

# 核子構造WGLレポート

「日本の核物理の将来」タウンミーティング

2011年7月29日(金)@RCNP

後藤雄二(理研)

# 目次

- 現在の作業の状態
- Key Questions, Key Words
- 原稿の章立て案
- 想定されるFacilityのUpgrade/Construction
- Resourceの算定

# 現在の作業の状態

- WGメンバー
  - 実験11名、理論10名
  - 代表:後藤、副代表:(熊野→)小池、宮地
- 会合
  - 7月11日第5回ミーティング
  - 7月28日第6回ミーティング
- 文書
  - 章立てして、担当者に分けて記述できる部分をまとめたドラフトを作成
  - 全体の議論に基づく将来計画の記述は今後進める
  - 整合性のとれた内容になるようドラフトの改訂を進めている(現在約22ページ)

# *Key Questions, Key Words*

- 横偏極現象の解明
  - SSA (Single-Spin Asymmetry)、角分布の測定
  - TMD (Transverse-momentum dependent)分布関数の測定
  - 偏極Drell-Yan実験
  - 今後5年から10年の目標(2020年頃まで)
- 核子の三次元構造と軌道角運動量
  - GPD (Generalized Parton Distribution)関数の測定
  - DVCS (Deeply-Virtual Compton Scattering)測定、HEMP (Hard Exclusive Meson Production)測定
  - $J_i$ の和則から軌道角運動量の導出
  - 今後20年以内の目標(2030年頃まで)
- パarton分布関数の精密化とスピンパズルの解明

# 枠組み

- Bjorkenのスケーリング則

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 d\nu} = \sigma_{\text{Mott}} \left[ W_2(Q^2, \nu) + 2W_1(Q^2, \nu) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

- $Q^2$ が大きくなっても、散乱断面積は下がらない
- レプトン+陽子のDIS (Deep Inelastic Scattering、深非弾性散乱)は、陽子中の点状の構成要素(パートン)との弾性散乱(Mott散乱)の重ね合わせ
  - 互いに相互作用していないパートンからの独立(incoherent)な散乱

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \frac{E'}{E} \frac{1}{x} \left[ F_2(Q^2, x) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{Q^2}{2x^2 M^2} 2xF_1(Q^2, x) \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

# 枠組み

- クォーク・パートン模型 (QPM)

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \{1 + (1-y)^2\} F_2(Q^2, x)$$

$$F_2 = x \sum_q e_q^2 q(x)$$

- パarton分布関数 (PDF)

- $q(x)$ : クォーク  $q$  の parton 分布関数

- 量子色力学 (QCD)

- グルーオン: クォーク間の力を媒介するゲージ粒子

- スケーリング則の破れ

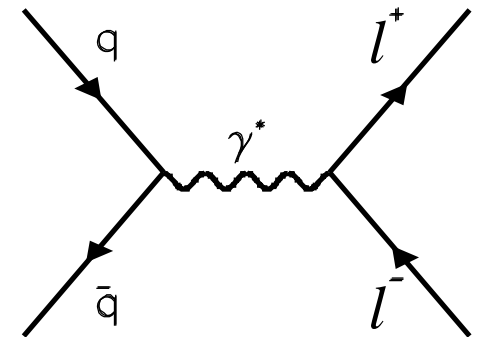
- 高エネルギー (短距離) でのクォーク・グルーオンの相互作用

# 現在何を研究しているか

- パarton分布関数(PDF)の精密化とスピンパズルの解明
  - 核子のスピンを担っているものは何か？
  - クォークスピンの寄与、グルーオンスピンの寄与
- 横偏極現象の解明
  - SSA(Single-Spin Asymmetry)、角分布の測定
  - パarton間の独立(incoherent)な散乱では、大きなSSAを説明できない
  - パarton間の量子的多体相関の研究
- 核子の三次元構造と軌道角運動量
  - GPD(Generalized Parton Distribution)関数の研究
  - 形状因子とPDFを包含した概念
  - $J_i$ の和則により軌道角運動量に結びつく

# 横偏極現象の解明

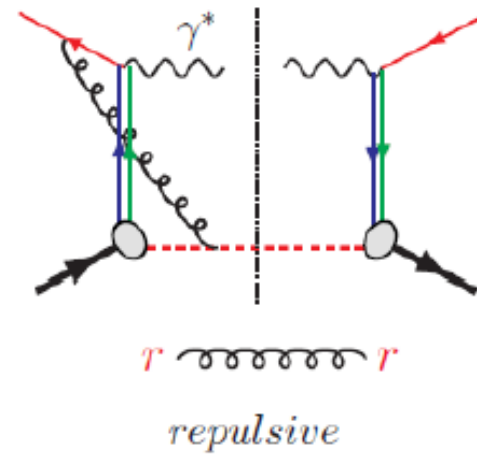
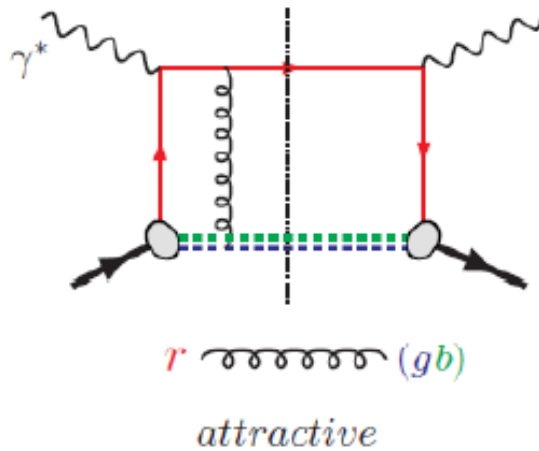
- 今後5年から10年の目標(2020年頃まで)
- SSA (single-spin asymmetry)測定、角分布測定のQCDによる解明
  - Sivers効果(Sivers分布関数)、Collins効果(transversity分布関数+Collins破碎関数)、higher-twist効果の分離
- TMD(Transverse-Momentum Dependent)分布関数の測定
  - Sivers関数
    - 核子の横方向のスピンのとパートンの横運動量( $k_T$ )との相関
- 偏極Drell-Yan実験





# 横偏極現象の解明

- Sivers分布関数の偏極Semi-inclusive DIS過程と偏極Drell-Yan過程の比較解析
  - final/initial state interactionの役割
  - 符号の逆転

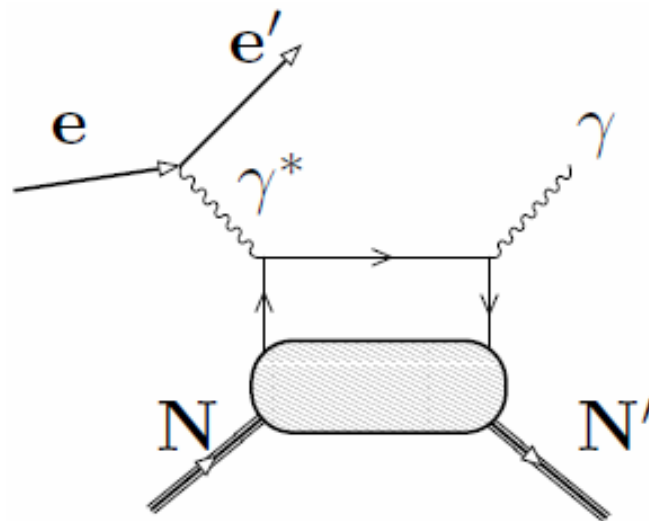


$$f_{1T}^\perp(x, k_\perp)|_{\text{SIS}} = -f_{1T}^\perp(x, k_\perp)|_{\text{DY}}$$

- 理論的基盤の確立を目指す
  - Transversity分布関数、Boer-Mulders分布関数の測定
  - 核子中の軌道角運動量との関連を探る

# 核子の三次元構造と軌道角運動量

- 今後20年以内の目標(2030年頃まで)
- GPD (Generalized Parton Distribution) 関数の測定
  - 形状因子とPDFを包含した概念
- レプトン+核子散乱による測定
  - DVCS (Deeply-Virtual Compton Scattering) 過程
  - HEMP (Hard Exclusive Meson Production) 過程



# 核子の三次元構造と軌道角運動量

- Jiの和則から軌道角運動量の導出
  - 核子スピンへの軌道角運動量の寄与を実験的に分離して導出する曖昧さのない手段

$$\frac{1}{2} = \sum_q J^q + J^g = \left( \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \sum_q L^q \right) + J^g$$

- 多次元データを基に模型を築く
  - 核子中の多体相関を記述していなければならない

# 原稿の章立て案

- 序章
  - 何を知りたいのか、歴史と概観
- 理論的枠組み
  - 高エネルギー反応過程と核子構造研究の理論的枠組み
- 現在の目標、研究の対象
  - 現在何を研究しているのか
- 将来の目標と実験計画
  - 将来何を研究したいのか
- (リソースの算定)

# *FacilitiesのUpgrade/Construction*

- 偏極Drell-Yan測定
  - 2020年頃までTMD分布関数の測定
  - COMPASS、RHICで最初の実験(2012~2014年)
  - その後、RHIC、Fermilab、GSI(、J-PARC)でより精密な測定の計画
- DVCS/HEMP測定
  - 2030年頃までGPD関数の測定
  - これまでHERA/COMPASS/JLab実験から結果、今後も計画がある
  - 将来の(偏極)ep collider実験
    - EIC/ENC/LHeC
  - 今後の核子構造分野の中心計画
    - 必要なenergy、luminosityの議論
    - 必要人数、予算の議論

# 実験計画

- (偏極)ep collider + eA collider実験
  - HERA-IIIをより高いluminosityと同程度のenergyで実現する
  - EIC/ENC/LHeC
    - ENCはlow energy
    - LHeCは偏極陽子がない
- (偏極)ep collider + eA colliderの物理
  - Small-xの物理
    - 核子/原子核中のパートン(主にグルーオン)密度の飽和
    - パートンの再結合、カラーグラス凝縮(CGC)
    - 幾何学的スケーリング
  - 核子の三次元構造と軌道角運動量
  - スピンパズルの解明

# ep/eA collider計画

## Electron Ion Colliders

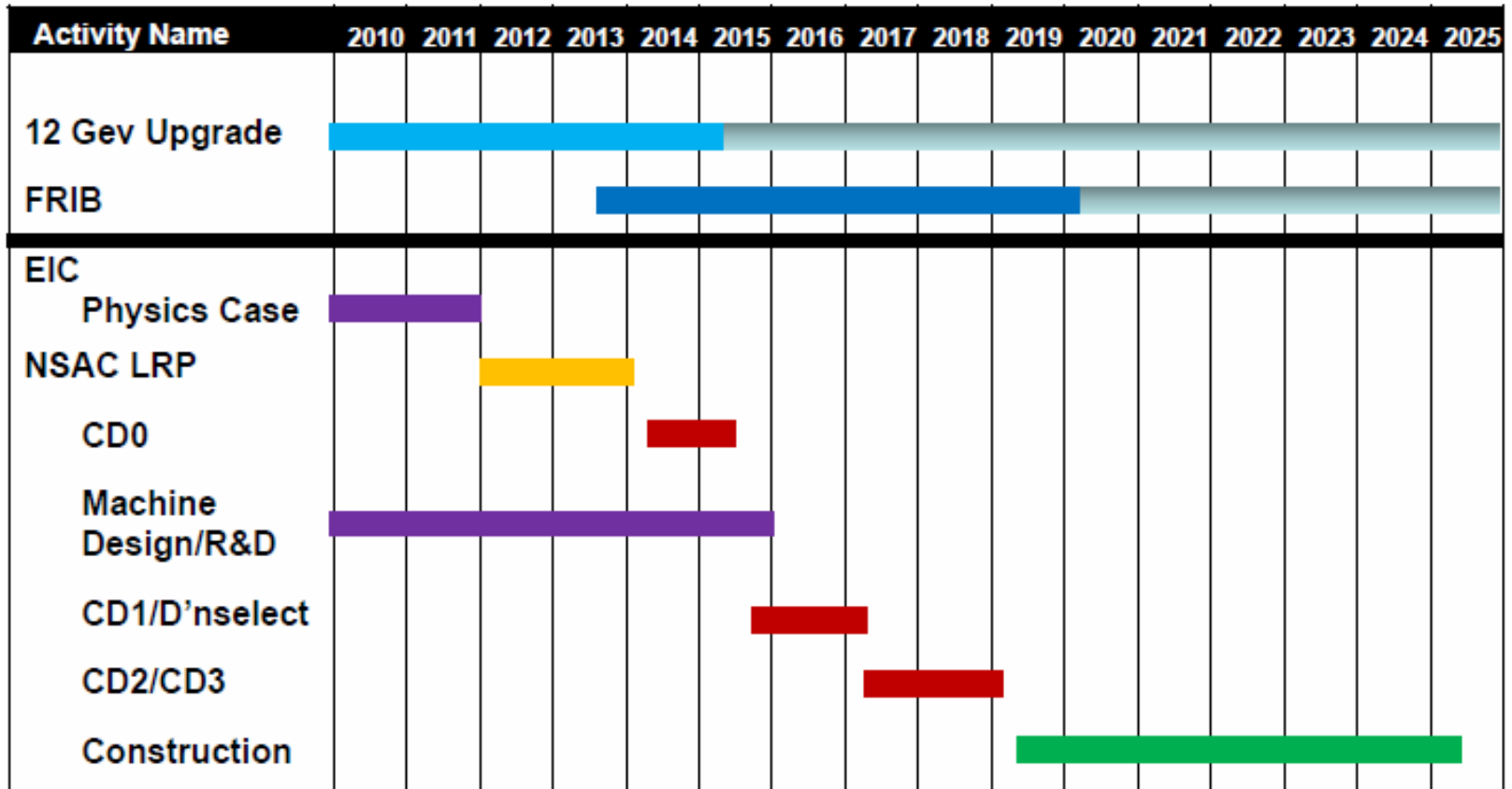
### Design Goals for Colliders Under Consideration World-wide

	Energies	s	Design Luminosity
(M)EIC@JLab	Up to 11 x 60+	240-3000	Close to $10^{34}$
Future ELIC@JLab	Up to 11 x 250 (20? x 250)	11000 (20000?)	Close to $10^{35}$
Staged MeRHIC@BNL	Up to 5 x 250	600-5000	Close to $10^{34}$
eRHIC@BNL	Up to 20 x 325 (30 x 325)	26000 (39000)	Close to $10^{34}$
ENC@GSI	Up to 3 x 15	180	Few x $10^{32}$
LHeC@CERN	Up to 150 x 7000	4200000	Close to $10^{33}$

Present focus of interest (in the US) are the (M)EIC and Staged MeRHIC versions, with s up to ~3000 and 5000, resp.

# EIC計画

## EIC Realization Imagined





# Resourceの算定

- COMPASS
  - 約10名(山形大、宮崎大)
  - 科研費その他
- RHIC(スピン物理)
  - 約30名(理研、RBRC、京大、東工大、立教大、KEK)
    - 大まかに、学生+ポスドク15名、スタッフ10名、ボス5名
  - 理研から約2億円/年
    - これまで全体の約5%を担ってきた
- SeaQuest
  - 約10名(東工大、理研、山形大、KEK)
  - 科研費、大学運営費、その他、約2000万円/年
- Belle(破砕関数)
  - 数名(理研、東工大)
  - 科研費
- オーバーラップを考えると計40名程度？

# Resourceの算定

- 次期計画
  - (偏極)ep collider実験
  - 年齢別の人数分布を10年前から現在で比較、将来を予想する
  - 現状の人数維持、予算維持は不可欠
  - (偏極)ep + eA collider実験として、他分野(e.g. 高エネルギー重イオン)との協力
    - RHIC実験と同様の構造の維持
  - 国際協力実験に対する日本の寄与の議論
    - 予算獲得
    - 段階的実現の可能性

# ***Backup Slides***

# 目次

- 序章
  - 何を知りたいのか
- 現在の目標、研究の対象
  - 現在何を研究しているか
- 将来の目標
  - 将来何を研究したいか
- 実験計画
- まとめ

# 何を知りたいのか

- 何を目標、対象としているのか、そしてその意義
  - 核子(およびハドロン、原子核)の構造は、要素還元論的にはある程度理解されているが、実際はより複雑な構造を持っており、その理解なくしては説明できない多くの現象を知っている
    - 横偏極現象、small-x/large-xでの振舞い、QGP
    - 高エネルギー素粒子実験に対するinputとしても必要
  - どこまで第一原理であるQCDに基づき理解できるか
    - より高い予言能力を持ちたい
    - パarton描像を超えたハドロン構造
    - カイラル対称性、閉じ込めのメカニズム

# 歴史

- 電子ビーム散乱実験
  - Mott散乱
  - 電子のスピン $1/2$ 、標的の反跳
- 電子-陽子の弾性散乱
  - SLACの電子ビーム(1950-60年代)
  - Rosenbluthの公式
    - $G_E$ : 電気形状因子
    - $G_M$ : 磁気形状因子
  - 形状因子の測定
    - 陽子の大きさの測定: 0.8 fm

# 歴史

- 深非弾性散乱実験 (DIS)
  - MIT-SLAC実験 (1969, Friedman, Kendall, Taylor)
    - $Q^2$ が大きくなっても、散乱断面積は下がらない
      - 大角度散乱
      - 陽子の中の点状の構成要素 (パートン)
  - Bjorkenのスケーリング則
    - $F_2$ 、 $F_1$ は $Q^2$ によらず、 $x$ のみの関数である
    - DISは陽子中の点状の構成要素 (パートン) との弾性散乱の重ね合わせ
      - 互いに相互作用していないパートンからのincoherentな散乱

# 歴史

- クォーク・パートン模型 (QPM)
  - Bjorkenのスケーリング則
    - Dirac散乱: 標的が $\mu$ のようなスピン1/2の標的
  - Callan-Grossの関係式
    - パートンは $\mu$ のようにスピン1/2
  - パートン分布関数 (PDF)
    - $q(x)$ : クォーク $q$ のパートン分布関数



# 歴史

- 量子色力学(QCD)
  - 非可換ゲージ理論の漸近的自由性(1972)
  - グルーオン:クォーク間の力を媒介するゲージ粒子
  - スケーリング則の破れ
    - 弱い $Q^2$ 依存性
    - 高エネルギー(短距離)でのクォーク・グルーオンの相互作用

# 因子化とパートン分布関数

# 現在何を研究しているか

- 1970年代、1980年代
  - 基礎が築かれた
- 1990年代、2000年代
  - 築かれた基礎に対するプロダクションの時代？
- 2010年代以降
  - 新たなパラダイムの模索？

# 現在何を研究しているか

- パarton分布関数(PDF)の精密化とスピンパズルの解明
  - Collinear因子化に基づく描像
- 横偏極現象
  - Transverse-momentum dependent (TMD)因子化
    - TMD分布関数と破碎関数
- 核子の三次元構造と軌道角運動量
  - 一般化されたparton分布(GPD)

# PDFの精密化とスピンパズルの解明

- スピンパズル
  - 核子のスピンを担っているものは何か？
  - クォークスピンの寄与
    - 偏極DIS実験
    - 約30%の寄与
  - グルーオンスピンの寄与
    - 偏極semi-inclusive DIS実験、偏極核子衝突実験により、大きな制限がかけられてきている
  - 軌道角運動量の寄与
    - スピン和則による軌道角運動量の決定

# PDFの精密化とスピンパズルの解明

- 反クォーク分布、フレーバー依存性の測定
  - Drell-Yan反応
  - weak boson生成
- 小さい $x$ 領域の構造関数
- 大きい $x$ 領域の構造関数

# 横偏極現象の解明

- SSA (single-spin asymmetry)測定、角分布測定
  - パートン間の独立 (incoherent) な散乱では、大きなSSAを説明できない
- QCDによる解明
  - Sivers効果 (Sivers分布関数)、Collins効果 (transversity分布関数 + Collins破碎関数)、higher-twist効果 (パートン間の量子多体相関) の分離、理解
  - TMD分布関数の測定
- 偏極Semi-inclusive DIS過程と偏極Drell-Yan過程の比較解析
  - final/initial state interactionの役割

# 核子の三次元構造と軌道角運動量

- GPD関数
  - 形状因子とPDFを包含した概念
  - 因子化の証明
    - process independentである
    - QCDで厳密に取り扱うことができる
  - $J_i$ の和則により軌道角運動量に結びつく
  - DVCS/HEMPにより測定される
    - 多次元データが必要
- スピン分解



# 現在何を研究しているか

- QCD摂動論
  - 高次計算
  - Log発散の再総和
- QCD非摂動論
  - 格子QCD
  - 有効理論、有効模型
  - AdS/CFTからのアプローチ

# 将来何を研究したいか

- TMD分布関数の測定
  - 今後5年から10年の目標(2020年頃まで)
- GPD関数の測定
  - 今後20年以内の目標(2030年頃まで)

# まとめ

- 新たなパラダイムに基づいた発展、統合
  - 核子構造の3次元的記述の統合は可能か？
  - 高エネルギーハドロン、原子核の物理
    - 4分野(ハイパー核、高エネルギー原子核、新ハドロン、核子構造)を超えた計画？
    - 宇宙線、天体など(宇宙論、物性...)の他分野を含む発展？
- 20年以降の目標(2030年以降)を考える！