

FNAL-SeaQuest 実験による ドレル-ヤン反応の $p+d / p+p$ 断面積比の測定

日本物理学会 2022 年秋季大会

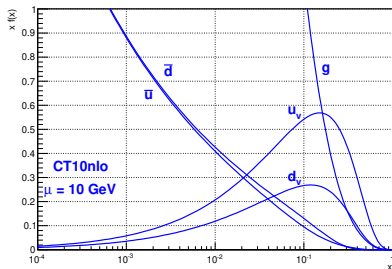
2022/09/07, 7pA521-4

中野健一, 後藤雄二, 澤田真也, 柴田利明, 永井慧, 宮地義之,
他 SeaQuest collaboration

バージニア大

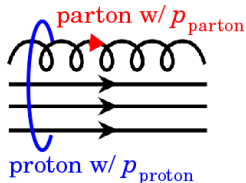
研究目的 — 核子内の反クォーク分布

- 核子 (陽子) の非偏極パートン分布関数



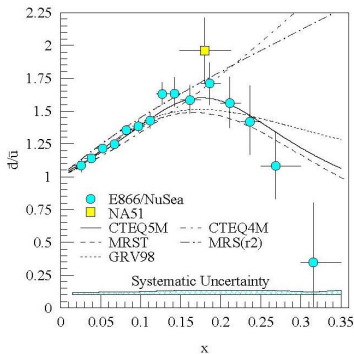
- 反クォークの分布はフレーバー対称か?

- 強い相互作用はフレーバーに依らない
- $g \rightarrow u\bar{u}$ & $g \rightarrow d\bar{d}$ による \bar{u} & \bar{d} の生成確率はほぼ等しい



反クォークのフレーバー非対称性: \bar{d}/\bar{u}

- CERN NMC ('90): 深非弾性散乱
 - Gottfried Sum: $S_G = 0.235 \pm 0.026 < 1/3$
 - $\int_0^1 \bar{d}(x)dx - \int_0^1 \bar{u}(x)dx = 0.147 \pm 0.039$ — フレーバー非対称性の発見
- $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の x 依存性の測定: Drell-Yan 反応
 - CERN NA51 ('94): $\bar{d} > \bar{u}$ at $x \sim 0.18$
 - FNAL E866/NuSea ('98): $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ for $x \in (0.015, 0.35)$



70% asymmetry!

A few % expected

FNAL-SeaQuest 実験

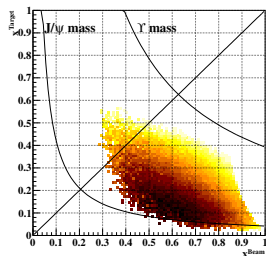
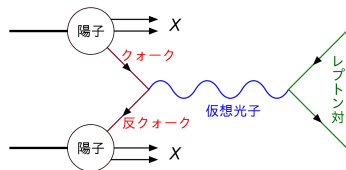
- 大きな x ($0.15 \lesssim x \lesssim 0.45$) での $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の精密測定
- Drell-Yan 反応: $p + p \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
 - 反応断面積 @ LO:

$$\frac{d^2\sigma}{dx_b dx_t} = \frac{4\pi\alpha^2}{9x_b x_t s} \sum_{q=u,d} e_q^2 \{q_b(x_b)\bar{q}_t(x_t) + \bar{q}_b(x_b)q_t(x_t)\}$$

- 前方領域での計測 \Rightarrow “ $q_b(x_b)\bar{q}_t(x_t)$ ” 項のみ \Rightarrow クォーク @ ビーム & 反クォーク @ 標的
- $p+d / p+p$ 断面積比を測定

$$\frac{\sigma_D(x_t)}{2\sigma_H(x_t)} \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\bar{d}(x_t)}{\bar{u}(x_t)} \right)$$

- 第一の結果: *Nature* 590, 561 (2021)
- 現在のデータ解析
 - 異なるデータ解析手法を用いた解析結果の検証
 - $\bar{d} - \bar{u}$ の抽出
 - 今回は現状を報告

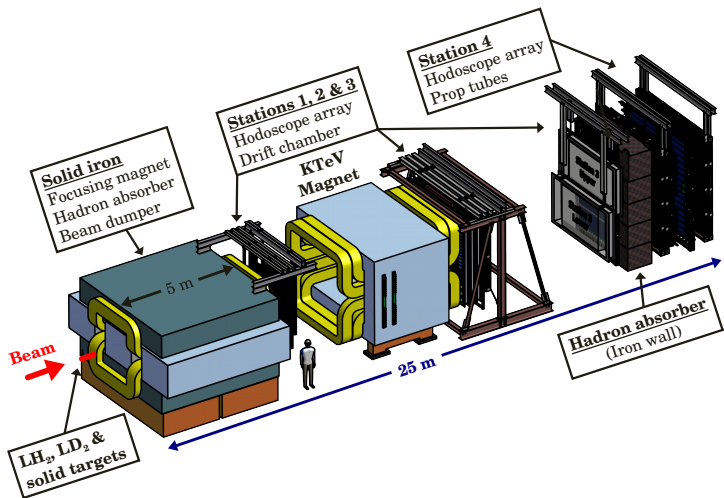


陽子ビーム @ FNAL



- Energy $E = 120$ GeV
($\sqrt{s} = 15$ GeV)
- Duty cycle
 - 5 sec for E906
 - 55 sec for ν exp.
- Bunch
 - Length: 1 nsec
 - Interval: 19 nsec (53 MHz)
 - 10^{13} protons in 5 sec

E906/SeaQuest Spectrometer



- Targets: LH₂, LD₂, C, Fe, W
- Focusing magnet (FMag) & Tracking magnet (KMag)
- Iron inside FMag, as hadron absorber & beam dump

$p+d / p+p$ 断面積比のデータ解析

補正項目

- シグナル (Drell-Yan 反応由来の $\mu^+ \mu^-$) 再構成効率の除算
- ランダム バックグラウンドの除外
 - ビーム強度の大きさに起因する強い依存性が課題

解析手法 1: “Intensity-Extrapolation” 法 — Nature 誌の結果に使用

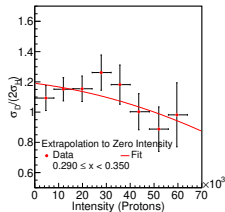
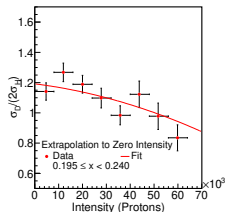
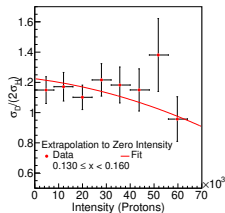
- 補正無しでの $\mu^+ \mu^-$ 数を用いた $p+d / p+p$ 比

$$\frac{Y_D(x_t, I)}{2Y_H(x_t, I)}$$
$$Y_{H,D}(x_t, I) = \frac{N_{H,D}(x_t, I)}{L_{H,D}} - \frac{N_{Empty}(x_t, I)}{L_{Empty}}$$

- ビーム強度 $I = 0$ へ外挿

$$\frac{Y_D(x_t, I)}{2Y_H(x_t, I)} = \frac{\sigma_{pd}(x_t)}{2\sigma_{pp}(x_t)} + aI + bI^2$$

- 実効的に補正完了
- 実データのみで補正可能

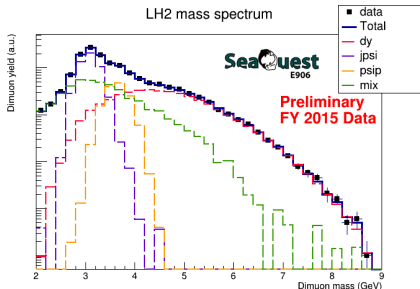


- 解析手法 2: “Mass-Fit” 法

- ランダム バックグラウンド

- 実データの複数のイベントから μ^+ と μ^- を組み合わせてランダム BG の分布形状を再現

- 不変質量分布を成分フィット



- データ解析カットの再検証

- フィット結果の MC / カット依存性の低減

- $M > 4.5$ GeV でのシグナル数を抽出

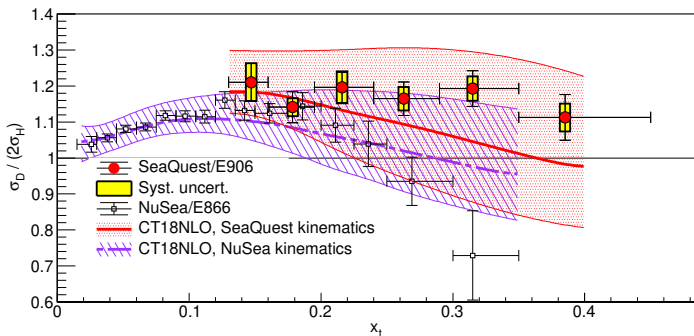
- シグナル再構成効率の除算

- 実データの検出器信号を MC シグナルに埋め込んで再構成効率を評価

- 本手法を用いた $p+d / p+p$ 断面積比の結果は投稿準備中

$p+d / p+p$ 断面積比の結果

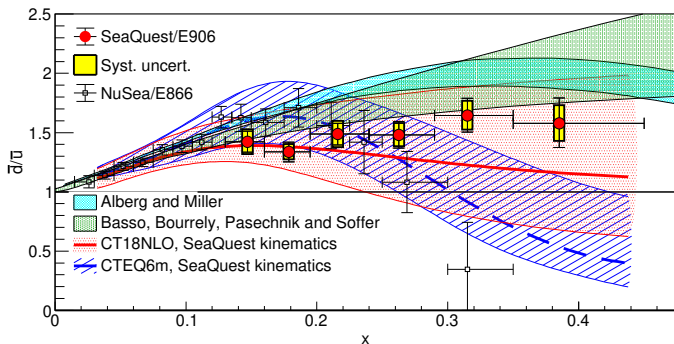
- Intensity-Extrapolation 法による結果 — Nature 590, 561 (2021)



- 測定した x_t の範囲で常に $\sigma_D / 2\sigma_H > 1$
- $x_t \sim 0.3$ で NuSea/E866 の結果と差異有り
- Mass-Fit 法による結果
 - $x_t \sim 0.3$ での結果を異なるデータ解析手法で検証
 - 系統誤差の低減の可能性

反クォークのフレーバー非対称度: \bar{d}/\bar{u}

- Intensity-Extrapolation 法による結果 — Nature 590, 561 (2021)



- 測定した x の範囲で常に $\bar{d}/\bar{u} > 1$
- $x \sim 0.3$ で NuSea/E866 の結果と差異有り
- Mass-Fit 法により $x \sim 0.3$ での結果を検証

結論

- SeaQuest 実験 @ FNAL
 - 反クォーク分布のフレーバー非対称度 $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の大 x での精密測定
 - $p + p$ & $p + d$ での Drell-Yan 反応を計測 $\implies p+d / p+p$ 断面積比
- 2 種のデータ解析手法
 - Intensity-Extrapolation 法 — Nature 誌の結果に使用
 - Mass-Fit 法
 - IE 法による $x_t \sim 0.3$ での結果を検証
 - 系統誤差の低減の可能性
- $p+d / p+p$ 断面積比 & \bar{d}/\bar{u} の結果
 - Intensity-Extrapolation 法による結果 — Nature 590, 561 (2021)
 - 測定した x の範囲で常に $\sigma_D/2\sigma_H > 1$ & $\bar{d}/\bar{u} > 1$
 - $x \sim 0.3$ で NuSea/E866 の結果と差異有り