

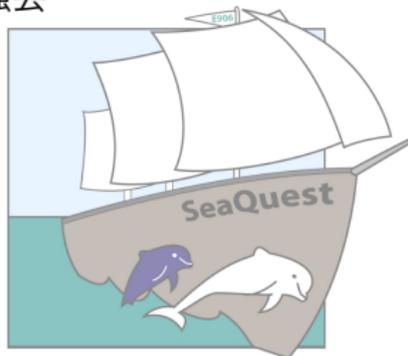
Fermilab SeaQuest 実験の最新結果

高エネルギー QCD・核子構造 勉強会

永井 慧

東京工業大学 柴田研究室

11th Dec. 2015

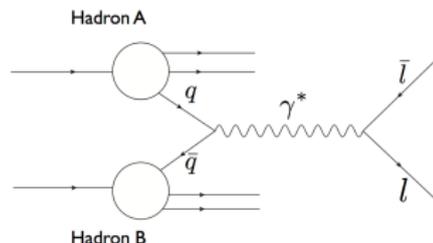


- ① SeaQuest 実験
- ② 反クォークのフレーバー非対称度
- ③ 原子核効果
- ④ まとめ

1. SeaQuest 実験

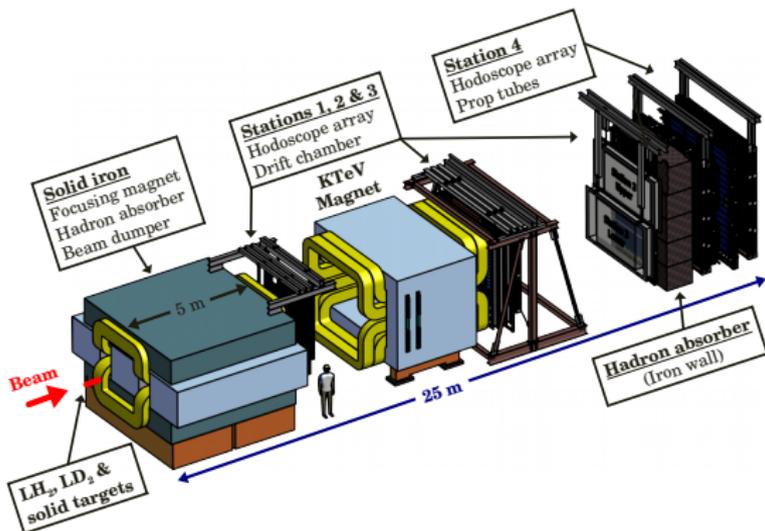
SeaQuest 実験

- フェルミ国立加速器研究所
 - ▶ Main Injector:
120 GeV ($\sqrt{s} = 15$ GeV) の陽子ビーム
- 日本、アメリカ合衆国、台湾が参加
- Drell-Yan 実験
 - ▶ $q\bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$
 - ▶ 陽子中の反クォークが必ず反応に含まれる
⇒ 反クォークの研究に最適
 - ▶ Drell-Yan 反応由来のミュオンの運動量を測定
- 研究テーマ
 - ▶ 反クォークのフレーバー非対称度
 - ▶ Boer-Mulders 関数
→ 実データ解析進行中
 - ▶ 原子核効果



- 陽子ビームのエネルギー: 120 GeV
 - ▶ 重心系エネルギー: $\sqrt{s} = 15$ GeV
- 60 秒毎に 5 秒間のビームを受け取る
 - ▶ 他の 55 秒間はニュートリノ実験用
 - ▶ ビームが来てない時間を利用して、標的の入れ替え、データの記録など
- バンチ
 - ▶ 53 MHz (19 ns^{-1})
 - ▶ 一つのバンチに平均 40k 個の陽子
 - ▶ Duty Factor (ビーム強度 I の安定性を示す指標) $\equiv \langle I \rangle^2 / \langle I^2 \rangle$:
30% in Run 2 \rightarrow 45% in Run 3

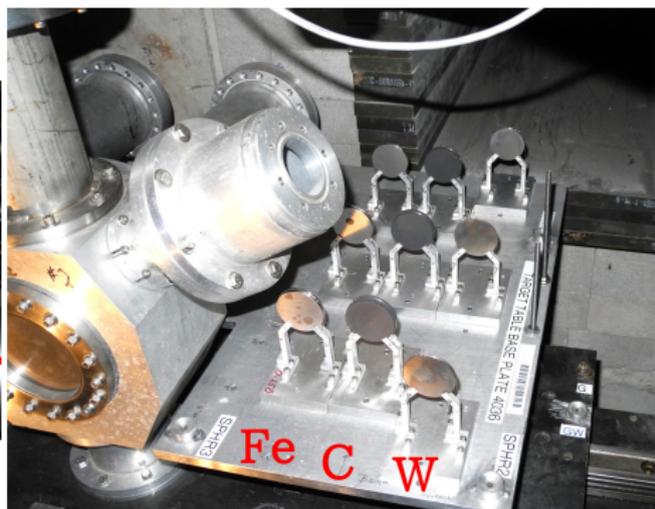
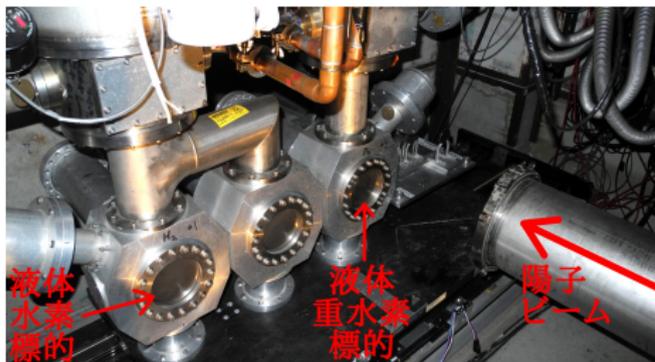
SeaQuest Spectrometer

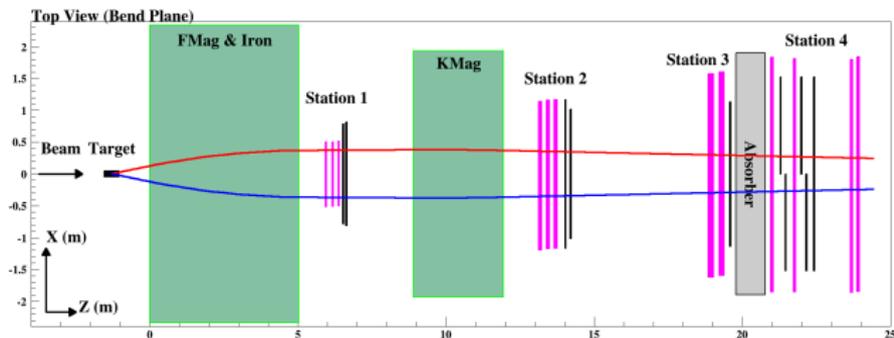


- 標的: LH₂, LD₂, C, Fe, W
- 4つのトラッキング“Stations”
 - ▶ St. 1-3: トラッキング (Drift Chambers & Hodoscope)
 - ▶ St. 4: ミューオン識別 (Drift Tube & Hodoscope)
- 収束用マグネット (1st magnet, FMAG)
 - ▶ ビームダンプとしても使用
- 解析用マグネット (2nd magnet, KMAG)

標的

- 液体標的: LH2, LD2
- 個体標的: 鉄、炭素、タングステン
- ビームが来てない時間に標的の台を動かしてビームラインに設置





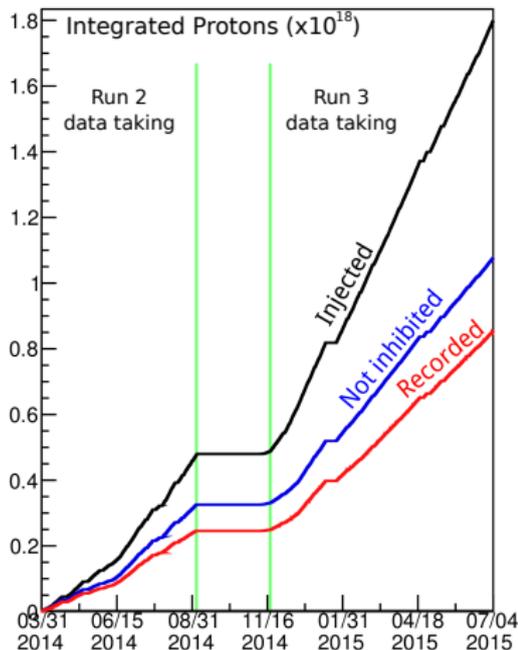
- “トリガーロードセット”: トリガーロードの組
 - ▶ “トリガーロード”: Drell-Yan 反応由来の Dimuon が通る道を hodoscope によって大まかに決めたもの
- Dimuon Trigger
 - ▶ μ^+ , μ^- それぞれのトリガーロードにかかったミュオンを少なくとも1つずつ要求
 - ▶ Drell-Yan rate (mass $\geq 4 \text{ GeV}/c^2$): 数 Hz
 - ▶ ランダムレート: $\sim 1 \text{ kHz}$

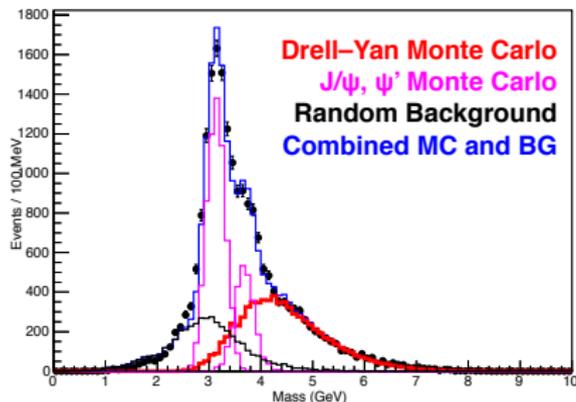
実験計画

年	月	
2009	04	検出器の建設開始
2011	08	検出器の建設完了
2012	03-04	第 1 期データ収集 (commissioning)
	05-	検出器のアップグレード
2013	11-	第 2 期データ収集
2014	09-10	加速器の調整
	11-	第 3 期データ収集
2015	07-09	加速器の調整
	10-	第 4 期データ収集
2016	?	第 4 期データ収集完了

● 第 3 期データ収集まで完了

- ▶ 0.8×10^{18} の陽子を取得
- ▶ 目標陽子数: 3.4×10^{18}





- 使用したデータ
 - ▶ 第2期データ収集で得られたデータ (最終的な統計量の3%)
- ミューオン対の不変質量分布のフィッティングに成功
 - ▶ Drell-Yan, J/ψ, ψ': シミュレーションによって評価
 - ▶ Random Background: event mixing によって評価
 - ▶ 検出器、飛跡再構成プログラムは期待通り
 - ▶ Drell-Yan 反応由来のミューオン対は 4.2 GeV 以上で支配的

2. 反クォークのフレーバー非対称度

フレーバー非対称性

- 陽子中の反クォーク

- ▶ $g \rightarrow u + \bar{u}$, $g \rightarrow d + \bar{d}$
- ▶ \bar{d} , \bar{u} の生成に関して制限はない $\rightarrow \bar{d} = \bar{u}$?... “フレーバー対称”

- Gottfried sum: フレーバー対称性をテストする初めての試み

$$S_G \equiv \int_0^1 \frac{dx}{x} [F_2^p(x) - F_2^n(x)] = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}(\bar{u}_p - \bar{d}_p)$$

$F_2^p(x)$, $F_2^n(x)$: 陽子、中性子の構造関数

- ▶ 陽子と中性子が対称的なパートン分布関数を持つことを仮定

$$u_p(x) = d_n(x), d_p(x) = u_n(x), \bar{u}_p(x) = \bar{d}_n(x), \bar{d}_p(x) = \bar{u}_n(x)$$

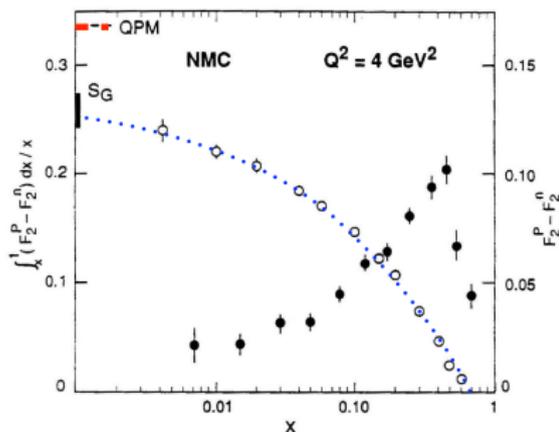
- 陽子中の \bar{d} と \bar{u} が対称的 $\rightarrow S_G = 1/3$

- NMC 実験 (CERN, 1990)

$$S_G = 0.235 \pm 0.026 < 1/3$$

$$\rightarrow \bar{d} \neq \bar{u}$$

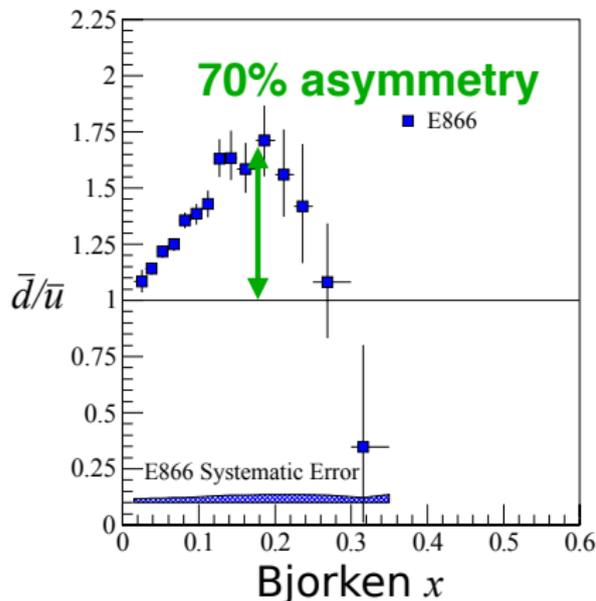
“フレーバー非対称性” の発見!!



フレーバー非対称度の x 依存性

E866 実験 (Fermilab): \bar{d}/\bar{u} の Bjorken x 依存性を測定 ($0.015 < x < 0.35$)

- フレーバー非対称度 x 依存性の初測定
- 最大で 70% の非対称度 ($x \sim 0.2$)
 - ▶ メソクラウドモデルで再現
- $\bar{d} < \bar{u}$ at $x \sim 0.3$?
 - ▶ 理論で再現できず
 - ▶ 統計誤差が大きい
 - 大統計でのさらなる研究が必要



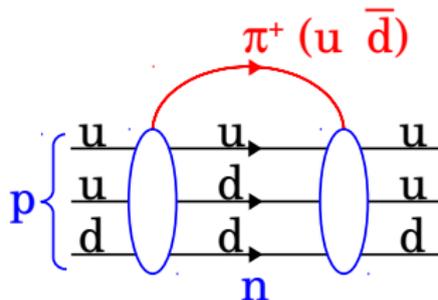
→ SeaQuest 実験が $0.1 < x < 0.45$ の範囲で精度良く測定を行う

現在最も良くフレーバー非対称度を再現

- 陽子の波動関数: メソンの波動関数を含んでいる

$$|p\rangle = |p_0\rangle + \alpha|n\pi^+\rangle + \beta|\Delta^{++}\pi^-\rangle + \dots$$

- ▶ $p \rightarrow n + \pi^+$: π^+ が \bar{d} を含む
- ▶ $p \rightarrow \Delta^{++} + \pi^-$: π^- が \bar{u} を含む
- ★ $p \rightarrow n + \pi^+$ の確率が $p \rightarrow \Delta^{++} + \pi^-$ より高い
 $\rightarrow \bar{d} > \bar{u}$



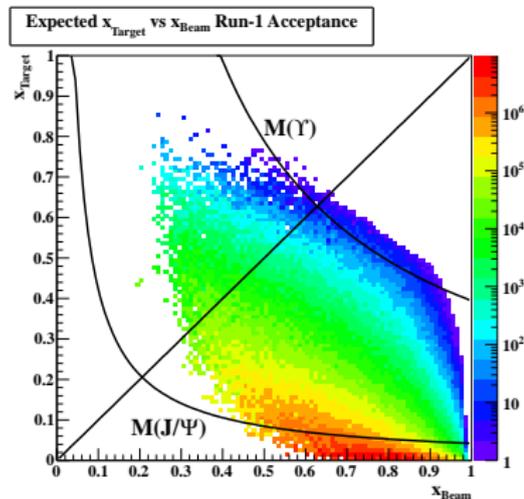
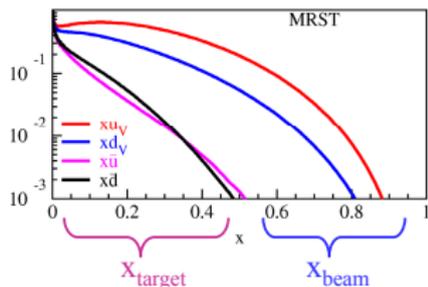
フレーバー非対称度の測定

- 陽子-陽子, 陽子-重陽子の Drell-Yan 反応を利用

$$\bullet \frac{d^2\sigma}{dx_t dx_b} = \frac{4\pi\alpha^2}{9x_t x_b s} \sum e^2 [\bar{q}_t(x_t)q_b(x_b) + \bar{q}_b(x_b)q_t(x_t)]$$

- ▶ SeaQuest 実験は前方測定 $\rightarrow x_t \ll x_b$
- ▶ $\bar{q}_b(x_b)q_t(x_t)$ は無視できる
- ▶ 反応断面積比を利用して \bar{d}/\bar{u} を導出

$$\left. \frac{\frac{1}{2} \sigma^{pd \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{\frac{1}{2} \sigma^{pp \rightarrow \mu^+ \mu^-}} \right|_{x_b \gg x_t} \approx \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\bar{d}(x_t)}{\bar{u}(x_t)} \right]$$



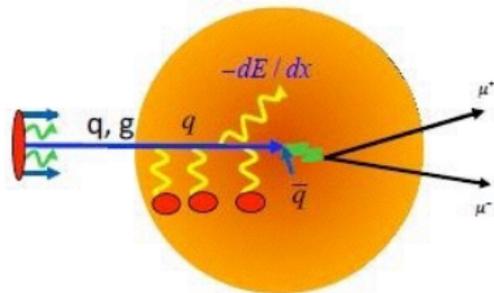
(プロット削除)

- ミューオン対不変質量 ≥ 4.2 GeV
- 系統誤差は大きい、現在改善中
 - ▶ ミューオン対再構成率のビーム強度依存性が最大の要因
- 小さい Bjorken x では E866 実験の結果と一致
- 大きい x での振る舞いの決定にはさらなる統計が必要
 - ▶ 最終的には 20 倍の統計量+より広い x_2 の感受領域

3. 原子核効果

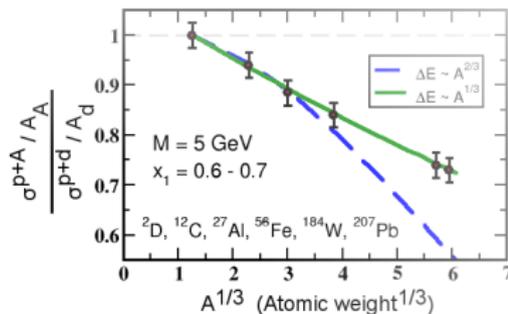
パートンエネルギー損失

- 反応前のクォークが原子核中を移動、エネルギーを失う
- Drell-Yan 過程を用いる
→ 始状態の効果のみ



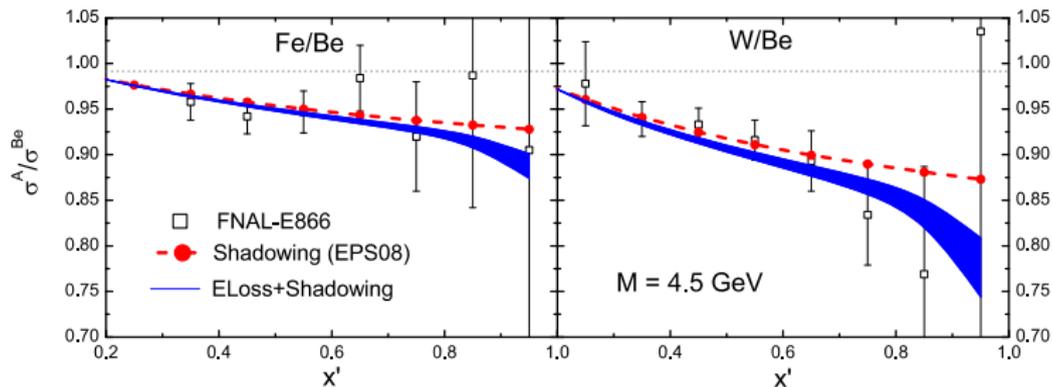
- パートンエネルギー損失 → x_{Beam} が小さくなる
 - ▶ Galvin and Milana : $\Delta x_1 = -\kappa_1 x_1 A^{1/3}$
 - ▶ Brodsky and Hoyer: $\Delta x_1 = -\frac{\kappa_2}{s} A^{1/3}$
 - ▶ Baier *et al.* : $\Delta x_1 = -\frac{\kappa_3}{s} A^{2/3}$
- 異なる原子核での反応断面積/核子数の比は大きい x_{Beam} で変化すると期待される

$$R_{pA} = \left(\frac{1}{A_A} \sigma(p + A) \right) / \left(\frac{1}{A_C} \sigma(p + C) \right)$$



E866 実験の結果

- E866 実験: $E_{\text{beam}} = 800 \text{ GeV}$, $\sqrt{s} = 39 \text{ GeV}$

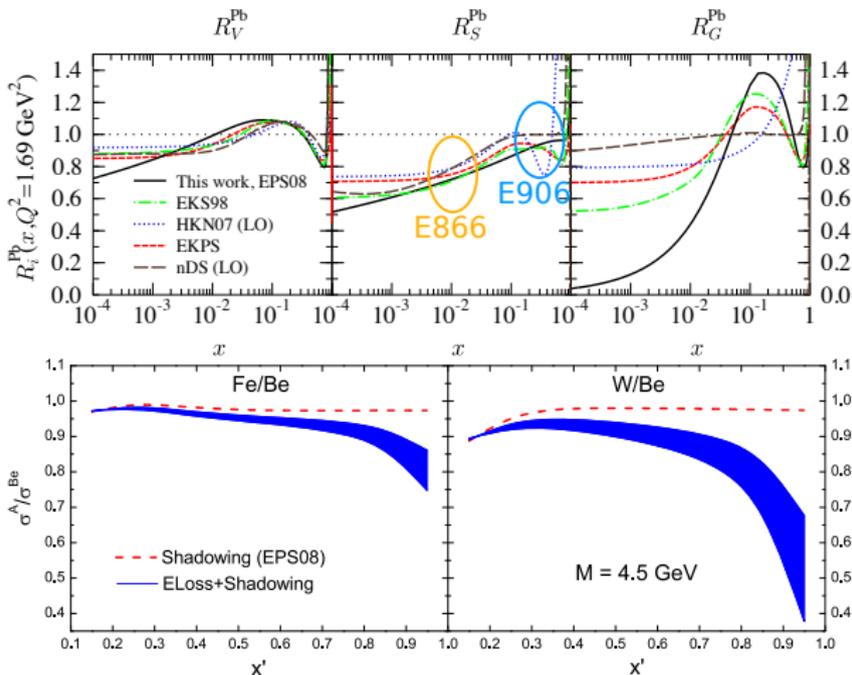


- 反応断面積比が低下
 - Shadowing の効果のみでも低下を十分に説明が可能
 - Shadowing の影響を受けないように測定することが重要

SeaQuest 実験での測定

大きな Bjorken $x_{\text{target}} (> 0.1)$, 小さな $\sqrt{s} (= 15 \text{ GeV})$

- Shadowing が小さい
- パartonエネルギー損失 $\propto 1/s$



パートンエネルギー損失を直接測定することが可能

(プロット削除)

- 第2期&第3期 (一部) データ収集で得たデータ (最終的な統計量の30%)
- ミューオン対の不変質量 > 4.2 GeV
- $x_{\text{target}} > 0.15$
- 反応断面積比の低下を確認

(プロット削除)

- ミューオン対不変質量 > 5 GeV
- $x_{\text{target}} > 0.15$, $x_{\text{beam}} > 0.6$
- 核子数 A の増加に伴って反応断面積比が低下
 - ▶ 系統誤差を改善中
 - ▶ 最終的におよそ 3 倍の統計量

- Fermilab SeaQuest 実験
 - ▶ 120 GeV の陽子ビームを用いた Drell-Yan 実験
 - ▶ 研究テーマ: フレーバー非対称性 \bar{d}/\bar{u} 、Boer-Mulders 関数、原子核効果
 - ▶ 第 3 期データ収集までに陽子ビーム 0.8×10^{18} のデータ
 - ▶ 現在第 4 期データ収集進行中
- フレーバー非対称性 \bar{d}/\bar{u}
 - ▶ 最終的な統計量の 5%
 - ▶ 小さい Bjorken x で E866 実験の結果と一致
 - ▶ 系統誤差を改善中、より広い x_{target} でのデータを取得中
- 原子核効果
 - ▶ Shadowing が小さい領域でパートンエネルギー損失を直接測定
 - ▶ 最終的な統計量の 30%
 - ▶ 反応断面積比 (Fe or W/C) が x_{beam} の増加に伴って低下することを確認
 - ▶ 反応断面積比の $A^{1/3}$ 依存性を確認
 - ▶ 系統誤差を改善中