

# 大型水チェレンコフ検出器の為の ヘテロジニアス型 事象再構成アルゴリズムの開発 (公募研究)

矢野 孝臣

所属: 東京大学ICRR (2017.12~), 神戸大学(~2017.11)

7<sup>th</sup> Jan. 2018

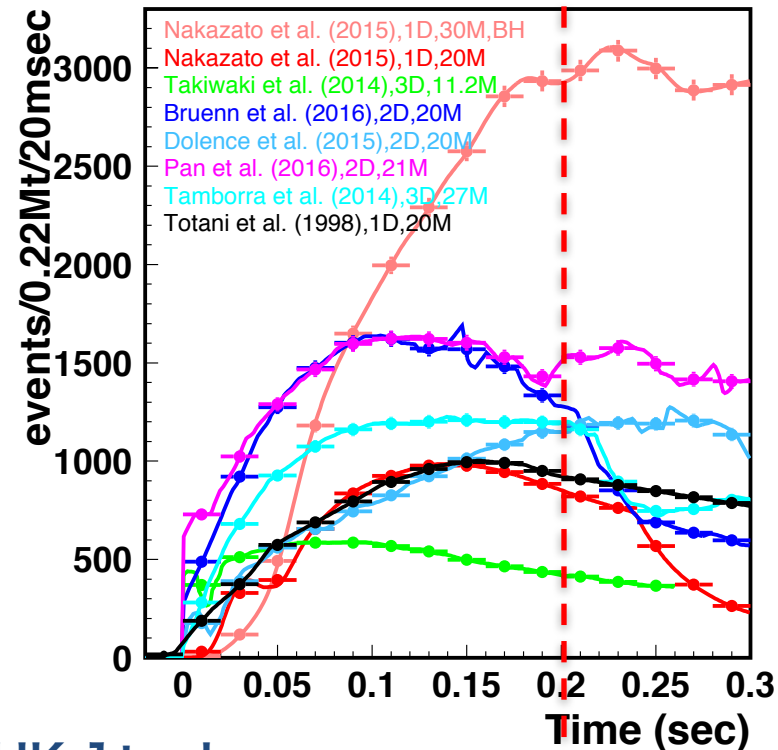
新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」  
第4回超新星ニュートリノ研究会

# Introduction

## 大型水チェレンコフ検出器による超新星バースト $\nu$ の検出 1

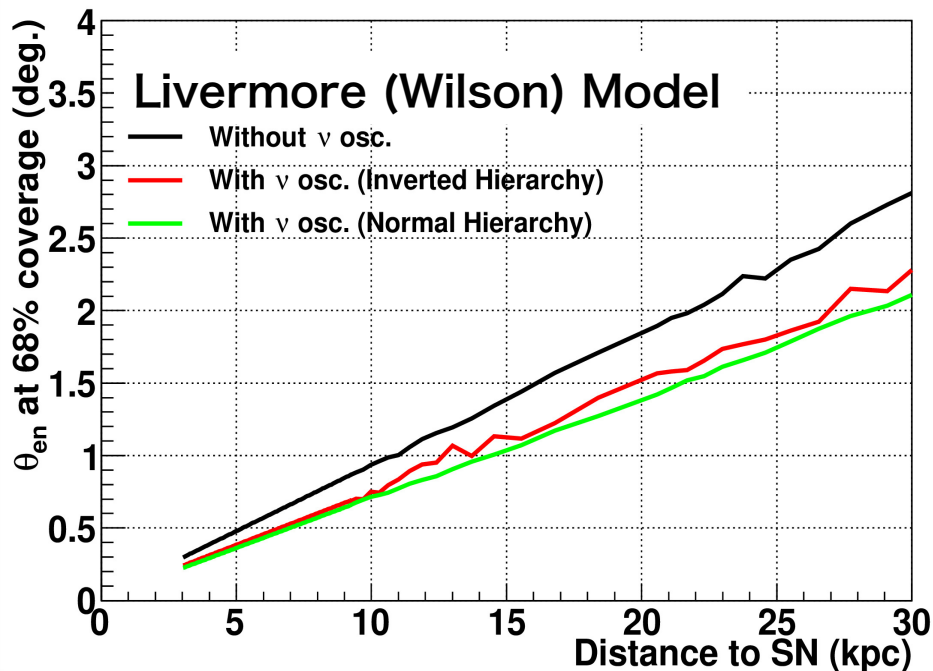
- 超新星バースト $\nu$ の検出は大型水チェレンコフ検出器の重要な物理テーマの一つ
  - 爆発メカニズムの解明
    - (SASI, 回転, 対流, BH形成)
  - 高温高密度の物理(EOS)等への制限
  - マルチメッセンジャー観測
- 日本のスーパーカミオカンデ, ハイパーカミオカンデ(2026~)が牽引。
- 近傍の超新星では高統計が期待
  - Max evt. rate: 50k~1MHz@10kpc, HK 1 tank
  - Max evt. rate: 5~100MHz@1kpc, HK 1 tank
    - Eta Carina: 2.4kpc, 70M&30M
    - Betelgeuse: 0.2kpc, 20M

超新星 $\nu$ 事象数@10kpc,  
/1 tank of HK

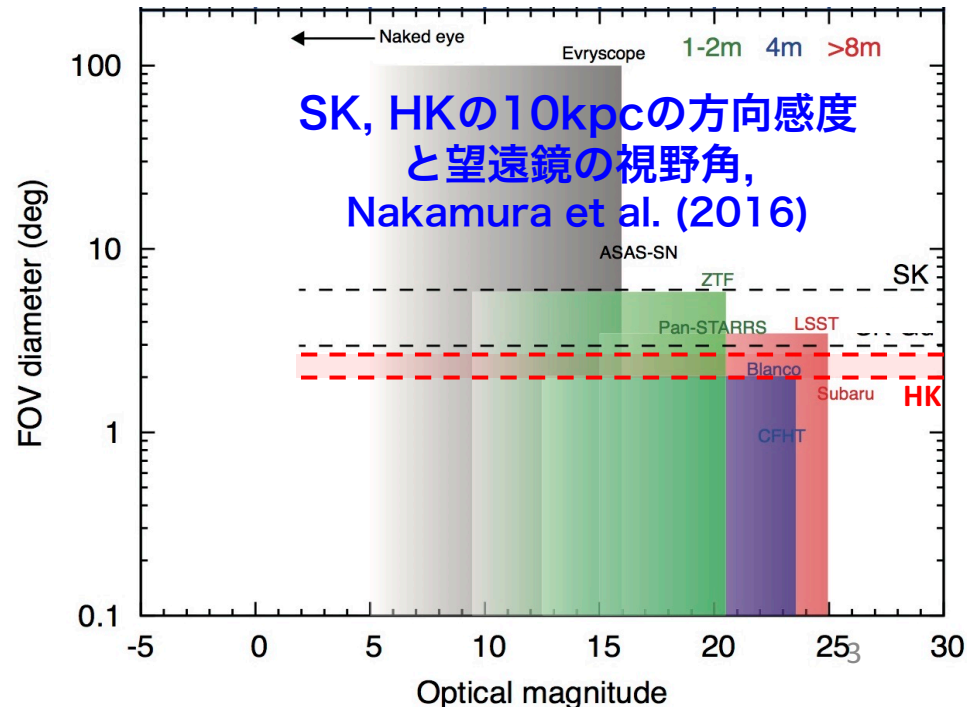


# 高速化の要請: マルチメッセンジャー観測

- **HK**はSN $\nu$ 事象から超新星の方向を(常に $4\pi$ で)同定することが出来、銀河中心で**視野角(両側角)  $\sim 2$ 度**の分解能を持つ。
- 銀河中心の超新星について、口径 $>8\text{m}$ の光学望遠鏡(LSST, スバル望遠鏡 HSC)とのマルチメッセンジャー観測が期待される。
  - 光学観測が特に興味のあるショックブレイクアウト(SBO)はニュートリノ信号から**数分 $\sim$ 一日**で起こる(Core-Collapse型 超新星)。

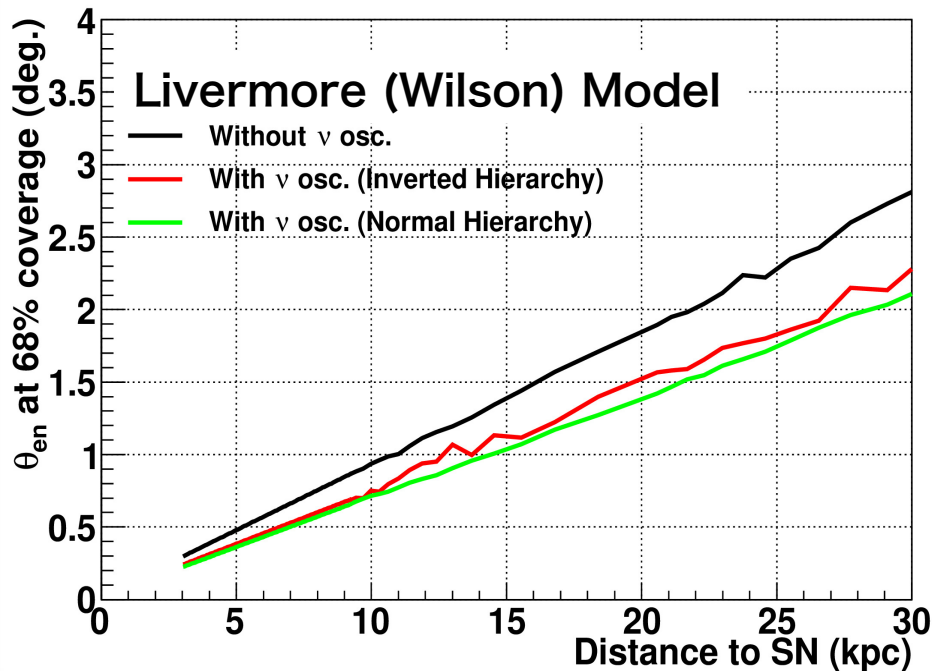


HKのSN方向への感度 (片側角)

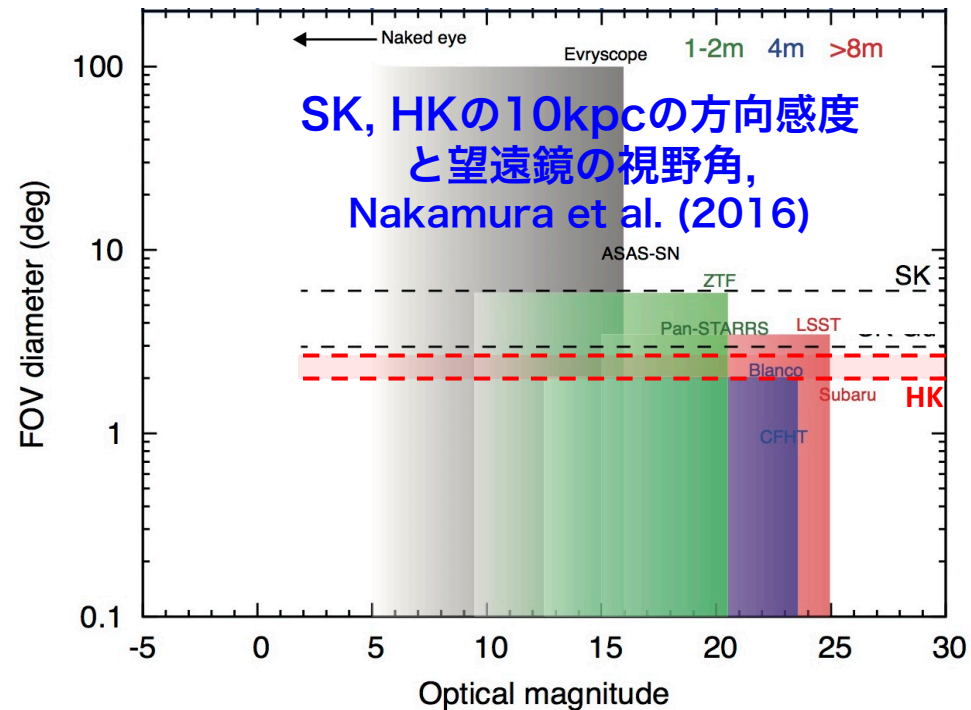


# 高速化の要請: マルチメッセンジャー観測

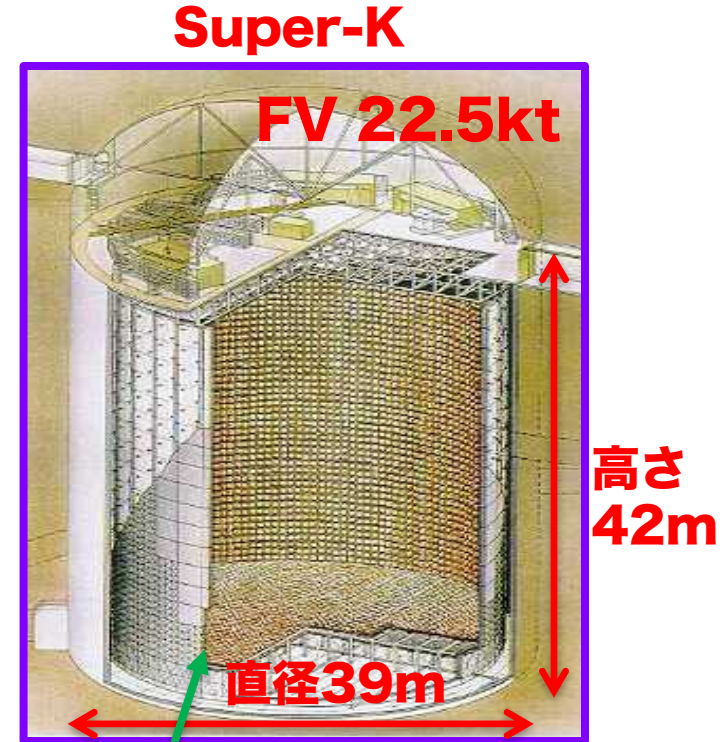
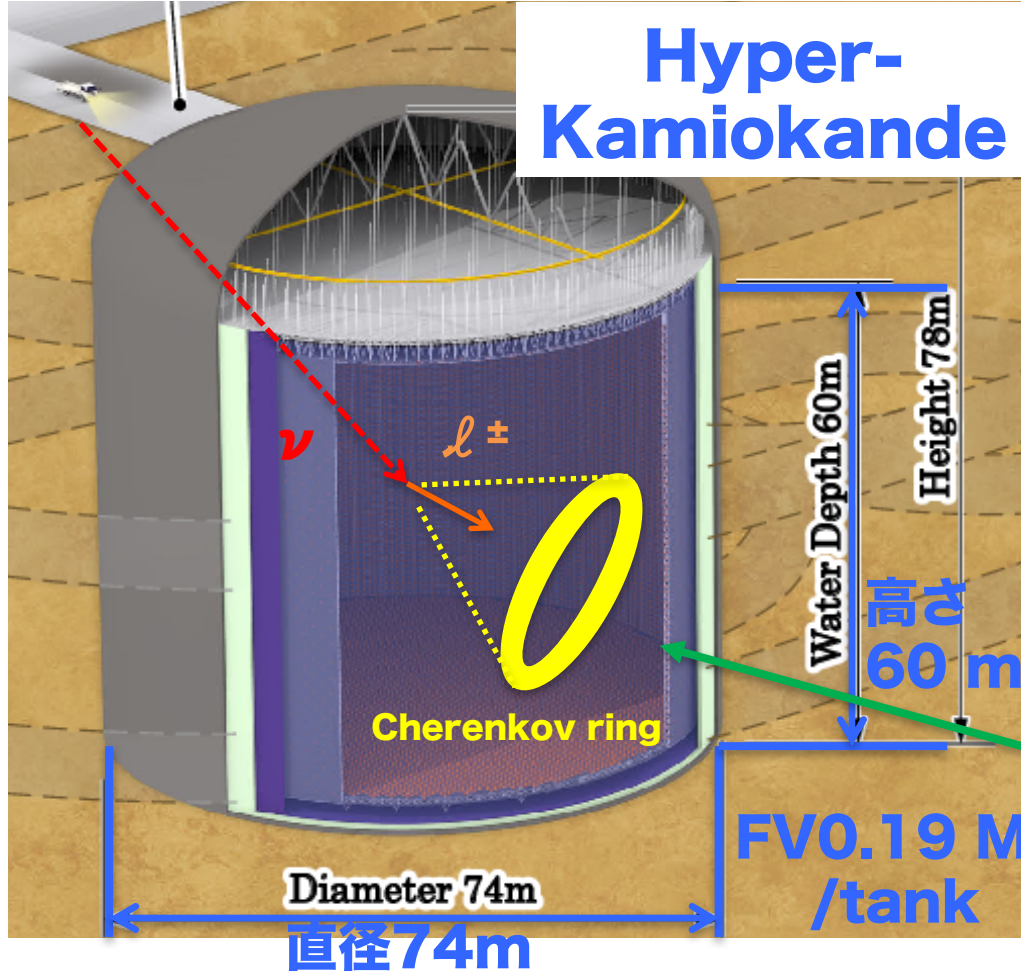
- 方向感度は統計数の二乗根にほぼ比例。視野角2度= $\sim$ 10万事象解析。
- 10分で解析しアラートを出す為には0.005s/事象で再構成する必要がある。
  - SKでは再構成に $<$   $\sim$ 0.1 秒/事象 (@15MeV)。 @ Xeon E5-2680,
  - HKだと現在O(1) 秒/事象 (@15MeV, 仮)。 1 cpu thread
- SKでは1/20、HKでは現行の1/200以下まで短縮が必要。
  - CPU100個を並列に使って補う事は可能。



HKのSN方向への感度



# 大型水チェレンコフ検出器による $\nu$ 検出



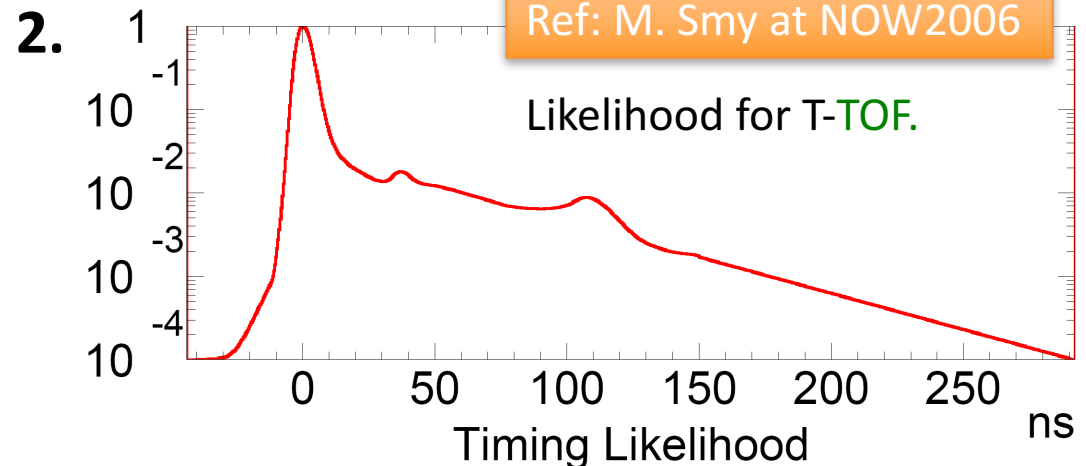
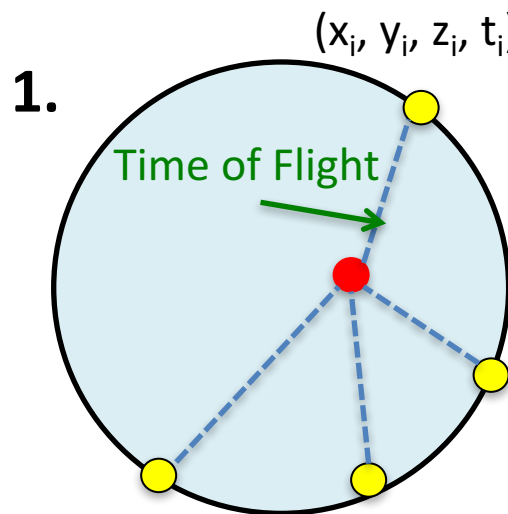
光検出器(PMT)  
~40,000本(HK)  
~11,100本(SK)

- ニュートリノが生成する荷電粒子のチェレンコフ光を検出。
- 各光検出器(PMT)によるチェレンコフ光の検出時間・位置から元事象の位置・時間・方向(・粒子種別)を再構成。

# 現行の事象位置再構成

SK (HK) で使用されている事象位置再構成アルゴリズム (BONSAI, hk-BONSAI) では、おおまかに以下の二段階で事象の再構成を行う。

1. 4-hit combination による初期事象位置候補の探索
2. チェレンコフ光検出の時間分布Likelihoodを用いた事象位置のFine tuning



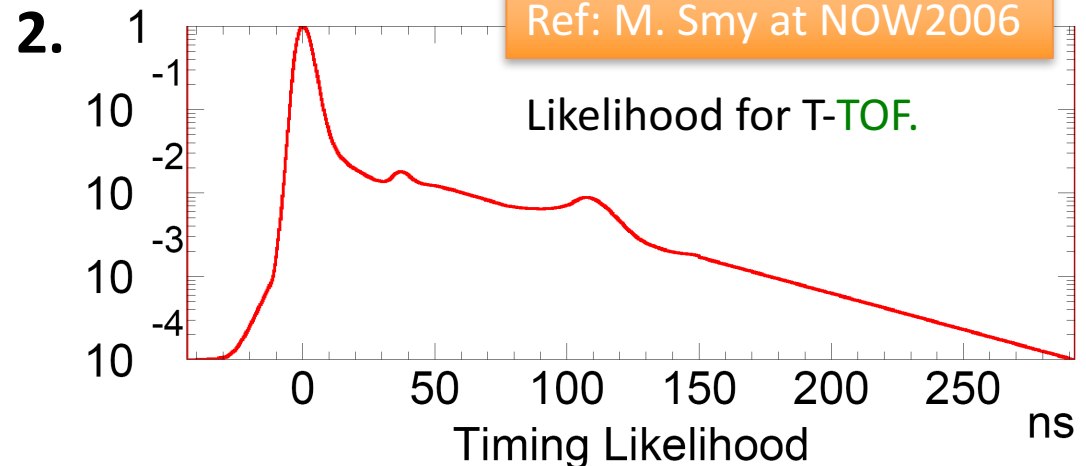
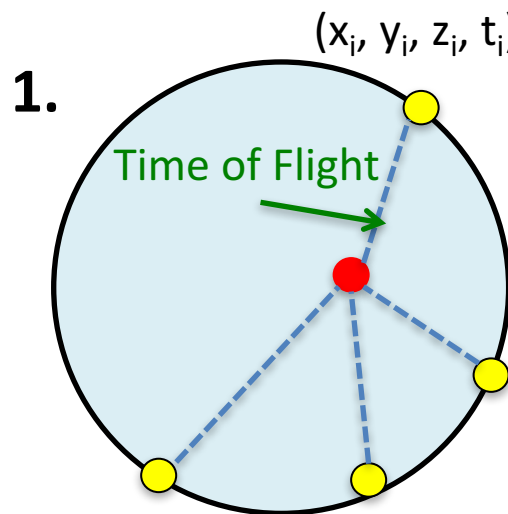
# 現行の事象位置再構成

SK (HK) で使用されている事象位置再構成アルゴリズム (BONSAI, hk-BONSAI) では、おおまかに以下の二段階で事象の再構成を行う。

## 1. 4-hit combination による初期事象位置候補の探索

- **今回はこの部分を高速化。**

## 2. チェレンコフ光検出の時間分布Likelihoodを用いた事象位置のFine tuning

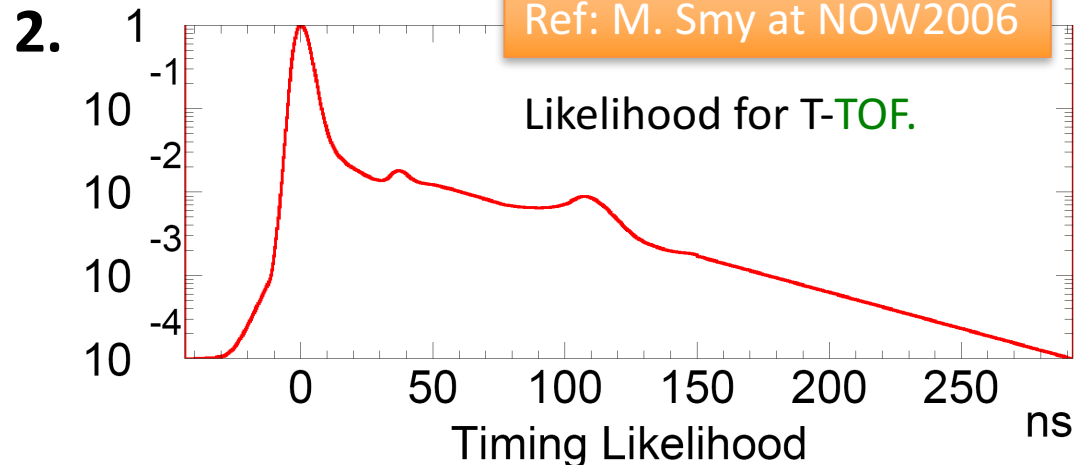
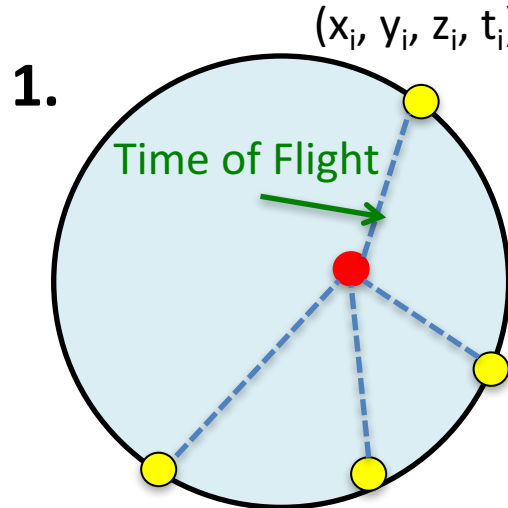


# 現行の事象位置再構成

SK (HK) で使用されている事象位置再構成アルゴリズム (BONSAI, hk-BONSAI) では、おおまかに以下の二段階で事象の再構成を行う。

## 1. 4-hit combination による初期事象位置候補の探索

- **今回はこの部分を高速化。**
- **2017年の新しい計算手法・計算資源を用いる。**  
→ **ヘテロジニアスコンピューティング**





# ヘテロジニアスコンピューティング

## GPGPU (General Purpose Graphic Processing Unit)

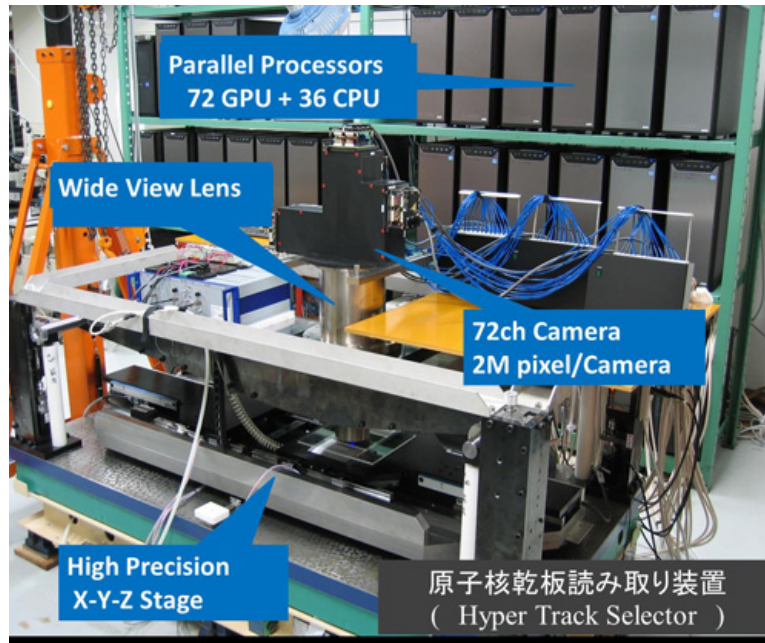
### ヘテロジニアスコンピューティングとは

- 異なるアーキテクチャのプロセッサを混載したシステム上で、用途に応じて適したプロセッサに処理を分担させることで全体の処理を高める計算手段。
- 近年では**GPGPU**の発展が著しく、一般への応用も盛ん。
  - GPGPUは単純なベクトル演算 (= 複数のデータに同じ演算を同時に適用する) に特化したプロセッサ。
    - 今回の目的(4hit combination=行列演算等)に適合。
  - Intel Xeon E5-2680 v4 : 570 GFLOPS (単精度浮動小数), ¥200K
  - NVIDIA TITAN V : 15 TFLOPS (単精度浮動小数), \$3000



# 素粒子物理分野での応用例

- 広視野角の原子核乾板の事象再構成 (@名大, Bern大)
  - 使用例:  $\nu$  振動実験OPERA,  $\gamma$  線望遠鏡気球実験GRANE
  - T. Fukuda et al. JINST (2013), <https://arxiv.org/abs/1301.1768>
  - A. Ariga, T. Ariga JINST (2014), <https://arxiv.org/abs/1311.5334>



© Nagoya University,  
JAXAホームページより転載

- 液体アルゴン検出器の事象再構成 (ARGONTUBE@Bern大)
  - A. Ereditato et al. JINST (2013), <https://arxiv.org/abs/1304.6961>
  - “Studies with a Liquid Argon Time Projection Chamber“, M. Schenk, Springer (2015)
- 検出器シミュレーションGeant4の高速化(SLAC, KEK等)
  - 医療用途に向けた高速化が主目的
  - H.N Tran et al, NIMB (2016), <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.01.017>

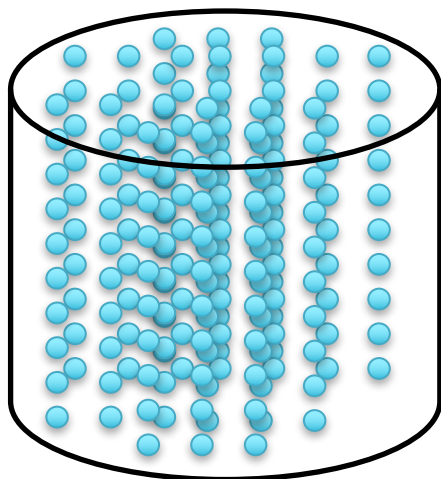
# Hyper-Kに向けた応用の一例

- 開発中のHKトリガーシステム

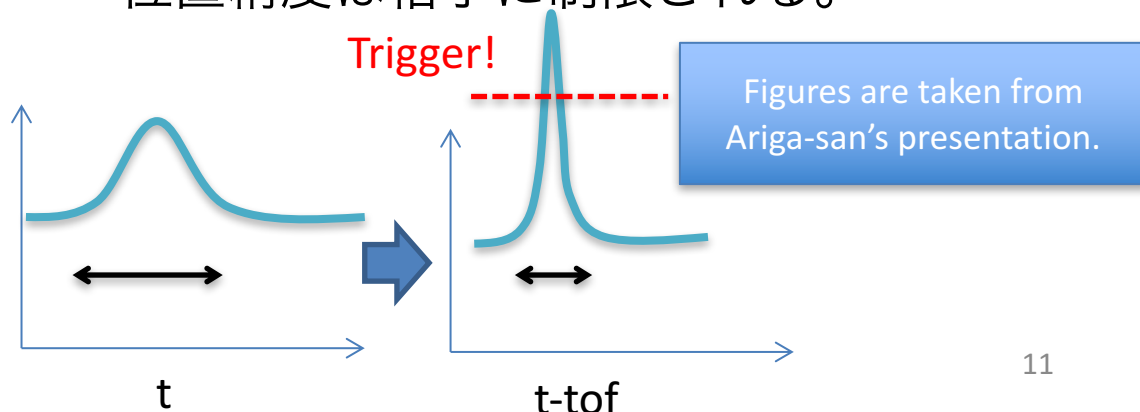
- インテリジェントトリガーシステム

- リアルタイムの事象再構成を行いながら事象のトリガーと記録を行うシステム。
    - “Intelligent Trigger for Hyper-K with GPUs”, A. Ariga at Third HK EU Meeting(2015)
    - “Low Energy Triggering for Hyper-Kamiokande”, T. Dealtry at Neutrino 2016(2016) etc.

- 検出器の有効体積内にあらかじめ格子点を決めておき、各点についてT-TOFを計算。
      - S/Nの分離が容易になる。
      - 偽事象を減らし、閾値を下げられる。
      - 位置精度は格子に制限される。



検出器中に5m間隔の格子点を置く



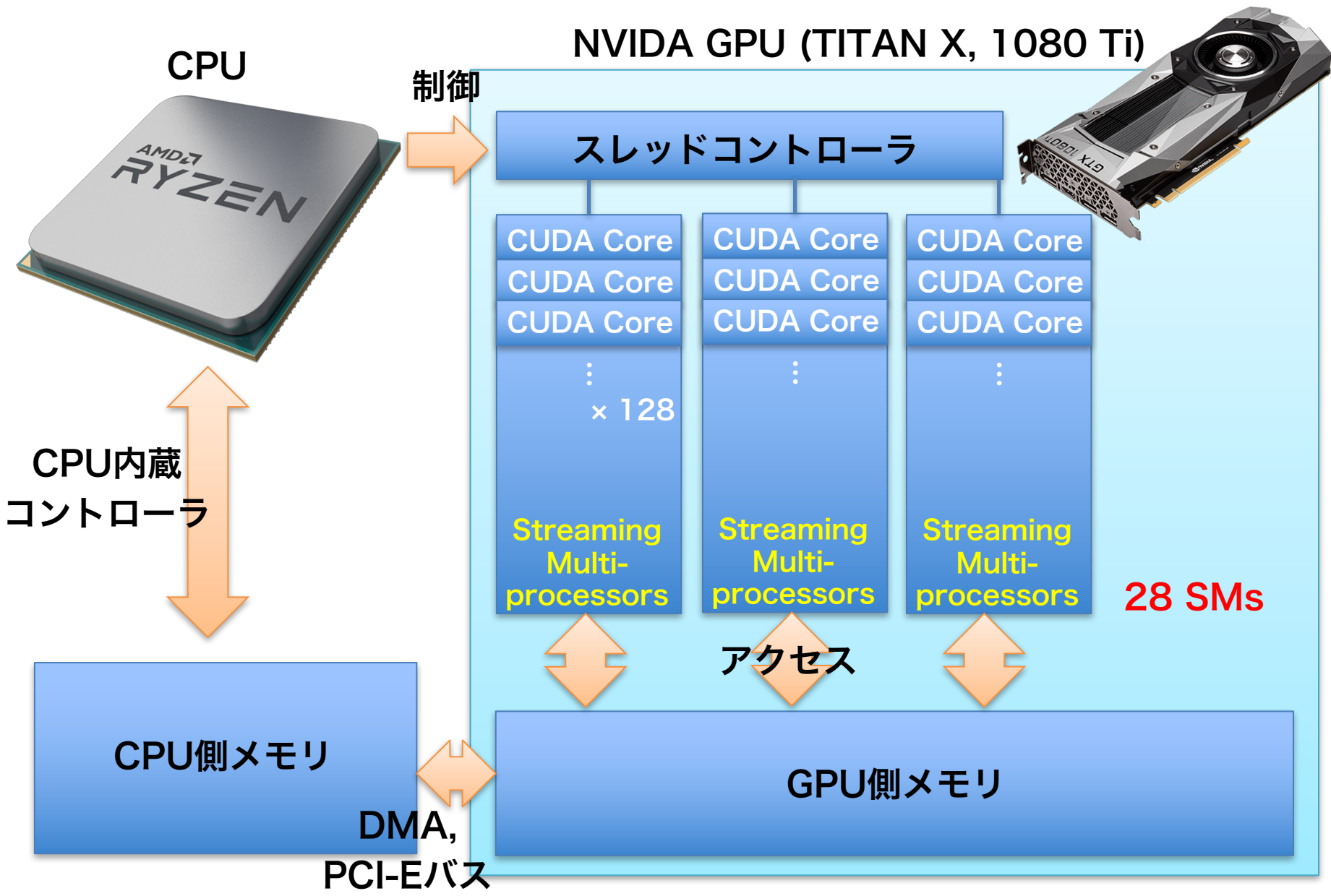
# アルゴリズム開発に用いるPC

- ヘテロジニアスコンピューティング=GPGPU処理の可能なマシンを導入
  - DOS/V パラダイス, GALLERIA AZ(KT01/B350)
    - 実売価格 ¥270k



- **AMD Ryzen 7 1800X (8 core 16 thread)**
  - **240 GFLOPS** (単精度浮動小数, Sandra Benchmark)
  - メモリ(CPU直結) 16GB
- **NVIDIA GeForce 1080Ti (3584 CUDA Core = thread)**
  - 前世代TITAN Xの一般向け仕様
  - **11 TFLOPS** (単精度浮動小数)
  - メモリ(GPU直結) 11GB

# システムのブロックダイアグラム



# システムのブロックダイアグラム

CPU

NVIDIA GPU (TITAN X, 1080 Ti)



スレッドコントローラ

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮  
× 128

Streaming  
Multi-  
processors

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮

Streaming  
Multi-  
processors

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮

Streaming  
Multi-  
processors

28 SMs

1. ディスクからヒット情報を読み出



CPU側メモリ

GPU側メモリ

# システムのブロックダイアグラム

CPU

NVIDIA GPU (TITAN X, 1080 Ti)



スレッドコントローラ

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮  
× 128

Streaming  
Multi-  
processors

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮

Streaming  
Multi-  
processors

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮

Streaming  
Multi-  
processors

28 SMs

1. ディスクからヒット情報を読み出



CPU側メモリ



GPU側メモリ

2. GPU側に転送



# システムのブロックダイアグラム

CPU

NVIDIA GPU (TITAN X, 1080 Ti)



スレッドコントローラ

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮  
× 128

Streaming  
Multi-  
processors

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

⋮

Streaming  
Multi-  
processors

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core

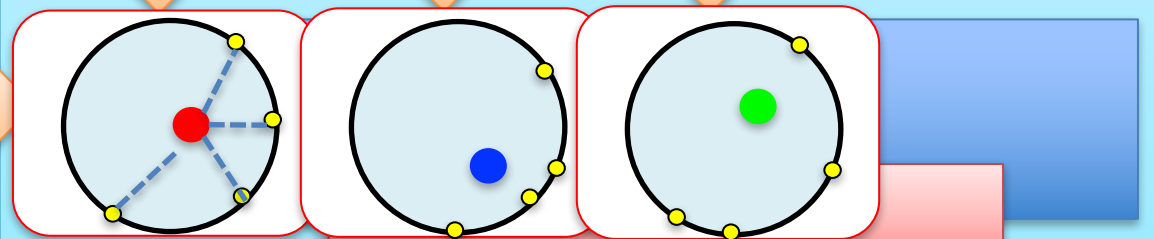
⋮

Streaming

1. ディスクからヒット情報を読み出

3. 各ヒット情報をSMが処理  
(1 CUDA Core 1ヒットパターン)

CPU側メモリ





# システムのブロックダイアグラム

CPU

NVIDIA GPU (TITAN X, 1080 Ti)



スレッドコントローラ

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core  
⋮  
× 128

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core  
⋮

CUDA Core  
CUDA Core  
CUDA Core  
⋮

Streaming  
Multi-  
processors

Streaming  
Multi-  
processors

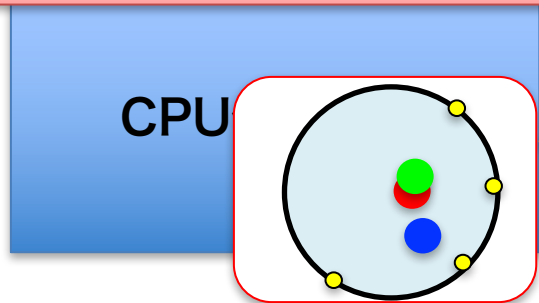
Streaming

1. ディスクからヒット情報を読み出

4. 結果の読み出し・CPU処理

3. 各ヒット情報をSMが処理  
(1 CUDA Core 1ヒットパターン)

2. GPU側に転送



CPU

GPU側メモリ

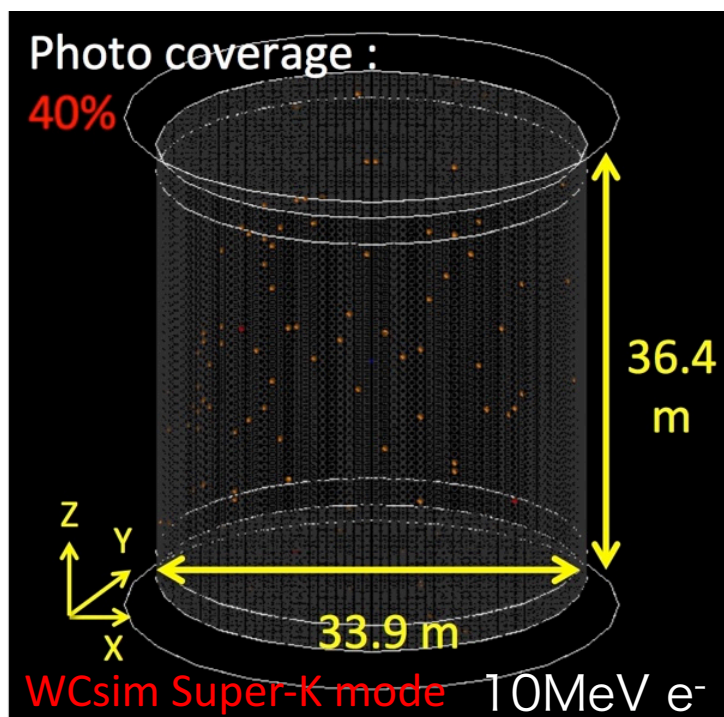
2. GPU側に転送

# アルゴリズムの試作

- “4-hit combination による初期事象位置候補の探索” をGPGPU処理を用いて実装 (Bern大学 有賀さんのご協力による)。
- **最大150個のPMTによる光子検出(PMT Hit)について全パターンの4-hit combinationをとり、元の事象の候補位置を算出。**
  - 現段階では開発の初歩的なレベルに留まっており、事象  $\pm 100\text{ns}$  の範囲で早いヒットから150個を選択して計算を実行。
- **SK(HK)アルゴリズム(BONSAI, hk-BONSAI)との違い:**
  - SKのアルゴリズムは前処理によって巧妙に4-hit計算に用いるPMTの数を削減している。
    - Minkovski空間で相関のない組み合わせを計算から省く。
    - 近接したHitの情報を用いて、計算に用いるHitを削減。
  - 試作アルゴリズムはLikelihoodによる位置のFine Tuneを導入していない(後述)。
  - 事象方向の再構成について未実装。

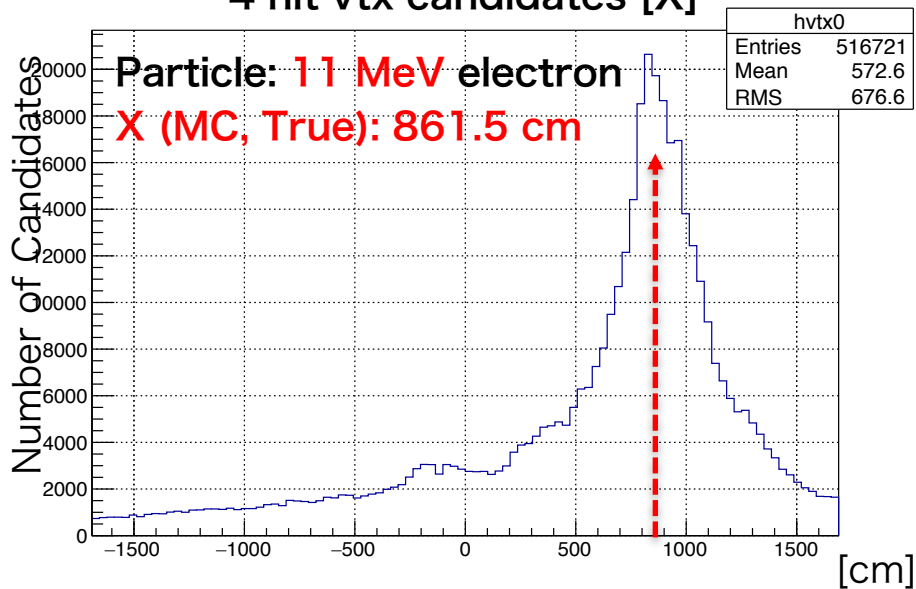
# 試作アルゴリズムの評価 (1)

- 汎用水チェレンコフ検出器シミュレータWCSimを使用して試作アルゴリズムの性能を評価する。
  - GitHubから誰でも入手可能: <https://github.com/WCSim>
  - Hyper-K Proto-collaborationも使用・開発しているGeant4ベースの計算機シミュレーション。
  - SuperKモード+光検出器の応答をSKに近づけるパッチを使用。



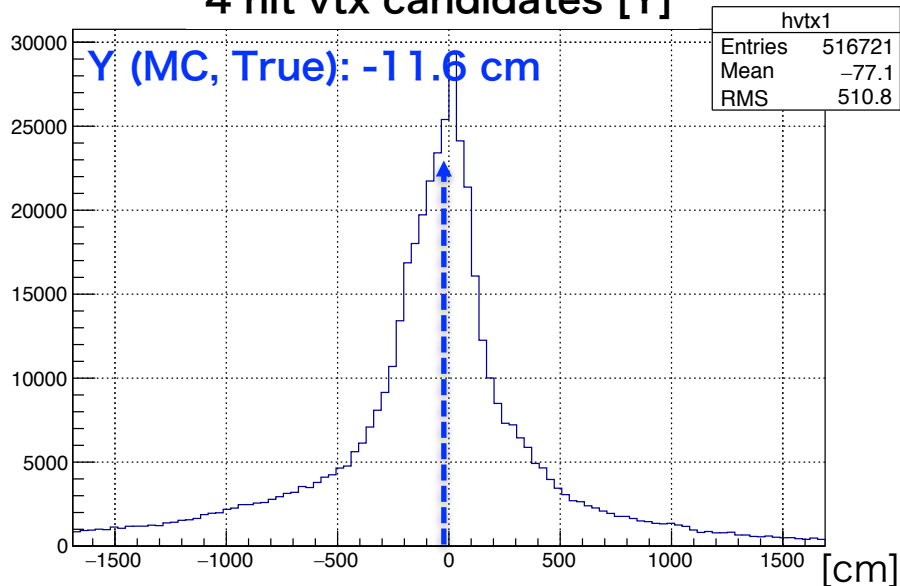
# 試作アルゴリズムの評価 (2)

4 hit vtx candidates [X]

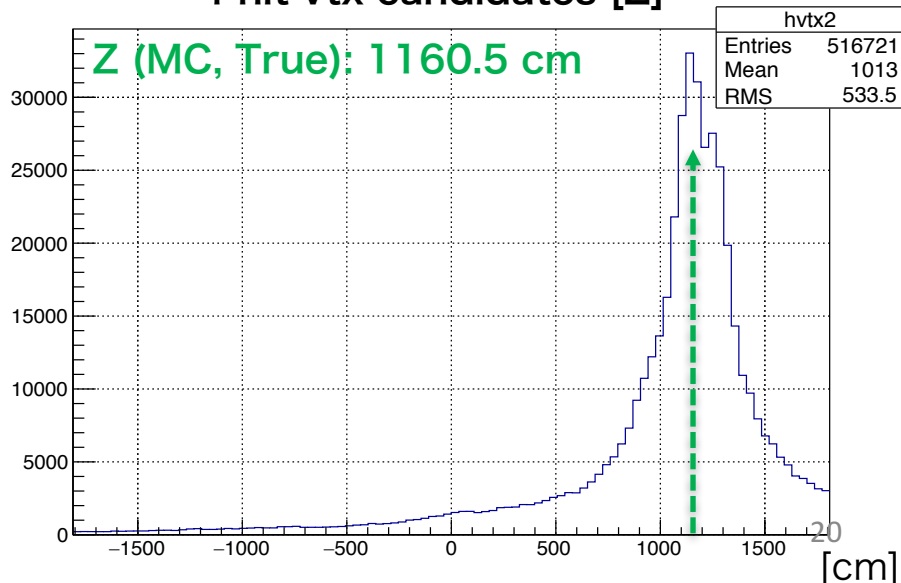


- 4 hit combinationによって得られたCandidatesの位置分布はMCの真の事象位置近くにピークを示す。
- 初歩的な統計処理として、Candidate分布のピーク位置を取り出し、真の位置との差(再構成の分解能)を評価。

4 hit vtx candidates [Y]

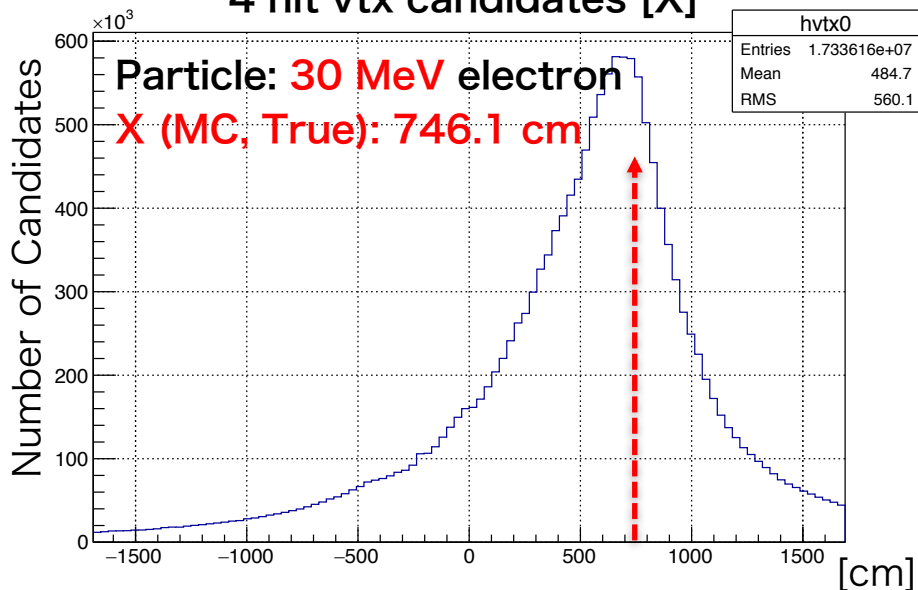


4 hit vtx candidates [Z]



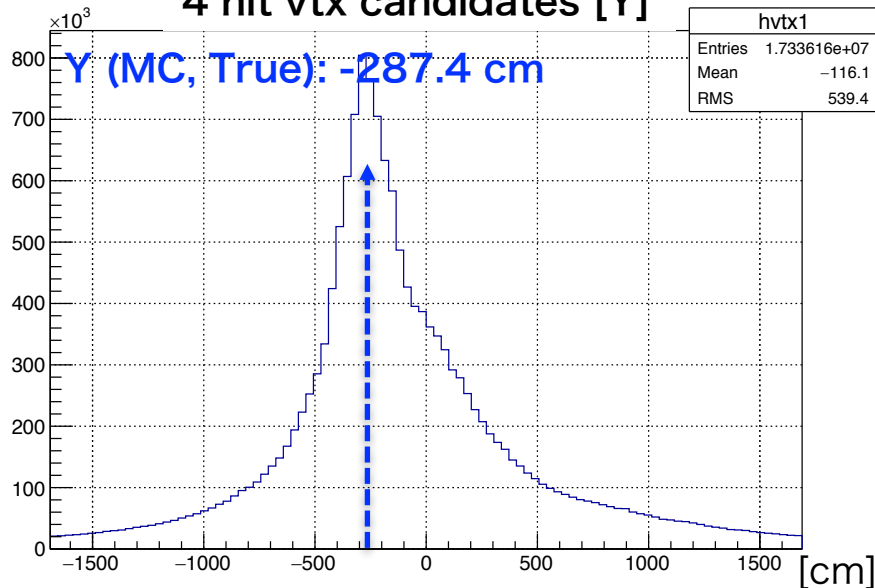
# 試作アルゴリズムの評価 (2)

4 hit vtx candidates [X]

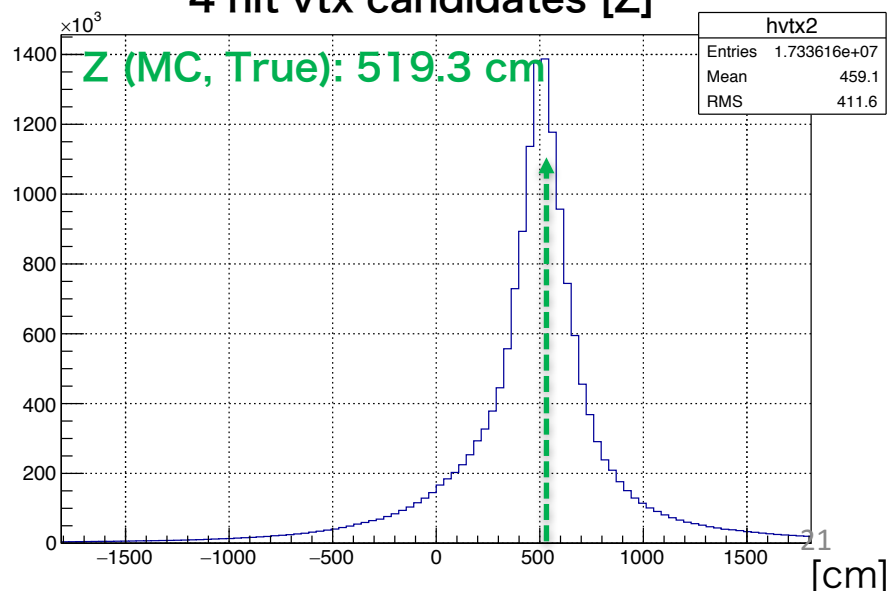


- 4 hit combinationによって得られたCandidatesの位置分布はMCの真の事象位置近くにピークを示す。
- 初歩的な統計処理として、Candidate分布のピーク位置を取り出し、真の位置との差(再構成の分解能)を評価。

4 hit vtx candidates [Y]

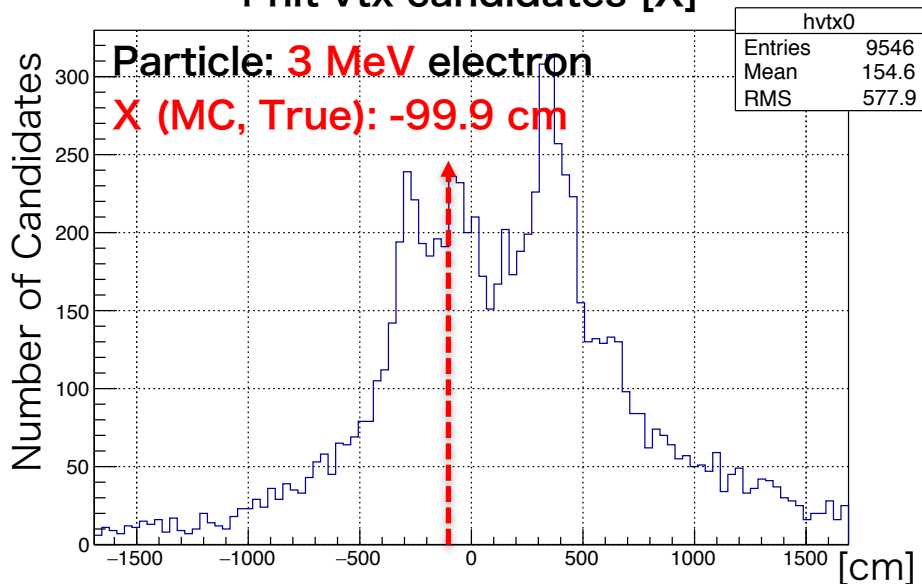


4 hit vtx candidates [Z]



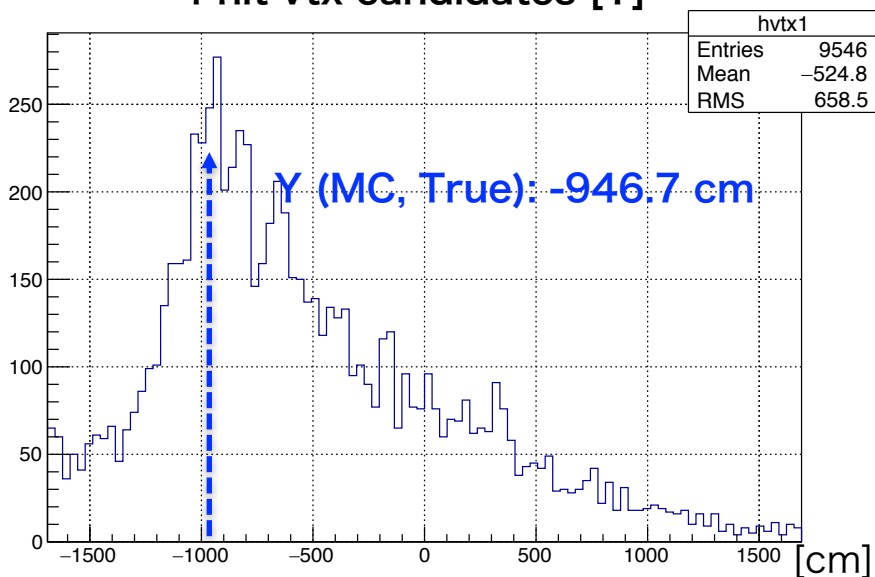
# 試作アルゴリズムの評価 (2)

4 hit vtx candidates [X]

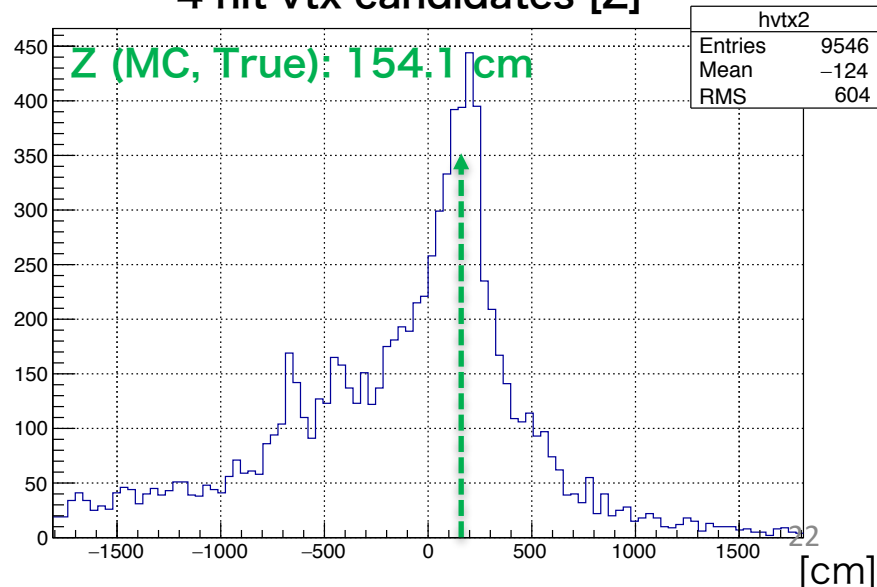


- 4 hit combinationによって得られたCandidatesの位置分布はMCの真の事象位置近くにピークを示す。
- 初歩的な統計処理として、Candidate分布のピーク位置を取り出し、真の位置との差(再構成の分解能)を評価。

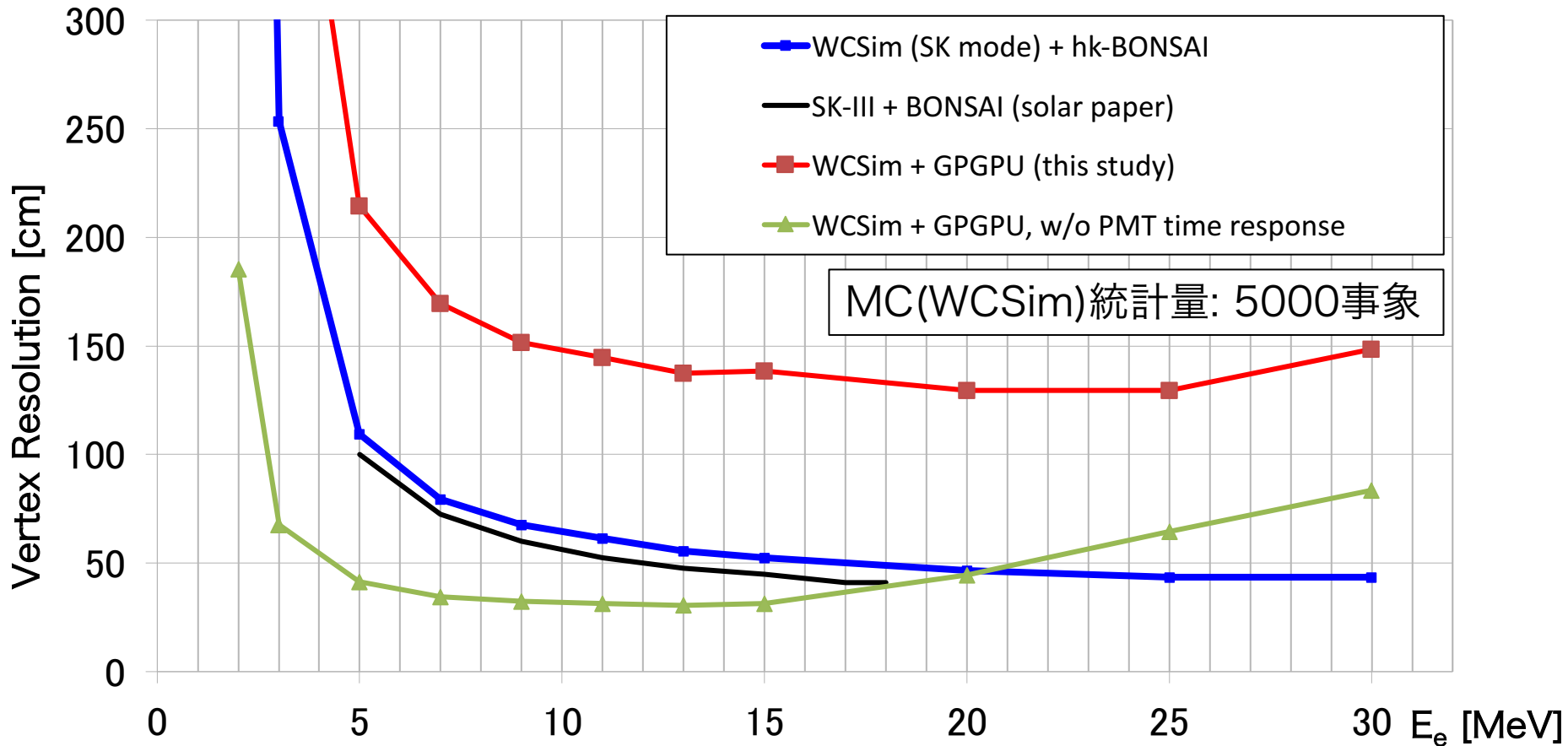
4 hit vtx candidates [Y]



4 hit vtx candidates [Z]

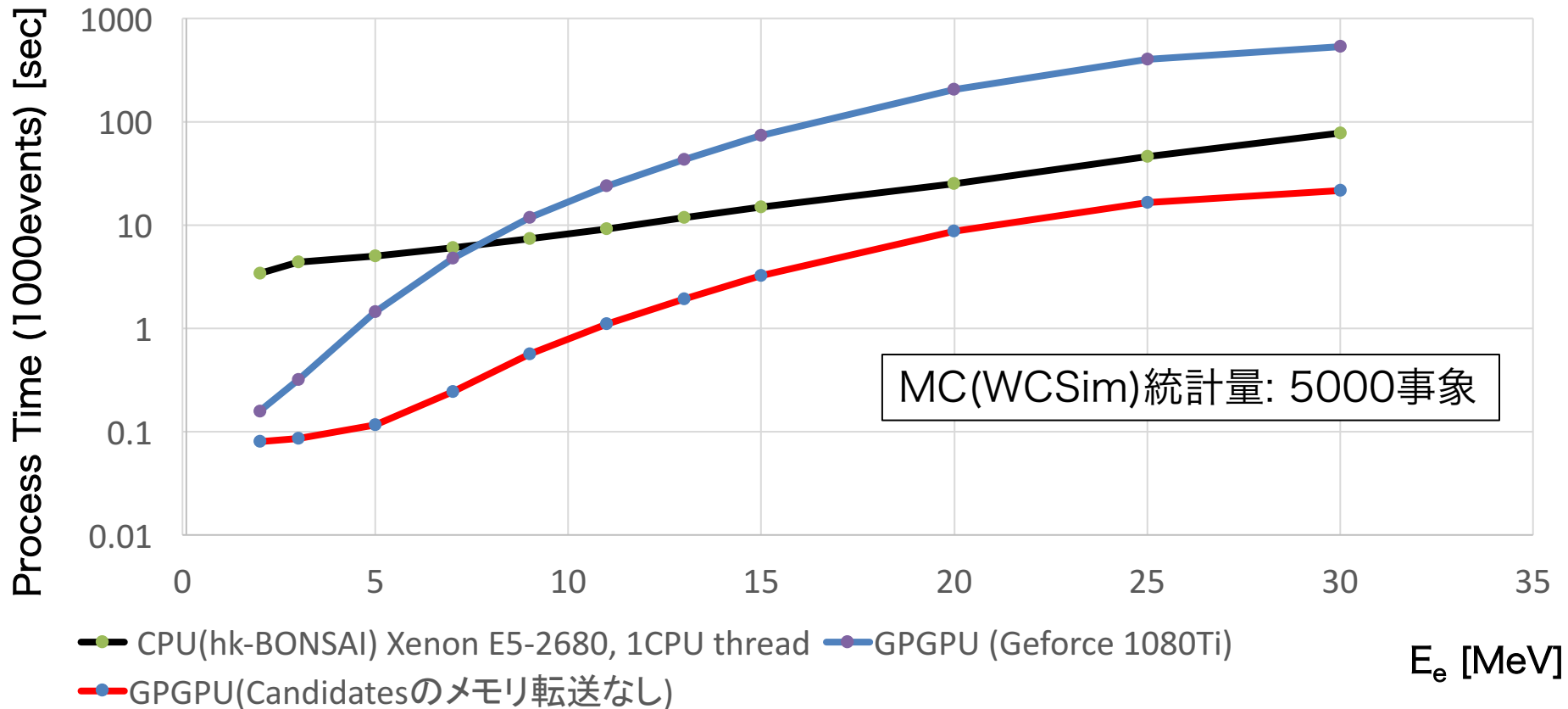


# 試作アルゴリズムの評価 (位置分解能)



- 現段階で試作アルゴリズムの位置分解能はSKの再構成アルゴリズムに及ばない。PMTの時間分解能が分解能悪化の主因。
  - 位置分解能: 68%の再構成事象が含まれる真の事象位置からの距離。
  - CPUによる統計処理(Likeilhood等 FineTune)で性能の向上が期待される。
- 今後Hyper-Kにおける性能についても確認。

# 試作アルゴリズムの評価 (計算時間)

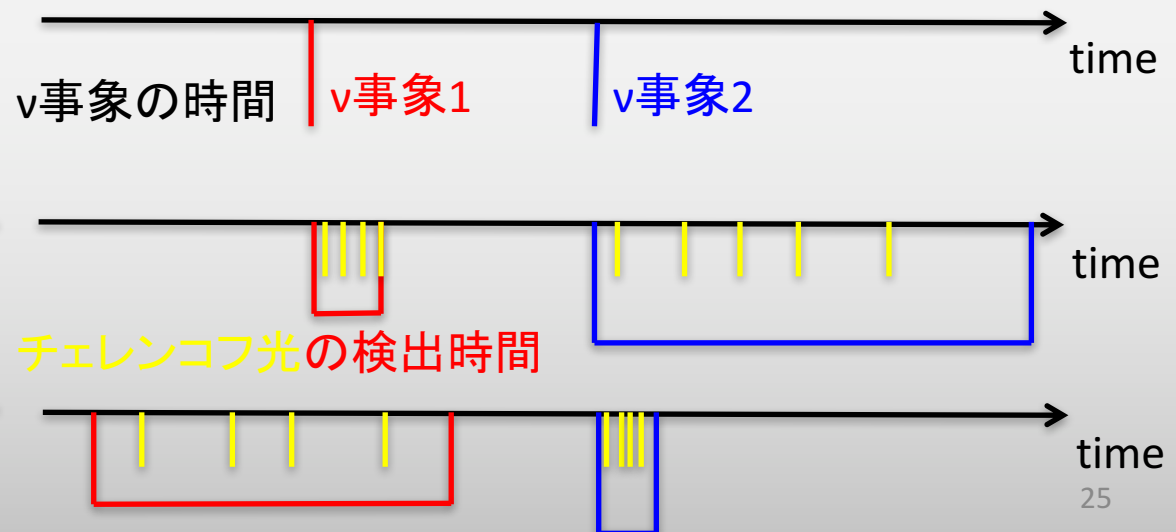
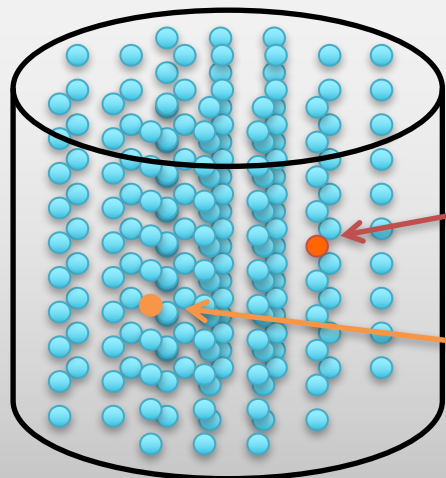


- 試作アルゴリズムはSKアルゴリズムよりも3~50倍高速(計算のみ)。
  - ただしXenon E5-2680は一基で16 thread走らせる事が可能。
  - SKのアルゴリズムは処理時間の~75%が4hit combination。
  - 4hit combinationの単純な置き換えを行うと2~4倍の高速化が期待される。
- Candidate vertex情報のGPU->CPUメモリ転送に課題。



# 別タイプのアルゴリズムの案

- HK用トリガーシステムを応用したアルゴリズム。
  1. **GPGPU**による格子点による初期事象位置候補の探索
  2. **CPU**によるチェレンコフ光検出の時間分布Likelihoodを用いた事象位置の Fine tuning。
- 超新星等でニュートリノ事象が時間・空間的に近接する場合、(定性的に)分離能力に優れると期待される。



# まとめと今後の予定

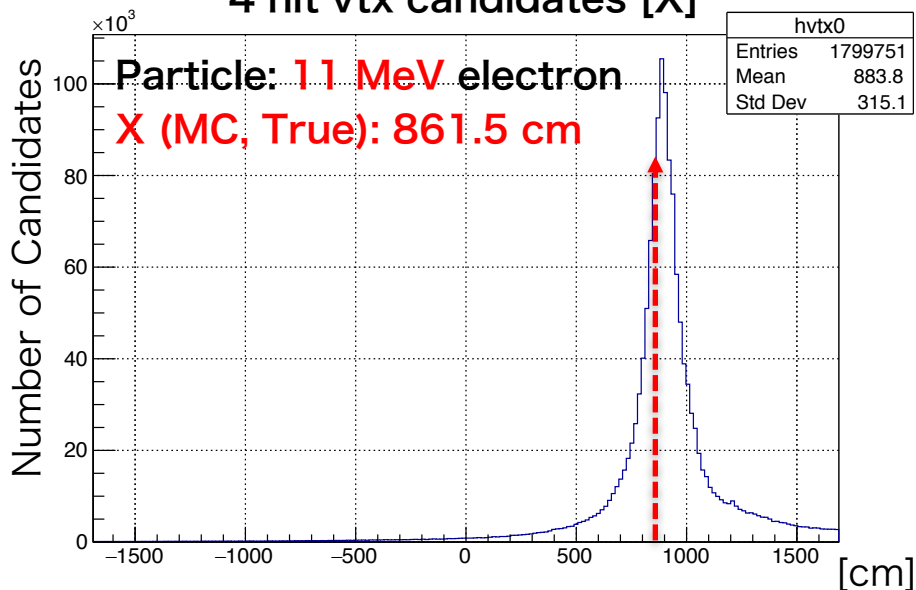
- 近年素粒子物理学分野においても、新しい計算資源である**GPGPU**が用いられ始めている。
- 本公募研究では、大型水チェレンコフ検出器のため**GPGPU**を用いた**ヘテロジニアス型事象再構成アルゴリズム**の技術開発・実証を行う。
- **実証用プログラムとしてとして、以下の概念のコードを作成中。**
  - 高速だが単純な計算に特化した**GPU**によるVertex候補探索
    - 4-hit combination
  - 複雑な計算に優れる**CPU**によるVertex Fine Tuning.
    - (To be done, Likelihoodないし他の統計的处理)
- 現段階で4-hit combination計算は0.003秒/事象@15MeV, SKを仮定。
  - 分解能は~140cm程度。方向Fitの導入・精度の向上が必要。
- コード自体の改良・HKのようなPMT(Hit)が多い状況での性能評価を継続する。

# Appendix

GPU計算でPMTの分解能を考えない場合  
=WCSimのTrue Timeを使用した場合

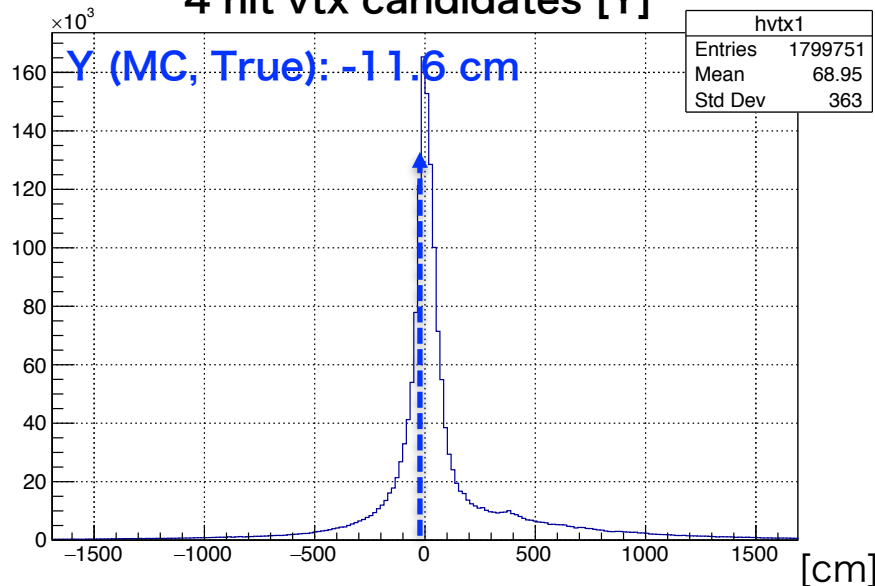
# 試作アルゴリズムの評価 (2)

4 hit vtx candidates [X]

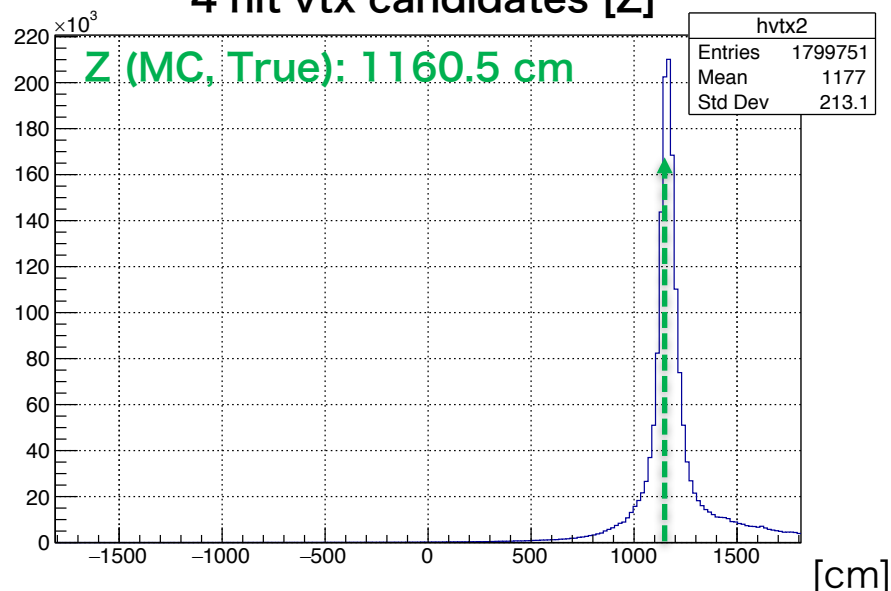


- 4 hit combinationによって得られたCandidatesの位置分布はMCの真の事象位置近くに鋭いピークを示す。
- 初歩的な統計処理として、Candidate分布のピーク位置を取り出し、真の位置との差(再構成の分解能)を評価。

4 hit vtx candidates [Y]

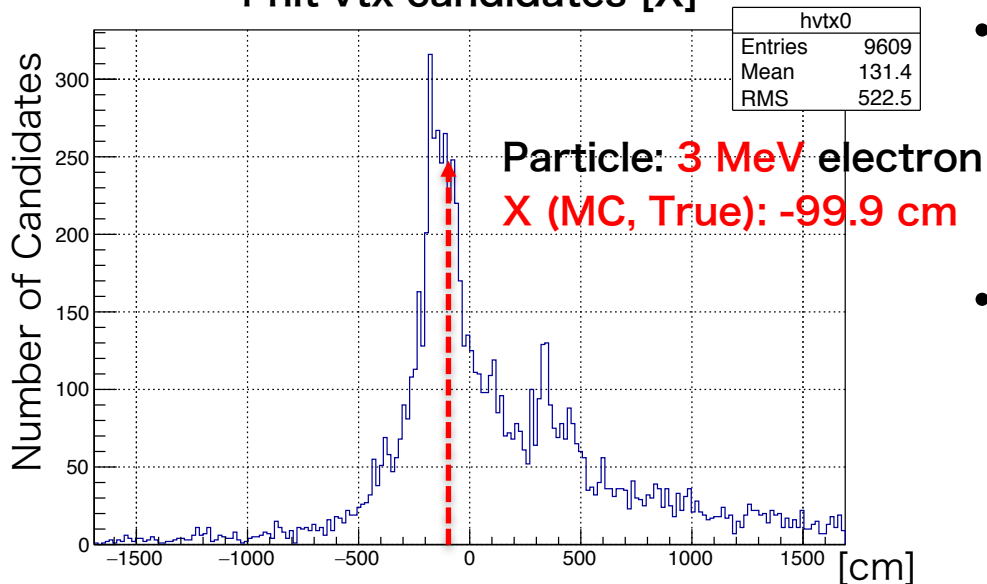


4 hit vtx candidates [Z]



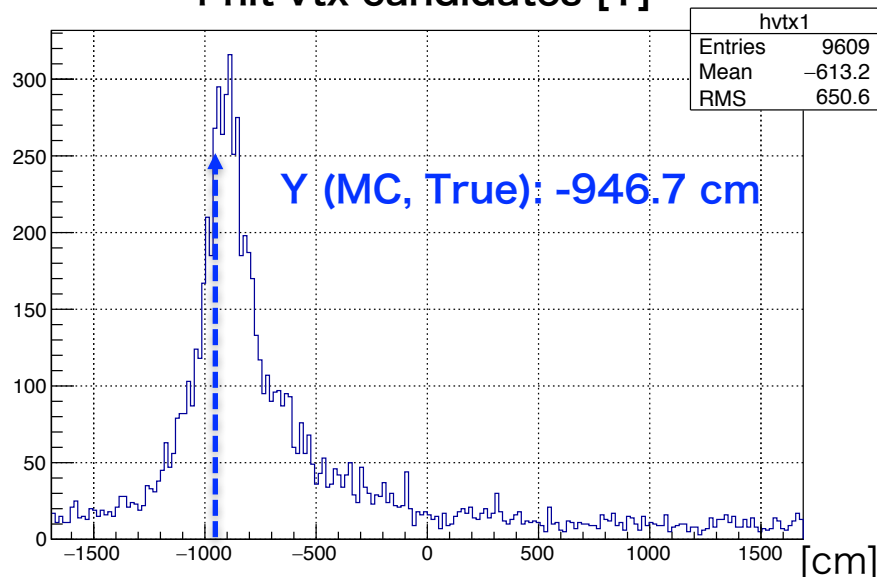
# 試作アルゴリズムの評価 (2)

4 hit vtx candidates [X]

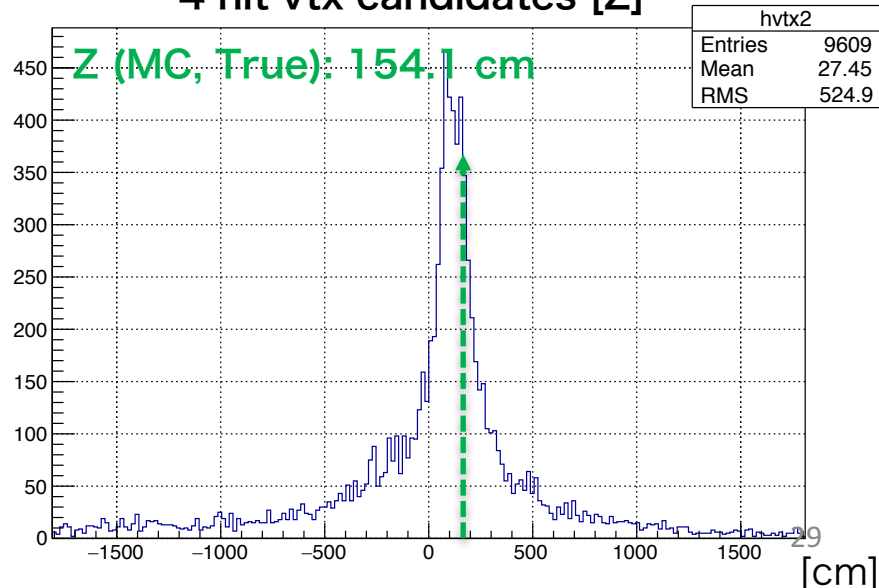


- 4 hit combinationによって得られたCandidatesの位置分布はMCの真の事象位置近くに鋭いピークを示す。
- 初歩的な統計処理として、Candidate分布のピーク位置を取り出し、真の位置との差(再構成の分解能)を評価。

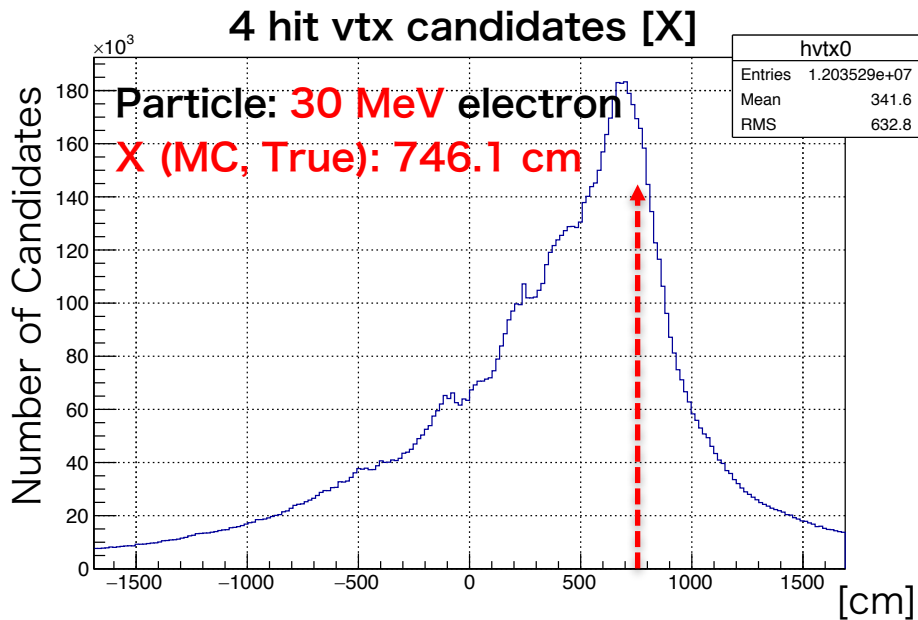
4 hit vtx candidates [Y]



4 hit vtx candidates [Z]



# 試作アルゴリズムの評価 (2)



- 4 hit combinationによって得られたCandidatesの位置分布はMCの真の事象位置近くに鋭いピークを示す。
- 初歩的な統計処理として、Candidate分布のピーク位置を取り出し、真の位置との差(再構成の分解能)を評価。

