



陽子内部に働く力を解き明かす 陽子中の凝縮エネルギーが生み出す閉じ込め圧力

藤井大輔 Fujii Daisuke

原子力科学の基礎は陽子や中性子(核子)とそれを結びつける核力です。核子は、より小さなクォークとグルーオンと呼ばれる素粒子の複雑な相互作用の結果として形成されます。従来は、この相互作用の複雑さのために、核子内部において素粒子の間でどのような力が働き、安定した核子という構造を作り出すかを解明することは極めて困難と考えられてきました。しかし、近年、核子内部に働く圧力が実験的に測定可能となりました。この圧力分布は素粒子の複雑な相互作用の結果形成される核子内部の力の分布であり、核子とそれを支える力の本質に迫る新たな手がかりが得られました。私はこの圧力分布の起源を理論的に解明し、核子中のクォーク-グルーオン凝縮に由来するエネルギーが核子の安定な圧力を生むことを示しました。この研究成果は、核子と核力の理

解の深化を通して、原子力科学の発展に資する可能性を秘めています。

陽子内部にひしめく無数の素粒子

原子力科学の基礎は、陽子や中性子(核子)と、それを結びつける核力です。かつて、核子はそれ以上分割できない素粒子(自然界の最小単位)と考えられていましたが、現代では、核子やその仲間であるハドロンは、クォークとグルーオンという素粒子から構成されていることが明らかになっています。とりわけ核子は、3つのクォークからなるとされていますが、実はこれらのクォークの質量を足し合わせても、核子全体の質量のわずか数%にしかありません。では、残りの質量はどこから来るのでしょうか。実は、核子の内部では粒子が絶えず生成と消滅を繰り返しており、そのようなダイナミックな過程の中で、クォークやグルーオンの運動エネルギーや、

クォーク対(クォークとその反粒子の対)やグルーオンの凝縮によって生じるエネルギーが、大部分の質量を生み出していることが判明しています(図1)。

陽子内部にはどのような力が働いているのか？
かつて湯川秀樹は、核子の間にパイ中間子と呼ばれる粒子が交換されることで、核子を結びつける核力が生まれると提案し、日本人初のノーベル賞を受賞しました。湯川の間接子論は、原子核を構成する核子同士がパイ中間子を吸収・放出することで力を及ぼしあう仕組みを説明します。こうした「粒子の交換によって力が生じる」という考え方は、現代の素粒子論でも基本的な枠組みとなっています。現代では、核子と核力の背後には量子色力学(QCD)という基礎理論が存在することが明らかとなっています。QCDの枠組みにおいては、核力もクォークやグルーオンの交換によって説明されま

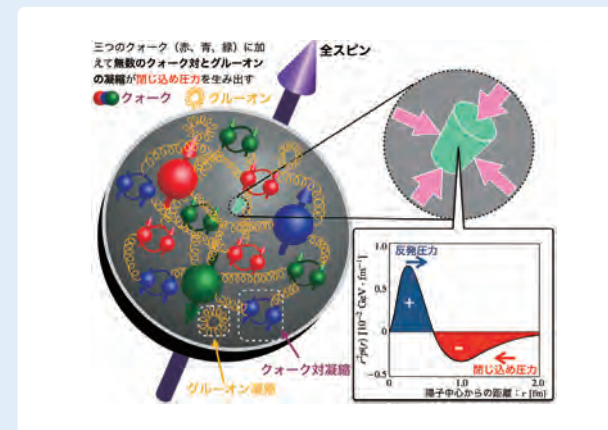


図1

す。また、核子の内部でも同様の仕組みにより力が発生し、クォークとグルーオンが核子中に閉じ込められていると予想されています。

しかし、核子は、絶えず生成・消滅する多数のクォークやグルーオンからなる多体系であり、それらすべての粒子間で起こる相互作用を追跡し、核子内部に働く力の全体像を理論的に捉えることは極めて困難であると考えられてきました。従って、現代科学をもってしても、陽子が安定に存在する理由を完全に説明することはできていません。

2018年初めて測定された陽子内部の圧力

2018年、米国ジェファーソン研究所(JLab)の加速器を用いた電子散乱実験において、高エネルギー電子ビームで陽子から放出される光子を精密に検出し、その散乱データを解析することで、内部の圧力分布が初めて測定されました。その結果、中心部では外向きに約 10^{35} Paに達する、現在自然界で観測された中で最も巨大な圧力が働き、周縁部ではそれを押し留める内向きの“閉じ込め圧力”が働くことが明らかとなりました(図1)。この圧力分布は、無数のクォークとグルーオンの複雑な相互作用の結果として、核子内部の観測者が感じる力の分布であり、この力のつり合いが核子の安定性を支えていると考えられます。

さらに、米国ブルックヘブン国立研

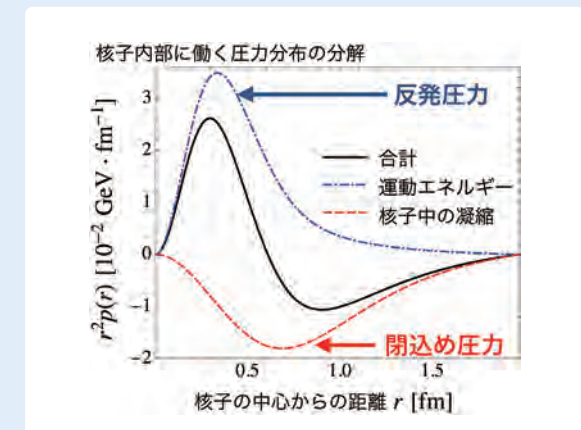


図2

究所に建設中の電子-イオン衝突型加速器(EIC)は2030年頃の運転開始が予定されており、運転開始後はより高い精度で同様の解析が可能となり、核子内部の圧力構造に関する理解はさらに深まることが期待されます。

陽子を支える力の正体:

陽子中の凝縮エネルギー

光子を通して核子内部の圧力を間接的に測定することが実験的に可能となりました。そして、この実験過程を理論的に記述することで、核子内部の圧力を計算することができます。したがって、複雑な相互作用の結果形成される核子内部の力の分布を理論的に調べることができます。この力の分布を理論的に調べることで、核子が如何にして安定に存在し得るかについての理解を深めることができるかもしれません。

しかし、現在までのところ、なぜそのような力の分布が核子内部に発生するかを調べた仕事は限られています。そこで私は、この力の分布の起源を理論的に調べることで、核子の安定性を支えるメカニズムに迫りました。ここでは最近の私の研究成果を一つ紹介します。私は、核子内部の圧力分布を、理論的に首尾一貫した方法で、クォークやグルーオンの運動エネルギー、および核子中のクォーク対凝縮とグルーオン凝縮に由来するエネルギーといった異なる起源からの寄与に分解する

ことに成功しました。その結果、クォークを核子内部に閉じ込める“閉じ込め圧力”が、核子中のクォーク対凝縮とグルーオン凝縮に起因するエネルギーによって駆動されていることを明らかにしました(図2)。これまでは質量生成への寄与で注目されていた凝縮由来のエネルギーが、実は核子の圧力バランスにも決定的役割を果たすことを示しました。

さらに、パイ中間子においても同様のメカニズムを確認しました。これらの結果は、このメカニズムがハドロンに共通の普遍的性質である可能性を示唆します。

核子内部の圧力構造の解明は、クォークとグルーオンの複雑な相互作用の結果生じる力の本質を理解する手掛かりとなります。核力もこれらの素粒子の相互作用の結果生じる力であるから、本研究を通して、原子力科学の基礎である核子と核力の本質に迫る道が拓かれました。さらに、我々の解析は原子核内部の圧力へも適用可能であり、EIC実験では原子核内部の圧力測定が一つのテーマとして掲げられています。原子核内部の圧力の性質の理解が進めば、我々の研究は将来的に核融合や核分裂に役立つ知見をもたらす可能性があります。このような核子や核力の根本的な理解は、次の世代の原子力科学の礎を築くものです。

図1: 陽子内部の模式図

図2: 核子内部に働く圧力とその分解