

論文の内容の要旨

論文題目

Innovative di-electron spectrometer for the precise measurement of ϕ meson mass spectra in nuclei

(原子核中の ϕ 中間子の質量分布精密測定のための革新的電子対検出器の開発)

氏名 小松 雄哉

申請者は大強度陽子加速器施設 J-PARC において ϕ 中間子の質量変化を高統計かつ高分解能で測定するための検出器群を開発した。現在、ハドロンの質量は量子色力学(QCD)におけるカイラル対称性の破れによってもたらされると考えられている。カイラル対称性の破れの秩序変数であるクォーク・反クォーク凝縮は直接観測できないが、原子核中のような高密度媒質中ではカイラル対称性が部分的に回復し、ベクトル中間子の質量分布が真空中の分布から変化することが示唆されている。これまでに世界各地で高温または高密度媒質中でのベクトル中間子の質量を測定する実験が行われてきたが、測定された質量分布の位置と幅の変化量には矛盾があり、また質量変化の起源についての解釈も定まっていない。

ベクトル中間子の中でも ϕ 中間子は自然幅が狭く、近傍に他の共鳴状態が存在しないため、質量分布の測定に適している。 ϕ 中間子の核中での質量分布の変化は過去に KEK-PS E325 実験によってのみ測定され、3.4%の質量減少と 3.6 倍の幅の増加($\beta\gamma$ が 1.25 より小さい ϕ 中間子のみを選別すると 3.1%の質量減少と 7.1 倍の幅の増加)が報告された。ところが KEK-PS E325 実験の測定結果は近年の Lattice と QCD 和則を用いた理論計算に比べて変化量が大きく、異なる系での測定が待たれている。また、質量変化の物理的な起源を考察するためには、標的核依存性や ϕ 中間子の運動量依存性などの系統的測定が必要である。

従って、先行実験 KEK-PS E325 実験の結果を再確認できるだけの感度を有し、さらに 先行実験以上の高統計を実現できる、という 2 点を満たす新しい実験の実施が待たれている。

本論文の主題である J-PARC E16 実験では ϕ 中間子の原子核中での質量分布を高統計かつ高分解能で測定する。J-PARC の高運動量一次陽子ビームラインにおいて、運動エネルギー 30 GeV の陽子ビームを原子核標的に照射して ϕ 中間子を生成し、崩壊生成物である電子・陽電子対の同定と運動量測定を行う。本研究では 0.33×10^{10} proton/spill という大強度ビームによる高計数率環境でも 10 MeV/c² という高質量分解能を達成する検出器群を開発した。高計数率環境下で荷電粒子を検出するため、標的に最も近い飛跡検出器では電子増幅器として Gas Electron Multiplier (GEM) という新しい技術を用いた。GEM は従来素粒子・原子核実験で使用されてきた Drift chamber よりも計数率耐性に優れ、かつ同等以上の位置分解能を得られる。また、Silicon Strip Detector よりも低コストで大きなアクセプタンスを得られる。本論文では開発した検出器の性能を実測し、シミュレーションによって質量分布の変化に対する感度を評価した。その結果、J-PARC E16 実験が KEK-PS E325 実験の結果と同等の質量変化に対して、同等以上の感度を有することを示した。

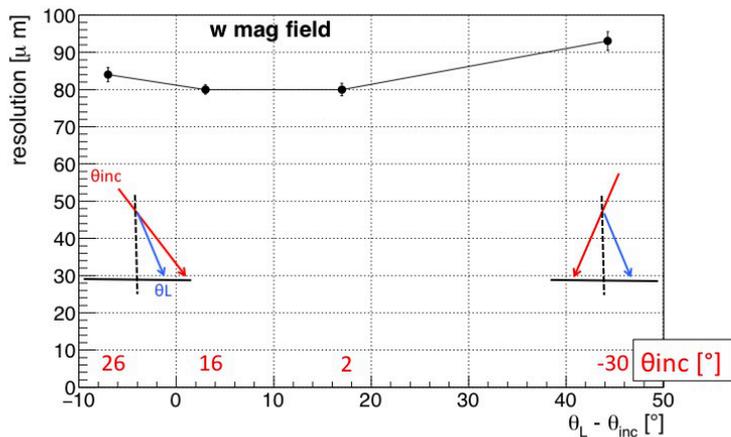
検出器群は荷電粒子の運動量を測定する GEM 飛跡検出器と電子同定用の Hadron Blind Detector (HBD)、鉛ガラス検出器により構成される。ビーム前方の検出器に対する計数率は ~ 1.7 kHz/mm² に達すると予想され、Drift chamber での計測は困難である。GEM は電子の増幅が局所的であり、また増幅の際に生じた陽イオンは速やかに電極に吸収されるため、高計数率下で使用可能である。GEM 飛跡検出器は三層の GEM と二次元ストリップ型の読み出し基板より構成する。10 MeV/c² の質量分解能を達成するためには、入射角度 30° までで 100 μ m の位置分解能が要求される。HBD と鉛ガラス検出器はチェレンコフ光を検出することで電子を同定し、かつ主な背景事象である荷電 π 中間子のイベントを除去する。(総荷電 π 中間子数)/(検出した荷電 π 中間子数)を π 中間子除去率とし、 π 中間子除去率 3×10^3 が目標である。HBD は GEM を用いたチェレンコフ検出器であり、表面に CsI を蒸着した GEM によりチェレンコフ光を光電子に変換する。東北大学電子光理学研究センター (ELPH) と J-PARC K1.1BR ビームラインにおいて電子ビームと荷電 π 中間子ビームに対する HBD と鉛ガラス検出器の応答を調べた結果、HBD と鉛ガラス検出器を合わせて、電子の検出効率 57%、 π 中間子除去率 3.2×10^3 という十分な性能が得られた。

GEM 飛跡検出器は磁石内で運動量を測定する。従って、磁場中での位置分解能を評価した。磁場中では電離電子は Lorentz 力を受け、電場から Lorentz 角 (θ_L) だけずれた方向に沿って移動する。そのため、粒子の通過位置の解析の際に Lorentz 角による位置のずれの補正が必要である。電離電子の広がり、磁場がない場合は粒子の入射角 (θ_{inc}) が検出面に対して垂直時 ($\theta_{inc} = 0^\circ$) に最小であるが、磁場中では $\theta_{inc} = \theta_L$ の時に最小となると予想

される。ELPH の RTAGX 双極磁石の gap 間に飛跡検出器を設置し、陽電子ビームを用いて位置分解能の $\theta_L - \theta_{inc}$ 依存性を調べた。中心磁場 1 T 中で $\theta_L - \theta_{inc} = -7, -3, 17, 44^\circ$ ($\theta_{inc} = 26, 16, 2, -30^\circ$ に対応。)について位置分解能を評価した。 $\theta_L - \theta_{inc} = 44^\circ$ に対しては電離電子の到達時間の情報から電離領域内の電場方向の電離位置を計算し、次に電離位置が入射角と平行に並ぶように Lorentz 角によるずれを補正した。補正した電離位置は直線で fit し、検出面との交点を測定位置とした (Timing 法)。Timing 法は $\theta_L - \theta_{inc}$ が大きく、電離電子の広がり大きいときに有効であった。 $\theta_L - \theta_{inc}$ が小さい領域、 $\theta_L - \theta_{inc} = -7, -3, 17^\circ$ では到達時間情報を用いて Lorentz 角によるずれを補正した上で電荷の重心を計算した (Center of charge (COC)法)。Timing 法と COC 法により θ_{inc} が -30° から 26° において $100 \mu\text{m}$ 以上の位置分解能が得られ、磁場中でも要求性能を満たすことを示した (図 1)。

各検出器の物質と、実測した性能をモンテカルロ・シミュレーションに組み込み、実際の実験で得られるであろう ϕ 中間子の質量分布を計算した。GEM 飛跡検出器には ϕ 中間子起源の飛跡の他に、ビームハローと標的起源の背景事象を想定した飛跡を重ねた。 ϕ 中間子の質量分解能は KEK-PS E325 実験よりも向上し、 $\beta\gamma$ の全領域を含んだイベントで $9.0 \text{ MeV}/c^2$ 、遅い領域 ($\beta\gamma < 1.25$) で $8.5 \text{ MeV}/c^2$ であった。次に、背景事象の質量分布を計算した。背景事象の起源は、photon からの対生成による e^+ 、中性 π 中間子の Dalitz 崩壊起源の e^+ 、電子だと誤同定された荷電 π 中間子である。

信号と背景事象を足しあわせた質量分布を使い、KEK-PS E325 実験で報告された質量変化に対する感度を評価した。質量



分布のシフトと幅の広がりには密度に比例した項で表し、密度の係数をそれぞれ k_1, k_2 とした。KEK-PS E325 実験の結果と同じく、 $\beta\gamma < 1.25$ の遅い ϕ 中間子に対して $k_1=0.031$ (3.1%の質量減少)、 $k_2 = 6.1$ (7.1 倍の幅の増加) を仮定して計算した。質量変化を

図 1. 位置分解能の $\theta_L - \theta_{inc}$ 依存性。

有意に検出できるかどうか調べるため、質量変化を取り入れた分布を真空中の質量分布で fit し、 χ^2 値を調べた。質量変化による盛り上がりが見られる $0.913 \text{ GeV}/c^2$ から $1.011 \text{ GeV}/c^2$ までを fit 範囲に含むと、真空中の質量分布を用いたモデルへの棄却力は 99.9%以上

であったが、含まない場合は 1σ 以下であり、 χ^2 検定によって質量変化の存在を示すことができた。

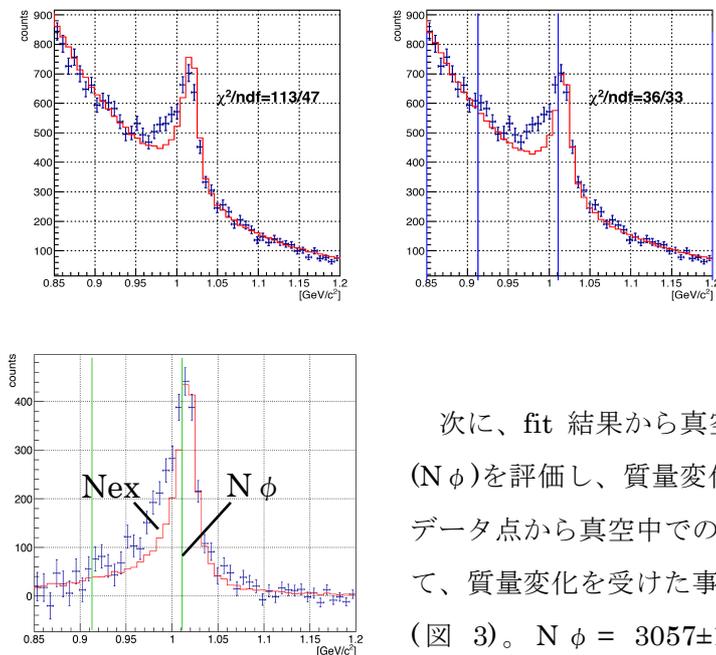


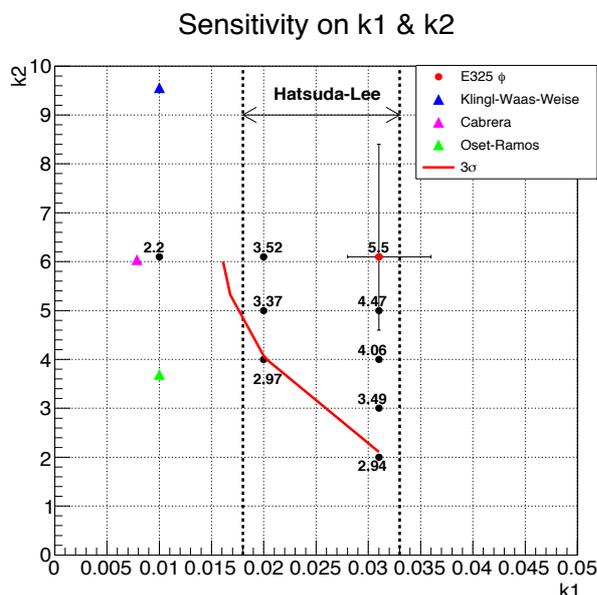
図 2. (左) 0.85-1.2 GeV/c² の全領域を用いた Fit 結果。赤線は真空中の ϕ 中間子の質量分布とバックグラウンドの和を表す。(右) 0.913-1.011 GeV/c² を除いた Fit 結果。

図 3. Fit 結果の背景事象を差し引いた後の質量分布。

次に、fit 結果から真空中の ϕ 中間子の成分の事象数 (N_ϕ) を評価し、質量変化を含んだシミュレーションのデータ点から真空中での分布による fit 結果を差し引いて、質量変化を受けた事象数 (N_{ex}) を評価した (図 3)。

$N_\phi = 3057 \pm 162(\text{stat.}) \pm 185(\text{syst.})$ 、 $N_{ex} = 788 \pm 93(\text{stat.}) \pm 140(\text{syst.})$ が得られ、 $N_{ex}/(N_\phi + N_{ex})$ は $0.20 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.03(\text{syst.})$ となった。統計誤差は KEK-PS E325 実験の半分

に縮小され、系統誤差まで含めても 5σ 以上の感度を有することが分かった。さらに、どこまでの質量変化を有意に観測できるか調べるために、 k_1, k_2 を変えて $N_{ex}/(N_\phi + N_{ex})$ の感度を評価した (図 4)。その結果、Hatsuda-Lee の理論予想範囲については良い感度を持ち、 $k_1 < 0.018$ の領域にも 3σ 以上の感度があることが分かった。



以上により、本博士論文では J-PARC E16 実験は質量分解能、統計ともに先行実験より優れており、全く新しい検出器群を用いて ϕ 中間子の質量変化を有意に測定することが可能であることを示した。

図 4. $N_{ex}/(N_\phi + N_{ex})$ の感度の k_1, k_2 依存性。黒丸が評価点で、数字が感度 (σ) を表す。