

第11回高エネルギーQCD・核子構造勉強会



COMPASS 実験の状況

 山形大 糠塚元気



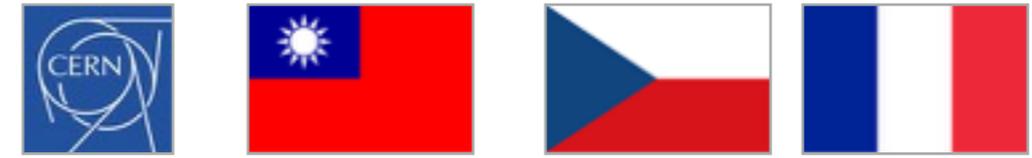
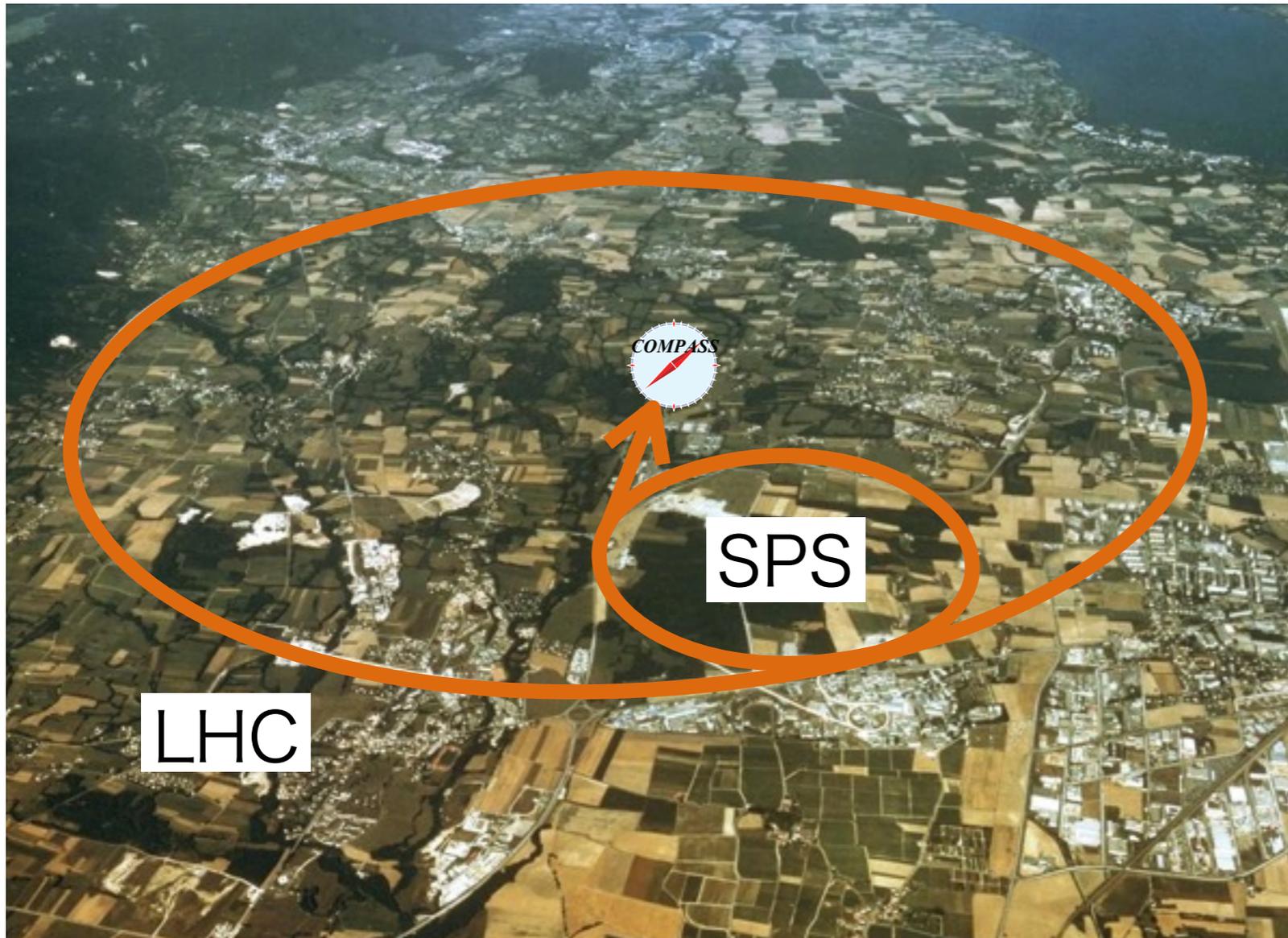
COMPASS 実験概要

- ・ (一般的な) セットアップ
- ・ 年表

偏極 ドレル・ヤン (DY) 実験

- ・ パートンの横方向運動量に依存した (TMD) パarton分布関数 (PDF)
 - ▶ 偏極 DY を介した TMD-PDF の抽出
 - ▶ Semi-inclusive な深非弾性散乱 (SIDIS) を介した TMD-PDF の抽出
 - ▶ 偏極 DY vs SIDIS
 - ▶ SIDIS を介した Sivers, Boer-Mulders 関数の測定結果
- ・ COMPASS 偏極 DY 実験
 - ▶ セットアップ
 - ▶ タイムライン
 - ▶ 暫定的な結果

COMPASS 実験概要



COmmon
Muon
Proton
Apparatus for
Structure and
Spectroscopy



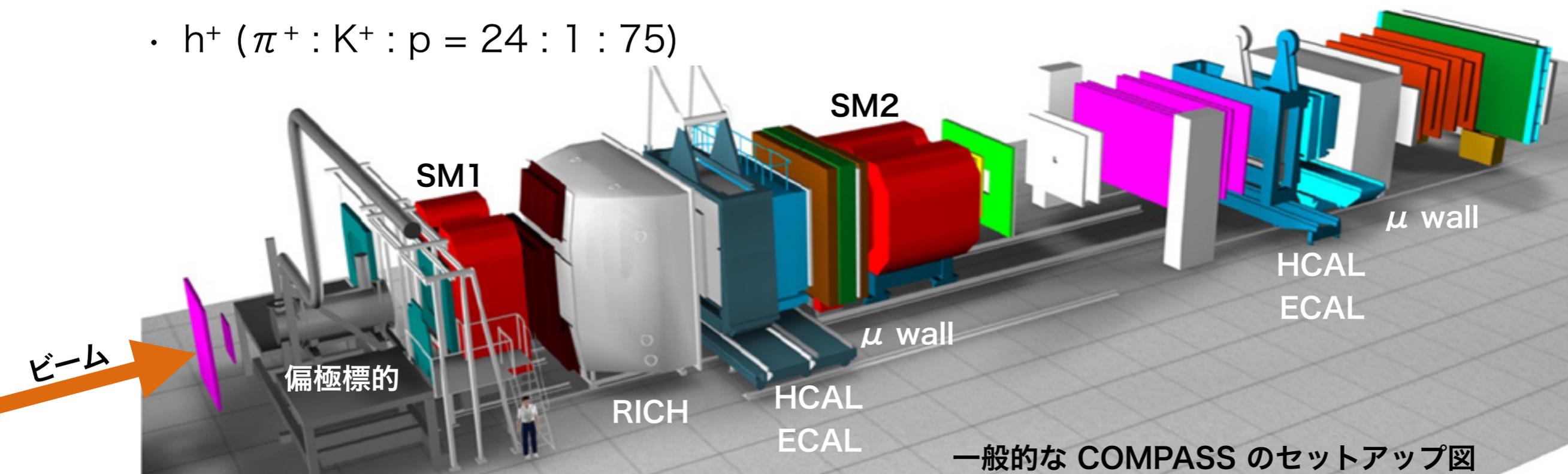
- 核子構造とハドロンスペクトロスコピー
- CERN SPS の 2 次粒子ビーム (μ , ハドロン) と固定標的を用いた実験
- 12 カ国 約 250 人 + 学生
- 2002 年からデータ収集開始
- 2012 年から Phase II 開始

ビーム

- $p < 200 \text{ GeV}/c$
- 縦偏極 μ^\pm ビーム ($\sim 80\%$)
- ハドロンビーム
 - $h^- (\pi^- : K^- : \bar{p} = 97 : 2 : 1)$
 - $h^+ (\pi^+ : K^+ : p = 24 : 1 : 75)$

偏極標的 (縦・横偏極)

- 2 or 3 セル を異なる向きに同時偏極
- NH_3 : 約 80%,
- ${}^6\text{LiD}$: 約 50%,



スペクトロメータ

- Large angle (LAS, 35 - 180 mrad) と Small angle (SAS, 18 - 35 mrad) の 2 ステージ
- 約 350 トラッキング面, ハドロン・電磁カロリメータ, RICH, μ wall, ビーム PID

COMPASS 実験概要：年表



Phase I

Phase II

年	物理	ビーム (GeV/c)	標的
2002-4	SIDIS	160, μ	偏極重陽子 (縦&横)
2006	SIDIS	160, μ	偏極重陽子 (縦)
2007	SIDIS	160, μ	偏極陽子 (縦&横)
2008-9	ハドロンスペクトロスコーピー		
2010	SIDIS	160, μ	偏極陽子 (横)
2011	SIDIS	190, μ	偏極陽子 (縦)
2012	Primakoff, DVCS のテスト		
2014-5	偏極 DY	190, h	偏極陽子 (横) ←
2016-7	DVCS	160, μ	陽子
2018	偏極 DY	190, h	偏極陽子 (横)

COMPASS 実験概要

- ・ (一般的な) セットアップ
- ・ 年表

偏極 ドレル・ヤン (DY) 実験

- ・ パートンの横方向運動量に依存した (TMD) パarton分布関数 (PDF)
 - ▶ 偏極 DY を介した TMD-PDF の抽出
 - ▶ Semi-inclusive な深非弾性散乱 (SIDIS) を介した TMD-PDF の抽出
 - ▶ 偏極 DY vs SIDIS
 - ▶ SIDIS を介した Sivers, Boer-Mulders 関数の測定結果
- ・ COMPASS 偏極 DY 実験
 - ▶ セットアップ
 - ▶ タイムライン
 - ▶ 暫定的な結果

核子の偏極

		核子の偏極		
		0	たて	よこ
クォークの偏極	0	f_1 		
	たて		g_{1L} 	
	よこ			h_1

核子スピン
 クォークスピン

@ twist 2



核子の偏極

		核子の偏極		
		0	たて	よこ
クォークの偏極	0	f_1 		f_{1T}^\perp -
	たて		g_{1L}	g_{1T} -
	よこ	h_1^\perp -	h_{1L}^\perp	h_1 - h_{1T}^\perp -

核子スピン
 クォークスピン
 クォーク運動量

@ twist 2

Sivers 関数 :

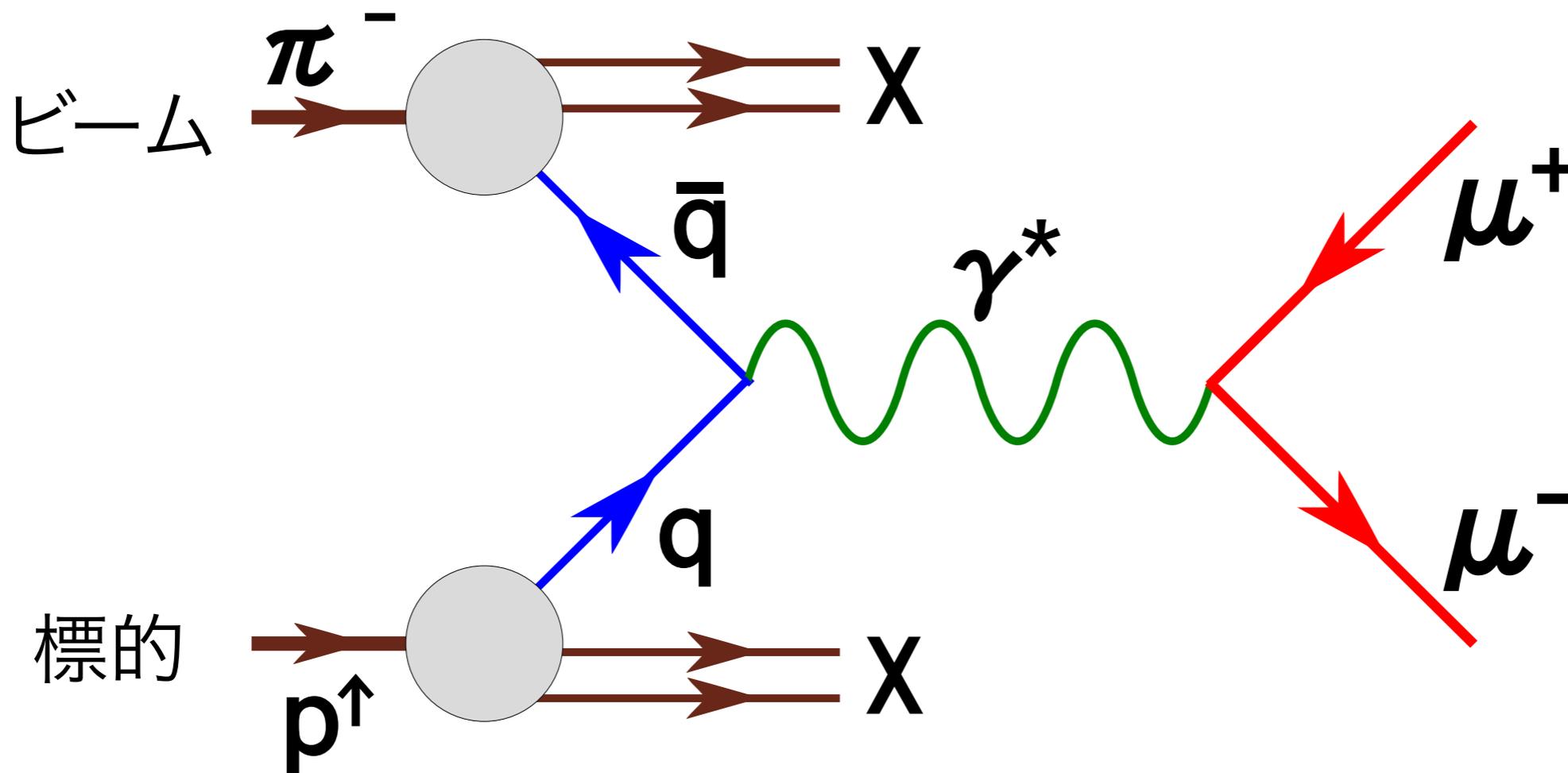
核子の横方向スピンと k_T の相関を記述する。値が 0 でないときパートンの軌道角運動量の存在を示唆する。

Boer-Mulders 関数 :

核子中のパートンの横方向スピンと k_T の相関を記述する。

※ k_T : パートンの横方向運動量

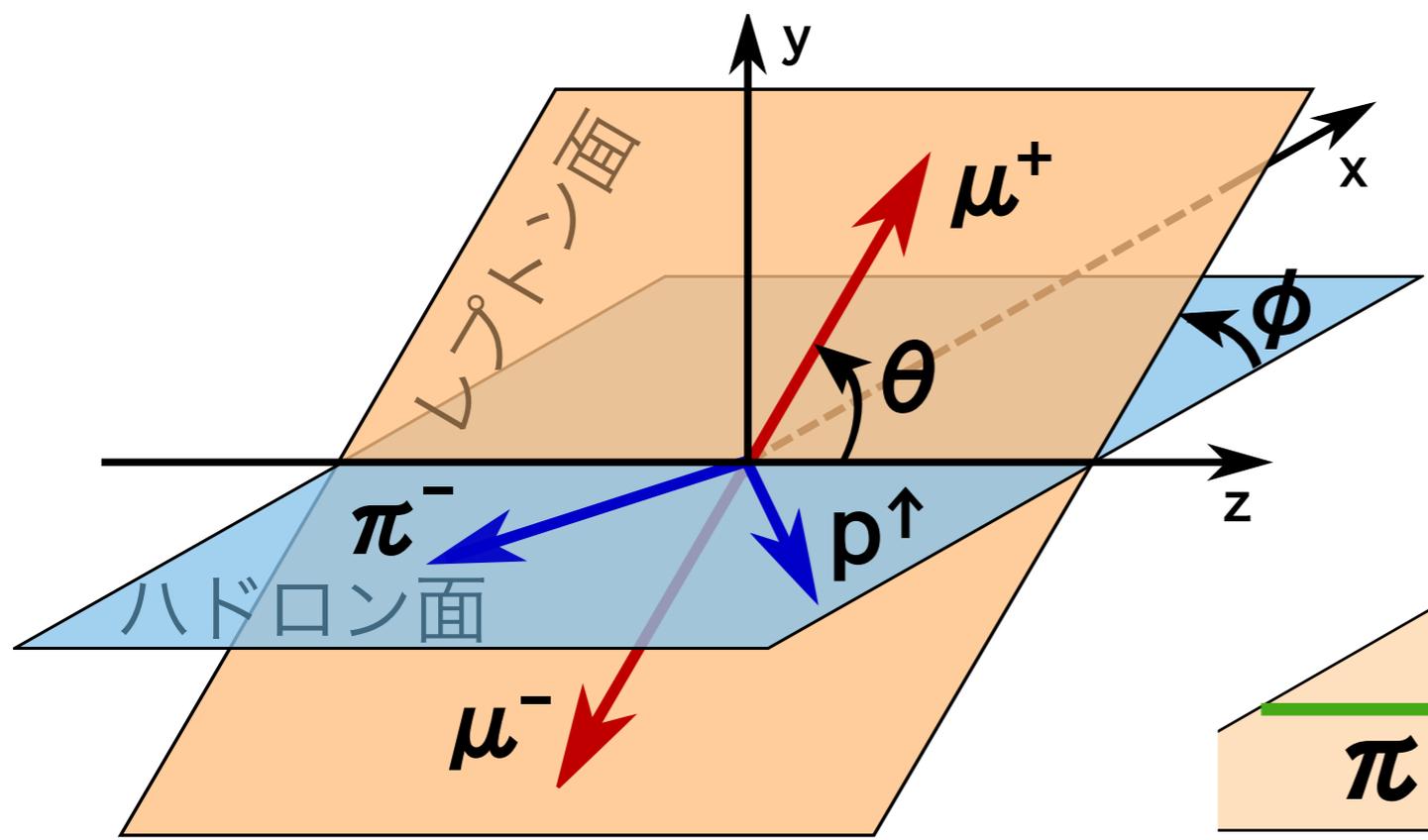
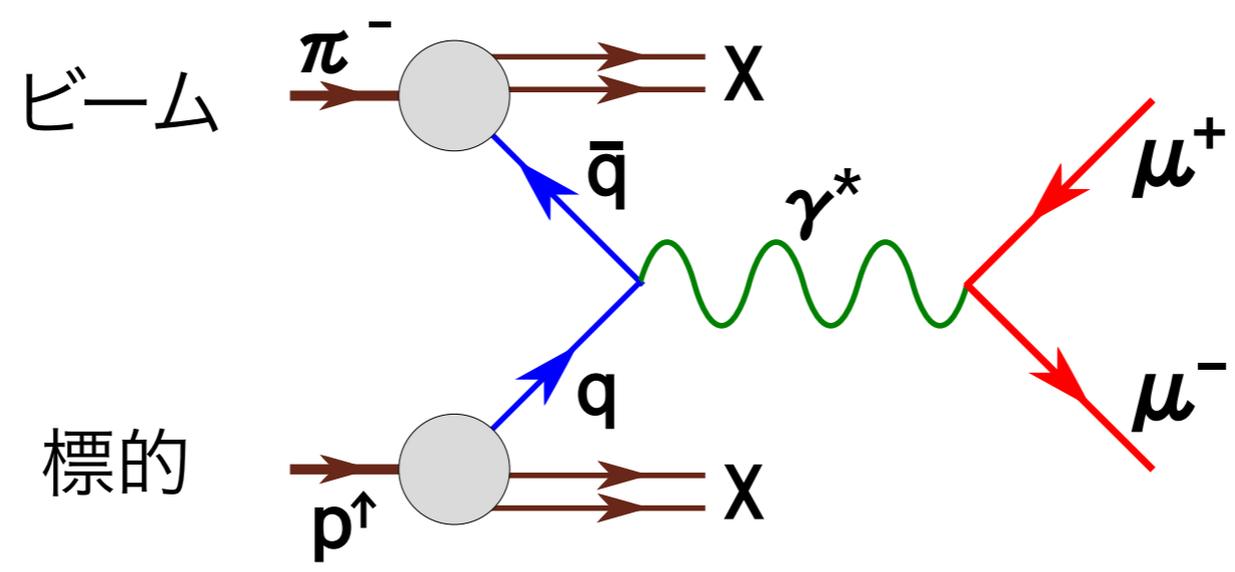
偏極 ドレール・ヤン (DY) @ COMPASS



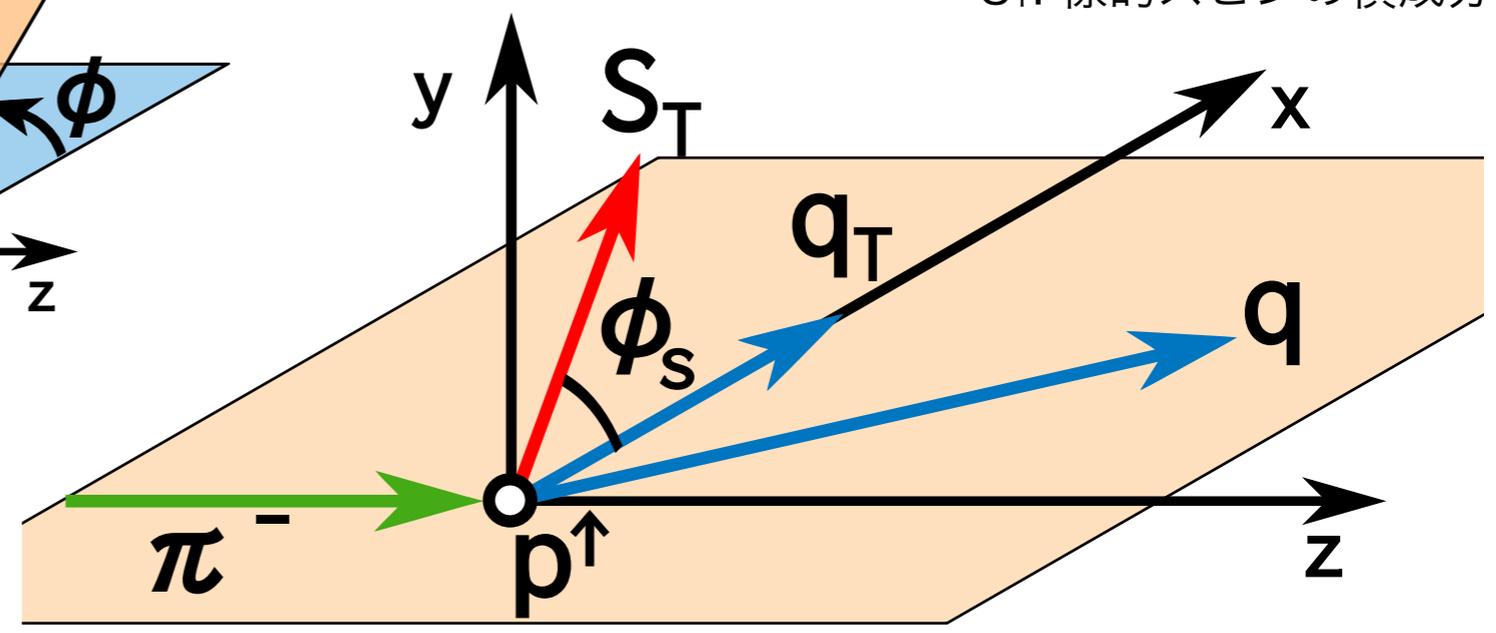
COMPASS で測定する偏極 DY 過程のファインマン図

q	dimuon の運動量
$x_{\pi(N)} = q^2 / (2P_{\pi(N)} \cdot q)$	$\pi(N)$ 中のパートンが担う運動量の割合
$M_{\mu\mu}^2 = Q^2 = q^2 = sx_\pi x_N$	dimuon の不変質量の 2 乗
$x_F = x_\pi - x_N$	ファインマン x

偏極 DY @ COMPASS



Collins - Soper 系
(仮想光子の静止系)



標的静止系

q : dimuon 運動量
 q_T : q の横成分
 S_T : 標的スピンの横成分

偏極 DY を介した TMP-PDF の抽出

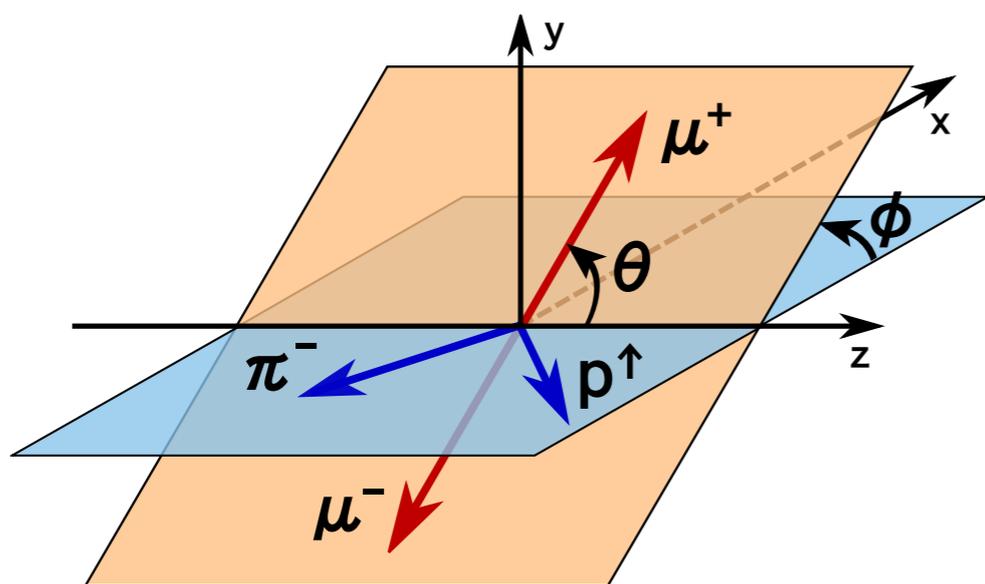
leading order における無偏極ビームと横偏極標的を用いたときの断面積

$$\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} = \frac{\alpha_{em}^2}{Fq^2} \times$$

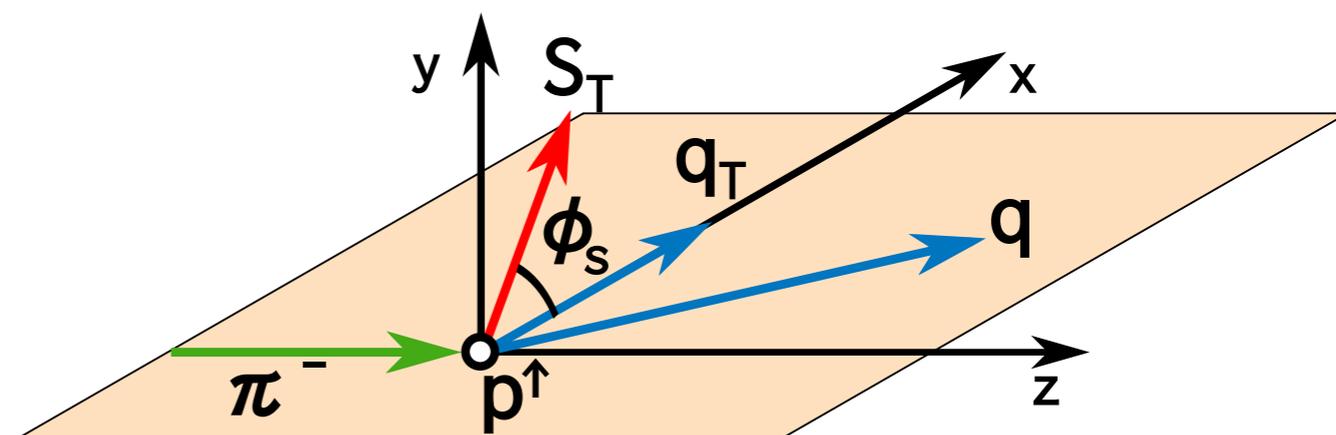
$$\left[\begin{aligned} & \left(1 + D_{[\sin^2 \theta]} A_U^{\cos 2\phi} \cos 2\phi \right) \\ & + |S_T| \left\{ \begin{aligned} & A_T^{\sin \phi_S} \sin \phi_S \\ & + D_{[\sin^2 \theta]} \left(\begin{aligned} & A_T^{\sin(2\phi + \phi_S)} \sin(2\phi + \phi_S) \\ & + A_T^{\sin(2\phi - \phi_S)} \sin(2\phi - \phi_S) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right]$$

$$D[f(\theta)] = \frac{f(\theta)}{1 + A_U^1 \cos^2 \theta}$$

$$\hat{\sigma}_U = (F_U^1 + F_U^2)(1 + A_U^1 \cos^2 \theta)$$



Collins - Soper 系



標的静止系

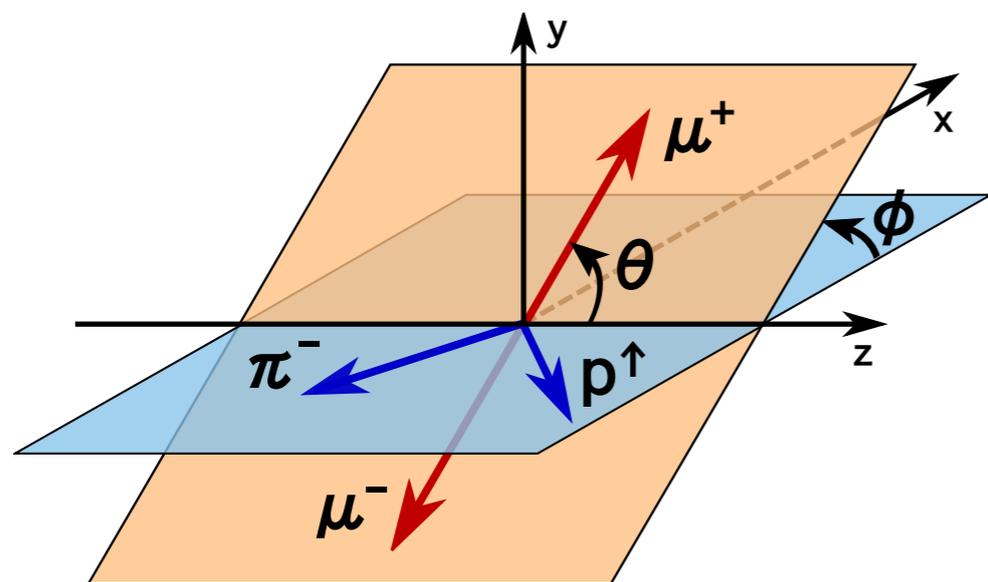
偏極 DY を介した TMP-PDF の抽出

leading order における無偏極ビームと横偏極標的を用いたときの断面積

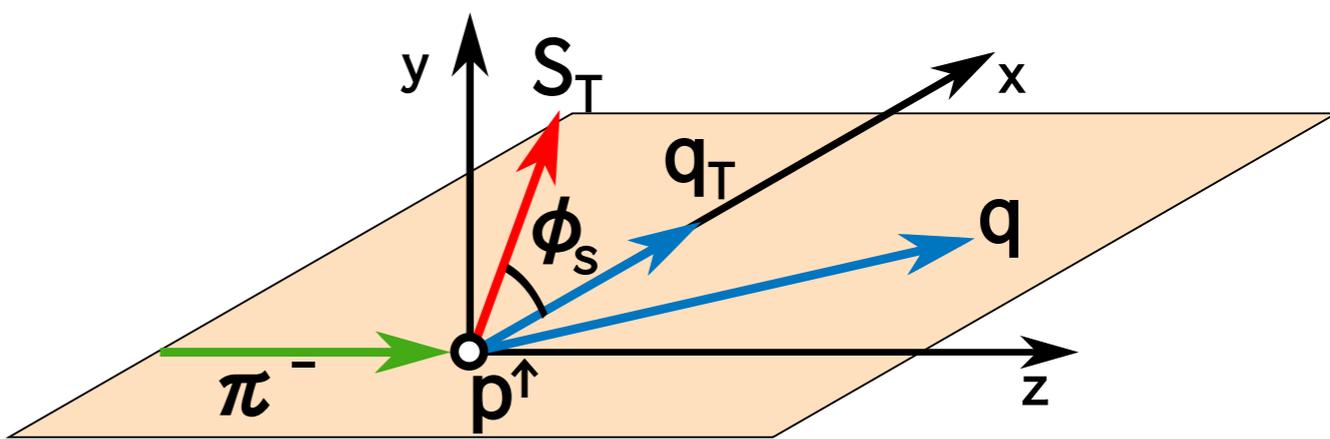
$$\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} = \frac{\alpha_{em}^2}{Fq^2} \times$$

$$\left[\begin{aligned} & \left(1 + D_{[\sin^2 \theta]} A_U^{\cos 2\phi} \cos 2\phi \right) \\ & + |S_T| \left\{ \begin{aligned} & A_T^{\sin \phi_S} \sin \phi_S \\ & + D_{[\sin^2 \theta]} \left(\begin{aligned} & A_T^{\sin(2\phi + \phi_S)} \sin(2\phi + \phi_S) \\ & + A_T^{\sin(2\phi - \phi_S)} \sin(2\phi - \phi_S) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right] \times \text{PDF}_{\text{target}} \otimes \text{PDF}_{\text{beam}}$$

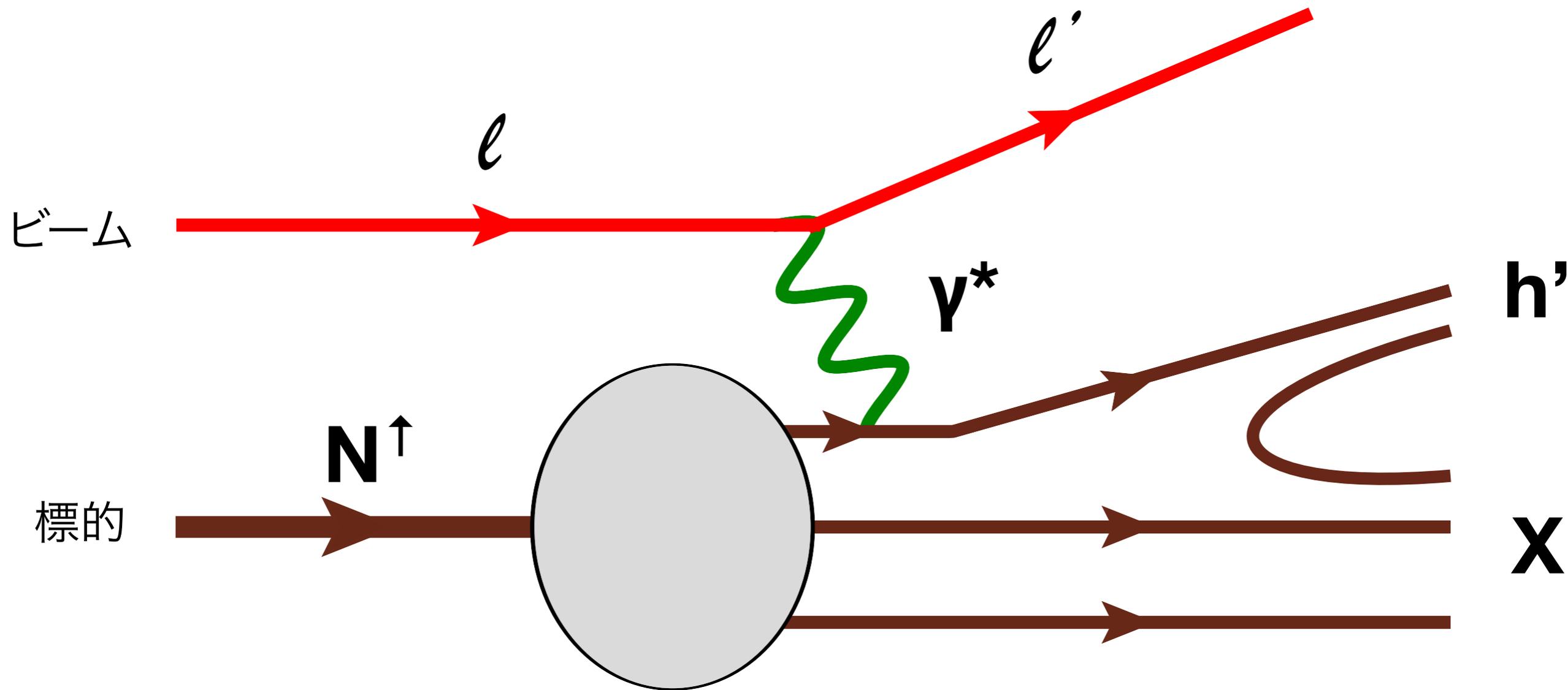
- $h_1^\perp(p) \otimes h_1^\perp(\pi)$
- $f_{1T}^\perp(p) \otimes f_1(\pi)$
- $h_{1T}^\perp(p) \otimes h_1^\perp(\pi)$
- $h_1(p) \otimes h_1^\perp(\pi)$



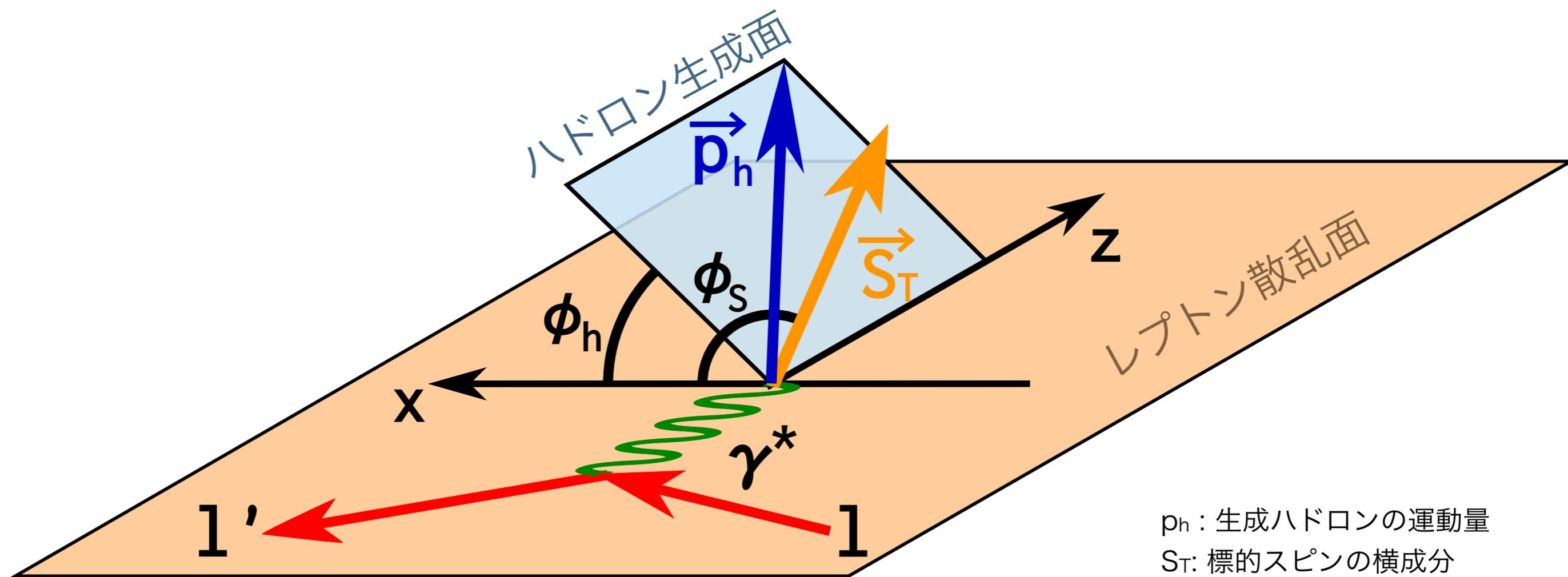
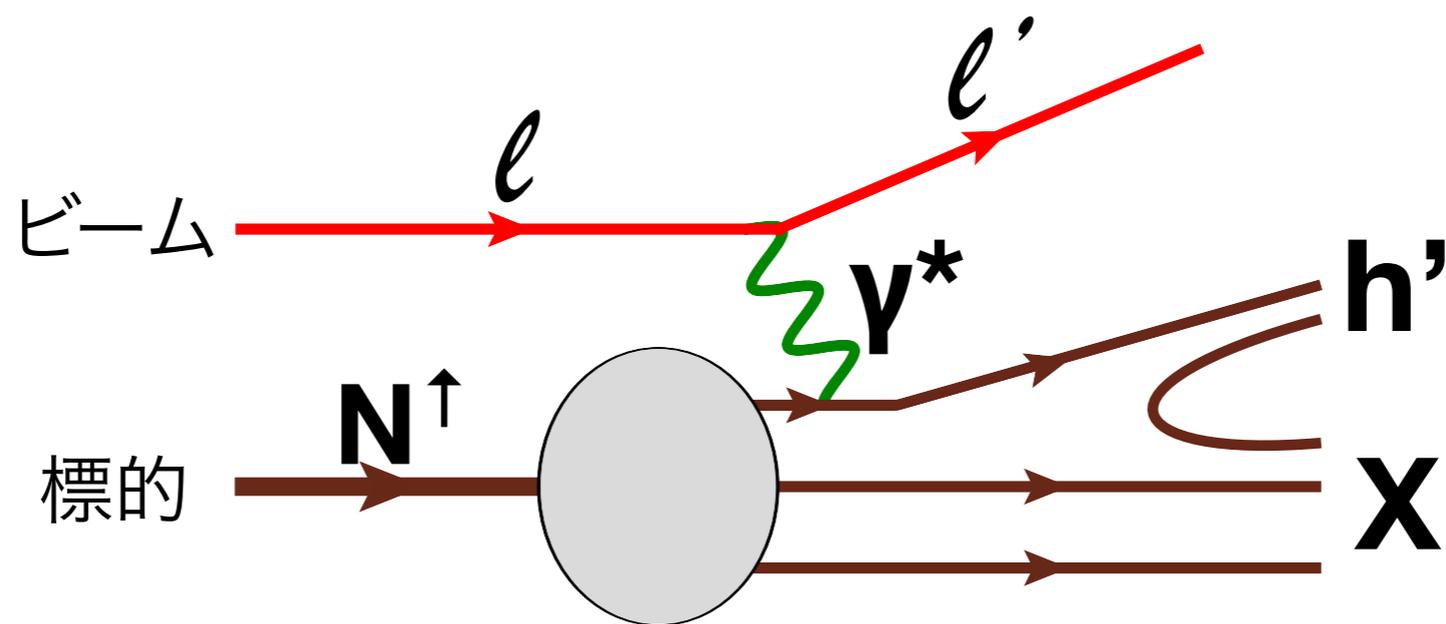
Collins - Soper 系



標的静止系



Semi-inclusive な深非弾性散乱 (SIDIS) を介した TMD-PDF



p_h : 生成ハドロンの運動量
 S_T : 標的スピンの横成分

SIDIS を介した TMD-PDF の抽出

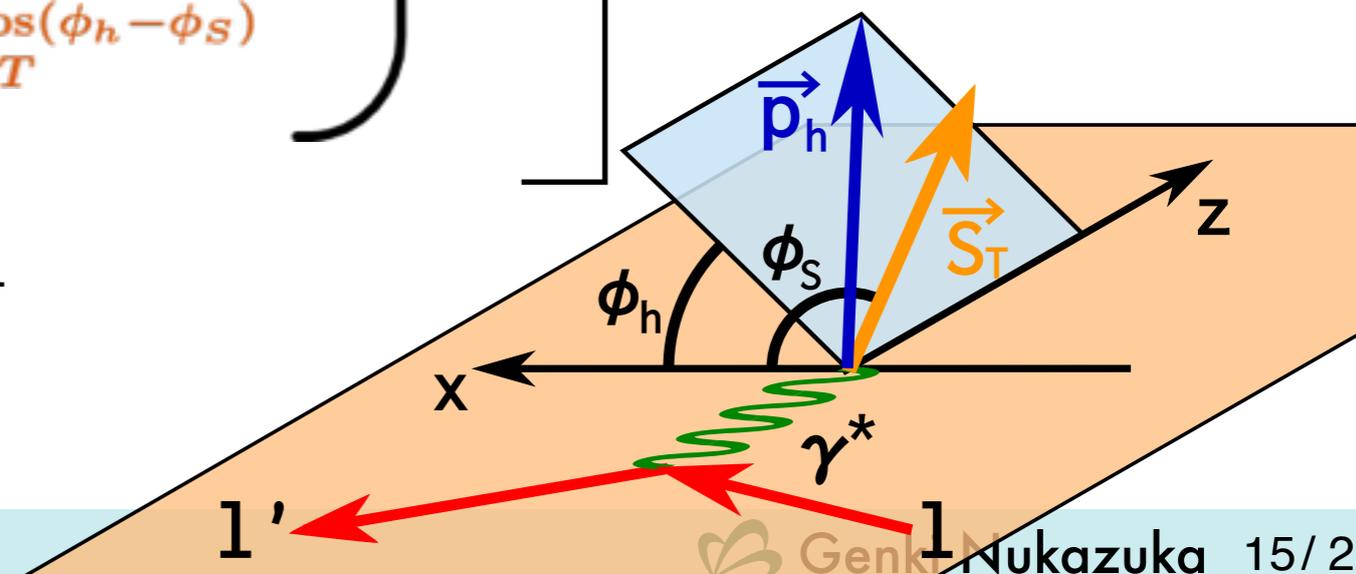
縦極ビームと横偏極標的を用いたときの断面積

$$\frac{d\sigma_{SIDIS}^{LO}}{dx dy dz dp_T^2 d\varphi_h d\psi}$$

$$= \left[\frac{\alpha^2}{xyQ^2} \frac{y^2}{2(1-\epsilon)} \left(1 + \frac{\gamma^2}{2x} \right) \times (F_{UU,T} + \epsilon F_{UU,L}) \right. \\ \left. \left\{ \begin{aligned} & 1 + \cos 2\phi_h (\epsilon A_{UU}^{\cos 2\phi_h}) \\ & + S_T \left[\begin{aligned} & \sin(\phi_h - \phi_S) A_{UT}^{\sin(\phi_h - \phi_S)} \\ & + \sin(\phi_h + \phi_S) \epsilon A_{UT}^{\sin(\phi_h + \phi_S)} \\ & + \sin(3\phi_h - \phi_S) \epsilon A_{UT}^{\sin(3\phi_h - \phi_S)} \end{aligned} \right] \\ & + S_T \lambda \left[\cos(\phi_h - \phi_S) \sqrt{1 - \epsilon^2} A_{LT}^{\cos(\phi_h - \phi_S)} \right] \end{aligned} \right\} \right]$$

$$\gamma = \frac{2Mx}{Q} \quad A_{U(L),T}^W(\phi_h, \phi_S) = \frac{F_{U(L),T}^W(\phi_h, \phi_S)}{F_{UU,T} + \epsilon F_{UU,L}}$$

$$\epsilon = \frac{1 - y - \frac{1}{4}\gamma^2 y^2}{1 - y + \frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{4}\gamma^2 y^2}$$



SIDIS を介した TMD-PDF の抽出

縦極ビームと横偏極標的を用いたときの断面積

観測量：PDF ⊗ 破砕関数

$$\frac{d\sigma_{SIDIS}^{LO}}{dx dy dz dp_T^2 d\phi_h d\psi}$$

$$\frac{\alpha^2}{xyQ^2} \frac{y^2}{2(1-\epsilon)} \left(1 + \frac{\gamma^2}{2x}\right) \times (F_{UU,T} + \epsilon F_{UU,L})$$

$$1 + \cos 2\phi_h (\epsilon A_{UU}^{\cos 2\phi_h})$$

$$+ S_T \left[\begin{aligned} & \sin(\phi_h - \phi_S) A_{UT}^{\sin(\phi_h - \phi_S)} \\ & + \sin(\phi_h + \phi_S) \epsilon A_{UT}^{\sin(\phi_h + \phi_S)} \\ & + \sin(3\phi_h - \phi_S) \epsilon A_{UT}^{\sin(3\phi_h - \phi_S)} \end{aligned} \right]$$

$$+ S_T \lambda \left[\cos(\phi_h - \phi_S) \sqrt{1 - \epsilon^2} A_{LT}^{\cos(\phi_h - \phi_S)} \right]$$

$$h_1^{\perp q} \otimes H_{1q}^{\perp h} : \text{Boer-Mulders}$$

$$f_{1T}^{\perp q} \otimes D_{1q}^h : \text{Sivers}$$

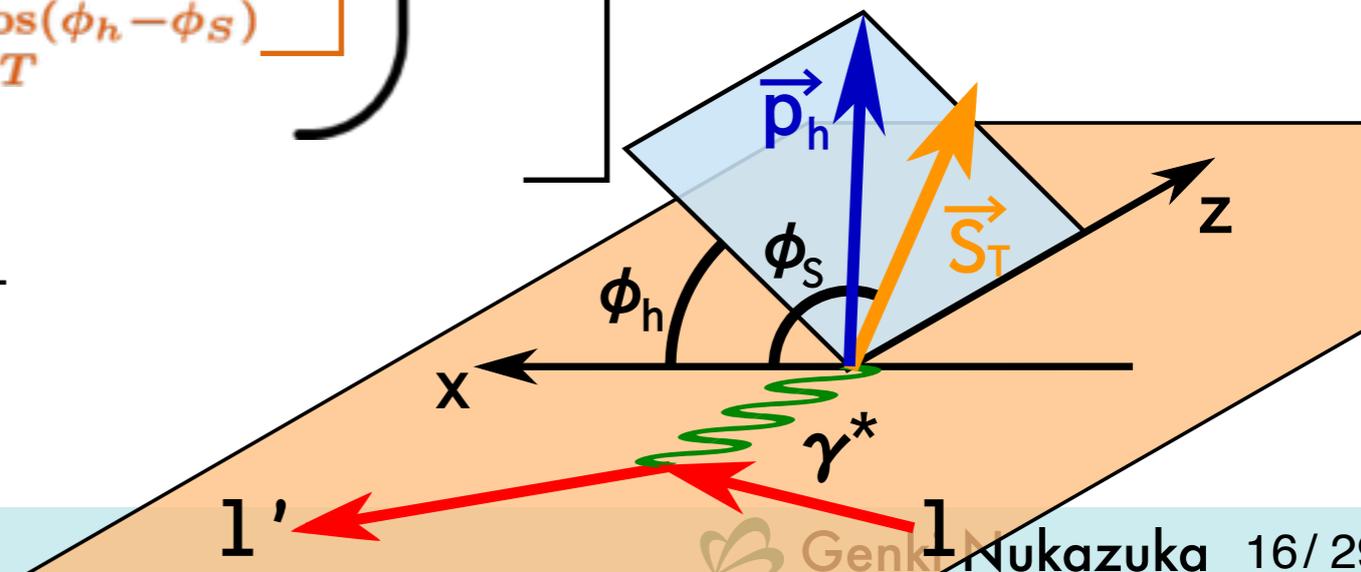
$$h_1^q \otimes H_{1q}^{\perp h} : \text{Transversity}$$

$$h_{1T}^{\perp q} \otimes H_{1q}^{\perp h} : \text{Pretzelosity}$$

$$g_{1T}^q \otimes D_{1q}^h : \text{Worm-gear}$$

$$\gamma = \frac{2Mx}{Q} \quad A_{U(L),T}^W(\phi_h, \phi_S) = \frac{F_{U(L),T}^W(\phi_h, \phi_S)}{F_{UU,T} + \epsilon F_{UU,L}}$$

$$\epsilon = \frac{1 - y - \frac{1}{4}\gamma^2 y^2}{1 - y + \frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{4}\gamma^2 y^2}$$

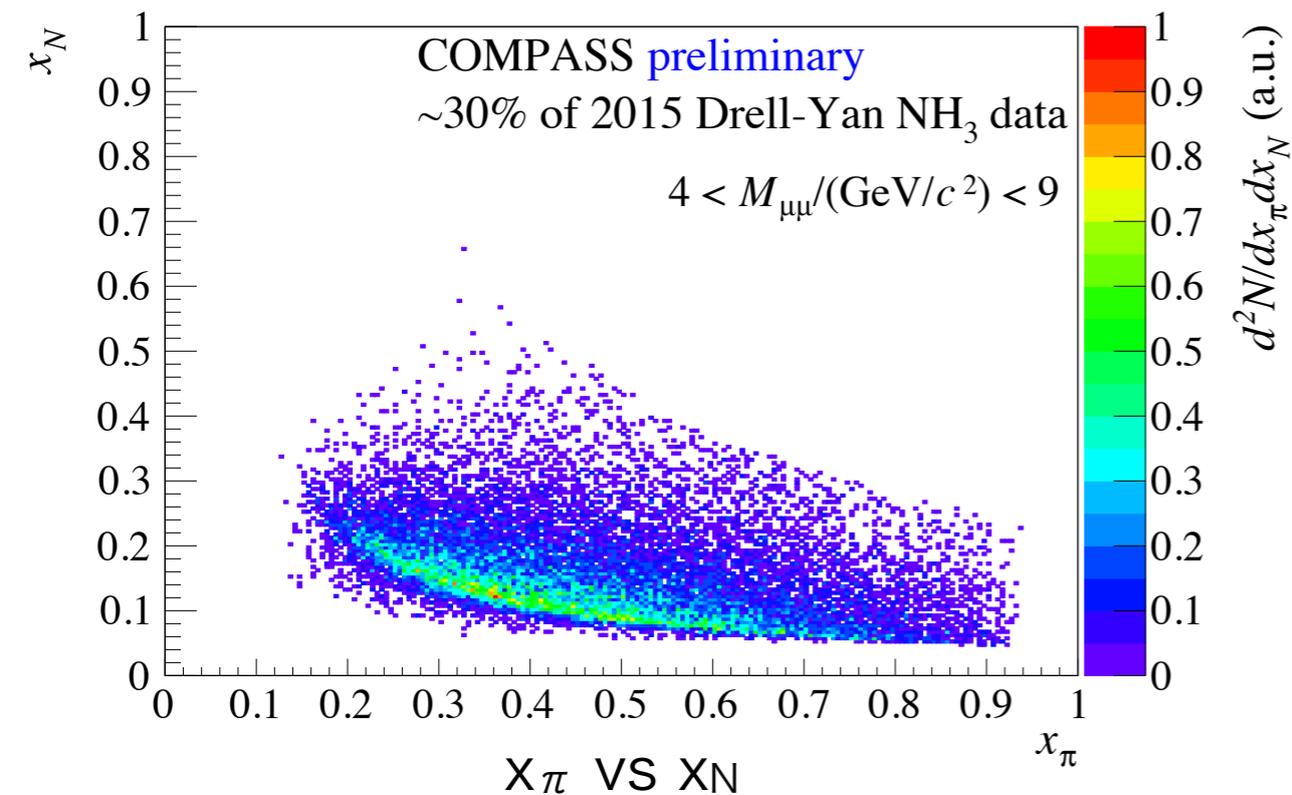


偏極 DY@COMPASS

- 測定量：PDF ⊗ PDF
→ 破砕関数が関与しない
- 偏極標的を用いた世界初の偏極 DY
- valence u , valence \bar{u} の DY が支配的

偏極 SIDIS

- 測定量：PDF ⊗ 破砕関数
- すでに測定が行われている



(2015年データの3割)

偏極 DY@COMPASS

- ・ 測定量：PDF \otimes PDF
→ 破砕関数が関与しない
- ・ 偏極標的を用いた世界初の偏極 DY
- ・ valence u , valence \bar{u} の DY が支配的

偏極 SIDIS

- ・ 測定量：PDF \otimes 破砕関数
- ・ すでに測定が行われている

→ COMPASS における偏極 DY の測定は破砕関数を用いずに valence u の PDF にアクセスできる

偏極 DY vs SIDIS



偏極 DY@COMPASS

- ・ 測定量：PDF ⊗ PDF
→ 破砕関数が関与しない
- ・ 偏極標的を用いた世界初の偏極 DY
- ・ valence u , valence \bar{u} の DY が支配的

偏極 SIDIS

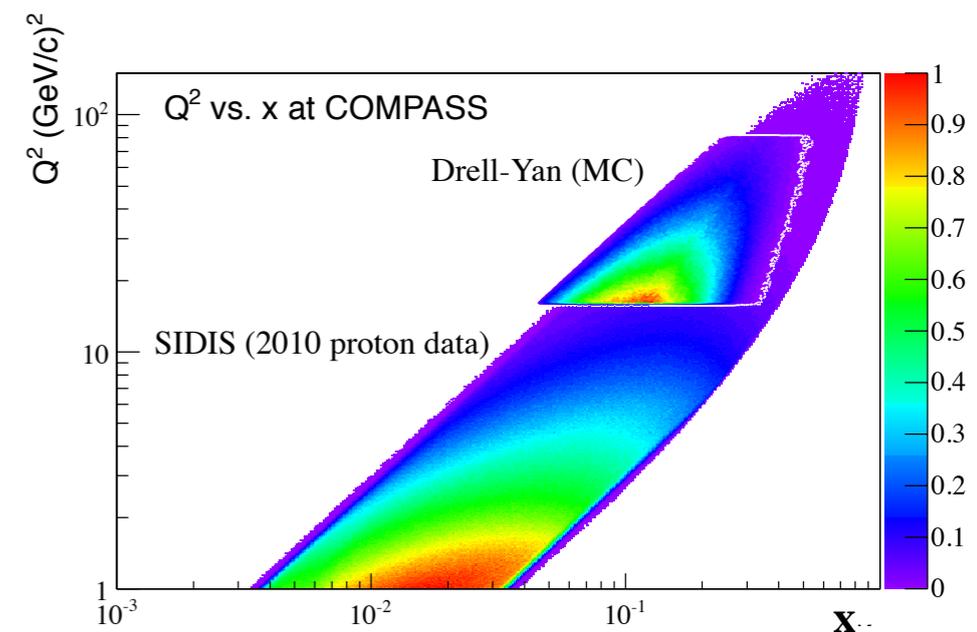
- ・ 測定量：PDF ⊗ 破砕関数
- ・ すでに測定が行われている

Collins による予言 (PLB536(2002)43) :

$$f_{1T}^{\perp}|_{DY} = -f_{1T}^{\perp}|_{SIDIS} \text{ (Sivers)}$$

$$h_1^{\perp}|_{DY} = -h_1^{\perp}|_{SIDIS} \text{ (Boer-Mulders)}$$

⇒ TMD アプローチの重要なテスト



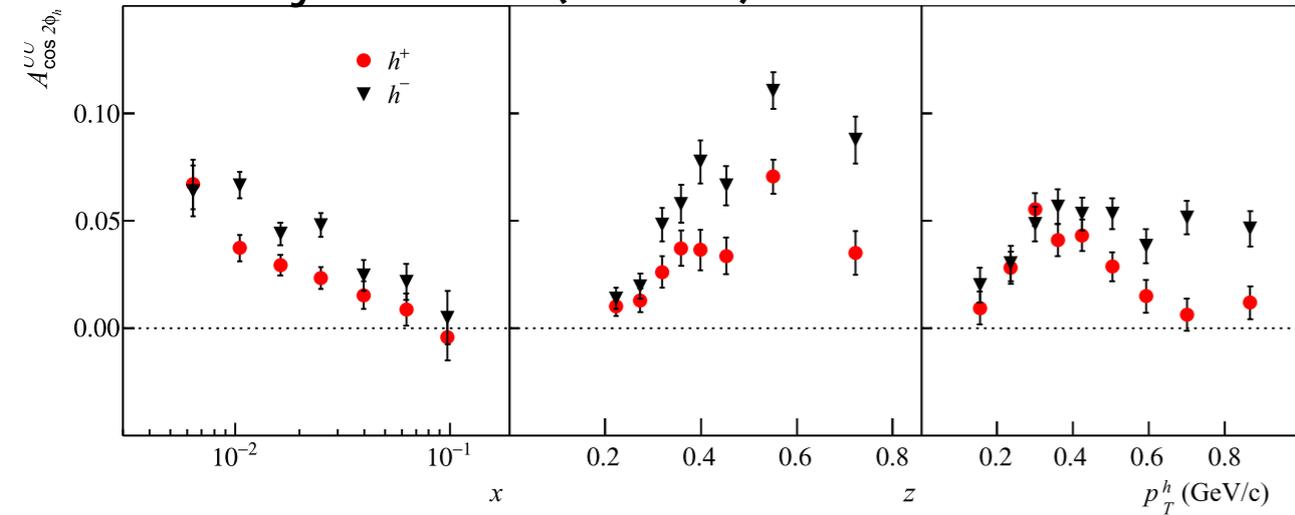
SIDIS, 偏極 DY に対する
COMPASS のアクセプタンス

偏極 DY, SIDIS の両方で TMD-PDF を

同じ運動学領域で測定できるのは COMPASS だけ！！！！

$$A_{UU}^{\cos 2\phi_h} \quad (\text{Boer-Mulders})$$

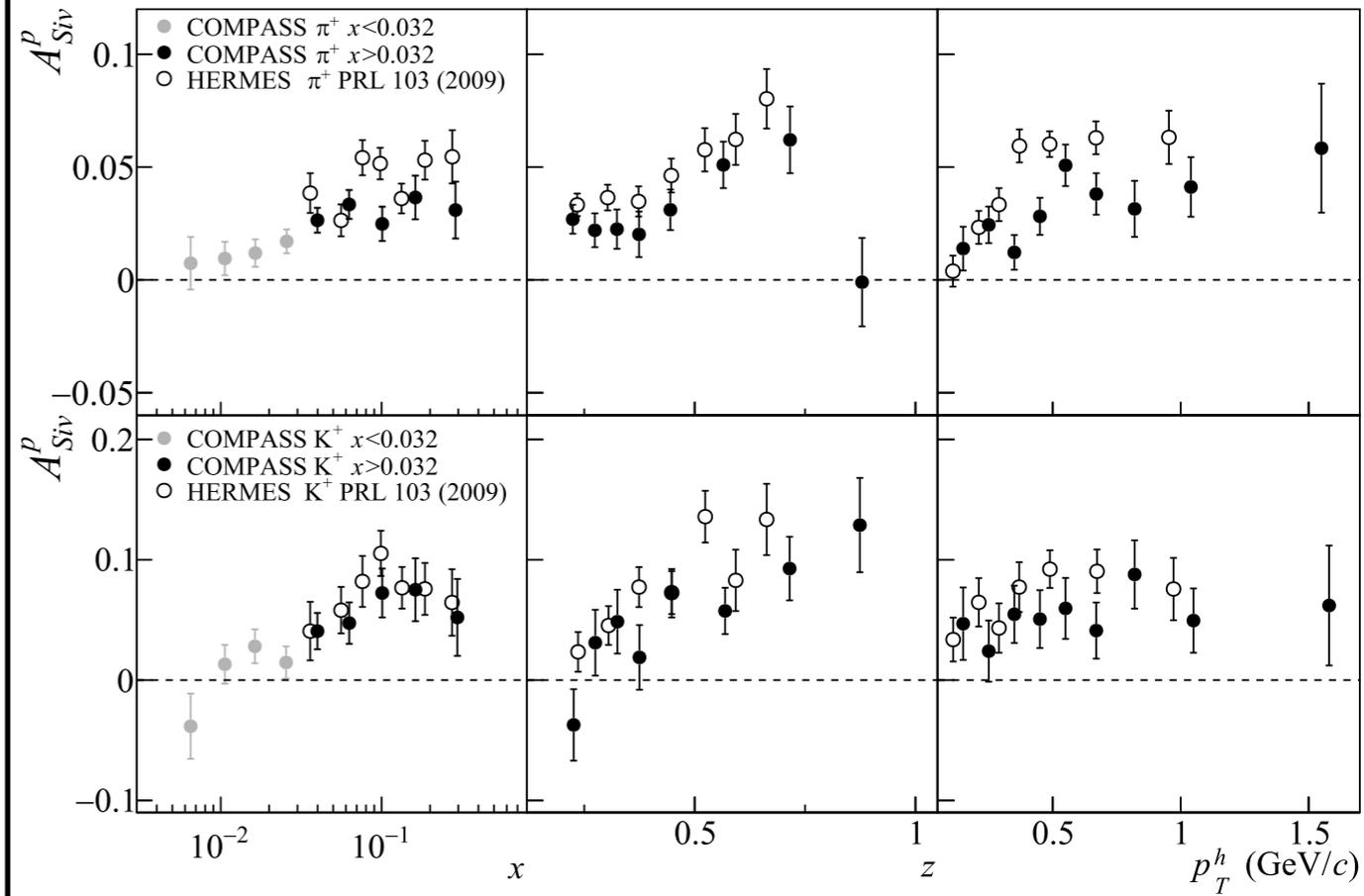
Nucl.Phys.B886(2014)1046



COMPASS

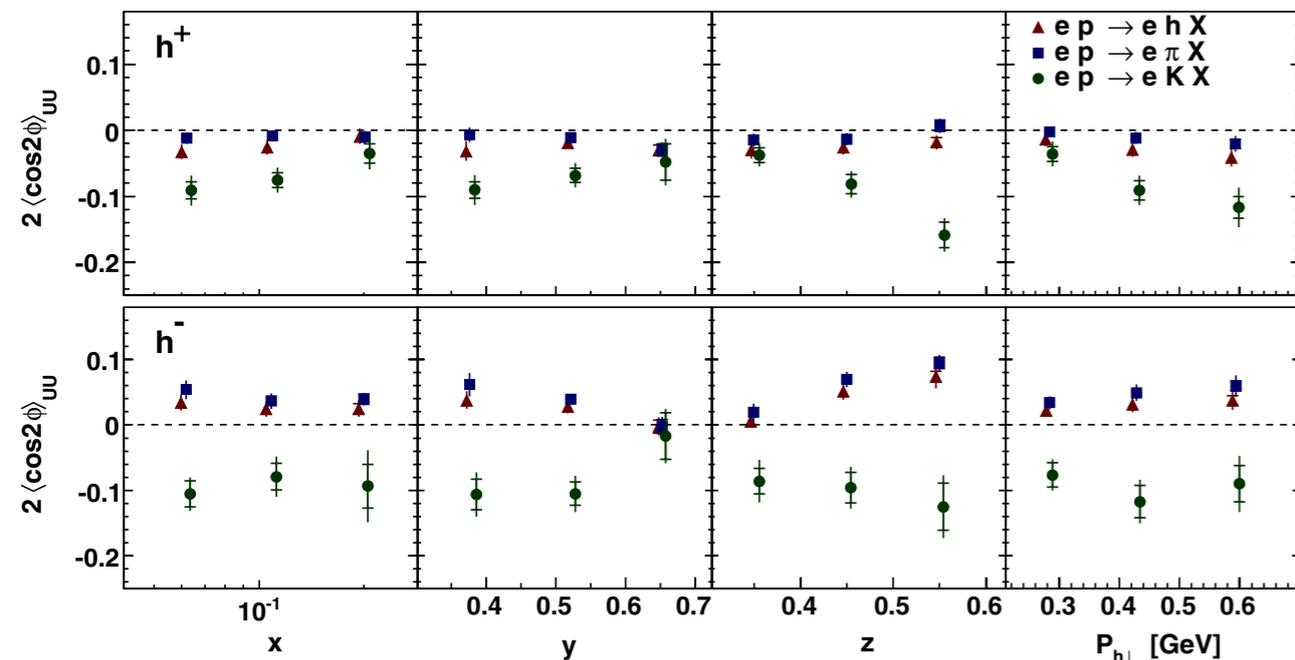
$$A_{UT}^{\sin(\phi_h - \phi_S)} \quad (\text{Sivers})$$

Phys.Lett.B744(2015)250-259



0 でない非対称度が測定されている！

Phys.Rev.D87(2013)012010



HERMES

COMPASS 実験概要

- ・ (一般的な) セットアップ
- ・ 年表

偏極 ドレル・ヤン (DY) 実験

- ・ パートンの横方向運動量に依存した (TMD) パarton分布関数 (PDF)
 - ▶ 偏極 DY を介した TMD-PDF の抽出
 - ▶ Semi-inclusive な深非弾性散乱 (SIDIS) を介した TMD-PDF の抽出
 - ▶ 偏極 DY vs SIDIS
 - ▶ SIDIS を介した Sivers, Boer-Mulders 関数の測定結果
- ・ COMPASS 偏極 DY 実験
 - ▶ セットアップ
 - ▶ タイムライン
 - ▶ 暫定的な結果



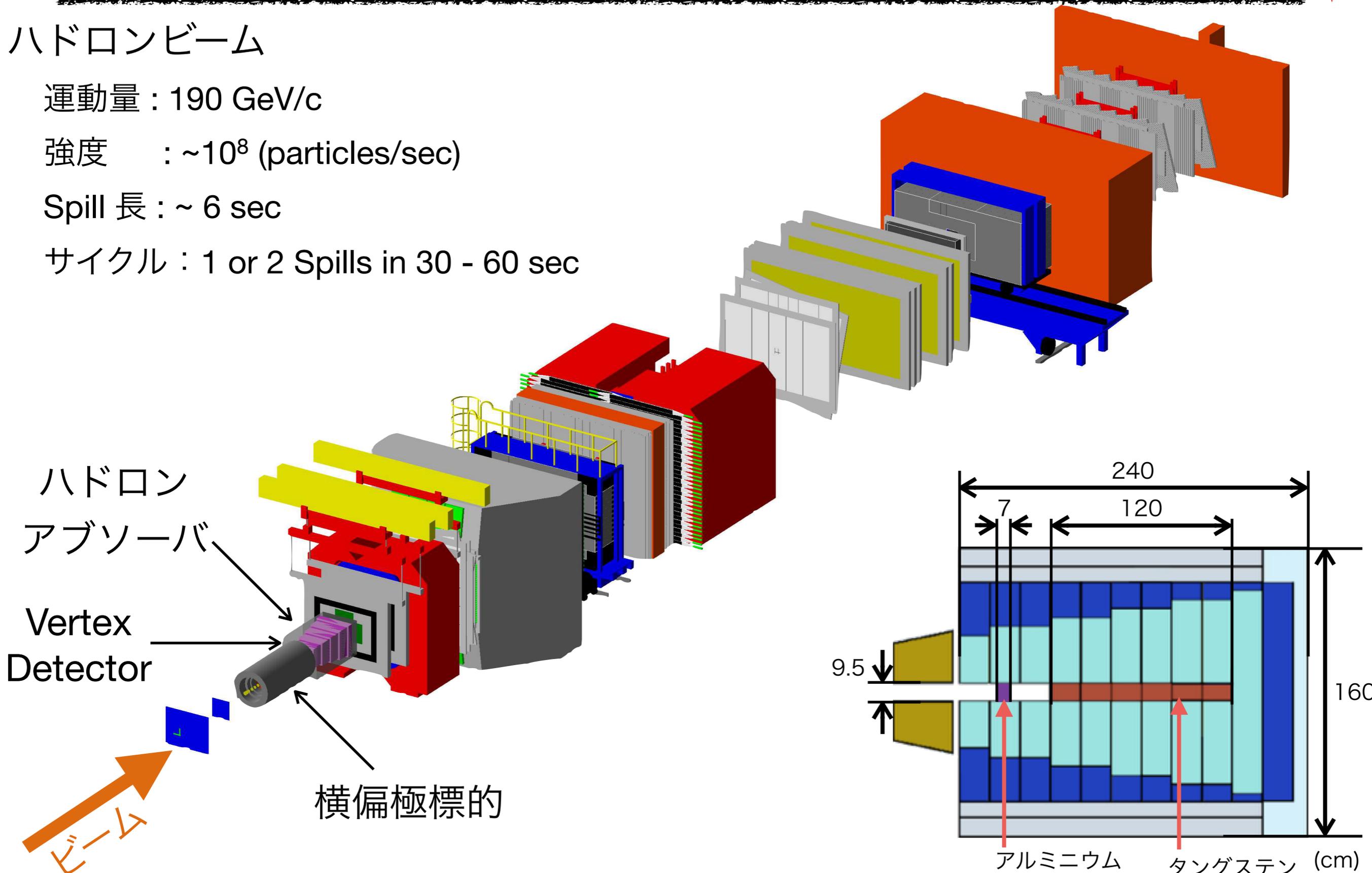
ハドロンビーム

運動量：190 GeV/c

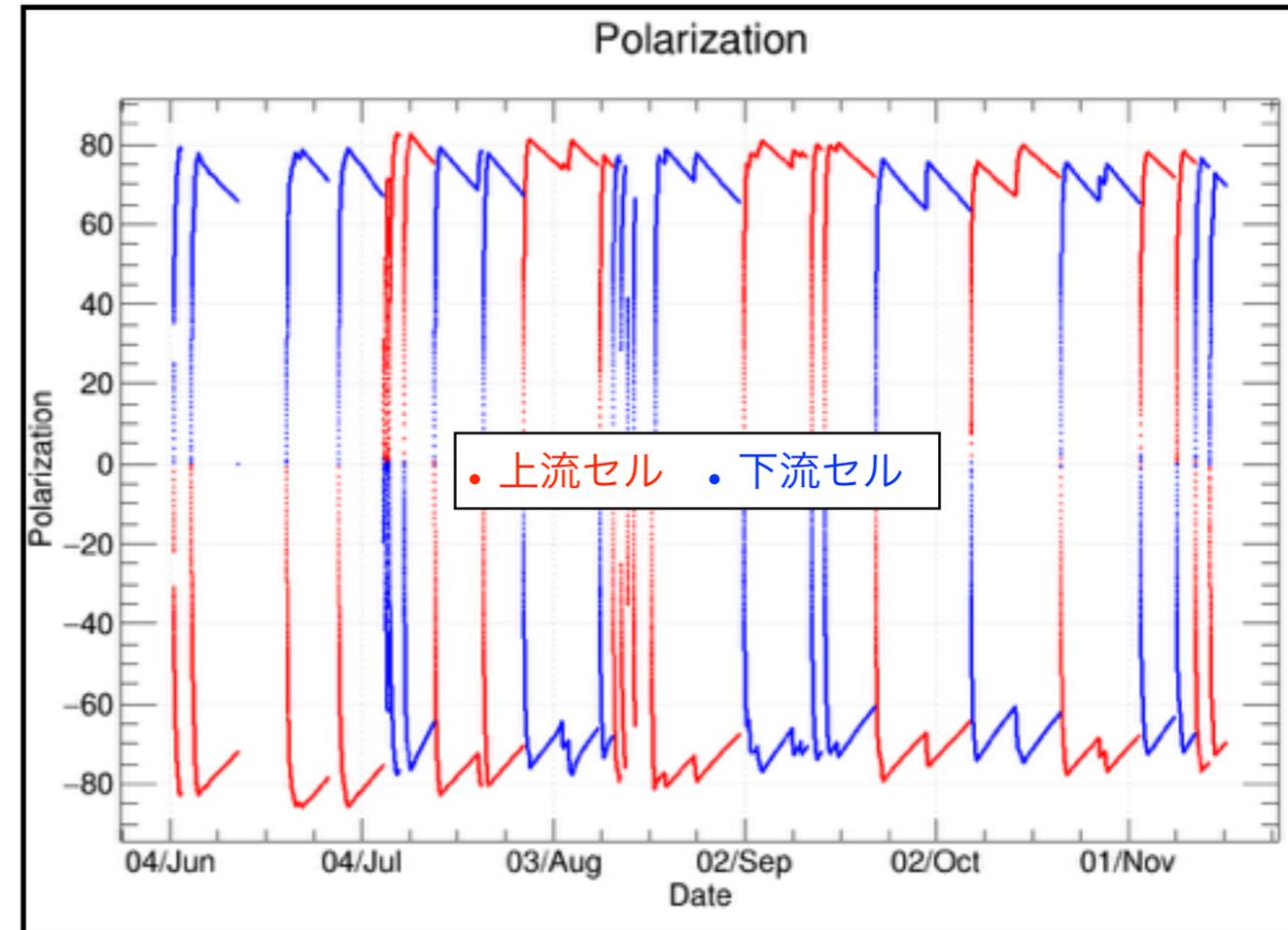
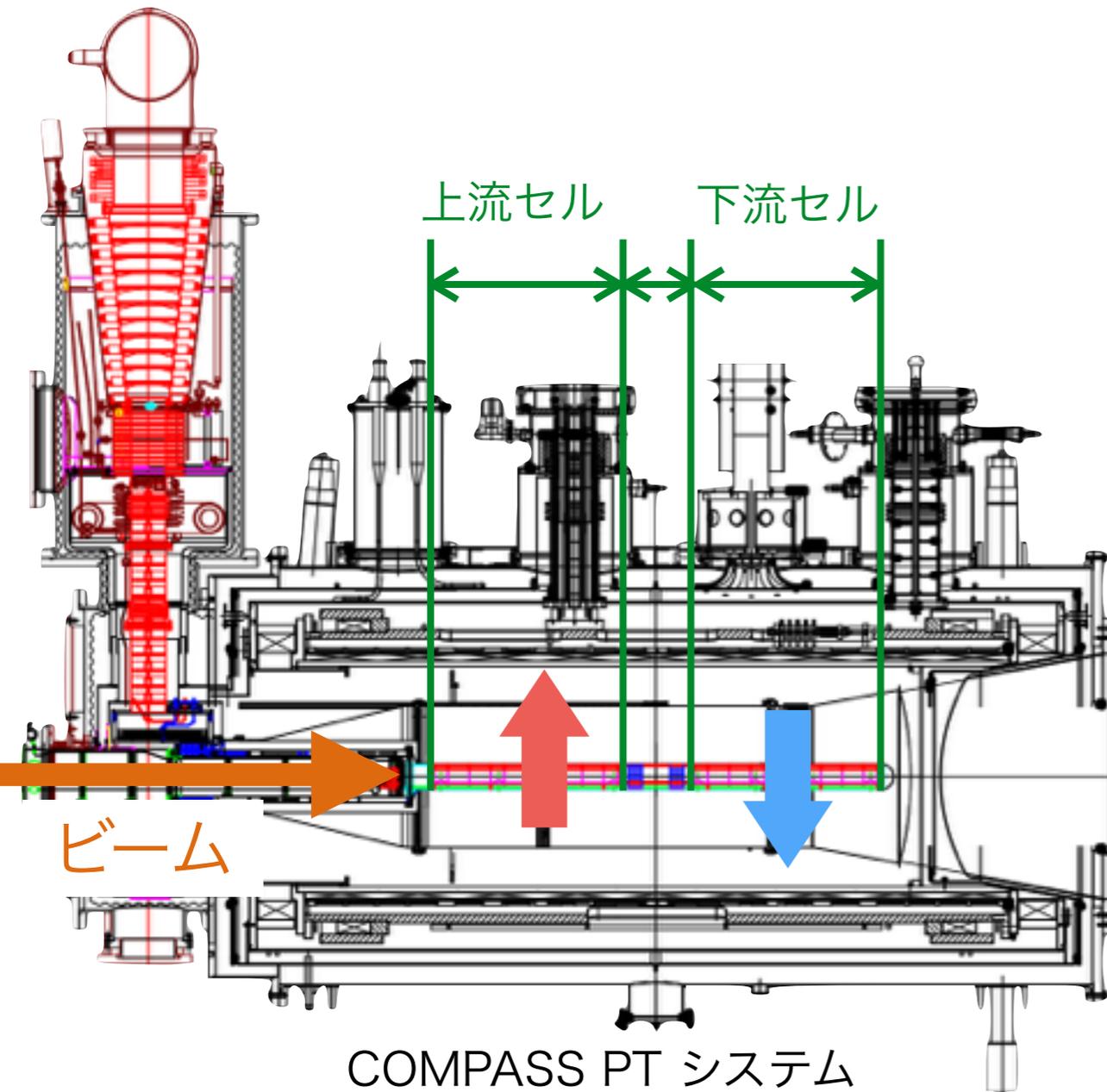
強度： $\sim 10^8$ (particles/sec)

Spill 長： ~ 6 sec

サイクル：1 or 2 Spills in 30 - 60 sec



ハドロンアブソーバの断面図



偏極 DY ラン時の偏極度

- 固体アンモニア(NH₃) 中の水素核
- ターゲットセル 55 × φ4 cm
- NH₃ をセル 2 つに格納し, 20 cm 間隔を開けて, ビームライン上に設置
- 最大偏極度 ± 85% 程度, 典型的には ± 75%

2014：試験ラン（3週間）

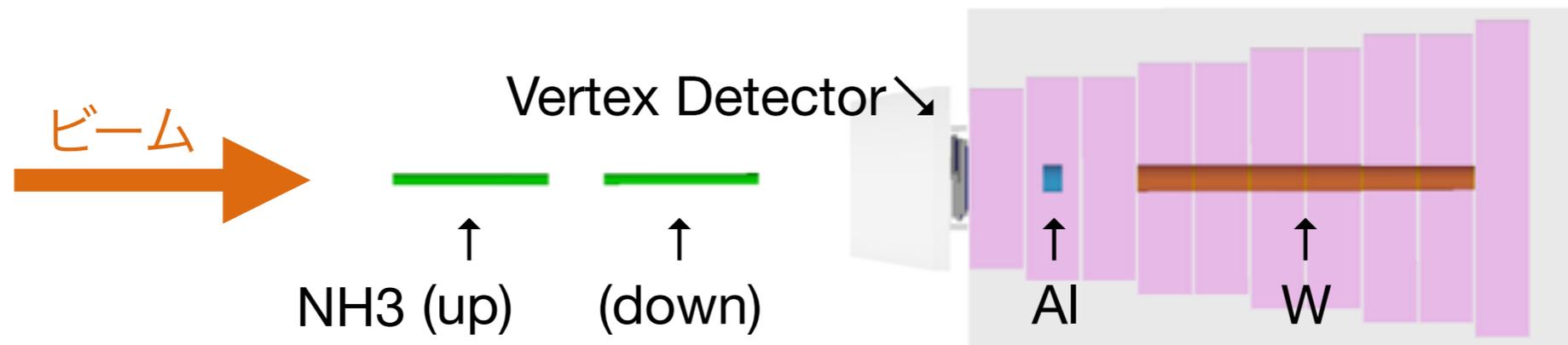
ハドロンアブソーバ, vertex detector 使用
偏極標的未使用

2015：データ収集（4ヶ月）

現在：結果公開に向けて鋭意準備中

2017：DIS(4/3 - 4/7) にて公開予定

2018：データ収集予定

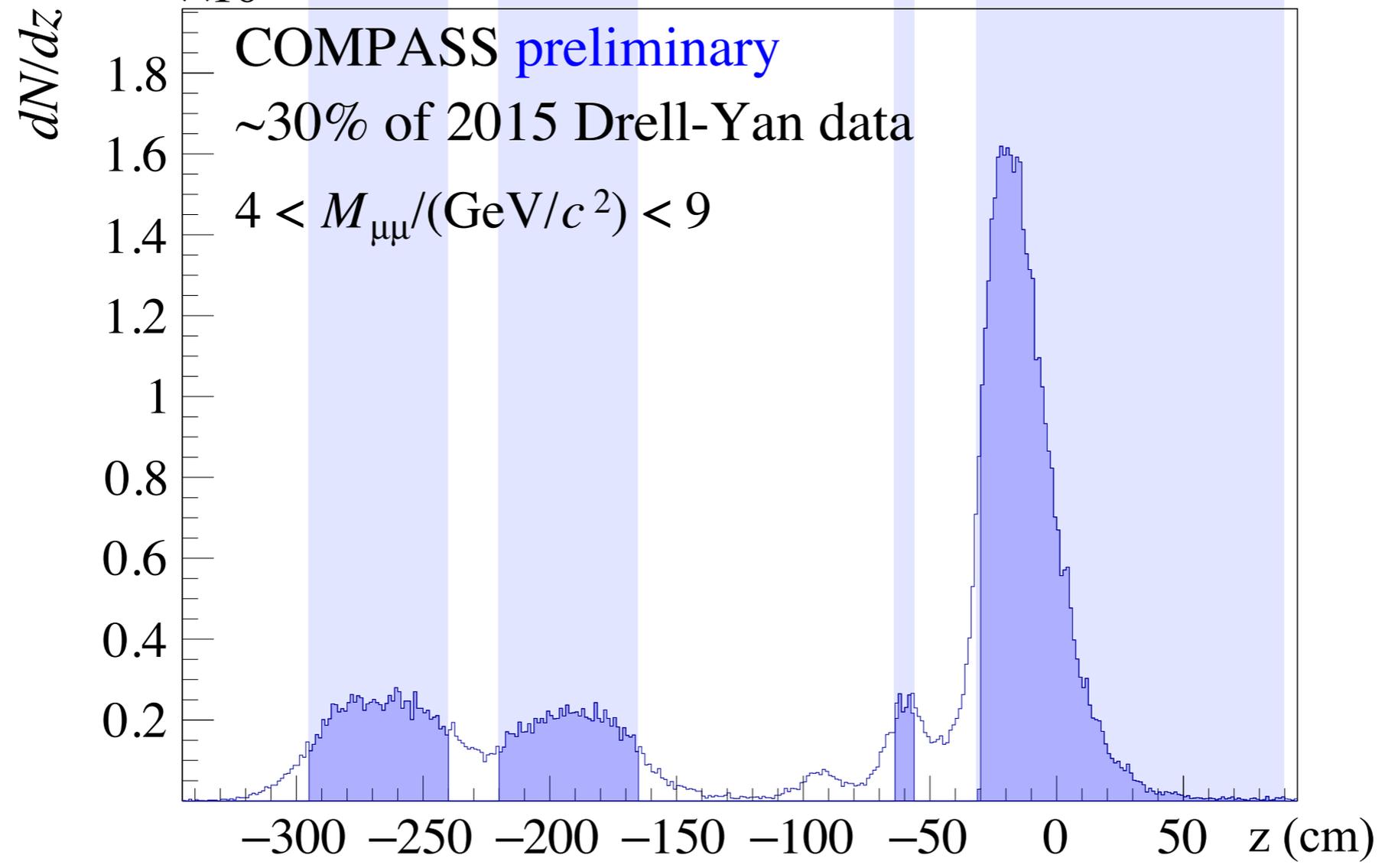
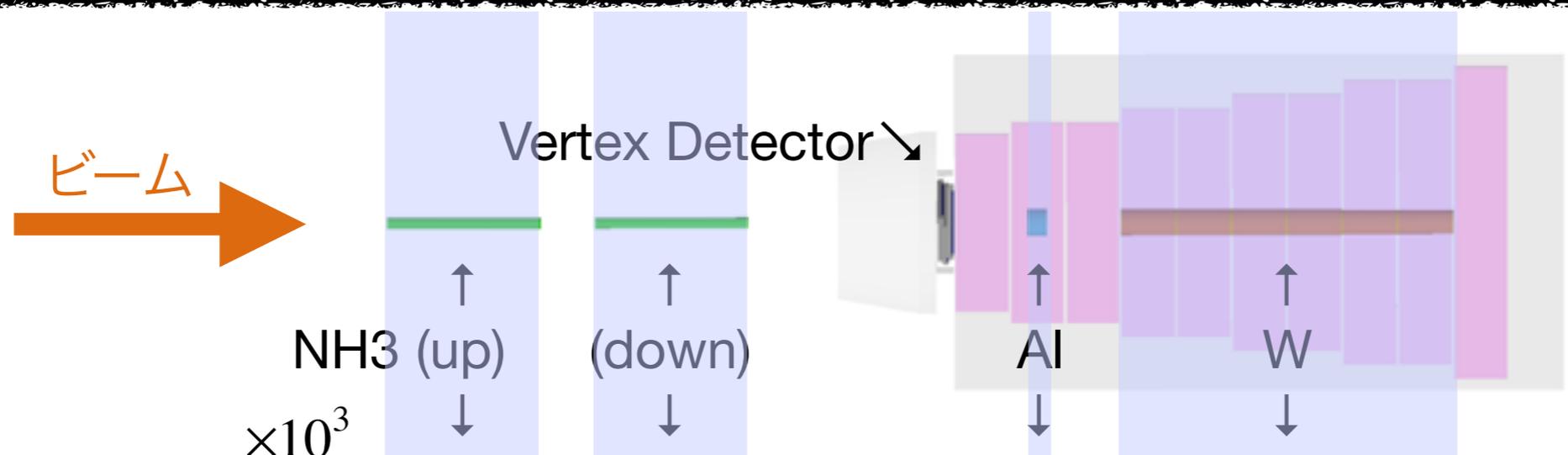


偏極標的 (NH₃) : 55 × φ4 cm × 2 セル

アルミニウム標的 (Al) : 7 × φ 9.4 cm

タングステンビームプラグ (W) : 120 × φ9 cm

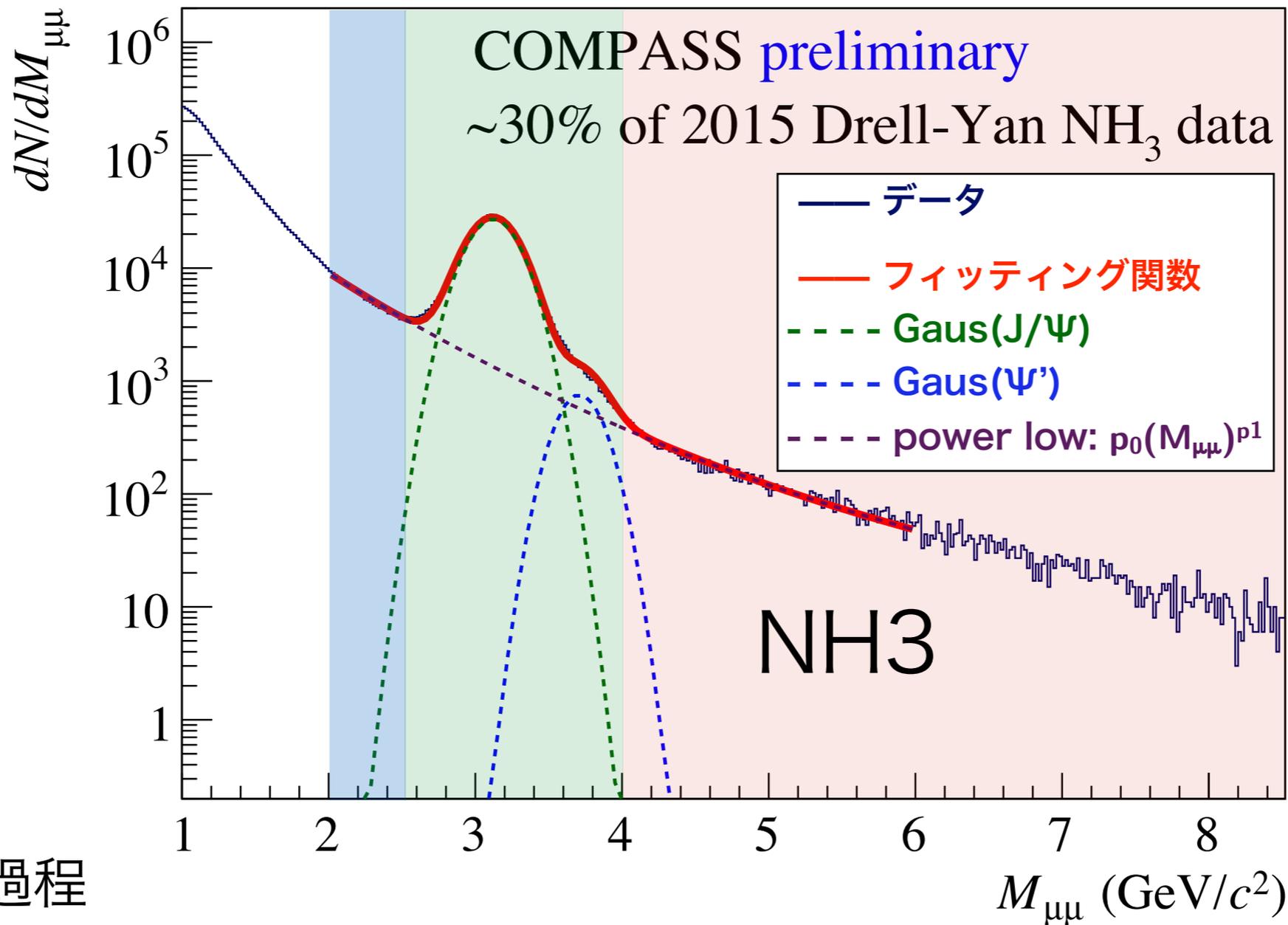
解析の現状: 反応点



反応点を識別するための十分な分解能が得られている



解析の現状: Dimuon 不変質量分布



支配的な物理過程

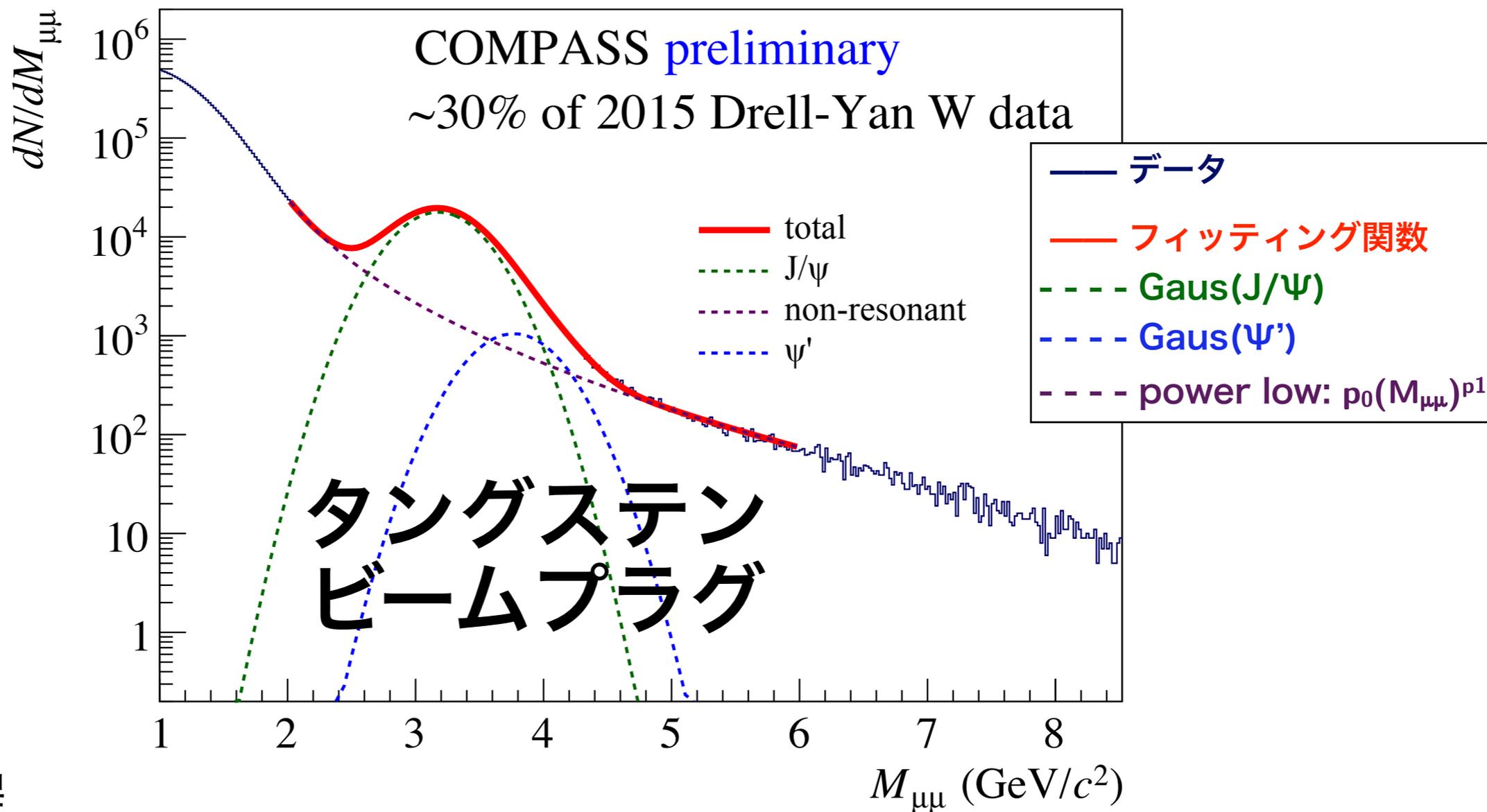
$M_{\mu\mu} > 4 \text{ GeV}/c^2$: High Mass DY 領域

DY が支配的, クリーンだが統計が少ない

$2.5 < M_{\mu\mu} < 4 \text{ GeV}/c^2$: J/ψ, ψ' 領域

$2 < M_{\mu\mu} < 2.5 \text{ GeV}/c^2$: Low Mass DY 領域

高統計だがバックグラウンド (物理: $D \rightarrow \mu^\pm X$, J/ψ, 組み合わせ: $\pi \text{ or } K \rightarrow \mu\nu$) がある



支配的な物理過程

$M_{\mu\mu} > 4$ GeV/c² : High Mass DY 領域

DY が支配的, クリーンだが統計が少ない

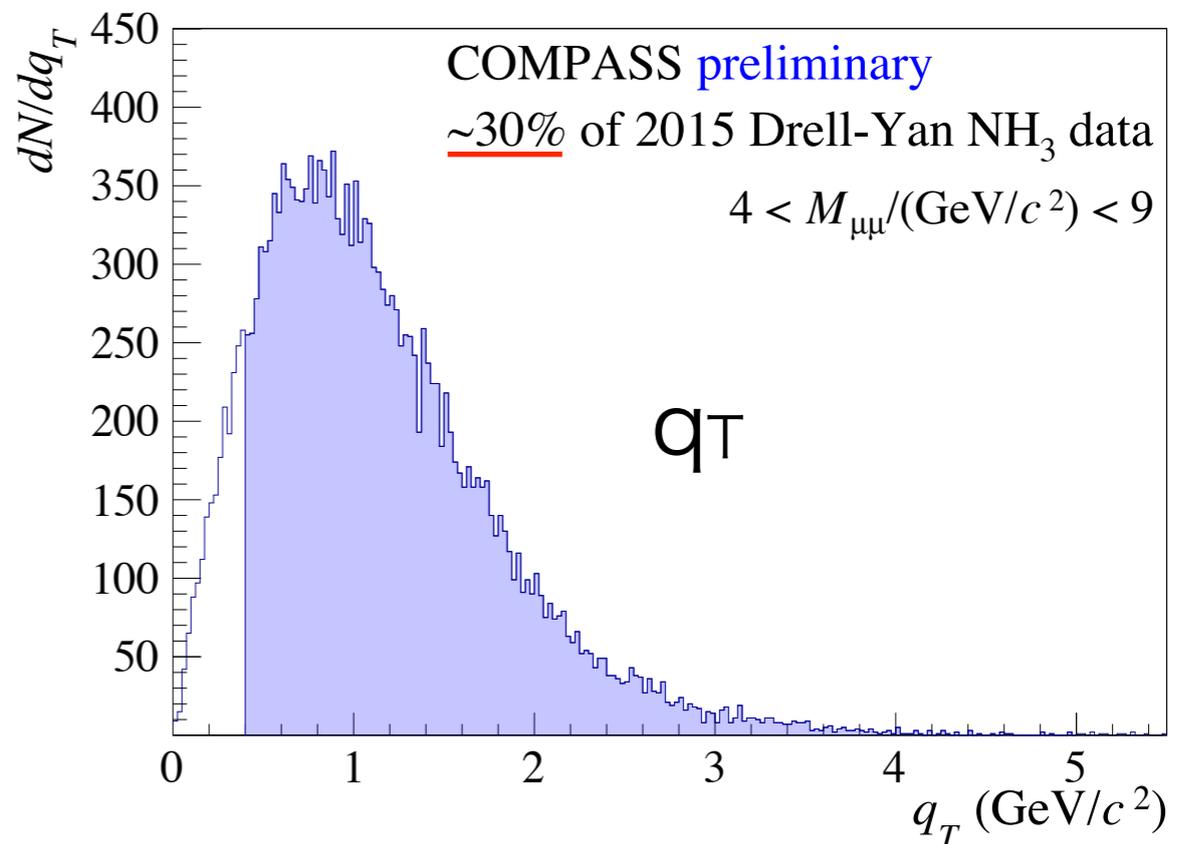
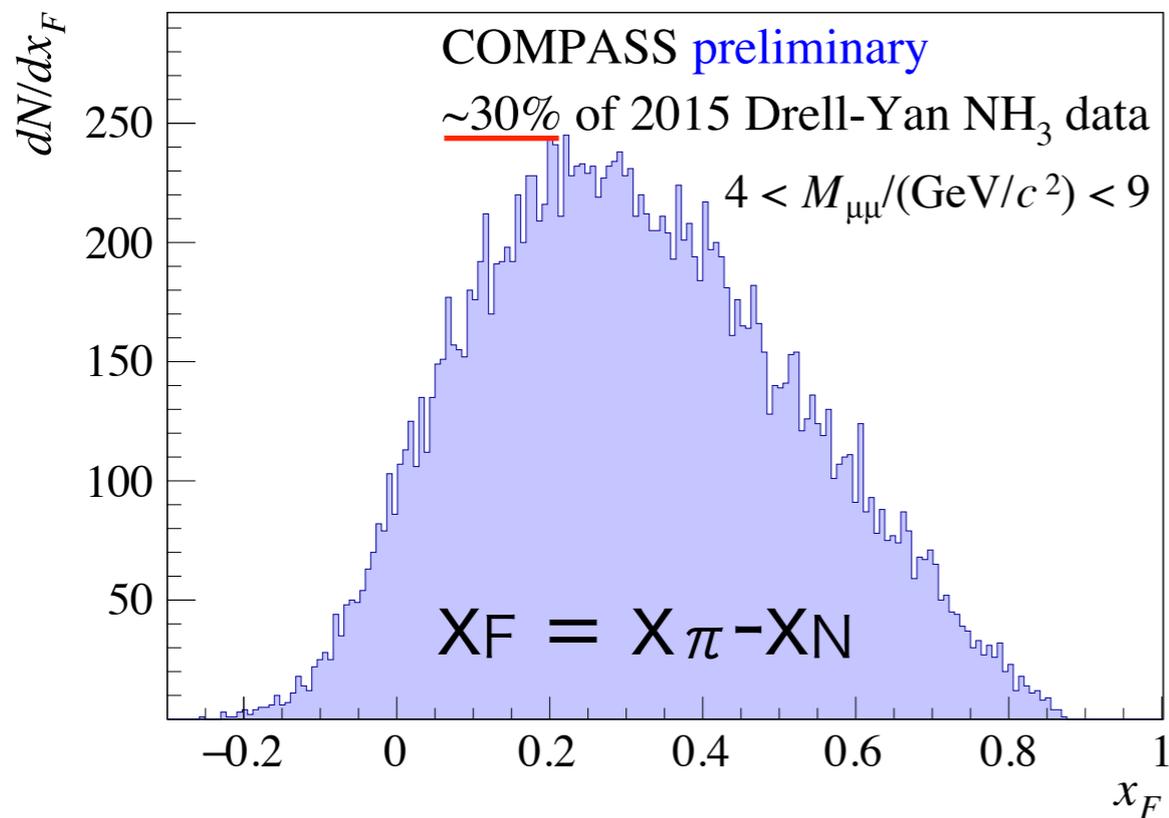
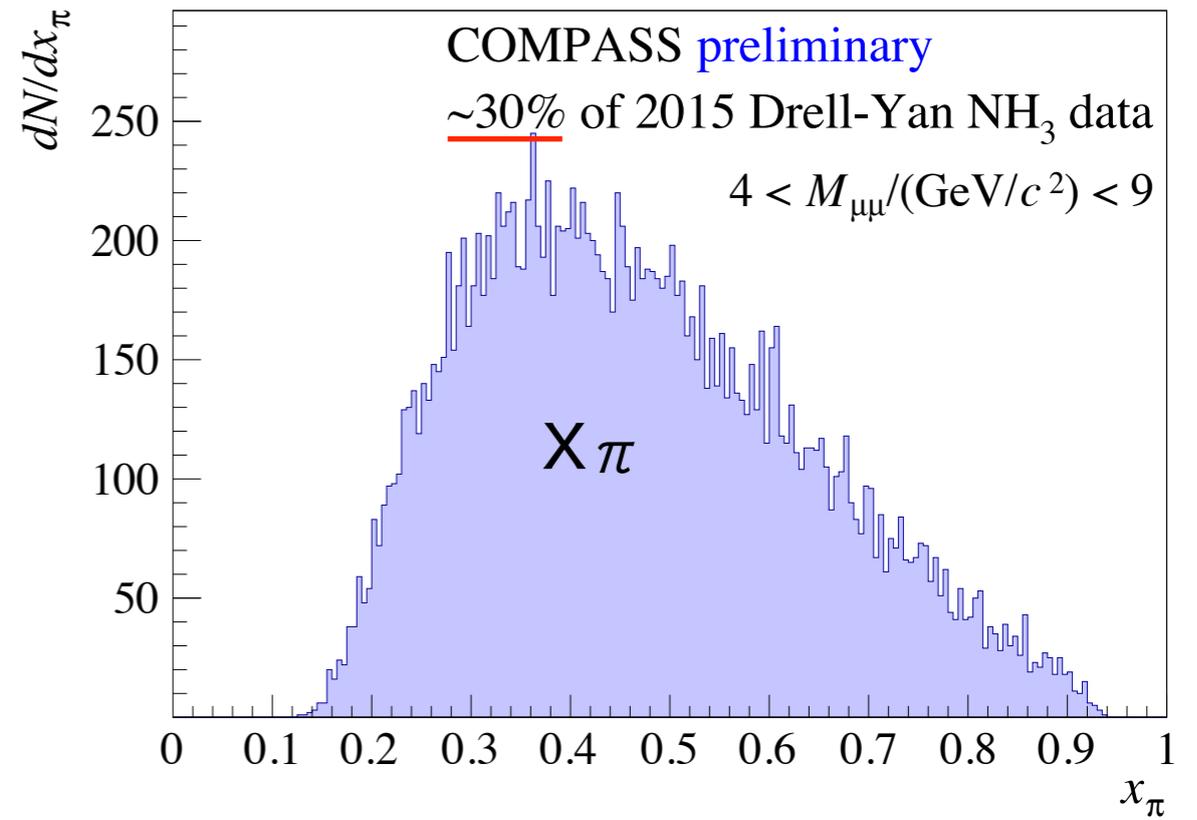
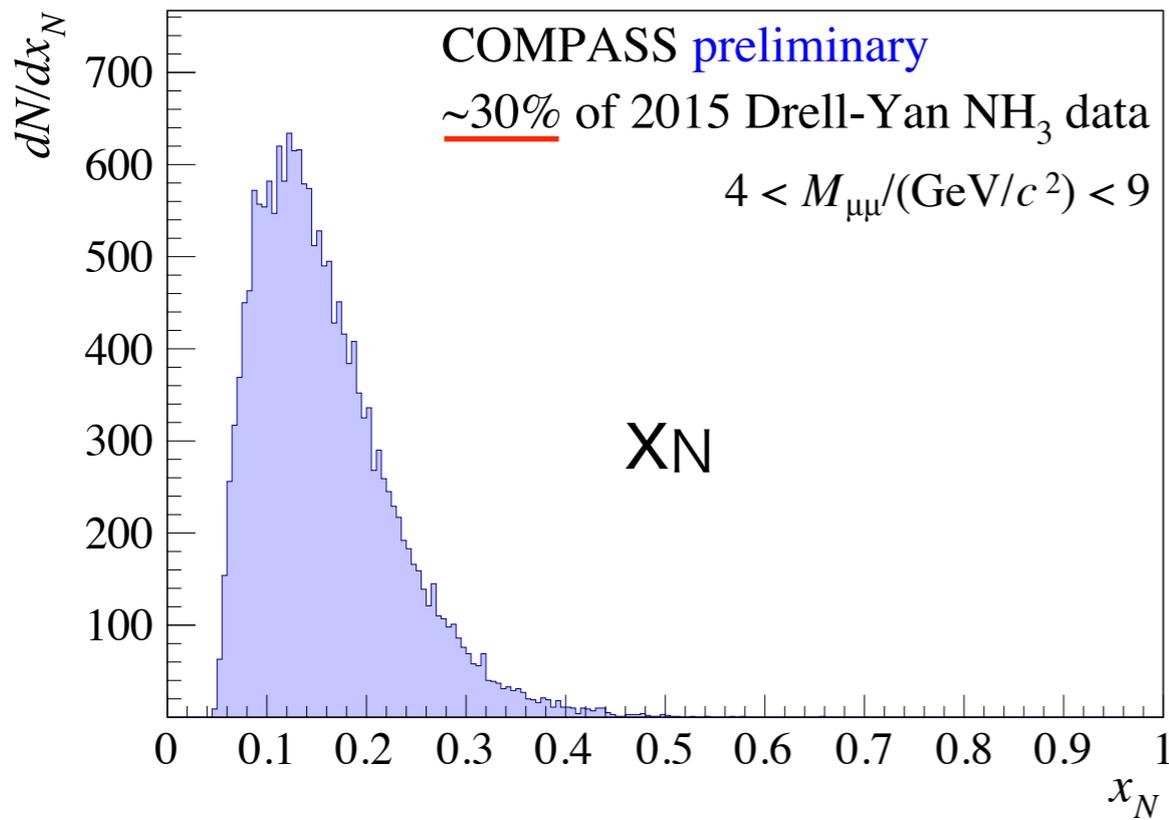
$2.5 < M_{\mu\mu} < 4$ GeV/c²: J/ψ, ψ' 領域

$2 < M_{\mu\mu} < 2.5$ GeV/c²: Low Mass DY 領域

高統計だがバックグラウンド (物理: $D \rightarrow \mu^\pm X$, J/ψ, 組み合わせ: π or $K \rightarrow \mu\nu$) がある



解析の現状： x_N , x_π , x_F , q_T (NH_3 , High Mass DY 領域)

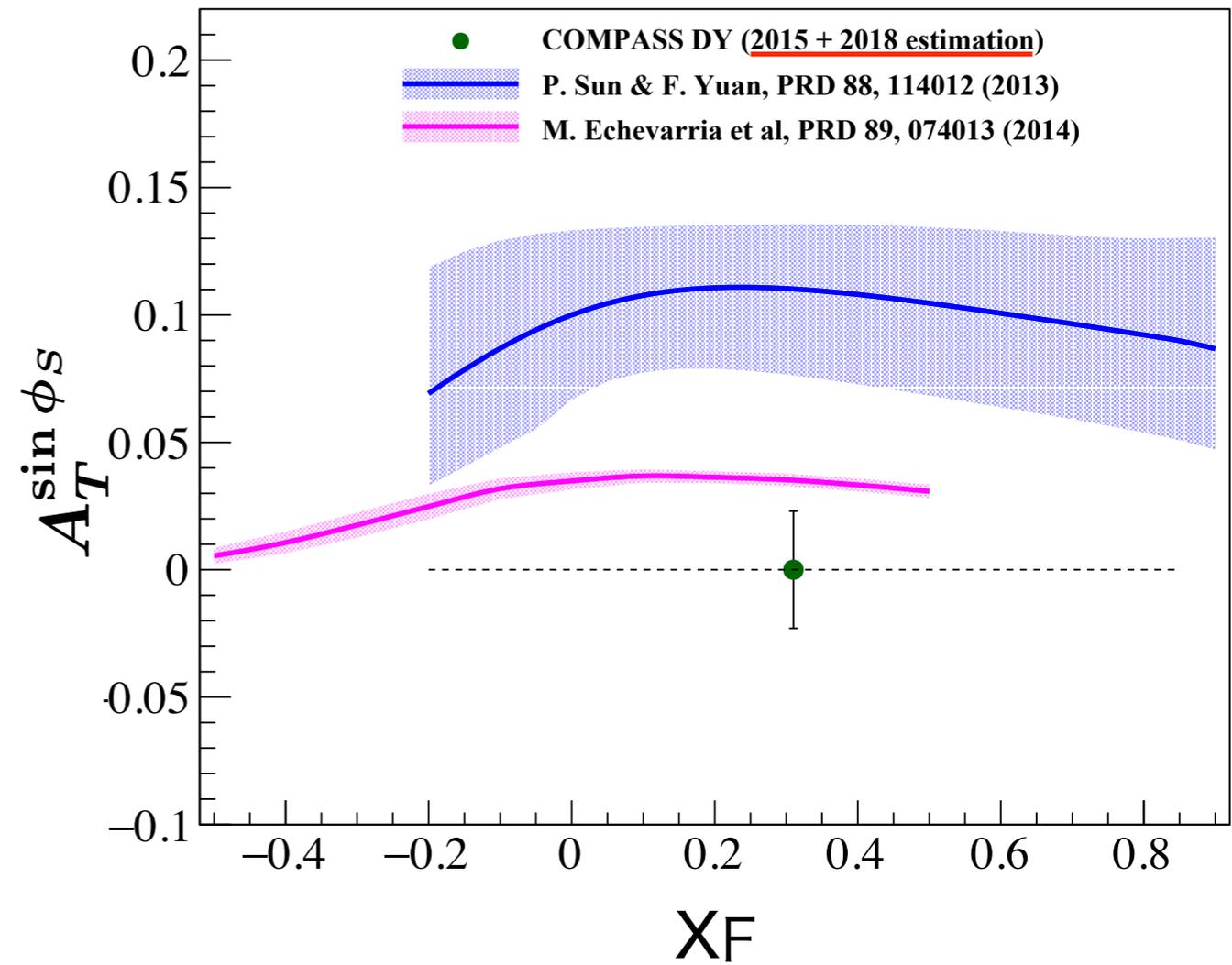
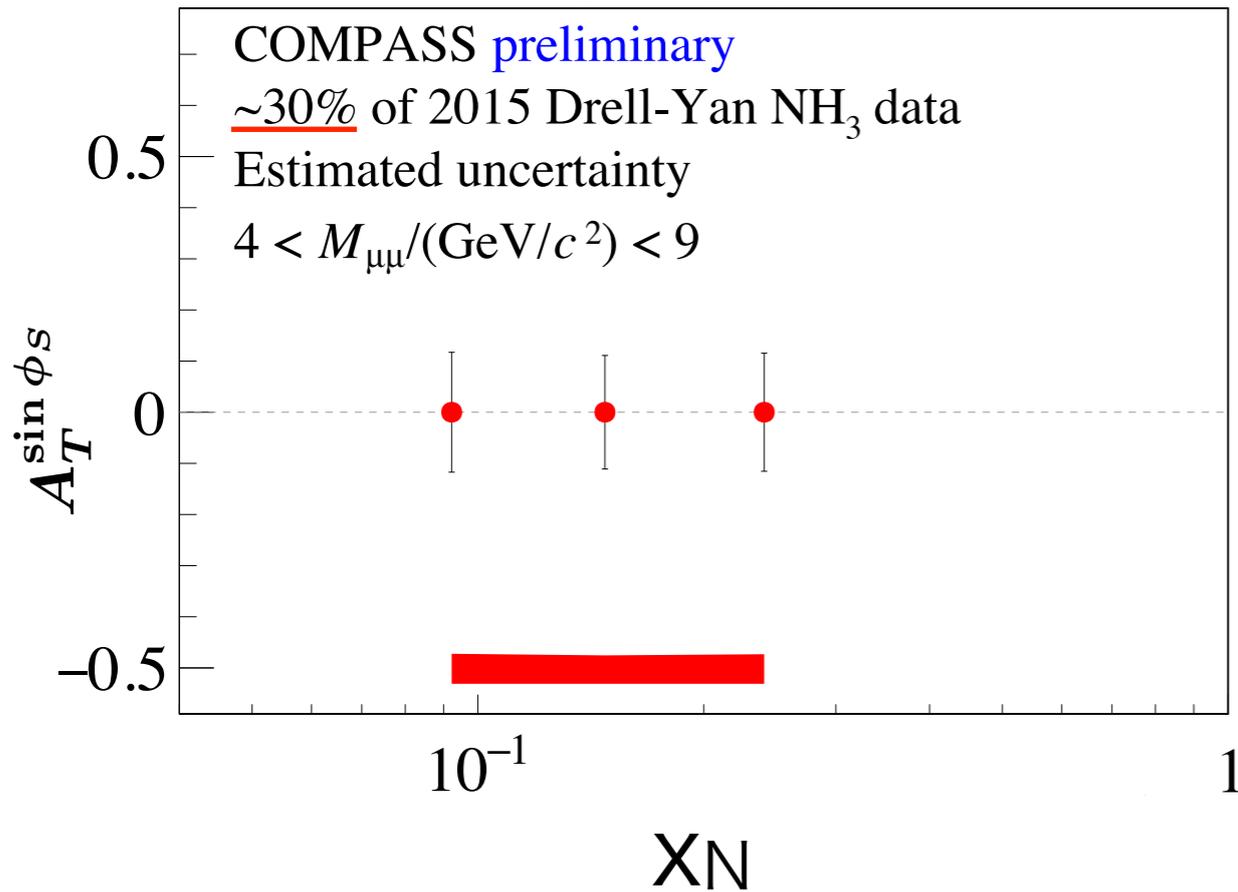




$$A_T^{\sin \phi_S} \propto f_{1T}^\perp(p) \otimes f_1(\pi) \text{ (Sivers)}$$

2015 年全統計 + 2018 年全統計 (予想)

2015 年全統計の 3 割



COMPASS 国際共同研究

- COMPASS は 12 カ国から 200 人以上の研究者が参加する国際共同研究グループで、核子構造とハドロンスペクトロスコピーの研究を行い、2002 年からデータ収集を続けている。

偏極 DY 実験

- COMPASS は同じ運動学的領域で、偏極 DY と偏極 SIDIS による TMD-PDF 測定ができる。
- 2015 年にデータ収集約 4 ヶ月間を行った。
- 全統計の 3 割を用いた解析結果
 - NH₃ セルを分離するのに十分な位置分解能が得られた。
 - High Mass DY 領域 (4~9 GeV/c²) , Low Mass DY 領域 (2~2.5 GeV/c²) で DY の解析を行う。
 - X_N, X_π, X_F, q_T 分布, 予想される統計/系統誤差を報告した。
- プレリミナリーな非対称度の結果を DIS 2017 で公開することを目標に、鋭意解析中。