

核子構造 WG レポート原稿

中野健一

2017 年 8 月 31 日

3. 最近の進展

3.4. 非偏極測定

3.4.1. 反クォーク分布のフレーバー非対称性

反クォークが $g \rightarrow q + \bar{q}$ というグルーオン分岐から生じる場合、 \bar{u} と \bar{d} の質量はほぼ同じなので生成確率もほぼ等しくなる。したがって核子内の \bar{u} と \bar{d} の分布量はフレーバー対称、つまり $\bar{d} = \bar{u}$ であると考えられていた。この対称性は Gottfried 和 S_G の測定を通じて初めて実験的に検証された。CERN の NMC 実験は 1990 年に陽子と中性子の構造関数を測定し、 $S_G = 0.235 \pm 0.026$ であることを発見した [1]。陽子内の \bar{u} と \bar{d} の分布量が等しい場合に $S_G = 1/3$ であり、測定結果の $S_G < 1/3$ は \bar{d} が多いこと ($\bar{u} < \bar{d}$) を意味する。さらに CERN の NA51 実験 (1994 年)[2] と Fermilab の E866/NuSea 実験 (1998 年)[3] は、パートン分布関数を直接的に測定してフレーバー非対称度 $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ を明らかにした。非対称度は運動量比 x に強く依存し、 $x \sim 0.1$ で 70%もの非対称度 ($\bar{d}/\bar{u} = 1.7$) に達する。この大きな非対称度は、グルーオン分岐でない非摂動的な過程が反クォークの生成を支配していることを意味しており、核子構造ひいては非摂動的領域での強い相互作用の性質を理解するために重要な現象である。

この大きな \bar{d}/\bar{u} 非対称度の発生メカニズムを説明すべく、様々な理論モデルが提唱され、測定結果と比較されている [4]。多くの理論モデルは測定された非対称度の x 依存性をおよそ再現するが、 $x \sim 0.3$ に向けて急速に非対称度が小さくなるという傾向は説明できない。さらに、大きい x で非対称度が $\bar{d} < \bar{u}$ に転じるという傾向を測定結果は示しており、この大小関係の反転はどの理論モデルも再現しえないものである。測定データと理論モデルの一致度を精査するためには、大きい x で測定データの精度を高める必要がある。

大きい x での \bar{d}/\bar{u} を測定するために、現在 Fermilab において E906/SeaQuest 実験が実施されている。この実験では陽子および重陽子の標的に陽子ビームを照射し、Drell-Yan 反応を計測することにより $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ を直接的に測定する。Drell-Yan 反応とは、クォークと反クォークが対消滅して仮想光子となってからレプトン対 ($\mu^+ + \mu^-$) に崩壊する過程であり、反応断面積が小さいので大きな積算ルミノシティを必要とする。Fermilab の Main Injector から取り出される陽子ビームは、その強度 (10^{12} 陽子/秒) とエネルギー (120 GeV) において SeaQuest 実験の目的に適った施設である。

SeaQuest 実験は 2012 年 4 月にビームと検出器のコミッショニングを終え、2013 年 11 月から 2017 年 7 月まで夏期 2ヶ月の加速器シャットダウンを挟みつつ物理データを収集した。ビーム陽子 1.4×10^{18}

個のデータを計測・記録した。データ収集と並行して解析を進め、収集したデータの 1/3 を用いた $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の preliminary な結果 (図 1) を 2016 年 4 月に公表した。 $0.1 < x < 0.6$ の範囲で有意な非対称度が観測されており、解析データの追加および解析手法の改良により高精度な最終結果を求めつつある。また、収集された Drell-Yan 反応のデータを用いて、 $p+p$ と $p+d$ での角度分布 (Boer-Mulders 分布関数) の測定 [5] や $p+A$ での原子核効果の測定 [6] のためのデータ解析も進行中である。

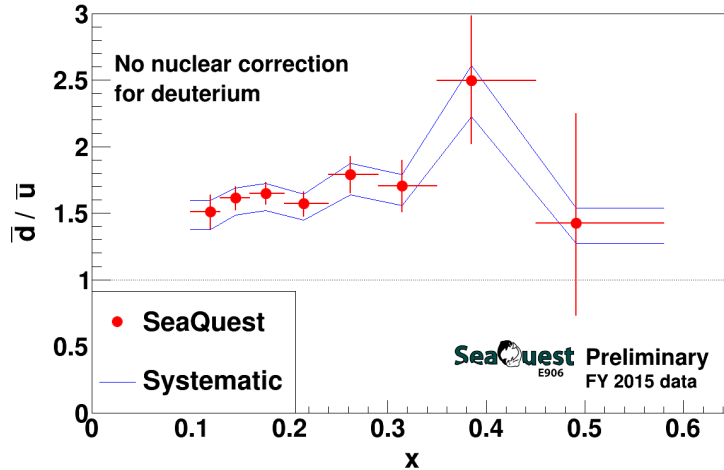


図 1: SeaQuest 実験による $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の preliminary な測定結果。

4. 今後の展望

4.2. 実験計画

4.2.2. Fermilab

SeaQuest 実験のデータ収集が一段落し、その高度化実験が準備されている。核子構造の現在の理論的フレームワーク (TMD 因子化) を検証する手法として Drell-Yan 反応の重要性は高く、偏極したビームや標的を用いた偏極 Drell-Yan 反応の測定が Fermilab において可能である。

偏極標的を用いた実験が E1039 実験として提案・準備されている。 NH_3 と ND_3 を陽子と重陽子の横偏極標的として用い、SeaQuest 実験の検出器をそのまま利用して陽子ビームとの偏極 Drell-Yan 反応を計測する。終状態ミュオン対の生成角度の非等方性 ($\sin \phi$ modulation) の大きさ A_N から、反クォークの Sivers 分布関数を抽出する。2 年間のデータ収集で達成可能な測定精度を図 2 に示す。2017 年 5 月の時点で標的単体での偏極テストは完了しており、設計通りの偏極度とその空間一様性を達成した。早ければ 2018 年後半から物理データの収集を開始する。

また、偏極ビームを用いた実験が E1027 実験として提案・準備されている。 A_N を測定するという測定手法は E1039 実験と同じだが、ビーム側を偏極させることによりクォークの Sivers 分布関数を抽出できる。陽子標的を用いた 1 年間のデータ収集で達成可能な測定精度を図 3 に示す。2012 年 11 月に Fermilab より Stage-1 approval を受けており、加速器の装置を偏極ビーム用に再設計するための

具体的な計画が検討されている。長期計画として、E1039 実験の偏極標的を併用することで二重偏極の Drell-Yan 反応の計測も可能となり、反クォークの Transversity 分布関数などを直接測定できる。

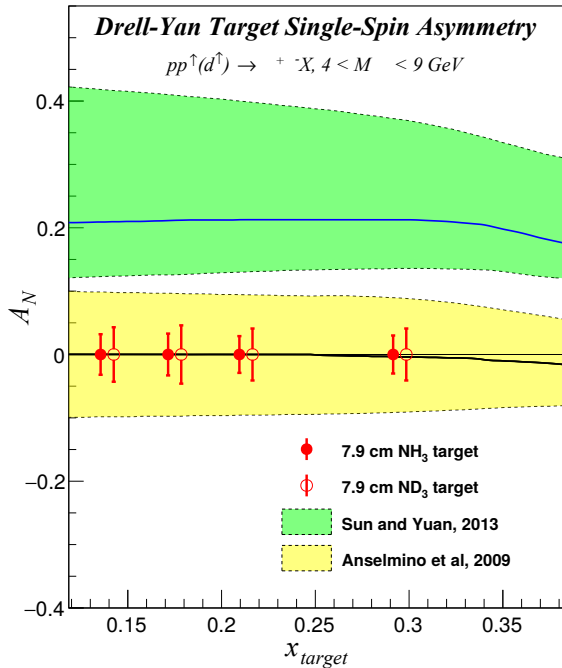


図 2: E1039 実験において陽子と重陽子の横偏縦棒が各 x での統計精度を表す。曲線とその極標的を用いて 2 年間のデータ収集を行なったバンドは、既存の SIDIS 測定を用いた理論モデルの場合に期待される A_N の測定精度。○点にデルによる予想値である。E1027 実験により、付いた縦棒が各 x での統計精度を表す。2 本の既存の測定を上回る精度でクォークの Sivers 曲線とそのバンドは、既存の SIDIS 測定を用いた 2 種類の理論モデルによる予想値である。E1039 実験により、既存の測定および理論計算のモデル依存性を上回る精度で反クォークの Sivers 分布関数を決定可能である。

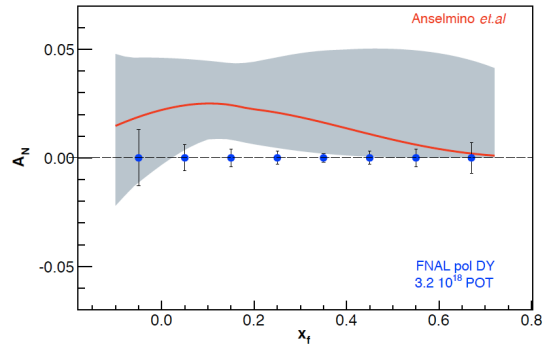


図 3: E1027 実験において陽子の非偏極標的を用いて 1 年間のデータ収集を行なった場合に期待される A_N の測定精度。○点に付いた

参考文献

- [1] M. Arneodo *et al.* [New Muon Collaboration], Phys. Rev. D **50**, R1 (1994).
- [2] A. Baldit *et al.* [NA51 Collaboration], Phys. Lett. B **332**, 244 (1994).
- [3] R. S. Towell *et al.* [NuSea Collaboration], Phys. Rev. D **64**, 052002 (2001)
- [4] W. C. Chang and J. C. Peng, Prog. Part. Nucl. Phys. **79**, 95 (2014)
- [5] L. Y. Zhu *et al.* [NuSea Collaboration], Phys. Rev. Lett. **102**, 182001 (2009)
- [6] M. A. Vasilev *et al.* [NuSea Collaboration], Phys. Rev. Lett. **83**, 2304 (1999)