

偏極陽子衝突実験で探る 陽子スピンの謎

岡田謙介

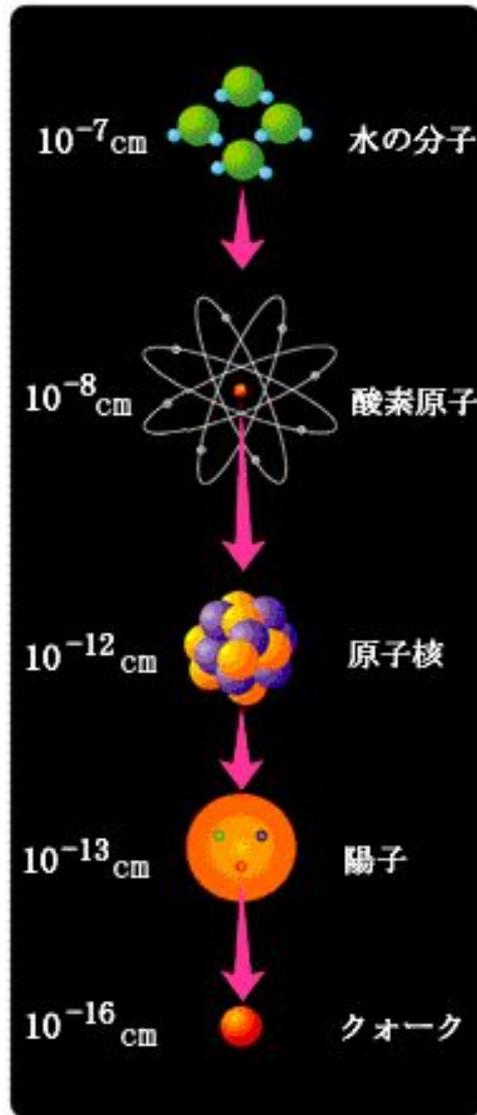
RIKEN BNL Research Center

2011年7月8日

概要

- 「陽子スピンの謎」とは
- RHIC加速器での陽子スピンプログラム
- PHENIX実験はRHICの検出器のひとつ
- これまでの結果
- まとめ

物質の起源はなにか？

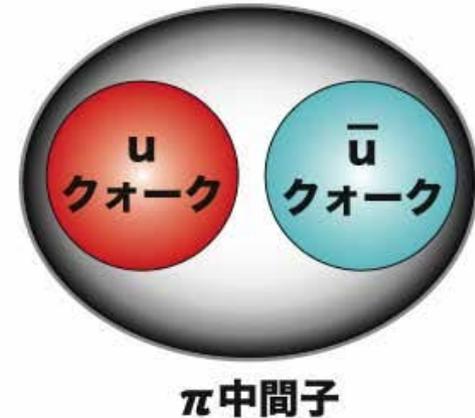
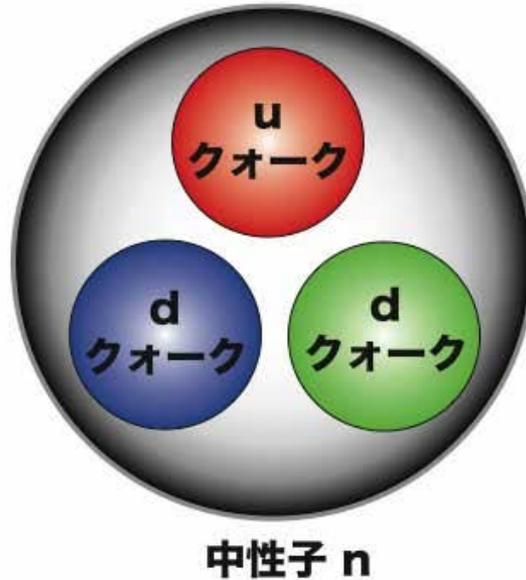
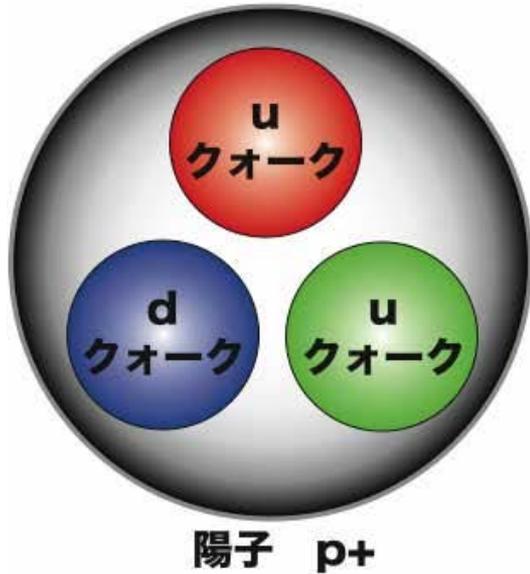


- 水を細かくしていくとどうなる？
 - 分子は何から出来ているの？
 - 原子は？
 - 原子核は？
 - 陽子は？
 - クォークは？
-
- 現在のところクォークは素粒子。
 - クォークは単体では存在しない。

素粒子の種類

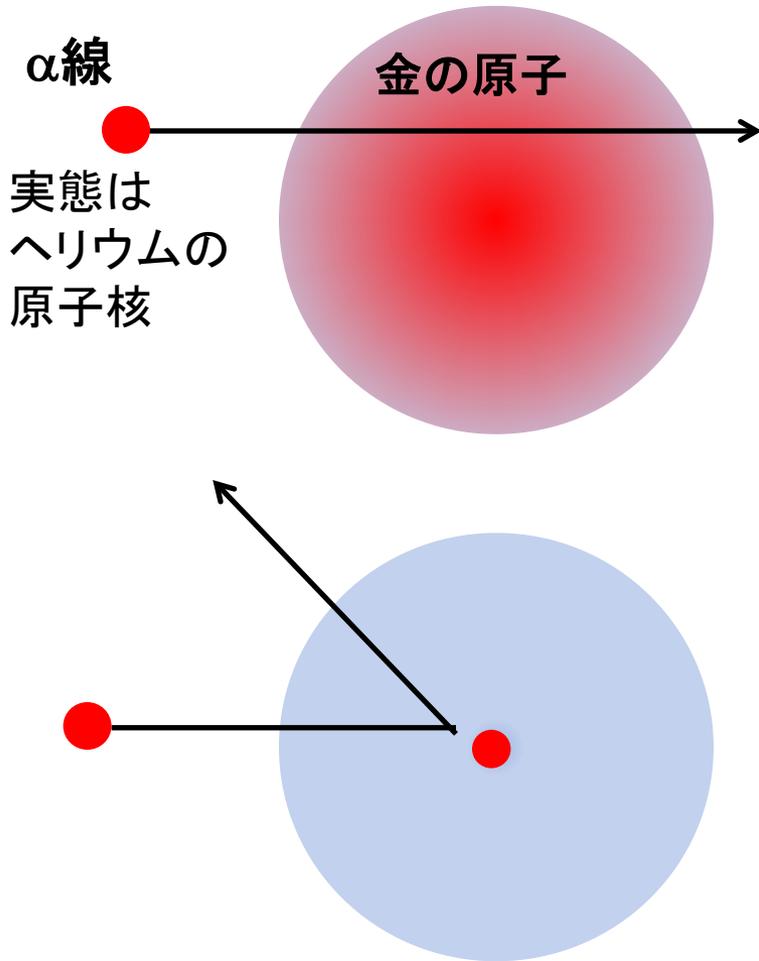
標準模型粒子			
フェルミ粒子			
クォーク		レプトン	
u アップ	d ダウン	e 電子	ν_e 電子ニュートリノ
c チャーム	s ストレンジ	μ ミューオン	ν_μ ミューニュートリノ
t トップ	b ボトム	τ タウ	ν_τ タウニュートリノ
物質を作る粒子であり、例えば陽子は二つのアップクォークと一つのダウンクォークから構成される			
ボース粒子			
強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	(未発見)
g グルーオン	γ 光子	W Z W粒子 Z粒子	H ヒッグス粒子
電磁力を抑え同種のクォークを結びつける力	電氣的、磁氣的な力を統一した力	β 崩壊などの崩壊を説明する力	質量の起源となる粒子
それぞれの粒子に関するパラメータは基本的に異なる			

陽子の仲間(ハドロン)



- クォークが集まった粒子には色々な種類がある。
- 陽子、中性子以外の名をあまり耳にしないのは寿命が短くて崩壊してしまうため。

小さいものの構造は散乱具合をみる



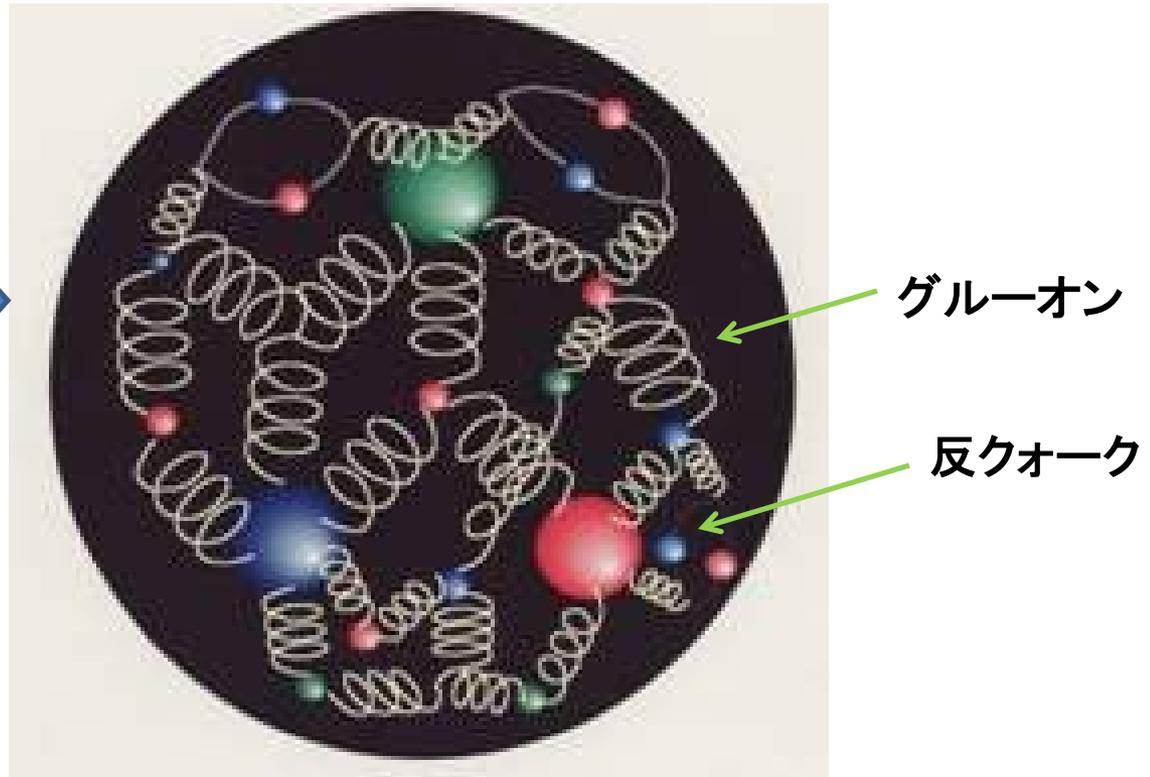
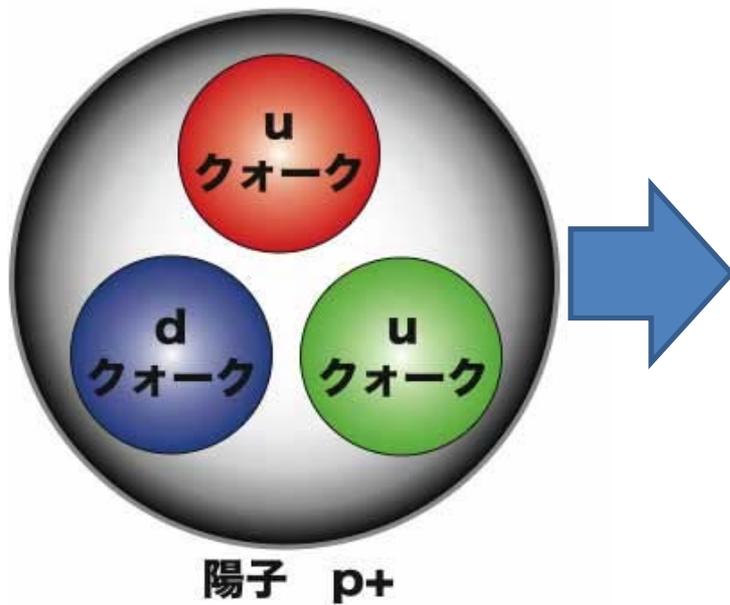
- 例) 金原子の構造

1. ぼんやりと雲のような場合
2. 正の電荷を持つ原子核が存在する場合

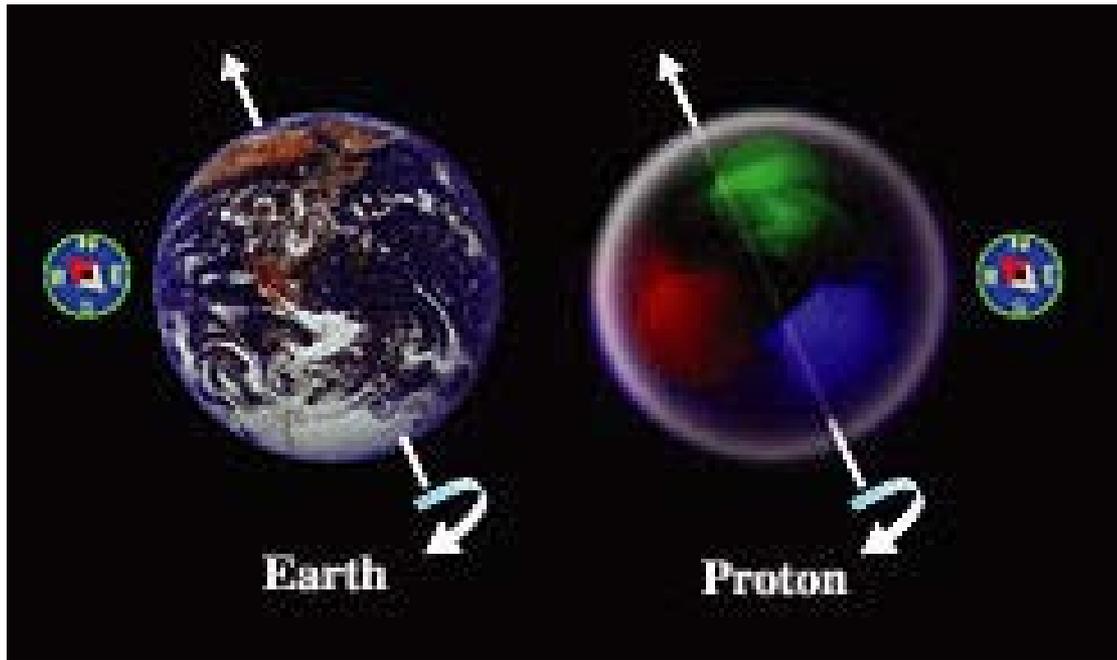
陽子の場合、弾は電子など。

陽子の中身はもう少し複雑

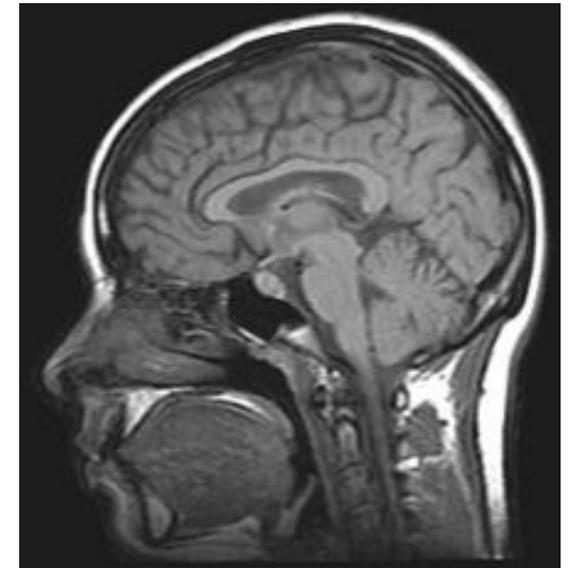
散乱実験で分かったこと



陽子にはスピンという性質がある



- よく陽子の自転に例えられる。
- 基本単位 ($\hbar = h/2\pi$) で $1/2$ 。
- 軸を決めると平行か反平行の2種類。



とても役に立つ
(例 MRI)

陽子スピン(1/2)の内訳は？

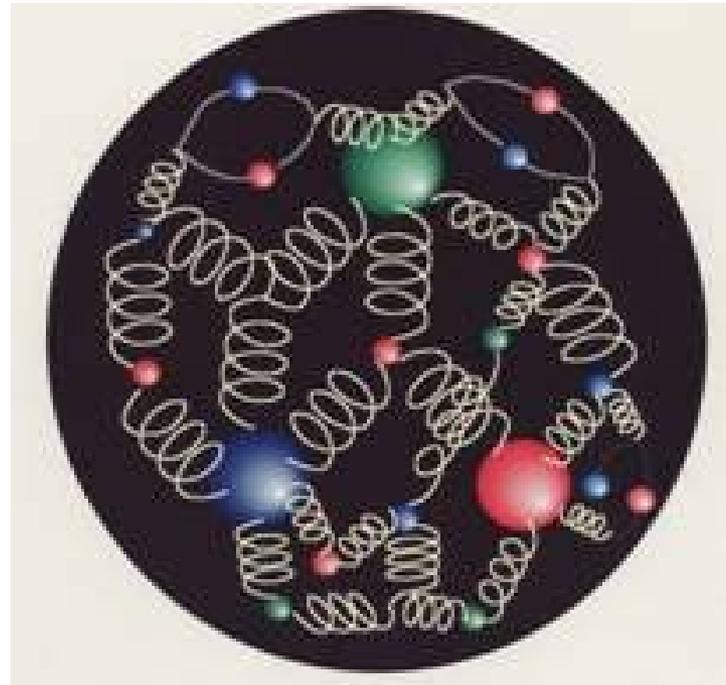
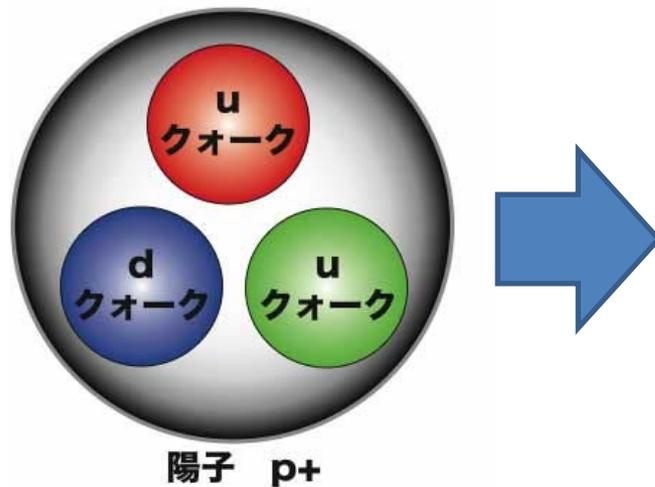
(1980年代後半)

SLAC/CERN/DESY/JLAB での電子、ミュオン散乱実験

- 陽子のクォークスピンの寄与

– たった約25%。

スピン危機/パズル



グルーオンが鍵 (→RHIC登場)

陽子スピン=

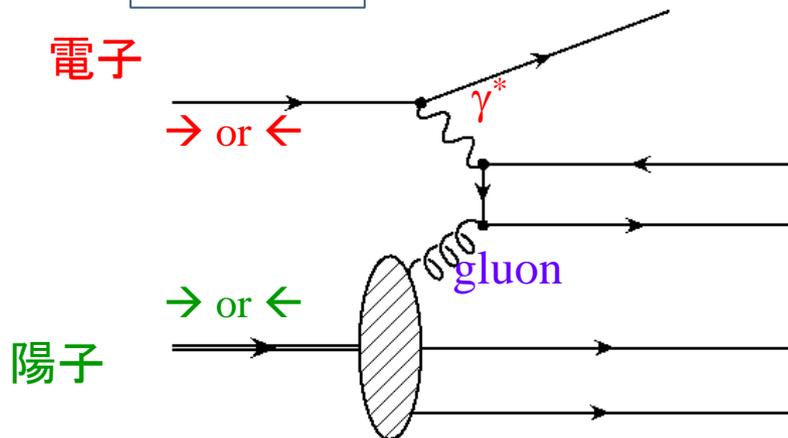
(クォークスピン) + (グルーオンスピン) + (軌道角運動量)

$$\frac{1}{2} \Delta\Sigma \quad \Delta g \quad L$$

~25%

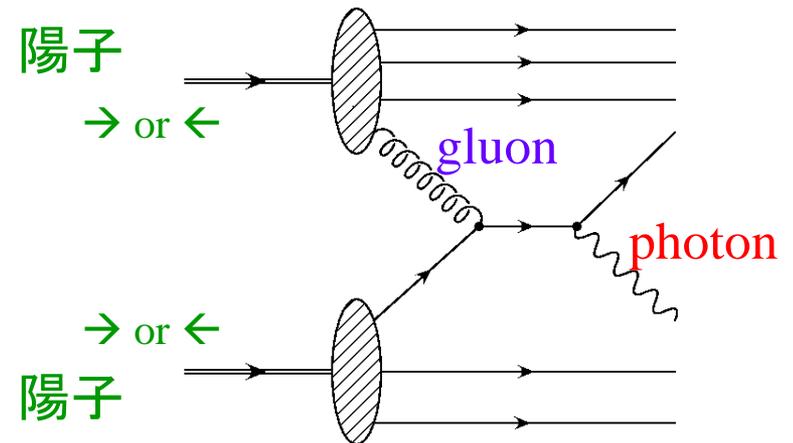
間接的

電子散乱



直接的

陽子、陽子衝突





RHIC

BOOSTER

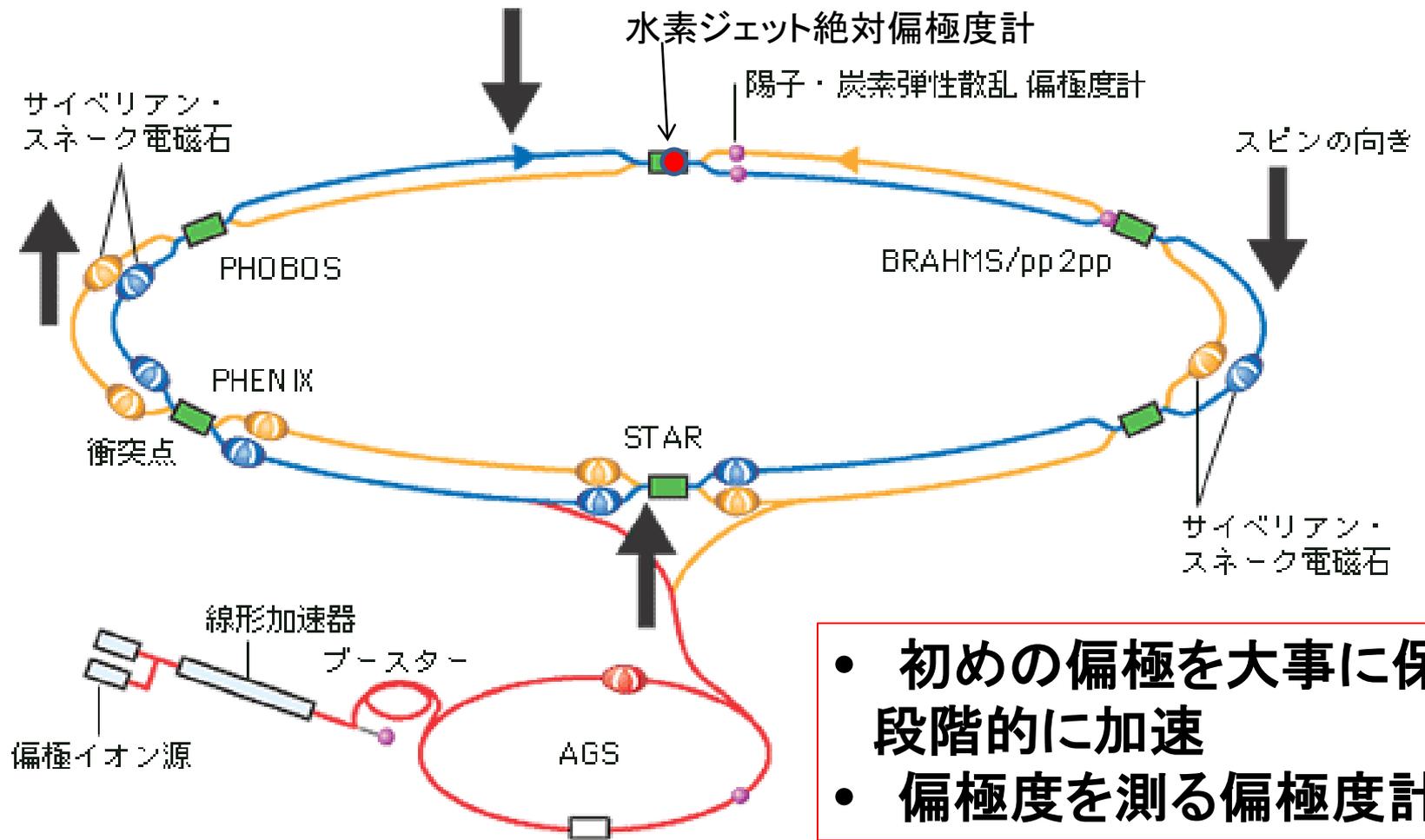
G-2

LINAC

AGS

TANDEMS

偏極陽子コライダーの実現



- 初めの偏極を大事に保ち段階的に加速
- 偏極度を測る偏極度計

Relativistic Heavy Ion Collider? 相対論的重イオンコライダー？

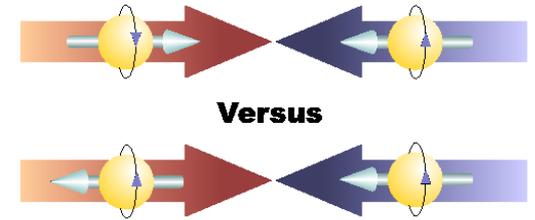
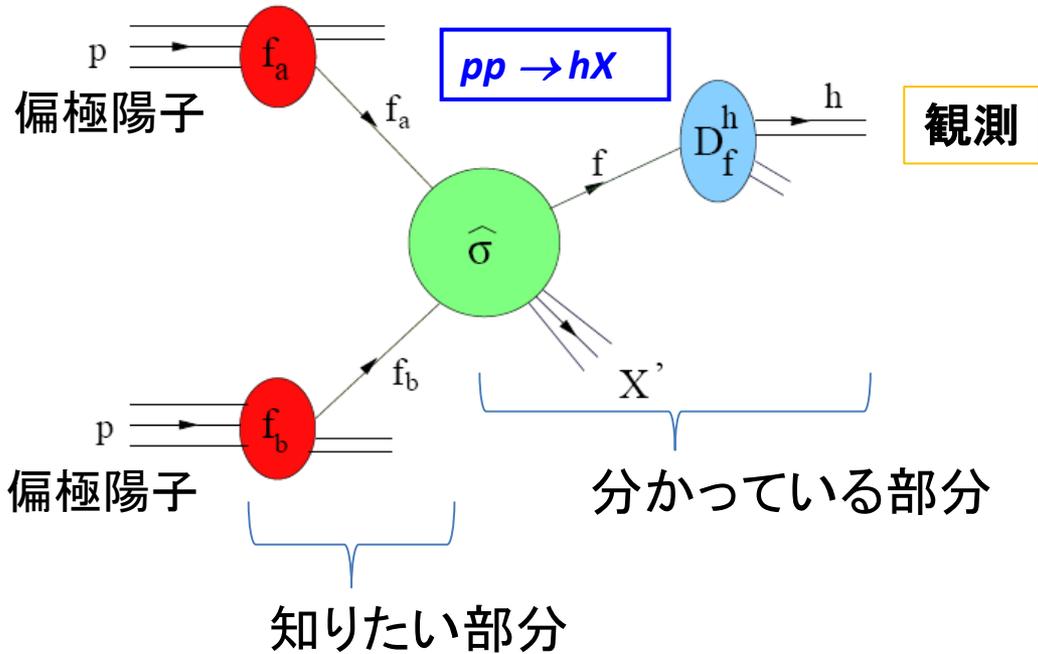
- 1991年 RHICの建設開始。
- 1993年 スピン計画実験採択
- 1995年 理研とBNLの提携により加速器の特別な磁石(サイベリアンスネーク)等の建設、偏極度計の開発を開始。
- 2002年 世界初の偏極陽子衝突(エネルギー ← 私 2001 200GeV)に成功。
- 2009年 エネルギー500GeVの偏極衝突プログラムの開始。

ここまでのポイント

- 陽子はクォーク、反クォーク、グルーオンから出来ている。
- 中身を調べるには散乱の様子を見る。
- 陽子のスピンはクォーク、反クォークのスピンの合計では説明つかない。
- 偏極陽子コライダー (RHIC) で陽子スピンの謎を探る。

RHIC スピンプログラム3本柱

1. グルーオン偏極の測定



陽子のスピン反平行

versus

陽子のスピン 平行

グルーオンの絡む反応のスピン依存性を調べる。
縦偏極、ダブルスピン非対称度。

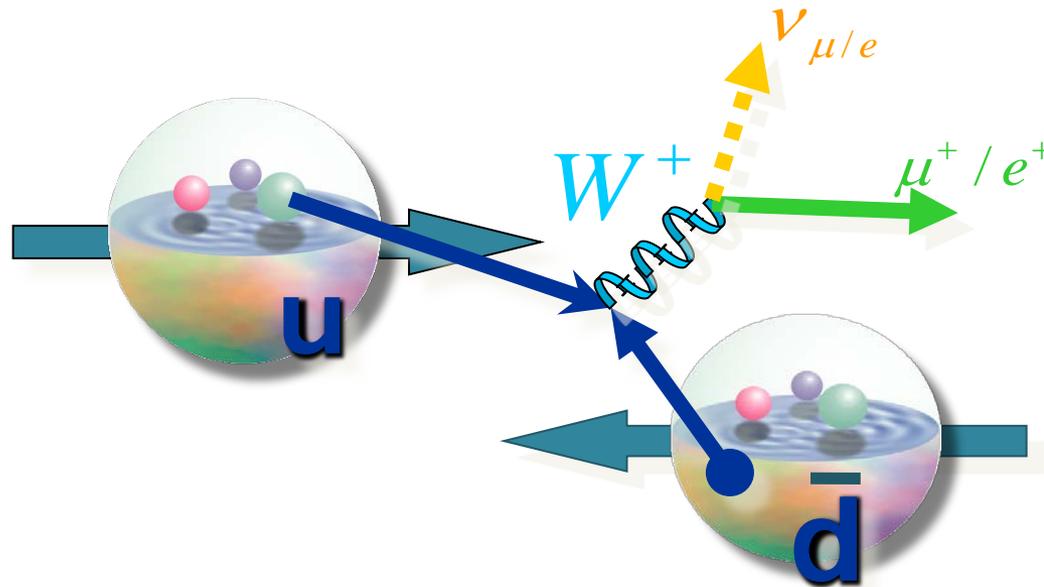
2. W粒子を使った 反クォークの種類別偏極測定

ボース粒子			
強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	(未発見)
g グルーオン	γ 光子	W Z W粒子 Z粒子	H ヒッグス粒子
電磁力を抑え 同種のクォーク を結びつける力	電氣的、磁氣的 な力を統一した 力	β 崩壊などの崩 壊を説明する力	質量の起源とな る粒子
それぞれの粒子に関するパラメータは基本的に異なる			



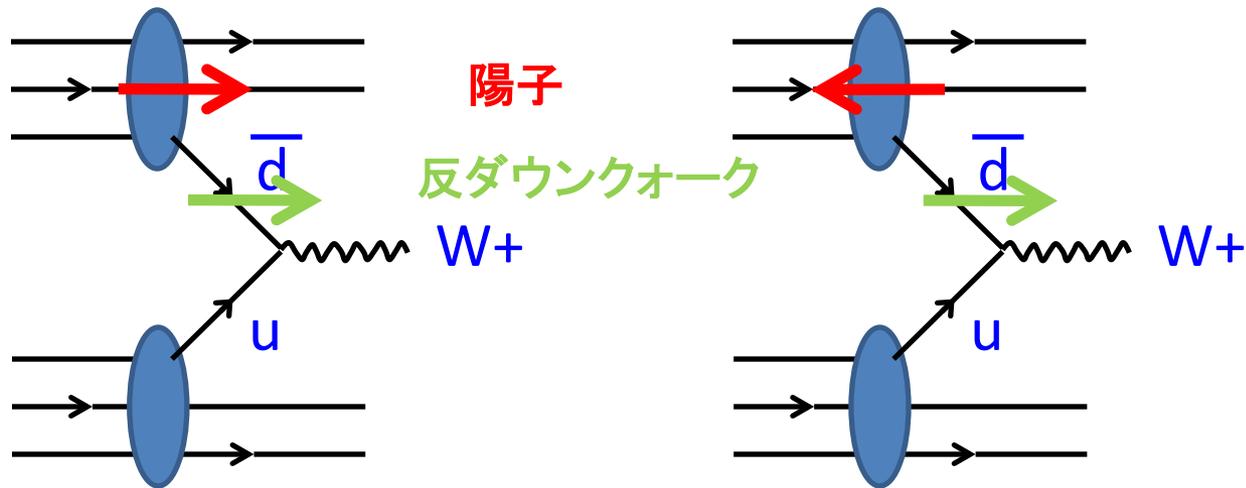
- 十分な衝突エネルギー(500GeV)があるとW粒子をたくさんためることができる。

クォークの種類、スピンの向きを特定



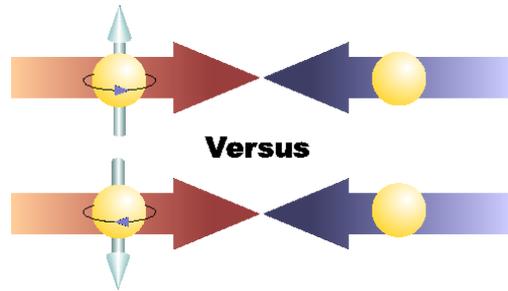
- W^+ はアップクォークと**反**ダウンクォーク ($u\bar{d}$)
- W^- は**反**アップクォークとダウンクォーク ($\bar{u}d$)の衝突からできる。
- 「弱い相互作用」の特徴(パリティ非保存)から W 粒子を作るクォークのスピンは決まっている。

陽子のスピン反転を比較



- W^+ の生成の陽子のスピンに対する非対称度 (A_L)を調べることで陽子の中の反ダウクォークの偏極を調べることができる。

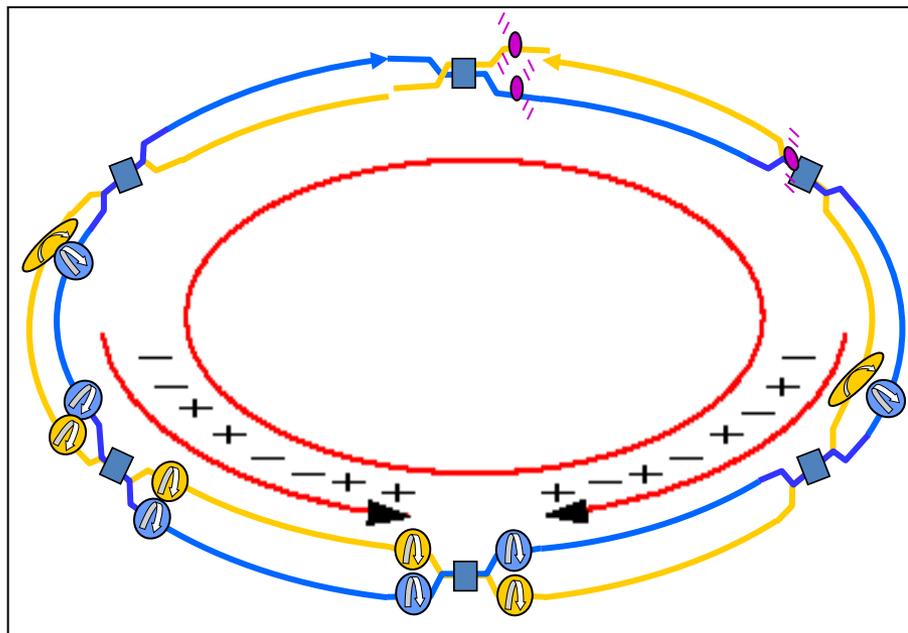
3. 強い相互作用の理論(QCD)の理解



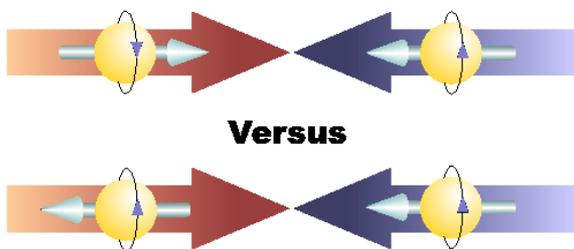
横偏極、シングルスピン非対称度

- 摂動QCD計算の高次の効果が現われる。
- 直感的には陽子の進行方向に対して垂直な方向の運動。
- 軌道角運動量に関連しているはず。(しかしまだどうつながるかは明解でない。)
- 実験と理論が補い合って進化している分野。

実験の要



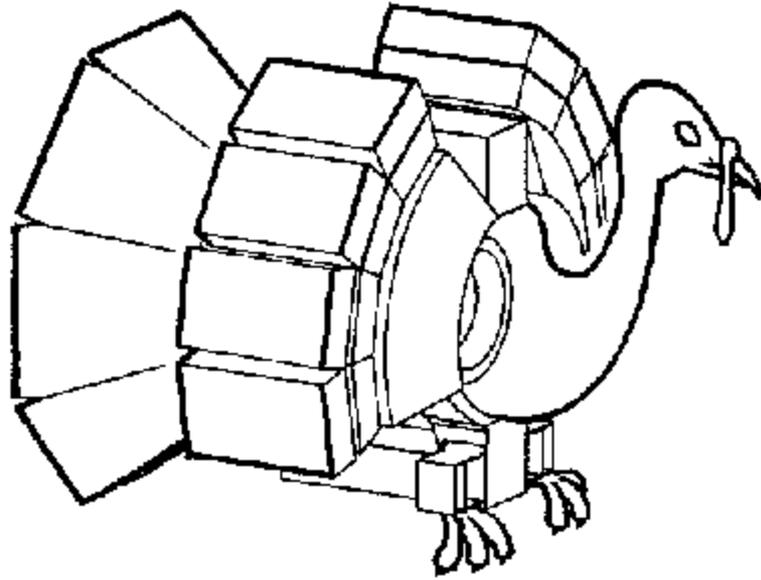
加速器のバンチ毎に陽子の偏極の向きを変え、実験環境の時間依存性をキャンセル。



- スピンの向き毎の衝突頻度の測定
- 偏極陽子衝突による生成物の検出



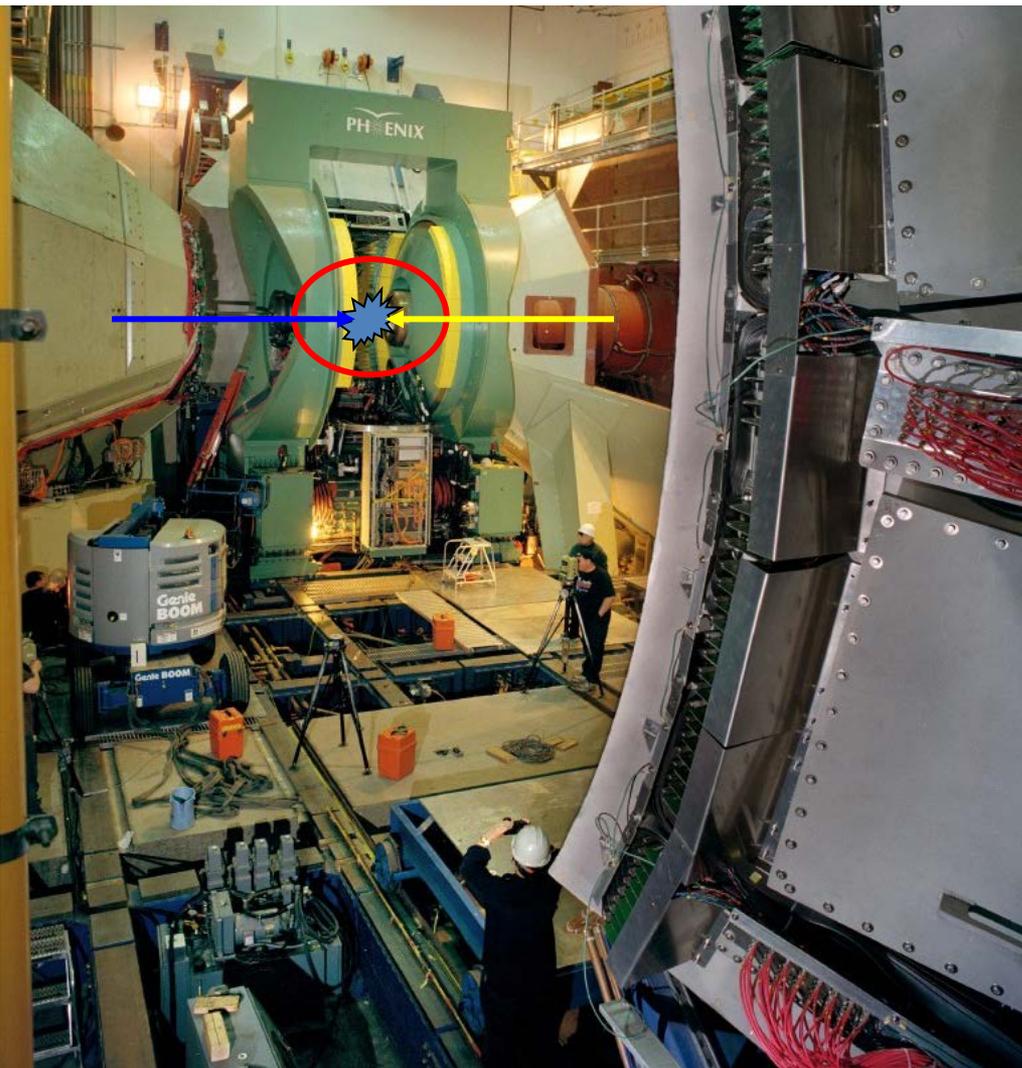
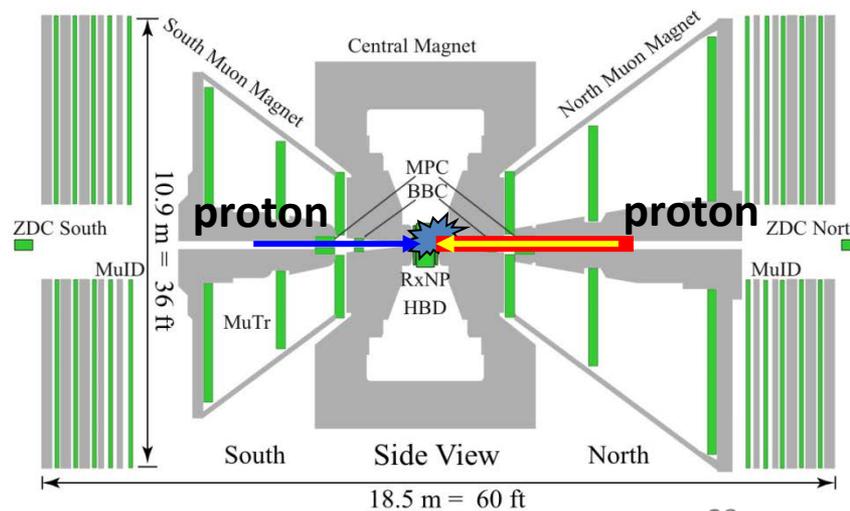
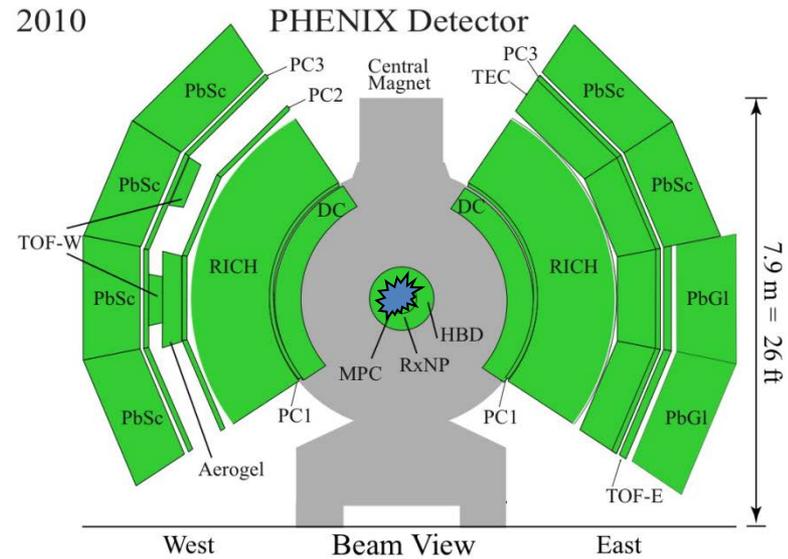
- 反応の陽子スピン依存性。



PHENIX実験 (RHICに2つある汎用実験装置の1つ)

PHENIX 検出器

Central arms
+ Forward muon arms





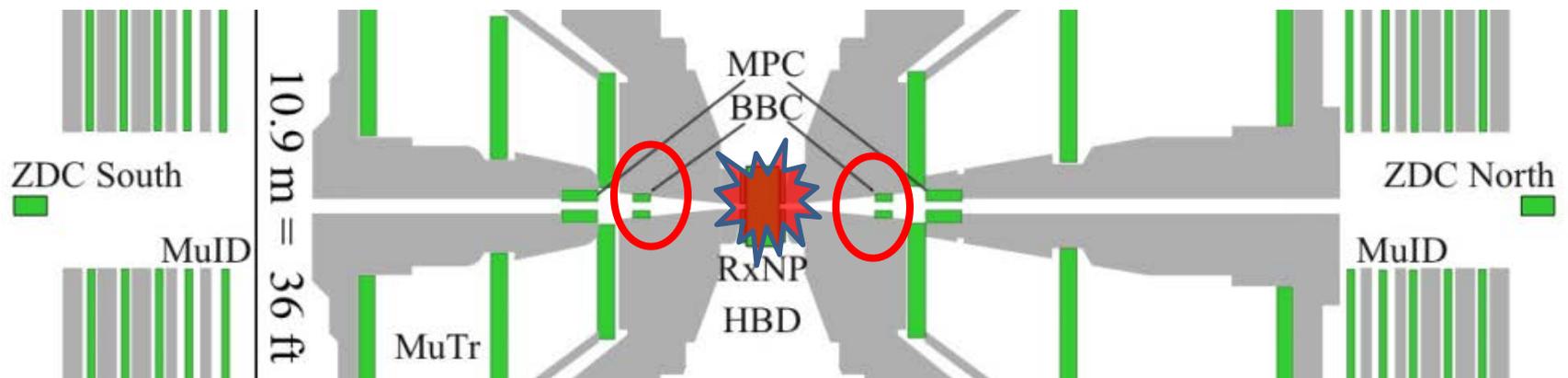
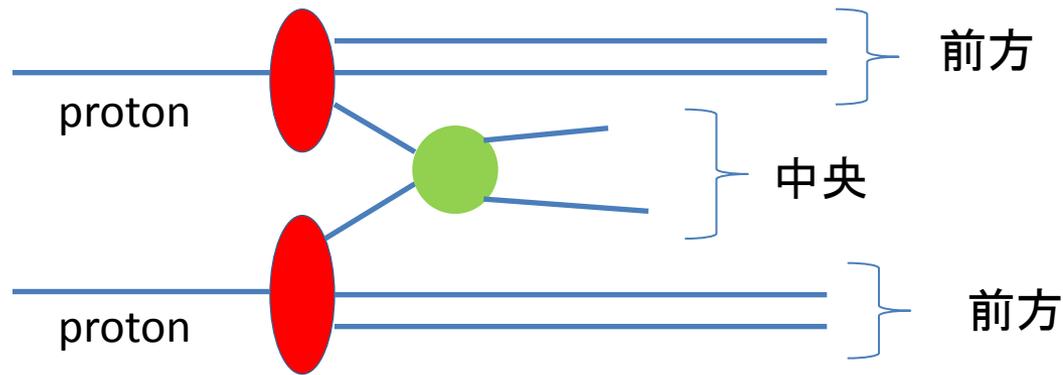
7/8/2011

K.Okada (RBRC)

24

衝突頻度の測定

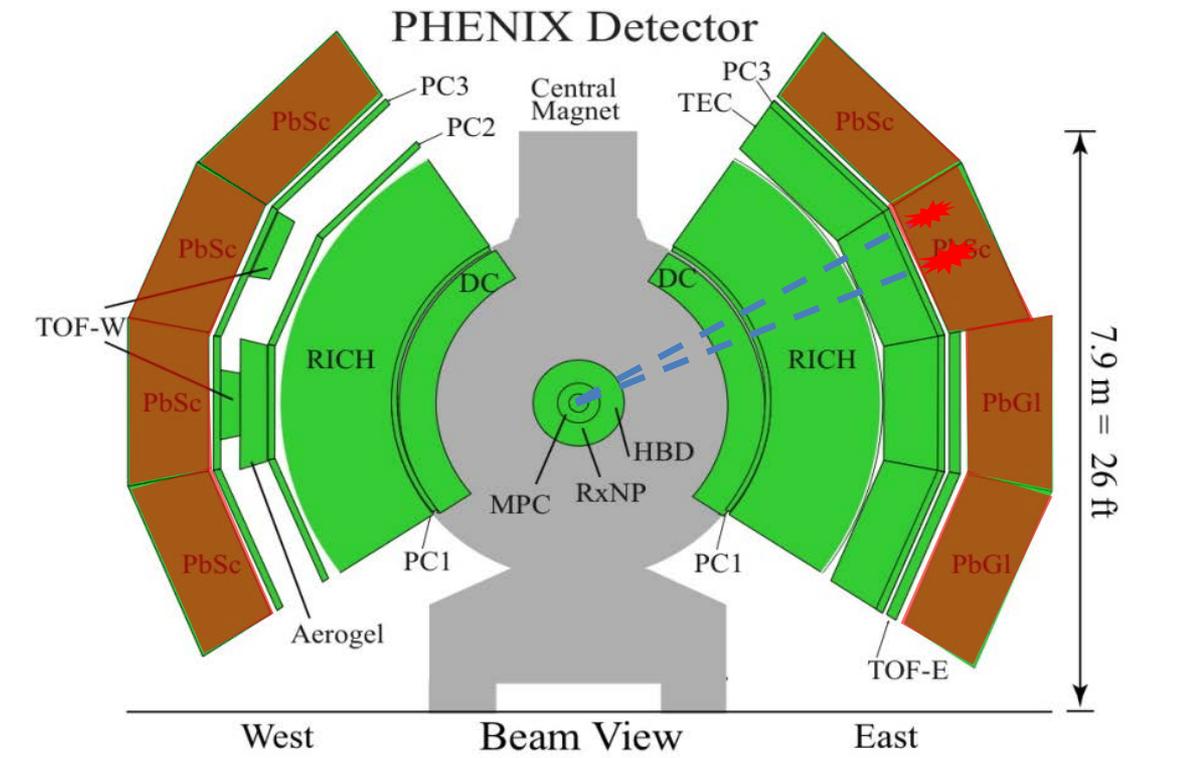
- 原子核の破片を捕らえ衝突頻度を測定。



生成物の検出(例1)

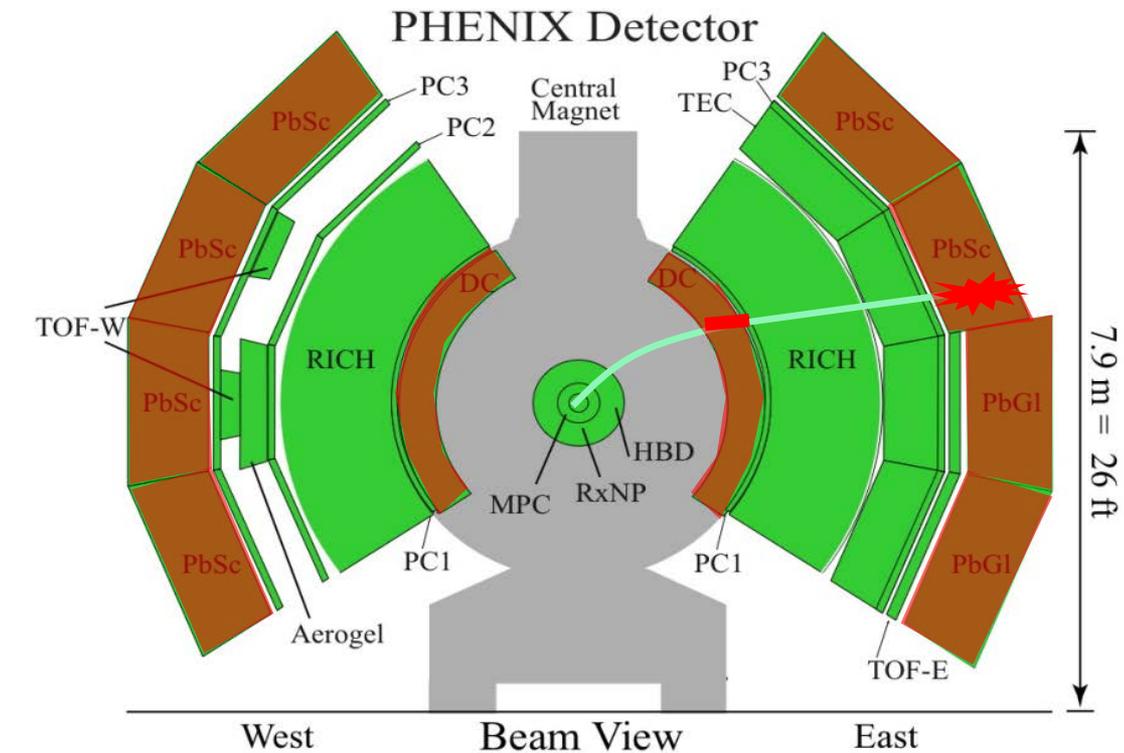
- 電磁カロリメータ

- 中性パイ粒子(反応で一番たくさん出来る)が崩壊した2つの光子を捕らえる。



生成物の検出 (例2)

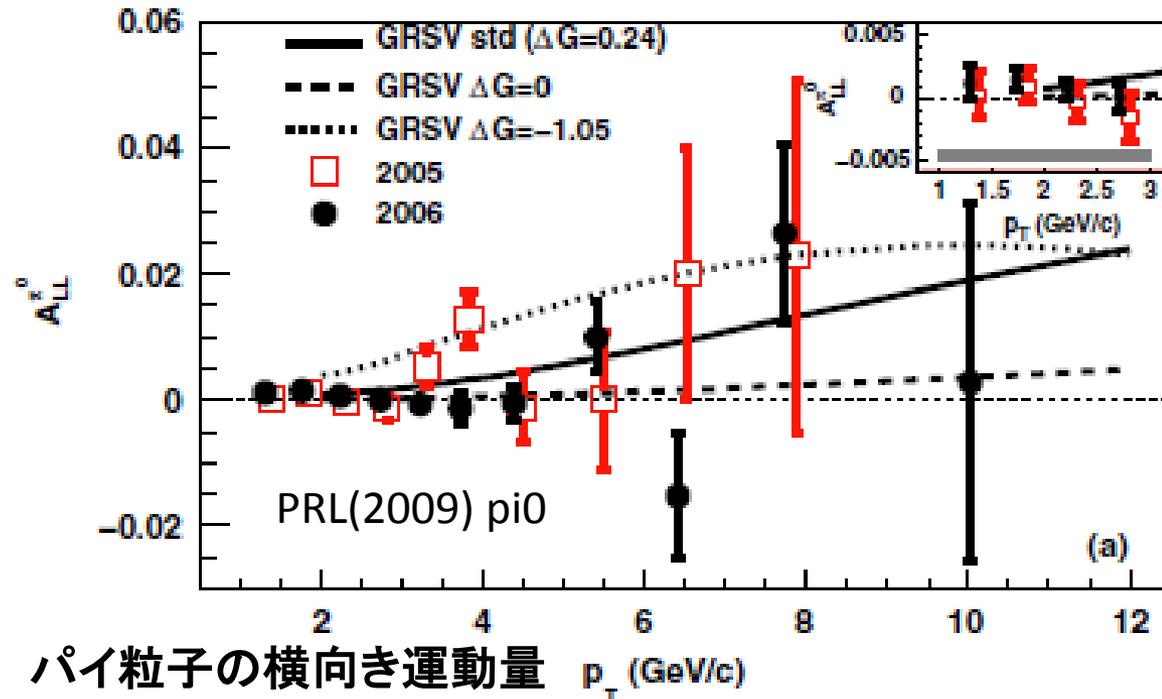
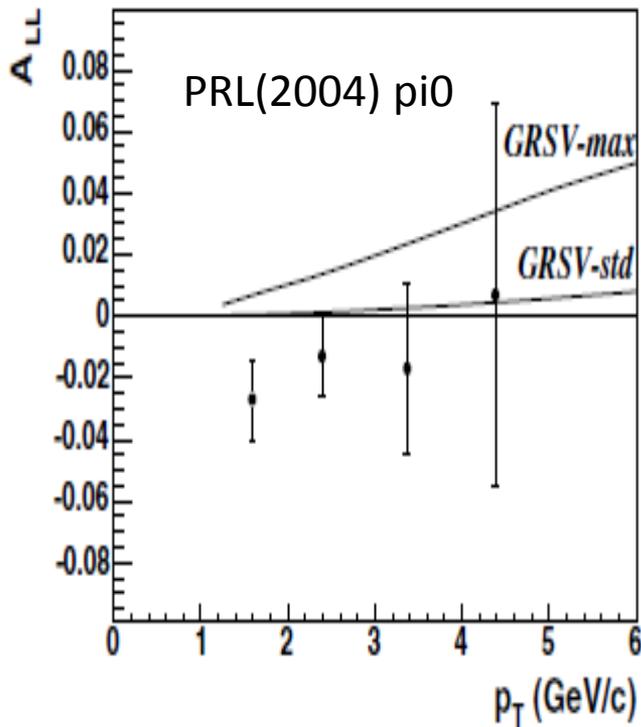
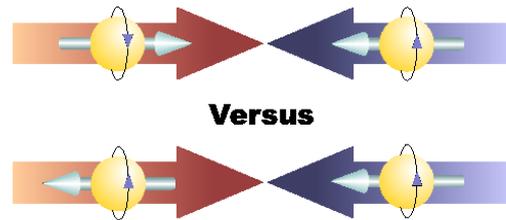
- 電磁カロリメータとドリフトチェンバー/パッドチェンバー
 - W粒子の崩壊した電子を捕らえる。



RHICスピンの結果(2011年現在)

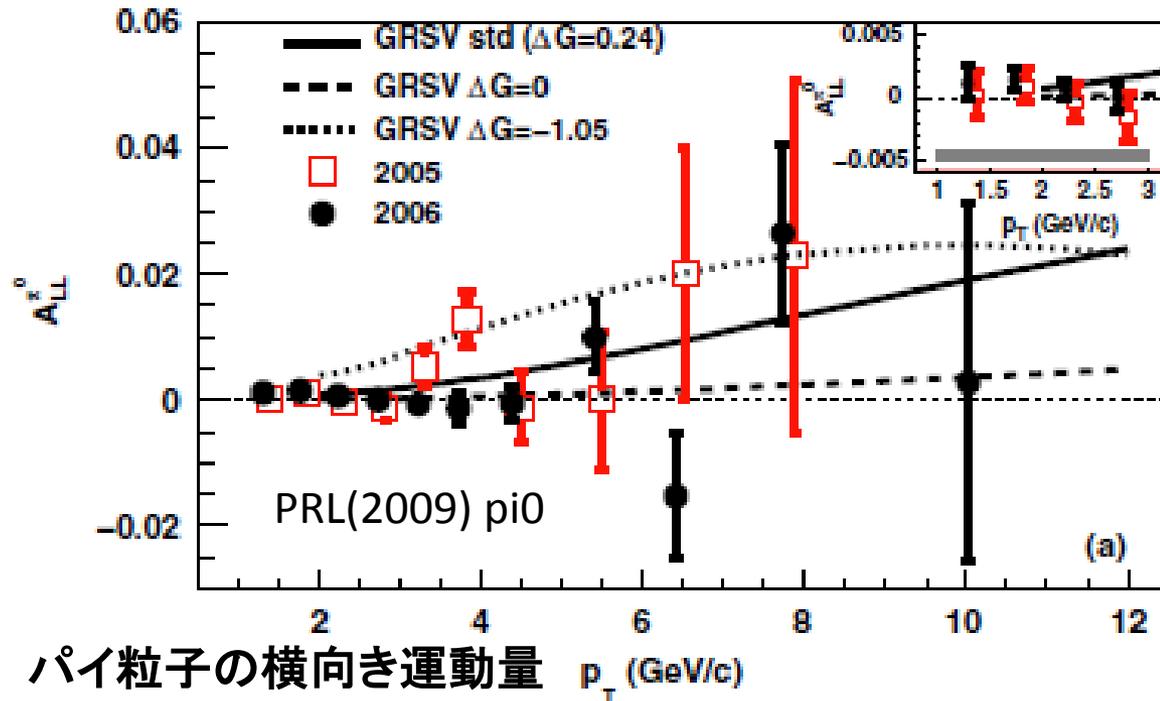
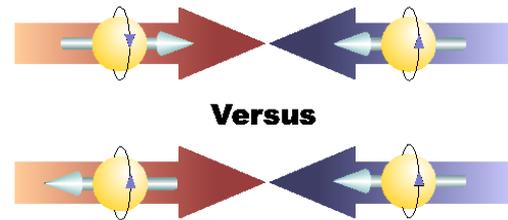
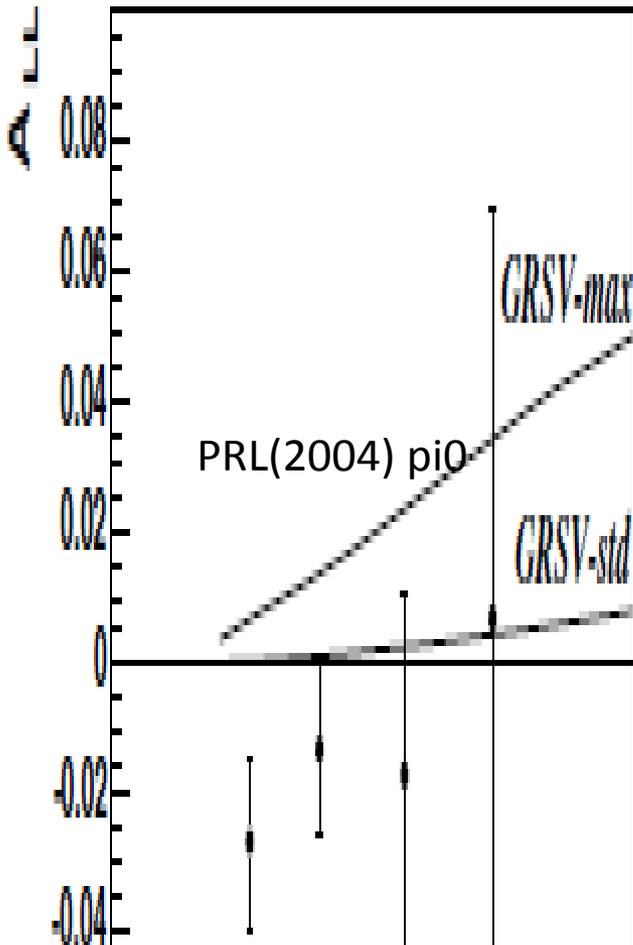
グルーオン偏極は小さかった

- 中性パイ粒子生成のダブルスピン非対称度 (A_{LL}^0) の測定結果



グルーオン偏極は小さかった

- 極端に大きなグルーオン偏極のモデルは棄却。



Δg に節？

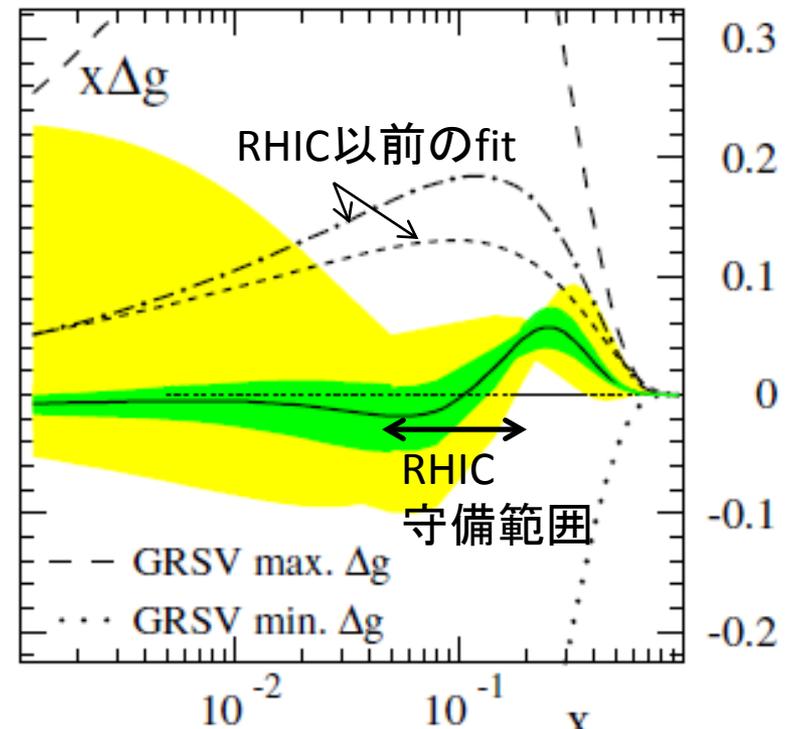
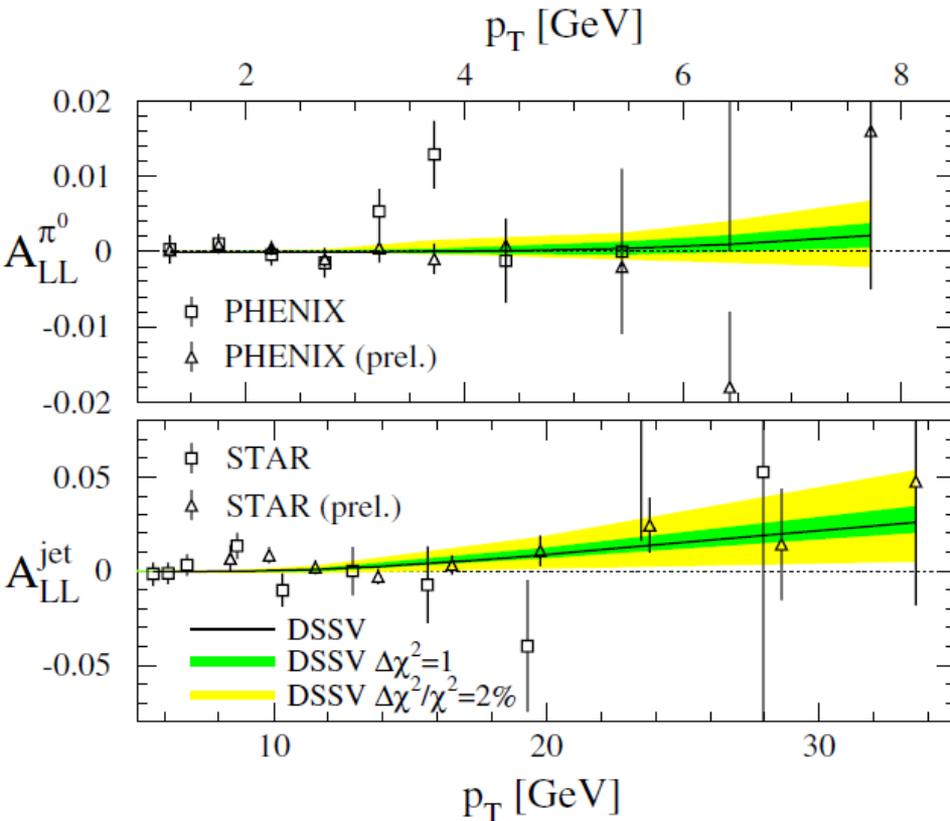
● DSSVグループによるグローバル解析結果

– PHENIX + STAR + SIDIS + DIS

– Δg はGRSV-std より小さい [$\Delta g = 0.4$ at $Q^2 = 1$ (GeV/c)²]

– RHICデータで $\Delta g(x)$ の $0.05 < x < 0.2$ の領域に強い制限。

de Florian, Sassot, Stratmann
and Vogelsang,
PRL 101, 072001 (2008).



(横軸) ~ グルーオンの担う運動量の割合

W BOSON

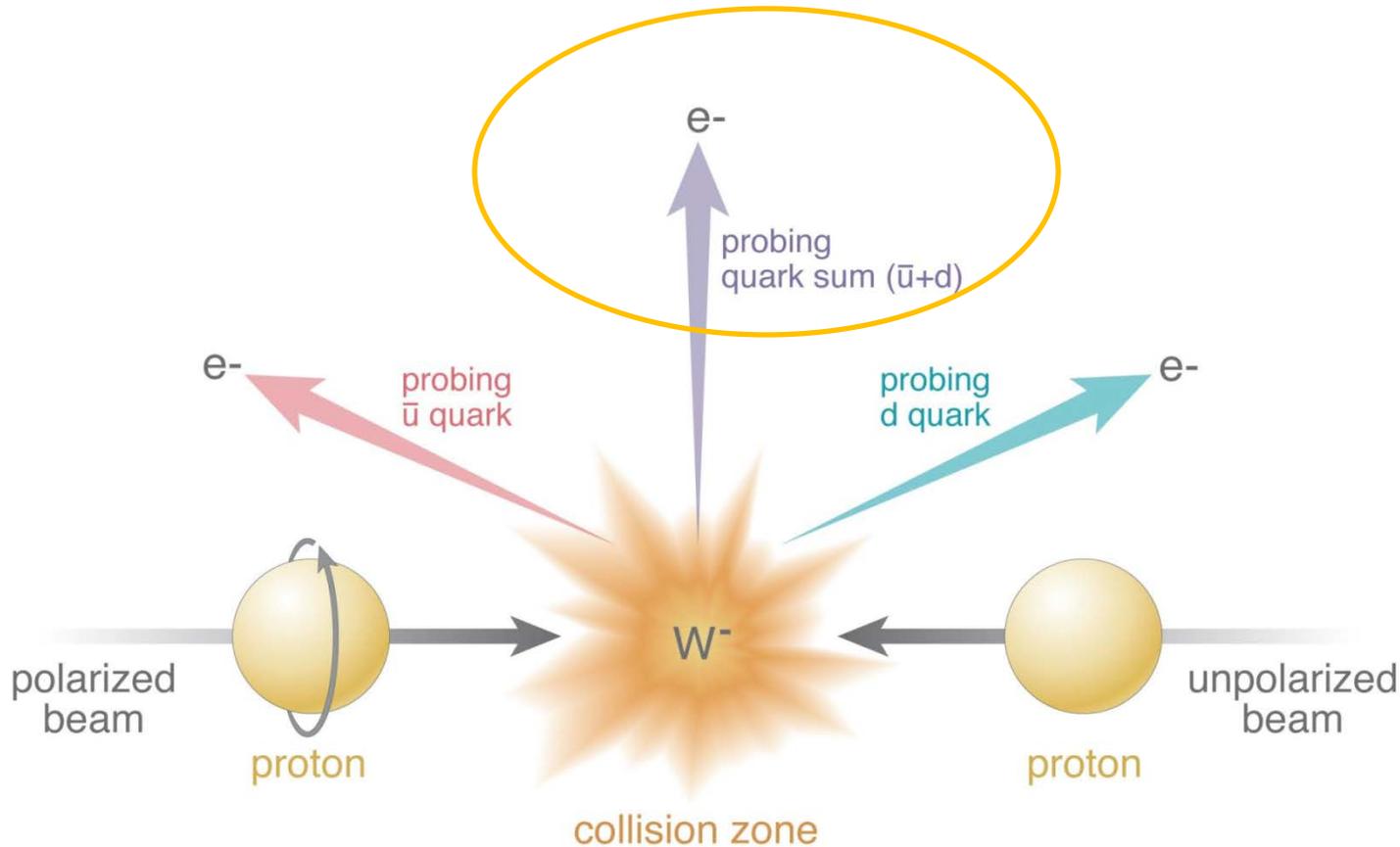


PHENIXでのW粒子の測定 (PRL 106,062001(2011))

Cross Section and Parity-Violating Spin Asymmetries of W^\pm Boson Production in Polarized $p + p$ Collisions at $\sqrt{s} = 500$ GeV

A. Adare,¹¹ S. Afanasiev,²⁵ C. Aidala,³⁴ N.N. Ajitanand,⁵⁶ Y. Akiba,^{50,51} R. Akimoto,¹⁰ J. Alexander,⁵⁶ H. Al-Ta'ani,⁴⁴ K. R. Andrews,¹ A. Angerami,¹² K. Aoki,⁵⁰ N. Apadula,⁵⁷ E. Appelt,⁶¹ Y. Aramaki,¹⁰ R. Armendariz,⁶ E. C. Aschenauer,⁵ T. C. Awes,⁴⁶ B. Azmoun,⁵ V. Babintsev,²¹ M. Bai,⁴ B. Bannier,⁵⁷ K. N. Barish,⁶ B. Bassalleck,⁴³ A. T. Basye,¹ S. Bathe,⁵¹ V. Baublis,⁴⁹ C. Baumann,³⁹ A. Bazilevsky,⁵ R. Belmont,⁶¹ J. Ben-Benjamin,⁴⁰ R. Bennett,⁵⁷ A. Berdnikov,⁵³ Y. Berdnikov,⁵³ D. S. Blau,³⁰ J. S. Bok,⁶³ K. Boyle,⁵¹ M. L. Brooks,³⁴ D. Broxmeyer,⁴⁰ H. Buesching,⁵ V. Bumazhnov,²¹ G. Bunce,^{5,51} S. Butsyk,³⁴ S. Campbell,⁵⁷ A. Caringi,⁴⁰ P. Castera,⁵⁷ C.-H. Chen,⁵⁷ C. Y. Chi,¹² M. Chiu,⁵ I. J. Choi,^{22,63} J. B. Choi,⁸ R. K. Choudhury,³ P. Christiansen,³⁶ T. Chujo,⁶⁰ O. Chvala,⁶ V. Cianciolo,⁴⁶ Z. Citron,⁵⁷ B. A. Cole,¹² Z. Conesa del Valle,³² M. Connors,⁵⁷ M. Csanád,¹⁵ T. Csörgő,²⁸ S. Dairaku,^{31,50} A. Datta,³⁸ G. David,⁵ M. K. Dayananda,¹⁸ A. Denisov,²¹ A. Deshpande,^{51,57} E. J. Desmond,⁵ K. V. Dharmawardane,⁴⁴ O. Dietzsch,⁵⁴ A. Dion,²⁴ M. Donadelli,⁵⁴ L. D'Orazio,³⁷ O. Drapier,³² A. Drees,⁵⁷ K. A. Drees,⁴ J. M. Durham,⁵⁷ A. Durum,²¹ Y. V. Efremenko,⁴⁶ T. Engelmöre,¹² A. Enokizono,⁴⁶ H. En'yo,^{50,51} S. Esumi,⁶⁰ B. Fadem,⁴⁰ D. E. Fields,⁴³ M. Finger, Jr.,⁷ M. Finger,⁷ F. Fleuret,³² S. L. Fokin,³⁰ J. E. Frantz,⁴⁵ A. Franz,⁵ A. D. Frawley,¹⁷ Y. Fukao,⁵⁰ T. Fusayasu,⁴² I. Garishvili,⁵⁸ A. Glenn,³³ X. Gong,⁵⁶ M. Gonin,³² Y. Goto,^{50,51} R. Granier de Cassagnac,³² N. Grau,¹² S. V. Greene,⁶¹ M. Grosse Perdekamp,²² T. Gunji,¹⁰ L. Guo,³⁴ H.-Å. Gustafsson,^{36,*} J. S. Haggerty,⁵ K. I. Hahn,¹⁶ H. Hamagaki,¹⁰ J. Hamblen,⁵⁸ J. Hanks,¹² R. Han,⁴⁸ C. Harper,⁴⁰ K. Hashimoto,^{52,50} E. Haslum,³⁶ R. Hayano,¹⁰ T. K. Hemmick,⁵⁷ T. Hester,⁶ X. He,¹⁸ J. C. Hill,²⁴ R. S. Hollis,⁶ W. Holzmann,¹² K. Homma,²⁰ B. Hong,²⁹ T. Horaguchi,⁶⁰ Y. Hori,¹⁰ D. Hornback,⁴⁶ S. Huang,⁶¹ T. Ichihara,^{50,51} R. Ichimiya,⁵⁰ H. Iinuma,²⁷ Y. Ikeda,^{50,52,60} K. Imai,^{31,50} M. Inaba,⁶⁰ A. Iordanova,⁶ D. Isenhower,¹ M. Ishihara,⁵⁰ M. Issah,⁶¹ A. Isupov,²⁵ D. Ivanishev,⁴⁹ Y. Iwanaga,²⁰ B. V. Jacak,^{57,†} J. Jia,^{5,56} X. Jiang,³⁴ B. M. Johnson,⁵ T. Jones,¹ K. S. Joo,⁴¹ D. Jouan,⁴⁷ J. Kamin,⁵⁷ S. Kaneti,⁵⁷ B. H. Kang,¹⁹ J. H. Kang,⁶³ J. S. Kang,¹⁹ J. Kapustinsky,³⁴ K. Karatsu,^{31,50} M. Kasai,^{52,50} D. Kawall,^{38,51} A. V. Kazantsev,³⁰ T. Kempel,²⁴ A. Khanzadeev,⁴⁹ K. M. Kijima,²⁰ B. I. Kim,²⁹ D. I. Kim,²⁶ E. I. Kim,⁸ V. I. Kim,²² V. K. Kim,¹⁹ E. Kinney,¹¹ Á. Kise,¹⁵ E. Kistanov,⁵ D. Kleinjan,⁶ D. Klina,⁵⁷

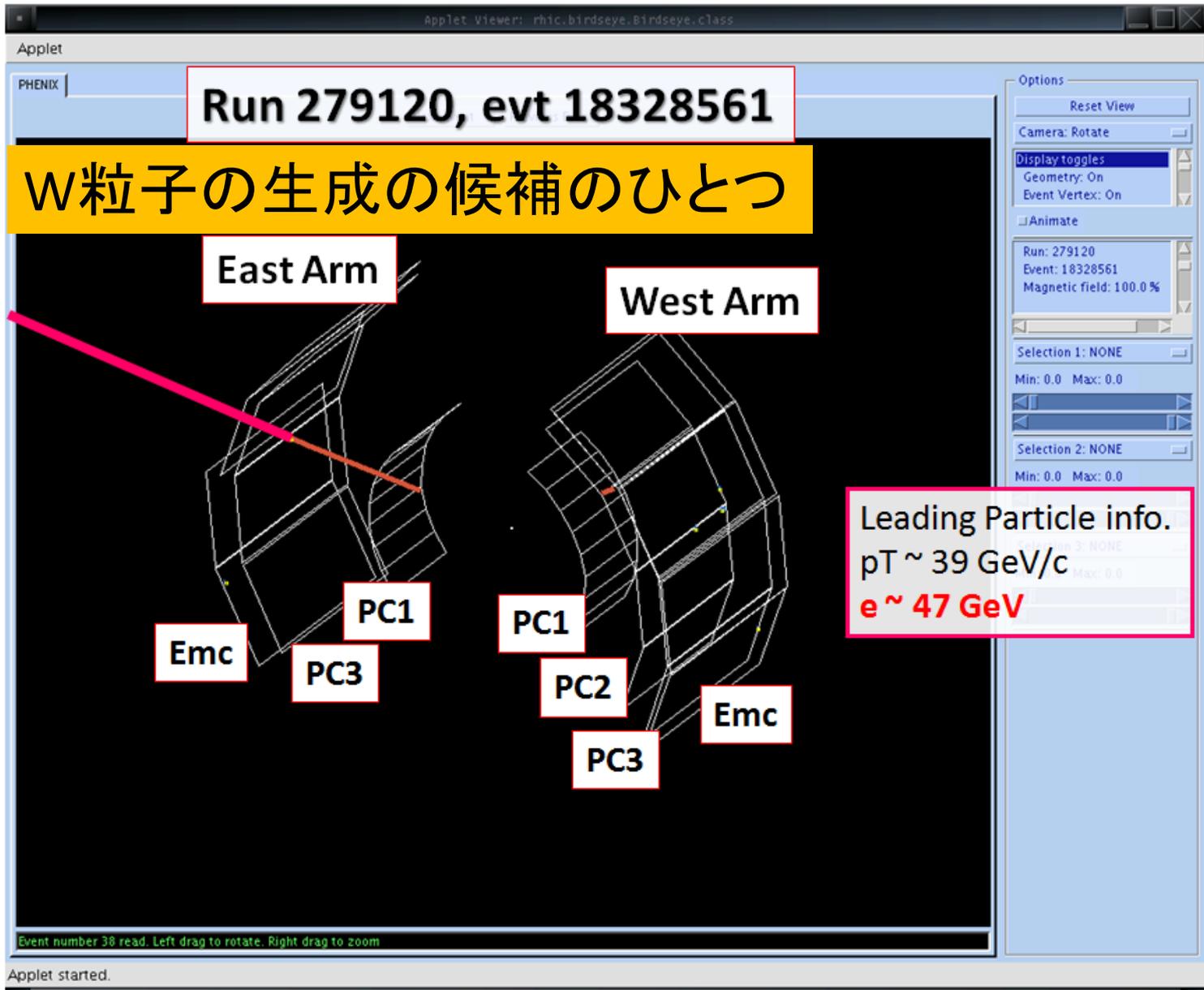
W粒子の崩壊を検出する



$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$$

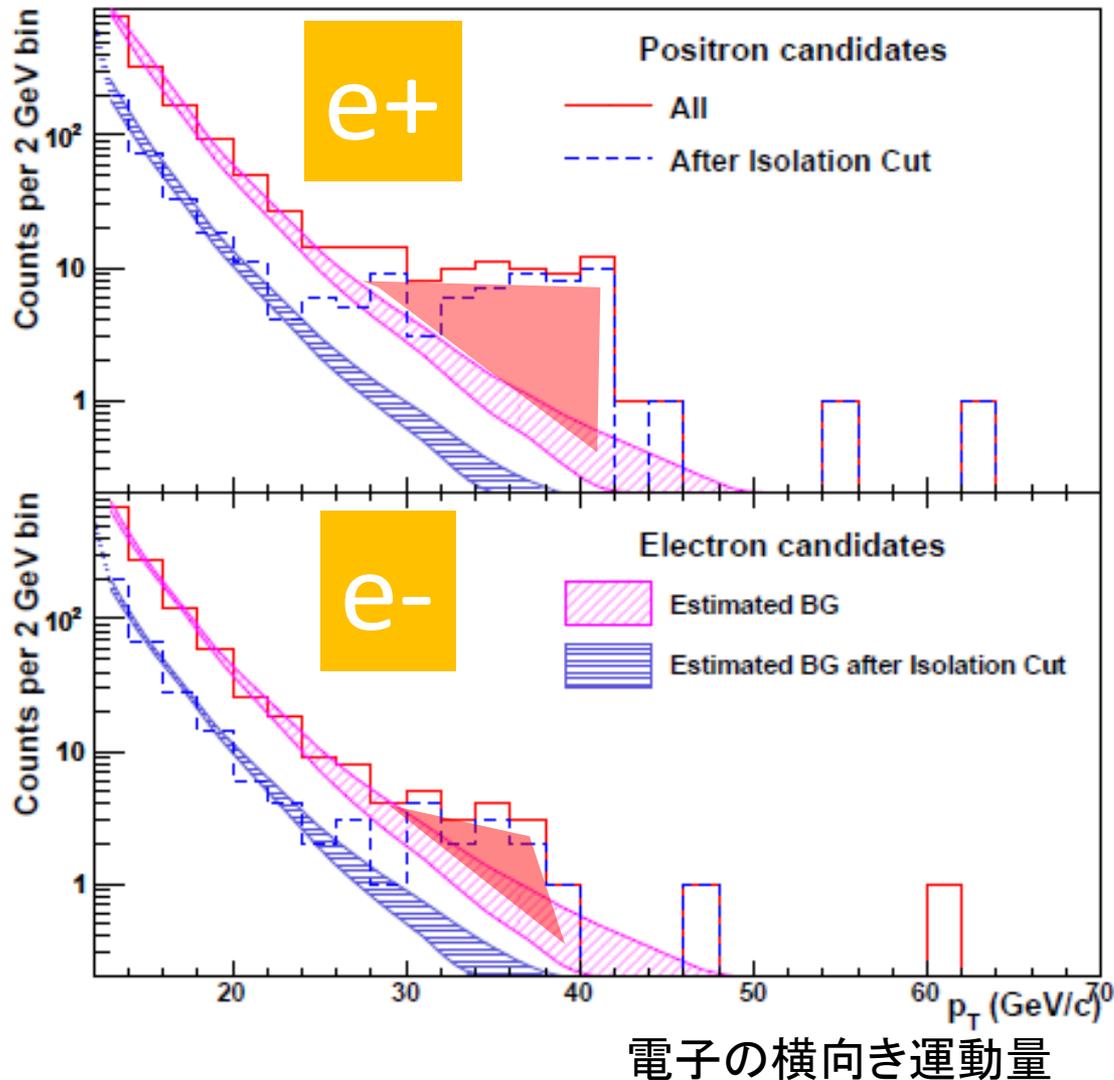
$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

ニュートリノ(ν)
は捕らえられない。



高いエネルギー、
 周りすっきり

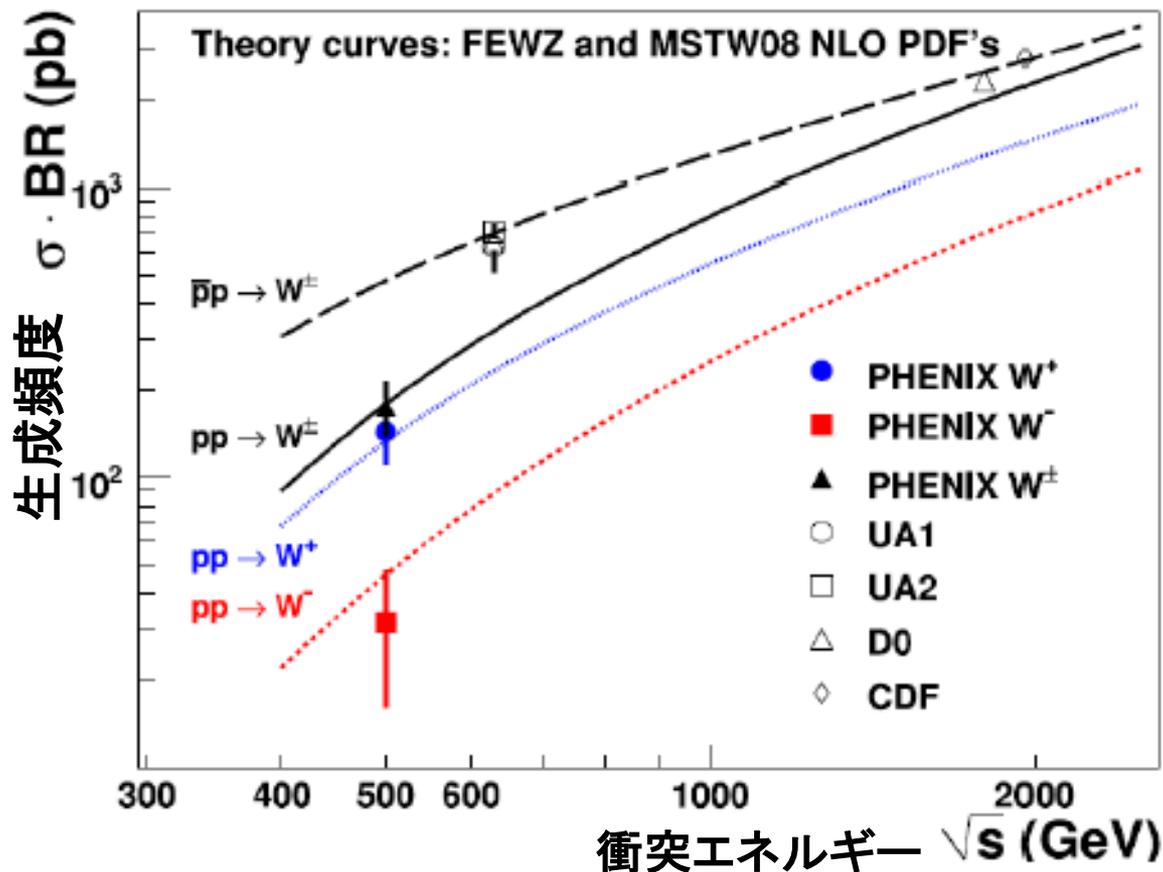
W粒子のシグナル捕らえた！



- W粒子の電子、陽電子への崩壊。
- 横向き運動量の分布の肩の部分

W粒子の生成頻度の測定

PHENIX で捕まえた分 \longrightarrow 全体
 (pT>30GeV, |y|<0.35)



Z粒子の寄与

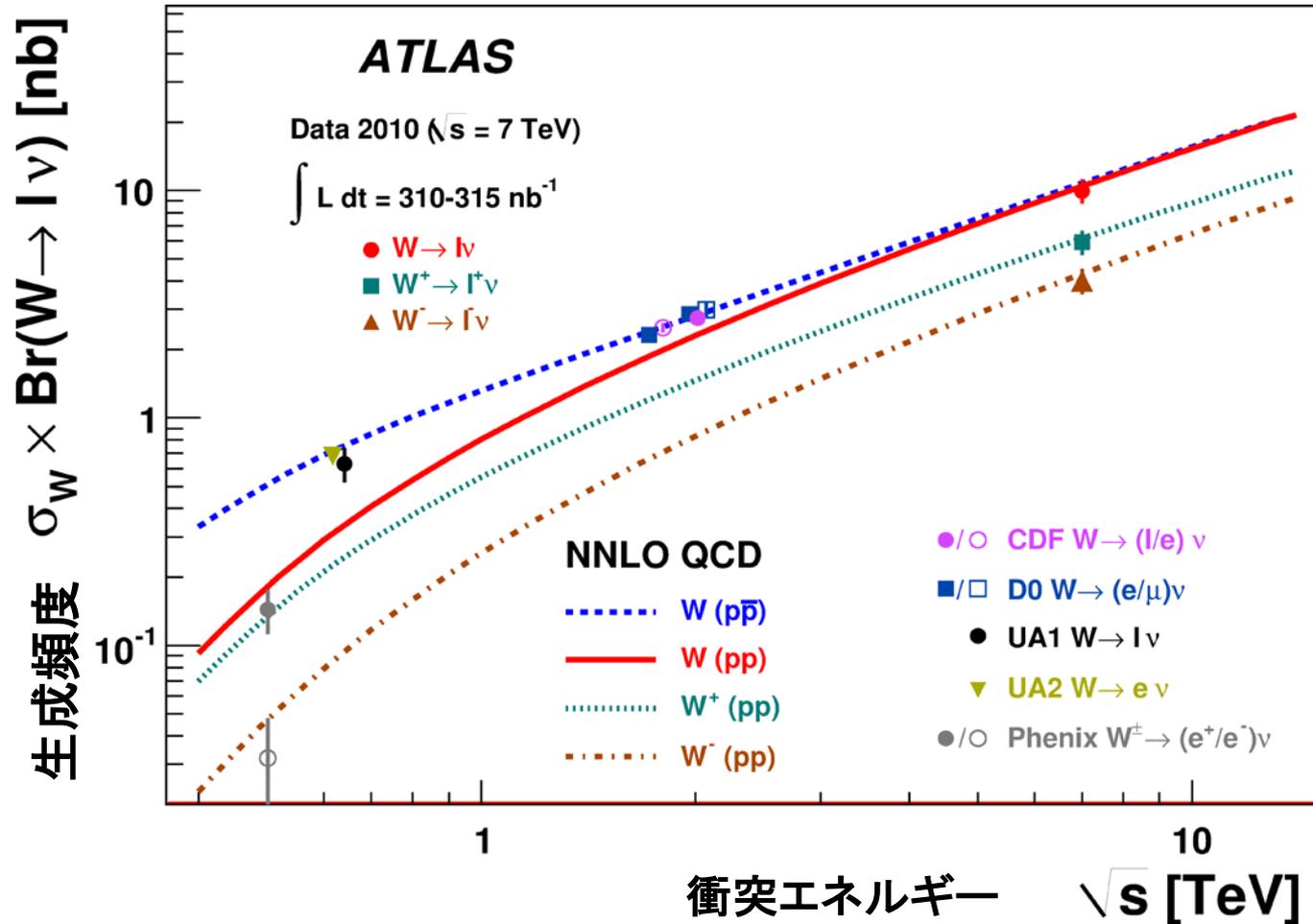
+ : ~7%, - : ~30%

PHENIXで捕えた割合

+ : ~22%, - : ~15%

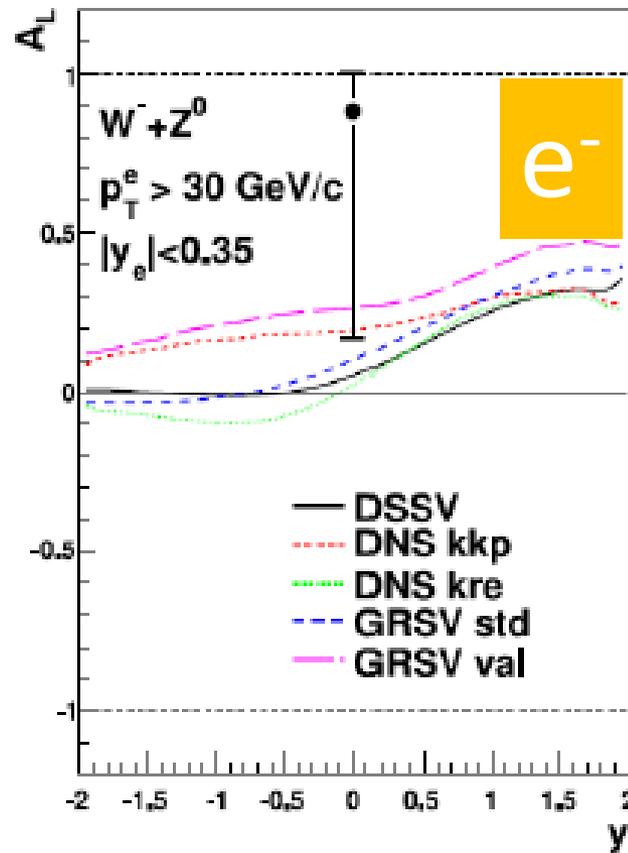
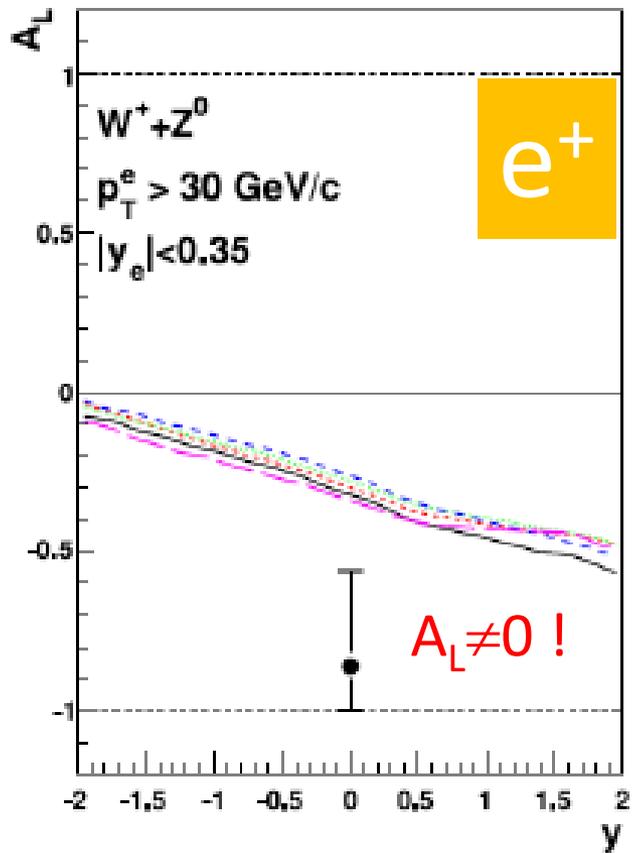
陽子陽子衝突での
初めての測定

LHCでの測定 (ATLAS)



ATLAS, JHEP 1012:060,2010 ([arXiv/1010.2130v1](https://arxiv.org/abs/1010.2130v1))

スピン依存性を調べる手順は整った



シングルスピン
非対称度 (A_L)
の68%CL

(横軸)
W粒子の娘粒子の
方位角に当たるもの

前後方向の崩壊粒子を捉える検出器が今年完成した。
今後数年間でデータを蓄積する。

W粒子解析のタスクフォース

2007 RSC(11/30) Okada

2008 JPS (9/23) Okada

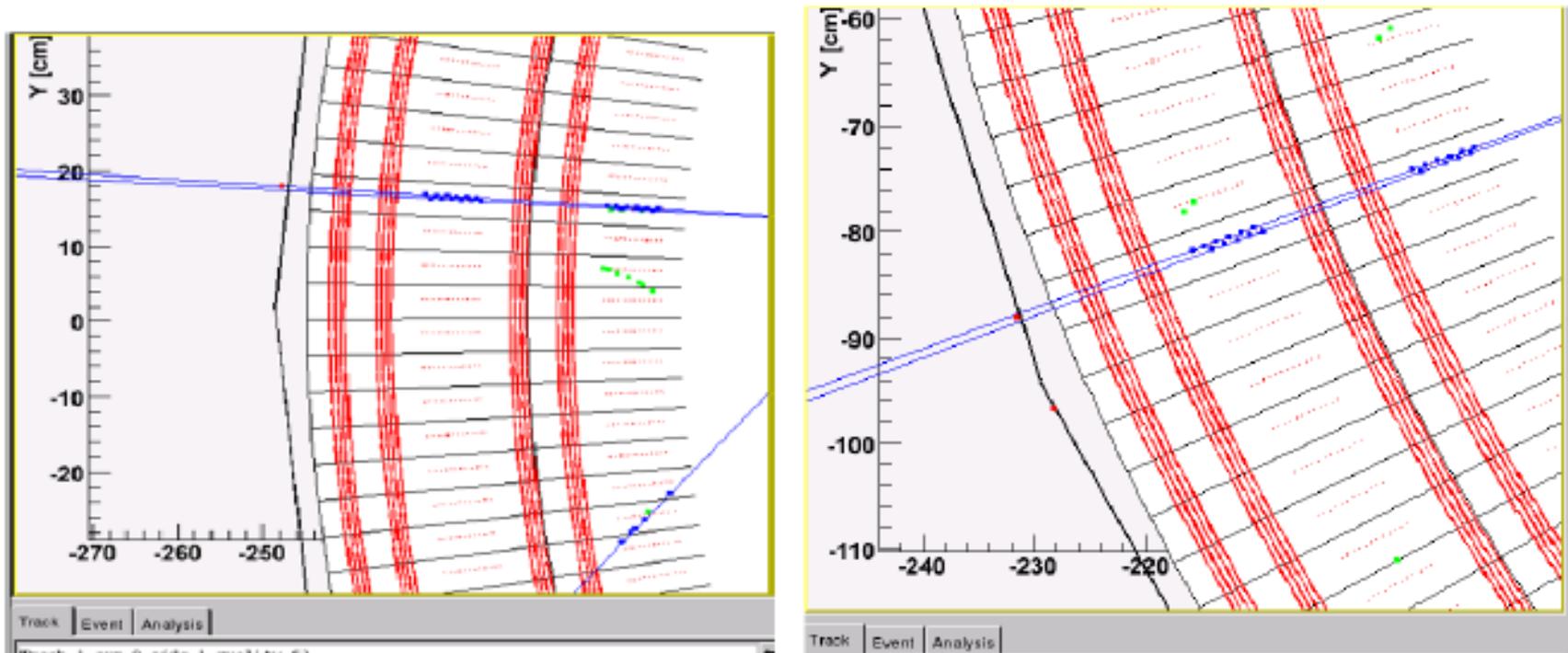
Task force (Chiu, Okada)	(09-10-06)		(10-04-07)	DIS2010 (4/19) Chiu
(09-01-23)	(09-10-20)	DNP/JPS (10/13) Karatsu	(10-04-13)	
(09-02-05)	(09-10-27)		(10-04-20)	
(09-02-13)	(09-11-03)		(10-04-27)	
(09-02-27)	(09-11-09)		(10-05-04)	
(09-03-13)	(09-11-16)		(10-05-11)	
(09-03-27)	(09-11-30)	RHIC spin collaboration	(10-05-18)	
(09-04-10)	(09-12-07)	(11/21) Okada	(10-05-25)	
(09-05-07)	(09-12-14)		(10-06-09)	
(09-05-21)	(09-12-22)		(10-06-16)	
(09-06-12)	(09-12-29)	WWND (1/2) Kawall	(10-06-29)	W-BNL (6/24) Kawall
(09-07-14)	(10-01-05)		(10-07-07)	
(09-07-21)	(10-01-12)	PHENIX collaboration	(10-07-15)	
(09-07-27)	(10-01-19)	(1/15) Okada	(10-07-20)	ICHEP (7/21) Haggerty
(09-08-04)	(10-01-26)		(10-07-27)	
(09-08-11)	(10-02-02)	プレリミナリースタンプ	(10-08-03)	
(09-08-18)	(10-02-24)	APS (2/13) Haggerty	(10-08-06)	
(09-08-25)	(10-03-02)	LLWI (2/14) Okada	(10-08-17)	
(09-09-01)	(10-03-09)		8/17- 9/4 ppg meetings everyday.	
(09-09-08)	(10-03-16)	High PT2010 (3/17) Karatsu	arXiv:1009.0505	論文投稿
(09-09-15)	(10-03-23)			
(09-09-23)	(10-03-30)			JPS (9/11) Okada
(09-09-29)				SPIN (9/27) Okada

↑ **データ取得**
↓ Run9 500GeV

User's meeting
(6/1) Karatsu

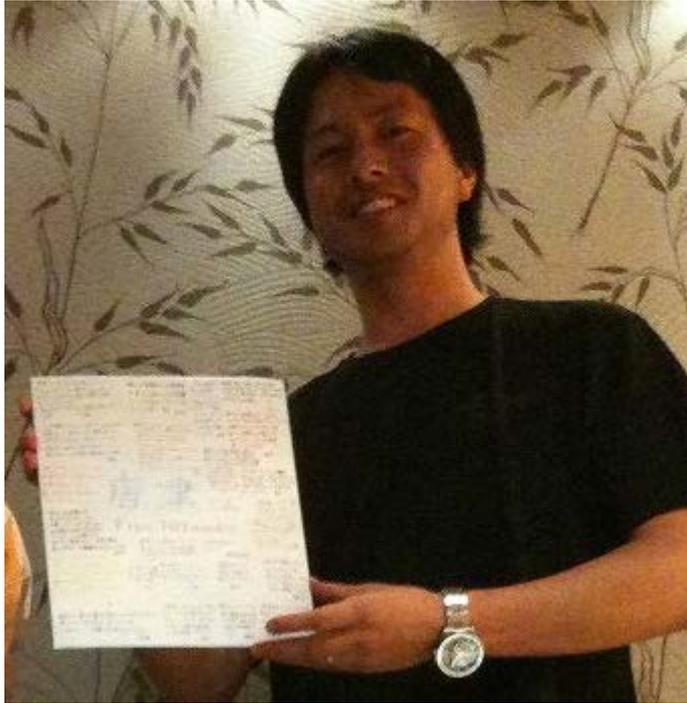
2011年2月 論文掲載

使えなかった反応の例



- ドリフトチェンバーのゴーストが出る領域がある。
- W粒子の電荷が分からないので使えない。
- 性能の限界に挑む解析。

京都大学唐津君

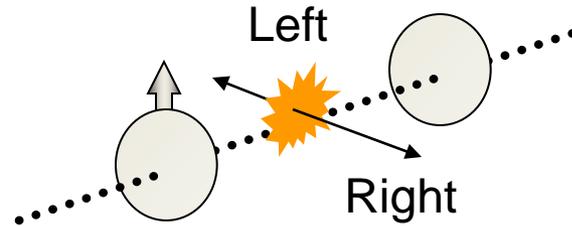
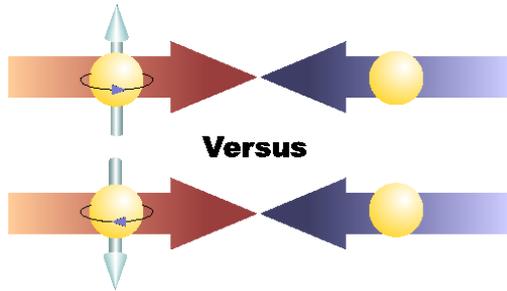


Kenichi Karatsu:

"Measurement of Cross Section and Single Spin Asymmetries of W-Boson Production in Polarized pp Collisions at $\sqrt{s}=500$ GeV",
Ph.D. thesis at Kyoto University, 2011,

この春、京都大学から学位取得。おめでとう。

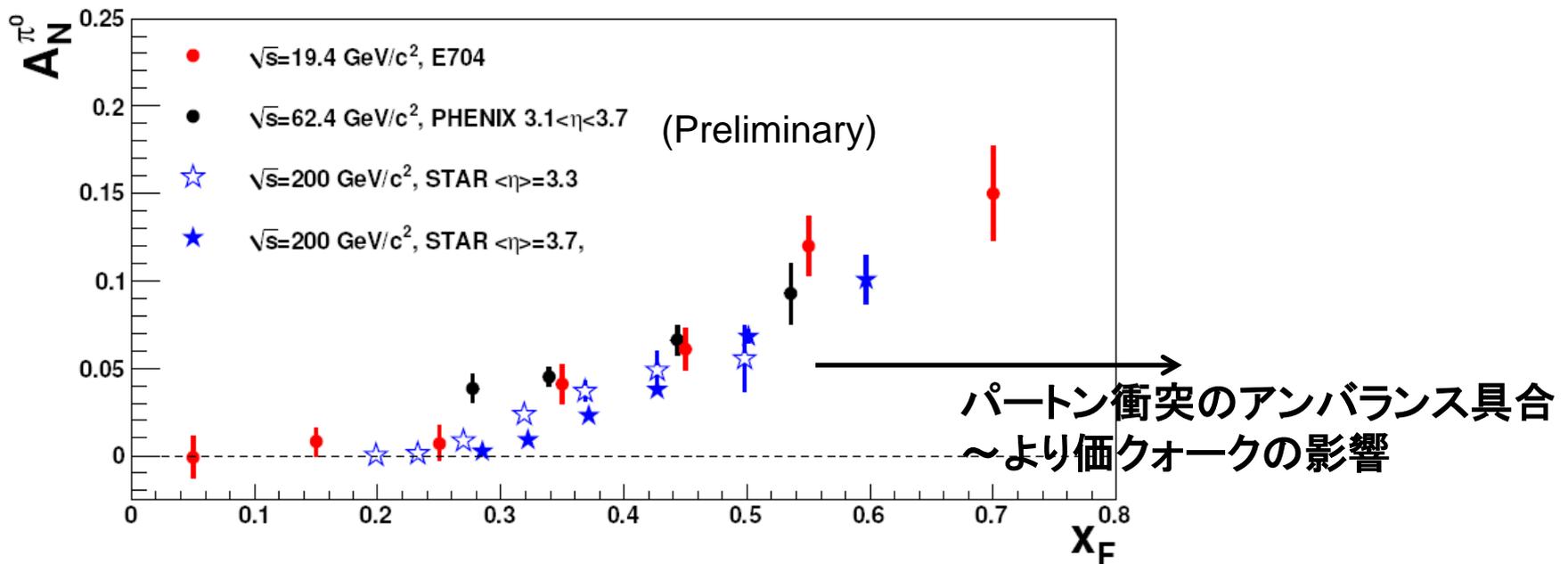
横偏極陽子のスピン非対称度 (新たなQCD理論確認ツール)



$$A_N = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R}$$

- 測定値は陽子のスピンの向きに対する左右の非対称度

クォークの横向き運動を示唆



- RHICのエネルギーでも大きな非対称度。
- 陽子が大きさを持っていない(collinearな)描像では現われない。
- 軌道角運動量(L)と結びつけるモデルあり。
- まずは詳しく測定することが大事。

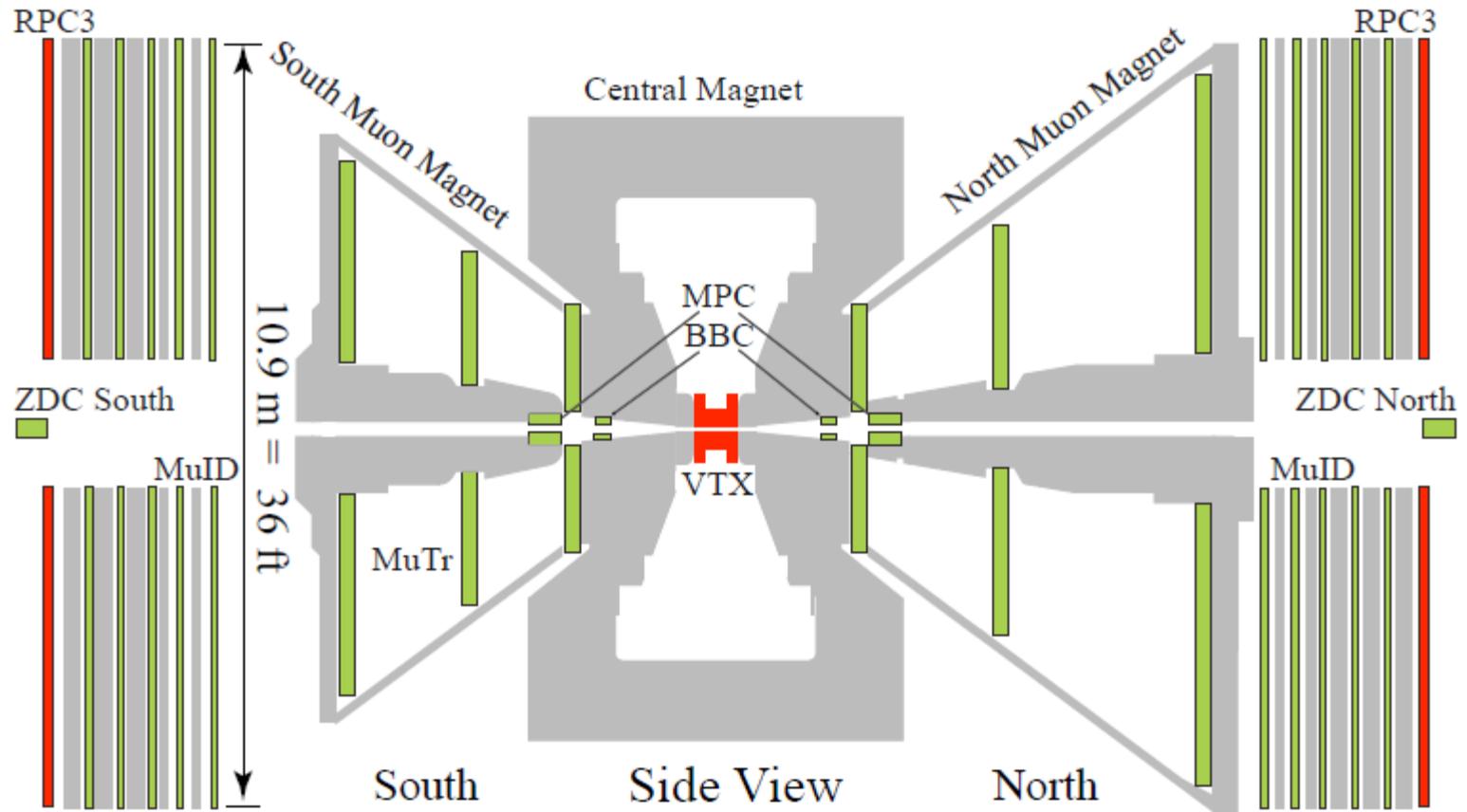
RHICスピンのこれからの予定

W粒子の反クォーク偏極測定が第一

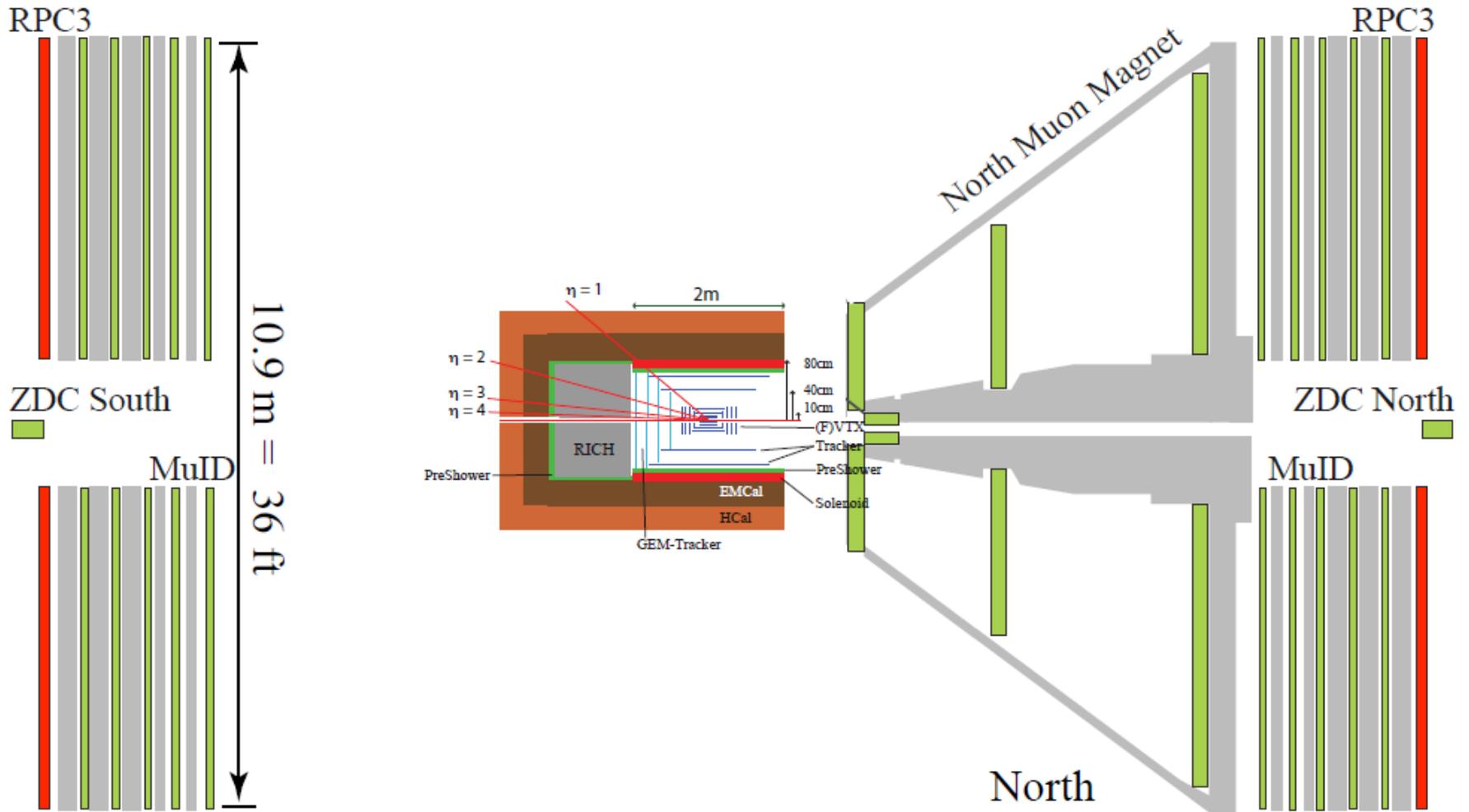
- この先はW粒子による反クォーク偏極の測定が主な目的。
- 重イオン衝突実験の参照データ(200GeV)を取る必要性があるが、その際はW粒子の物理にはエネルギーが足りない。
 - (PHENIX) 横スピン衝突でなにか新しいものを見つけられないか。
 - (STAR) 広いアクセプタンスを利用してグルーオン偏極の運動量比依存性を解く。

PHENIX (now 2011)

データを取り始めて11年



sPHENIX 案 (~2010後半)



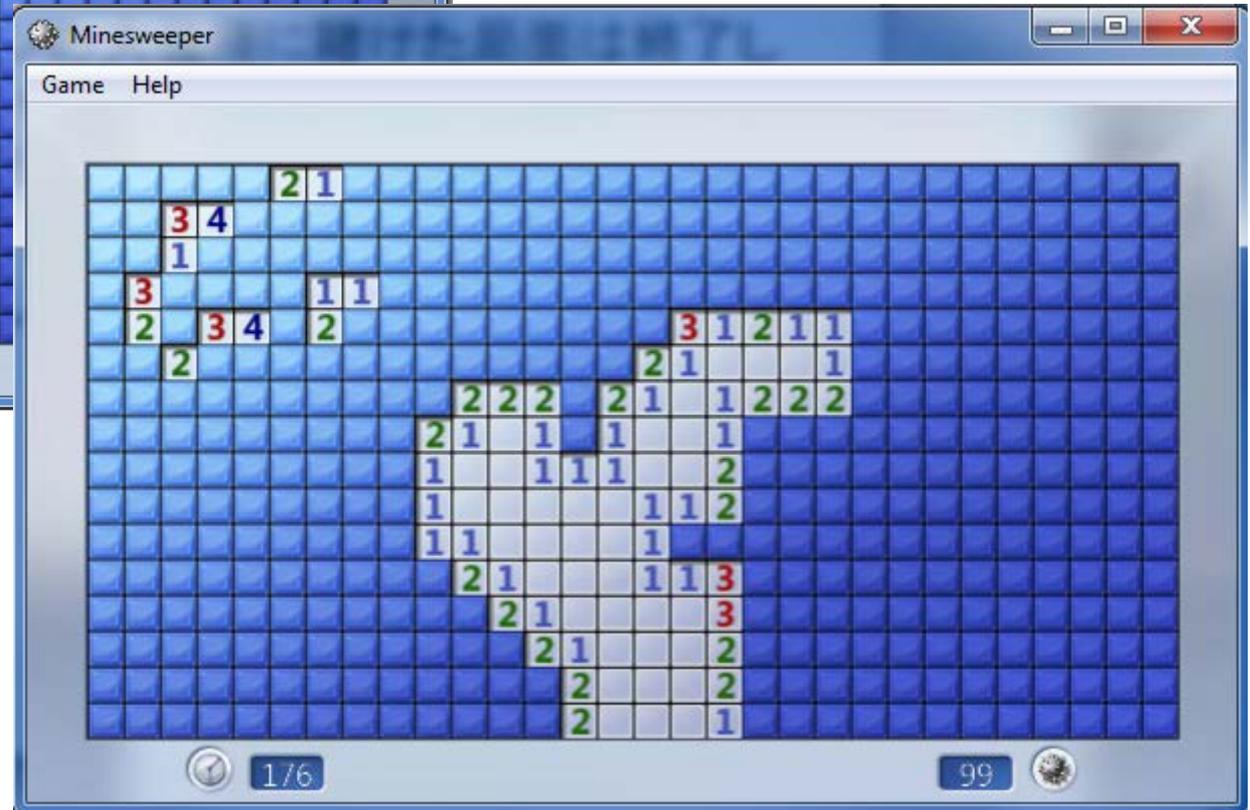
- 衝突点から全体をカバー
- 前方の検出器が横向きスピンの物理に重要

まとめ

- 偏極陽子衝突で陽子のスピン構造の探索を始めて10年経った。
- グルーオンの偏極度は小さかった。 Δg に節？
- パリティが破れているW粒子の生成を使った反クォーク偏極度の測定がスタートした。
- 横偏極陽子の衝突は摂動QCD計算の高次の項の検証になる。今理論と実験が発展している分野。前方への粒子生成が鍵。ただ今のPHENIX実験のセットアップでは弱い。
→ sPHENIX (Super PHENIX)

一突きで世界の広がる急所？

イメージ: マインスイーパー
数字が周囲8マスに存在する
爆弾の数を示しており、全部
特定するのが目的のゲーム



初めから分かれば誰も
苦労しないけれど...