

π 中間子で探る強い相互作用の真空構造



板橋 健太*

理化学研究所仁科加速器科学研究センター
itahashi@phys.sci.osaka-u.ac.jp



比連崎 悟

奈良女子大学理学部
zaki@cc.nara-wu.ac.jp

我々の世界はクォークやレプトンのような物質を構成する素粒子、力を伝えるゲージ粒子、質量を与えるヒッグス粒子などからできている。宇宙が高温高密度の「火の玉」として誕生した直後、クォークやレプトンは質量を持たなかったが、温度が下がる過程で真空中にヒッグス粒子が凝縮し、レプトンやクォークに質量が生まれた。この質量は身近な物質である陽子や中性子を構成するアップ (u) やダウン (d) クォークでは陽子質量の1%程度である。宇宙はクォークグルーオンプラズマ (QGP) の状態にあるが、温度が200 MeV程度に下がると、**強い相互作用**は強結合となり、クォークは**ハドロン**に閉じ込められ、カラーの自由度が見えなくなる。さらに真空中にクォーク・反クォーク対 $q\bar{q}$ 凝縮 (クォーク凝縮) が生じる。 $q\bar{q}$ 凝縮は真空中に構造をもたらす、**カイラル対称性**が破れる。その真空期待値 $\langle \bar{q}q \rangle$ はカイラル対称性の秩序変数であり、 $\langle \bar{q}q \rangle$ が0から有限値へ変化する遷移は、QGP相からハドロン相への相転移を意味する。この時、 u 、 d クォークは質量の多くを獲得する。

このシナリオは、様々な方法で検証されている。高エネルギー重イオン衝突実験では、QGPの生成が確認されている。格子QCD計算では、 $\langle \bar{q}q \rangle$ が温度低下と共に有限値を持つことがわかっている。一方、 $\langle \bar{q}q \rangle$ は物質密度への依存性も持つはずである。ここで物質密度は、真空中にドーブされた不純物のような役割を果たし、例えば、原子核中では真空の対称性の変化が期待される。有効場の理論などを用いた研究によると密度上昇と共に $\langle \bar{q}q \rangle$ が減少する。

さて、 $\langle \bar{q}q \rangle$ は直接には観測できないが、間接的に推定できる。例えばクォーク質量は $\langle \bar{q}q \rangle$ と関係するから、中間子の質量も $\langle \bar{q}q \rangle$ に依存し、これを捉える実験が行われている。一方、質量は相互作用による自己エネルギーなので、相互作用に変化が生じると言うこともできる。

π 中間子と原子核の相互作用も $\langle \bar{q}q \rangle$ に関するヒントを与える。 **π 中間子原子**は、負電荷の π 中間子が原子核にクーロン力で束縛された系である。 π 中間子-原子核間に働く強い相互作用が斥力的なので、比較的重い原子核に束縛されると π の波動関数は原子核表面付近に局在し、ここから原子核密度の1/2付近での相互作用を評価できる。このように深く束縛された状態を、原子核反応で直接励起し、**欠損質量測定により分光**することで、相互作用の変化を調べる。

我々は、 π 中間子スズ原子の励起スペクトルを測定し、 π 中間子の束縛エネルギーを求めることで有限原子核密度での π 中間子と原子核の相互作用を決定した。 π 中間子 (重) 水素と比較すると、原子核中で強い相互作用の斥力が増大している。この情報から $\langle \bar{q}q \rangle$ の減少量を評価することができる。解析の結果、原子核密度の約60%の密度で $\langle \bar{q}q \rangle$ は真空中と比べて $77 \pm 2\%$ に減少していることがわかった。この結果は多くの理論的予想と誤差の範囲で一致しており、カイラル対称性が高密度で回復していることを裏付けている。現在の真空が「からっぽ」ではなくクォーク凝縮が満ちているというシナリオをサポートする結果であると言える。

用語解説

強い相互作用:
量子色力学 (QCD) で記述される自然界に存在する4つの相互作用の1つ。カイラル対称性の自発的破れや、クォーク閉じ込めなど興味深い性質を有し、理論・実験・数値シミュレーションなど多様な手法を用いて活発に研究が進められている。

ハドロン:
強い相互作用をする粒子の総称であり、その性質にQCDの対称性の様相が反映されていると考えられる。特に低エネルギー領域において、QCDの対称性や真空の構造に関する情報を与える。

カイラル対称性:
クォーク質量が0の極限でQCDが持つ対称性であり、カイラリティと呼ばれる量で区別されたクォークに対して、フレーバー空間で独立の変換を行っても、QCDラグランジアンが不変に保たれることを意味する。ハドロン物理学等で大変重要な概念であることがわかっている。

π 中間子原子:
バーチャルな状態では核力を媒介するいわゆる湯川中間子が、実粒子の状態で原子核に束縛されてきた原子である。大きさや束縛エネルギー等は通常原子と全く異なり、むしろ原子核に近い。

欠損質量分光法 (missing mass spectroscopy):
相対性理論によるエネルギーと質量の等価性により、高エネルギー粒子の大きな運動エネルギーから新しい物質 (粒子) を生成し、それを分光学的に観測する手法。不安定な状態も生成/観測可能とする。

* 現所属: 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻