

Title	Development of a low-mass high-efficient charged particle detector for KL _s search (KL _s 探索のための低物質量、高検出効率の荷電粒子検出器の開発) (Abstract_要旨)
Author(s)	Naito, Daichi
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2016-05-23
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k19882
Right	許諾条件により要旨は2016-06-30に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士 (理学)	氏名	内藤 大地
論文題目	Development of a low-mass high-efficient charged particle detector for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ search		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、大強度陽子加速器施設J-PARCで行っている中性K中間子の稀崩壊$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$探索実験 (KOTO実験) において、その探索感度を達成するために必要不可欠な検出器の開発、製作、性能評価、とその検出器を用いた物理感度の研究について報告している。$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$崩壊は未発見で、素粒子標準理論からの予測分岐比は$3 \times 10^{-11}$、またより大きな分岐比を予測する新物理モデルも多数ある。KOTO実験では標準理論予測感度まで探索を行い、新物理の発見を目指している。</p> <p>J-PARC加速器からの30GeV陽子を使ってK_L ビームを生成する。$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$崩壊の検出には、$\pi^0$崩壊からの2個の$\gamma$線をカロリメータで検出し、その他に余剰粒子がないことを要求する。本論文の主テーマである荷電粒子検出器は、このカロリメータ上流全面を覆い、$K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu$崩壊などの荷電粒子を含む背景事象を削減するために、カロリメータに入射する荷電粒子がないことを保証し、10桁以上の荷電粒子背景事象の削減を目標とする。一方で、ビームハロー領域に存在する中性子が検出器と反応して生成されるπ^0やη中間子からの2γ線も背景事象となる。KOTO実験のパイロット実験であったKEK E391a実験では、カロリメータ上流に荷電粒子検出器が配置されたが、この中性子反応が主要な背景事象となり探索感度が2.6×10^{-8}で制限された。この探索感度を向上させるべく、KOTO実験では本論文で紹介している荷電粒子検出器を開発した。</p> <p>荷電粒子検出器は、直径2mの2層のプラスチックシンチレータからなる。各層50枚のシンチレータストリップから構成され、波長変換ファイバーを埋め込み、光検出器MPPCで読み出す。本実験では、3mm角のMPPCに電子冷却器ペルチェ素子を実装したパッケージを開発した。50倍のゲイン、周波数帯域200MHzの前置増幅器、200チャンネルのMPPCのバイアス電圧、温度のコントローラも開発した。</p> <p>中性子による背景事象の削減には、反応する物質量を低減するために、厚さ3mmの薄いプラスチックシンチレータを採用した。一層の検出器で99.9%以上の検出効率、つまり10^{-3}以下の非検出率を達成することが要求され、シンチレータ全域に渡り十分な発光量を獲得できるかがポイントである。また、50枚のシンチレータストリップを並べる際の固定方法、隙間による検出効率の低下を考慮することも重要である。このような観点で開発を行い、実機を製作し、さらにビームテスト実験を行った結果について報告している。</p> <p>完成した荷電粒子検出器の実機は、J-PARCのKOTO実験のビームラインに設置し、その総合性能を試験した。ドリフトチェンバー、シンチレータホドスコープ及びカロリメータを用い荷電粒子のトラックを再構成し、荷電粒子が検出器を貫通していることを要求し、その検出効率を測定した。結果は100keVのエネルギー損失に対して、平均18.6光電子の獲得光量を達成し、非検出率は一層あたり1.5×10^{-5}以下となり、要求を</p>			

満たしていることを確認した。また、時間分解能が悪いと真の信号を偶発的に落としてしまうため、時間分解能が良いことが重要で、1.2nsの分解能を得ることに成功した。

最後に、この荷電粒子検出器を用いた、KOTO実験の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 探索感度について研究している。中性子反応による背景事象については、KEK E391a実験より、2桁以上の削減を達成していることを確認した。荷電粒子を含む背景事象については、シミュレーションを用いて評価し、0.6事象の背景事象という評価となった。また、偶発ヒットによる信号検出ロスによるアクセプタンスを65%と評価した。この結果、今回製作しインストールを行った荷電粒子検出器は要求性能を十分に満たしており、KOTO実験が十分な物理感度を達成できると結論した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

論文は、素粒子物理学の標準模型を超えた新物理を探索する中性K中間子稀崩壊実験において、その探索感度を保証する荷電粒子検出器の、開発、製作、実機性能評価、実験の最終的な物理感度について報告している。

本論文では、最初にK中間子稀崩壊実験の物理目標、粒子反粒子対称性の説明、様々な新物理の模型について、詳しく解説している。そして、新しく開発した直径2m、厚さ3mmのプラスチックシンチレータ2層からなる荷電粒子検出器の設計方針を詳細に記述している。シンチレータストリップを50枚程度敷き詰め1層を構成し、シンチレーション光は波長変換ファイバーを使って光検出器MPPCで読み出す。中性子反応による背景事象を削減すべく低物質質量を実現し、さらに荷電粒子に対する発光量を確保することに成功した。KOTO実験開始前に、実機の荷電粒子検出器をビームテストし、1層あたり 10^{-5} レベルの非検出率を達成していることを確認した。時間分解能の評価を含め、KOTO実験における信号事象と背景事象を評価し、製作した荷電粒子検出器がKOTO実験の感度を保証するものであることを示した。実機の開発、製作についても、電子冷却器付きMPPC、前置増幅器、コントローラなど独自の開発を含め、十分な内容が記述されている。これまでにない新しい測定器を設計・製作し、その性能を 10^{-5} レベルの非検出率まで確認しており、学位論文として十分な価値がある。また、物理感度の研究のために、様々な系統誤差を検討する必要があったが、それをなしとげた内藤氏の実力の高さがよくわかる。論文は、導入から結論に至るまで、論旨がはっきりしており、本人の理解の深さが読み取れた。

以上のように、研究内容とその展開は独自性を持った上で十分な到達度に達していると判断した。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。平成28年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、多数の難問にも明確な解答をし、試問は合格であった。論文については更なる記述の向上を求め、平成28年4月12日に論文のみを再審査した。その結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2016 年 6 月 30 日以降