

2022年02月20日

ICEPP Symposium

SK-Gdにおける宇宙線ミュオン由来の 中性子捕獲信号を用いた水槽内全域での エネルギー再構成の改善

東大理 横山・中島研究室 M1

志摩 静香

- ▶ 2020年にSKタンクにガドリニウムが加えられ、SK-Gd実験が開始した
 - 中性子の検出効率が劇的に向上
 - 超新星背景ニュートリノの探索感度の向上

- ▶ 本研究では、核破碎中性子反応を用いる
 - 核破碎中性子信号やGd濃度を用いた検出器応答の安定性の確認
 - SKが検出した中性子信号の位置依存性、時間依存性を評価してエネルギー較正手法の開発を目指す

SKでの低エネルギー領域の較正方法

- ▶ SKでは様々なエネルギー領域での物理事象を観測するために各エネルギー領域で異なるエネルギー較正が行われている

energy	3.5 ~20MeV	~100MeV	100MeV~
物理事象	 太陽ニュートリノ	 超新星背景ニュートリノ	 大気ニュートリノ
較正源			 陽子崩壊
Linac	5, 8 MeV	12, 15, 18 MeV	
DT calibration		○	
decay e		○	約 50 MeVまで
¹⁶ N		○	
Ni		○	
核破碎中性子		約 8 MeV	

▶ 太陽ニュートリノ

- SK-IVのエネルギー統計誤差：0.54%（そのうち位置依存性が0.44%）
 - SK-IVの時間的な安定性：0.5%以内で安定
- ➡ SK-Gdでは、同じ程度かより良い精度を目指す

▶ 超新星背景ニュートリノ

- バックグラウンドを減らすことを重要視
- 中性子の検出効率を正しく理解

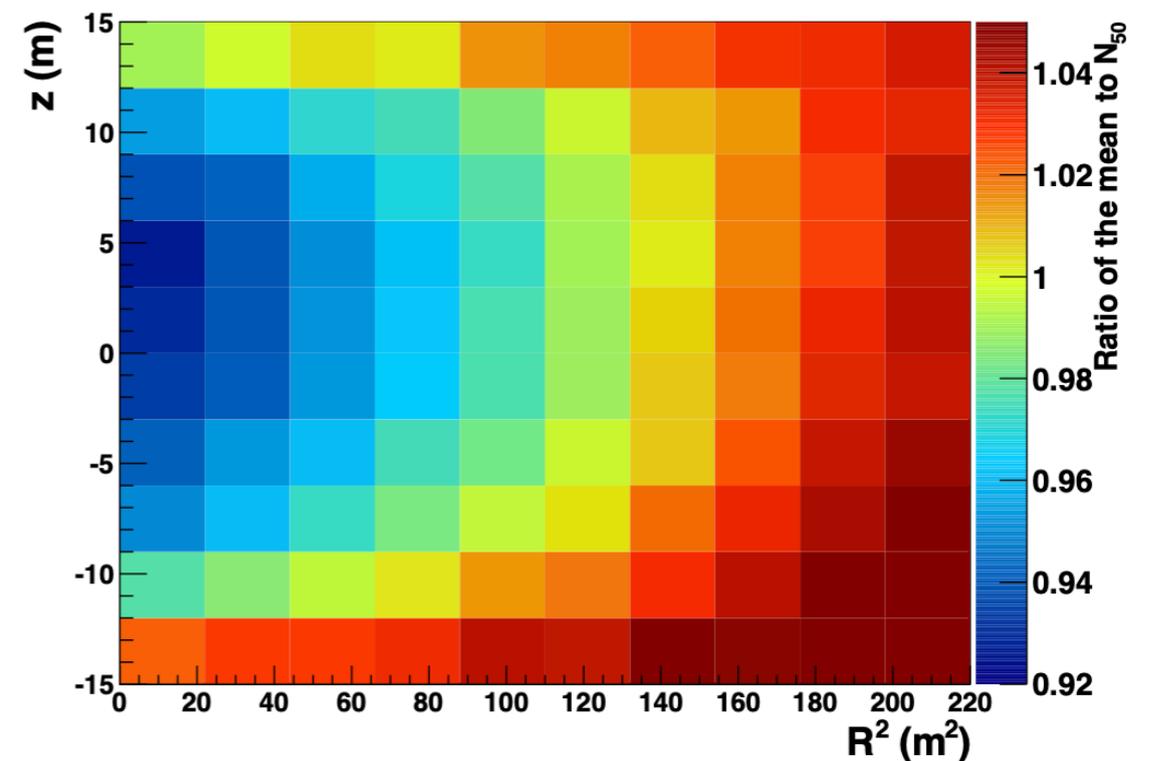
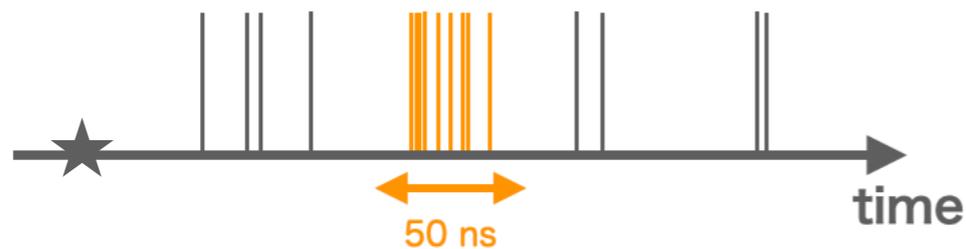
- ▶ チェレンコフ光がヒットしたPMTの本数から荷電粒子のエネルギーに変換



- 低エネルギー事象では放出される光子が少なくヒットのPMT 1 つにつき 1 光電子程しか入射しない

- ▶ 50 ns 以内に光を検出したPMTの数： N_{50}

- 位置依存性がある

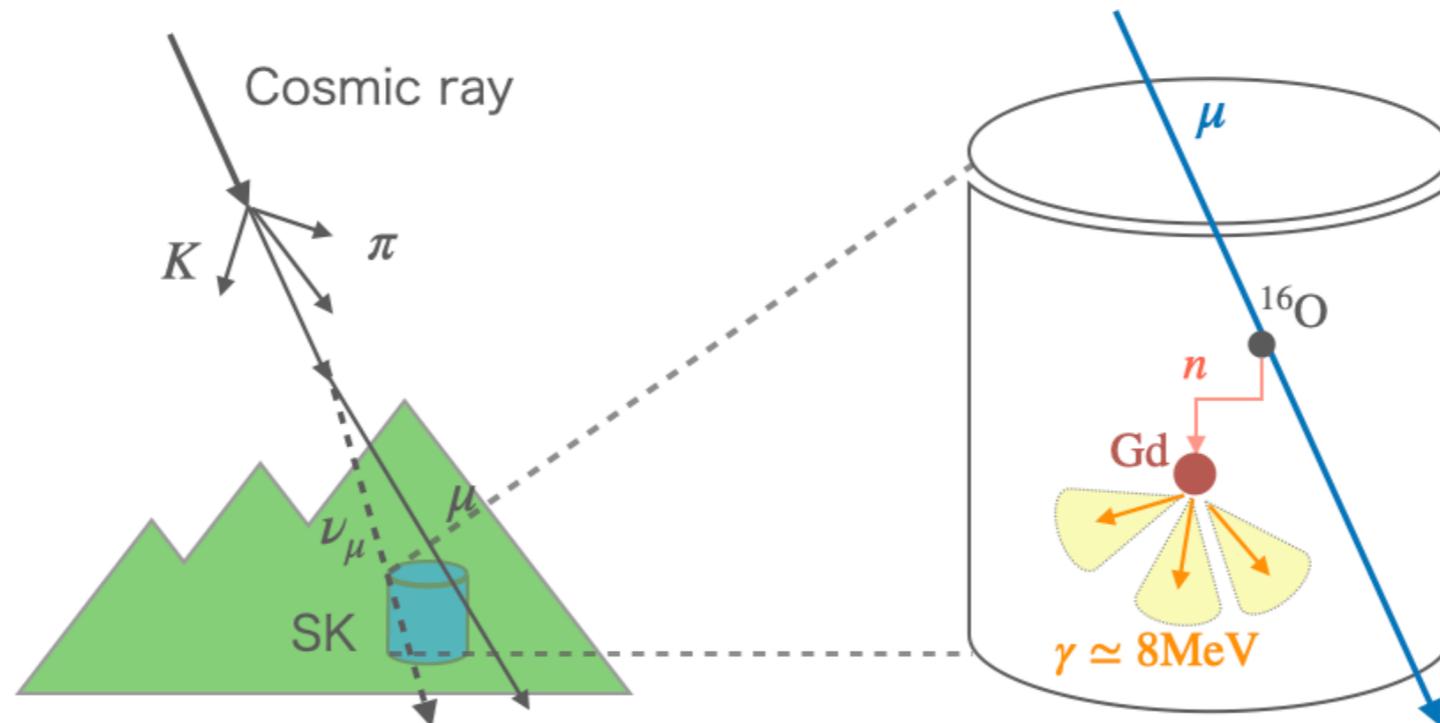


▶ N_{50} の補正

- 位置依存性の他にもPMTのdark noiseやチェレンコフ光の散乱・反射、水の状況などによる影響があるので補正する必要がある
 - ➔ この補正を較正によって評価する
- 従来の補正： N_{eff} (-> p20)
- Gd導入後、水質が変化したので新しい補正の手法を開発する必要がある

▶ 核破碎中性子

- 宇宙線ミュオンがSK検出器内の酸素原子と反応して生成する



▶ 核破碎中性子を用いた較正の利点

● 事象数が多い

核破碎中性子：1日 約 10^5 事象 | ^{16}N ：1日 約20事象

● 検出器全域で観測される

核破碎中性子：全域 | LINAC： $x = (-12, -8, -4)$ 、 $z = (-12, 0, 12)$ [m]

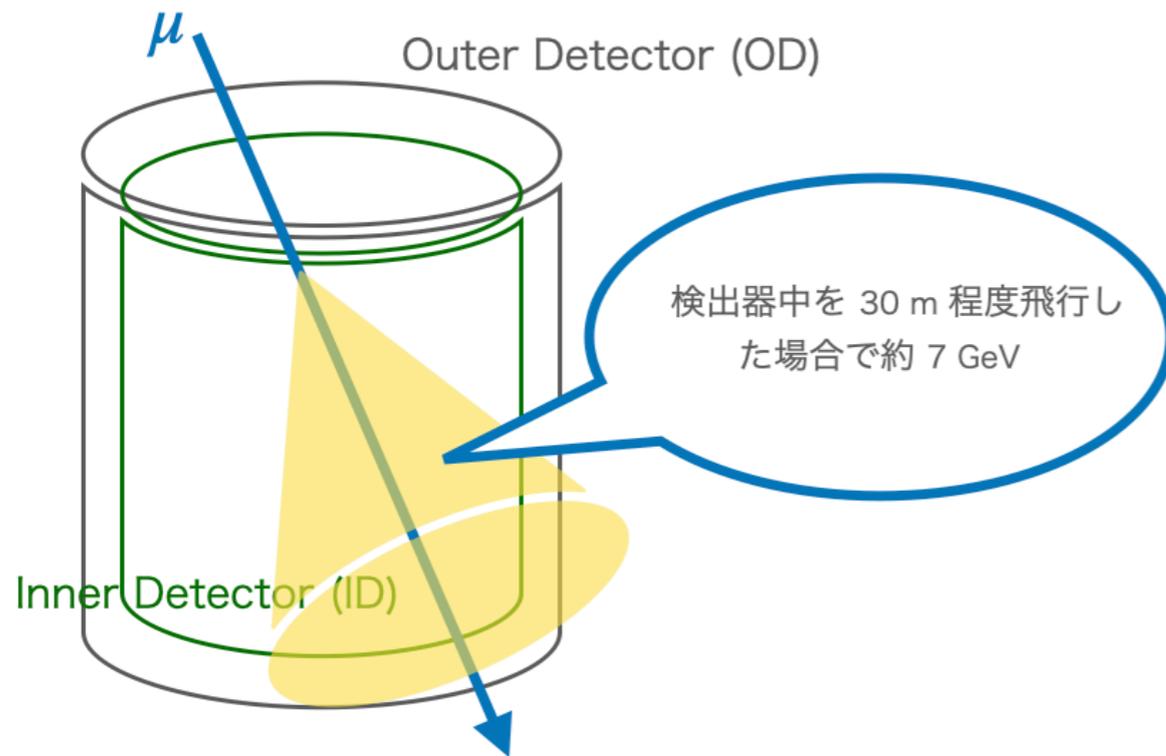
● 一定のエネルギーを観測できる

核破碎中性子：合計 8MeV

他の較正源の欠点を補う

▶ 宇宙線ミュオン選別条件

- ① Outer Detector と Inner Detector の両方のPMTが反応
- ② IDで観測された信号の積分電荷の総量： $Q_{\mu} > 10000$ p.e.



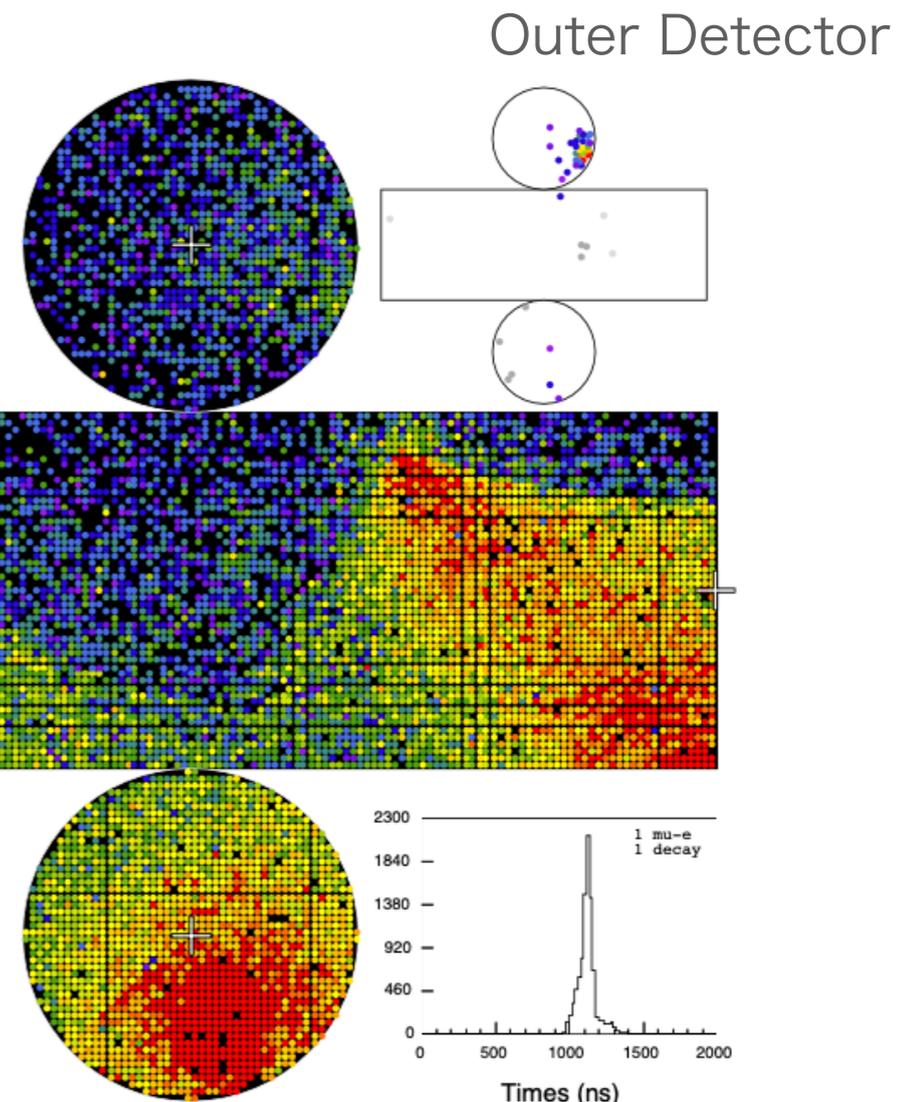
Super-Kamiokande V

Run 81366 Sub 3 Event 2769680
19-06-26:21:09:41
Inner: 9368 hits, 97847 pe
Outer: 35 hits, 234 pe
Trigger: 0x1000000f
D_wall: 1690.0 cm
Evis: 0.0 MeV

Charge (pe)

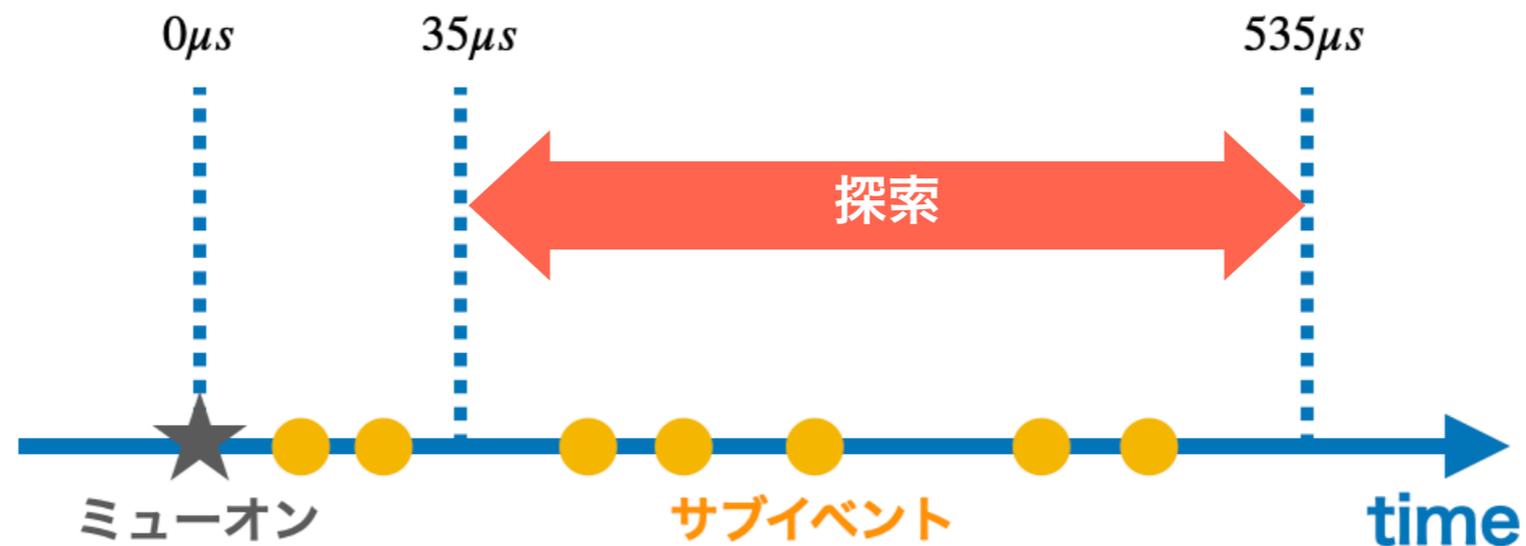
- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2- 8.0
- 4.7- 6.2
- 3.3- 4.7
- 2.2- 3.3
- 1.3- 2.2
- 0.7- 1.3
- 0.2- 0.7
- < 0.2

Inner Detector



▶ 宇宙線ミュオン由来の中性子信号の探索

- 宇宙線ミュオンの飛来後、[35, 535] μs でGdによる中性子捕獲イベントの探索を行う
 - 現在のGd濃度 0.011% \rightarrow 中性子捕獲時定数 $\sim 115 \mu\text{s}$
 - $\sim 35 \mu\text{s}$ は除外
 - ミュオンの崩壊電子による信号 ($\sim 2.2 \mu\text{s}$)
 - PMTのアフターパルス (10 \sim 20 μs)



▶ Gdによる中性子捕獲信号の選別条件

- ① 中性子捕獲イベントの発生地点とミュオントラックの位置関係

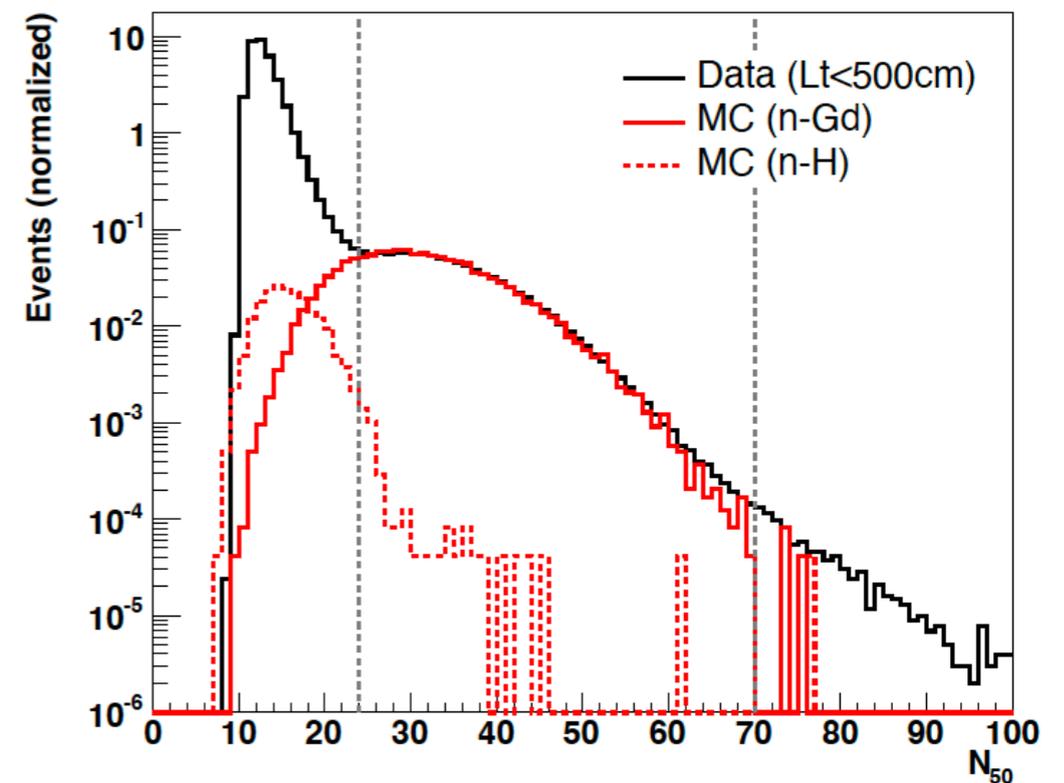
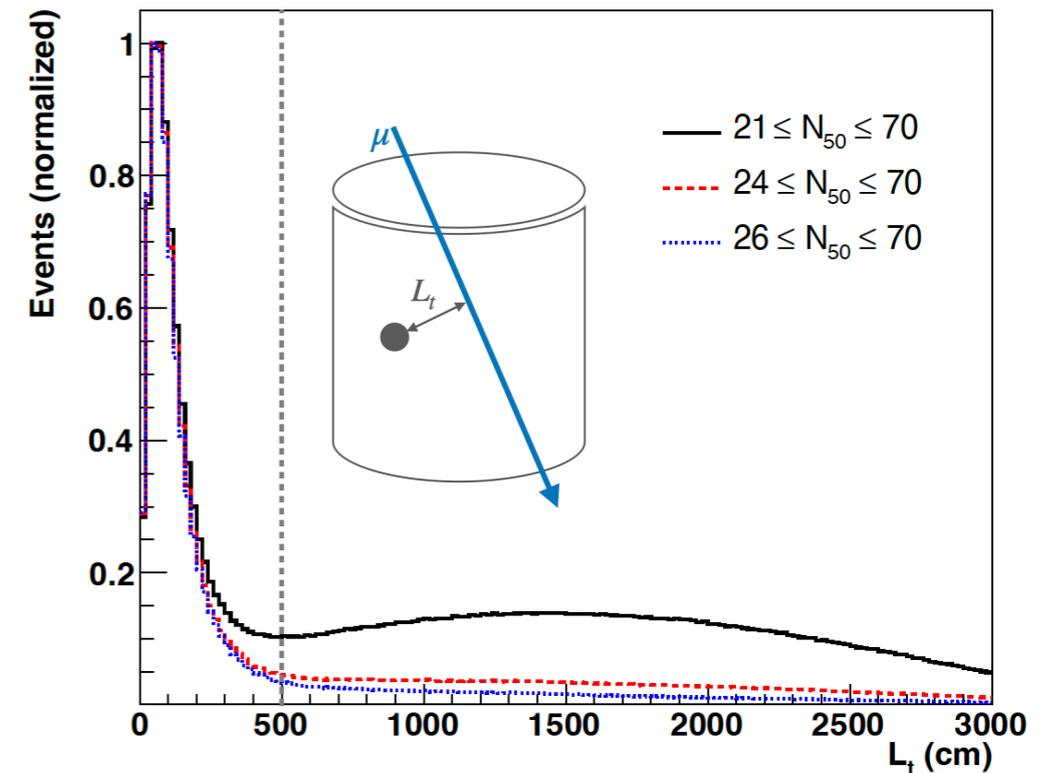
$$L_t < 500 \text{ cm}$$

- 中性子捕獲はミュオントラック付近で起こる

- ② 光を検出したPMTの数（信号の大きさ）： N_{50}

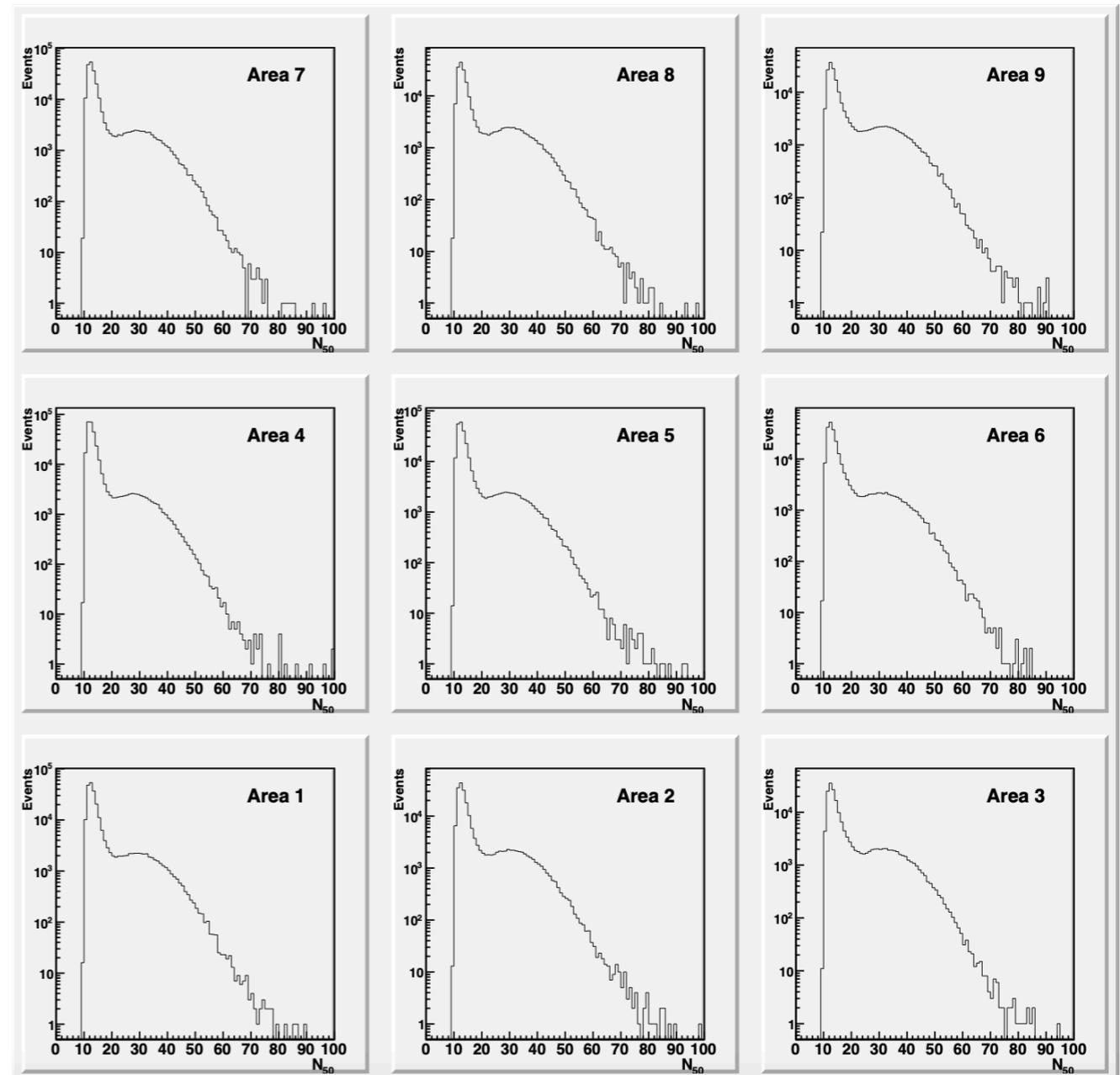
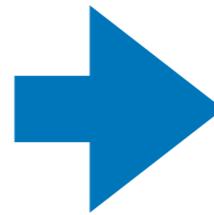
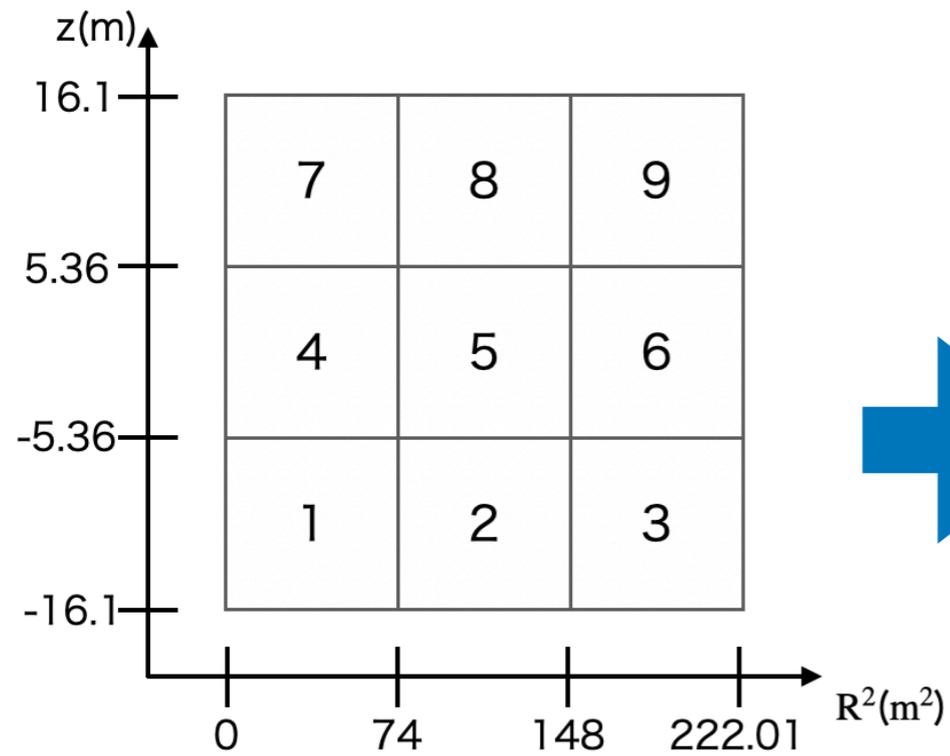
- データとMCの比較

➡ $20 < N_{50} < 70$ の範囲にn-Gdの信号



▶ 位置依存性

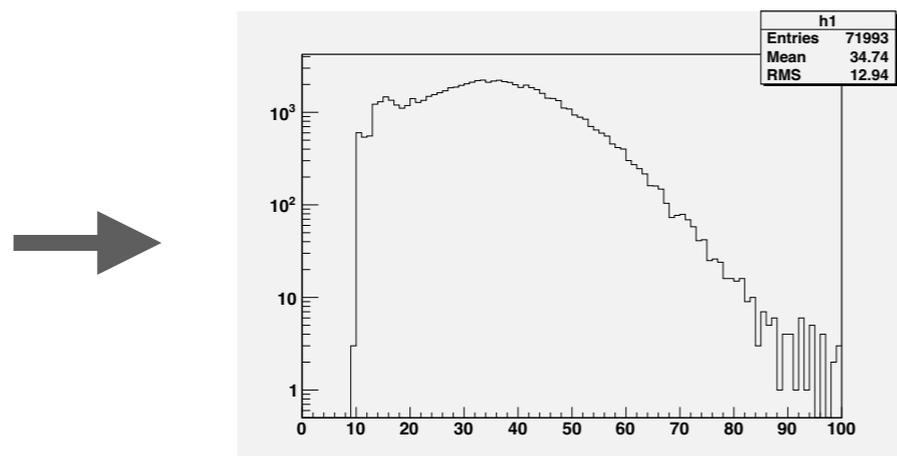
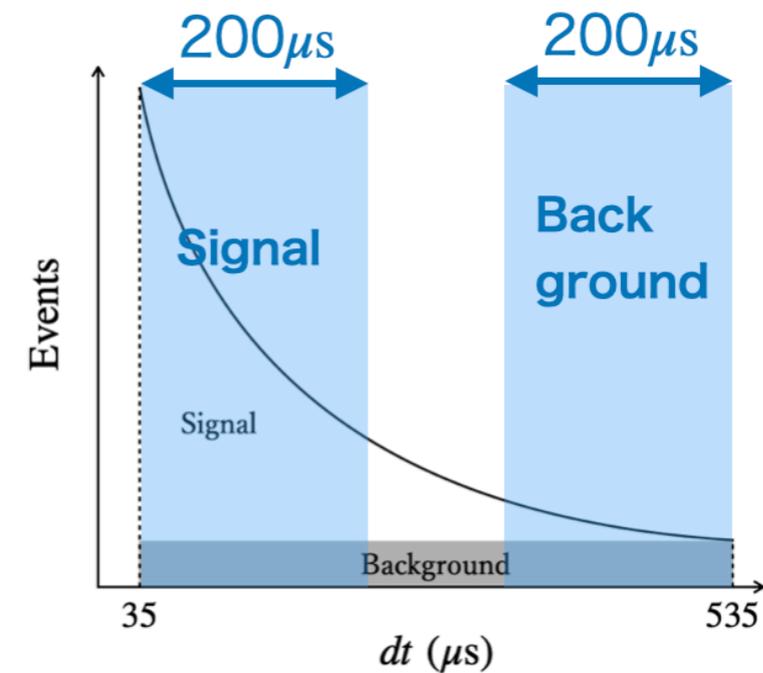
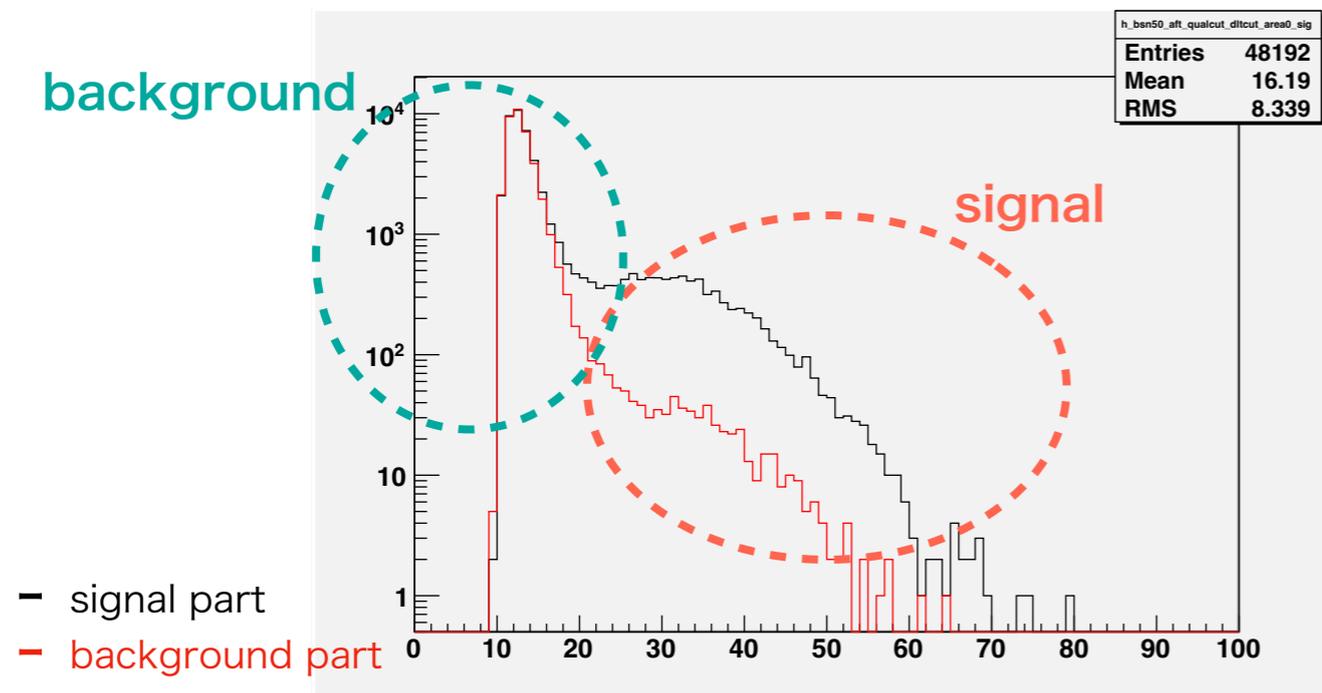
① 検出器を9つに分割し、各エリアで中性子の信号を観察



▶ 位置依存性

② バックグラウンドの除去

- 中性子のイベント数が時定数をもって減少することを利用



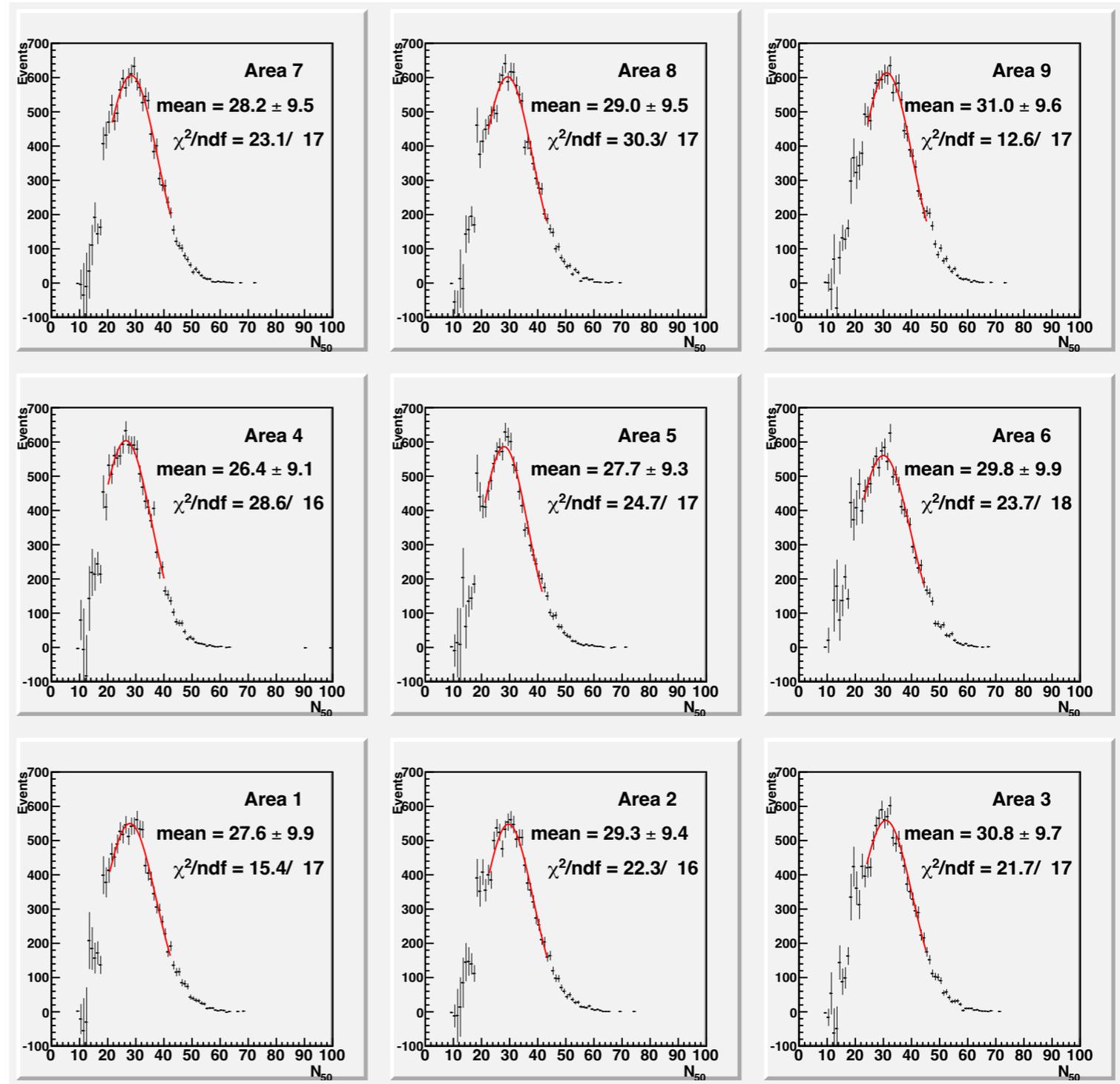
Signal part - Background part → neutron signal

▶ 位置依存性

③ fittingを行ってエネルギーの値(N_{50})を求める

● Fitting 条件

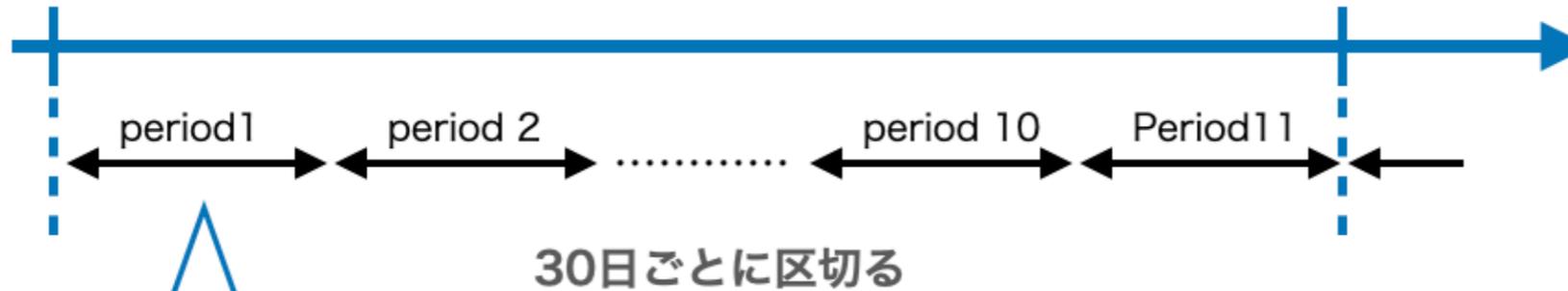
- 関数：ガウス関数
- 範囲：
[mean - 0.7 * sigma ,
mean + 1.5 * sigma]



▶ 検出器応答の安定性

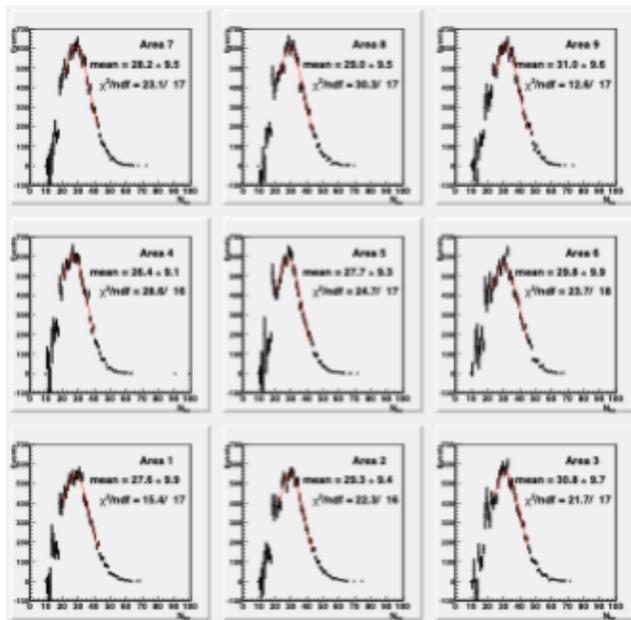
2020/09/10

2021/08/18

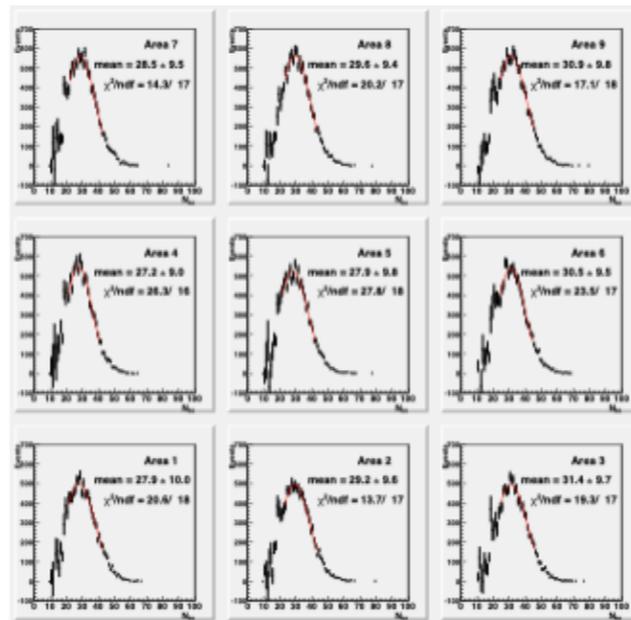


- 期間ごとに検出器を9分割してエリアごとの中性子の反応をみる

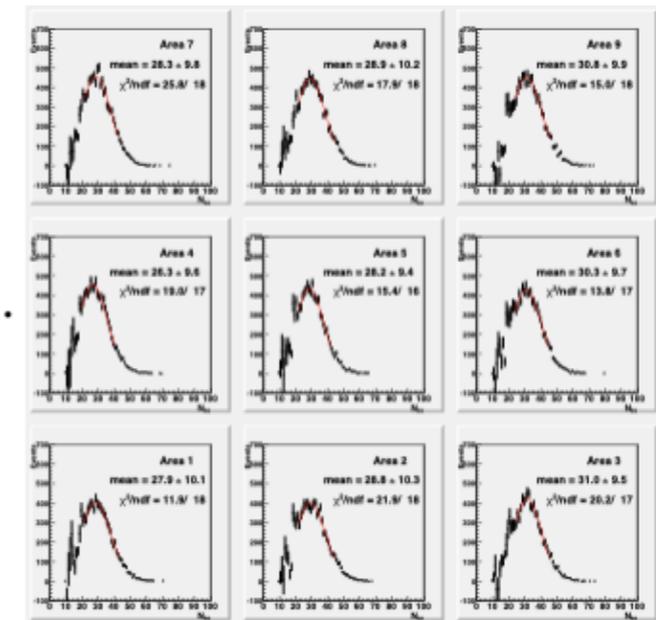
period 1



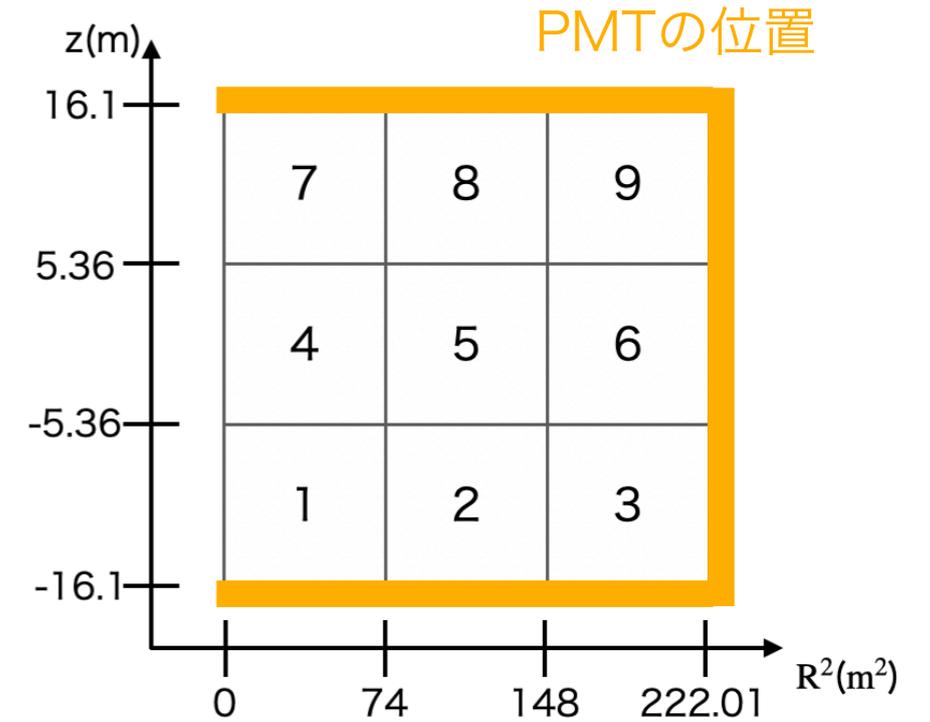
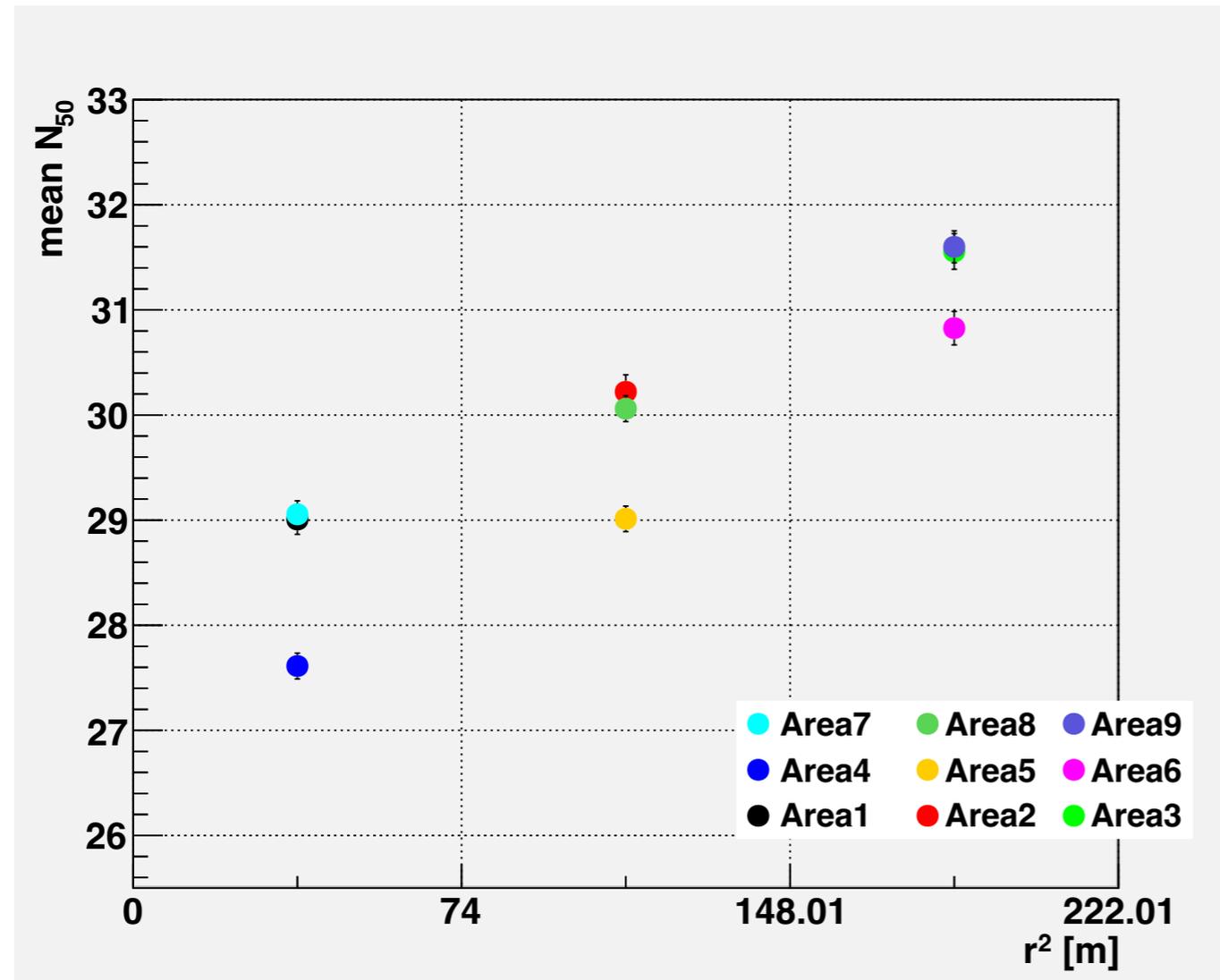
period 2



period 11



▶ Period1 の中性子信号の位置依存性

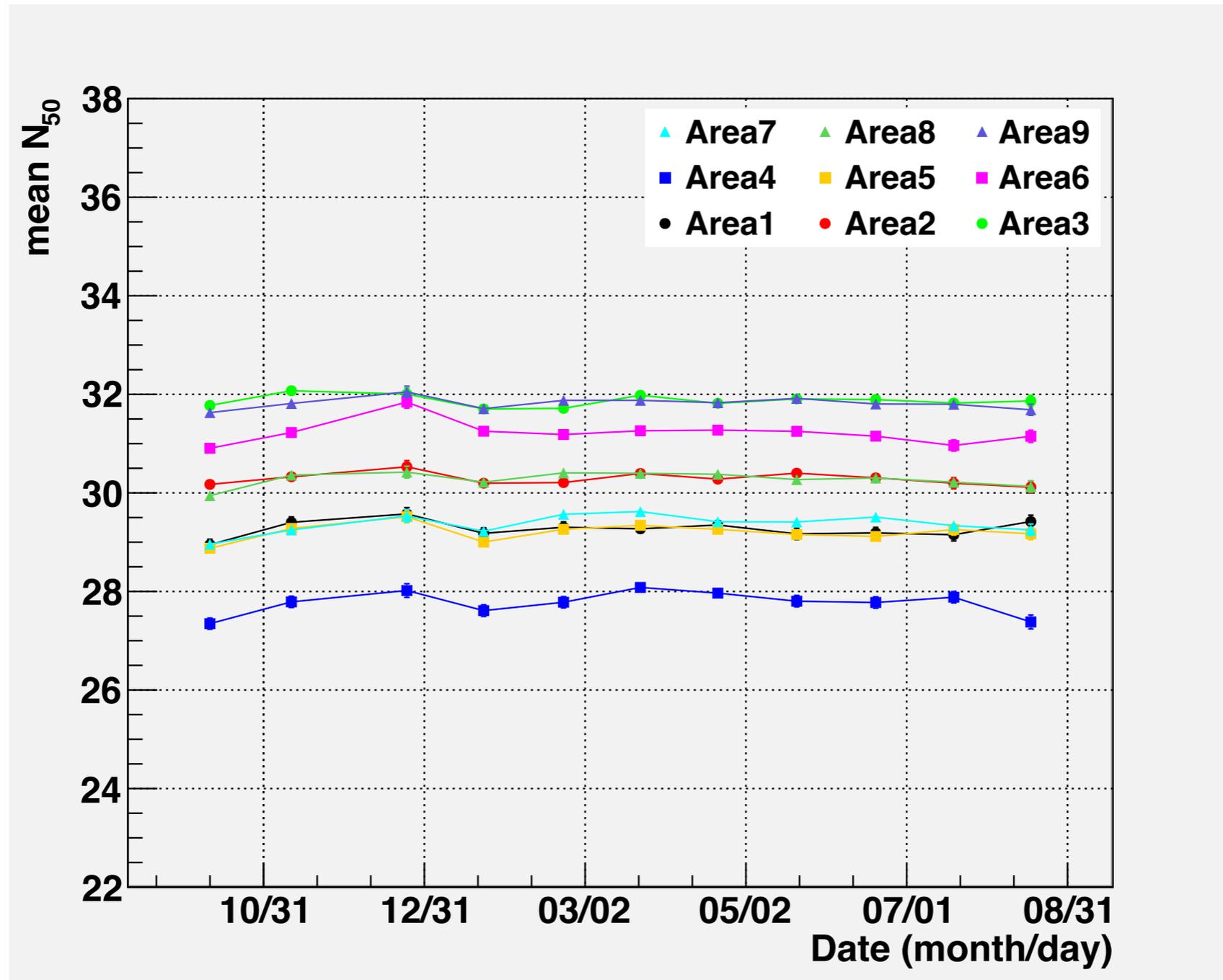


- 全体的な傾向として、PMTからの距離によって N_{50} の値が変わる

▶ 透過率による影響

➡ 補正する手法の開発を目指す

▶ 検出器応答の安定性 (2020/09/10 ~ 2021/08/18)



● エリアごとに多少の差はあるが全体的安定している

▶ まとめ

- SKにガドリニウムが加えられ、SK-Gd実験が開始した
 - 核破碎中性子を用いたエネルギー較正手法の開発を目指す
 - 検出器応答の安定性を観察
- 核破碎中性子信号の位置依存性と安定性を確認

▶ 今後の予定

- 中性子の生成数やミューオンの種類の違いによる中性子信号を評価
- 他のキャリブレーションソースと比較し評価できる信号の確認
- 引き続き検出器応答の安定性の確認

Backup

各低エネルギー一較正源の比較

	較正源	利点	欠点
較正実験	Linac	<ul style="list-style-type: none"> ● 単一のエネルギーの電子を入射 	<ul style="list-style-type: none"> ● 人手がいる ● 年に1,2回しかデータが取れない ● 位置が固定される
	DT calibration	<ul style="list-style-type: none"> ● Linacよりも位置の自由度が高い ● 比較的少ない人数での作業が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● DTG自身がチェレンコフ光の進行を妨害 ● 電子のエネルギーが単一でない
	Ni	<ul style="list-style-type: none"> ● 比較的少ない人数での作業が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 位置が固定される
宇宙線由来	decay e	<ul style="list-style-type: none"> ● SKタンク全域での検出が可能 ● 全期間での解析が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 観測する事象数が少ない ● 長期の観測時間が必要
	^{16}N	<ul style="list-style-type: none"> ● SKタンク全域での検出が可能 ● 全期間での解析が可能 ● Energy scaleの方向依存性の調査が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 観測する事象数が少ない (1日約 20 事象) ● 長期の観測時間が必要
	Spallation neutron	<ul style="list-style-type: none"> ● SKタンク全域での検出が可能 ● 全期間での解析が可能 ● 事象数が多い (1日約 10^5 事象) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 光子のエネルギーを検出 (電子と比べると再構成が難しい)

$$N_{eff} = \sum_{i=1}^{N_{50}} \left[(X_i - \epsilon_{tail}^i - \epsilon_{dark}^i) \times \frac{N_{all}}{N_{alive}} \times \frac{S(0,0)}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \exp\left(\frac{r_i}{L_{eff}^i}\right) \times \frac{1}{QE_i(1 + C \cdot G_i(t))} \right]$$

- Correction elements

- X_i : multiple photoelectron

- ϵ_{tail}^i : delay hit

- ϵ_{dark}^i : dark hit

- $\frac{N_{all}}{N_{alive}}$: the percentage of PMTs that are working properly

- $S(\theta, \phi)$: photocathode coverage

- $\exp(r_i/L_{eff}^i)$: attenuation effect by water

- $1/[QE_i(1 + C \cdot G_i(t))]$: quantum efficiency of PMT

- スーパーカミオカンデ検出器は1996年4月に開始し、現在までデータ取得期間が6つのフェイズに分かれている

フェイズ	データ取得期間	内水槽 PMT	外水槽 PMT	被覆率	衝撃波防止ケース	エレクトロニクス
SK-I	1996/04–2001/07	11,146 本	1,885 本	40 %	なし	ATM
SK-II	2002/10–2005/10	5,182 本	1,885 本	19 %	あり	ATM
SK-III	2006/07–2008/08	11,129 本	1,885 本	40 %	あり	ATM
SK-IV	2008/08–2018/05	11,129 本	1,885 本	40 %	あり	QBEE
SK-V	2019/01–2020/06	11,129 本	1,885 本	40 %	あり	QBEE
SK-VI	2020/08–現在	11,129 本	1,885 本	40 %	あり	QBEE

- SK-I ~ SK-V → 純水
- SK-VI → Gd (0.011%)