

※OSはWindowsを使用して下さい
 ※薄く色のついている部分に入力して下さい 入力後は、一旦PDFとして保存しEメールに添付して送信して下さい

【注意】右上の「フォームを送信」は使用しないで下さい

基礎科学

審査区分 ※ 1 5 0 2 0


受付番号 ※ 1 9 0 5 0 5

※平成31(2019)年度の科研費審査区分表の小区分名(5ケタ数字)を必ず記入して下さい

※メールにて受付番号を受領後記入して下さい

2019年度 基礎科学研究助成申請書

公益財団法人 住友財団 御中

申請者 伊藤 博士 

住友財団の基礎科学研究助成を下記のとおり申請いたします。
記

○ 研究テーマ (40字以内でご記入下さい)

水チェレンコフ実験における太陽由来の反電子ニュートリノ探索

○ 申請者

フリガナ	イトウ	ヒロシ	学位	博士(理学)
氏名	伊藤	博士	職位	特任研究員
			生年月日	西暦 1990年 09月 02日生 (29歳)
現住所	〒939-2252 富山市上大久保531クワット201 Tel:080-1225-9564			
所属機関	名称	東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設		
	所在	〒506-1205 E-mail:itoh@km.icrr.u-tokyo.ac.jp 岐阜県飛騨市神岡町東茂住456 Tel:0578-85-9712 Fax:0578-85-9640		
(注)所属機関の名称は、機関名のみでなく学部名、大学院研究科名、部門名などまで詳細にご記入下さい (注)選考結果は各申請者宛に通知します 異動した場合は新所属と受付番号をEメール等でご連絡下さい				
不在時の 連絡先 (連絡担当者)	氏名	清水昭彦		
	所属機関	東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設		
	住所	〒506-1205 E-mail:shimizu@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp 岐阜県飛騨市神岡町東茂住456 Tel:0578-85-9630 Fax:0578-85-9640		

○ 申請金額(万円未満切り捨て) 当該研究費総額 380 万円の内 1 1 5 万円


○ 研究形態 (いずれかの□をクリック) 1. 共同研究 (申請者の他 1名) 2. 個人研究

○ 申請者所属機関承諾書 個々の所属機関からの応募者数に上限はありません
 (注)本欄だけは、画面からの電子入力不要です 一無記入のまま財団宛のEメールに添付送信して下さい

当機関に所属する上記申請者が住友財団の助成を申請することを承諾します。

所 在 千葉県柏市柏の葉5-1-5

機 関 名 東京大学宇宙線研究所

職名・氏名 所長 梶田 隆 章  (職印又は私印)

2019年 5月 31日

所属機関の長(大学の場合は学科長・学部長・病院長等)の承諾を得て下さい

申請者名 伊藤 博士

受付番号*

1 9 0 5 0 5

※メールにて受付番号を受領後記入して下さい

申請者の略歴 (大学、研究機関に所属していない場合は研究歴を記入して下さい)

最終学歴	千葉大学大学院 理学研究科 博士後期課程 学位取得		
履歴事項 (最終学歴以降)	2017年10月1日～2019年3月31日	神戸大学大学院 理学研究科 学術研究員	
	2019年 4月1日～現在	東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設 特任研究員	

共同研究者

氏名	生年月(西暦)	所属	職位	最終学歴
中野佑樹	1988年6月12日	神戸大学	特命助教	東京大学大学院 修了 (理学博士)

申請者の主な業績 (発表論文、表彰、著作など)

発表論文は、申請研究テーマに関係のあるもので、申請者(代表)及び共同研究者が最近5年間に発表したものの中から5件を限度として、最近のものから順に発表年次を過去に遡って記入して下さい。著者名が多数にわたる場合は、主な著者を数名記入し以下を省略しても可(申請者が発表した論文で他の著者を省略する場合、著者の総数と申請者が掲載されている順番を記入。例…総数10名で3番目の場合→3/10)。

- [1]. **Hiroshi Ito** (1/20), et al., "Performance check of the *CsI(Tl)* calorimeter for the J-PARC E36 experiment by observing e^+ from muon decay", Nucl. Inst. Meth. A 901 (2018) 1-5.
- [2]. Y. Nakano and Y. Takeuchi, "Development of the database for low-background studies in kamioka", AIP Conference Proceedings 1921, 040002 (2018).
- [3]. K. Abe, **Y. Nakano** (93/169), et al., The Super-Kamiokande Collaboration, "Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande-IV", Phys. Rev. D 94, 052010 (2016).
- [4]. H. Zhang, **Y. Nakano** (10/120), et al., The Super-Kamiokande Collaboration, "Supernova Relic Neutrino search with neutron tagging at Super-Kamiokande-IV", Astroparticle Physics 60 (2015) 41-46.

研究の目的 (この研究に至った経緯、位置づけ、内外の他の研究との対比を含めて記入して下さい)

【研究に至った経緯】

電子ニュートリノ (ν_e) が反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) へ振動するモード ($\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動) は、素粒子標準模型において Lorentz 不変性を破り、新物理の発見に繋がる [1]。太陽内では ν_e が核融合によって生成される一方、 $\bar{\nu}_e$ は生成されないと考えられている。従って、太陽由来の $\bar{\nu}_e$ 観測は $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動の存在を強く支持する。今日の太陽ニュートリノ観測は、標的中で ν_e と弾性散乱で反跳した e^- の方向と太陽との角度分布から裏付けられている。しかし、 $\bar{\nu}_e$ も同様に電子と弾性散乱するため、既存の検出方法では ν_e と $\bar{\nu}_e$ を区別することが難しい。近年、 $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ において、放出された中性子が陽子に捕獲され平均 256 μsec 遅れて 2.2 MeV の γ を放射する現象を利用した $\bar{\nu}_e$ 識別の手法が確立されてきた [2]。さらに、 $\bar{\nu}_e$ 事象の検出効率を改善するために、中性子の吸収断面積が高いガドリニウム (以下 Gd) を用いた水チェレンコフ検出器開発、そして有効体積 190 kton もの超巨大水チェレンコフ検出器開発が進められている。

【位置づけ】

本研究は 50 kton の水チェレンコフ実験における中性子捕獲事象を要求して太陽由来の $\bar{\nu}_e$ を探索する。さらに、現在神岡グループで進められている濃度 0.2% の $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ 水溶液を用いた水チェレンコフ検出器で、 $\bar{\nu}_e$ 識別効率が約 90% へ改善されると予想され、従来の検出器と比べて、太陽由来の $\bar{\nu}_e$ の感度が 5 倍以上改善される。また、太陽由来の $\bar{\nu}_e$ は超新星背景ニュートリノ探索において雑音事象となり得るため、本研究はニュートリノ天文学の分野において重要な調査となる。

【内外の他の研究との対比】右の表に他グループによる太陽 $\bar{\nu}_e$ の探索結果を示す。2012 年、KamLAND は最高感度で太陽 $\bar{\nu}_e$ の流量上限を決定した [6]。SK-IV は中性子捕獲事象を選択したことで [2]、 $\bar{\nu}_e$ 流量感度は数百 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下まで達した (図 1)。SK-IV は 2018 年までデータ取得しており、解析できる統計量が増えるため、流量感度 $\sim 10 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の領域で太陽 $\bar{\nu}_e$ の探索ができる。

Exp. Group	$E_{\bar{\nu}_e}$ (MeV)	Total flux of Solar $\bar{\nu}_e$ ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
Super Kamiokande-I [3]	10-17	$< 4.04 \times 10^4$ (90%CL)
SNO [4]	4-14.8	$< 3.4 \times 10^4$ (90%CL)
Borexino [5]	> 7.3 > 1.8	< 990 (90%CL) < 760 (90%CL)
KamLAND [6]	> 8.3	< 93 (90%CL) $(5.3 \times 10^{-5} \phi(8B))$
SK-IV (~2012) [2]	13.3-30.3	(Paper said for only SRN.)

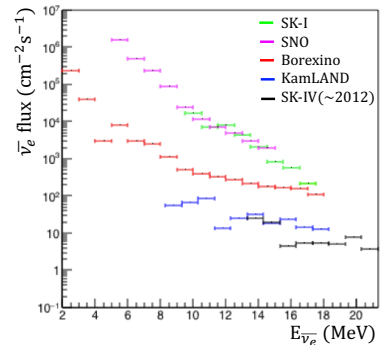


図 1. Model independent 90%CL $\bar{\nu}_e$ flux upper limit.

【参考文献】 [1] Phys. Rev. D80 076007 (2009). [2] Astropart. Phys. 60 (2015) 41. [3] Phys. Rev Lett. 90 171302 (2003). [4] Phys. Rev. D70 093014 (2004). [5] Phys. Lett. B 696 (2011) 191. [6] Astrophys. J. 745 (2012) 193.

この研究の特色 (独創性に関する説明等)

基本的に太陽で $\bar{\nu}_e$ は発生しないと考えられている。太陽内部では強い磁場によって、磁気モーメントが極端に小さい ν_e が歳差振動で $\bar{\nu}_\mu$ に変わり、地球へ到達するまでに通常の振動で $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ に変わる過程を経て $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動するモデルが予言された [7]。 $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動の確率は以下で計算される。

$$P(\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1.8 \times 10^{-10} \sin^2 2\theta_{12} \left[\frac{\mu}{10^{-12} \mu_B} \frac{B}{10 \text{ kG}} \right]^2 \quad (1)$$

ここで、 μ は $\bar{\nu}_e$ の磁気モーメント、 μ_B は Bohr 磁子、 B は太陽内部磁場、 $\sin^2 \theta_{12} \sim 0.307$ [8] である。

中性子捕獲事象 ($\bar{\nu}_e$ 事象) は遅延発生した γ を要求することで選択される。この $\bar{\nu}_e$ 事象において、背景雑音である大気 $\bar{\nu}_e$ [9]、核破砕による ^9Li 事象 [10]、原子炉 $\bar{\nu}_e$ 、偶発雑音を見積もる。太陽 $\bar{\nu}_e$ が検出器で観測されたときの信号スペクトラムをシミュレータで計算し、データに適用することで太陽 $\bar{\nu}_e$ を探索する。有意な信号が見つからなければ、世界で最も厳しい上限値を決定する。

低エネルギー領域の $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ 事象において、 e^+ は $\bar{\nu}_e$ の方向と反対方向に放射しやすい傾向を持つ。中性子は水中の陽子もしくは Gd に捕獲されて、遅れて γ が発生する。アクシデンタルな雑音信号の中から後発 γ を識別するために、これらをモンテカルロシミュレーションに実装し、 $\bar{\nu}_e$ 事象を効率よく選択し、 $\bar{\nu}_e$ 方向の依存性を調べる。本研究が完成すると、 $\bar{\nu}_e$ 方向決定で太陽由来の事象における雑音を強く制限できる。

【参考文献】 [7] Phys. Lett. B 553 (2018) 7. [8] Phys. Rev. D94 052010 (2016). [9] Phys. Rev. D94 052001 (2016). [10] Phys. Rev. D93 012004 (2016).

研究計画の概要

本研究では、Super Kamiokande(SK)実験のデータを用いて太陽由来の $\bar{\nu}_e$ を探索する。さらに、 $Gd_2(SO_4)_3$ 水溶液を溶かした水チェレンコフ検出器や有効体積190ktonの検出器における感度を見積もり、太陽由来の $\bar{\nu}_e$ の感度、そして超新星背景ニュートリノ(SRN)への事象染込みを評価する。以下に研究計画の詳細を示す。

【**計算機とシミュレーター**】データ解析、擬似信号生成、情報共有のための計算機サーバーを立ち上げる。本計算機は代表者が管理し、分担者もリモートアクセス利用できるように設定する。解析結果の情報(太陽由来の $\bar{\nu}_e$ 、原子炉 $\bar{\nu}_e$ 、大気 $\bar{\nu}_e$ 、 9Li による誤認識信号のシミュレータなど)をデータベース上にまとめて、次世代実験のために同業者(特に若手研究者)と共有する。申請者らは放射能データベースを開発し運営してきた経験[11]を本研究でも活かす。

【**検出器ジオメトリ**】検出器は直径40m, 高さ40m, 50 ktonの水槽を要するSKのジオメトリを参考にする。PMTのdark rateや信号の応答性を継承する。検出器サイズの拡張性を実装し、次世代実験の感度見積りに応用する。

【**熱中性子の擬似データ**】水中の熱中性子の振る舞いを計算し、中性子捕獲 $np \rightarrow d \gamma$ (2.2 MeV)と $n \text{ } ^X\text{Gd} \rightarrow \text{}^{X+1}\text{Gd} \gamma\text{'s}$ (~total 8 MeV) 反応過程を実装する(図2)。 $np \rightarrow d \gamma$ 過程では256 μs の寿命で1本 γ が放出するのに対して、 $n \text{ } ^X\text{Gd} \rightarrow \text{}^{X+1}\text{Gd} \gamma\text{'s}$ は約30 μs の寿命で複数 γ が放出する。

【 **$\bar{\nu}_e$ 擬似データ**】太陽 $\bar{\nu}_e$ の流量は $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動にエネルギー依存性がないと考えると、太陽 ν_e の形状と相似であると考えられる。擬似データ生成として、まず反応断面積は $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ 過程を実装する(図3)。この過程はベータ崩壊の時間反転(IBD: Inverse beta decay)と等しく断面積はよく調べられている[12]。この二つを入力として、検出器の構造に依存した応答擬似信号を生成する。同様に背景雑音事象である原子炉 $\bar{\nu}_e$ 、大気 $\bar{\nu}_e$ 、 9Li 事象、予言された超新星背景 $\bar{\nu}_e$ も再現し実験データと比較する。

【**解析と予想される貢献**】SKデータにおいて核破砕反応カット、有効体積カット、 μ -like cut、中性子捕獲事象の要請などの事象選択を施す。これで得られた $\bar{\nu}_e$ 事象候補について、予想される背景雑音事象を見積もり、残された事象から太陽由来の $\bar{\nu}_e$ 流量を決定する。予想された背景雑音より統計的優位に $\bar{\nu}_e$ 事象が存在している場合、事象頻度の季節変動の有無を調査する。この信号が全て太陽由来であれば、太陽と地球の距離が1年を通して変わり、この季節変動は太陽 $\bar{\nu}_e$ の強い証拠になる。SRNは太陽 $\bar{\nu}_e$ における雑音事象となるが、事象頻度が一定であると仮定すると季節変動は起きない。一方、統計的優位な事象が観測されなかったとしても、22.5 kton \cdot 10 yrのexposureのSK-IVでは太陽 $\bar{\nu}_e$ 流量の上限更新が期待できる。式(1)でも示すように、太陽 $\bar{\nu}_e$ 流量が決定された場合、 $\bar{\nu}_e$ の磁気モーメントの上限値 $2.9 \times 10^{-11} \mu_B$ [13]から太陽内部の磁場強度の下限値も言及できる。

【**次世代実験の感度見積もり**】得られた結果を用いて $Gd_2(SO_4)_3$ を含んだ水チェレンコフ光検出器のために、Gdによる中性子捕獲へ擬似信号を切り替える。エネルギー閾値を3~4 MeVへ引き下げて太陽 $\bar{\nu}_e$ 感度を見積もる。そして、有効体積190 ktonの水チェレンコフ光検出器における太陽 $\bar{\nu}_e$ の感度も見積もる。今度は、これら検出器において、SRNに入り込む太陽 $\bar{\nu}_e$ を評価する。

【**参考文献**】 [11] AIP Conf. Proc. 1921, 040002 (2018). [12] Phys. Lett. B 564 (2003)42. [13] Advan. High Ene. Phys. 350150 (2012).

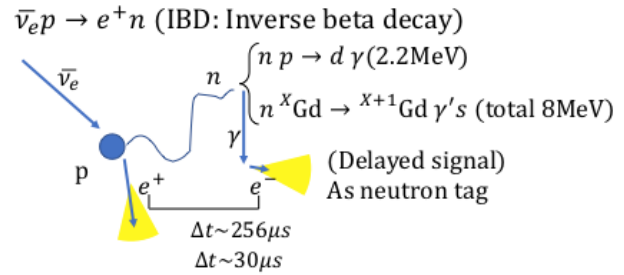


図2. $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ における相互作用過程。

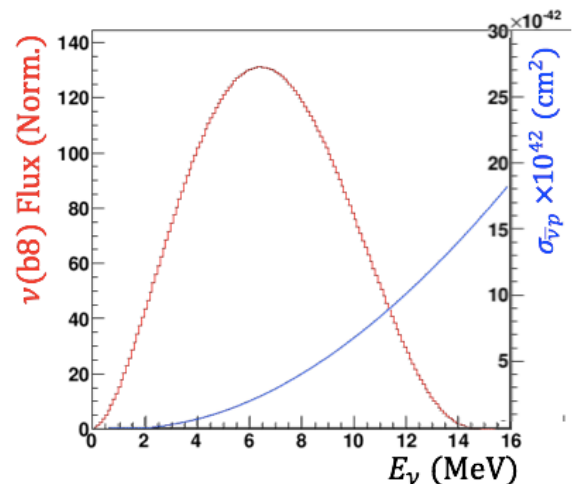


図3. $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ における反応断面積(青)と太陽由来 8B ニュートリノの流量(赤)。

申請者名 伊藤博士

受付番号*	1	9	0	5	0	5
-------	---	---	---	---	---	---

※メールにて受付番号を受領後記入して下さい

助成申請金額の費目別内訳

(金額単位：万円)

費目	金額	内訳・算出根拠等
旅費(国内旅行)	30 20	研究打ち合わせに伴う片道100km超の出張旅費 研究会に伴う片道100km超の出張旅費
機械器具備品費	50	解析専用の高性能デスクトップPC: CPU & CPUクーラ, GPU, メモリ、記憶磁気装置(HDD/SSD)、マザーボード、キーボード、マウス、電源、BDドライブ
消耗品	5	電子部品: HDDソケット、ネジ、クーラーファン、配線ケーブル
その他	5 5	論文投稿オープンアクセスのための費用 論文英文校正費用
合計	115	← P 1 の申請金額に一致 (万円未満は切り捨てて申請金額として下さい)

注：記入に際しては、研究助成金費目一覧表を参照下さい。数年間に亘る研究の場合にも、助成期間（原則「2019年11月～2020年10月」）に必要な金額を記入して下さい。

当該研究全体の資金計画

(金額単位：万円)

内訳	金額	調達先
当該研究費 ① (=②+③) (P 1 の当該研究費総額に一致)	380	
既に調達が確定している額 ②	0	
調達を予定している額 ③	115	住友財団からの助成 (P 1 の申請金額に一致)
	165 100	住友電工財団 島津科学財団

注1：①=②+③ となります。

注2：②、③には、校費、科学研究費補助金、他財団からの助成金等を全て記入して下さい。

同一又は類似テーマでの他の機関への助成金申請

(金額単位：万円)

助成金等の名称	代表研究者名	研究テーマ	金額	助成、内定、申請中、申請予定、等を記入

テーマにかかわらず受給が確定している（内定を含む）1,000万円以上の助成金（金額単位：万円）

助成金等の名称	機関名	金額	テーマ（研究課題等）