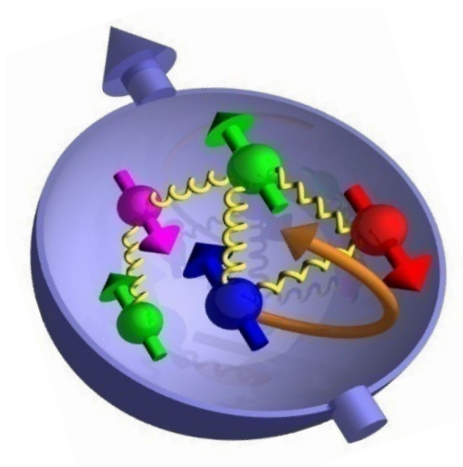


陽子内の海クォークはどこまでわかったか？ —反クォークのドレル・ヤン反応による検出—

日本物理学会 2023 年春季大会 チュートリアル講演
2023/03/22, 22aV1-7

中野 健一

バージニア大学



目次

1. はじめに — 陽子の内部構造 & “核子物理”
2. 陽子のパートン構造
 - 深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering)
 - パートン分布関数
 - 海クォーク (~ 反クォーク) の生成機構
3. ドレル・ヤン反応
 - 反クォークの直接測定法
 - 実験セットアップ例
4. 反クォーク分布のフレーバー非対称性
 - フレーバー非対称性の理論的・実験的背景
 - SeaQuest 実験による測定結果 & 理論計算との比較
5. 反クォークの軌道運動
 - 反クォークの Sivers 分布関数
 - ドレル・ヤン反応を用いた測定法
 - SpinQuest 実験で予想される測定結果
6. まとめ

クォーク

- カレント (Current) クォーク

Particle Data Group, PTEP 2022, 083C01

フレーバー		質量	電荷	アイソスピン I_z
アップ	(u)	2 MeV	$+2/3 e$	$+1/2$
ダウン	(d)	5 MeV	$-1/3 e$	$-1/2$
チャーム	(c)	1.3 GeV	$+2/3 e$	0
ストレンジ	(s)	90 MeV	$-1/3 e$	0
トップ	(t)	170 GeV	$+2/3 e$	0
ボトム	(b)	4.2 GeV	$-1/3 e$	0

- 反クォーク

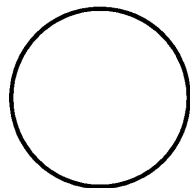
反アップ	(\bar{u})	2 MeV	$-2/3 e$	$-1/2$
反ダウン	(\bar{d})	5 MeV	$+1/3 e$	$+1/2$

- 比較: 構成子 (Constituent) クォーク

- 陽子 = $u + u + d$ — 質量 938.27 MeV
- 構成子クォーク質量 ~ 300 MeV

陽子 (核子) の内部構造 — 観測スケール依存

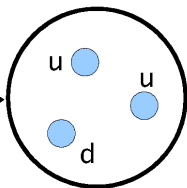
長距離, 低エネルギー



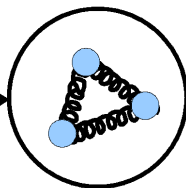
Elementary particle

⇒

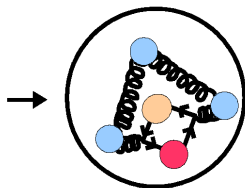
短距離, 高エネルギー



Quark model



Gluons and QCD

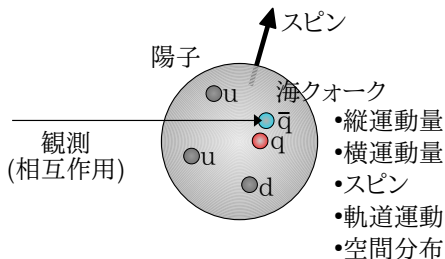


Sea quark

- クォーク模型 (Gell-Mann, Zweig, 1964)
 - 構成子クォーク
- パarton模型 (Feynman, 1969)
 - 価 (Valence) クォーク
- パarton模型の発展
 - グルーオン g
 - 海 (Sea) クォーク
 - 動的生成 $g \rightarrow q\bar{q}$

核子物理

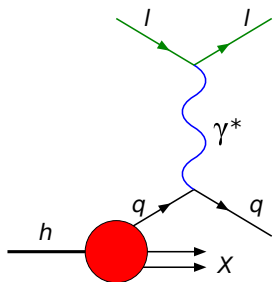
- 高エネルギー散乱を通じて核子 (陽子) のパートン構造を解き明かす
- エネルギー $\gtrsim 1 \text{ GeV} \iff$ 距離 $\lesssim 1 \text{ fm}$
- クォーク・反クォーク・グルーオン構造
- 本講演では海クォークに注目



2. 陽子のパートン構造

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 のスケールリング変数

- 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: $F_1(x, Q^2)$ & $F_2(x, Q^2)$ — 電磁相互作用の対称性を満たす自由度

DIS によるパートンの発見

- パートンは強い相互作用の閉じ込めにより単独では存在・観測しえない

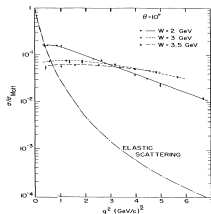
- Bjorken スケーリング則

$$F_1(x, Q^2) \xrightarrow[x \text{ fixed}]{Q^2 \rightarrow \infty} F_1(x),$$

$$F_2(x, Q^2) \xrightarrow[x \text{ fixed}]{Q^2 \rightarrow \infty} F_2(x)$$

- 構造関数は x のみに依存する

- パートン = 点状粒子

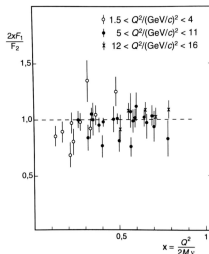


(SLAC-MIT)

- Callen-Gross 関係式

$$2xF_1 = F_2$$

- パートン = スピン 1/2 粒子 = クォーク

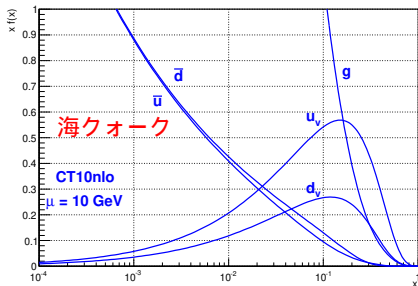
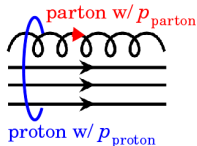


- DIS によりパートンの存在は証明され、その分布量が測定できる

- $F_2(x, Q^2) = x \cdot \sum_f e_f^2 (q_f(x, Q^2) + \bar{q}_f(x, Q^2))$

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

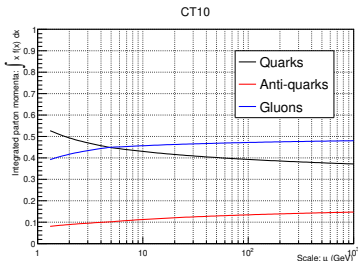
- スケール変数 x は“パートンが担う運動量比”と解釈可: $x = \frac{p_{\text{parton}}}{p_{\text{proton}}}$
- 非偏極 PDF
 - 運動量比 x を担うパートンの分布密度
 - フレーバー毎: $u(x), \bar{u}(x), d(x), \bar{d}(x), G(x)$, etc.
 - $\Rightarrow \int_0^1 u(x) dx$ — 陽子内の u クォークの総数
 - $\Rightarrow \int_0^1 xu(x) dx$ — u クォークが担う運動量比の合計



- $u_v(x) \equiv u(x) - \bar{u}(x)$
- $d_v(x) \equiv d(x) - \bar{d}(x)$
- $\int_0^1 u_v(x) dx = 2$ 個
- $\int_0^1 d_v(x) dx = 1$ 個
- 小 x では海クォークが支配的

電荷を持たないパートン = グルーオン

- $e + p$ & $e + n$ の DIS による構造関数 F_2 の測定
 - $\int_0^1 dx (F_2^{ep}(x) + F_2^{en}(x)) = \frac{5}{9} \int_0^1 dx x (q(x) + \bar{q}(x)) = \frac{5}{9} \cdot 0.54$
 - 陽子の運動量の約 1/2 は DIS (電磁相互作用) で見えない



- グルーオン分布: $G(x)$
 - DIS 反応断面積の観測スケール依存性
 - ハドロン + ハドロンでのジェット生成断面積 ($g + g \rightarrow g + g$, etc.)
- 陽子の運動量の内訳
 - $q : \bar{q} : g \sim 45\% : 10\% : 45\% @ \mu \sim 10 \text{ GeV}$
 - 動的に生じる海クォークとグルーオンの寄与がむしろ支配的
 - PDF の観測スケール依存性 = DGLAP 発展方程式



陽子のスピン問題

- 縦偏極 PDF: パートのスピン状態を定めた PDF

$$\circ \Delta q(x) \equiv q^+(x) - q^-(x)$$

$$\circ \Delta \bar{q}(x) \equiv \bar{q}^+(x) - \bar{q}^-(x)$$

$$\circ \Delta G(x) \equiv G^+(x) - G^-(x)$$

+:  parton spin
 proton spin

-: 


- EMC 実験の測定結果 (1989)

- クォークのスピンの総和:

$$\frac{1}{2}\Delta\Sigma \equiv \frac{1}{2}\sum_q \int dx (\Delta q(x) + \Delta \bar{q}(x))$$

- クォークのスピンの寄与は $(12 \pm 9 \pm 14)\%$ とたいへん小さい

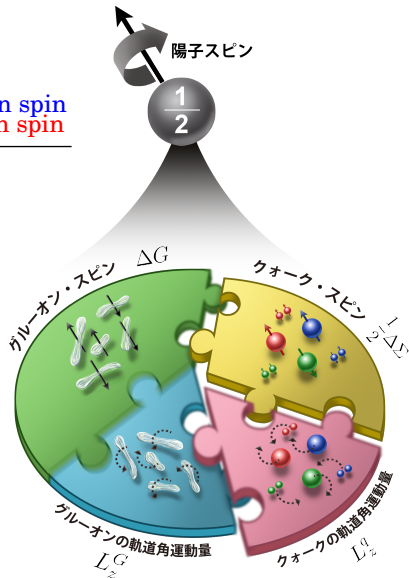
- 多数の実験結果の総合解析

$$\circ \frac{1}{2}\Delta\Sigma \approx 30\%$$

- グルーオンのスピン ΔG とパートンの軌道角運動量 L_z の必要性

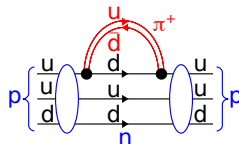
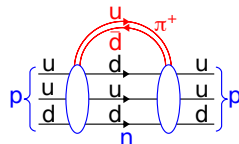
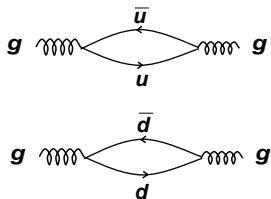
$$\circ \frac{1}{2}_{\text{陽子}} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_z^q + L_z^G$$

- 広汎な核子研究の発端となった



海クォーク (\approx 反クォーク) の生成機構

- クォーク (摂動論) 的過程
 - グルーオンからのクォーク対の生成
- ハドロン (非摂動論) 的過程
 - 中間子雲モデル
 - カイラルクォークモデル
 - ...



...

中間子雲モデルでの反クォークの生成

- 陽子 観測 = ハドロン + 中間子雲:

$$|p\rangle = (1 - a - b)|p_0\rangle + a|N\pi\rangle + b|\Delta\pi\rangle$$

- \bar{d} は $|n\pi^+\rangle$ 状態の π^+ 等として生じる
- \bar{u} は $|\Delta^{++}\pi^-\rangle$ 状態の π^- 等として生じる

- 反クォークの総量

$$= \sum [\text{ハドロンと中間子の中の反クォーク}]$$

$$\circ \bar{u}_p(x) \sim \bar{u}_{p_0}(x) + f_{\pi N} \otimes \bar{u}_\pi(x) + f_{\pi\Delta} \otimes \bar{u}_\pi(x)$$

$$\circ f_{\pi N} \otimes \bar{u}_\pi(x) = \int_x^1 \frac{dy}{y} f_{\pi N}(y) \bar{u}_\pi(x/y)$$

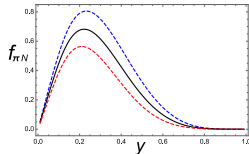
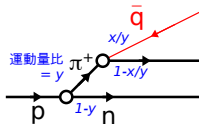
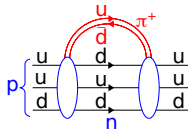
$$\circ f_{\pi N}(y): \pi\text{-}N \text{ 分岐関数}$$

$$\circ \bar{u}_\pi(x/y): \text{パイオン内反クォーク分布関数}$$

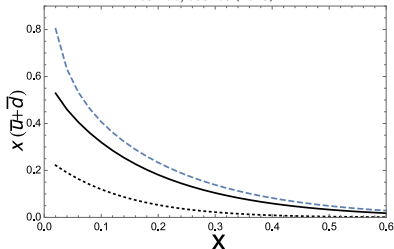
- $\bar{d}_p(x)$ も同様

- 実験データの総合解析の結果 (CT14) とおおよそ一致

- この描像はどこまで正しいのか?
他の量の再現性は?



PRC 100, 035205 (2019)



海クォーク研究の意義

- 海クォーク = 陽子の構造に欠かせない一成分
 - “価” クォークだけでは陽子の価数 (valence) は決まらない
 - 陽子の運動量・スピン・空間分布の一部は海クォークが担っているはず
- 海クォークは、陽子内のパートン相互作用の機構に比例的感度がある
 - 全ての海クォーク (\approx 反クォーク) は生成・消滅を繰り返している
 - 反クォーク生成の状態 (スピン/フレーバー等) で相互作用の性質が変われば、それは反クォークの分布量に比例して現れる (cf. クォーク生成量は価クォーク分布量で薄められてしまう)
 - 例: \bar{u} と \bar{d} はどのように生成するか? 強い相互作用なのでフレーバー間に差異は無いかな?
 - クォーク・グルーオン分布の理解の一助



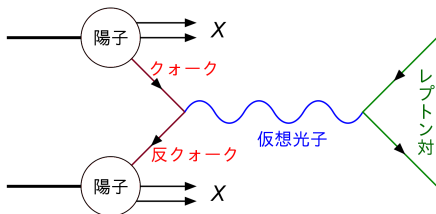
1. 反クォーク PDF の高精度測定
2. 陽子のパートン構造の解明
 - 反クォークの寄与
 - クォーク・グルーオンとの統一的理解

3. ドレル・ヤン反応

陽子内の反クォークを調べる方法

ドレール・ヤン反応とは?

- ハドロン-ハドロン散乱からの大不変質量を持つレプトン対の生成



$$q + \bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow l^+ + l^-$$

- 始状態: $p + p$, $\pi + p$, $p + A$, etc.
- 終状態: $\mu^+ + \mu^-$, $e^+ + e^-$, etc.

最初の理論的予測

- By two theorists, S. D. Drell & T.-M. Yan — PRL25, 316 (1970)

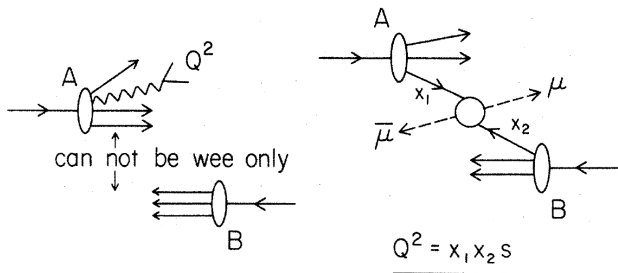
MASSIVE LEPTON-PAIR PRODUCTION IN HADRON-HADRON COLLISIONS AT HIGH ENERGIES*

Sidney D. Drell and Tung-Mow Yan

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 25 May 1970)

On the basis of a parton model studied earlier we consider the production process of large-mass lepton pairs from hadron-hadron inelastic collisions in the limiting region, $s \rightarrow \infty$, Q^2/s finite, Q^2 and s being the squared invariant masses of the lepton pair and the two initial hadrons, respectively. General scaling properties and connections with deep inelastic electron scattering are discussed. In particular, a rapidly decreasing cross section as $Q^2/s \rightarrow 1$ is predicted as a consequence of the observed rapid falloff of the inelastic scattering structure function νW_2 near threshold.



(a)

(b)

最初の実験的観測

• In $p+U$ at CERN — PRL25, 1523 (1970)

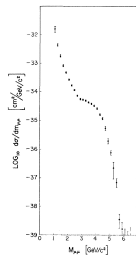
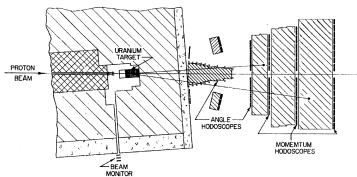
Observation of Massive Muon Pairs in Hadron Collisions*

J. H. Christenson, G. S. Hicks, L. M. Lederman, P. J. Limon, and B. G. Pope
Columbia University, New York, New York 10027, and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

and

E. Zavattini
CERN Laboratory, Geneva, Switzerland
(Received 8 September 1970)

Muon pairs in the mass range $1 < m_{\mu\mu} < 6.7 \text{ GeV}/c^2$ have been observed in collisions of high-energy protons with uranium nuclei. At an incident energy of 29 GeV, the cross section varies smoothly as $d\sigma/dm_{\mu\mu} \approx 10^{-32}/m_{\mu\mu}^5 \text{ cm}^2 (\text{GeV}/c)^{-2}$ and exhibits no resonant structure. The total cross section increases by a factor of 5 as the proton energy rises from 22 to 29.5 GeV.



- “No resonant structure”...
- J/ψ discovery in 1974 at SLAC SPEAR ($e^+ + e^-$) & BNL AGS ($p+\text{Be}$)

ドレル・ヤン反応断面積

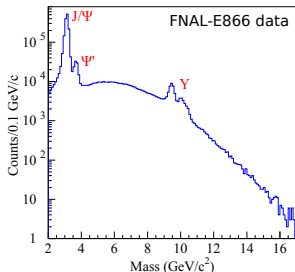
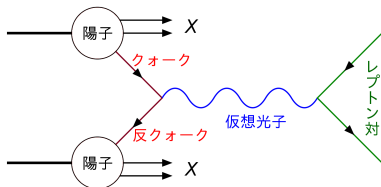
● 運動学的変数

- \sqrt{s} : ハドロン-ハドロン 重心系エネルギー
- M : 不変質量 ($= x_{beam}x_{target}S$)
- x_{beam} : ビーム側の Bjorken x
- x_{target} : 標的側の Bjorken x

● 反応断面積 @ LO

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

- 電磁相互作用なので σ は比較的小さい
- J/ψ , Υ 等の共鳴ピークの下での連続分布がシグナル



ドレル・ヤン反応を用いた反クォークの直接測定

- 実験的工夫

- 前方測定

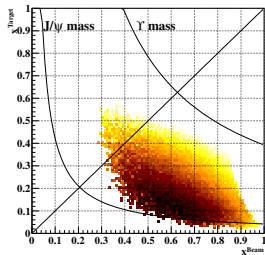
- ○ 断面積の “ $q(x_{beam})\bar{q}(x_{target})$ ” の項が支配的

- ○ ○ \implies 常に ビーム側に q & 標的側に \bar{q}

- ○ 不変質量大 $\implies x_{target}$ & x_{beam} 大

- 水素 & 重水素標的の併用

- ○ 反クォークのフレーバー (\bar{u} vs \bar{d}) の実験的分離 — 後述

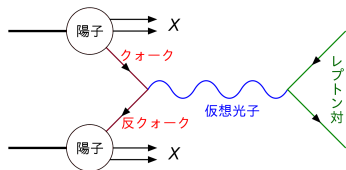


- イベントごとに q と \bar{q} が各々の x の値も含めて決定可

- $\sigma(x_{target}) \propto \bar{q}(x_{target})$ と比例的感度

- 理論的にクリーンな終状態

- μ^\pm は強い相互作用による副次散乱を起こさない

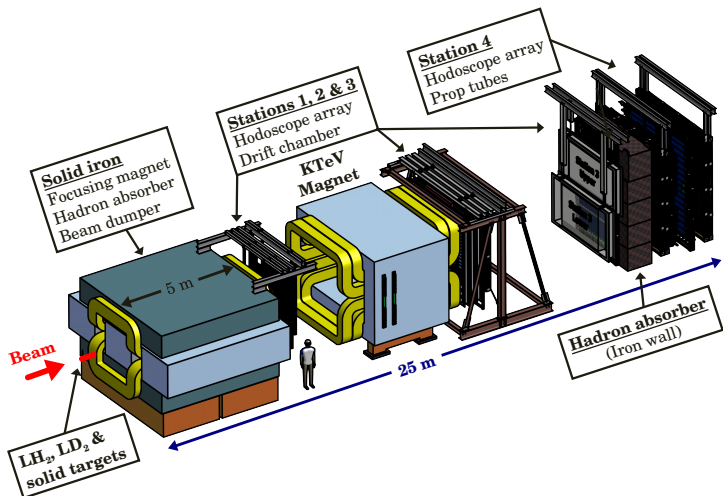


ドレル・ヤン反応の計測 @ フェルミ国立加速器研

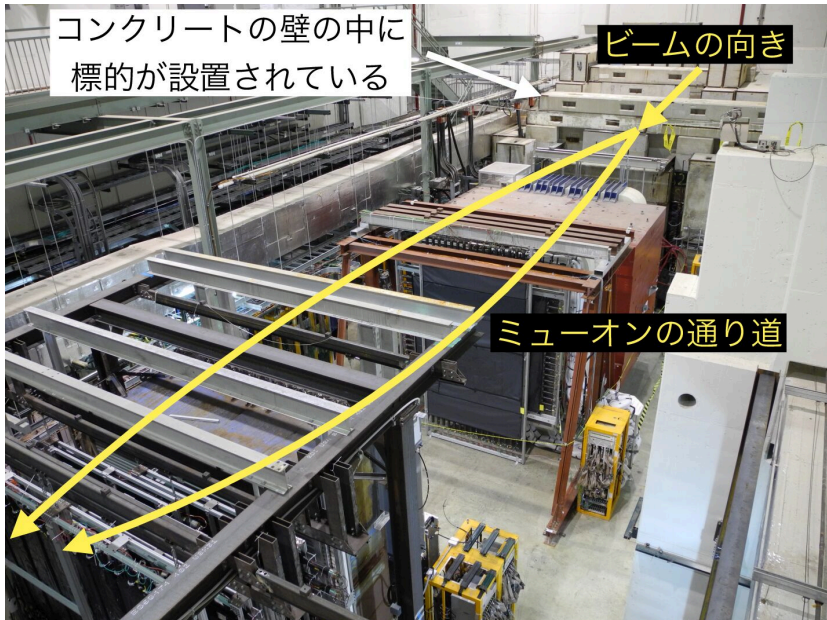


- 陽子ビーム
(Main Injector より)
- エネルギー $E = 120 \text{ GeV}$
($\sqrt{s} = 15 \text{ GeV}$)
- 強度 $\sim 10^{12}$ protons/sec

SeaQuest 検出器



- ターゲット: LH₂, LD₂, 他
- ドレル・ヤン反応からの $\mu^+\mu^-$ 対を検出
- 検出器は偏極ドレル・ヤン反応の実験 (SpinQuest) でも利用



4. 反クォーク分布のフレーバー非対称性

$$\begin{array}{c} > \\ \bar{u}(x) = \bar{d}(x) \\ < \\ ?? \end{array} \quad \text{in the proton}$$

反クォーク (\bar{u} vs \bar{d}) のフレーバー対称性

- 対称であるべき?

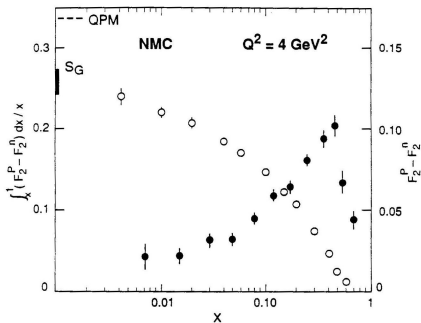
- グルーオンからの対生成: $g \rightarrow q\bar{q} \implies \bar{d} = \bar{u}$
- Gottfried 和則:

$$\begin{aligned}
 S_G &= \int_0^1 \frac{dx}{x} \{F_{2p}(x) - F_{2n}(x)\} \\
 &= \frac{1}{3} \{(u - \bar{u}) - (d - \bar{d})\} - \frac{2}{3}(\bar{d} - \bar{u}) \\
 &= \frac{1}{3} \quad \text{if } \bar{d} = \bar{u}
 \end{aligned}$$

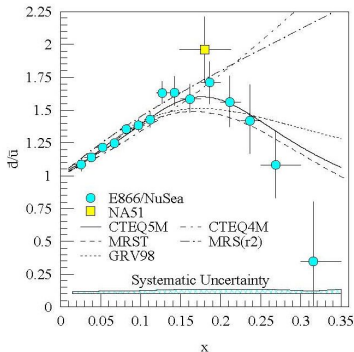
- CERN NMC (1990):

ミュオン深非弾性散乱

- Gottfried 和: $S_G = 0.235 \pm 0.026 < 1/3$
— 和則の破れ
- $\int_0^1 \bar{d}(x)dx - \int_0^1 \bar{u}(x)dx = 0.147 \pm 0.039$
— 反クォークのフレーバー対称性の破れ ($\bar{d} > \bar{u}$) の発見



- 非対称度の x 依存性 ($\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$) の測定: ドレル・ヤン反応
 - CERN NA51 実験 (1994): $\bar{d} > \bar{u}$ @ $x \sim 0.18$
 - FNAL E866/NuSea 実験 (1998): $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ @ $x \in (0.015, 0.35)$

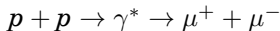


70% asymmetry!
 A few % expected

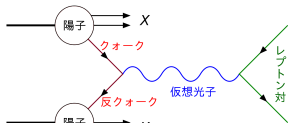
- 大きな x ($\gtrsim 0.2$) での測定誤差が大きく、理論計算も大きくばらつく
 ⇒ SeaQuest 実験による高精度測定

ドレル・ヤン反応を用いた $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の測定

- ドレル・ヤン反応 @ 前方:



$$\frac{d^2\sigma}{dx_{beam}dx_{target}} = \frac{4\pi\alpha^2}{9x_{beam}x_{target}} \frac{1}{s} \sum_{q=u,d} e_q^2 q_{beam}(x_{beam}) \bar{q}_{target}(x_{target})$$



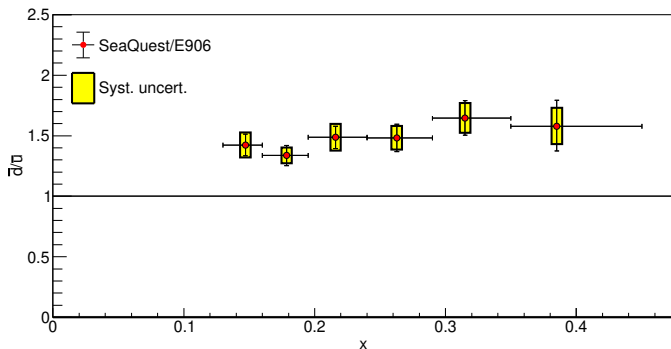
- 陽子ビームと水素 & 重水素標的による反応断面積の比の測定

$$\frac{\sigma_D(x_{target})}{2\sigma_H(x_{target})} \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_{p+n}(x_{target})}{\sigma_{p+p}(x_{target})} \right) \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\bar{d}(x_{target})}{\bar{u}(x_{target})} \right)$$

- データ解析時は断面積比を高次項 (NLO) まで計算
- 強い相互作用によるバックグラウンド粒子 ($\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm$ 等) を測定データより除外

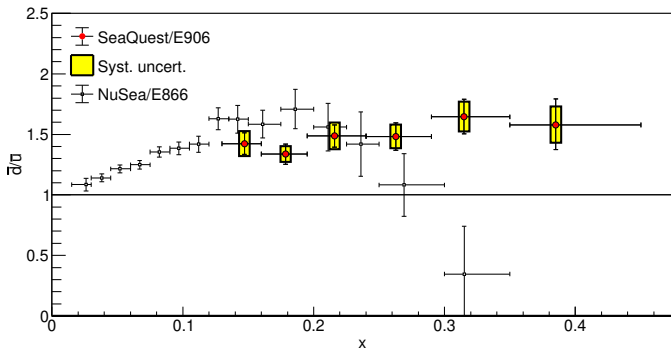
$\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の測定結果

- SeaQuest 実験 — Nature 590, 561 (2021)



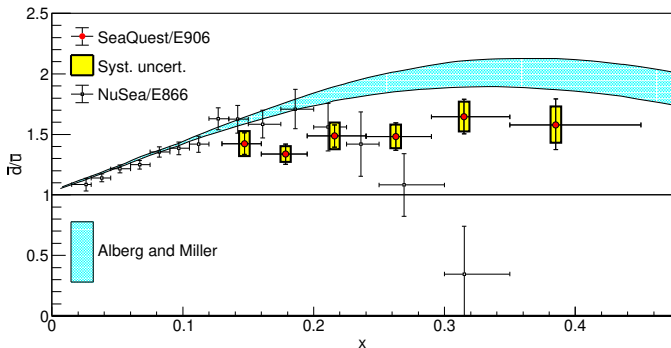
- 大きな x (0.45) まで測定
- 全ての測定範囲で大きな $\bar{d}/\bar{u} > 1$ の非対称度を観測

- NuSea/E866 実験との比較



- 小さな x (~ 0.2) で一致
- より大きな x (0.45) まで高精度に測定
 - $x \sim 0.3$ で実験間に差異

- 理論モデル計算との比較



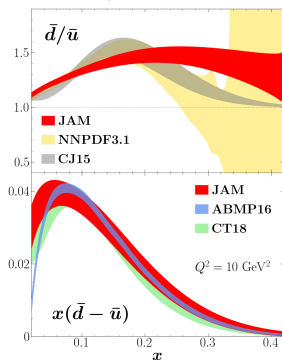
- 中間子雲モデルで x 依存性を再現可 — PRC 100, 035205 (2019)
- 大きな x で反クォーク分布を決定するユニークなデータ
- モデル計算の再評価 (PRD 105, 114054 (2022)) や SeaQuest データを含めた総合解析が進展中

SeaQuest データを含めた反クォーク PDF の総合解析

- SeaQuest および RHIC-STAR W^\pm データを含めた $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ 抽出の例

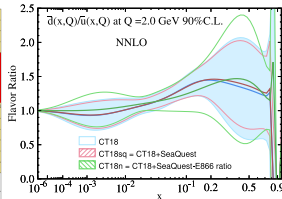
○ JAM

PRD 104, 074031



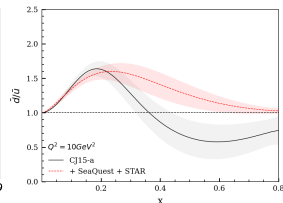
○ CT18sq

arXiv:2108.06596



○ CJ15-a+

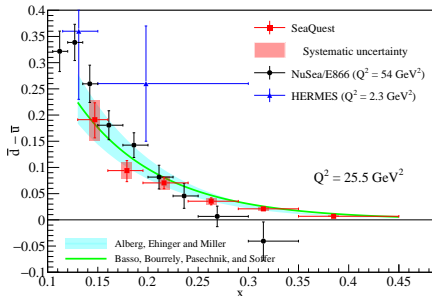
arXiv:2108.05786



- 種々の分布形状や分布モデルを用いたデータの検証が進行中

分布量の差: $\bar{d}(x) - \bar{u}(x)$

- ハドロン (非摂動論) 的過程で生じる \bar{q} に注目
 - パートン (摂動論) 的過程 ($g \rightarrow q\bar{q}$) は $\bar{d} \approx \bar{u}$ なので相殺
- $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ の測定結果より抽出 — arXiv:2212.12160 (Jan. 2023)



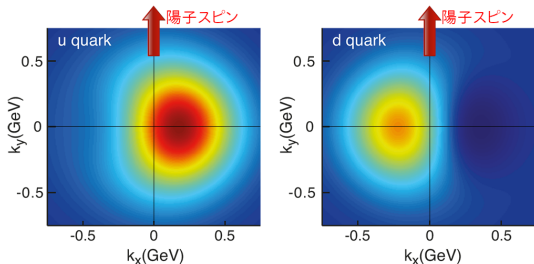
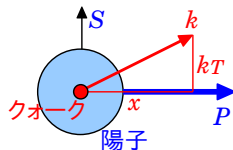
- モデル計算との一致度は $\bar{d}(x)/\bar{u}(x)$ よりも良い
- モデル計算におけるパートンの過程の精度が誤差要因?

5. 反クォークの軌道運動

Sivers 分布関数

Sivers 分布関数

- パートの横運動量 (k_T) を自由度に追加
⇒ Transverse-Momentum-Dependent (TMD) PDF
- Sivers 分布関数: $f_{1T}^\perp(x, k_T)$
≈ 陽子スピン (S) とパートン横運動量 (k_T) の相関の強さ

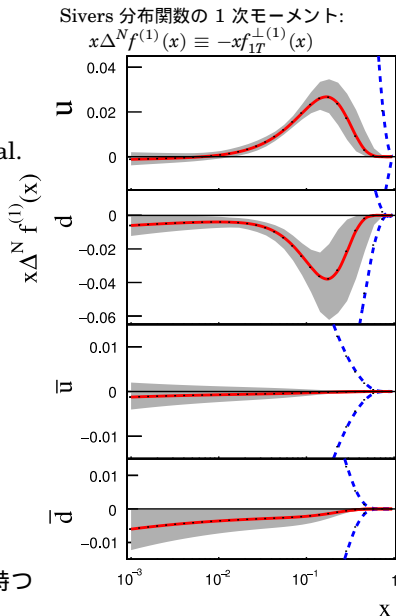


EPJA 52, 268

- パートの軌道運動 ⇒ 空間分布の偏り ⇒ k_T の偏り
- パートンが陽子スピンを軸として多次元構造をしている証拠

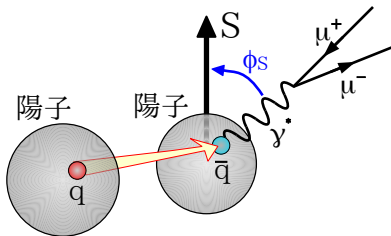
Sivers 分布関数の現状

- 実験データの総合解析による抽出
 - HERMES (2005), COMPASS & JLab 実験データの利用
 - 例: JHEP 04 (2017) 046, M. Anselmino et al.
- クォークの Sivers 分布関数は非ゼロ
 - クォーク横運動量は陽子スピンの相関有り
- 反クォークの Sivers 分布関数
 - そもそも相関は有る?
 - クォークとの違いは?
- SpinQuest 実験 @ フェルミ国立加速器研: 反クォークの Sivers 分布関数の直接測定
 - 横偏極の(重)陽子標的の開発
 - 横偏極ドレル・ヤン反応の計測
 - 非ゼロの結果
 - ⇒ 反クォークが横運動量・軌道角運動量を持つ
 - ⇒ 陽子の多次元パートン構造の一成分



反クォーク Siverts 分布関数の測定 @ SpinQuest 実験

- 陽子ビーム + 横偏極 NH_3 & ND_3 標的
- ドレル・ヤン反応 @ 前方 — SeaQuest 実験の測定手法と同様
 - 偏極陽子 (標的) の反クォークが反応



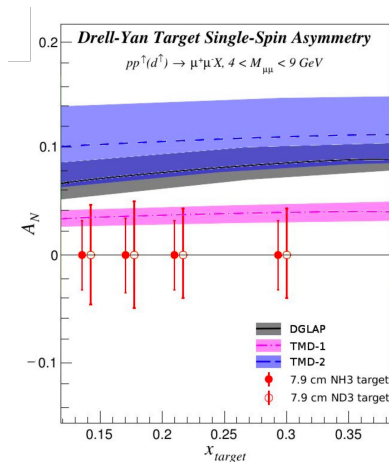
- 観測量: 横単スピン非対称度 A_N

$$A_N(\phi_S) \equiv \frac{\sigma^\uparrow(\phi_S) - \sigma^\downarrow(\phi_S)}{\sigma^\uparrow(\phi_S) + \sigma^\downarrow(\phi_S)} \sim \frac{f(x_B) \cdot f_{1T}^\perp(x_T)}{f(x_B) \cdot f(x_T)}$$

- $\phi_S \sim$ 陽子スピンとミュオン対 (=仮想光子) の間の方位角
- Siverts 分布関数が非ゼロ
 - ⇒ 陽子スピンと反クォーク横運動量が相関
 - ⇒ ϕ_S 分布が偏る
 - ⇒ A_N が非ゼロ

SpinQuest 実験で予想される結果

- 実験の現状 & 計画
 - 偏極標的・検出器は準備完了
 - 2023 年春:
陽子ビームを用いたコミッションング
 - 2023 年から 2 年間のデータ収集
- 横単スピン非対称度: $A_N^{\sin \phi_S}$
 - $0.1 \lesssim x_{target} \lesssim 0.3$
 - 測定精度 $\delta_{A_N} \sim 0.04$
- 非ゼロの反クォーク Sivers 分布関数 (と x 依存性) の初観測を目指す



6. まとめ

- 核子物理
 - 陽子 = クォーク + 反クォーク + グルーオン @ 高エネルギースケール
 - 陽子の質量/電荷/スピン等はどう形作られているか?
- 陽子内の海クォーク
 - 存在は確認されており、分布量が測定されつつある
 - 精密測定に基づいて生成機構を検証中
 - パートン相互作用の新たな性質に感度があると期待
- ドレル・ヤン反応: $q + \bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow l^+ + l^-$
 - 古く 1970 年から理論的・実験的に研究
 - 反クォーク分布のフレーバーごとの直接測定が可能

- 反クォーク分布のフレーバー非対称性 — SeaQuest 実験
 - 広い x の範囲 (0.1–0.45) で大きな非対称度 ($\bar{d}/\bar{u} \approx 1.5$)
 - 中間子雲モデルなどである程度再現可
 - ハドロン (非摂動論) 的な反クォーク生成過程が支配的か
 - モデル計算の再評価や新データを含めた総合解析が進展中
- 反クォークの軌道運動 — SpinQuest 実験
 - Sivers 分布関数 \approx 陽子スピン (S) とパートン横運動量 (k_T) の相関の強さ
 - 反クォークの Sivers 分布関数が非ゼロ
 - ⇒ 反クォークが横運動量・軌道角運動量を持つ
 - 横偏極標的を用いたドレル・ヤン反応の測定
 - 2023 年に 2 年間のデータ収集を開始