

ニュートリノ検出装置「KamLAND」を用いた GRB からの熱的ニュートリノの研究

大木 悠平 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

「KamLAND」は低エネルギー領域 (数 MeV~数十 MeV) に感度を持つニュートリノ検出装置である。GRB からのニュートリノに関する研究はこれまでも他の実験で行われてきたが、それは GRB ジェットに付随するものである。KamLAND では、GRB 発生前に放出されるといわれている、数十 MeV の熱的ニュートリノを検出できる可能性がある。

ポスターでは、熱的ニュートリノの探索に向けた、KamLAND で予想されるニュートリノフリューエンスの上限値のシュミレーション結果について発表する。

1 Introduction

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙で最もエネルギーの大きい天体現象として知られているが、その発生の仕組みについてはまだ明らかにされていない。GRB は継続時間によって 2 種類に分けられ、2 秒以下の short GRB と呼ばれるものと、2 秒以上の long GRB と呼ばれるものがある。それぞれ発生の候補として、前者はコンパクト天体の合体、後者はハイパーノヴァが有力視されているが、両者とも結果として降着円盤を伴ったブラックホールを形成し、それが相対論的なファイヤーボールジェットを生成して GRB を引き起こすとされている。この過程で数十 MeV の熱的ニュートリノが放出されると予想されており、このようなニュートリノを検出することでファイヤーボールジェットの初期状態や GRB のメカニズムが明らかになるかもしれない。

現在、ファイヤーボールジェットに由来する高エネルギーニュートリノに関する研究は行われているが、GRB からの熱的ニュートリノに関しては観測による研究は行われていない。KamLAND グループでは、その熱的ニュートリノに関する研究を行おうとしており、その前段階として、実データでの解析に備えた解析方法の確認と予想されるニュートリノフリューエンスの見積もりを報告する。

2 KamLAND 検出器

KamLAND 検出器は液体シンチレータ (LS) を用いてニュートリノを検出する装置である。KamLAND は岐阜県神岡町の池ノ山の地中に設置されているため、岩盤によって宇宙線からのミュオンが遮蔽され、極低バックグラウンド環境下で検出を行える。

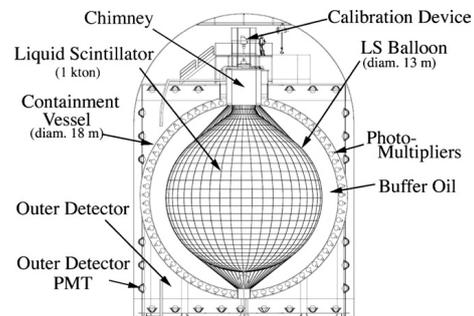
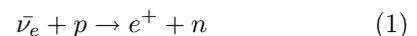


図 1: KamLAND

検出器は図 1 のようになっている。直径 13m のバルーンの中に LS (デカン:80%、プソイドクメン:20%、PPO: $1.36 \pm 0.03 \text{ gl}^{-1}$) が入っており、反電子ニュートリノが LS 中の陽子と逆ベータ反応を起こす様子を PMT で検出する。



この反応はディレイドコインシデンス (DC) イベントのペアを作るため、それを利用する事でバックグラウンド (BG) イベントとの識別が可能になっている。

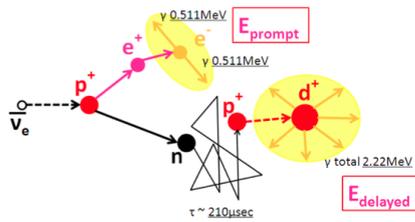


図 2: DC イベント

DC イベントは e^+ がエネルギーを落とす先発イベントと、陽子による中性子捕獲による 2.2MeV の γ 線生成という後発イベントの 2 種類あり、先発イベントによって検出されるエネルギーは $\bar{\nu}_e$ の持っていたエネルギーと、 $E_{\bar{\nu}_e} \simeq E_p + \bar{E}_n + 0.8\text{ MeV}$ という式で関係している。 $E_p (\equiv T_{e^+} + 2m_e)$ は e^+ の運動エネルギーと対消滅のエネルギーで、 \bar{E}_n は中性子反跳のエネルギーである。これらの先発と後発イベントの位置、発生時間により BG との識別を行える。KamLAND の位置分解能は $\sim 12\text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$ で、エネルギー分解能は $6.4\%/ \sqrt{E(\text{MeV})}$ である。また、2011 年 9 月からは KamLAND-Zen という実験が行われており、上記のバルーン内に直径 3.08m のミニバルーンを入れて、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索を行っている [1]。

3 ニュートリノ探索

3.1 解析手法

この解析では、継続時間や赤方偏移、フリューエンスを考えず、全ての GRB をトリガーとして使用する。また、大抵の GRB は遠くに位置するため個々の GRB からの熱的ニュートリノを検出できない。そのため、on-time、off-time window について KamLAND で検出したエネルギースペクトルの差を統計的に評価することにする。

それぞれの GRB のトリガー時間に対して、on-time window として $-100\text{ 秒} \sim +350\text{ 秒}$ をとり、その間に DC イベントあるかを調べる。この window の幅は、熱的ニュートリノの生成と GRB ジェットの間の時間差と、ニュートリノが質量を持つことによる相対論

的な遅れを考慮して決定した。long GRB が星野重力崩壊と仮定すると、星のコアで重力崩壊が起こり、中性子星が中心に生まれるとニュートリノが出始めて GRB ジェットが形成されると考えられるが、この段階ではまだ星の外層が残っている。そのためニュートリノはすぐに出て来ても、GRB ジェットが外層を抜けて観測可能になるまでに $O(10\text{ 秒})$ の時間がかかることから -100 秒 から window を取る [2]。そして、ニュートリノの最も重い質量固有状態を 0.087eV と仮定してニュートリノの遅延時間を計算すると、赤方偏移が $z=10$ だとしても 285 秒 以内になるため、 $+350\text{ 秒}$ まで window を開くことにした。

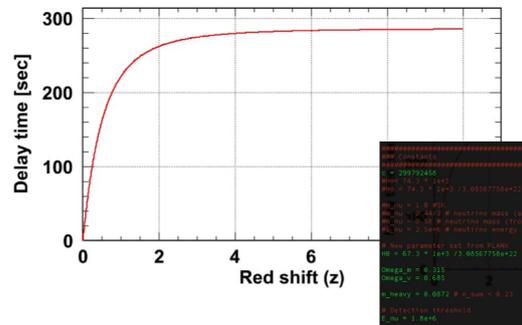


図 3: ニュートリノ遅延

また、純粋な BG イベントのスペクトルを見積もるために、GRB のトリガー時間に対して $+1,000\text{ 秒} \sim +10,000\text{ 秒}$ を off-time window として用いる。

3.2 GRB データ

GRB トリガー時間のデータは、Gamma-Ray burst Coordinates Network(GCN) のものを使用している。それらのトリガーは主に SWIFT や Fermi などの衛星から得られる。GCN によると KamLAND が動いている期間におよそ $6,000$ 個の GRB が見つかっており、その内赤方偏移がわかっているものは long GRB が 226 個、short GRB が 13 個ある。

3.3 フリューエンスの上限值

実データを使う場合には上記のような on-off でのエネルギースペクトルの違いを確認する事から始め

るが、この発表では実際のデータを使う前段階として、on-time と off-time でエネルギースペクトルに有為な差がないと仮定したシミュレーションの結果を発表する。有為な差がないとするとニュートリノフリューエンスの上限値を計算することができ、今回は 2.5MeV のビン幅で各ビン毎のフリューエンスを以下の式を用いて計算する。

$$F_i = \frac{N_i^{FC90}}{\sum_j N_{GRB}^j N_T^j \epsilon^j \sigma(E_{\nu_e}^i)} \quad (2)$$

ここで、 N_i^{FC90} は Feldman-Cousins による 90% C.L. 上限値 [3]、 N_{GRB}^j は GRB の数、 N_T^j はターゲットの数 (LS 中の陽子数)、 ϵ^j はエフィシエンシー、 σ は $\bar{\nu}_e$ の反応断面積である。また、 i はビン番号、 j は実験の期間を表しており、 $j=1$ は KamLAND 実験の期間、 $j=2$ は KamLAND-Zen 実験の期間である。期間によって分けているのは、KamLAND-Zen 実験でミニバルーンを入れたことで DC イベントのセレクションが変化するためである。

3.4 計算結果

off-time のイベント数を KamLAND の過去の論文 [4] から見積もり、on のイベント数=off のイベント数として $E_p: 7.5\sim 30\text{MeV}$ でフリューエンスを計算すると、以下ようになった。

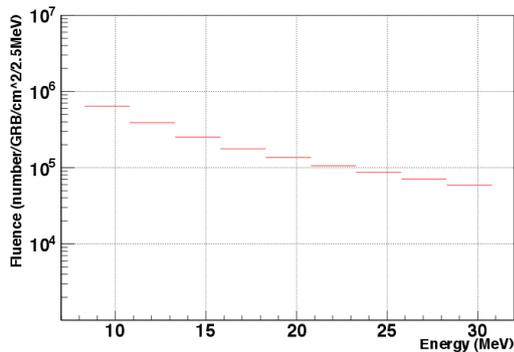


図 4: ニュートリノフリューエンスの上限値

4 今後の展望

今回はニュートリノフリューエンスの予想される上限値を計算した。実際の解析では、on-off で有為か否かの統計的なテストをしてからさらに解析を進めていくことになる。今回のシミュレーションのように有為な差がなかったとすると、同様にしてビン毎のフリューエンス上限値が計算できる。さらにその先の構想として、フリューエンスの上限値と赤方編移のわかっている GRB を用いることでニュートリノの温度とニュートリノルミノシティについての制限をつけたいと考えている。

Reference

- [1] Gando, A., et al. 2012, Phys. Rev. C, 85, 045504
- [2] Sekiguchi, Y., & Suwa, Y. 2012, private communication
- [3] Feldman, G., & Cousins, R. D. 1998, Phys. Rev. D, 57, 3873
- [4] Gando, A., et al. 2011, The Astrophysical Journal, 745, 193
- Abadie, J., et al. 2012, The Astrophysical Journal, 760, 12