

陽子のスピ構造：シバース効果とクォークの軌道角運動量

柴田 利明

東工大 基礎物理学専攻

陽子と中性子は原子核を構成し、宇宙の星や生物などの基本要素となっているが、現在ではこれらの粒子（核子）は素粒子ではなくクォークからできていることがわかっている。核子は基本的に3つのクォークから成っている。宇宙初期の高温の環境下ではクォークは自由に飛び回っていたが、 10^{-4} 秒後ぐらい経つと核子が形成されたと考えられている。核子はフェルミ粒子で、スピンは $1/2$ であるが、クォークのスピンも $1/2$ である。核子のスピン $1/2$ が宇宙初期にどのようにして構成されたかは興味ある量子色力学（QCD）の問題である。陽子スピンに対するクォークのスピン寄与は約30%に過ぎないことが知られていて、「陽子のスピンの問題」と呼ばれている。

柴田研究室では高エネルギー電子-核子深非弾性散乱実験 HERMES をドイツ・ハンブルクの DESY において 12 年間にわたって行ってきた。そのデータ解析は終盤に達し、HERMES はこれまでに 70 篇の論文を発表した。東工大は HERMES に対する日本からの唯一の参加機関である。東工大は、実験の要点となる $\pi \cdot K$ 中間子の識別のためのリング・イメージング・チェレンコフ検出器の建設に主要な役割を果たした。偏極気体標的の開発にも貢献した。実験データ解析では、横偏極の陽子標的、つまり電子ビームの進行方向に垂直にスピンの向いた陽子標的での実験の解析に重点を置いている。

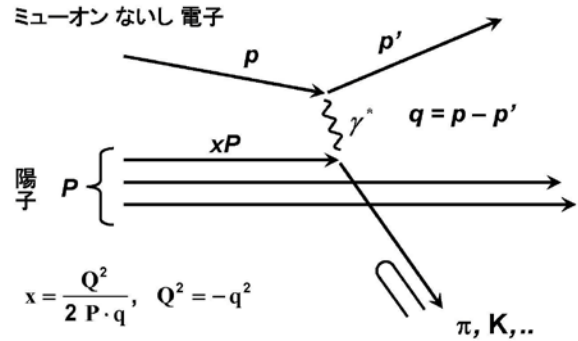


図 1: 深非弾性散乱

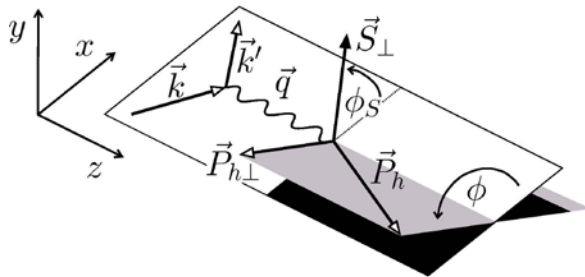


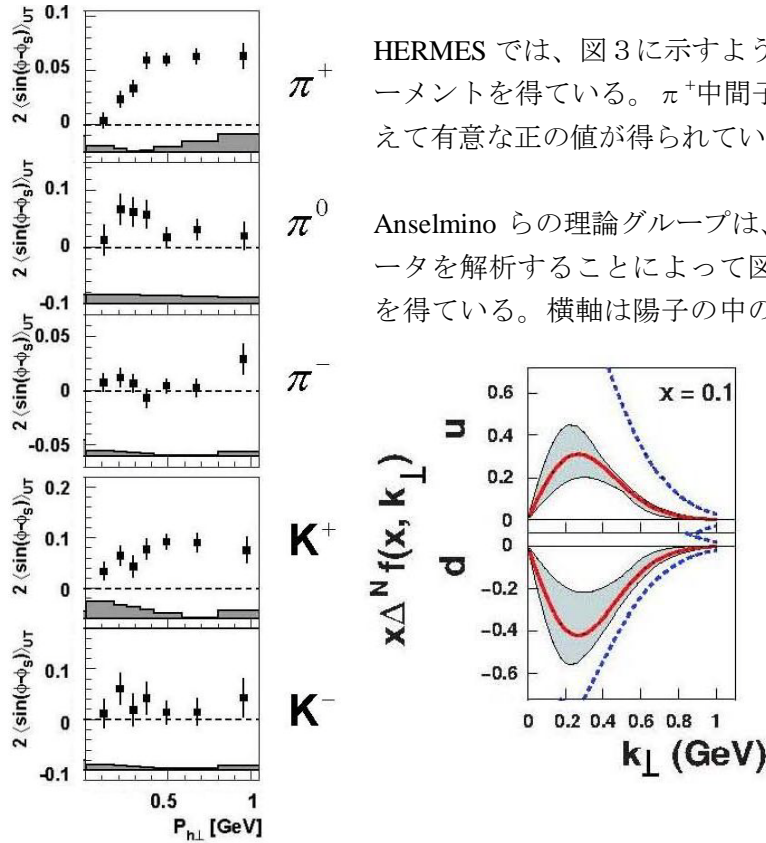
図 2: 入射電子 k と散乱電子 k' の運動量で散乱平面が決まり、仮想光子（波線）のまわりの中間子発生の方角角も決まる。

深非弾性散乱は、図 1 に示すようにミュオンないし電子ビームと陽子の中のクォークの散乱である。HERMES では 27.6 GeV の電子ビームを用いている。偏極深非弾性散乱で、横偏極の陽子標的について、HERMES はシバース効果と呼ばれる非対称度を分離抽出することに成功している。

シバース効果とは、陽子のスピンの方向とその陽子の中のクォークの運動量の方向の相関に起因して非対称度が現れることである。

スピンと軌道角運動量の結合は、原子核物理においては原子核の魔法数を生み出す起源になっていて重要な要素であったが、陽子のクォーク構造においても現在、盛んに研究がなされている。

シバース効果は図2に示すように、中間子(π , K)の発生が、散乱の際に交換される仮想光子の方向のまわりの方位角 ($\phi - \phi_s$) についてどのような非対称度を持っているかを測定することによって研究できる。 ϕ は中間子が発生する平面の角度、 ϕ_s は陽子のスピンの方向を表す。



HERMES では、図3に示すような $\sin(\phi - \phi_s)$ 型の角度分布のモーメントを得ている。 π^+ 中間子、 K^+ 中間子生成では統計誤差を超えて有意な正の値が得られている。

Anselmino らの理論グループは、HERMES と COMPASS 実験のデータを解析することによって図4に示すようなシバース分布関数を得ている。横軸は陽子の中のクォークの横向き運動量である。

u (アップクォーク)については正、 d (ダウンクォーク)については負の分布が得られている。帯は解析の精度を示す。点線は理論的な上限・下限を示す。

図4： 実験データから得られたシバース分布関数。横軸はクォークの横方向運動量。

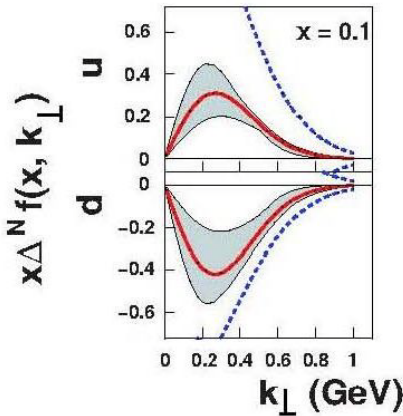


図3： π 、 K 中間子発生の際のシバース分布関数の \sin モーメント。横軸は中間子の横方向運動量。帯は系統的誤差の大きさを示す。

HERMES では、観測された非対称度の物理的根拠について検討を進めている。シバース効果は、図5に示すように、偏極した陽子内のクォークが軌道角運動量を持っている場合に、ビームから見て左半分と右半分でクォークの運動量が相対的に違うことに起因する可能性がある。

陽子のスピン構造研究の新しい段階を拓いたと言えるので、実験データの詳細な解析を行っている。

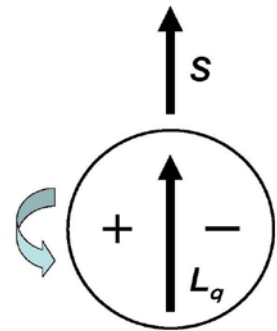


図5： 陽子のスピン S に対しクォークが軌道角運動量 Lq を持つと、ビームから見た運動量が左右で相対的に異なる。そのために方位角依存性が生じる可能性がある。