

FNAL-SeaQuest 実験における 陽子ビームを用いた原子核効果の測定

第 24 回 高エネルギー QCD・核子構造 勉強会 @ 東北大
2024/07/04

中野 健一

バージニア大

アウトライン

1. 原子核効果とは

[参考] 第 23 回 勉強会など

- ▷ 深非弾性散乱 (DIS) & 核子のパートン分布関数
- ▷ 原子核効果 (EMC 効果) の発見
- ▷ 原子核効果の発生機構

2. 陽子ビームを用いた原子核効果の研究

- ▷ ドレル・ヤン反応
- ▷ 過去の測定結果
- ▷ SeaQuest 実験の目的

3. SeaQuest 実験のセットアップ

- ▷ 検出器, 標的, データ収集と解析

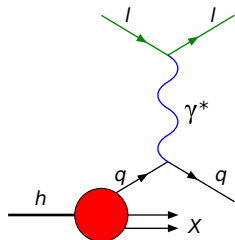
4. SeaQuest 実験の測定結果

5. まとめ

1. 原子核効果とは

深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering: DIS)

► $l + p \rightarrow l + X$



$P \stackrel{lab}{=} (M, \mathbf{0})$	陽子の 4 元運動量
$\ell = (\epsilon, \boldsymbol{\ell})$	始状態の電子の 4 元運動量
$\ell' = (\epsilon', \boldsymbol{\ell}')$	終状態の電子の 4 元運動量
$q = \ell - \ell'$	仮想光子の 4 元運動量
$\nu = P \cdot q / M$	仮想光子のエネルギー
$Q^2 = -q^2$	観測スケール
$x = \frac{Q^2}{2P \cdot q}$	Bjorken のスケーリング変数

► 反応断面積 (実験室系)

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\epsilon'} = \frac{\alpha^2}{4\epsilon^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \left(\frac{1}{\nu} F_2(x, Q^2) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{2}{M} F_1(x, Q^2) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

▷ 構造関数: $F_1(x, Q^2)$ & $F_2(x, Q^2)$

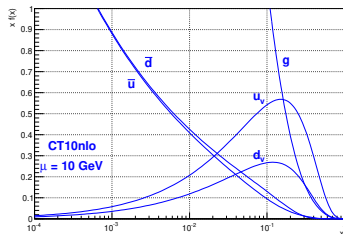
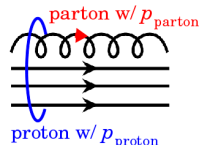
▷ $F_2(x, Q^2) = x \cdot \sum_f e_f^2 (q_f(x, Q^2) + \bar{q}_f(x, Q^2))$ in Quark Parton Model

パートン分布関数 (Parton Distribution Function)

▶ Bjorken $x = \text{“パートンが担う運動量比”} = \frac{p_{\text{parton}}}{p_{\text{proton}}}$

▶ 非偏極 PDF

- ▶ 運動量比 x を担うパートンの分布密度
- ▶ フレーバー毎: $u(x)$, $\bar{u}(x)$, $d(x)$, $\bar{d}(x)$, $G(x)$, etc.

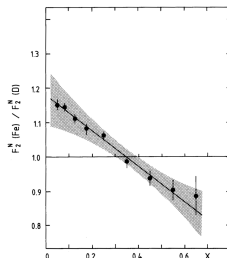
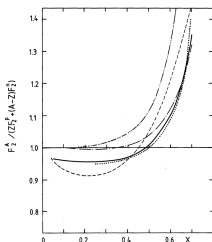


▶ PDF の総合解析

- ▶ 多くの実験による DIS の反応断面積 ($\sim$ 構造関数) の測定
⇒ PDF のフレーバー別の抽出
- ▶ 幅広い運動学的領域 (x , Q^2)
- ▶ 異なる反応過程 (SIDIS, ドレル・ヤン反応など)

EMC 効果の発見

- ▶ 原子核比: R_A
 - ▷ $R_A \equiv \frac{F_2^A(x, Q^2)}{F_2^D(x, Q^2)}$
 - ▷ $R_A \neq 1 \implies$ 原子核内核子 $\neq$ 単独核子
- ▶ 核子は“平均的”に低密度で弱束縛 $\implies R_A \approx 1$ か??
 - ▷ 距離 $1.8 \text{ fm} >$ 半径 0.9 fm
 - ▷ 束縛エネルギー $8 \text{ MeV} <$ 質量 1 GeV
- ▶ European Muon Collaboration による測定
 - ▷ フェルミ運動の効果の理論予測
 - ▷ PLB 123, 275 (1983)



広汎な原子核効果の測定

- 深非弾性散乱 赤はミューオンビーム, 青は電子ビーム

EMC at CERN, 1983- (European Muon Collaboration)

SLAC experiments : Reanalysis and new data

NMC at CERN (New Muon Collaboration)

HERMES at DESY

FNAL experiments

JLab experiments

EIC in preparation

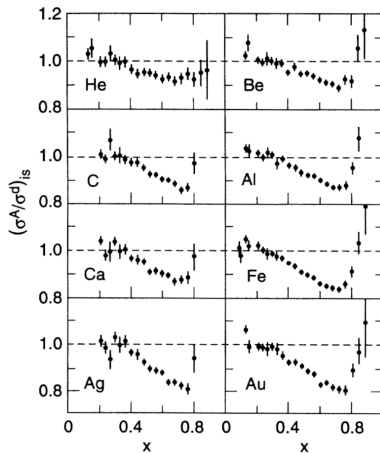
- ドレール-ヤン反応 (陽子ビーム)

E772, E866 at Fermilab

SeaQuest at Fermilab

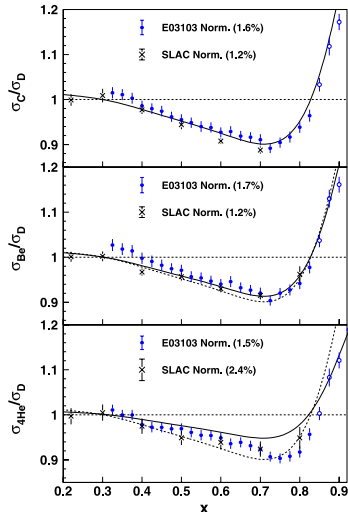
T.-A. Shibata

▶ SLAC: PRD 49, 4348 (1994)

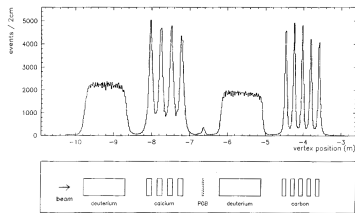
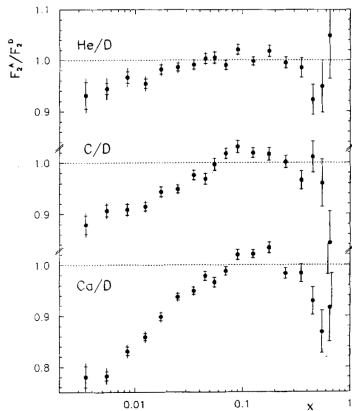


▶ 大きな x の測定

▶ JLab: PRL 103, 202301 (2009)



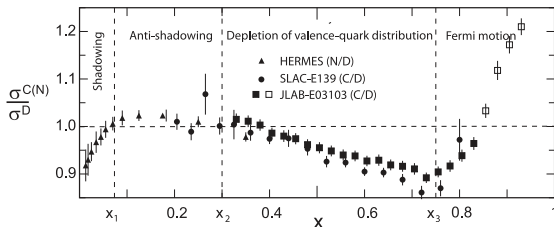
▶ NMC: ZPC 51, 387 (1991)



- ▶ 幅広い x 領域を (特に小さな x まで) 測定
- ▶ $0.1 < x < 0.3$: Anti-shadowing は 2-3% の効果

▶ 他多数の実験による異なる核種, x , Q^2 での測定

原子核効果の発生機構



- ▶ $x \gtrsim 0.75$: フェルミ運動: $F_2^A(x) = \sum_{\lambda} \int_x^{M_A/M_N} dy f_{\lambda}(y) F_2^N(x/y)$
- ▶ $0.3 \lesssim x \lesssim 0.75$: EMC 効果
 - ▷ 動的リスケーリング: $F_2^A(x, Q^2) = F_2^N(x, \xi^A Q^2)$
 - ▷ 畳み込み (Convolution): $q_{a/A} = \sum_{\tau=p,n} f_{\tau/A} \otimes q_{a/\tau} \sim \text{核子分布} \otimes \text{パートン分布}$
 - ▷ 様々なモデルの提唱 → 実験データとの比較 → モデルの更新/棄却
- ▶ $x \lesssim 0.1$: Shadowing & $0.1 \lesssim x \lesssim 0.3$: Anti-shadowing
 - ▷ $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}$ @ 原子核表面 with $q\bar{q}$ 伝播長 $\lambda = 0.2/x$ fm
 - ▷ $x \lesssim 0.1$ では $\lambda > \text{核子距離 (2 fm)}$ $\Rightarrow$ 表面の核子が奥の核子を隠す

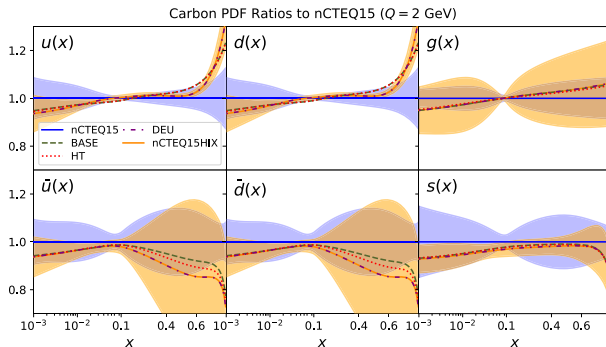
原子核 PDF

▶ 測定データの総合解析 $\Rightarrow$ 原子核 PDF (nPDF) の抽出

▶ nCTEQ15HIX — PRD 103, 114015 (2021)

▷ $xf_i^{p/A}(x, Q_0) = c_0 x^{c_1} (1-x)^{c_2} e^{c_3 x} (1 + e^{c_4 x})^{c_5}$

▷ 原子核依存性: $c_k(A) = p_k + a_k(1 - A^{-b_k})$



▷ High- x の測定データが nPDF の決定には重要

▷ 特に $\bar{u}$ & $\bar{d}$ の不定性が大きい

▶ 核子-核子 短距離相関 (SRC: Short-Range Correlation)

— PRL 133, 152502 (2024)

▷ Nuclear spectral function: $S_A(k, E) = S_A^{MF}(k, E) + S_A^{SRC}(k, E)$

▷ パーarton分布: $f_i^A(x, Q) =$

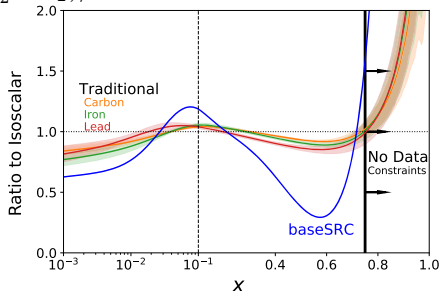
$$\frac{Z}{A} \left[(1 - C_p^A) f_i^p(x, Q) + C_p^A f_i^{SRCp}(x, Q) \right] + \frac{N}{A} \left[(1 - C_n^A) f_i^n(x, Q) + C_n^A f_i^{SRCn}(x, Q) \right]$$

▷ $f_i^{p(n)}(x, Q)$: 自由核子の PDF

▷ $f_i^{SRCp(n)}(x, Q)$: SRC 核子の PDF

▷ $C_{p(n)}^A$: SRC 状態の陽子 (中性子) の割合

▷ Ratio of $F_2^A/2$ to $(F_2^p + F_2^n)/2$



▶ 仮想パイオン交換など — PRC 90, 045204 (2014)

- ▶ 畳み込み: $q_{a/A} = \sum_{\tau=p,n} f_{\tau/A} \otimes q_{a/\tau} \sim$ 核子分布 $\otimes$ パートン分布
- ▶ 複数の原子核効果のモデル化
- ▶ パイオン交換にかかる補正

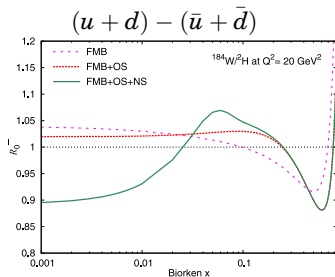
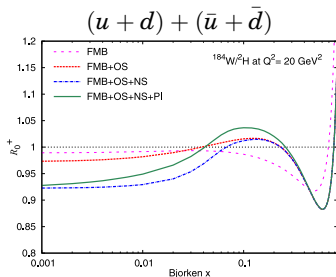
FMB = Fermi Motion & Binding

OS = Off-Shell

NS = Nuclear Shadowing

PI = Pion

- ▶ Isoscaler: $\delta_{\pi} q_{0/A}(x, Q^2) = f_{\pi/A} \otimes q_{0/\pi}$
- ▶ Isovector: $\delta_{\pi} q_{1/A}(x, Q^2) = (f_{\pi^+/A} - f_{\pi^-/A}) \otimes q_{1/\pi^+}$
- ▶ Ratio of W to D for isoscaler part ($q_0 = u + d$)



- ▶ 大きなパイオン交換の寄与 @ $x \sim 0.1$
- ▶ 反クォークに対して $x \sim 0.1$ で Shadowing が負の寄与

原子核効果の理解の状況

- ▶ EMC 効果の発見 (1983) から 40 年
- ▶ 様々な実験による広汎な測定
 - ▷ 深非弾性散乱 (DIS) @ SLAC, CERN, DESY, FNAL, JLab, etc.
 - ▷ ドレル・ヤン実験 — 後述
- ▶ 様々な理論の提唱・精査
 - ▷ 動的リスケーリング, 畳み込み定式化, etc.
 - ▷ 新たなデータによる理論モデルの更新・棄却
 - ▷ 少ないパラメータで多くのデータを再現可能に
- ▶ 課題
 - ▷ 精密測定による理論の検証 @ JLab, EIC, etc.
 - ▷ 反クォークに対する原子核効果 $\Leftarrow$ ドレル・ヤン反応

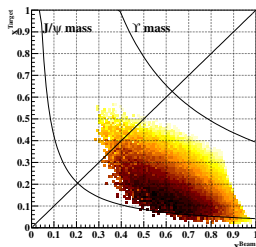
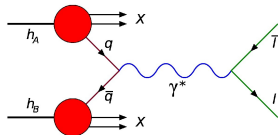
2. 陽子ビームを用いた原子核効果の研究

ドレル・ヤン反応

- ▶ 陽子 + 陽子から大きな不変質量を持つレプトン対の生成する過程: $p + p \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$
- ▶ ドレル・ヤン反応の断面積 @ LO

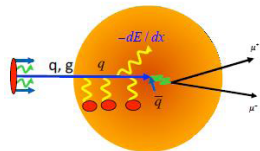
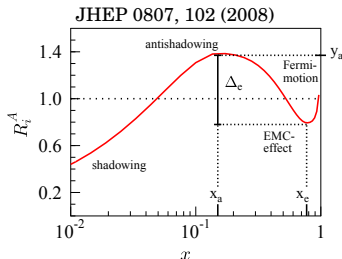
$$\frac{d^2\sigma}{dx_{beam}dx_{target}} = \frac{4\pi\alpha^2}{9x_{beam}x_{target}} \frac{1}{s} \sum_i e_i^2 \cdot \{q_i(x_{beam})\bar{q}_i(x_{target}) + \bar{q}_i(x_{beam})q_i(x_{target})\}$$

- ▶ 前方で測定すれば“ $q_i(x_{beam}) \bar{q}_i(x_{target})$ ”のみが残る — 常に反クォーク @ ターゲット
- ▶ イベントごとに q と $\bar{q}$ の区別と x の再構成が可能
- ▶ ドレル・ヤン反応の利点
 - ▶ $\bar{q}$ の選択的な測定
 - ▶ 深非弾性散乱 (DIS) との類似性
 - ▶▶ 同一物理量の相補的な測定
 - ▶ 終状態で強い相互作用の影響を受けない



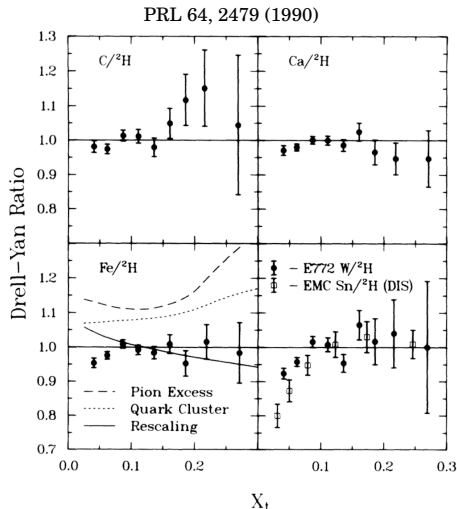
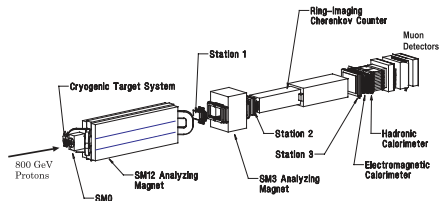
ドレル・ヤン反応における原子核効果

- ▶ 観測量: $R_A \equiv \hat{\sigma}^{p+A}(x) / \hat{\sigma}^{p+d}(x)$
= 核子当たりの反応断面積の A/d 比
- ▶ 標的側の核子における変化
= DIS ($e + p$) で観測される“原子核効果”
 - ▷ Shadowing & anti-shadowing
 - ▷ EMC 効果
 - ▷ Fermi 運動
- ▶ ビーム側の陽子における変化
 - ▷ ビーム側パートンと核物質のソフトな相互作用
⇒ 冷たい核物質中でのパートンエネルギー損失
- ▶ 終状態での相互作用は影響しない
- ▶ 発生機構を分離測定するには様々な条件での測定が必要
 - ▷ DIS での測定
 - ▷ 高エネルギー $p + A$ での測定 (Quark-Gluon Plasma at RHIC/LHC)



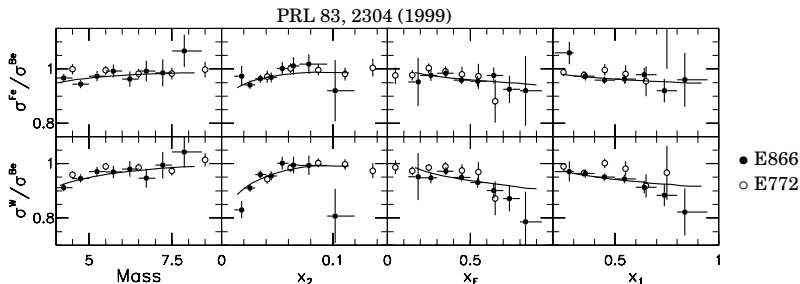
FNAL E772 実験

- ▶ 陽子ビーム @ 800 GeV
from Tevatron
- ▶ 標的: D, C, Ca, Fe & W
- ▶ $R_A \approx 1$ @ $0.1 \lesssim x_{target} \lesssim 0.3$
 - ▷ Anti-shadowing の領域で $R_A \approx 1$
 - ▷ Anti-shadowing は反クォーク (~ 海クォーク) には生じない?



FNAL E866 実験

- ▶ 陽子ビーム @ 800 GeV from Tevatron
- ▶ 標的: Be, Fe & W
- ▶ 大アクセプタンス @ 小 x_{target}



- ▶ E772 実験と一致 @ $x_{target} \gtrsim 0.05$
- ▶ $R_A < 1$ @ $x_{target} \lesssim 0.05$
 - ▶ 有意な Shadowing 効果
 - ▶ DIS で観測される効果と同サイズ

SeaQuest 実験の目的

▶ 陽子ビーム @ 120 GeV

▶ 大アクセプタンス @ 大 x_{target}

1. 反クォークに対する原子核効果: R_A vs x_{target}

- ▶ クォークと比べて小さい? — PRL64, 2479 (1990)
- ▶ $0.1 < x_{target} < 0.45$ での高精度測定

2. ビーム陽子のパートンが冷たい原子核中で受ける原子核効果

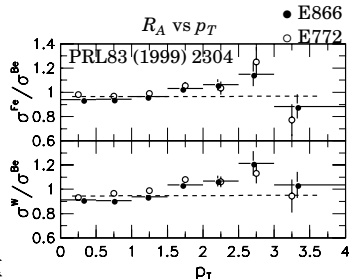
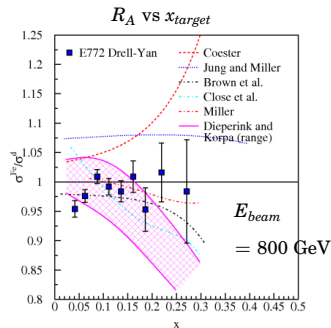
- ▶ エネルギー損失 $\Delta x \propto A^{1/3}$ or $A^{2/3}$?

2.1 R_A vs x_{beam} : エネルギー損失

2.2 R_A vs p_T : 横運動量の拡幅 (p_T broadening) — PRL83, 2304 (1999)

▶ ドレル・ヤン反応の前方測定の特特殊性

- ▶ 小さな反応断面積 $\Rightarrow$
大きなビーム強度 & 専用のアクセプタンス設計
- ▶ FNAL の大強度ビーム & スペクトロメータは貴重



3. SeaQuest 実験のセットアップ

日本語の解説:

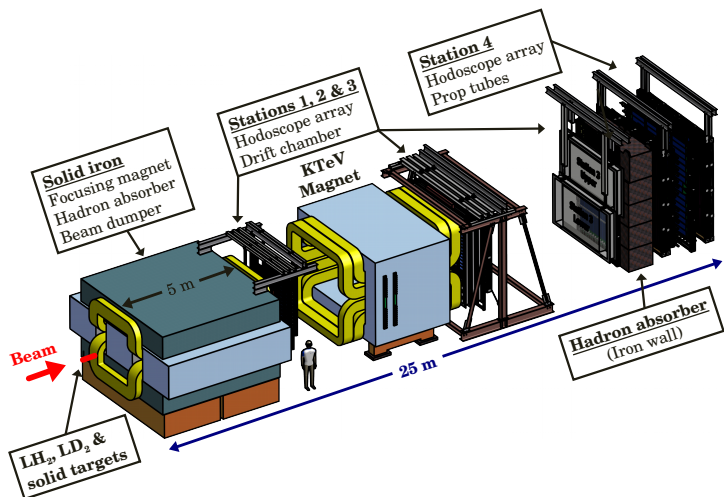
中野健一、永井慧、柴田利明、後藤雄二、澤田真也、宮地義之,
「原子核研究」第 69 巻 1 号 (2024) 72-83

3. 陽子ビーム @ フェルミ国立加速器研究所



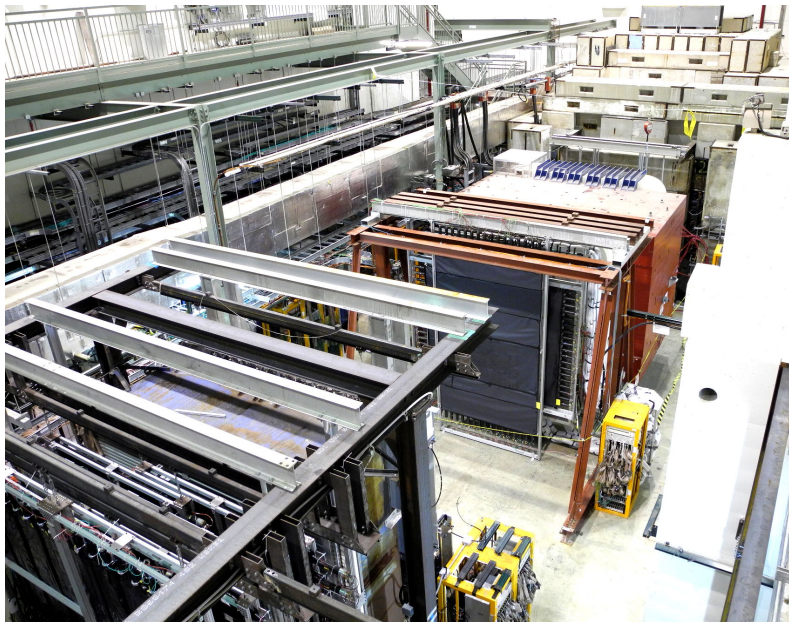
- Energy $E = 120 \text{ GeV}$
($\sqrt{s} = 15 \text{ GeV}$)

SeaQuest スペクトロメータ



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

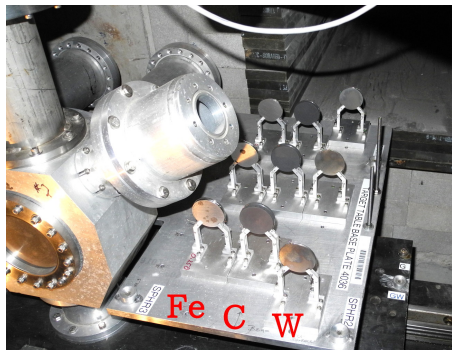
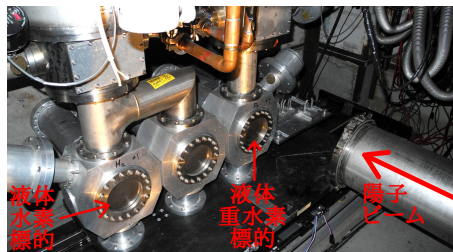
SeaQuest Hall — 2015-July-27



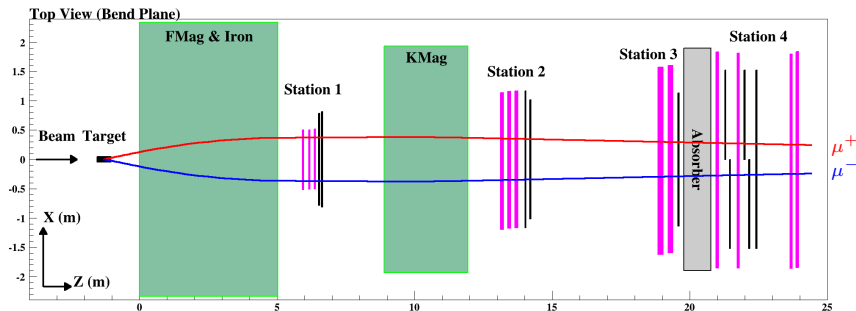
FNAL-SeaQuest 実験における陽子ビームを用いた原子核効果の測定

SeaQuest Targets

- ▶ LH_2 , LD_2
 - ▷ 50.8 cm $\sim$ 0.1 interaction lengths
- ▶ Iron, Carbon, Tungsten



▶ 典型的なドレル・ヤン反応 (平面図) ... $\text{mass} = 6 \text{ GeV}$, $\theta_{\mu^+} = 90^\circ$, $\phi_{\mu^+} = 0^\circ$



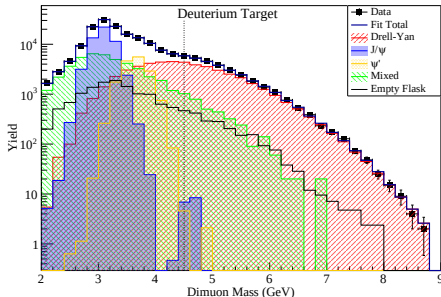
▶ ミューオン対の検出

- ▶ ホドスコープによる質量の大きなミューオン対のトリガー @ St. 1-4
- ▶ ドリフトチェンバーによる飛跡再構成 @ St. 1-3
- ▶ ドリフトチューブによる粒子識別 @ St. 4
- ▶ 検出されるミューオンの運動量は約 $40 \text{ GeV}/c$

▶ 2014-2017 年にデータ収集

ドレル・ヤン反応の再構成と識別

- ▶ 逆符号ミューオン対を含むイベントをトリガー・再構成
- ▶ 収集した物理データの前半を利用
- ▶ ミューオン対の不変質量の分布 (PRC 108, 035202)

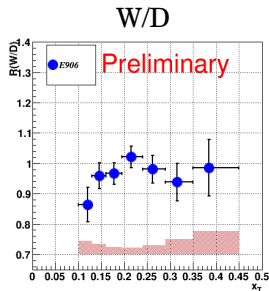
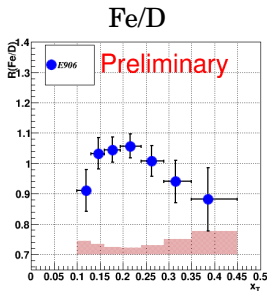
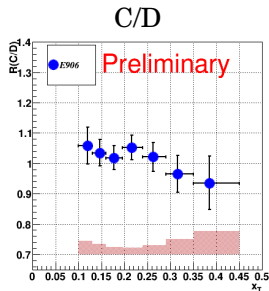


- ▶ Drell-Yan, J/ψ & ψ' 事象はシミュレーション
- ▶ 偶発同時計測の事象は“event mixing”した実データ
- ▶ ターゲット物質以外からの事象は“Empty”ターゲットの実データ
- ▶ 不変質量 $M > 4.2$ GeV の計数を抽出し断面積比を評価

4. SeaQuest 実験の測定結果

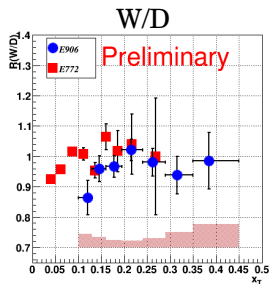
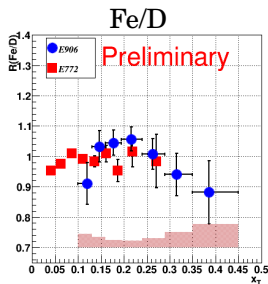
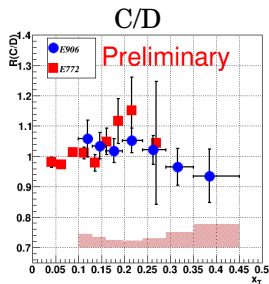
R_A vs x_{target} by SeaQuest

- ▶ 反クォークに対する原子核効果に有感



- ▶ $R_A = 1$ からの変化は数%から 10%程度
 - ▶ クォークに対する効果 ($R_A > 1$) と異なる
 - ▶ Miller による pion excess model の計算結果に近い
- ▶ EMC 効果に近い傾向 ($R_A < 1$ as $x \rightarrow 1$) も見られる

▶ E772 実験の結果との比較



▶ 測定精度の範囲で一致

▶ SeaQuest の結果は $x_{target} \gtrsim 0.2$ でより高精度

R_A vs x_{beam} by SeaQuest

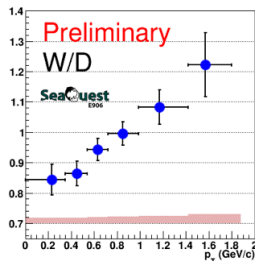
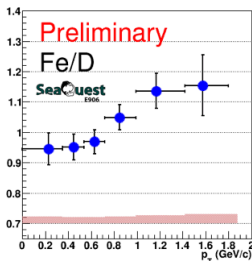
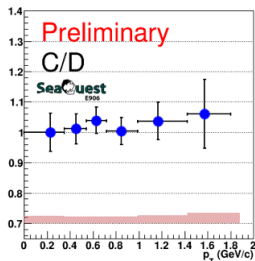
- ▶ パートンエネルギー損失の効果が支配的となる運動学的領域 ($x_{Target} > 0.15, x_{Beam} > 0.6$) を選択

(Preview plots are not archived)

- ▶ Fe & W について有意に $\hat{\sigma}^{p+A}(x)/\hat{\sigma}^{p+C}(x) < 1$
- ▶ $A^{1/3}$ 依存性からエネルギー損失過程の機構を決定 (collisional or radiative?)

R_A vs p_T by SeaQuest

- ▶ 横運動量の拡幅 (p_T broadening) に有感



- ▶ R_A が右上がり = 横運動量の拡幅
 - ▶ より大きな拡幅 @ より重い標的核
 - ▶ E772 & E866 実験の結果と一致

5. まとめ

- ▶ EMC 効果は 1983 年にミュオン深非弾性散乱によって発見
- ▶ SLAC, CERN (NMC), DESY (HERMES), FNAL, JLab での深非弾性散乱、および FNAL でのドレル・ヤン反応による精密測定
- ▶ $p + A$ ドレル・ヤン反応により原子核効果を多角的に測定可能
- ▶ SeaQuest 実験 @ FNAL
 - ▷ 120 GeV の陽子ビーム
 - ▷ LH_2 , LD_2 , C, Fe, W のターゲット
- ▶ 測定結果
 - ▷ 原子核比 R_A を x_{target} , x_{beam} & p_T の関数として測定
 - ▷ 大きな x_{target} ($\gtrsim 0.2$) で高精度
 - ▷ 特に反クォークに対する原子核 (EMC) 効果を明らかにする
- ▶ データ解析の展望
 - ▷ 後半の物理データの追加
 - ▷ 系統誤差の低減
 - ▷ 2025 年 2 月より新たな PhD 学生の主導でデータ解析が進行中