

スーパーカミオカンデ実験における Geant4ベースシミュレーション SKG4の開発

原田 将之(岡山大学),

萩原 開人, 小汐由介(岡山大学), 他Super-Kamiokande Collaboration



目次

- 
1. 研究背景・目的
 2. これまでの結果
 3. 光子の散乱、反射
 4. まとめ

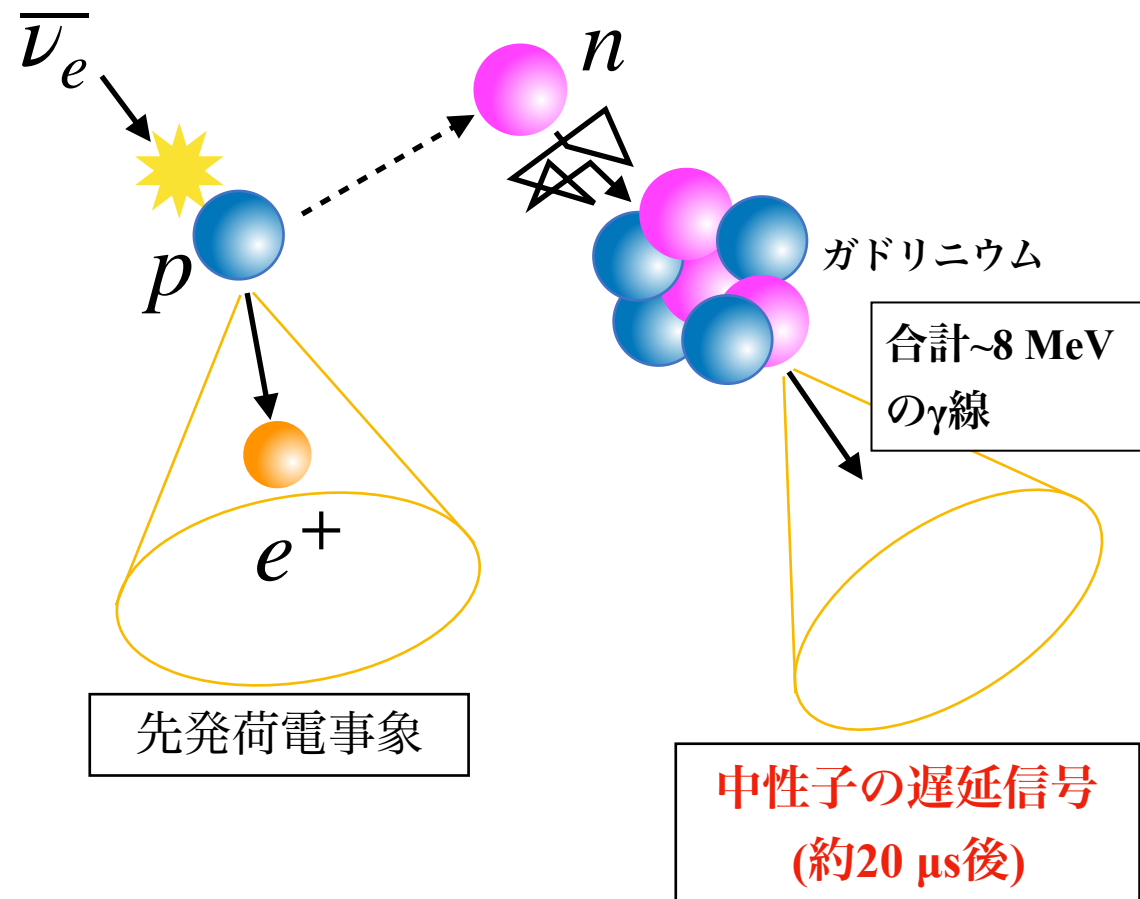
研究背景・目的

3

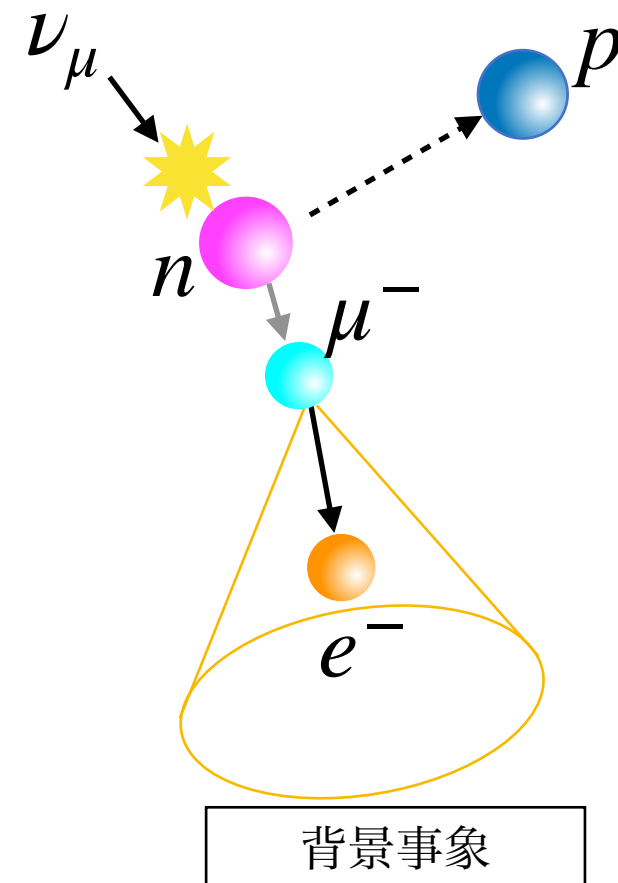
●研究背景：SK-Gd実験

スーパーカミオカンデ(SK)の超純水に硫酸Gdを0.2%溶かすことで中性子信号の同定を行い、超新星背景ニュートリノなどと背景事象の識別を図る。

超新星背景ニュートリノ



背景事象 (大気ニュートリノ)



研究背景・目的

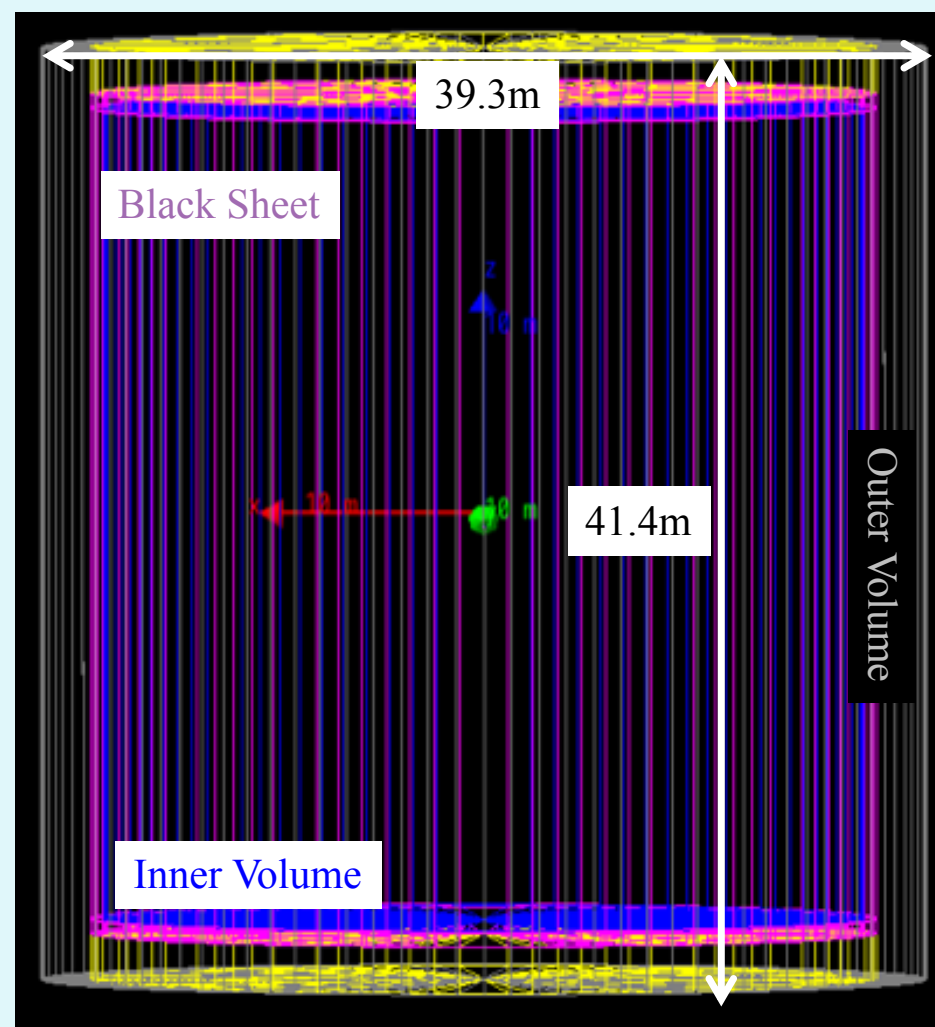
4

●研究目的：SK-Gdにおける検出器シミュレーション

SKのシミュレーションは今までGeant3ベース([SKDetSim](#))。

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、Geant4ベースの
シミュレーション([SKG4](#))を構築する。

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



物理モデル

5

●電磁気物理モデル

Geant4では、電磁相互作用についての物理リストが更新されており、SKG4では低エネルギーでの精度の良いG4Livermoreを採用している。

実際の比較でもMultiple Scatteringやチェレンコフ光子の放出に差異が見られた。(萩原さんが2018年秋季大会で報告)

●低エネルギー中性子モデル

SKDetSimには低エネルギー中性子の正確な輸送モデルが導入されていなかった。

SKG4では低エネルギー用のパッケージ（NeutronHP）を採用している。またGdの熱中性子捕獲からのガンマ線放出には実験から得られた高精度モデルを採用している。

これまでの結果

6

•SKDetSimを用いた物理モデルの比較

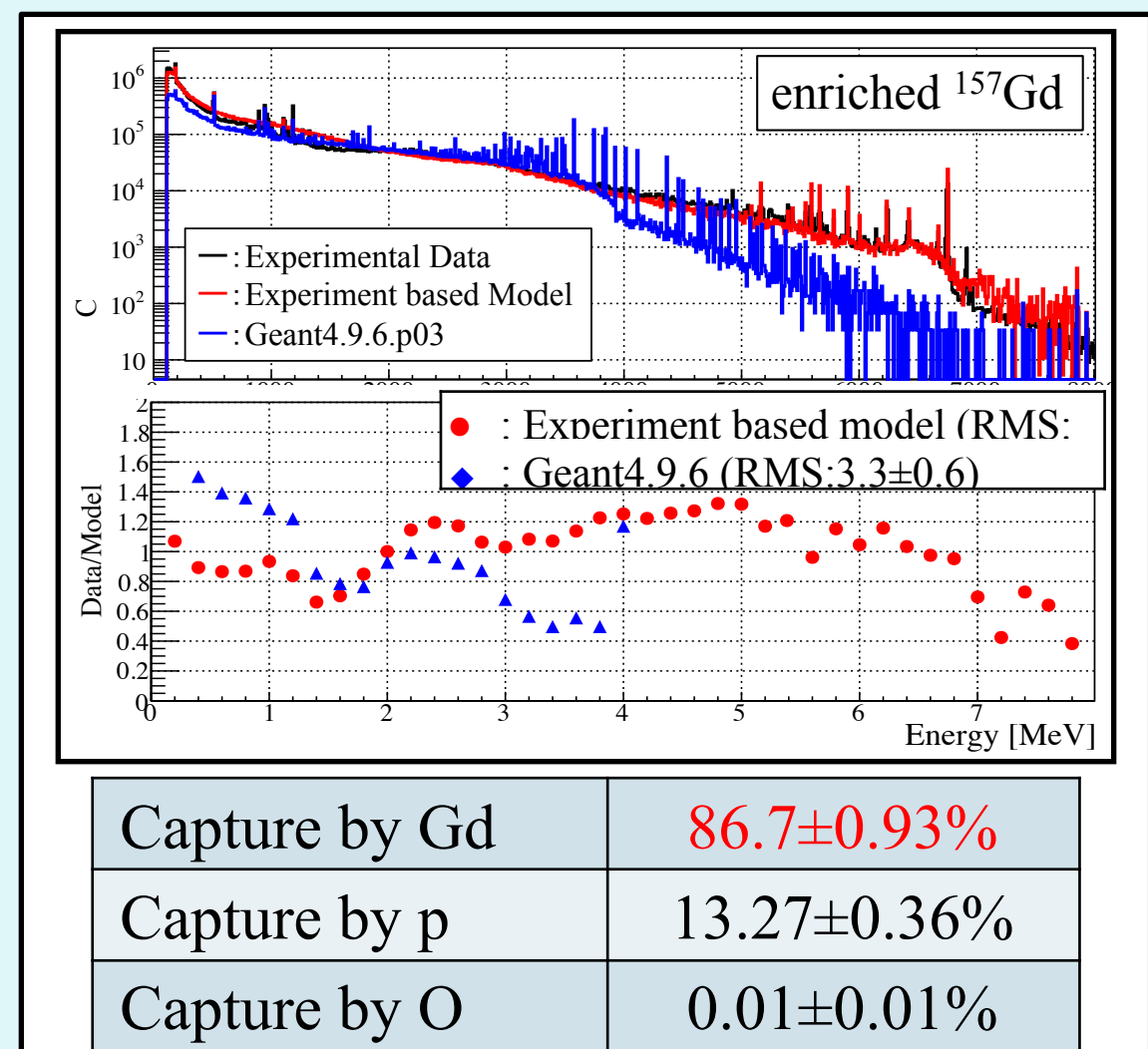
実際のSKの実験データを用いて調整する前に、SKDetSimを用いて電子の挙動の比較を行った。（2018年秋季大会で萩原さんが報告）

•Gdの中性子捕獲ガンマ線モデルの導入

Gdの中性子捕獲からのガンマ線放出の実験から得られた新モデル[1]を導入し、挙動を確認した。

（2018年年次大会で萩原さんが報告）

	SKDetSim		SKG4	
	Mean	Sigma	Mean	Sigma
光子発生数	1950	162.3	1900	165.6
PMT Hit数	760	68.1	740	66.9



光子の評価

7

SKDetSimと光子の吸収、散乱、反射について比較し、評価した。

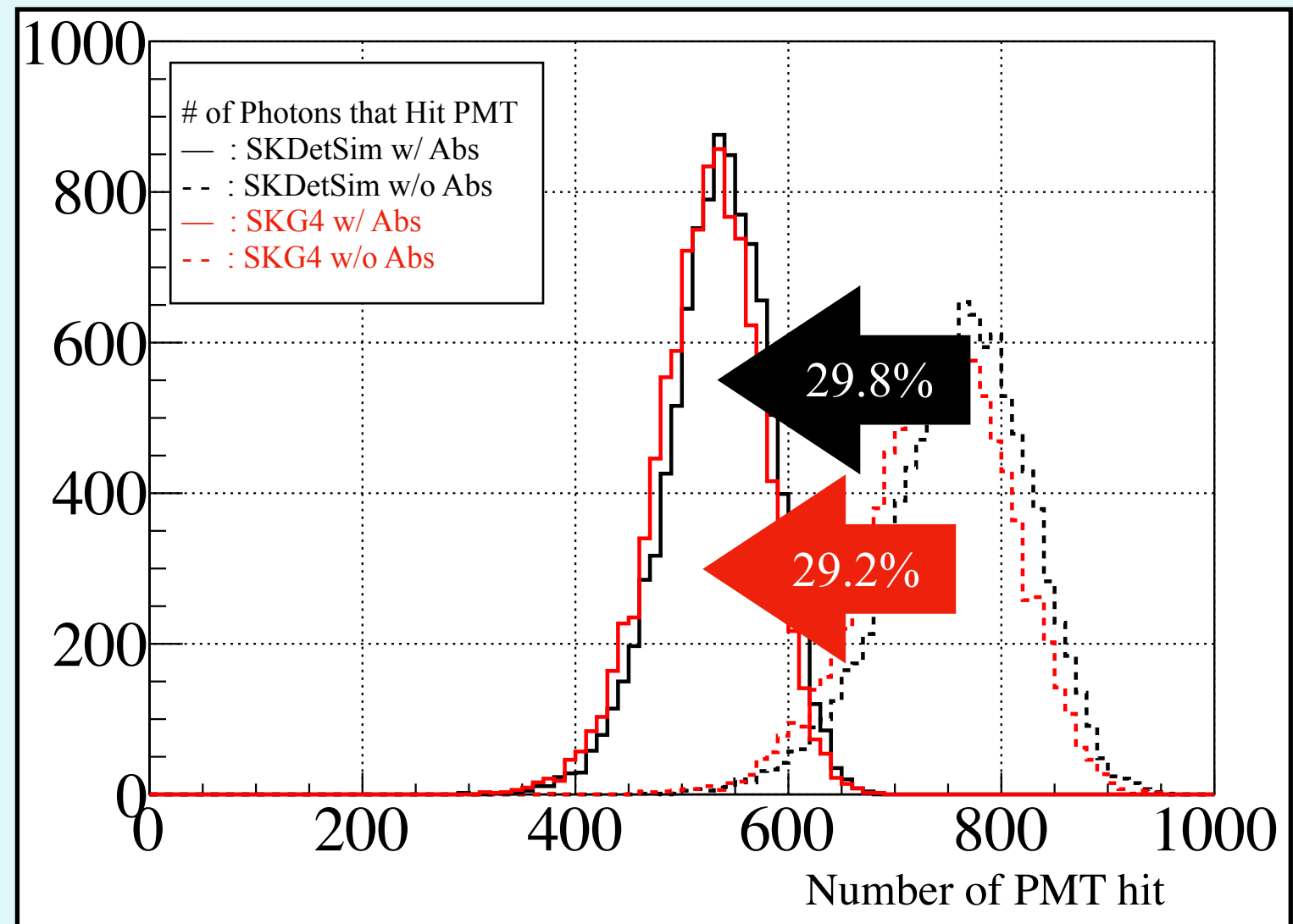
光子の吸収・散乱

8

•光子の吸収

SKDetSimで導入されているものとGeant4の吸収過程の計算手法は同じである。物質中での光子の吸収過程はSKDetSimで用いられている、測定データから得られた吸収長テーブルを利用した。

10 MeV 電子からのチェレンコフ光のPMTのHit数を用いて吸収の効果を評価した。



光子の吸収・散乱

9

•光子の散乱

散乱の定義はSKDetSimとGeant4で異なる。

	SKDetSim	SKG4
レイリー散乱	Symmetric Scat.	G4OpRayleigh
ミー散乱	Asymmetric Scat.	G4MieHG

SKDetSimの定義を以下のように再定義し、SKDetSimの散乱長テーブルを利用しテーブルを作成した。

== 定義 ==

Symmetric Scat：二つの散乱の対称部分の和（Geant4におけるレイリー散乱とミー散乱の対称部分）

Asymmetric Scat.：ミー散乱の前方部分

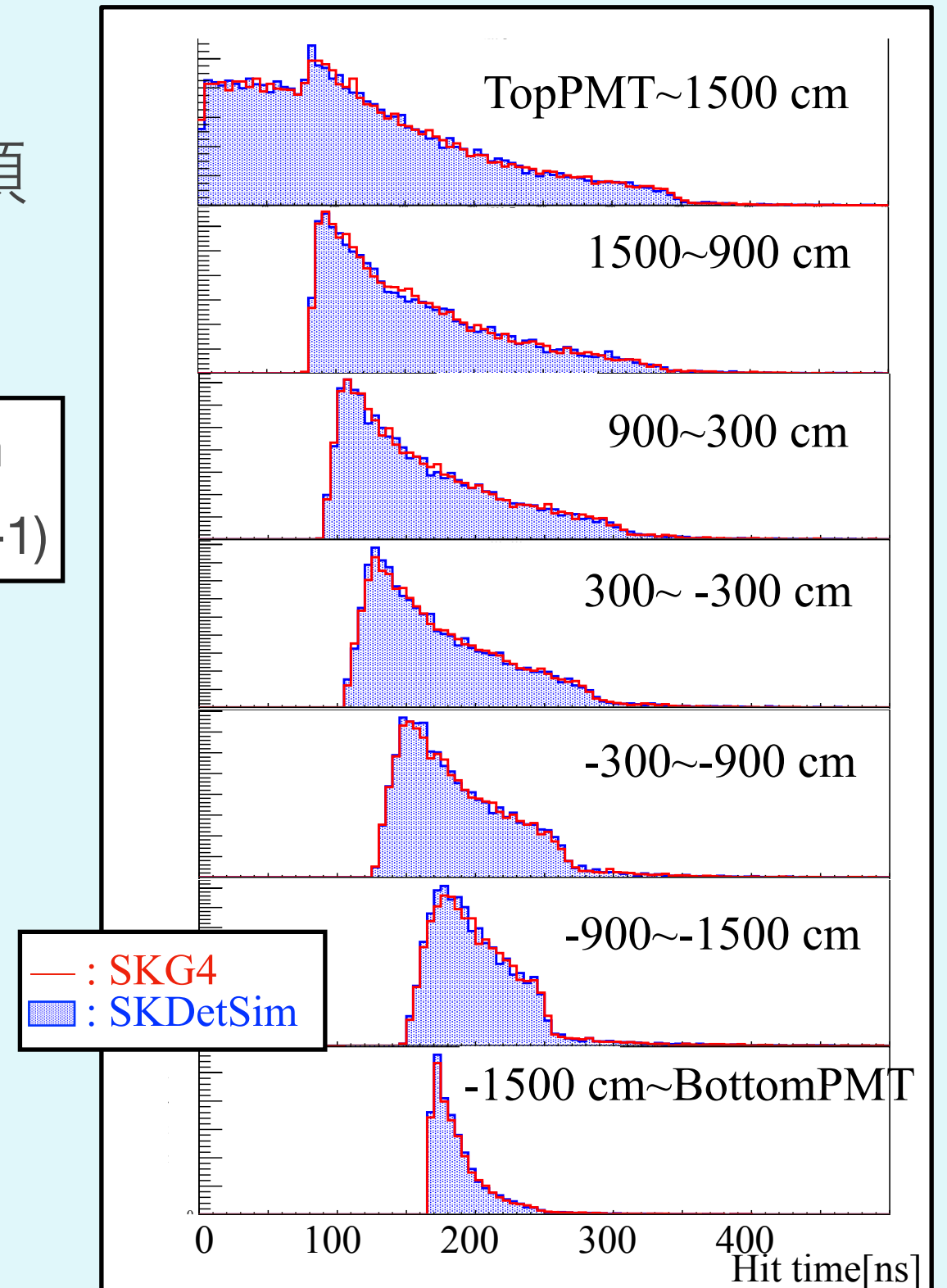
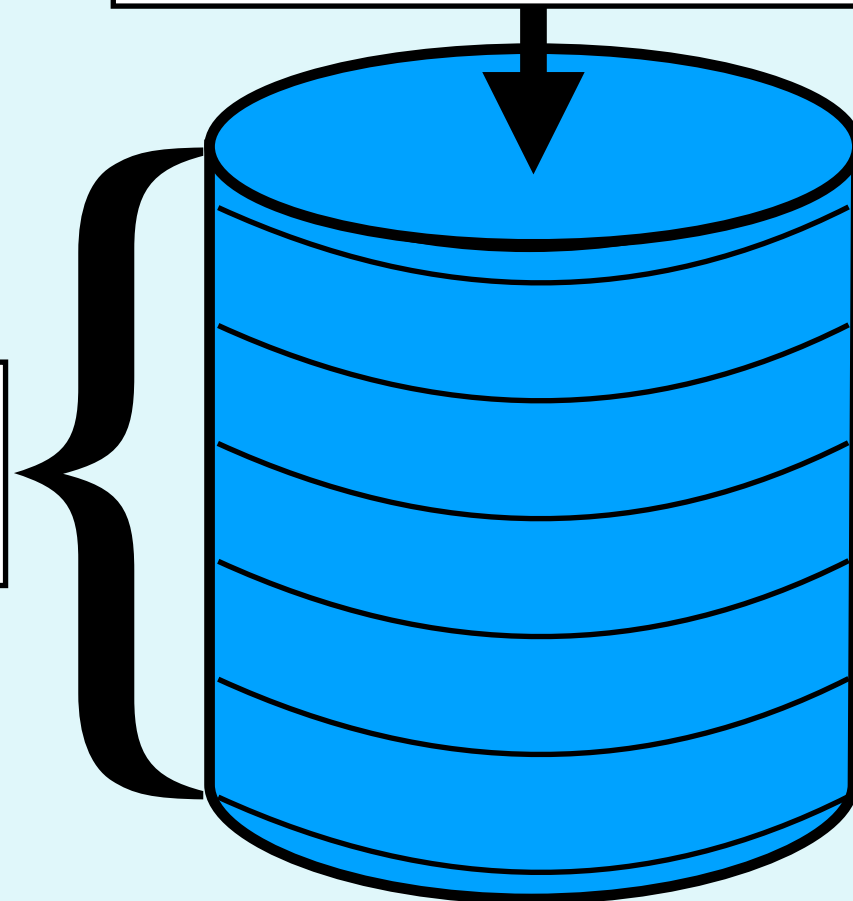
光子の吸収・散乱

10

PMTのヒット区域ごとの時間分布で
SKDetSimと比較し、光学光子の波長領域
で良い一致を得た。

光子 波長 350~650 nm
位置(0,0,1800)、方向(0,0,-1)

Z軸方向に7つの
領域に分けて評価



例：波長350 nm

光子の反射

11

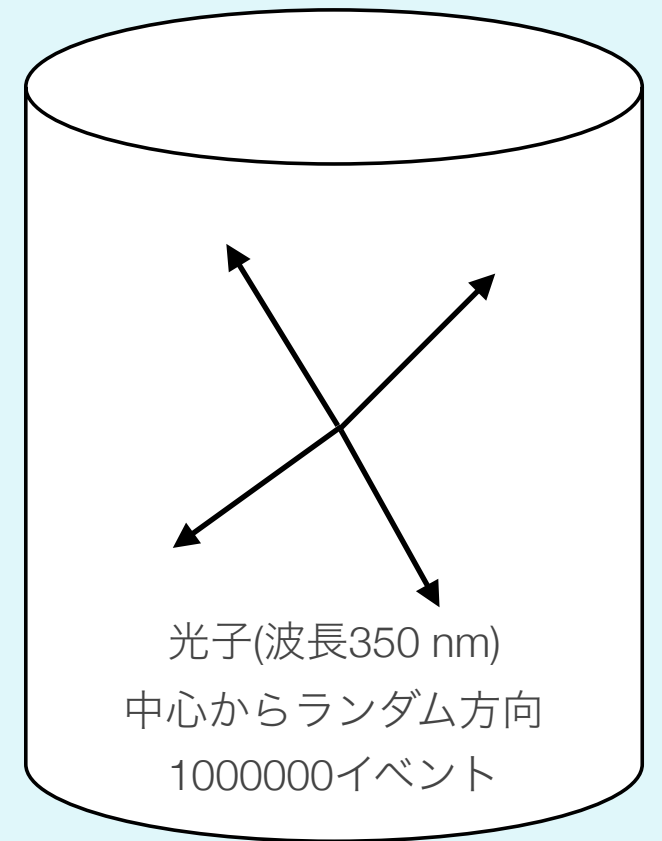
•ブラックシートでの反射

SKのブラックシートに~4%の反射を考慮する。

Geant4では物質を決めると誘電率から反射率を決定するが、ブラックシートの複素誘電率が分かっていない。

光子のブラックシートでの相互作用について

Geant4の境界条件を用いず、偏光により反射率を計算した。



	SKDetSim	SKG4
BS反射無	420500	420447
BS反射有	427734	428656
増加率	1.7%	1.9%

光子の反射と量子効率

12

●PMTでの反射

PMTの物質中、光電面の複素屈折率、厚さがわかっていない。

SKDetSimではSKでの校正データに多層膜モデルを考慮し、PMT表面での反射率を計算している。

今回はGeant4の境界条件を用いず、この手法をもとに計算した。

また測定値をもとにSKDetSimと同様の量子効率を考慮した。

4 mm	Water	n~1.33
	Glass	n~1.474
11.5 nm	Bialkali	n~??
	Vacuum	n=1.0

	SKDetSim	SKG4
PMT反射無	420500	420447
PMT反射有	194628	193890
減少率	46.3%	46.1%

まとめ

13

•目的

Geant4ベースのSK検出器シミュレーションSKG4を開発する。

•結果

現在のシミュレーション（SKDetSim）との比較を行った。

光子の散乱、吸収プロセスに関してGeant4のモデルを用いてSKDetSimと良い一致を得ることができた。

光子のブラックシート、PMT表面での反射をGeant4のモデルに外挿してSKDetSimを再現することができた。

•今後

DAQ、トリガー部分のシミュレーションの構築

SKの実際の校正データを用いた調整

Back Up

14



光子の反射

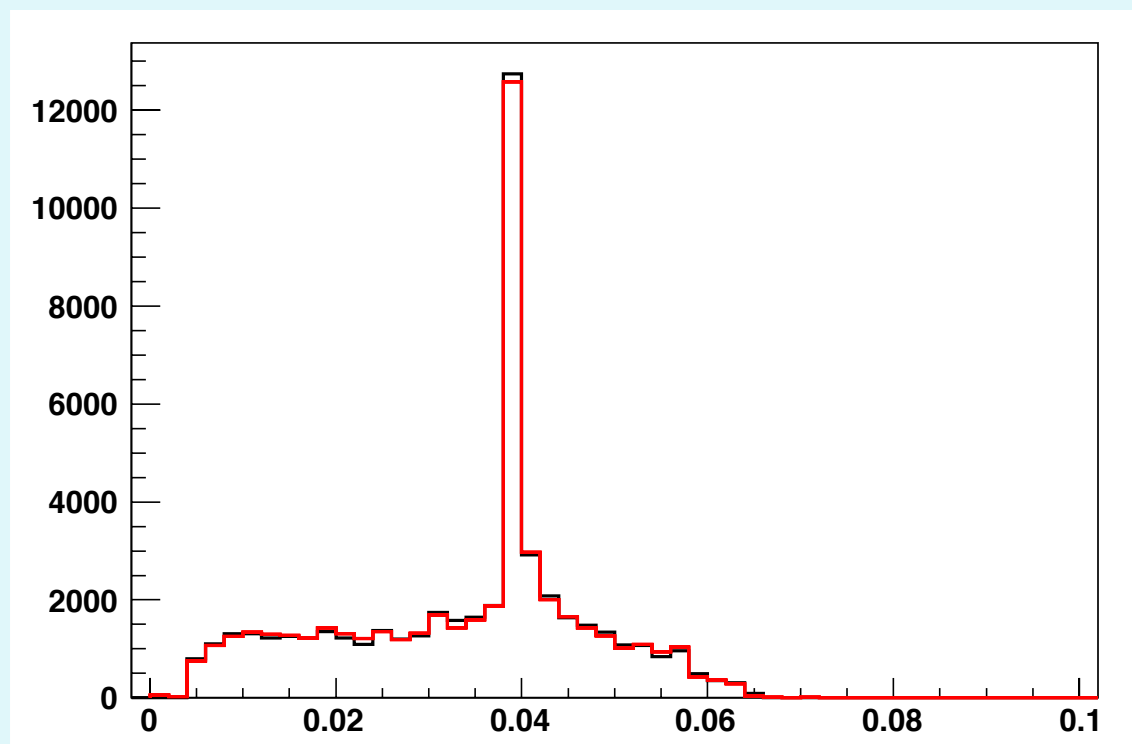
15

•ブラックシートでの反射

SKのブラックシートに~4%の反射を考慮する。

Geant4では物質を決めると誘電率から反射率を決定するが、ブラックシートの詳細な性質がわかっていない。

光子のブラックシートでの相互作用についてGeant4の境界条件を用いず、偏光により反射率を計算した。



	SKDetSim	SKG4
BS反射無	420500	420447
BS反射有	427734	428656
増加率	1.7%	1.9%

これまでの結果

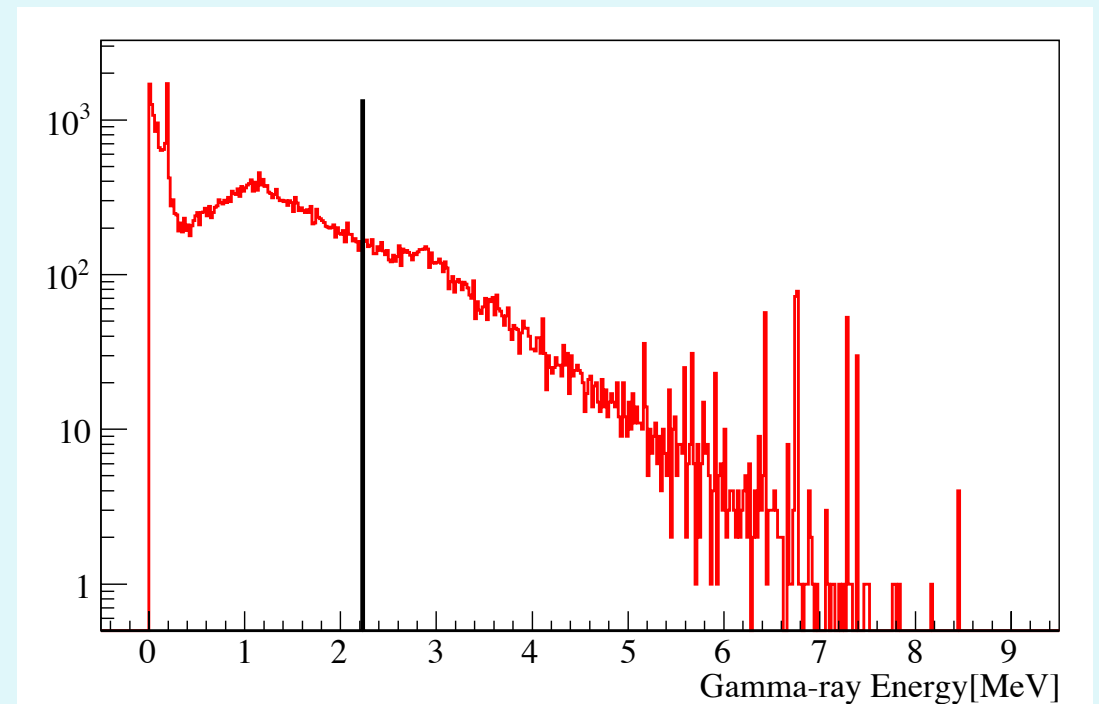
16

- SKDetSimを用いた物理モデルの比較

実際のSKの実験データを用いて調整する前に、SKDetSimを用いて電子の挙動の比較を行った。

- Gdの中性子捕獲ガンマ線モデルの導入

SK-Gdでの物理で重要なGdの中性子捕獲からのガンマ線における新モデルを導入し、挙動を確認した。



	SKDetSim		SKG4	
	Mean	Sigma	Mean	Sigma
光子発生数	1950	162.3	1900	165.6
PMT Hit数	740	68.1	760	66.9

Capture by Gd	86.7±0.93%
Capture by p	13.27±0.36%
Capture by O	0.01±0.01%

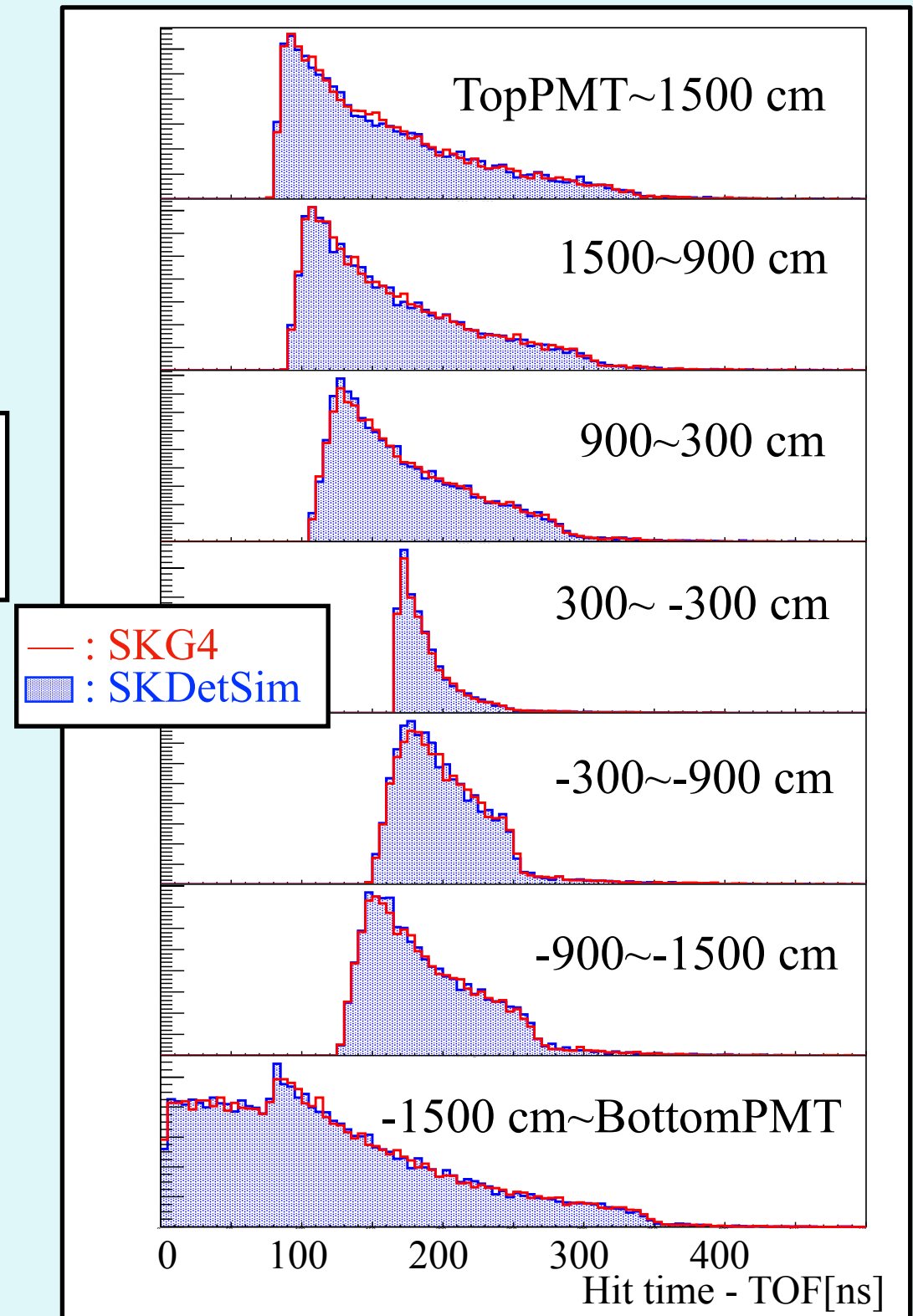
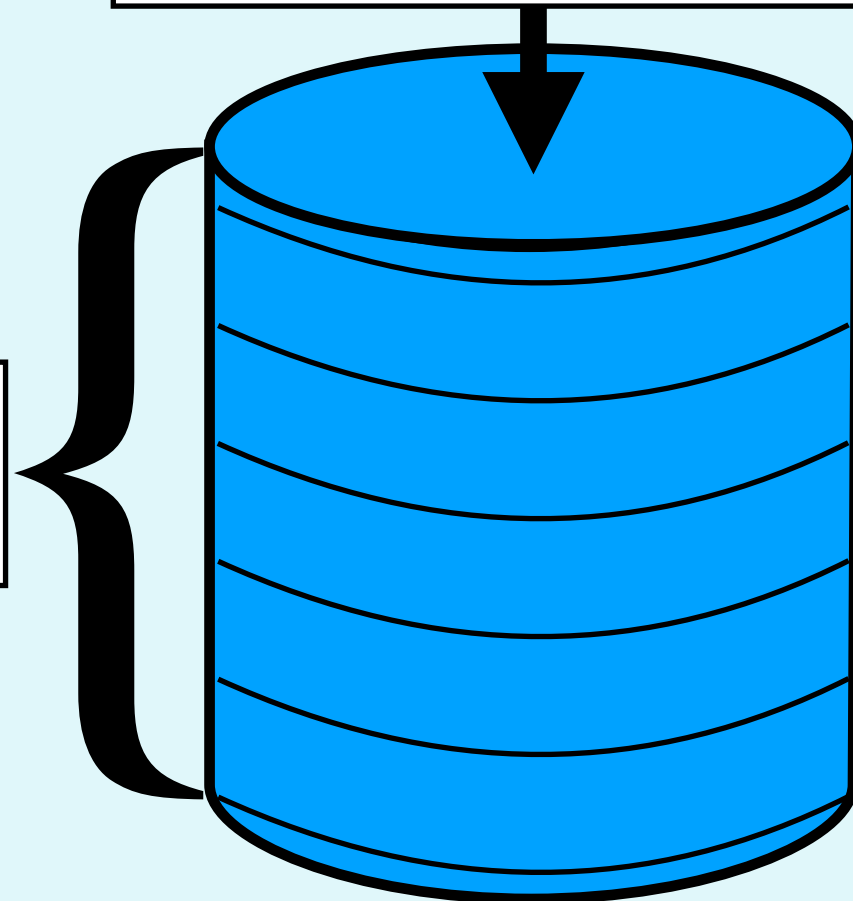
光子の吸収・散乱

17

PMTのヒット区域ごとの時間分布で
SKDetSimと比較し、光学光子の波長領域
で良い一致を得た。

光子 波長 350~650 nm
位置(0,0,1800)、方向(0,0,-1)

Z軸方向に7つの
領域に分けて評価



例：波長350 nm

ブラックシートの反射

18

チェレンコフ光の偏光は円錐に垂直な直線偏光

偏光の入射面を垂直成分(s成分)と並行成分(p成分)に分けると、
反射率Rは以下のようにかける

$$R(\theta) = C_p R_p(\theta) + C_s R_s(\theta)$$

$$C_p + C_s = 1$$

p偏光 ε_p は、

$$\vec{\varepsilon}_p = \frac{1}{\sin\theta}(\vec{n} + \cos\theta \cdot \vec{s})$$

と書ける。

最終的に

$$\Rightarrow C_p = \cos^2\psi \quad (\psi : \text{偏光とp偏光の間の角度})$$