

Article for the Joarnal of Physical
Society of Japan
~Introduction to Spin Physics~
日本物理学会誌解説記事

Yuji Goto/Ralf Seidl/Itaru Nakagawa
後藤・Seidl・中川

Accepted on May 20th

Table of Contents

1. Lead Page (Independent article for non-expert readers)
2. Introduction
3. Gluon Spin @ RHIC
4. Sea Quark Spin Measurement via W -production @ RHIC
5. Orbital Motion Measurement via Transverse Single Spin Asymmetry Measurement @ RHIC
6. Summary and Future

Lead Page

1 page summary of the “spin puzzle” history and RHIC contribution (gluon spin). Pointing out the prospect of orbital angular momentum measurement, possibly in EIC.

解説

高エネルギー偏極陽子-陽子衝突で探る陽子のスピン構造



後藤雄二

理化学研究所 仁科加速器科学
学研究センター
goto@riken.jp



Ralf Seidl

理化学研究所 仁科加速器科学
学研究センター
rseidl@riken.jp



中川格

理化学研究所 仁科加速器科学
学研究センター
itaru@riken.jp

陽子は高エネルギーにおいて量子色力学(QCD)に基づきクォークとグルーオンから構成されると理解されているが、陽子のスピン量子数 $1/2$ をその構成要素から説明することは長年の課題である。陽子のもう一つの量子数である電荷 $+1$ は3つの価クォーク電荷の総和でうまく説明できるため、陽子のスピンのみ同様に価クォークのスピンのみで説明できると思われた。

実際に高エネルギー偏極レプトン散乱実験でクォーク・スピンの寄与を測定してみたところ、現在までにその寄与はせいぜい30%程度であることが判明している。これは「陽子スピンのパズル(謎)」と呼ばれ、高エネルギー QCD 分野における未解決問題の一つである。

では残りの70%はどこから来ているのだろうか?ここで浮上してきたのが、グルーオンのスピンである。陽子はクォークとグルーオンで構成されているから、クォーク・スピンのみで説明がつかない分はグルーオン・スピンの寄与で補われるのだろうか?と予想された。

クォーク・スピンの寄与の特定に華々しい実績を残してきた高エネルギー偏極レプトン散乱実験だが、レプトンが散乱される際に交換される仮想光子は、陽子内のグルーオンと直接相互作用をしないため既存のレプトン散乱実験ではグルーオンに対する感度は余り高くない。そこで米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)では、世界で唯一の高エネルギー偏極陽子-陽子衝突型加速器を用いてグルーオン・スピンの寄与の測定に挑んだ。

2001年から10年以上に及ぶ実験で、漸くグルーオン・スピンの寄与はゼロではな

く、大凡クォーク・スピンの寄与ぐらいである証拠を掴んだ。まだその精度は十分と言える程高くないが、クォークとグルーオンのスピンの寄与を足し合わせても、陽子のスピン全てを説明することはできない可能性が出てきた。陽子の構成要素はクォークとグルーオン以外にないのだから、それらのスピンの寄与を足し合わせて陽子スピンのみにならなければおかしいのではないか?何か見落としはないか?

クォークとグルーオンは陽子という閉じられた空間内で運動をしているので、それらの軌道角運動量も陽子スピンの寄与にできる。つまり陽子スピンのみには、クォークとグルーオンのスピンの寄与とそれらの軌道角運動量の和で与えられる「スピン和則」が成り立つ。軌道角運動量の測定を目的とした実験も既に多く存在するが、測定した観測量と軌道角運動量を関連付けるのは一筋縄ではいかないため、現時点では軌道角運動量の寄与はあまり良くわかっていない。しかし近年実験手法もより洗練され、理論の発展も著しく、軌道角運動量を特定する土台が急速に整備されつつある。

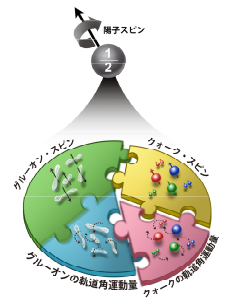
陽子スピン $1/2$ を構成要素から説明する研究は、陽子スピンの寄与をそれぞれ成分を一つ一つ高精度で測定し、最終的にスピン和則が満たされることを確かめるのがゴールである。そのためにはクォークとグルーオンのスピン、及び軌道角運動量の寄与をそれぞれ精密に測定しなければならない。スピンパズルは偏極陽子-陽子衝突実験で解決まで後一步の所まで追い詰めた。この追求のバトンは、2030年頃にBNLで実験開始が予定されている世界初の電子-イオン衝突型加速器に引き継がれる。

—Keywords—

価クォーク:

核子、中間子等ハドロンの量子数の実体を担うクォークおよび反クォーク。陽子の場合 $+2/3$ の電荷を持つ u クォークが二つと $-1/3$ の電荷を持つ d クォークが価クォーク。これらを足し合わせると陽子の電荷 $+1$ になる。

陽子スピンのパズル(謎): 陽子スピン和則(後述)の各項目をパズルのピースに準え、それぞれクォーク・スピンのピース(右上)、グルーオン・スピンのピース(左上)、そしてクォークとグルーオンの軌道角運動量のピース(それぞれ右下、左下)とする。これら一つ一つを丁寧に測定することで、ピースの大きさや輪郭がハッキリし、全てのピースが出揃うことで陽子スピン $1/2$ というパズルが完成し、謎解きが完結する。



陽子のスピン和則:

陽子スピンは、陽子の構成要素であるクォークとグルーオンのスピンと軌道角運動量がそれぞれ寄与する和で与えられる、とする和則。古典力学の角運動量保存則に相当する。 3

Sec. 1 Introduction

- History of proton structure from low energy to high energy scale
- High energy accelerator and resolution
- Importance of gluon role at low-x (high energy)
- Introduction of spin sum rule and where we are

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L_z^q + L_z^G$$

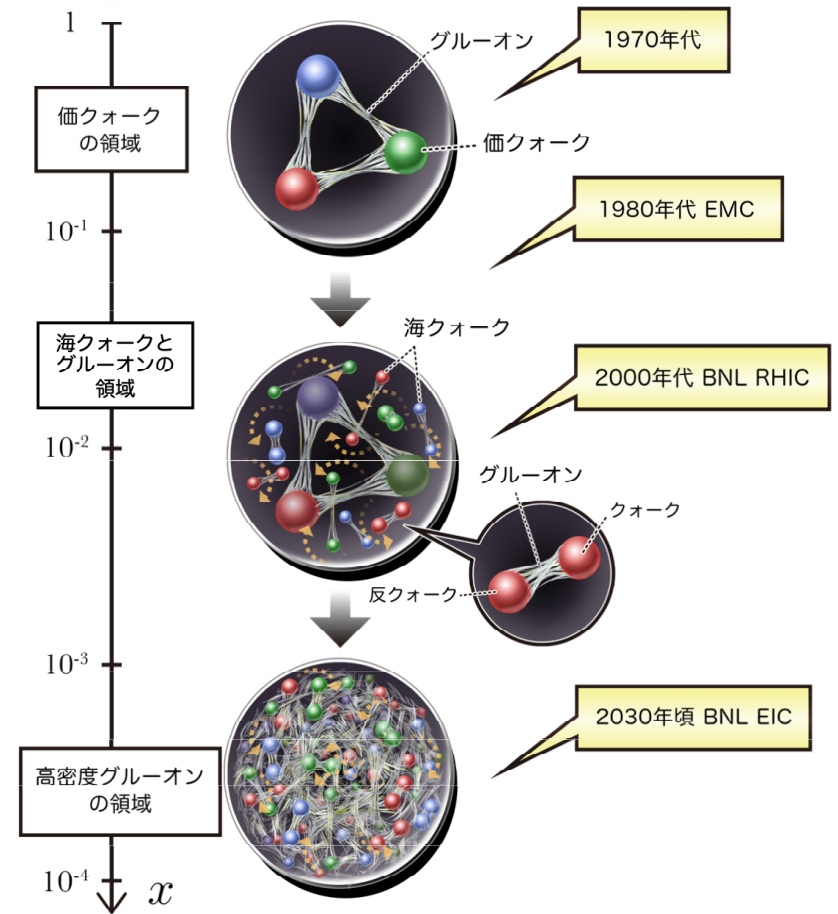
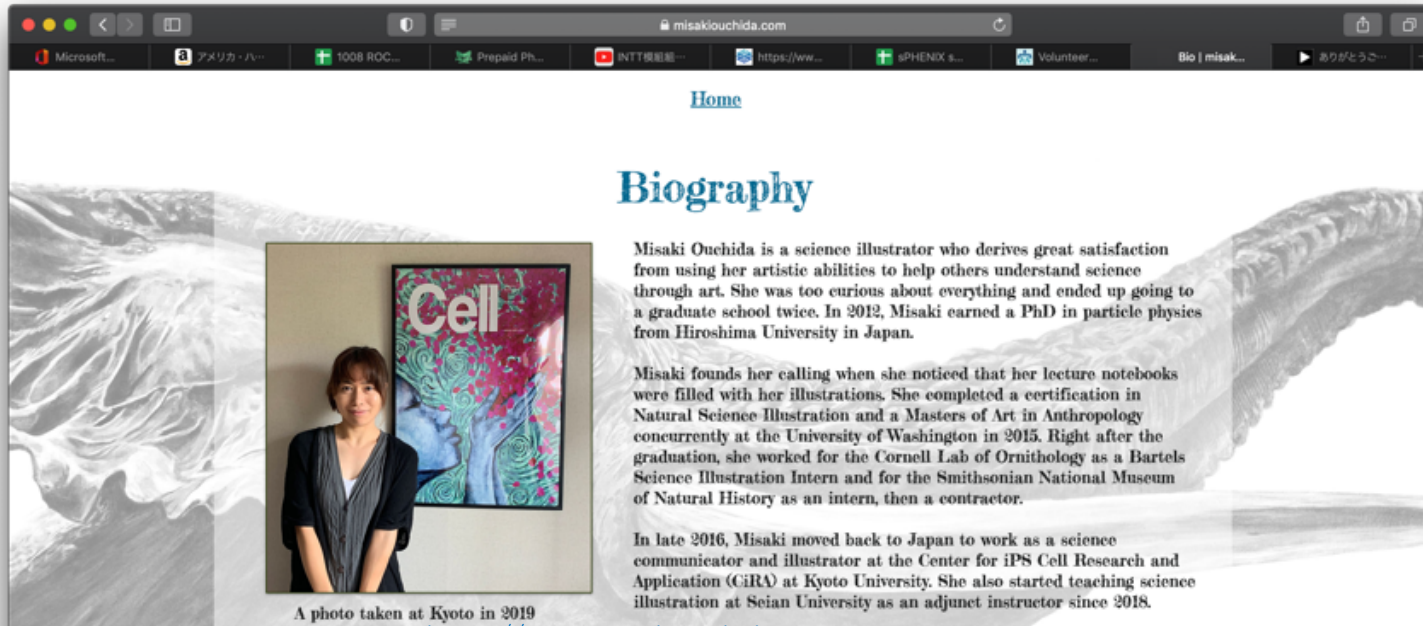


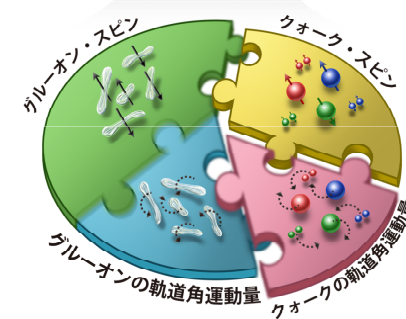
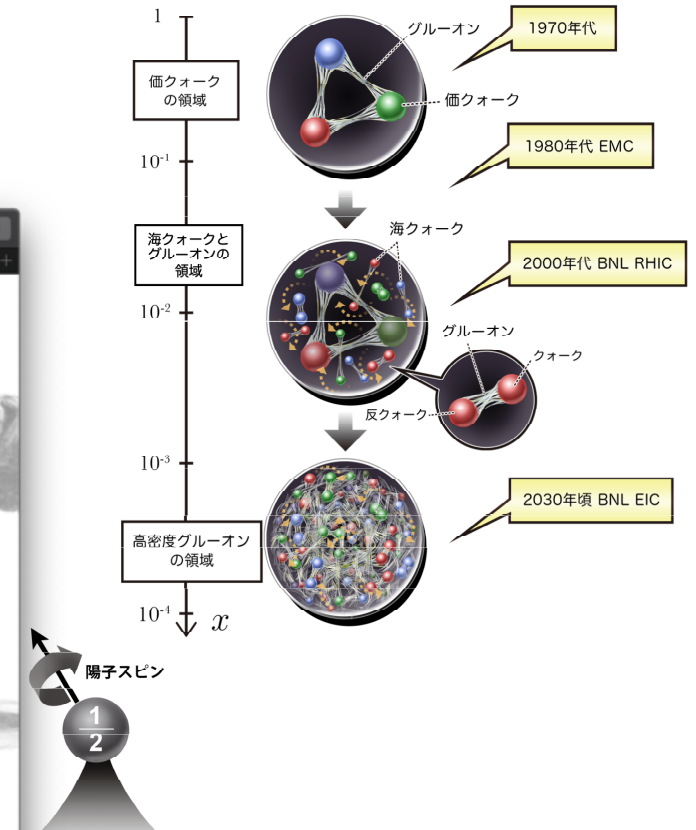
図1 加速器技術の進化によりプローブのエネルギーが高くなり、それに伴い観測される陽子の内部構造の分解能 (Q^2) が緻密になっていく様子。分解能が上がると、より x の小さい領域へのアクセスが可能になる。 x の小さい領域はグルオン密度が高い事が知られ、反応にグルオンが関わる確率が高くなる。

Illustration by Misaki Ouchida



<https://www.misakiouchida.com>

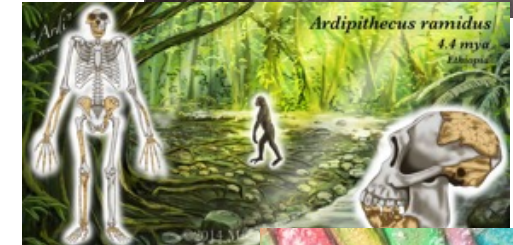
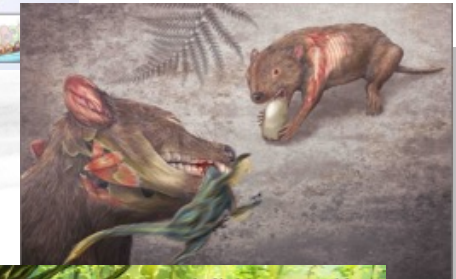
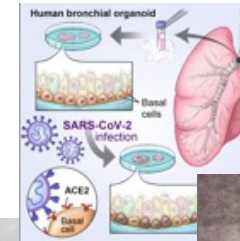
Ph.D from Hiroshima Univ. in heavy ion physics at RHIC ex-PHENIX collaborator.



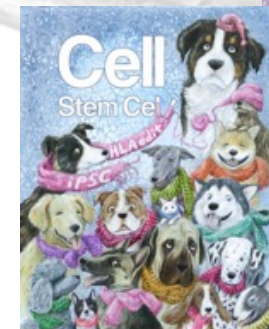
Misaki Ouchida's Profile

Curriculum Vitae

- 2018 - present Adjunct Instructor
Seian University of Art and Design
- 2016 - present Science Communicator, In-house Science Illustrator
Center for iPS Cell Research and Application (CiRA) Kyoto University
- 2016 Science Illustration Intern, Contractor
Entomology, Ornithology, and Ichthyology
Smithsonian Institution National Museum of Natural History
- 2015 - 2016 Bartel Science Illustration Intern
Cornell Lab of Ornithology
- 2015 Certificate in Natural Science Illustration
University of Washington
- 2015 Master of Arts (Anthropology), *University of Washington*
人類学
- 2012 Ph.D. in Science (Physics), *Hiroshima University*
- 2007 Master of Science (Physics), *Hiroshima University*
- 2005 CERN Summer School, *CERN*
- 2005 Bachelor of Science (Physics), *Hiroshima University*



← RHIC



2022 July ~ Assistant Professor at Hokkaido University

Sec.2 Gluon Spin Measurement at RHIC

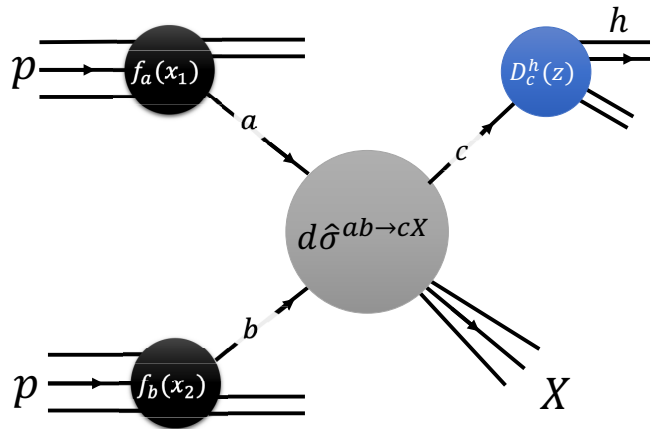


図2 高エネルギー陽子-陽子衝突における包括的ハドロン生成反応のダイアグラム。

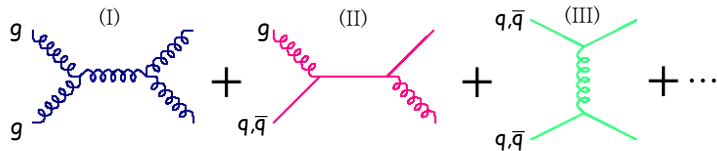


図3 高エネルギー陽子-陽子衝突におけるパートンの素過程ダイアグラムの例。図2のパートン a, b がそれぞれ (I) グルーオン-グルーオンの反応、(II) グルーオン-(反)クォークの反応、(III) (反)クォーク-(反)クォークの反応。

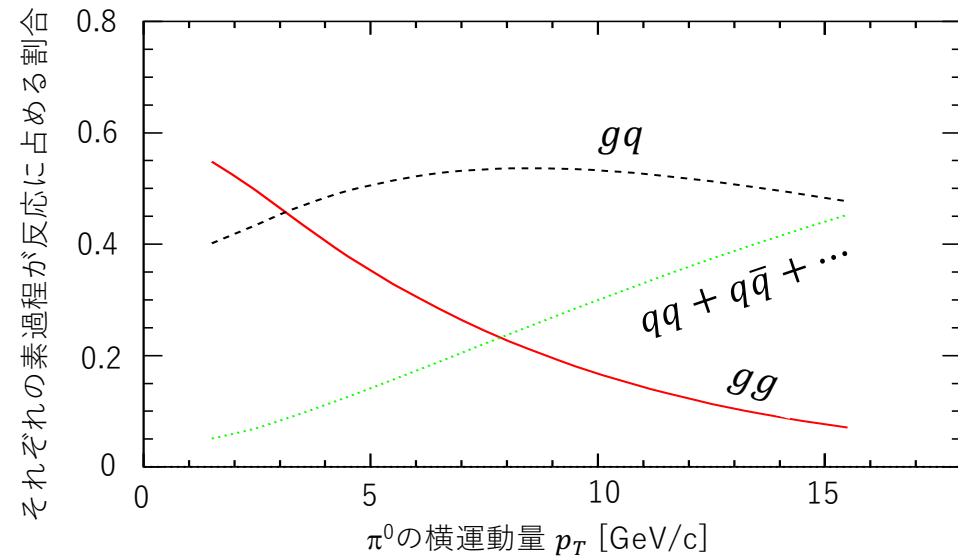


図4 $\sqrt{s} = 200$ GeVにおける陽子-陽子衝突反応の中央ラピディティ領域 ($|\eta| < 0.35$) の π^0 生成の素過程割合の pQCD 予測。グルーオン-グルーオン (実線)、グルーオン-クォーク (破線)、クォーク-クォーク反応 (点線)、それぞれの割合を π^0 の横運動量 p_T の関数で示している。

Sec. 2 Gluon Spin Measurement Results

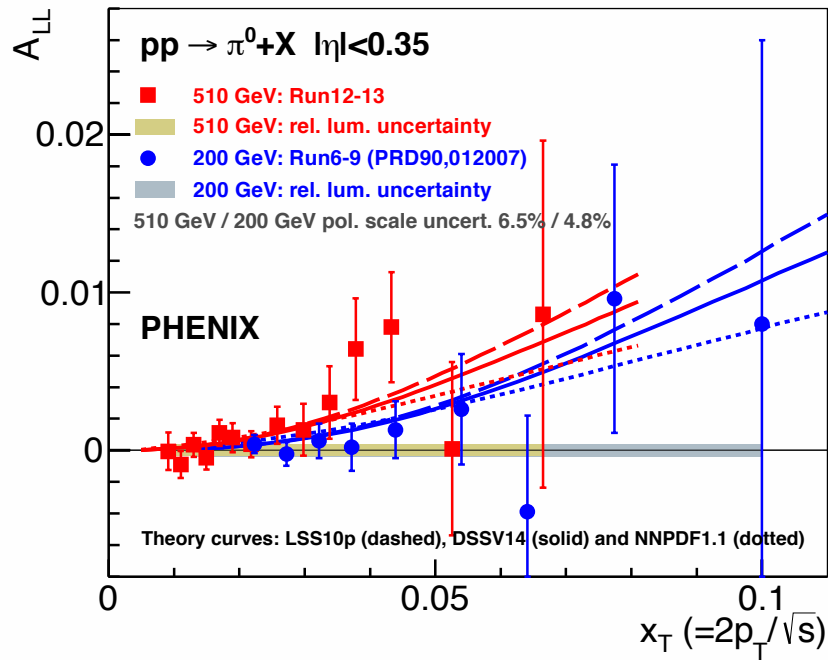


図5 PHENIX 実験で測定された縦偏極陽子-陽子衝突反応の中央ラピディティ領域 ($|\eta| < 0.35$) の π^0 生成非対称度 A_{LL} 。四角は $\sqrt{s} = 510$ GeV、丸は $\sqrt{s} = 200$ GeV のデータ¹¹⁾。横軸は横運動量 $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$ 。実線、破線、点線はそれぞれの衝突エネルギーに対するグローバル QCD 解析モデル計算^{12, 13, 14)}。

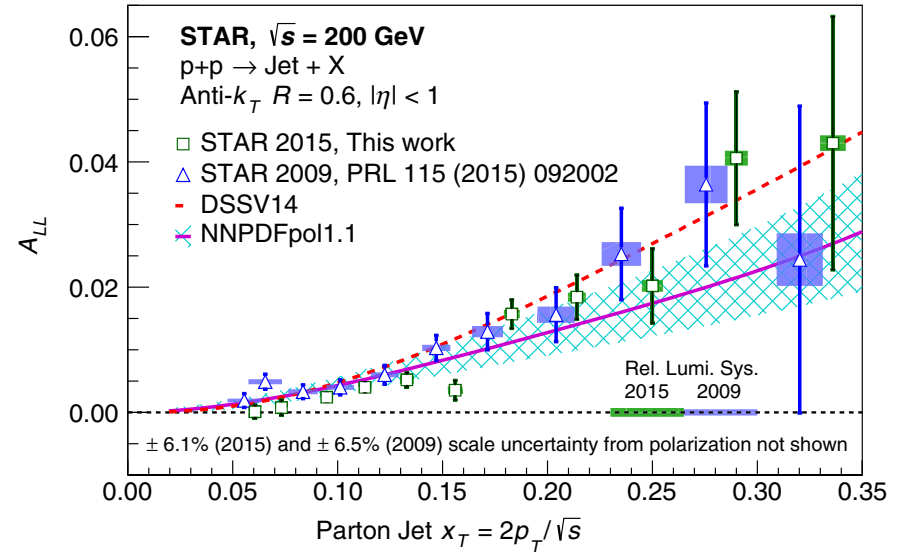


図6 STAR 実験で測定された $\sqrt{s} = 200$ GeV における縦偏極陽子-陽子衝突反応の中央ラピディティ領域 ($|\eta| < 1$) の単ジェット生成非対称度 A_{LL} 。横軸はジェットの横運動量 $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$ で、2009 年と 2015 年に取得した実験データをそれぞれ三角¹⁵⁾、四角¹⁶⁾ で示す。実線とその線影、破線は衝突エネルギーに対するグローバル QCD 解析モデル計算^{14, 12)}。

$$\int_{0.05}^{0.2} \Delta g(x) dx = 0.20^{+0.06}_{-0.07} \quad \sim 40\% \text{ of Proton Spin}$$

Sec 3. Sea Quark Spin

New generation sea-quark measurement at RHIC
Advantages in

1. Avoid ambiguity introduced by the hadron fragmentation function.
2. Hard scale reliable description by pQCD.
3. Flavor is almost fixed.

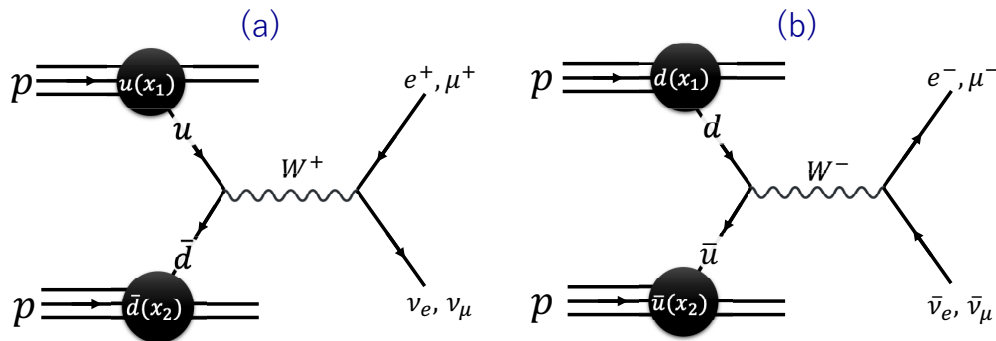


図7 高エネルギー非偏極陽子-陽子衝突の (a) W^+ 生成反応、(b) W^- 生成反応ダイアグラム。

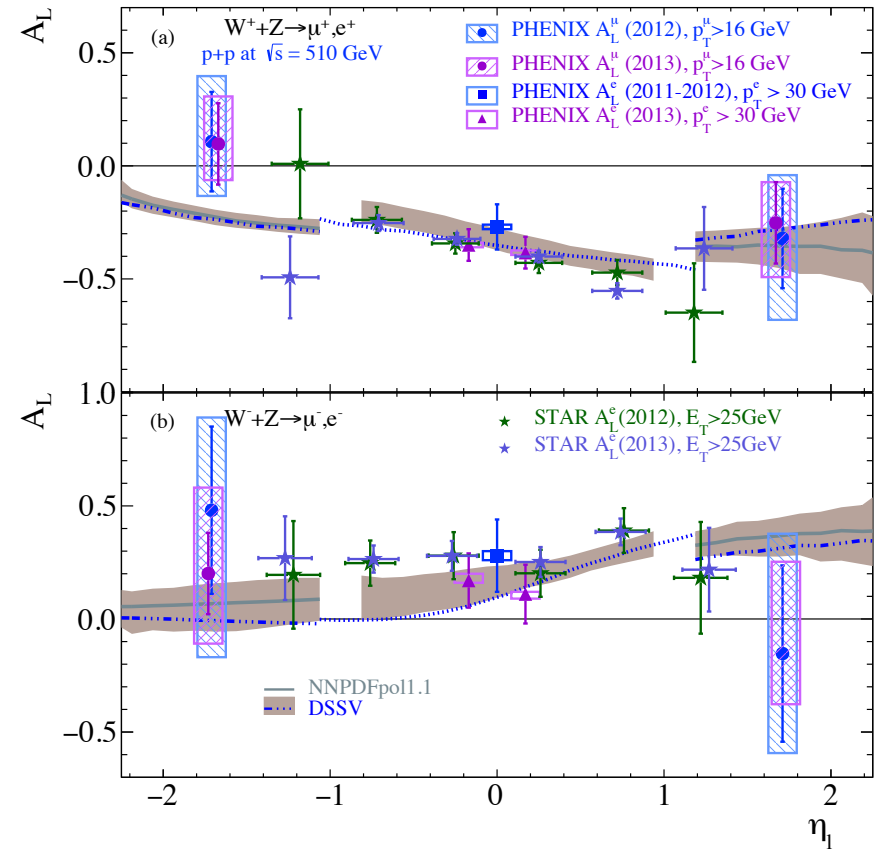


図8 W と Z ボソンからの正・負崩壊レプトンの単縦スピン非対称度 A_L をレプトンのラピディティの関数としてプロットした^{17, 18}。比較のために、RHIC のデータを含めずにグローバル QCD 解析した異なる二つの理論予測を実線¹⁴、点線や破線等¹²) で示す。

Transverse Single Spin Asymmetry

The last missing piece of the "Spin Puzzle"
 Not yet established neither theoretically nor experimentally.

$$A_N = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} \quad (4)$$

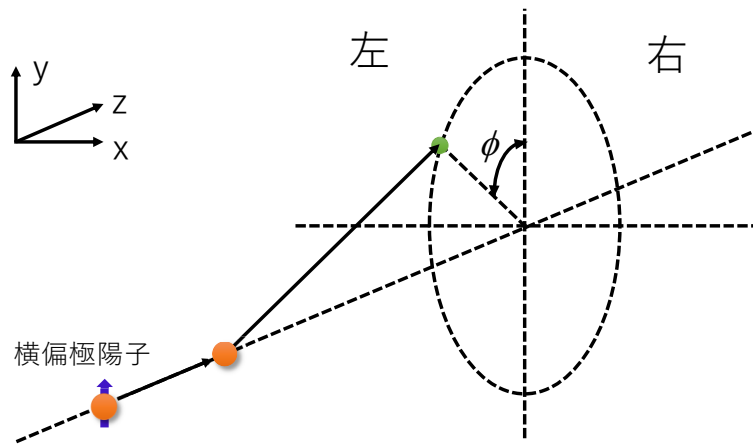


図9 横偏極した陽子と無偏極な陽子との衝突において、終状態にハドロンや光子を生成する反応で、生成断面積が入射陽子のスピンの向きに依存する現象を単スピン非対称 (SSA) と呼ぶ。

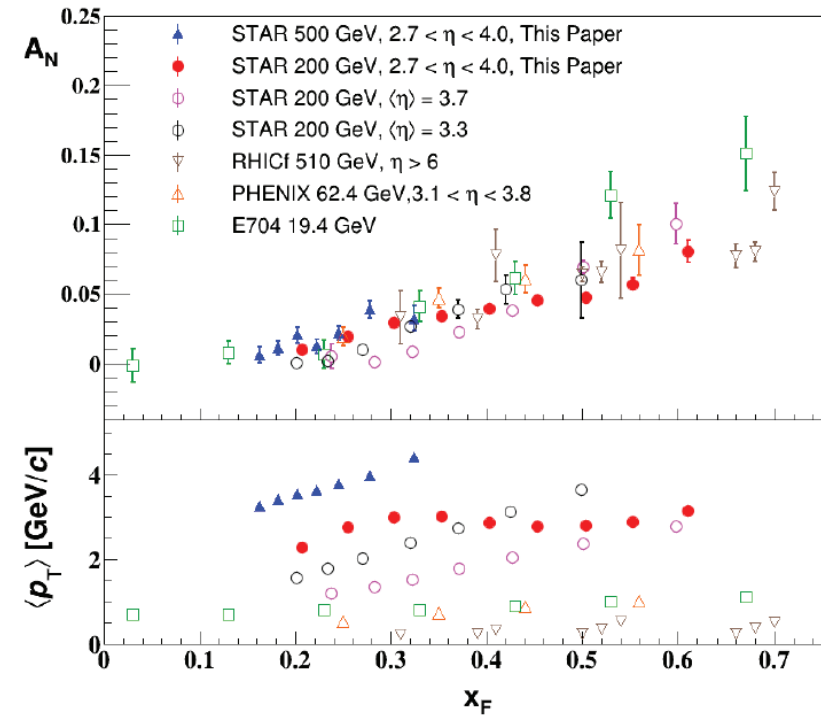


図10 Fermilab-E704 実験、STAR 実験、PHENIX 実験、RHICf 実験により測定された π^0 の A_N の結果。

Transverse Single Spin Asymmetry

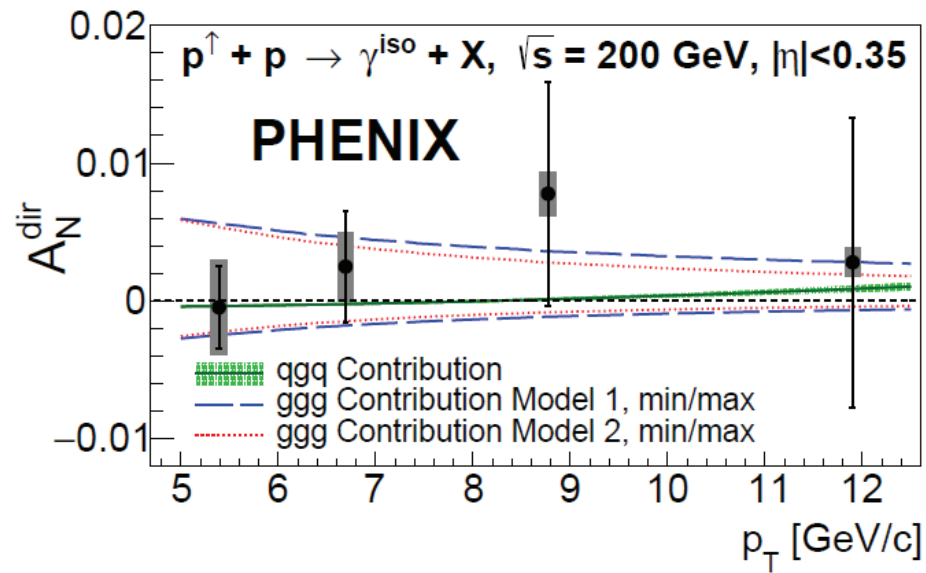


図 13 PHENIX 実験の中央電磁カロリメータを用いた光子の直接生成過程に対する A_N 測定結果。

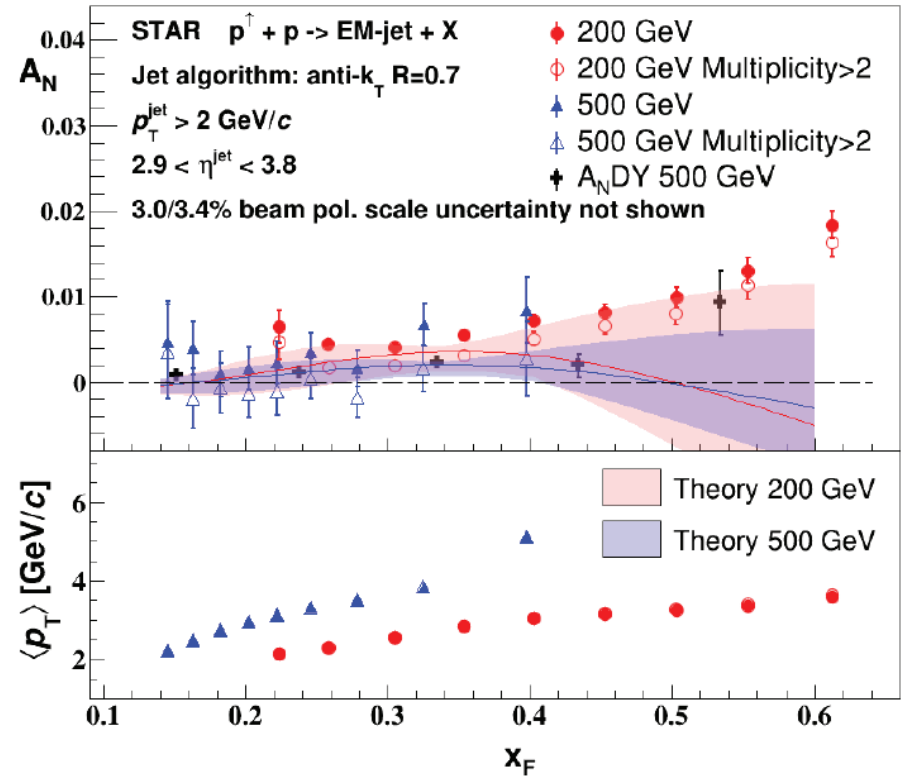


図 14 STAR 実験の前方電磁カロリメータを用いたジェットの電磁成分に対する A_N 測定結果と AnDY 実験の結果の比較。

Summary and Future Prospect

- RHIC's contribution to Spin Puzzle
- EIC