



スーパーカミオカンデにおけるGeant4ベースのシミュレーション を用いた水中での光伝播モデルの開発と性能評価

多田智昭(岡大理)

小汐由介(岡大理)、他Super-Kamiokande Collaboration

2022年3月15日 日本物理学会 第77回年次大会

1. スーパーカミオカンデ (SK)

2. 研究目的

3. シミュレーション

4. T-ToF分布

5. 結果

6. まとめ・今後の展望

スーパーカミオカンデ (SK)

検出器

▶ 大型水チェレンコフ検出器

- 岐阜県飛騨市の神岡鉱山地下約1,000mに建設

構造

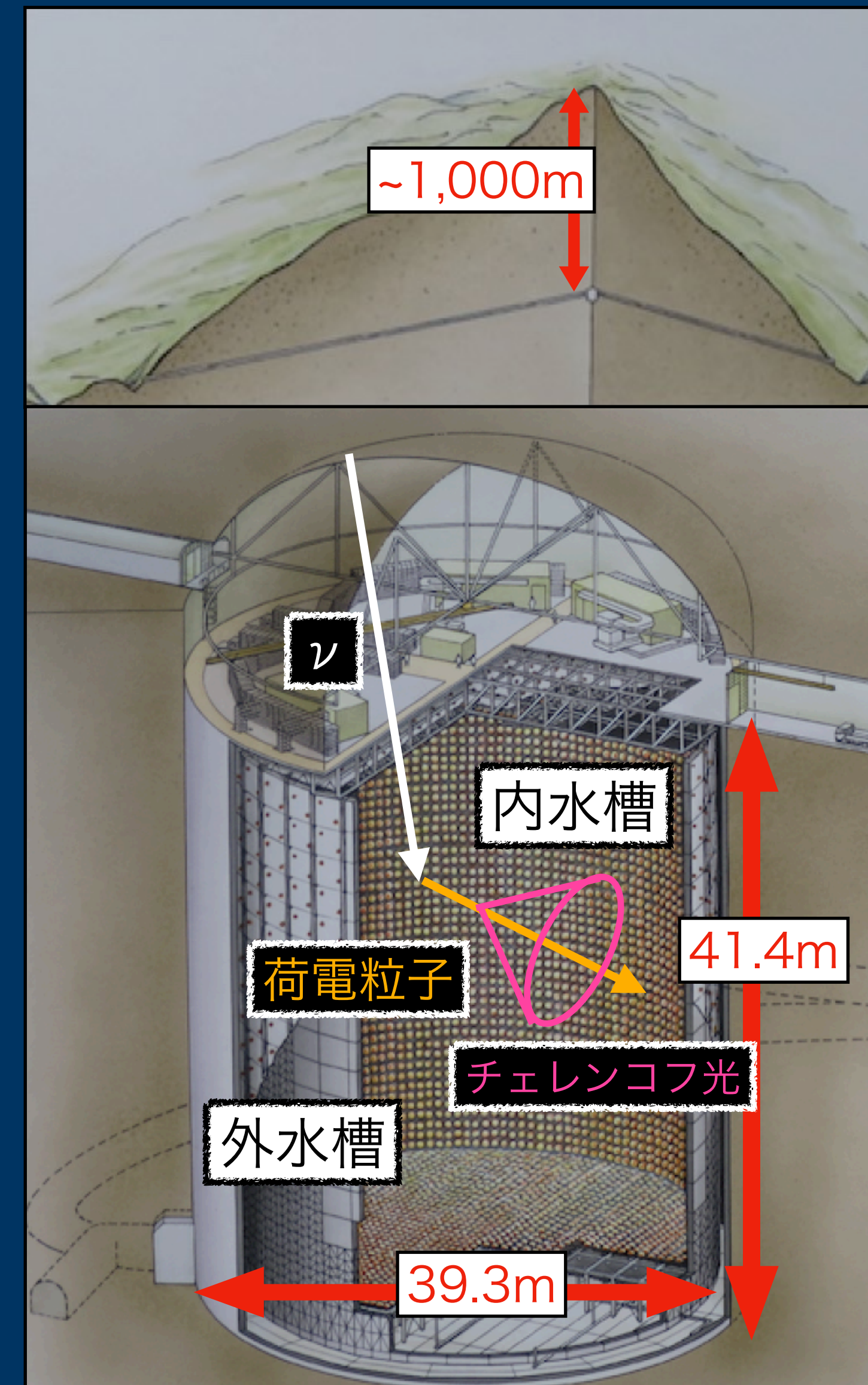
▶ 約5万トンの超純水が入った円筒形タンクと光電子増倍管(PMT)

- 内水槽・・・直径20インチ(50cm)のPMTを約11,000本設置
- 外水槽・・・直径8インチ(20cm)のPMTを約2,000本設置

検出方法

▶ ν の反応で生成した荷電粒子から放出されるチェレンコフ光をPMTで検出

- Hitパターンはリング状

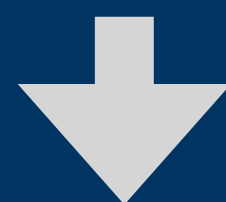


スーパーカミオカンデ (SK)

Event display

▶ 粒子識別 + 到来方向・エネルギーの決定

▶ リングの周りにもHit



⦿ 水分子に散乱された光子

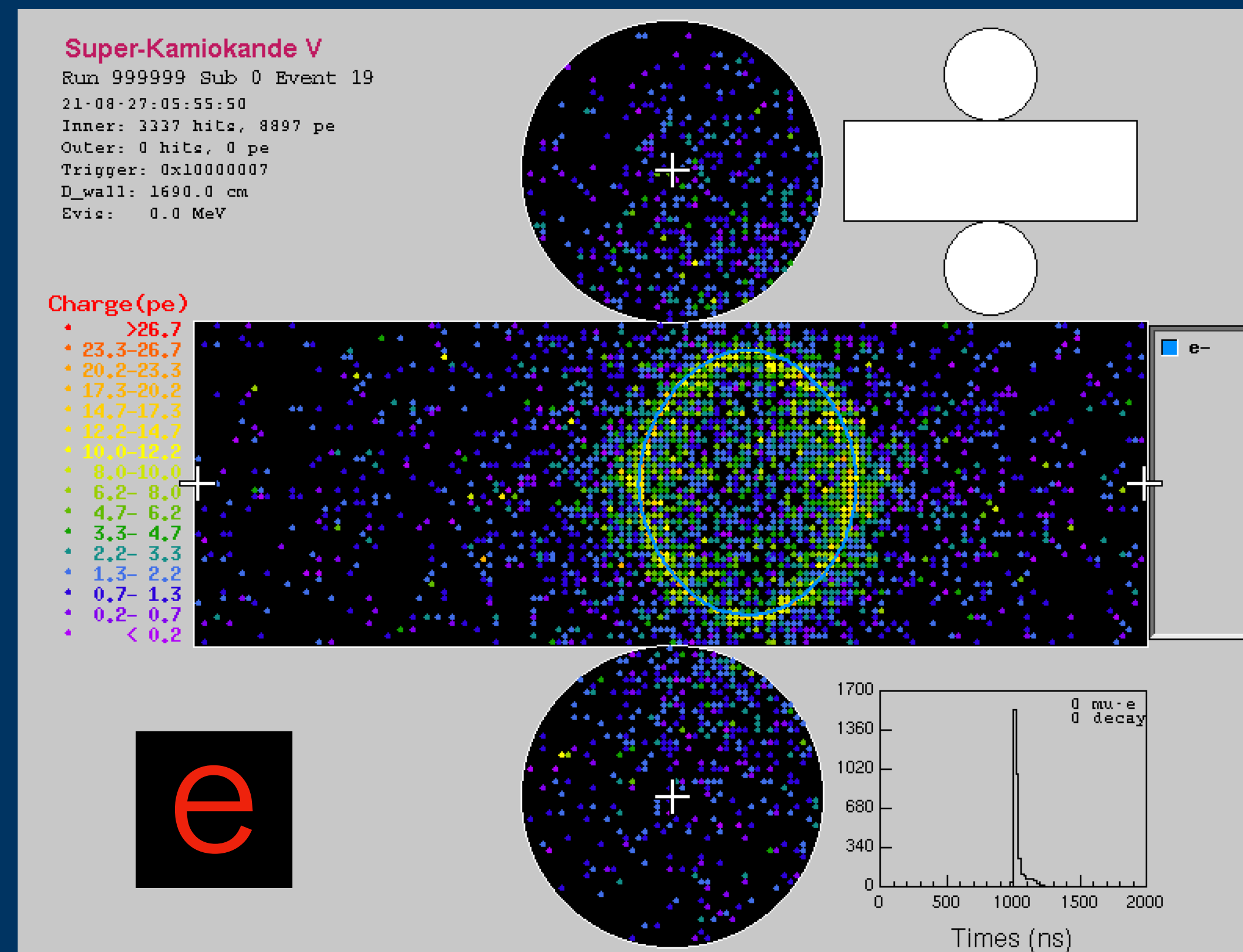
⦿ PMT表面やアクリルカバーで反射した光子

+

⦿ 水分子に吸収された光子 (Event displayでは見えない)



水中での光子の吸収散乱や反射を正しく理解し見積もることは必要不可欠



目的

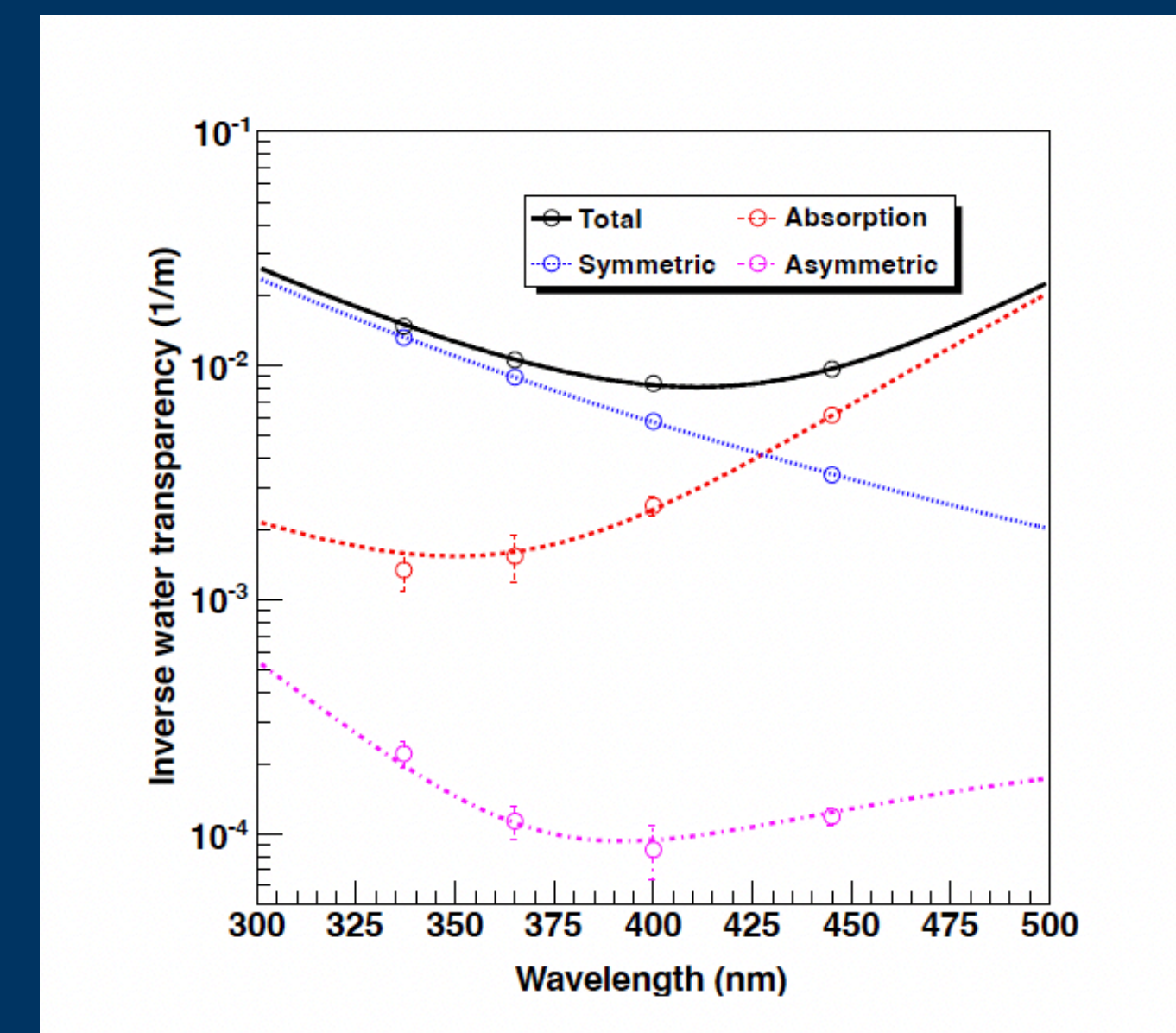
水中での光子の伝播を正確に理解し、最適な**吸収散乱パラメータ**を決定する

方法

- ▶ タンク内にレーザーを入射し取得した実際のデータ
- ▶ 同様の条件で作成したレーザーシミュレーション(MC)
- 👁 データとMCのHit時間分布を評価し、吸収散乱パラメータを決定

水の吸収散乱パラメータ

- ▶ $\alpha_{abs}(\lambda)$: 吸収 [1/m]
- ▶ $\alpha_{sym}(\lambda)$: 等方散乱 (レイリー散乱) [1/m]
- ▶ $\alpha_{asym}(\lambda)$: 非等方散乱 (ミー散乱) [1/m]
- 👁 SKのためにモデル化



(Calibration of the Super-Kamiokande Detector)

SKのシミュレーション (MC)

SKDETSIM

- ▶ SK観測開始から現在も使用
- ▶ 現在の水の吸収散乱パラメータはSKDETSIMで決定

SKG4

- ▶ 近年、汎用性・維持管理のため新たに構築

	シミュレーション	言語	物理モデル
SKDETSIM	GEANT3	FORTRAN	更新終了
SKG4	Geant4	C++	逐次更新 (最新)

- 👁 水中での光子の伝播モデル
- 👁 チェレンコフ光発生モデル ← 本講演の結果には関係しない

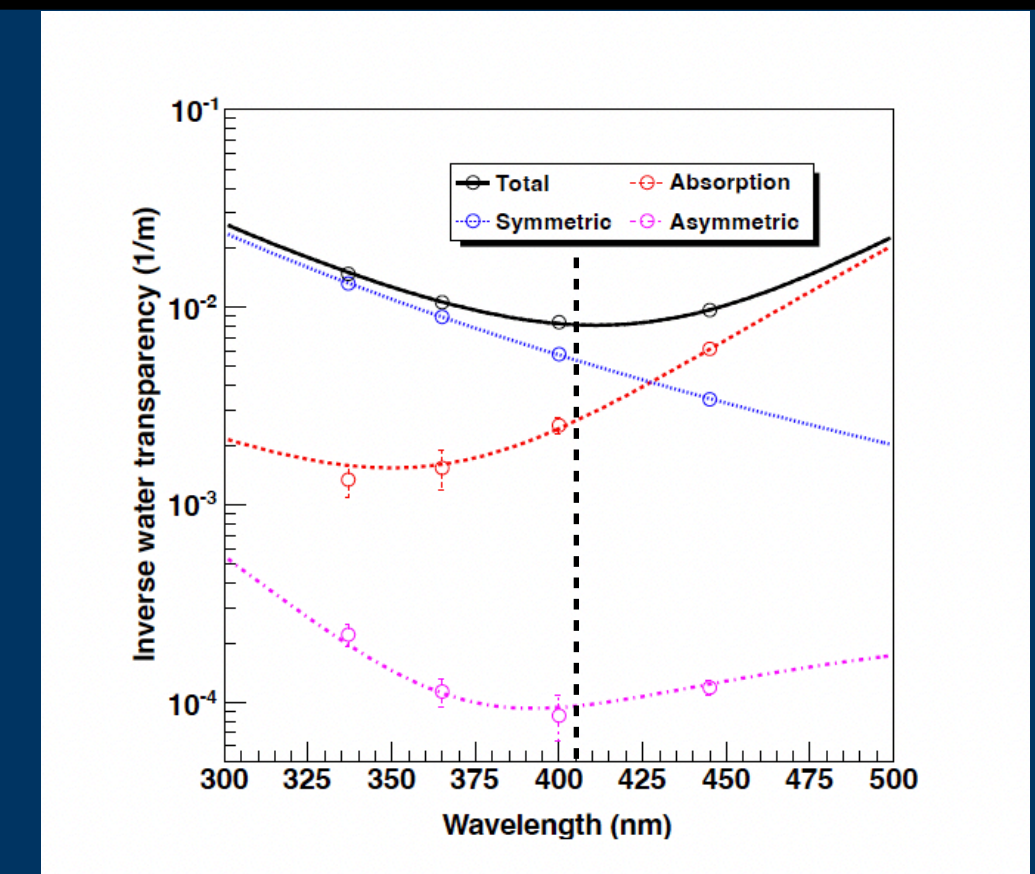
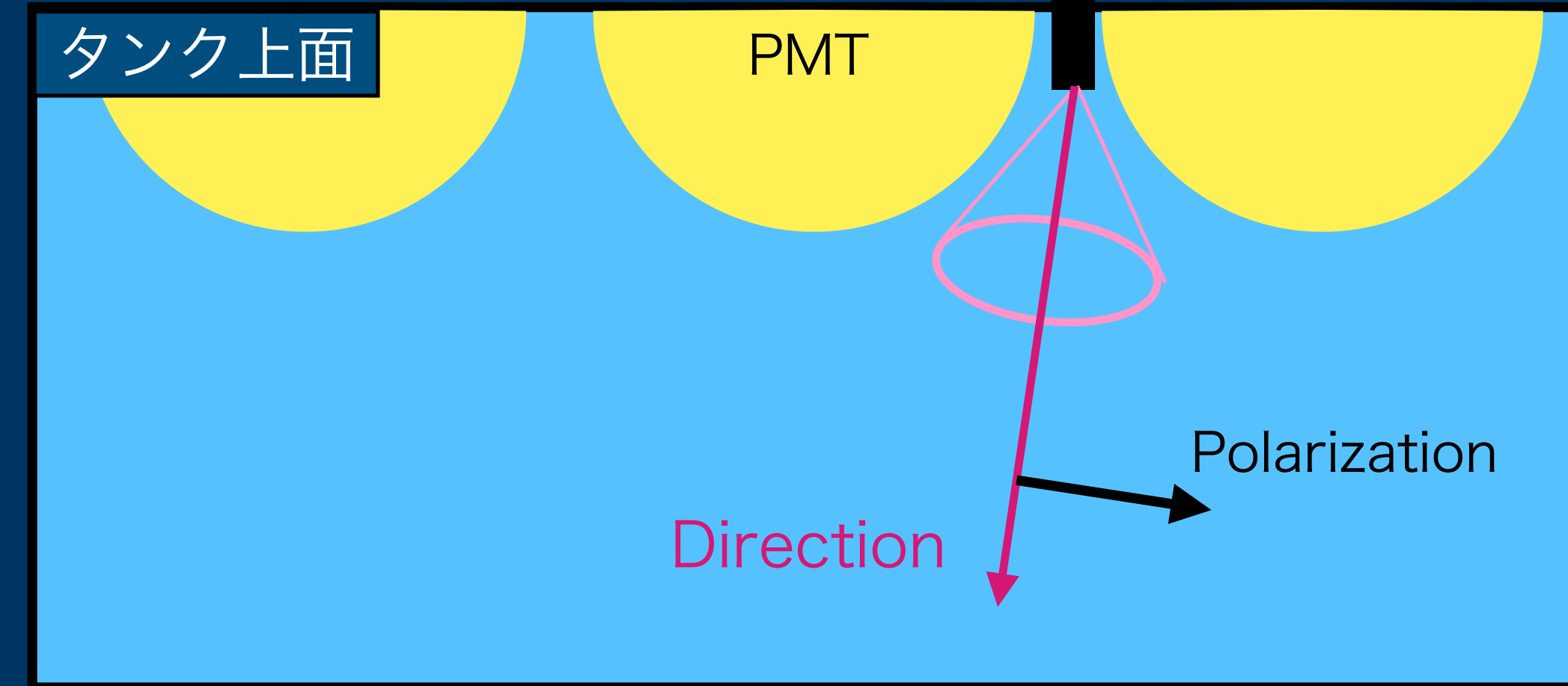
研究の最終目標はSKG4とデータの評価から吸収散乱パラメータを決定する

- ▶ 本講演ではSKDETSIMとSKG4の比較を行う

レーザーシミュレーション

タンク内に光学光子を入射

- ▶ 位置 : タンク上面
- ▶ 波長 : 全光子で一定 ($\lambda = 405\text{nm}$)
- ▶ 方向 : 下方向を中心にランダムに決定
- ▶ 偏光 : 入射方向に対して垂直な面内でランダムに決定
- ▶ 光子数 : 1 イベントは一定数入射
- ▶ イベント数 : 10万イベント



(Calibration of the Super-Kamiokande Detector)

$\lambda = 405\text{nm}$

$$\alpha_{abs}(\lambda) : \sim 10^{-3} \text{ [1/m]}$$

$$\alpha_{sym}(\lambda) : \sim 10^{-2} \text{ [1/m]}$$

$$\alpha_{asym}(\lambda) : \sim 10^{-4} \text{ [1/m]}$$

👁 吸収散乱パラメータはSKDETSIMとSKG4で同じ

👁 405nmでは $\alpha_{sym}(\lambda) > \alpha_{abs}(\lambda) > \alpha_{asym}(\lambda)$

T-ToF分布

Hit時間からToFを引いた時間

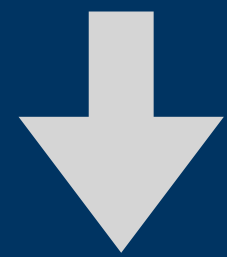
▶ ToF：図の点線を光子が進む時間

👁 PMT間の距離

👁 始点：光源真下付近のPMT

👁 終点：HitしたPMT

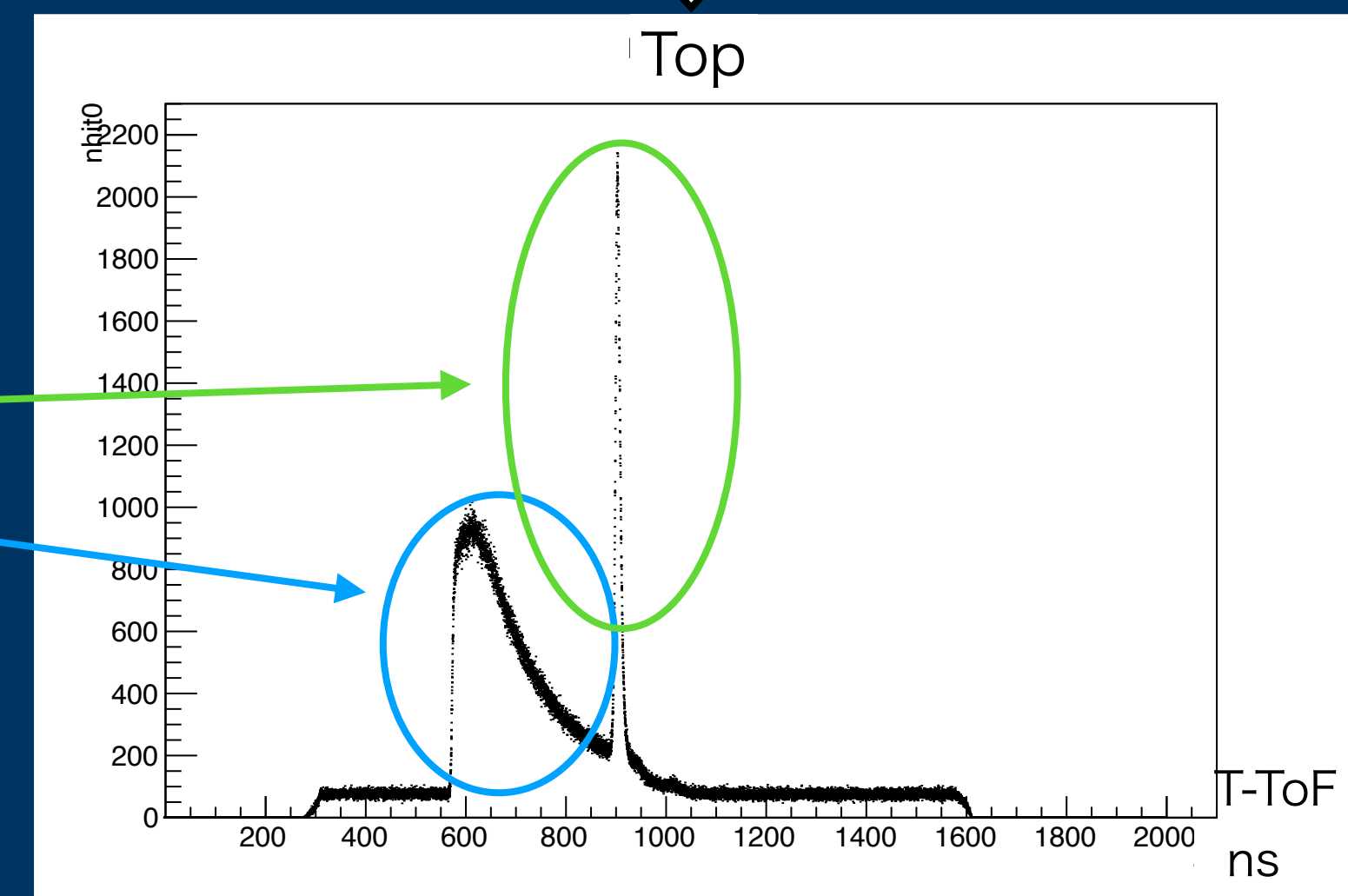
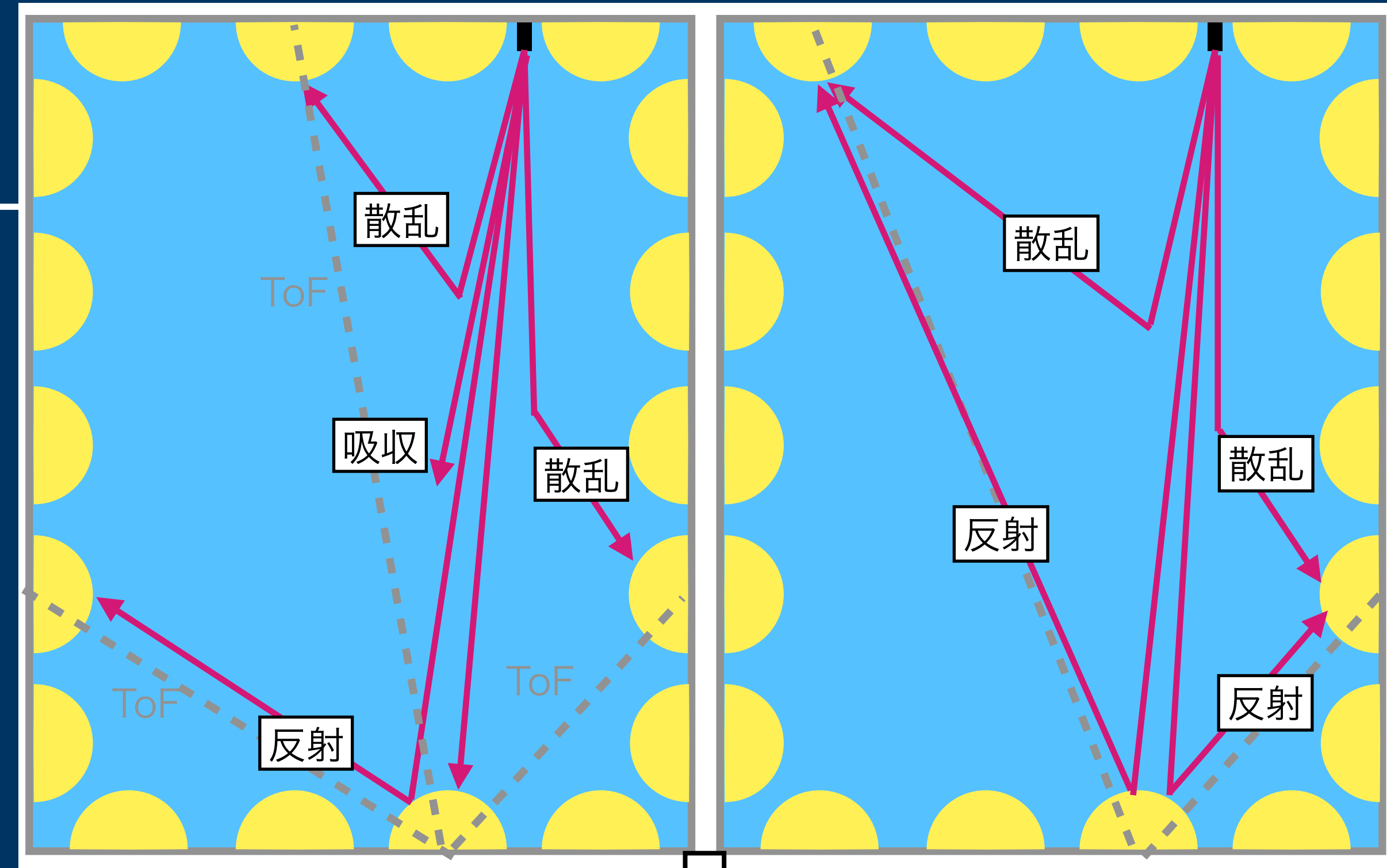
👁 ToFの始点は固定



▶ 散乱光子と反射光子を区別

👁 散乱光子

👁 反射光子



結果

黒 : SKDETSIM

赤 : SKG4

▶ PMTの位置で分類したT-ToF分布

● Top

● Barrel 1 ~ 5 (タンク側面)

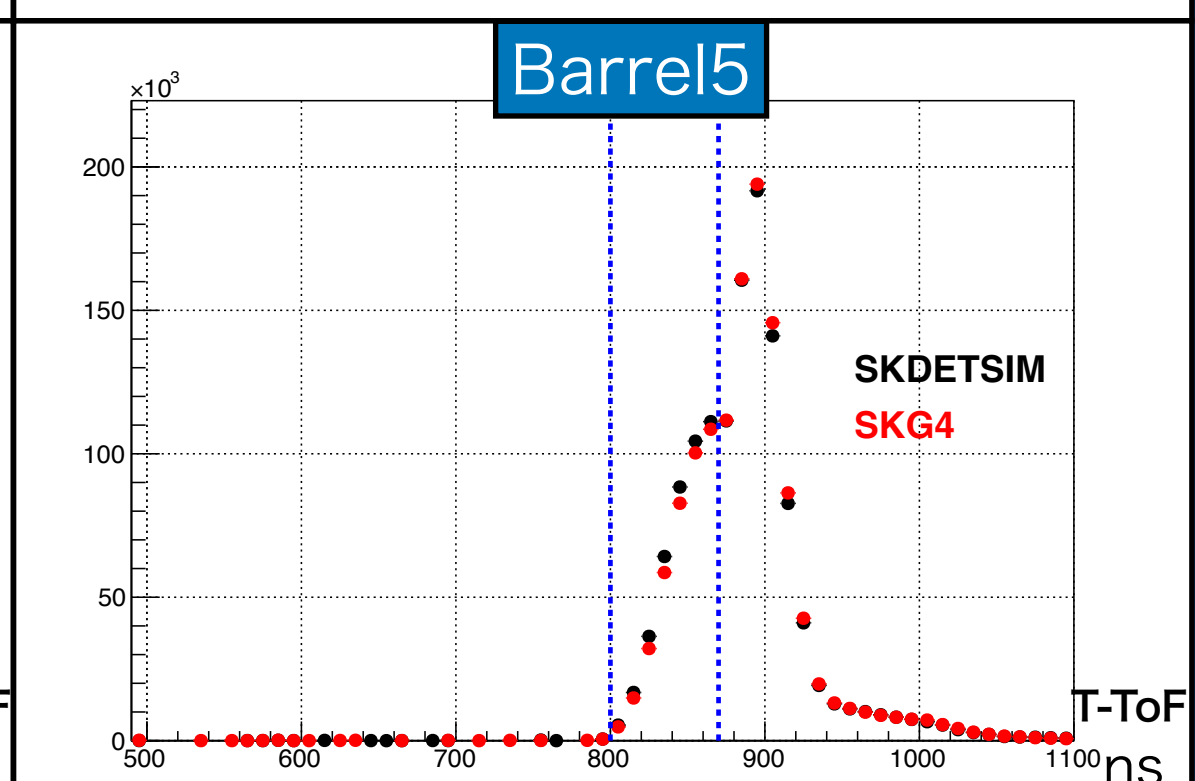
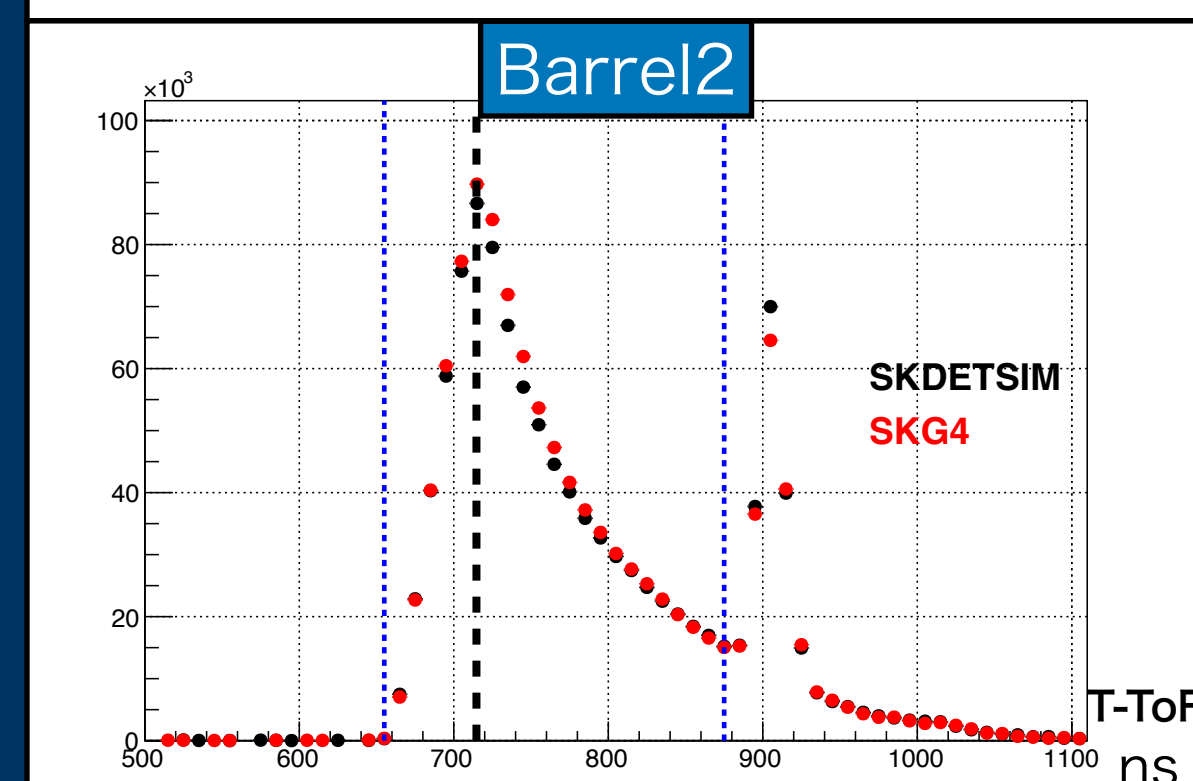
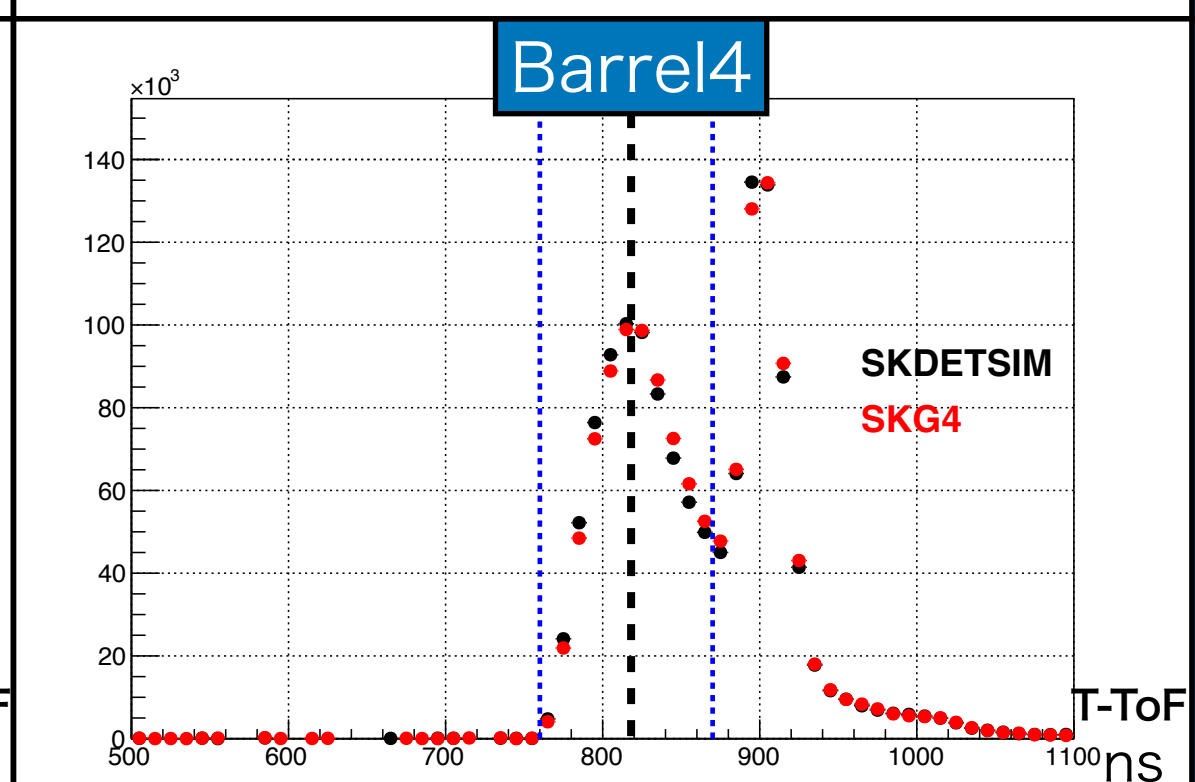
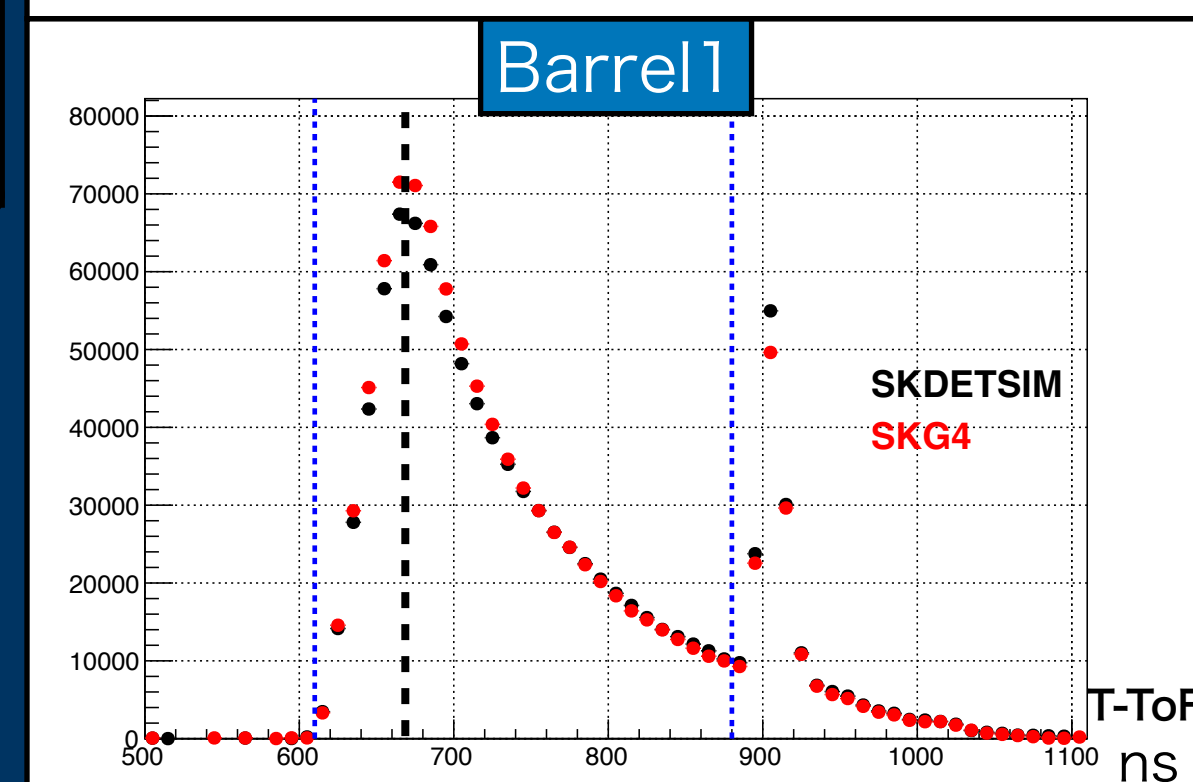
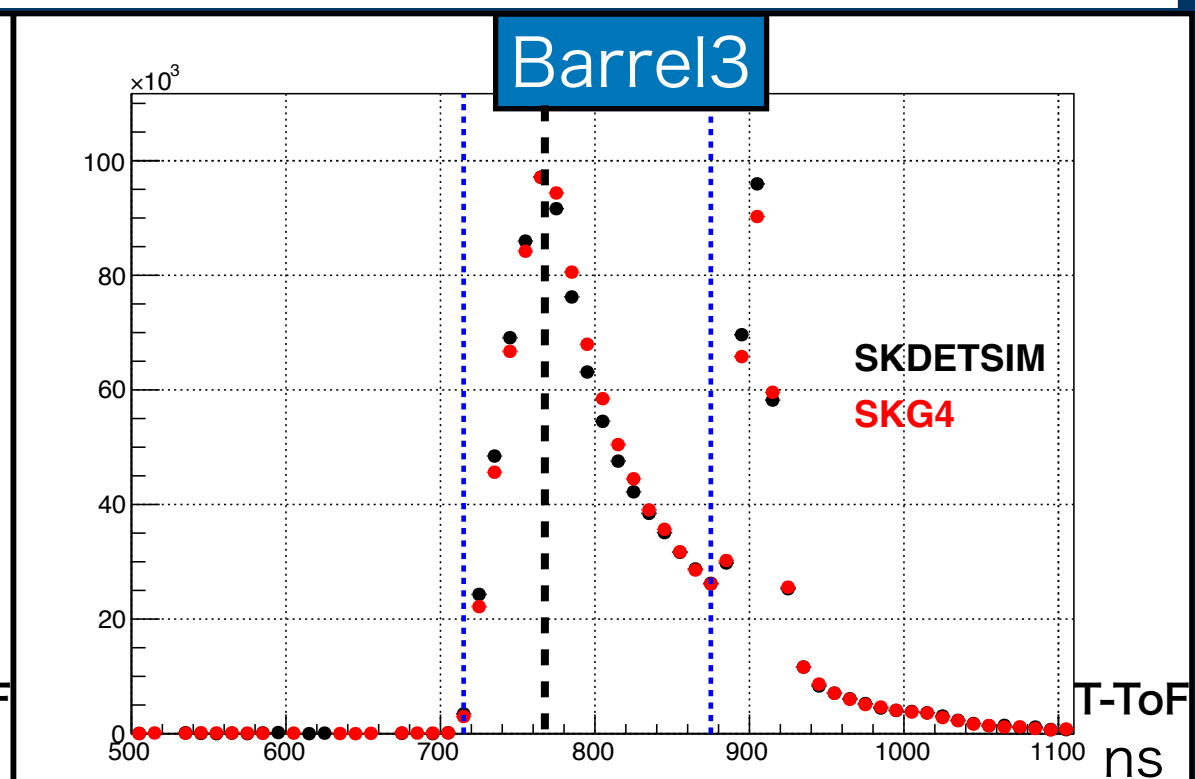
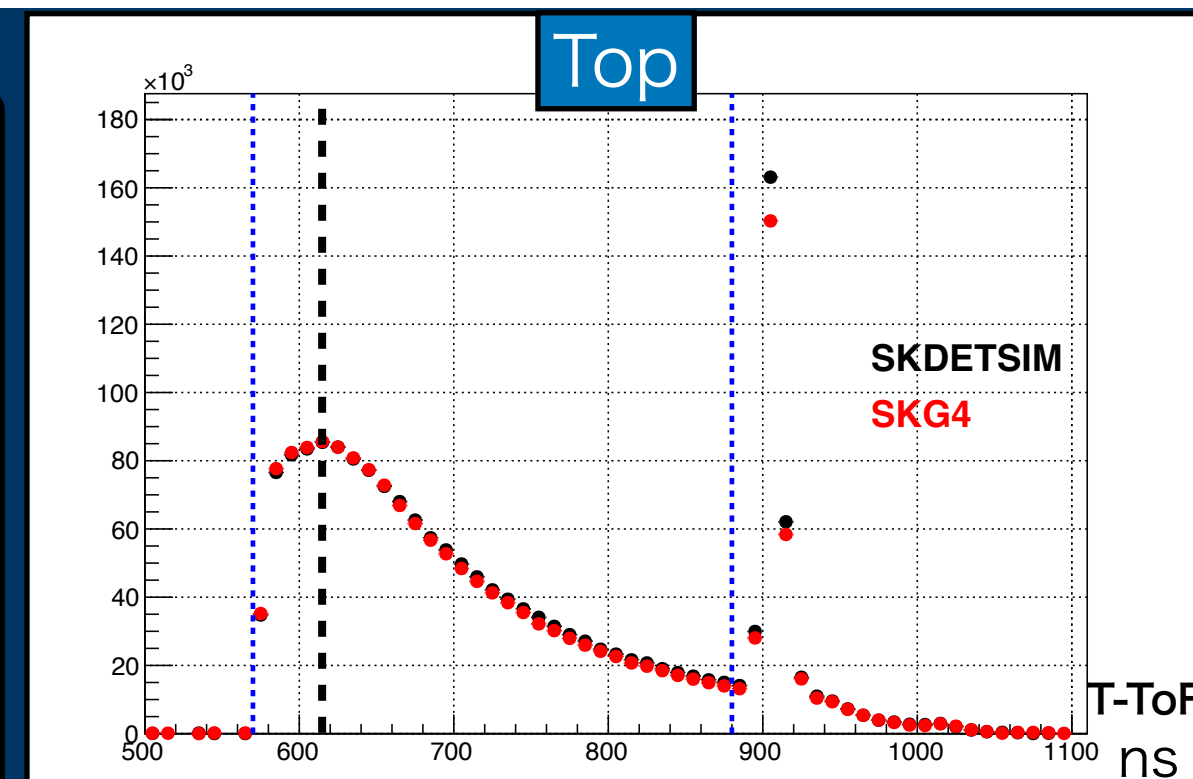
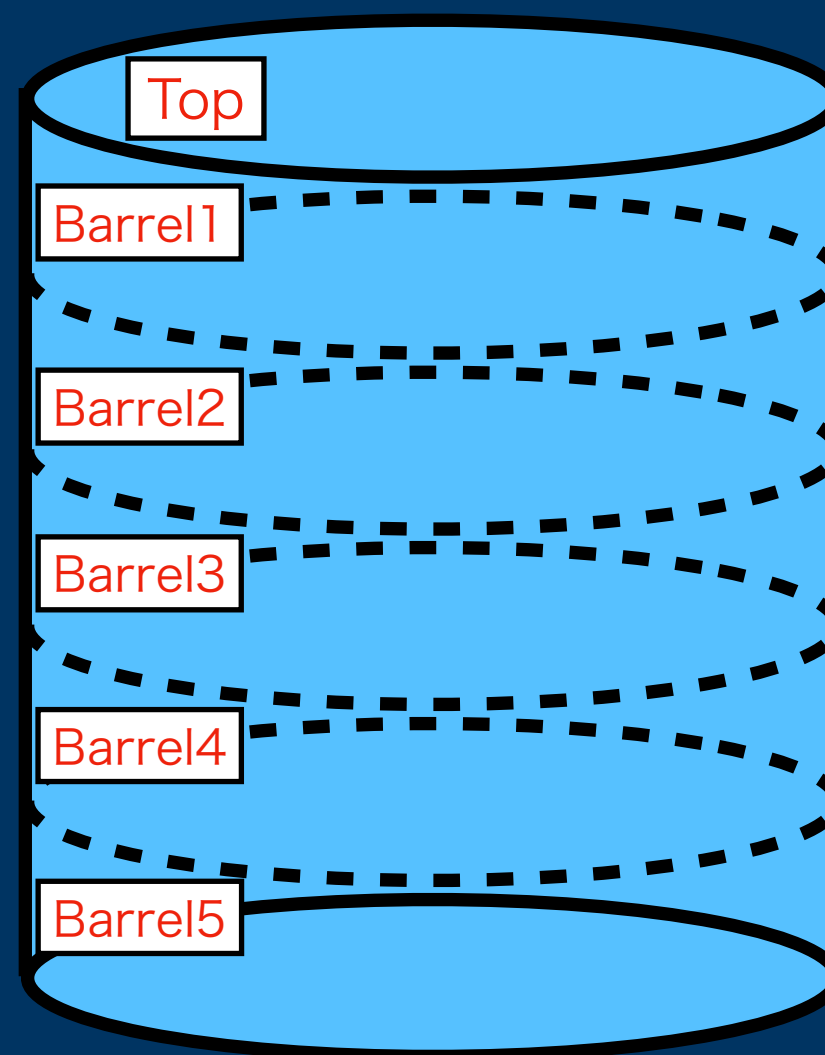
▶ 青点線の間 : 散乱成分

▶ 黒点線 : 散乱のピーク

▶ 2つの分布の形状はよく合っている

● 正しくレーザーが発射できている

▶ 発射位置(Top)から遠い程、散乱成分と反射成分に近い



結果

T-ToF分布の比 (SKG4/SKDETSIM)

▶ Top、Barrel 1、Barrel 3、Barrel 5

Top

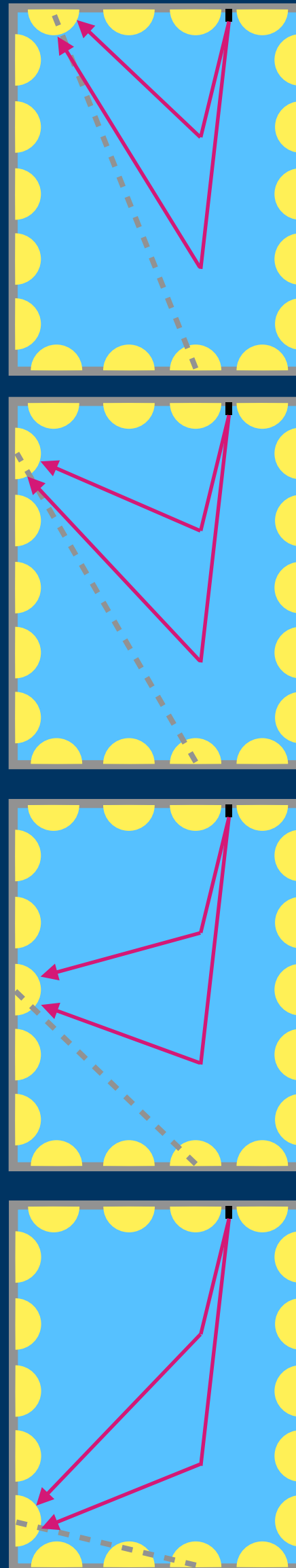
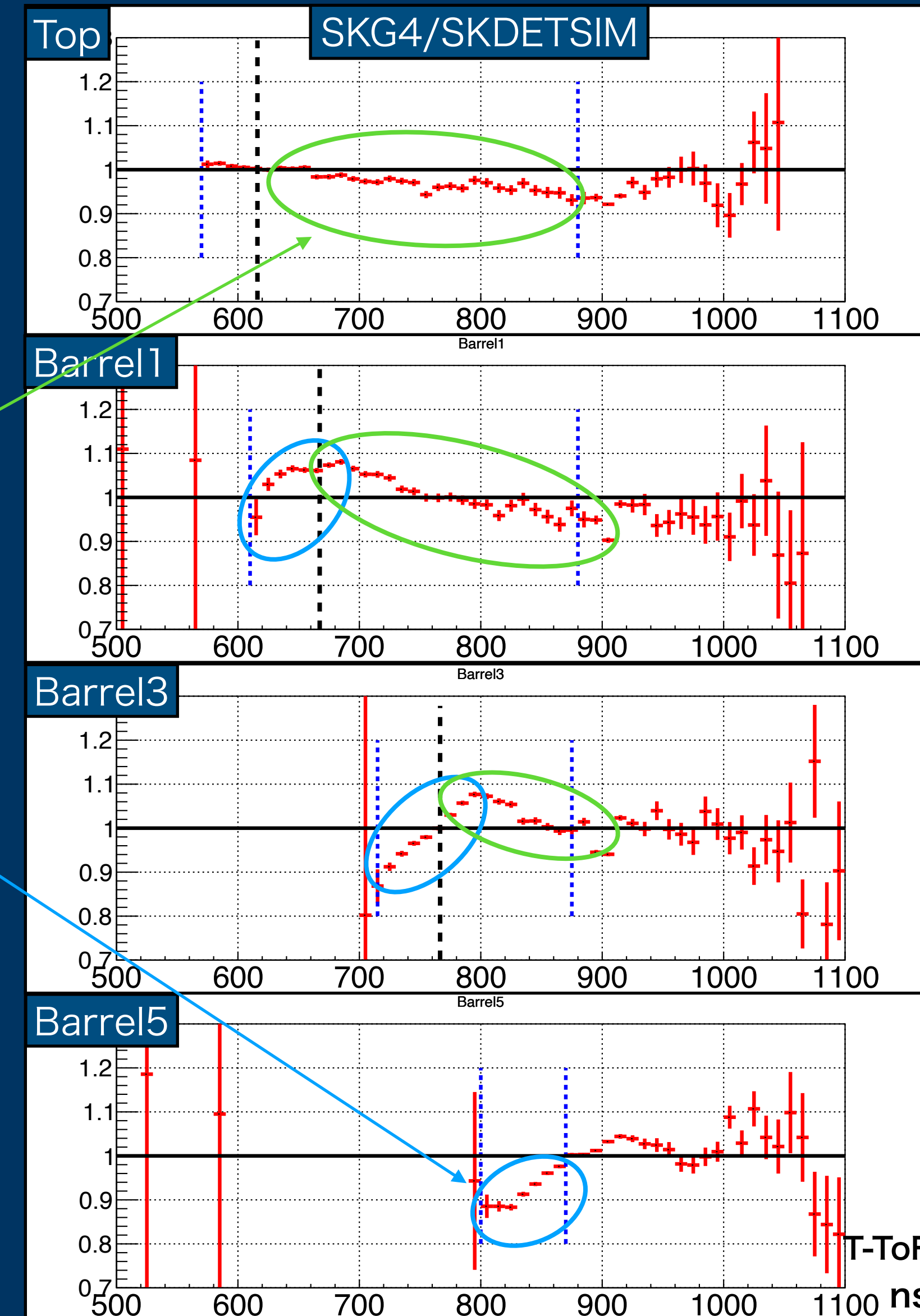
- ▶ 等方散乱の後方成分が支配的
- 👁️ 時間とともにSKG4のHitが相対的に減少 (～10%)

Barrel 5

- ▶ 非等方散乱と等方散乱の前方成分が支配的
- 👁️ 時間とともにSKG4のHitが相対的に増加 (～15%)
- 👁️ 非等方散乱の角度分布が異なっていることが原因？

Barrel 1 ～ 4

- ▶ 等方散乱と非等方散乱 (前方成分+後方成分)
- 👁️ 両方の時間依存性が現れている



まとめ・今後の展望



研究目的

- ▶ 水中での光の伝播を正しく理解し、最適な水の吸収散乱パラメータを決定する
 - 👁️ 吸収・等方散乱・非等方散乱の3つのパラメータ

研究方法

- ▶ MCとデータを評価し、パラメータを決定

シミュレーション (MC)

- ▶ SKDETSIMとSKG4
- ▶ 研究の最終目標はSKG4とデータの比較からパラメータを決定
- ▶ 本講演ではSKDETSIMとSKG4の比較を行った

結果 (T-ToF分布)

- ▶ HitしたPMTの位置(Top, Barrel1~5)で分類して分布の比較
- ▶ 後方散乱成分は時間とともにSKG4のHitが相対的に減少 (～10%)
- ▶ 前方散乱成分は時間とともにSKG4のHitが相対的に増加 (～15%)
 - 👁️ 非等方散乱(前方散乱)の角度分布が異なることが原因？

今後の展望

- ▶ SKG4とSKDETSIMの違いの究明と理解 (前方散乱成分・後方散乱成分の時間依存性)
- ▶ SKG4とデータの比較からパラメータの決定 → 従来の決定方法で良いのか検討

Back up

SK-Gd実験とMC



SK-Gd実験 (2020年7月～)

- ▶ 超新星背景ニュートリノ (SRN) の世界初観測に向けた実験
- ▶ タンク内の超純水にガドリニウム (Gd) を溶解する (現在は0.011%)
- ▶ Gdの熱中性子捕獲 による γ 線放出を用いた事象選別
 - 👁 現在は約50%の中性子捕獲確率

Gdによる吸収散乱パラメータへの影響は小さい → 今後調査

SKDETSIM (GEANT3ベース)

- ▶ 低エネルギー中性子の輸送モデルが正確でない
- ▶ Gdの熱中性子捕獲による γ 線放出のモデルが高精度でない



SKG4 (Geant4ベース)

- ▶ SKDETSIMの上記の問題を解消 → SK-Gd実験のためのシミュレーション

吸収散乱パラメータと光の減衰

水の吸収散乱パラメータ

👁 $\alpha_{abs}(\lambda)$ [1/m]

👁 $\alpha_{sym}(\lambda)$ [1/m]

👁 $\alpha_{asym}(\lambda)$ [1/m]

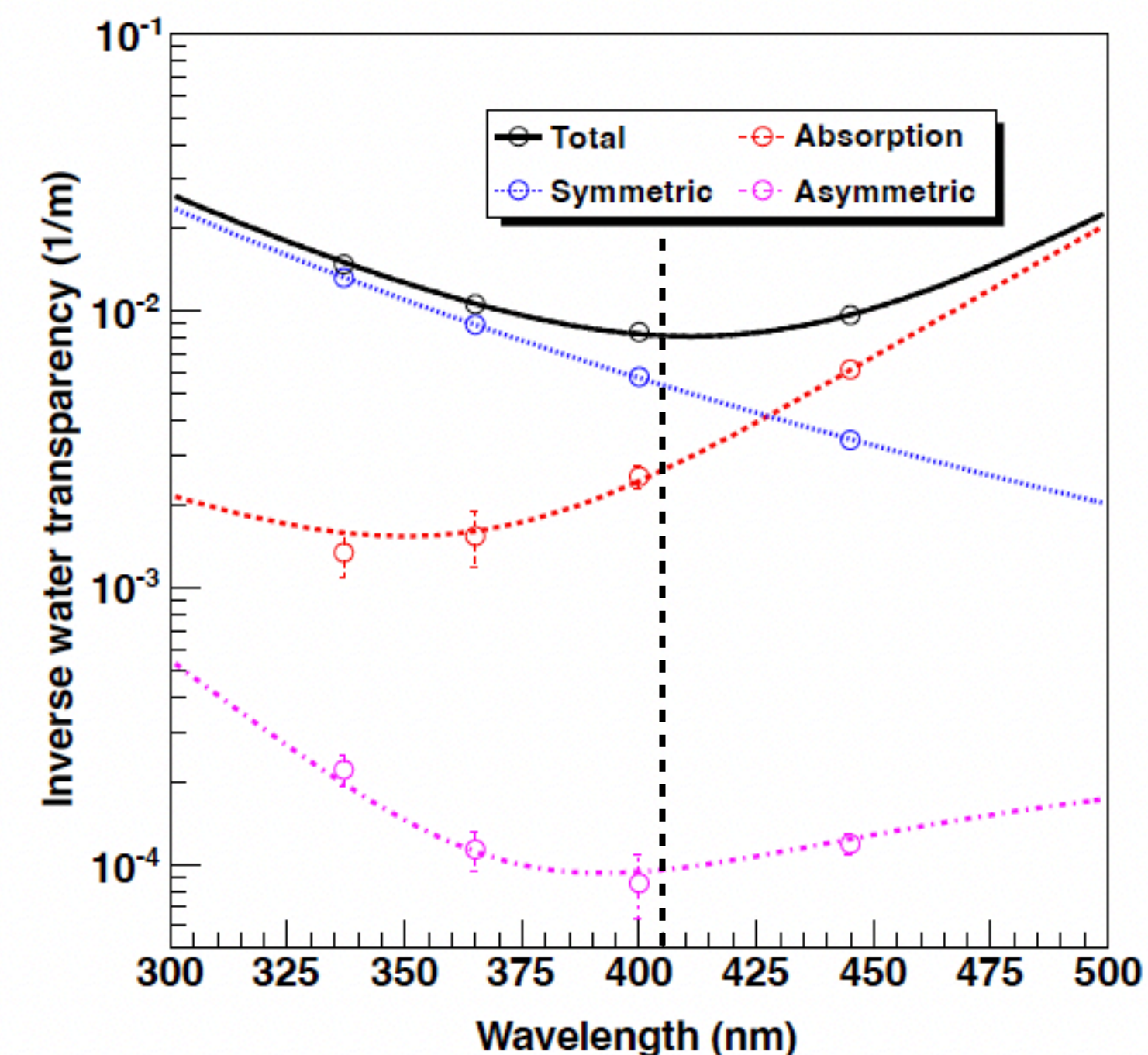
光の減衰長

👁
$$L(\lambda) = \frac{1}{\alpha_{abs}(\lambda) + \alpha_{sym}(\lambda) + \alpha_{asym}(\lambda)} \quad [m]$$

水中での光の減衰

👁
$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{\frac{l}{L(\lambda)}}$$

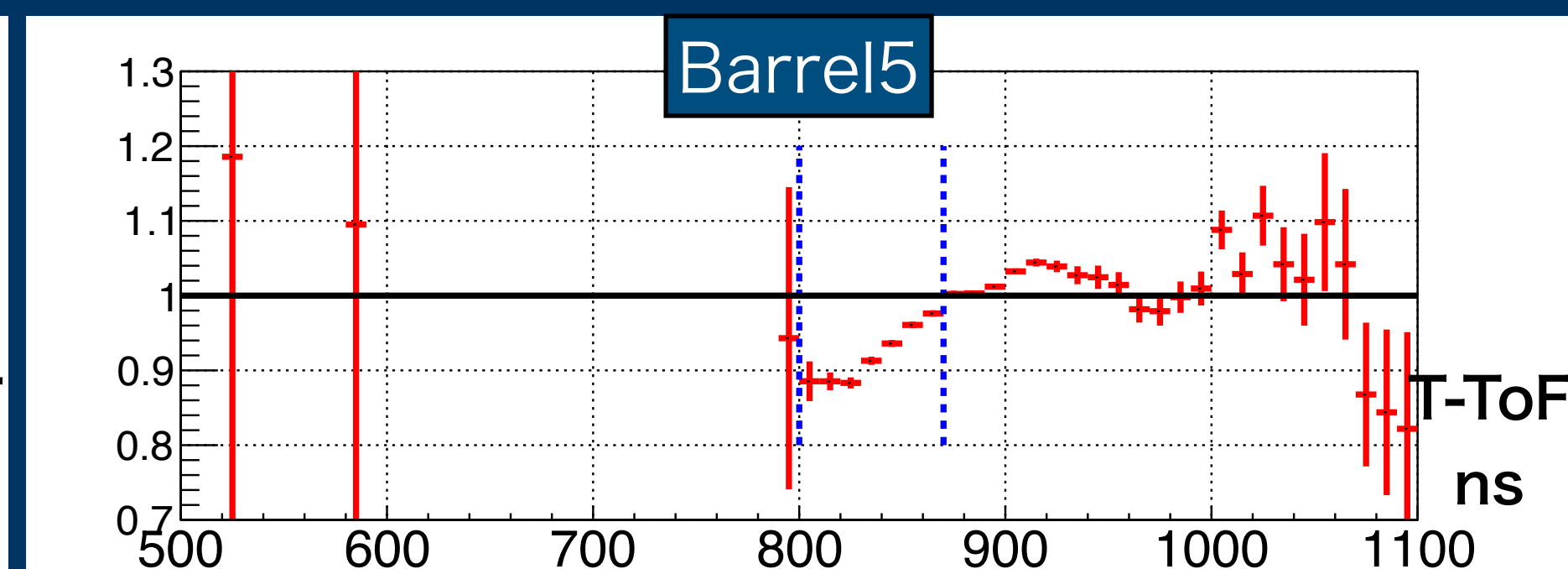
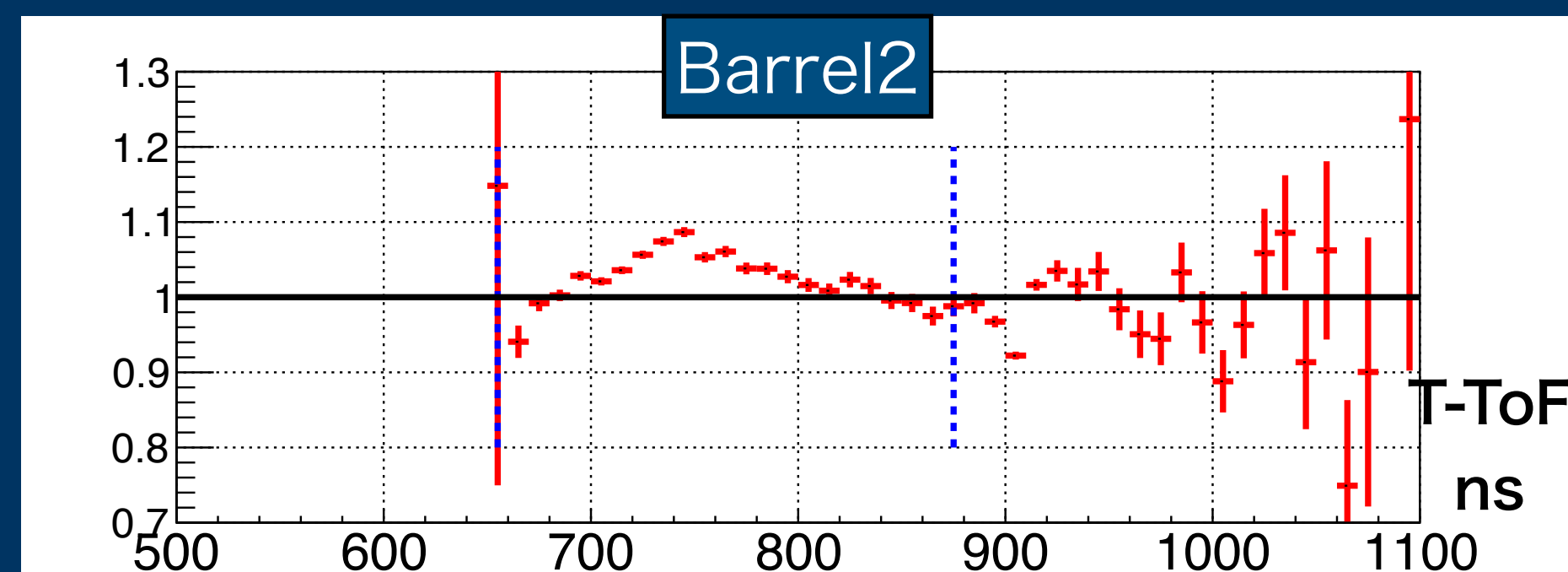
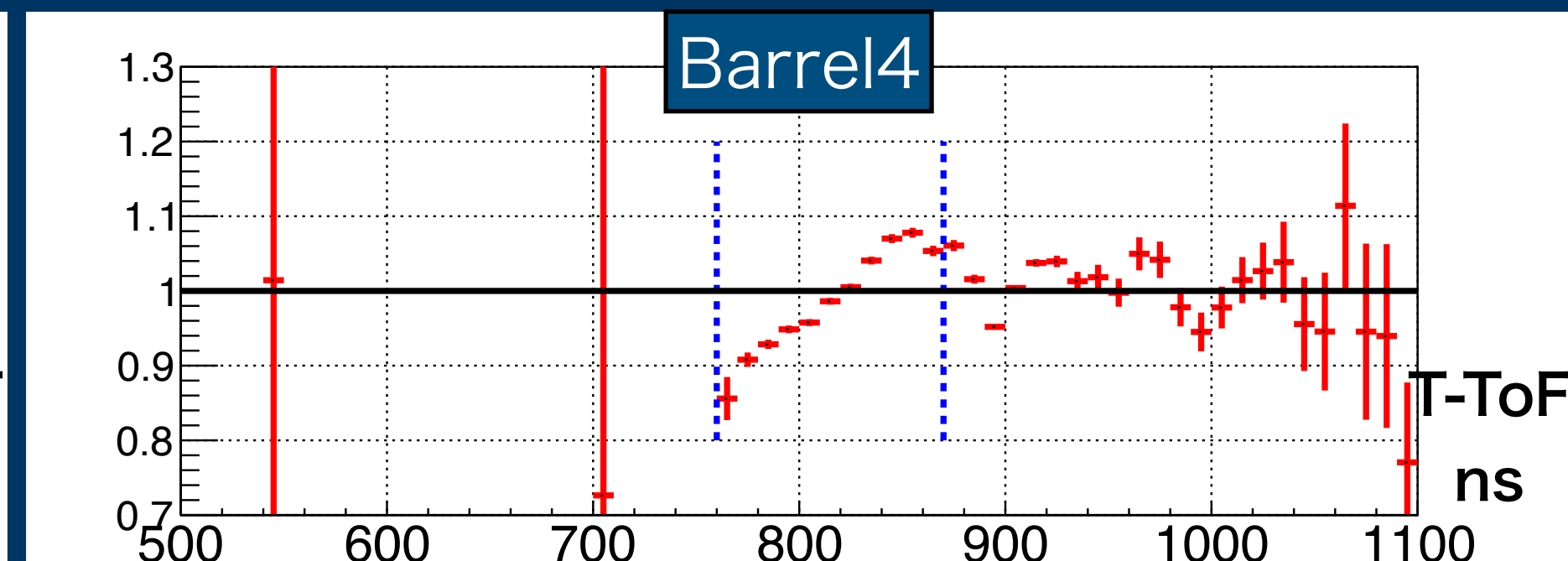
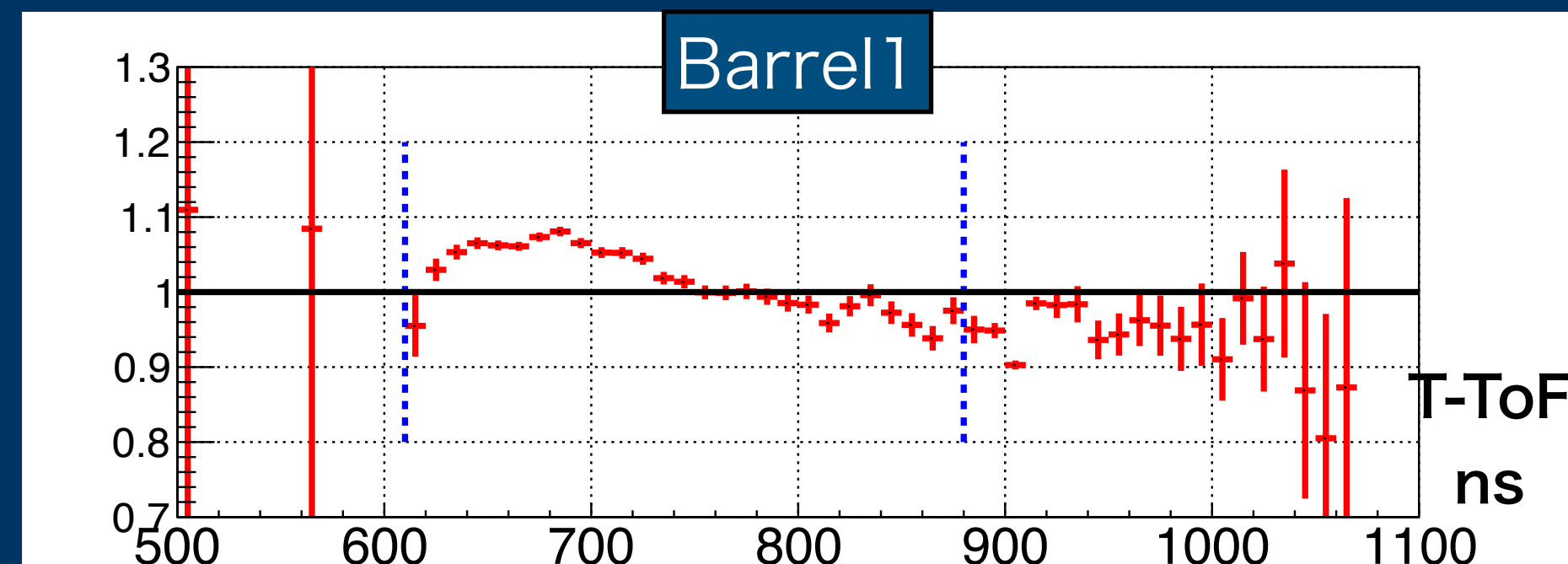
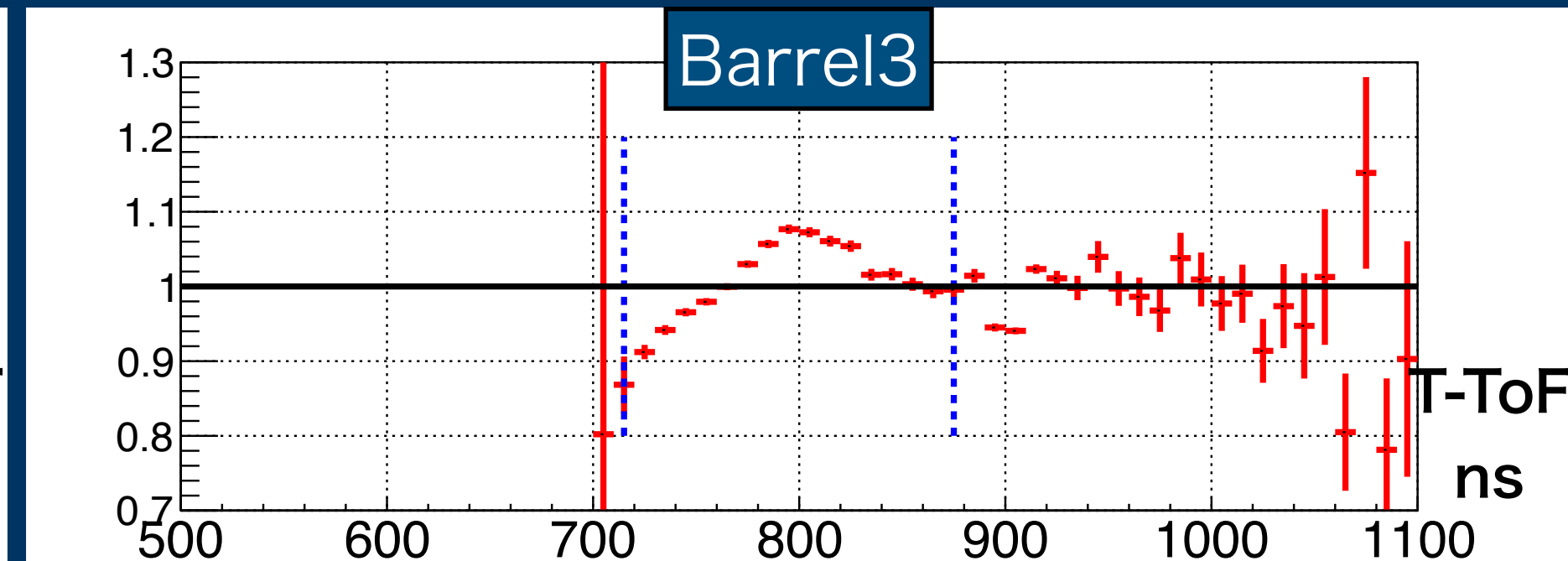
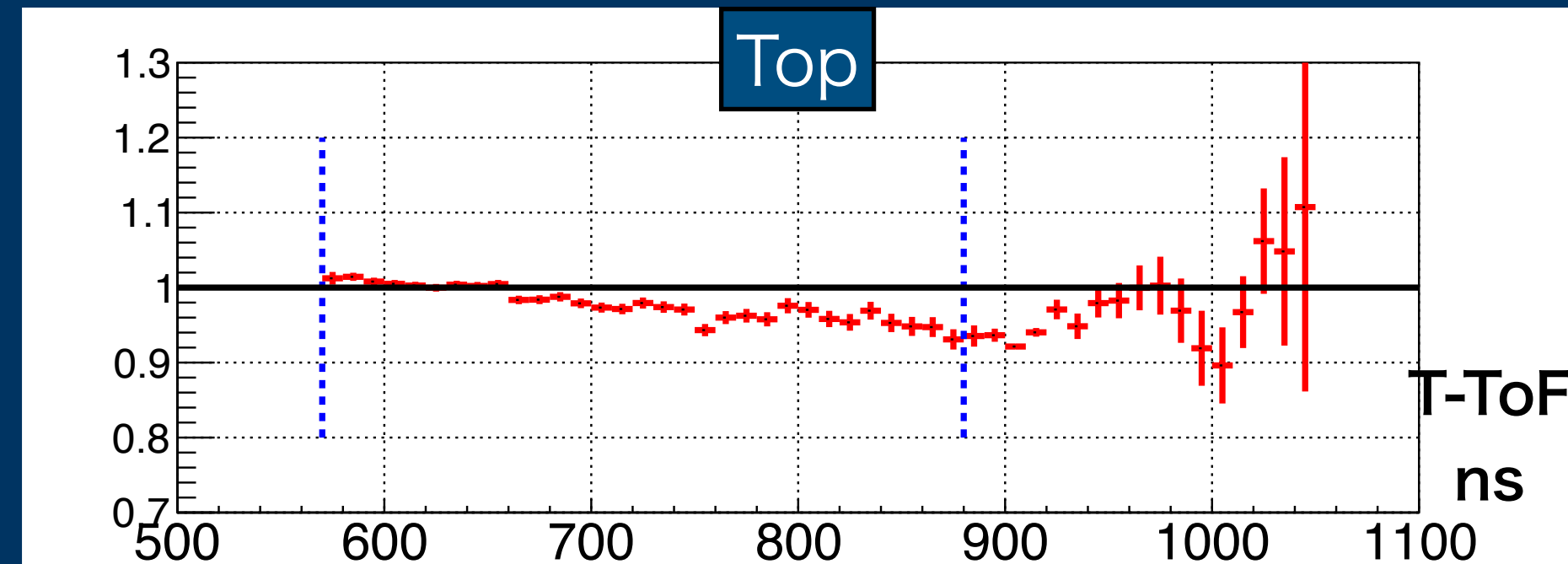
$I(\lambda)$: 光の強度、 l [m] : 光の進んだ距離



(Calibration of the Super-Kamiokande Detector)

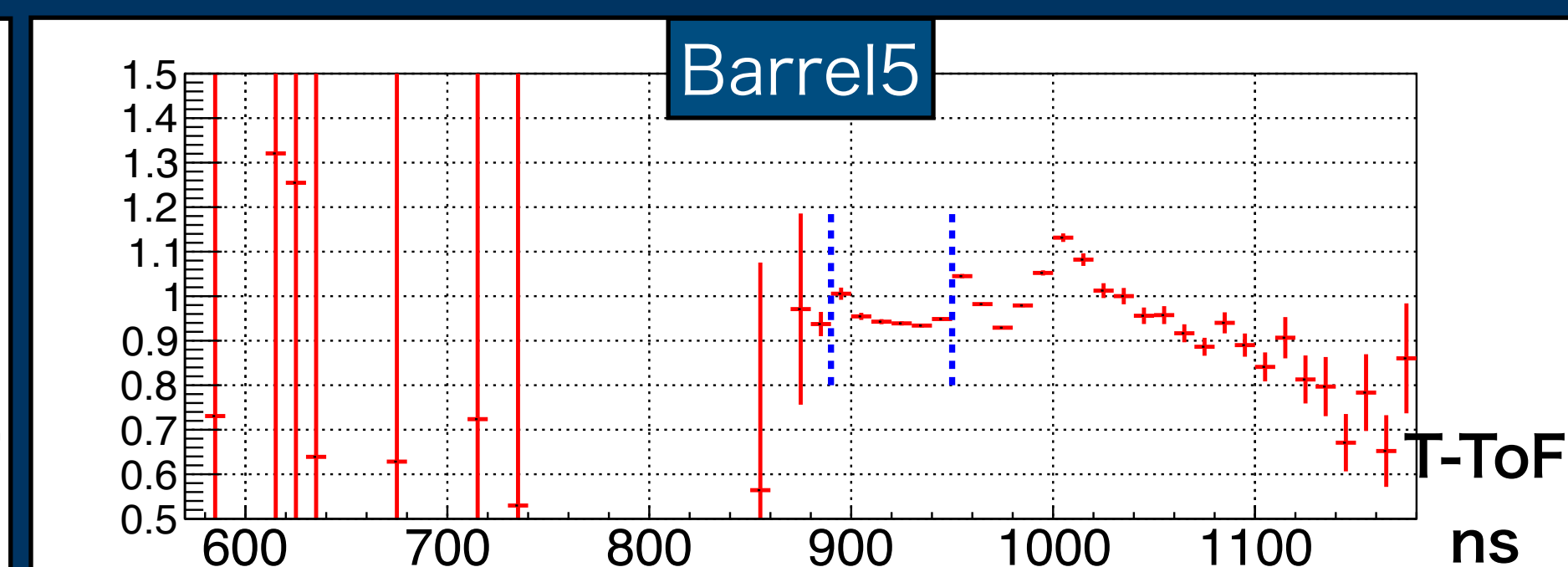
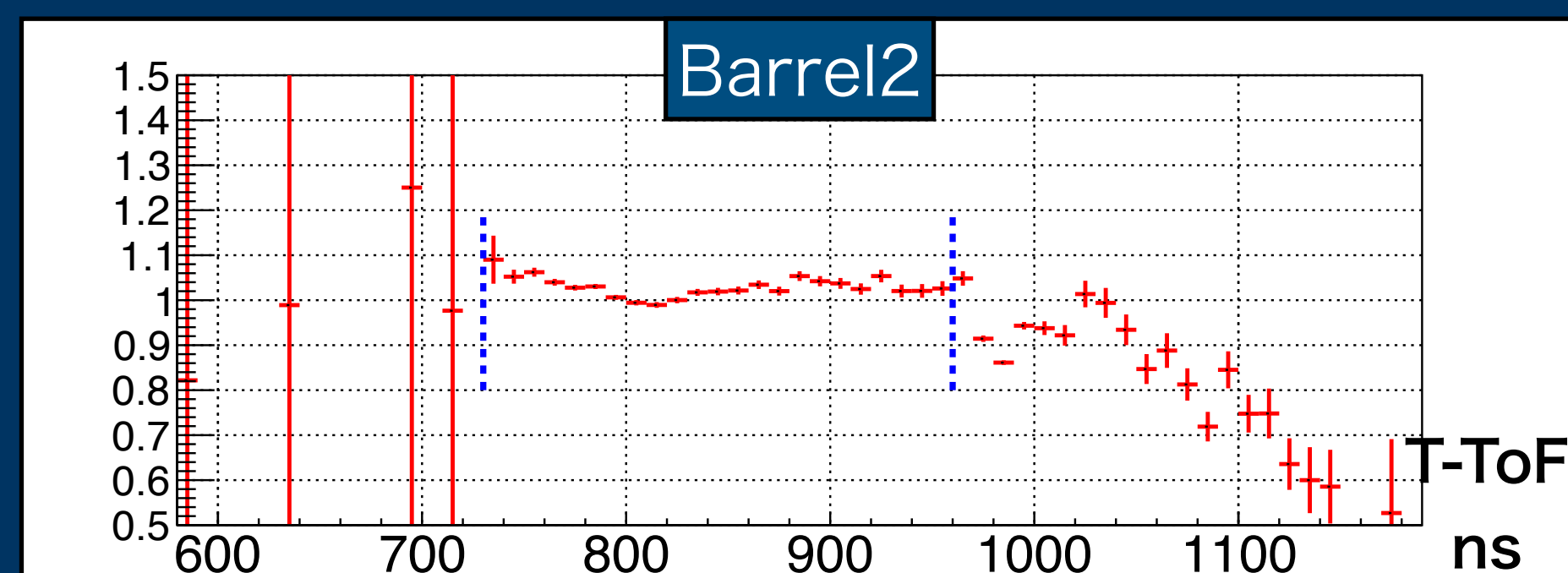
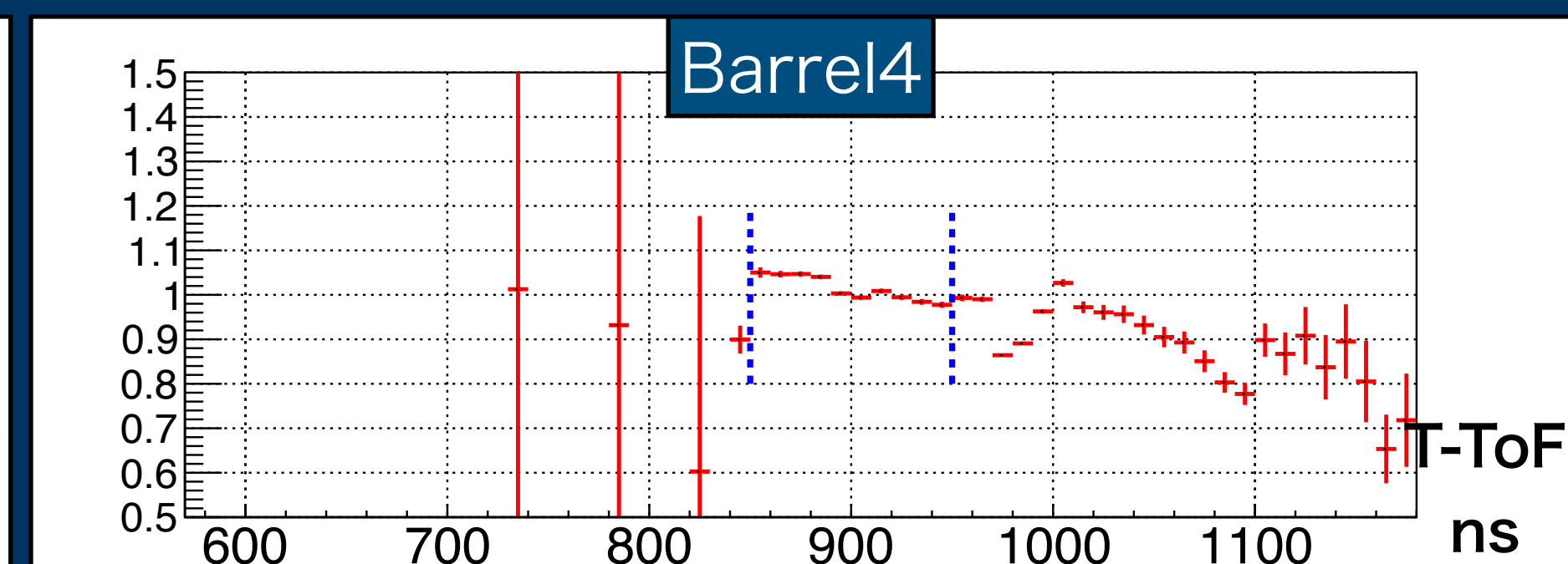
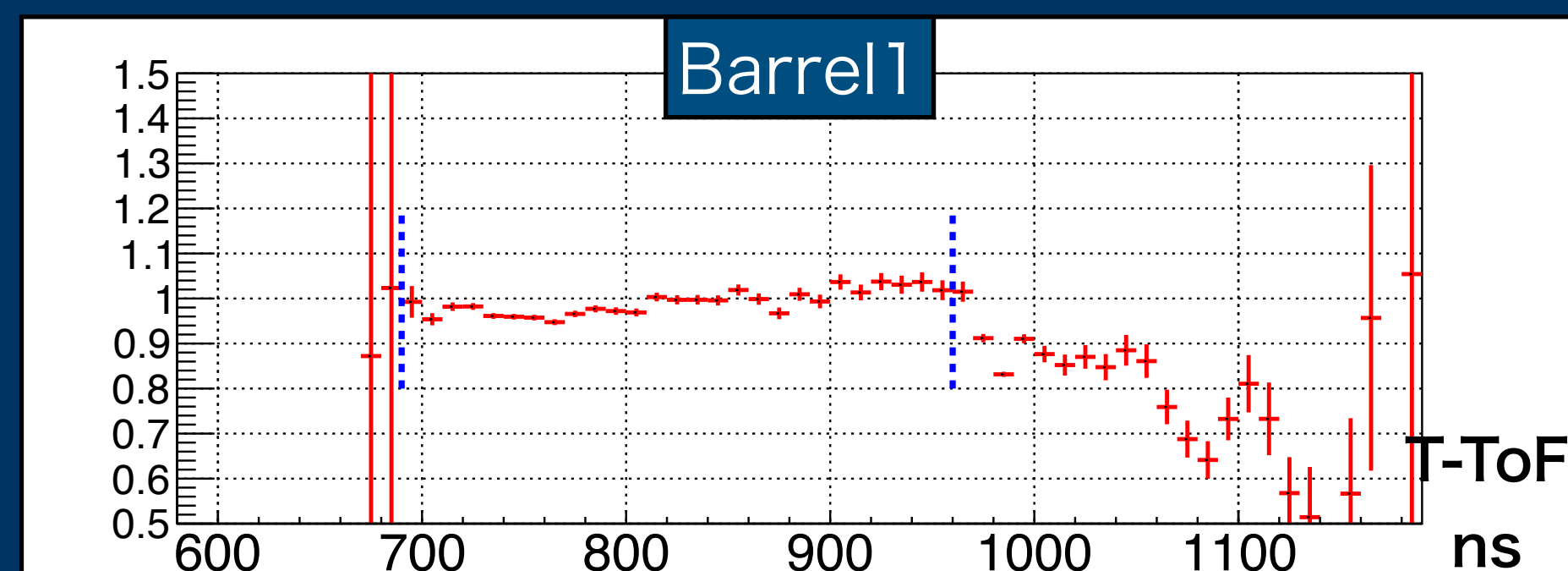
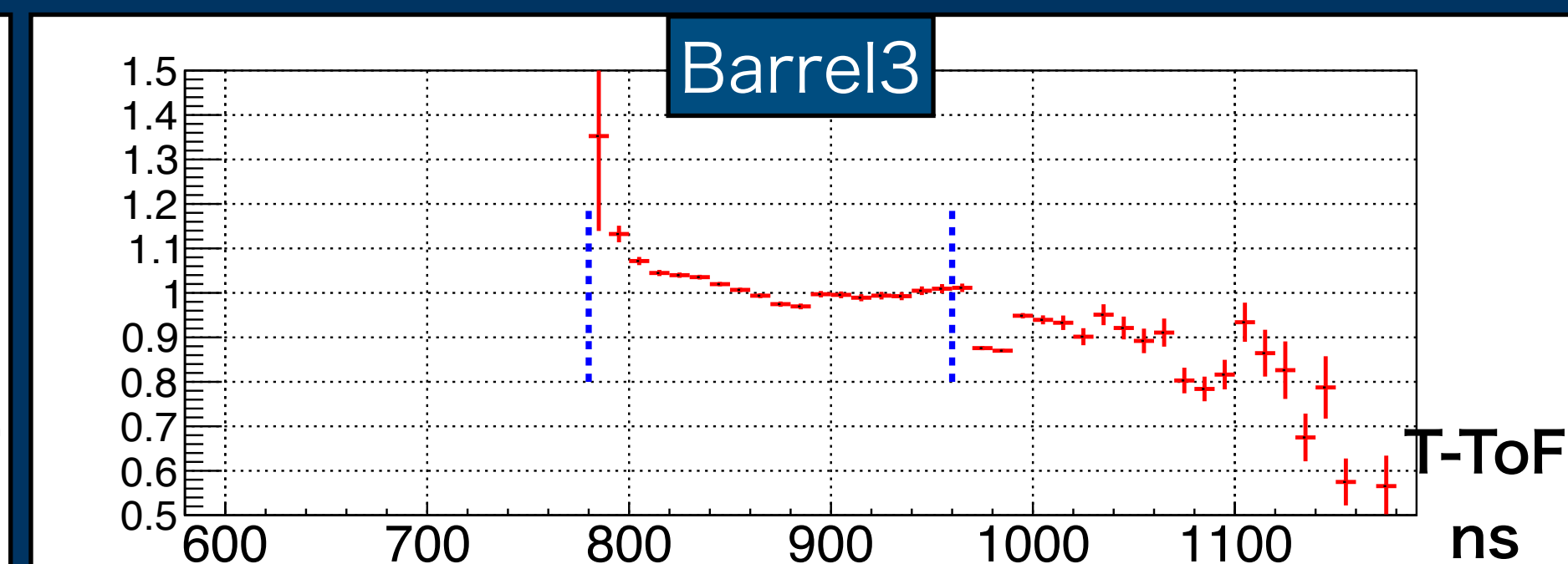
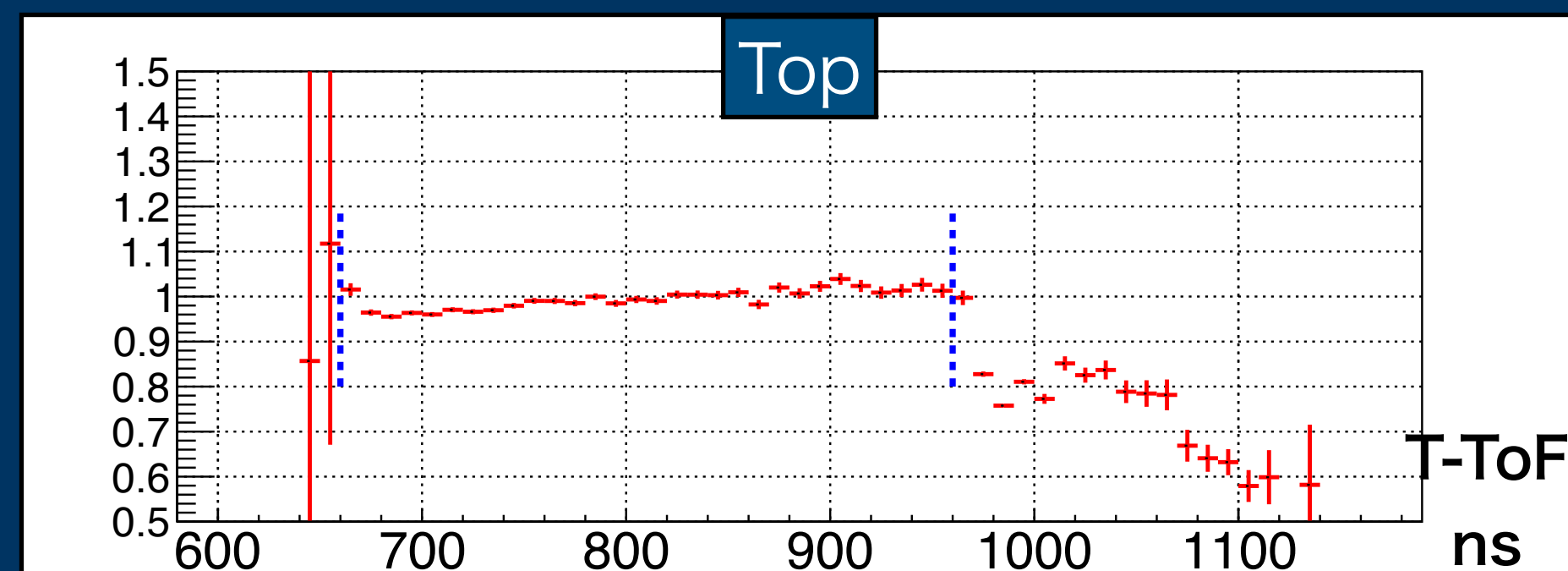
T-ToF分布の比 (追加)

SKDETSIMとSKG4のT-ToF分布の比



データとの比較 (SKDETSIM)

SKDETSIMとデータのT-ToF分布の比



MC内での散乱

SKDETSIM

▶ 等方散乱

- 👁️ レイリー散乱 + ミー散乱の等方成分

▶ 非等方散乱

- 👁️ ミー散乱の非等方成分（前方のみ）

SKG4

▶ 等方散乱

- 👁️ レイリー散乱

▶ 非等方散乱

- 👁️ ミー散乱

