

フェルミ研 SeaQuest 実験による 陽子+鉄からのドレル・ヤン反応の角度分布の測定

日本物理学会 2024 年春季大会

2024/03/21, 21pU1-3

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

目次

1. ドレル・ヤン反応の角度分布

- 陽子+鉄を用いた測定の意義

2. SeaQuest 実験による測定

- 実験セットアップ — ビームダンプを標的物質として利用
- データ解析

3. 測定結果 — SeaQuest preliminary

- 角度分布の係数 (λ, μ, ν) vs ミューオン対の横運動量
- 他の測定結果との比較

4. まとめと展望

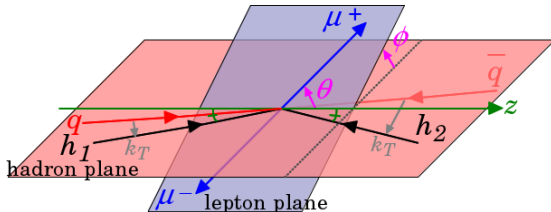
ハドロン+ハドロン → レプトン対の角度分布

- 深非弾性散乱 (DIS) の構造関数と同様の定式化
 - パートン模型やドレル・ヤン反応に限定されない
 - Chi-Sing Lam & Wu-Ki Tung, PRD 18, 2447 (1978)

$$\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} = \frac{1}{2} \frac{1}{(2\pi)^4} \frac{\alpha^2}{(Ms)^2} \left(W_T(1 + \cos^2 \theta) - W_L(1 - \cos^2 \theta) \right. \\ \left. + W_{\Delta} \sin 2\theta \cos \phi + W_{\Delta\Delta} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right)$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\lambda + 3} \left(1 + \lambda \cos^2 \theta + \mu \sin 2\theta \cos \phi + \frac{\nu}{2} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right)$$

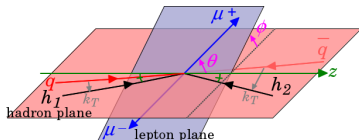
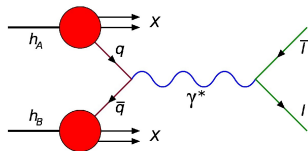
in Collins-Soper frame



Lam-Tung Relation

- Drell-Yan angles in Collins-Soper frame

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\lambda + 3} \left(1 + \lambda \cos^2 \theta + \mu \sin 2\theta \cos \phi + \frac{\nu}{2} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right)$$



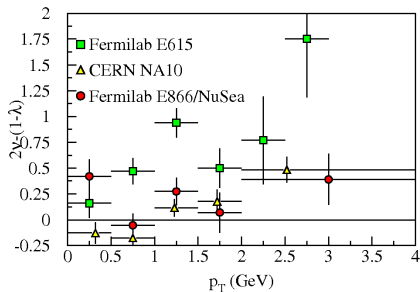
- Lam-Tung relation:

$$1 - \lambda = 2\nu$$

- Spin-1/2 nature of quarks ... analogous to Callen-Gross relation in DIS
- No NLO corrections ($\mathcal{O}(\alpha_s)$)
- Small NNLO corrections ($\mathcal{O}(\alpha_s^2)$)

固定標的実験による測定

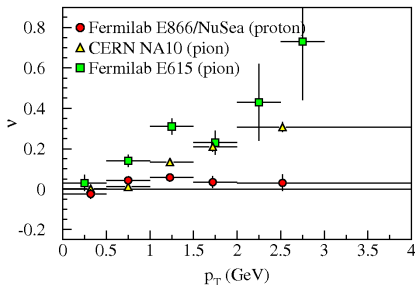
- $2\nu - (1 - \lambda)$



- With π^- beam

- Lam-Tung relation **violated!**
- Large ν

- $\nu \dots \cos 2\phi$ dependence



- With p beam

- Lam-Tung relation violated **weakly?**
- Small ν

SeaQuest 実験による角度分布の測定

- ドレル・ヤン反応の角度分布が含む情報

- QCD 高次項の効果

- 角度分布係数 (λ , μ , ν) の大きさと P_T 依存性

- Boer-Mulders 分布関数 h_1^\perp

- With π beam:

$$\nu \propto [\text{valence } h_1^\perp \text{ in } \pi] \times [\text{valence } h_1^\perp \text{ in } p]$$

- With p beam:

$$\nu \propto [\text{valence } h_1^\perp \text{ in } p] \times [\text{sea } h_1^\perp \text{ in } p]$$

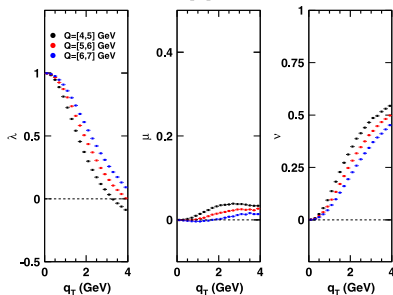
- SeaQuest 実験による測定

- 陽子ビームの新たなデータ

- 標的として(重)陽子に加えて原子核(鉄)を利用

⇒ 既存の $p + p$ (NuSea) や $\pi + W$ (NA10, E615) との総合解析

NLO pQCD (PRD99, 014032)
SeaQuest p+p at 120 GeV

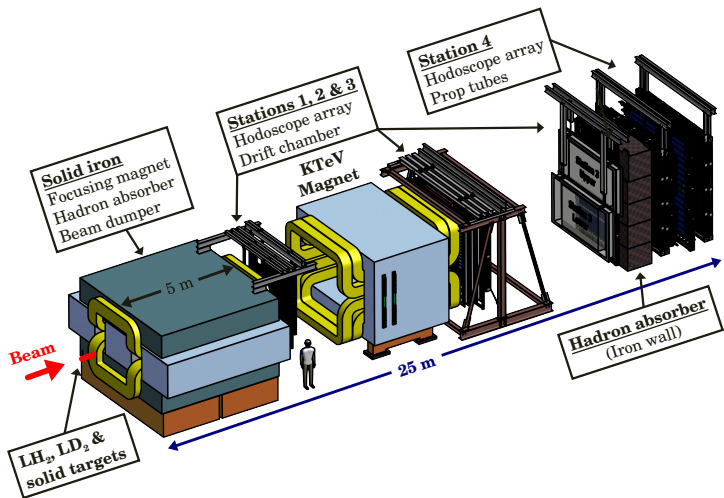


陽子ビーム @ FNAL



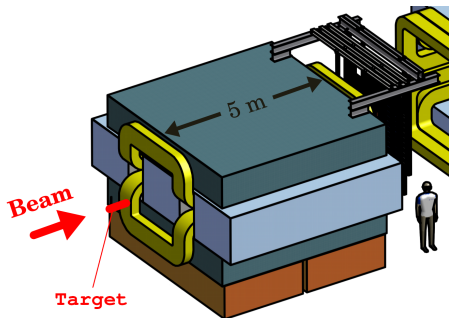
- Energy $E = 120$ GeV ($\sqrt{s} = 15$ GeV)
- Duty cycle
 - 5 sec for E906
 - 55 sec for ν exp.
- Bunch
 - Length: 1 nsec
 - Interval: 19 nsec (53 MHz)
 - 10^{13} protons in 5 sec

E906/SeaQuest Spectrometer



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

SeaQuest 実験の鉄標的と鉄製ビームダンプ



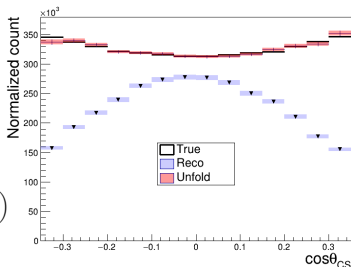
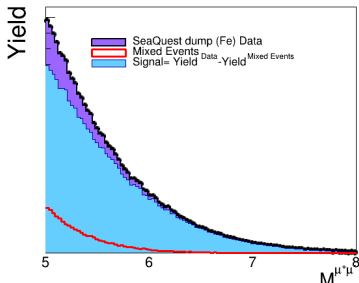
		厚さ (cm)	N of int. lengths	N of spills/cycle
鉄標的		1.905	0.114	1
ビームダンプ	全体	500		23 (常時)
ビームダンプ	解析	50	2.992	

- 角度分布の抽出には高統計が望ましい
- 上流部分の 50 cm のみを解析に使用 \implies 系統誤差の低減
- ビームダンプでの事象数は鉄標的と比べて 100 倍以上

データ解析

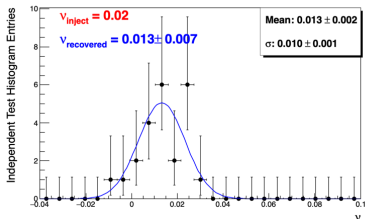
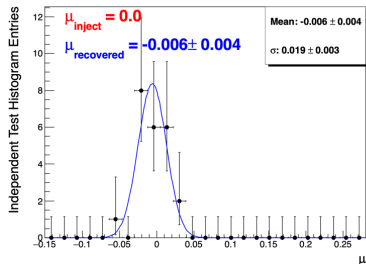
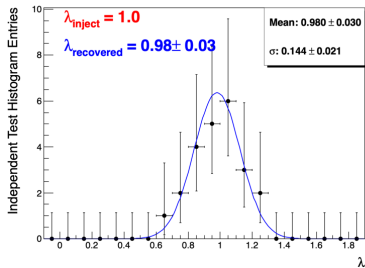
- 全収集データの前半を本解析に使用
- ビームダンプの上流部分 (50 cm) で交差する $\mu^+\mu^-$ 対を選択
- 不変質量分布 ($M > 5$ GeV)
 - ランダム BG の寄与は “Event Mixing” により評価
- 検出効率 & 分解能の補正
 - Geant4 による検出器シミュレーション
 - Unfolding 法 (RooUnfold) による補正
- 角度分布フィット \implies 係数 (λ, ν, μ) 抽出

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\lambda + 3} \left(1 + \lambda \cos^2 \theta + \mu \sin 2\theta \cos \phi + \frac{\nu}{2} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right)$$



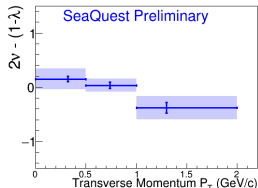
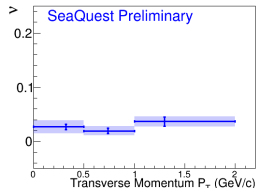
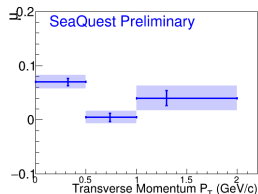
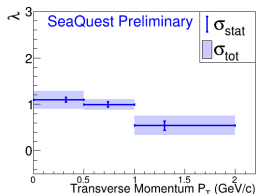
補正手法の検証

- 数種類の角度分布係数 (λ , μ , ν) を仮定して MC イベントを生成
- イベント再構成 + 補正 \Rightarrow 抽出値と真値を比較



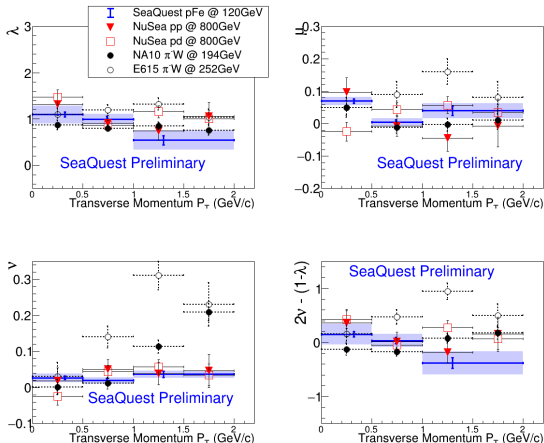
測定結果 — 陽子+鉄からのドレル・ヤン反応の角度分布

- SeaQuest 実験の preliminary 結果



- $\lambda \sim 1, \mu \sim 0.05, \nu \sim 0$
- $0 < P_T < 2 \text{ GeV}$ で弱い P_T 依存性

- 他の測定結果との比較



- SeaQuest 実験の結果は特に μ と ν でより高精度
- NuSea (E866) 実験の $p + p$ & $p + d$ の測定結果とほぼ一致

まとめと展望

- ドレル・ヤン反応の角度分布
 - QCD 高次項
 - 横運動量依存パートン分布関数 (Boer-Mulders 分布)
- SeaQuest 実験 @ フェルミ研
 - 陽子+原子核での新たな測定データ
 - ビームダンプ (FMag) での反応イベントによる高統計な結果
- 測定結果
 - $\lambda \sim 1, \mu \sim 0.05, \nu \sim 0$
 - $0 < P_T < 2 \text{ GeV}$ で弱い P_T 依存性
 - 特に μ と ν でより高精度
 - NuSea (E866) 実験の $p + p$ & $p + d$ の測定結果とほぼ一致
- 展望
 - QCD 高次計算による理論予測値
 - 原子核効果の大きさの評価