

# 重イオン衝突実験における渦と磁場の研究成果

---

大久保 孝祐

宇宙史センターワークショップ

2022.3.24

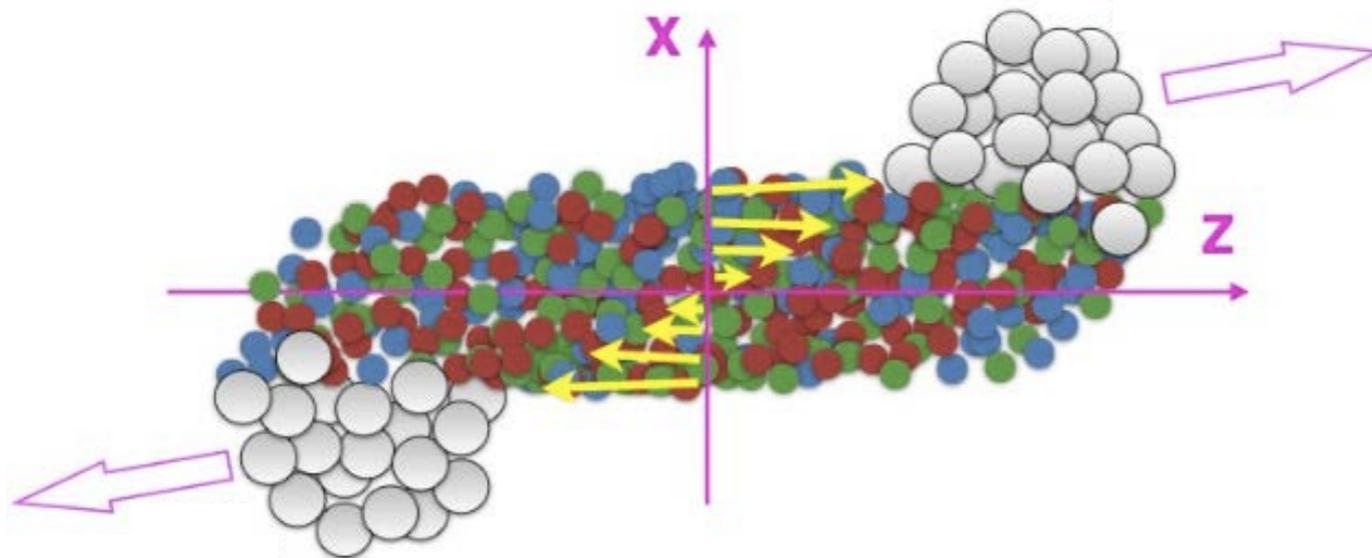
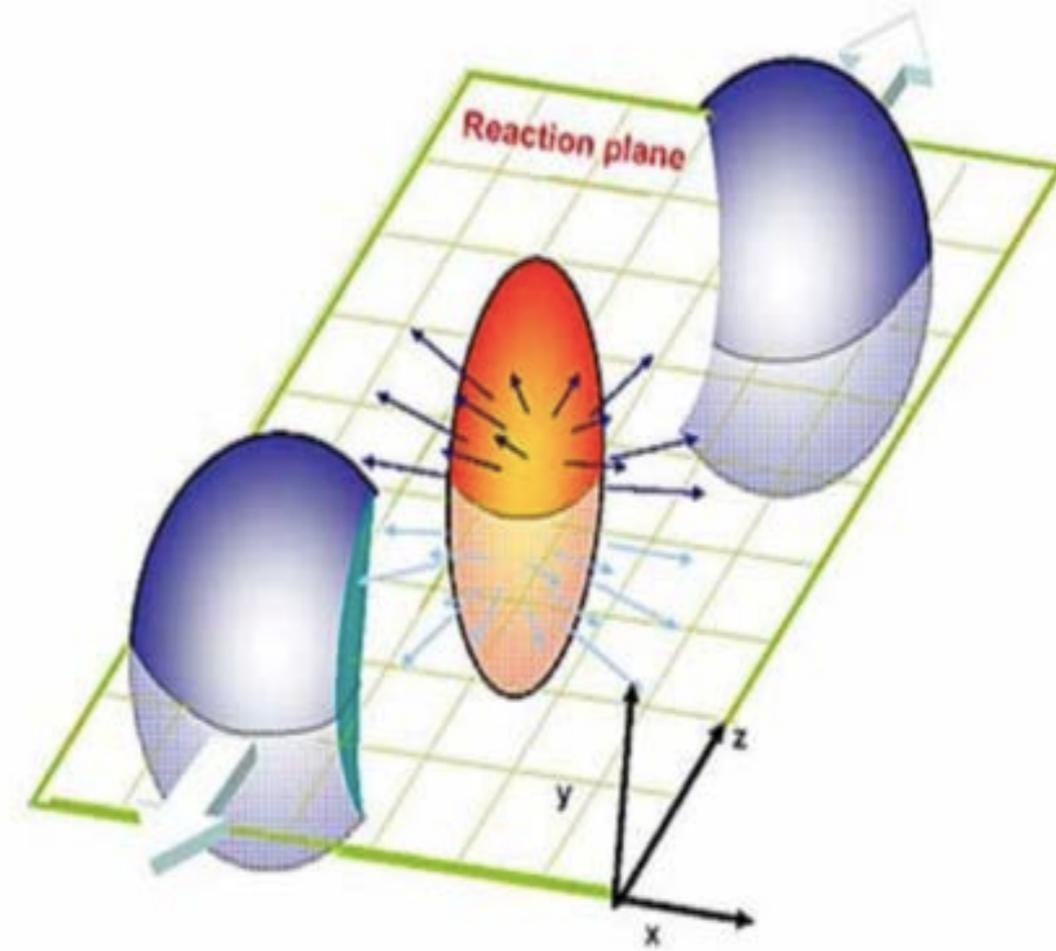
# 渦と磁場

◆非中心衝突事象では...

✓生成された系は回転運動をする。

-Z.-T. Liang and X.-N. Wang, PRL94, 102301 (2005)

-D. Kharzeev, L. McLerran, and H. Warringa, Nucl.Phys.A803, 227 (2008)



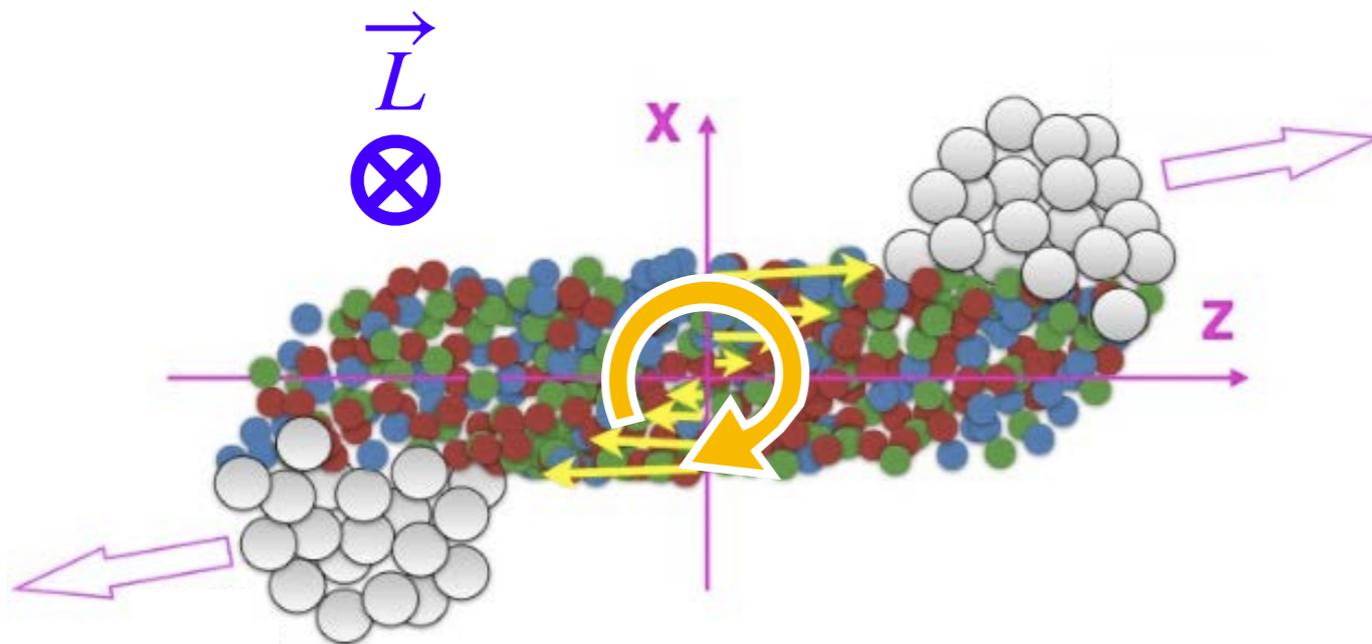
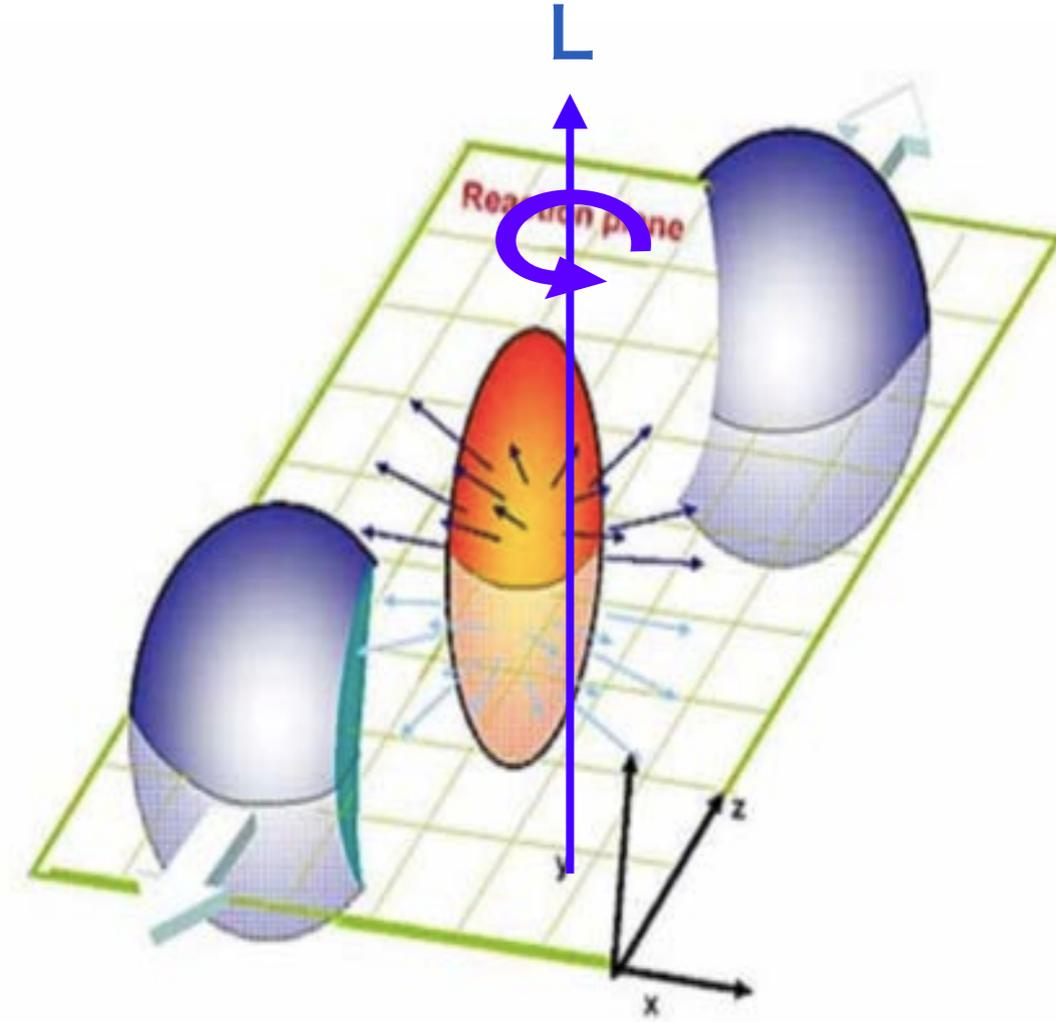
# 渦と磁場

◆非中心衝突事象では...

✓生成された系は回転運動をする。

-Z.-T. Liang and X.-N. Wang, PRL94, 102301 (2005)

-D. Kharzeev, L. McLerran, and H. Warringa, Nucl.Phys.A803, 227 (2008)



$$\omega_y = \frac{1}{2} (\nabla \times \mathbf{v})_y \approx -\frac{1}{2} \frac{\partial v_z}{\partial x}$$

# 渦と磁場

◆非中心衝突事象では...

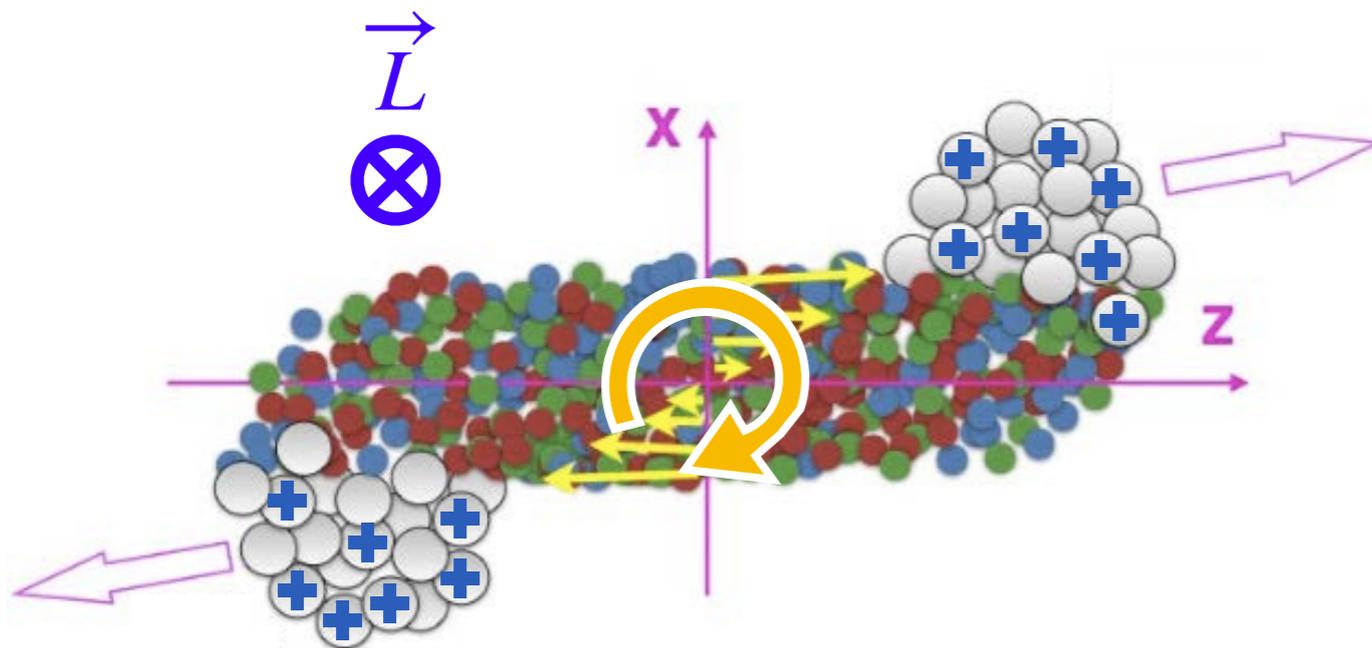
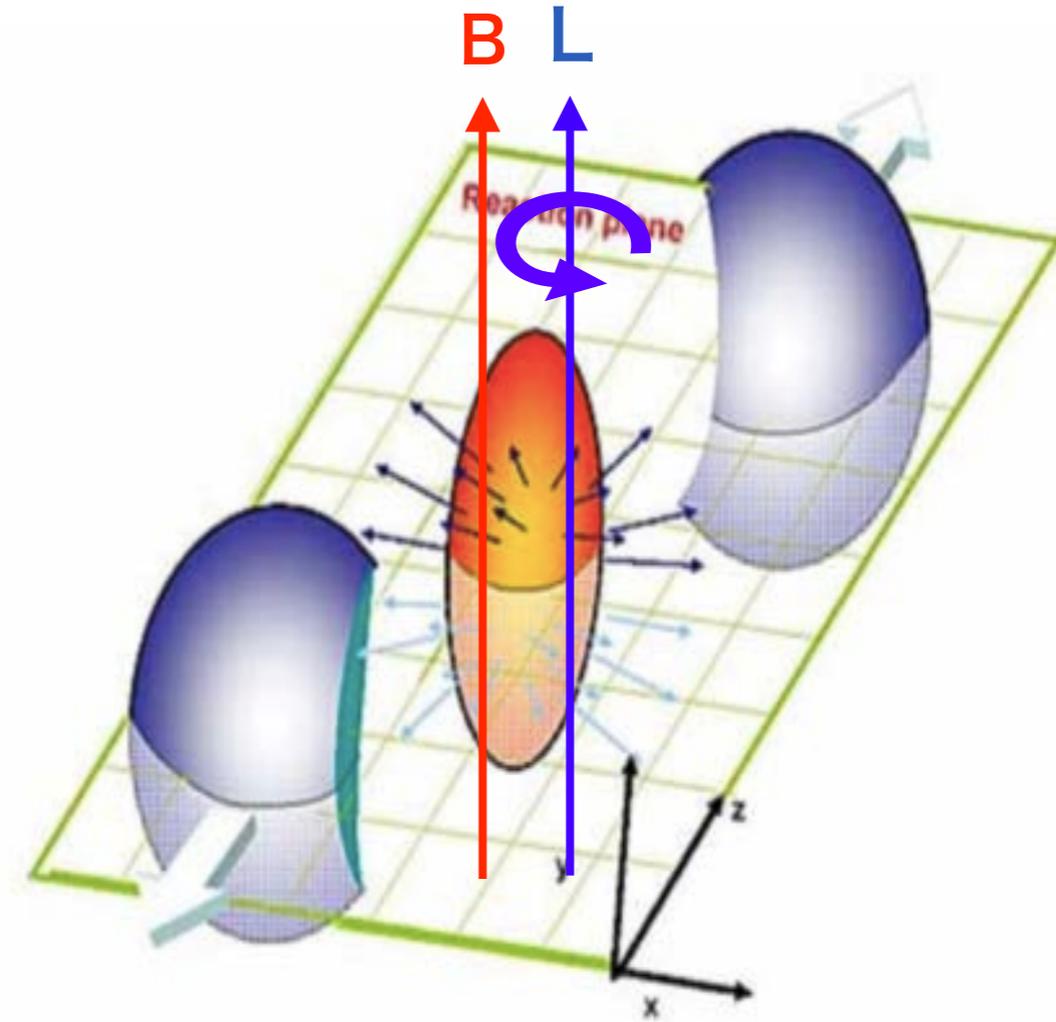
✓生成された系は回転運動をする。

-Z.-T. Liang and X.-N. Wang, PRL94, 102301 (2005)

-D. Kharzeev, L. McLerran, and H. Warringa, Nucl.Phys.A803, 227 (2008)

✓原子核衝突後の初期に強磁場が発生する。

-McLerran and Skokov, Nucl. Phys. A929, 184 (2014)



$$\omega_y = \frac{1}{2} (\nabla \times \mathbf{v})_y \approx -\frac{1}{2} \frac{\partial v_z}{\partial x}$$

# グローバル偏極

◆生成粒子は系の軌道角運動量と初期磁場によってスピン方向が揃えられる。

✓系の軌道角運動量によって揃えられる場合

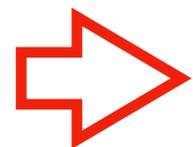
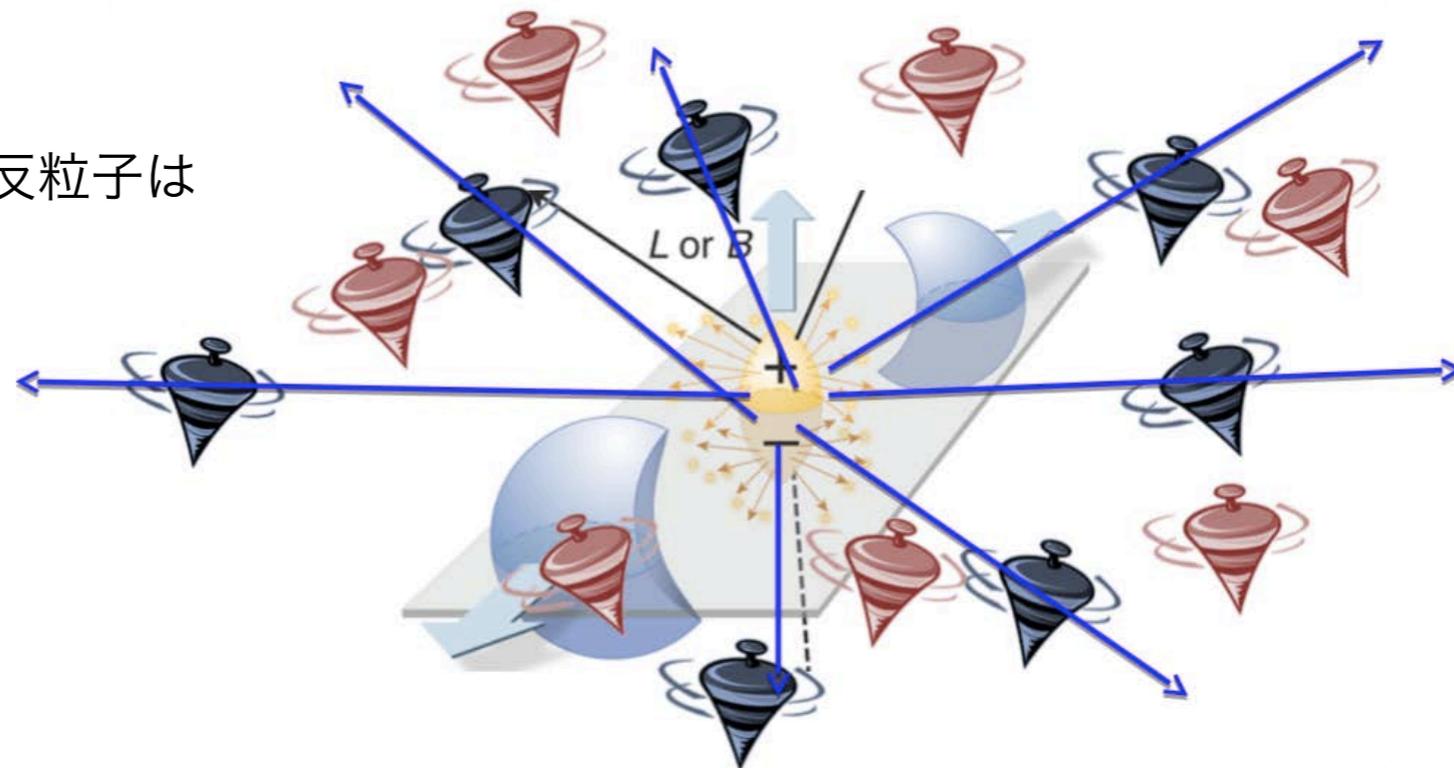
- 粒子と反粒子は軌道角運動量ベクトル $\vec{L}$ と同じ方向に揃えられる。

✓初期磁場によって揃えられる場合

- 磁気モーメントの符号から粒子と反粒子は互いに逆方向に揃えられる。

## ▶ グローバル偏極

- 系全体のスピン方向の偏り

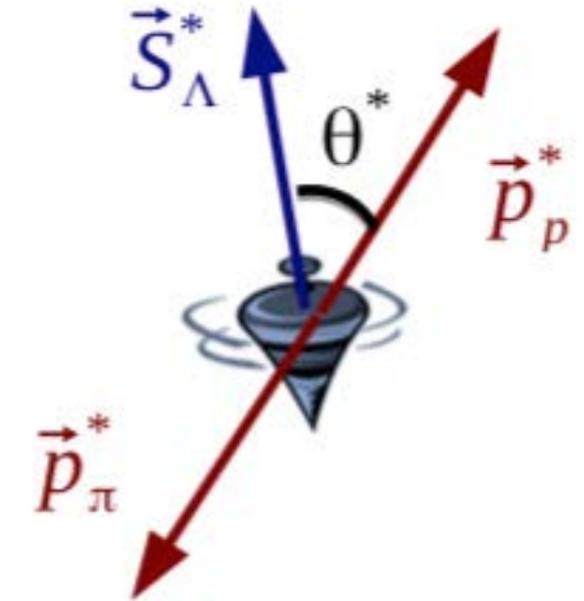


グローバル偏極は渦構造や磁場の性質を調べることができる。

# 測定方法

## ◆弱い相互作用を介したラムダ粒子の崩壊

- ▶ 崩壊陽子はラムダ粒子のスピンの方向に放出される傾向  
(反ラムダ粒子は逆方向)



## ◆グローバル偏極の測定方法

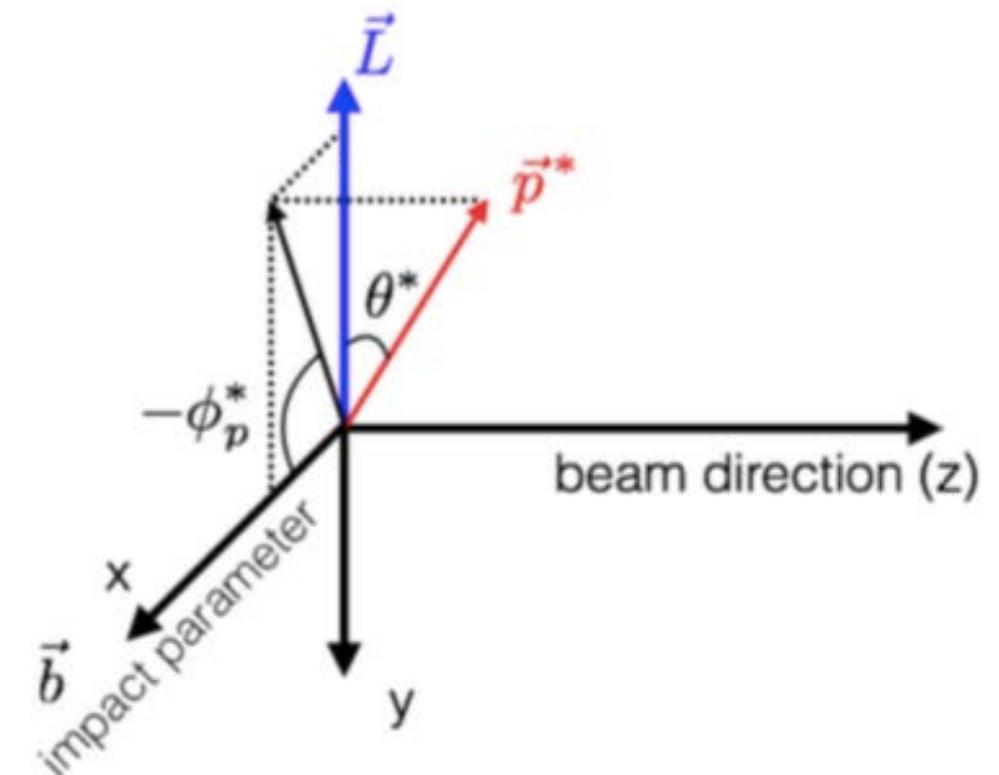
- ▶ ラムダ粒子の静止座標系における崩壊陽子の方位角分布を用いることで測定できる。

-STAR, PRC76, 024915(2007)

$$P_H = \frac{8}{\pi\alpha_H} \frac{\langle \sin(\Psi_1 - \phi_p^*) \rangle}{\text{Res}(\Psi_1)}$$

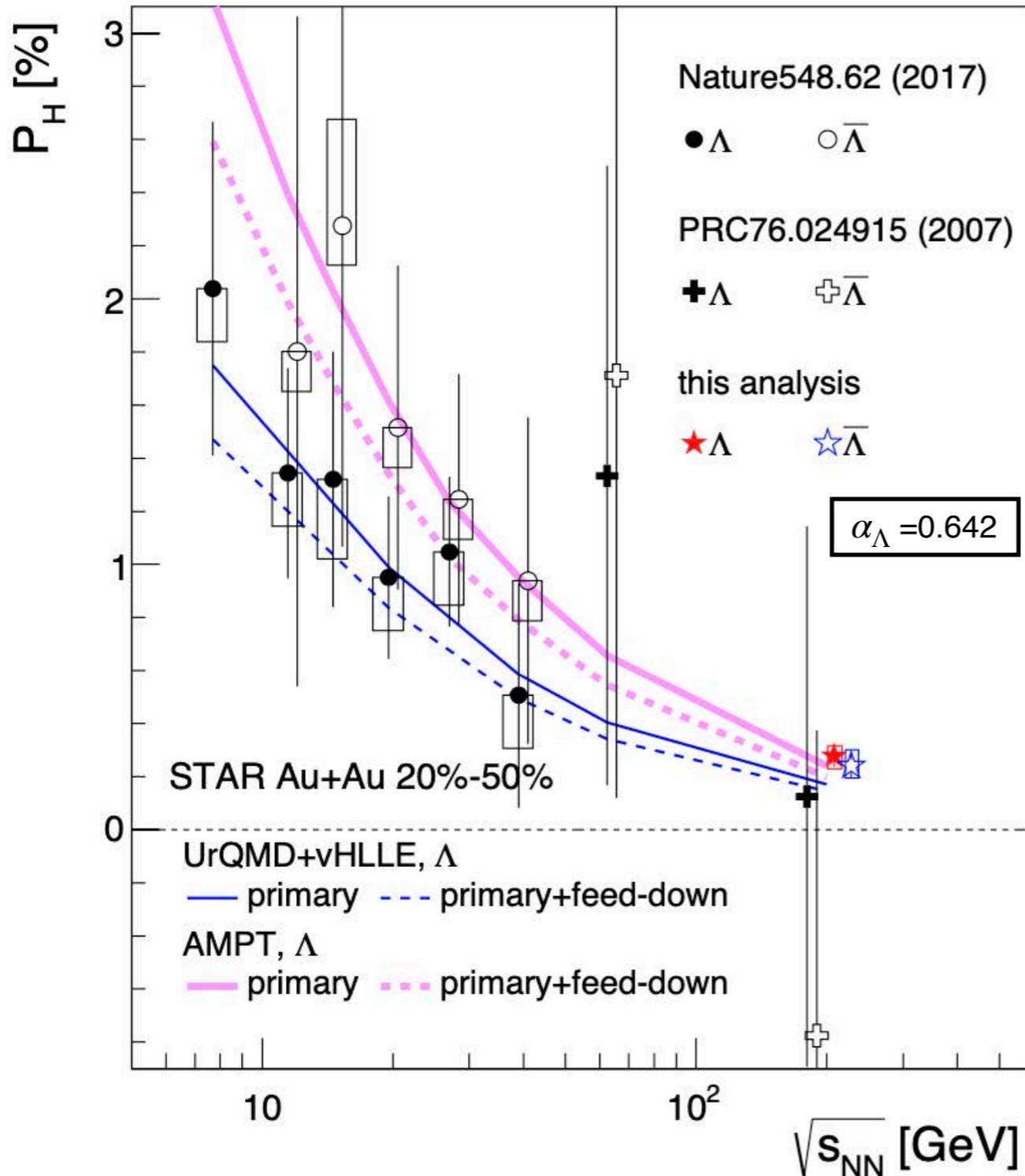
$\alpha_H$ : 崩壊パラメーター     $\phi_p^*$ : ハイペロンの静止座標系にお

$\Psi_1$ : 1次のイベント平面    ける崩壊バリオンの方位角



# STAR実験におけるグローバル偏極の測定

J. Adams et al. (STAR), PRC98, 14910 (2018)



✓有限なグローバル偏極を観測！

Becattini, Karpenko, Lisa, Upsal, and Voloshin,  
PRC95.054902 (2017)

$$P_{\Lambda(\bar{\Lambda})} \simeq \frac{1}{2} \frac{\omega}{T} \pm \frac{\mu_\Lambda B}{T}$$

$$\omega = (P_\Lambda + P_{\bar{\Lambda}}) k_B T / \hbar \sim 10^{21} s^{-1}$$

$\mu_\Lambda$ : 磁気モーメント

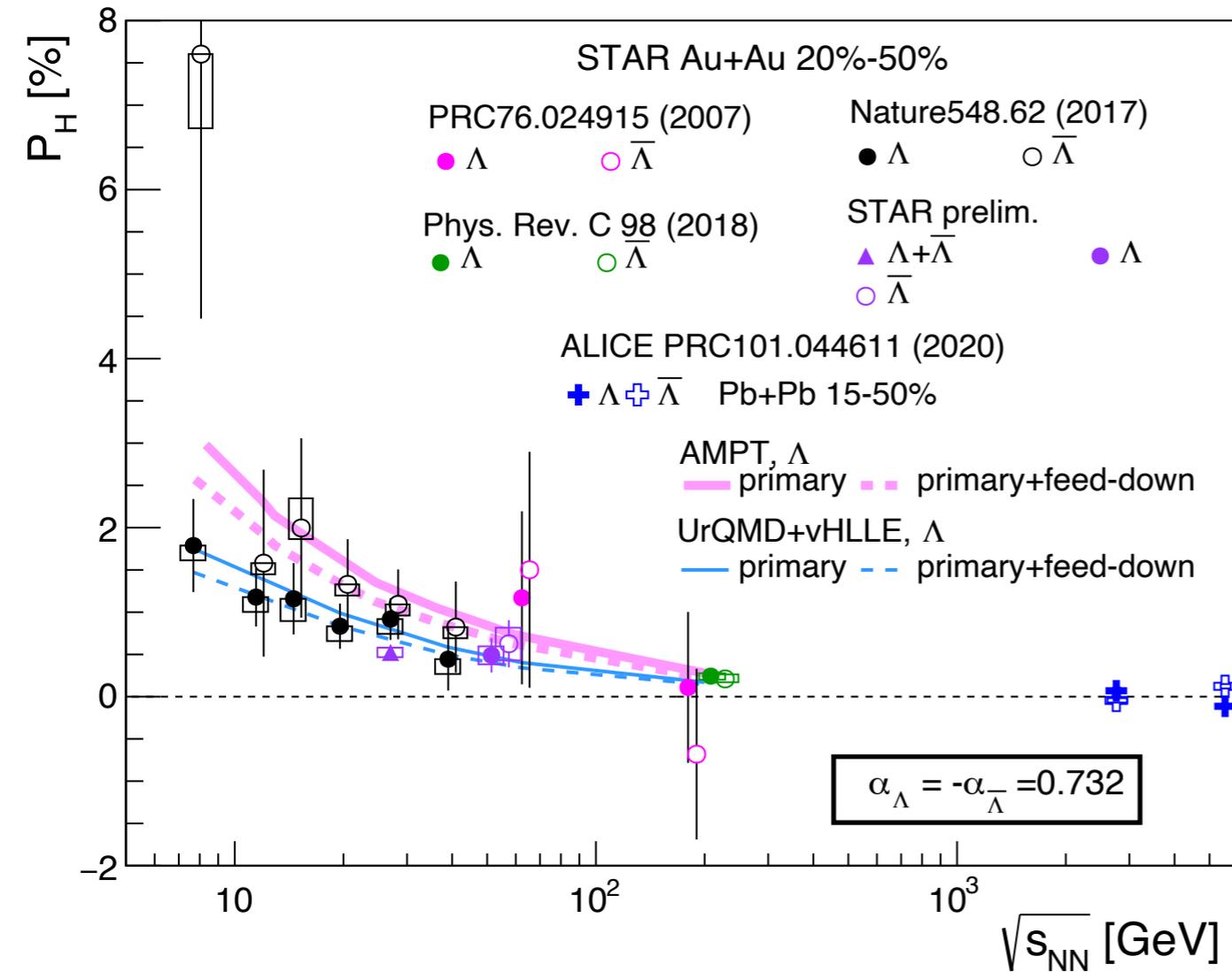
T: 熱平行時の温度(=160 MeV)

観測史上最も高速で回転している！

✓衝突エネルギーが低いほど値が大きくなる。

✓ $\Lambda$ とanti- $\Lambda$ の結果に優位な違いは観測されていない。

# ALICE実験におけるグローバル偏極の測定



✓ ALICE実験では鉛+鉛衝突 2.76, 5.02 TeV  
で測定。

## 2.76 TeV

$$P_{\Lambda}(\%) = 0.08 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.04(\text{syst.})$$

$$P_{\bar{\Lambda}}(\%) = -0.05 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.03(\text{syst.})$$

## 5.02 TeV

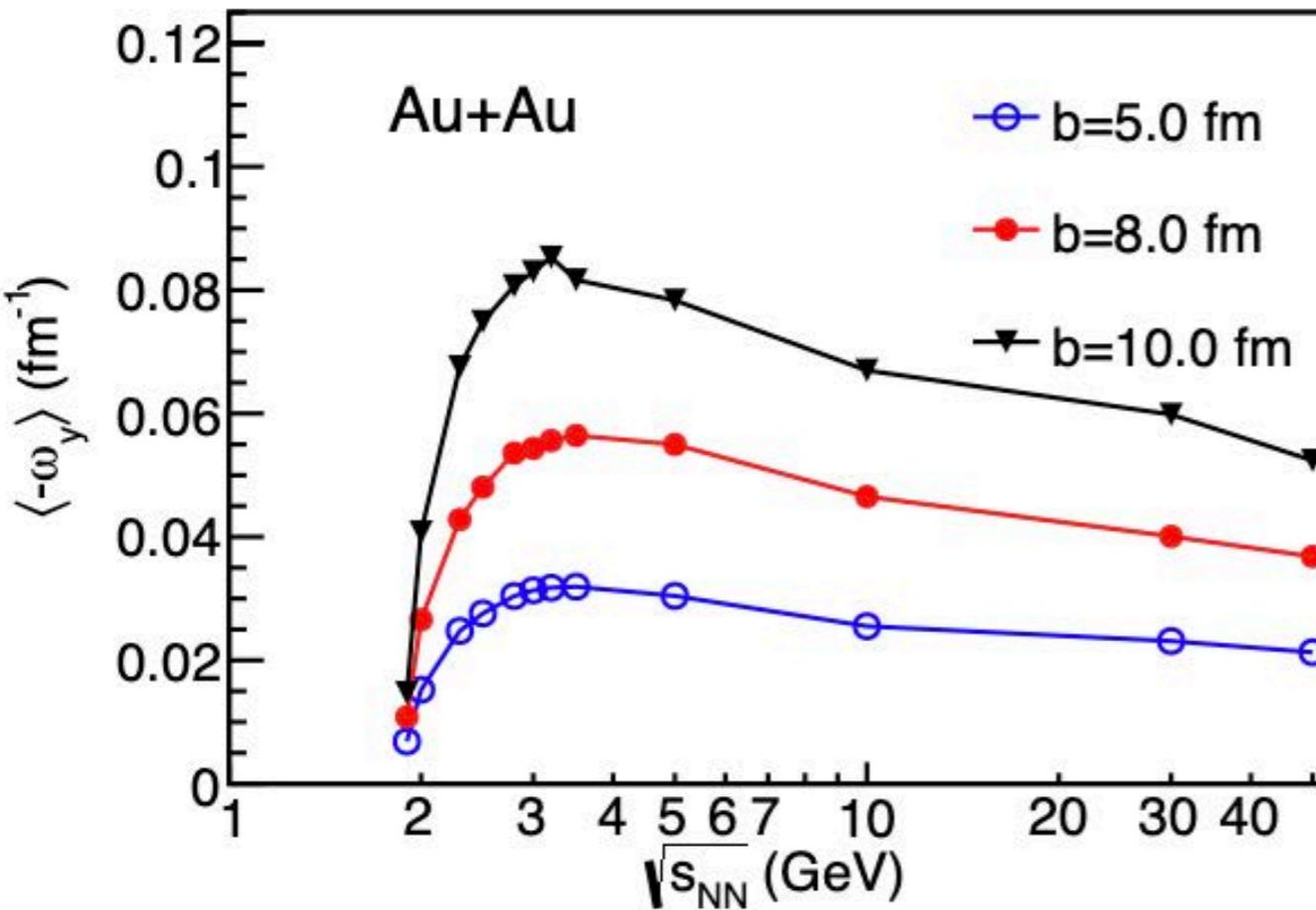
$$P_{\Lambda}(\%) = -0.13 \pm 0.11(\text{stat.}) \pm 0.04(\text{syst.})$$

$$P_{\bar{\Lambda}}(\%) = 0.14 \pm 0.12(\text{stat.}) \pm 0.03(\text{syst.})$$

✓ さらに高いエネルギーでも値が低くなる  
傾向。

# 低エネルギー領域での渦度

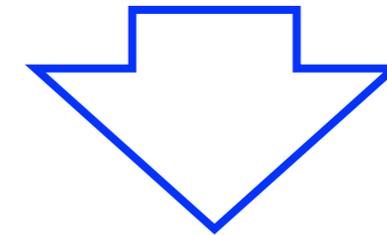
X.-G. Deng et al., PRC101.064908 (2020)



## UrQMDモデル

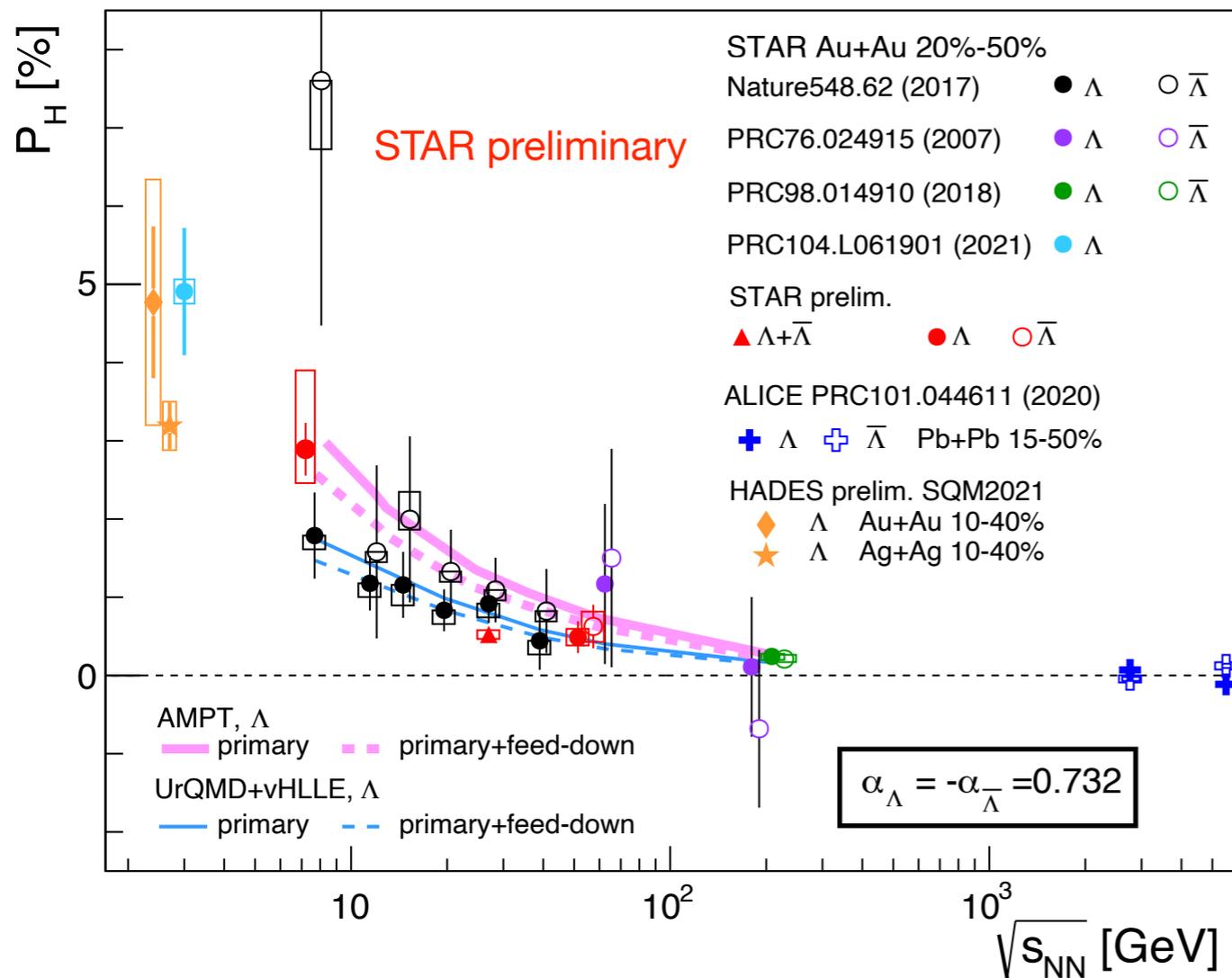
✓  $\sqrt{s_{NN}} = 3\text{GeV}$ 付近で渦度が最も大きい。

✓  $\sqrt{s_{NN}} = 2m_N$ で渦度が消失する。



・ グローバル偏極は  $2m_N \approx 1.9 < \sqrt{s_{NN}} < 7.7$  GeV  
の領域でピークをもつことが予想される。

# 低エネルギーにおけるグローバル偏極の測定

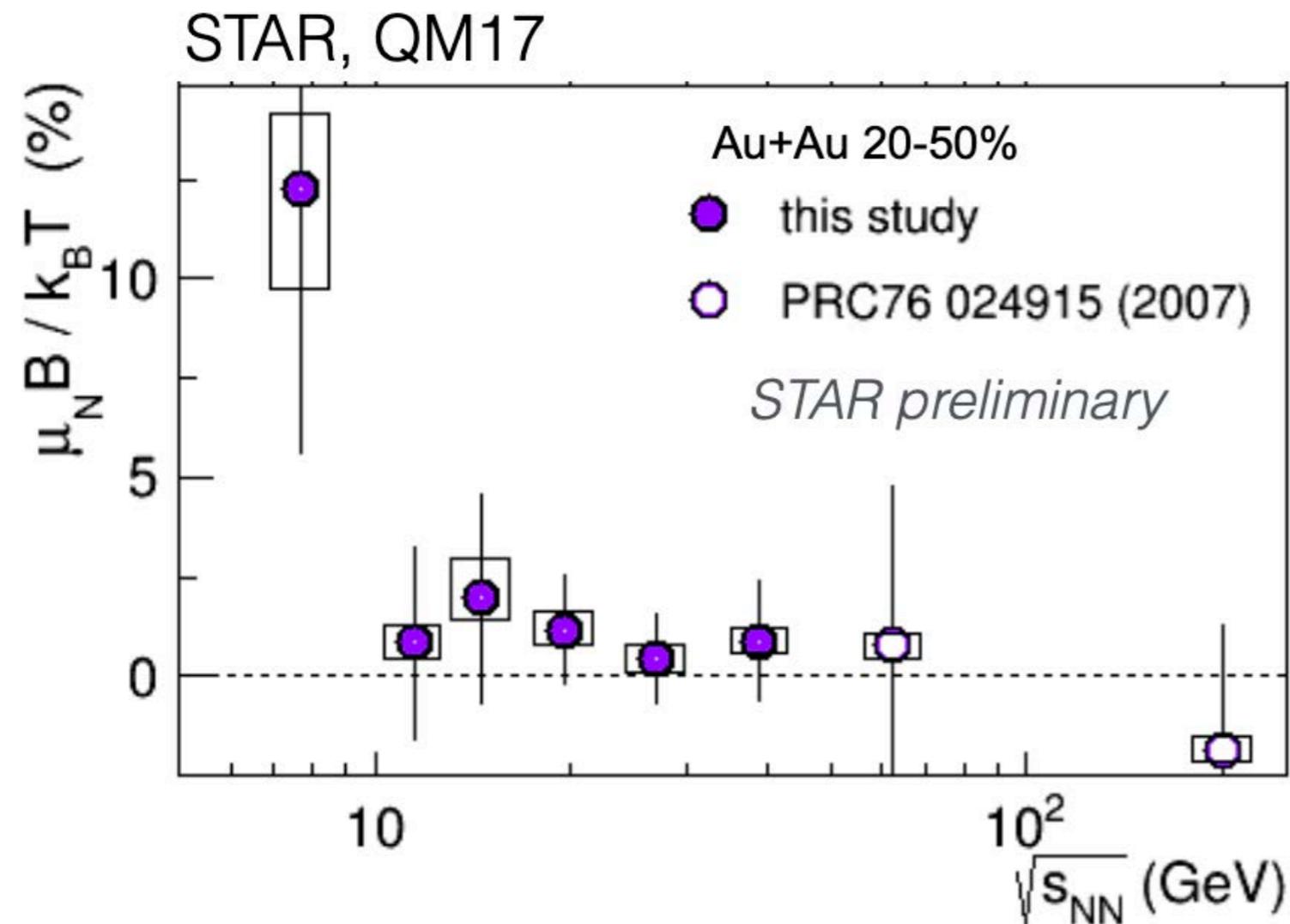


✓ HADES実験では金+金衝突 2.4 GeV,  
銀+銀衝突 2.55 GeVで測定。

✓ STAR実験では固定標的型、金+金衝突  
3.0, 7.2 GeVで測定。

➡ 2.4 GeVまで衝突エネルギーが低くなると  
ともにグローバル偏極は大きくなる。

# 磁場の見積もり



Becattini, Karpenko, Lisa, Upsal, and Voloshin, PRC95.054902 (2017)

$$P_{\Lambda(\bar{\Lambda})} \simeq \frac{1}{2} \frac{\omega}{T} \pm \frac{\mu_{\Lambda} B}{T}$$

$\mu_{\Lambda}$ : 磁気モーメント

T: 熱平衡時の温度(=160 MeV)

$$B = (P_{\Lambda} - P_{\bar{\Lambda}})T / (2\mu_{\Lambda})$$

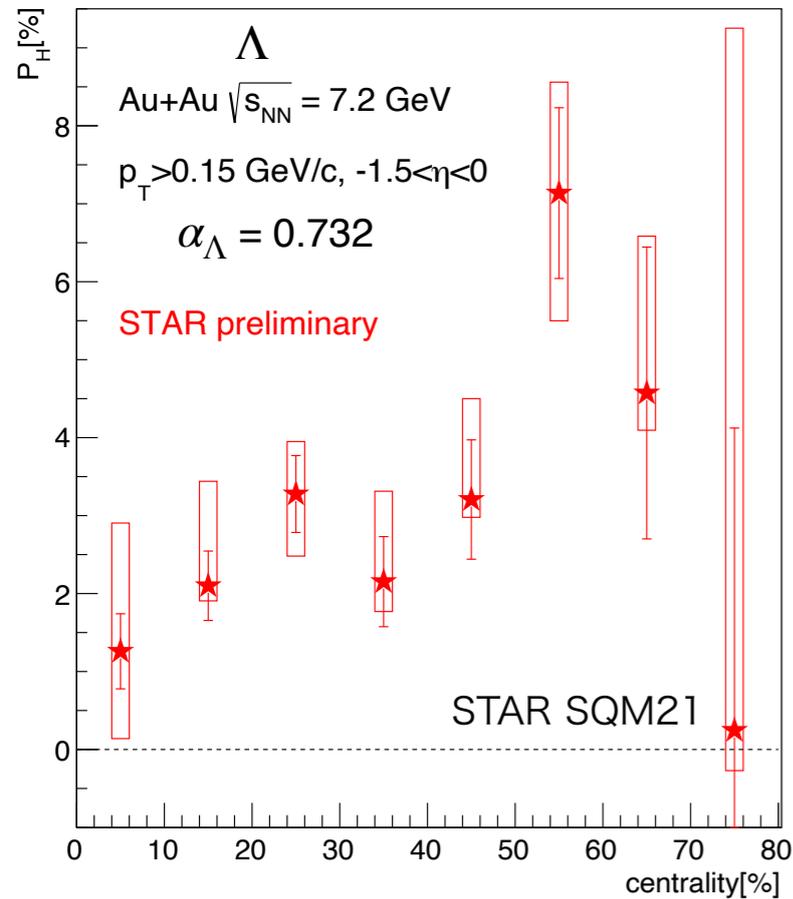
$$\sim 2 \times 10^{11} [\text{T}]$$

✓ Thermalモデルによると、 $\Lambda$ とanti- $\Lambda$ の差によって運動学的フリーズアウト時の磁場を調べることができる。

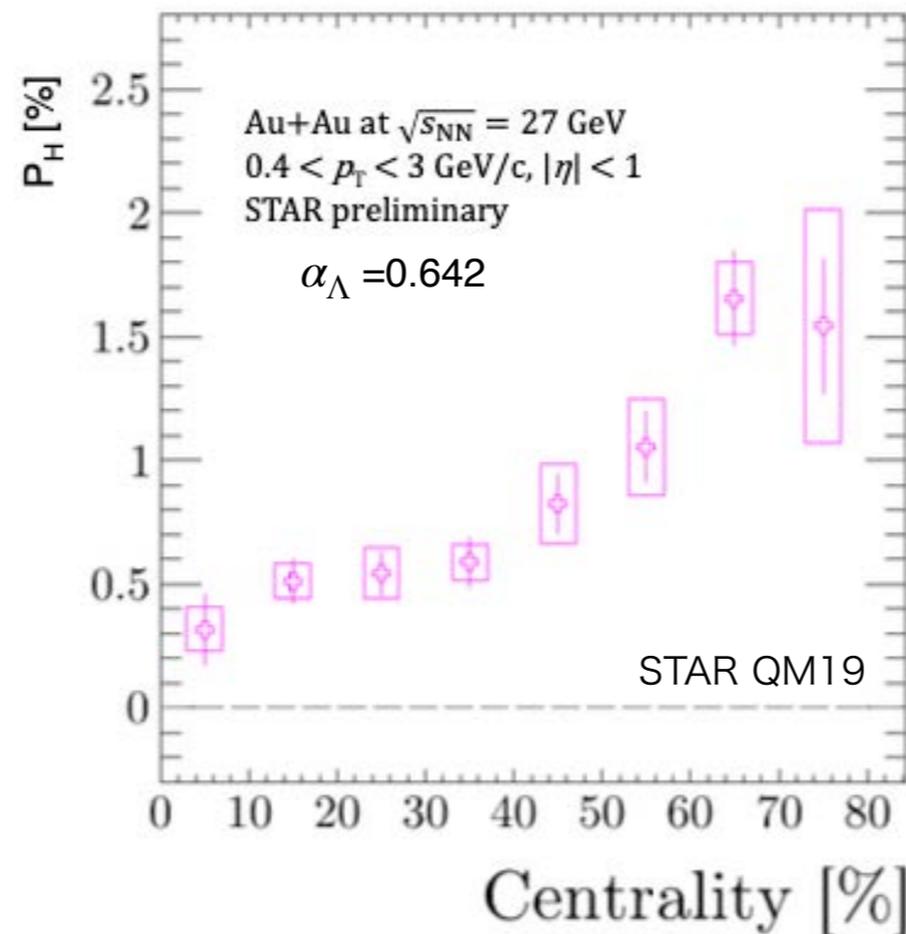
✓ 磁場以外からも影響を受ける可能性。

# グローバル偏極の中心衝突度依存性

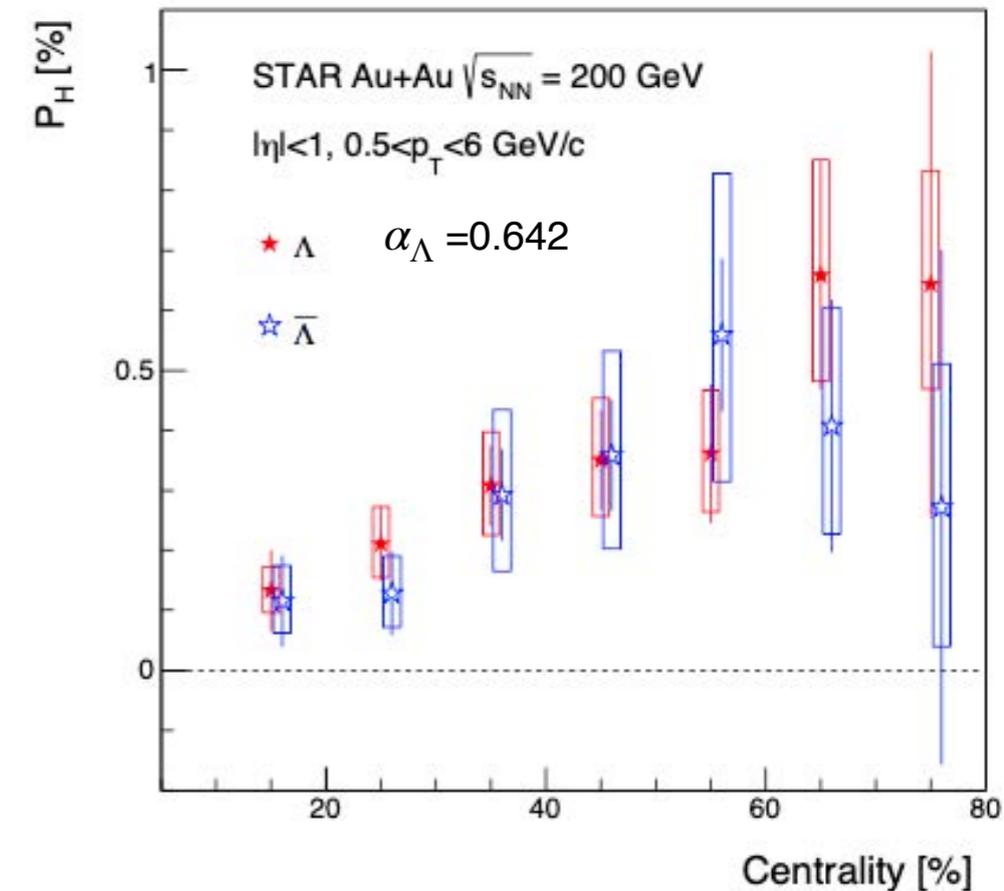
7.2 GeV



27 GeV



200 GeV



J. Adams et al. (STAR), PRC98. 014910 (2018)

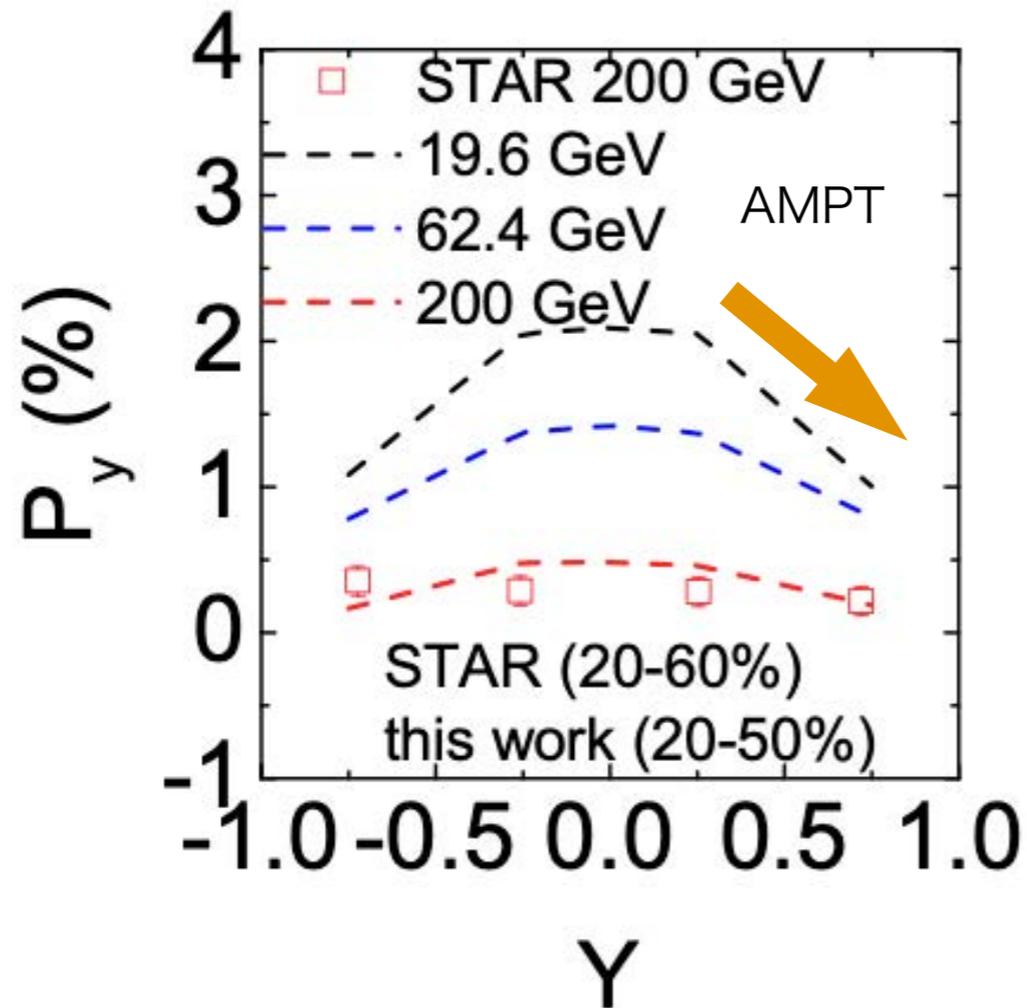
✓ 中心衝突ほどグローバル偏極は小さくなる傾向。

- 系の軌道角運動量は周辺衝突よりも中心衝突の方が小さい。

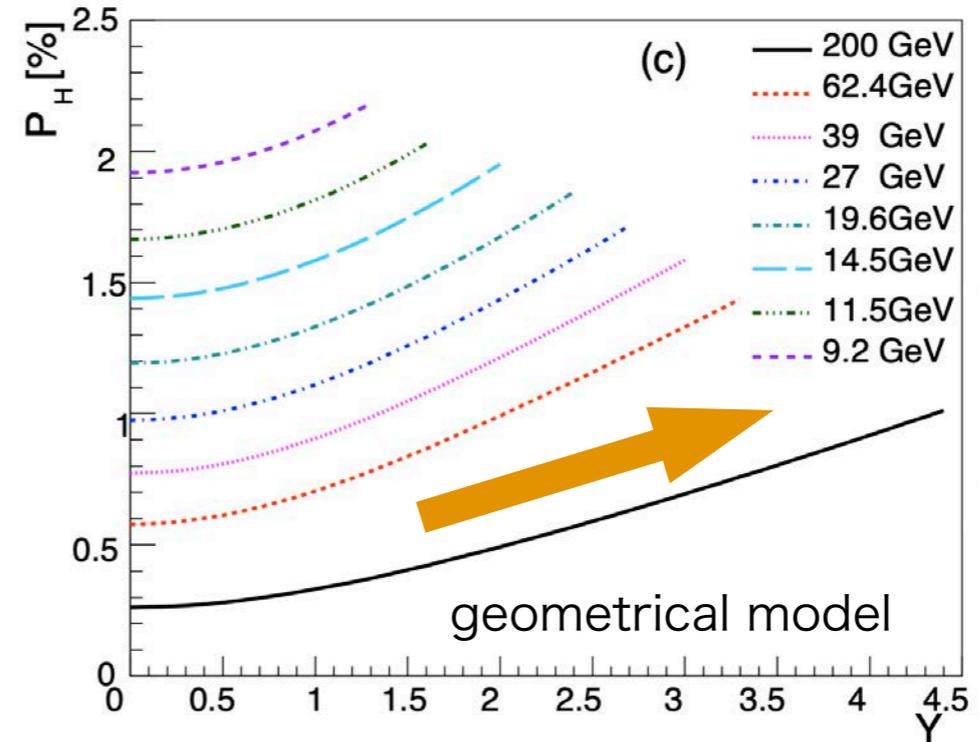
# グローバル偏極のラピディティ依存性

✓ グローバル偏極のラピディティ依存性はモデルによって予想が異なる。

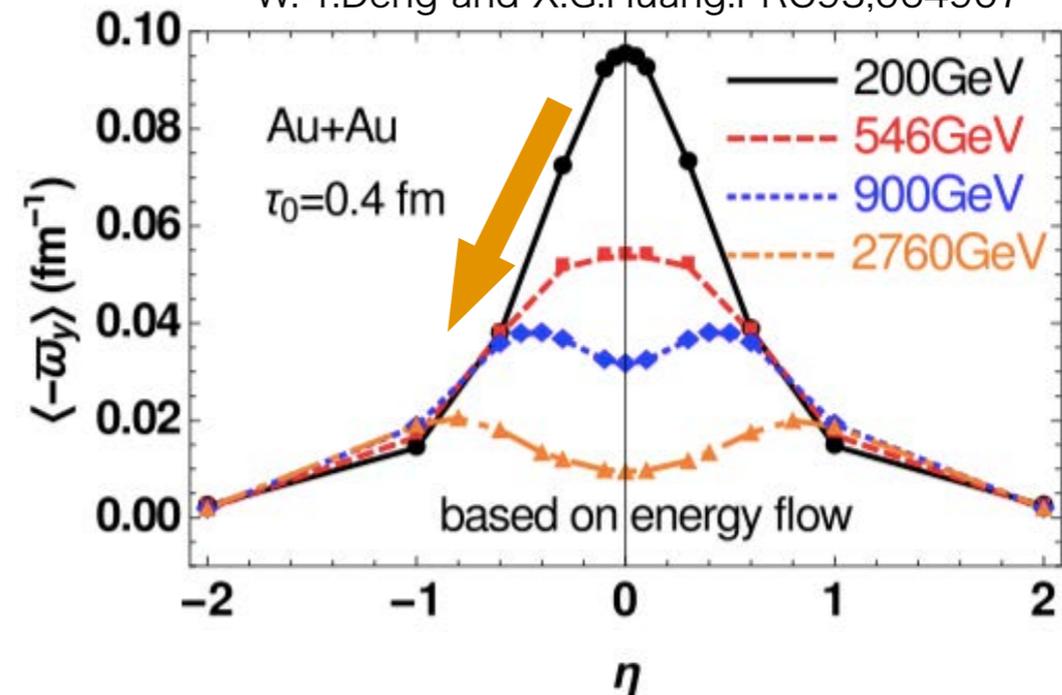
D.X.We, W.T.Deng and X.G.Huang, PRC99.014905 (2019)



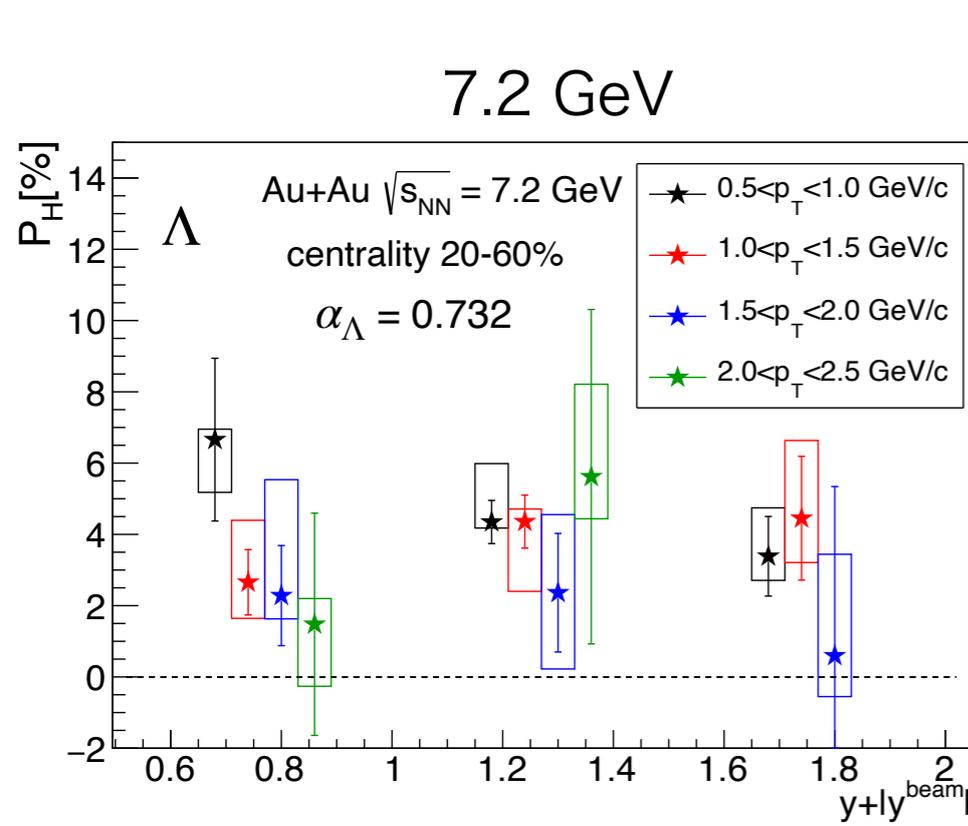
Z.T.Liang et al., Chin.Phys.C 45 (2021) 1, 014102



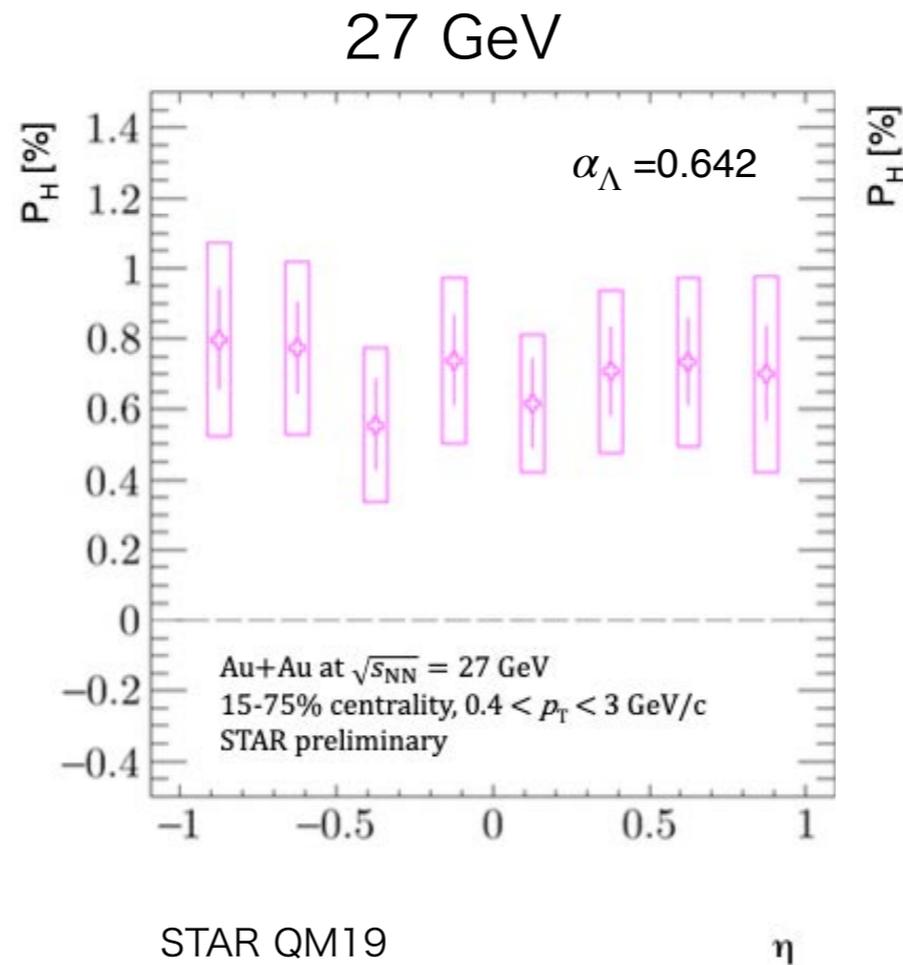
W.-T.Deng and X.G.Huang:PRC93,064907



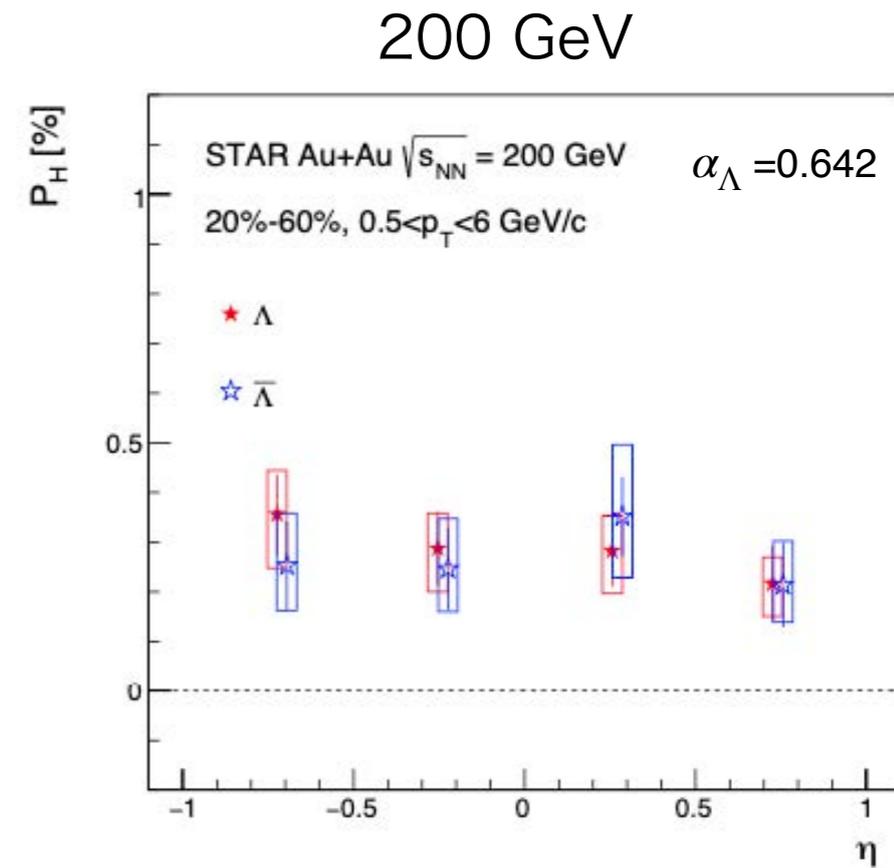
# グローバル偏極のラピディティ依存性



STAR SQM21



STAR QM19

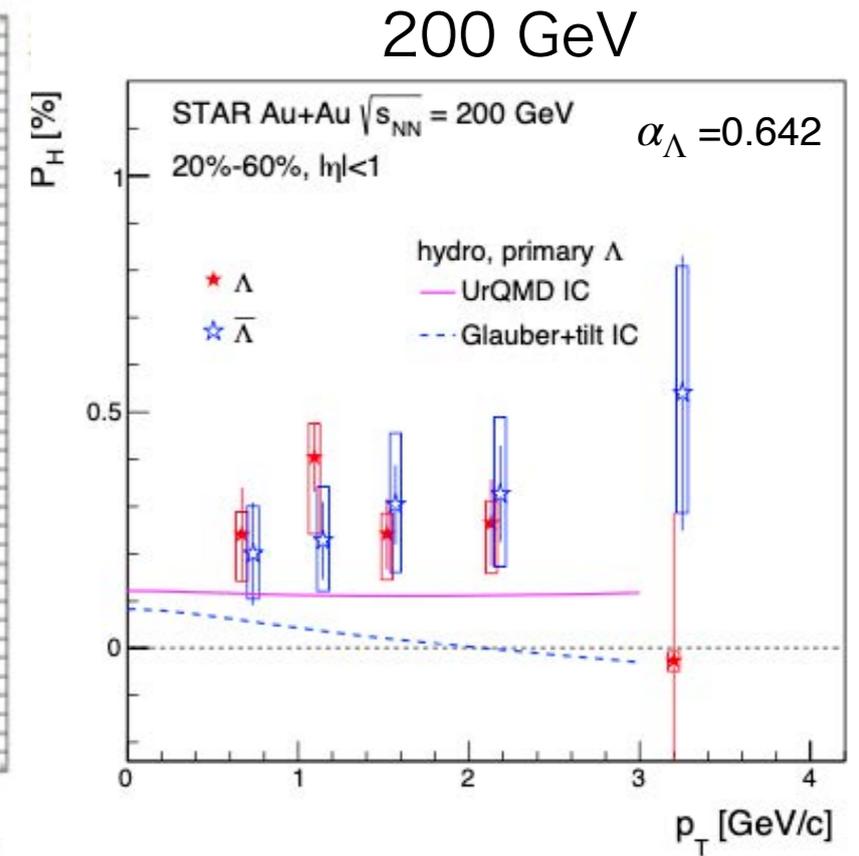
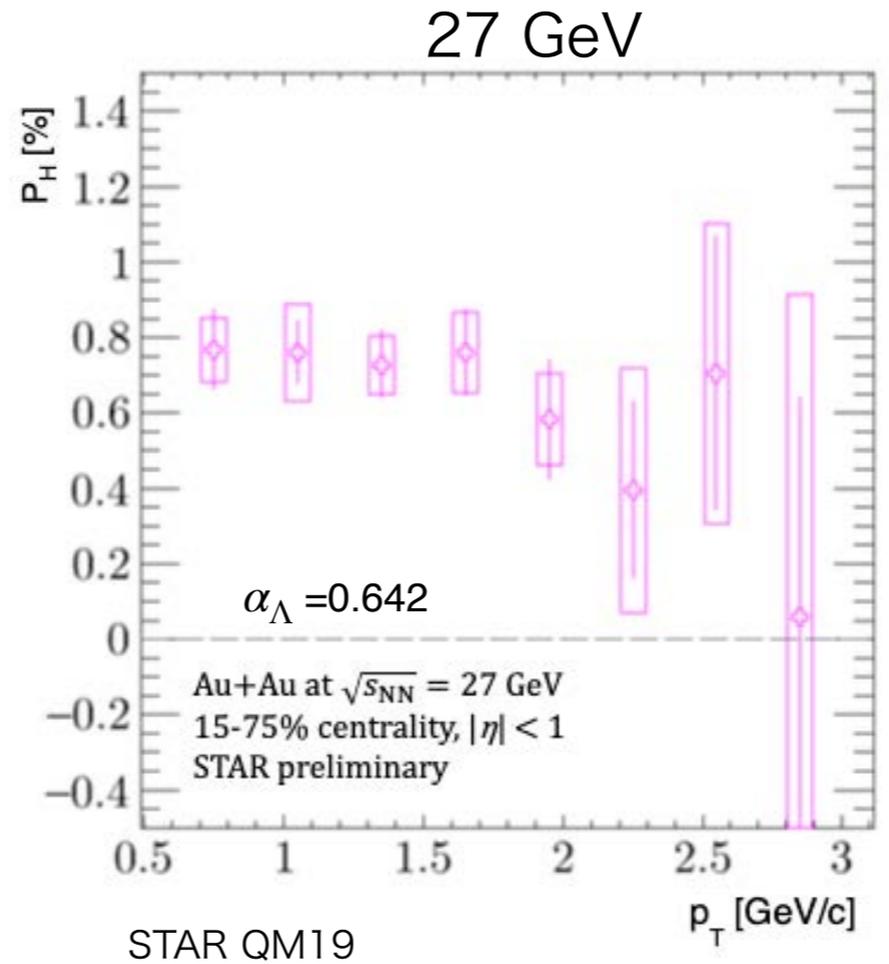
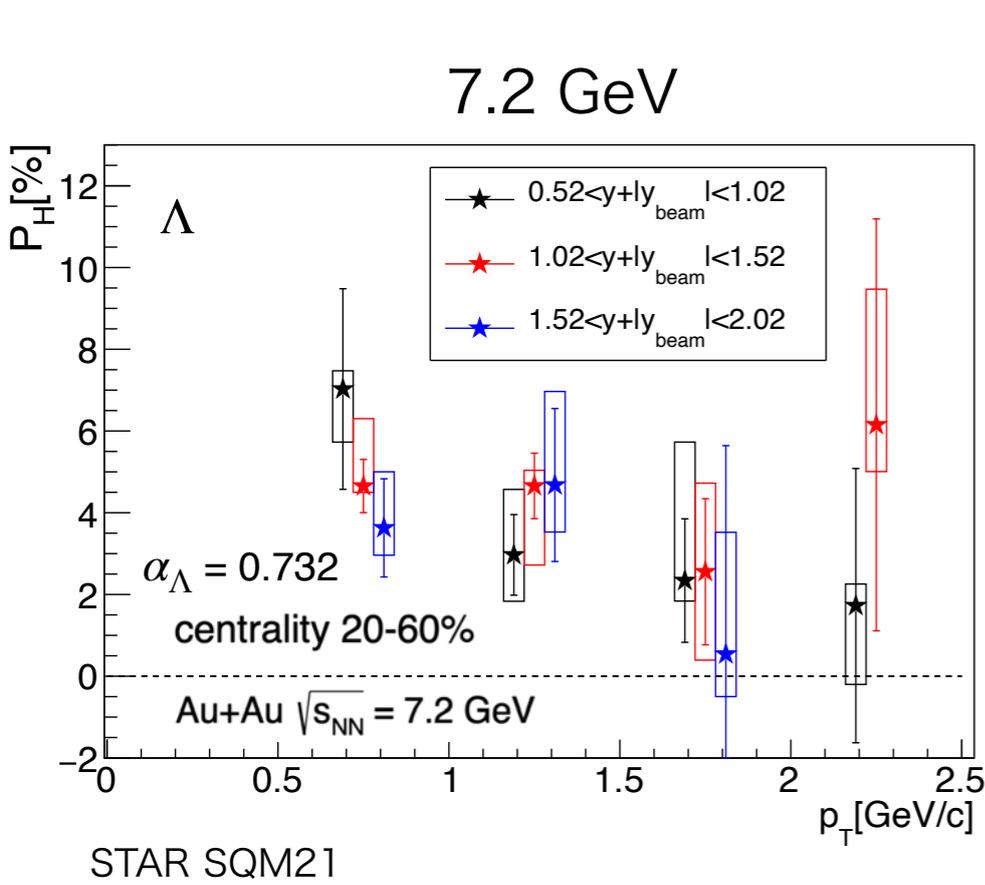


J. Adams et al. (STAR), PRC98. 014910 (2018)

✓ 不確かさの範囲内で有意な依存性は観測されていない。

✓ STAR実験ではiTPC ( $|\eta| < 1.5$ )の搭載と前方領域のアップグレード(2023+2025)によって  
 広ラピディティ領域での測定が可能。

# グローバル偏極の横運動量依存性



## ▶ 低い横運動量領域

- 衝突後期の粒子散乱によって生じるスミアリング効果によりグローバル偏極は小さくなる可能性がある。

## ▶ 高い横運動量領域

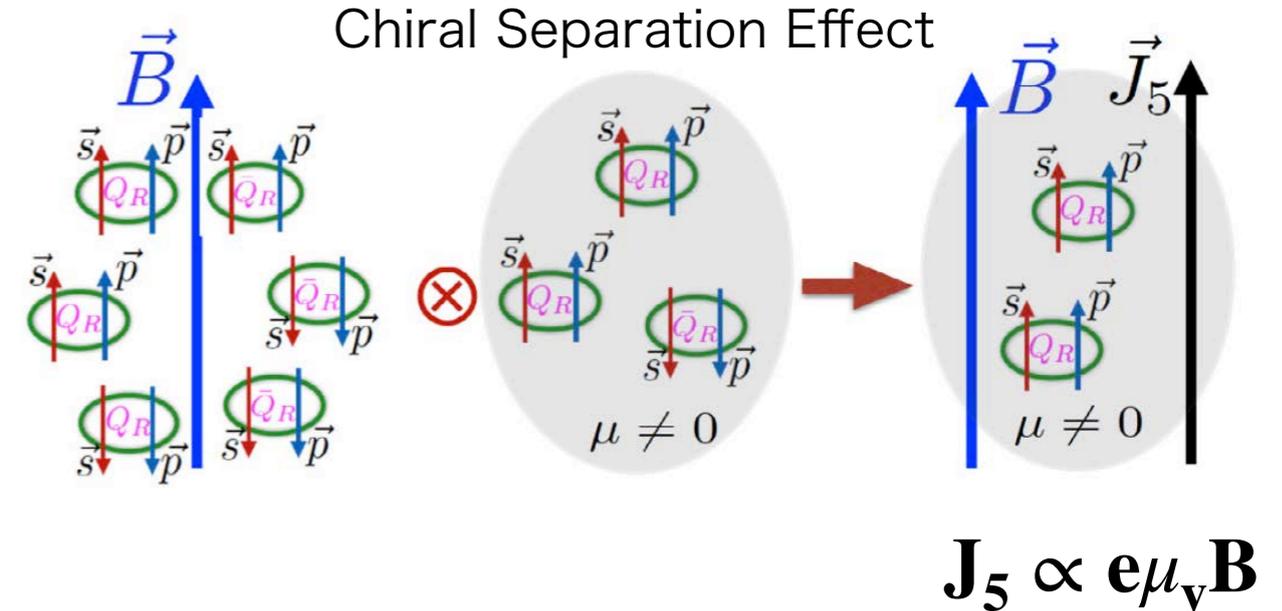
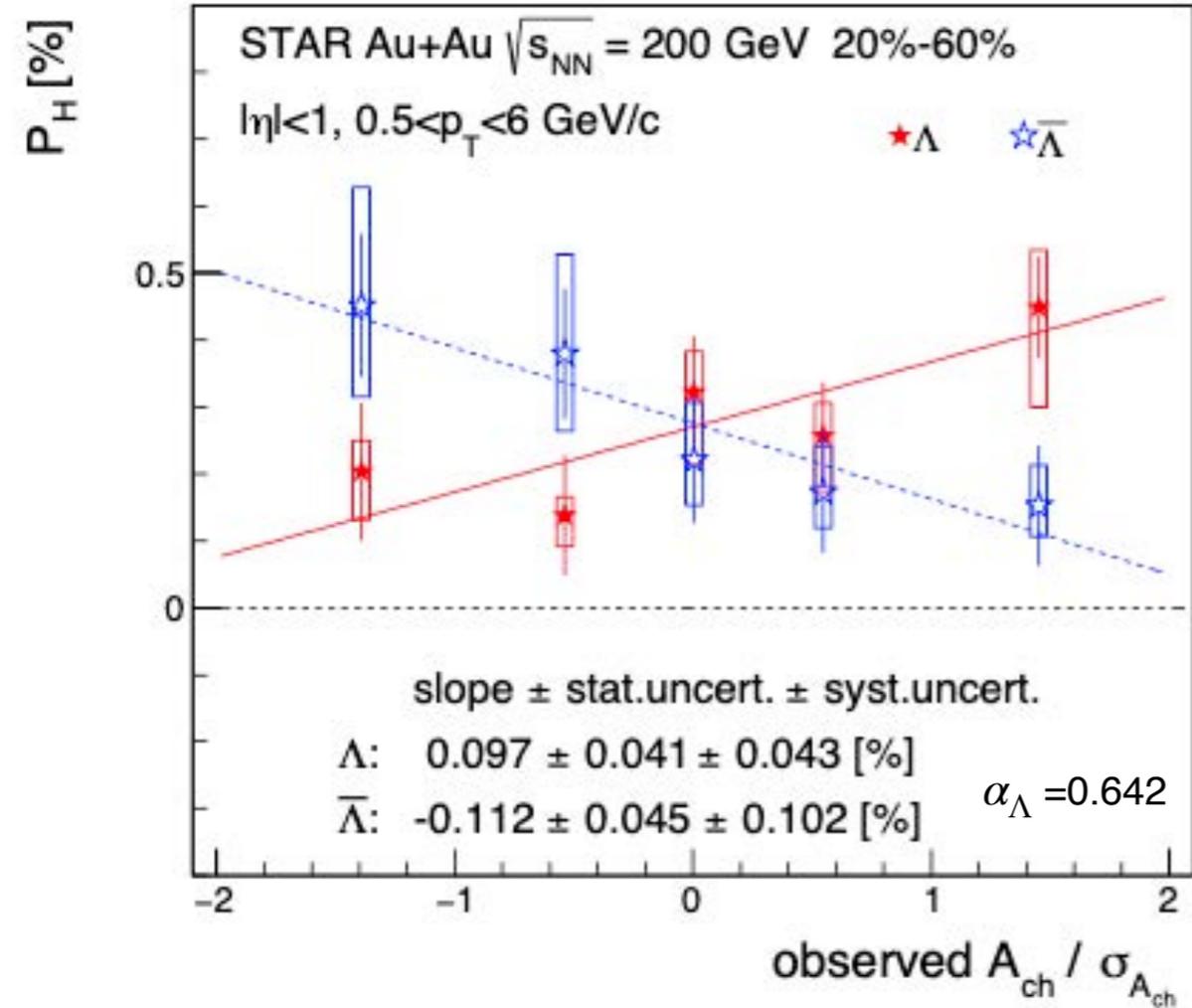
- ジェットフラグメンテーションによってグローバル偏極は小さくなる可能性がある。

J. Adams et al. (STAR), PRC98. 014910 (2018)

✓ 不確かさの範囲内で有意な依存性は観測されていない。

# グローバル偏極の電荷非対称性依存性

J. Adams et al. (STAR), PRC98. 014910 (2018)



✓ 軸電流  $J_5$  が媒質内に生成される。

- もし  $e\mu_v > 0$  ( $< 0$ ) の場合、(反)粒子のスピンは磁場の方向に揃えられる。

✓ 電荷非対称性  $A_{ch}$

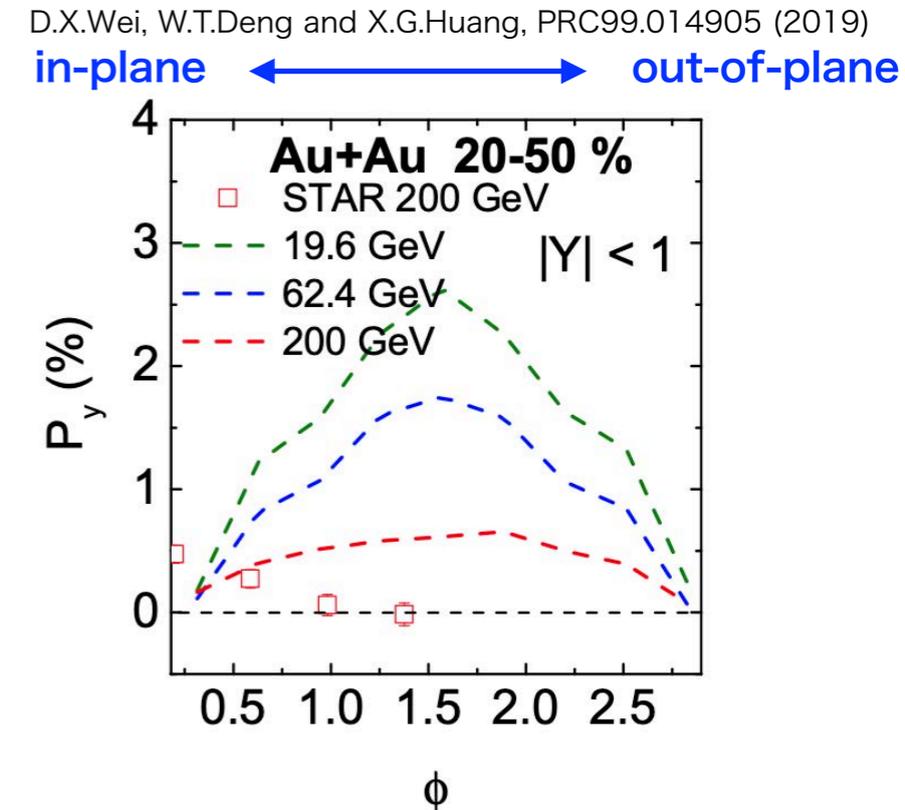
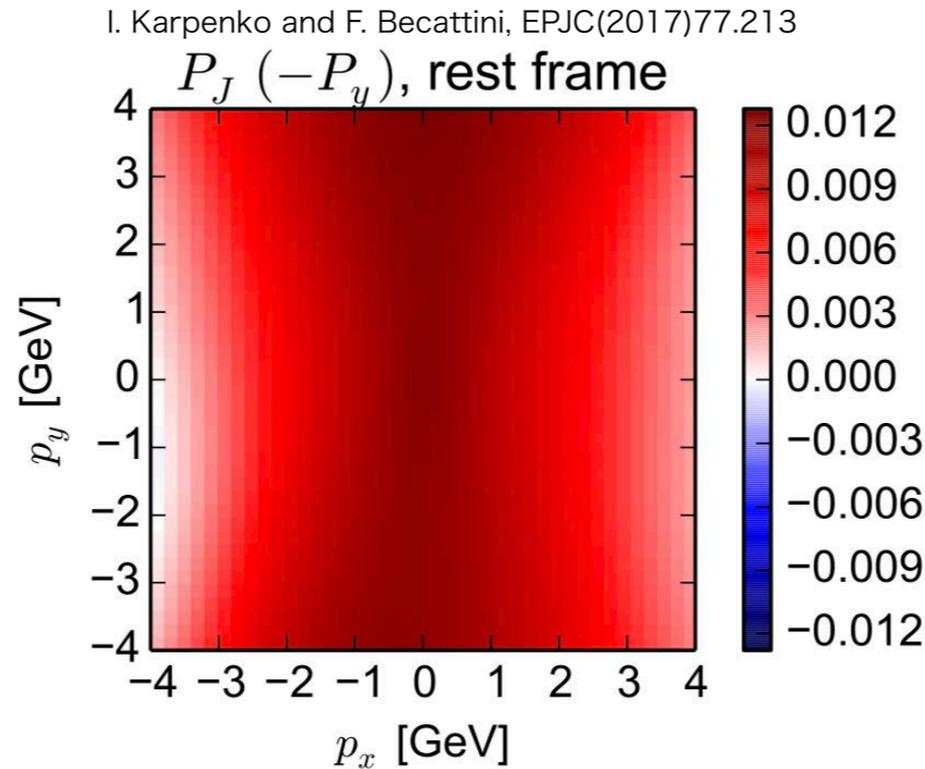
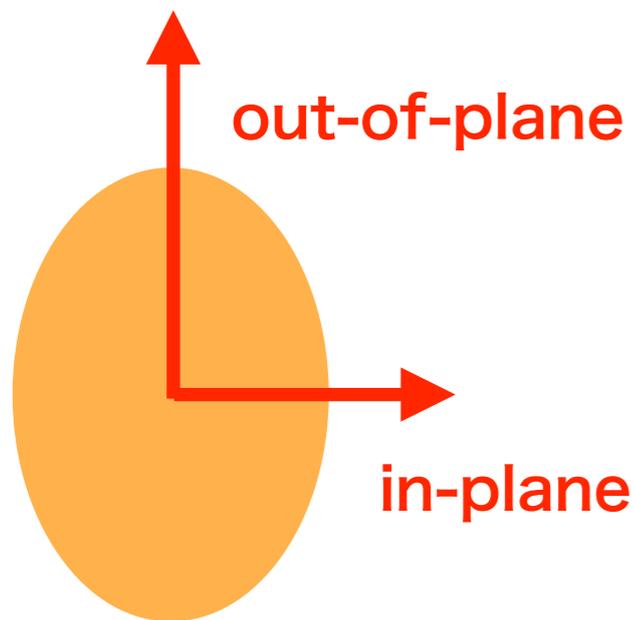
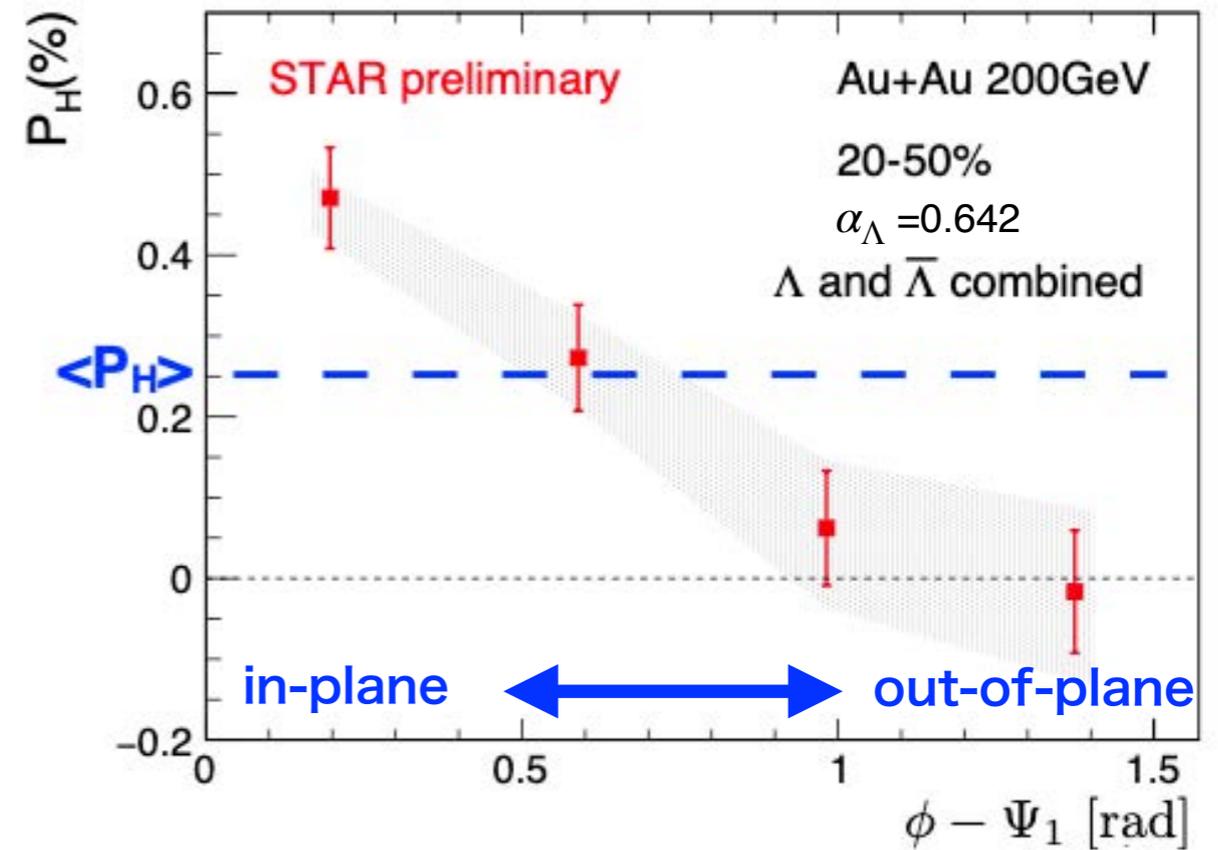
$$\mu_v / T \propto A_{ch} = \frac{\langle N_+ - N_- \rangle}{\langle N_+ + N_- \rangle}$$

✓  $\Lambda$  と anti- $\Lambda$  の傾きが  $1 \sim 2\sigma$  程度異なる。

# グローバル偏極の方位角依存性

STAR ISMD18

- ✓ 測定結果はin-planeの方がグローバル偏極は大きい。
- ✓ 実験結果と理論計算では傾向が異なる。



# Ξ粒子、Ω粒子のグローバル偏極

- ・ 渦によるグローバル偏極への寄与はスピンのみに依存する。

$$\mathbf{P} = \frac{\langle \mathbf{s} \rangle}{s} \approx \frac{(s+1)\boldsymbol{\omega}}{3T}$$

- ・ 磁気モーメントが異なると磁場からの影響も異なる。

## ▶ 三粒子、Ω粒子を用いたグローバル偏極の測定

- ・ Ξ → Λ + π<sup>-</sup>

$$\mathbf{P}_{\Lambda}^* = \frac{(\alpha_{\Xi} + \mathbf{P}_{\Xi}^* \cdot \hat{\mathbf{p}}_{\Lambda}^*)\hat{\mathbf{p}}_{\Lambda}^* + \beta_{\Xi}\mathbf{P}_{\Xi}^* \times \hat{\mathbf{p}}_{\Lambda}^* + \gamma_{\Xi}\hat{\mathbf{p}}_{\Lambda}^* \times (\mathbf{P}_{\Xi}^* \times \hat{\mathbf{p}}_{\Lambda}^*)}{1 + \alpha_{\Xi}\mathbf{P}_{\Xi}^* \cdot \hat{\mathbf{p}}_{\Lambda}^*}$$

$$(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1)$$

$$\mathbf{P}_{\Lambda}^* = C_{\Xi-\Lambda}\mathbf{P}_{\Xi}^* = \frac{1}{3}(1 + 2\gamma_{\Xi})\mathbf{P}_{\Xi}^*. \quad C_{\Xi-\Lambda} = \frac{1}{3}(1 + 2 \times 0.916) = +0.944.$$

- ・ Ω → Λ + K<sup>-</sup>

$$\mathbf{P}_{\Lambda}^* = C_{\Omega-\Lambda}\mathbf{P}_{\Omega}^* = \frac{1}{5}(1 + 4\gamma_{\Omega})\mathbf{P}_{\Omega}^*.$$

$\alpha_{\Omega}, \beta_{\Omega} \ll 1$  であるため、 $\gamma_{\Omega} \sim 1$

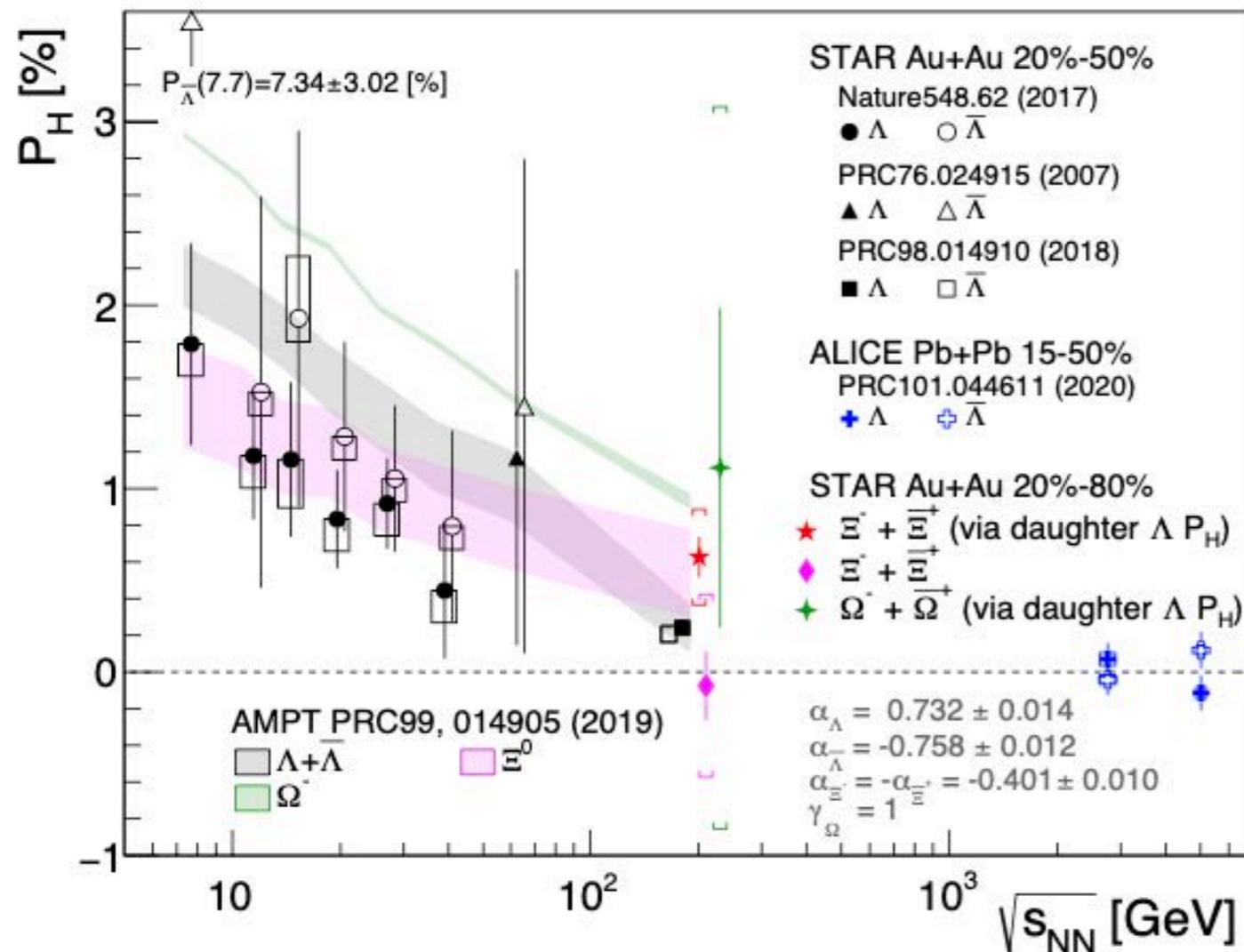
$$\rightarrow C_{\Omega\Lambda} \approx +1, -0.6$$

hyperon	decay mode	$a_H$	magnetic moment $\mu_H$	spin
Λ (uds)	Λ → pπ <sup>-</sup> (BR: 63.9%)	0.732	-0.613	1/2
Ξ <sup>-</sup> (dss)	Ξ <sup>-</sup> → Λπ <sup>-</sup> (BR: 99.9%)	-0.401	-0.6507	1/2
Ω <sup>-</sup> (sss)	Ω <sup>-</sup> → ΛK <sup>-</sup> (BR: 67.8%)	0.0157	-2.02	3/2

✓ 三粒子、Ω粒子のグローバル偏極は娘Λ粒子のグローバル偏極を用いて測定ができる。

# Ξ粒子、Ω粒子のグローバル偏極

J, Adam et al. (STAR), PRL126, 162301 (2021)



✓ 200 GeVにおけるΞ、Ω粒子のグローバル偏極の測定

$$\langle P_\Lambda \rangle = 0.24 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.03(\text{syst.}) [\%]$$

$$\langle P_\Xi \rangle = 0.47 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.23(\text{syst.}) [\%]$$

$$\langle P_\Omega \rangle = 1.11 \pm 0.87(\text{stat.}) \pm 1.97(\text{syst.}) [\%]$$

✓ ΛよりもΞ、Ωのグローバル偏極が大きい可能性

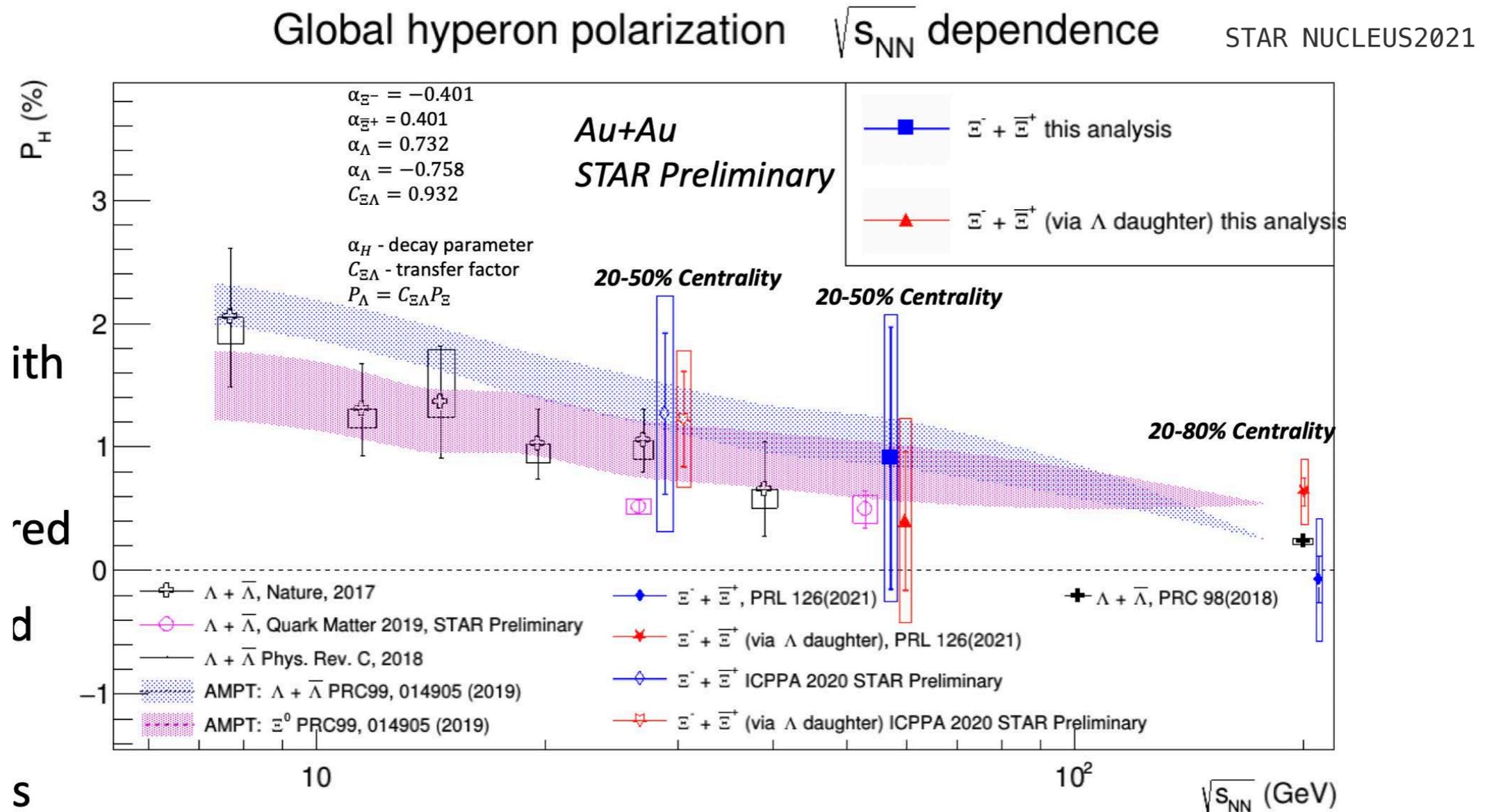
✓ AMPTモデル計算と不確かさの範囲内で一致

- 軽い粒子ほどより偏極され得る
- Freeze outする時間
- feed-down効果

# Ξ粒子のグローバル偏極

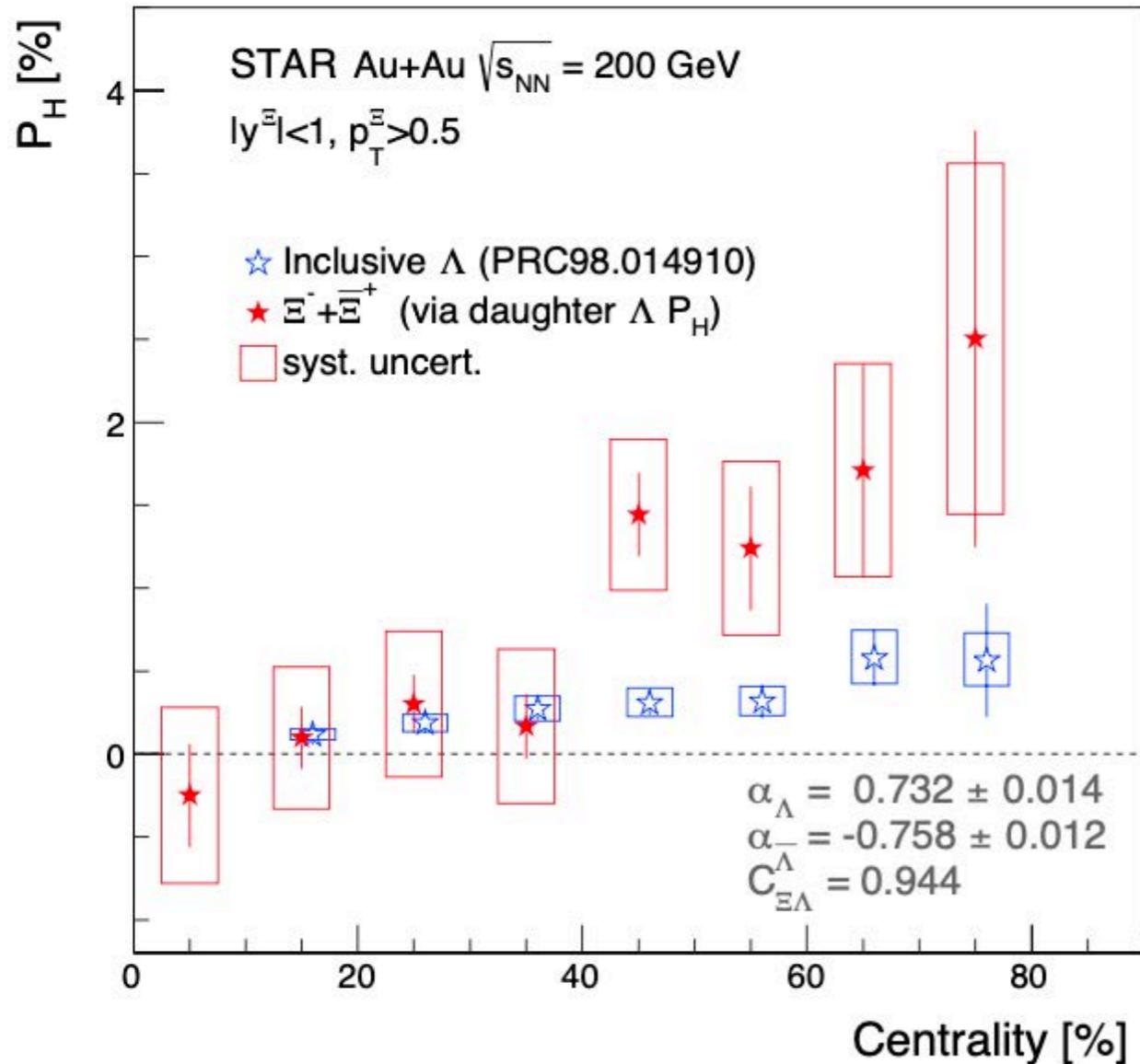
✓ 27, 54.4 GeVにおける三粒子のグローバル偏極

- モデル計算と不確かさの範囲内で一致
- Λ粒子のグローバル偏極と不確かさの範囲内で有意な差はない



# Ξ粒子のグローバル偏極の中心衝突度依存性

J, Adam et al. (STAR), PRL126, 162301 (2021)



✓  $\Lambda$ 粒子と同様に周辺衝突よりも中心衝突の方が値が小さい。

✓ 周辺衝突事象では $\Lambda$ 粒子よりも大きいことを示唆。

# ビーム軸方向の偏極 $P_z$

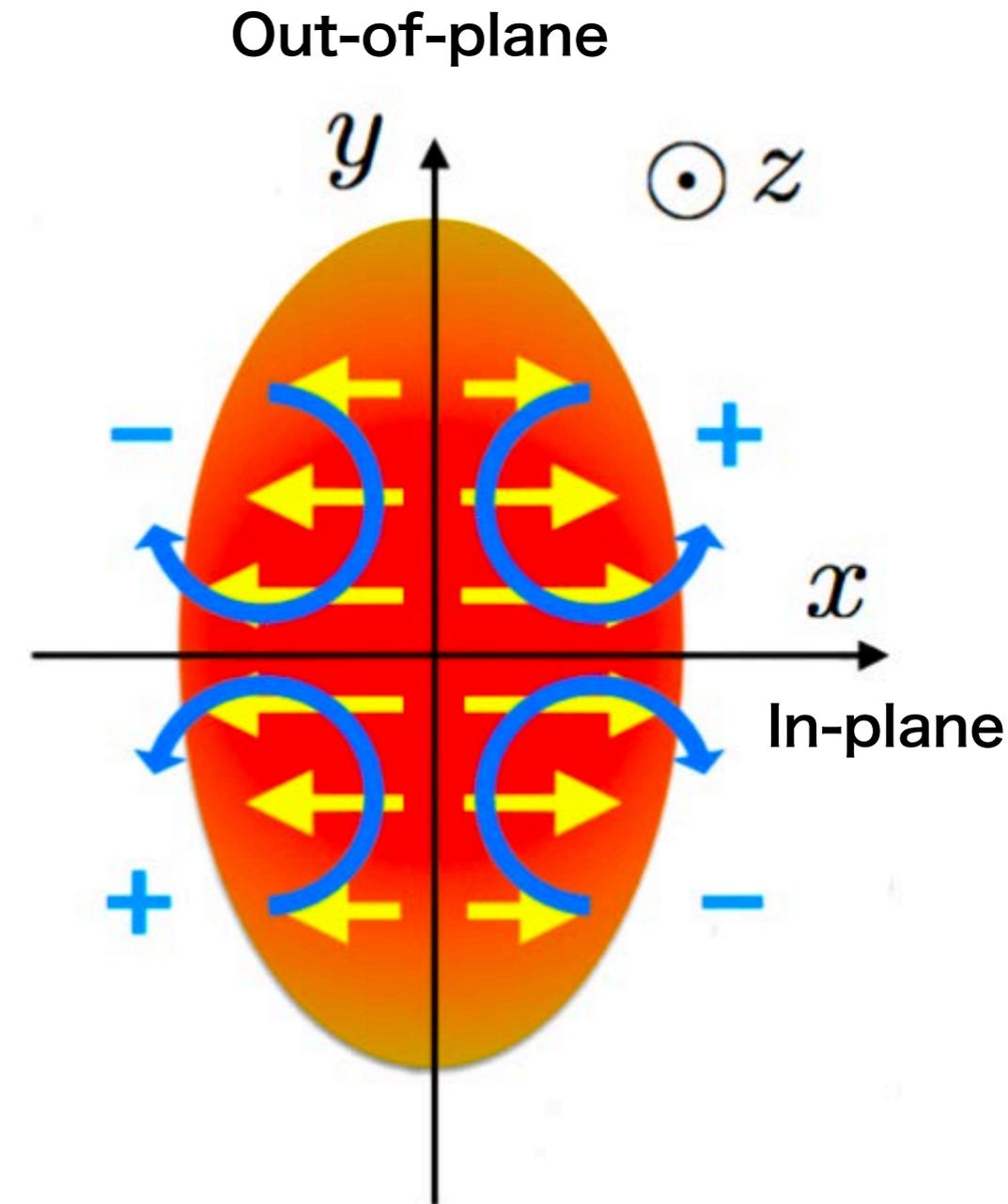
✓ Out-of-plane方向よりもin-plane方向の方がフローが強い  
ため、局所的な渦が発生する。

## →ビーム軸方向の偏極 $P_z$

- 系の進化の過程において後期のフローの発展により  
敏感である。

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\Omega^*} &= \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha_H \mathbf{P}_H \cdot \mathbf{p}_p^*) \\ \langle \cos \theta_p^* \rangle &= \int \frac{dN}{d\Omega^*} \cos \theta_p^* d\Omega^* \\ &= \alpha_H P_z \langle (\cos \theta_p^*)^2 \rangle \\ \therefore P_z &= \frac{\langle \cos \theta_p^* \rangle}{\alpha_H \langle (\cos \theta_p^*)^2 \rangle} \\ &= \frac{3 \langle \cos \theta_p^* \rangle}{\alpha_H} \quad (\text{もし検出効率が完全な場合}) \end{aligned}$$

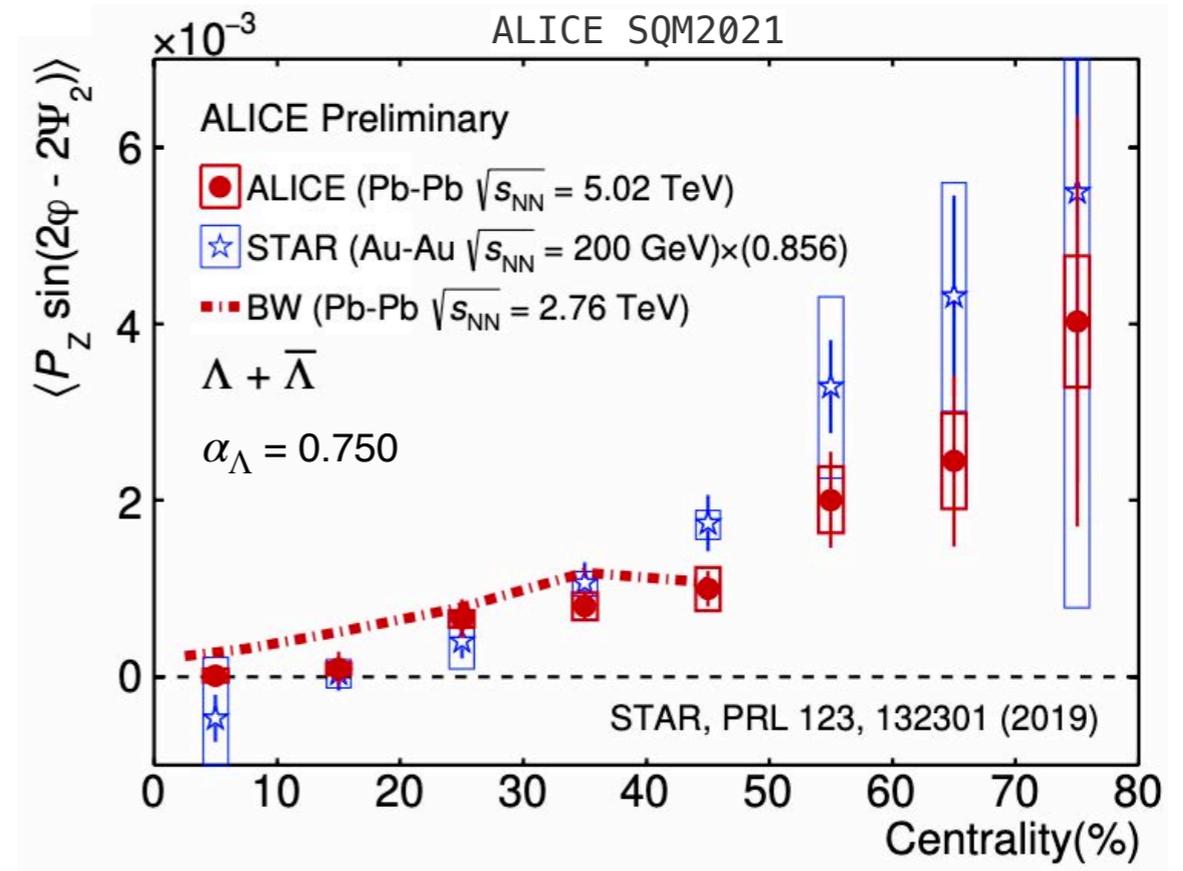
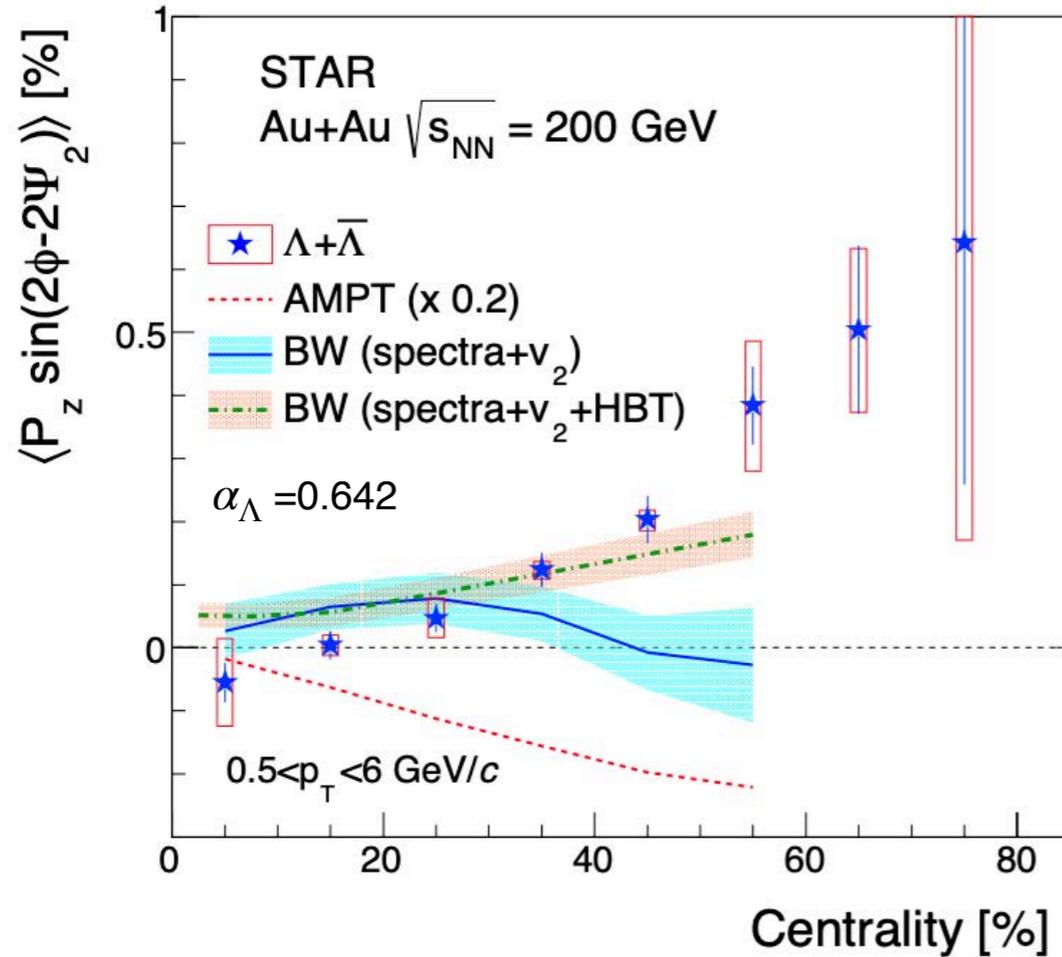
$\theta_p^*$ :  $\Lambda$  の静止座標系における崩壊陽子の仰角



S. Voloshin, EPJ Web Conf.171, 07002 (2018)

# Pzの中心衝突度依存性

J, Adam et al. (STAR), PRL123, 132301 (2019)

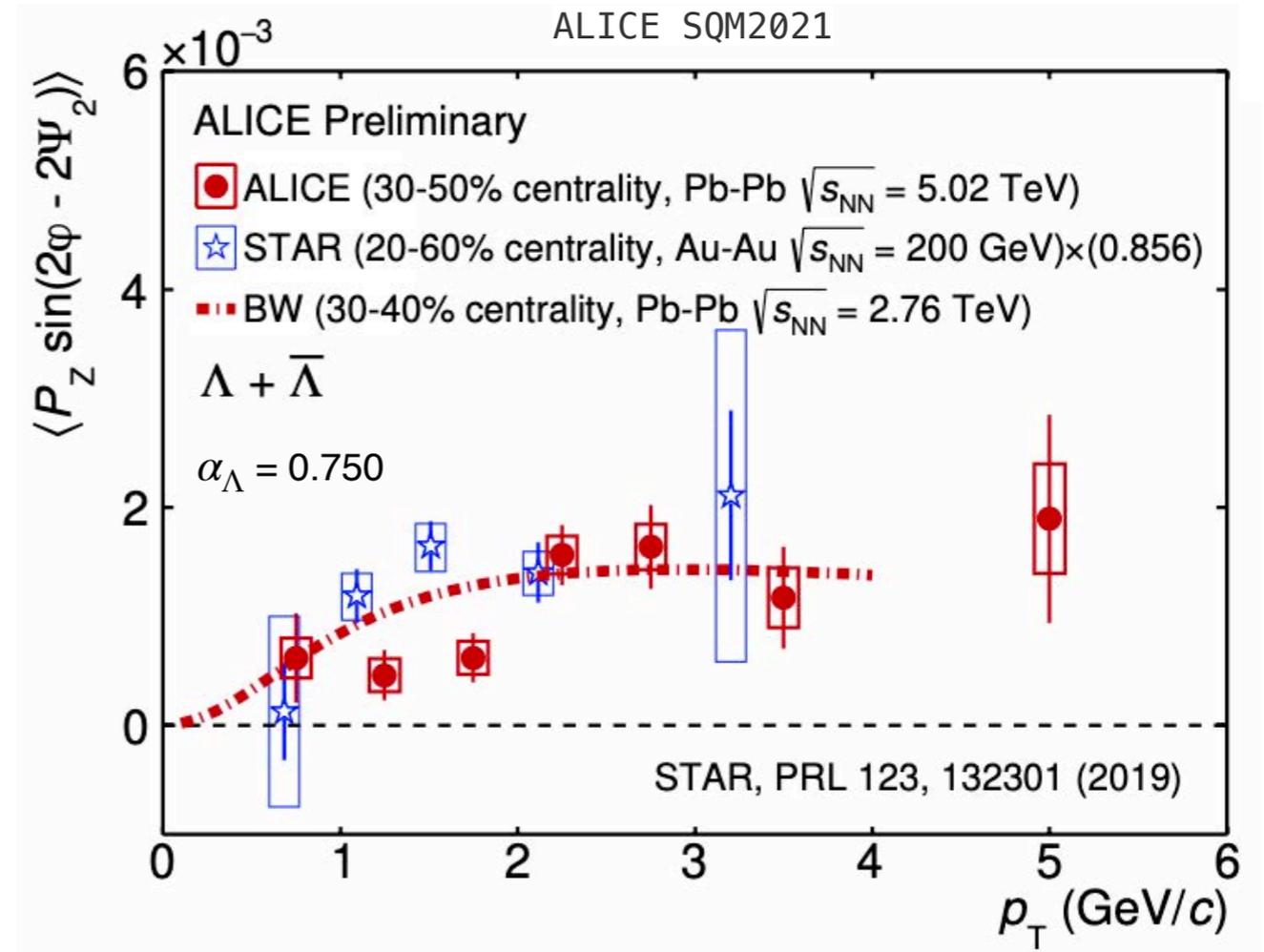
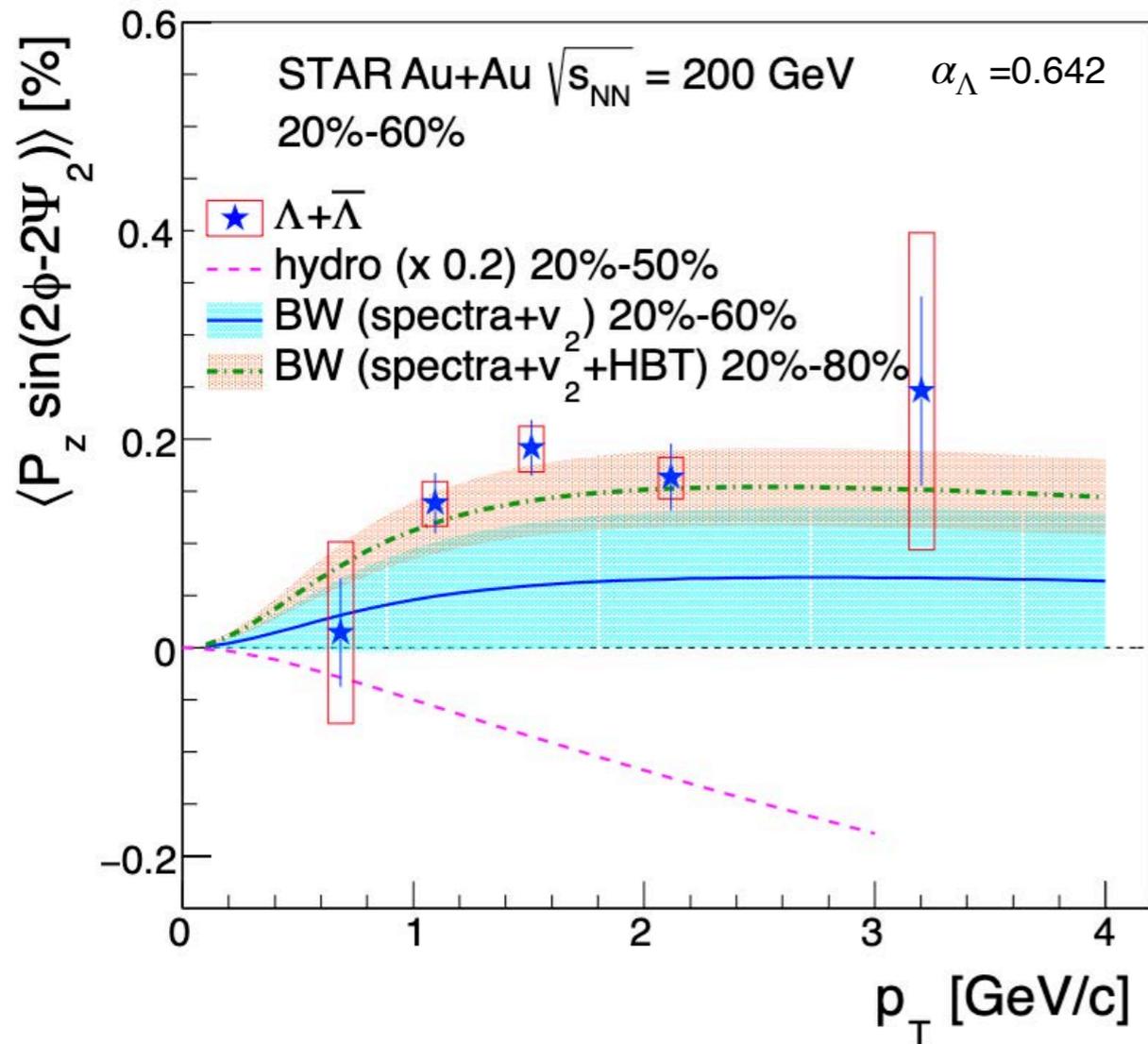


✓ 中心衝突よりも周辺衝突の方が値が大きい傾向を観測。

- $v_2$ は周辺衝突の方が大きい
- $v_2$ は中心衝突でも初期の密度揺らぎから0にならないが、 $P_z$ は不確かさの範囲内で0。
- BWモデル計算は測定値を再現しているが、AMPTモデル計算は符号が反転している。

# P<sub>z</sub>の横運動量依存性

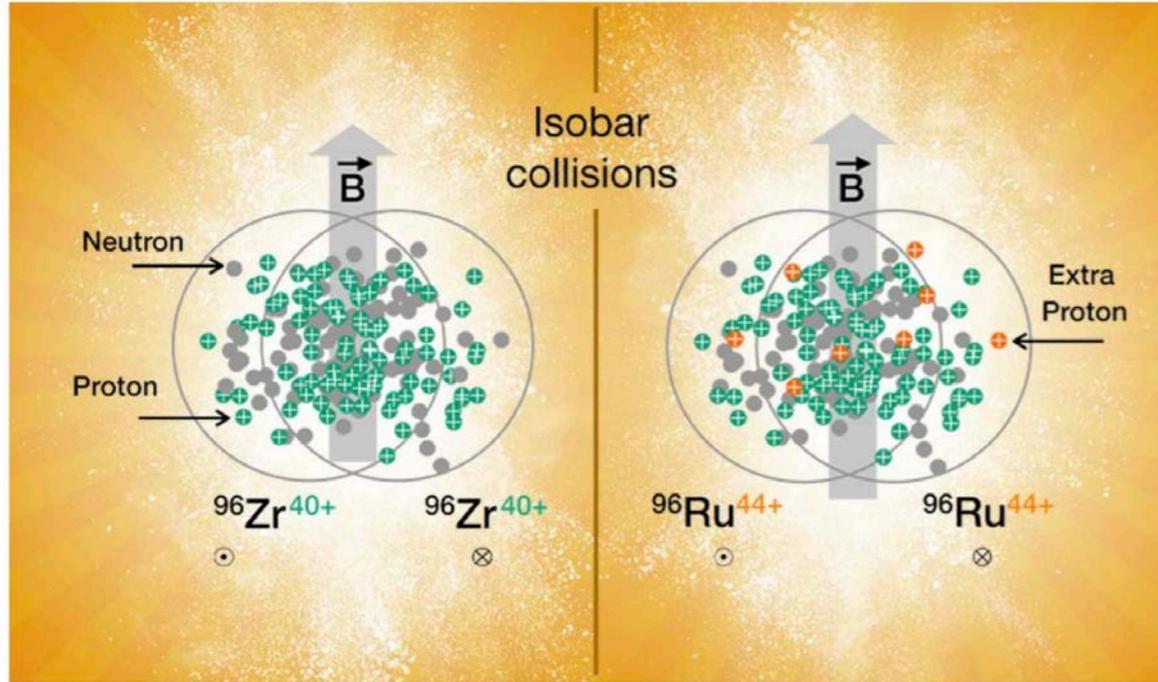
J, Adam et al. (STAR), PRL123, 132301 (2019)



✓ 200 GeVでは  $p_T > 1$  GeV/cでは有意な有意な依存性は観測されていない。

✓  $p_T < 2$  GeV/cでは5.02 TeVよりも200 GeVの方が大きい。

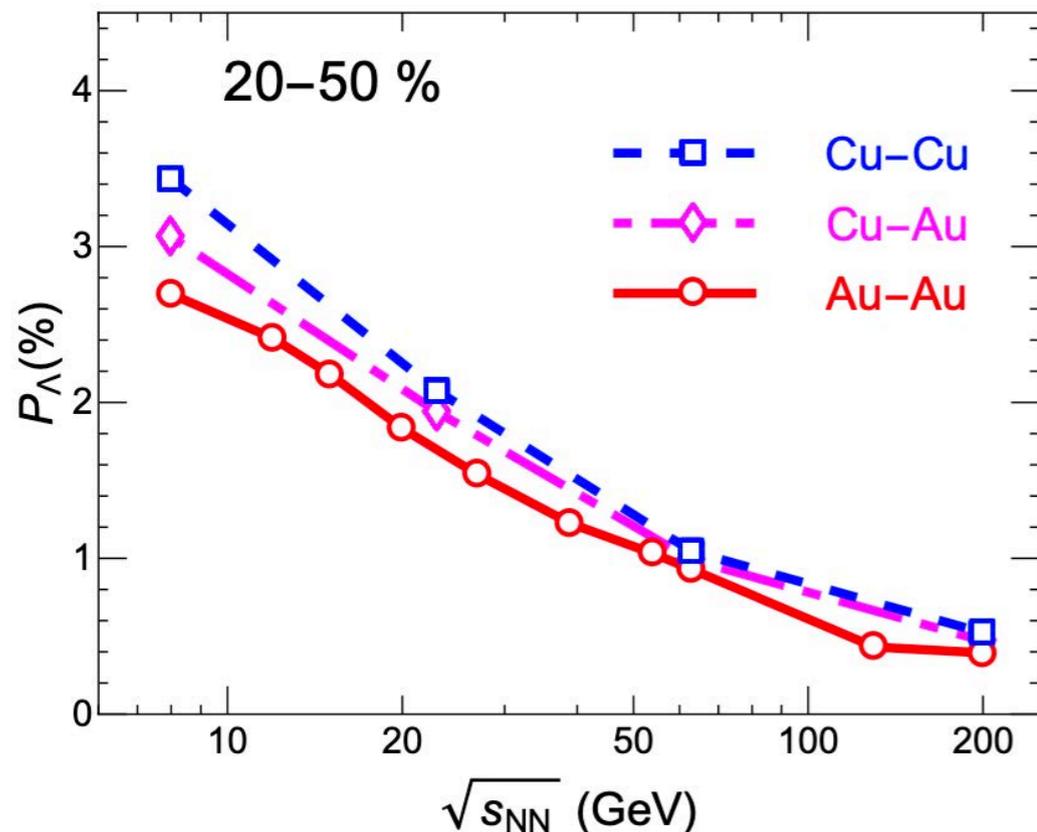
# 異なる衝突系におけるグローバル偏極



## ✓ Zr+Zr衝突およびRu+Ru衝突(アイソバー)

- ・ 質量数は同じが陽子数が異なる。
- ・ 初期磁場の大きさが異なる。
- ・ 磁場の寄与によってグローバル偏極が異なる可能性。

S. Shuzhe et al., *Phys.Lett.B* 788 (2019) 409-413



## ✓ グローバル偏極の衝突系依存性

- ・ AMPTモデルではAu+Au衝突よりもCu+Cu衝突の方がグローバル偏極が大きいと予測。
- ・  $\Lambda$ 粒子が生成される時間が系によって異なる。  
(Cu-Cu < Cu-Au < Au-Au)

# まとめと展望

## ▶ まとめ

✓ 原子核衝突においてローカルおよびグローバル偏極の測定が行われている。

- 有限なグローバル偏極を観測 → 系が高速で回転している！ ( $\omega \sim 10^{21} s^{-1}$ )
- 様々な依存性を測定(衝突エネルギー、中心衝突度、...)
- 三粒子、 $\Omega$ 粒子を用いた測定

## ▶ 今後の展望

✓ アイソバー衝突系における測定。

✓ STAR実験ではビーム走査実験IIによって低いエネルギーで高統計なデータセットが測定された。

✓ STAR実験では前方領域の検出器のアップグレードが行われる。

衝突型のデータセット

Beam Energy (GeV/nucleon)	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	$\mu_B$ (MeV)	Number Events Requested (Recorded)	Date Collected
13.5	27	156	(560 M)	Run-18
9.8	19.6	206	400 M (582 M)	Run-19
7.3	14.6	262	300 M (324 M)	Run-19
5.75	11.5	316	230 M (235 M)	Run-20
4.59	9.2	373	160 M (162 M)	Run-20+20b
3.85	7.7	420	100 M (100 M)	Run-21

固定標的型のデータセット

Beam Energy (GeV/nucleon)	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	$\mu_B$ (MeV)	Run Time	Number Events Requested (Recorded)	Date Collected
31.2	7.7 (FXT)	420	0.5+1.1 days	100 M (50 M+112 M)	Run-19+20
19.5	6.2 (FXT)	487	1.4 days	100 M (118 M)	Run-20
13.5	5.2 (FXT)	541	1.0 day	100 M (103 M)	Run-20
9.8	4.5 (FXT)	589	0.9 days	100 M (108 M)	Run-20
7.3	3.9 (FXT)	633	1.1 days	100 M (117 M)	Run-20
5.75	3.5 (FXT)	666	0.9 days	100 M (116 M)	Run-20
4.59	3.2 (FXT)	699	2.0 days	100 M (200 M)	Run-19
3.85	3.0 (FXT)	721	4.6 days	100 M (259 M)	Run-18

Back up

# フィードダウン効果

✓ 観測される  $\Lambda$  粒子のうち約60%が重い粒子の崩壊によって生成される。

✓ 親粒子の偏極は娘粒子( $\Lambda$ 粒子)に引き継がれる。

$$\mathbf{S}_\Lambda^* = C \mathbf{S}_R^*$$

$C_{AB}$  : 粒子AからBへのスピン伝達係数

$S_R$  : 親粒子のスピン

$f_{\Lambda R}$  : ラムダ粒子のうち粒子Rの崩壊によって生成されるラムダ粒子の割合

$\mu_R$  : 粒子Rの磁気モーメント

$$\begin{pmatrix} \varpi_c \\ B_c/T \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \sum_R (f_{\Lambda R} C_{\Lambda R} - \frac{1}{3} f_{\Sigma^0 R} C_{\Sigma^0 R}) S_R(S_R + 1) & \frac{2}{3} \sum_R (f_{\Lambda R} C_{\Lambda R} - \frac{1}{3} f_{\Sigma^0 R} C_{\Sigma^0 R}) (S_R + 1) \mu_R \\ \frac{2}{3} \sum_{\bar{R}} (f_{\Lambda \bar{R}} C_{\Lambda \bar{R}} - \frac{1}{3} f_{\Sigma^0 \bar{R}} C_{\Sigma^0 \bar{R}}) S_{\bar{R}}(S_{\bar{R}} + 1) & \frac{2}{3} \sum_{\bar{R}} (f_{\Lambda \bar{R}} C_{\Lambda \bar{R}} - \frac{1}{3} f_{\Sigma^0 \bar{R}} C_{\Sigma^0 \bar{R}}) (S_{\bar{R}} + 1) \mu_{\bar{R}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P_\Lambda^{\text{meas}} \\ P_{\bar{\Lambda}}^{\text{meas}} \end{pmatrix}.$$

✓ ラムダ粒子のグローバル偏極は15 - 20 %程度抑制される。

Decay	$C$
parity-conserving: $1/2^+ \rightarrow 1/2^+ 0^-$	-1/3
parity-conserving: $1/2^- \rightarrow 1/2^+ 0^-$	1
parity-conserving: $3/2^+ \rightarrow 1/2^+ 0^-$	1/3
parity-conserving: $3/2^- \rightarrow 1/2^+ 0^-$	-1/5
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$	+0.900
$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$	+0.927
$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$	-1/3

# 渦度の時間依存性

X.-G. Deng et al., PRC101.064908 (2020)

