

Phi Colloquium

Dove, J., Kerns, B., McClellan, R.E. *et al.*

The asymmetry of antimatter in the proton

Nature 590, 561–565 (2021)

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03282-z>

M2 Takuro HASEGAWA



目次

- 概要
- 背景
 - パarton模型とフレーバー対称性
 - Drell-Yan反応
 - 先行実験 (NMC実験, NuSea実験, HERMES実験)
- 実験セットアップ
 - Fermilab
 - E906 SeaQuest実験
- 測定・解析
 - 測定
 - ビーム強度による補正
 - 断面積比から比 \bar{d}/\bar{u} を導出
- 結果 (Parton Distribution Function比)
- 考察
 - pion cloud model
 - statistical model
 - 他の実験への影響

概要

- 核子の構成要素であるクォークが発見されてから数十年が経過
- しかし、内部の粒子が量子力学的な束縛状態である核子のスピンなどの特性をどのように形成しているかは実験的/理論的に未解明
- valenceクォーク以外に陽子の内部には短い時間の間、クォーク・反クォーク対が存在する
- 短い間のため観測が難しいが、クォーク・反クォークが対消滅する反応を用いることで測定が可能

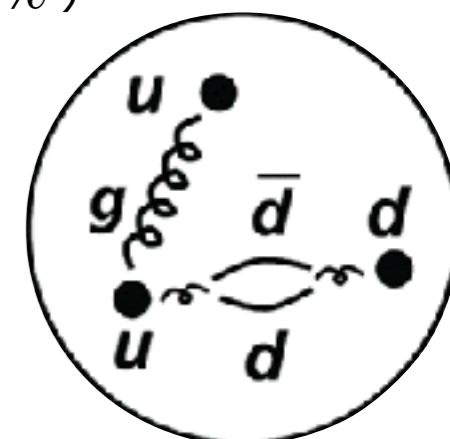
- FermilabのSeaQuest実験が陽子内部で反クォークのフレーバー対称性が破れていることを確認
- 陽子ビームを液体水素/液体重水素標的に入射させ、Drell-Yan反応で得られるミュオン対を検出
- 大きいBjorken x 領域で反アップクォーク (\bar{u}) より反ダウンクォーク (\bar{d}) の方が多かった

背景



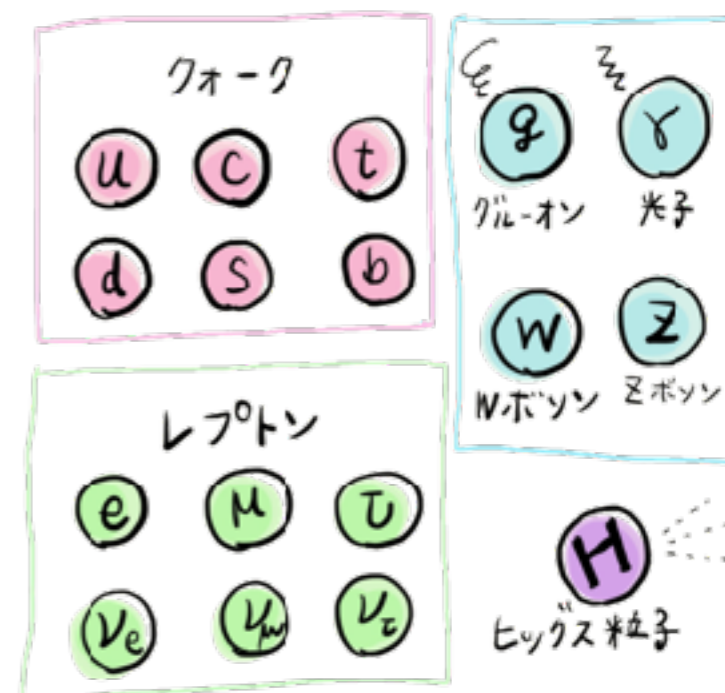
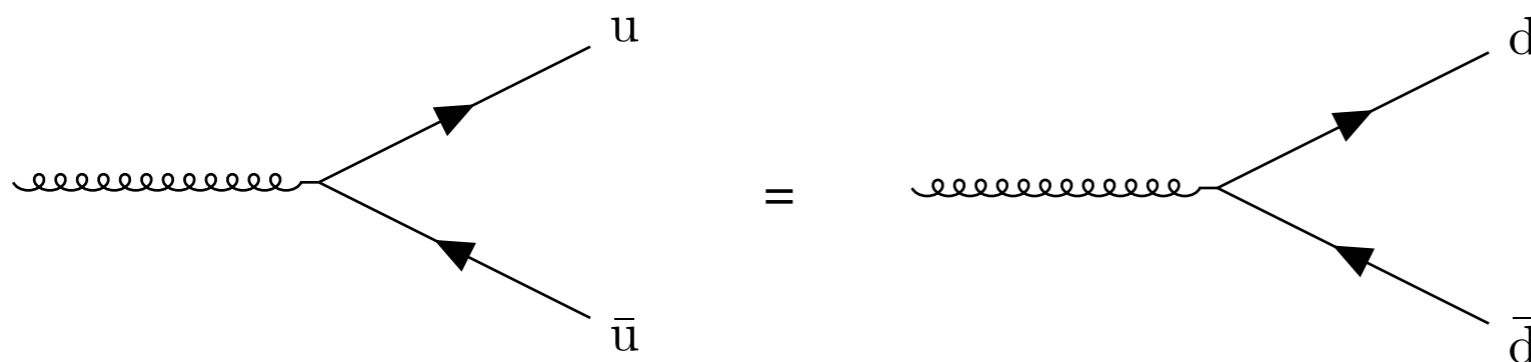
パートン模型とフレーバー対称性

- クォーク模型によると、陽子は2つの u と1つの d から構成される (valence quark)
- しかし、陽子の質量 ($938 \text{ MeV}/c^2$) に対して、クォーク単体の質量 (Higgs mass) は数 MeV/c^2
- さらに、陽子のスピンに対して、valence quarkが寄与する割合はわずか (約30%)
- より小さいスケールでは、クォーク模型では説明しきれない実験事実が存在
- クォーク, 反クォーク (まとめて sea quark), グルーオンが存在
- これらをまとめてpartonと呼ぶ



<https://www.titech.ac.jp/news/2021/048489.html>

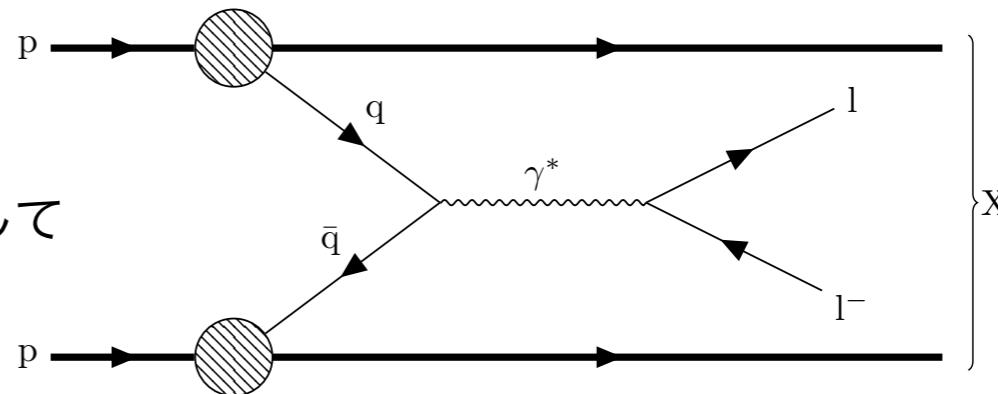
- QCD (強い相互作用の理論) によると結合定数はフレーバー (≡種類) に依存しない (フレーバー対称性)
- 厳密には u と d 質量差の分だけ異なるが、質量差 ($\sim 1 \text{ MeV}/c^2$) は陽子の質量に対して小さいため陽子中のグルーオンから $u\bar{u}$ と $d\bar{d}$ が対生成する確率はほとんど同じ



<https://teamkmisc.wixsite.com/home/dark-candy-standard-model>

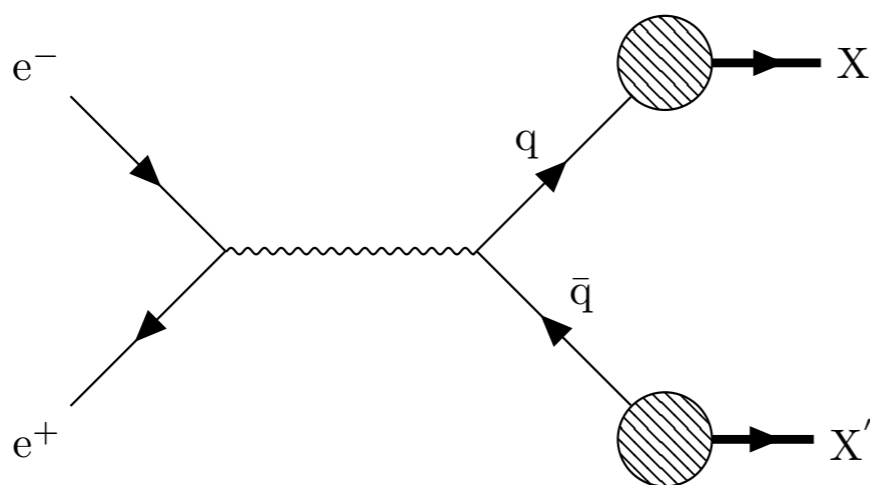
Drell-Yan反応

- クォークと反クォークが仮想光子 γ^* または Z を介してレプトン・反レプトン対に崩壊する反応
($p + p \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$)

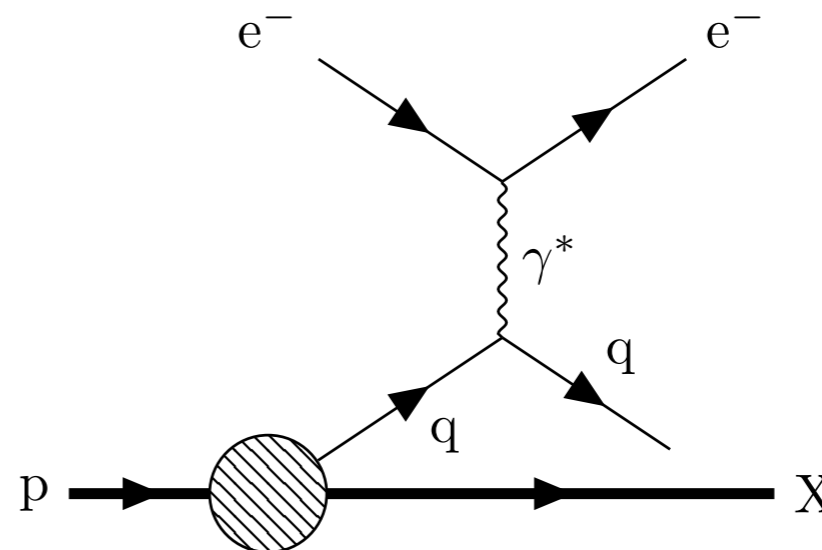


- 他の反応と比べて物質中の反クォークを調べるのに適している

電子陽電子対消滅によるハドロン生成



電子による深部非弾性散乱



- Drell-Yan反応の断面積は, parton distribution function $q(x)$ に依存する

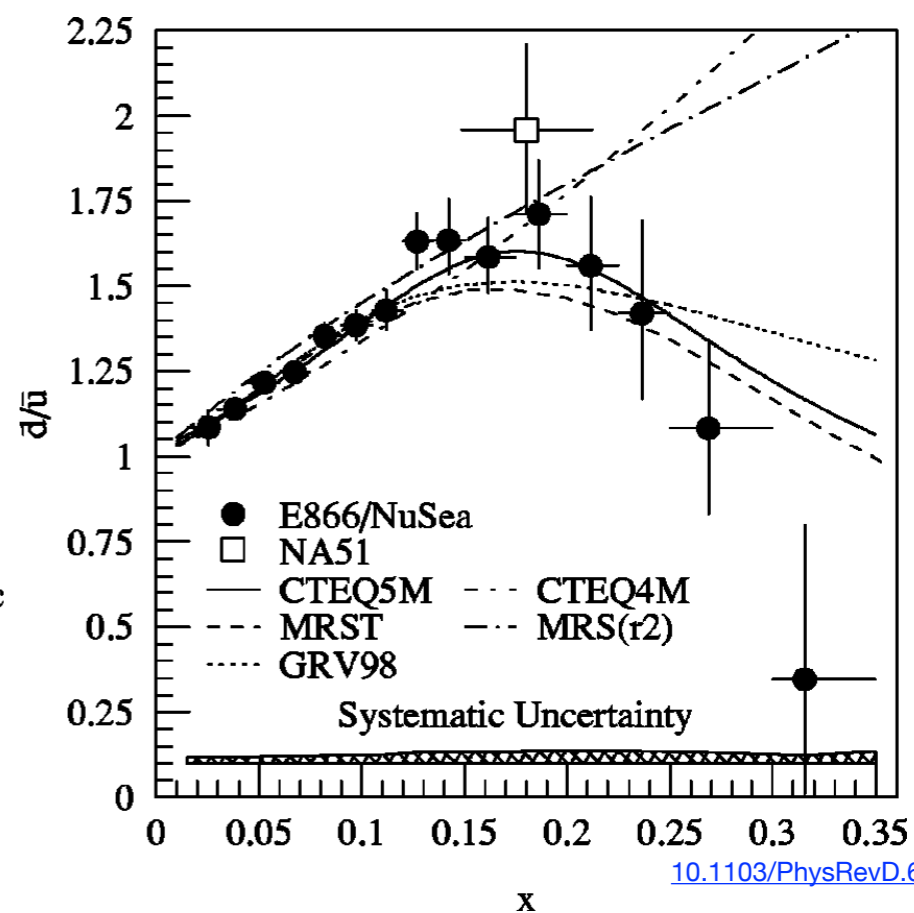
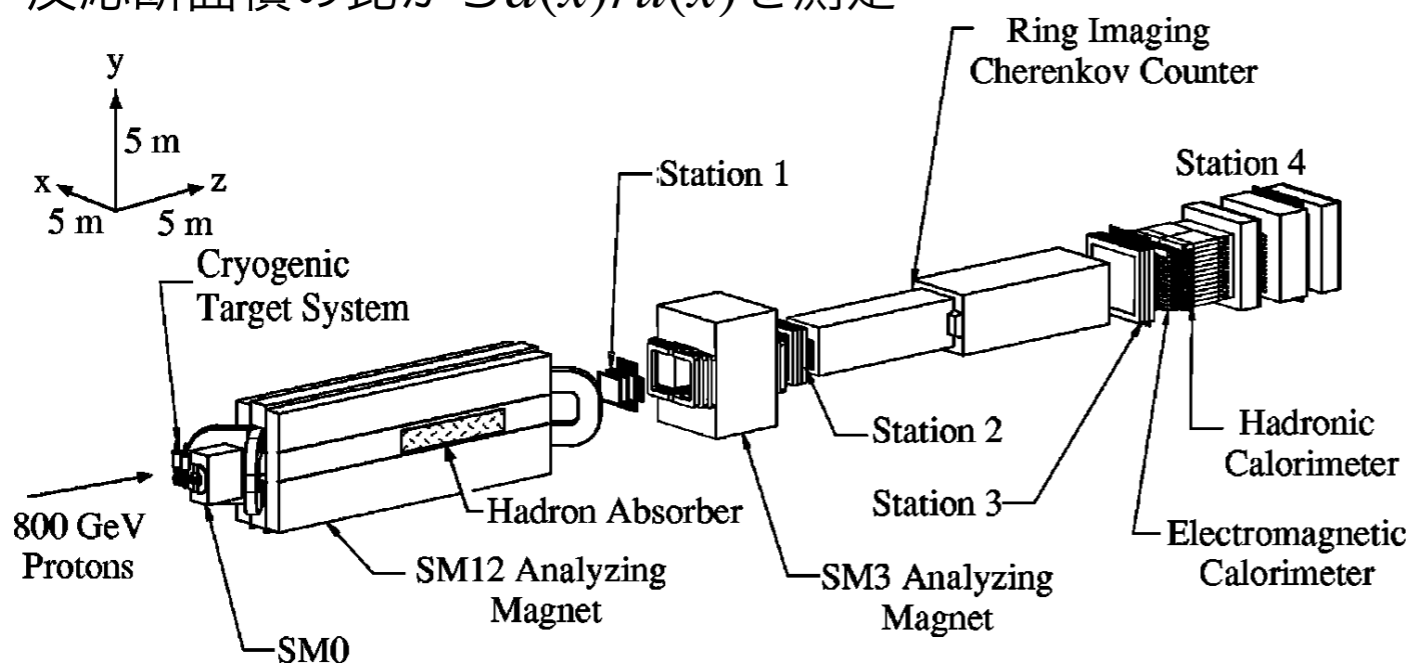
$$\frac{d^2\sigma}{dx_b dx_t} = \frac{4\pi\alpha^2}{9s x_b x_t} \sum_q e_q^2 [q(x_b)\bar{q}(x_t) + \bar{q}(x_b)q(x_t)] \quad (b, t: \text{ビーム, ターゲット})$$

- x は Bjorken の x (パートンが核子の運動量を担う割合)
- s : 重心系エネルギー, q : クォークのフレーバー, e_q : クォーク電荷

先行実験

- CERN New Muon Collaboration (NMC) が $x \sim 0.004 - 0.8$ において,

$$\int dx \bar{d}(x) - \bar{u}(x) = 0.147 \pm 0.039$$
 を確認
- (SPSから得た二次 90 - 280 GeV ミューオンビームを水素/重水素標的と深部非弾性散乱)
- CERN NA51 DYSSIS実験でDrell-Yan反応を用いて $x \sim 0.18$ で $\bar{d}(x)$ が $\bar{u}(x)$ より大きいことを確認
- Fermilab E866 NuSea実験では、水素と重水素標的に800 GeV陽子ビームを入射
 反応断面積の比から $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ を測定

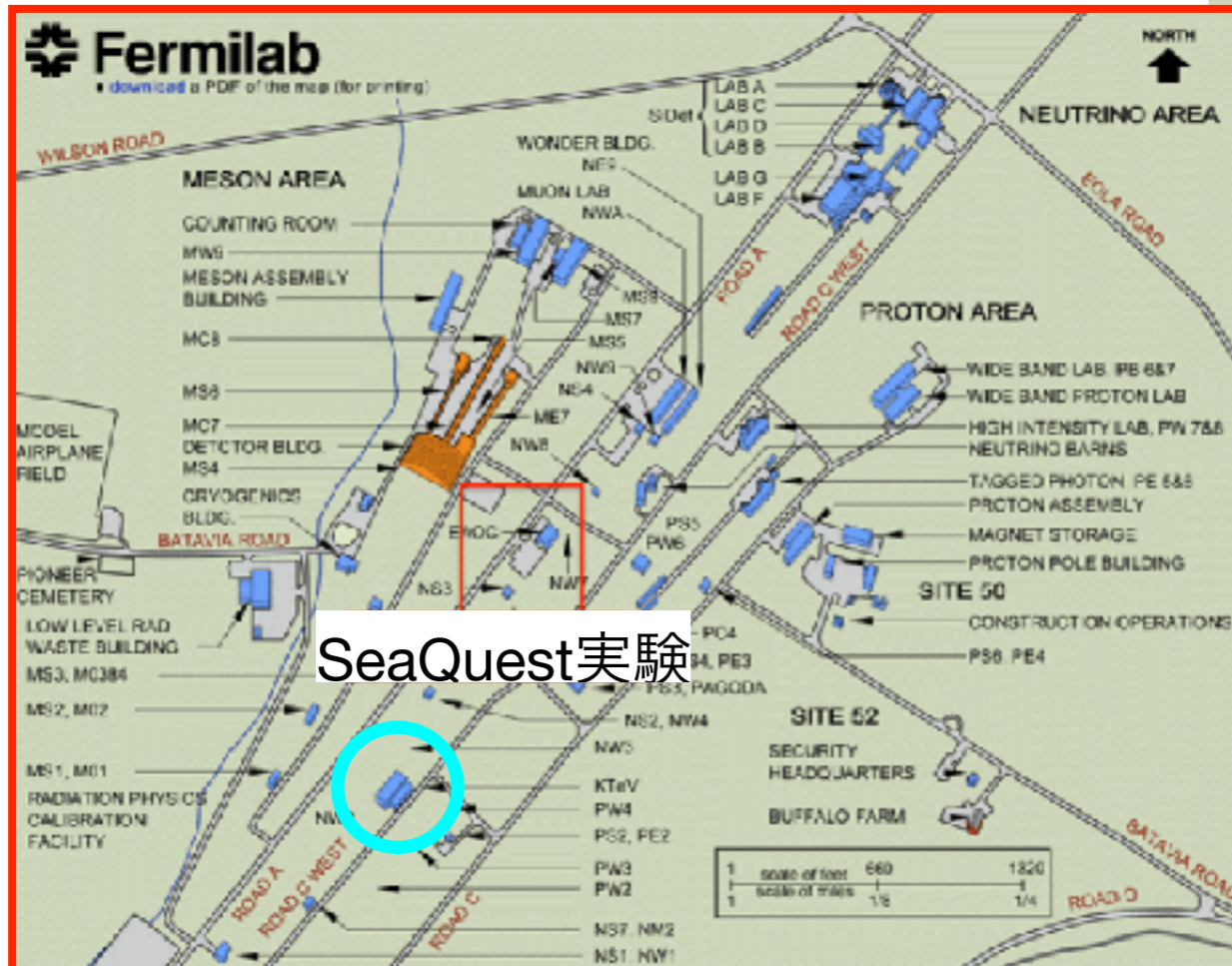
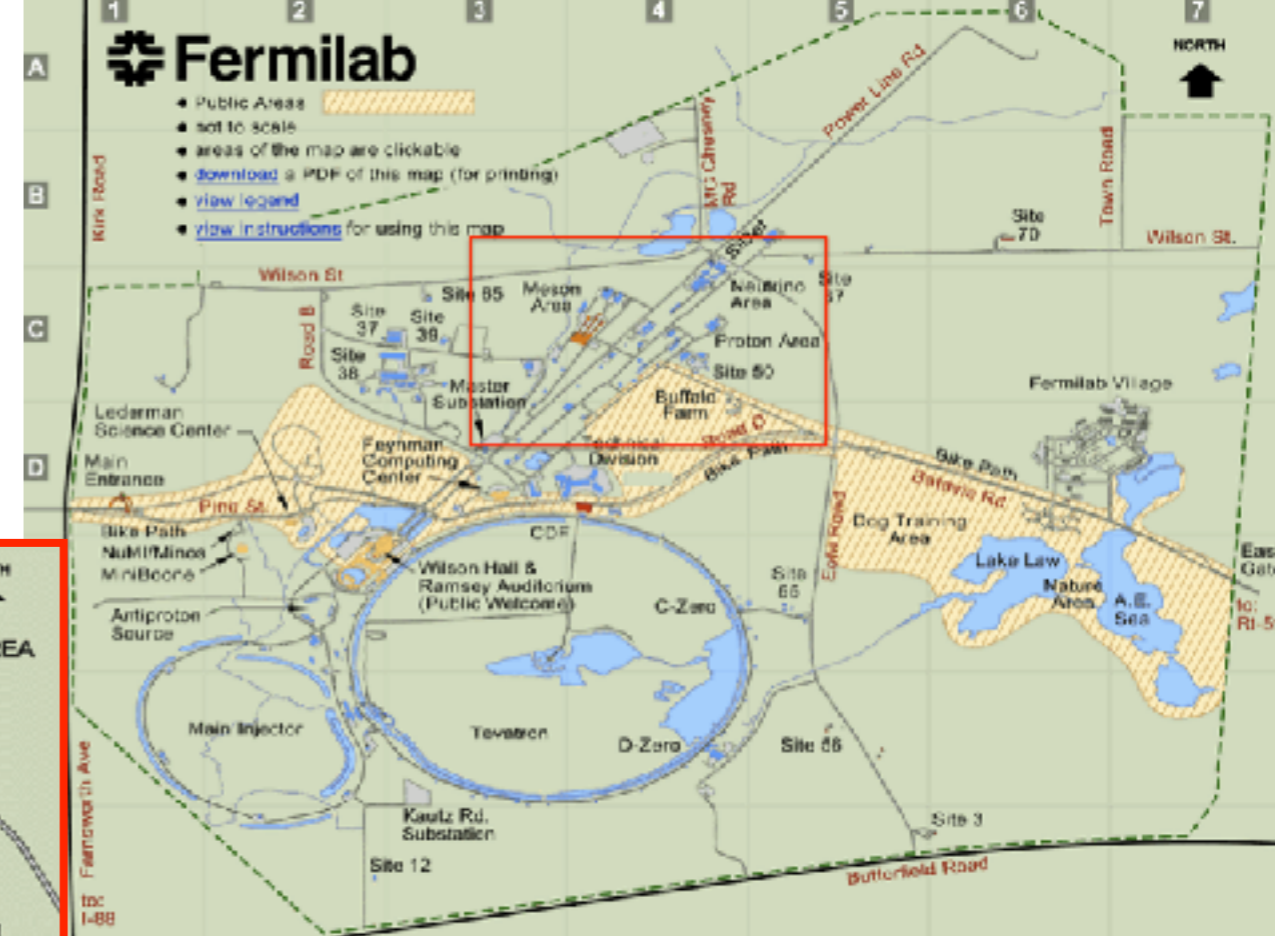


- DESY HERMES実験でも同様の結果

実験セットアップ

Fermilab (FNAL)

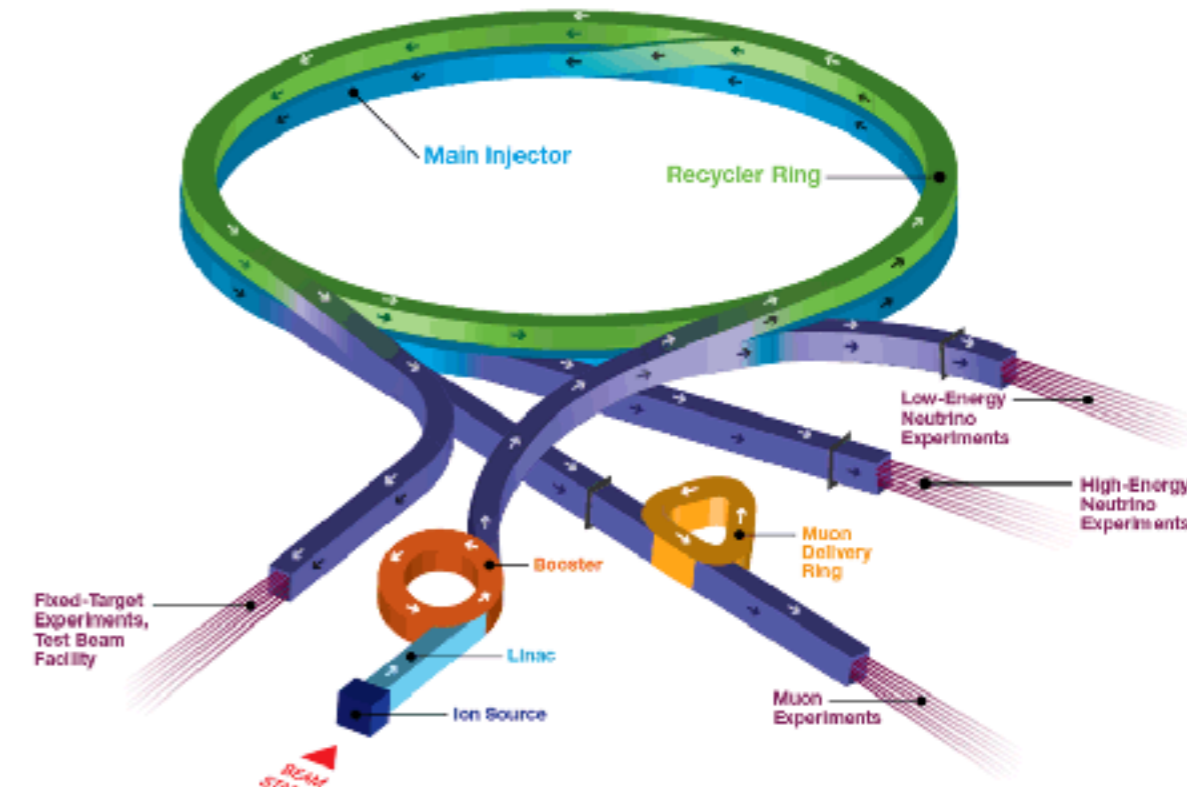
- アメリカ シカゴ近郊にある加速器実験施設
- Tevatronでtクォークが発見された
- Muon g-2, Minibooneなどの実験を行っている



SeaQuest実験

- Main Injectorから”遅取り出し” (4秒間/60秒間隔)
- 120 GeV/c²の陽子ビームを用いる

https://mu2e.fnal.gov/public/hep/computing_retired/Workshops/2012_August/trainingCenter.shtml

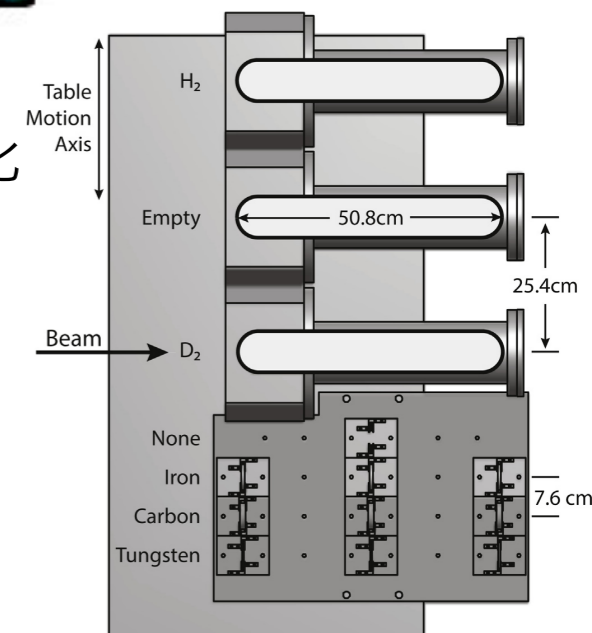


<https://www.fnal.gov/pub/science/particle-accelerators/accelerator-complex.html>

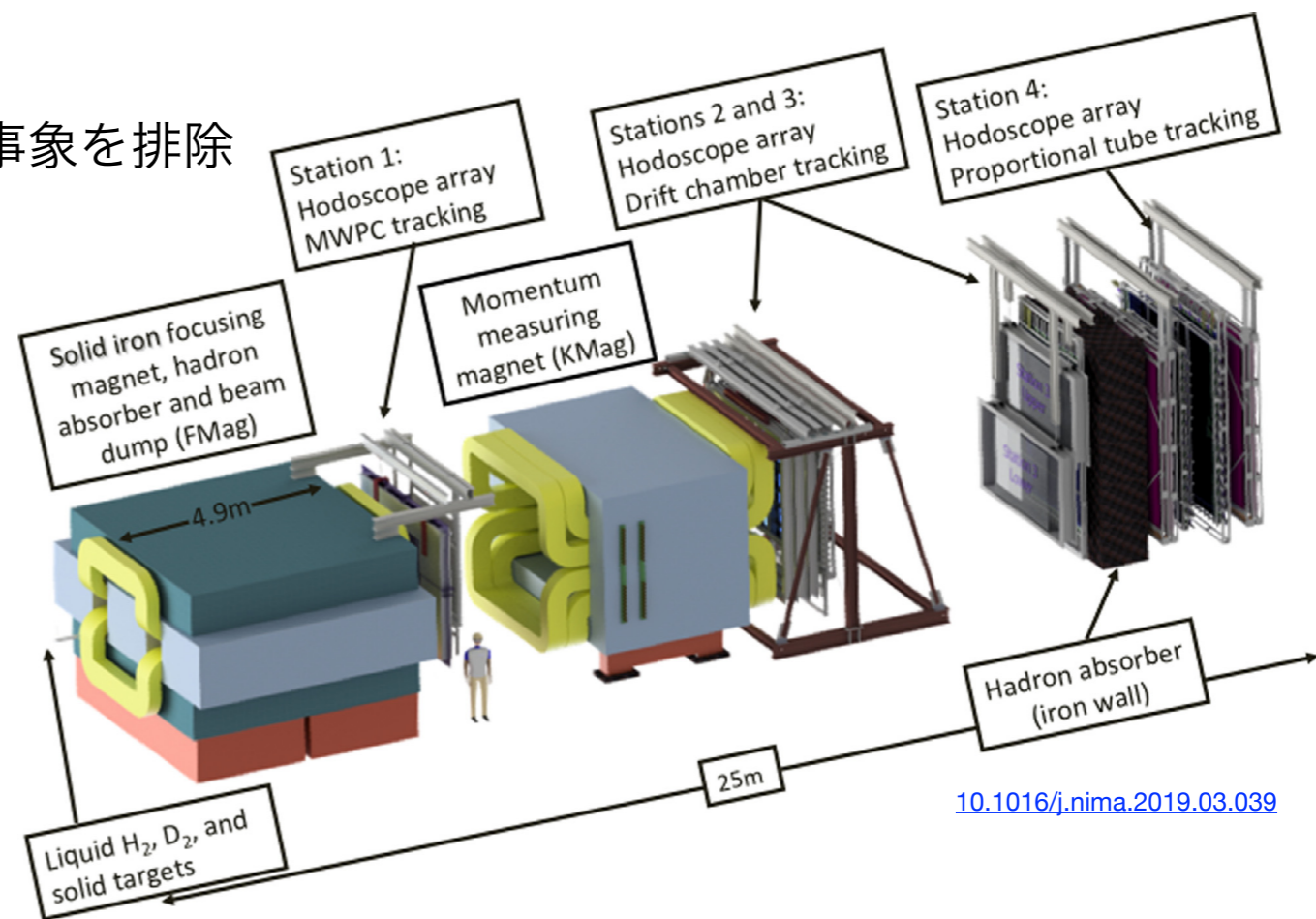
E906 SeaQuest実験



- E866 NuSea実験の後継実験
- より大きい x について $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ を測定するためにスペクトロメーターを大型化
- $120 \text{ GeV}/c^2$ の陽子ビームを液体水素/液体重水素標的に入射
- H_2 標的, D_2 標的, 空容器 (BG測定用) を入れ替えながら測定
- 2段の電磁石, ドリフトチェンバー, プラスチックシンチレーターで構成



- 1段目の電磁石で横方向にキックし, 低質量事象を排除
- 2段目で曲げることで電荷と運動量を測定
- ドリフトチェンバーで飛跡を測定
- 飛跡を再構成し標的から飛来したかを判別
- station 4にある $t \sim 1 \text{ m}$ の鉄absorberを貫通したものを μ として粒子識別



[10.1016/j.nima.2019.03.039](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.039)

測定・解析



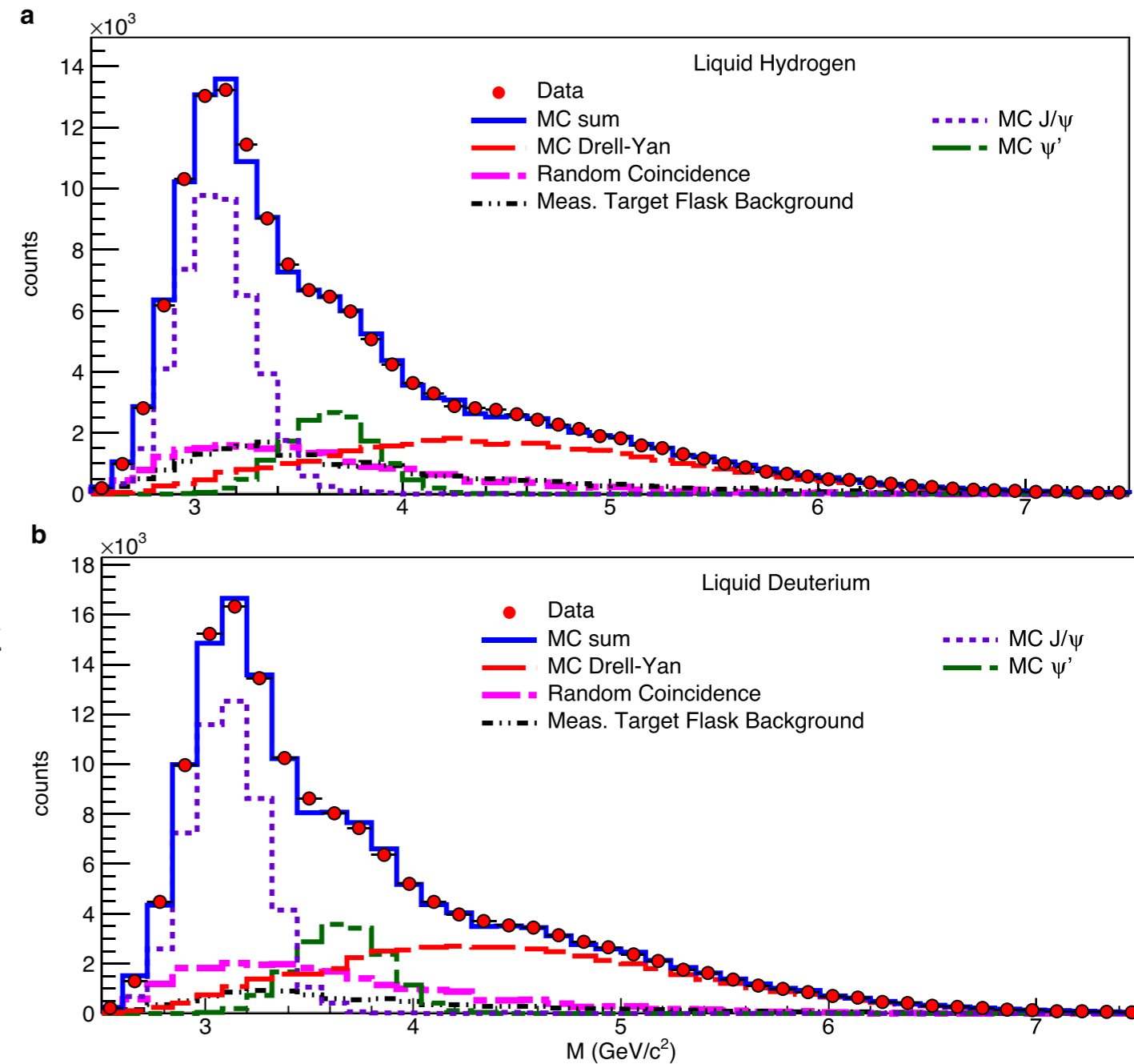
測定

- 飛跡を再構成した $\mu^+ - \mu^-$ 対の運動量 ($\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$) から, ビームと標的の x および不変質量 M を決定

$$x_b = \frac{\mathbf{p}_{\text{target}} \cdot \mathbf{p}_{\text{sum}}}{\mathbf{p}_{\text{target}} \cdot (\mathbf{p}_{\text{beam}} + \mathbf{p}_{\text{target}})}, \quad x_t = \frac{\mathbf{p}_{\text{beam}} \cdot \mathbf{p}_{\text{sum}}}{\mathbf{p}_{\text{beam}} \cdot (\mathbf{p}_{\text{beam}} + \mathbf{p}_{\text{target}})} \quad (\mathbf{p}_{\text{sum}} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)$$

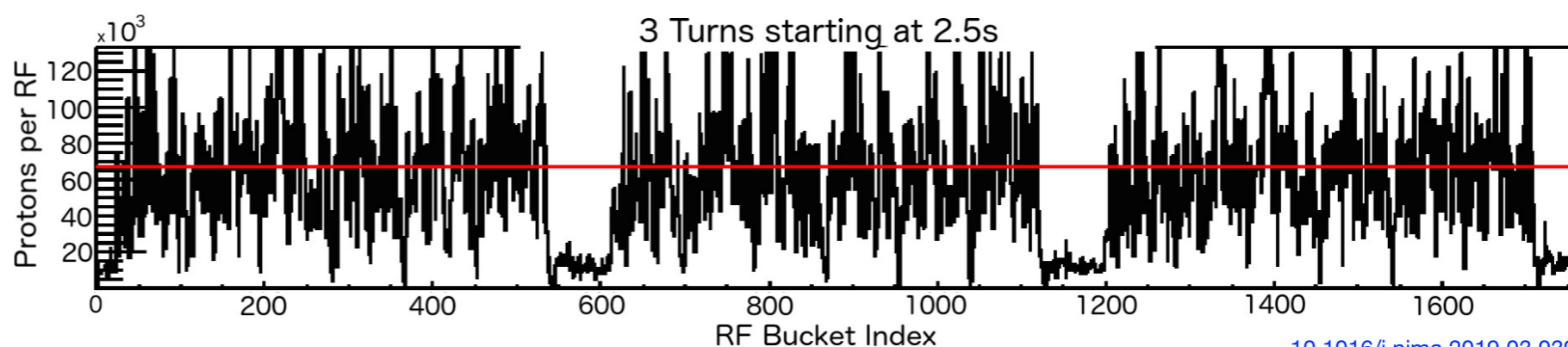
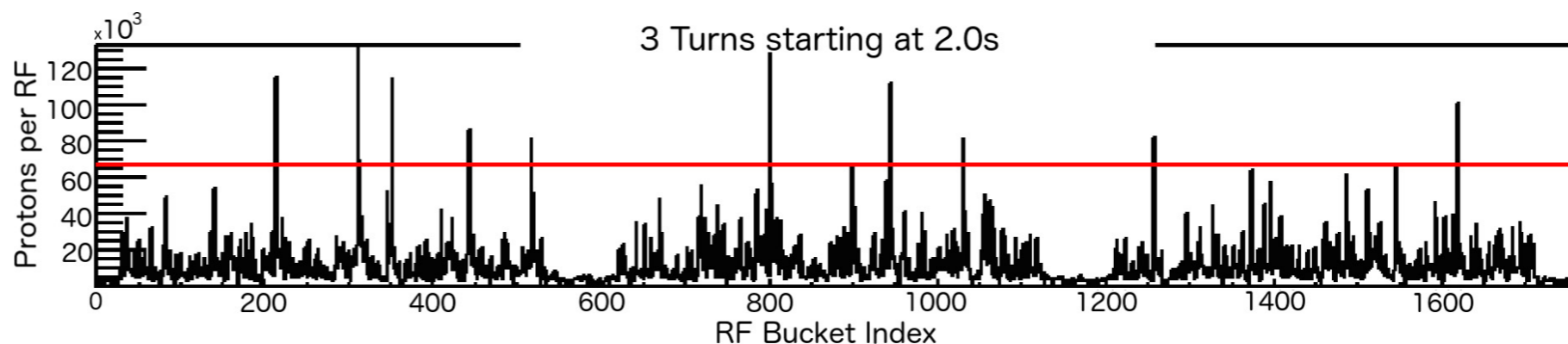
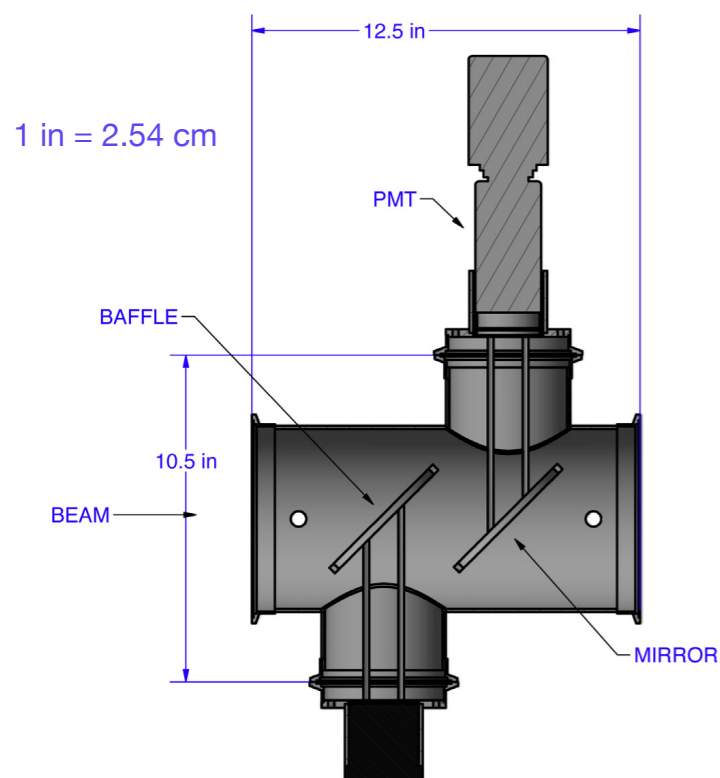
$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2|^2$$

- 液体水素と液体重水素標的のイベント数
- 低質量領域では $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ が支配的 (BR $\sim 6\%$)
- $\psi' \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ 崩壊が続く
- $m_{J/\psi} = 3.1 \text{ GeV}/c^2$ ($\Gamma = 0.21 \text{ GeV}/c^2$) と $m_{\psi'} = 3.7 \text{ GeV}/c^2$ をよく再現している



ビーム強度による補正

- SeaQuest実験に用いる陽子ビームはMain Injectorとから"遅い取り出し (slow-spill extraction) "
- 陽子ビームの強度が強すぎると, pileupや余計なBGの原因となるため 64000陽子以上のbunchをCherenkov検出器でveto (排除) する (赤線より下となる時間領域を使う)



[10.1016/j.nima.2019.03.039](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.039)

- bunchの中の陽子数によって飛跡再構成率とaccidental coincidences (偶発同時計数) が変化
- バンチ強度に依存する効果を, 重水素の収率 Y_D と水素の収率 Y_H の比を強度 I の関数として表し解析

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

- Fit関数のパラメーター数は赤池情報量規準に基づいて決定

断面積比から比 \bar{d}/\bar{u} を導出

- Drell-Yan反応の断面積の最低次の項は,

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

- Feynman momentum fraction $x_F \equiv x_b - x_t \gg 0$ (前方領域) のとき, 右辺第一項だけが生き残る

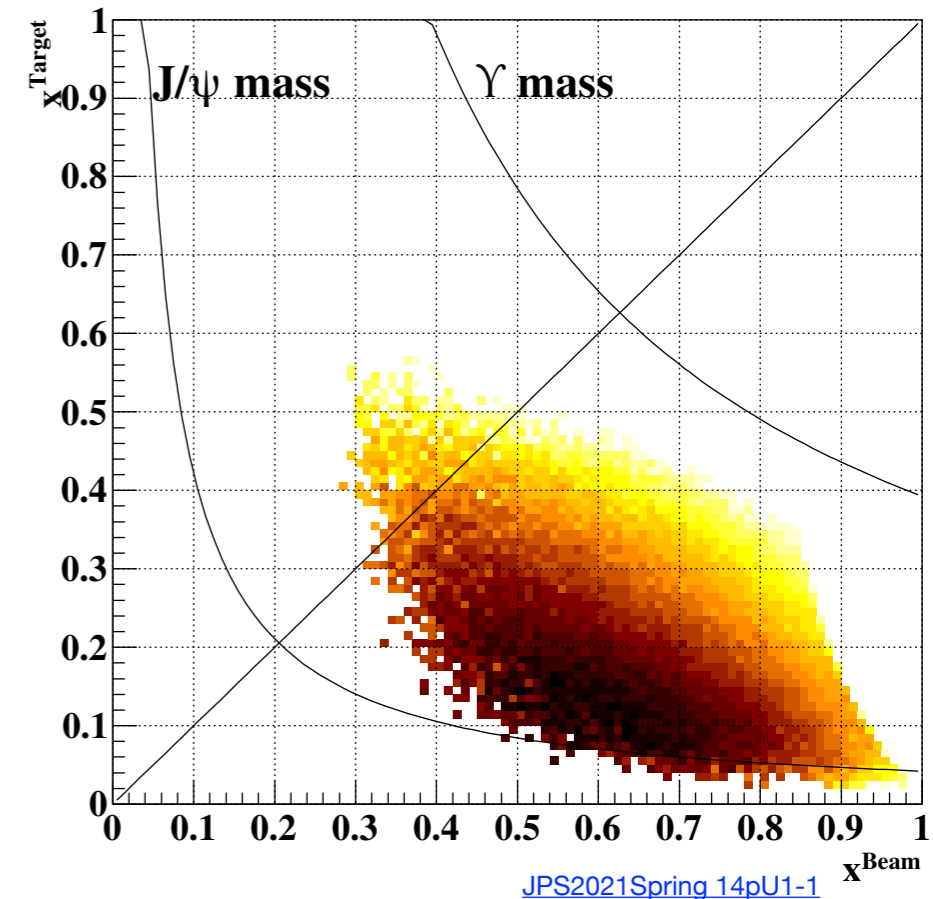
- 断面積比から直接PDF比を求めることができる

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_H} \approx \frac{\sigma_p + \sigma_n}{\sigma_p} \approx 1 + \frac{\bar{d}_p(x_t)}{\bar{u}_p(x_t)}$$

- 実際は, $x_b - x_t \gg 0$ があまり良く成立しないため精度が悪い

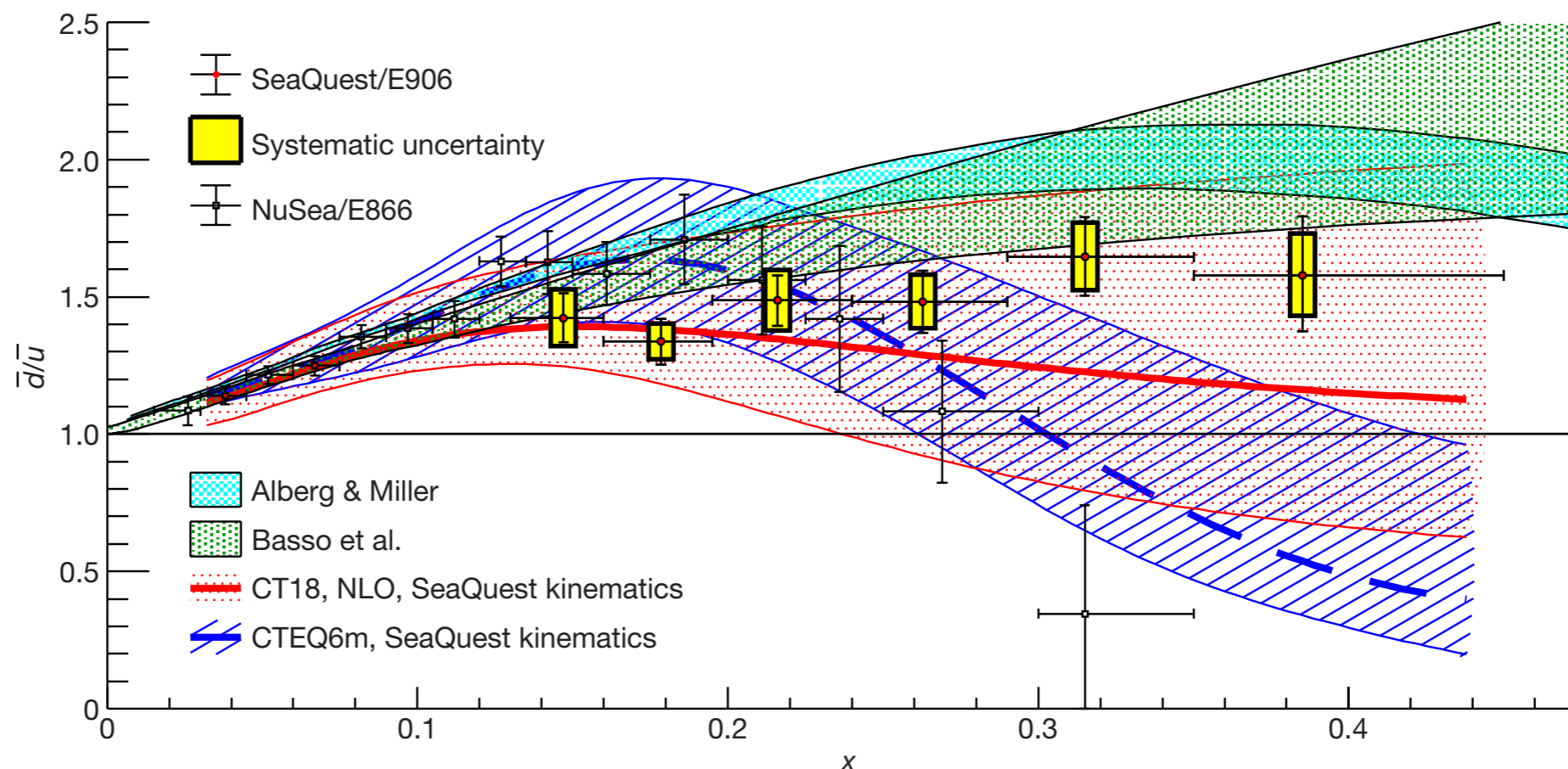
→ 反復解析により $\frac{\bar{d}(x)}{\bar{u}(x)}$ を決定する

1. 実験データから反応断面積比 R_{data} を測定
2. $\frac{\bar{d}}{\bar{u}}$ の仮の値を設定 (初期値: $\frac{\bar{d}}{\bar{u}} = 1$)
3. LHCでの測定から求めたPDF"CT18"のNLO計算 (QCD結合定数 α_s の1次の項まで摂動展開) を行い 反応断面積比 R_{pred} を (x_t, x_b) 毎に計算
4. R_{data} と R_{pred} の差に基づいて $\frac{\bar{d}}{\bar{u}}$ の値を更新
5. R_{data} と R_{pred} の差が十分小さくなるまで3.と4.を繰り返す



結果

Parton Distribution Function比



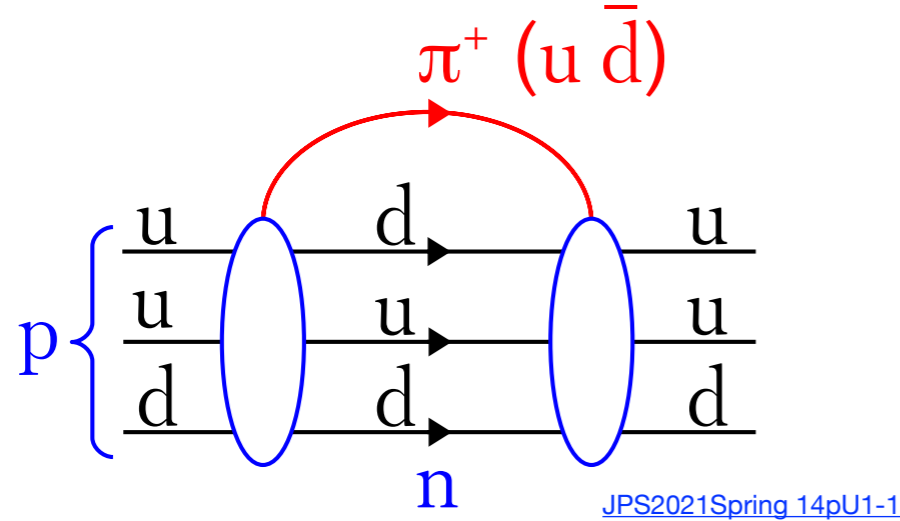
- 先行実験であるNuSea実験の結果と重ね書き（今回のSeaQuestはより大きい x に最適化）
- SeaQuestとNuSeaは小 x で一致するが、 $x = 0.32$ 近辺のデータは 3σ 異なっている
- 赤線と青線は、NuSea実験のデータを含むPDFを用いてSeaQuest kinematicsで計算
- NuSeaとSeaQuest実験の違いはkinematicsの違いだけでは説明できない
- シアンと緑は、陽子内にフレーバー非対称性を生み出すモデルから理論計算
- NuSea実験の $\frac{\bar{d}}{\bar{u}} < 1$ を再現するモデルは今のところ存在しない

考察

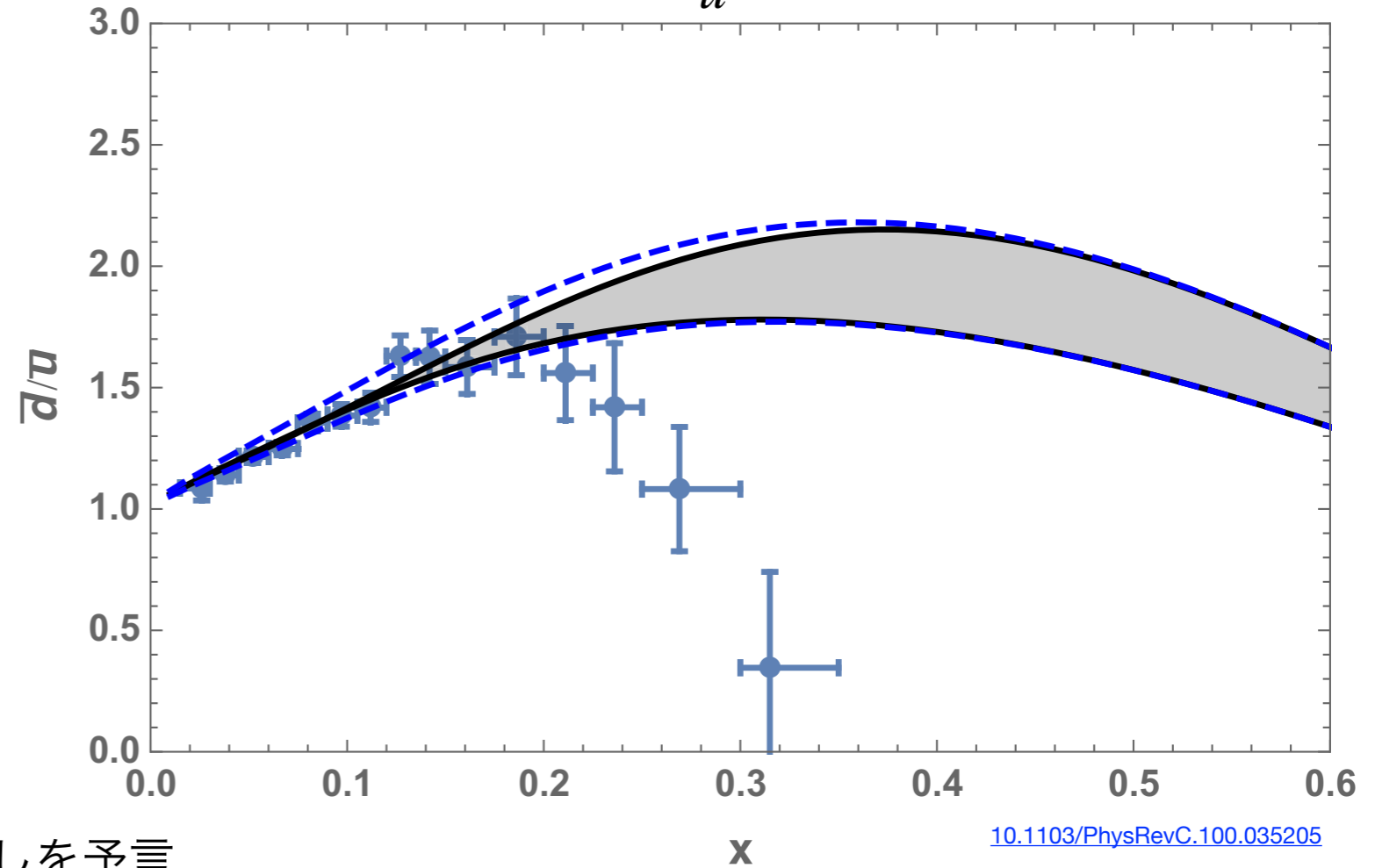


pion cloud model

- 核子同士は中間子を介して相互作用している
- 核子が単体で存在している場合でも、中間子の放出・自己吸収が起き得る
- 中間子の発生量に伴って陽子における反クォークの存在量が変わり、 $\frac{\bar{d}}{\bar{u}}$ が1からずれる



- $\bar{d}/\bar{u} \rightarrow 1.0$ @ $x \rightarrow 0$
- $\bar{d}/\bar{u} > 1.0$ @ middle x
- $\bar{d}/\bar{u} < 1.0$ @ $x \rightarrow 1$



- スピン偏極 ($\Delta q(x) \equiv q^\uparrow - q^\downarrow$) 無しを予言

$$\Delta \bar{d}(x) = \Delta \bar{u}(x) = 0$$

- これはRHICで得られた W^\pm の非対称度 A_L の結果とinconsistent

statistical model

- パarton分布が量子統計に従うというモデル
- 質量0のpartonが一定温度一定体積のなかで、クォーク・反クォークはFermi-Dirac統計に、グルーオンはBose-Einstein統計に従う

$$xq^h(x) = \frac{A_q X_{0q}^h x^{b_q}}{\exp\left[\left(x - X_{0q}^h\right)/\bar{x}\right] + 1} + \frac{\tilde{A}_q x^{\tilde{b}_q}}{\exp(x/\bar{x}) + 1}$$

$$x\bar{q}^h(x) = \frac{\bar{A}_q \left(X_{0q}^- h\right)^{-1} x^{b_{\bar{q}}}}{\exp\left[\left(x + X_{0q}^- h\right)/\bar{x}\right] + 1} + \frac{\tilde{A}_q x^{\tilde{b}_q}}{\exp(x/\bar{x}) + 1}$$

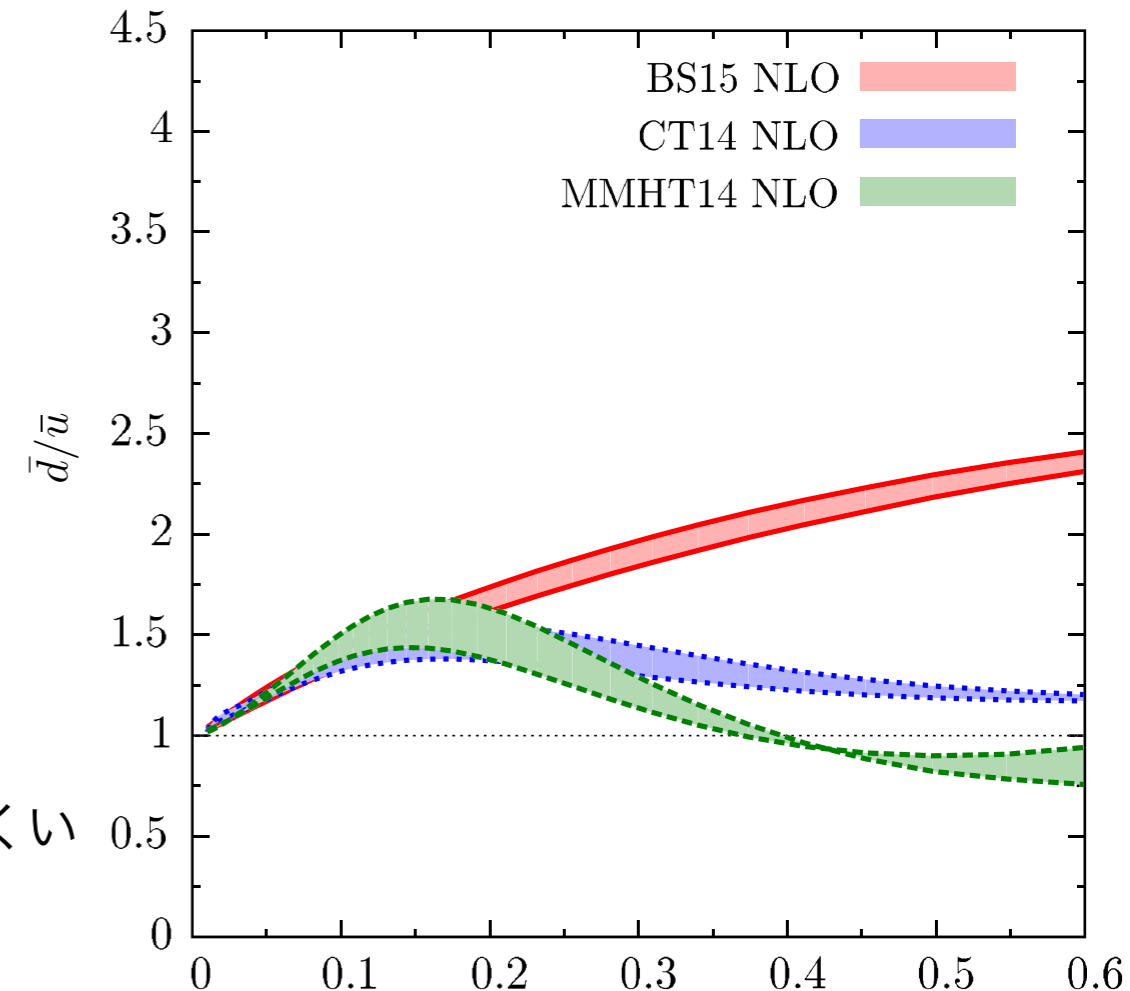
$$xG(x, Q_0^2) = \frac{A_G x^{b_G}}{\exp(x/\bar{x}) - 1}$$

- 陽子のvalenceクォークはuud
- Pauliの排他律によって抑制され、uはdよりも作られにくい

- 反対方向のspin偏極を予言

$$\Delta\bar{d}(x) - \Delta\bar{u}(x) \approx -\bar{d}(x) - \bar{u}(x)$$

- これはRHICで得られた W^\pm の非対称度 A_L の結果とcompatible



x [10.1016/j.nuclphysa.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2016.02.001)

他の実験への影響

- SeaQuest実験とNuSea実験の結果は、LHCでのKaluzza-Klein粒子探索に影響を及ぼすかもしれない
 - Kaluzza-Klein粒子…階層性問題を解決する余剰次元モデルに登場する未発見粒子
- KK粒子である W' や Z' は軽いクォーク・レプトンとの結合が重い粒子に対し抑制されている
- NuSea実験の結果を含むPDF"CTEQ6"を用いて計算すると、現在の質量領域上限の少し上の4 - 5 TeV/c²では、
 - $u_V(x_1)$ と $\bar{d}(x_2)$ からKKボソン W'/Z' が得られる断面積が増加し、
 - $u_V(x_1)$ と $\bar{u}(x_2)$ から得られる断面積が減少することが予測されている
- 陽子のスピンを構成するのに反クォークのスピんと角運動量がどの程度寄与しているかを調べるのがNuSea実験とSeaQuest実験の違いを説明する鍵となる
- 現在、いくつかの実験がFermilab, Jefferson Lab, BNL, CERNで計画中

まとめ

- FermilabのE906 SeaQuest実験はDrell-Yan反応 ($q\text{-}\bar{q}$ 対が仮想光子を介して $\mu\text{-}\bar{\mu}$ 対に崩壊する反応) を用いて先行実験であるE86 NuSea実験よりも高運動量領域でフレーバー非対称度を測定
- 陽子ビームを液体水素/液体重水素標的に入射させ, Drell-Yan反応で得られるミュオン対を検出
- 大きいBjorken x 領域で反アップクォーク (\bar{u}) より反ダウンクォーク (\bar{d}) の方が多かった
- この結果と先行実験であるNuSea実験の結果は一部食い違う
(SeaQuestとNuSeaは小 x で一致するが, $x = 0.32$ 近辺のデータは 3σ 異なっている)
- この違いの原因はまだ明らかになっていない
- 今回のSeaQuest実験の結果は全データの50%を解析に用いたもの
- 残りの半分を現在解析中

backup



断面積比

- NuSeaのSeaQuestは陽子のエネルギーやアクセプタンスが異なる為、もう一つの力学変数である x_b が異なり、断面積比が違っている

- CT18NLO, CTEQ6m
: Parton Distribution Function

- NuSeaのデータを含む為よく一致するはず

