

# スーパーカミオカンデにおける 検出器較正の研究

2021年2月16日

素粒子物理学研究室

41501204 酒井聖矢

国際学会発表(1回) : **1 NEUTRINO 2020** [2020.Jul.2]

国内学会発表(5回) : **1-4** 日本物理学会 [2019.Sep.17] [2020.Mar.19] [2020.Sep.16] [2020.Sep.16]

**5 Flavor Physics Workshop 2019** [2019.Nov.20]

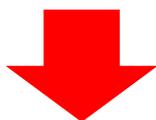
1. 超新星背景ニュートリノ (SRN)
2. スーパーカミオカンデ (SK)
3. 量子効率の測定
4. 将来に向けて
5. まとめ

# 超新星背景ニュートリノ(SRN)

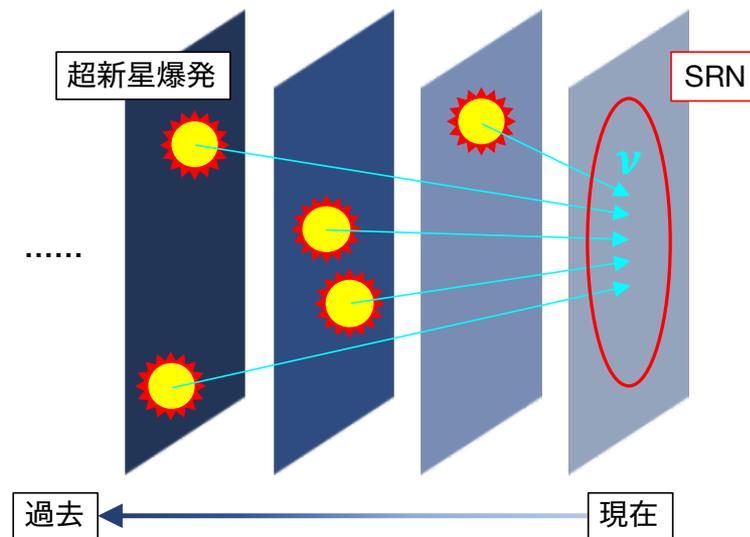
**SRN**：過去の超新星爆発ニュートリノの重ね合わせ

- エネルギーフラックスが個々の爆発からのニュートリノ放出量や宇宙全体での爆発発生率に依存

## SRNの観測



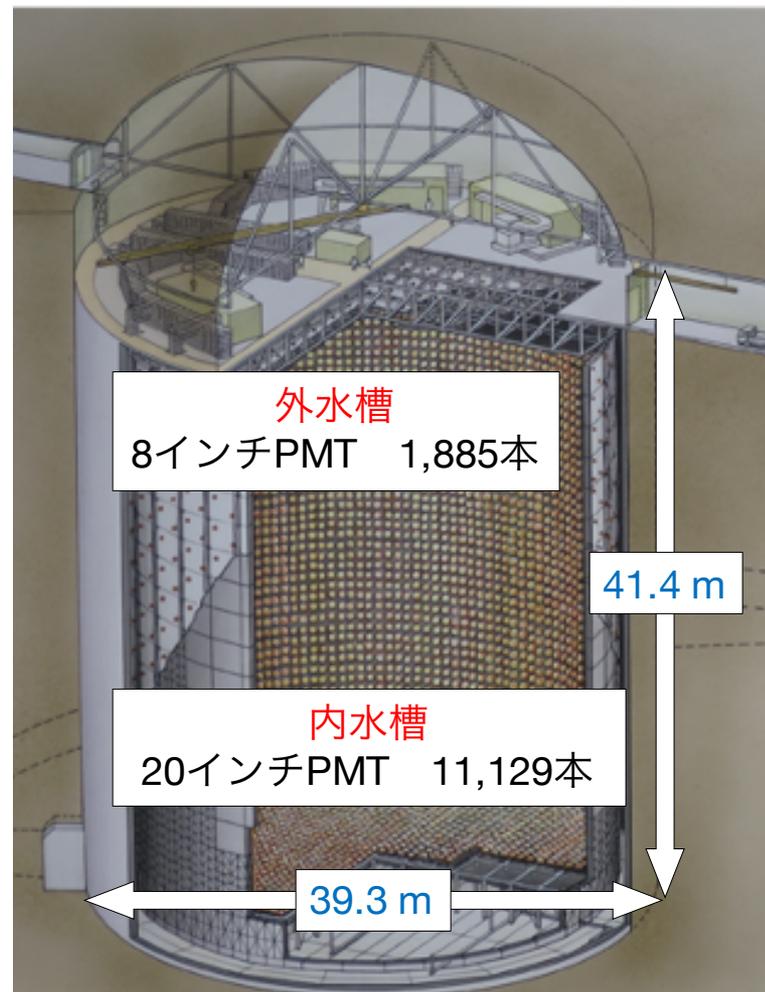
超新星爆発機構や星形成の歴史に対する理解が格段に進む



現在スーパーカミオカンデでは  
SRNの世界初観測を目指している

# スーパーカミオカンデ(SK)

- 岐阜県飛騨市の地下1,000 mにある巨大水チェレンコフ検出器
- 5万トンの超純水で満たされた円筒形水タンクと光電子増倍管(PMT)から構成
- PMTキャリブレーション
  - 高電圧の決定
  - ゲインの測定
  - **量子効率の測定**
  - 時間応答の較正 など

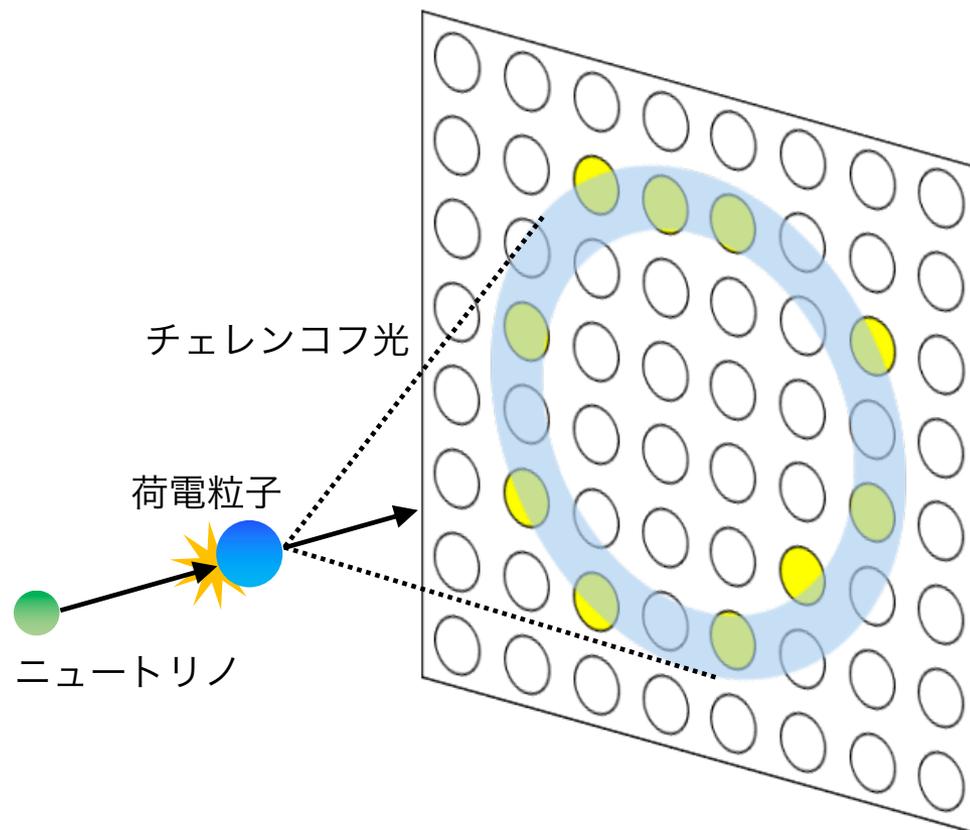


# 量子効率の測定

**量子効率**：PMTの光電面で  
光子を光電子に  
変換する確率

## 目的

内水槽PMTの相対的な  
量子効率を計算する



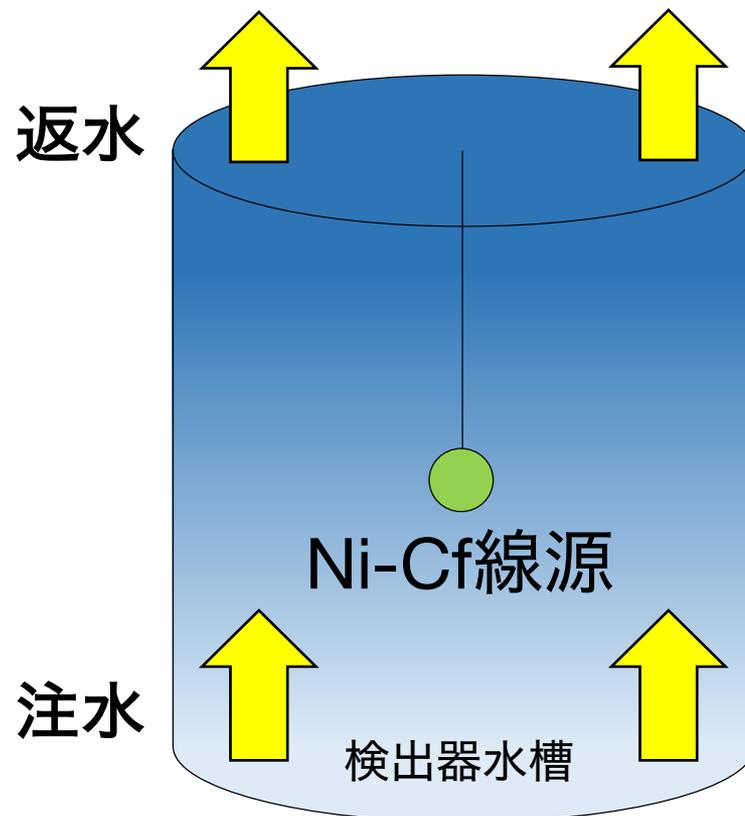
- 低エネルギー事象( $\leq 100$  MeV)のエネルギー再構成には  
**その事象で反応したPMTの数(ヒット数)**を用いる
- 低エネルギー事象でPMTがヒットする確率  $\propto$  量子効率
- 各PMTの量子効率には個体差がある  
→ **エネルギー再構成の精度に影響**

Ni-Cf線源をタンク中心に置いてデータ取得

各PMTのヒット数を計算・比較

## 測定前の準備

水質の上下非対称性による影響を極力抑えるために  
対流を起こす



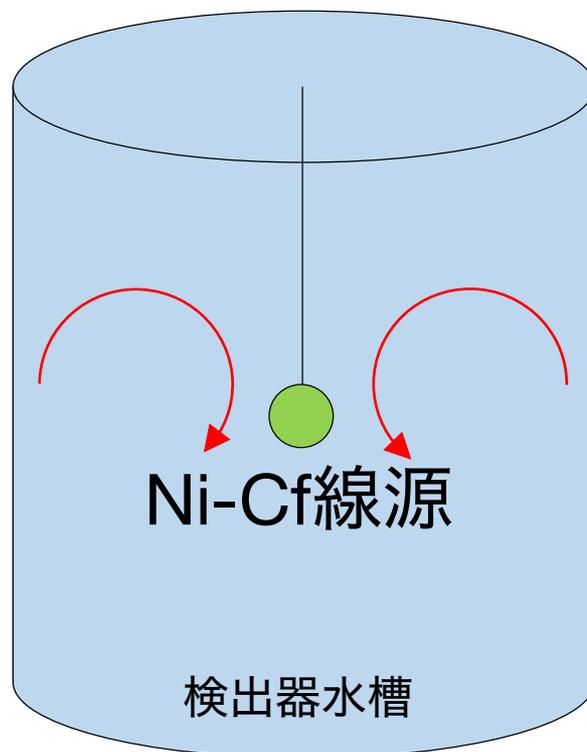
Ni-Cf線源をタンク中心に置いてデータ取得

各PMTのヒット数を計算・比較

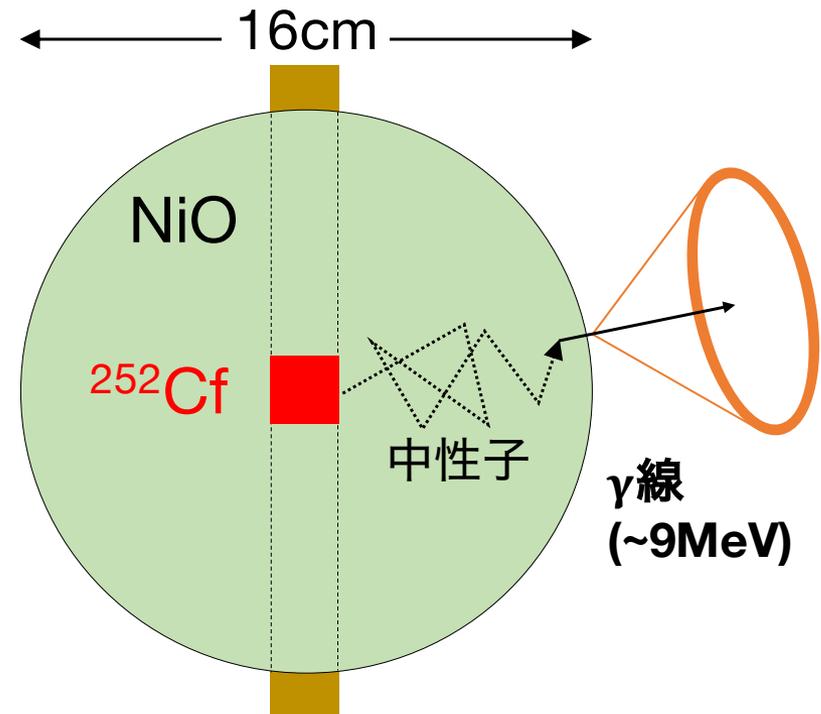
## 測定前の準備

水質の上下非対称性による影響を極力抑えるために対流を起こす

対流

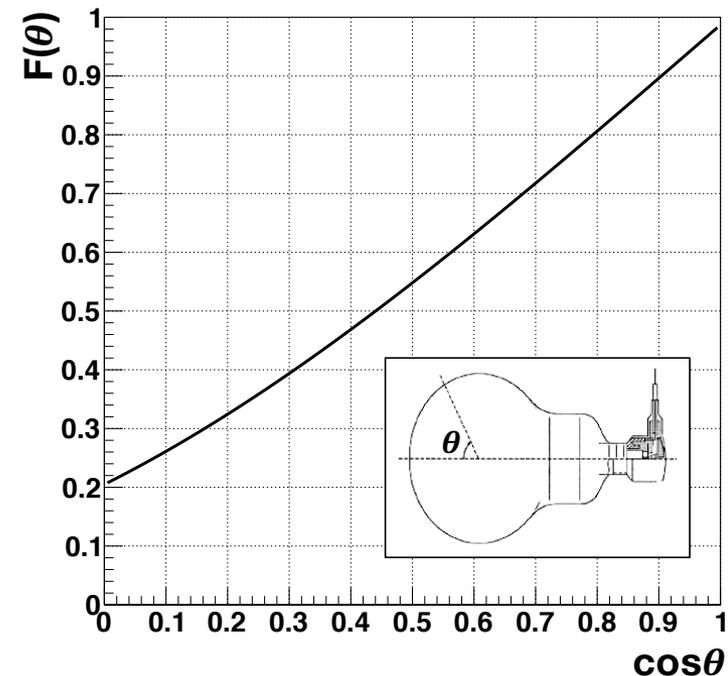
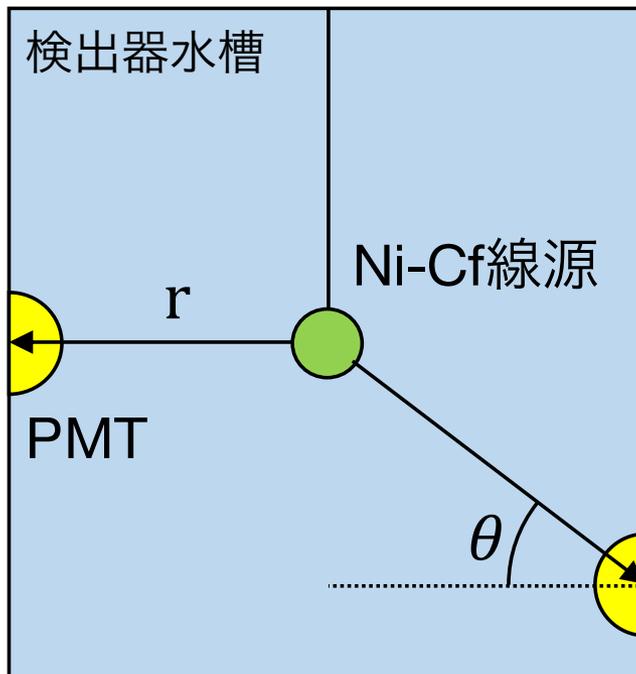


- NiOの粉末が混ぜ込まれた球状の樹脂＋中性子線源Cf
- 合計約9 MeVのガンマ線を等方的に放出
- 1つのPMTで複数光電子が生成されることが稀  
→ 量子効率の測定に適している



# ヒット数の幾何学的補正

- Ni-Cf線源からの距離や入射方向によってヒット数が変化
  - 距離** : 光は距離の二乗に比例して拡散  
→  $r^2$ をヒット数に掛ける
  - 入射方向** : 入射方向によってPMTの有感面積が変化  
→  $F(\theta)$ をヒット数から割る



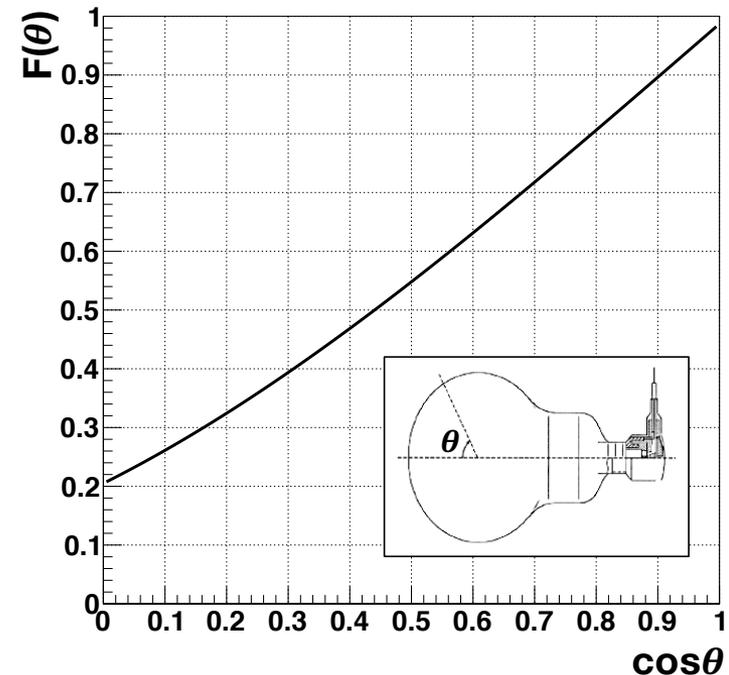
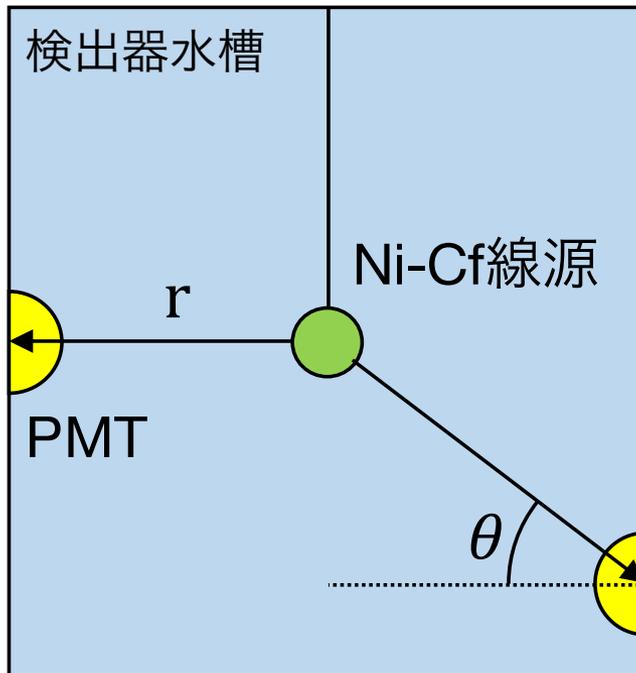
# ヒット数の幾何学的補正

Hit<sub>corr</sub> : 幾何学的補正を加えた後のPMTのヒット数

$$\text{Hit}_{\text{corr}} = \text{Hit} \times r^2 / F(\theta)$$

Hit rate : Hit<sub>corr</sub>を規格化したもの

$$\text{Hit rate} = \text{Hit}_{\text{corr}} / (\sum_i \text{Hit}_{\text{corr},i} / N)$$

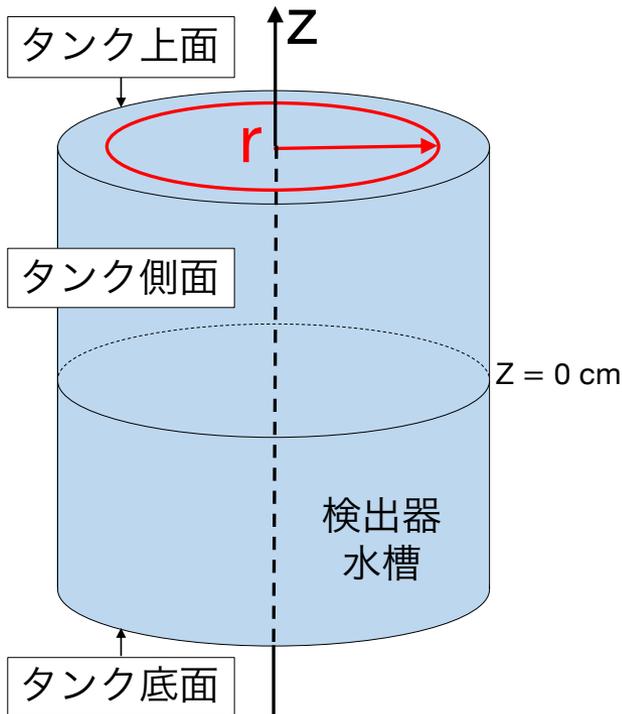
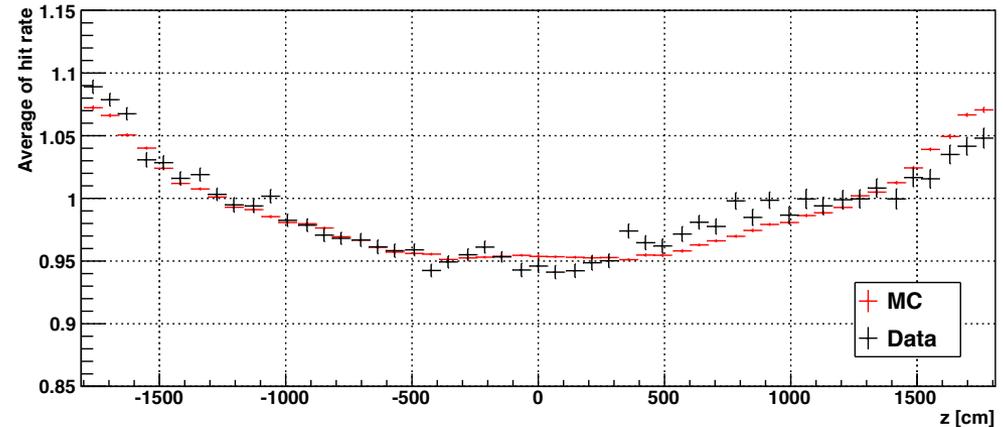


# MCとの比較

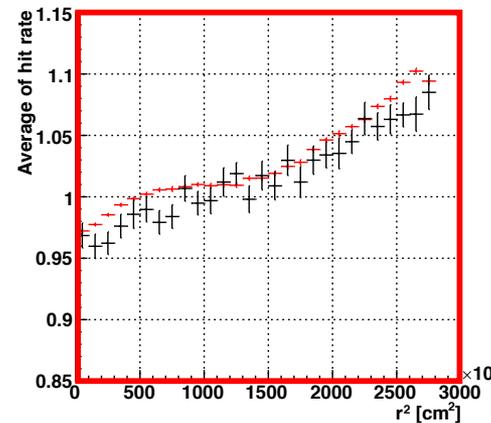
- Hit rateにはチェレンコフ光の反射や水質の効果が含まれる  
→ MCとの比較を行う

$$QE = \frac{\text{Hit rate}_{\text{Data}}}{\text{Hit rate}_{\text{MC}}}$$

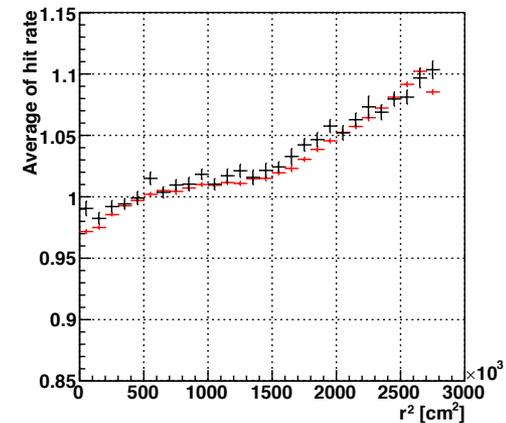
タンク側面



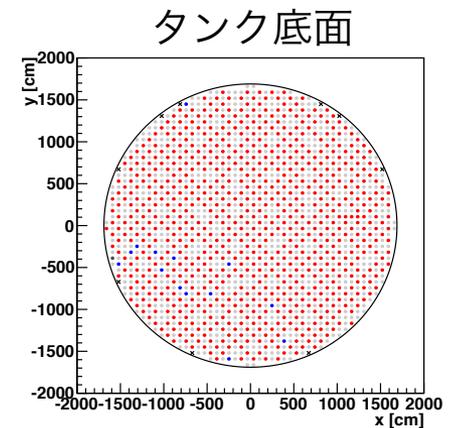
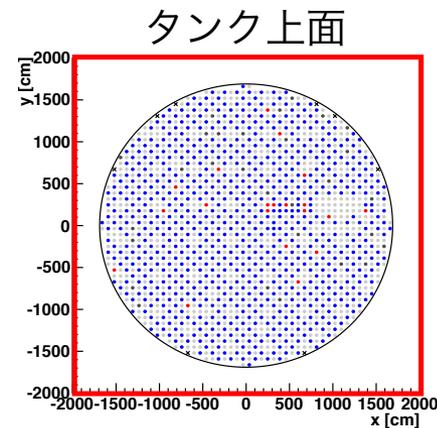
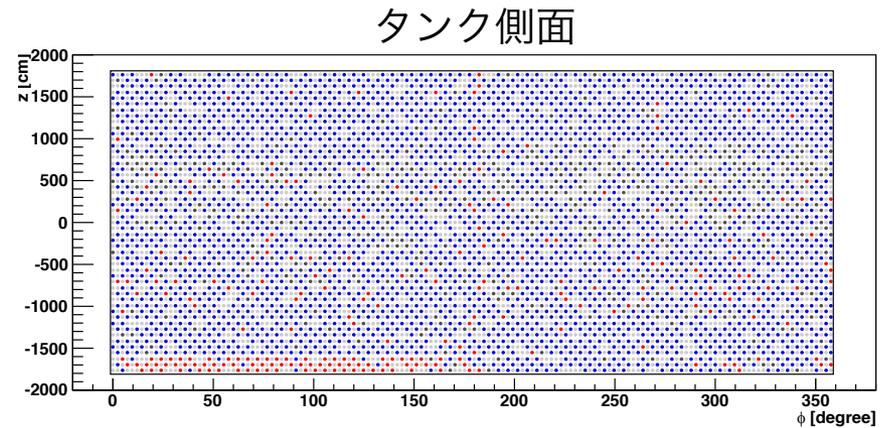
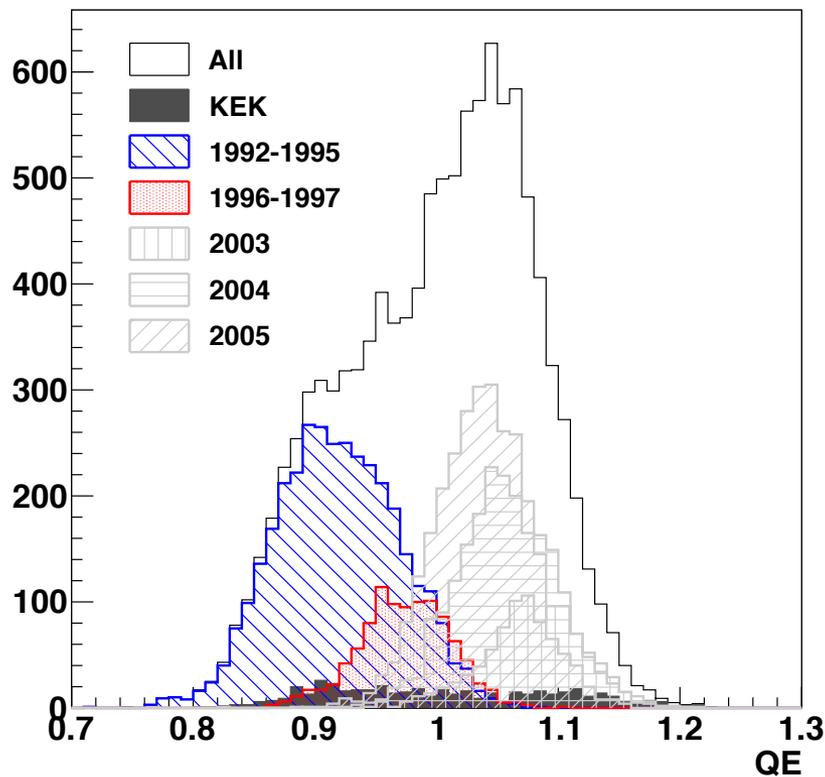
タンク上面



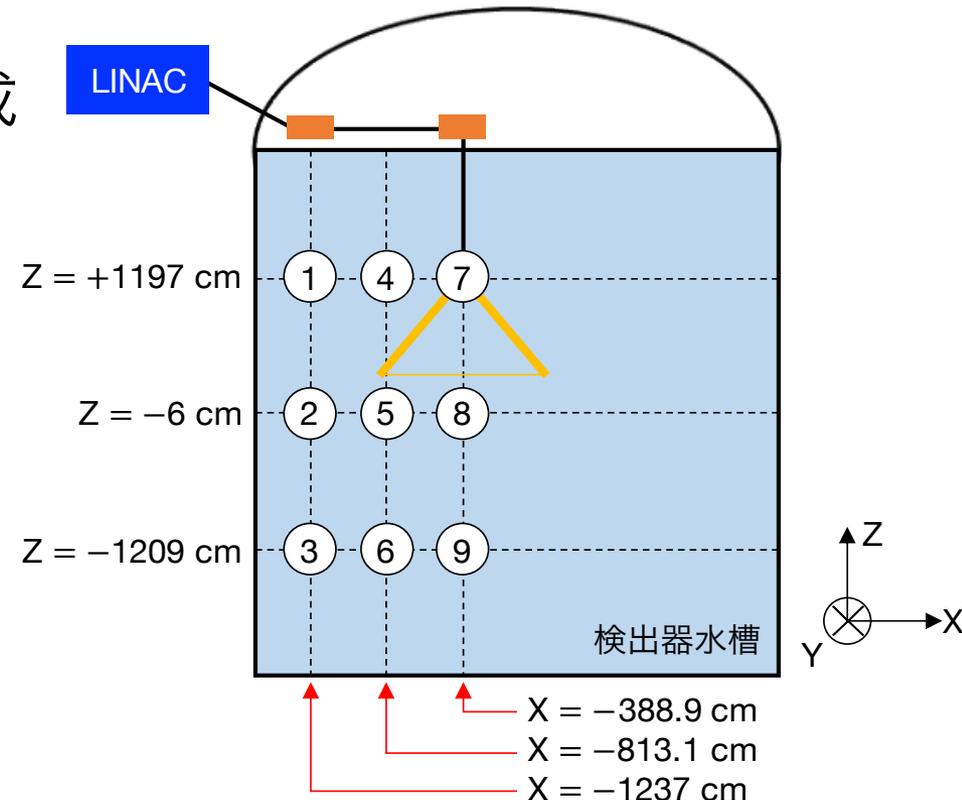
タンク底面



- 各PMTの生産年度の違いによって $\pm 20\%$ のばらつき  
→ SKの解析で利用されている



- LINAC(電子ビーム)を用いる
- 各位置(1 - 9)から電子(6, 8, 12, 18 MeV)を下向きに照射してデータを取得
  - 今回測定した量子効率を用いてエネルギーを再構成
  - データとMCでエネルギーを比較
- 位置依存性の系統誤差  
0.40% → **0.34%**
- 系統誤差の合計  
0.48% → **0.42%**

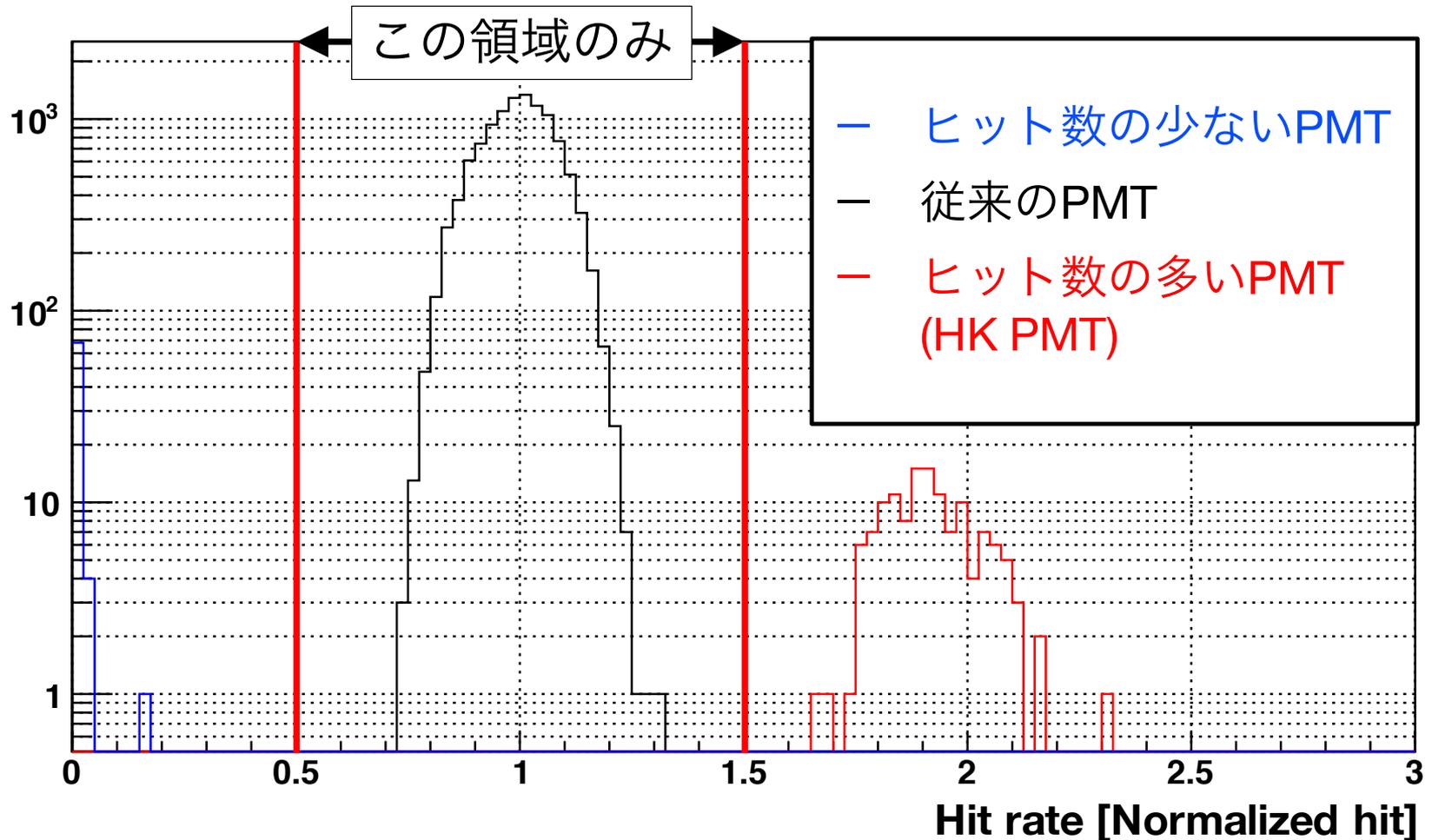


- 2018年6月から2019年1月にSK-Gd実験に向けた改修工事

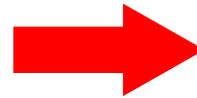
**SK-Gd実験**：タンク内に硫酸ガドリニウムを溶解し  
中性子由来の信号の検出効率を上げて  
SRNの世界初観測を目指す実験

- 改修工事の目的
  - タンクの止水補強
  - タンク内の配管の改良
  - 不具合のあるPMTの交換  
不具合のある136本のPMT  
→ 従来のPMTよりも高性能の**HK PMT**
- 2019年2月の実験再開に伴い検出器較正実験を行った

- 従来PMTの量子効率を測定



- 2020年7月にSK-Gd実験が始まった
- 硫酸ガドリニウムを導入する手法を確立した



- 硫酸ガドリニウムの質量濃度  
0.02% (現在) → 0.05% (2022年) → 0.2% (目標)
- 博士後期課程での研究

**SK-Gd実験のデータ解析・SRN探索**

- 現在SKではSRNの世界初観測を目指している
- SKではPMTキャリブレーションが定期的に行われている
  - Ni-Cf線源を用いて量子効率を測定
  - 各PMTの生産年度の違いによって $\pm 20\%$ のばらつき
  - エネルギー再構成の系統誤差を削減
- 2020年7月にSK-Gd実験が始まった
  - 硫酸ガドリニウムを導入する手法を確立した
  - 博士後期課程でSK-Gd実験のデータ解析・SRN探索

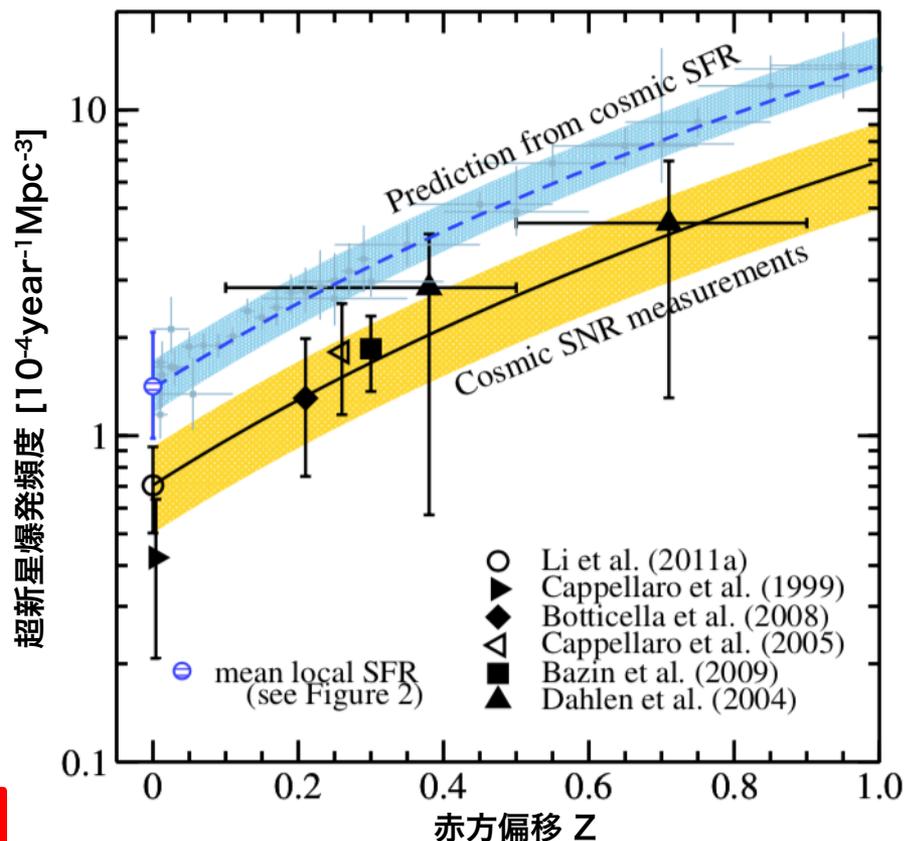
**Back Up**

- 星生成率から予想される頻度に対して光学観測から得た頻度は約半分
  - 暗い超新星？
  - 光を遮る物質が存在？

## SRNの観測



光学観測の問題なしに直接超新星爆発頻度を議論できる



↑ 超新星爆発頻度

点線は星生成率から予想される頻度であり、実線は光学観測から得た頻度。

- 超新星爆発を起こすほど重い星の寿命は宇宙の進化の時間スケールと比べて十分に短い
  - 重い星の誕生とその爆発は同時刻とみなせる
  - 星生成率から超新星爆発頻度は予測できるはず
  - 特に赤方偏移の大きい領域において予測と結果が不一致

SRNのエネルギースペクトルを得ることで星生成率、超新星爆発頻度、超新星爆発機構を理解できる

$$\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^\infty \frac{dz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \times \left[ R_{\text{CCSN}}(z) \int_0^{Z_{\text{max}}} \Psi_{\text{ZF}}(z, Z) \left\{ \int_{M_{\text{min}}}^{M_{\text{max}}} \Psi_{\text{IMF}}(M) \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM \right\} dZ \right]$$

$H_0$  : ハッブル定数

$\Omega_m$  : 物質密度パラメータ

$\Omega_\Lambda$  : 宇宙定数

$R_{\text{CCSN}}(z)$  : 重力崩壊型超新星発生率

$Z$  : メタリシティ (天体に含まれる水素・ヘリウム以外の元素の割合)

$\Psi_{\text{ZF}}(z, Z)$  : 親星のメタリシティ分布関数

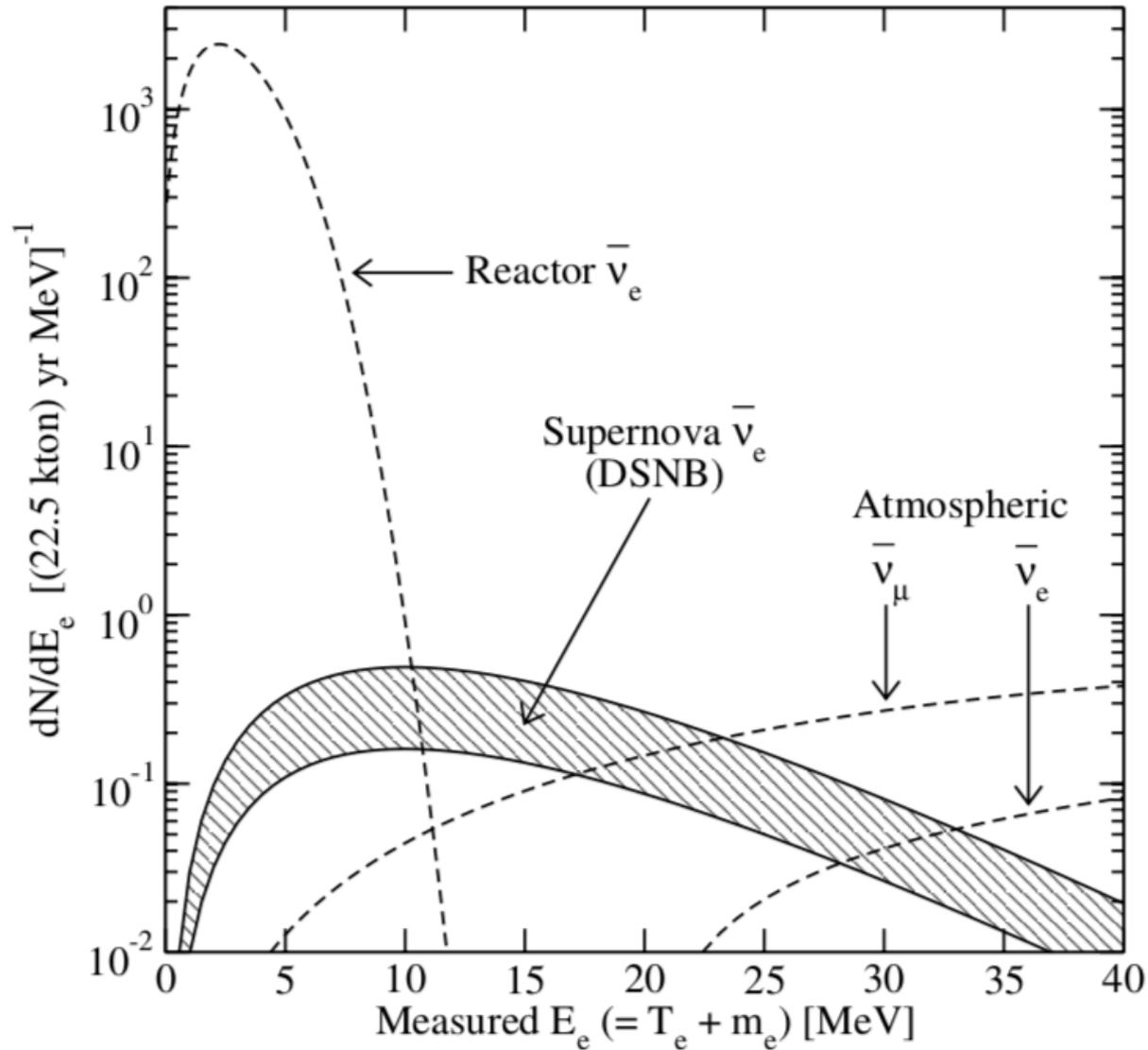
$M$  : 初期質量

$\Psi_{\text{IMF}}(M)$  : 親星の初期質量関数

(どのような質量の星がどのような頻度で生まれるかを表す関数)

$dN(M, Z, E'_\nu)/dE'_\nu$  : 各重力崩壊型超新星からのニュートリノ数スペクトル

※ ニュートリノ放出時間での物理量には ' を付けている



## 高電圧の決定

ある光量を入射した際に全てのPMTで同程度の電荷を出力するようにする  
等方光源(Xeランプ+拡散球)をタンク中心に設置して測定

## ゲインの測定

各PMTのゲインを測定する

(絶対ゲイン) Ni-Cf線源で測定 → 1光電子出力分布を見る

(相対ゲイン) 窒素レーザーで測定

## 量子効率の測定

(本スライドを参照)

## 時間応答の較正

ケーブルの長さや信号の大きさでずれてしまう(TOFを除いた)各PMTの応答時間を揃える

窒素レーザーを用いて様々な光量で測定

## 水の透過率の測定

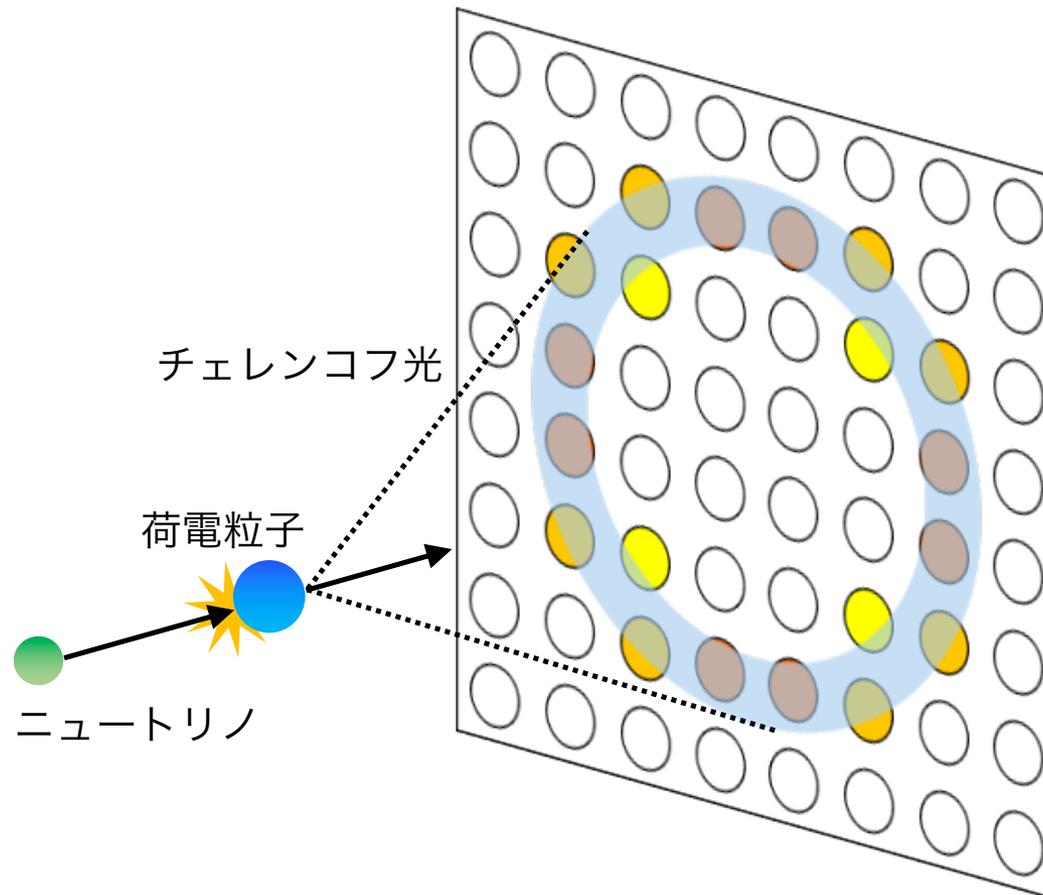
チェレンコフ光が超純水中でどの程度減衰するのかを理解する

laser diodeと窒素レーザーで測定

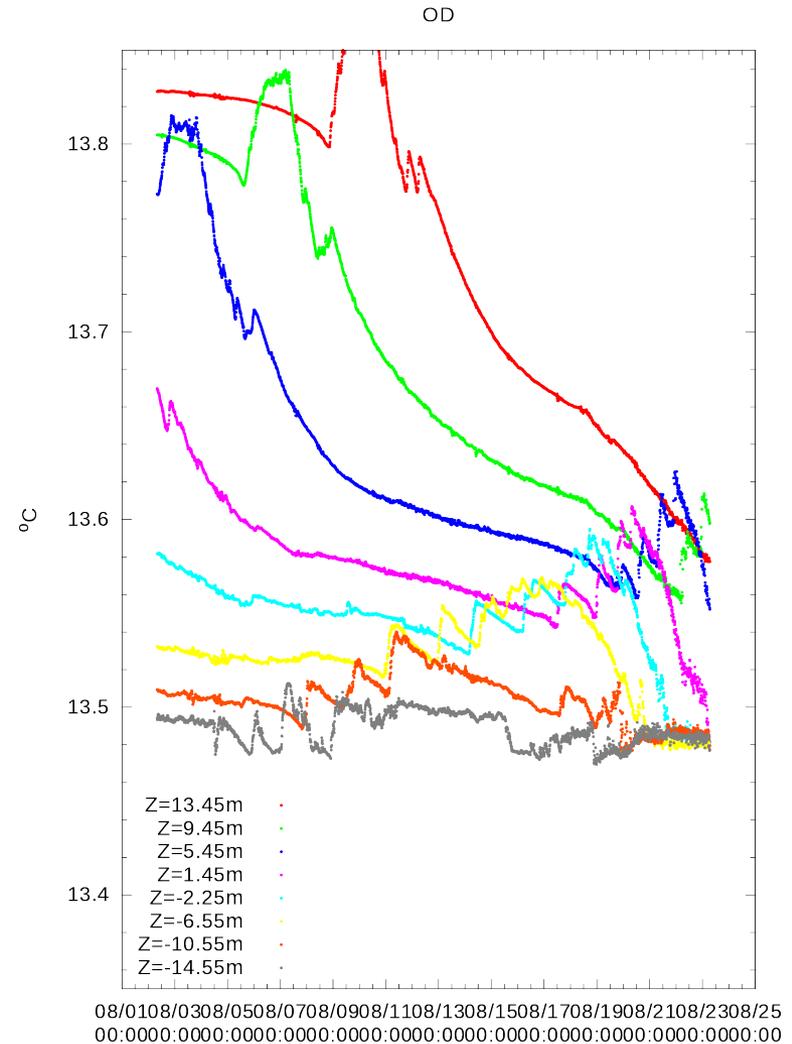
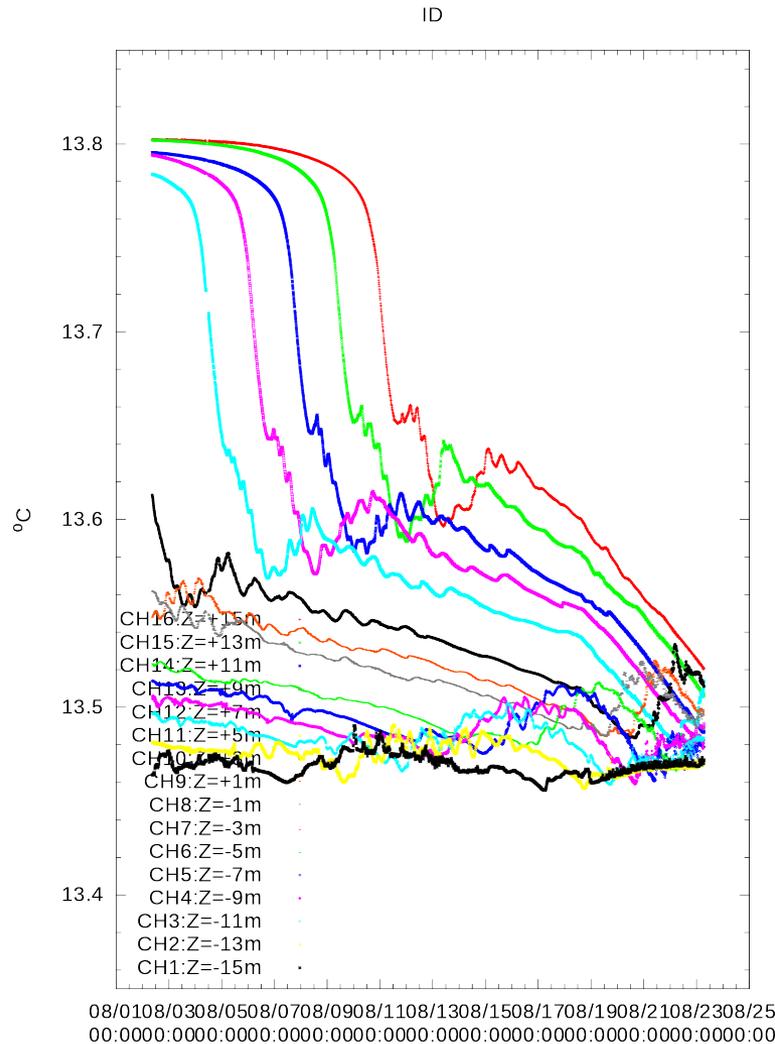
$$N_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^{N_{50}} \left[ (X_i + \epsilon_{\text{tail}} - \epsilon_{\text{dark}}) \times \frac{N_{\text{all}}}{N_{\text{normal}}} \times \frac{R_{\text{cover}}}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{\text{run}}}\right) \times \frac{1}{QE_i} \right]$$

- $N_{50}$  : 50 nsecの時間幅に含まれるヒット数
- $X_i$  : 複数光電子ヒットの補正
- $\epsilon_{\text{tail}}$  : 反射と散乱の補正
- $\epsilon_{\text{dark}}$  : PMTのダークノイズによるヒットの補正
- $N_{\text{all}}/N_{\text{normal}}$  : 不具合のあるPMTの補正
- $R_{\text{cover}}/S(\theta_i, \phi_i)$  : 光電被覆の補正
- $\exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{\text{run}}}\right)$  : 水質の透過率の補正
- $1/QE_i$  : 量子効率の補正

- 高エネルギー事象( $\geq 100$  MeV)のエネルギー再構成には各PMTの信号の大きさの和(総電荷量)を用いる
- 電荷量  $\propto$  量子効率  $\times$  ゲイン



- 対流が起きているかどうかは温度計で確認できる



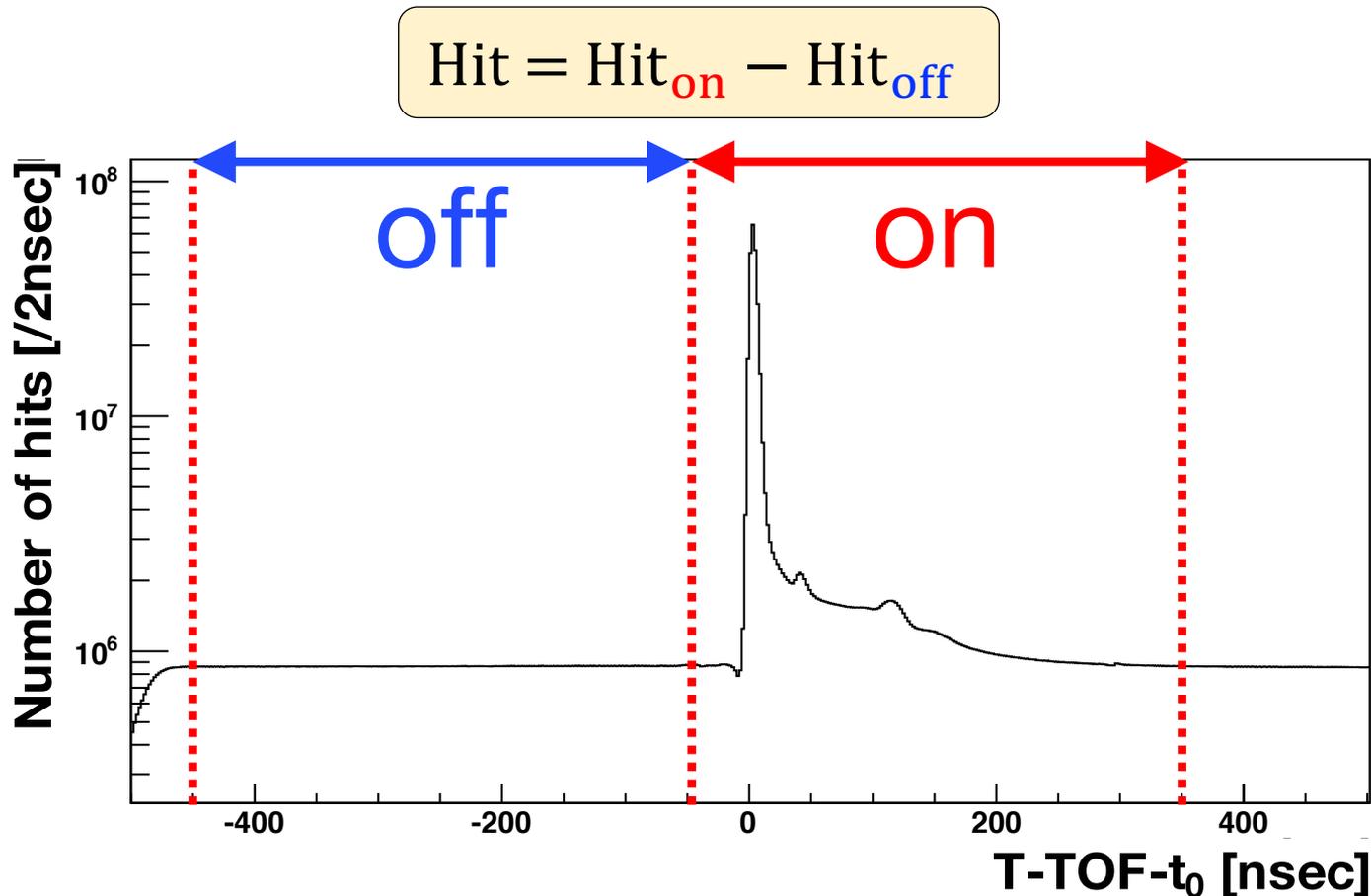
- 取得したデータからNi-Cf線源による事象だけを選択

## 取り除く事象

- **Ni-Cf線源から遠い場所で起きた事象**
- **低エネルギー事象**  
放射性バックグラウンド  
自発核分裂時のガンマ線  
陽子の中性子捕獲によるガンマ線 など
- **高エネルギー事象**  
宇宙線ミュオン など

# ヒット数の計算

- T-TOF分布を用いてダークノイズによるヒットを除く
- 中心のピークがNi-Cf線源によるヒット  
→ **on**と**off**という時間幅を設けて、**on**領域のヒット数から**off**領域のヒット数を差し引く



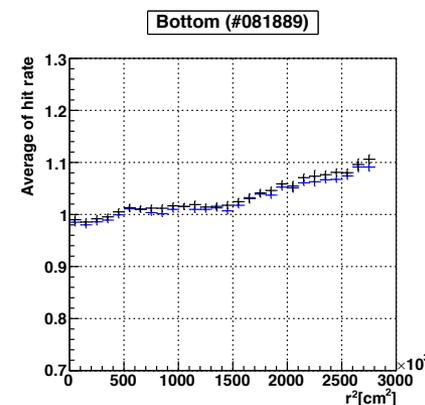
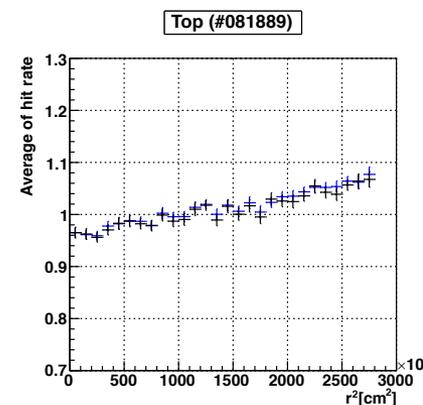
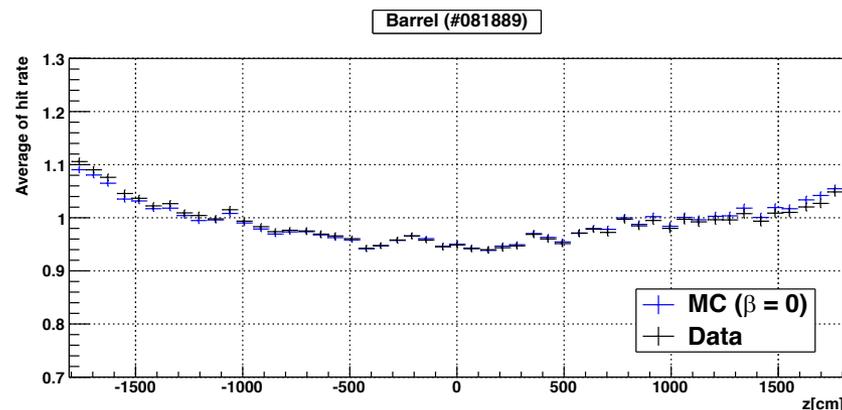
# 水質の上下非対称性パラメータ( $\beta$ )

29

- データと(ある $\beta$ での)MCを用いてHit rate分布を作成
- $\chi^2$ を計算する

$$\chi^2 = \sum_{107 \text{ bin}} \frac{(\text{Hit rate}_{\text{Data}} - \text{Hit rate}_{\text{MC}})^2}{\text{Error}_{\text{Data}}^2 + \text{Error}_{\text{MC}}^2}$$

- 上記の手順を $\beta$ を変えながら繰り返す

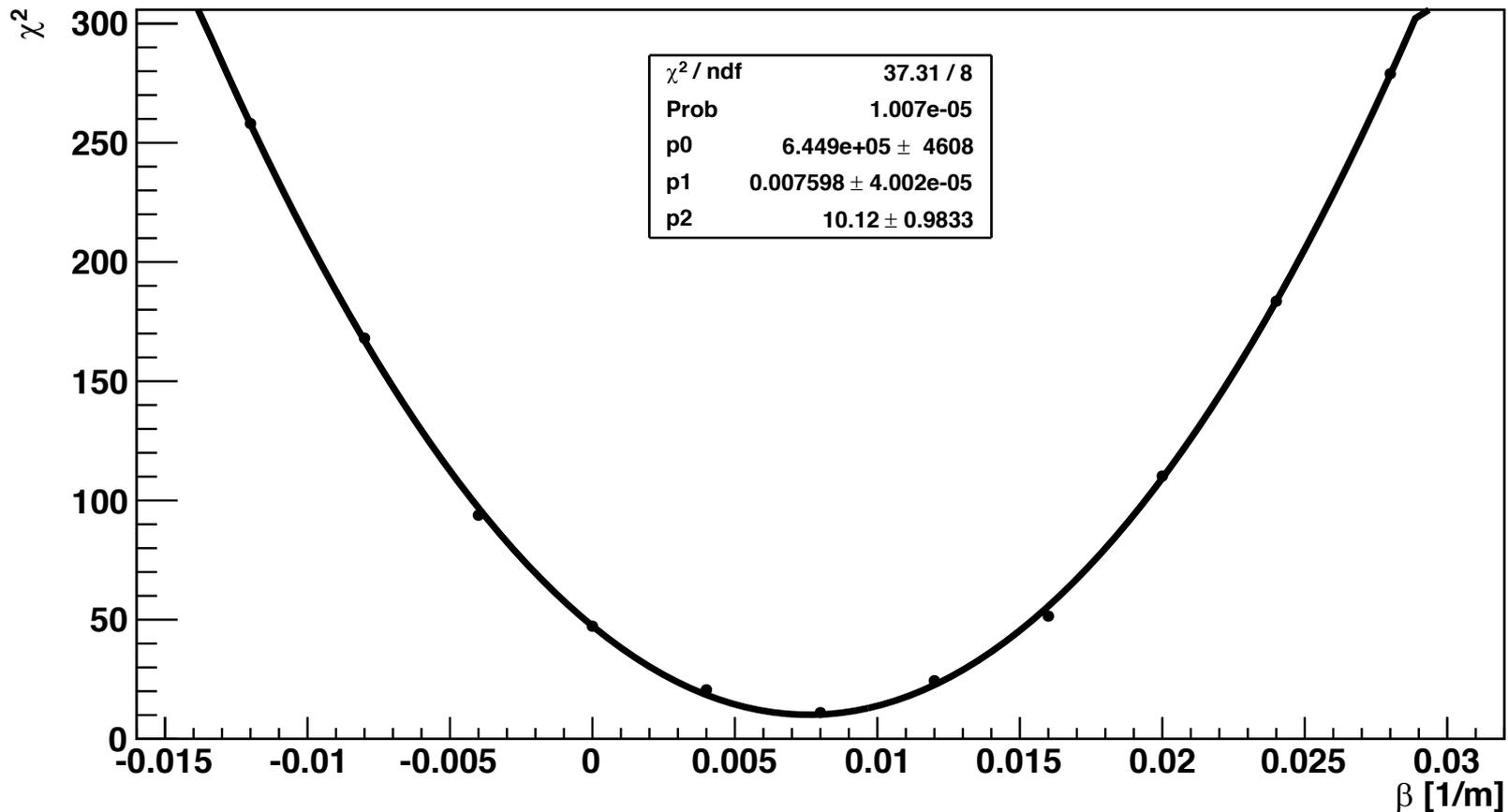


# 水質の上下非対称性パラメータ( $\beta$ )

30

- $\beta$ と $\chi^2$ に関するグラフを描き、二次関数でフィット  
→  $\chi^2$ を最小にする $\beta$ を決定

$\beta$  vs  $\chi^2$



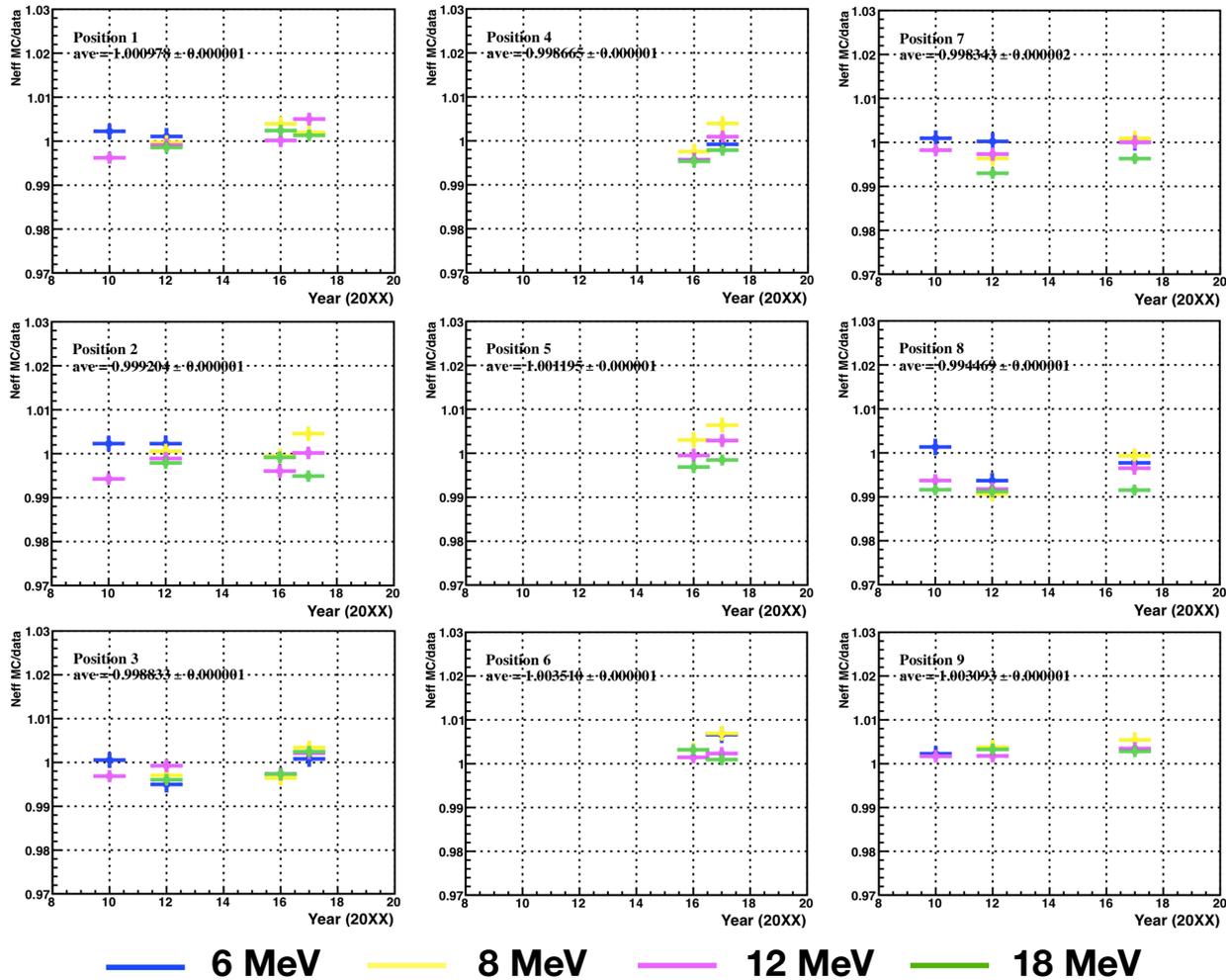


図 4.22 データと MC の間での各位置における再計算された  $N_{\text{eff}}$  分布のピーク位置の違い [49], 各分布は図 3.14 の電子ビームの位置と対応している。各分布において、横軸は LINAC データの取得年、縦軸は  $N_{\text{eff}}$  のデータと MC の比を示している。また、プロットの色は電子ビームのエネルギーを示している。

また、図 4.22 の各プロットを  $r_i$  とすると、 $r_i$  は以下の式で表される。

$$r_i = \frac{N_{\text{eff, MC}} - N_{\text{eff, Data}}}{N_{\text{eff, Data}}} \quad (4.12)$$

ここで、 $N_{\text{eff, MC}}$  は MC で計算した  $N_{\text{eff}}$ 、 $N_{\text{eff, Data}}$  はデータで計算した  $N_{\text{eff}}$  である。次に、各位置で  $r_i$  の RMS を計算する。

$$x_p = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_i^{N_p} r_i^2} \quad (4.13)$$

ここで、下付きの  $p$  は位置番号、 $N_p$  は各位置における LINAC のデータ数を示す。そして、以下の式で系統誤差を計算する。

$$(\text{系統誤差}) = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^9 w_p x_p^2}{\sum_{p=1}^9 w_p}} \times 100 [\%] \quad (4.14)$$

ここで、 $w_p$  は図 4.23 のように有効体積を 9 つの領域に分割した時の各領域の体積であり、 $w_p$  の値は表 4.2 のようになる。

表 4.2  $w_p$  の値 [49], 単位はキロトン。

$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$	$w_7$	$w_8$	$w_9$
3.726	4.398	3.697	2.199	2.595	2.181	1.151	1.359	1.142

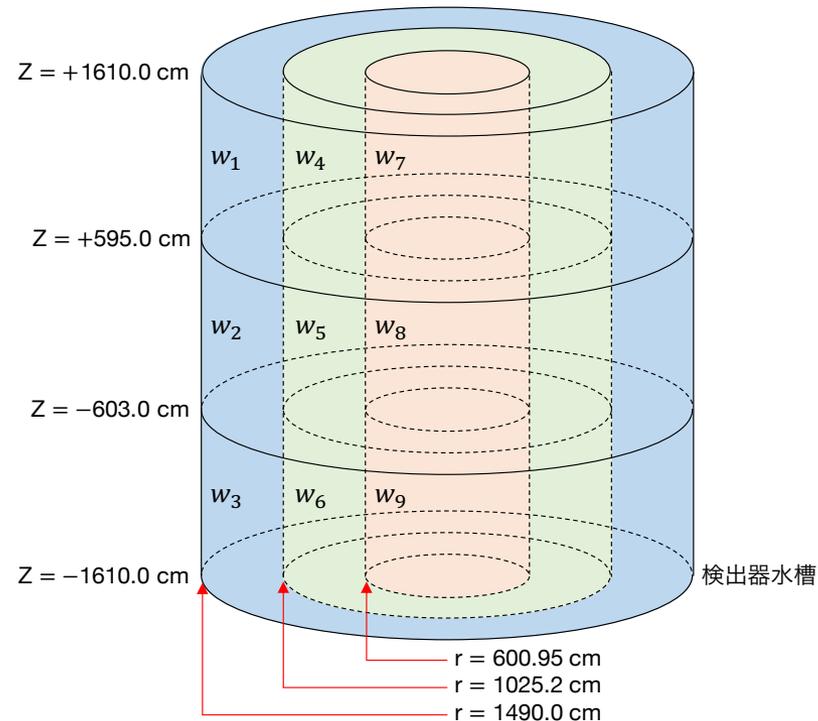
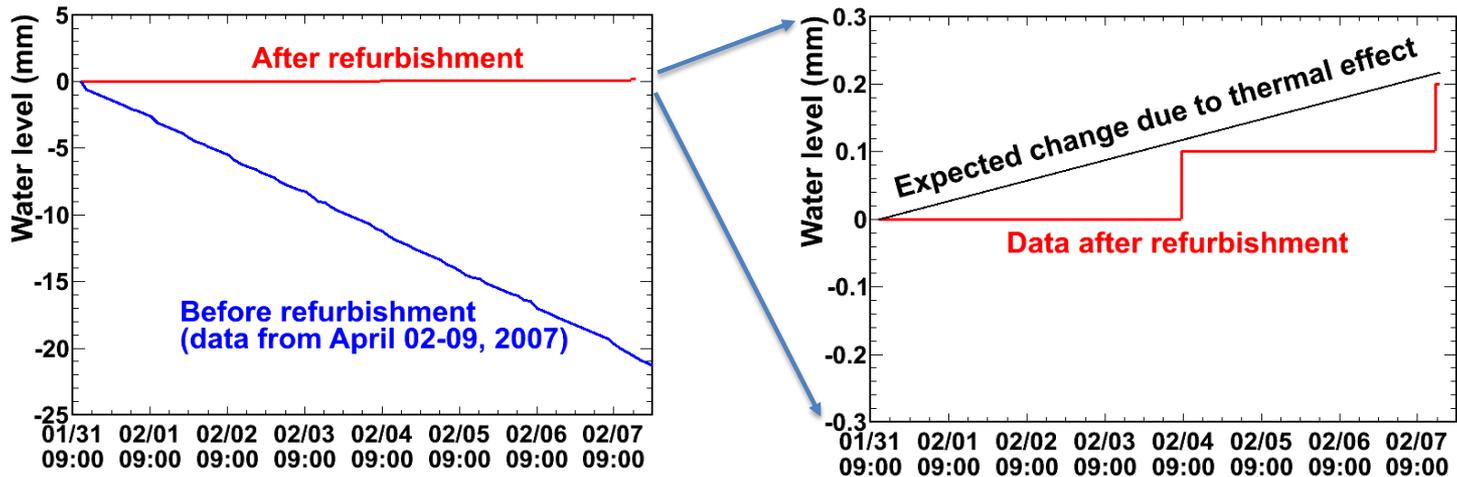


図 4.23 9 つの領域に分割した有効体積, [49] を基に作成。

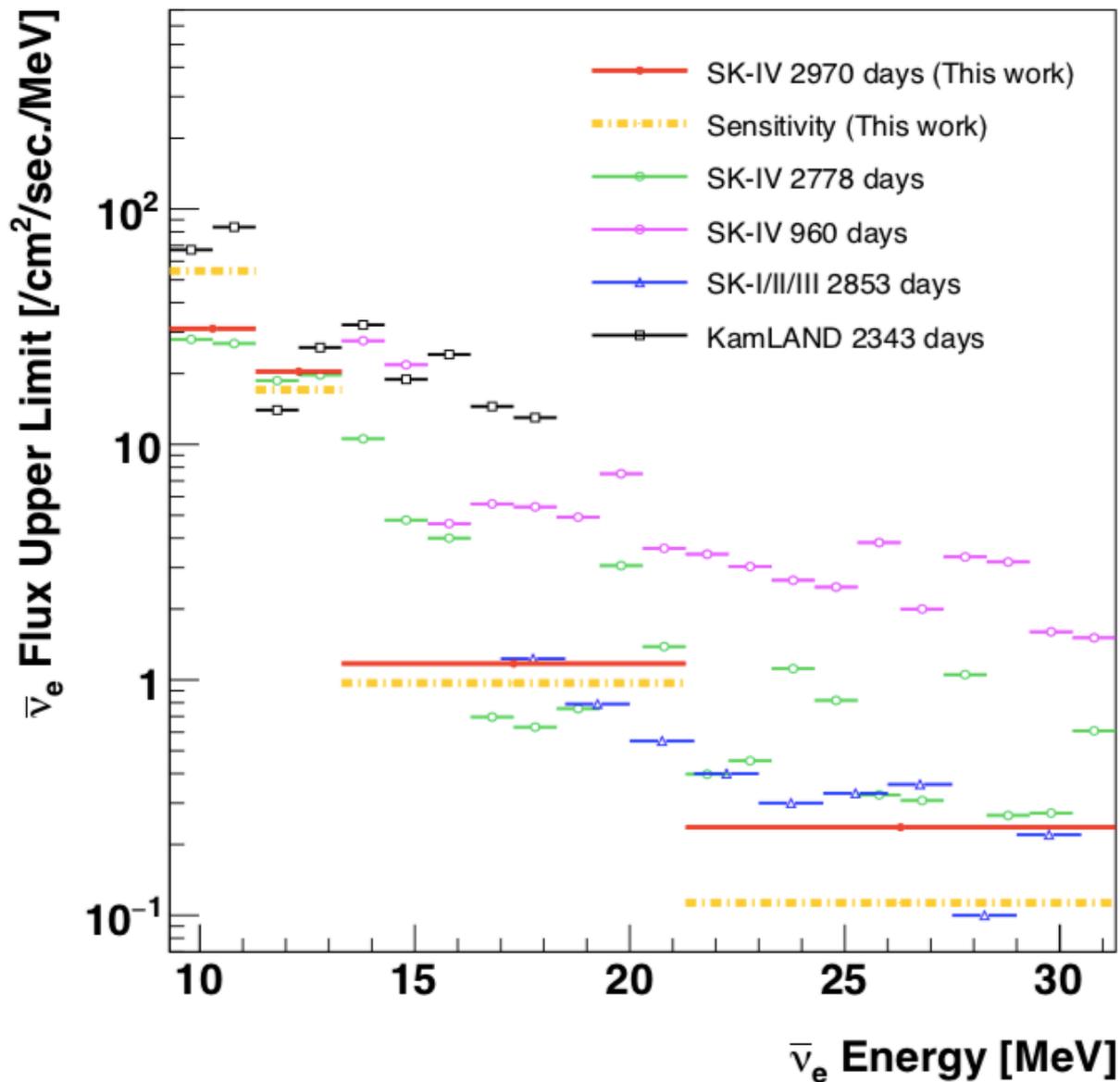
## Water Leakage from SK tank

After filling the tank completely with water, we started the water leakage measurement from 11:30 on 31<sup>st</sup> January to 15:52 on 7<sup>th</sup> February, 2019. (7 days 4 hours 22 minutes in total)



### Conclusion

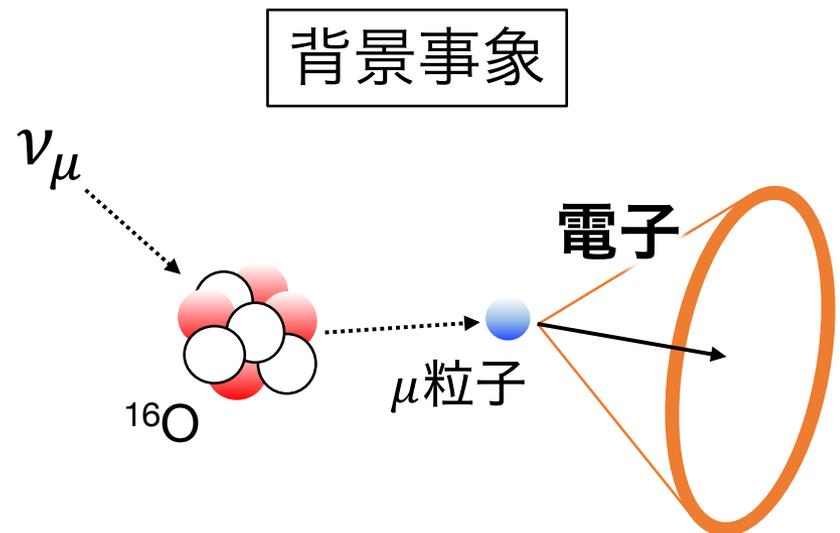
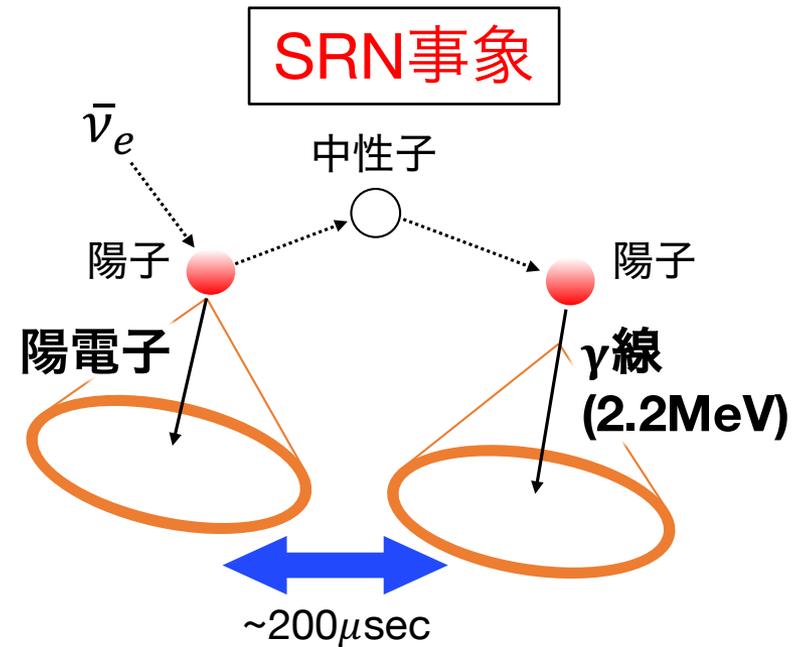
- Currently we do not observe any water leakage from the SK tank within the accuracy of our measurement, which is less than 0.017 tons per day.
- This is less than 1/200th of the leak rate observed before the 2018/2019 tank refurbishment.

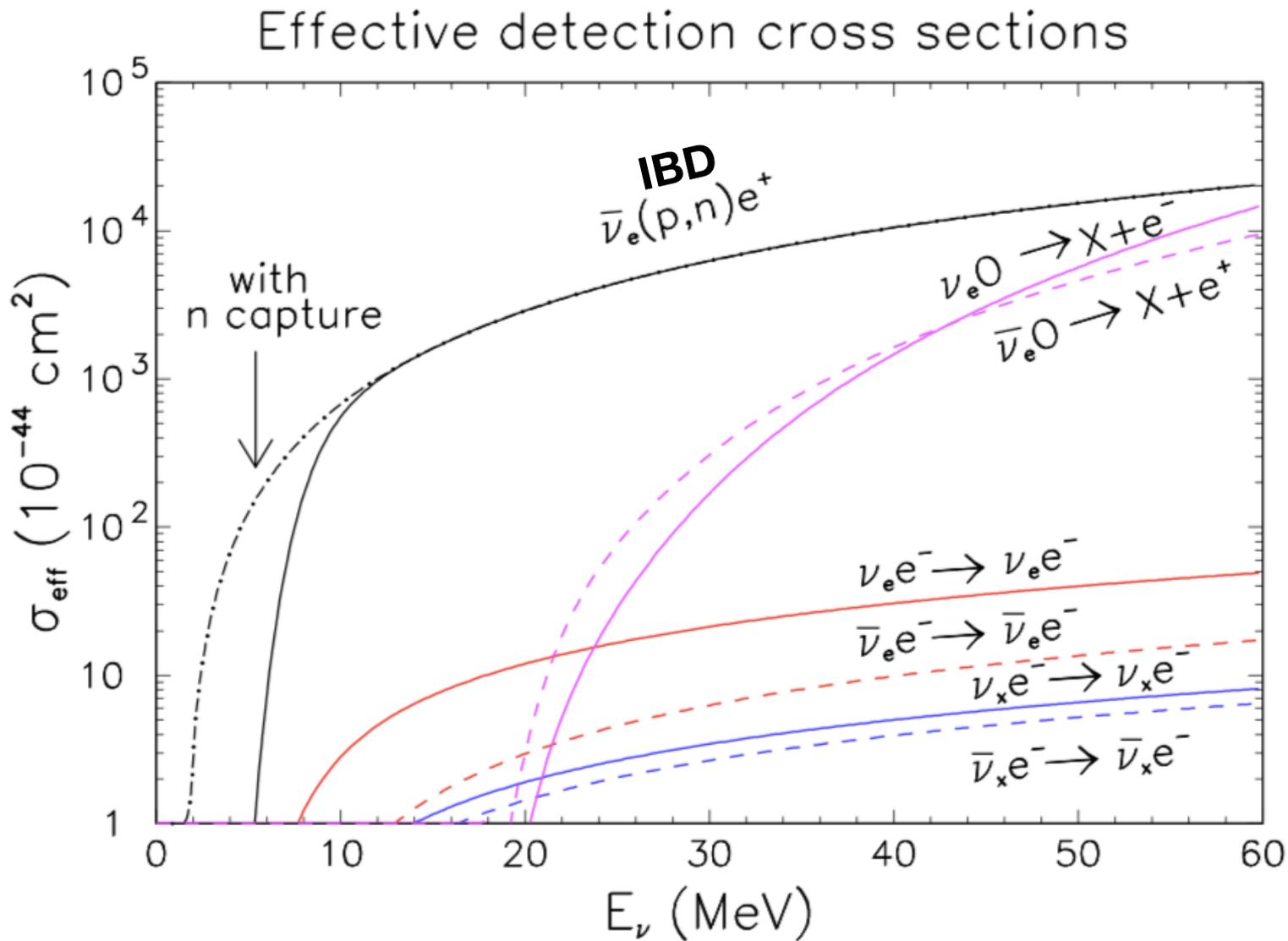


- $E < 30\text{MeV}$ で探索
- 観測対象：  
 $\bar{\nu}_e$ による逆ベータ崩壊反応



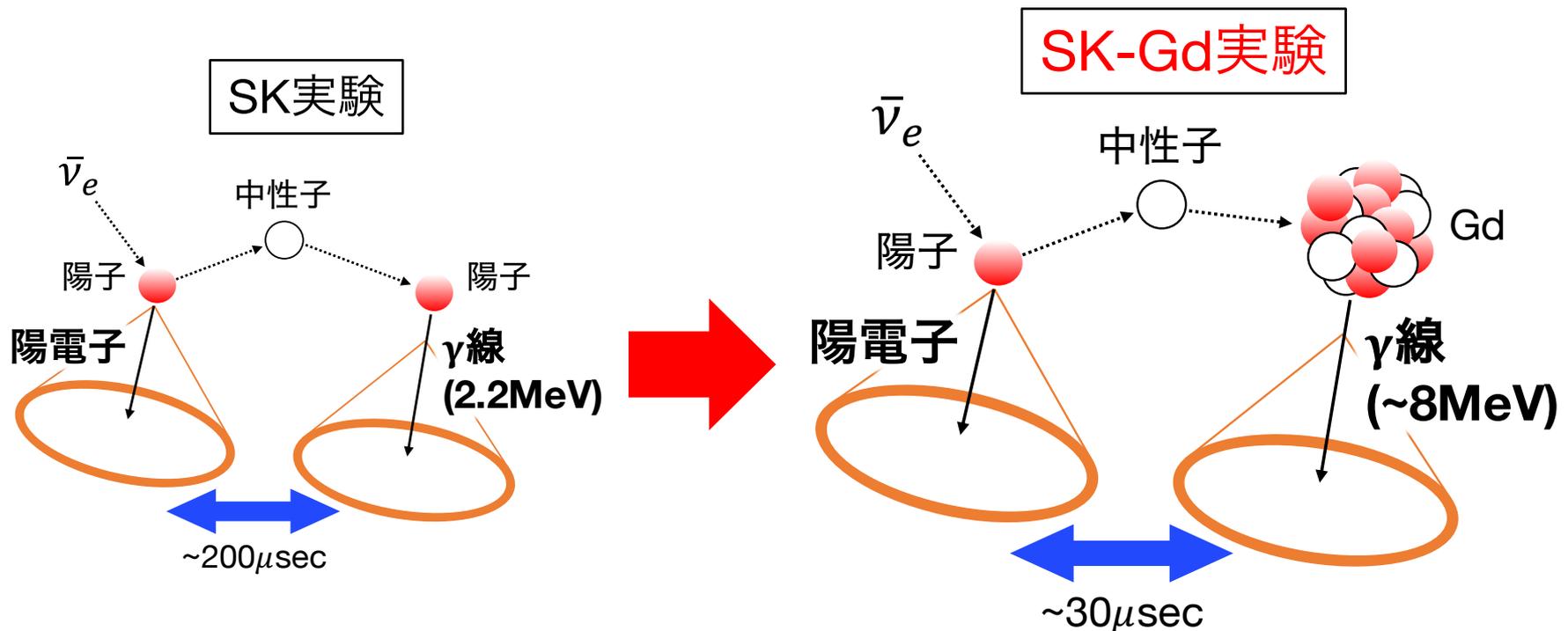
- 過去に陽電子と中性子の2つの信号を捉えることで大気ニュートリノ背景事象の削減を試みた
- **ガンマ線のエネルギーが低く、同定効率が低い(~20%)**





\* エネルギー分解能や検出器のエネルギー閾値による効果を含む

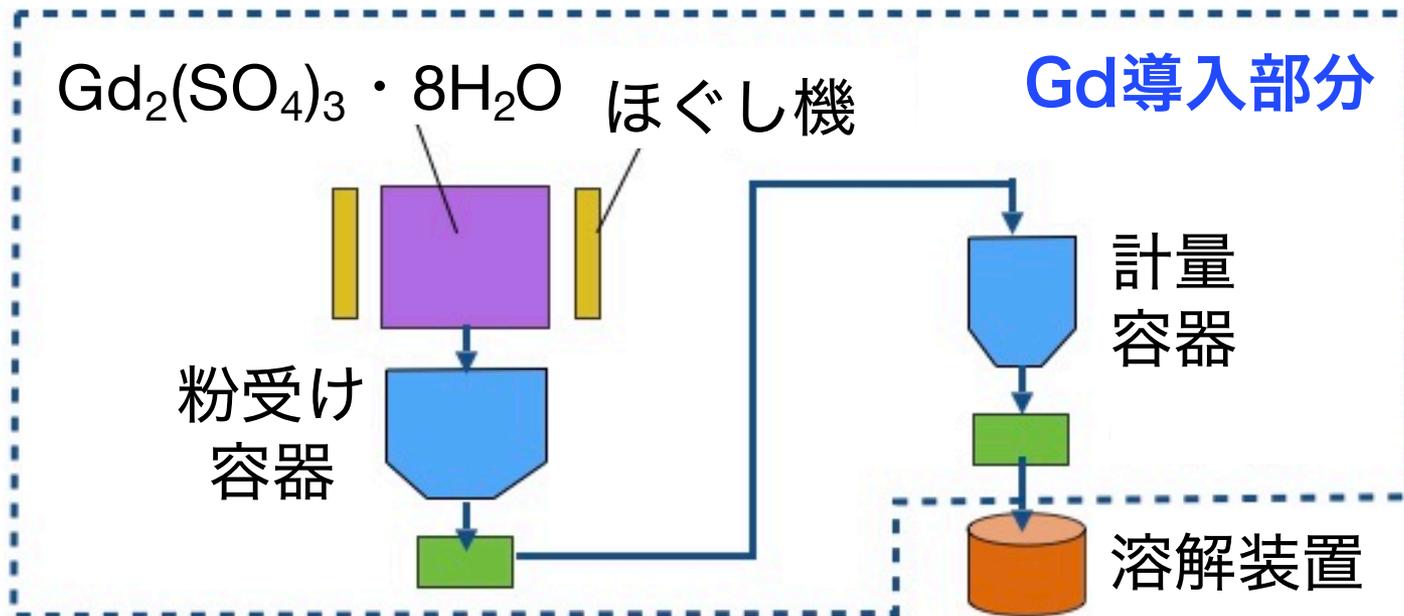
- 超純水中に(最終的に)質量濃度0.2%の硫酸ガドリニウム ( $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ )を溶解
- Gdは熱中性子捕獲断面積が天然元素中で最大で、合計約8MeVのガンマ線を放出
- ~90%の同定効率で背景事象を大幅に削減



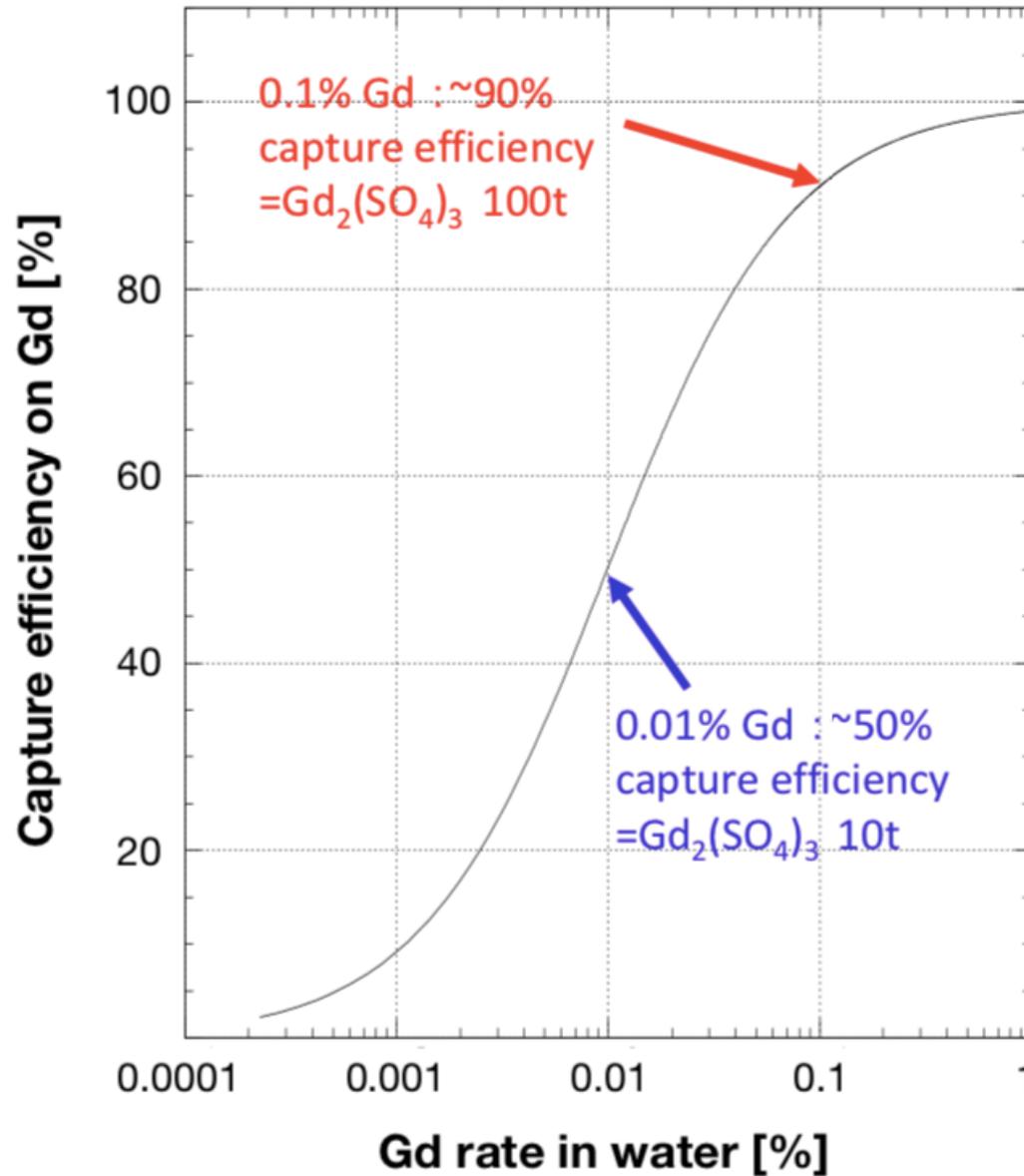
1.  $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (1袋500kg) を粉受け容器に入れる

2. パイプで計量容器に移す

3. 一定量ずつ溶解してSKタンクへ輸送

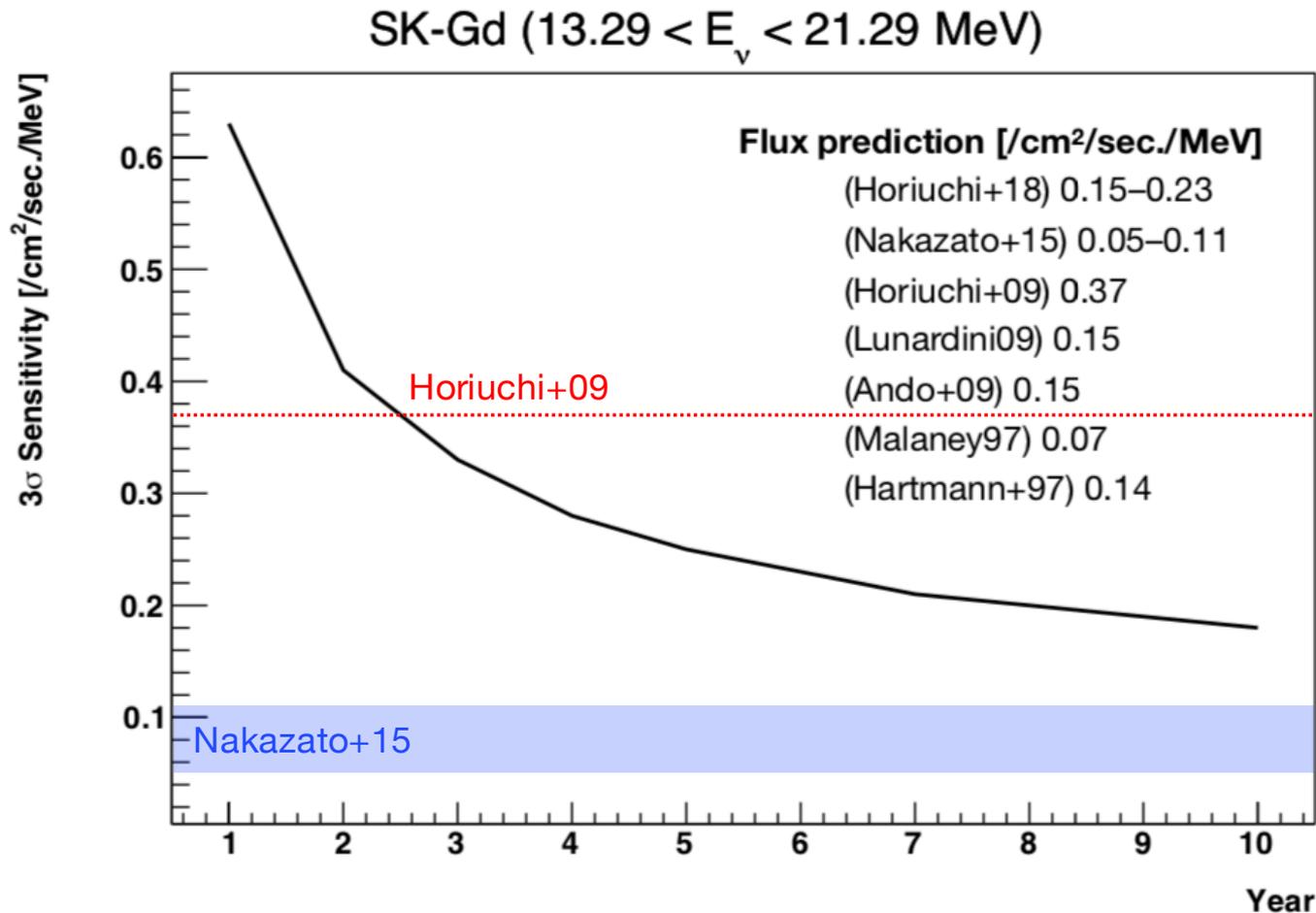


# 中性子捕獲効率



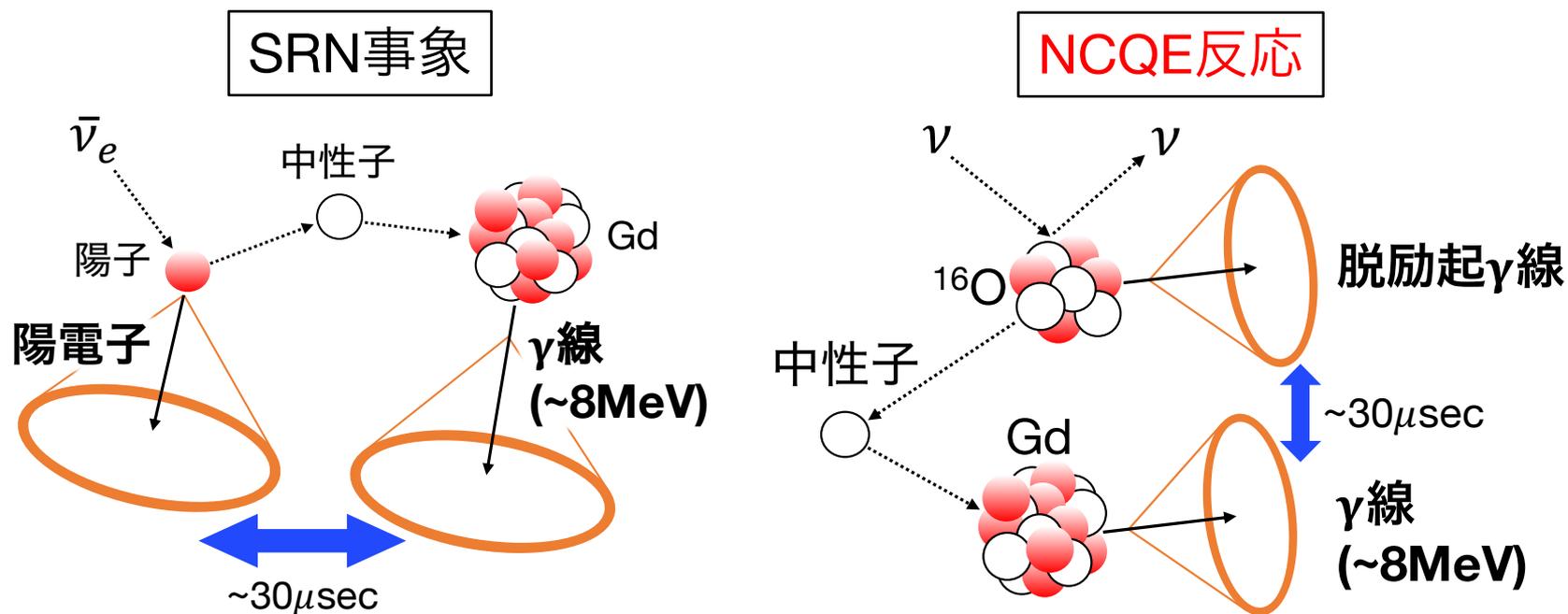
# SRN $\bar{\nu}_e$ フラックスの $3\sigma$ 感度

- SRNが観測されなくても $3\sigma$ の信頼度でこの上限値が付けられる
- 5-10年の観測で検証可能な理論モデルと検証不可能な理論モデルがある
- 系統誤差・背景事象の削減により多くの理論モデルを検証可能



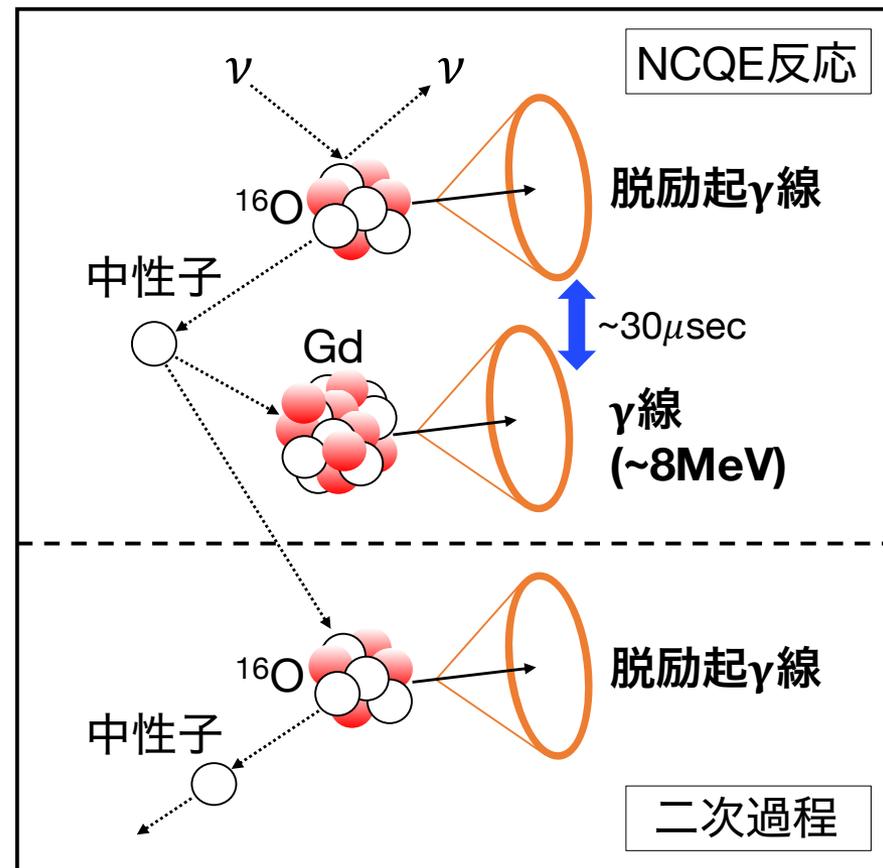
## SK-Gd実験のデータを解析し、SRN探索を行う

- SK-Gd実験でも識別できない事象 → 正確な見積もりが必要
- 大気ニュートリノの中性カレント準弾性散乱反応(NCQE反応)  
ニュートリノが酸素原子核内の核子を弾き出し、原子核を励起させる反応

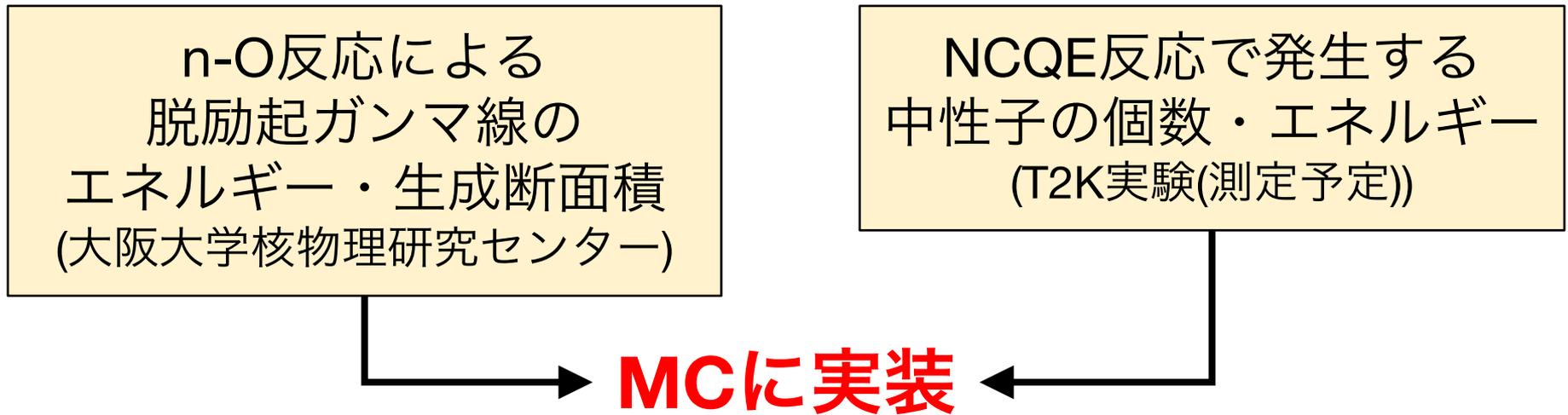


- T2K実験でNCQE反応断面積を測定 (世界最高精度)
- 実験を基にした数十MeV以上の中性子と原子核の正確な反応モデルがない

中性子(数十MeV—数百MeV)  
と酸素原子核の反応  
(n-O反応)由来の系統誤差が  
大きい(~13%)



- 新たなn-O反応モデルの構築



- 大気ニュートリノのNCQE反応におけるn-O反応由来の系統誤差を削減
- 大気ニュートリノのNCQE反応数の測定
- SK-Gd実験のデータ解析・SRN探索

- 新たなn-O反応モデルの構築
- 大気ニュートリノのNCQE反応数の測定
- SK-Gd実験のデータ解析・SRN探索

期間	2021年度		2022年度		2023年度	
SK-Gdの進捗	Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 0.02%	Gd導入	Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 0.05%			
研究概要	n-O反応モデルの 構築		NCQE反応数の 測定		SRN 探索	D論執筆
	SK-Gdデータ解析					

Decay electron

“atm. muon neutrinos”

$\nu_e$  CC

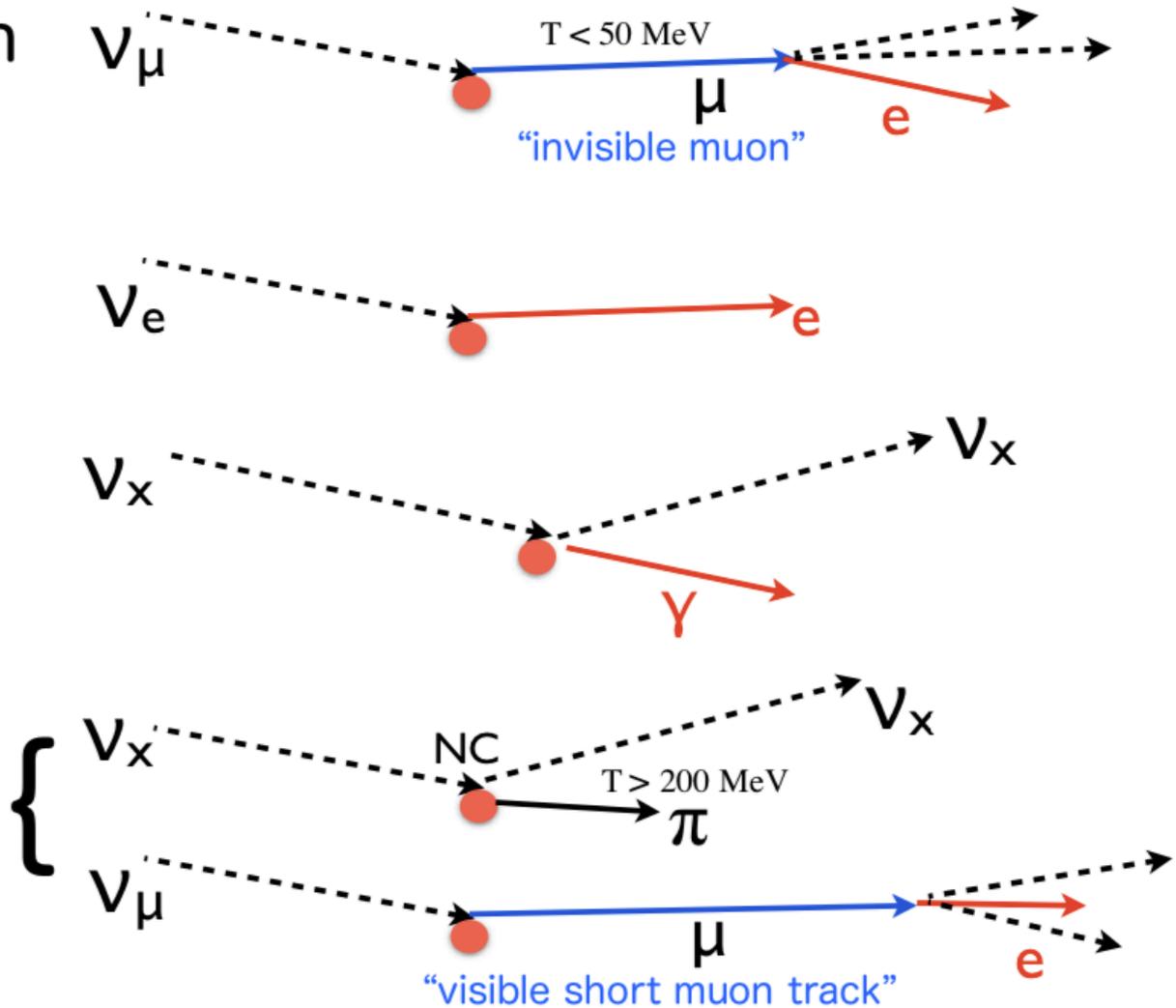
“atm. electron neutrinos”

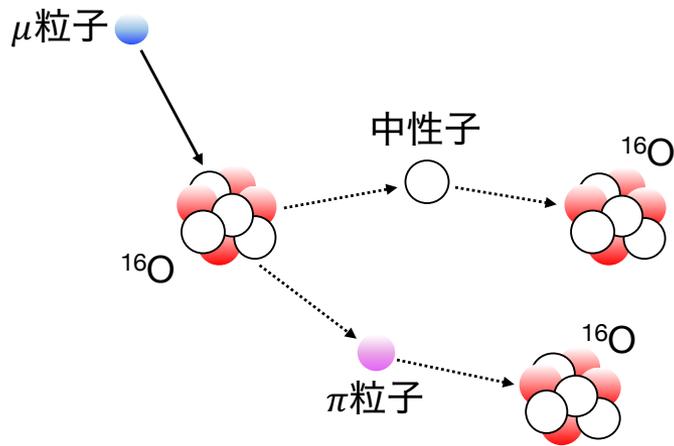
NC Elastic

“atmospheric”

$\mu/\pi$

“ $\mu/\pi$  production  
from atm. neutrinos”





Isotope	Half-life [sec.]	Decay mode	Yield [ $\times 10^{-7} \mu\text{on}^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$ ]	Primary process
<i>n</i>			2030	
<sup>18</sup> N	0.624	$\beta^-$	0.02	<sup>18</sup> O( <i>n, p</i> )
<sup>17</sup> N	4.173	$\beta^-n$ 低エネルギー	0.59	<sup>18</sup> O( <i>n, n + p</i> )
<sup>16</sup> N	7.13	$\beta^- \gamma$ (66%), $\beta^-$ (28%)	18	( <i>n, p</i> )
<sup>16</sup> C	0.747	$\beta^-n$ 低エネルギー	0.02	( $\pi^-, np$ )
<sup>15</sup> C	2.449	$\beta^- \gamma$ (63%), $\beta^-$ (37%)	0.82	( <i>n, 2p</i> )
<sup>14</sup> B	0.0138	$\beta^- \gamma$	0.02	( <i>n, 3p</i> )
<sup>13</sup> O	0.0086	$\beta^+$	0.26	( $\mu^-, p + 2n + \mu^- + \pi^-$ )
<sup>13</sup> B	0.0174	$\beta^-$	1.9	( $\pi^-, 2p + n$ )
<sup>12</sup> N	0.0110	$\beta^+$	1.3	( $\pi^+, 2p + 2n$ )
<sup>12</sup> B	0.0202	$\beta^-$	12	( <i>n, <math>\alpha + p</math></i> )
<sup>12</sup> Be	0.0236	$\beta^-$	0.10	( $\pi^-, \alpha + p + n$ )
<sup>11</sup> Be	13.8	$\beta^-$ (55%), $\beta^- \gamma$ (31%)	0.81	( <i>n, <math>\alpha + 2p</math></i> )
<sup>11</sup> Li	0.0085	$\beta^-n$ 短寿命	0.01	( $\pi^+, 5p + \pi^+ + \pi^0$ )
<sup>9</sup> C	0.127	$\beta^+$	0.89	( <i>n, <math>\alpha + 4n</math></i> )
<sup>9</sup> Li	0.178	$\beta^-n$ (51%), $\beta^-$ (49%)	1.9	( $\pi^-, \alpha + 2p + n$ )
<sup>8</sup> B	0.77	$\beta^+$	5.8	( $\pi^+, \alpha + 2p + 2n$ )
<sup>8</sup> Li	0.838	$\beta^-$ 低エネルギー	13	( $\pi^-, \alpha + {}^2\text{H} + p + n$ )
<sup>8</sup> He	0.119	$\beta^- \gamma$ (84%), $\beta^-n$ (16%)	0.23	( $\pi^-, {}^3\text{H} + 4p + n$ )
<sup>15</sup> O			351	( $\gamma, n$ )
<sup>15</sup> N			773	( $\gamma, p$ )
<sup>14</sup> O			13	( <i>n, 3n</i> )
<sup>14</sup> N			295	( $\gamma, n + p$ )
<sup>14</sup> C			64	( <i>n, n + 2p</i> )
<sup>13</sup> N			19	( $\gamma, {}^3\text{H}$ )
<sup>13</sup> C			225	( <i>n, {}^2\text{H} + p + n</i> )
<sup>12</sup> C			792	( $\gamma, \alpha$ )
<sup>11</sup> C			105	( <i>n, <math>\alpha + 2n</math></i> )
<sup>11</sup> B			174	( <i>n, <math>\alpha + p + n</math></i> )
<sup>10</sup> C			7.6	( <i>n, <math>\alpha + 3n</math></i> )
<sup>10</sup> B			77	( <i>n, <math>\alpha + p + 2n</math></i> )
<sup>10</sup> Be			24	( <i>n, <math>\alpha + 2p + n</math></i> )
<sup>9</sup> Be			38	( <i>n, 2<math>\alpha</math></i> )
sum			3015	



- 安定
- 長寿命
- 観測不可
- 低エネルギー

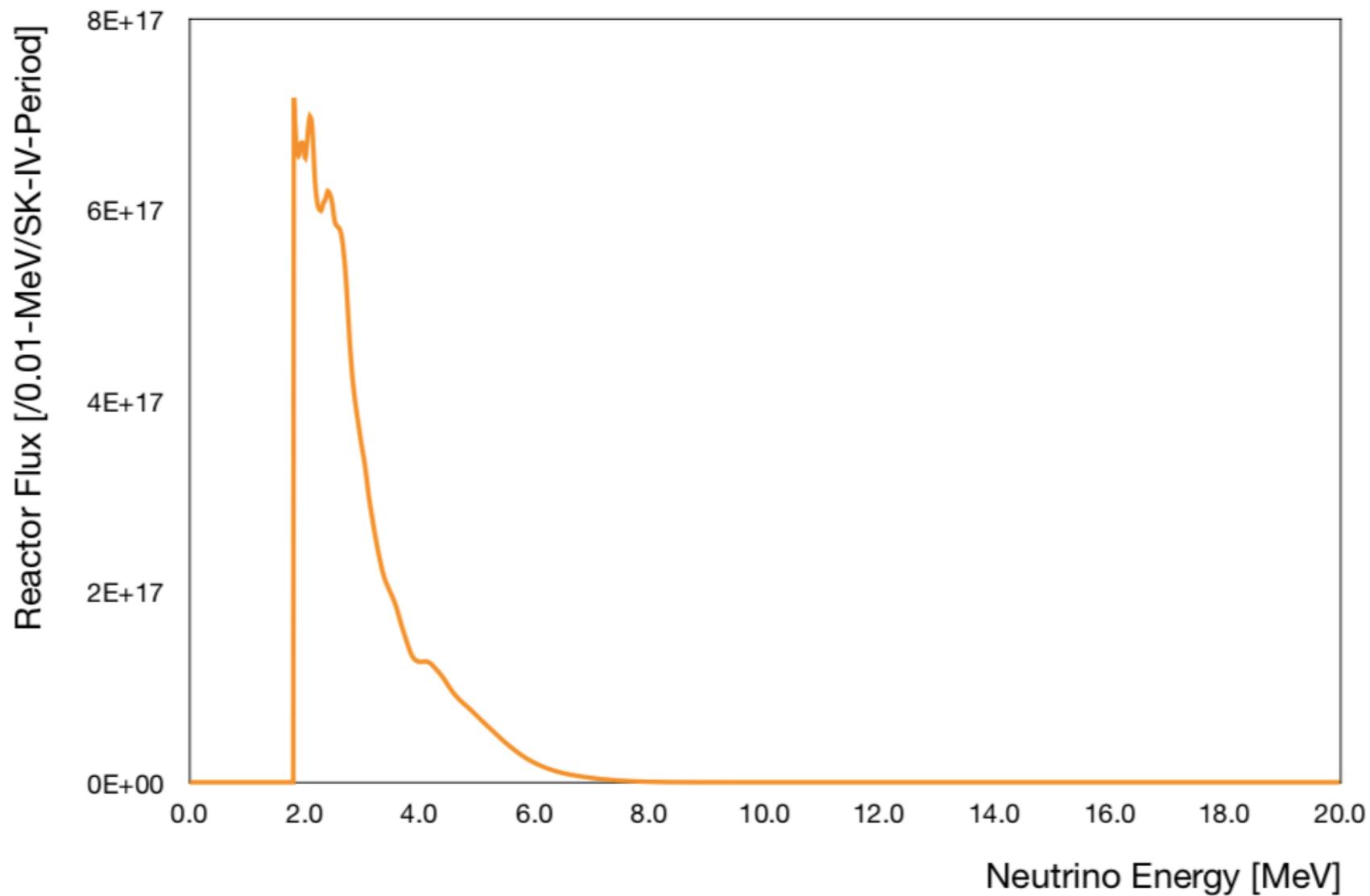


Table 7.5: Summary of systematic uncertainties on the observed event rate in percent for the FHC and RHC sample components. The fraction of each component, listed as “Event fraction”, is shown together in percent. For the beam-unrelated events, the total uncertainty entry represents the statistical uncertainty.

		$\nu$ -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC-other	CC	Beam-unrelated
FHC	Event fraction	75.0	2.0	17.8	3.7	1.5
	Neutrino flux	6.7	8.6	7.3	6.4	-
	Neutrino interaction	3.0	3.0	8.2	16.5	-
	Primary- $\gamma$ production	11.0	10.6	6.0	6.6	-
	Secondary- $\gamma$ production	13.5	13.4	19.5	17.6	-
	Oscillation parameter	-	-	-	4.1	-
	Detector response	3.4	3.4	2.0	5.2	-
Total error		19.2	19.7	23.3	26.7	3.0
RHC	Event fraction	19.0	59.9	16.5	2.5	2.1
	Neutrino flux	7.0	6.4	7.0	6.5	-
	Neutrino interaction	3.0	3.0	10.8	38.2	-
	Primary- $\gamma$ production	12.2	11.4	3.5	0.5	-
	Secondary- $\gamma$ production	13.6	13.1	19.3	21.4	-
	Oscillation parameter	-	-	-	3.1	-
	Detector response	3.4	3.4	2.0	5.2	-
Total error		20.1	19.0	23.4	44.7	3.9

Table 12.3: Summary on the NCQE background uncertainties for neutrinos and antineutrinos for each energy region. The numbers are shown in percent.

Energy [MeV]	7.49–9.49	9.49–11.49	11.49–19.49	19.49–29.49
T2K cross section (in this thesis)	+32/–25 (+31/–25)			
Atmospheric- $\nu$ flux	15 (15)			
Flux difference	5 (7)			
Spallation cut	3 (3)	3 (3)	1 (1)	0 (0)
Cherenkov angle cut	42 (42)	50 (50)	18 (18)	84 (84)
Other third reduction	3 (3)	3 (3)	3 (3)	3 (3)
Neutron tagging efficiency	21 (21)			
Neutron multiplicity	40 (39)	41 (40)	40 (40)	41 (42)
Total (neutrino)	+72/–69	+77/–74	+60/–57	+102/–100
Total (antineutrino)	+71/–68	+76/–74	+60/–57	+102/–101