

# SK-Gd実験における 中性子捕獲事象再構成手法の改善

原田将之(岡山大学)

他Super-Kamiokande Collaboration

日本物理学会 第76回年次大会 2021年3月14日

# 目次

---

- 導入
  - 超新星背景ニュートリノ
  - SK-Gd実験
- 中性子探索
  - 中性子位置再構成
- 位置再構成手法の検証
- まとめ

# 超新星背景ニュートリノ

- 超新星背景ニュートリノ (Supernova Relic Neutrino : **SRN**)  
: 過去に起こった超新星爆発で生成されたニュートリノ  
の重ね合わせ

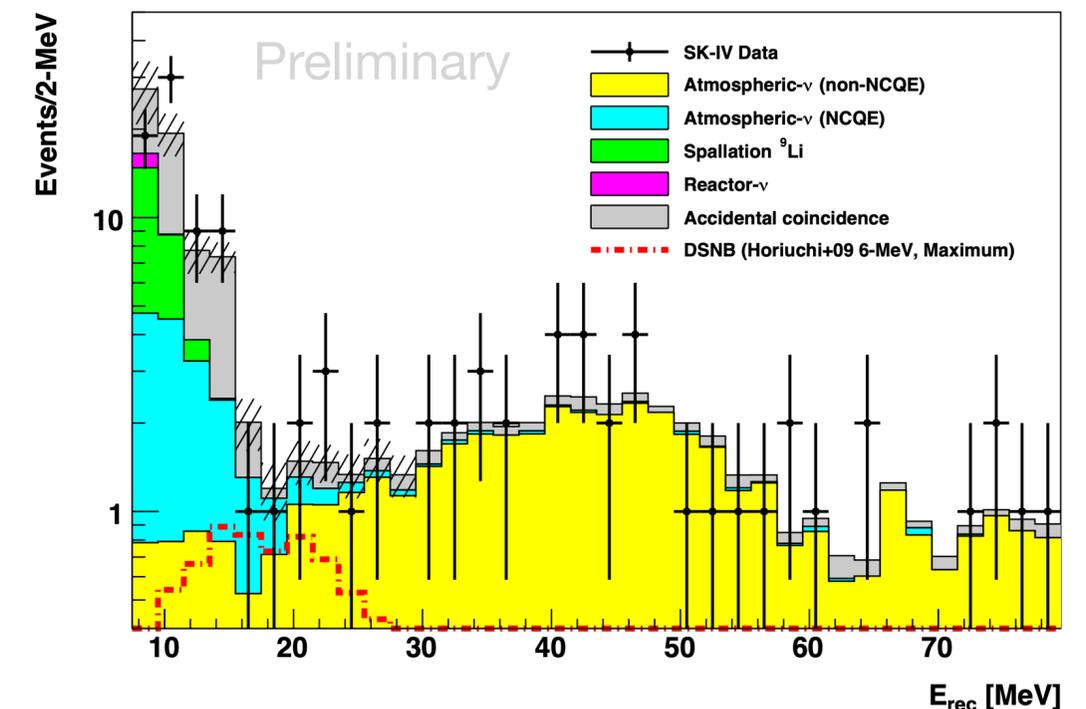
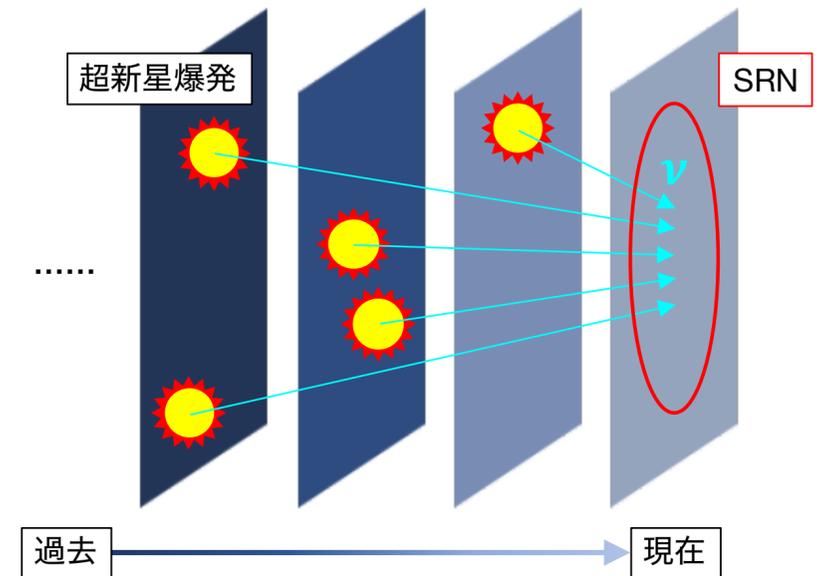
SRNの観測



超新星爆発機構・星形成の歴史の理解

- スーパーカミオカンデ実験では世界初観測を目指している
- SRNの強度が低い(~ 5 events/year)ため、純水での探索では感度が足りておらず、観測には至っていない

→ SK-Gd実験



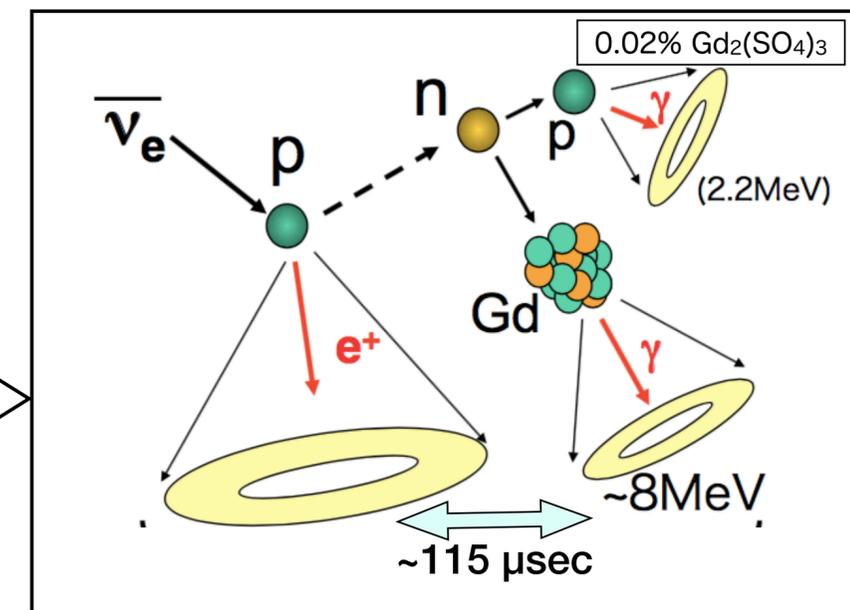
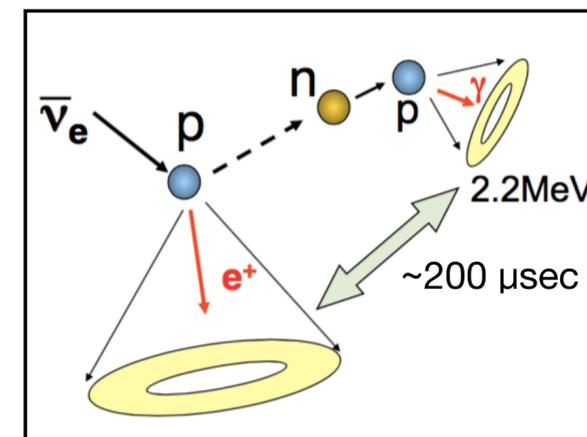
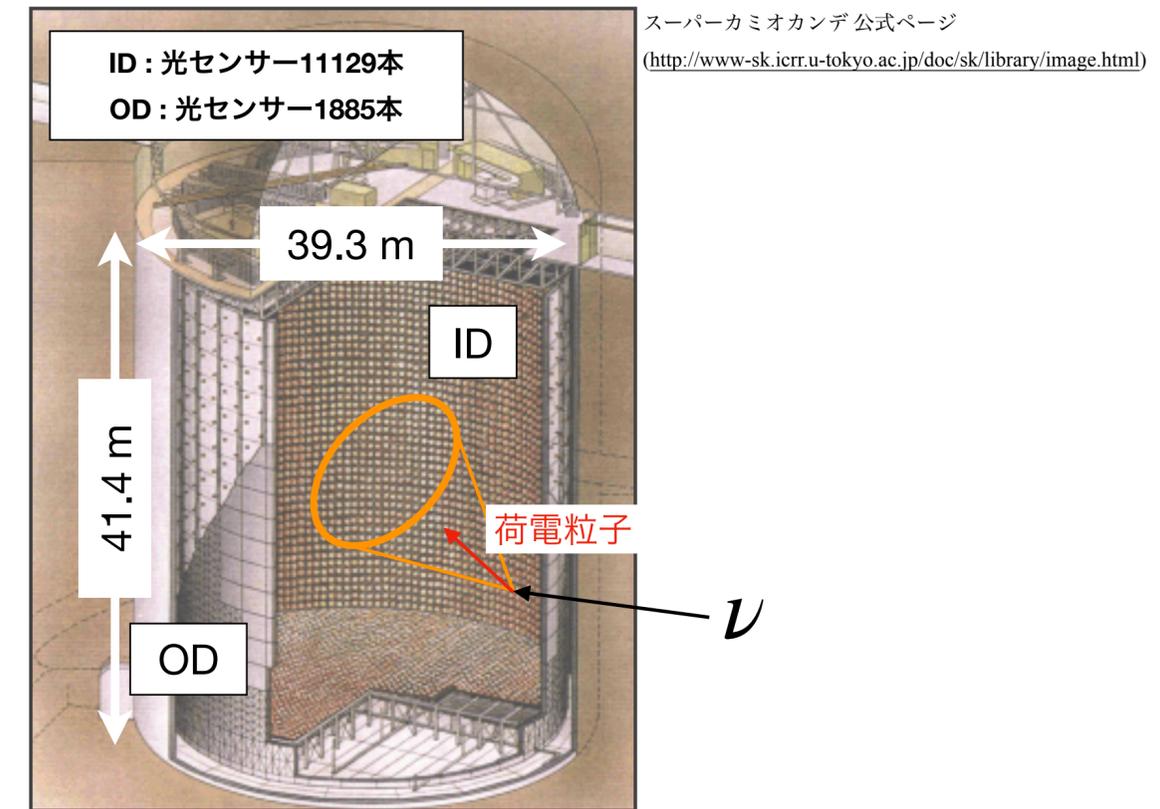
SKでの純水期におけるSRN探索の最新結果

(芦田 洋輔さんの発表(13aT1-2)より)

# SK-Gd実験

Super-Kamiokande検出器の超純水に硫酸Gdを溶解し、  
中性子信号を高効率で検出する

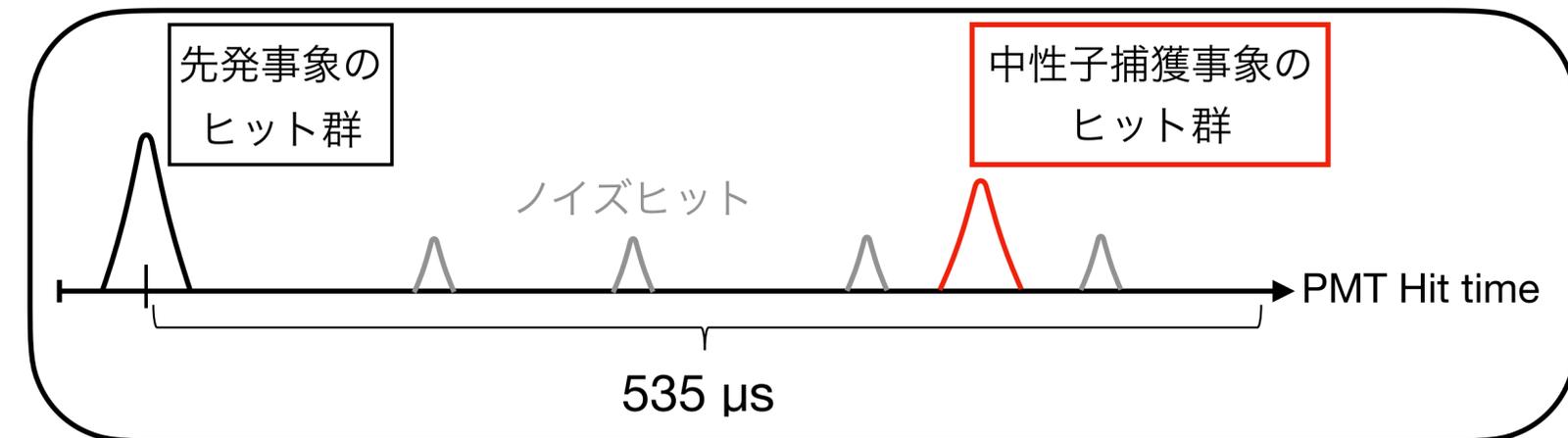
- Super-Kamiokande検出器(SK)
  - 超純水50 ktonを蓄えたチェレンコフ検出器
  - IDに11129本のPMT→Hit時間、電荷、ヒット数から事象再構成
- SRN信号(逆ベータ崩壊) :  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- 陽電子に付随する中性子を探索することでバックグラウンドを削減  
→ 同時遅延計測
- Gdの中性子捕獲 : 合計~8 MeVのガンマ線
- 2021年3月現在、Gd濃度0.011%相当が導入済  
(Gdの中性子捕獲 ~ 50%)



# 中性子探索

- 535 usのヒットから中性子由来のクラスターを探索  
→ノイズ由来のヒットとの識別が重要

- 機械学習を用いて、ヒット数・中性子捕獲事象の再構成情報を使って中性子信号を識別 → Neutron-Tagging

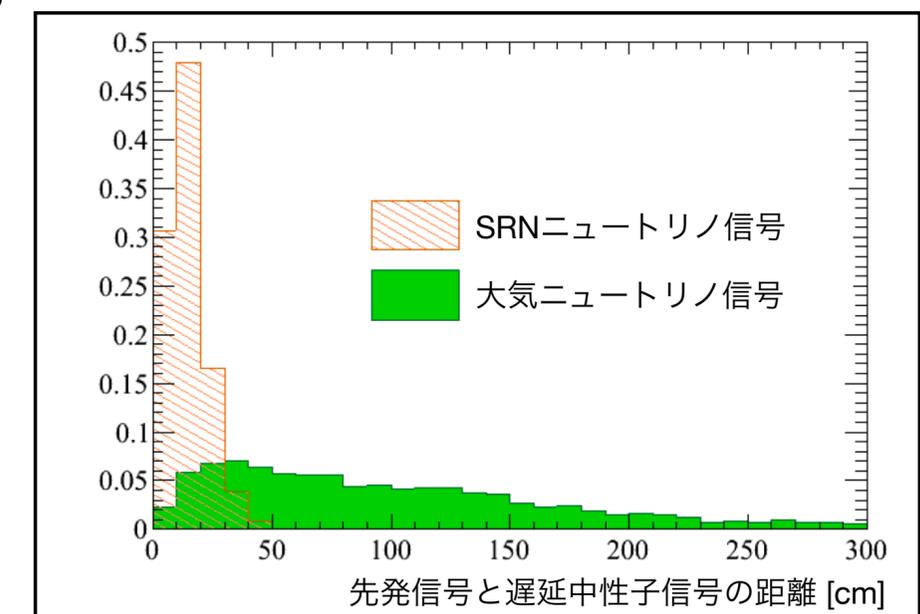


- 詳細はHanさんの発表(講演番号12aT2-4)を参照 ( Tagging Efficiency ~ 65% )

- 中性子捕獲位置再構成

- Neutron-Taggingに用いる変数は中性子の位置・ヒット数の再構成情報に基づいている  
→再構成精度が中性子同定・選別精度に直結する可能性
- 中性子事象-先発事象の距離は中性子エネルギーと相関有  
→大気ニュートリノなどからの中性子を伴うバックグラウンドの削減

- 現行の再構成手法は純水での中性子捕獲(2.2 MeV)について構築されている  
→現行の手法のSK-Gdにおける検証、改善を行った



# 中性子捕獲信号の位置再構成手法

## 現行手法

### PMTへのHit 時間を使った グリッド探索

① 先発事象を使ったT-TOF分布から、  
Timing windowを用いたHit selection

② Selected Hitを用いたGrid search

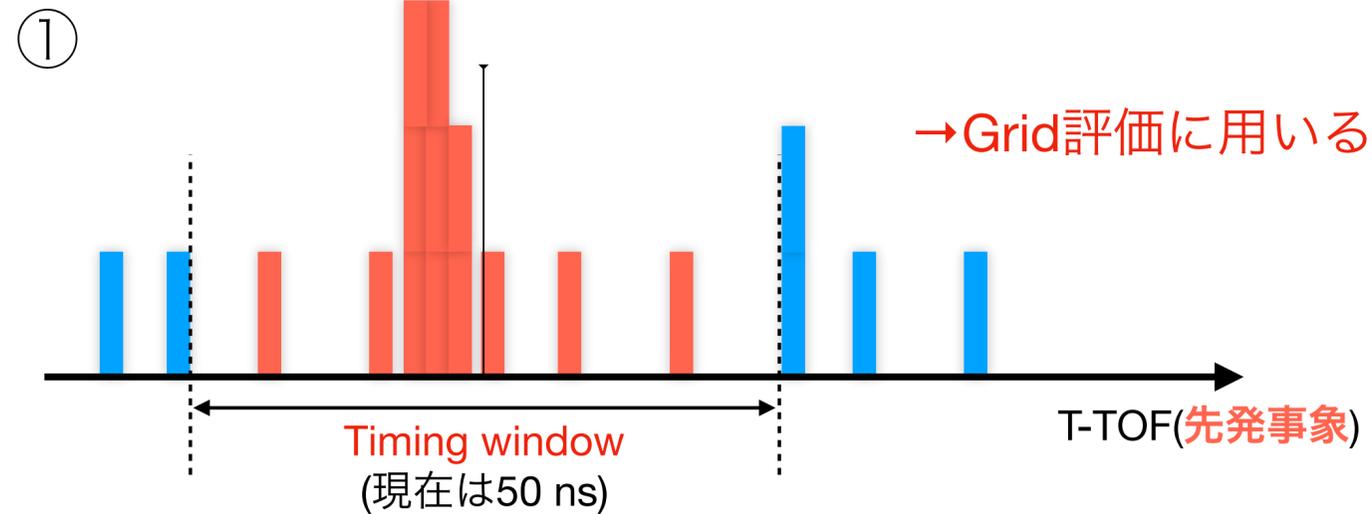
I. 100 cmグリッド作成

II. 各グリッド点を使ったTOF補正

III.  $T_{RMS}$ 評価

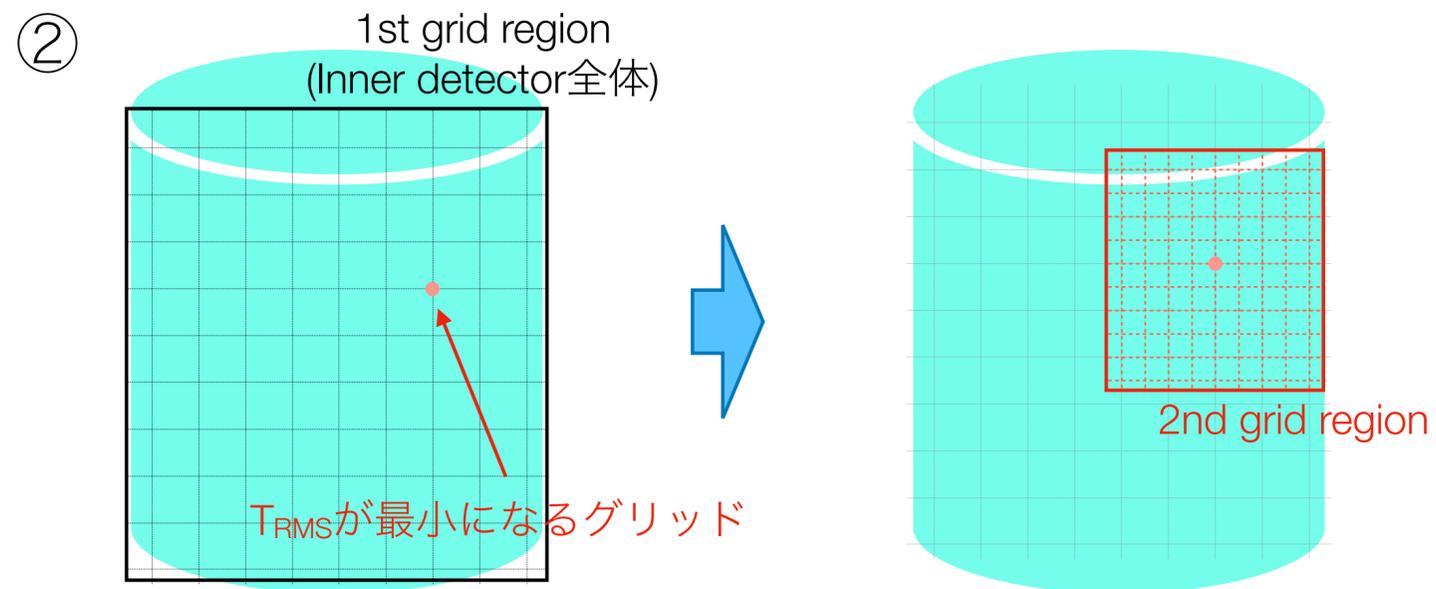
0.5 cmになるまで

グリッドを小さくしながらLoop



$$TOF = \frac{(PMT \text{ Position}) - (Prompt \text{ vertex})}{c/n_{\text{water}}}$$

中性子捕獲の位置が分からないため  
先発事象を使う



$$TOF = \frac{(PMT \text{ Position}) - (Grid \text{ position})}{c/n_{\text{water}}}$$

TOF補正が良い = Hitが最も集まると考える

→ $T_{rms}$ が最小の点を探索

Gd信号に対してパラメータが変更される可能性

→MCを用いてGd信号におけるTiming windowの検証・改善を行なった

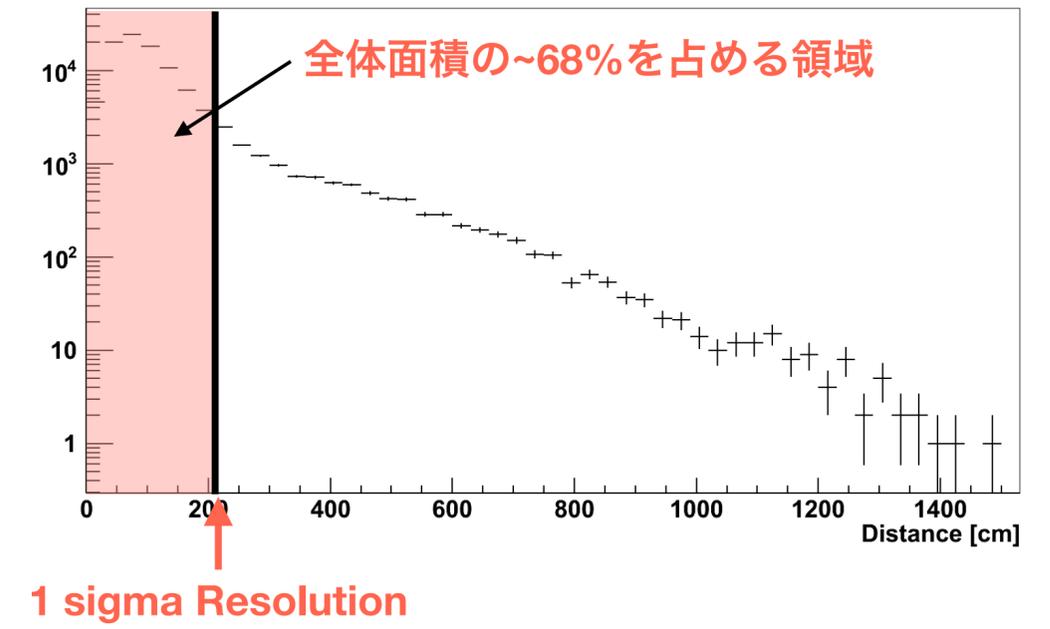
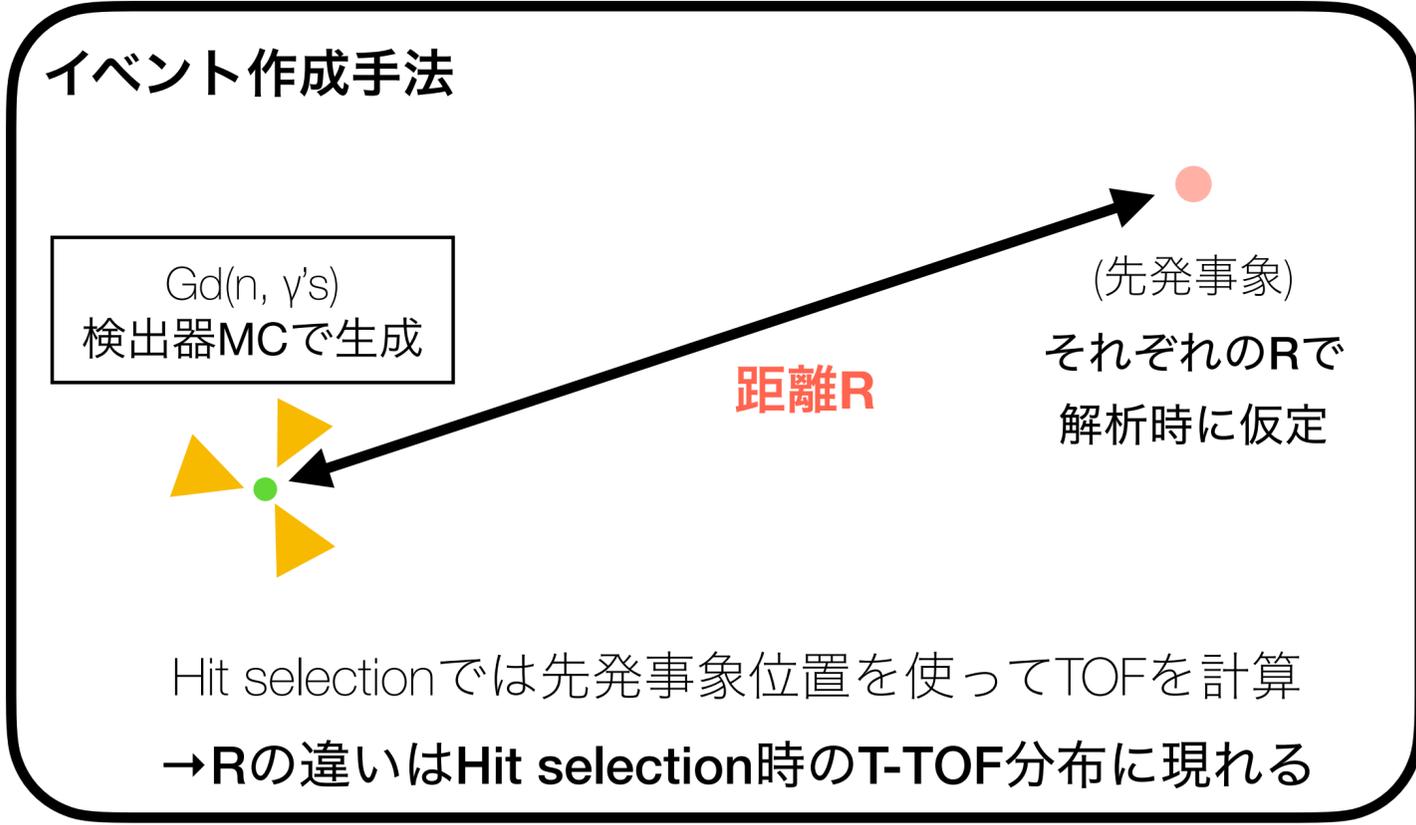
# 検証方法

先発事象と中性子の距離  $R$   
Hit selectionでのTiming window  $T$

- ・  $R$ と $T$ の相関
  - ・ 適切な $T$ の見積もり
- を簡単なMCを用いて検証

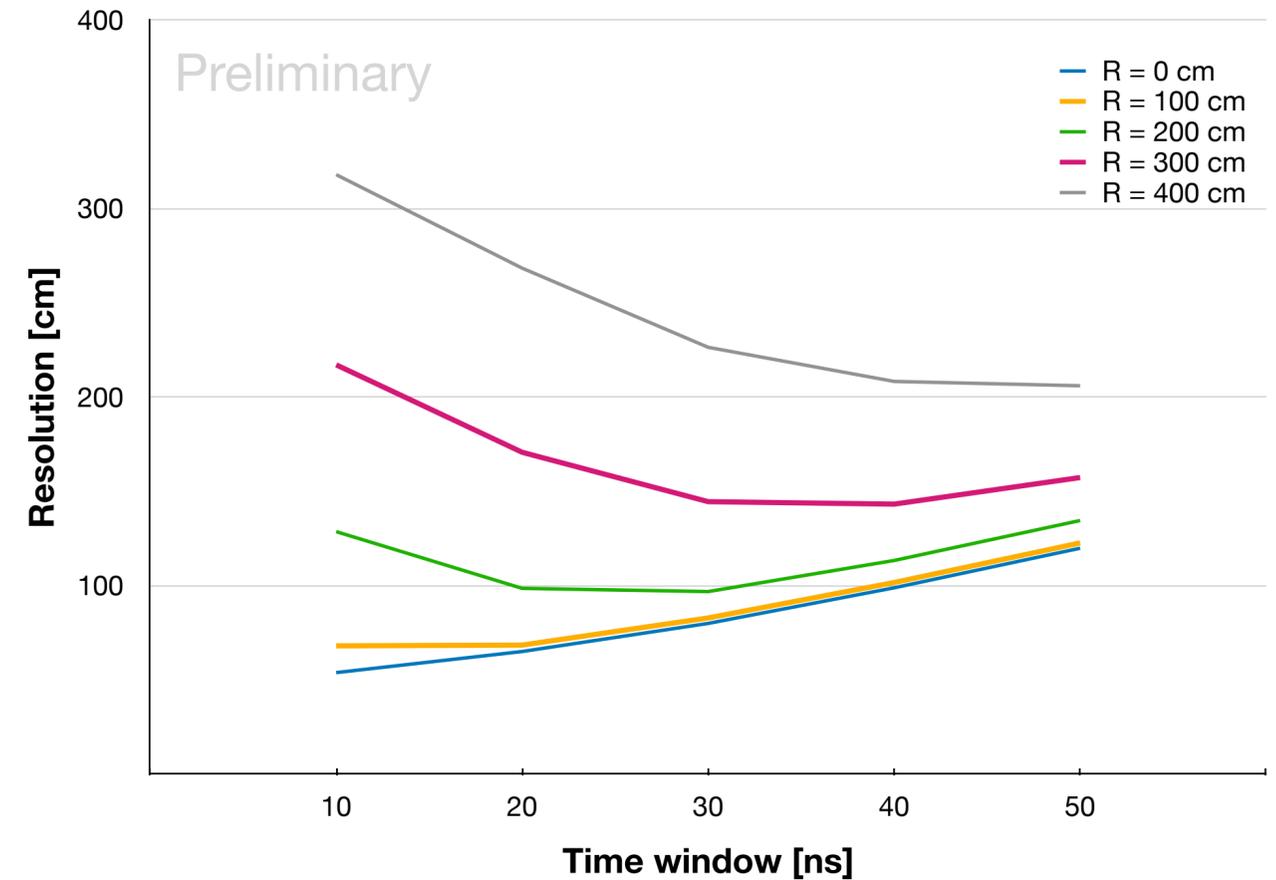
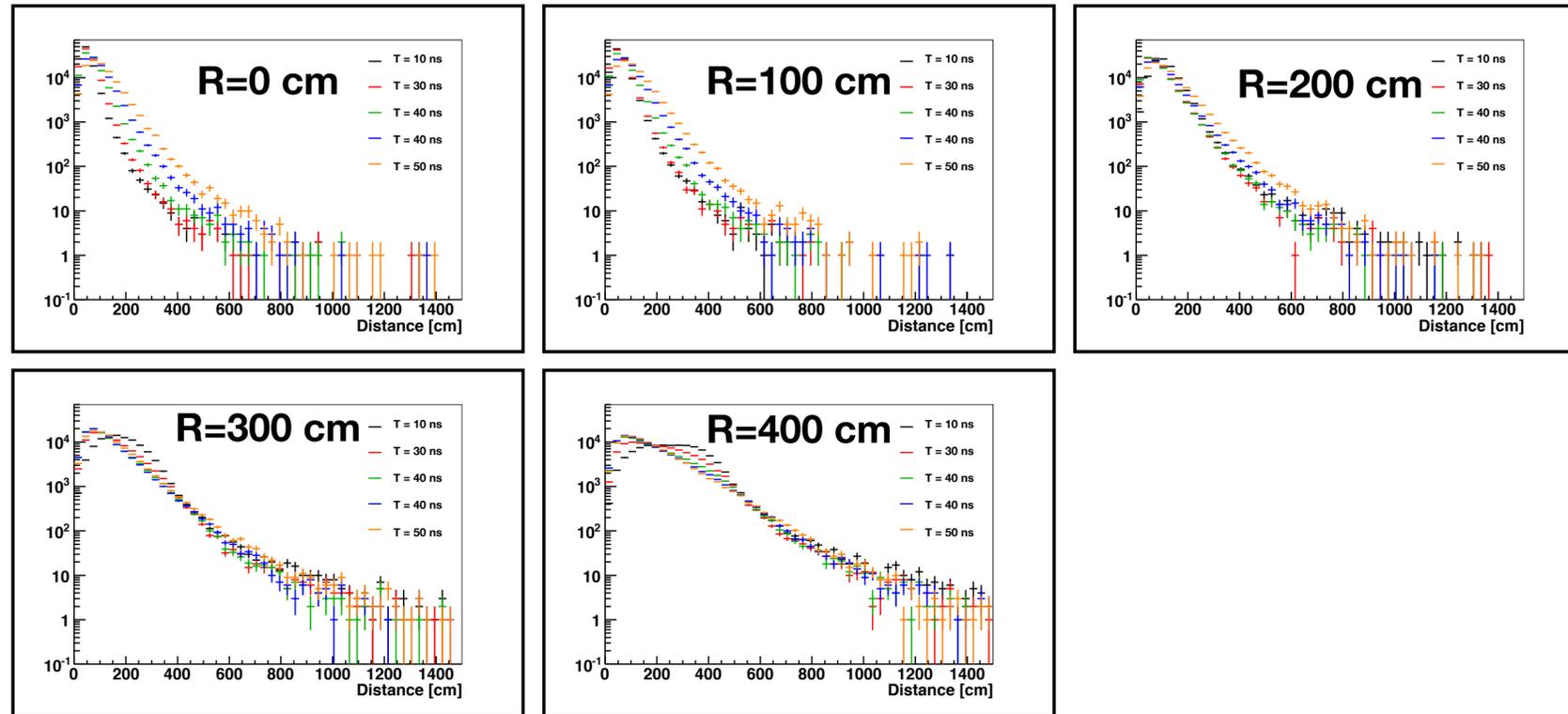
## 検証方法

- Gd(n,  $\gamma$ 's)事象からの $\gamma$ 線をタンク内一様に生成 (10万 event)
  1.  $R$ を(0, 100, 200, 300, 400 cm)と定義  
→先発事象の位置は解析時に $R$ の距離でランダムに決定  
Hit selectionでのTOFの計算に用いる
  2.  $T$ を(10, 20, 30, 40, 50 ns)で用意  
→(再構成位置 - 真の生成位置)の距離をプロット
  3.  $R \times T = 25$ 個のプロットに対し、  
1sigma Resolution = 全面積の $1\sigma$  (~ 68%)となる距離を計算



# Timing windowの検証 ①

(再構成 - 真)位置の距離分布



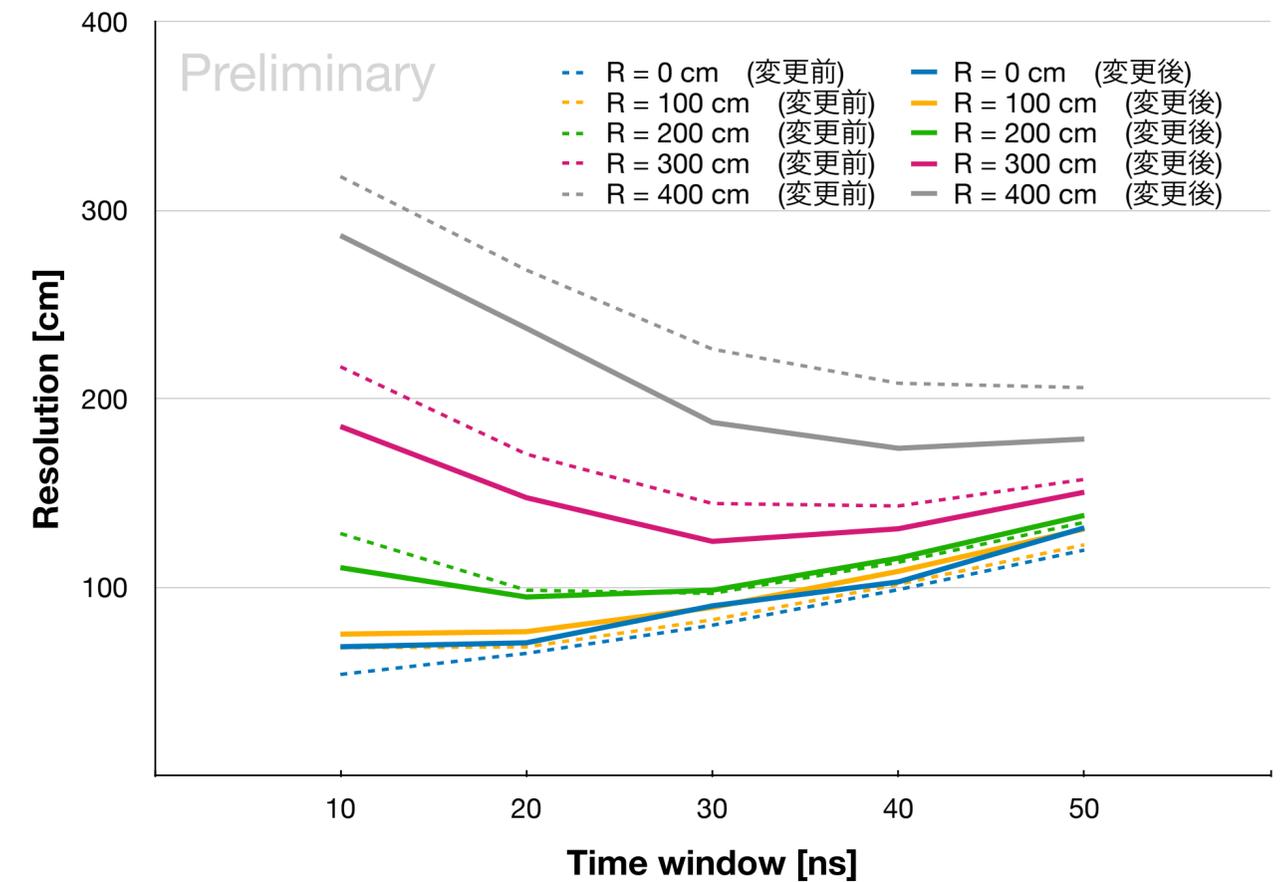
- Rが大きくなる  
 →Hit selectionでTOF補正の精度が悪くなる  
 →True hitの割合が減って位置分解能が悪くなる
- R < 100 cmの範囲ではTOF補正の精度がいい  
 →Timing windowが小さいほど位置分解能が良くなる
- 結果①: 現在の50 nsは大きく取りすぎている

1 sigma resolution [cm]

	0 cm	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm
10 ns	54.0	68.2	128.8	217.3	318.2
20 ns	65.2	68.6	98.7	170.9	268.6
30 ns	80.1	83.0	97.0	144.7	226.6
40 ns	99.0	101.8	113.5	143.4	208.5
50 ns	120.0	122.8	134.7	157.5	206.2

# Timing windowの検証 ②

- 前ページの結果から、中性子の移動距離 R が大きいと TOF の補正が効きにくくなる  
→各Loopの最初にBest gridを使ったTOFでHit selectionをし直す
- R が小さい領域での変化は少ない
- R が大きい領域で、期待通り分解能の向上が見られた
- 結果②：Loop毎にHit selectionをやり直すことで、  
R が大きい領域で 最大30 cm 程度の分解能の向上が得られた



	0 cm	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm
10 ns	68.7	75.4	110.7	185.6	286.9
20 ns	70.8	76.7	95.1	147.8	237.7
30 ns	90.4	89.6	98.7	124.6	187.7
40 ns	103.1	108.7	115.7	131.3	174.0
50 ns	131.8	131.2	138.4	150.7	178.9

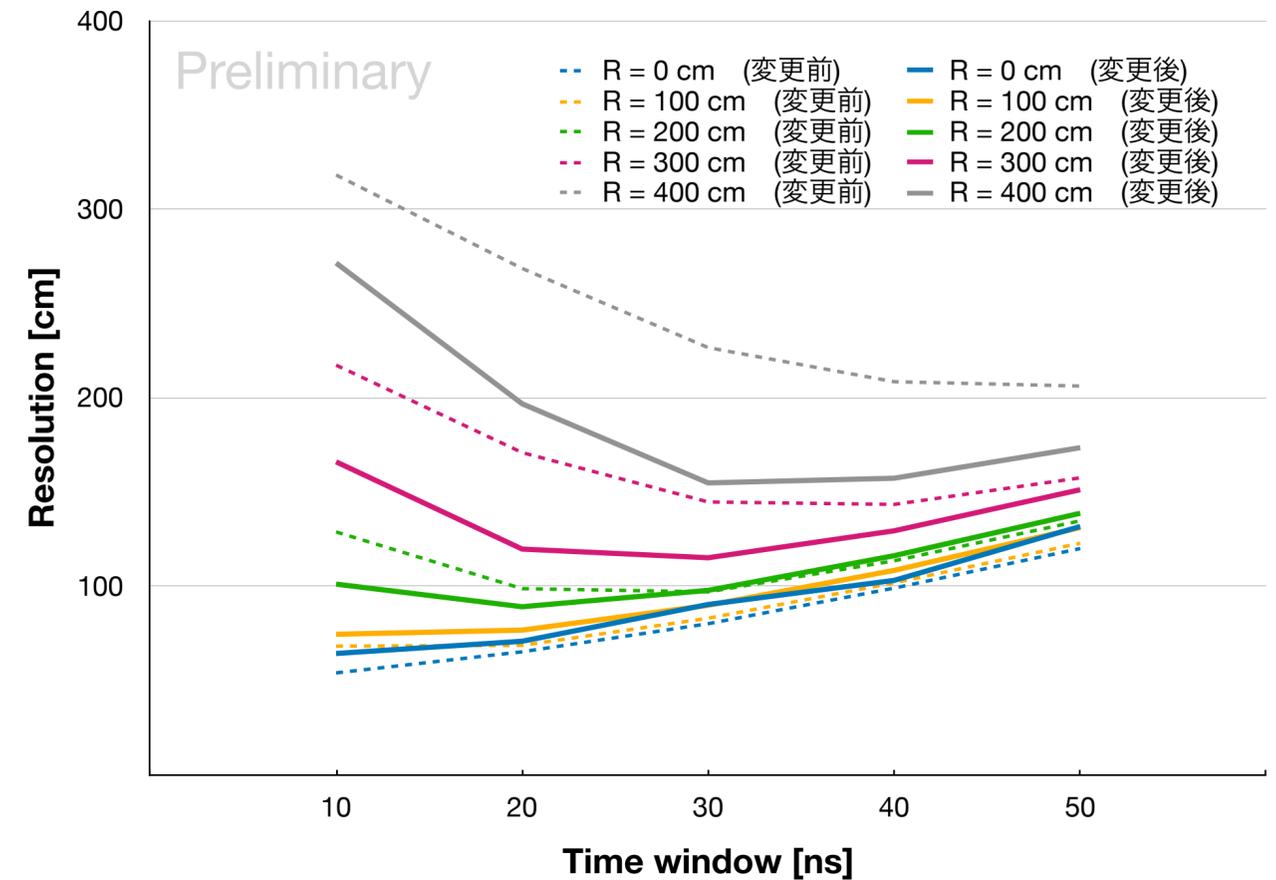
10 cm以上分解能が向上    10 cm以上分解能が低下

# Timing windowの検証 ③

- Gd信号はノイズヒットより十分大きい  
→ Selected Hit数自体での評価ができる可能性を検討する
- Grid評価時に
  - Grid点を使ったTOF補正  
→ Timing window内のHit数  $n_{Selected}$  を計算

を行い、 $\frac{T_{RMS}}{\sqrt{n_{Selected}}}$  を使ってBest gridを探索

- 結果②で得られた結果と比べて、Rが大きい側で分解能が向上
- 結果③：Hit数を使ってGrid searchをすることで、  
Rが大きい領域で最大40 cm程度の位置分解能の向上が見られた
- 今後：30 nsのwindowが妥当?



	0 cm	100 cm	200 cm	300 cm	400 cm
10 ns	64.3	74.5	101.1	166.0	271.5
20 ns	70.8	76.7	89.1	119.7	196.8
30 ns	90.3	89.9	97.8	115.1	154.8
40 ns	103.1	108.4	116.2	129.4	157.3
50 ns	131.7	131.1	138.7	151.2	173.5

10 cm以上分解能が向上    10 cm以上分解能が低下

# まとめ

- SKで中性子信号の同定効率を向上させる**SK-Gd実験**が始まった
- SK-Gdでは中性子の同時遅延計測を行うために、機械学習を用いた**Neutron-Tagging**で中性子を探索
- Neutron-Taggingで使う変数を計算するためには中性子捕獲発生位置の再構成が必要  
→Gd(n,  $\gamma$ 's)事象の再構成について、位置分解能の検証を行なった
- 結果①：位置分解能はRに依存し、Timing windowは短くできる
- 結果②：Hit selection手法の改善によりRの大きい領域での精度が向上
- 結果③：Grid searchの改善でRが大きい領域での精度向上が図れる
- 今後：30 nsのTime windowで改善した手法をNeutron-Taggingに導入し、同定効率の変動を調べる