

中間子の電子対崩壊精密測定による原子核中のカイラル凝縮の研究

研究代表者	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員	
	四日市 悟 (よっかいち さとし)	研究者番号:20360670
研究課題情報	課題番号: 23H05440	研究期間: 2023年度~2027年度
	キーワード: 実験核物理 量子色力学 GEM 飛跡検出器 電子検出器	

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

● 研究の全体像

ビッグバンからの宇宙の冷却にともない、物質を構成する粒子であるクォークは質量を得た。ヒッグス機構により3MeV程度の質量を得るが、その後、さらに陽子中性子などハドロンが生成されるとき、カイラル凝縮による300MeV程度の質量を得て、現在の宇宙の物質が構成されている(図1上)。逆に、カイラル凝縮は温度をあげていくとゼロになるが、他方、原子核密度程度の高密度ではゼロにならないまでも減少すると考えられており(図1右下)、原子核中ではハドロンの質量も変化するであろうと考えられる。このような現象は、強い相互作用の理論である量子色力学を使って予言されてきた。こうした予言にもとづき、2002年にデータ収集を完了したKEK-PS E325実験で、ハドロン的一种であるベクトル中間子 ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) の原子核中における質量変化現象の証拠をつかみ、2006-7年に発表した。世界的にも同様な実験がいくつか行われているが、 $\phi$  中間子の質量変化の検出は現在同実験だけである。本研究ではこの実験を高度化したJ-PARC E16実験による系統的な再測定により、E325の結果を10倍以上のデータ量で再確認して原子核中の中間子質量変化の存在を確立し、理論計算と比較して、物質質量獲得機構の実験的証拠とする。

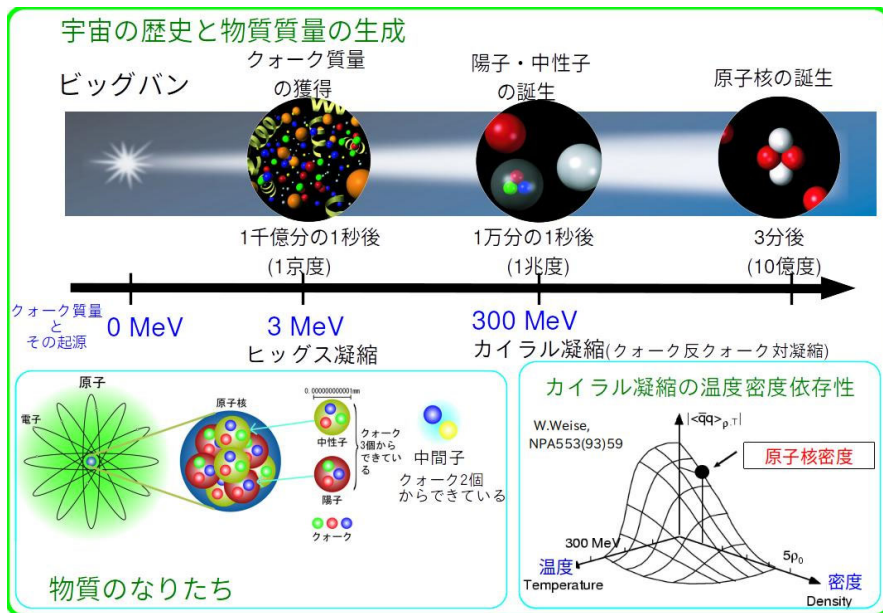


図1 物質質量獲得機構のイメージ図

● 研究方法

J-PARC ハドロン実験施設に2020年に完成した高運動量ビームラインに新しい電子・陽電子対スペクトロメータを建設し、ベクトル中間子の質量分布を測定する。J-PARC MR加速器からの30GeV 一次ビームを、測定器中央においた極薄の原子核標的 (C/Cu/Pb)に照射して中間子を生成し、標的での10MHz という高い反応レートに耐える検出器で大立体角をカバーして、ベクトル中間子の電子陽電子対崩壊を測定する。

(研究方法つづき)

GEM 飛跡検出器(GTR)により位置分解能100 $\mu$ m を達成、 $\phi$ 中間子の質量分解能は6~8MeVと前実験より向上する。電子同定には前段:ハドロンブラインド電子検出器 (HBD、ガスチェレンコフ検出器の一種)、後段:鉛ガラス電磁カロリメータ (LG) の2段構成を用いる。これまでの科研費により、8モジュールからなる第一期スペクトロメータはほぼ完成している(図2)。

ビームラインの完成とともに、モジュール数が少ないうちから、試運転を開始し、検出器の性能、ビームの性質などの測定を行ってきた。本研究第1-第2年度には最初の物理データ取得(約60日)をおこない、並行して検出器モジュールを増備して、第4年度には二回目の物理データ取得(同)をおこなう計画である。

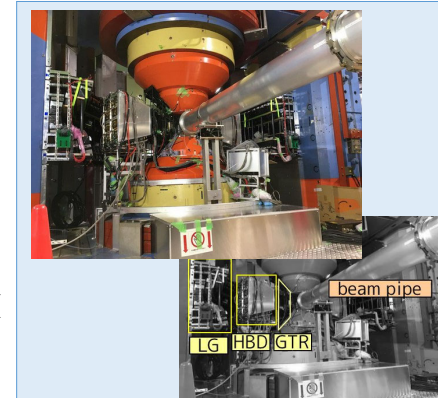


図2 スペクトロメータの写真

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

- 質量変化の理論によらない解析として、 $\phi$ 中間子の質量分布を、質量変化のない場合に想定される形と比較して、変形量(図3)を系統的に調べる。中間子速度依存性(速い中間子データサンプルでは、物質中滞在時間が短くなるため変化する数が少ない)および標的原子核サイズ依存性(大きい原子核では物質中滞在時間が長くなるため変化する数が多いと期待できる)を検出して、質量変化の存在を再確認する(図4)。

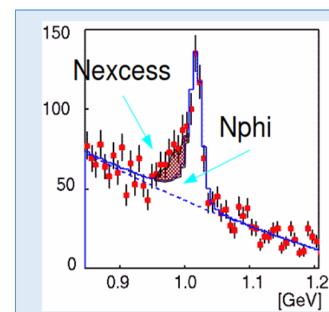


図3 変形量 Nexcess/Nphiの概念図。赤がデータ点とエラー、青線が質量変化のない場合の質量分布。Nexcessは最も単純には、質量が変化した中間子の数と考えられる。

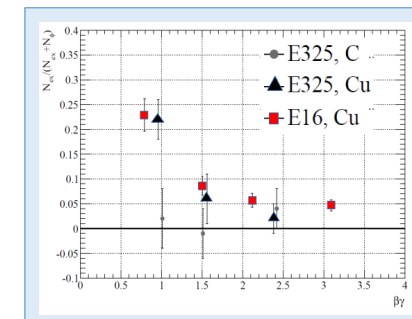


図4 赤:本研究で測定される変形量の中間子速度依存性(最初のデータ収集(60日)を仮定)。黒は先行研究のKEK-PS E325。速いほど変形が少ない傾向があり、しかも有意にゼロではないことが新たに示される。

- 次に、理論にもとづいた質量分布予測との比較を行う。原子核中での崩壊点分布モデルとあわせて、測定した質量分布を再現できるモデルにもとづき、中間子の質量減少量(通常原子核密度換算)を導出し、その運動量依存性(すなわち原子核中での中間子の分散関係)も測定して、量子色力学にもとづき理論計算との比較により原子核内カイラル凝縮の大きさに換算する。

図5 本研究で得られる $\phi$ 中間子の質量変化の運動量依存性(分散関係)。二回のデータ収集を仮定。青が本研究、ピンクは先行研究のKEK-PS E325の結果(1点のみ、PRL 98(07)042501)。線は理論計算とそのエラー(S.H.Lee, PRC57(98) 927 & NPA 670(00)119)。

