

ニュートリノ CP 対称性破れの発見に向けたエネルギー再構成精度向上のための水透過率位置依存性測定手法の開発

洪 子涵 (宇宙線研究所 神岡施設 森山研究室) hung@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

概要

本研究はニュートリノの CP 対称性の破れを発見することを目指し、日本国内の素粒子実験であるスーパーカミオカンデ・ハイパーカミオカンデでの研究を行う。具体的には、検出器内の水の透過率の位置依存性の測定法をスーパーカミオカンデにおいて確立する。光の発生源として Ni/Cf 線源を用い、検出器内の水の状態と線源の位置を変化させ取得したデータとシミュレーションによって、水の透過率の位置依存性を測定する手法を開発する。

目指す物理: ニュートリノの CP 対称性の破れ

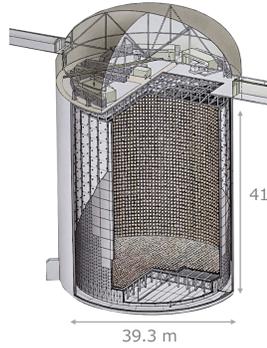
なぜ宇宙には物質が多く、反物質がほとんど存在しない?

クォークの混合に由来する CP 対称性の破れが存在するが、その大きさは観測される非対称性を生み出すには不十分

物質優勢を説明できる有力候補: レプトン系の CP 対称性の破れ

ニュートリノ振動を通じて、レプトン系における CP 対称性の破れを高精度に測定する

スーパーカミオカンデ実験 (SK)



5万トン水チェレンコフ検出器。中性子検出効率向上のため、2020年に Gd を導入、現在は 0.03% 含まれている。

- 現在の実験結果: T2K実験(far detectorとしてSKを使用)で $>1.9\sigma$ で CP 対称性の破れの兆候が見えている
- 目標: 統計量が向上する将来実験 HK で CP 対称性の破れの発見 ($>5\sigma$) を目指すため、系統誤差の低減が必要

→ HK で反応したニュートリノのエネルギーを 1% 以下*の精度で決定するのが必要

* $<1\%$ energy scale error + Non-linearity & particle dependence (beyond T2K)

研究目的 CP 対称性の破れの発見のためには、精密なエネルギースケールの理解が必要であるが、そのためには水中の光透過率の位置依存性をよく理解することが必要と考えられている。本研究の目的は、水チェレンコフ検出器におけるエネルギー再構成精度を向上させるため、水中光透過率の z 方向依存性を評価する手法を開発することである。

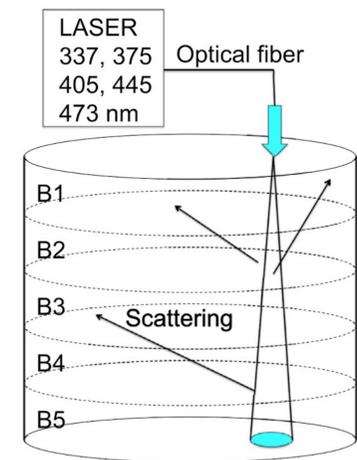
先行研究

① SK エネルギー測定精度: 2%

うち 0.5% が水透過率の位置依存性に起因する

② 既存の水透過率キャリブレーション

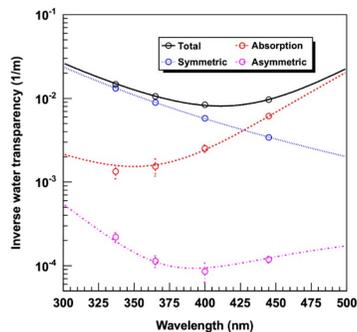
▼ コリメートレーザーを入射



• PMT hit 時間分布を Monte Carlo simulation (MC) と比較

• データと合うよう、MC の水パラメータを調整

• 入射波長に対応した吸収長を得る

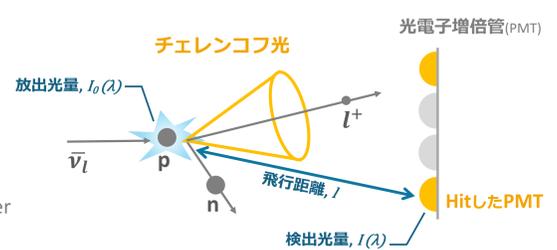


水中での光子伝搬

$$\text{検出光量 } I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{-L(\lambda)}$$

$$\text{減衰長 } L(\lambda) = \frac{1}{\alpha_{abs}(\lambda) + \alpha_{sym}(\lambda) + \alpha_{asy}(\lambda)}$$

吸収長 MC tuning parameter



SK の水モデル

• ニュートリノ振動観測運転期間(層流期)では、透過率はある高さ $z_{boundary}$ を境界に、そこから上は高さとともに低下する

• 水中の光透過率の時間変化は主に吸収によって引き起こされる

• 吸収長 $\alpha_{abs}(\lambda)$ に係数 $A(z, t)$ をかけて、水質の z および時間依存性を導入

$$A(z, t) = \begin{cases} 1 + z \cdot \beta(t) & z \geq z_{boundary} \text{ の場合} \\ 1 + z_{boundary} \cdot \beta(t) & z \leq z_{boundary} \text{ の場合} \end{cases} \quad \beta\text{モデル}$$

• $\beta(t)$ は水質上下非対称性を評価する変数 α_{tba} の関数

$$\beta = slope \cdot \alpha_{tba} + intercept$$

- slope と intercept は SK の各フェーズごとに決められている

本研究の特徴

従来の研究では実データをできるだけ再現できるように MC パラメータを調整していた。

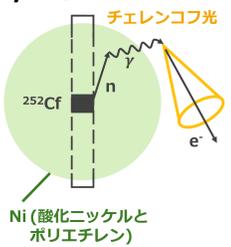
一方、本研究では水透過率を直接測定することを目指す。

研究手法

1. チェレンコフ光源として Ni/Cf 線源を用い、線源の高さを変化させて取得したデータを解析する。同一高さに配置された PMT のみを用いることで、チェレンコフ光が特定の水層を通過した際の検出光量変化を評価する

2. 層流期と対流期の比較を行うことで、PMT 個体差などの影響をキャンセルする

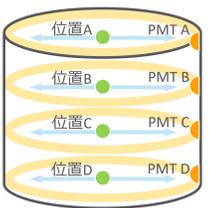
Ni/Cf 線源



放射線源 ^{252}Cf は自発核分裂し、その際に中性子を放出する。これらの中性子が Ni、H、Gd 原子核に捕獲されて γ 線を放出し、その γ 線が水中で対生成・光電効果・コンプトン散乱によって電子を生じる。生成された電子がチェレンコフ光を放射するため、Ni/Cf 線源は等方的なチェレンコフ光源として利用できる。

解析方法

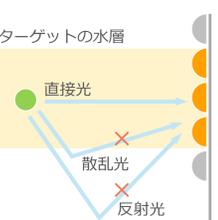
① 線源と同じ高さにある PMT を用いる



吸収長の高さ依存性を調べるために PMT を高さごとに分類し、Ni/Cf 線源の高さを変えたデータに対して、線源と同じ高さの PMT を解析に用いることで、特定の層を通過した光の Hit 数を抽出。

└ PMT が検出した光子数

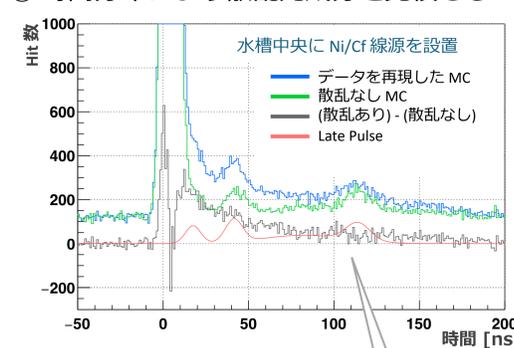
② 直接光による Hit を抽出する



線源から水平方向に伝播した直射光以外の信号、例えば反射光や散乱光など、他の経路から到来する光信号を除外することが重要。

Hit の時間分布を用いて、遅れて到達する反射・散乱光を除き、直射光のみを抽出。

③ 時間分布により散乱光成分を見積もる

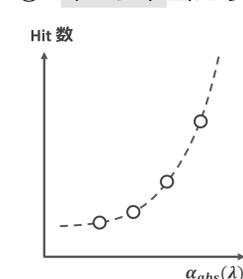


反射光はより遅い時間に到達するため、この時間範囲には含まれないと考える。30 ns 以降に見えるピークは、反跳電子による PMT の Late Pulse である。

データを再現した通常の MC とは別に、散乱光成分を除いた MC を作成し、両者の差から散乱成分を見積もる。

実データでは青成分しか得られないため、MC で求めた散乱成分を実データから差し引くことで、他経路からの光を除外できる。他条件を固定しつつ吸収長のみ異なる MC を複数作成し、データに最も適合する散乱光成分を決定。

④ 1 イベント当たりの Hit 数より吸収長を推定する



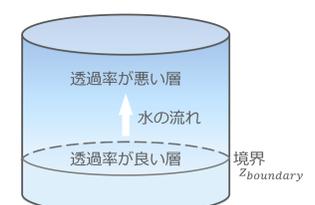
吸収長が短くなるほど Hit 数が減少する。複数の吸収長を設定した MC を作成し、それぞれの Hit 数を調べて依存関係(点線)を取得。この関係を用いることで、取得したデータを吸収長へ変換できるようになる。

水流状態

対流期



層流期 (ニュートリノ振動観測運転期間)



層流期では水が下から上へ流れ、吸収長は高さとともに減少し、高さの関数として β モデルで表現される。対流期は温水を下部から注入して水質が均一になる。両期間を比較することで、PMT 個体差などの影響をキャンセルできる。

結論と今後の展望

本研究は、MC を用いてスーパーカミオカンデの水透過率の高さ依存性を測定する手法の開発を目的としている。手法の要点は、特定層を通過した直接光の Hit 情報から高さ依存性を評価すること、そして PMT 個体差の影響を抑えるため、層流期と対流期の MC を比較する点にある。今後は、他条件を固定し吸収長のみを変えた複数の MC を作成して、最も適切な散乱成分を決定し、取得したデータを吸収長へ変換できるようにすることを目指す。