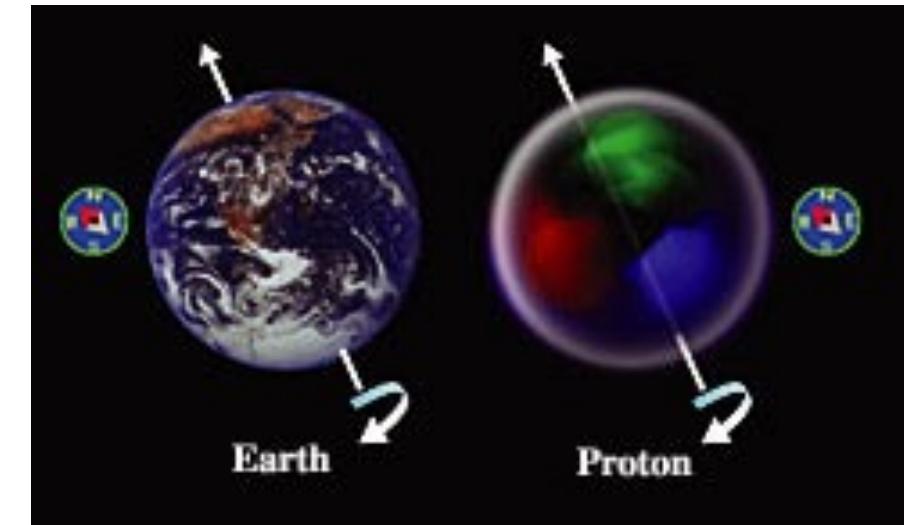
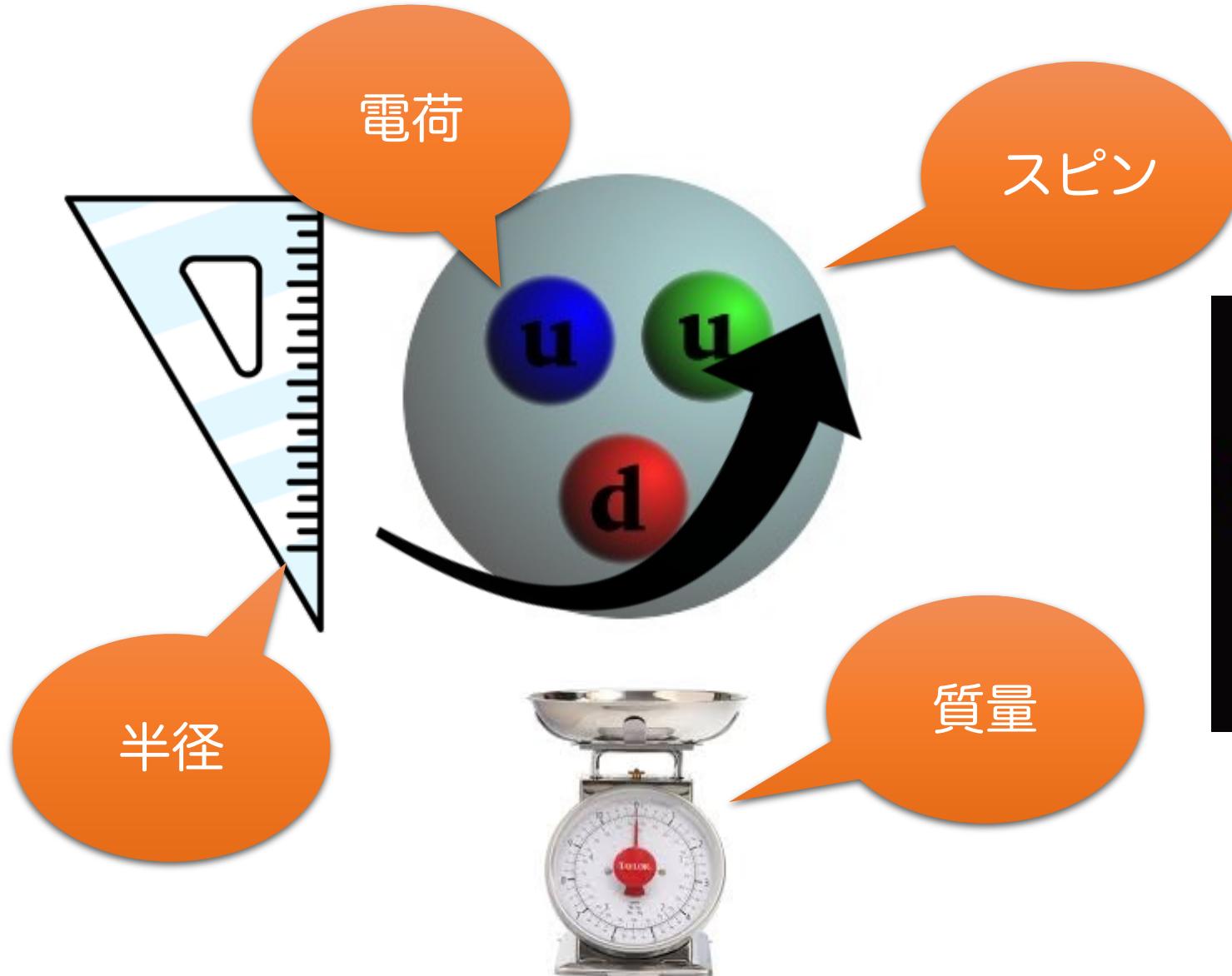


sPHENIXのスピン物理

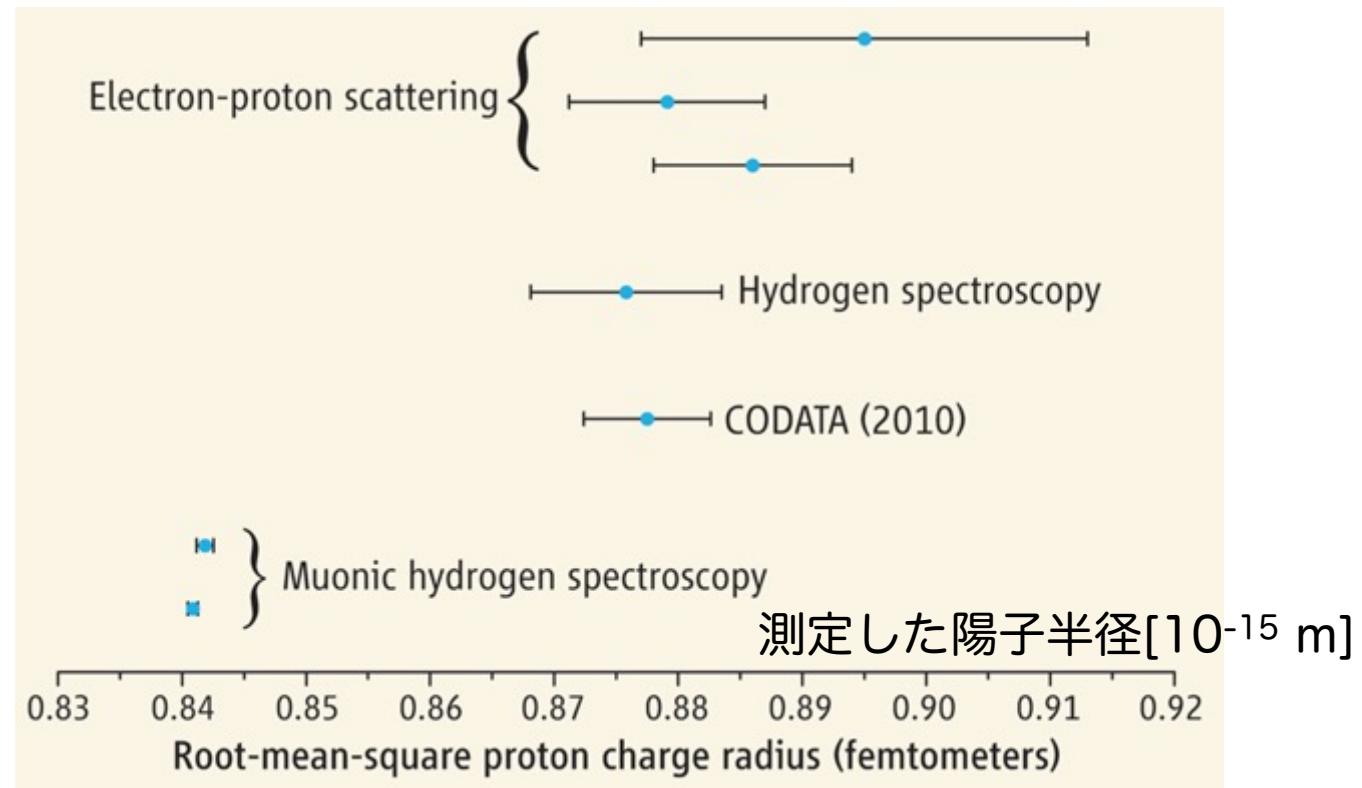
理研

中川 格

陽子のキャラ設定は？



陽子半径問題



測定方法によって半径が違うぞ！
どっちがインチキしたんだ！？

質量 mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$

電荷 charge → $2/3$

スピン spin → $1/2$

u

up

$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$

$2/3$

$1/2$

c

charm

$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$

$2/3$

$1/2$

t

top

0

0

1

g

gluon

$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$

0

0

H
Higgs
boson

QUARKS

$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$

$-1/3$

$1/2$

d

down

$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$

$-1/3$

$1/2$

s

strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$

$-1/3$

$1/2$

b

bottom

0

0

1

γ

photon

LEPTONS

$0.511 \text{ MeV}/c^2$

-1

$1/2$

e

electron

$105.7 \text{ MeV}/c^2$

-1

$1/2$

μ

muon

$1.777 \text{ GeV}/c^2$

-1

$1/2$

τ

tau

$91.2 \text{ GeV}/c^2$

0

1

Z

Z boson

GAUGE BOSONS

$<2.2 \text{ eV}/c^2$

0

$1/2$

ν_e

electron
neutrino

$<0.17 \text{ MeV}/c^2$

0

$1/2$

ν_μ

muon
neutrino

$<15.5 \text{ MeV}/c^2$

0

$1/2$

ν_τ

tau
neutrino

$80.4 \text{ GeV}/c^2$

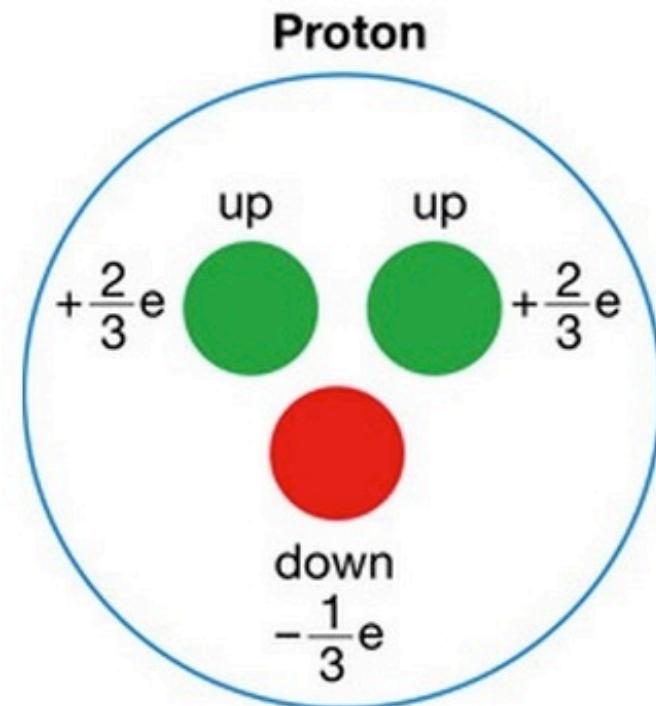
± 1

1

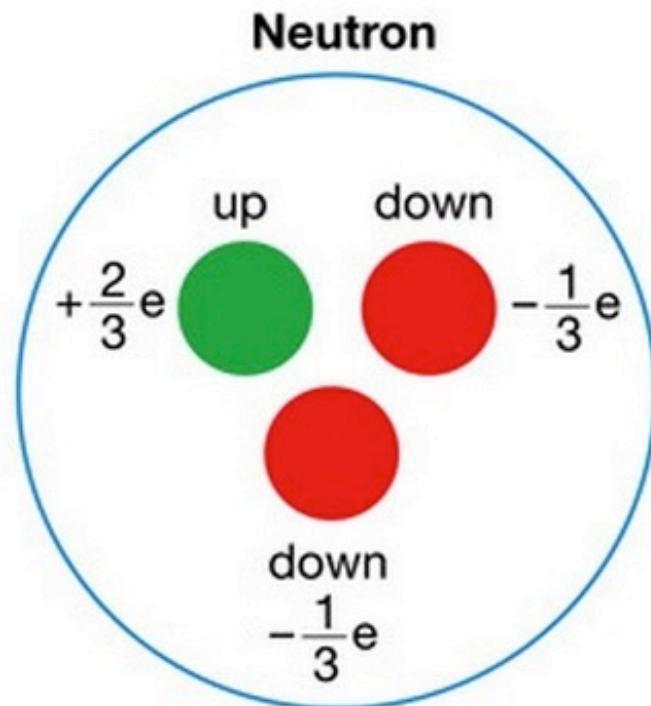
W

W boson

陽子の電荷



$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$



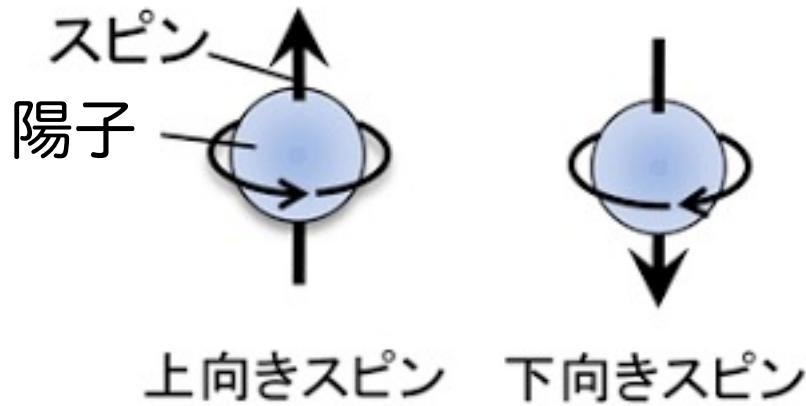
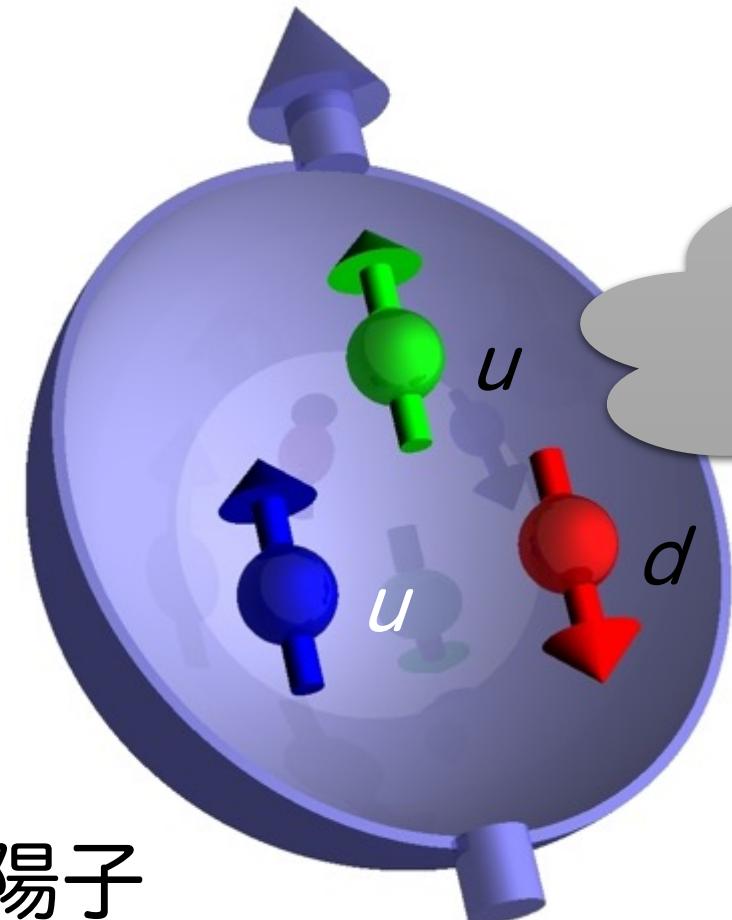
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$
QUARKS	

mass →	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$-\frac{1}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$
QUARKS	



陽子スピン

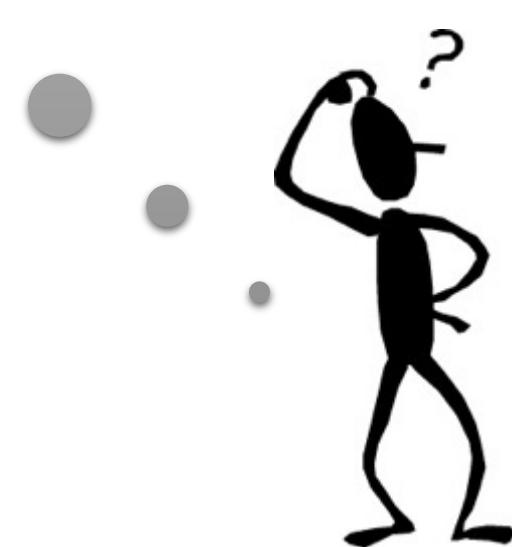


陽子スピン =
クォーク + クォーク + クォーク

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2} \right)$$

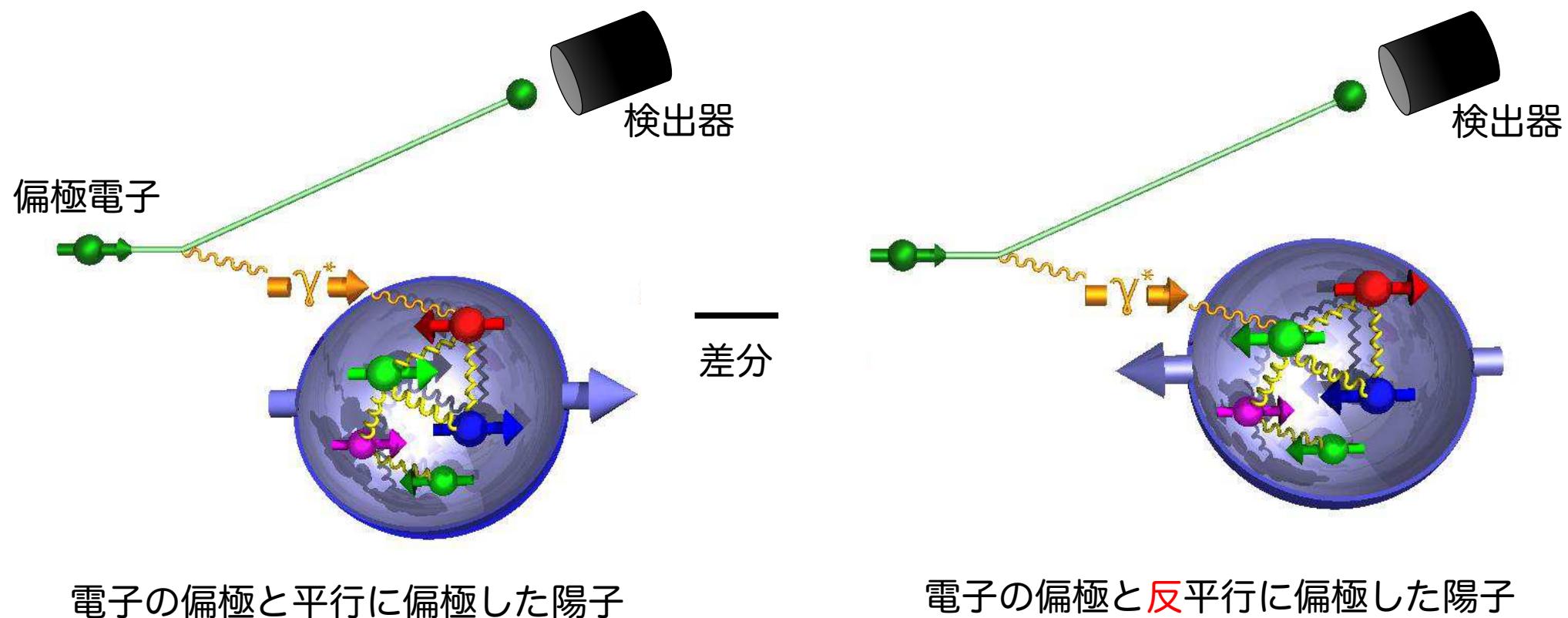
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$2/3$
spin →	$1/2$
	
	up
	
	down

QUARKS

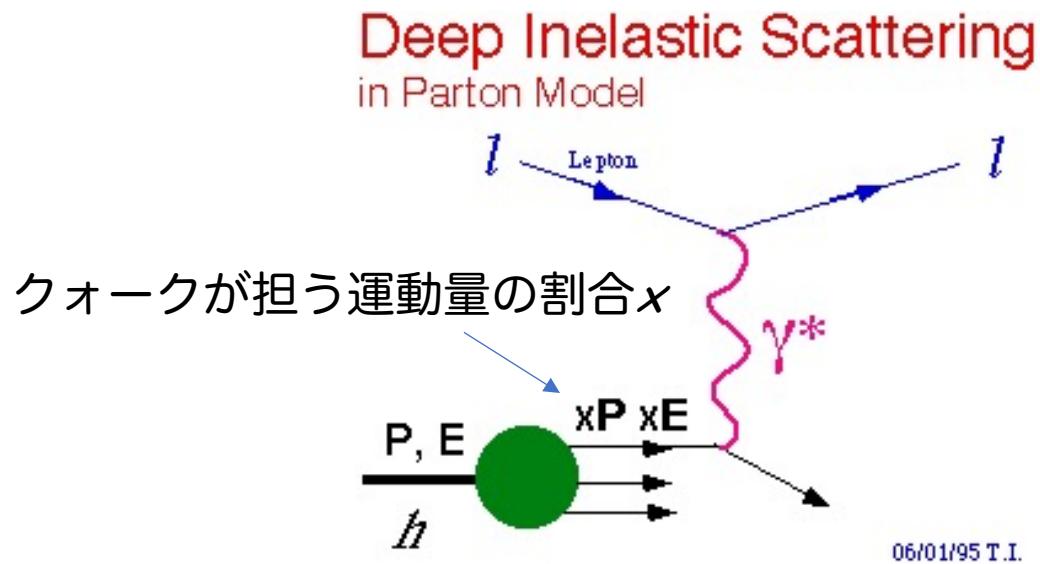


偏極深弾性散乱(DIS)実験

非対称度の測定



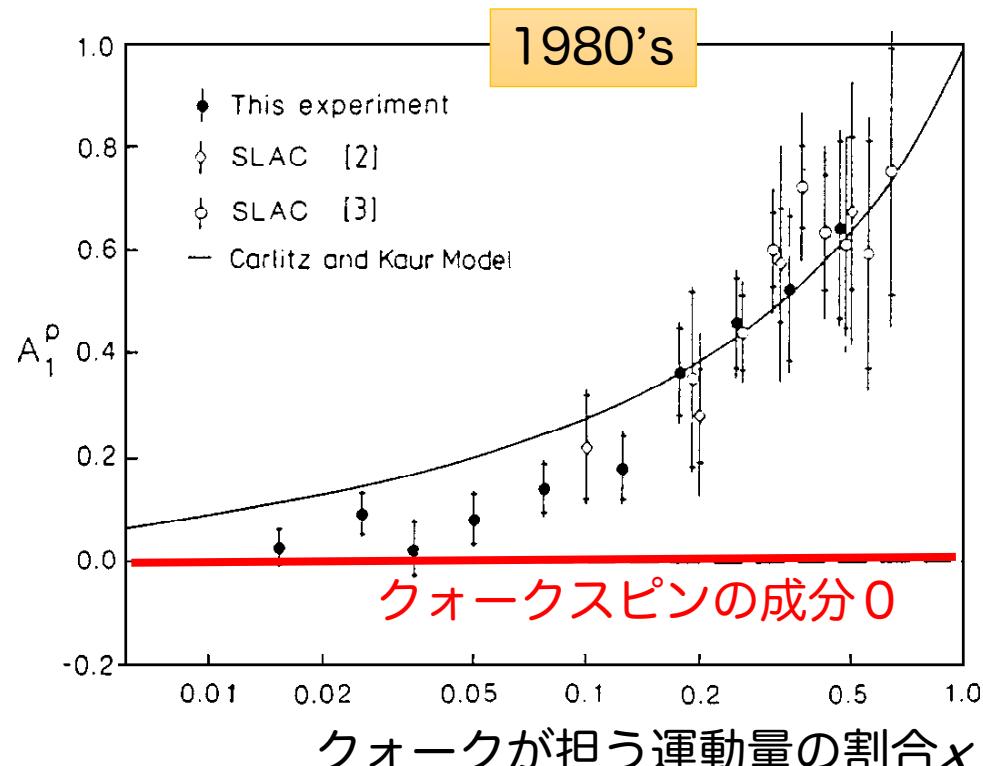
陽子スピンのクオーケスピニン成分



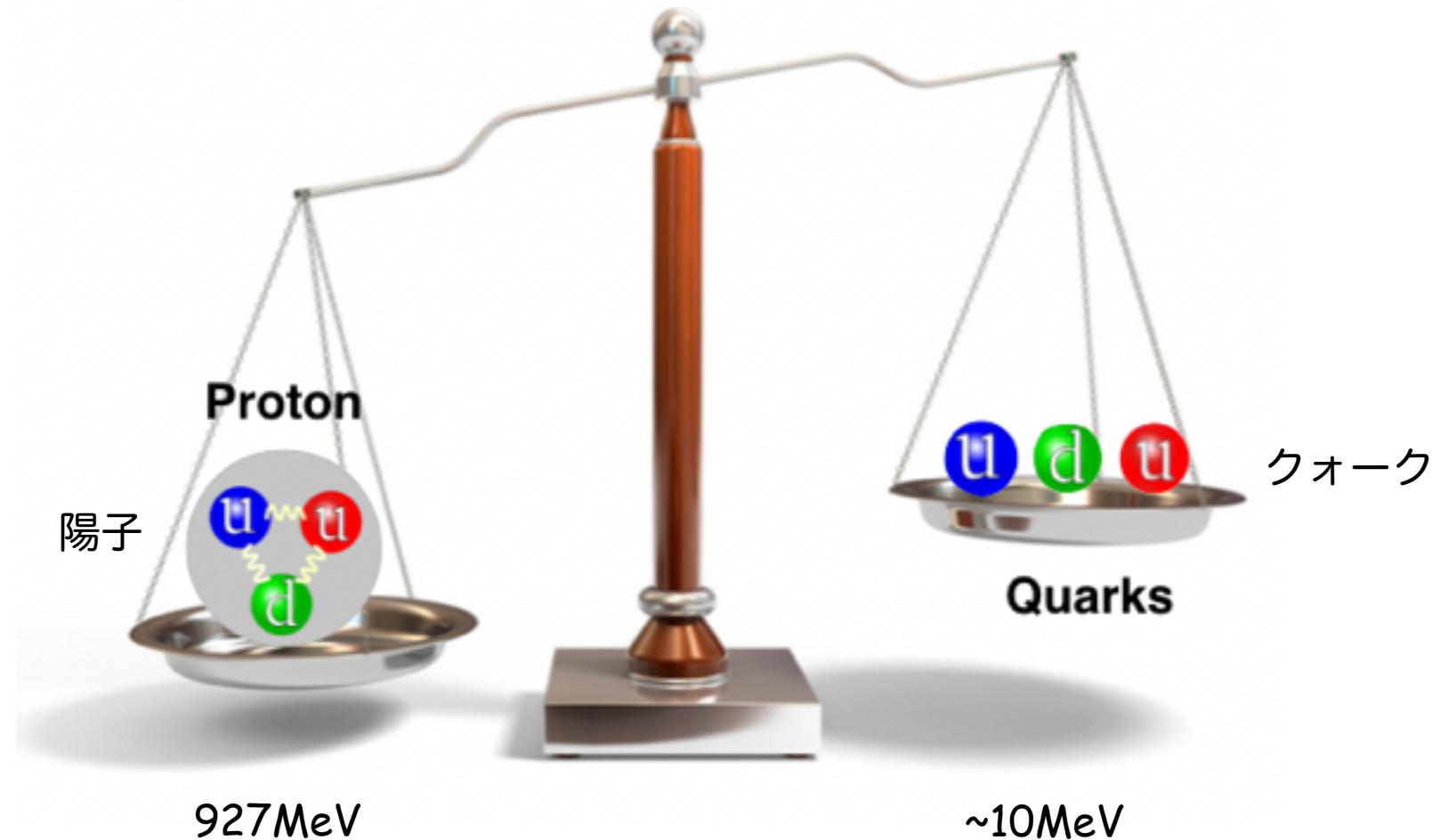
$$\int_0^1 dx g_1^p(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{4}{9} \Delta u + \frac{1}{9} \Delta d + \frac{1}{9} \Delta s \right]$$

$$= 0.123 \pm 0.013(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst})$$

どうやらクォークは陽子スピン $\frac{1}{2}$ の 25% 程度しか担っていないらしい



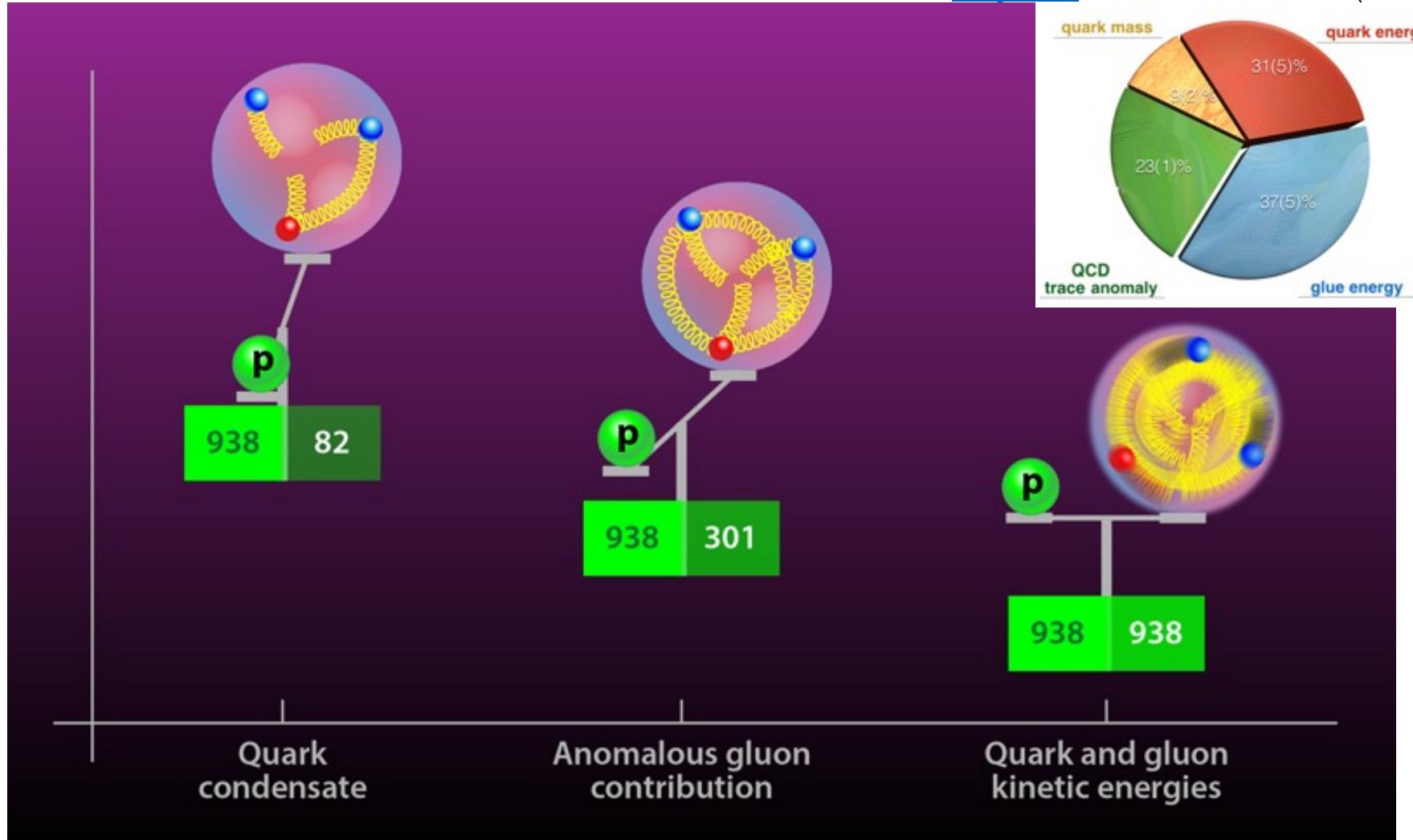
陽子の質量



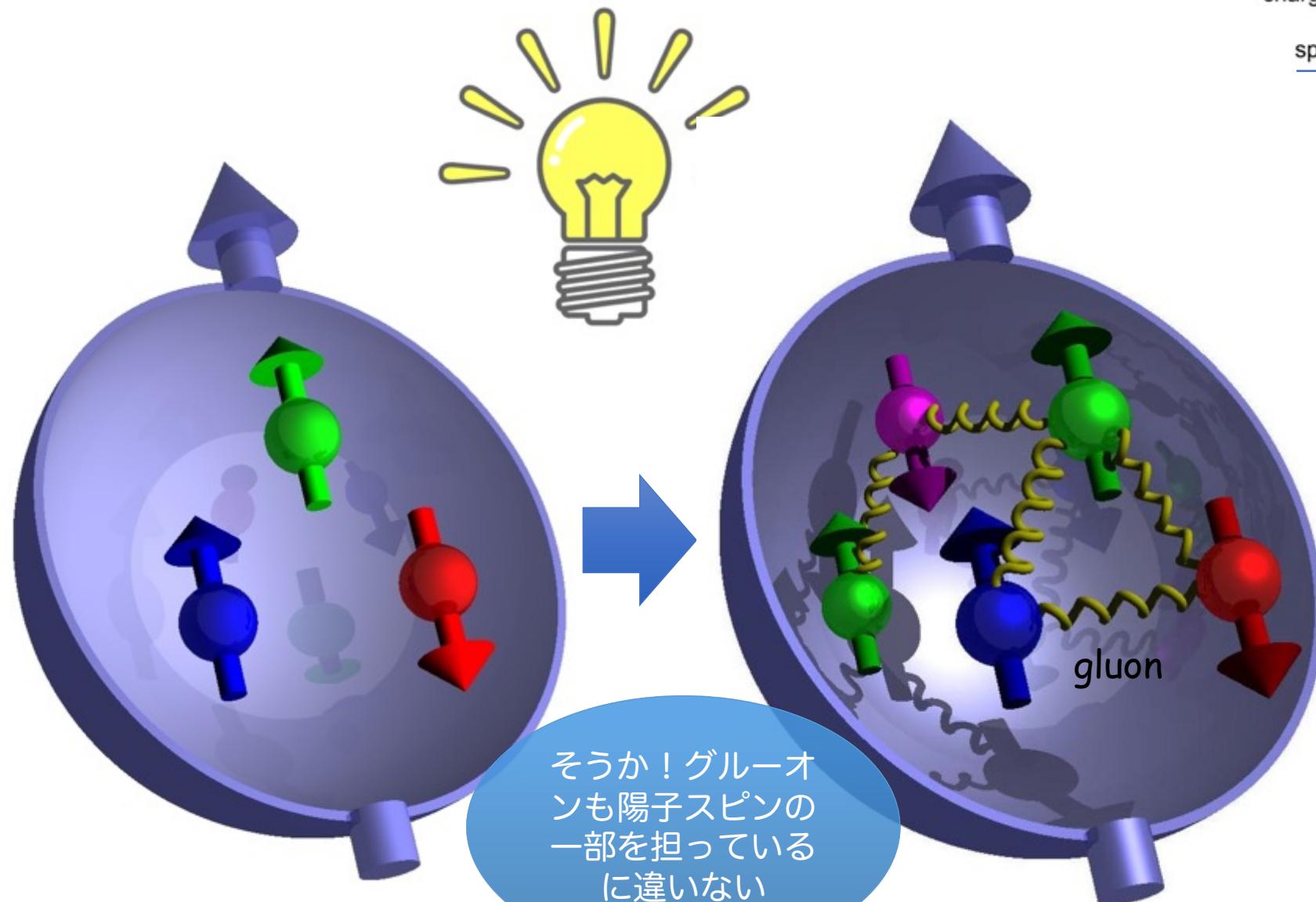
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$
charge →	$2/3$
spin →	$1/2$
	u
	up
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$
	$-1/3$
	$1/2$
	d
	down
QUARKS	

Origin of Proton Mass

[Yang, Yi-Bo et al. EPJ Web Conf. 175 \(2018\)](#)



陽子スピンのグルーオン成分



mass →	0
charge →	0
spin →	1

gluon

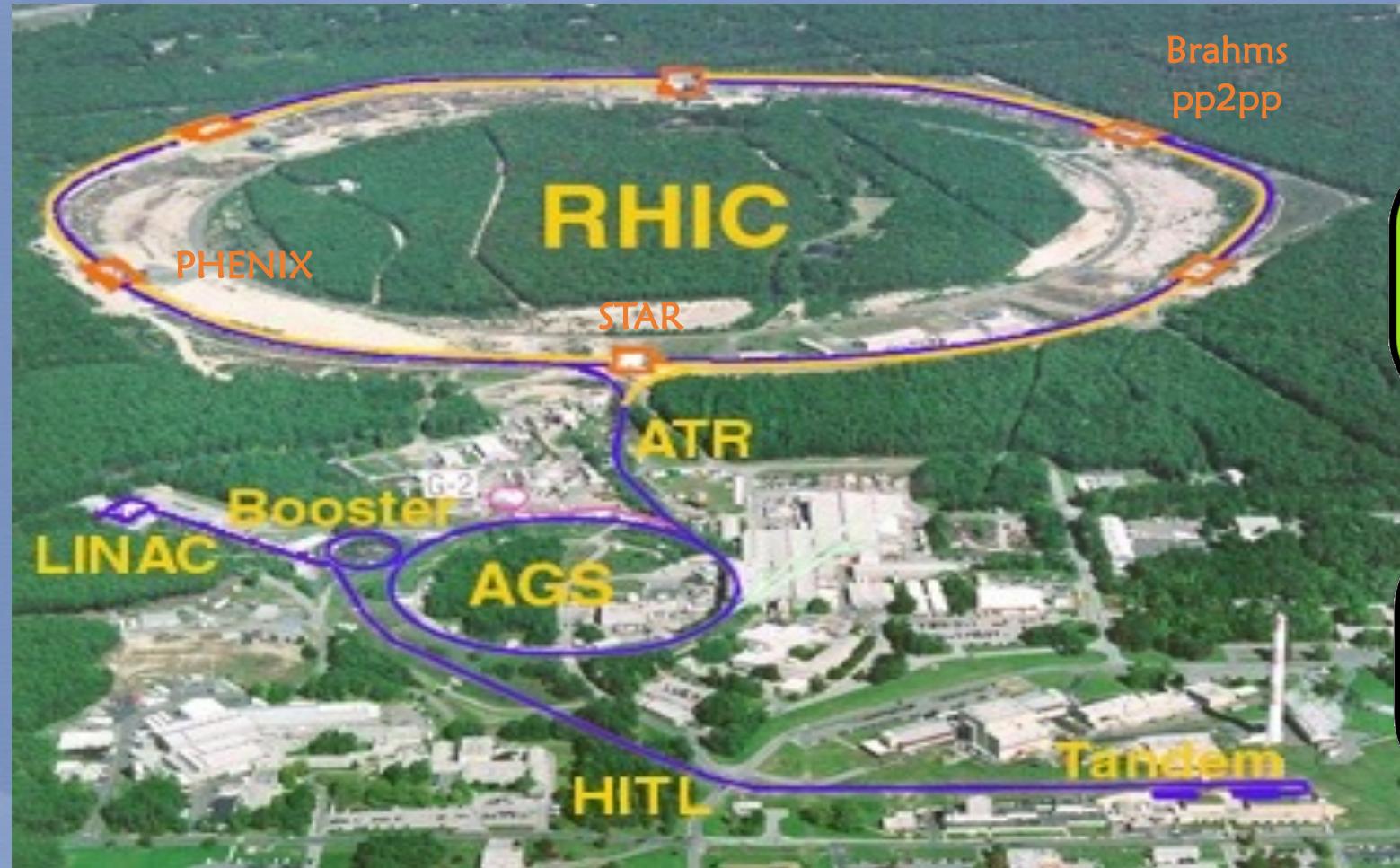
そうか！ グルーオンも陽子スピンの一部を担っているに違いない



The Relativistic Heavy Ion Collider

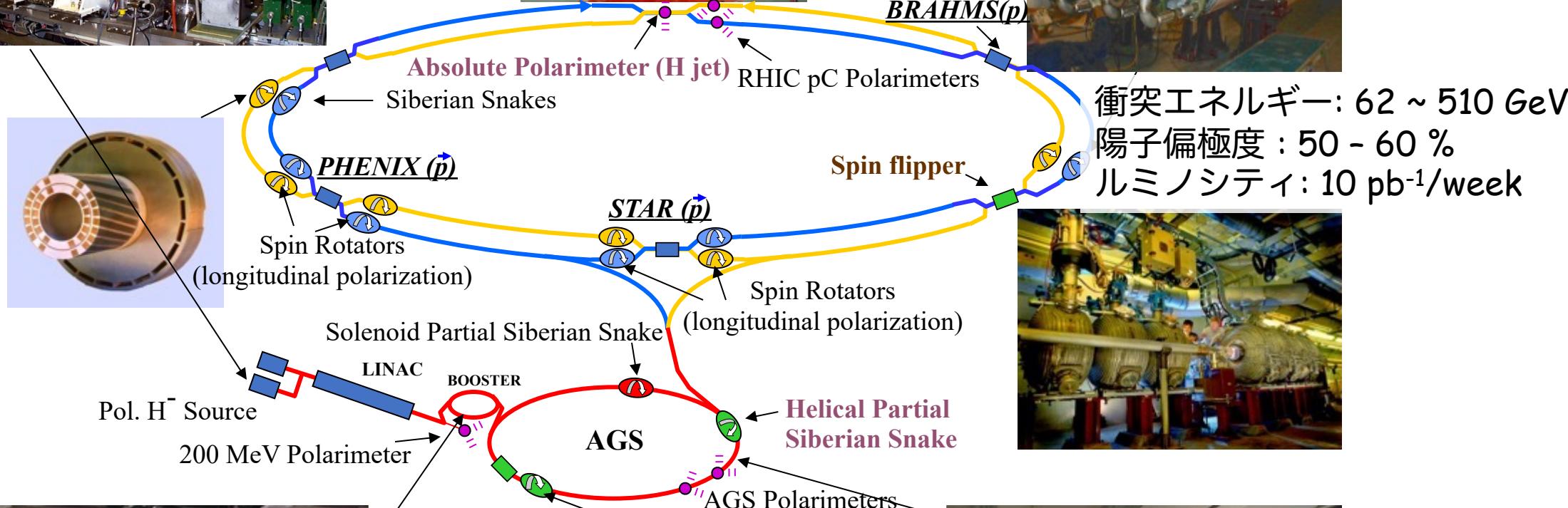
相対論的重イオン衝突型加速器

ブルックヘブン国立研究所

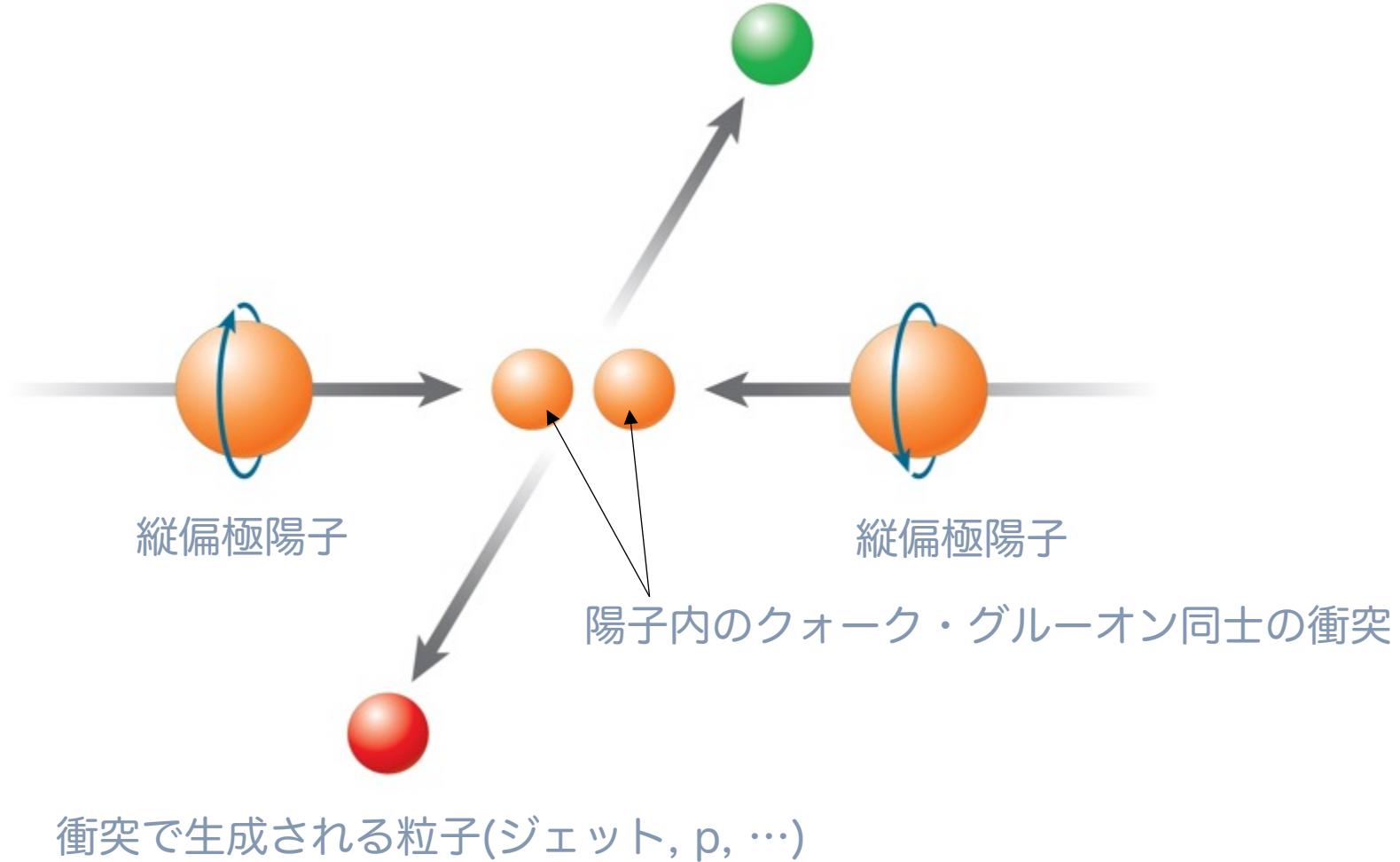


…か～ら～の～

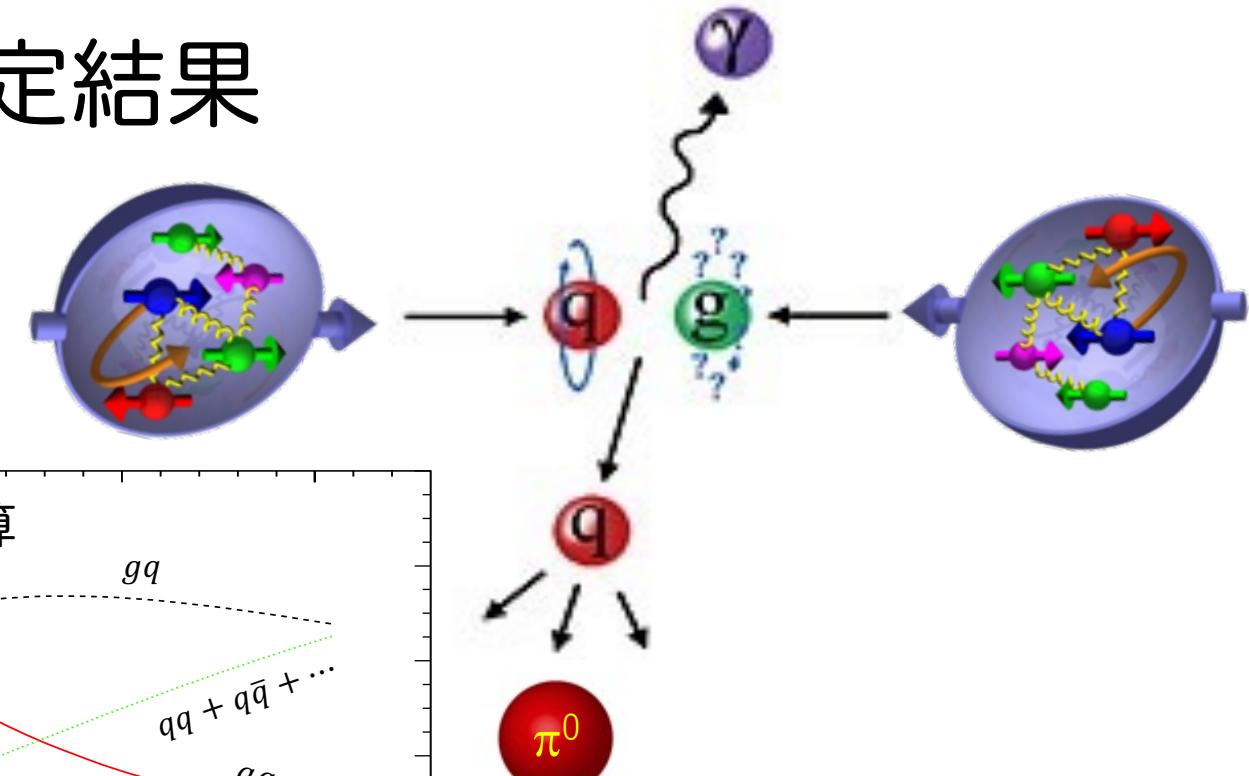
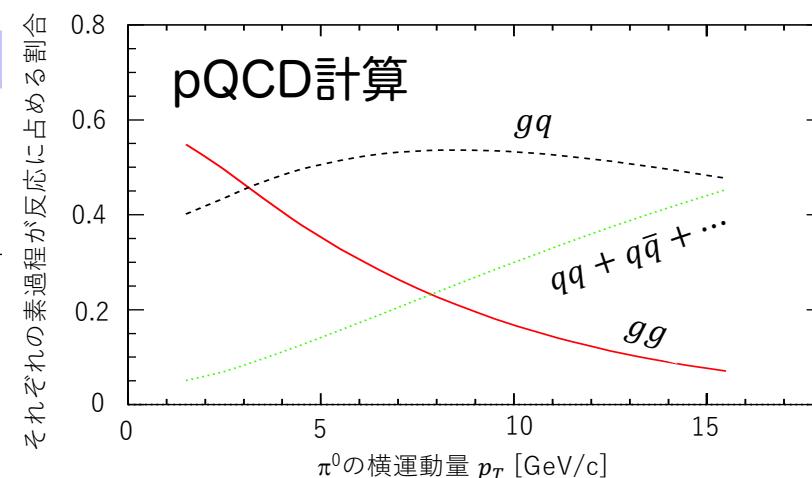
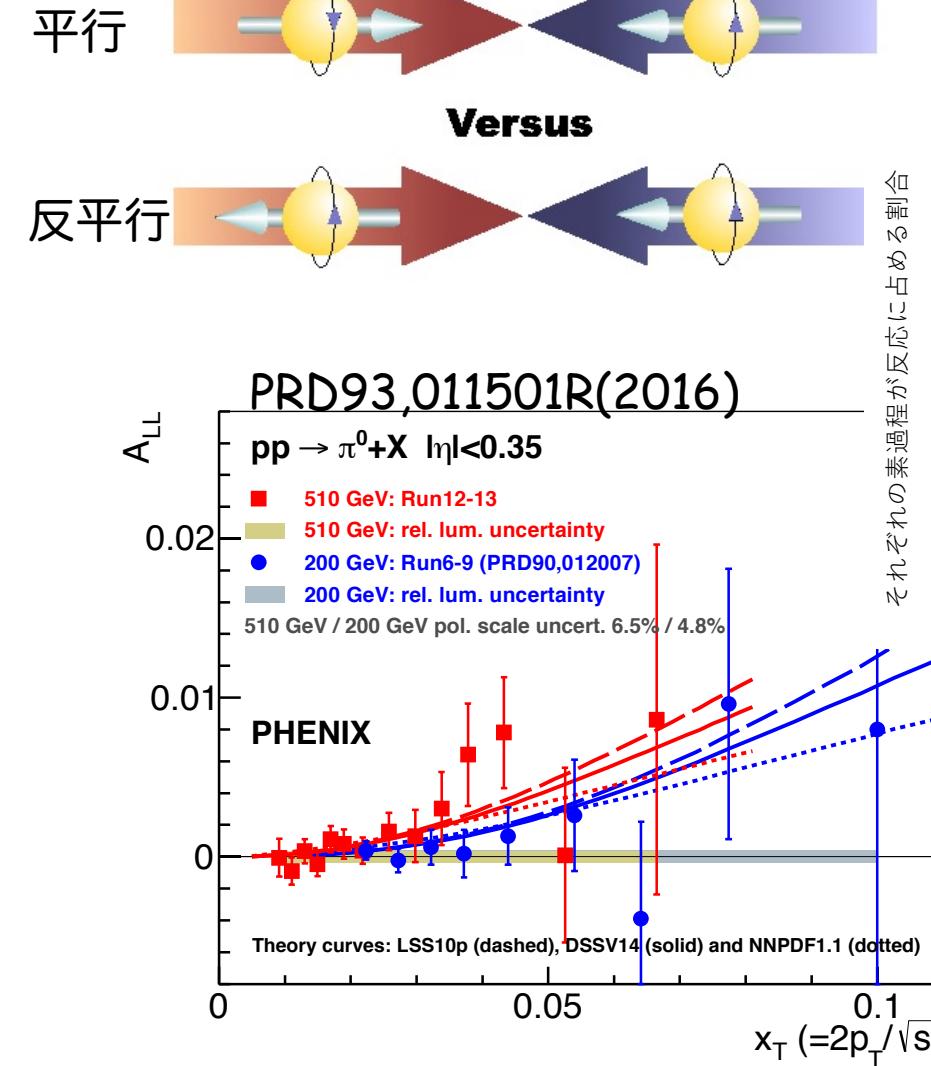
偏極陽子。



縦偏極陽子 + 陽子衝突



グルーオン成分の測定結果

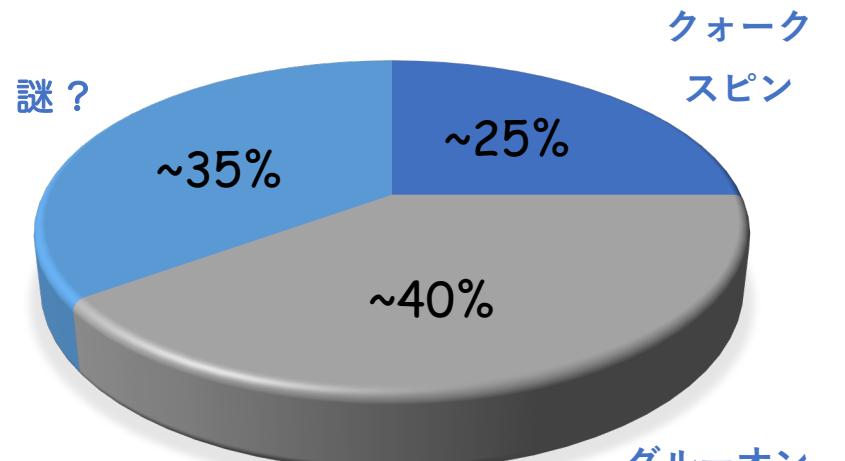
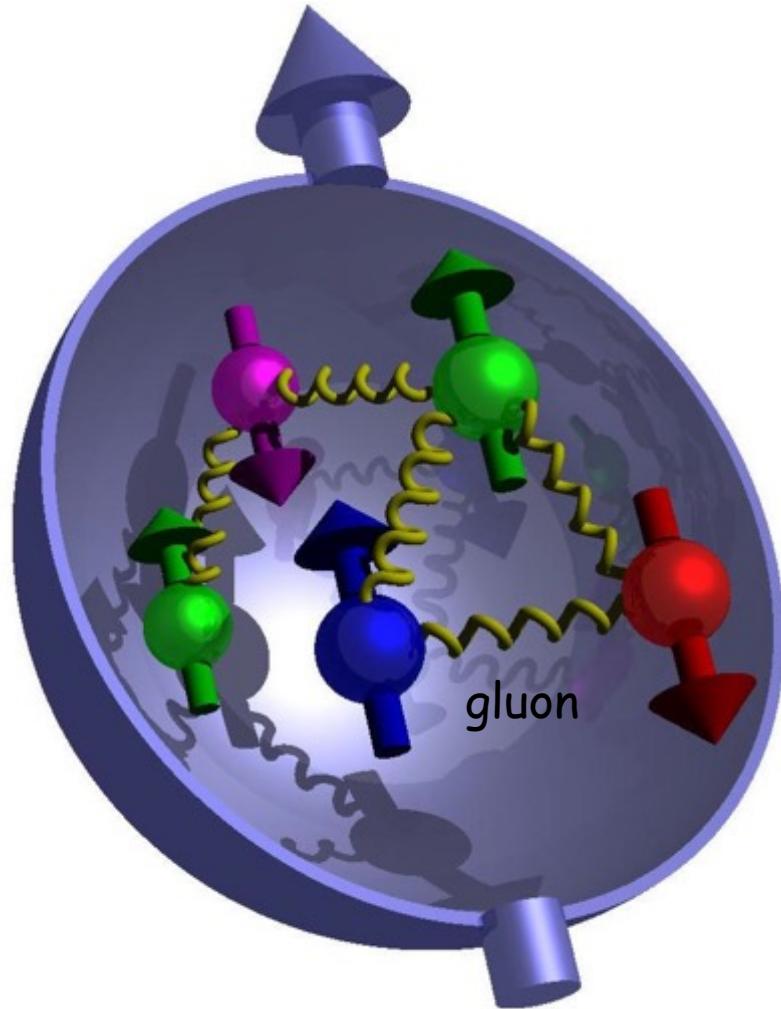


グルーオンスピンの積分値

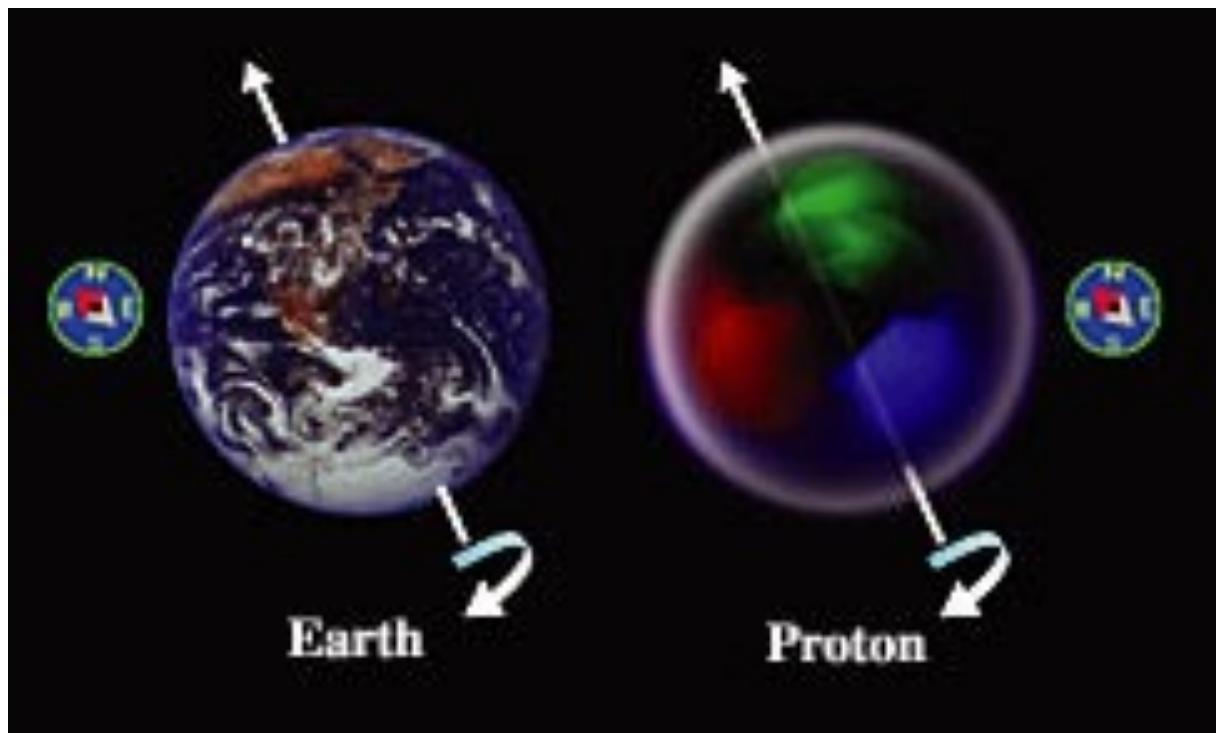
$$\int_{0.05}^{0.2} \Delta g(x) dx = 0.2 \pm^{0.06}_{0.07}$$

陽子スピンの30 ~ 40% (範囲は限定的)

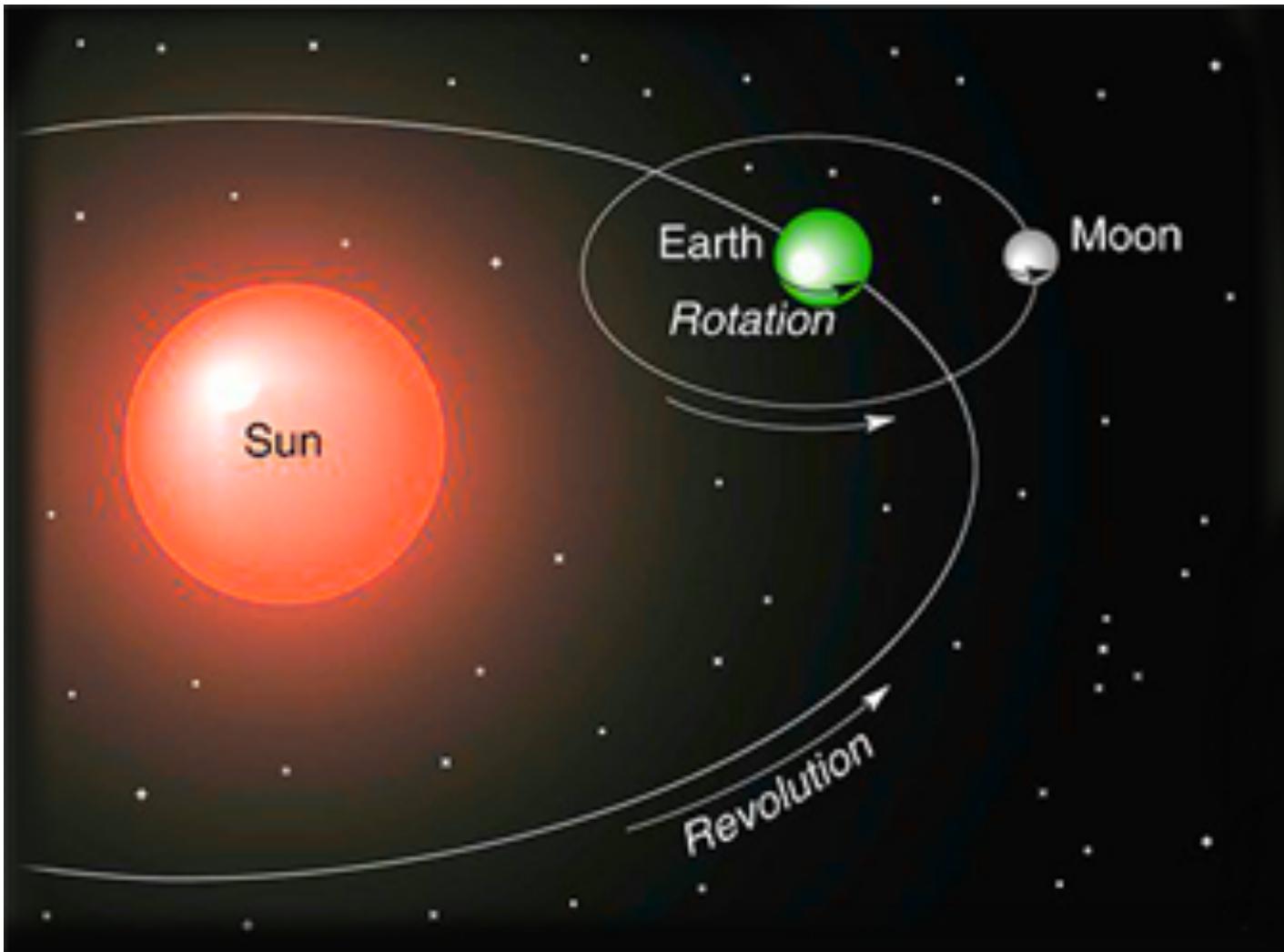
で?



なんか忘れてね?



軌道角運動量



角運動量保存則

「回転させやすい」
慣性モーメントが「1」



「回転させにくい」
慣性モーメントが「3」



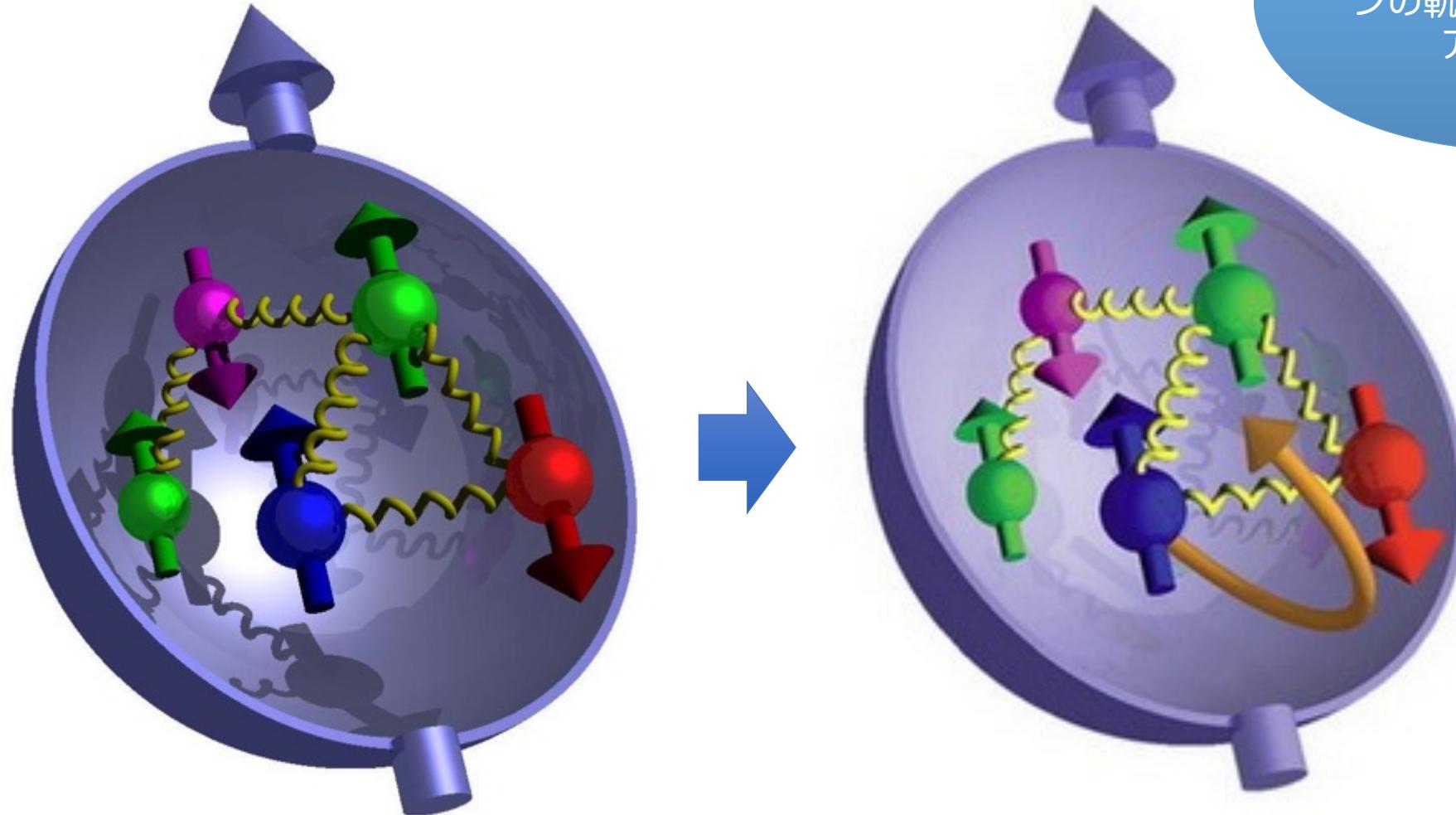
腕を抱えて慣性モーメントが3分の1になると...
回転速度（角速度）は3倍になる

スピン

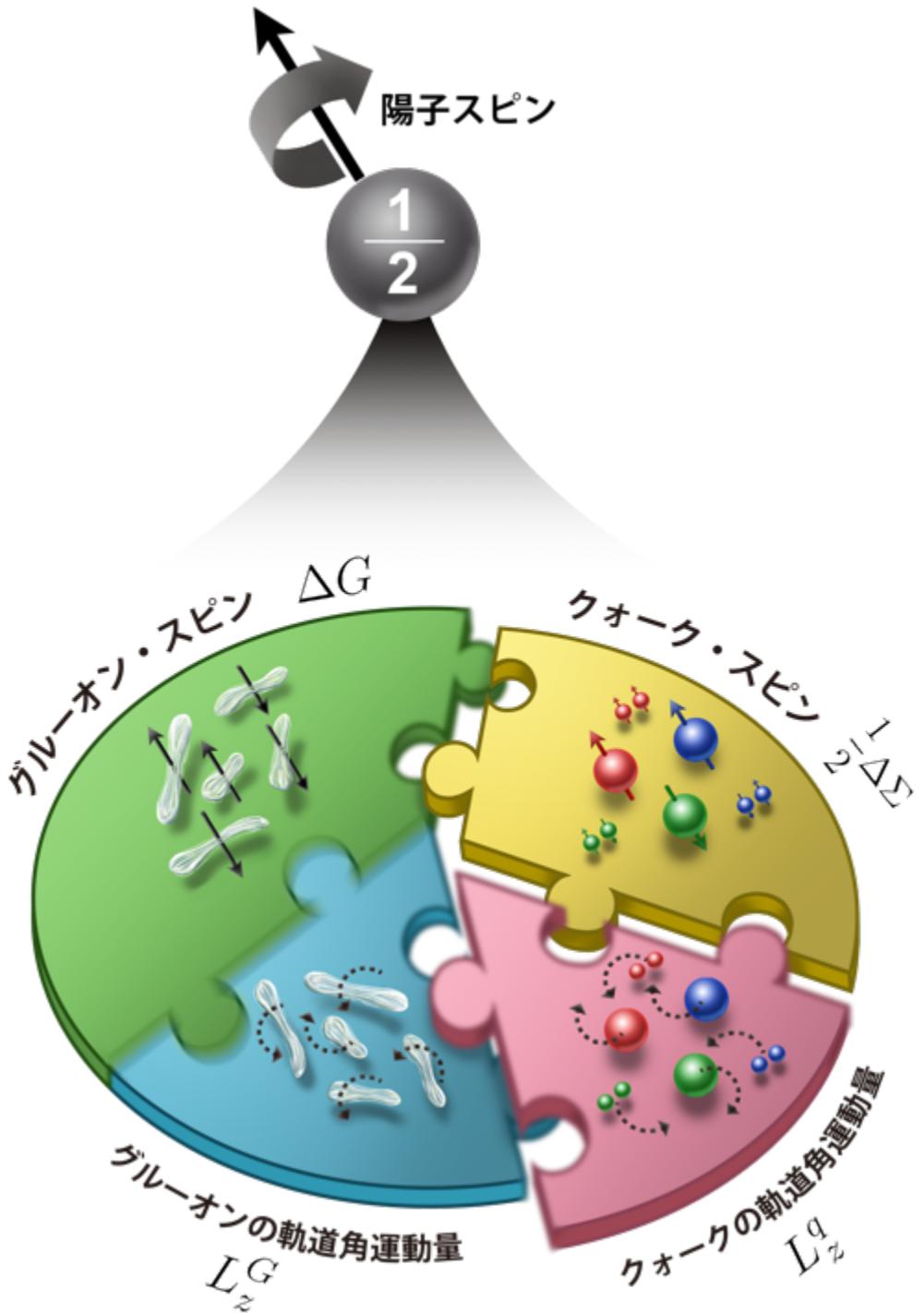


軌道角運動量

陽子のスピン構造



クォークとグルーオンの軌道角運動量もありか！



陽子スピンの和則

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

↓ ↓ ↓

$\sim 25\%$ $\sim 40\%$??

1980's 2000~2018

クォークスピン

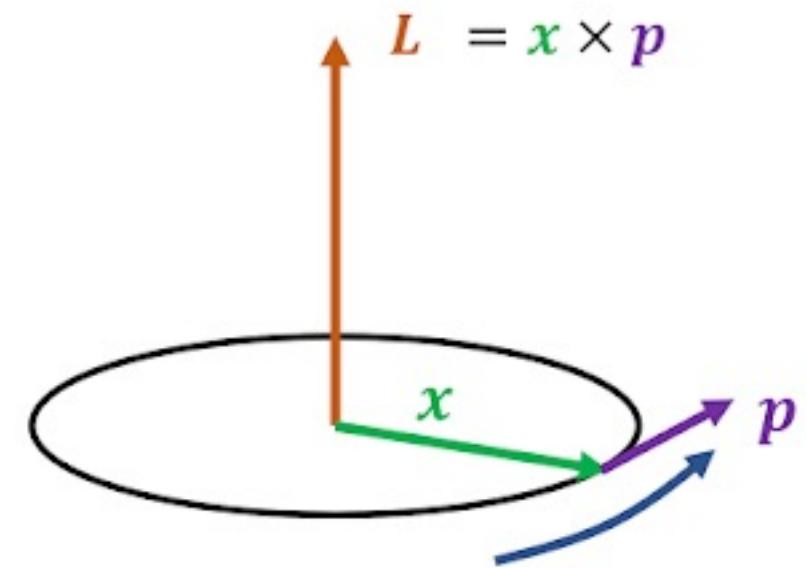
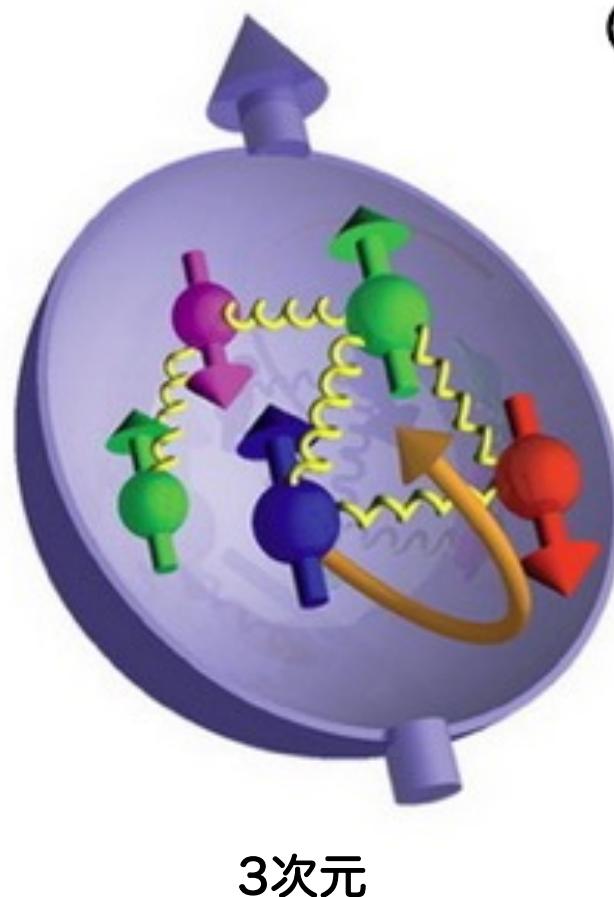
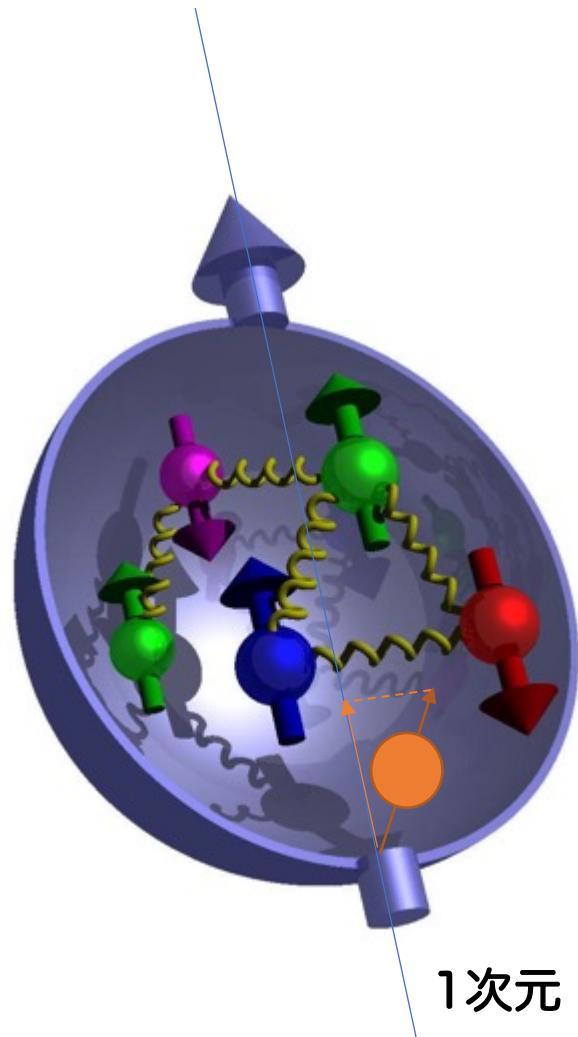
$$\Delta\Sigma = \int (\Delta u + \Delta d + \Delta s + \Delta \bar{u} + \Delta \bar{d} + \Delta \bar{s}) dx$$

グルーオンスピン

$$\Delta G(x) = \int \Delta g(x) dx$$

OK, Then let's
measure L !!

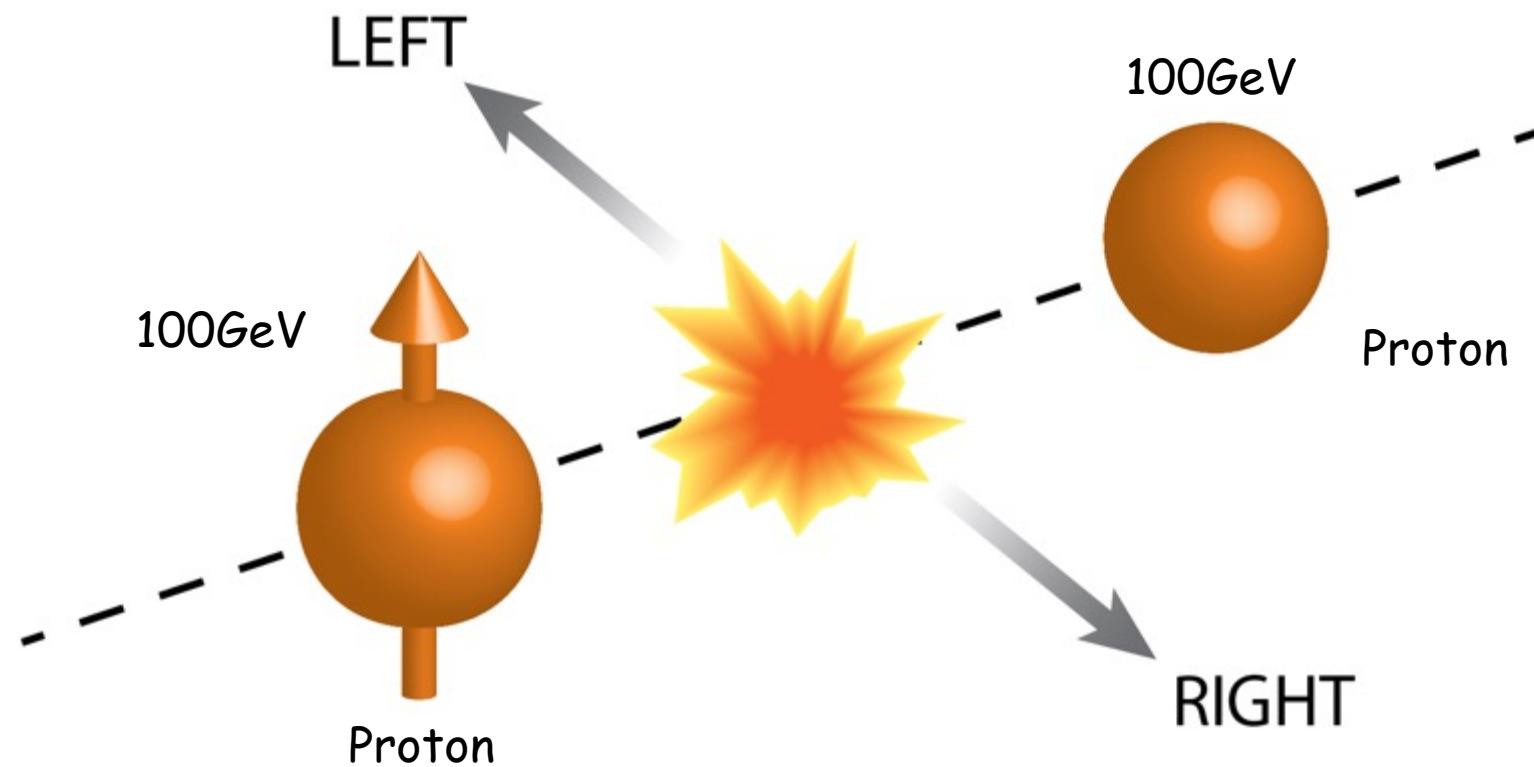
軌道角運動量の測定



<https://st-phys.blogspot.com/>

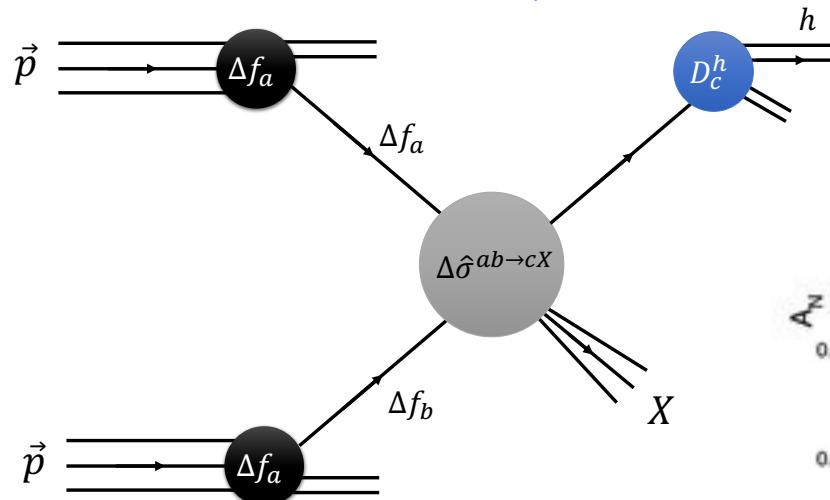
Not easy to
measure L

横偏極シングルスピン非対称性

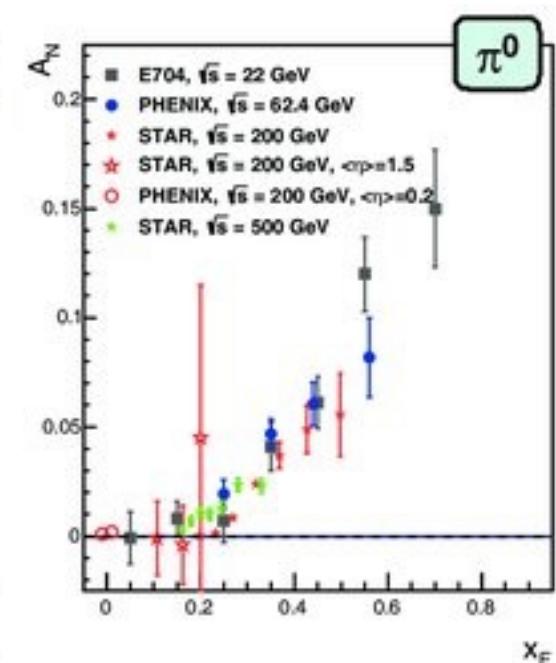
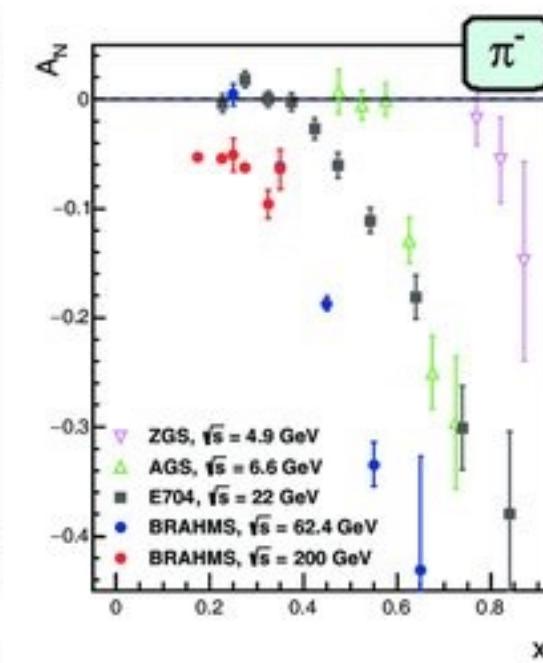
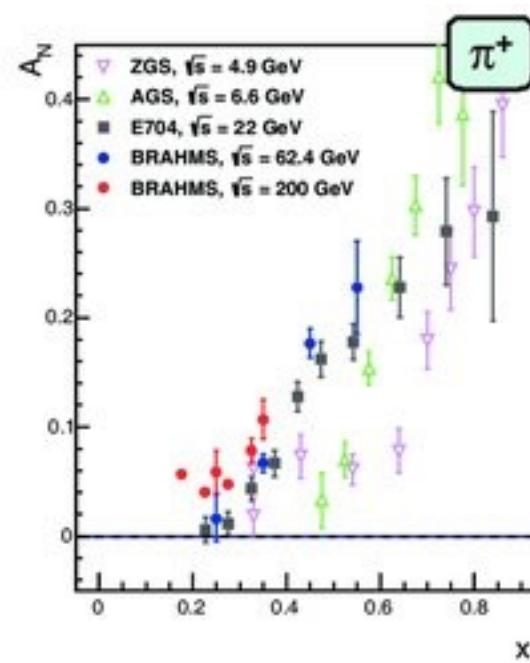


横偏極シングルスピン非対称性

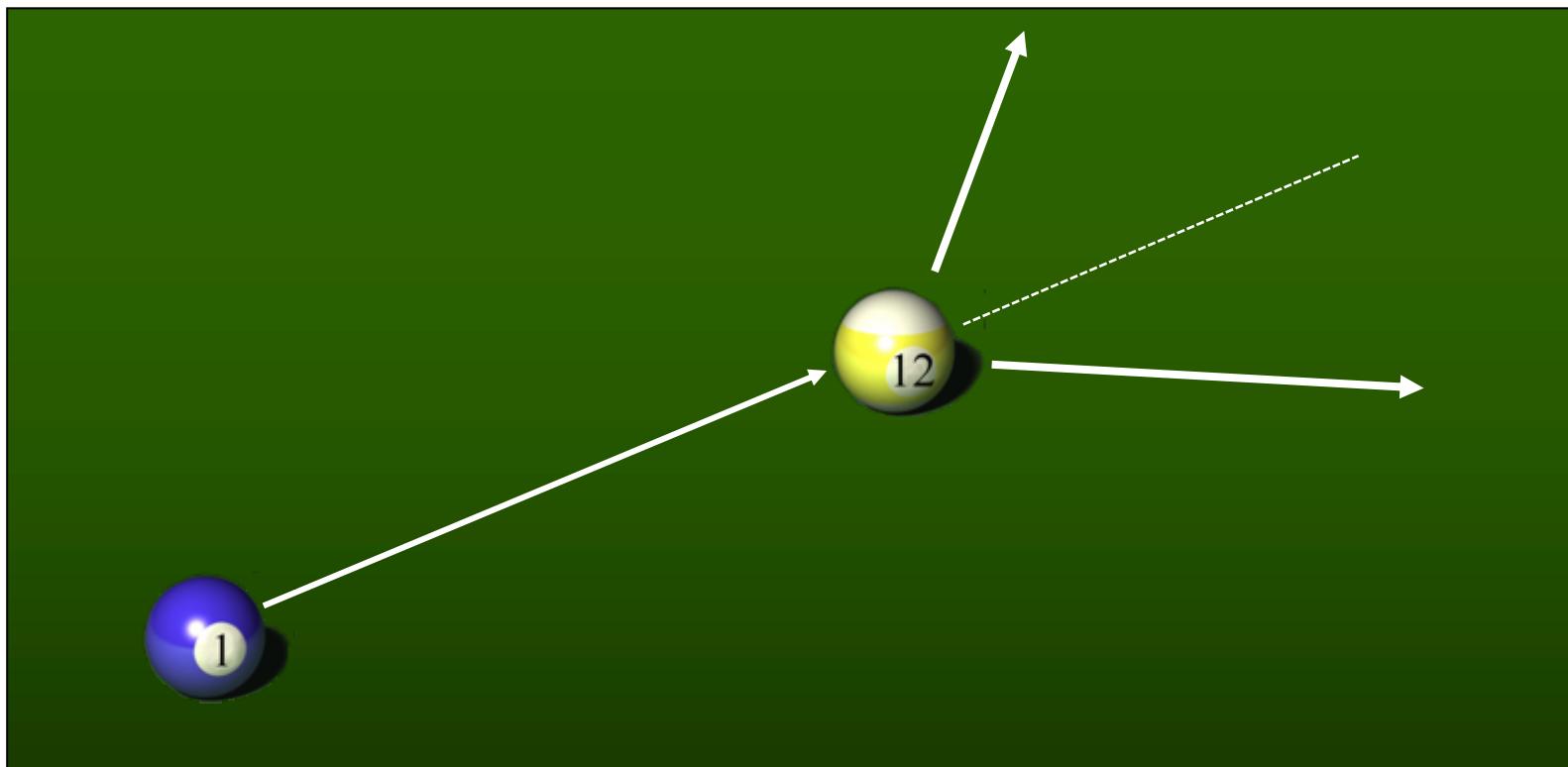
Inclusive hadron production



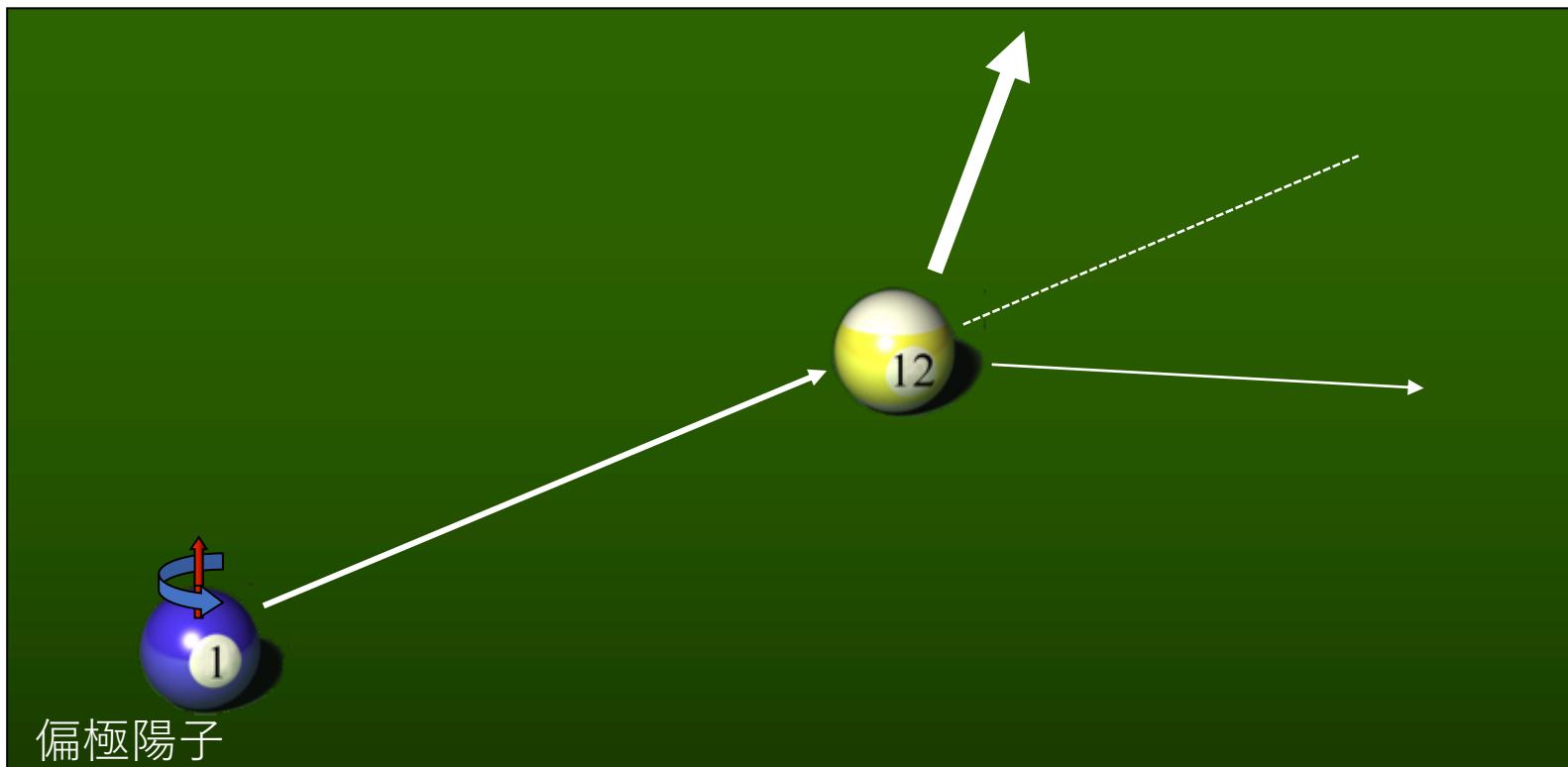
巨大な非対称性を観測！



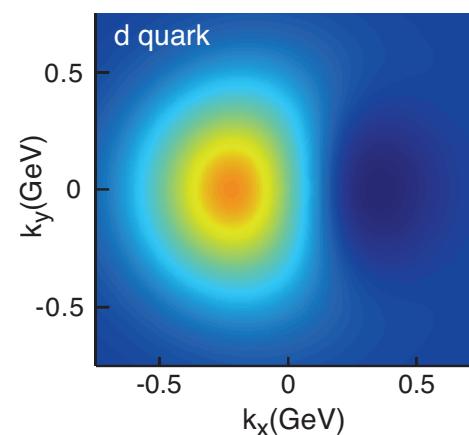
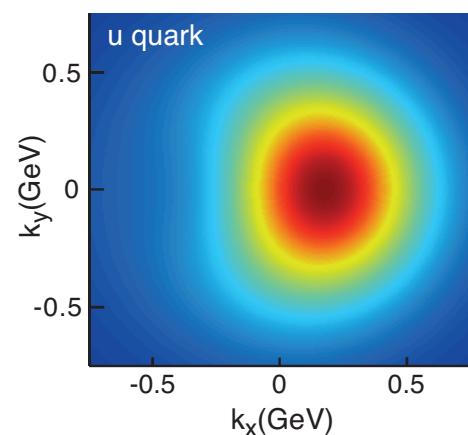
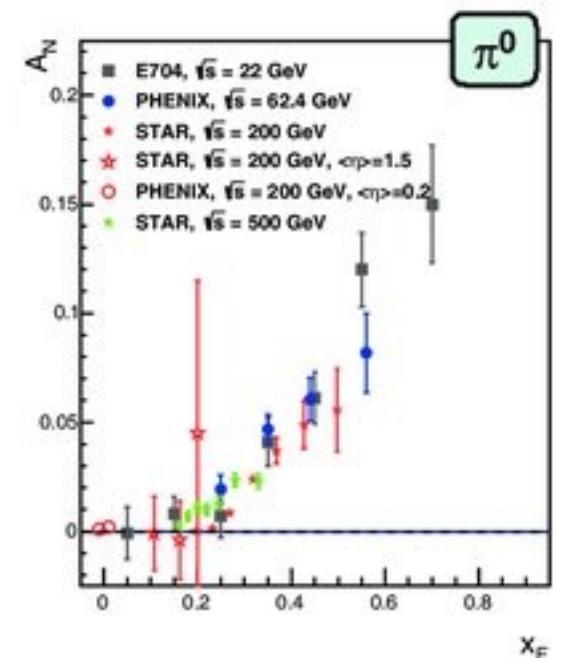
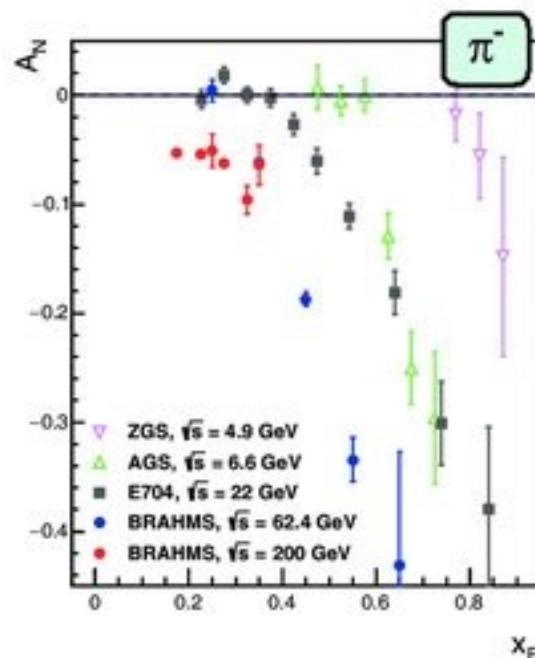
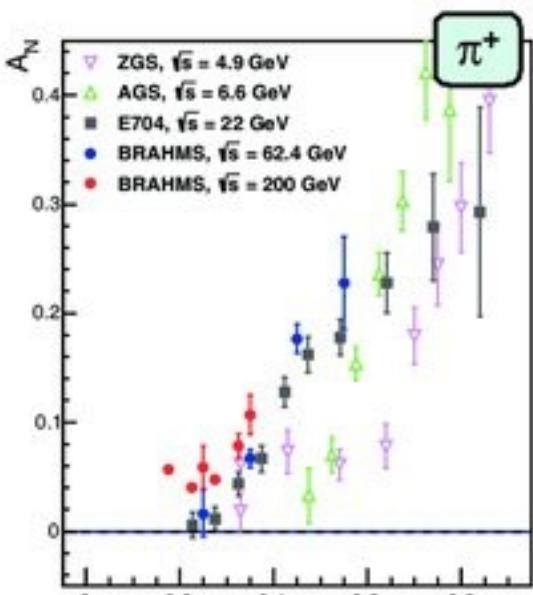
非偏極の場合



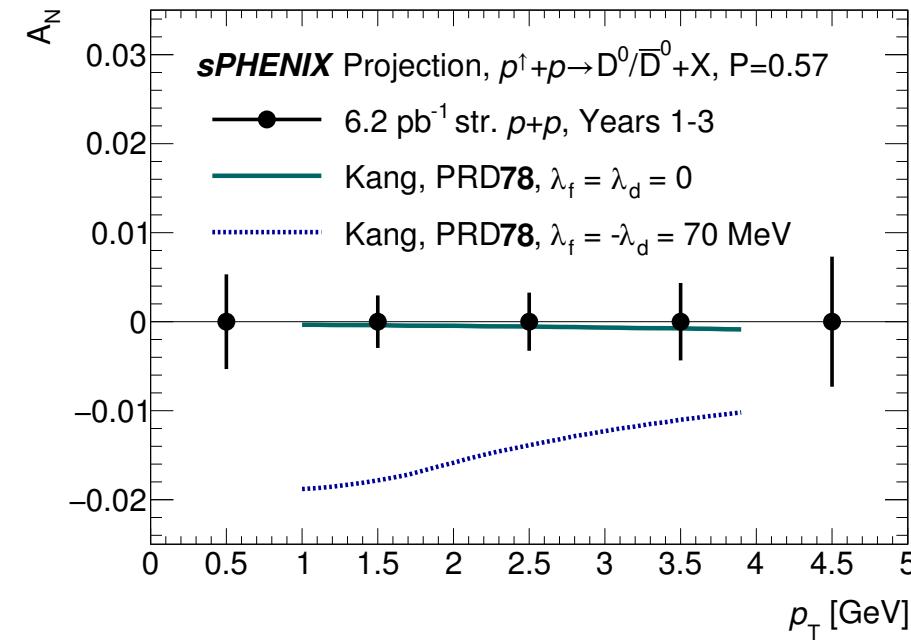
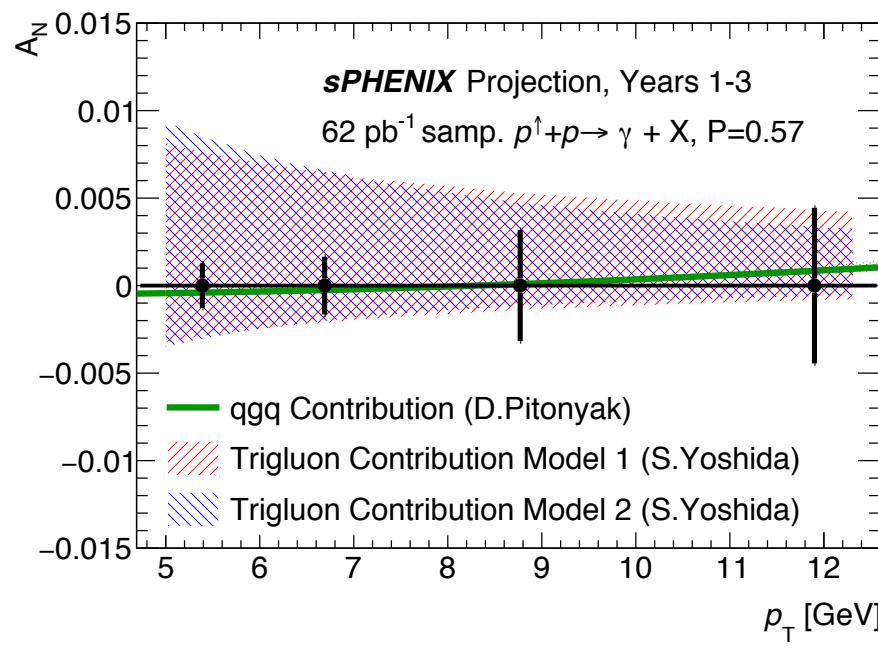
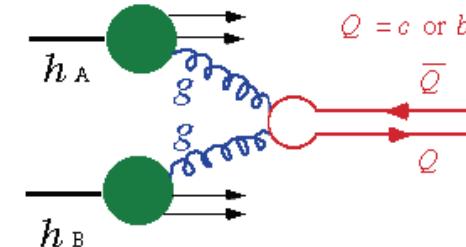
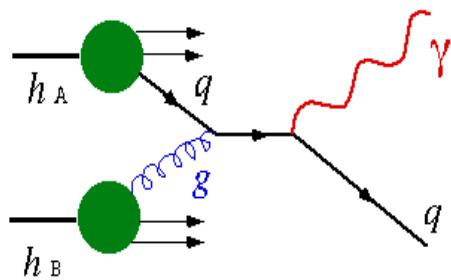
非偏極の場合



横偏極の場合

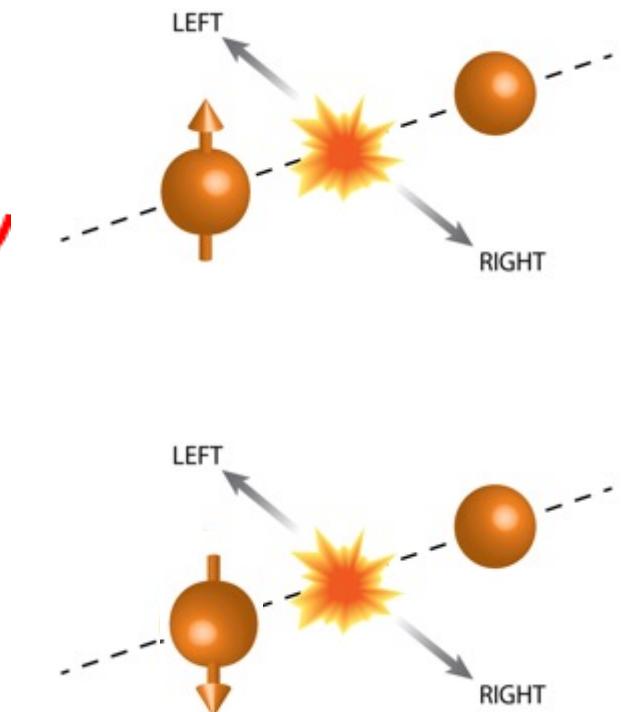
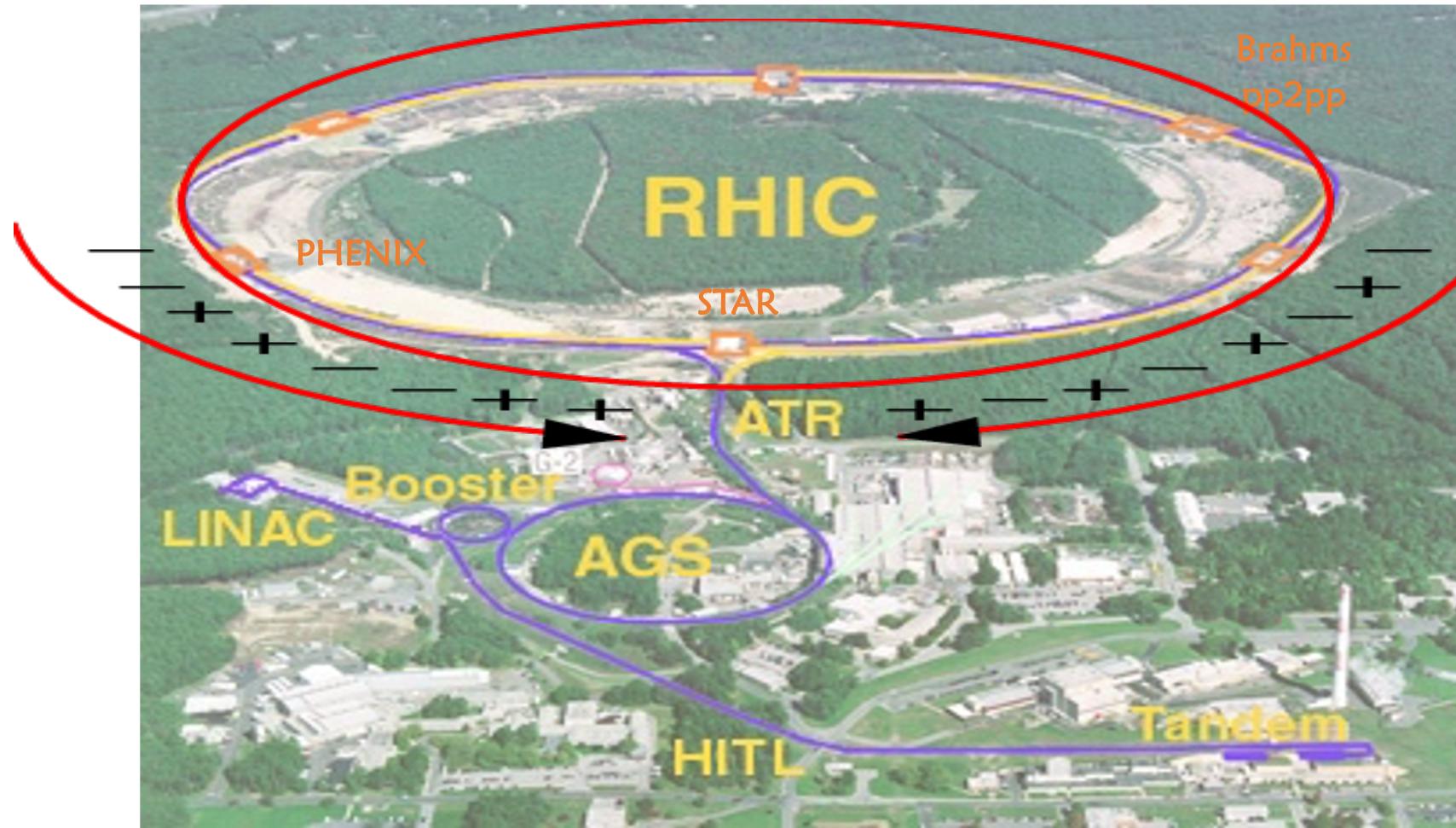


じゃあグルーオンは？



INTTの役割

1 beam clockの
時間分解能



日本初のレントゲン(1918年)
2次元



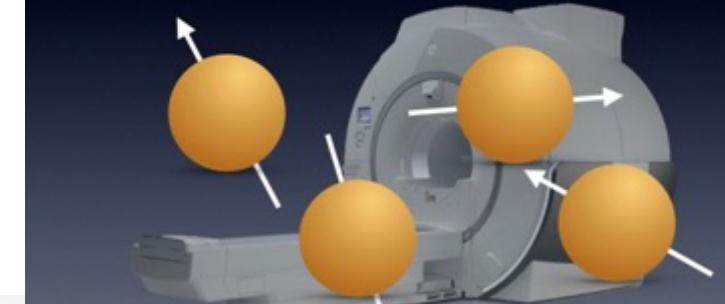
CTスキャナー(1989年)
3次元



3次元イメージング と医療の発展

MRIの原理？

MR装置内で磁場は一定方向を向いている（静磁場）
中に入るとプロトンは同じ方向を向く（基底状態）



https://camic.jp/movielist/mri01_202203/

MRI

高機能3テスラ
磁気共鳴診断装置

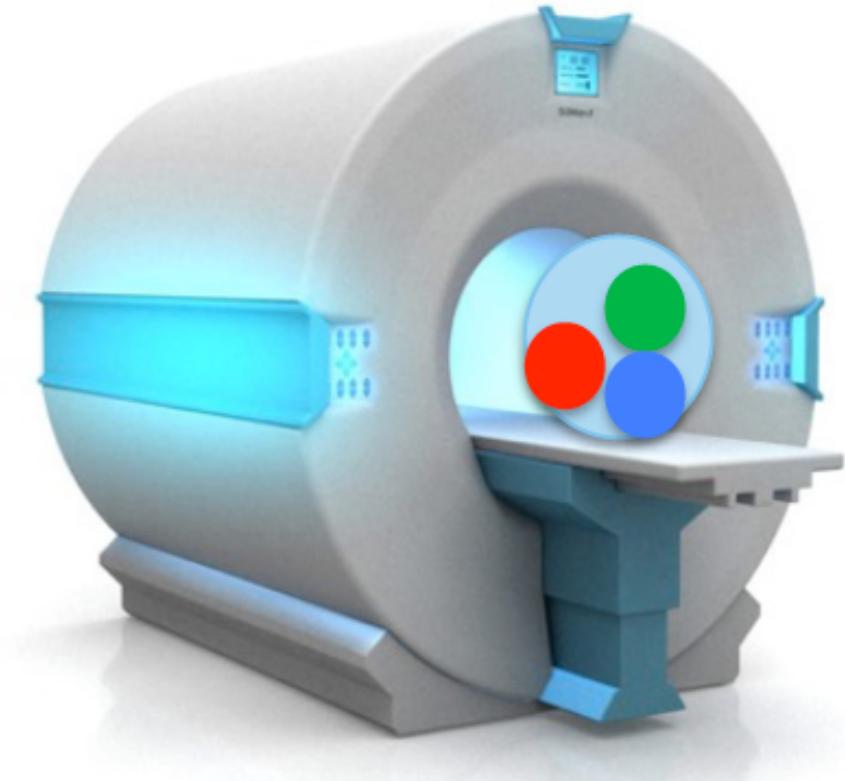
MAGNETOM Skyra 3.0T

今日

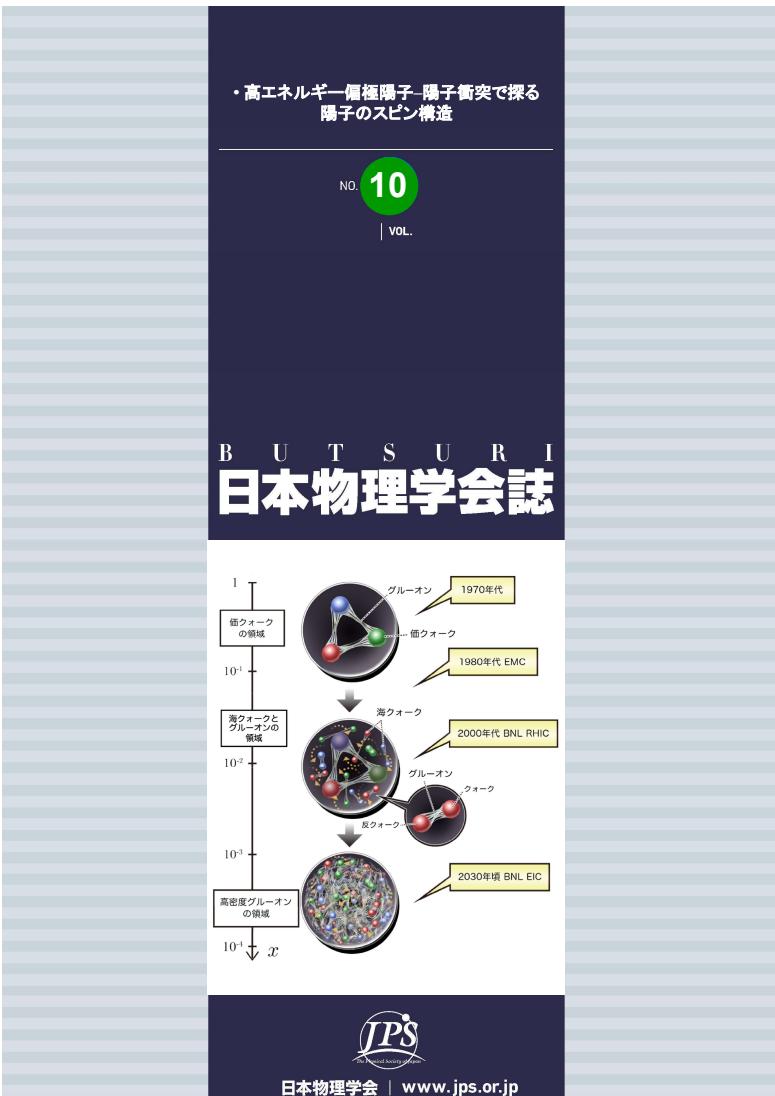


まとめ

- ・陽子スピニ和則の検証は、クォーク・グルーオンのスピニ成分にあたりをつけた。
- ・軌道角運動量の成分の特定はこれから。
- ・sPHENIXではグルーオンの角運動量成分測定に挑む。



興味を持ったら…



日本物理学会誌第77卷 第10号 (2022)

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
仁科加速器科学研究センター
goto@riken.jp



Ralf Seidl

理化学研究所
仁科加速器科学研究センター
rseidl@riken.jp



中川 格

理化学研究所
仁科加速器科学研究センター
itaru@riken.jp

—用語解説—

偏クォーク：
核子、中性子等ハドロンの量子的実体を担うクォークおよび反クォーク。陽子の場合+2/3の電荷を持つクォークが二つと-1/3の電荷を持つクォークが偏クォーク。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。これら一組を丁寧に測定することで、ピースの大きさや輪郭がはっきりし、全てのピースが出来ることで陽子スピン+1というパズルが完成し、謎解きが完結する。



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

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である+1は3つの偏クォーク電荷の総和でうまく説明できるため、陽子のスピンも同様に偏クォークのスピンが担うと思われた。

実際に高エネルギー偏極レpton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）**」と呼ばれる、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と予想された。

クォーク・スピンの寄与の特に華々しい実績を残してきた高エネルギー偏極レpton散乱実験だが、レpton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pton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、ようやくグルーオン・スピンの寄与はゼロではなく、おおよそクォーク・スpinの寄与

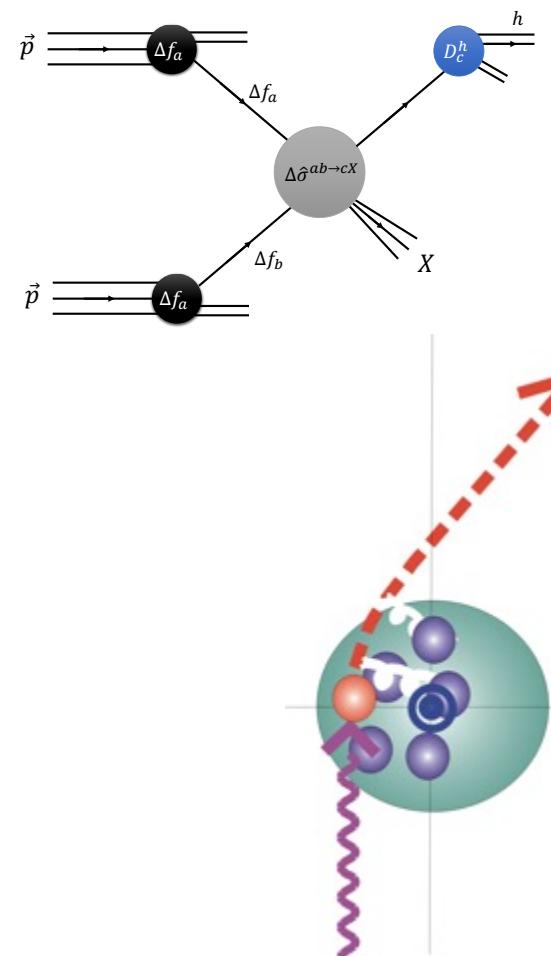
ぐらいである証拠を掴んだ。まだその精度は十分と言えるほど高くないが、クォークとグルーオンのスpinの寄与を足し合わせても、陽子のスpin全てを説明することはできない可能性が出てきた。陽子の構成要素はクォークとグルーオン以外にないのだから、それらのスpinの寄与を足し合わせて陽子スpinにならなければおかしいのではないか？何か見落としはないか？

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pinに寄与できる。つまり陽子スpinには、クォークとグルーオンのスpinの寄与とそれらの軌道角運動量の和で与えられる「**スpin和則**」が成立り立つ。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ないため、現時点では軌道角運動量の寄与はあまりよくわかっていない。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pin 1/2を構成要素から説明する研究は、陽子スpinに寄与しうるそれぞれの成分を一つ一つ高精度で測定し、最終的にスpin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pin、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pinパズルは偏極陽子-陽子衝突実験で解決まであと一歩のところまで追い詰めた。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。

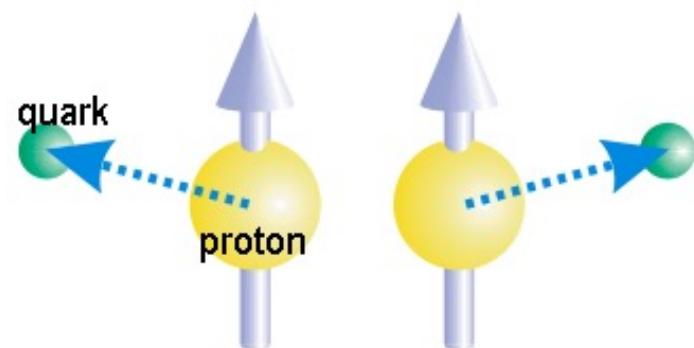
Backup Slides

Origin of Left-Right Asymmetry



Initial State Effect

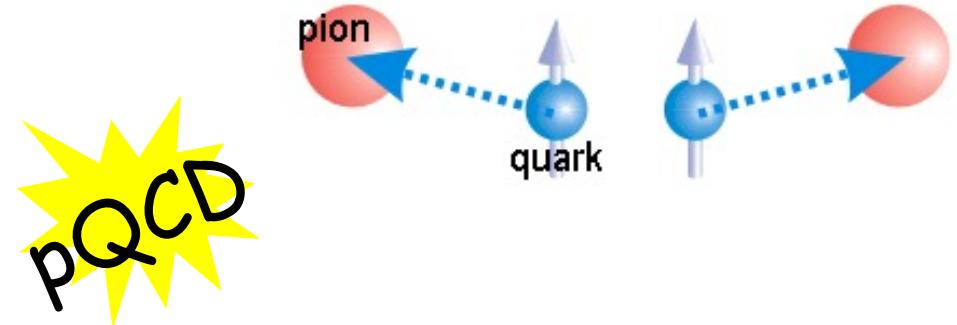
Sivers Mechanism



transverse-momentum
dependence of partons inside the
transversely-polarized nucleon

Final State Effect

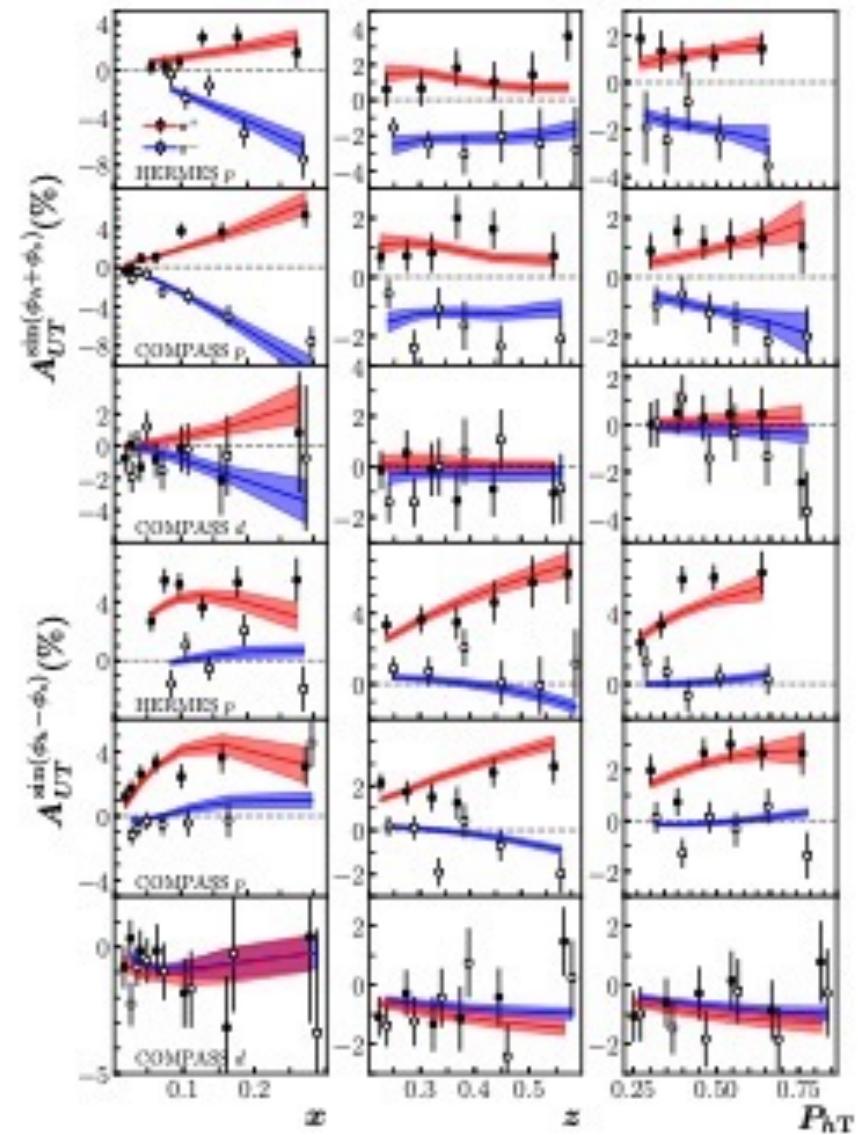
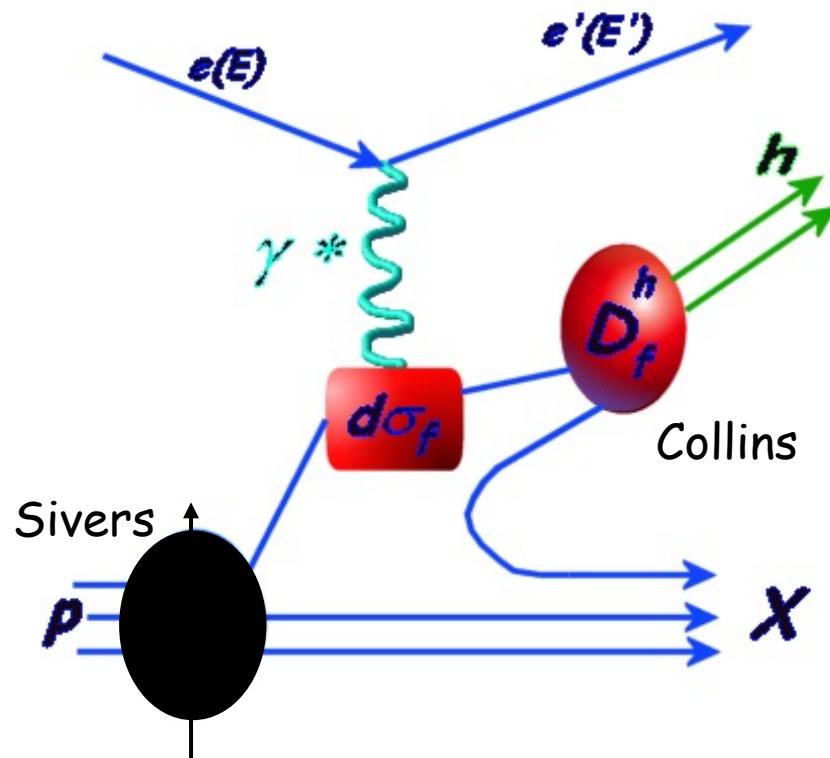
Collins Mechanism



correlation between transversely-
polarized nucleon and transversely
polarized partons inside

+ higher twist mechanism

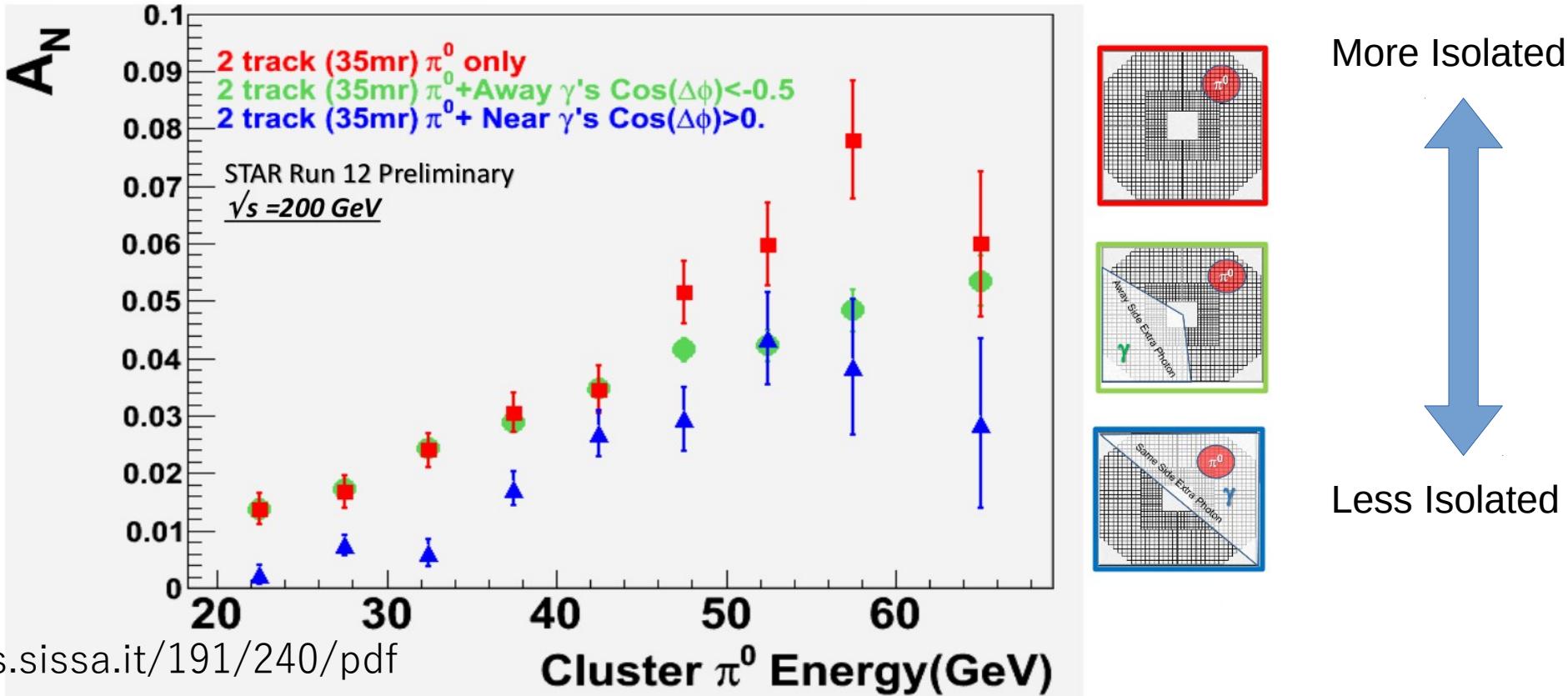
Semi-Inclusive Deep Inelastic Scattering



Sivers

Collins

Next Generation Measurement ~Activities around π^0 ~

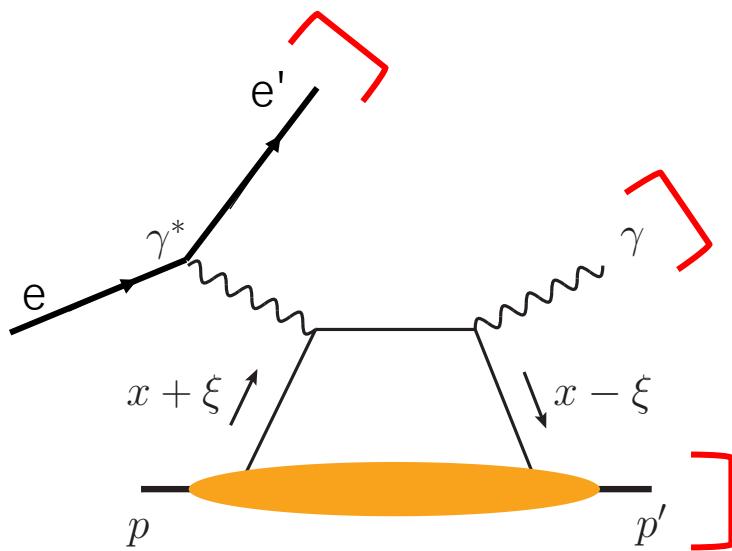


The more isolated π^0 , the larger the A_N .
Smaller A_N for jet-like events?

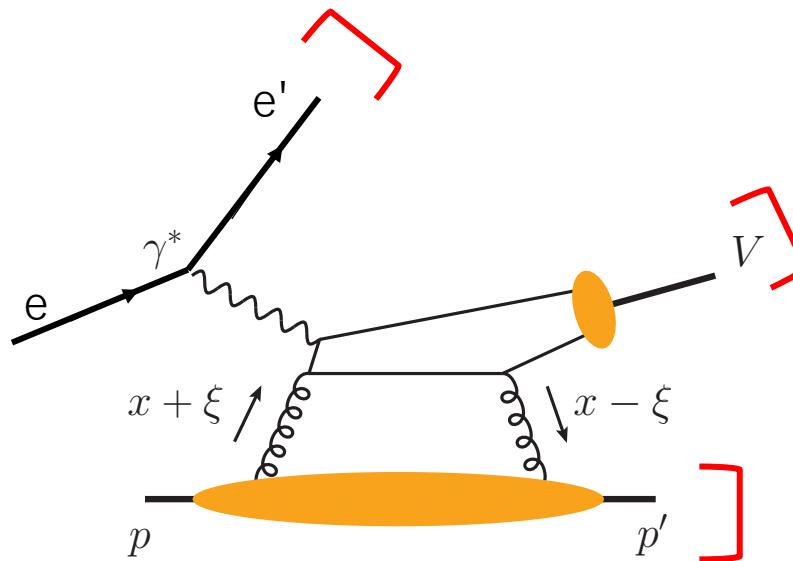
Collins Effect or Even Diffractive Nature A_N ?

What EIC can do for Orbital Angular Momentum?

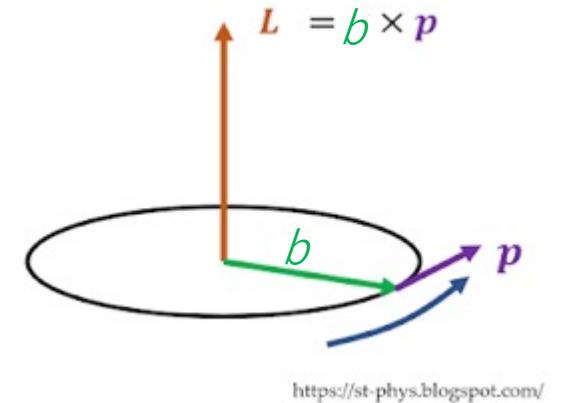
Exclusive Process



Deeply Virtual Compton Scattering
(DVCS)

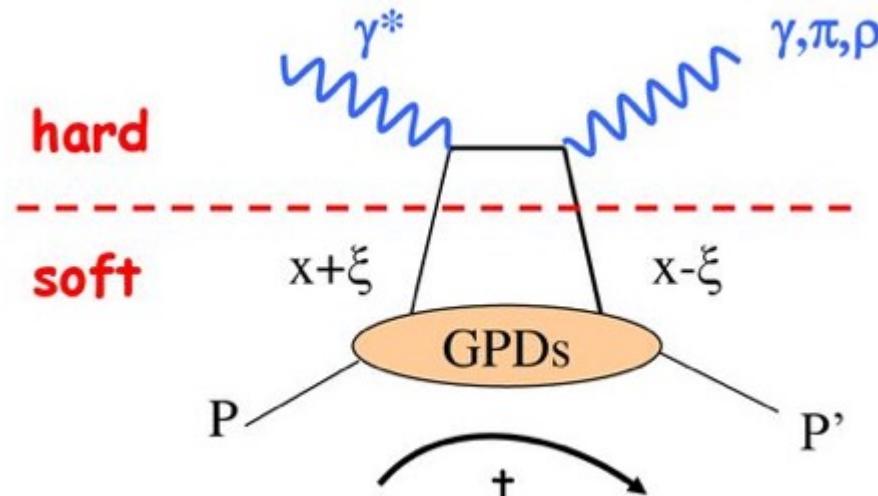


Deeply Virtual Meson Production
(DVMP)



<https://st-phys.blogspot.com/>

Generalized Parton Distribution (GPD)



Generalized Parton Distributions

for quarks :

4 functions $H, E, H, E(x, \xi, t)$

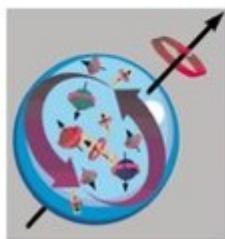
Factorisation:
 Q^2 large, $-t < 1 \text{ GeV}^2$

contains pdf
 $H(x, 0, 0) = q(x)$
measured in DIS

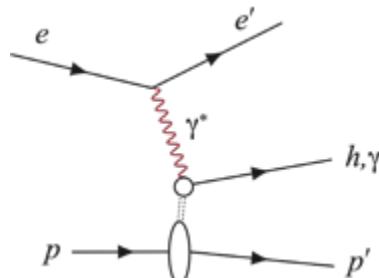
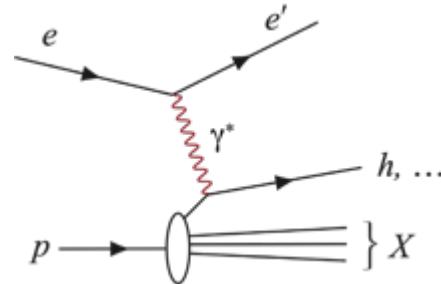
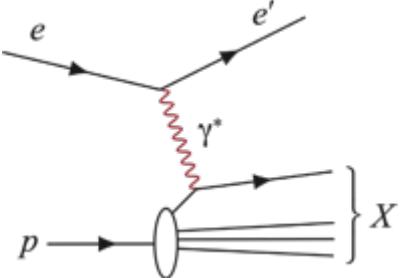
contains form factors
 $\int dx H(x, \xi, t) = F(t)$
measured in elastic scattering

contains information on the nucleon spin :

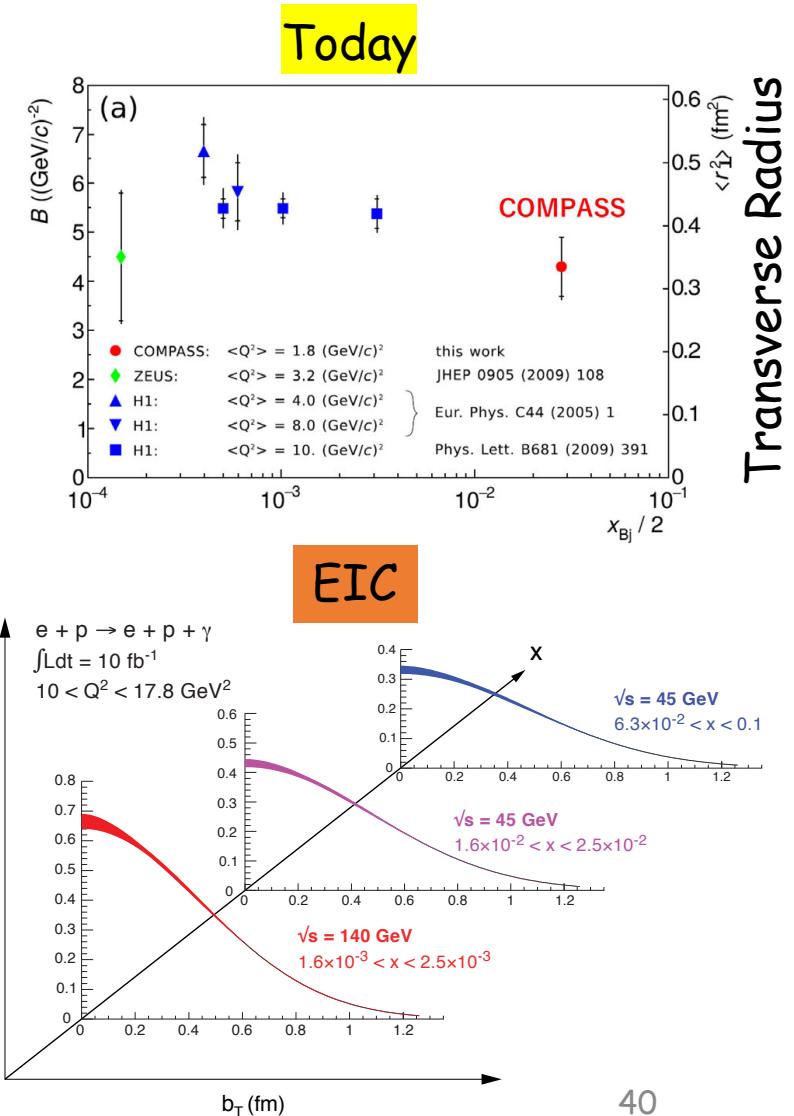
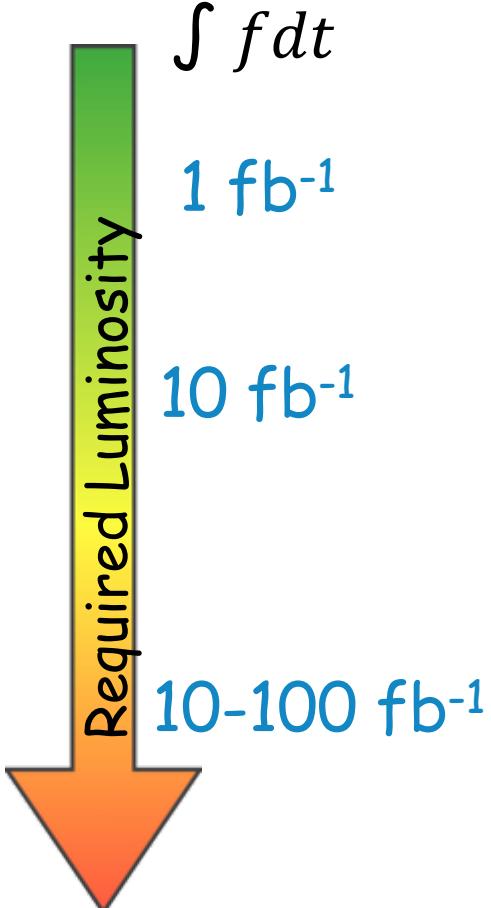
Ji's sum rule : $\int x(H(x, \xi, t=0) + E(x, \xi, t=0))dx = J_z$
and $1/2 = 1/2 \Delta\Sigma + L_z + \Delta G = J_z + \Delta G$



Expected Precision by EIC DVCS Measurements



- **Inclusive:** fine binning in x, Q^2
- **SIDIS:** 5-dimensional binning in x, Q^2, z, p_T, θ
- **Exclusive:** DVCS, DVMP



EIC Impact on Proton Spin Study

at a glance

