

陽子内の海クォークはどこまでわかったか？ —反クォークのドレル・ヤン反応による検出—

バージニア大
中野健一

What are the sea quarks in the proton? —Detection of anti-quarks by the Drell-Yan reaction—

University of Virginia
K. Nakano

陽子と中性子は総じて核子と呼ばれ、それら核子を構成要素として原子核の構造を解明するのが原子核物理である。一方で、この核子も単一粒子ではなく、短距離 (= 短時間) で観測するとパートンという内部構造が現れる (図 1 参照)。このパートン構造にも様々な性質が発見・予言されており、“核子構造物理”として活発に研究されている。

陽子はアップクォーク (u) 2 個とダウンクォーク (d) 1 個、中性子は u 1 個と d 2 個から主に構成されており、これらを価クォーク (ヴァレンスクォーク) と呼ぶ。そのほかに価クォークから放射されたグルーオンや、そのグルーオンが乖離してできたクォークと反クォークの対が陽子内に存在する。グルーオンつまり強い相互作用によって動的に生じたクォークと反クォークを“海クォーク”と呼ぶ。動的に生成・消滅し続けているので、海クォークは核子の構造に影響を与えないと考えられていた。しかし 1980 年代の“陽子スピンの問題”、つまりクォークのスピンだけでは陽子のスピン $1/2$ の半分にも満たないという問題を契機として、海クォークとグルーオンの重要性が明らかになっている。陽子のパートン構造 (= クォーク + 反クォーク + グルーオン) を理解することは、その構造を決めている強い相互作用の性質を紐解くためにも重要である。

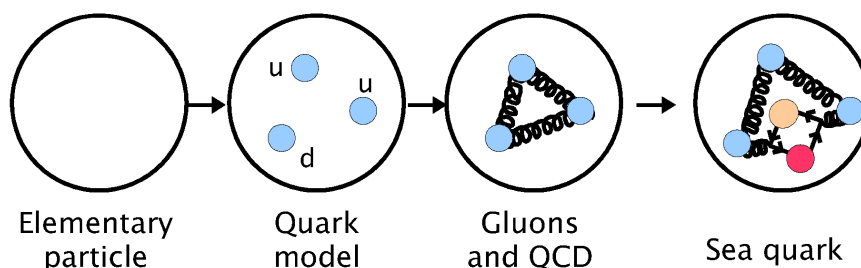


図 1 観測スケールで変化する陽子 (核子) の内部構造。長距離 (= 長時間) のスケールでは単一粒子として観測されるが、スケールの変化に応じて価クォーク、グルーオン、海クォークが現れる。

反クォークは海クォークとしてのみ存在するので、反クォークの性質は即ち海クォークの性質である。その興味深い性質の一つとして、反クォーク分布量のフレーバー非対称性を挙げたい。強い相互作用はフレーバー対称なので、 $g \rightarrow q\bar{q}$ から生じる反 u と反 d の量は等しいはずでる。し

しかし、1990年代のミュオン-核子の深非弾性散乱実験により、陽子内では反 d が反 u よりも多いという結果が得られた ($\bar{d} > \bar{u}$)。それに続き、陽子-核子のドレル・ヤン反応により、反 d の方が最大で70%も多く存在していることが分かった。多くの理論的モデルが提案されて非対称性の起源が検証されている。例えば図2に示した中間子雲モデルでは、核力を媒介するパイ中間子と同様に仮想的な中間子が核子の周りに生成し、その生成確率のフレーバー依存性から反クォーク分布の非対称性が生じる。



図2 中間子雲モデル。左図では、陽子が仮想的に中性子 (n) + パイ中間子 (π) に変化した状態になっている。右図はその変化を構成子クォークのレベルで表したものであり、反クォークの存在が見られる。

核子内の反クォークを測定するプローブとして重要性が高まっている反応過程が、ドレル・ヤン反応である。この反応では、図3の様に陽子-陽子の散乱においてクォークと反クォークが電磁相互作用を介してミュオン対になる。反クォークが必ず反応に関与するので、反クォークを選択的に測定可能である。ドレル・ヤン反応は古く1970年に予言・観測されたが、反クォーク分布のプローブとして複数の実験が行われている。近年では、固定標的型実験では例えばフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) の陽子ビームを用いた SeaQuest 実験、SpinQuest 実験がデータ解析中・実験準備中である。衝突型実験でのドレル・ヤン反応は、BNL-RHIC、LHCなどで解析されている。

本講演では、陽子の海クォーク構造について、これまでに明らかになっている実験的・理論的知見を解説する。核子構造分野に限らず原子核物理や隣接分野の研究者や大学院生を対象としている。

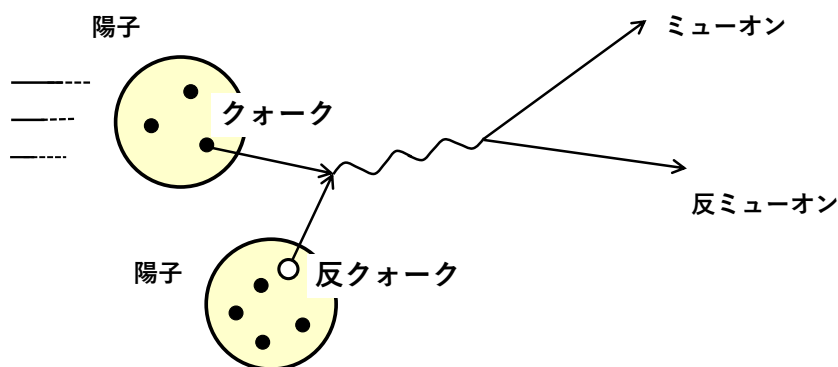


図3 ドレル・ヤン反応過程: $q\bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ 。より一般には始状態はハドロン-ハドロン、終状態はレプトン対。