量から見積られる)

- 1リング事象とマルチリング事象におけるPIDの確率関数

$$P_{single}(e, \mu) = P_{single}^{\text{pattern}}(e, \mu) \times P_{single}^{\text{angle}}(e, \mu) \quad (\text{Single-ring event})$$

$$P_{multi}(e, \mu) = P_{multi}^{\text{pattern}}(e, \mu) \quad (\text{Multi-ring event})$$

※ マルチリング事象に関しては光子の放出角度とそのエラーが正確に見積もられていないため、 $P^{\text{angle}}(e \text{ or } \mu)$ は計算に使われない

- PID likelihood

$$P_{PID} \equiv \sqrt{-\log P(\mu)} - \sqrt{-\log P(e)}$$

運動量 → 右に示した円錐内部で観測された光電子数

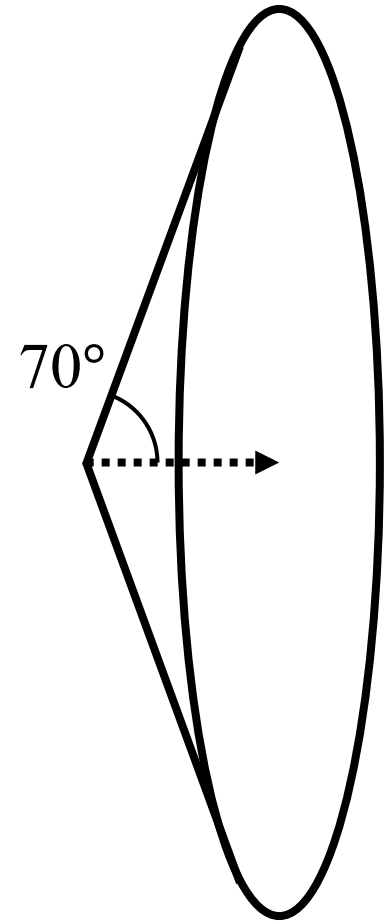
エネルギースケールは以下の4つを用いて較正

- 高エネルギーストップミュオン事象の飛跡長
 - 低エネルギーストップミュオン事象のチェレンコフ角度
 - ニュートリノ反応で生成される π^0 の不変質量
 - ミューオンの崩壊で生成される電子の運動量分布
- n番目のリングによるi番目のPMTでの光電子数

$$q_{i,n}^{\text{obs}} = q_i^{\text{obs}} \times \frac{q_{i,n}^{\text{exp}}}{\sum_{n'} q_{i,n'}^{\text{exp}}}$$

q_i^{obs} : i番目のPMTで観測された光電子数

$q_{i,n}^{\text{exp}}$: n番目のリングで期待されるi番目のPMTでの光電子数



- n番目のリングによる光電子数 (= n番目のリングから再構成された運動量)

$$RTOT_n = \frac{G_{MC}}{G_{data}} \left[\alpha \times \sum_{\substack{\theta_{i,n} < 70^\circ \\ -50\text{nsec} < t_i < 250\text{nsec}}} \left(q_{i,n}^{obs} \times \exp\left(\frac{r_i}{L}\right) \times \frac{\cos \Theta_i}{f(\Theta_i)} \right) - \sum_{\theta_{i,n} < 70^\circ} S_i \right]$$

- α : 規格化因子
- G_{data} 、 G_{MC} : データ(シミュレーション)におけるPMTの相対ゲイン
- $\theta_{i,n}$: n番目のリングの方向とi番目のPMTの方向がなす角度
- t_i : TOF(飛行時間)を引いたi番目のPMTのヒット時間
(崩壊電子による影響を抑えるために時間幅は-50 nsecから250 nsecに設定している)
- L : 水中での光の減衰長
- r_i : チェレンコフ光発生点からi番目のPMTまでの距離
- $f(\Theta_i)$: 光子の入射角 Θ_i に依存するPMTの有感面積の関数
- S_i : 散乱光子によって期待されるi番目のPMTでの光電子数

