

# SK-Gd実験における Geant4ベースのシミュレーション性能評価

第2回新学術「地下宇宙」若手研究会

2021年11月25日 - 2021年11月26日

酒井 聖矢 (岡山大学)

# 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
- 5万トンの超純水で満たされた水タンクと光電子増倍管 (PMT) から構成
- 内水槽 (直径50cmのPMT : 11,129本)

荷電粒子から放出されたチェレンコフ光をPMTで検出

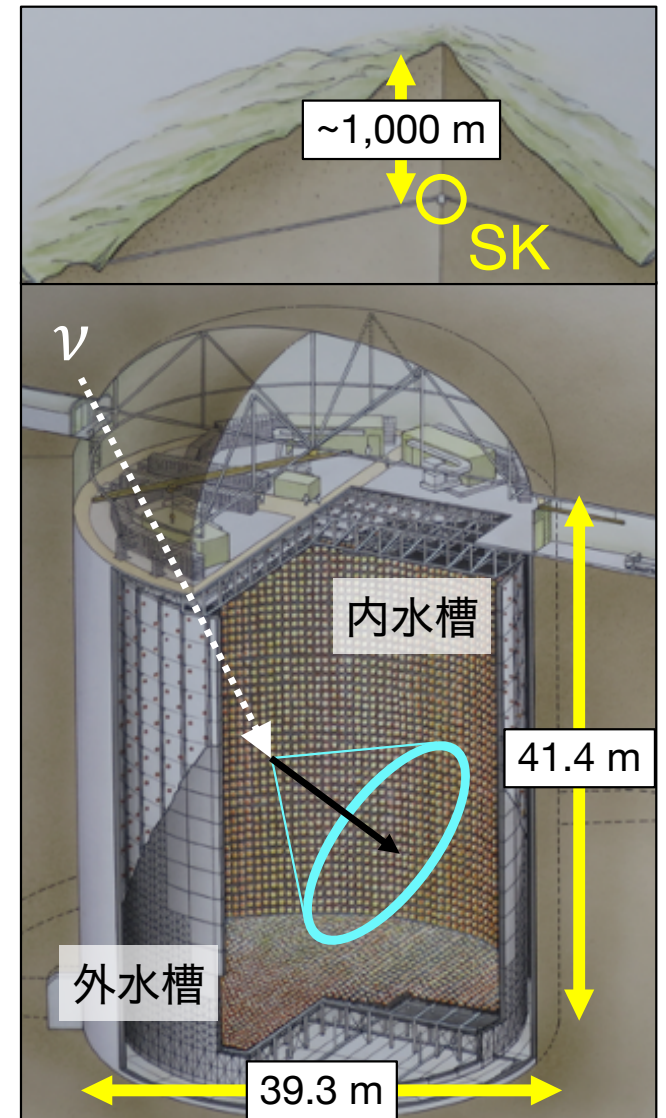
→ 荷電粒子の情報を再構成

- 外水槽 (直径20cmのPMT : 1,885本)  
→ 宇宙線ミュオンなどの事象識別
- **SK-Gd実験** (2020年7月 - )

SKの超純水中に質量濃度0.1%のGdを導入 (現在は0.011%)

→ Gdが熱中性子を捕獲すると合計~8 MeVのガンマ線を放出

→ 中性子を~90% (現段階では~50%) の確率で同定



- SK-Gd実験ではGdの熱中性子捕獲により発生するガンマ線を見る
- 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の熱中性子捕獲によるガンマ線放出の高精度なモデルが導入されていない
  - Geant4ベースのシミュレーション (**SKG4**) を構築
- SKDETSIMは20年以上に渡りチューニングが行われている
  - 中性子以外はデータを良く再現
  - 今後SKG4を使用するにあたり、  
中性子以外で**SKDETSIM**と**SKG4**が合っていることを確認

- SKDETSIMとSKG4を用いた物理モデルの比較

→ (大気ニュートリノのシミュレーションに向けて)

1 GeVの電子・ミュオンを用いて分布を作成・比較

## 比較した分布

- **全電荷量** (PMTが捉えた信号の大きさの総和)

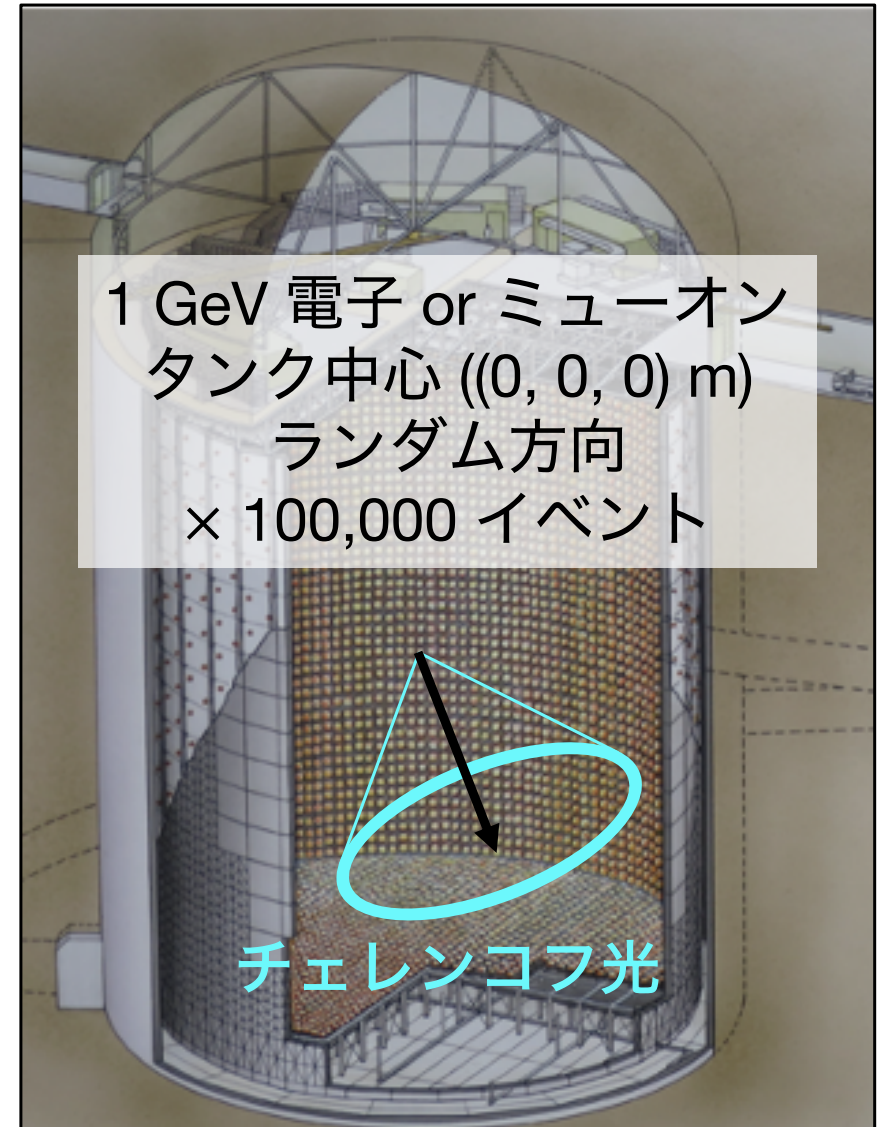
※ 電荷量はエネルギーに比例

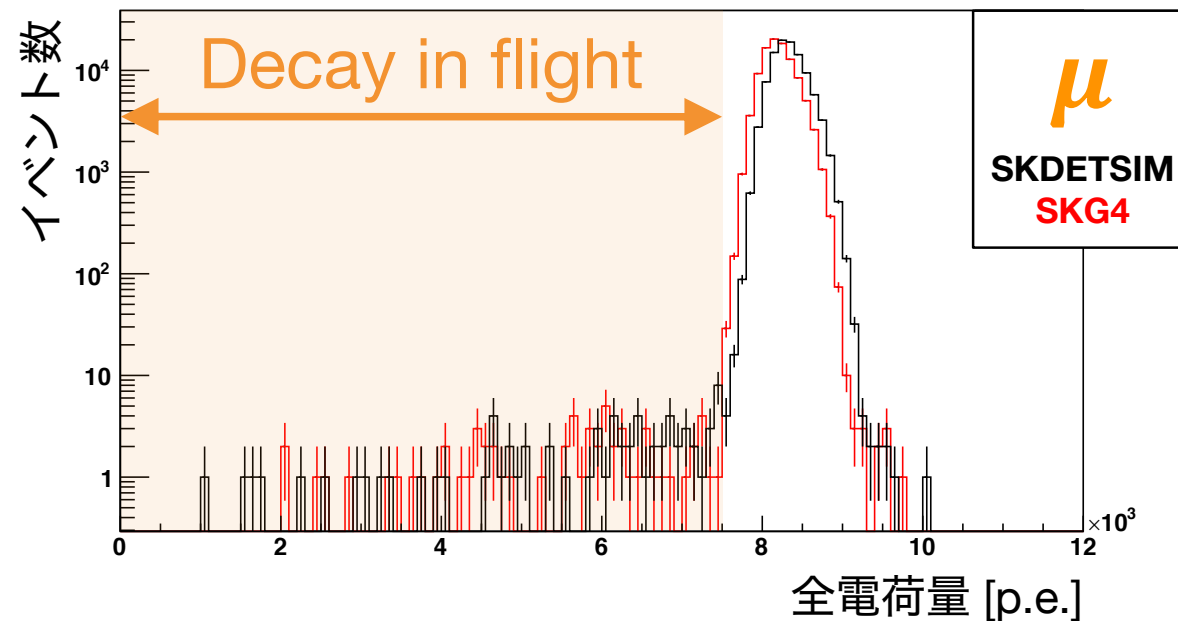
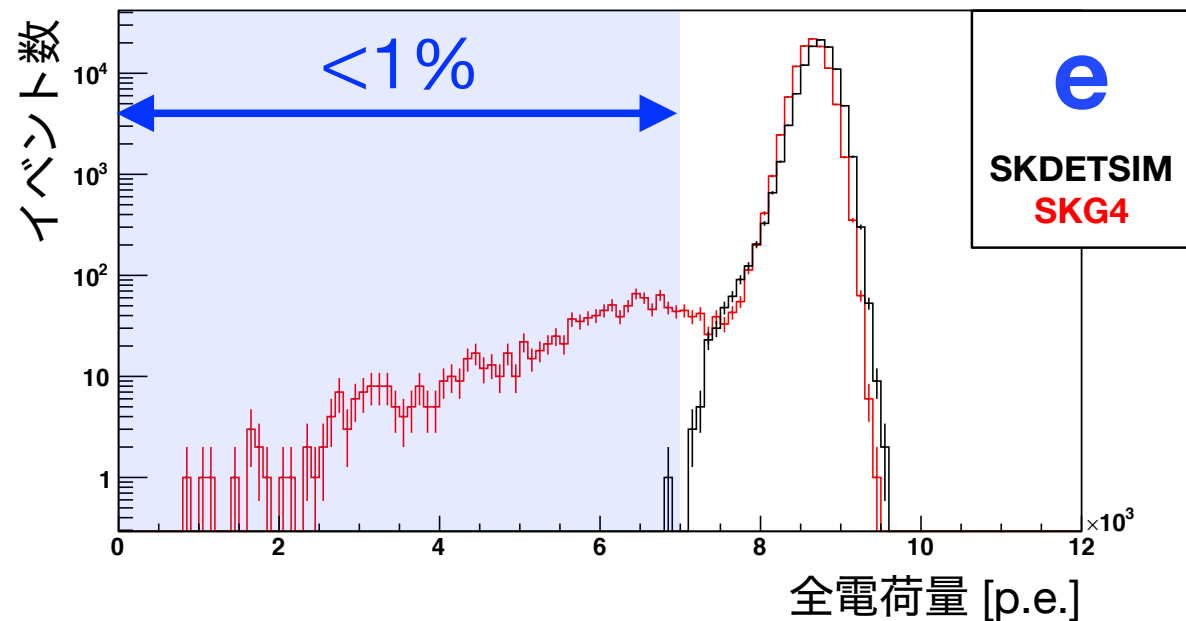
- **チェレンコフ光の角度分布**

- チェレンコフリング数

- 運動量

- PID (粒子弁別)





- 平均値で2%程度の差 (10 MeV 電子による先行研究の結果と同様の傾向、理解している)
- 電子においてSKG4にのみ全電荷量の小さいイベントが存在
  - イベント数が少ないため物理解析には影響しない
  - 分布の形が違う原因を調査

電子 (1 GeV)

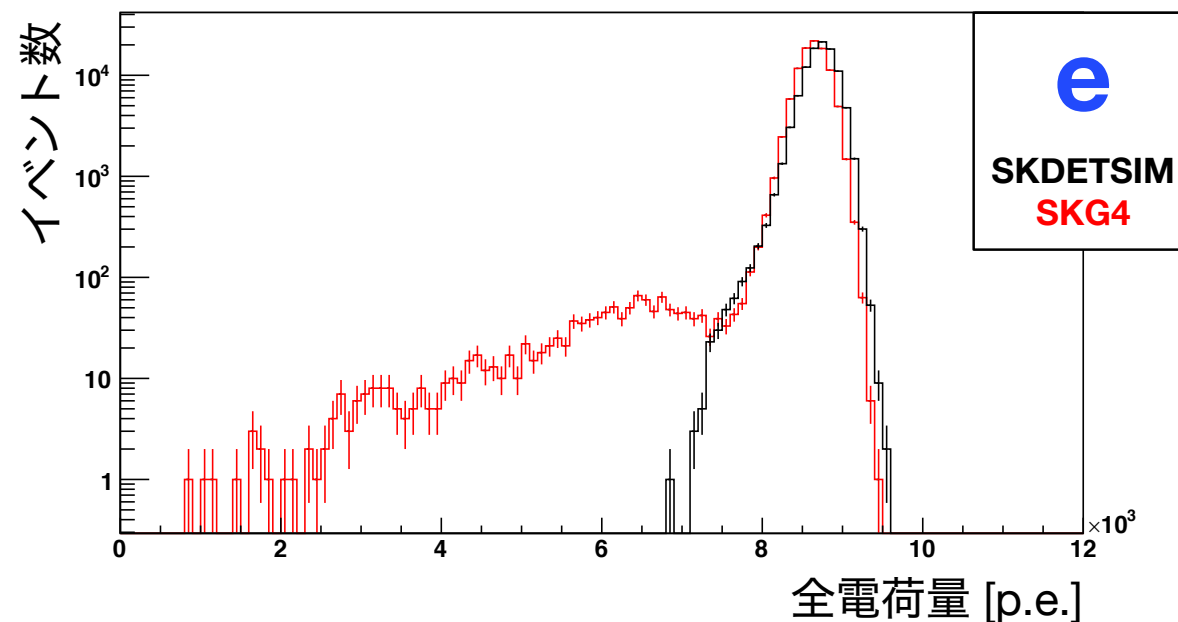
↓ 制動放射

ガンマ線 ( $\mathcal{O}(10^2)$  MeV)

↓  $^{16}\text{O}$ との光核反応

核子 (陽子、中性子) ( $\mathcal{O}(10^2)$  MeV)

- 光核反応によってエネルギーの大半が核子に受け渡される
- 重い荷電粒子のチェレンコフ閾値は大きい
  - 発生するチェレンコフ光子の数が少なくなる
  - 全電荷量が小さくなる
- 正しい物理モデルは入れるべき
  - SKG4では光核反応モデルをこのまま入れておく

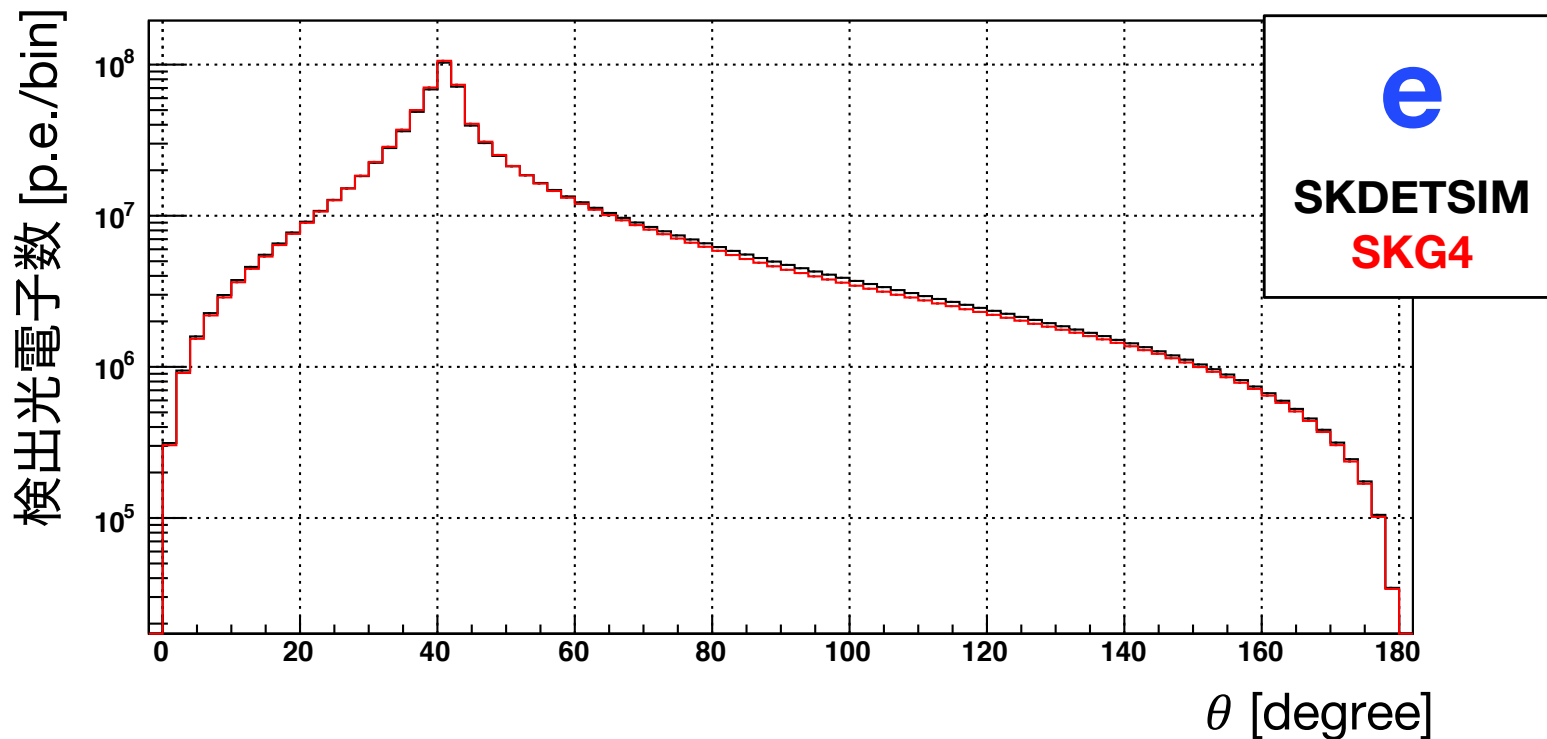
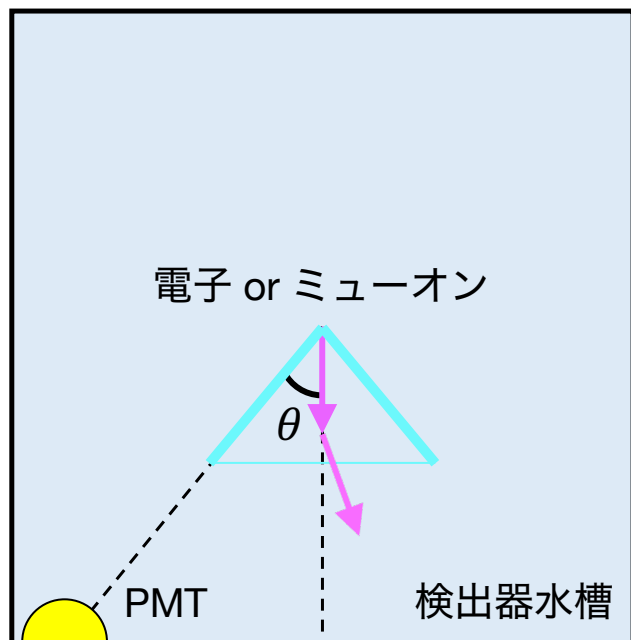
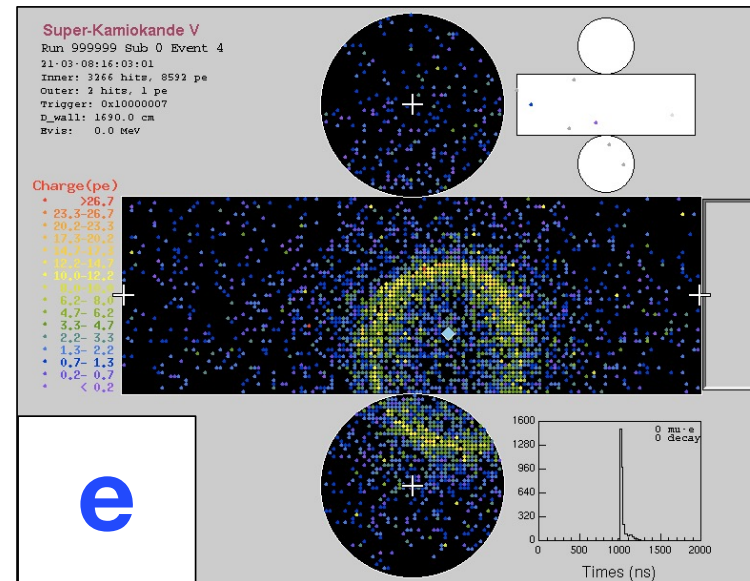


- (e.g.) 全電荷量が一番小さかったイベント  
ガンマ線 (~925 MeV)  
↓  $^{16}\text{O}$ との光核反応  
 $^{13}\text{C}$ 、陽子 × 2、中性子、ガンマ線



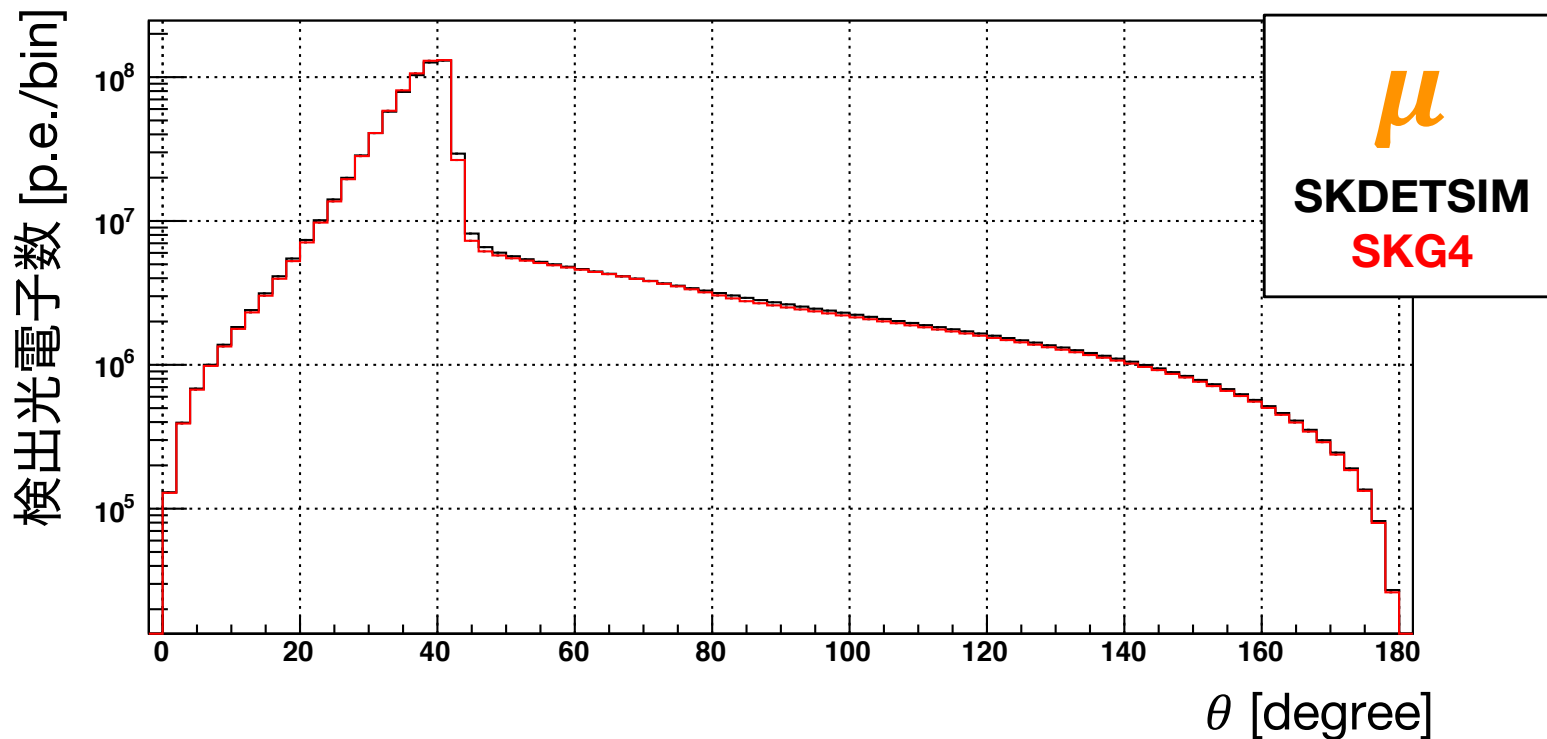
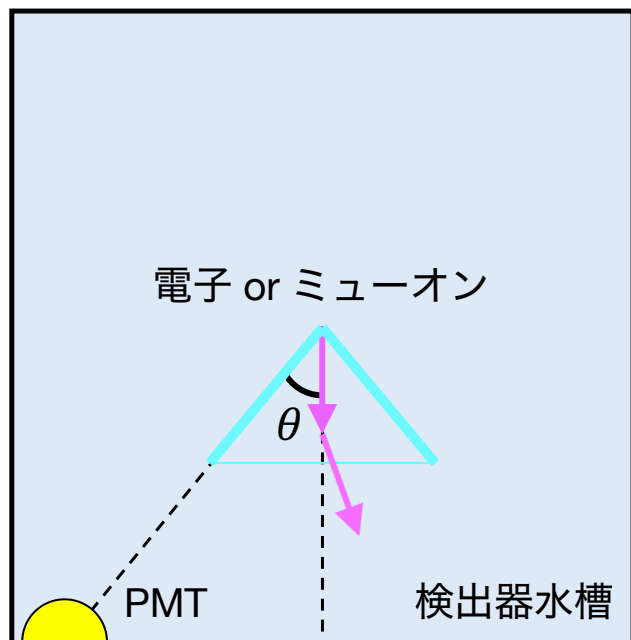
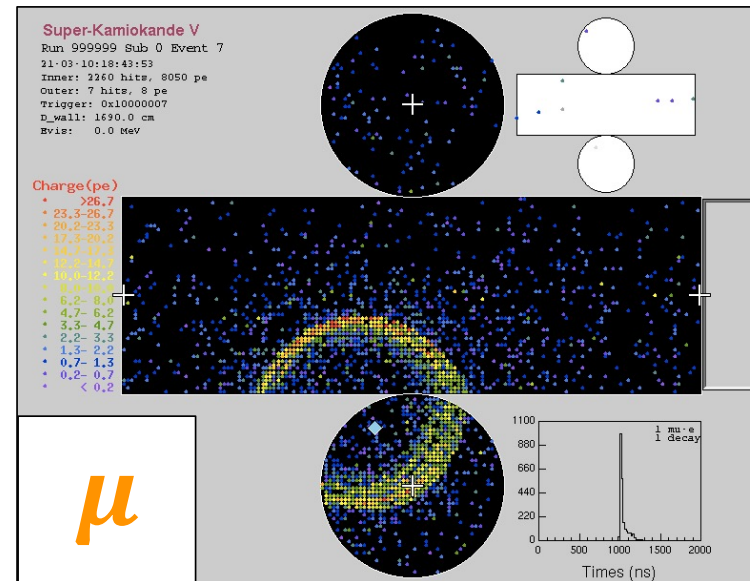
# チェレンコフ光の角度分布

- 電子とミュオンでチェレンコフ光の角度分布が異なる  
→ この違いを利用してPID (粒子弁別) を行っている
- チェレンコフ光の角度分布について理解することが重要



# チェレンコフ光の角度分布

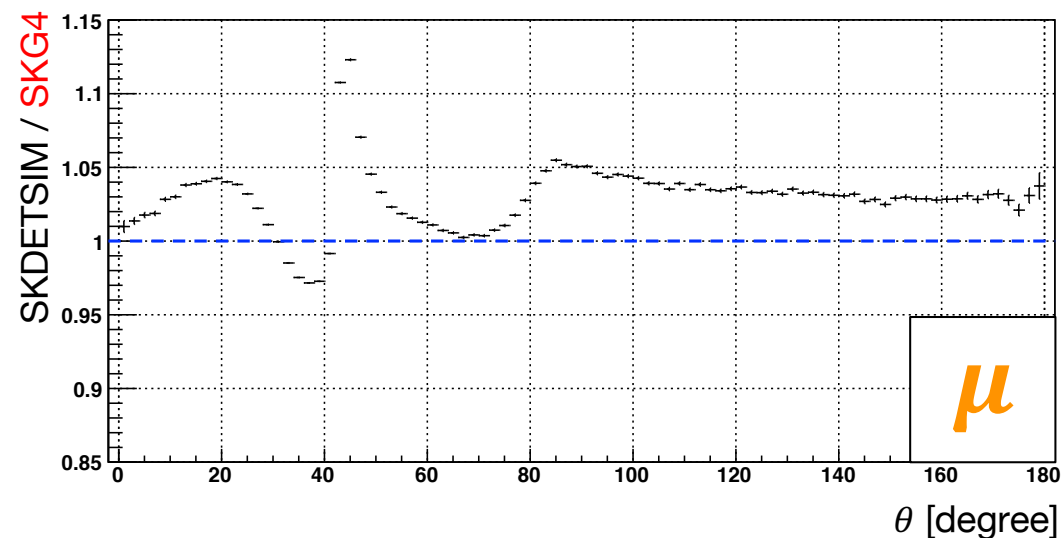
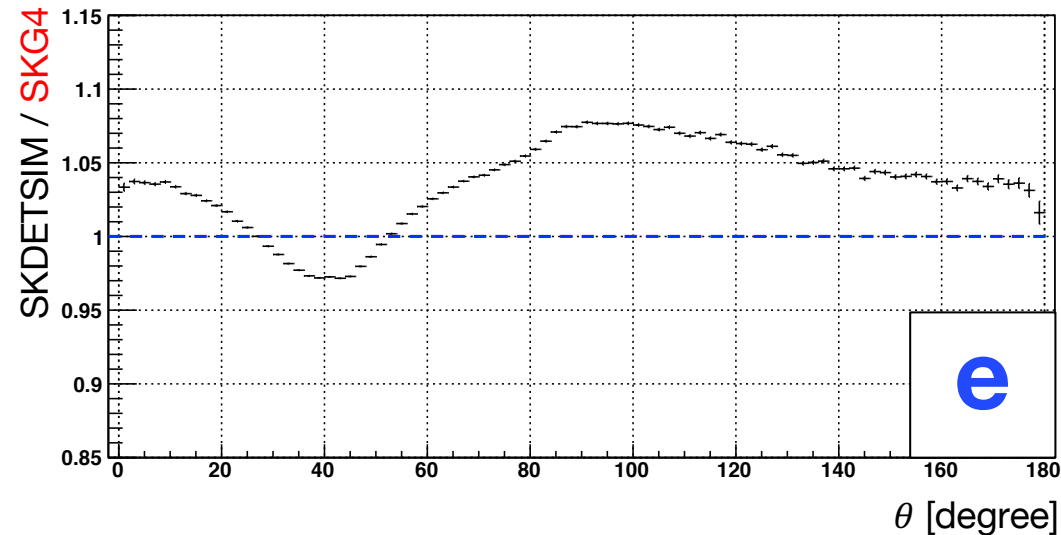
- 電子とミュオンでチェレンコフ光の角度分布が異なる  
→ この違いを利用してPID (粒子弁別) を行っている
- チェレンコフ光の角度分布について理解することが重要





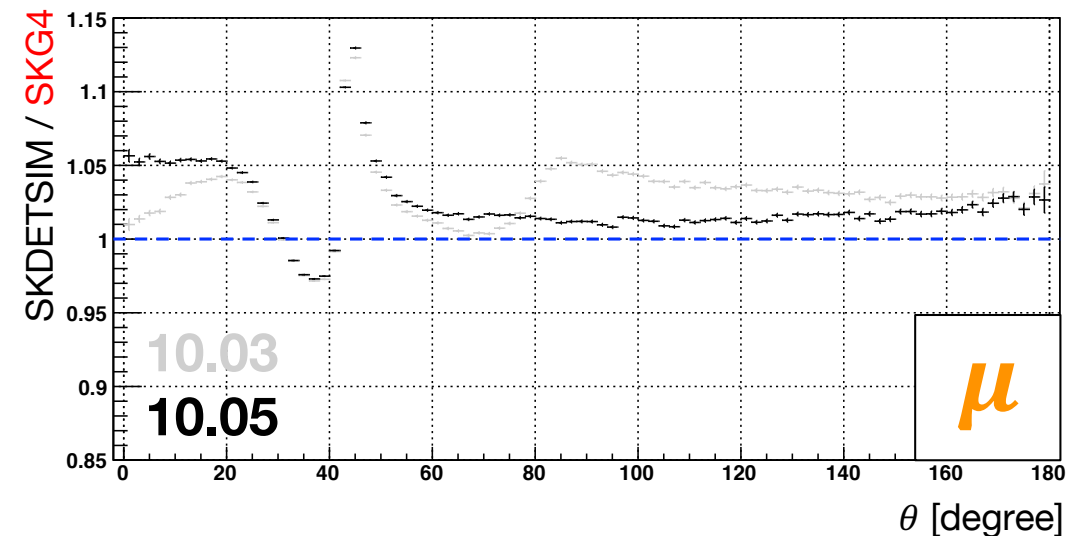
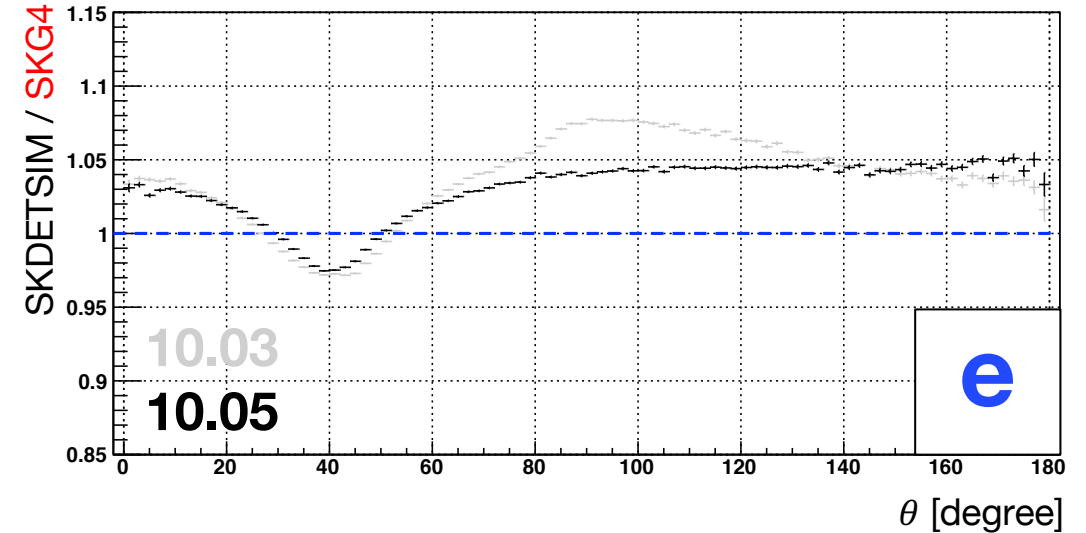
# チェレンコフ光の角度分布

- 高角度領域での差は主に荷電粒子の多重散乱モデルの違いによるもの
- ミューオンは散乱されにくい
- イオン化によって電子にエネルギーを与える  
→ 高角度領域の差は電子が寄与



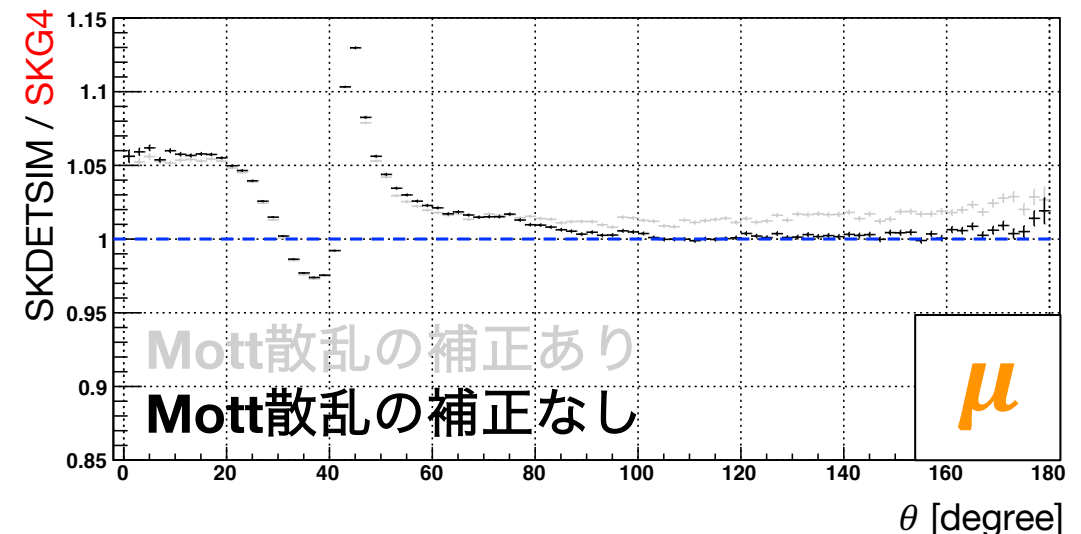
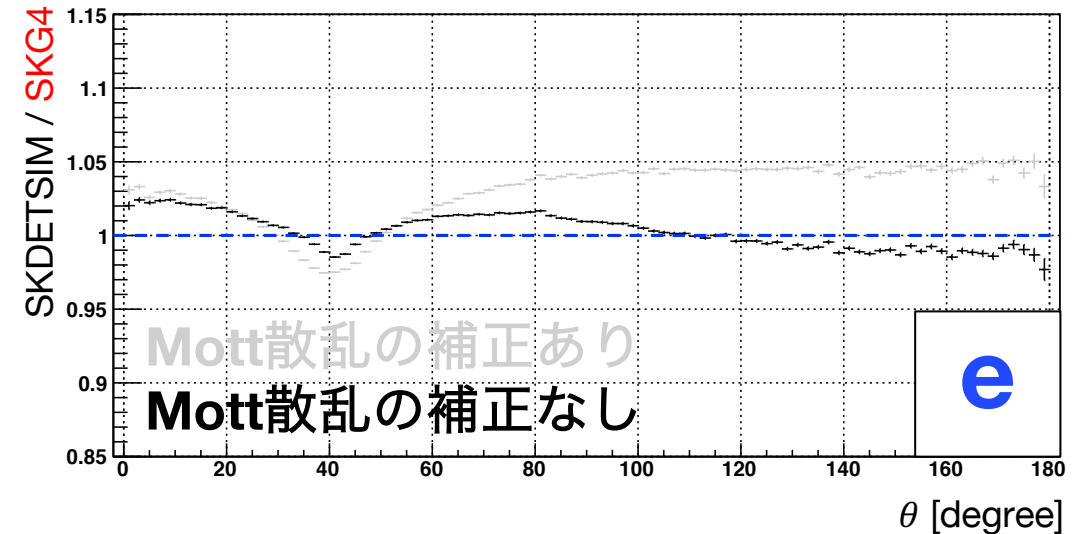
- これまでGeant4のバージョンは10.03
- Geant4のバージョンを10.05に上げて比較
  - 電子、ミューオン共に高角度領域での差が小さくなる
- 10.05に上げたことで低エネルギー領域におけるデフォルトの電子の多重散乱モデルが変化
  - 高角度領域の差は電子が寄与

e	10.03	10.05
多重散乱モデル	UrbanMsc 0 eV - 100 MeV	GoudsmitSaunderson 0 eV - 100 MeV
	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV	WentzelVIUni 100 MeV - 100 TeV



- Geant4のバージョン10.05の散乱モデルにおいてMott散乱\*の補正を外す
  - 高角度領域での差がさらに小さくなった
  - GEANT3 (SKDETSIM) にはMott散乱の補正が入っていない
- ミューオンにおいてピーク付近の差が大きい
  - 原因を調査

\* Rutherford散乱の拡張、スピンと磁気モーメントを持つ粒子が相対論的運動をする際に適用



- (簡単のため) ミューオンをタンク下向きに放出
- 条件をSKDETSIMと合わせる

## 多重散乱モデルを無視

→ 多重散乱による荷電粒子の角度変化を無くす

## デルタ線\*を発生させない

→ デルタ線の発生による荷電粒子のエネルギー・  
角度変化を無くす

## イオン化モデルのdE/dxを合わせる

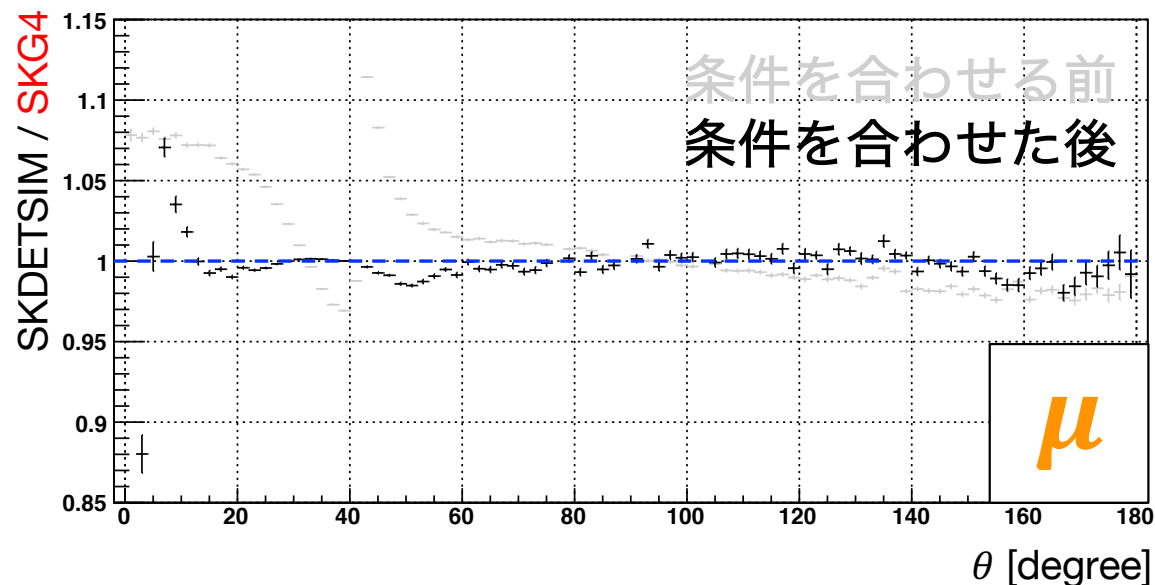
→ チェレンコフ光子の角度変化の度合いを合わせる

→ **低角度領域以外は理解**

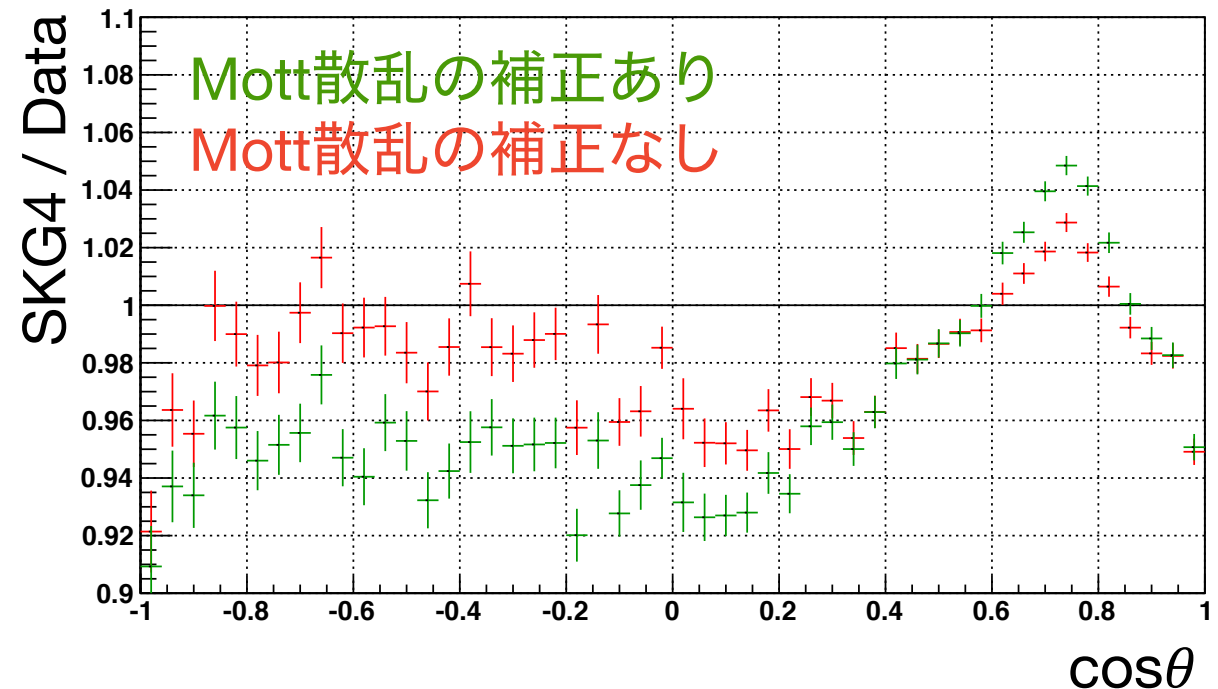
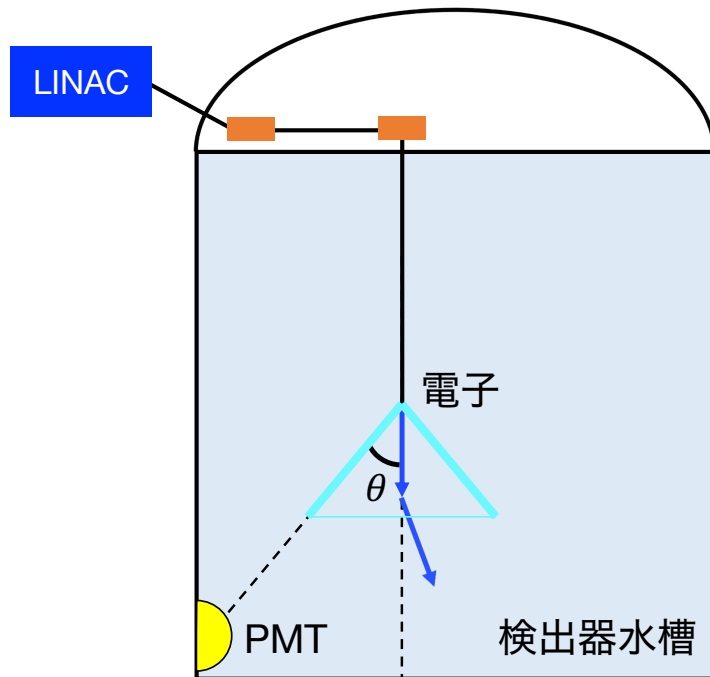
- これまではシミュレーション同士での比較

→ 今後は (宇宙線ミュオンなどの) データとの比較も行う

\* 高エネルギーの荷電粒子が原子や分子をイオン化することで発生する高速の二次電子



- 低エネルギー領域でデータと比較
- LINACを用いて12 MeVの電子を下向きに照射し、ヒット数の角度分布を比較
  - Mott散乱の補正を外すとデータに近づく
- 今後高エネルギー領域においてデータと比較
  - SKG4にMott散乱の補正を入れるかどうかはデータに合うように決定



- 今後の物理解析で**SKG4**を使用したい
  - SKDETSIMとSKG4において1 GeVの電子・ミュオンを用いて分布を作成・比較
- 電子において全電荷量で光核反応による違い
  - 分布の形は違うが、SKG4では光核反応モデルをそのまま入れておく
- Mott散乱の補正を外すとチェレンコフ光の角度分布の差が小さくなる
- ミュオンに関してはMott散乱の補正を外してもピーク付近に大きな差が残る
  - ほとんど理解
- 低エネルギー領域ではMott散乱の補正を外すとデータに近づく

## 今後の予定

- (宇宙線ミュオンなどの) データとの比較を行う
  - SKG4にMott散乱の補正を入れるかどうか決定
- 大気ニュートリノのシミュレーションをSKG4で行う
  - 超新星背景ニュートリノ探索における大気ニュートリノ背景事象の見積もりを行う



バックアップ

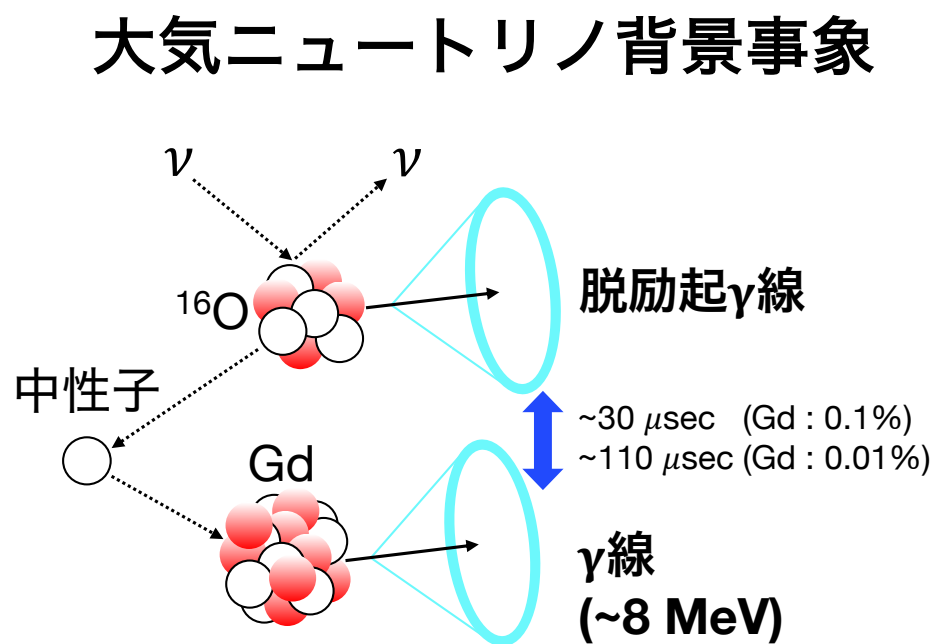
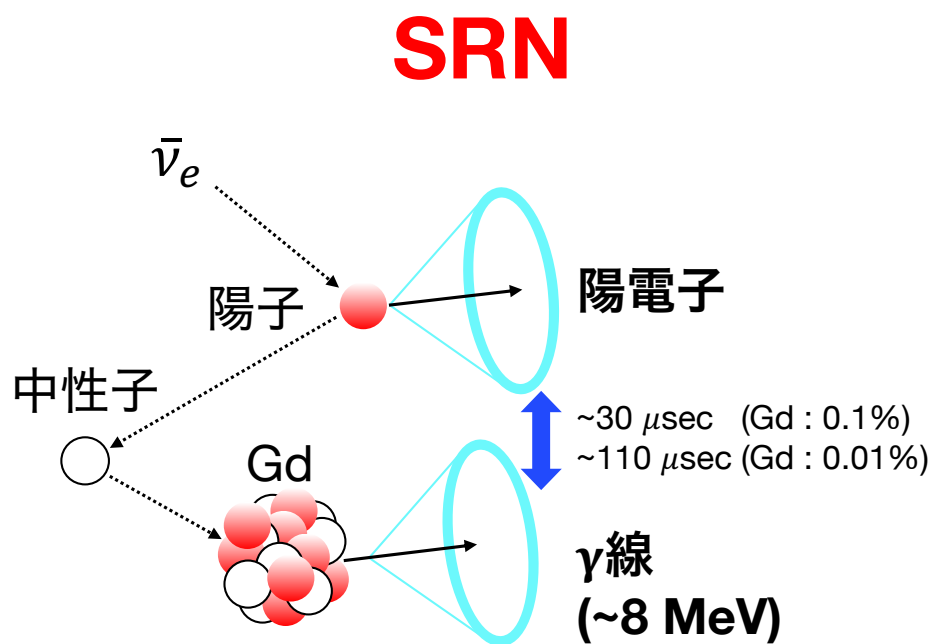
- **SK-Gd実験** (2020年7月 -)

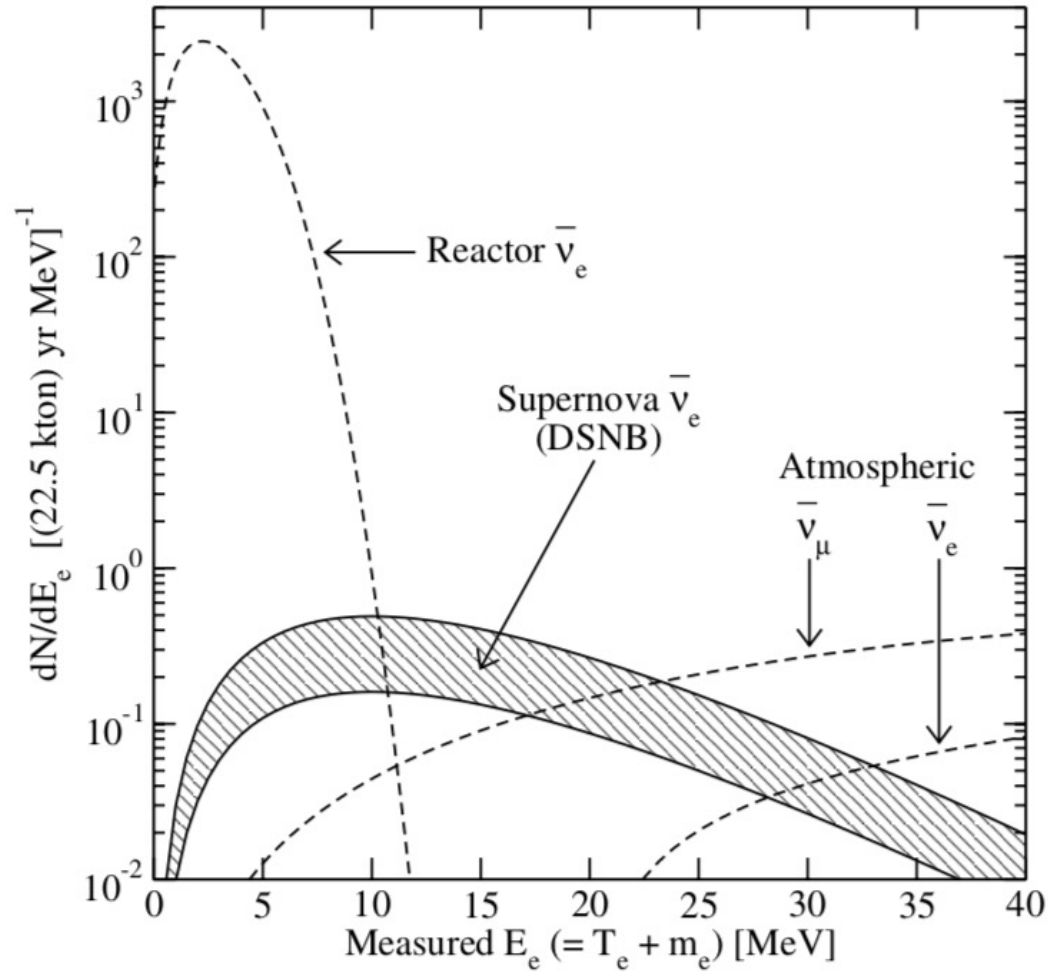
SKの超純水中にGdを導入して中性子信号の検出効率を大幅に向上させる実験

→ 超新星背景ニュートリノ (SRN) に対する感度も向上

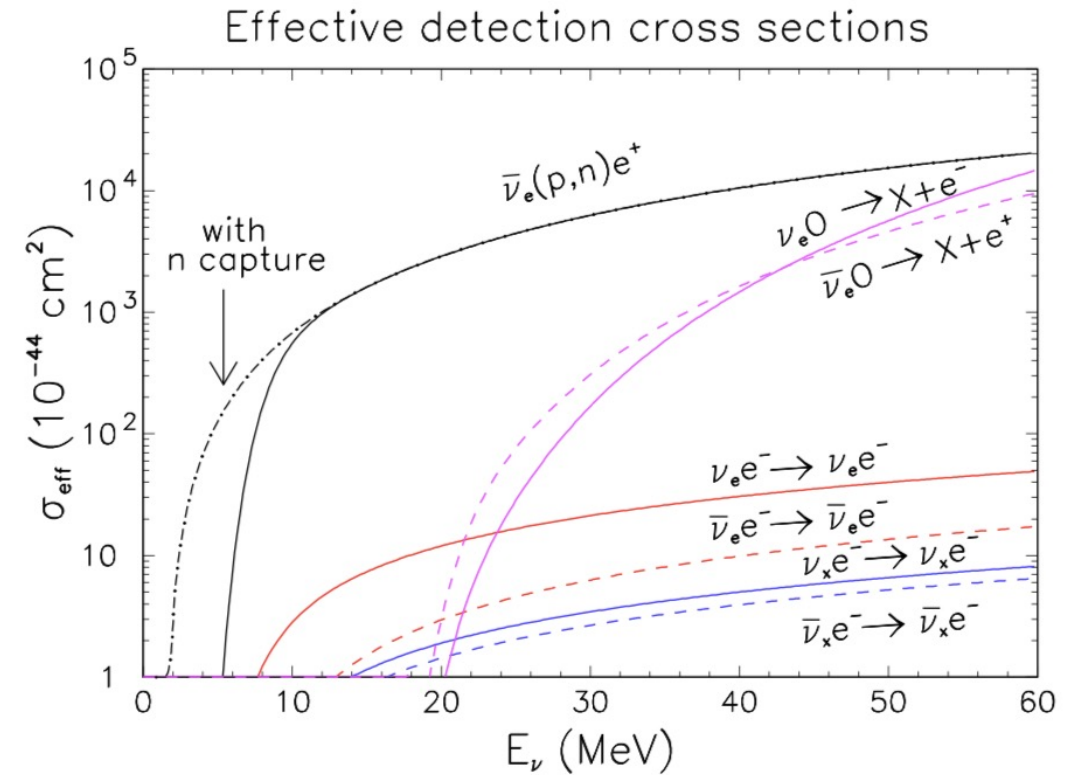
- (大気ニュートリノ背景事象など) SK-Gd実験でも識別できない事象

→ 事象数の正確な見積もりが必要

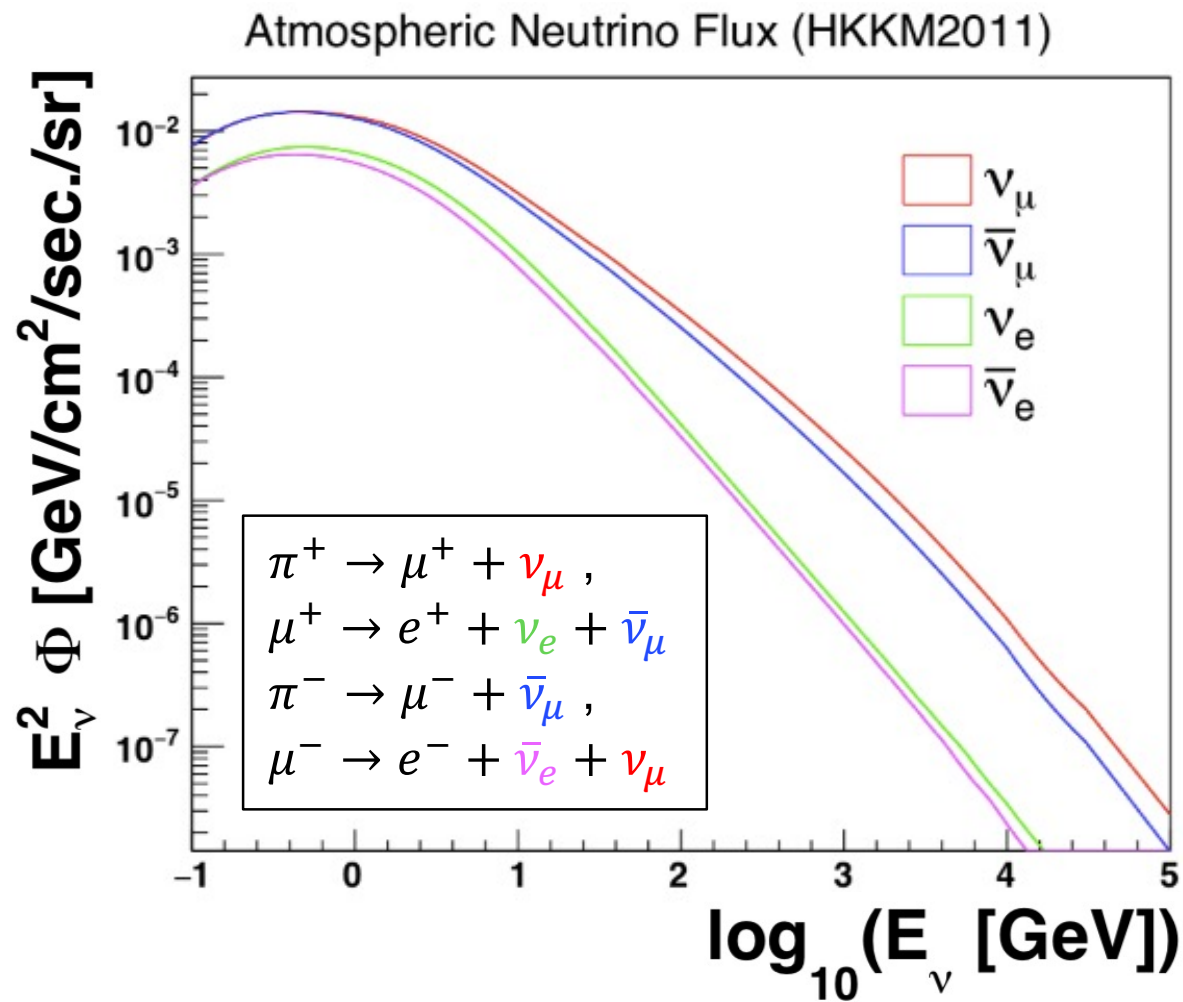




J. F. Beacom and M. R. Vagins, Phys. Rev. Lett., 93, 171101 (2004)



G. L. Fogli et al., Jour. of Cosm. and Astr. Phys., 04 (2005)



M. Honda et al., Phys. Rev. D, 83, 123001 (2011)

Y. Ashida, Ph.D Thesis, Kyoto University (2020)

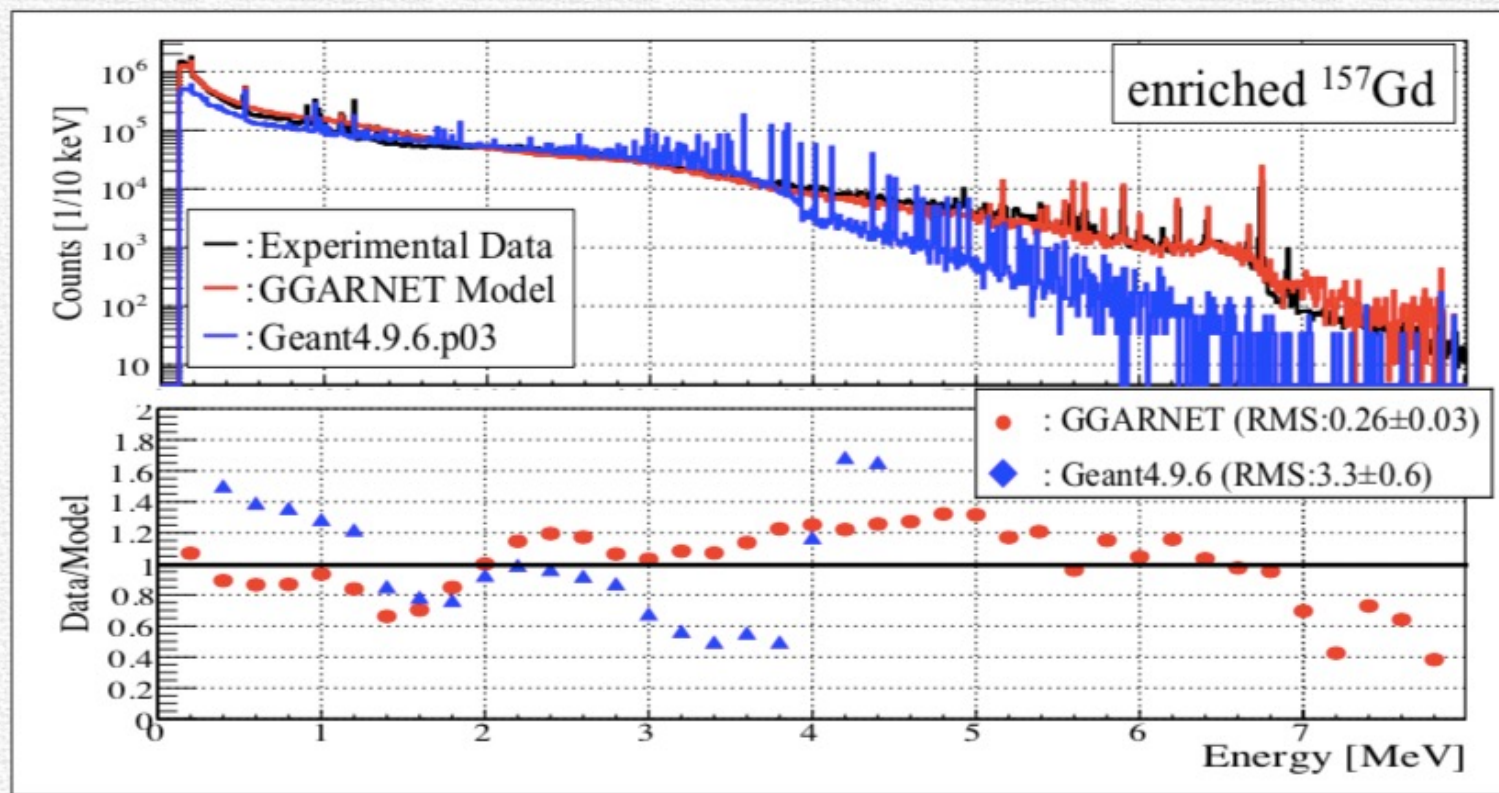
Geant4では、様々な物理リストを使用することが可能である。SKG4ではスーパーカミオカンデ実験に適したモデルを選択しなければならない。現在は以下の物理リストを使用している。

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( $\beta^-$ , etc.)
Stopping	G4Stopping	ミュー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	<b>G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP</b>	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)



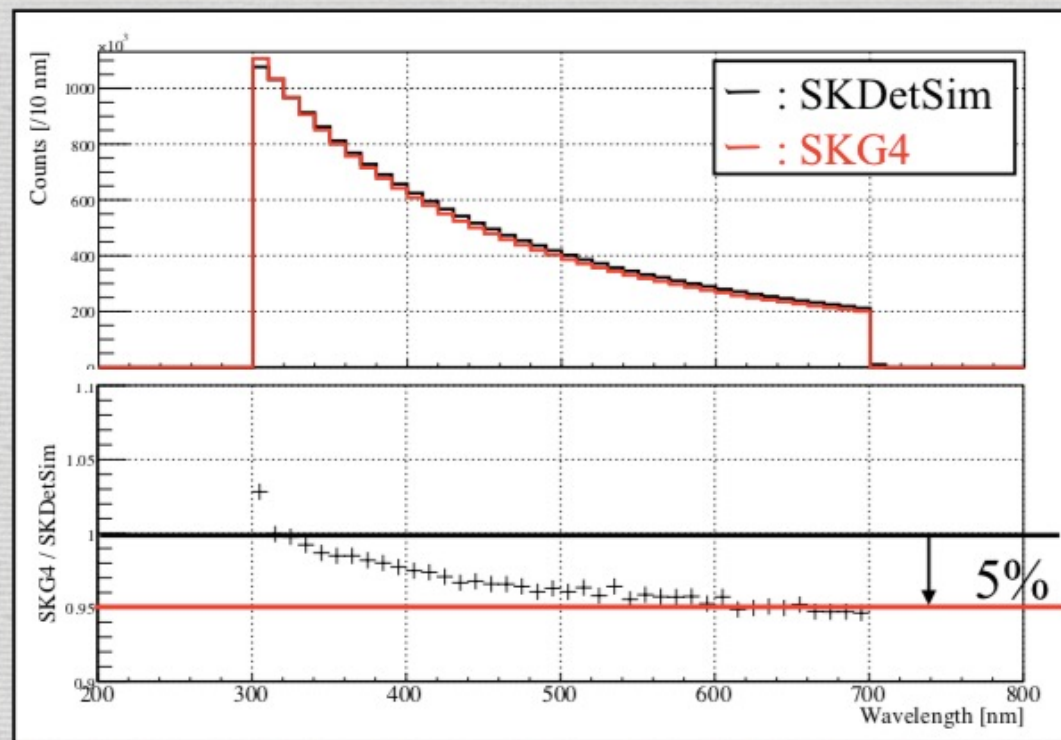
J-PARC/MLFに設置されたANNRI検出器を使用して、 $Gd(n,\gamma)$ 反応からの $\gamma$ 線を詳細測定した。その結果を使った高精度なモデル(GGARNET)が開発された。



(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。



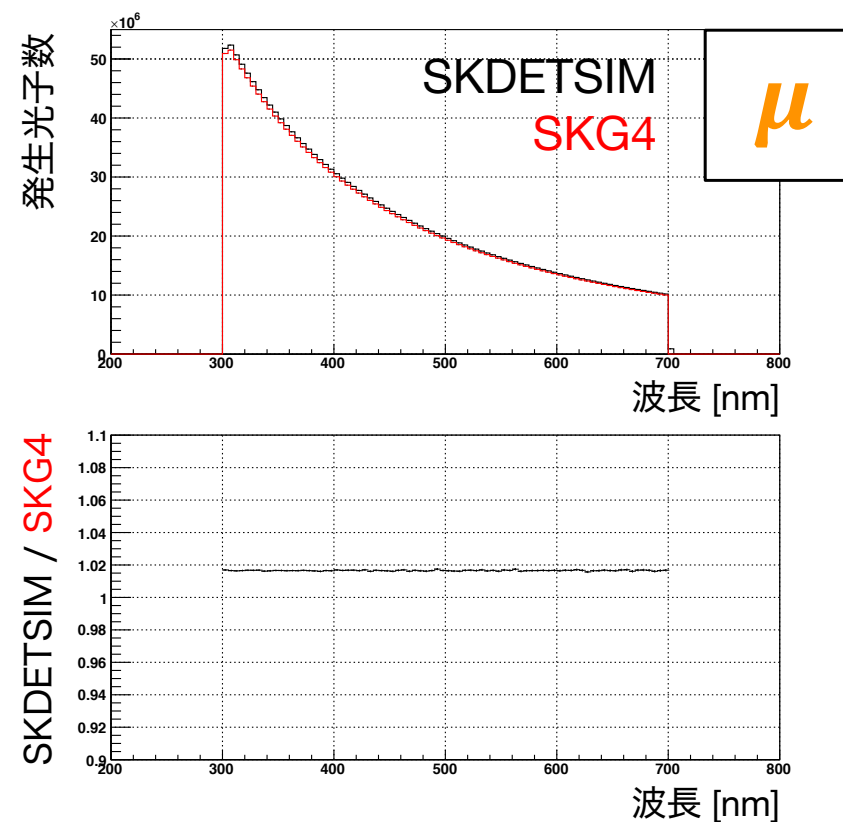
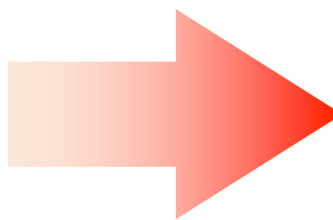
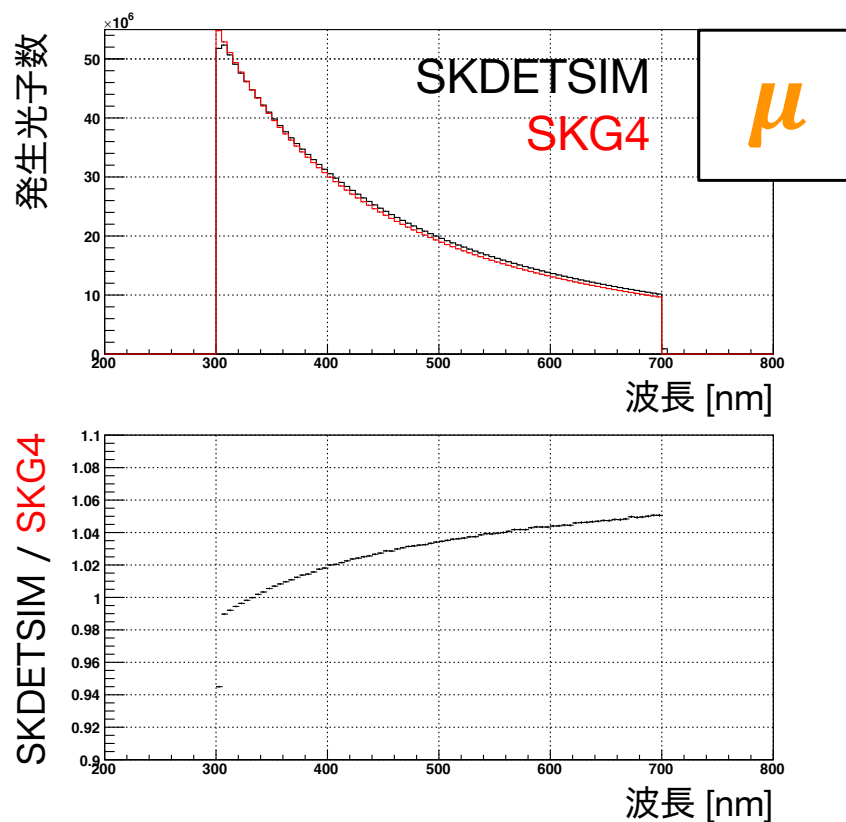
(日本物理学会 2018年秋季大会にて萩原さんが報告)

- 屈折率の波長依存性を無くす (SKG4をSKDETSIMに合わせる)

→ SKDETSIMの方が~2%多い

→ Overallなチェレンコフ光子の放出数はパラメータで調整可能

$$\frac{d^2N}{dLd\lambda} = 2\pi\alpha Z^2 \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}$$



- Geant4のバージョン10.03における電子のモデルを変更して全電荷量の平均値を比較

e	10.03	local-1	local-2	local-3	local-4
多重散乱 モデル	UrbanMsc 0 eV - 100 MeV	GoudsmitSaunderson 0 eV - 100 MeV	GoudsmitSaunderson 0 eV - 100 MeV	GoudsmitSaunderson 0 eV - 100 MeV	GoudsmitSaunderson 0 eV - 1 TeV
	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV	
イオン化 モデル	LowEnergyIoni 0 eV - 100 keV	LowEnergyIoni 0 eV - 100 keV	LowEnergyIoni 0 eV - 1 TeV	LowEnergyIoni 0 eV - 1 TeV	LowEnergyIoni 0 eV - 1 TeV
	MollerBhabha 100 keV - 1 TeV	MollerBhabha 100 keV - 1 TeV			
クーロン散乱 モデル	eCoulombScattering 100 MeV - 1 TeV	eCoulombScattering 100 MeV - 1 TeV	eCoulombScattering 100 MeV - 1 TeV		

- Geant4のバージョン10.03における電子のモデルを変更して全電荷量の平均値を比較
  - イオン化モデルを変更すると平均値の差が小さくなる
- モデルの変更は推奨されない
  - Overallなチェレンコフ光子の放出数はパラメータで調整すべき

全電荷量 [p.e.] (e)	10.03	local-1	local-2	local-3	local-4
SKDETSIM (平均値)	8872				
<b>SKG4</b> (平均値)	<b>8750</b>	<b>8752</b>	<b>8852</b>	<b>8852</b>	<b>8851</b>
SKDETSIM (平均値) / <b>SKG4</b> (平均値)	1.394%	1.371%	0.226%	0.226%	0.237%

- Geant4のバージョン10.03における電子のモデルを変更して全電荷量の平均値を比較

e	10.03	local-5
多重散乱 モデル	UrbanMsc 0 eV - 100 MeV	UrbanMsc 0 eV - 100 MeV
	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV	WentzelVIUni 100 MeV - 1 TeV
イオン化 モデル	LowEnergyIoni 0 eV - 100 keV	LowEnergyIoni 0 eV - 100 keV
	MollerBhabha 100 keV - 1 TeV	
クーロン散乱 モデル	eCoulombScattering 100 MeV - 1 TeV	eCoulombScattering 100 MeV - 1 TeV

- Geant4のバージョン10.03における電子のモデルを変更して全電荷量の平均値を比較
  - イオン化モデルを変更すると平均値の差が小さくなる
- モデルの変更は推奨されない
  - Overallなチェレンコフ光子の放出数はパラメータで調整すべき

全電荷量 [p.e.] ( $\mu$ )	10.03	local-5
SKDETSIM (平均値)	8480	
SKG4 (平均値)	8353	8377
SKDETSIM (平均値) / SKG4 (平均値)	1.520%	1.012%



- SKDETSIMの光核反応モデル
  - 2012年にT2K実験におけるNC  $\pi^0$ 事象の研究のために実装
  - 150 MeVまでしか実装されていない
  - 光核反応が起きても二次粒子が発生しない
- SKDETSIMとSKG4で光核反応を無視
  - 分布の形が一致

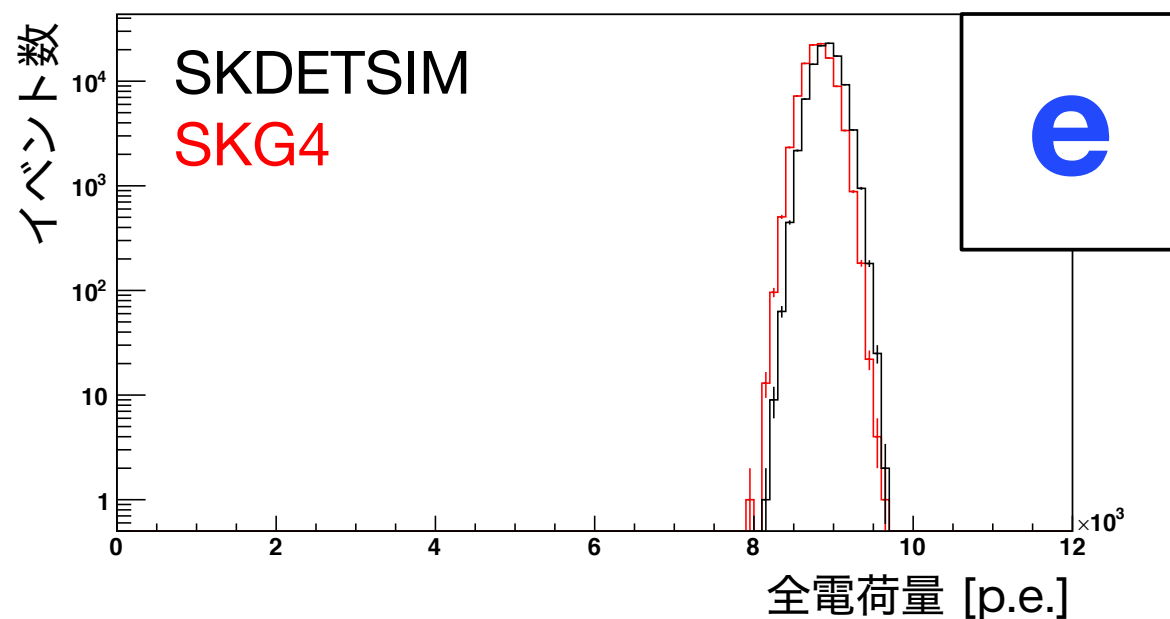
$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$  (J-PARC)

↓ ニュートリノ振動

$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$  (SK)

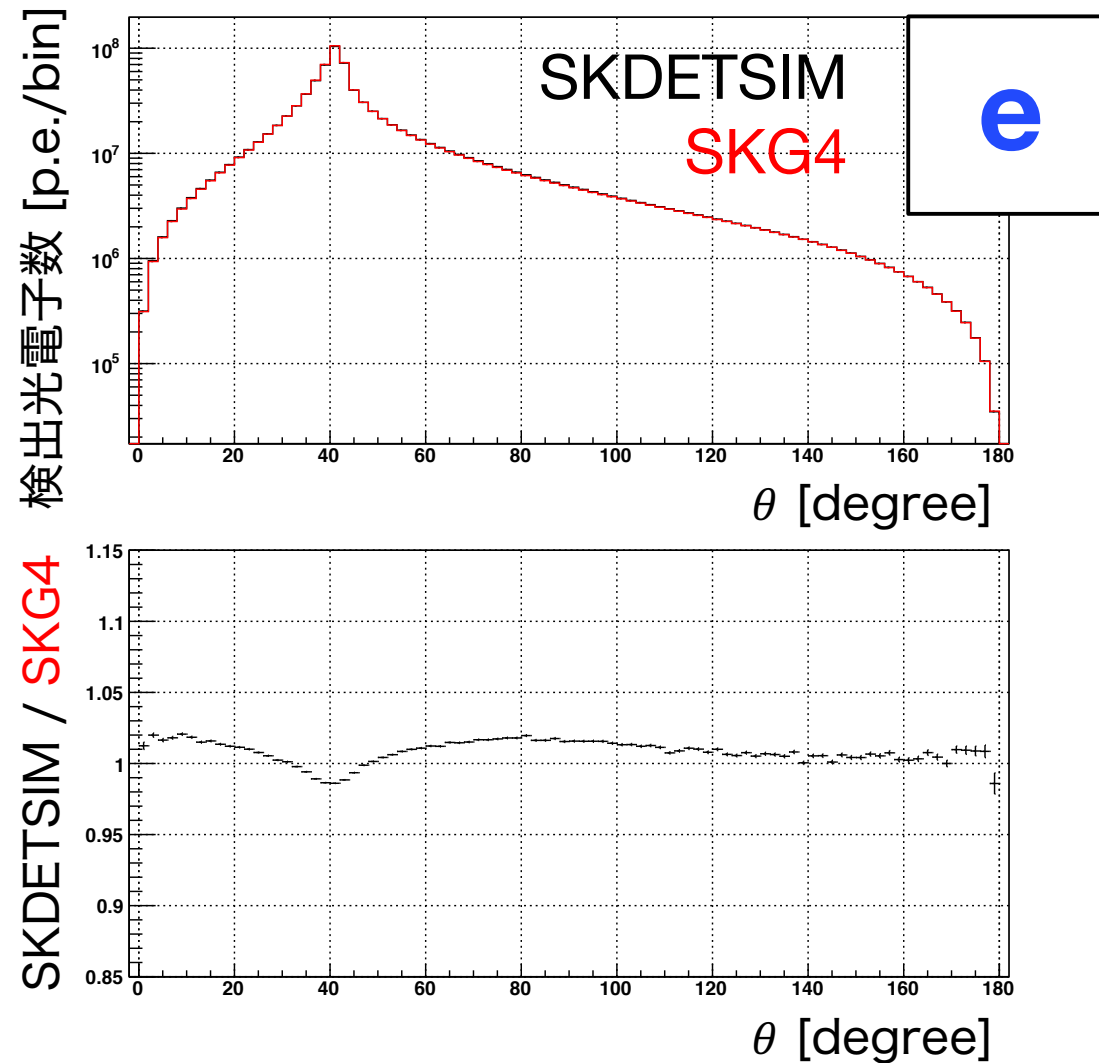
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  (SK)

$\pi^0 \rightarrow \gamma$  (見える) +  $\gamma$  (光核反応で見えない)



- SKG4で光核反応を無視

→ 分布の形に大きな変化はなし



イオン化モデルのdE/dxを合わせる

- $\delta$ や $C_e$ の値が合っていない

SKG4  $\frac{16}{18} (dE/dx)_O + \frac{2}{18} (dE/dx)_H$

SKDETSIM  $(dE/dx)_{H_2O}$

Bethe-Bloch restricted energy loss formula (GEANT3)

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{dE}{dx} \right) = \begin{cases} D \frac{ZZ_{inc}^2}{A\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e\beta^2\gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - \frac{2C_e}{Z} \right] & \text{if } T_{cut} \geq T_{max} \\ D \frac{ZZ_{inc}^2}{A\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e\beta^2\gamma^2 T_c}{I^2} \right) - \beta^2 \left( 1 + \frac{T_c}{T_{max}} \right) - \delta - \frac{2C_e}{Z} \right] & \text{if } T_{cut} < T_{max} \end{cases}$$

Bethe-Bloch restricted energy loss formula (Geant4)

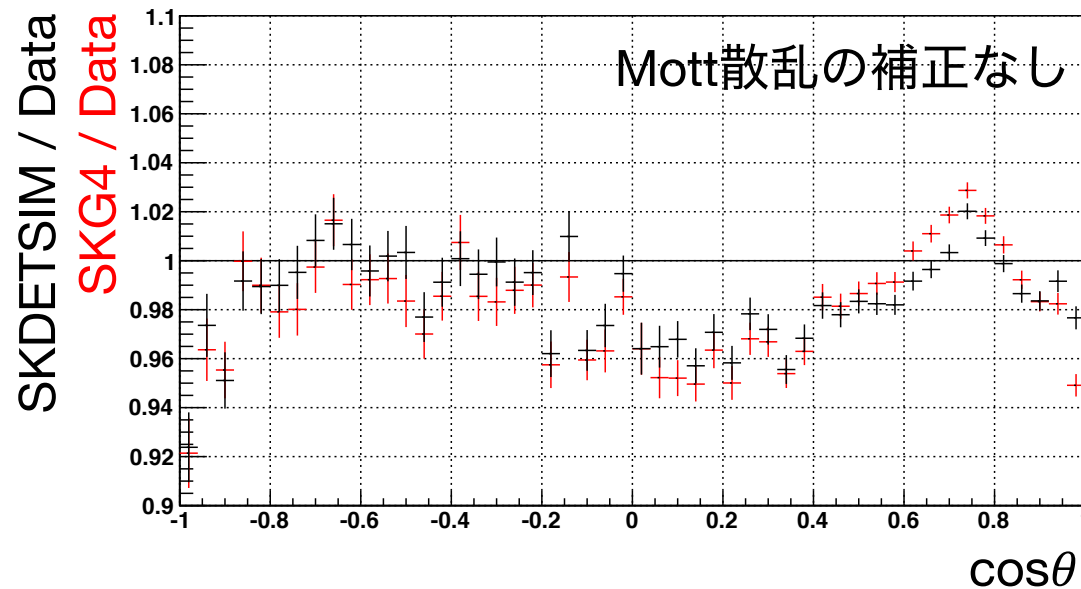
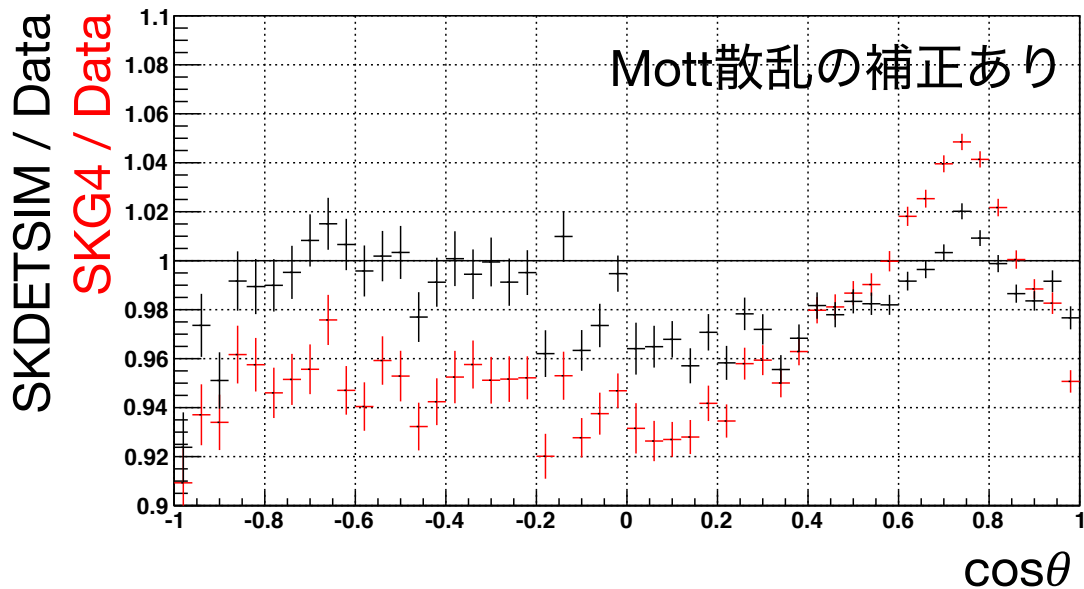
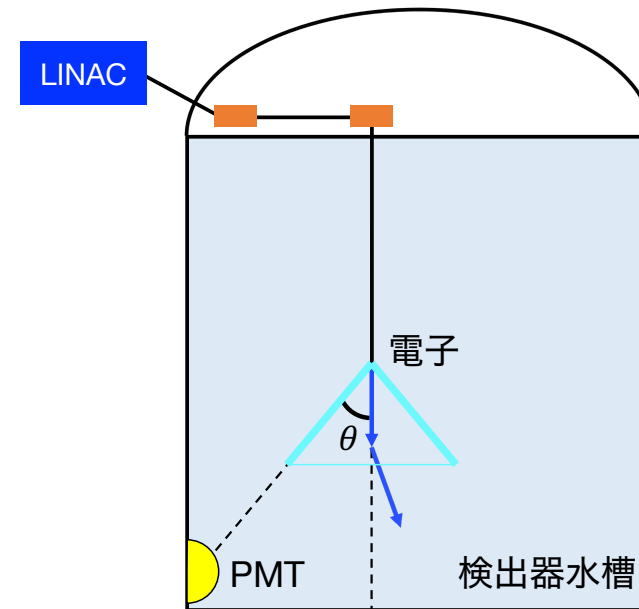
$$\frac{dE}{dx} = 2\pi r_e^2 mc^2 n_{el} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2mc^2\beta^2\gamma^2 T_{up}}{I^2} \right) - \beta^2 \left( 1 + \frac{T_{up}}{T_{max}} \right) - \delta - \frac{2C_e}{Z} + \overset{S}{\color{red}{\rule{0.5em}{0.4pt}}} + \overset{F}{\color{blue}{\rule{0.5em}{0.4pt}}} \right]$$

spin term

high order corrections

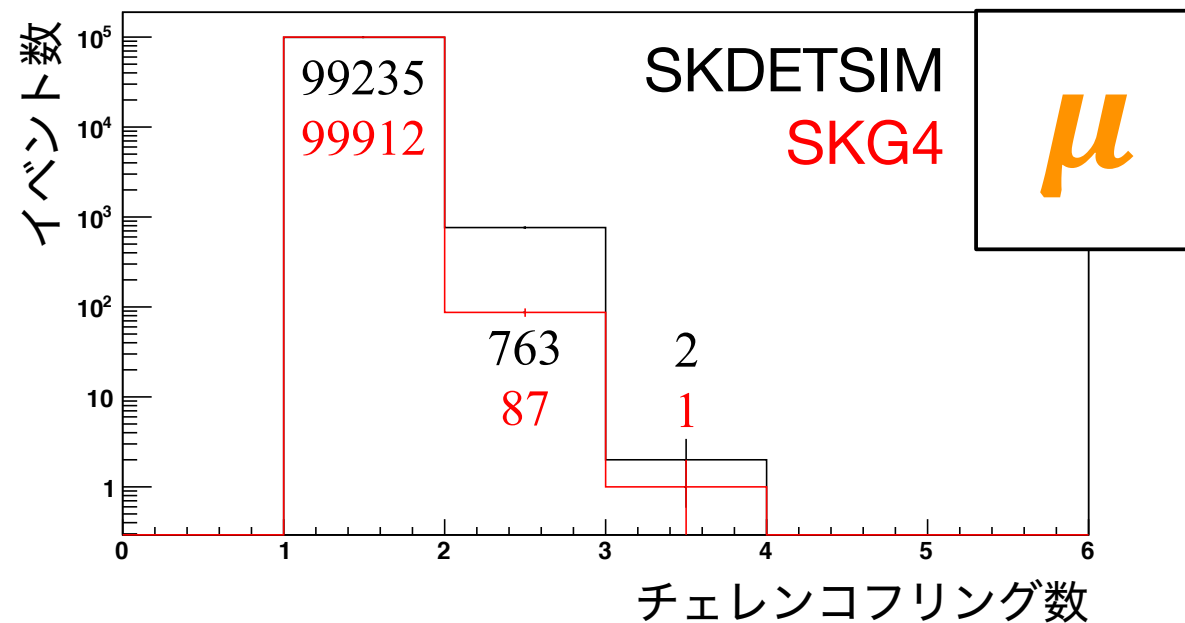
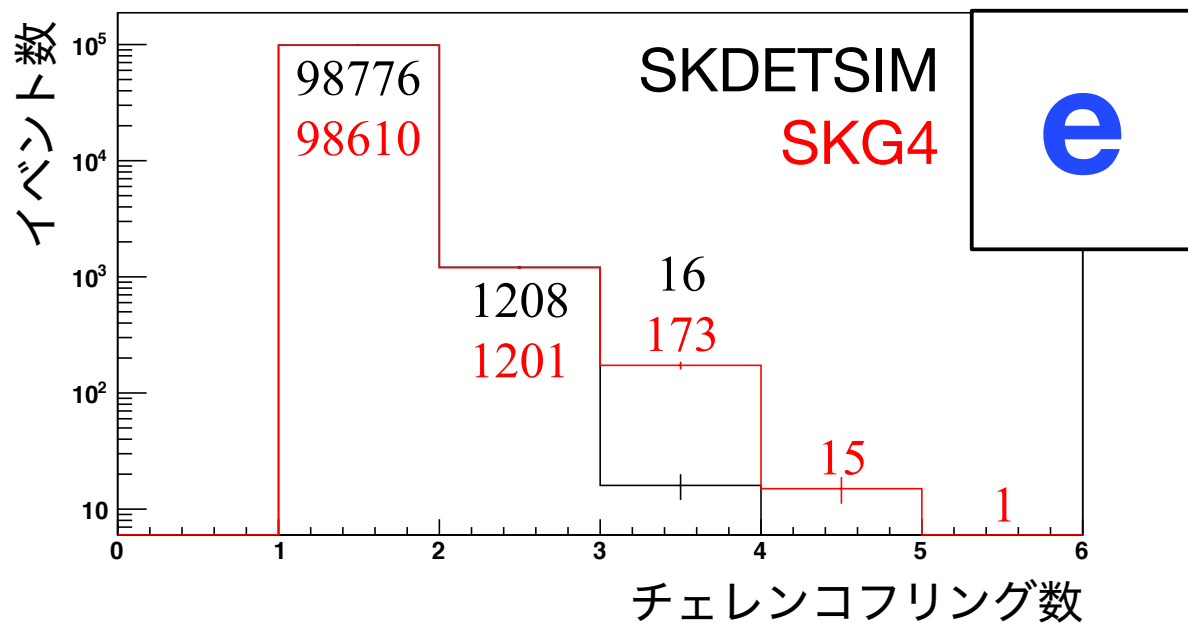
# データとの比較

- 低エネルギー領域でデータと比較
- LINACを用いて12 MeVの電子を下向きに照射し、ヒット数の角度分布を比較  
→ Mott散乱の補正を外すとデータに近づく



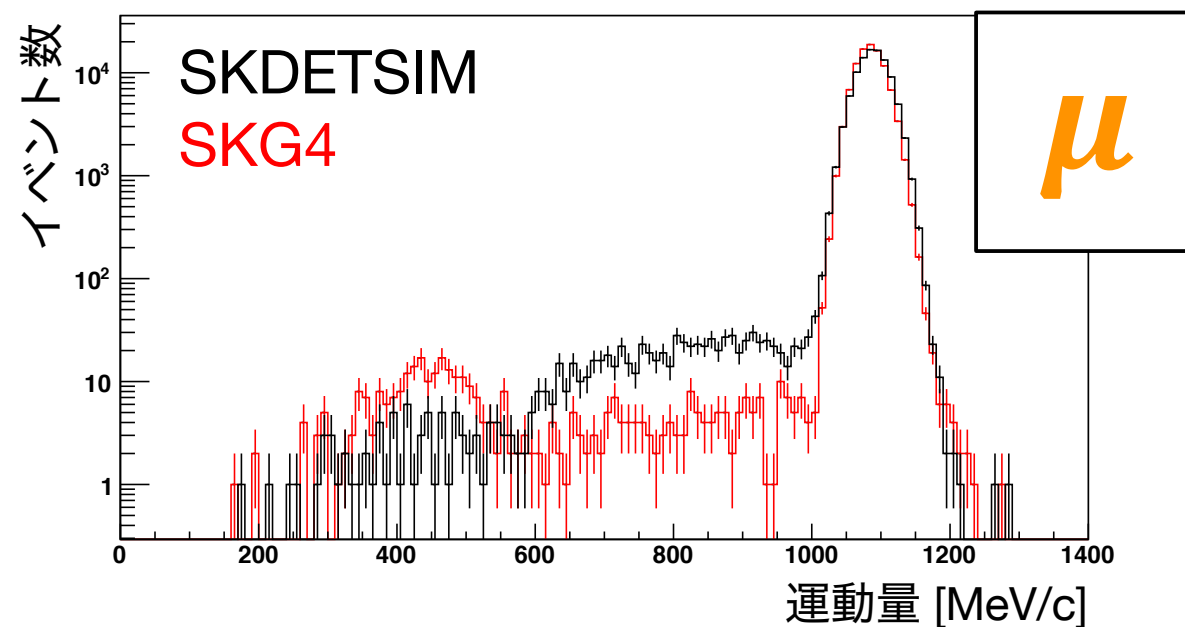
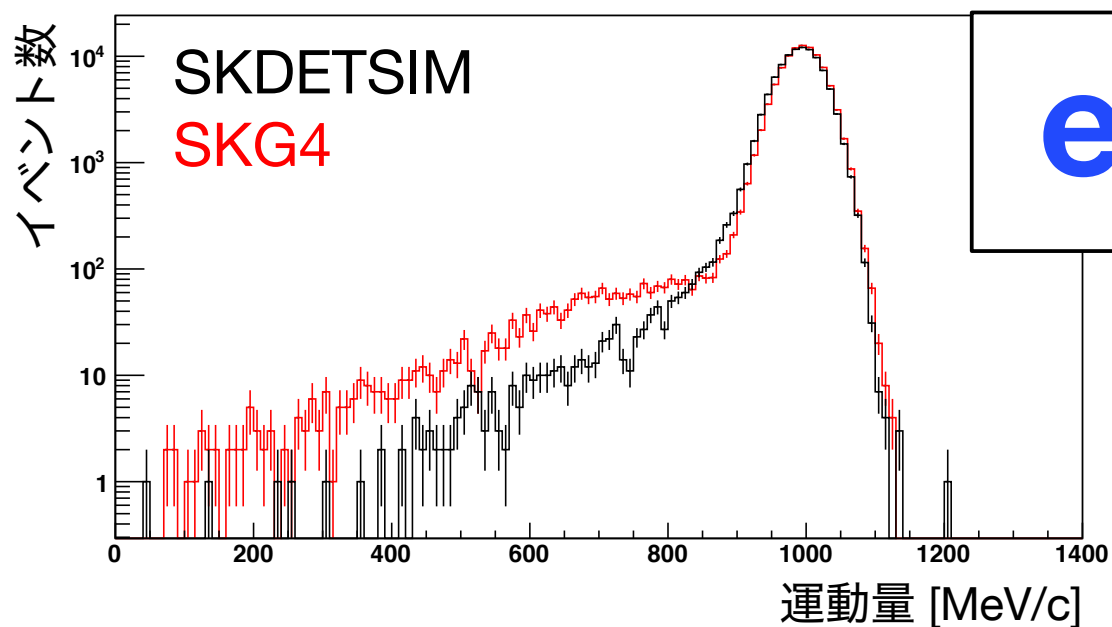
Geant4のバージョン10.05

Mott散乱の補正なし



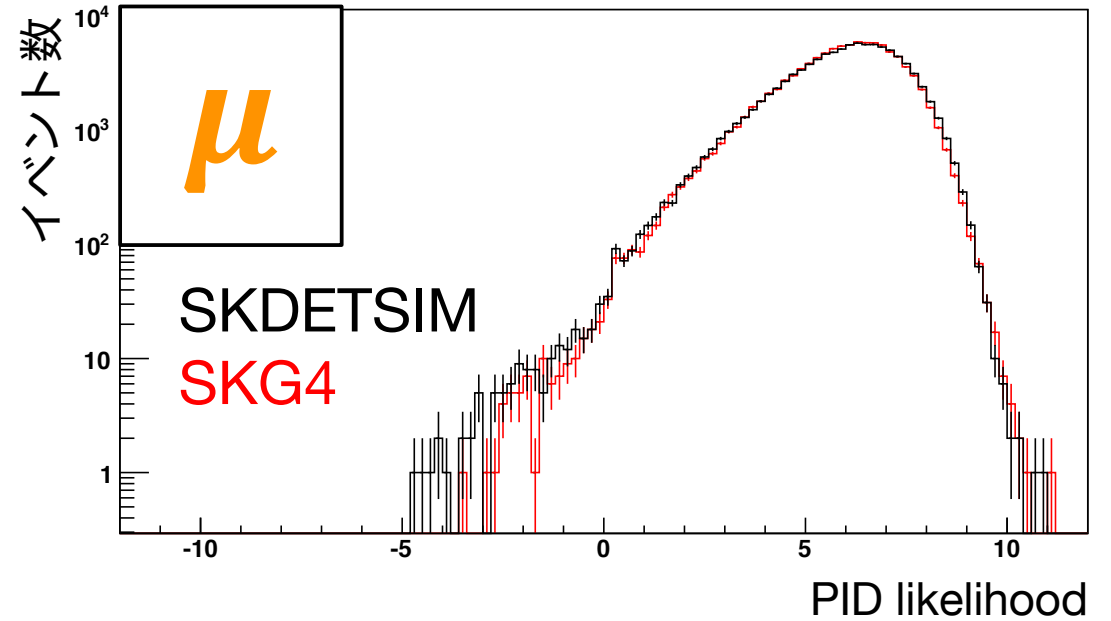
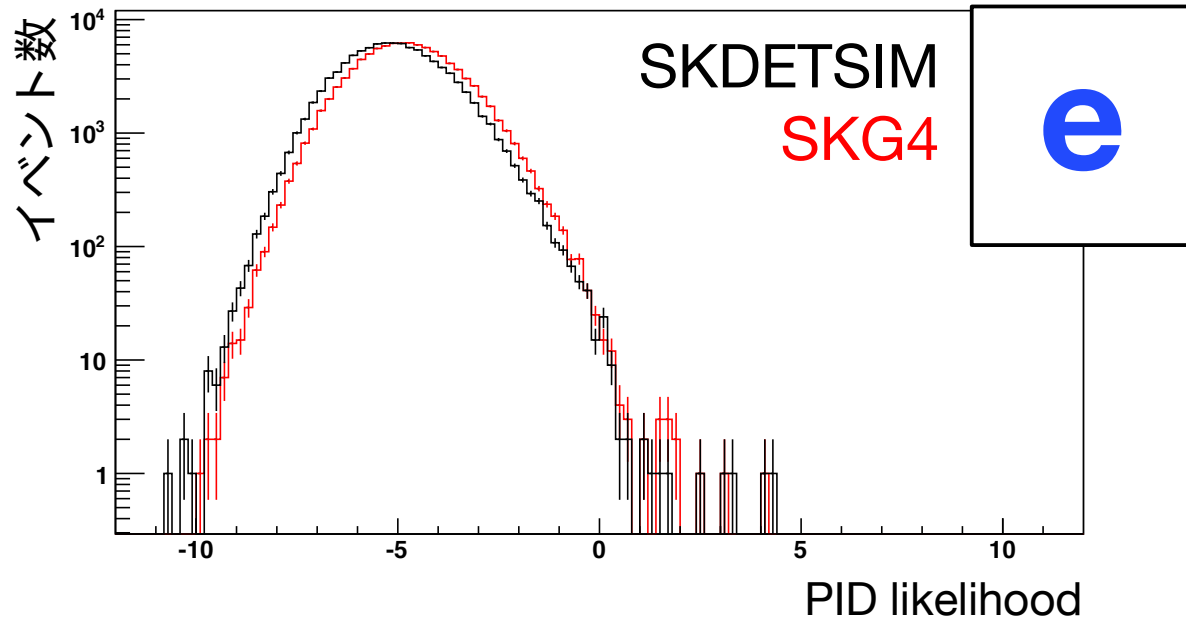
## Geant4のバージョン10.05

### Mott散乱の補正なし



## Geant4のバージョン10.05

### Mott散乱の補正なし





- 1 桐原陽一 他, ”電子後方散乱のモンテカルロ計算と実験の比較”