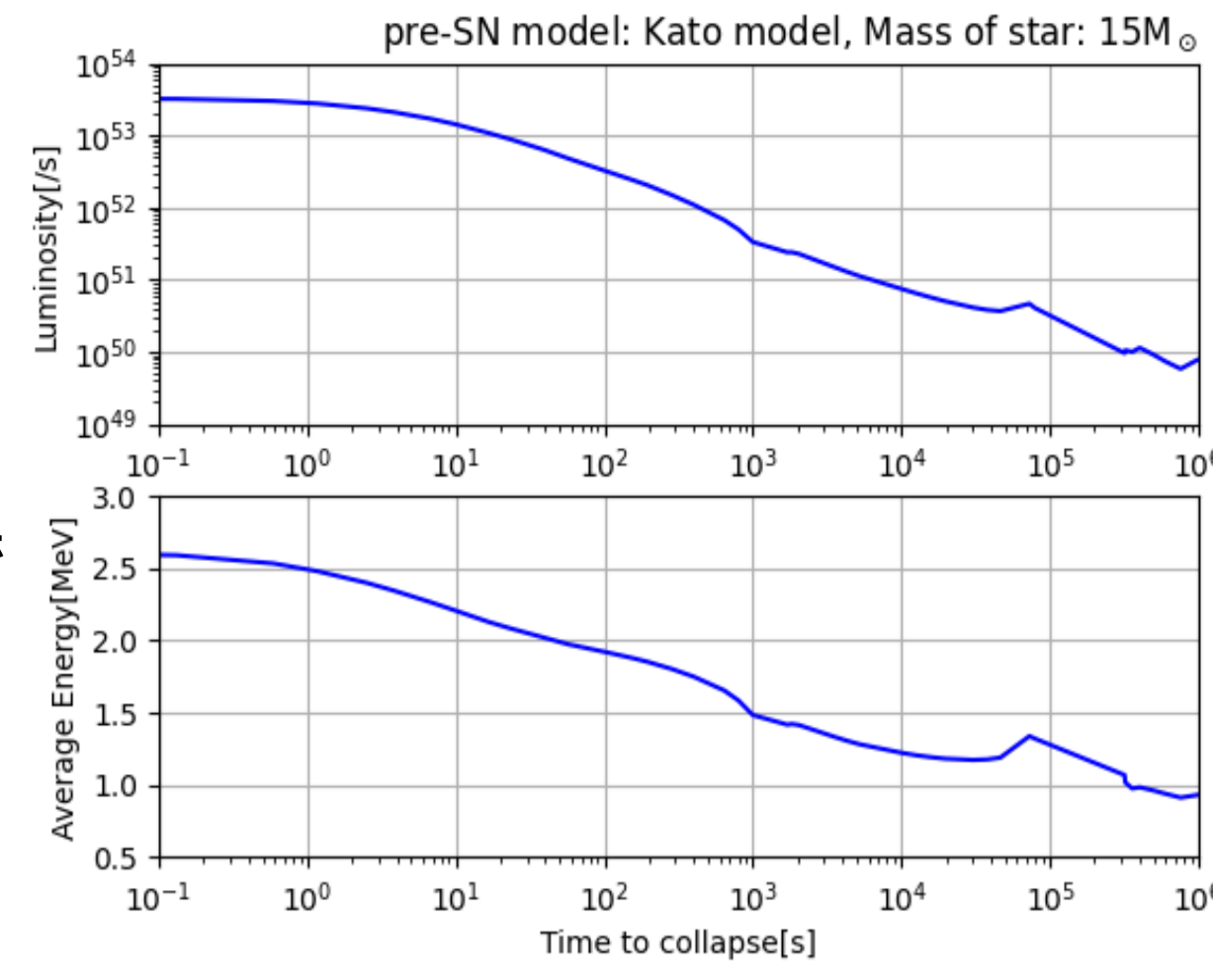


## 1. 研究背景

### 超新星前兆ニュートリノ

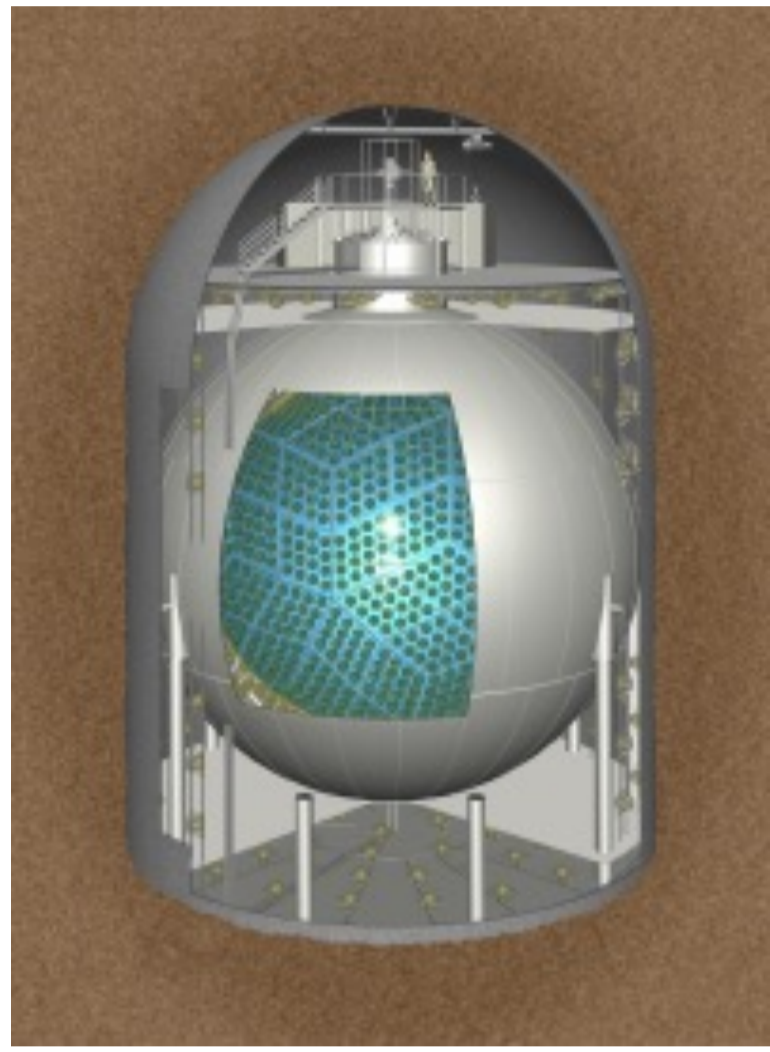
超新星爆発前に星内部の燃焼によりニュートリノを生成

超新星前兆ニュートリノを検出することで超新星爆発に対するアラートとなる。

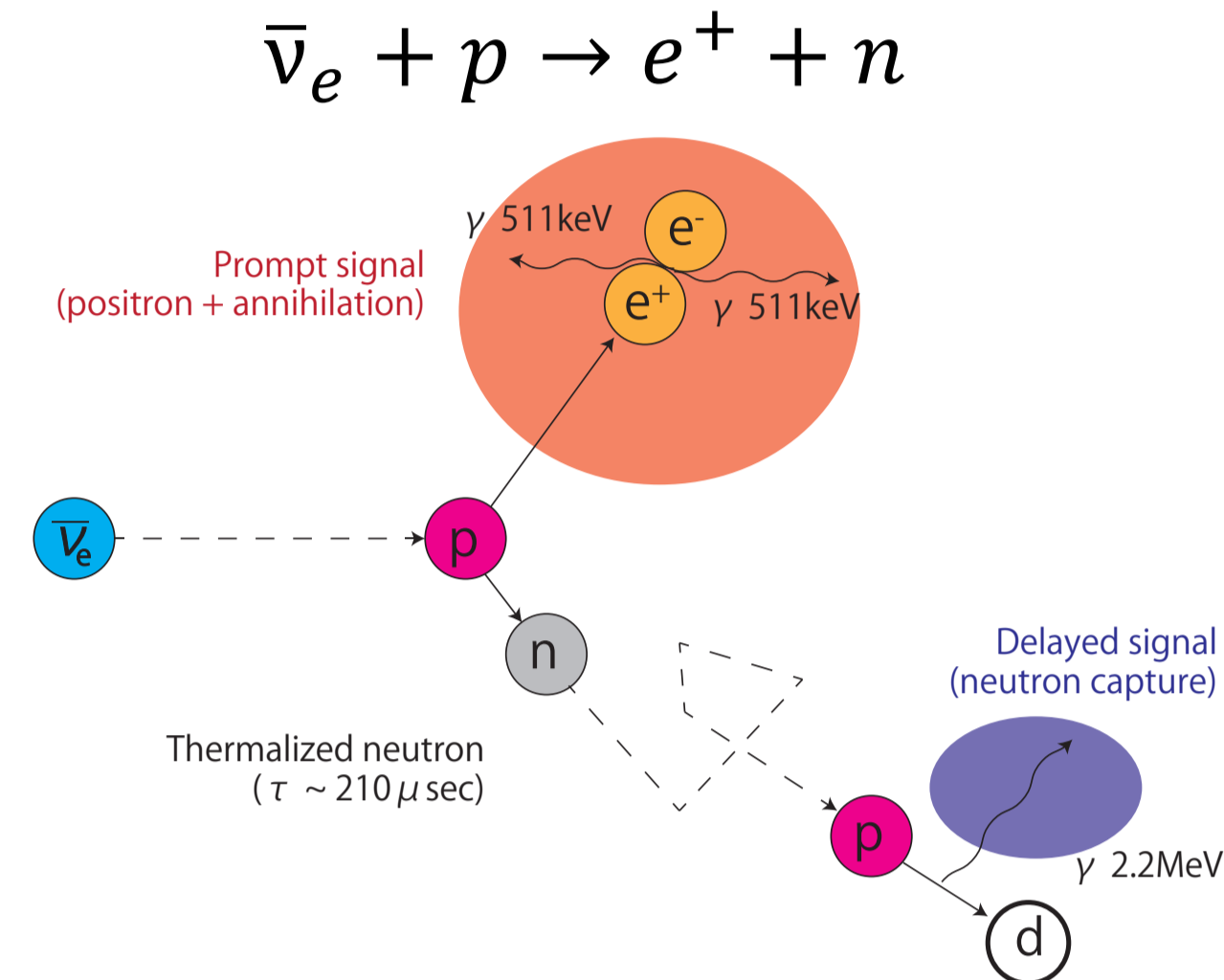


### KamLAND

- KamLANDは岐阜県池ノ山地下1000mに作られた液体シンチレータ検出器
- 低エネルギーニュートリノに感度をもつ。
  - 超新星前兆ニュートリノ(平均エネルギー2MeV以下)を検出可能



超新星前兆ニュートリノアラームでは逆ベータ崩壊を用いる。



## 2. 研究目的

現在のKamLANDの超新星前兆ニュートリノアラームでは

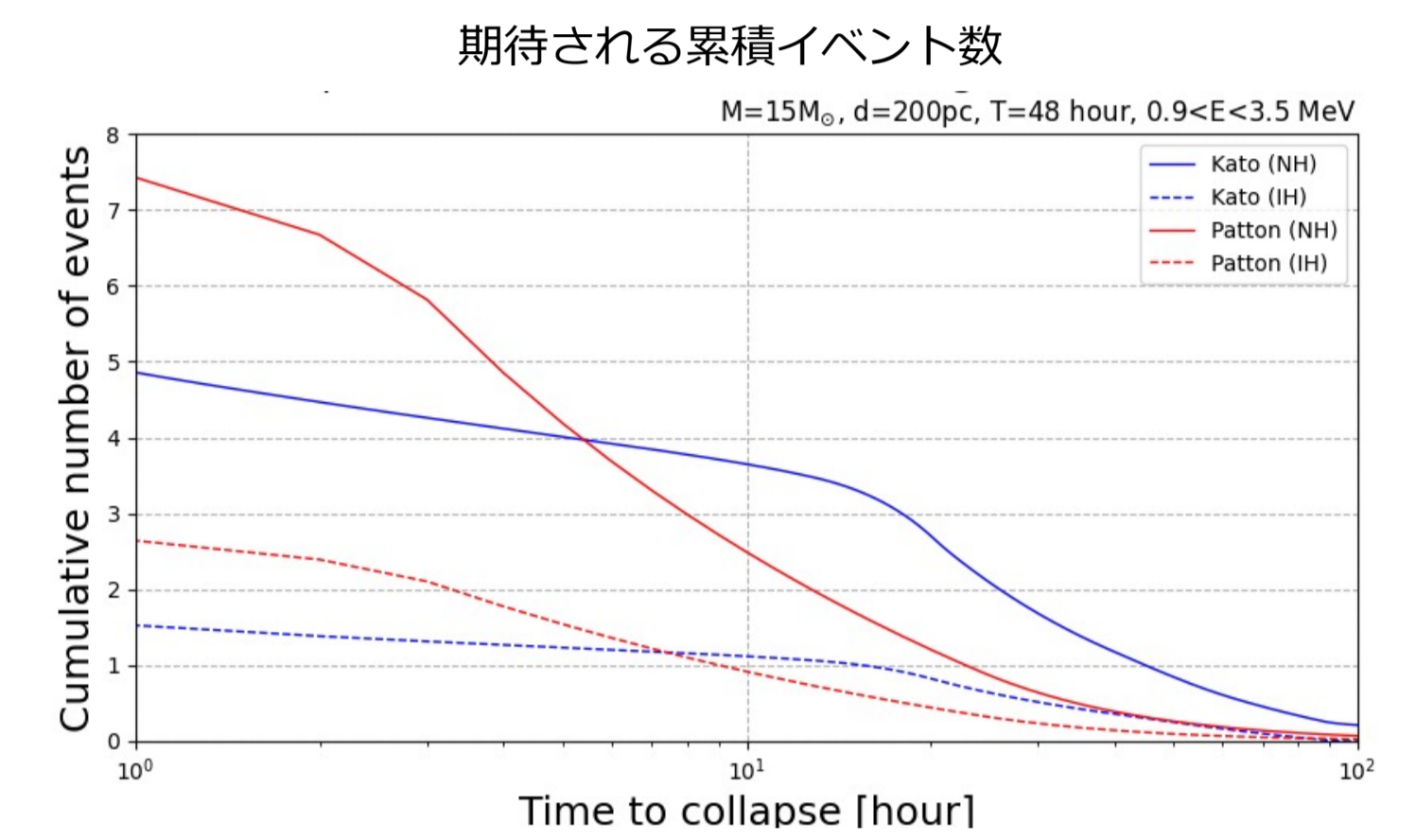
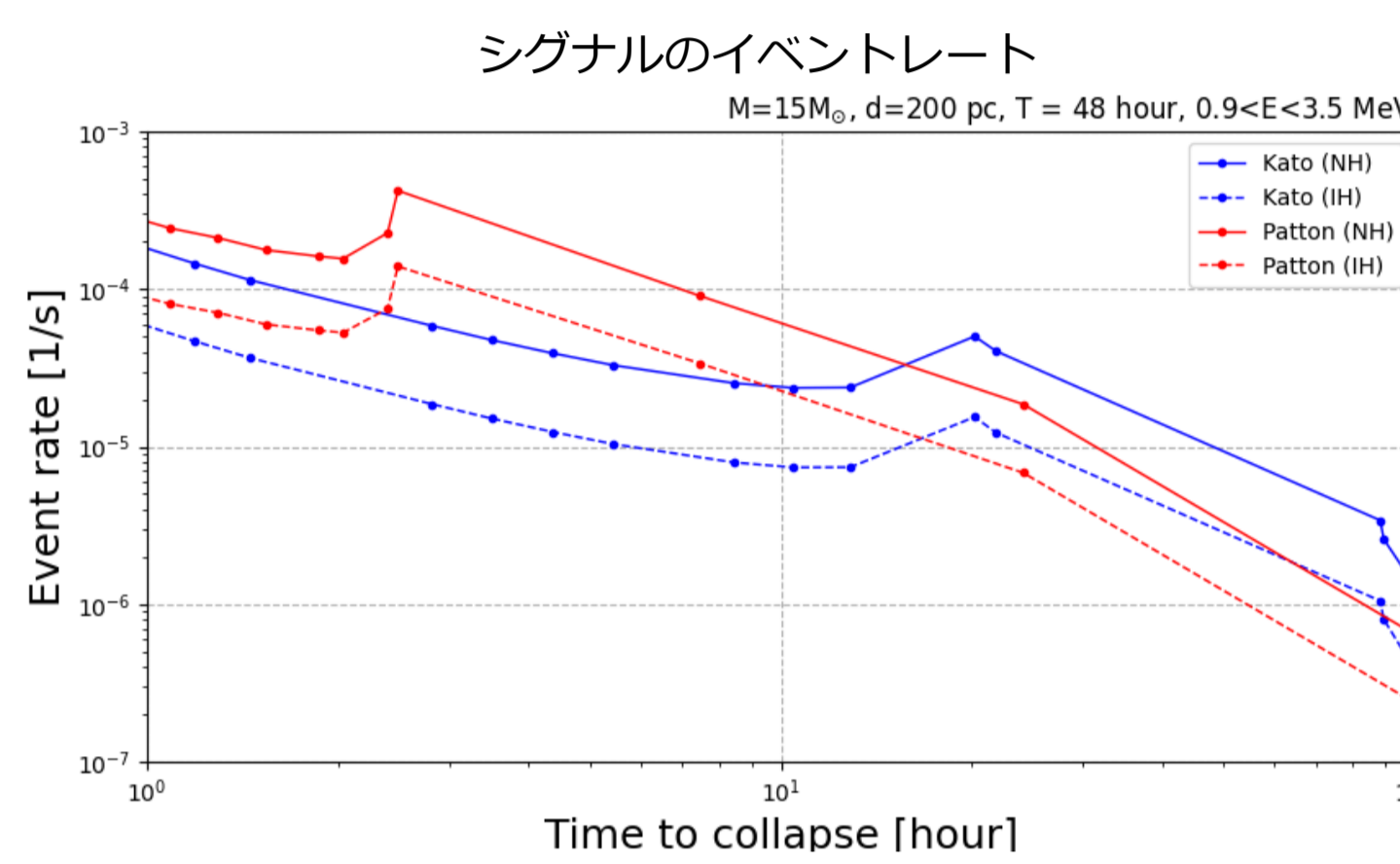
- 時間幅48時間、観測エネルギー範囲 $0.9 < E < 3.5$  MeV
- 累積イベント数のみから解析

- 改善1. **最新の超新星前兆ニュートリノのモデル**から時間幅と観測エネルギー範囲を最適化
- 改善2. **シグナルの時間変化**を考慮してより高感度のアラームを作成

### 用いた超新星前兆ニュートリノのモデル

- 星の質量:  $15M_{\odot}$ 。地球からの距離: 200pc
- 加藤モデル<sub>[1]</sub>とPattonモデル<sub>[2]</sub>を順階層と逆階層の場合に分けて用いた。

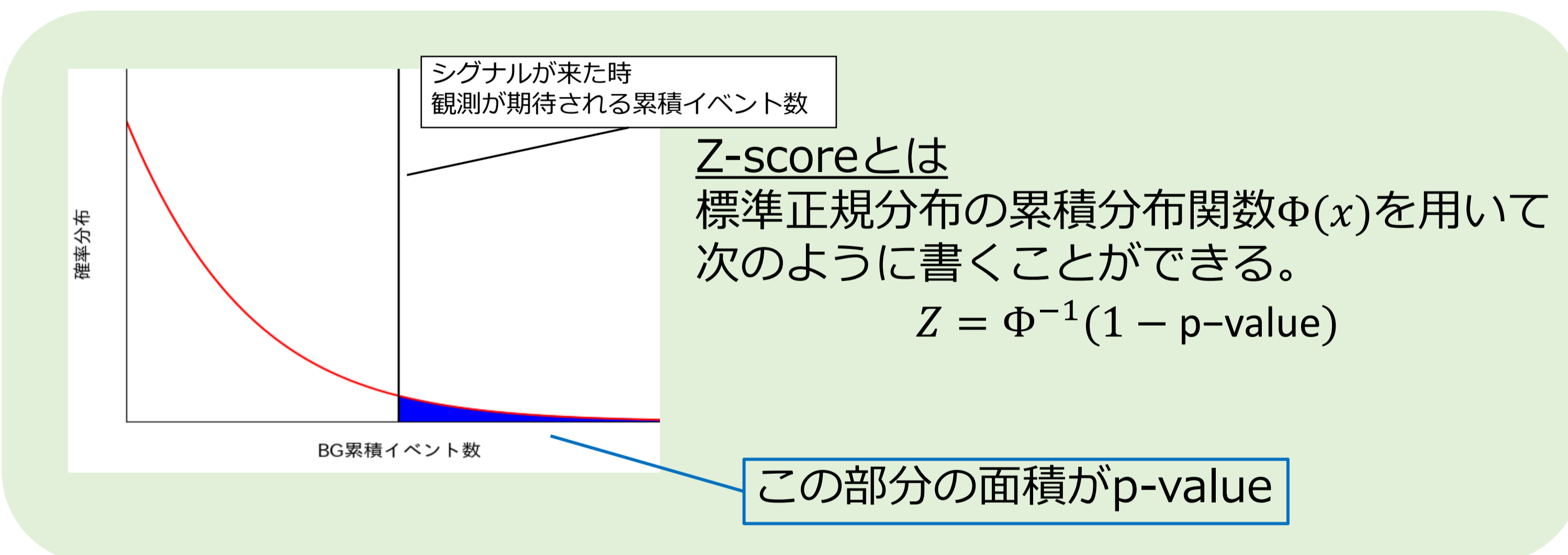
[1] Chinami Kato et al 2017 ApJ 848 48 (2017)  
[2] Kelly M. Patton et al 2017 ApJ 851 6 (2017)



## 3. 改善1 パラメータの最適化

### 解析方法

- それぞれの超新星前兆ニュートリノモデルで時間幅と観測エネルギー範囲を変えてZ-scoreを計算した。
- いずれのモデルに対しても、**Z-score $\geq 3$ に初めて達する時間が早い**時間幅と観測エネルギー範囲の組み合わせを探した。
- 次の時間幅と観測エネルギー範囲の組み合わせの中から選ぶ。
  - 時間幅: 12, 24, 36, 48時間
  - 観測エネルギー範囲の最大値: 2, 3, 4 MeV

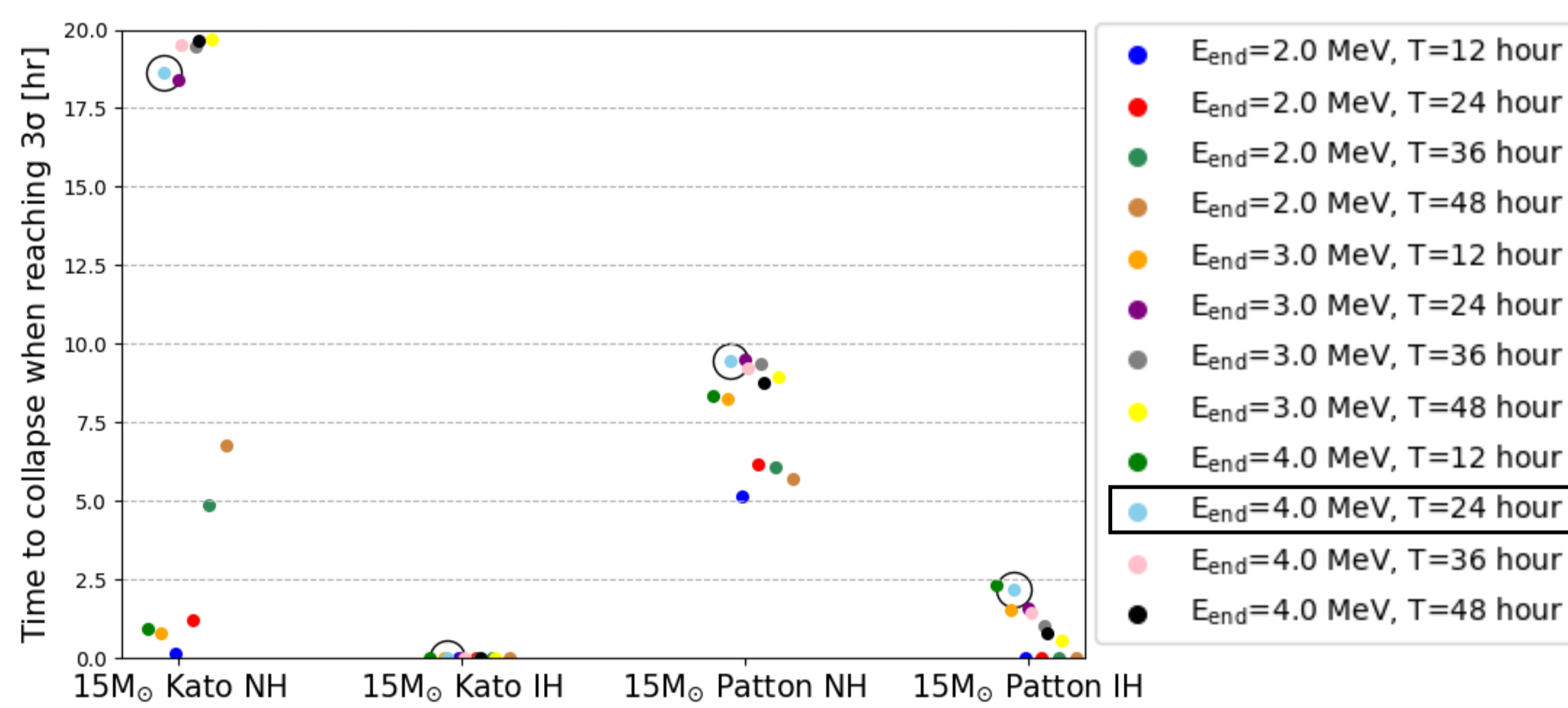


Z-scoreとは標準正規分布の累積分布関数 $\Phi(x)$ を用いて次のように書くことができる。

$$Z = \Phi^{-1}(1 - p\text{-value})$$

この部分の面積がp-value

### 解析結果



順階層で加藤モデルを仮定した時、Z-score $\geq 3$ となる時間が早いパラメータが集まっている。

このクラスターの中で他のモデルを仮定した場合でもZ-score $\geq 3$ となる時間が早いパラメータを選択

超新星前兆ニュートリノを検出するために最適なパラメータは  
時間幅 24時間  
観測エネルギー範囲  $0.9 < E < 4.0$  MeV

## 4. 改善2 シグナルの時間変化を考慮したアラーム

### 解析方法

BGに加えてシグナルが来た場合とBGのみの場合を仮定してlikelihood関数を計算

$$L(\{t_i\} | \text{BG} + \text{Signal}) = \text{Pois}(n, s_{\text{exp}} + b_{\text{exp}}) \prod_{i=1}^n \frac{1}{s_{\text{exp}} + b_{\text{exp}}} (r_s(t_i) + r_b)$$

$$L(\{t_i\} | \text{BG only}) = \text{Pois}(n, b_{\text{exp}}) \prod_{i=1}^n \frac{1}{b_{\text{exp}}} r_b$$

- 観測が期待されるイベントの時間の確率分布
- 観測が期待される累積イベント数の確率分布

二つのlikelihood関数の比の対数を計算して統計量を定義<sub>[3]</sub>

$$l_{\text{SA}}(t) = \log \frac{L(\{t_i\} | \text{BG} + \text{signal})}{L(\{t_i\} | \text{BG only})} = -s_{\text{exp}} + \sum_{i=1}^n \log \left( 1 + \frac{r_s(t_i)}{r_b} \right)$$

$\{t_i\}$ : 観測が期待されるイベントの時間 [hour] ( $t \leq t_i \leq t + \text{時間幅}$ )  
 $r_b$ : BGイベントレート [1/s]  
 $s_{\text{exp}}$ : 累積シグナルイベント数の期待値  
 $n$ : 観測が期待される累積イベント数  
 $b_{\text{exp}}$ : BG累積イベント数  
 $r_s$ : シグナルイベントレート [1/s]

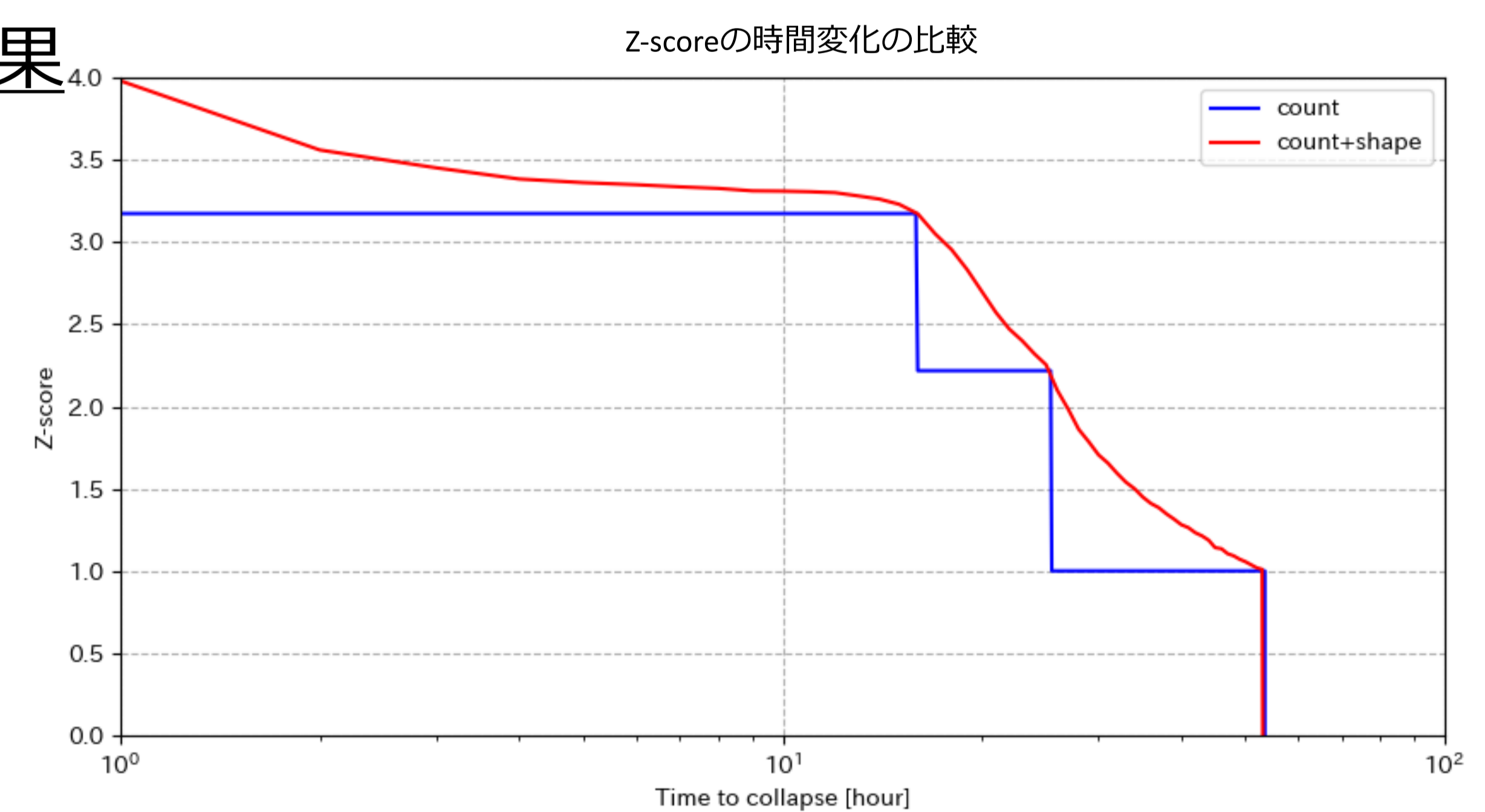
[3] A. Sheshukov et al JCAP12(2021)053

- モンテカルロ法を用いて $\{t_i\}$ と $n$ を乱数として生成し、 $l_{\text{SA}}$ を計算
- p-valueを次のように定義しZ-scoreに直す。

$$p = \int_{l_{\text{obs}}}^{\infty} \frac{P(l_{\text{SA}} | \text{BG only})}{\int_{l_{\text{obs}}}^{\infty} P(l_{\text{SA}} | \text{BG only})} dl_{\text{SA}} \quad l_{\text{obs}}: \text{シグナルが来た時観測が期待される } l_{\text{SA}} \\ = \text{シグナルが来た場合を仮定した } l_{\text{SA}} \text{の中央値}$$

イベントレートや累積イベント数の計算とモンテカルロ法で用いるモデルとして順階層加藤モデルを用いる。

### 解析結果



累積イベント数のみを考慮(青線)よりシグナルの時間変化を考慮(赤線)したほうがZ-scoreが大きい。

シグナルの時間変化を考慮することでより高感度のアラームをつくることができた。

## 5. 結論

超新星前兆ニュートリノの検出効率を上げるために、最新のモデルからKamLANDでの最適な時間幅と観測エネルギー範囲を最適化した。シグナルの時間変化を考慮することでより高感度の検出効率を実現した。

## 6. 今後の課題

改善2について、イベントレートや累積イベント数の計算とモンテカルロ乱数の生成で異なる超新星前兆ニュートリノのモデルを用いた時の振る舞いを考察する。