

SpinQuest 実験の概要と偏極標的

第 19 回 高エネルギー QCD・核子構造 勉強会 @ 山形大

2022/09/02

中野 健一

バージニア大

目次

1. SpinQuest 実験の物理

- 核子 (陽子) の横運動量依存パートン分布関数 (TMD PDF)
- 反クォークの Sivers 分布関数
- Drell-Yan 反応
- 期待される測定精度

2. 陽子ビームとスペクトロメータ

3. 偏極標的

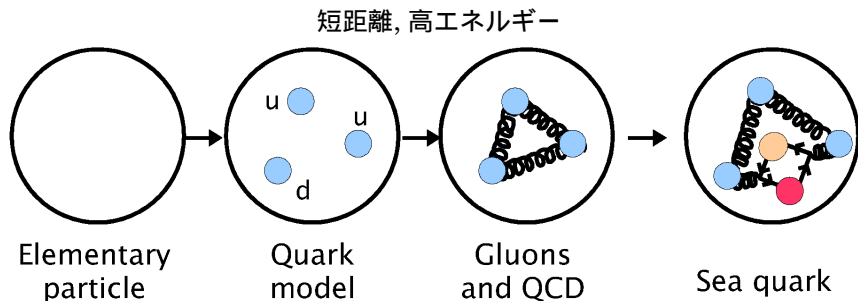
- 装置構成・必要性能
- 準備状況
- 系統誤差

4. 展望・まとめ

1. SpinQuest 実験の物理

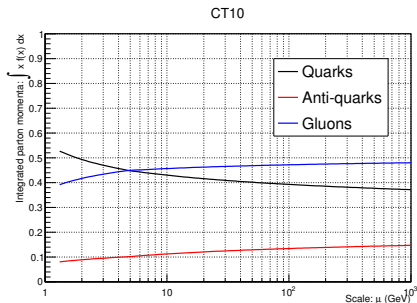
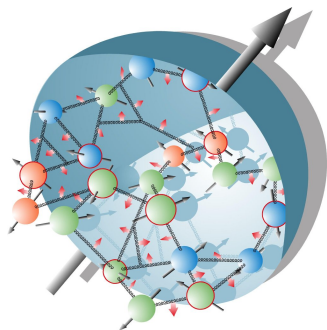
陽子 (核子) の内部構造

- 観測スケールで変質する描像



- エネルギースケール $\mu \gtrsim 1 \text{ GeV}$ での陽子構造が研究対象
- 反クォークの動的な生成 ($g \rightarrow q\bar{q}$)
- 陽子の構造ひいては強い相互作用の理解を目指し、陽子のクォーク・反クォーク・グルーオンの分布状態を明らかにする

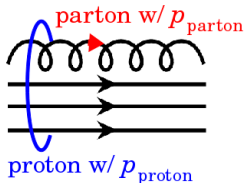
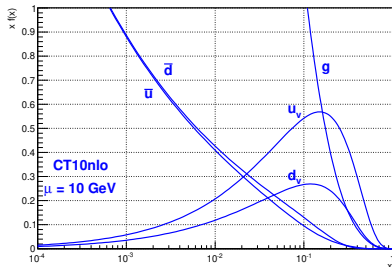
陽子のパートン構造 @ 短距離



- Valence quarks, sea quarks & gluons
- 陽子の運動量の内訳 ... $q : \bar{q} : g \sim 45\% : 10\% : 45\%$ @ $\mu \sim 10$ GeV

パートン分布関数: PDF

- Quarks, anti-quarks & gluons
 - Bjorken x : x_{Bj} \equiv 個々のパートンが担う運動量の比



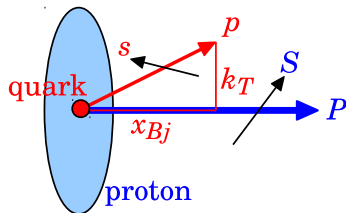
- 複数の実験データの総合解析 \implies パートン構造の現象論的な理解
- 強い相互作用 (QCD) に基づく理論化 \implies パートン構造の原理的な理解

Sivers 分布関数: $f_{1T}^\perp(x, k_T)$

- 横運動量依存 (TMD) PDF の 1 種 (全 8 種)

		Parton spin		
		U	L	T
Nucleon spin	U	Density f_1		Boer-Mulders h_1^\perp
	L		Helicity g_1	Worm gear #2 h_{1L}^\perp
	T	Sivers f_{1T}^\perp	Worm gear #1 g_{1T}	Transversity h_1 & Pretzelosity h_{1T}^\perp

- 核子のスピン (S) とパートンの横運動量 (k_T) の相関を表す

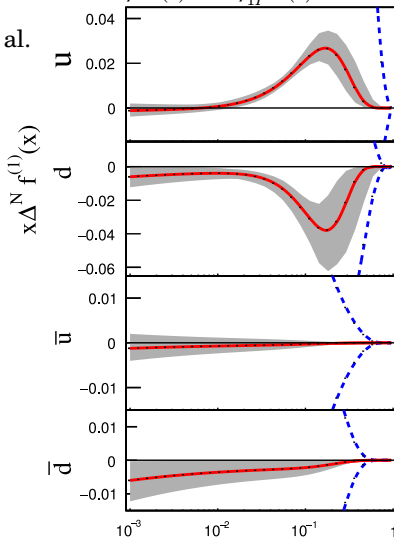


反クォークの Siverts 分布関数

- 総合解析による抽出
 - PRD88 (2013) 114012, P. Sun & F. Yuan
 - PRD89 (2014) 074013, M. G. Echevarria et al.
 - JHEP 04 (2017) 046, M. Anselmino et al.
 - HERMES, COMPASS & JLab のデータを使用
- 反クォークの $f_{1T}^\perp(x)$ は良く知られていない
 - 準包括的深非弾性散乱 (SIDIS) では反クォークとクォークの寄与が混ざるので

Siverts 分布関数の 1 次モーメント:

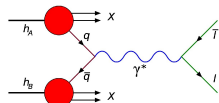
$$x\Delta^N f^{(1)}(x) \equiv -x f_{1T}^{\perp(1)}(x)$$



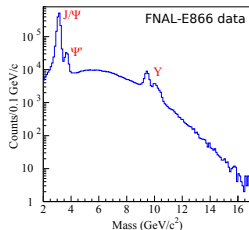
Drell-Yan 反応を用いた (TMD) PDF の測定

- 反応断面積 @ LO

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



- “ $q_i(x_{Beam})\bar{q}_i(x_{Target})$ ” が支配的 @ 前方生成
- クォークはビームに、反クォークは標的に由来し、それぞれの x がイベントごとに定まる
- 大きな不変質量 \implies 大きな x_{Beam} & x_{Target}

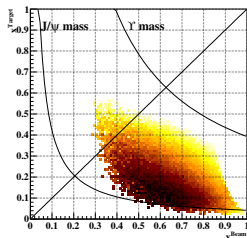


- PDF 測定の手段として

- 反応断面積 \implies 非偏極 PDFs
- 生成角度分布 \implies Boer-Mulders 分布関数
- 偏極ビーム/標的 \implies Sivers 分布関数など
- 原子核標的 \implies 原子核効果

- 深非弾性散乱 (SIDIS) との比較

- 反クォークに対する感度が高い
- TMD PDF の符号反転が検証可

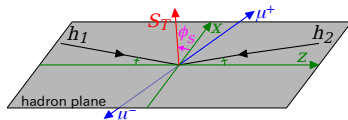


SpinQuest 実験の測定

- 陽子ビーム + 横偏極した水素 (NH₃) & 重水素 (ND₃) 標的
- $p + \vec{p}$ & $p + \vec{d}$ でのドレル・ヤン反応
- 観測量: Transverse Single-Spin Asymmetry A_N

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

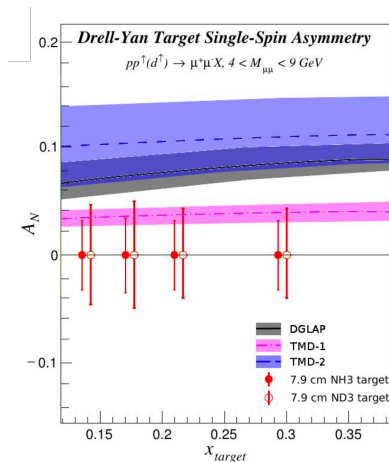
- ϕ_S : クォーク対の横運動量に対する陽子のスピンの方位角



- Sivers 分布関数 = 陽子スピンとクォーク横運動量の相関
- 相関が非ゼロ \implies 運動量が偏る \implies TSSA が非ゼロ
- 反クォークの Sivers 分布関数
 - $p + \vec{p}$ & $p + \vec{d}$ の TSSA の総合解析 $\implies \bar{u}$ & \bar{d} の分離

TSSA 測定の期待精度

- 測定条件
 - データ収集期間 = 2 年間
 - $\text{NH}_3:\text{ND}_3 = 50\%:50\%$ in time
 - Details in [the E1039 proposal](#)
- Transverse Single-Spin Asymmetry (TSSA): A_N
 - $0.1 \lesssim x_{\text{Target}} \lesssim 0.3$
 - 測定精度 $\delta_{A_N} \sim 0.04$
- 非ゼロの TSSA の初観測を目指す



2. SpinQuest 実験の 陽子ビームとスペクトロメータ

陽子ビーム @ FNAL

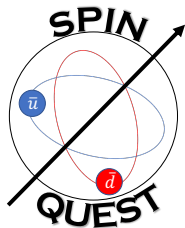


- Energy $E = 120$ GeV
($\sqrt{s} = 15$ GeV)
- Duty cycle
 - 5 sec for SpinQuest
 - 55 sec for ν exp.
- Bunch
 - Interval: 19 nsec (53 MHz)
 - 10^{13} protons in 5 sec

FNAL-SpinQuest/E1039 Collaboration

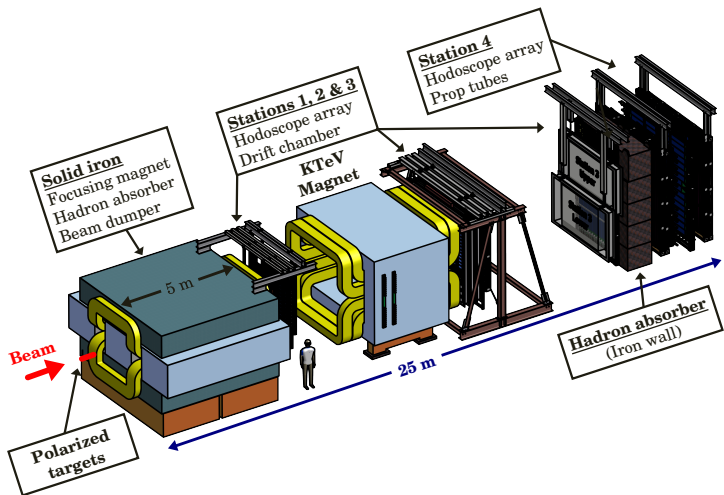
- Institutes

- Abilene Christian Univ.
- Argonne National Lab
- Aligarh Muslim Univ. IN
- Boston Univ.
- Fermi National Accelerator Lab
- KEK JP
- Los Alamos National Lab
- Mississippi State Univ.
- New Mexico State Univ.
- RIKEN JP
- Shandong Univ. CN
- Tokyo Tech JP
- Univ. of Colombo LK
- Univ. of Illinois
- Univ. of Michigan
- Univ. of New Hampshire
- Tsinghua Univ. CN
- Univ. of Virginia
- Yamagata Univ. JP
- Yerevan Physics Institute AM



<https://spinquest.fnal.gov>

SpinQuest Spectrometer



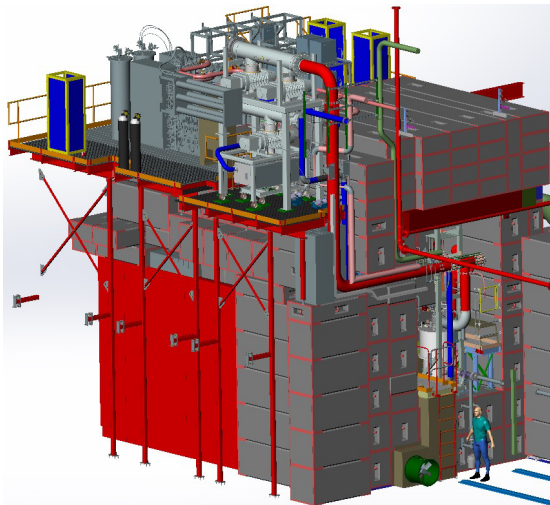
- 標的: 横偏極 NH_3 , ND_3
- 収束用電磁石 (FMag) & トラッキング用電磁石 (KMag)
- FMag の鉄芯 = ハドロン吸収体 & ビームダンプ

SpinQuest Hall (NM4) — 2022-August-26



3. SpinQuest 実験の偏極標的

Target Cave



- 偏極標的 in 放射線遮蔽用コンクリートブロック
- 冷却装置 on Cryo Platform
 - ヘリウム液化装置
 - 気化冷却用 “Roots Pump”

- 偏極標的 in Target Cave

- 単体テストは 2018 年にバー
ジニア大で完了
- Target Cave 内で配管・安全
試験の実施中

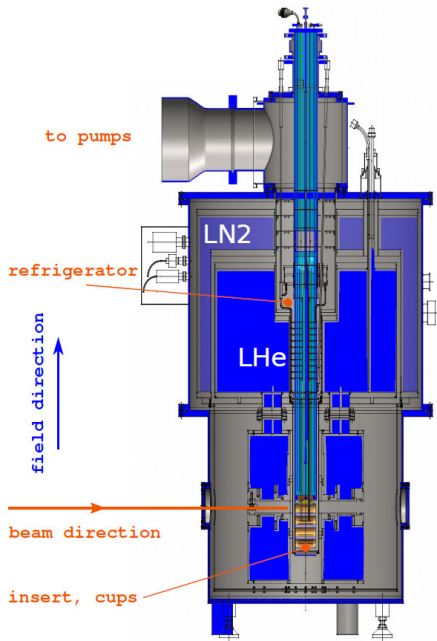


- **Roots Pump & ヘリウム液化装置**
 - 大強度ビームに応じた冷却性能
 - 吸気: 16,800 m³/hour
 - 液化: 200 L/day
 - ヘリウムの循環・安全試験の実施中



偏極標的冷却システム

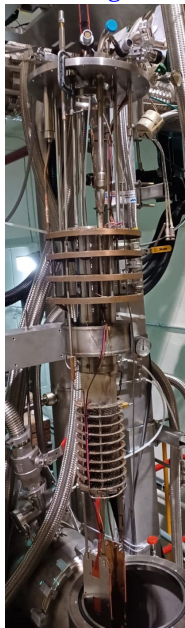
- “UVA”/“Hall-C” 偏極標的システムを横偏極用に改造
 - 磁場方向を縦偏極用へ変更
 - $B = 5 \text{ T}$
 - $dB/B < 10^{-4}$ over $z = 8 \text{ cm}$
- 超電導磁石
 - 磁場方向を縦偏極用へ変更
 - $B = 5 \text{ T}$
 - $dB/B < 10^{-4}$ over $z = 8 \text{ cm}$
- 冷却装置 @ 1 K
 - 気化冷却法
 - 冷却性能: 3 W at max



Vacuum Chamber Top



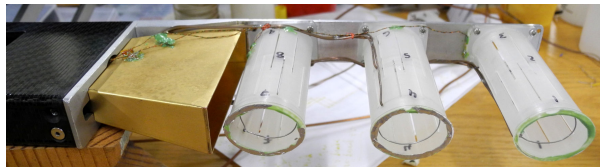
Fridge



Insert



偏極標的物質



- 物質仕様

- 固体 NH_3 & ND_3 ビーズ
- 電子照射 @ NIST — 12 MeV, $10^{17} e^-/\text{cm}^{-2}$

Material	Density	Dilution factor	Packing fraction	Polarization	Interaction length
NH_3	0.867 g/cm ³	0.176	0.60	80%	5.3%
ND_3	1.007 g/cm ³	0.300	0.60	32%	5.7%

- 標的セル × 3

- 寸法: L 80 mm, ϕ 40 mm
- NH_3 , ND_3 & Empty の組み合わせ
- 16 時間ごとに Annealing と偏極方向反転
- 7 日ごとに物質交換

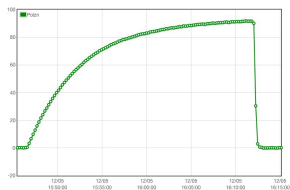
偏極法

- 動的核偏極法 (DNP)

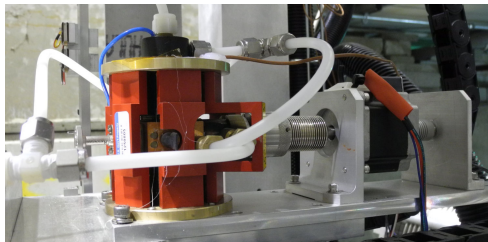
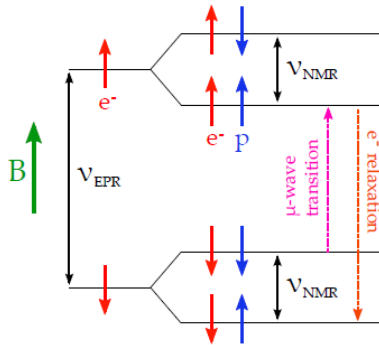
- 磁場: $B = 5 \text{ T}$
- マイクロ波: $f \approx 140 \text{ GHz}$
 - 高出力 EIO (CPI EIK)
+ Stepper Motor

- 偏極度

- 偏極テスト結果
— ビーム無し, 2018/12, UVA

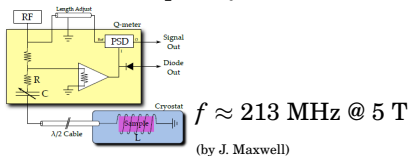


- $>90\%$ for NH_3
- コミッションングでビーム照射時の偏極度を測定



偏極度測定

- 核磁気共鳴法 (NMR)
- “NMR Rack” — Constructed by UVA
 - 共鳴回路: Liverpool Q-Meter



- “Polarization Display Panel”



- LANL による新システムも準備中 —
NIMA 995, 165045



標的偏極に起因する系統誤差

- Drell-Yan 反応の TSSA への寄与

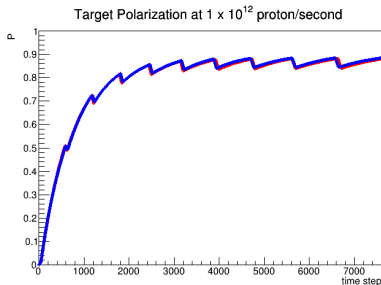
偏極標的	合計	6-7%
	偏極度の較正 (TE)	2.5% (<i>p</i>), 4.5% (<i>d</i>)
	偏極度の不均一性	2%
	標的物質の密度	1%
	放射線ダメージの不均一性	3%
	ビーム対標的のミスアライメント	0.5%
	Packing Fraction	2%
	Dilution Factor	3%
ビーム	合計	2.5%
データ解析	合計	3.5%

(実験プロポーザルより)

- より精密な評価と低減手法を検討中

偏極度の位置依存性 & 減偏極

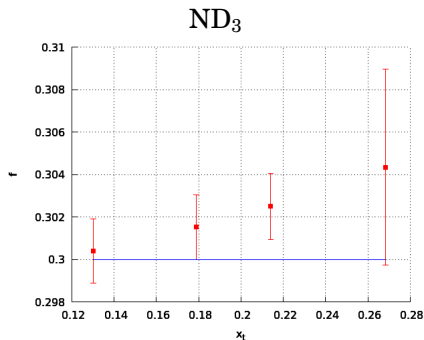
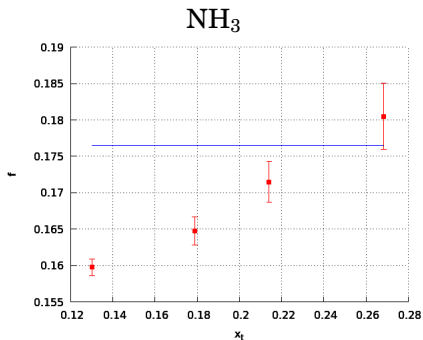
- 偏極度 vs 時間 & 位置の実測
 - 3 NMR coils/cell ($\delta_z = 8$ cm)
 - 4 NMR measurements/spill ($\delta_t = 4$ sec)
- 偏極度シミュレーション
 - Geant4 & LabVIEW
 - 熱負荷 = ビーム粒子 + マイクロ波
 - 関数形を抽出: $P(z, t)$



- 偏極度/spill = 偏極度の実測結果を関数形で積分

偏極度の Dilution Factor

- Dilution factor: $f \approx$ 偏極陽子数/全核子数 = 3/17 for NH₃
- 運動学的変数 (x_{Beam} & x_{Target}) への依存性
 - $f(x_T) = \frac{3d\sigma_H/dx_T}{3d\sigma_H/dx_T + d\sigma_N/dx_T}$
 - 数値計算 with MCFM (Monte-Carlo for Femtobarn Process, <https://mcfm.fnal.gov/>)



4. SpinQuest 実験の展望

- データ収集のスケジュール

Year	Month	Event
2022	12	Commission target & spectrometer using beam
2023	02	Start the 1st data taking
		↓ 4.5 months
	07	Accelerator summer shutdown
	12	Start the 2nd data taking

- “Day-One” Physics

- TSSA of J/ψ production — 最初の1ヶ月のデータ

- SpinQuest [Upgrades?](#)

- 重陽子内の反クォークのテンソル偏極分布 — PRD 94, 054022 (2016)
- 偏極原子核標的
- “DarkQuest”: Dark-photon search

まとめ

- SpinQuest 実験 — 陽子内の反クォークの Sivers 分布関数の測定
 - 120 GeV の陽子ビーム @ FNAL
 - 横偏極 NH_3 & ND_3 標的
 - ドレル・ヤン反応の TSSA の測定
 - TSSA \approx 標的スピンに対する生成角度分布の非対称度
 - 2023-2024 年で 2 年間の物理データ収集
- 偏極標的
 - “UVA”/“Hall-C” 偏極標的システムを継承
 - 陽子ビームの強度に応じた冷却・偏極性能の向上
 - 2022/12 から陽子ビームを用いたコミッショニング
- 正にコミッショニングとデータ収集を始める段階
 - 興味をお持ちの方はスポークスパーソンにご連絡を
 - Dustin Keller (UVA, dustin@virginia.edu) & Kun Liu (LANL, liuk@lanl.gov)