

RHIC スピン物理学の発展

EICで展開する新たな原子核・素粒子物理学

@東京大

2024年5月29日

後藤 雄二 (理研)

RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)



高エネルギー重イオン衝突と偏極陽子衝突をはじめ、様々な核種の組み合わせと衝突エネルギーでの高エネルギー衝突実験を行っている

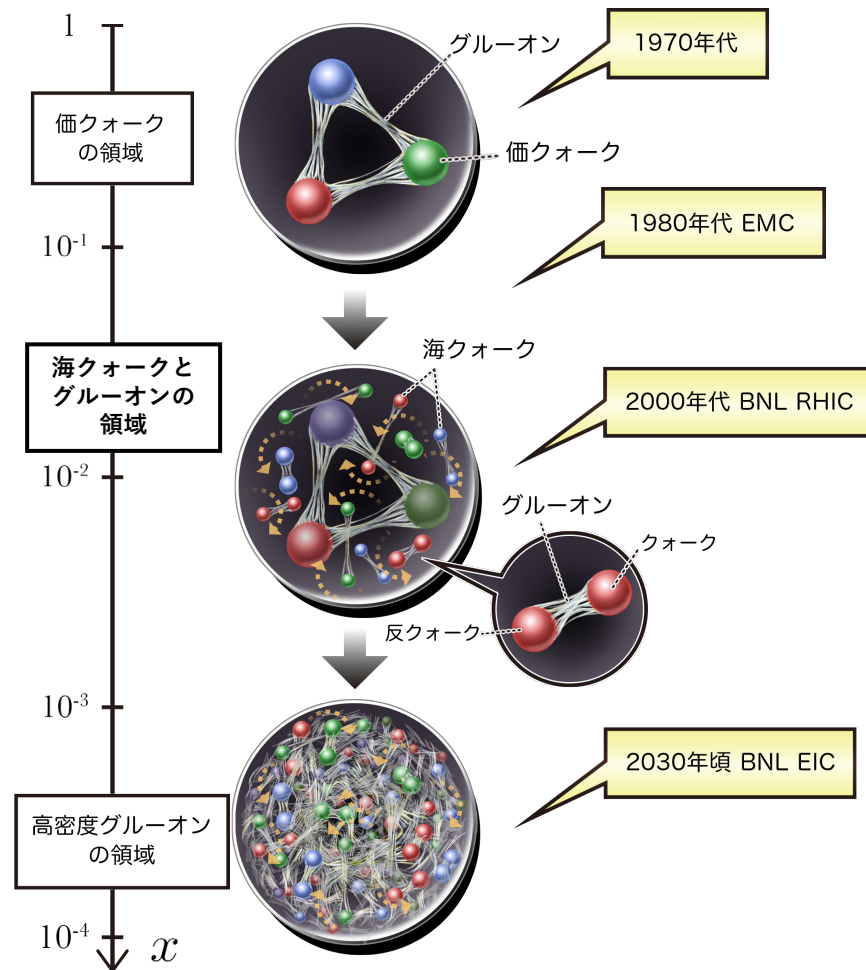
核子あたり7.7 GeVから200 GeVの金+金衝突

62.4 GeVから510 GeVの偏極陽子衝突

重陽子+金、銅+銅、ウラン+ウラン、銅+金、ヘリウム3+金、偏極陽子+金/アルミ

RHICの物理

- 高エネルギーQCD (量子色力学)
 - クォークとグルーオンの物理
 - 物質の成り立ち
- 重イオン衝突
 - クォーク・グルーオン・プラズマの物理
 - Hot QCD
- 偏極陽子衝突
 - 核子構造の物理
 - Cold QCD
 - RHICスピン物理 → EICの物理へ

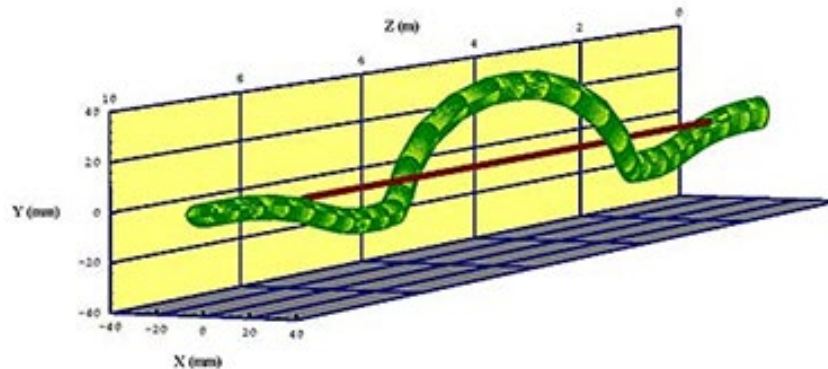


理研BNL協力

- RHICスピン計画 1997～
- RHICでの偏極陽子加速
 - 「シベリアの蛇」磁石、偏極度計
- PHENIX実験
 - ミューオン南アーム、ミューオントリガー、EMCal-RICHトリガー、ローカル偏極時計、VTXシリコン検出器
 - sPHENIXシリコン飛跡検出器
- 理研BNL研究センター



「シベリアの蛇」磁石第1号機

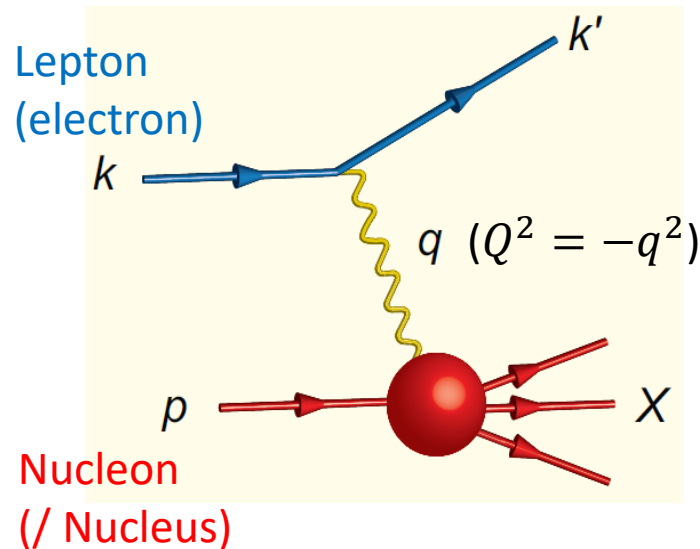


「シベリアの蛇」
磁石中のビーム粒子の軌道

クォーク・グルーオン構造

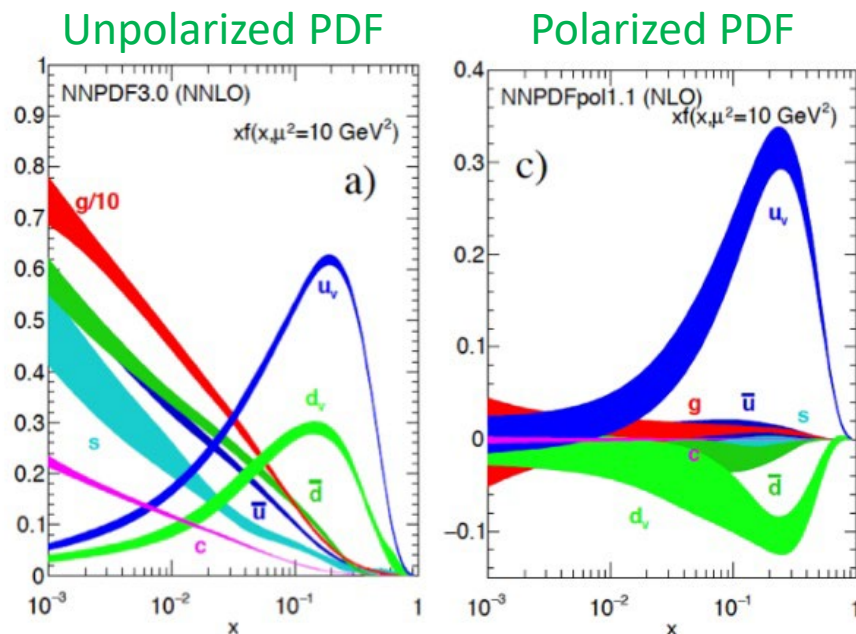
- レプトン（電子）の深非弾性散乱（inclusive DIS）

- 高い Q^2 ($Q^2 = -q^2$) が陽子内部のパートン（クォークとグルーオン）に対する分解能を与える



- クォーク、グルーオンのパートン分布関数 (PDF)

- 一次元描像
 - 横軸 x : クォーク、グルーオンの進行方向の運動量比
 - EICで偏極PDFの精度を格段に上げる



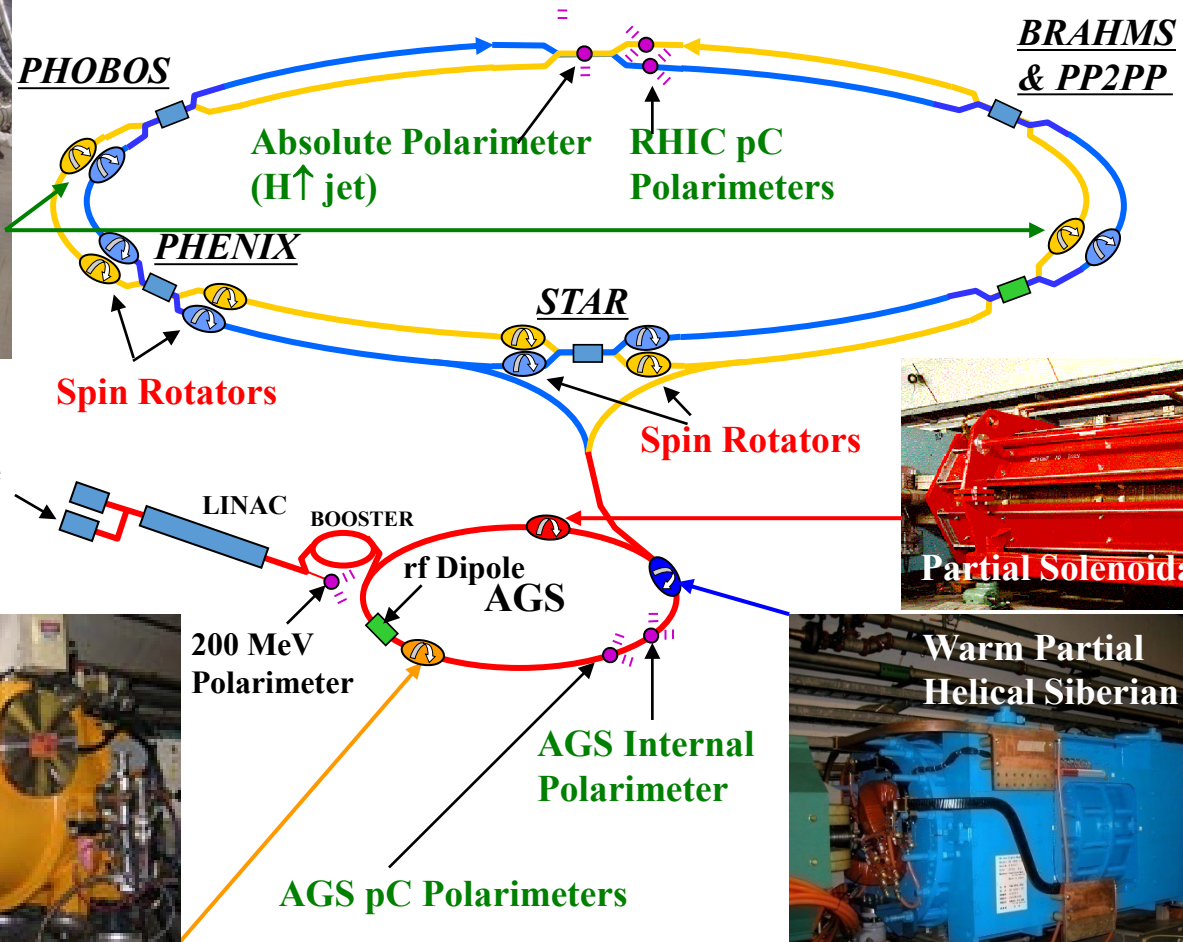
RHICでの陽子のスピンの構造の研究

- スピンパズルの謎を解く
 - 陽子 = クォーク (uud) + グルーオン
 - 陽子のスピン $1/2$ の起源は何か？
 - クォークのスピン ($1/2$)
 - グルーオンのスピン (1)
 - クォークとグルーオンの軌道角運動量
 - クォークのスピンが陽子のスピンを担う割合は 20% - 30%
- 縦スピン (ビーム軸方向) 非対称度の測定
 - グルーオン偏極測定
 - Wボソンによる反クォーク偏極測定
- 横スピン非対称度の測定
 - 前方の大きな横スピン非対称度の研究から軌道運動の理解へ

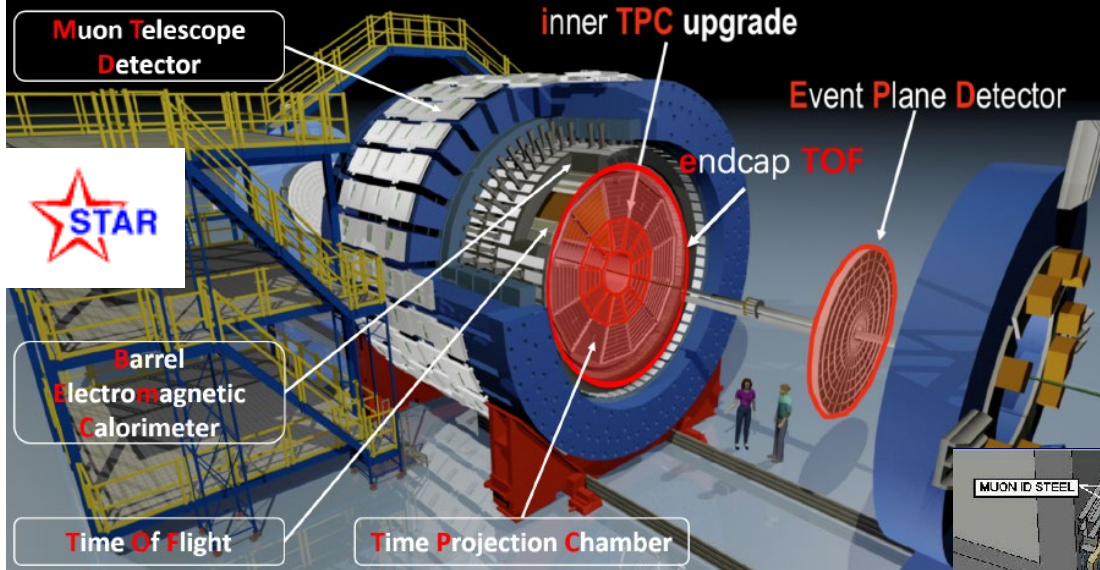


偏極陽子加速

- 偏極イオン源からの偏極度の維持、モニターを行う

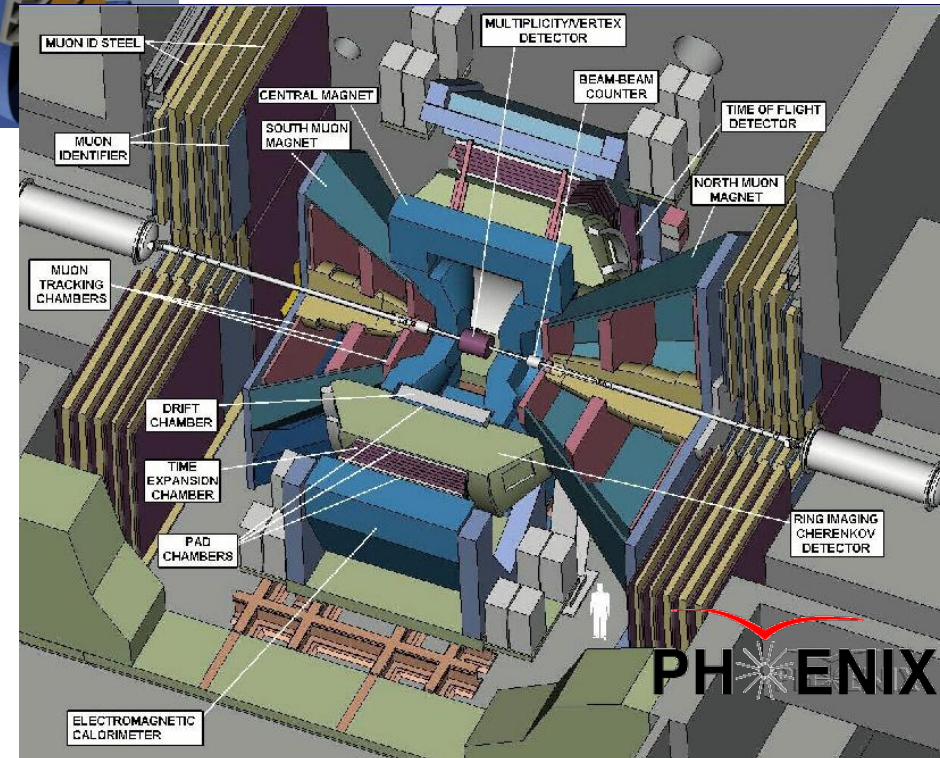


Polarized proton collision experiments



- STAR detector
 - 2π coverage for jet measurement
 - barrel TPC and EMC
 - endcap EMC

- PHENIX detector
 - limited acceptance
 - high resolution central EMCal
 - high-rate trigger and DAQ
 - forward muon detectors

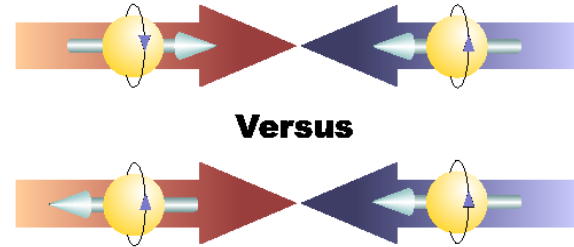


縦偏極陽子衝突

- A_{LL} (double-helicity asymmetry) の測定

- 衝突軸方向に偏極

$$A_{LL} = \frac{d\sigma_{++} - d\sigma_{+-}}{d\sigma_{++} + d\sigma_{+-}}$$

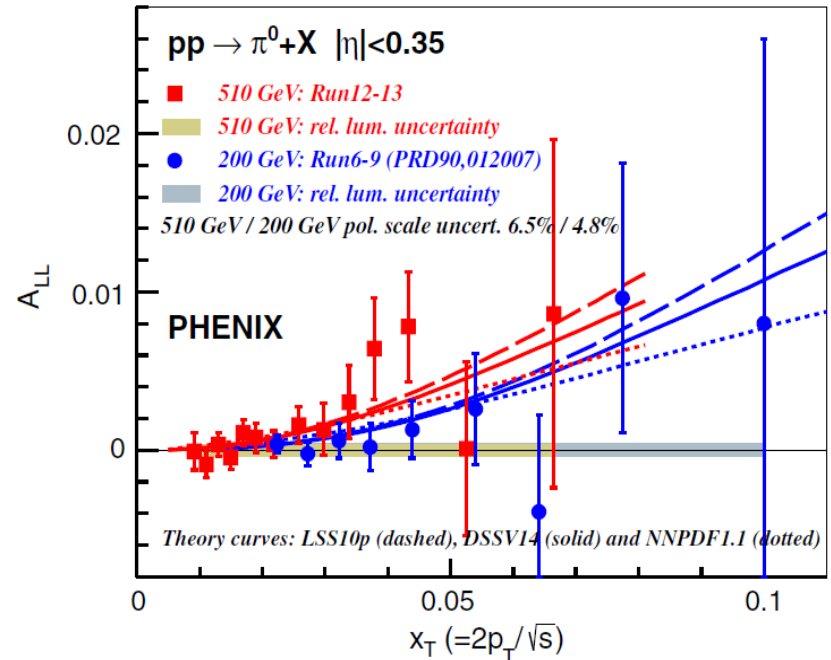
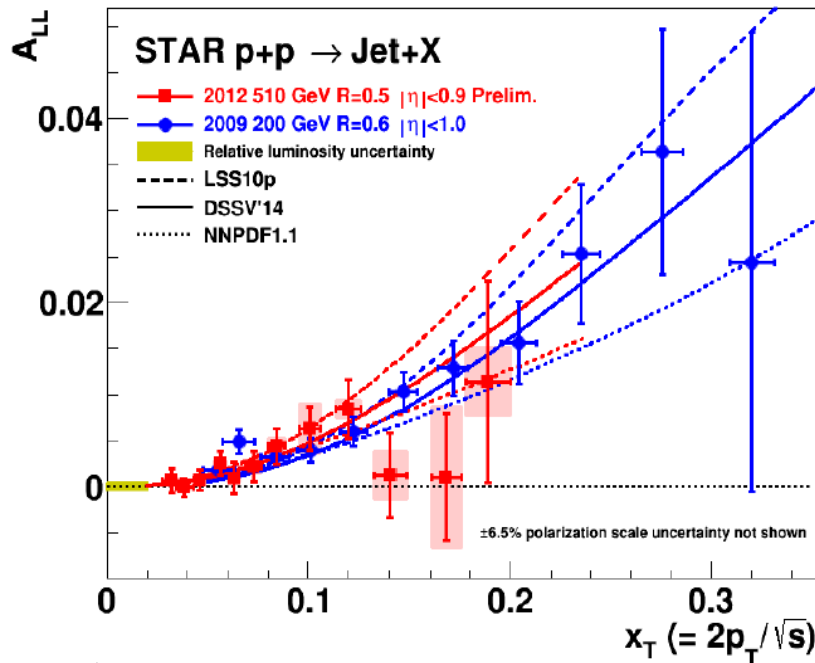


- グルーオン偏極

- gluon+gluon および gluon+quark 反応に対して A_{LL} を測定

Midrapidity jet at STAR

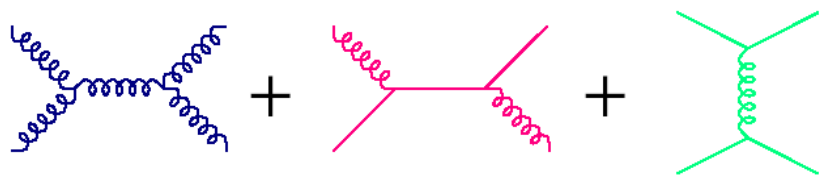
Midrapidity π^0 at PHENIX



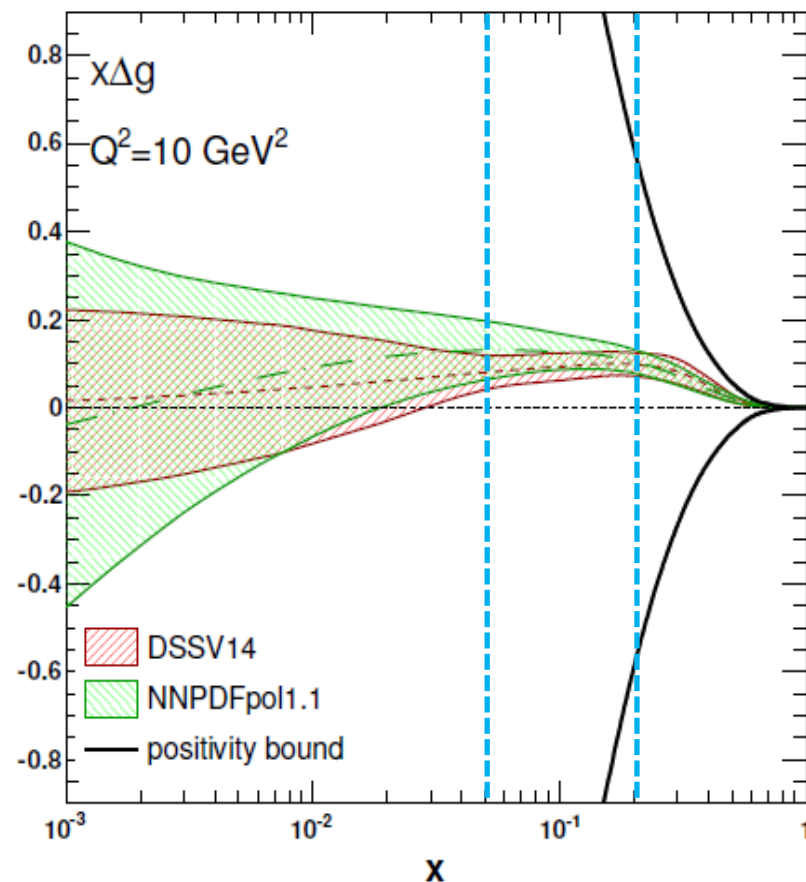
グルーオン偏極 (Δg)

arXiv:1503.03518

- 正のグルーオン偏極
 - DSSV、NNPDFによるグローバルQCD解析
 - 衝突エネルギー200 GeVのRHIC偏極陽子衝突データを含む
 - 2014年プレス発表
- グルーオン+グルーオンとグルーオン+クォーク反応からの大きな収量



- STAR実験のジェット測定
 - 大きなアクセプタンス
- PHENIX実験 π^0 測定
 - アクセプタンスは限られるが高性能のEMカロリメータ

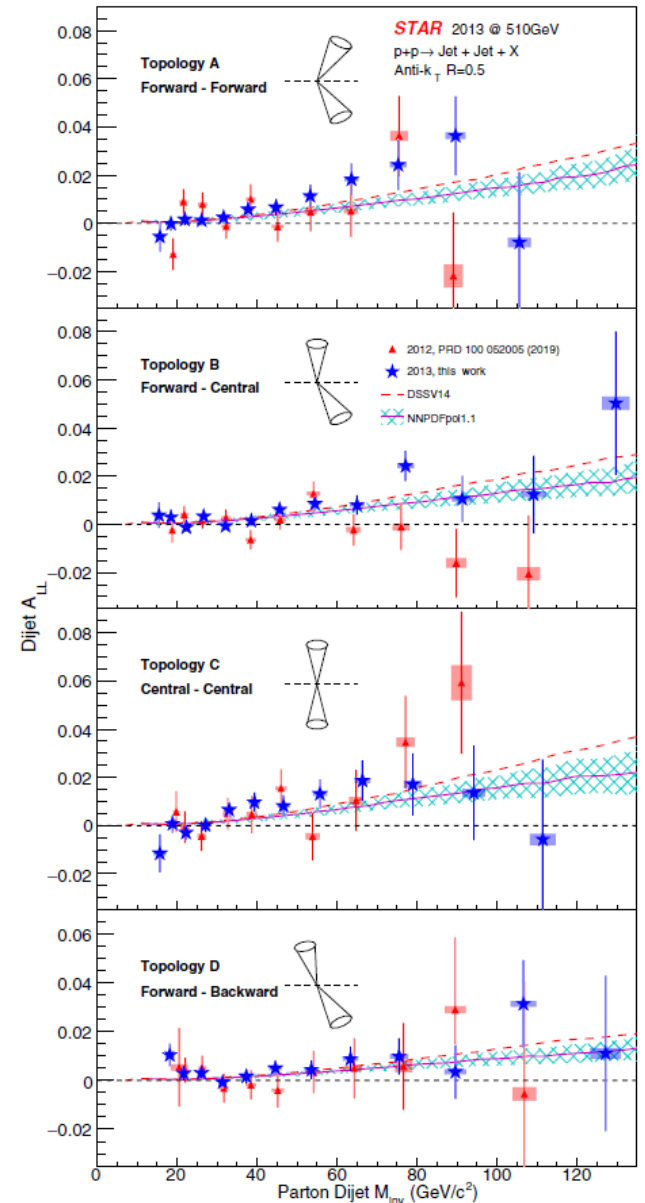
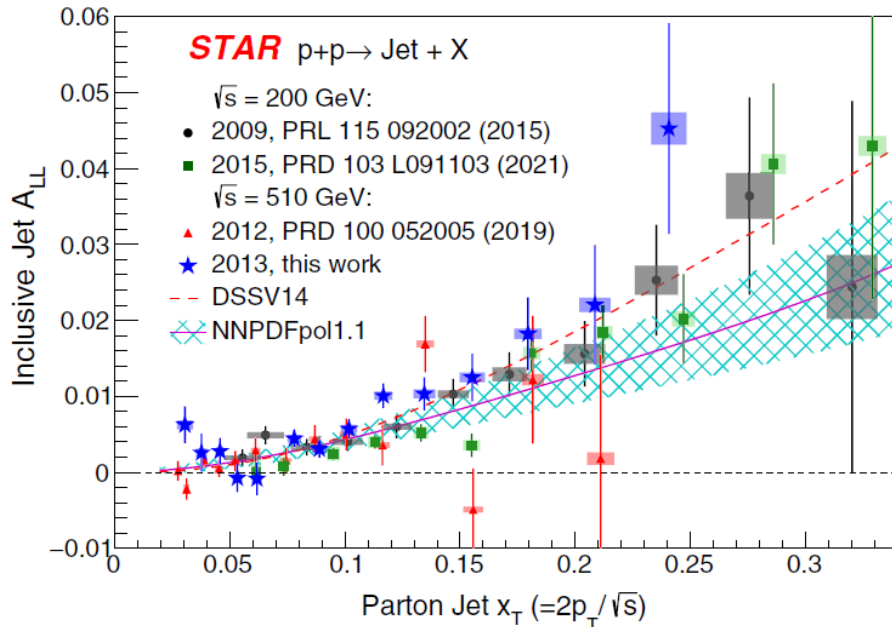


$$Q^2 = 10 \text{ GeV}^2 \quad \int_{0.05}^{0.2} dx \Delta g(x, Q^2)$$

NNPDFpol1.1	$+0.15 \pm 0.06$
DSSV14	$0.10^{+0.06}_{-0.07}$

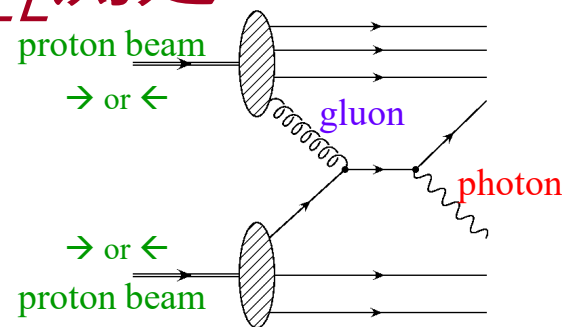
STARのJetとDi-Jet A_{LL} 測定

- 中央ラピディティでの包括的 (inclusive) ジェットと2ジェット
- Phys. Rev. D 105 (2022) 092011
 - $\sqrt{s} = 510$ GeV
- Phys. Rev. D 103 (2021) L091103
 - $\sqrt{s} = 200$ GeV



PHENIXの直接光子 A_{LL} 測定

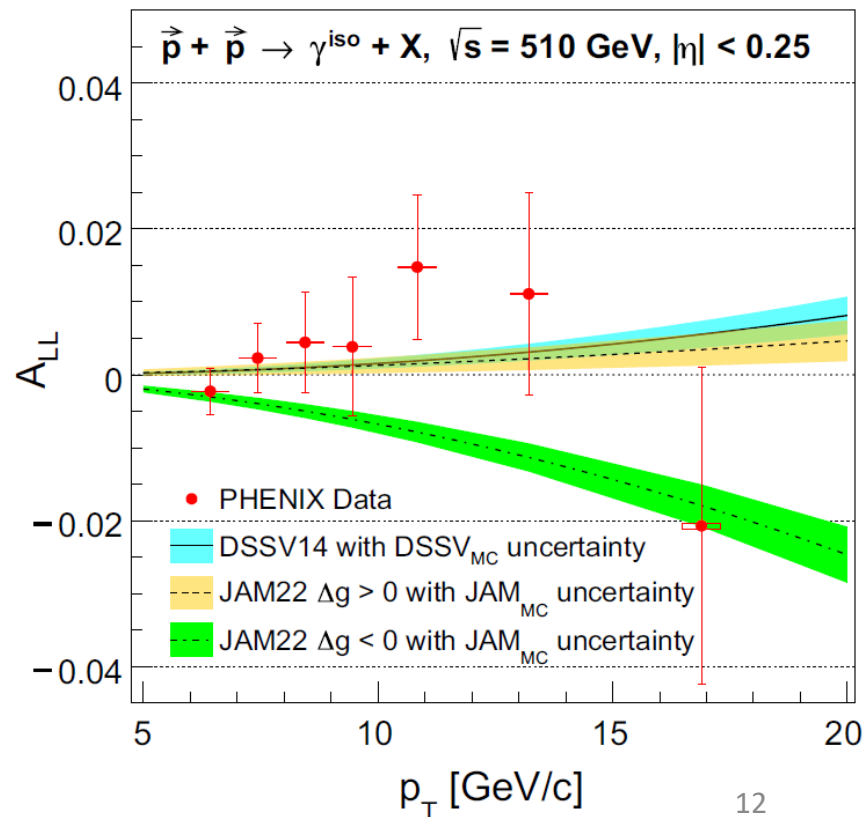
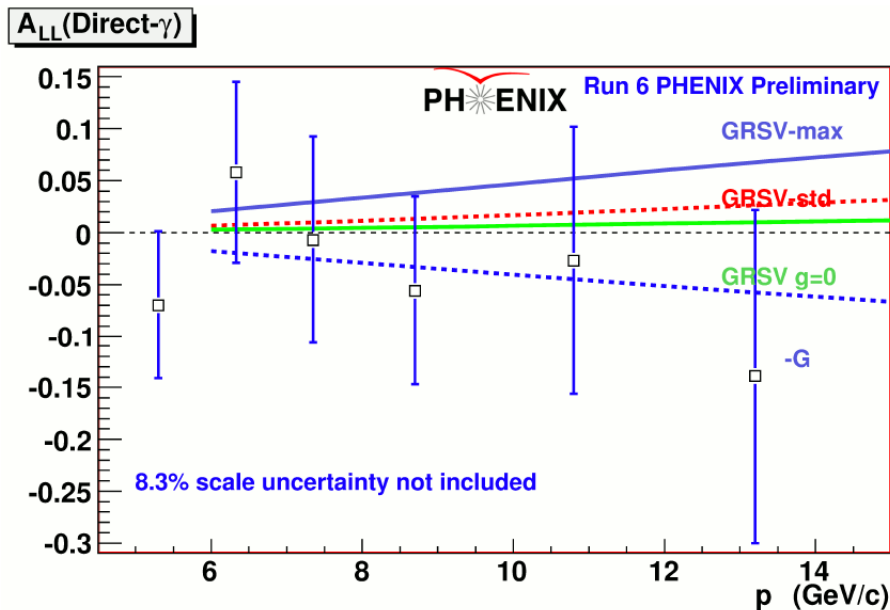
- 直接光子が負の非対称度（グルーオンのスピンの向きが陽子のスピンの向きと反対： $\Delta g < 0$ ）を持つ理論が正しい確率は0.3%以下
- グルーオン・スピンの向きが陽子スピンと同じ向き（ $\Delta g > 0$ ）であることを決定的に支持



衝突エネルギー200GeV（出版無し）

衝突エネルギー510 GeV

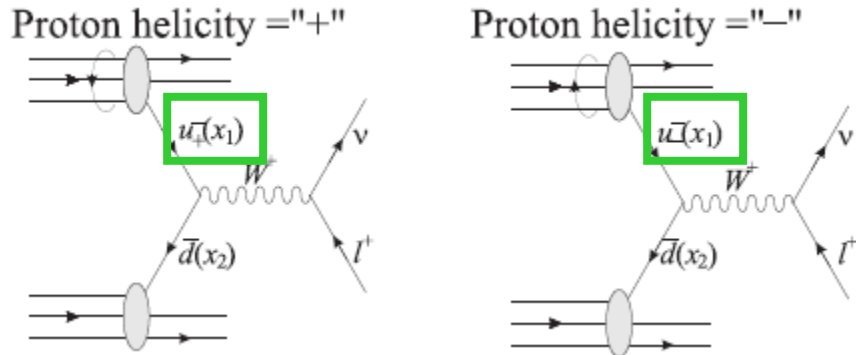
Phys. Rev. Lett. 130 (2023) 251901



反クォーク偏極

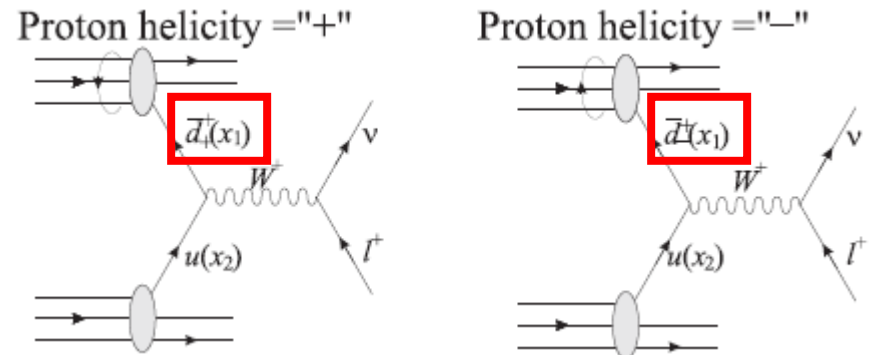
- Wボソン生成に対するパリティの破れた A_L の測定

前方ラピディティ



$$\frac{-\Delta u(x_a)}{u(x_a)}$$

後方ラピディティ



$$\frac{\Delta \bar{d}(x_a)}{\bar{d}(x_a)}$$

$$A_L^{W^+} = \frac{-\Delta u(x_a)\bar{d}(x_b) + \Delta \bar{d}(x_a)u(x_b)}{u(x_a)\bar{d}(x_b) + \bar{d}(x_a)u(x_b)}$$

- 偏極陽子に対して後方に生成されたWボソンは反クォーク偏極への感度を持つ

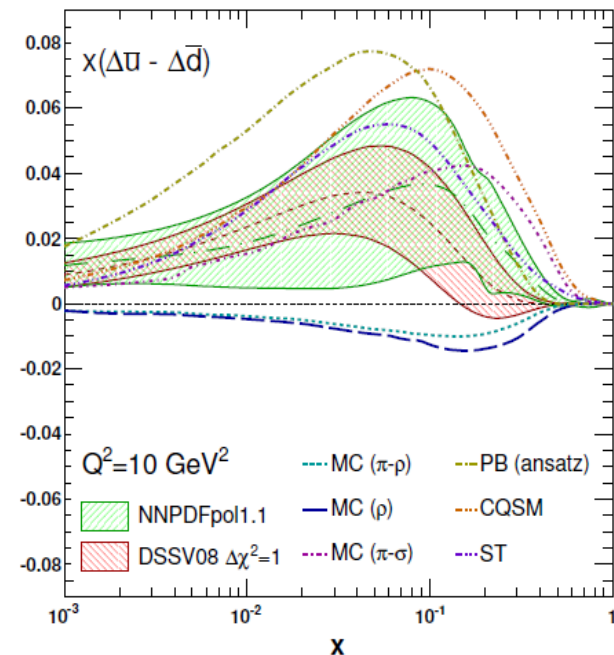
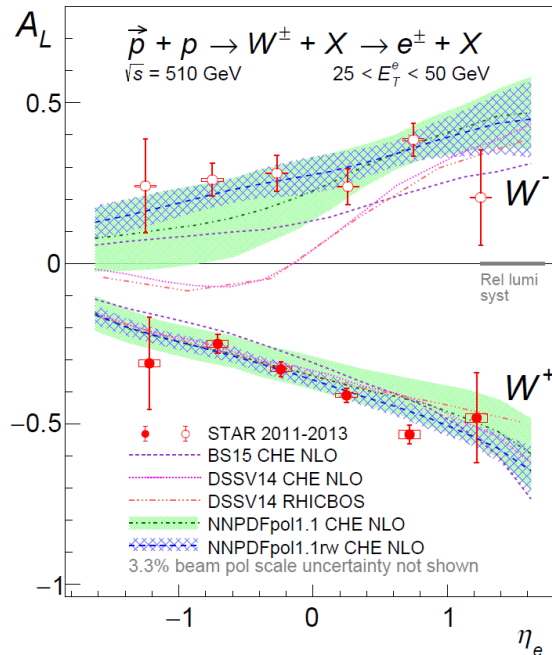
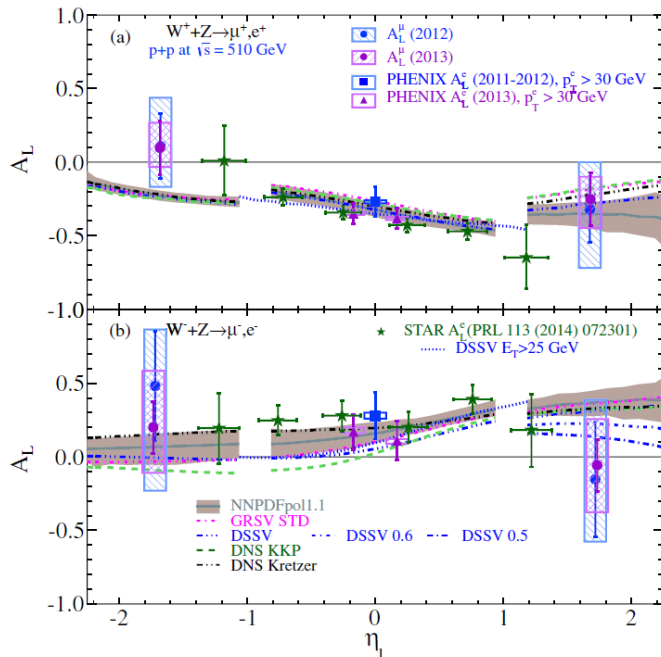
反クォーク偏極

- 2013年までに $\sqrt{s} = 510\text{GeV}$ 衝突で十分なデータを取得し、Wボソンデータの解析を行った
 - STAR中央検出器 } $W \rightarrow e\nu$
 - PHENIX中央検出器 }
 - PHENIX前方検出器 } $W \rightarrow \mu\nu$
- グローバルQCD解析により $\Delta\bar{u} > \Delta\bar{d}$ が示唆される
 - 非偏極では $\bar{d} > \bar{u}$

PHENIX: PRD98 (2018) 032007

STAR: PRD99 (2019) 051102

arXiv:1406.7122

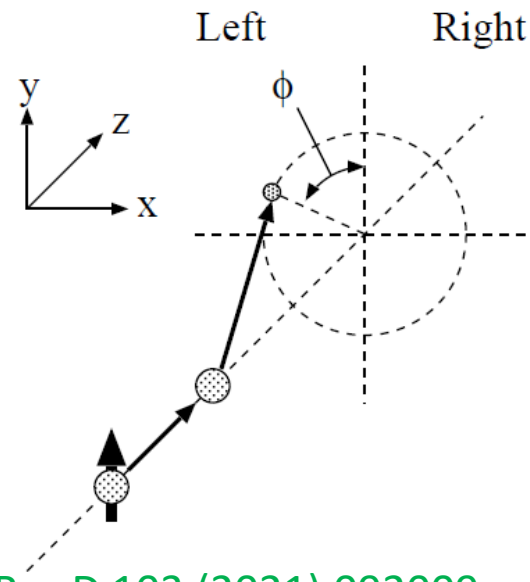


横偏極陽子 + 陽子衝突

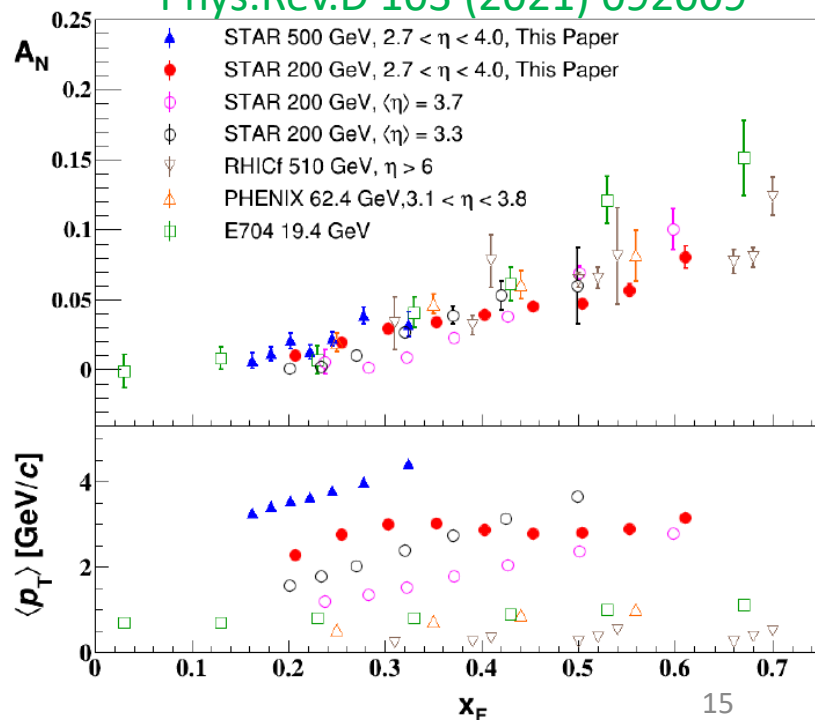
- 横非対称度 A_N (transverse single-spin asymmetry) の測定

$$A_N = \frac{d\sigma_{Left} - d\sigma_{Right}}{d\sigma_{Left} + d\sigma_{Right}}$$

- 方位角依存性の測定
- 前方ハドロン生成に対する大きな A_N
 - 広い \sqrt{s} の範囲で同様な結果
- 摂動論QCDによる2つの方法
- TMD (Transverse Momentum Dependent) 関数
 - 陽子内部の横運動量分布、スピンと軌道運動の相関を記述
- 高次ツイスト関数
 - Collinear因子化に基づき、クォーク・グルーオン相関関数、3グルーオン相関関数、ツイスト3破砕関数などのパートン間の量子的多体相関を記述

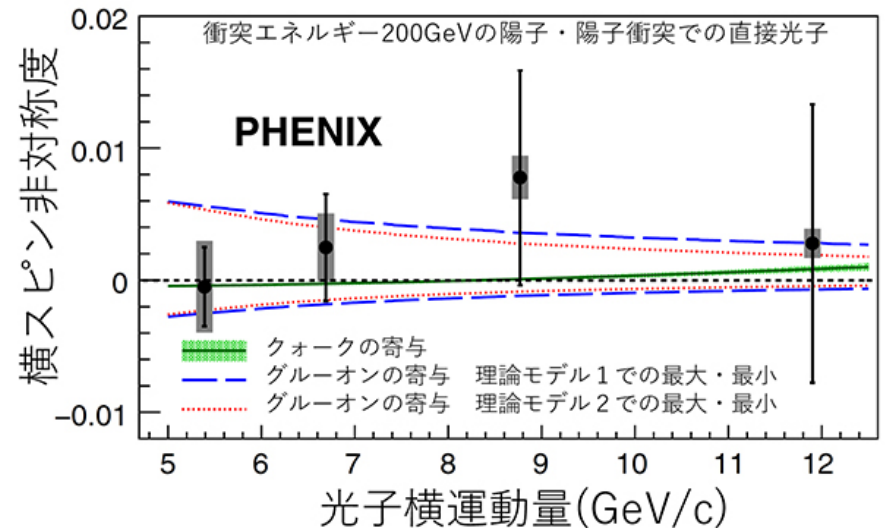
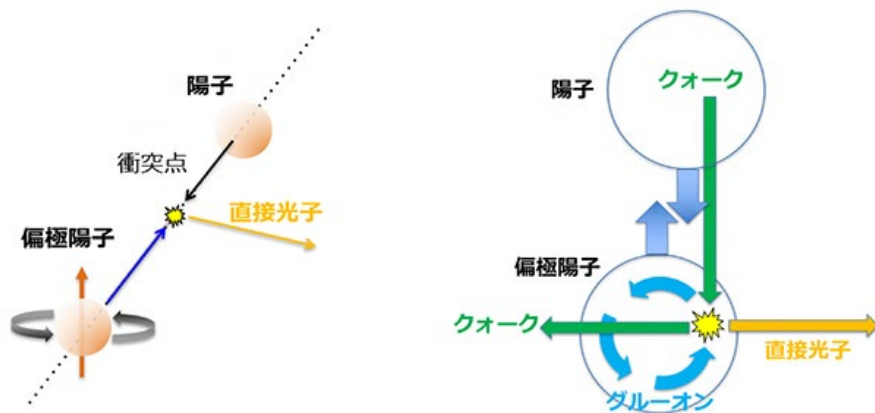
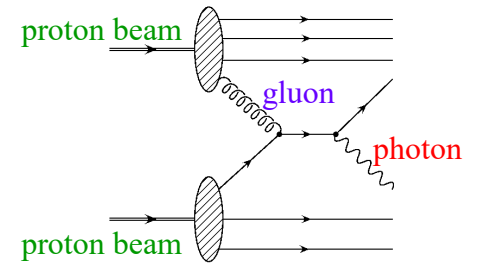


Phys.Rev.D 103 (2021) 092009



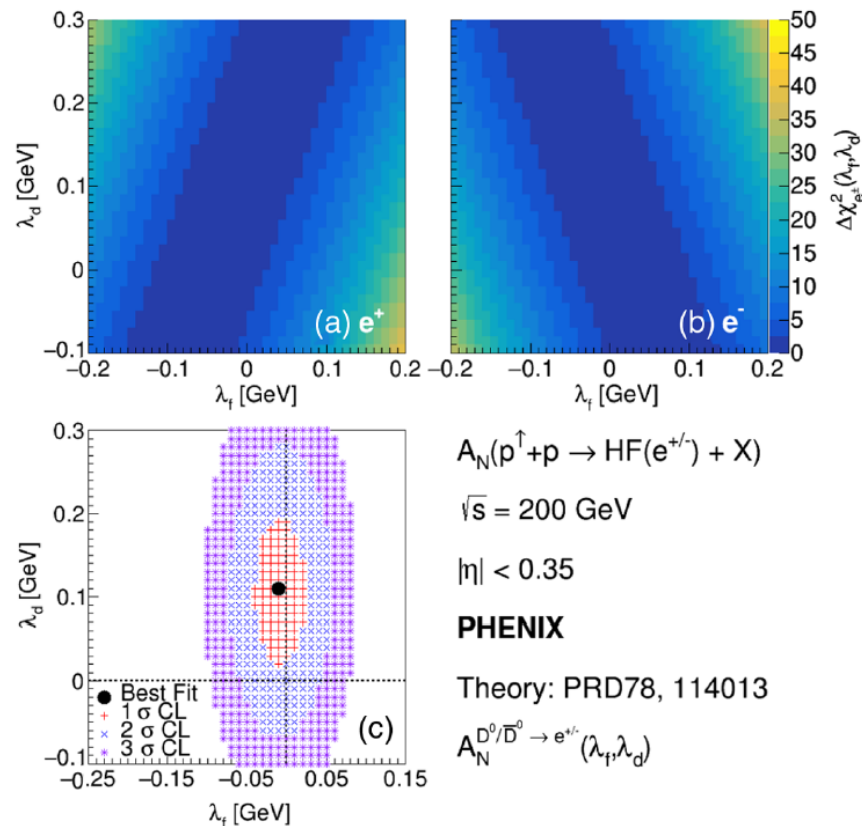
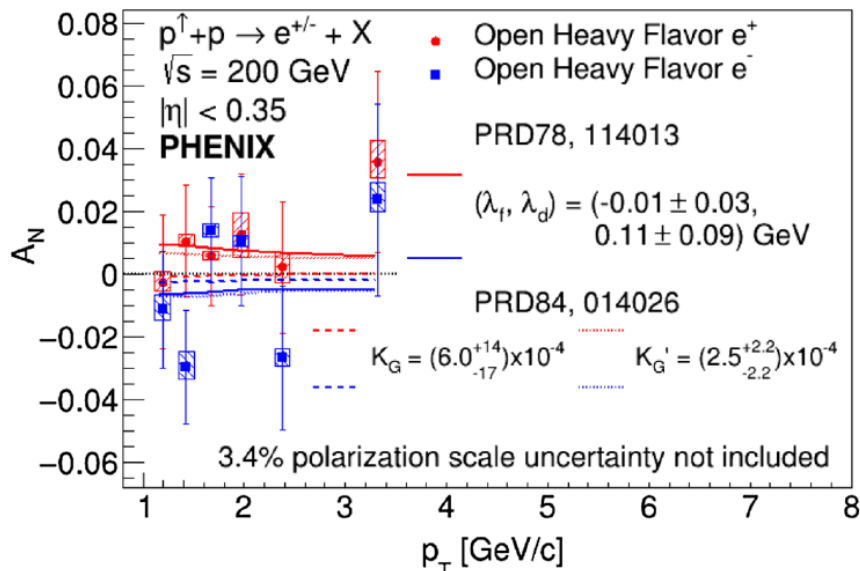
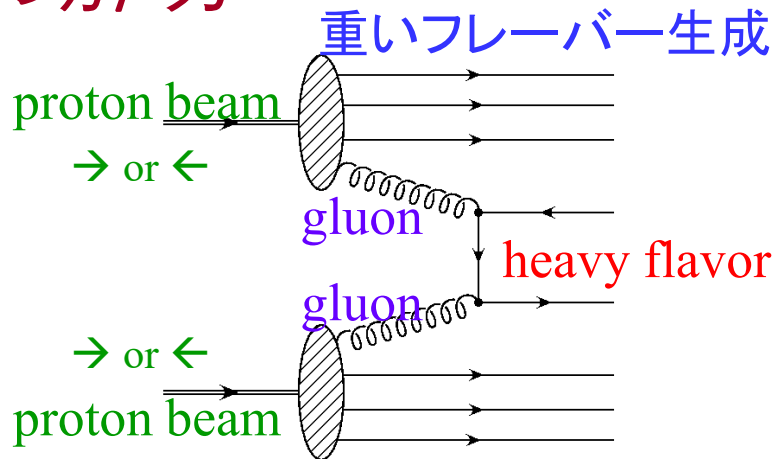
横偏極現象の解明

- 核子内部のクォーク、グルーオンの軌道運動の研究
- PHENIX実験
 - π 中間子、 η 中間子、 J/ψ 、荷電ハドロン、ミューオン・電子（重フレーバー）、直接光子
- 直接光子
 - Phys.Rev.Lett. 127 (2021) 162001
 - 始状態グルーオンのダイナミクスに敏感
 - 陽子内部のグルーオン運動の測定に成功
 - 3グルーオン相関関数に制限を与える



横偏極現象の解明

- PHENIX open heavy flavor at midrapidity
 - Phys. Rev. D 107 (2023) 052012.
 - グルーオン融合過程：始状態のグルーオンに感度
 - e^\pm 非対称度測定：レプトン崩壊チャンネル
 - 3グルーオン相関関数 (tri-gluon correlation function) に制限を与える

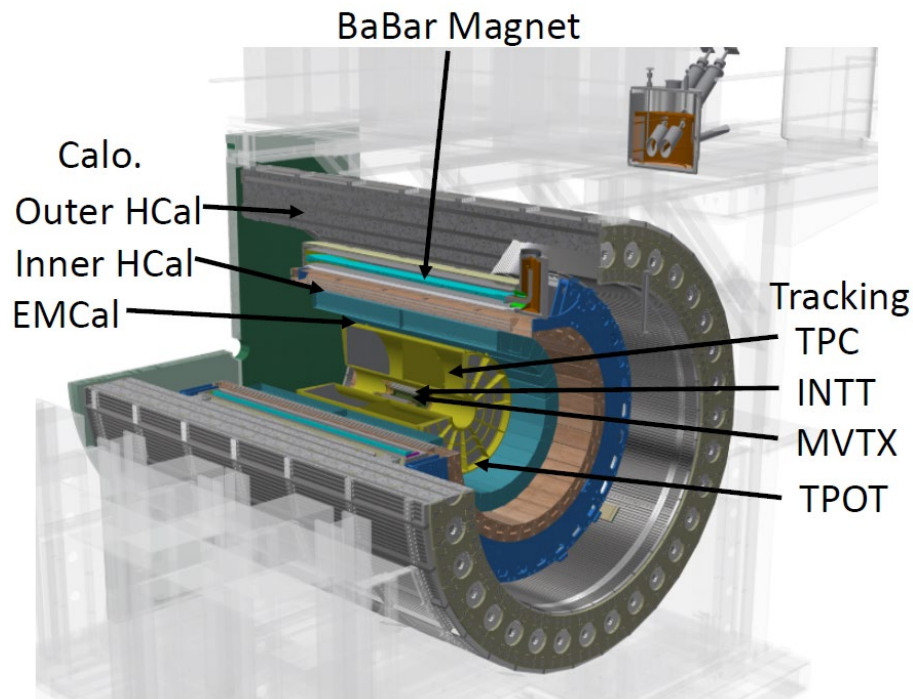


sPHENIX実験

- RHICスピンプログラムの完了
 - PHENIX実験のデータ収集が2016年に完了
 - 縦偏極陽子衝突からの物理はほぼ完了
 - 横偏極陽子衝突からの物理はまだ残っている

- sPHENIXの物理

- ジェット相関とジェット構造
- パートンのエネルギー損失
- ウプシロン分光
- Cold QCDとスピン物理



Not shown: sEPD and MBD

sPHENIX & STAR (2023-25)

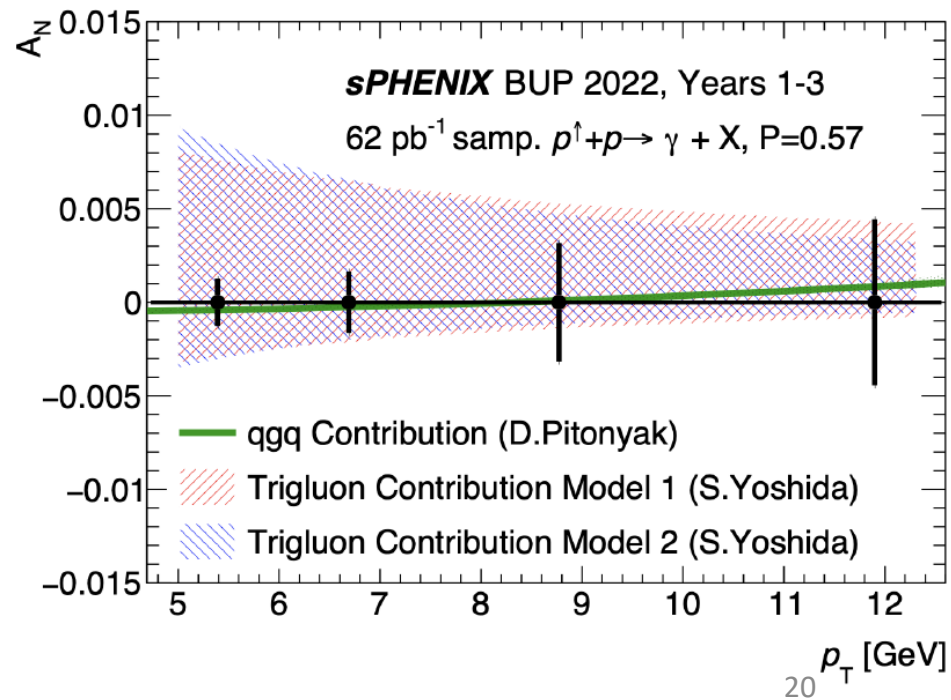
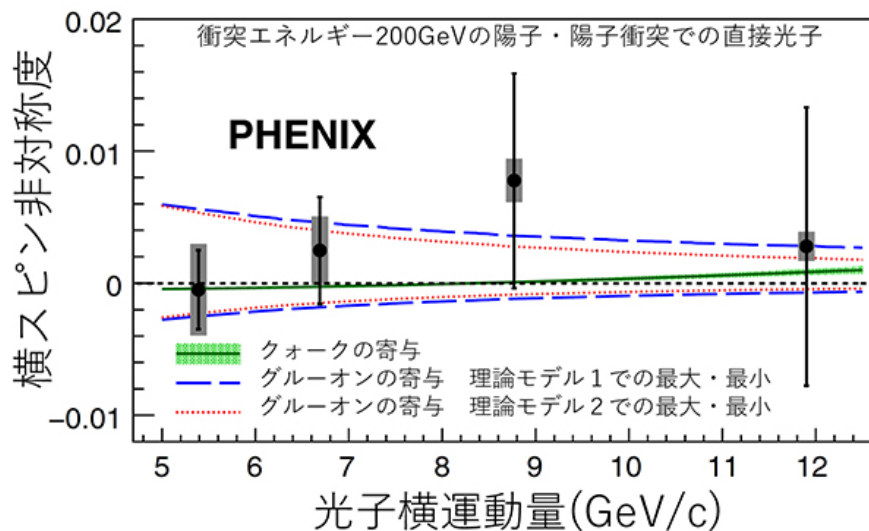
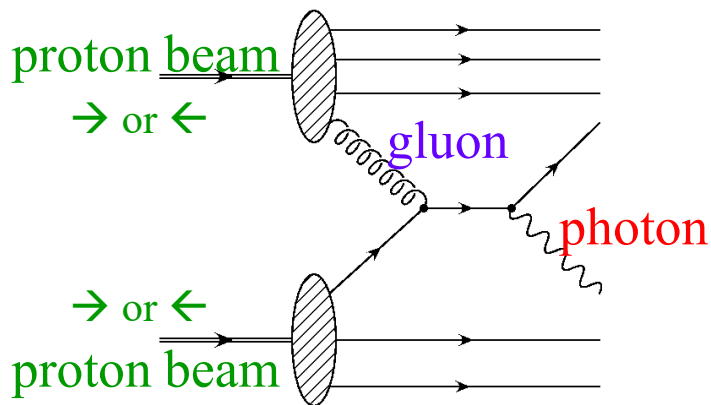
sPHENIX BUP 2022 [sPH-TRG-2022-001] 24 (28) cryo week scenarios

Year	Species	$\sqrt{s_{NN}}$ [GeV]	Cryo Weeks	Physics Weeks	Rec. Lum. $ z < 10$ cm	Samp. Lum. $ z < 10$ cm
2023	Au+Au	200	24 (28)	9 (13)	3.7 (5.7) nb ⁻¹	4.5 (6.9) nb ⁻¹
2024	$p^\uparrow p^\uparrow$	200	24 (28)	12 (16)	0.3 (0.4) pb ⁻¹ [5 kHz] 4.5 (6.2) pb ⁻¹ [10%-str]	45 (62) pb ⁻¹
2024	p^\uparrow +Au	200	–	5	0.003 pb ⁻¹ [5 kHz] 0.01 pb ⁻¹ [10%-str]	0.11 pb ⁻¹
2025	Au+Au	200	24 (28)	20.5 (24.5)	13 (15) nb ⁻¹	21 (25) nb ⁻¹

*s*PHENIX実験

- 直接光子

光子の直接生成

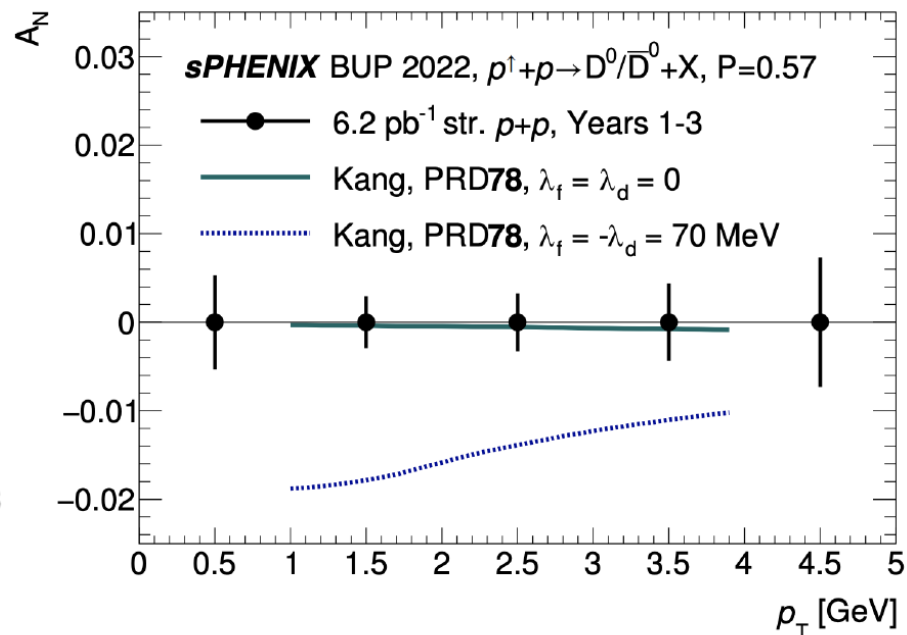
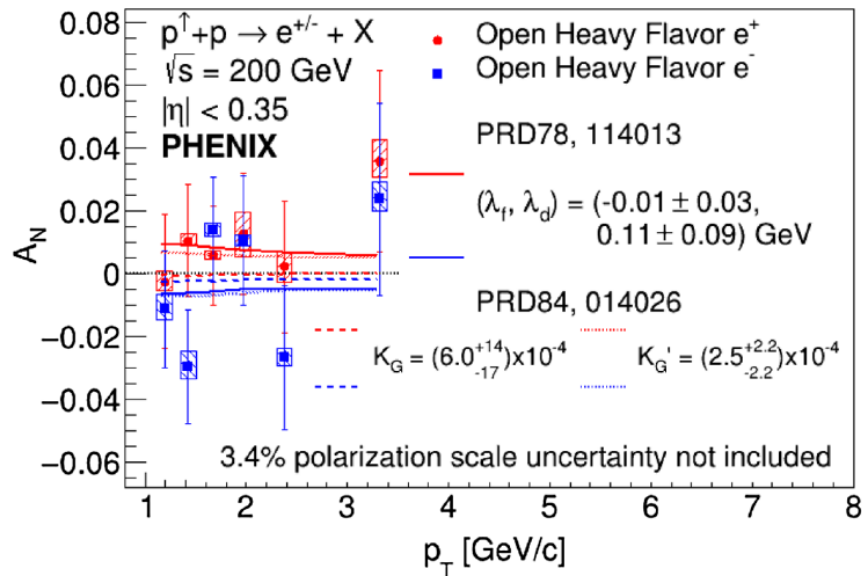
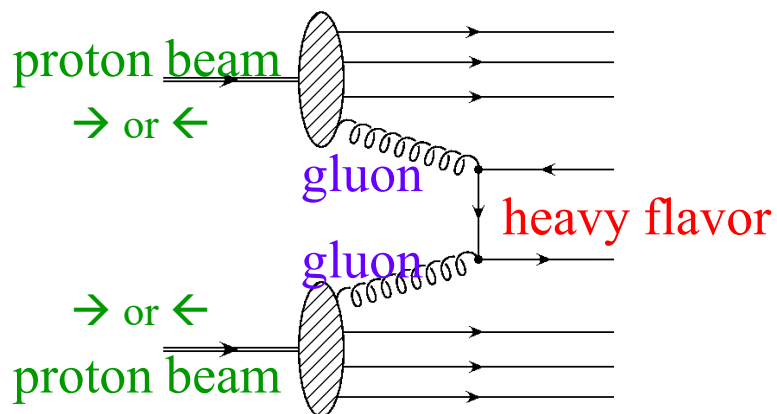


sPHENIX実験

• Open heavy flavor

- グルーオン融合過程：始状態のグルーオンに感度
 - 3グルーオン相関関数 (tri-gluon correlation function) に制限を与える
- e^\pm 非対称度測定：レプトン崩壊チャンネル
- D中間子非対称度測定

重いフレーバー生成



まとめ

- 偏極陽子衝突実験
- 縦スピン（ビーム軸方向）非対称度の測定
 - グルーオン偏極測定
 - Wボソンによる反クォーク偏極測定
- 横スピン非対称度の測定
 - 前方の大きな横スピン非対称度の研究から軌道運動の理解へ
- RHICスピンプログラムの完了
 - PHENIX実験のデータ収集が2016年に完了
 - 縦偏極陽子衝突からの物理はほぼ完了
 - 横偏極陽子衝突からの物理はまだ残っている
- sPHENIX実験
 - 核子内部のクォークとグルーオンの軌道運動の研究