

*EIC/ePIC*実験の物理と現状

第22回高エネルギーQCD・核子構造勉強会

2024年3月29日(金)

後藤雄二 (理研)

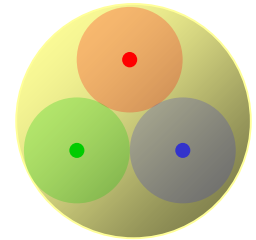
内容

- クォーク・グルーオン構造
- Electron-Ion Collider (EIC) の物理
 - 核子の質量
 - 核子のスピン
 - グルーオン飽和
- EIC計画の状況
 - ePIC実験

核子の内部構造

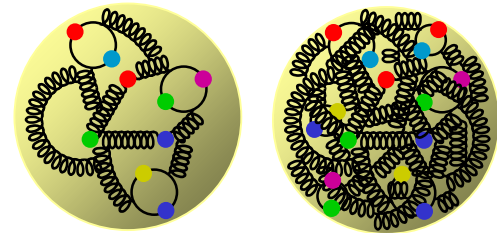
- 構成子クォーク描像

- 核子の磁気モーメントを説明
- 偏極深非弾性散乱実験でクォークスピンの核子スピンを担う割合を測定すると30%程度
- 「スピンパズル」



- クォーク・グルーオン描像

- 深非弾性散乱実験で測定しているのは構成子クォークではなく、カレントクォーク
- グルーオン相互作用の理解、グルーオンによる核子構造の理解が必要
- 高エネルギーハドロン衝突実験の初期状態

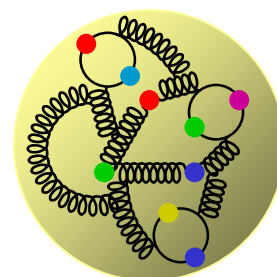
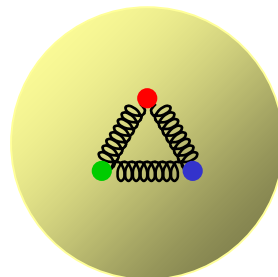
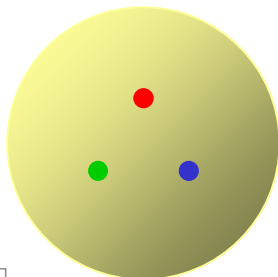
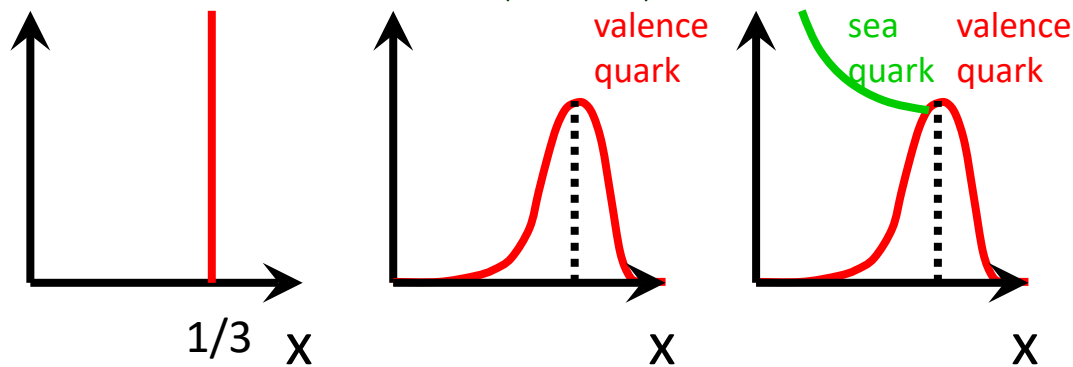


- 自然の階層としてのクォーク・グルーオンと構成子クォークの間の溝の理解

- カイラル対称性の破れ
- 閉じ込め

核子の内部構造

- 核子：閉じ込められたクォーク、グルーオンの力学を研究できる最も単純な多体系
- 単純なパートン描像
 - 縦方向の1次元描像
 - 互いに独立 (incoherent) なパートン (クォーク、グルーオン) から成る核子
 - パートン分布関数 (PDF) で記述される

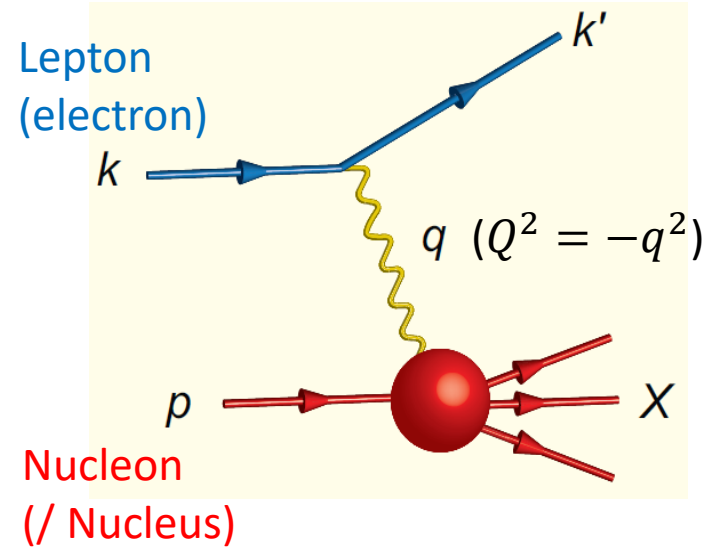


x : Bjorkenの x
“縦”方向の
運動量の割合
(1次元的な描像)

クォーク・グルーオン構造

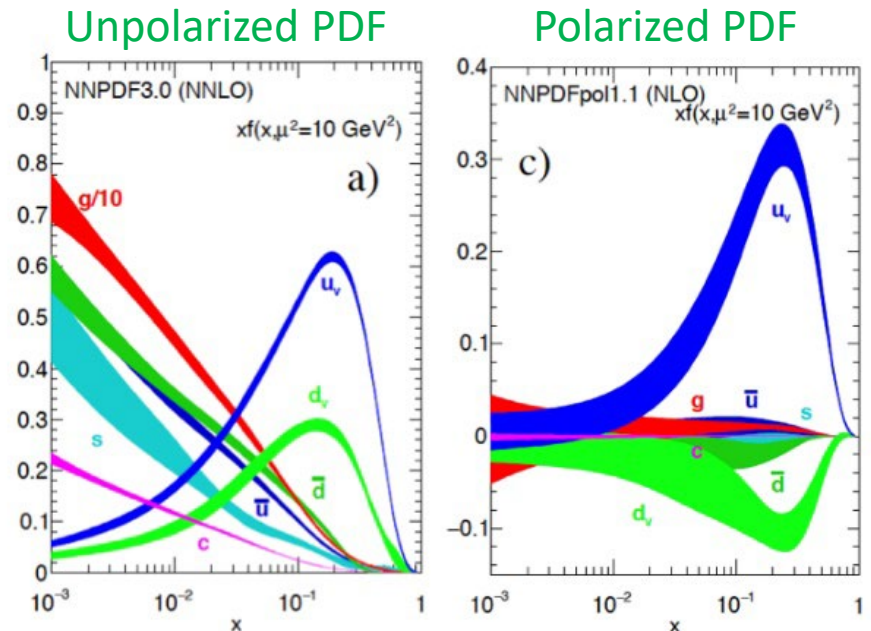
- レプトン（電子）の深非弾性散乱（inclusive DIS）

- 高い Q^2 ($Q^2 = -q^2$)が陽子内部のパートン（クォークとグルーオン）に対する分解能を与える



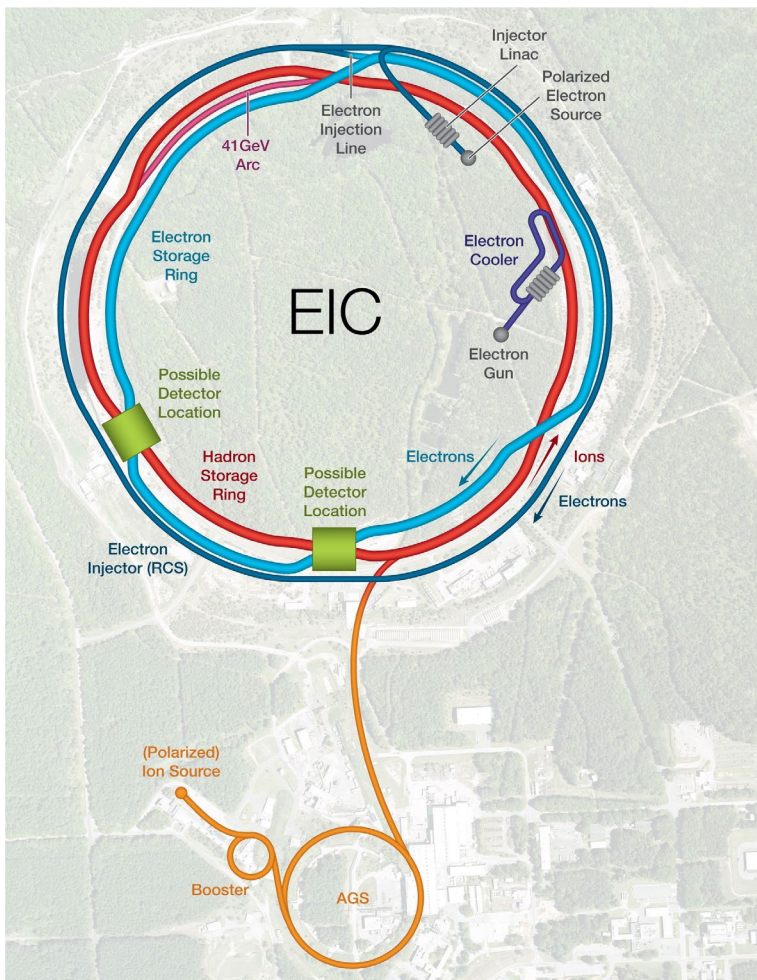
- クォーク、グルーオンのパートン分布関数 (PDF)

- 一次元描像
- 横軸 x : クォーク、グルーオンの進行方向の運動量比
- EICで偏極PDFの精度を格段に上げる



電子-イオン衝突型加速器 (EIC)

- 2020.1.9: ブルックヘブン国立研究所(BNL)がアメリカ原子核物理の次期計画であるEICの建設場所として選ばれた
- 世界初の偏極電子 + 偏極陽子及び軽イオン、重イオンの衝突型加速器



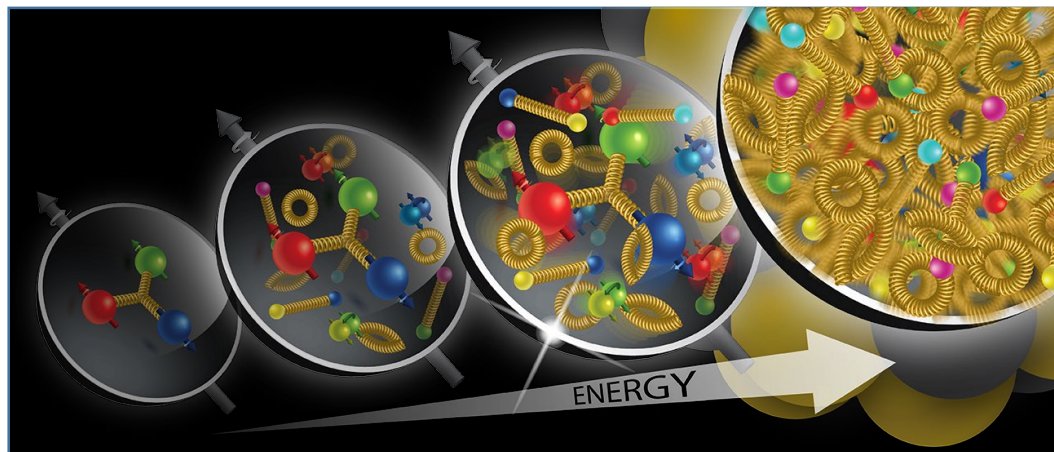
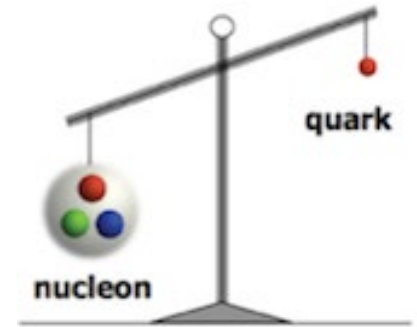
Project Design Goals

- High Luminosity: $L = 10^{33} - 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$, $10 - 100 \text{fb}^{-1}/\text{year}$
- Highly Polarized Beams: 70%
- Large Center of Mass Energy Range: $E_{\text{cm}} = 29 - 140 \text{ GeV}$
- Large Ion Species Range: protons – Uranium
- Large Detector Acceptance and Good Background Conditions
- Accommodate a Second Interaction Region (IR)

Polarized beam: e, p, d, ^3He

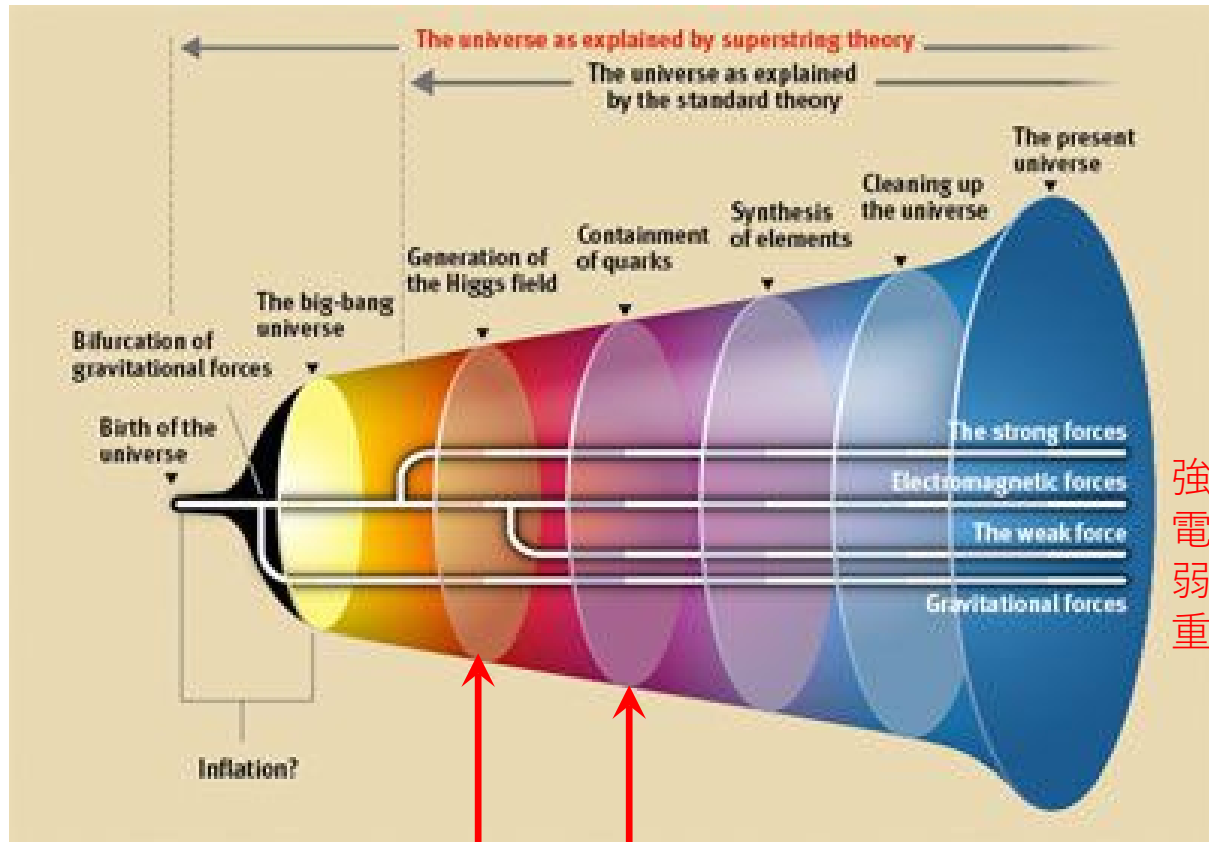
EICの物理

- 核子の質量はどのようにして生じるのか？
 - Higgs機構は陽子の質量の1%程度しか説明しない
- 核子のスピンはどのようにして生じるのか？
 - クォークのスピンは陽子のスピンの1/3程度しか担わない
- 高密度グルーオン系はどのような創発的性質を持つか？
 - グルーオン飽和は超高密度での新しい物質の状態を記述する



質量

- Higgs機構は陽子の質量の1%程度しか説明しない
- 対称性の破れが質量を創出する



強い力
電磁気力
弱い力
重力

対称性の破れ
Higgs場

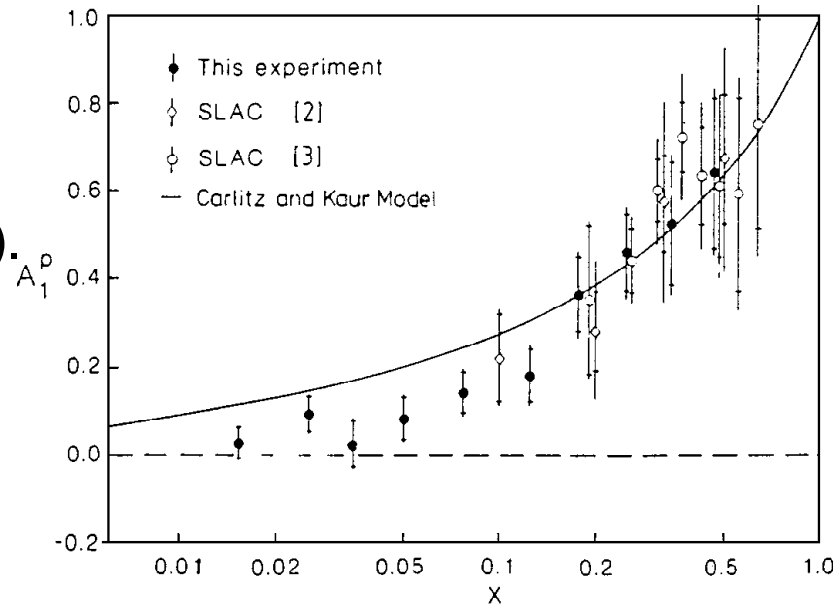
クォークの閉じ込め
カイラル対称性の破れ

核子スピン1/2の起源？

- EMC実験@CERN

J. Ashman et al., NPB 328, 1 (1989).

$$\int_0^1 dx g_1^p(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{4}{9} \Delta u + \frac{1}{9} \Delta d + \frac{1}{9} \Delta s \right]$$
$$= 0.123 \pm 0.013(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst})$$



- 中性子およびハイペロン崩壊データを用いて

$$\Delta\Sigma = \Delta u + \Delta d + \Delta s = 12 \pm 9(\text{stat}) \pm 14(\text{syst})\% \quad \text{「陽子スピンの危機」}$$

- クォークスピンは核子スピンの小さな割り合いにしか寄与しない
- x = 0 ~ 1 の積分による不確定性
 - より広いx領域を覆う、よりよい精度のデータが必要

➔ SLAC/CERN/DESY/JLAB 実験

スピン

スピンの謎

- クォーク・グルーオン構造における核子スピンの起源

$$\frac{1}{2} = \left[\frac{1}{2} \Delta\Sigma + L_Q \right] + [\Delta g + L_G]$$

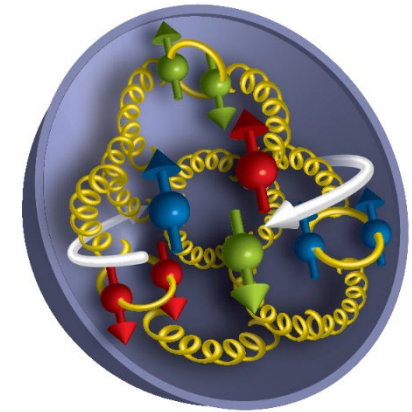
$\Delta\Sigma/2$ = Quark contribution to Proton Spin

L_Q = Quark Orbital Ang. Mom

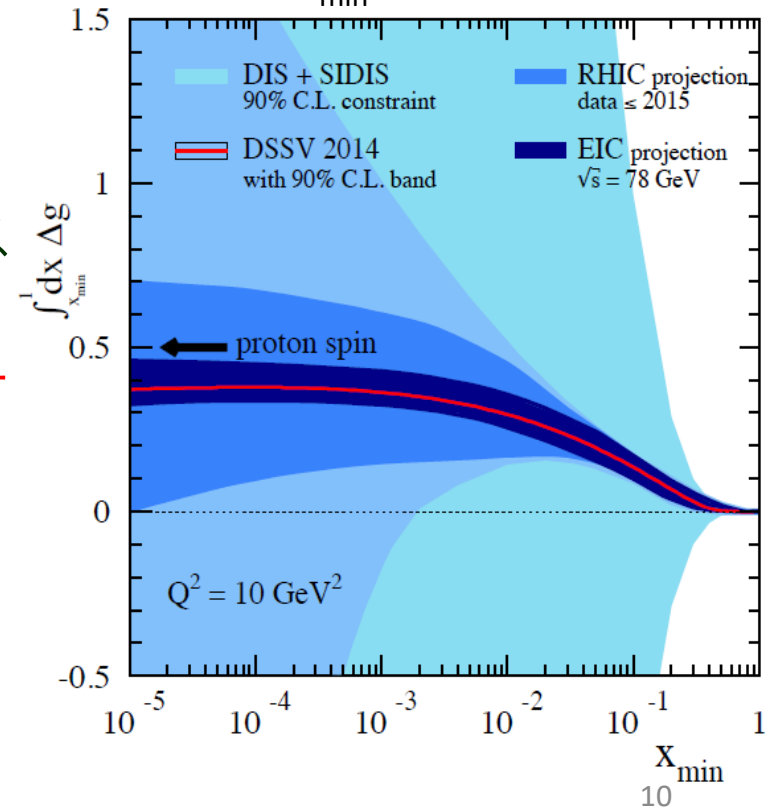
Δg = Gluon contribution to Proton Spin

L_G = Gluon Orbital Ang. Mom

- クォークスピンの寄与は核子スピンの20%-30%に過ぎない
- EICで偏極DISによりグルーオンスピンの寄与を測定
 - QCD発展方程式 (DGLAP方程式) により小さなBjorken- x 領域まで決定

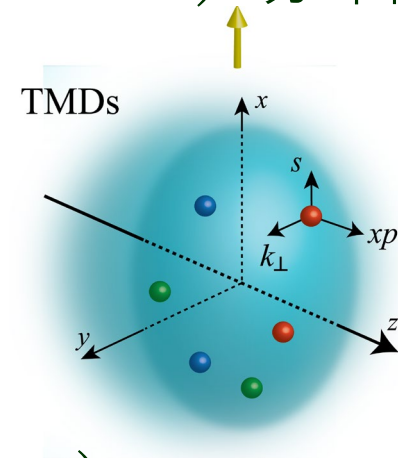
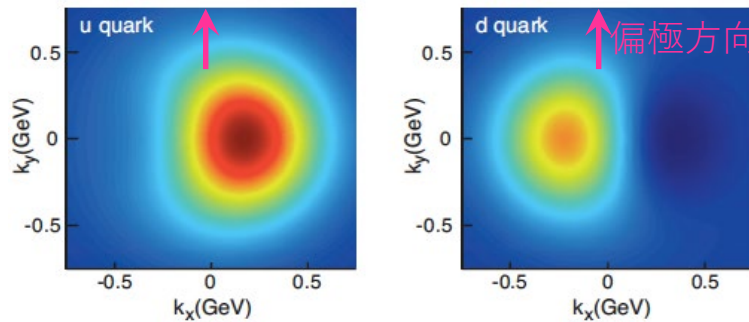


Integrated gluon polarization down to x_{\min}

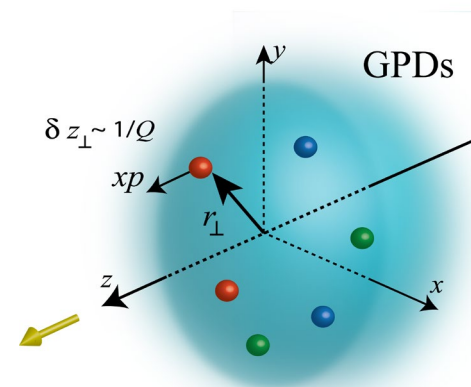
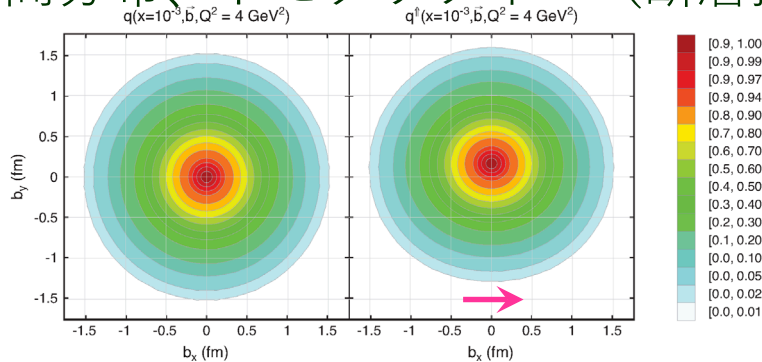


核子・原子核の3次元構造

- 陽子スピンの対する軌道運動、軌道角運動量の寄与を理解し、陽子スピンの理解を完結する
- TMD (Transverse-Momentum Dependent) 分布関数
 - 横運動量分布、スピンと軌道運動の相関

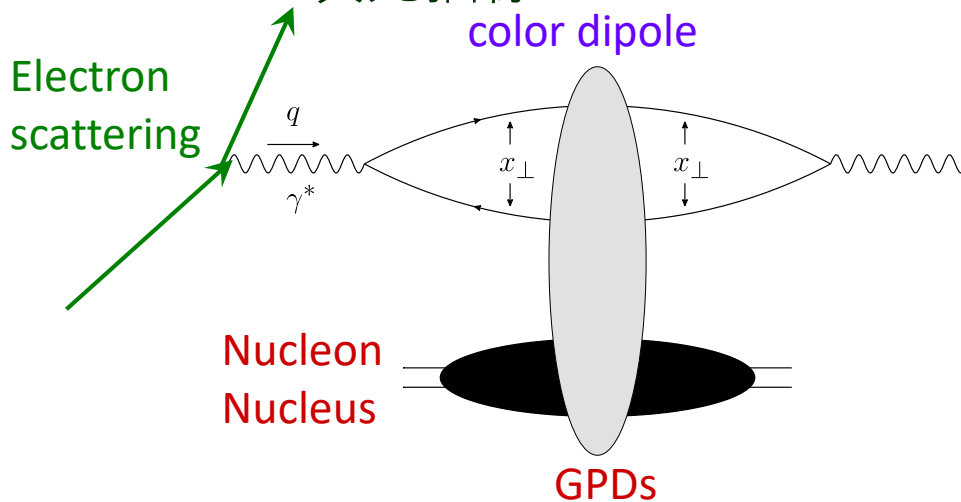


- GPD (Generalized Parton Distribution)
 - 空間分布、トモグラフィ（断層撮影）

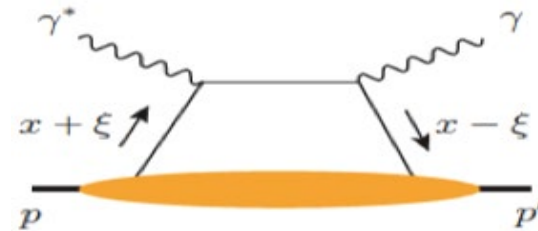


核子・原子核内部の空間分布

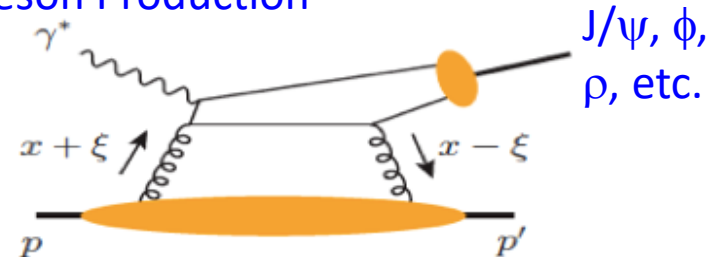
- EIC = カラー・ダイポール顕微鏡
 - exclusive (排他的) 過程やdiffractive (回折) 過程
 - 三次元描像



DVCS (Deeply Virtual Compton Scattering)



Meson Production



- 一般化されたパートン分布 (GPD) 関数
 - クォークやグルーオンの横方向の空間分布
 - HERA : 第1世代
 - EIC : 第2世代 (高輝度、重イオン、偏極)
 - 軌道角運動量
 - J_i の和則

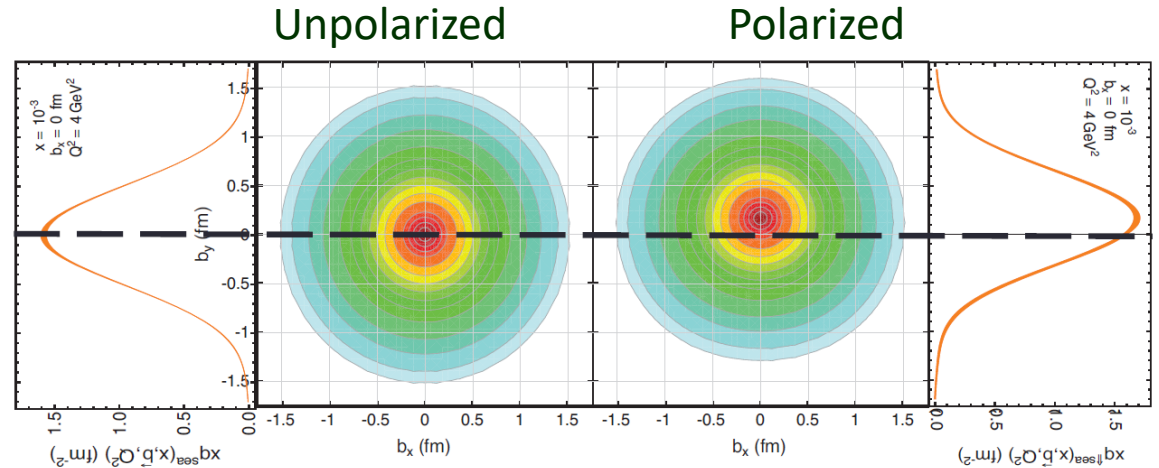
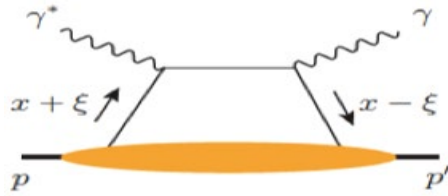
$$J_q^z = \frac{1}{2} \sum_q \Delta q + \sum_q L_q = \frac{1}{2} \left(\int_{-1}^1 x dx (H^q + E^q) \right)_{t \rightarrow 0}$$

核子・原子核のトモグラフィ

• DVCS

- 深部仮想コンプトン散乱過程

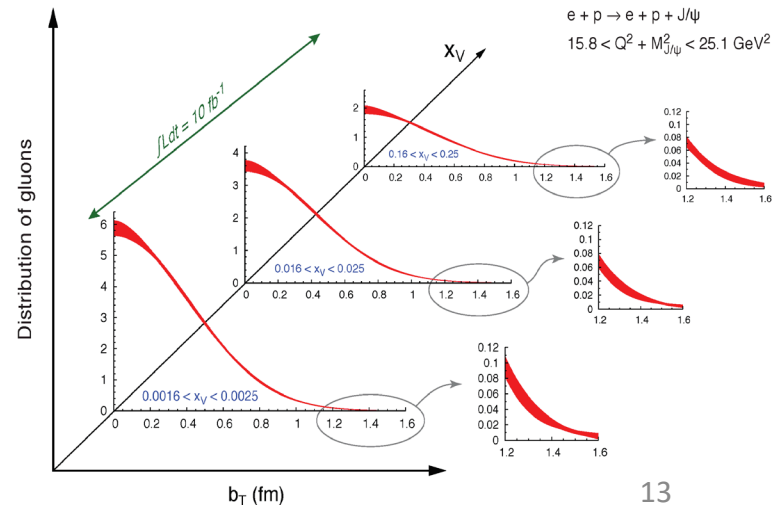
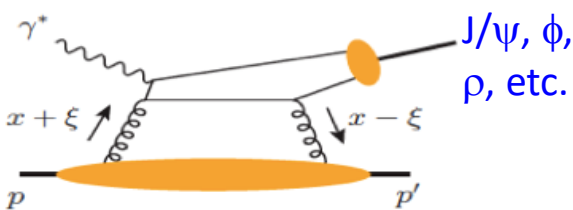
EIC 100 fb⁻¹ での海クォークの空間分布と対応する横断面におけるパートン密度



• 中間子生成過程

- J/ψ, φ, ρ等を測定することによりグルーオンの空間分布を測定する (トモグラフィ)
- 高ルミノシティ測定により、大きな半径に対しても精密な測定を行うことができる

EICでの排他的J/ψ生成から得られるグルーオンの空間分布のx依存性



核子の3次元構造

- クォーク、グルーオンはどのように核子内に閉じ込められているのか？

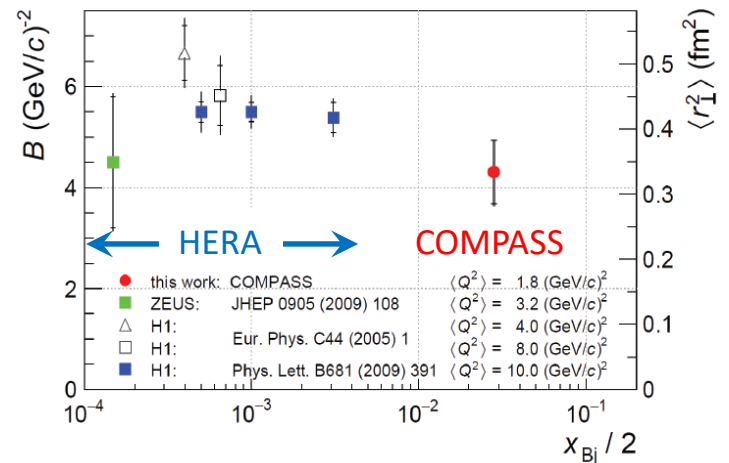
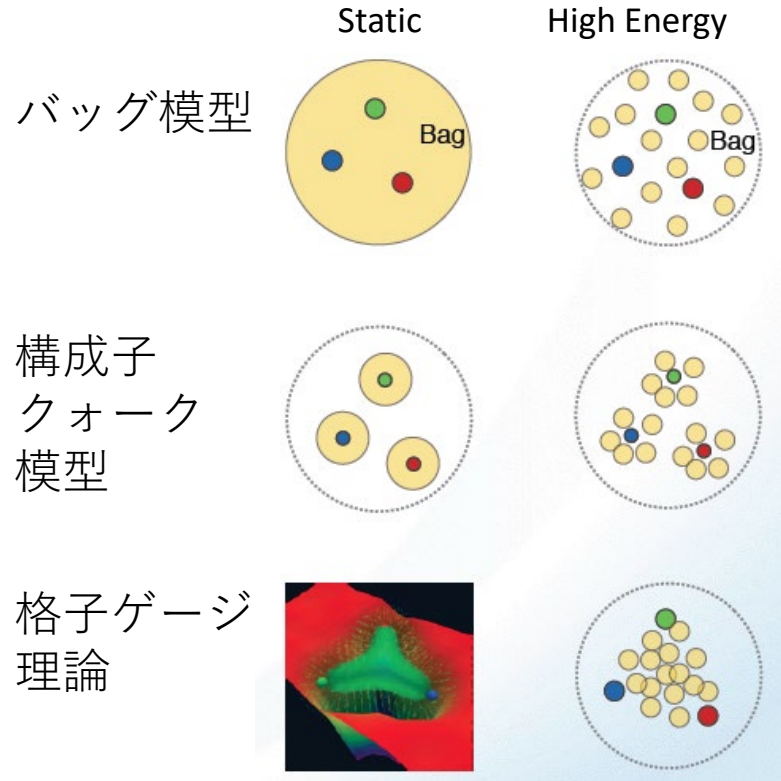
- バッグ模型
 - グルーオン半径 > 電荷半径
- 構成子クォーク模型
 - グルーオン半径 ~ 電荷半径
- 格子ゲージ理論
 - グルーオン半径 < 電荷半径

- 核子内部のクォークとグルーオンの横方向の分布測定が必要

- 核子（ハドロン）の低エネルギーでの性質と高エネルギーでのクォーク、グルーオンによる記述を結びつけることができるか？

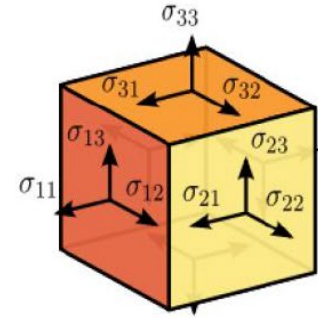
- GPD測定による核子トモグラフィ

- $R = 0.6 - 0.7 \text{ fm}$: グルーオン半径 (HERA) および海クォーク半径 (COMPASS)
- 電荷半径は $0.8 - 0.9 \text{ fm}$



一般化された形状因子

- エネルギー・運動量テンソル (EMT)



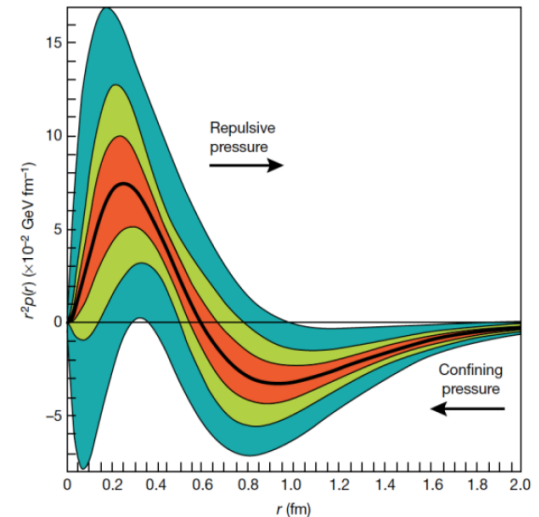
$$T^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} \text{Energy density} & \text{Momentum density} & & \\ T^{00} & T^{01} & T^{02} & T^{03} \\ T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} \\ T^{20} & T^{21} & T^{22} & T^{23} \\ T^{30} & T^{31} & T^{32} & T^{33} \\ \text{Energy flux} & \text{Momentum flux} & & \end{bmatrix}$$

Shear stress
せん断応力

Normal stress (pressure)
垂直応力

- GPD測定から核子内部の質量、スピン、圧力などの三次元分布を得る

- Jefferson LabのGPDデータを用いた圧力分布



Nature, 557, May 17, 2018

核子の質量

- 核子質量の和則

Relativistic Motion

Chiral
Symmetry
Breaking

Quantum
Fluctuations

$$M = E_q + E_g + \chi m_q + T_g$$

X. Ji, PRL 74 1071 (1995)

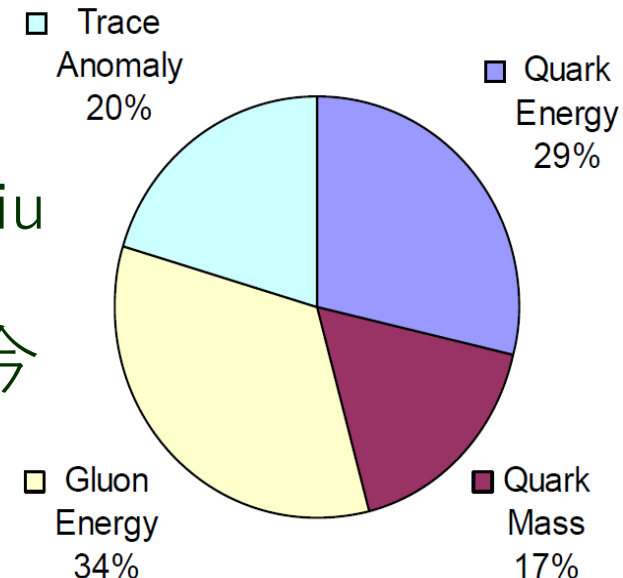
Quark Energy

Glulon Energy

Quark Mass

Trace Anomaly

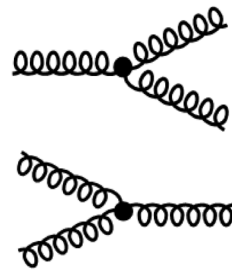
- 実験でのそれぞれの寄与の決定方法の議論が進む
- 格子QCD計算
 - arXiv:1710.09011, update by K.-F. Liu et al.
- 理論計算と実験測定の精密比較を今後進める
 - 質量、スピン、圧力、半径、...



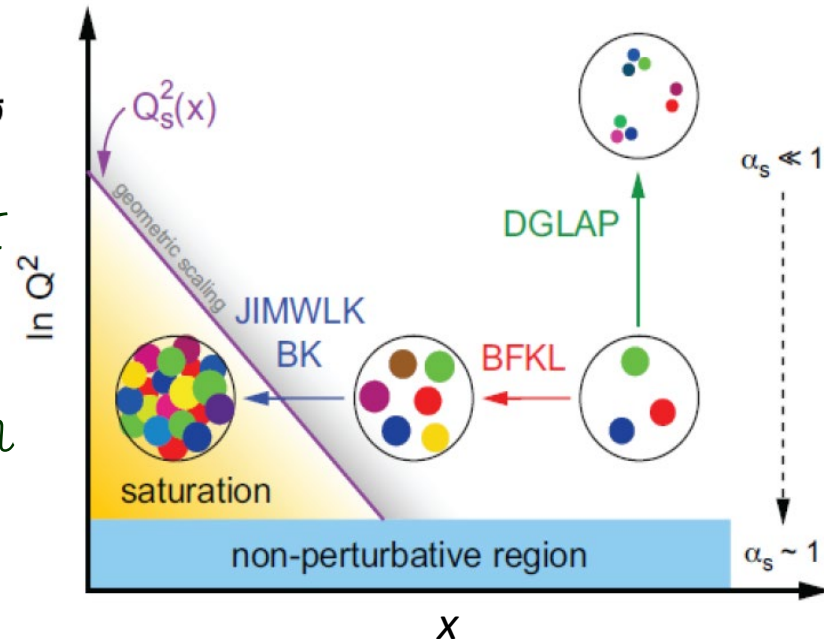
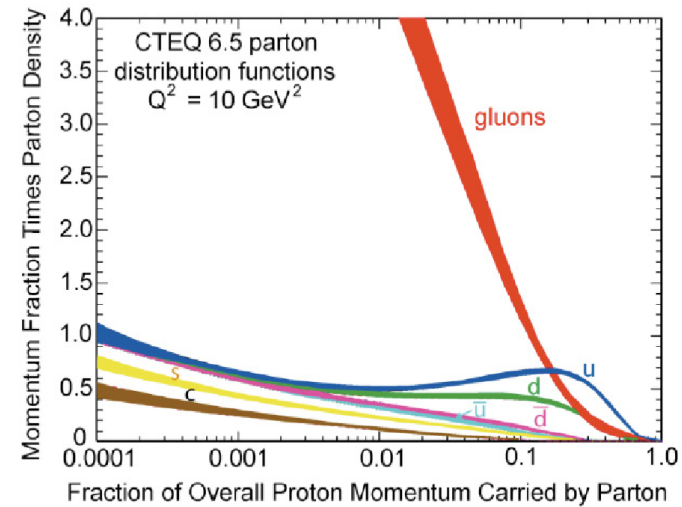
$e+A$ 衝突によるグルーオン飽和

- 摂動論QCDによりDGLAP及びBFKL発展方程式が高精度で働く
- 小さい x では線形のDGLAP/BFKLには問題がある
 - グルーオン分布関数の急上昇はユニタリ性を破る
- 新たなアプローチ：非線形発展方程式

- グルーオンの放出
 - 小さい x 領域で発散
- グルーオンの再結合
 - 発散を制限
- 超高エネルギーでは再結合によってグルーオン放出が補われる

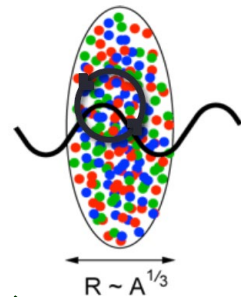


- BK/JIMWLK非線形効果
 - $Q_s(x)$ というスケールで特徴づけられるグルーオンの飽和状態
 - 小さい x 、小～中 Q^2 の物理を記述



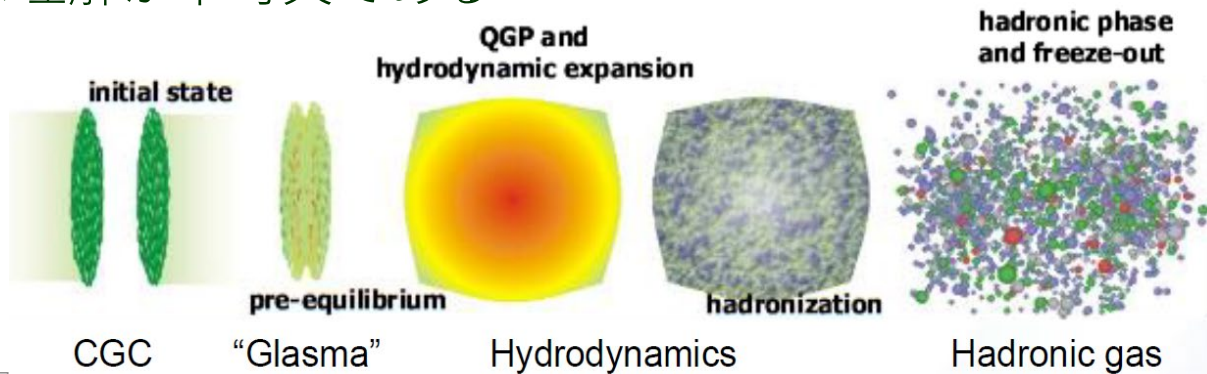
$e+A$ 衝突によるグルーオン飽和

- カラーガラス凝縮 (CGC)
 - 非線形な発展方程式
 - $Q_s(x)$ というスケールで特徴づけられるグルーオン密度の飽和状態
- 質量数Aによる Q_s の増大
 - 原子核ではかなり低いエネルギーで飽和領域に到達



$$(Q_s^A)^2 \approx cQ_0^2 \left[\frac{A}{x} \right]^{1/3}$$

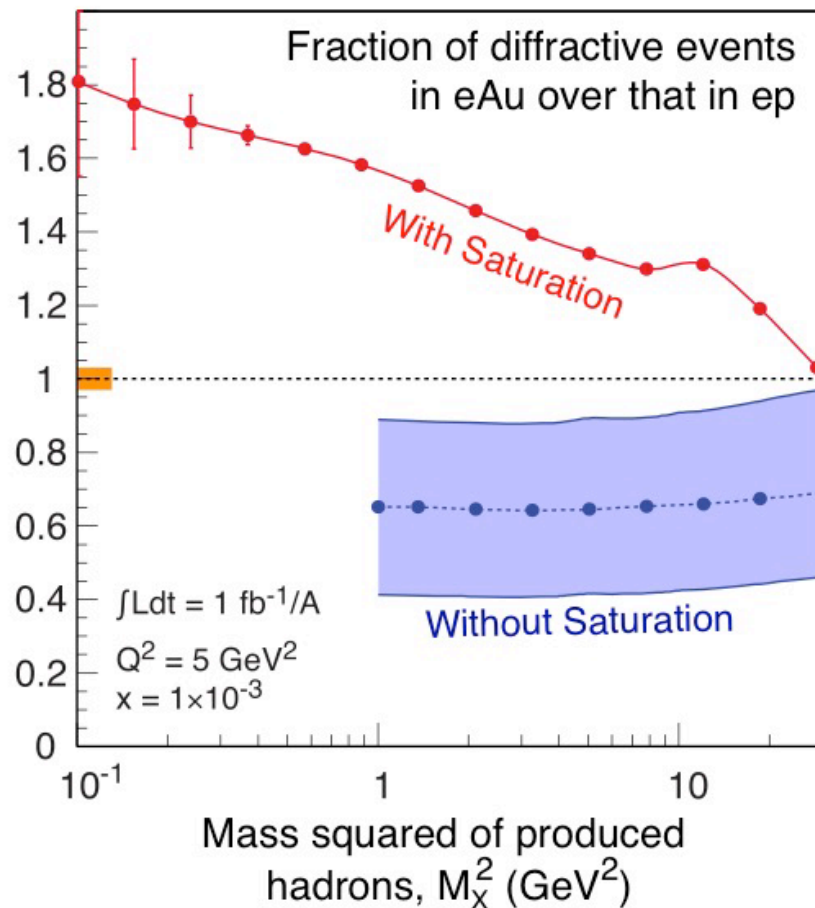
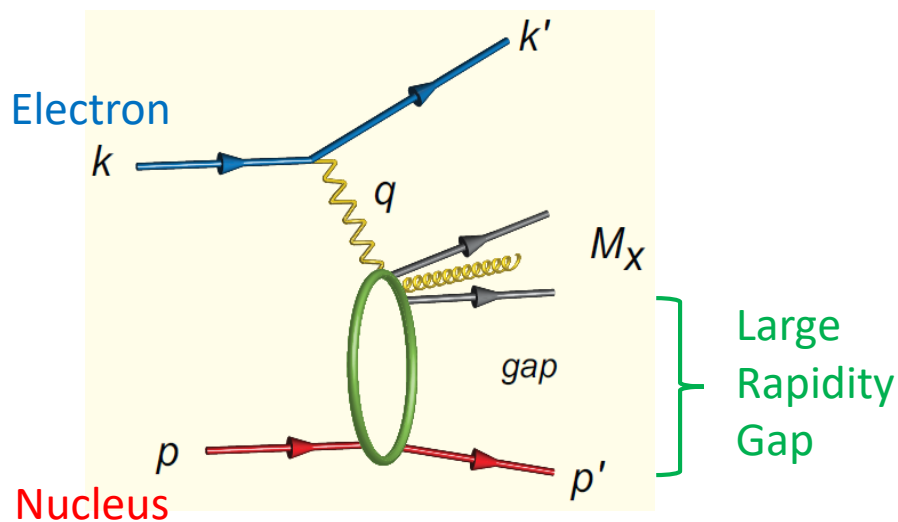
- 量子的な集団的グルーオン系の発見
 - グルーオン飽和の理論模型であるカラーガラス凝縮 (CGC) 模型により、実験との精密な比較を行うことができる
- RHICで発見されたQGPの生成メカニズムの理解のためには、その初期状態である原子核のクォーク・グルーオン描像に基づいた精密な理解が不可欠である



$e+A$ 衝突によるグルーオン飽和

- Diffractive cross section
 - グルーオン飽和を調べる最も感度の高い方法
- HERA $e+p$ では、10-15%が diffractive
- EIC $e+A$ では、CGCの予想では25-30%が diffractive

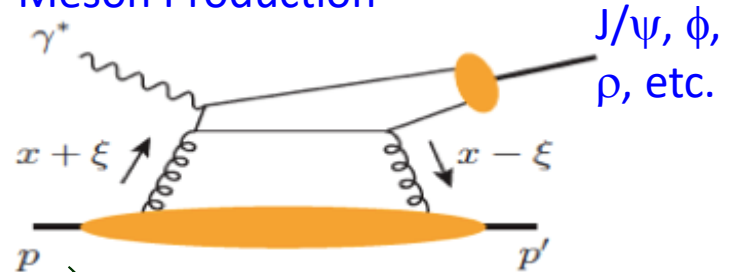
$$\sigma_{\text{diff}} \propto [g(x, Q^2)]^2$$



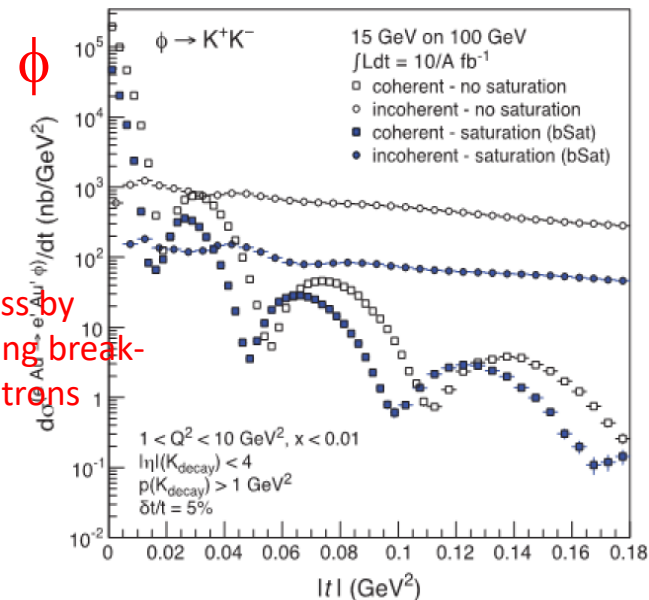
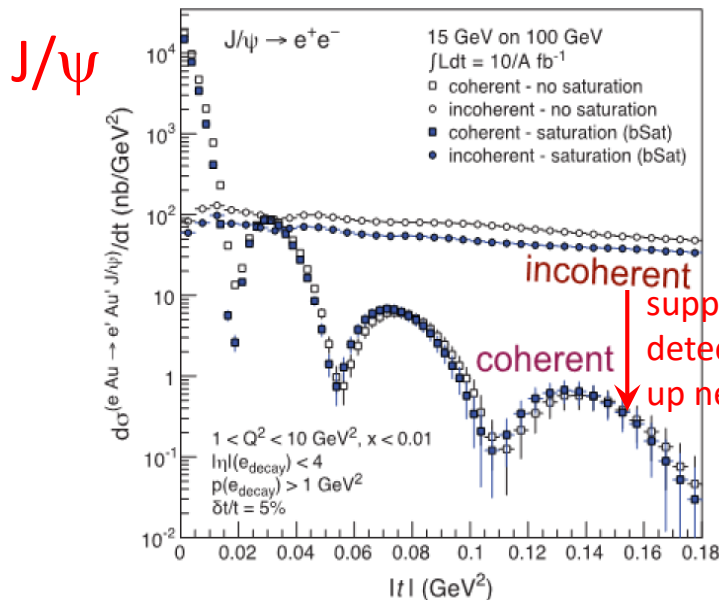
$e+A$ 衝突によるグルーオン飽和

- Diffractiveベクトル中間子生成
 - 運動量移行 t 依存は原子核内部の横方向のグルーオン空間分布に変換される
- Incoherent過程 (原子核が分裂)
 - 原子核内部の空間密度揺らぎ
 - Coherent過程よりもはるかに大きい
- Coherent過程 (原子核はそのまま残る)
 - グルーオン飽和に感度が高い
 - 励起原子核の分裂の識別 & 排除

Meson Production

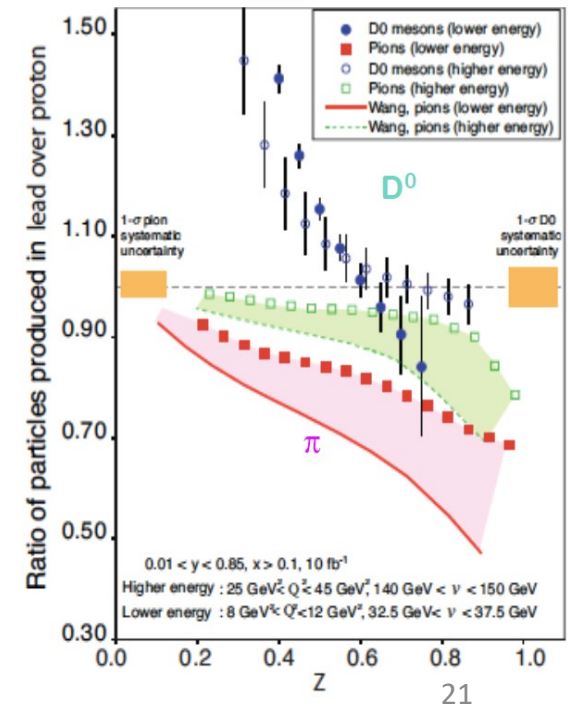
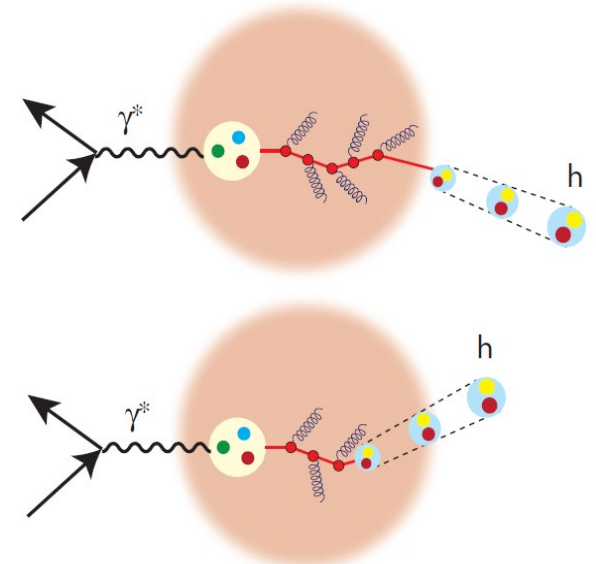


$J/\psi, \phi, \rho, \text{ etc.}$

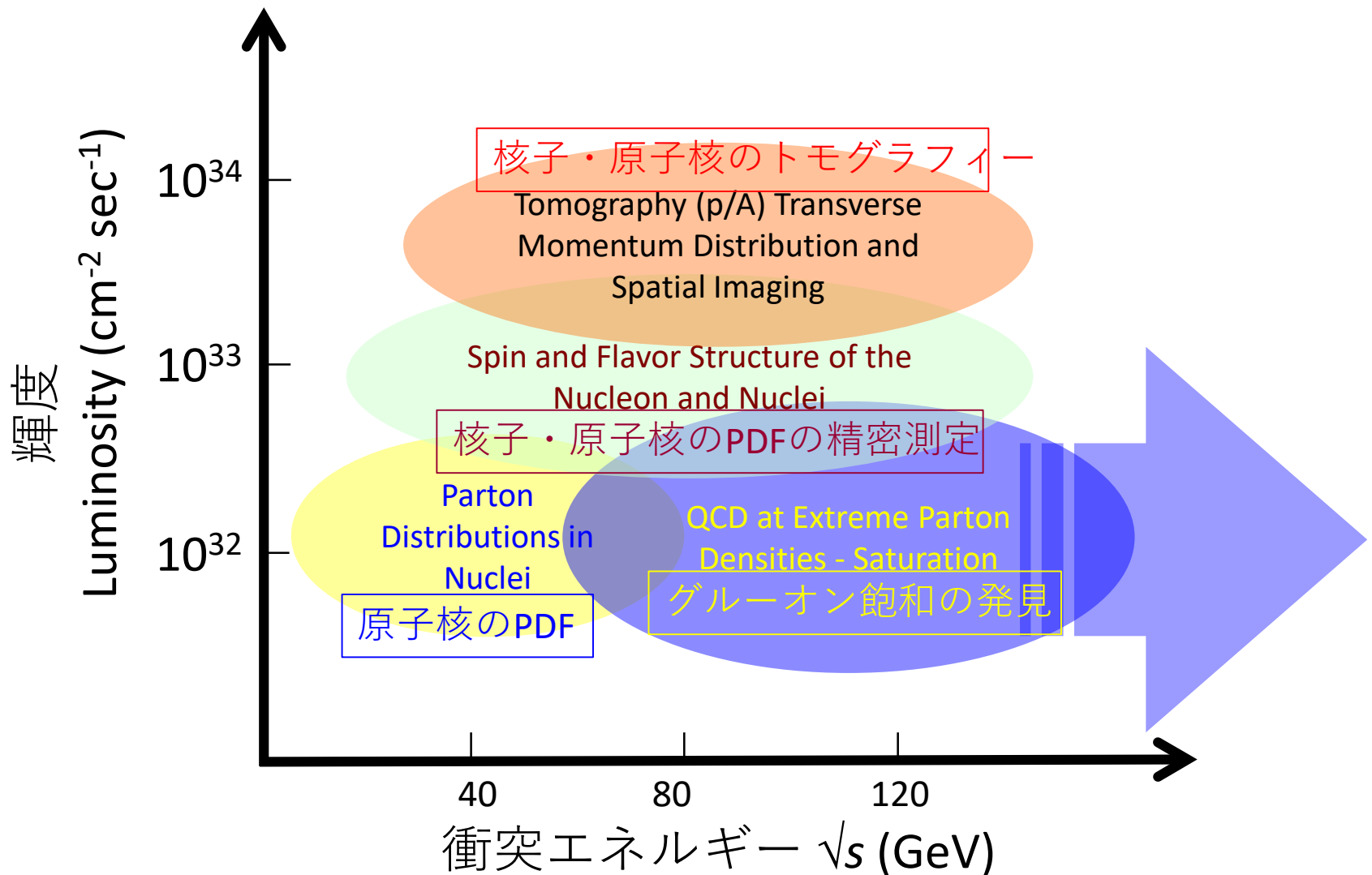


原子核内部でのハドロン化

- 核物質中 (cold nuclear matter) でのクォーク、グルーオンのハドロン化、ジェットの生成
 - 核物質は通過するカラー荷に対してどのように応答するか？
 - カラー荷からどのようにジェット、ハドロンが生成されるか？
 - ジェットの構造？
- ハドロン化の質量依存
 - 重いクォークのエネルギー損失
- Hot nuclear matter (QGP) との比較



EICの物理と輝度・エネルギー



Lattice QCDの発展

- 今後10年間におけるLattice QCD（格子量子色力学）の発展は実験精度に匹敵するか、もしくはそれを超えるものになることは明らかである
 - 計算機テクノロジーの発展
 - 計算機プロジェクトの必要性
- EICにおけるクォークとグルーオンの物理はLattice QCDの発展とともに進む
- 精密な理論計算と実験による精密測定の比較によりGCDの研究を行い、核子・原子核・QGPの理解を確立する



Supercomputer Fugaku

EICユーザーグループ (EICUG)

- 2016年設立
- 米、欧、アジアからの参加者1300名以上
 - 実験（検出器、データ収集・解析）、理論、計算、加速器
 - 36カ国から266機関の参加
 - 北米59%、欧州25%、アジア12%
- 2020年ユーザーグループによる物理と検出器設計レポートの作成
- 2020年11月、EIC計画からユーザーグループへEIC実験プログラムへの協力についてのExpressions of Interest (EOI) のコール
 - 日本からはEIC日本グループが1つのEOIを提出
 - 全部で47のEOIが提出された

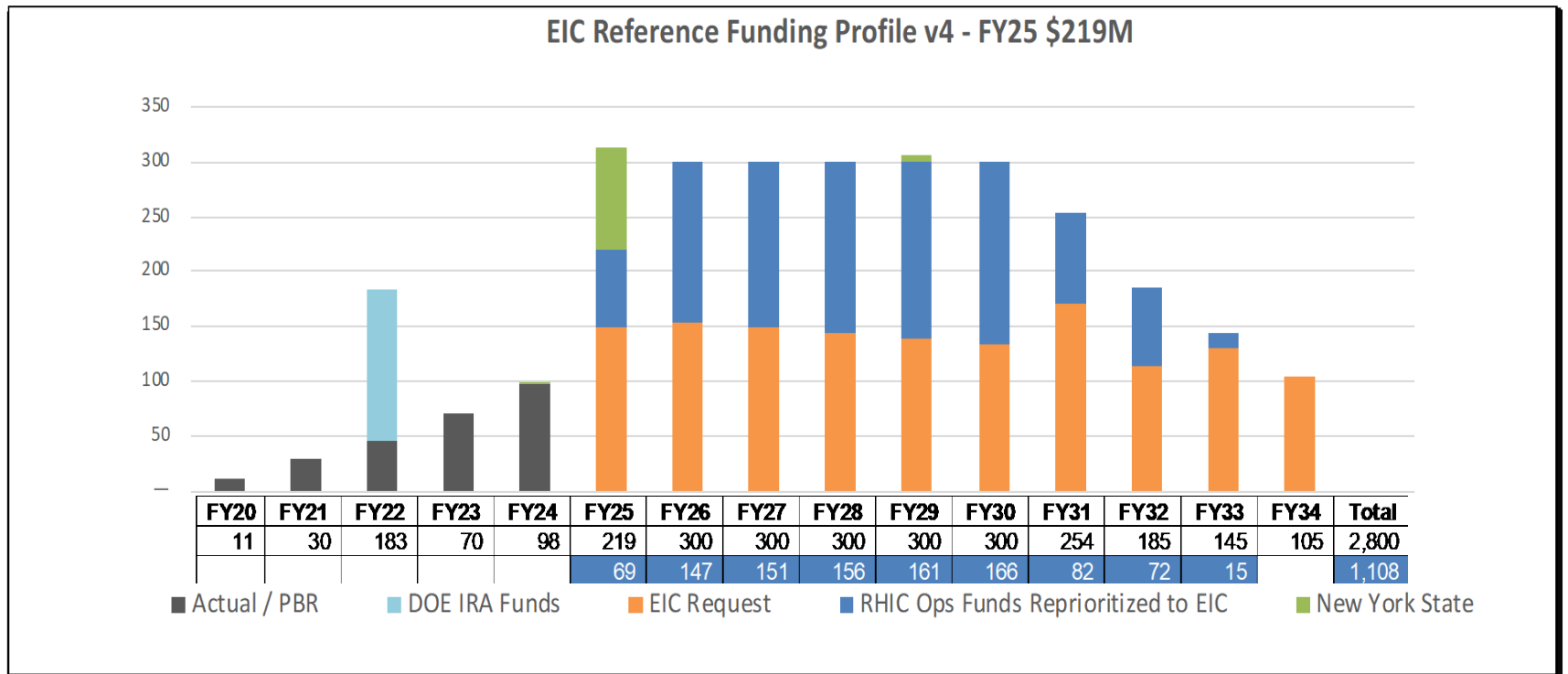


EICの状況

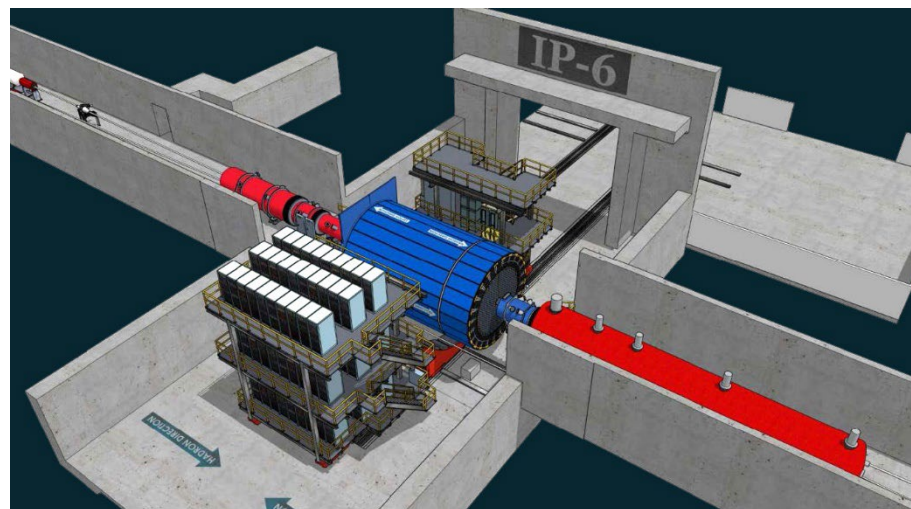
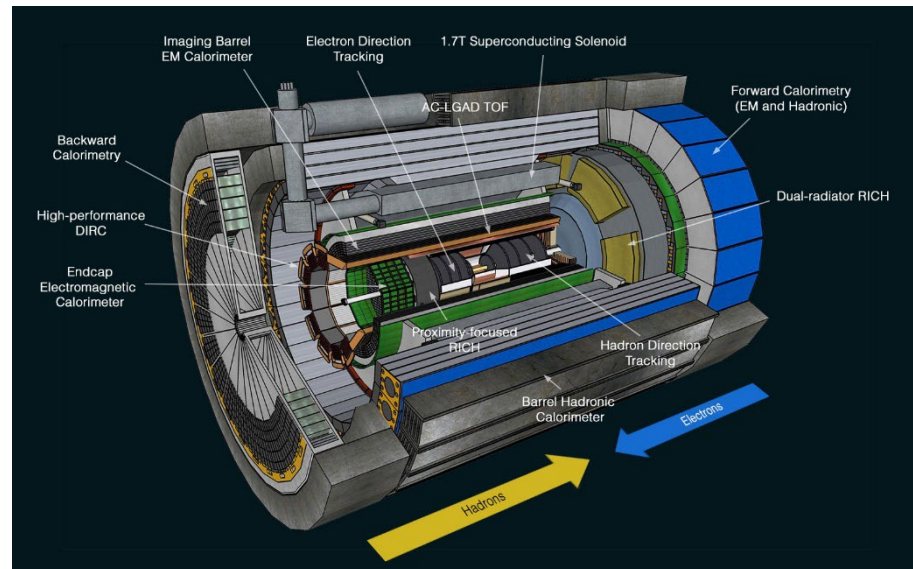
- 2015年：NSAC（原子力科学諮問委員会）Long Range Plan（長期計画）
 - 新規施設建設の最優先課題
- 2018年：米国科学アカデミー（NAS）による科学的及び社会的インパクトに対する高評価の答申を得た
- 2019年12月：米国DOEによるCD-0の承認
 - 科学的意義の承認
- 2020年1月：ブルックヘブン国立研究所（BNL）が建設場所として選ばれた
- 2021年：検出器コラボレーションの形成と提案
 - 2021年3月：検出器提案のコール
 - 2021年12月：3つの検出器提案の提出
- 2021年6月：米国DOEによるCD-1の承認
 - 計画の大筋と予算範囲\$1.7B-\$2.8Bの承認
- 2022年3月：DOEがEICのFY2022予算\$45Mを承認

EICの状況 (資金)

- 2023年度までのDOE資金\$294.2M (IRA資金\$138Mを含む)
- 2024年度大統領予算要求\$98.5M
- 保留中のNY州コミットメント\$100M
- RHICの運転資金の大部分は2025年度からEIC建設に優先され、年間\$150Mに達すると予想
- 2025年度の資金は未定、RHICの運転計画にもよる

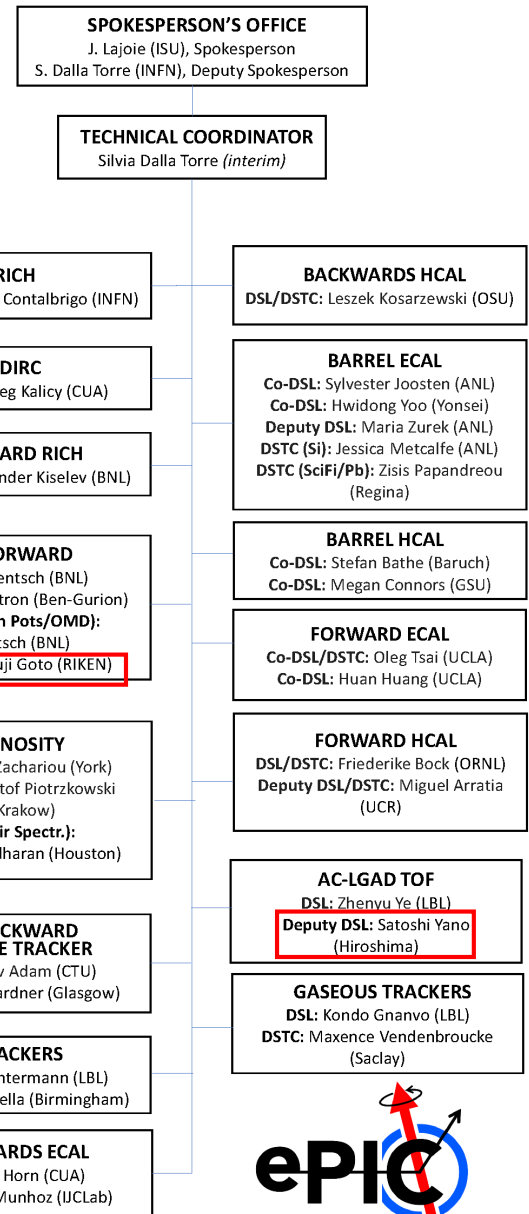


- 2021.3: EIC計画から検出器提案のコール
- 2021.12: 3つの検出器提案の提出
 - 日本グループはECCE検出器consortiumへ参加
- 2022.3: DPAP（検出器提案諮問委員会）が最初の検出器の基本設計としてECCE検出器を採用
 - ECCEと他の検出器共同研究を統合して第一検出器の技術設計の議論
- 2022.7: ePIC検出器共同研究



ePIC実験の状況

- ePIC 執行委員会 (EB: Executive Board)
 - ePIC 執行委員会が2023年10月の連携協議会 (CC: Collaboration Council) において発足
 - CC 選出メンバー: Barbara Jacak (Berkeley), Paul Newman (Birmingham), Taku Gunji (Tokyo)
- 2024年: TDR (Technical Design Report) の戦略と出版
- ePIC Collaboration Meeting
 - 2023.7: ポーランド、ワルシャワ大学 (EICUGミーティングと合同)
 - 2024.1: アルゴンヌ国立研究所
 - 2024.7: リーハイ大学 (EIC User Group Meetingと合同)
- EICアジアワークショップ
 - 2022.11: 韓国、仁川
 - 2023.3: 理研
 - 2024.1: 台湾、国立成功大学 (NCKU)
 - 2024.7: 中国、上海



まとめ

- EIC：世界初の偏極電子＋偏極陽子及び軽イオン、重イオンの衝突型加速器
 - 究極の量子色力学（QCD）研究施設
- クォーク・グルーオン構造→EICの物理
 - 核子の質量
 - 核子のスピン
 - グルーオン飽和
- EIC計画の状況
 - ePIC実験
 - EIC日本グループの活動
- 米国EIC計画への国内推進体制は万全に整っており、QCD研究を日本が主導して完遂する

Backup Slides

EICの状況

- 2023.11 NSAC長期計画 (Long Range Plan)
 - Recommendation 2 & 3
 - Electron-Ion Collider (EIC)
 - Neutrino-less double beta decay experiments
 - 施設建設の最優先事項として、EICの早期完成を推奨する
- EIC Resource Review Board Meeting
 - EICの共同研究を支援する国際的な資金提供機関の代表者と2つのホストラボ (BNL, JLab) の代表者で構成
 - 開発、建設、運用を調整
 - 第一回2023.4.3 - 4.4 Stony Brook Univ.
 - 郡司、後藤が日本から出席
 - 第二回2023.12.7 - 12.8 Catholic University of America, Washington DC
 - 在米大使館の岡村書記官(科学技術/原子力) + 郡司、後藤が出席
 - In-kind contribution (IKC)の議論
 - 共通基金、計算機、QAの議論
 - 第三回2024.5.6 - 5.7 Rome, Italy hosted by INFN

