

著者	おんだ なおと 恩田 直人
表題	水-ニュートリノ反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発

論文概要 (全体で4ページに収まるようにページを増やして構いません)

研究の背景

ニュートリノ振動は、素粒子物理学における標準理論を超えた現象の1つであり、この宇宙の物理への理解を深める上でこの現象を精密に測定することが重要である。宇宙における物質と反物質の非対称性は、物理学における長年の未解決問題の1つである。この問題を解決する有力な候補としてレプトンにおけるCP対称性の破れがあり、ニュートリノ振動実験で複素位相 δ_{CP} を測定することで検証される。

ハイパーカミオカンデ(HK)検出器は、岐阜県飛騨市神岡町の地下に建設中であり、2027年から稼働予定の次世代の大型水チェレンコフ検出器である。この検出器を用いたHK実験の1つに、茨城県東海村のJ-PARCで生成されるニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験がある。HK実験はCP対称性の破れを示す $\sin \delta_{CP} \neq 0$ の発見を物理目標の一つに掲げており、探索感度を最大限に高めるためには系統誤差の削減が重要となる。特にHK検出器と同じ水を標的としたニュートリノ反応の精密測定による削減が必要とされている。そのため、HK実験では現行の前置検出器に加えて新たな水標的の前置検出器の導入が検討されている。

水標的の前置検出器として水ベース液体シンチレータ(WbLS)を用いた飛跡検出器

(図1)の開発を行っている。WbLSは水に界面活性剤を用いて液体シンチレータ(LS)を溶かした液体である。水を含みながらシンチレーション光を観測できることから、水をニュートリノ標的としながら不感領域のほぼ存在しない検出器として利用可能である。WbLSは、反射材によって区切られた 1 cm^3 の立方体セルに封入されている。

荷電粒子の通過によってセル内で発生し

たシンチレーション光は、3方向から波長変換(WLS)ファイバにより読みだされ、その一端で半導体光検出器MPPCによって検出される。

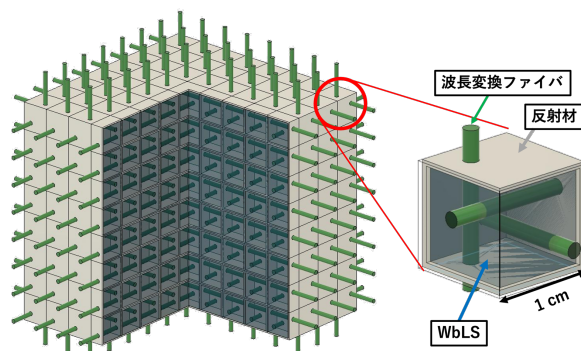


図1. 水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の概念図

水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発

① 試作機ビームテスト

4 × 4 × 5 = 80セルからなる小型試作機を作製し、陽電子ビームを用いた試験を行なった。WbLS を用いた検出器として荷電粒子の飛跡を初めて捉え、飛跡検出器として使用可能であることを示した(図2)。しかしながら、その検出光量は WLS ファイバ1本あたり最大 3.5 光子(p.e.)と低く、前置検出器として使用するには検出光量が十分ではないことが判明した。

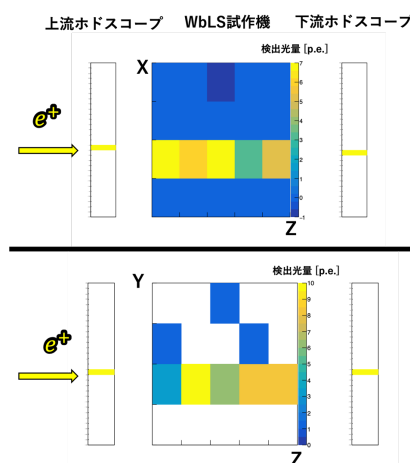


図 2. 試作機で捉えた陽電子の飛跡

そこで WbLS 検出器の各要素について、検出光量が向上する可能性があるか検討を行った。WbLS の発光量の増大と反射材の反射率上昇が検出光量の向上に大きく寄与することを試算し、本研究の WbLS 検出器開発における方針を決定した。

② 水ベース液体シンチレータの改良

WbLS の発光量を増大させるためには、LS の割合を大きくすることが必要である。しかしながら、WbLS では界面活性剤を用いて LS を溶かしていることから、LS の割合を大きくすると急激に水の割合が小さくなってしまう。水の割合を大きく保つことが水-ニュートリノ反応の精密測定には重要であり、効率よく液体シンチレータを溶かすことのできる界面活性剤の選定を WbLS の温度変化に着目して行った。その結果、今まで使用していた界面活性剤と同量で 1.5 倍程度 LS を溶かすことのできる可能な界面活性剤 IGEPAL CO-630 を発見した。

次に、発見した界面活性剤を用いて LS の割合の大きな WbLS を作製し、宇宙線を用いてその光量を測定した。この WbLS はビームテスト時の WbLS と比較して水の割合の低下を 3%に抑えながら、約 2 倍の LS の増量に成功しており、約 1.78 倍の検出光量を達成した(図3 N→L)。

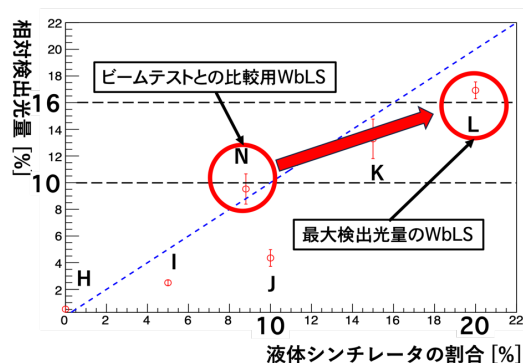


図 3. 光量測定の結果

③ 反射材の探索

反射材の反射率を高くすることにより、WLS ファイバまで到達するシンチレーション光の数を大きくすることが可能であり、検出光量の向上につながる(図4)。3種類の白色系樹脂を用いて 3D プリンタによって小型のセル状容器を作製し、宇宙線を用いて光量を測定した。測定の結果、検出光量が最大であった樹脂でもビームテストの反射材と同程度の検出光量であった。従って、本研究で探索した素材では検出光量の向上

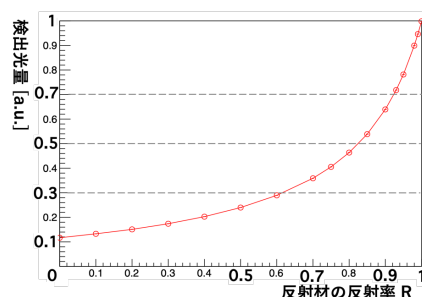


図 4. 検出光量と反射材の反射率の関係(シミュレーション)

につながらないことが分かった。また、Geant4 を用いたシミュレーションと比較を行い、検出光量が最大であった PA 樹脂の反射率は 85%程度であり、PTFE 製の反射シートの反射率である 93%まで向上させることにより、約 1.4 倍の検出光量増加が可能であることを見積もった。

水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の性能評価

最後に本研究によって開発した WbLS 飛跡検出器の前置検出器としての使用可能性について検討を行なった。水-ニュートリノ反応を精密測定するための検出器の求められる性能として、陽子と荷電パイ粒子の粒子識別能力を持っていることと飛跡に対する十分な検出効率を有していることが求められる。

粒子識別能力については、1つのセルでの検出光量を元に評価を行なった(図5)。本研究で達成したエネルギー・ファイバあたりの検出光量 4.7 p. e. /MeV では、波長変換ファイバによる光の減衰を考慮すると陽子を正しく識別する確率(検出率)96%以上、荷電パイ粒子を正しく識別する確率(排除率)92.5%以上で

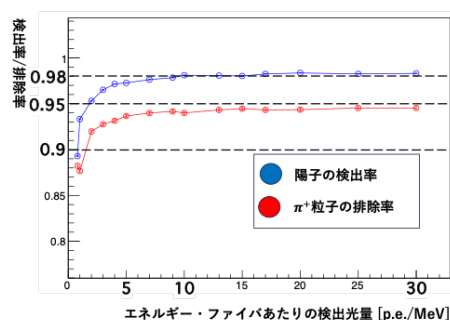


図 5.粒子識別能力

あった。粒子識別能力は既存を参考に決定した 30 p. e. /MeV と比較すると 1%以上小さいため十分ではなく、約 2 倍の検出光量向上が必要であることが分かった。

飛跡の検出効率については、最小電離粒子が通過した場合について計算し評価を行なった。本研究で達成した検出光量では、1ファイバでの検出効率は 89%であり十分な性能を有しているとはいえない。99%以上の検出効率を達成するためには、約 1.7 倍の検出光量増加が必要であることを計算した。

今後の展望

WbLS の改良により検出光量を約 1.78 倍向上させることに成功した。しかしながら、性能を評価したところ、更に 2 倍程度検出光量を向上させる必要があることが判明した。

1つ目の改善点として、反射材の改良がある。本研究において達成することはできなかったが、既存の反射材の反射率が 85%程度であることが判明したため、検出光量の向上量を見積もることができる。反射率 93%まで向上させることができれば検出光量は 1.4 倍増加し、目標に近づくことができる。

2つ目として WbLS の更なる改良がある。現在 WbLS 中の LS の割合は 20%であり、30%まで増加させることができれば 1.5 倍の検出光量増加が見込まれる。しかしながら、LS の増加は水の減少につながってしまう。WbLS 中の水の割合は水-ニュートリノ反応の測定の精度に直接関わってくるため、必要な水の割合を算出してから LS を増加させる研究を行う必要がある。

アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で4ページ以内に収まる範囲でページを増やして構いません。)

本論文において著者が最も力を入れた部分は、WbLS 中に LS を効率よく溶かすための界面活性剤の選定である。WbLS は、水中に界面活性剤がミセルを形成し LS を溶かしているミセル溶液であり、科学分野で分類すると化学の領域にある。これまで大学で物理を主に学んでいたため化学に馴染みがなく、本研究はまずミセルについて勉強するところから始まった。ミセルに関する化学分野の論文を読んでいる時に非イオン界面活性剤が形成するミセル溶液の温度特性があることを知り、本論文での界面活性剤を選別する手法として用いた。本手法の特徴として温度特性を同時に測定することで温度変化に対する耐性も確認することが挙げられる。実際の検出器の運転時には温度の日変化が起こるため、この手法による温度耐性の確認は重要になると考えられる。ミセル溶液の温度特性自体は既存の研究から知ったものであるが、本手法を WbLS の作製に使用した例は著者の知る限り存在せず、本研究独自のものである。