

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13560

研究課題名（和文）超高精度での反電子ニュートリノ観測を可能にする有機液体TPCの開発

研究課題名（英文）Development of an organic liquid TPC for precise measurement of electron antineutrinos

研究代表者

中島 康博（Nakajima, Yasuhiro）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：80792704

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：反電子ニュートリノの超高精度測定のための有機液体を媒質とするTime Projection Chamber (TPC)の開発を目指し、媒質の候補の一つである2,2,4-トリメチルペンタンについて、その電離電子検出性能と発光特性を、本研究で製作した装置を用いて評価した。電離電子検出性能については、信号をDC電流として観測することに成功した。パルス信号については有意な信号は確認できなかったが、より改善した測定のためのノイズ除去の指針や温度・圧力の制御の必要性などの知見を得ることが出来た。発光性能については、チェレンコフ発光は期待通り測定出来たが、シンチレーション発光は殆ど存在しないことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、既存の大型ニュートリノ検出器の性能を大きく上回る、有機液体を媒質として用いた新型ニュートリノ検出器の開発を目指している。完成すれば、過去の超新星爆発により生成されたニュートリノの観測による宇宙の元素合成の歴史の解明、原子炉ニュートリノの高精度観測など様々な応用が見込まれる。本研究では、その原理検証のために、候補となる有機液体の基礎特性の評価を行なった。これは、今後この原理を用いた検出器を開発する上での基礎となるものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research was to develop a Time Projection Chamber (TPC) with organic liquid as the detector medium. We evaluated ionization electron yield and light emitting property for one of the candidate liquids, 2,2,4-trimethylpentane, using the devices that we built for this research project. We succeeded to detect ionization electrons by measuring DC current induced to the electrode. Although we were not able to detect significant pulse signal, we identified necessary improvements to the system, such as noise reduction and temperature pressure control. About light emission property, we successfully observed Cherenkov light emission from this medium, while no significant signal of scintillation light emission was detected.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ニュートリノ TPC 有機液体

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発は宇宙の元素合成の重要なプロセスの一つであるが、そのエネルギーの 99%以上はニュートリノによって放出される。中でも、超新星背景ニュートリノと呼ばれる、過去の超新星爆発によって生成され現在の宇宙に蓄積していると考えられるニュートリノは、宇宙の進化の歴史を紐解く上で重要な手がかりとなる期待されている。その初観測を目指し、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウム(Gd)を溶解させる SK-Gd 計画等が進行している。一方で、期待される信号の数は年間数事象と極めて少なく、超新星ニュートリノ事象と背景事象をいかに弁別できるかが観測の鍵となる。そこで、本研究では、進行している SK-Gd 計画よりもさらに背景事象弁別精度を高め、より高精度で超新星背景ニュートリノ等を観測可能な測定器として、有機液体を媒質として用いた Time Projection Chamber (TPC)の開発を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超高精度での反ニュートリノ反応測定を可能にする、有機液体を媒質とした、Time Projection Chamber (TPC)を開発することである。コンセプトを図 1 に示す。有機液体をニュートリノ反応のアクティブな標的として用い、これに静電場をかけ、検出器内で電離された電子をドリフトさせ TPC として用いる。さらに、ドリフト領域の終端に高い電場領域を設け、ここで液相から気相への電離電子の抽出および気相部分での比例増幅を行う。この比例増幅過程で発生した光を、光検出器で測定する。

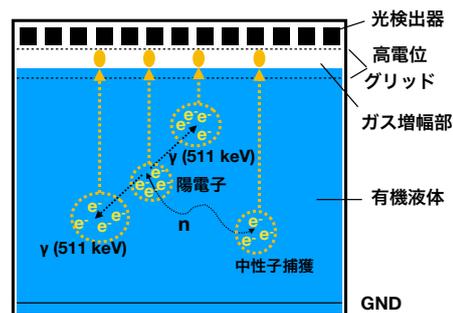


図 1: 有機液体 TPC のコンセプト

媒質として有機液体を用いる主な理由は、以下の 3 点である。

- 水素原子を含んでおり、逆ベータ崩壊反応を起こすのに必要な、原子核に束縛されていない陽子が豊富に存在する
- 無極性分子からなる有機物を選ぶことにより、電離電子を効率よくドリフトさせられる
- 可視光領域で発光する有機物を用いることにより、液体シンチレーターとしての性質も併せ持つことができること

これにより、(1)陽電子の媒質中でのエネルギー損失、(2)陽電子と電子の対消滅により生じた 2 本の 511keV γ 線、そして(3)中性子捕獲事象を、それぞれ空間的に分離し測定する。これらの事象は数十 cm 程度以下しか離れておらず、SK の位置分解能では効率的に分離することが不可能である。これに対し、有機液体 TPC では、

- 陽電子と(2)511keV γ 線の独立測定により、陽電子のより強力な同定
- 中性子がニュートリノの方向に放出されやすいという性質を利用し、(1)陽電子と(3)中性子捕獲位置の差から、ニュートリノの方向のイベント毎の再構成
- (1)陽電子と(3)中性子捕獲位置の差から、ニュートリノの方向のイベント毎の再構成

を可能にする。さらに常温での運用が可能であり、これも液体 Xe や液体 Ar を用いた TPC が低温容器を要求するのに対し、大きな利点である。

さらに、電離電子を液相から気相に抽出し比例増幅を行うことで、電離電子数を精密に測定し、既存の測定器を大きく上回る高分解能でのニュートリノエネルギーの測定を可能にする。ガス増幅部分において、気化した有機液体のみでは十分な発光量が得られない場合にはキセノン(Xe)などの希ガスを封入し、増幅および発光性能の向上を検討する。

これまでのところ、有機液体イオンチェンバーとして用いた検出器は存在するが、TPC として実現した例は無い。有機液体 TPC を実現するためには、媒質として使用するのに適した有機液体を開発することが現在最も重要なステップである。そこで、本研究では、候補となる有機液体について、発光量、電離電子数、液相から気相への抽出効率などの基礎特性を測定し、有機液体 TPC の原理検証を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 電離電子検出性能の測定

電離電子の検出性能を評価するため、図 2 に示すような小型イオンチェンバーを製作した。容器内に 4cm 径の平行平板電極を設置し、有機液体を満たした後、電極間に高電圧をかけた際に電極に誘起される電荷を測定できるシステムを構築した。また、接続したサブ容器との間で液体をやりとりすることにより、液面の高さを調整する機構も備えている。信号の測定方法としては、微小電流計を用いた DC 電流測定、および前置電荷増幅器とオシロスコープを用いた波形測定を行なった。

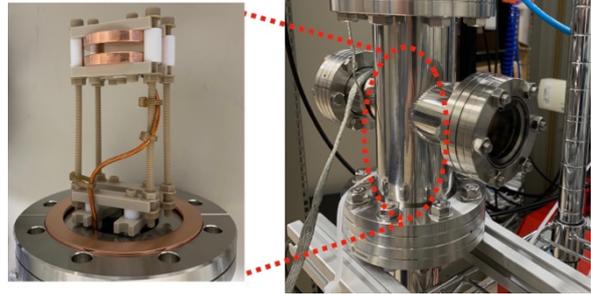
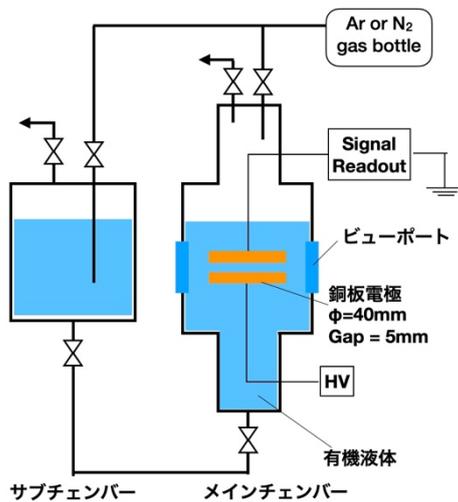


図 2: (左) イオンチェンバーの模式図。(右) 製作したイオンチェンバーの写真。

(2) 発光性能の測定

発光性能を評価するため、図 3 に示すように宇宙線が通過した際の発光を測定できるシステムを構築した。媒質を封入した容器は一辺 70mm の立方体であり、側面に取り付けた 1 インチ光電子増倍管 (PMT) で媒質からの発光を測定する。チェレンコフ光とシンチレーション光を区別するため、三方向に PMT を設置し、それぞれ独立に検出光電子数を評価した。チェレンコフ光測定のコントロールサンプルとして、純水を用いた測定も行なった。

4. 研究成果

本研究では、電離電子のドリフト性能が知られており、また比較的安価に入手可能な 2, 2, 4-トリメチルペンタンを有機液体の候補として、以下に挙げる電離電子の信号測定 (DC 及びパルス)、発光性能の測定を行なった。

(1) 電離電子の測定 (DC 電流)

図 2 のイオンチェンバーを 2, 2, 4-トリメチルペンタンで満たし、電極間に誘起される電流を微小電流計 (Keythley 6485 picoammeter) で測定した。密封放射線源の ^{22}Na をチェンバー付近に設置した場合とチェンバーから離れた場合を比較することで、 ^{22}Na からの γ 線が電極間で反応することによる信号の大きさを評価した。図 4 に示すように線源の有無により誘起される電流量がはっきりと変化し、また、1000 V/cm から 4000 V/cm の範囲で安定した 0.8pA 程度の出力を得ることに成功した。この測定した電流値は、線源の強度と文献値から知られている 2, 2, 4-トリメチルペンタンの電離電子量から期待される値とコンシステントであり、これにより本研究で製作したイオンチェンバーが、期待通り有機液体からの電離電子を測定できていることを確認した。

(2) 電離電子の測定 (パルス電荷)

電離電子によるパルス信号を測定するため、電極間を通過する宇宙線による信号測定を試みた。宇宙線はチェンバーの上下に設置したプラスチックシンチレーターを用いたカウンターを用いて同定し、宇宙線が通過したタイミングで電極に誘起される信号を前置電荷増幅器で増幅し、オシロスコープでその波形を取得した。しかし、本研究で行なった測定では、期待される信号の振幅が約 1 mV であるのに対し、ノイズをそれと同等以下まで削減することが出来ず、有意なパルス信号を観測することは出来なかった。一方で、主要なノイズ源は高圧電源であることも確認し、これを削減するには、ノイズフィルター等で電源由来のノイズを低減することに加え、チェンバーの構造体に変更を加え、その絶縁を向上させることが必要であることも明らかにな

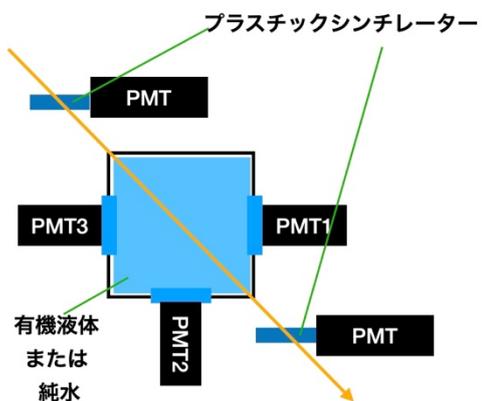


図 3: 発光量測定セットアップ

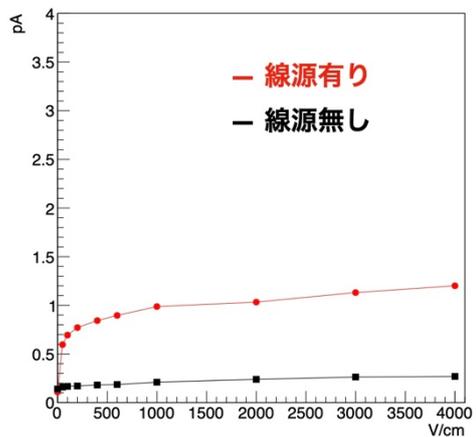


図 4: イオンチェンバーでの DC 電流の測定結果。放射線源として ^{22}Na を使用。

った。

さらに、液相から気相への電子抽出および気相でのガス増幅過程の測定を目指し、液面を電極の中間の高さに設定し、上記と同様の宇宙線を用いた測定を行なった。気相には、約1気圧の純アルゴンガスを追加で封入した。しかし、こちらの測定でも有意な信号は観測出来なかった。原因としてはアルゴンガスの影響により十分なガス利得が得られなかったこと、不純物の影響等が考えられるが、本研究の範囲内では特定に至っていない。原因となる個々の要素を検証し、安定した測定を実現するには、温度や圧力の制御・モニター機構や不純物の除去・モニター機構が必要であることを確認し、この点においても将来の研究における技術開発要素の指針を得た。

(3) 発光測定

図3に示した装置で、純水及び2,2,4-トリメチルペンタンの宇宙線に対する発光性能を測定した。チェレンコフ光とシンチレーション発光の成分を区別するため、チェレンコフ光を直接見込む位置にPMTを2本(PMT1, PMT2)、直接見込まない位置にPMTを1本(PMT3)配置した。結果を表1に示す。

表1: 発光量測定の結果。表中の数字の単位は光電子数。誤差は統計誤差を表す。

媒質	PMT1	PMT2	PMT3
純水	12.7±3.6	9.8±3.1	3.1±1.8
2,2,4-トリメチルペンタン	24.8±5.0	21.1±4.6	6.3±2.5

PMT1 および PMT2 で測定された光量は、チェレンコフ光のみでの光量の予想と系統不確かさの範囲内で一致している。純水と2,2,4-トリメチルペンタンでの測定値に差が生じているが、宇宙線をタグするプラスチックシンチレーターと容器の相対位置のずれにより説明できる量であり、両者の差は有意では無い。一方で、PMT3 で測定された光量は PMT1 および PMT2 に比べ有意に少なく、このことから観測された発光の主要な成分はチェレンコフ光であり、シンチレーション光はほとんど存在しないことが分かった。

(4) まとめ

有機液体 TPC の媒質の候補である2,2,4-トリメチルペンタンについて、その電離電子検出性能と発光特性を、それぞれ測定装置を製作・運用して評価した。

電離電子検出性能については、信号をDC電流として観測することに成功した。パルス信号については有意な信号は確認できなかったが、一方で、より改善した測定のためのノイズ除去の指針や温度・圧力の制御の必要性などの知見を得ることが出来た。発光性能については、チェレンコフ発光は期待通り測定できたが、シンチレーション発光はほとんど存在しないことが分かった。

今後、有機液体 TPC の実現可能性を引き続き検討するためには、本研究で得られた知見をもとに、他の候補液体を含めより精密な評価を行なってゆくことが重要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中島 康博
2. 発表標題 高精度反ニュートリノ観測のための有機液体TPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 康博
2. 発表標題 高精度反ニュートリノ観測のための有機液体TPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 康博
2. 発表標題 高精度反ニュートリノ観測のための有機液体TPCの開発
3. 学会等名 マイクロバターンガス検出器 (MPGD) & アクティブ媒質TPC合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 康博
2. 発表標題 高精度反ニュートリノ観測のための有機液体TPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 康博
2. 発表標題 高精度反ニュートリノ観測のための有機液体TPCの開発
3. 学会等名 アクティブ媒質TPC座談会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 康博
2. 発表標題 高精度反ニュートリノ観測のための有機液体TPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	渡辺 英一朗 (Watanabe Eiichiro)	東京大学・大学院理学系研究科・大学院生 (12601)	
研究協力者	松田 寛也 (Matsuda Hiroya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------