

*EIC/ePIC*実験の物理と現状

sPHENIX & EIC セミナー

2024年5月1日(水)

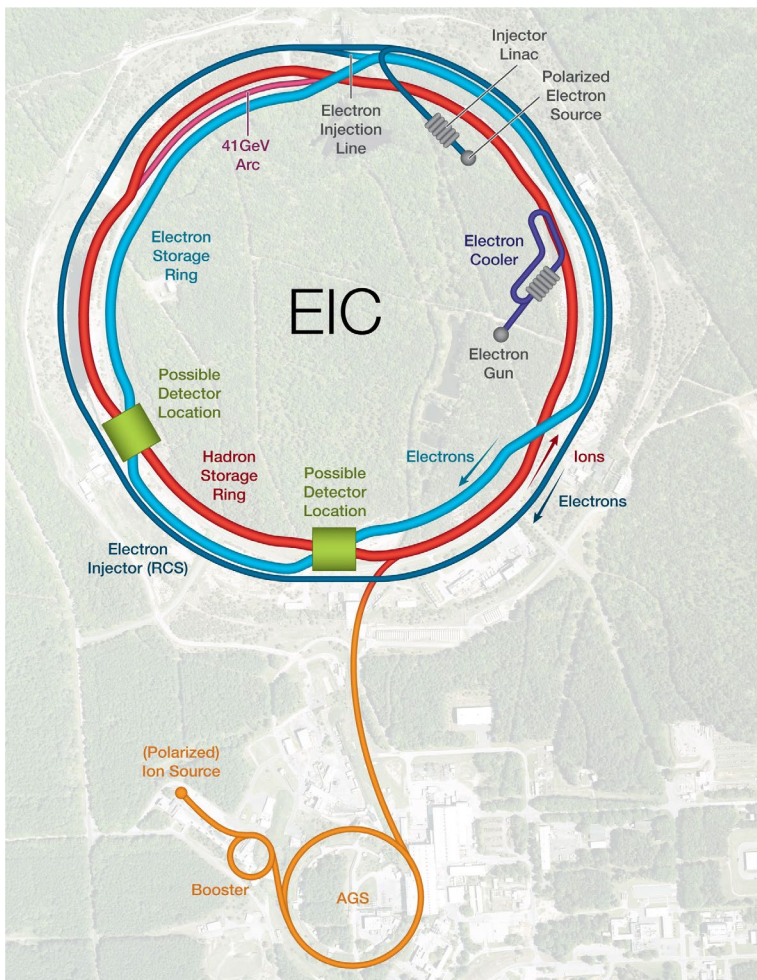
後藤雄二 (理研)

内容

- 歴史と核子構造の基礎
 - 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

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

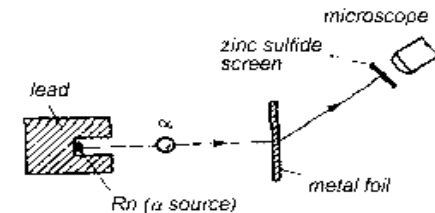
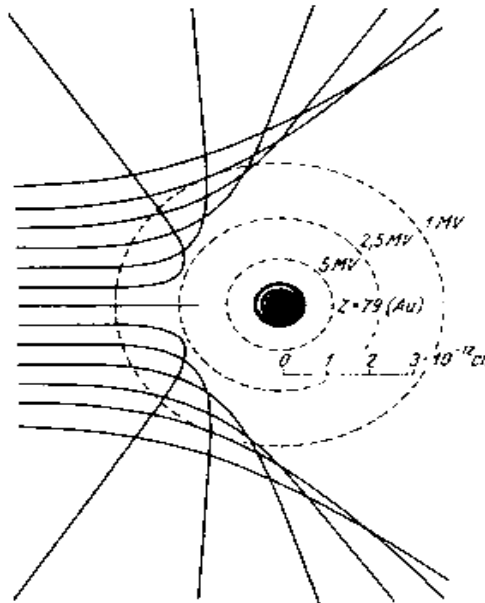
- High Luminosity: $L = 10^{33} - 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$, $10 - 100 \text{fb}^{-1}/\text{year}$
- Highly Polarized Beams: 70%
- Large Center of Mass Energy Range: $E_{\text{cm}} = 29 - 140 \text{ GeV}$
- Large Ion Species Range: protons – Uranium
- Large Detector Acceptance and Good Background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

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

原子の構造

- α 線の散乱実験
 - α 線を金箔に照射
 - 原子内に一様に電荷が分布なら小角度散乱のみ (Thomson模型)
 - 大角度散乱の観測、点状の原子核の発見
- Rutherford散乱 (1911)

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Rutherford}} = \frac{Z^2 \alpha^2}{4E^2 \sin^4 \theta/2}$$

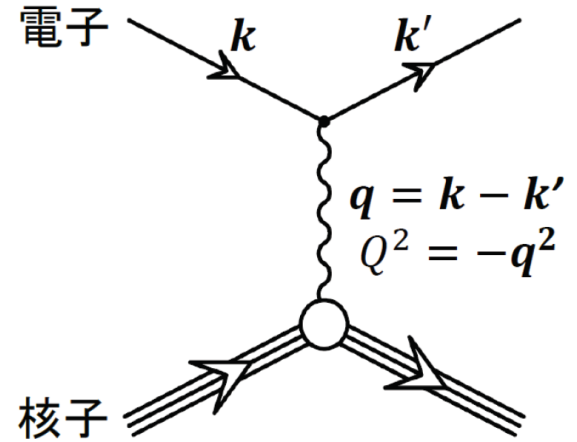


原子核、核子の構造

- 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

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Rutherford}} \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot \frac{E'}{E}$$

- 電子-陽子の弾性散乱
 - SLACの電子ビーム（1950-60年代）
 - 形状因子の測定
 - 散乱角分布の運動量移行 Q^2 依存
 - Rosenbluthの公式



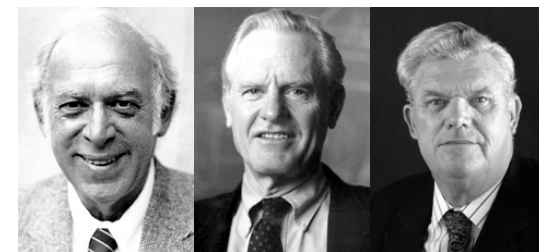
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} \left[\frac{G_E^2(Q^2) + \tau G_M^2(Q^2)}{1 + \tau} + 2\tau G_M^2(Q^2) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

- G_E : 電氣的形状因子
- G_M : 磁氣的形状因子
- 陽子の大きさの測定: 0.8 fm
 - 核子の内部構造を平均分布として示す

核子の構造

- 深非弾性散乱実験 (DIS)

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



Friedman Kendall Taylor

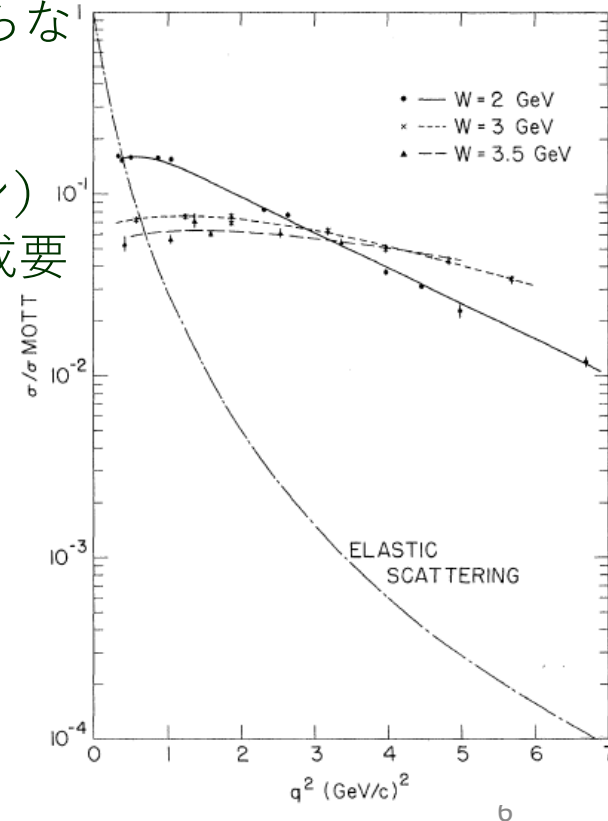
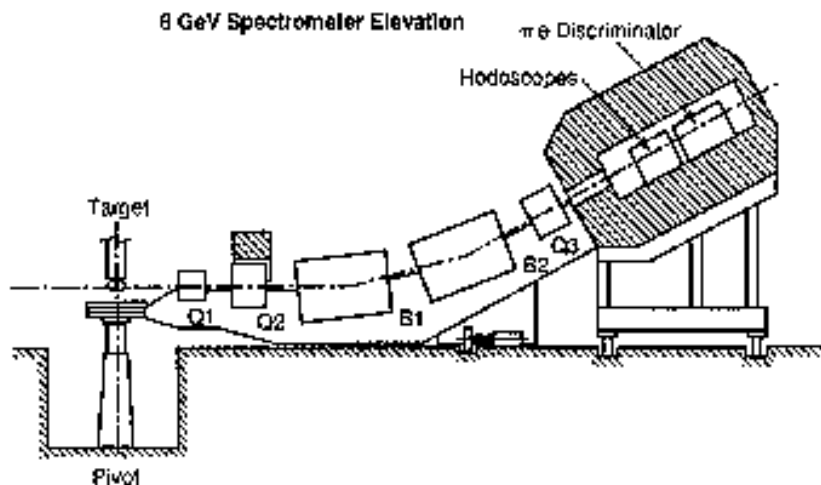
- MIT-SLAC実験 (1969, Friedman, Kendall, Taylor)

- 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)

- 核子全体による散乱ではなく、点状の構成要素との散乱



クォーク・パートン模型 (QPM)

- Bjorkenのスケーリング則

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

- F_2, F_1 は Q^2 によらず、 x のみの関数である
- Dirac散乱：標的が μ のようなスピン1/2の標的

$$\left(\frac{d\sigma}{dQ^2} \right)_{\text{Dirac}} = \frac{4\pi Z^2 \alpha^2}{Q^4} \left(\frac{E'}{E} \right)^2 \left[\cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{Q^2}{2M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

- Callan-Grossの関係式

$$F_2 = 2xF_1$$

- パートンは μ のようにスピン1/2

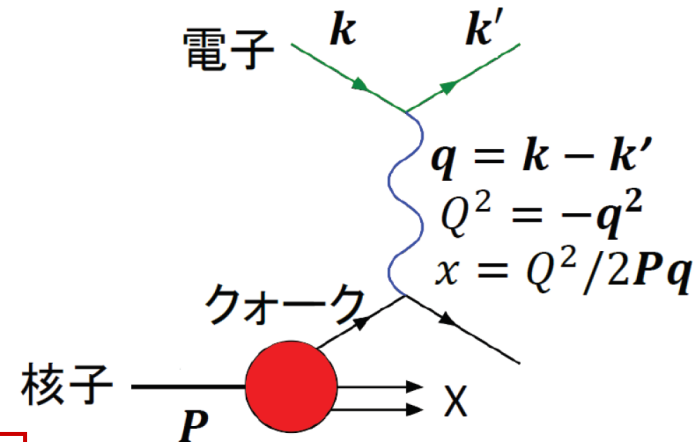
$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \{1 + (1-y)^2\} F_2(Q^2, x)$$

- 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

- パートン分布関数 (PDF)

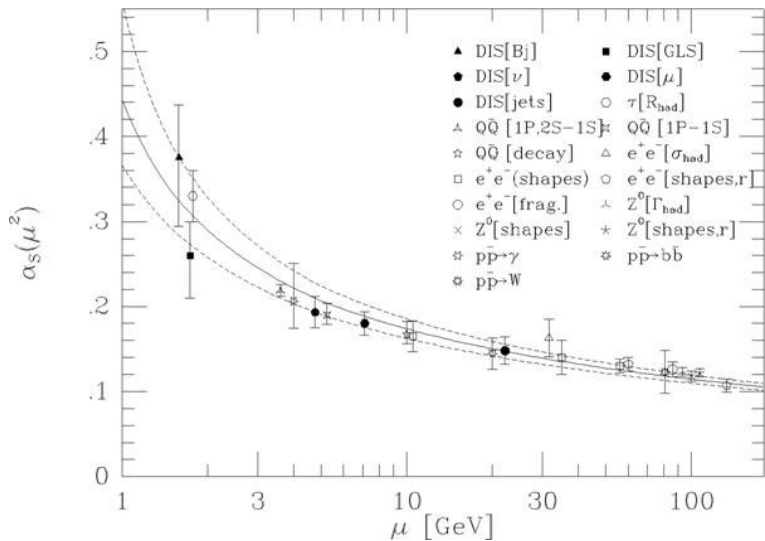
$$F_2 = x \sum_q e_q^2 q(x)$$

- 核子の内部構造をパートン分布として示す
- $q(x)$: クォーク q のパートン分布関数



QPMからQCDへ

- スケーリング則の破れ
 - 精密に測定すると、
 - Callan-Grossの関係式は破れている
 - F_2 は Q^2 に依存
 - グルーオンの存在
- 量子色力学 (QCD)
 - 漸近的自由性と閉じ込め



Gross

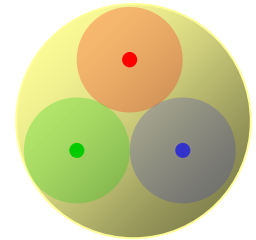
Politzer

Wilczek

核子の内部構造

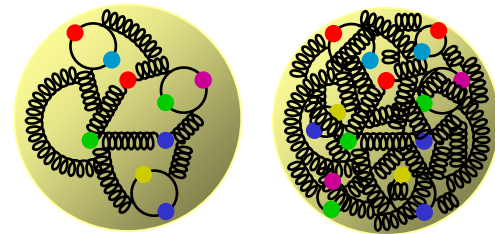
- 構成子クォーク描像

- 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

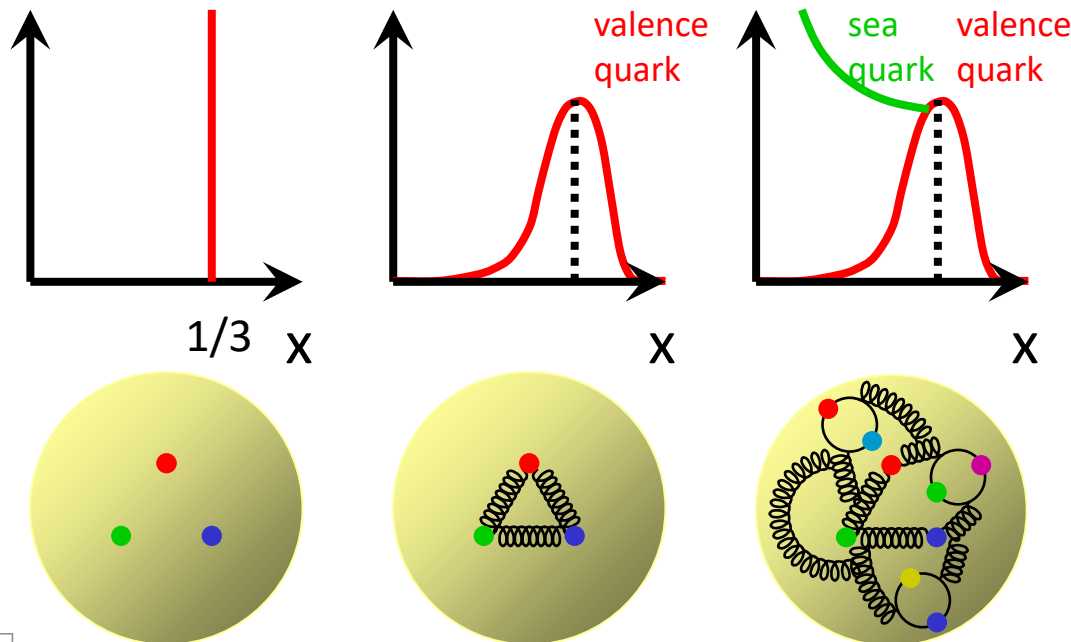


- 自然の階層としてのクォーク・グルーオンと構成子クォークの間の溝の理解

- 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

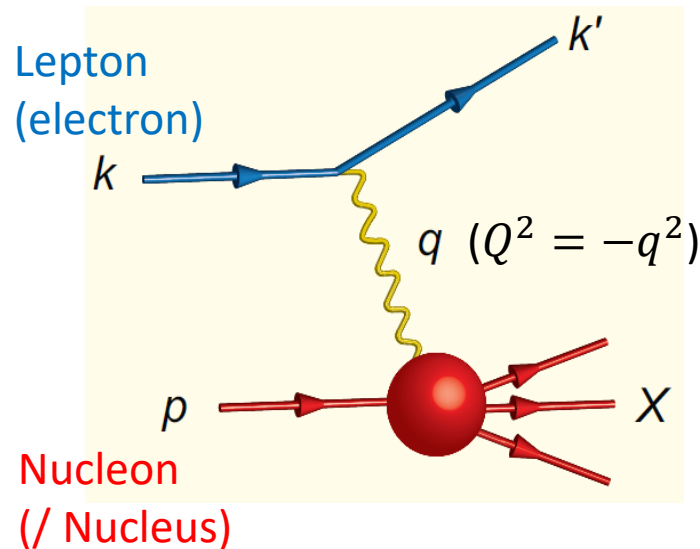


x: Bjorkenのx
“縦”方向の
運動量の割合
(1次元的な描像)

クォーク・グルーオン構造

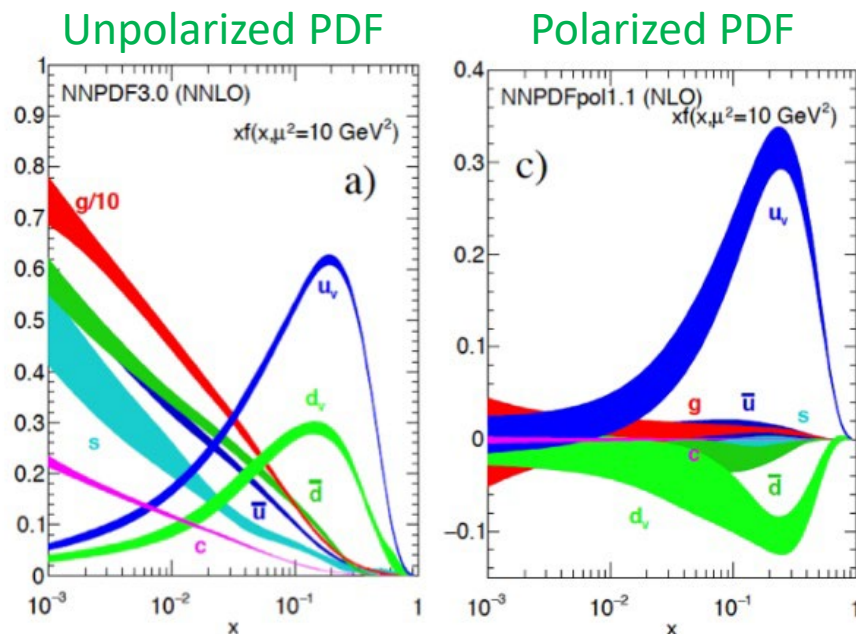
- レプトン（電子）の深非弾性散乱（inclusive DIS）

- 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



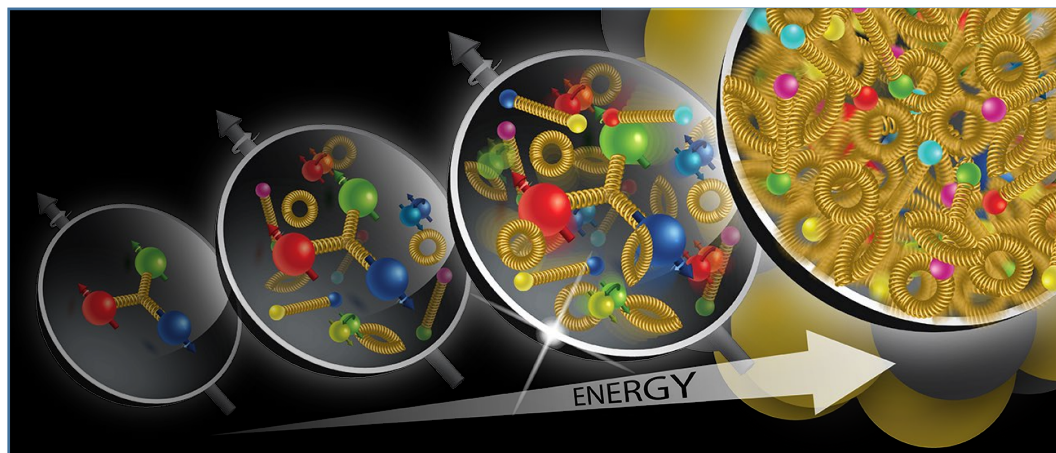
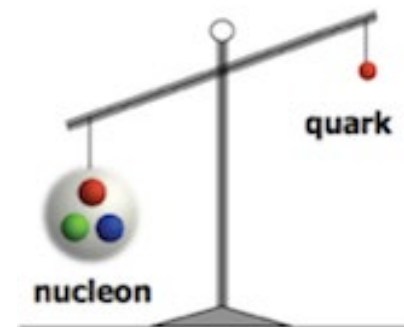
- クォーク、グルーオンのパートン分布関数 (PDF)

- 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



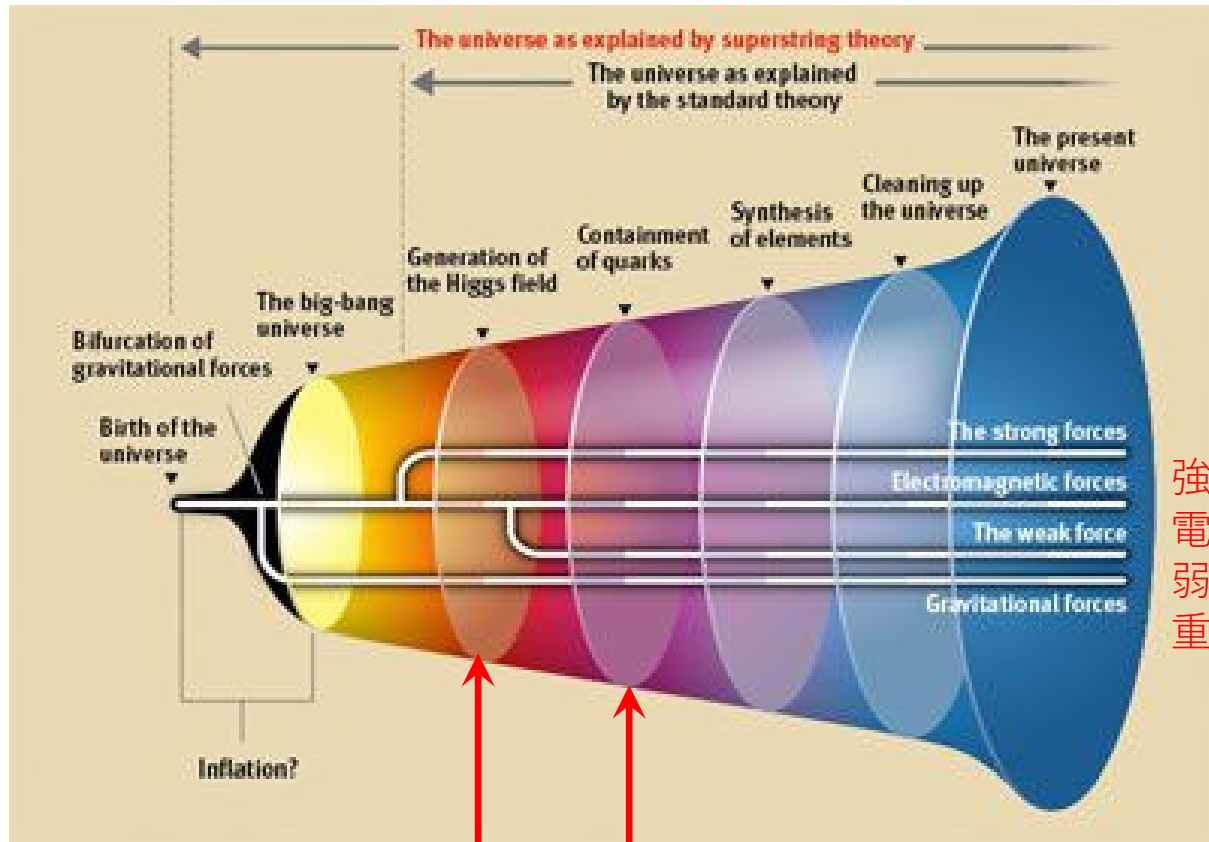
EICの物理

- 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



対称性の破れ
Higgs場

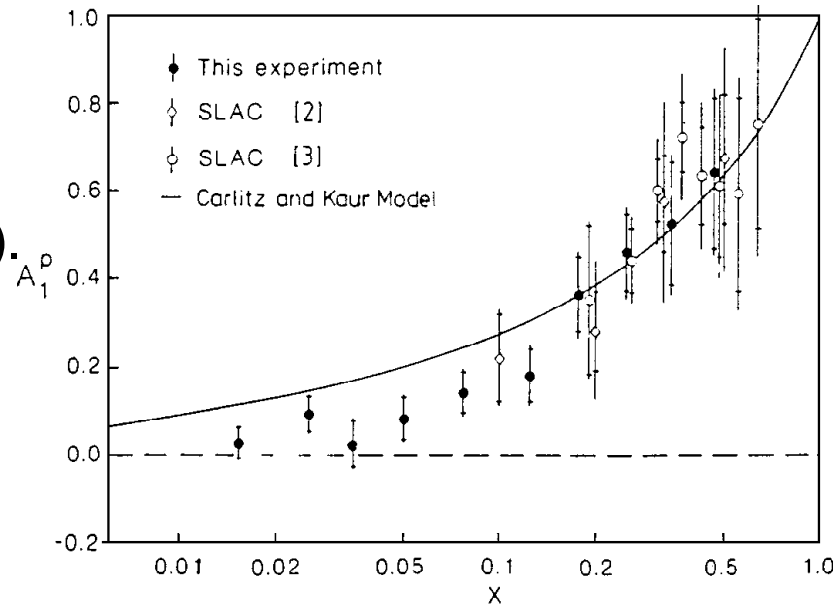
クォークの閉じ込め
カイラル対称性の破れ

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

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

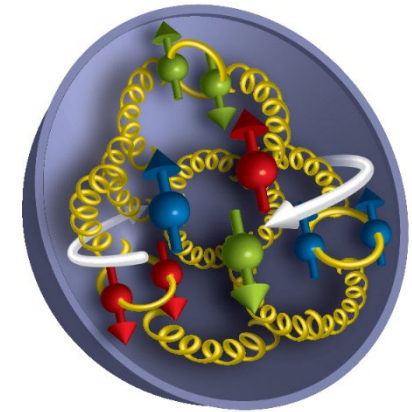
$\Delta\Sigma/2$ = Quark contribution to Proton Spin

L_Q = Quark Orbital Ang. Mom

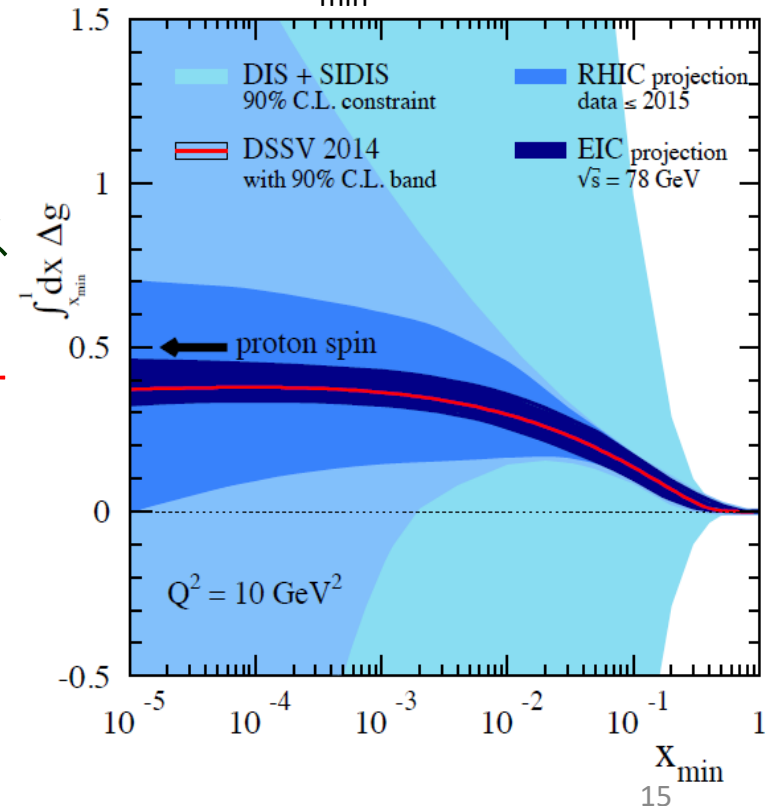
Δg = Gluon contribution to Proton Spin

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

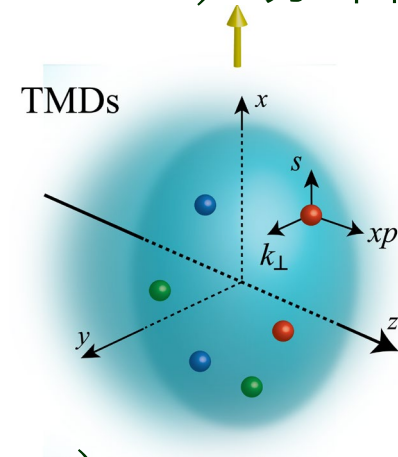
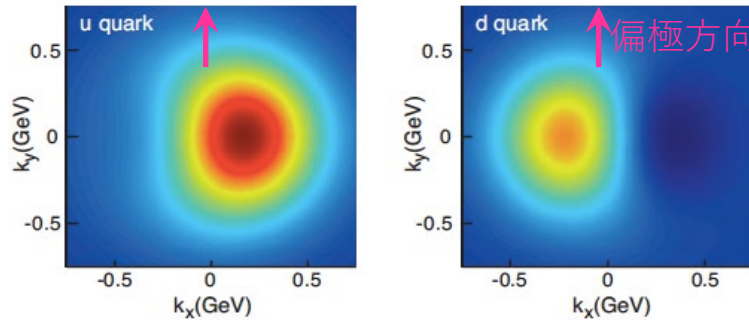


Integrated gluon polarization down to x_{\min}

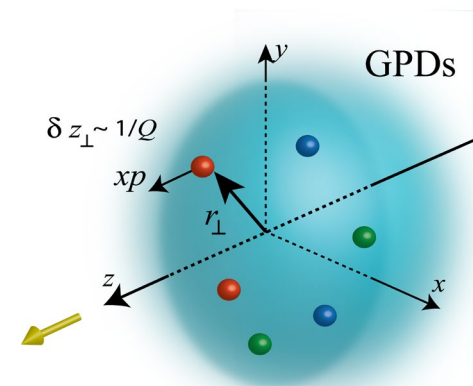
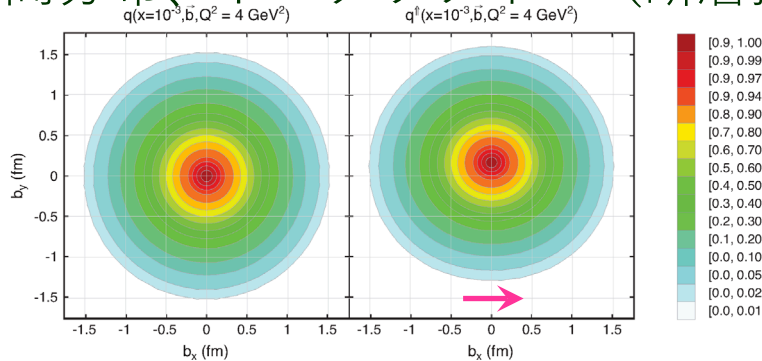


核子・原子核の3次元構造

- 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

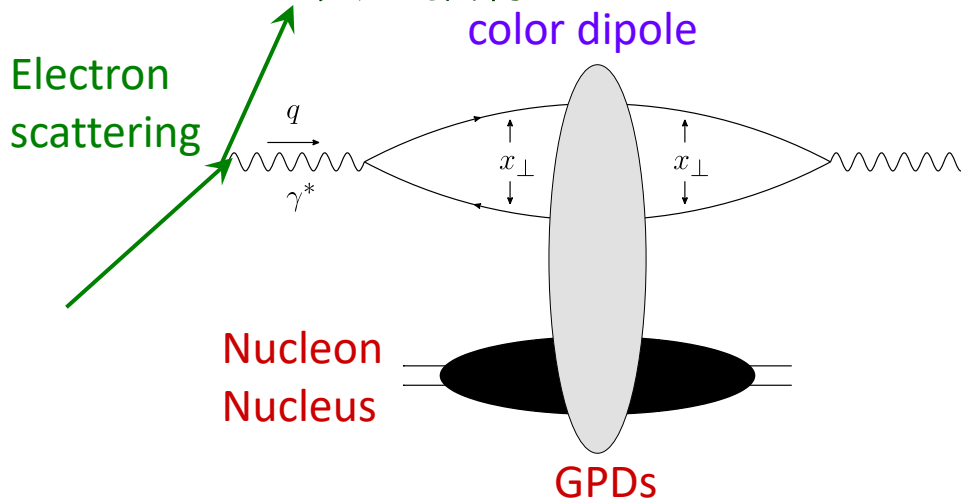


- GPD (Generalized Parton Distribution)
 - 空間分布、トモグラフィ（断層撮影）

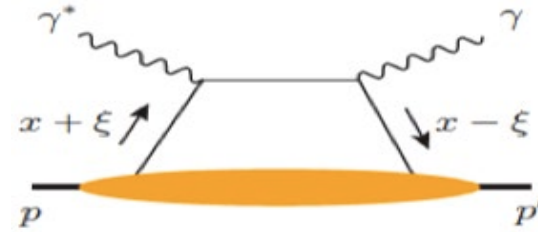


核子・原子核内部の空間分布

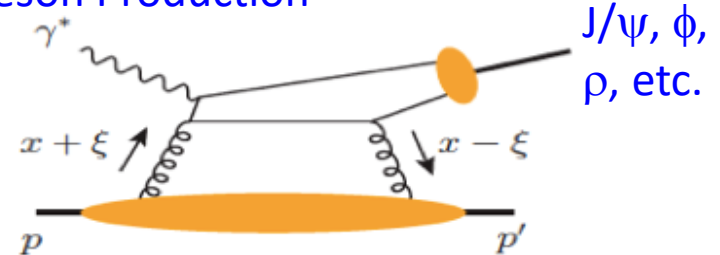
- EIC = カラー・ダイポール顕微鏡
 - exclusive (排他的) 過程やdiffractive (回折) 過程
 - 三次元描像



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

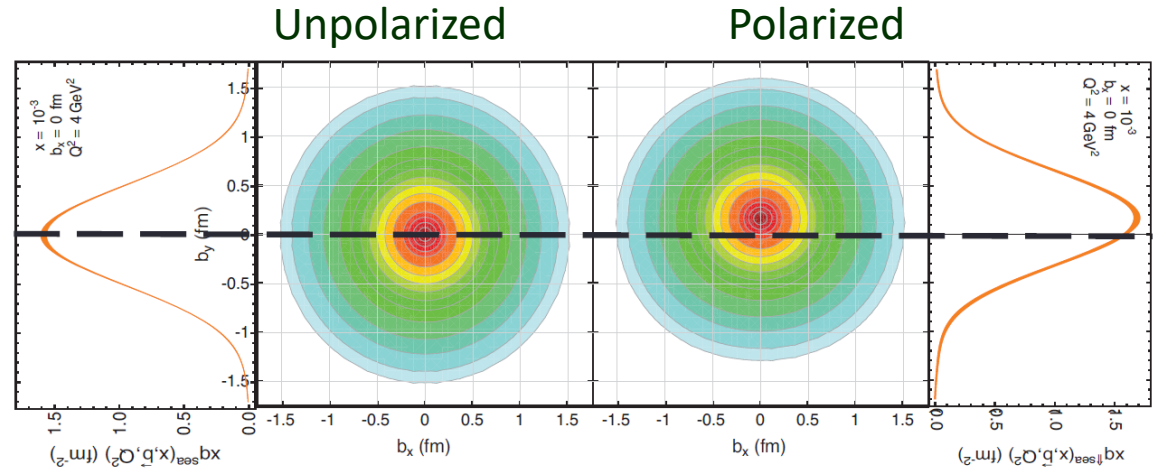
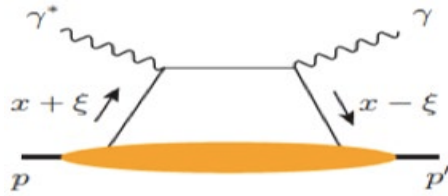
$$J_q^Z = \frac{1}{2} \sum_q \Delta q + \sum_q L_q = \frac{1}{2} \left(\int_{-1}^1 x dx (H^q + E^q) \right)_{t \rightarrow 0}$$

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

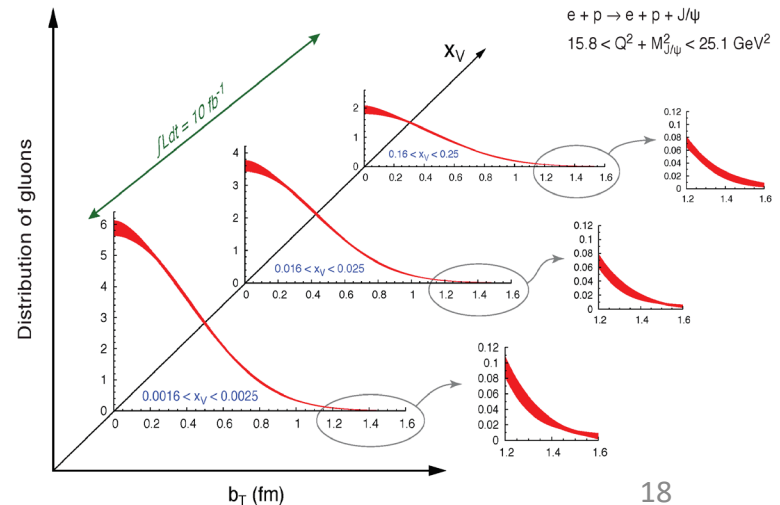
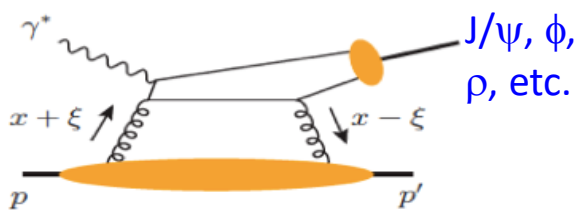
EIC 100 fb⁻¹ での海クォークの空間分布と対応する横断面におけるパートン密度



• 中間子生成過程

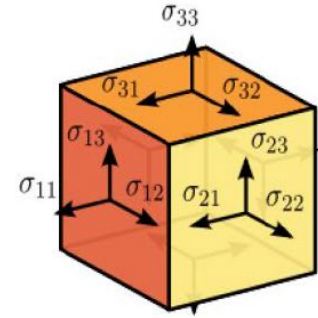
- J/ψ, φ, ρ等を測定することによりグルーオンの空間分布を測定する (トモグラフィ)
- 高ルミノシティ測定により、大きな半径に対しても精密な測定を行うことができる

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



一般化された形状因子

- エネルギー・運動量テンソル (EMT)



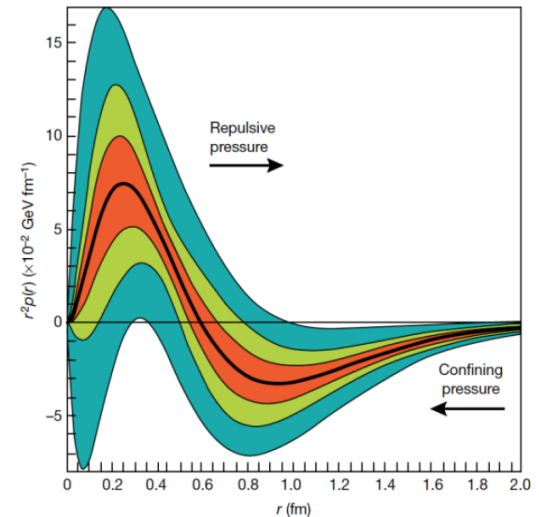
$$T^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} \text{Energy density} & \text{Momentum density} & & \\ T^{00} & T^{01} & T^{02} & T^{03} \\ T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} \\ T^{20} & T^{21} & T^{22} & T^{23} \\ T^{30} & T^{31} & T^{32} & T^{33} \\ \text{Energy flux} & \text{Momentum flux} & & \end{bmatrix}$$

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

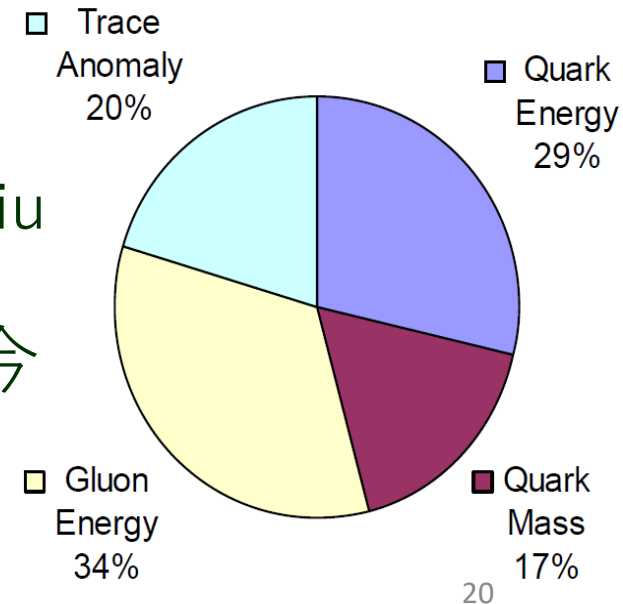
- 実験でのそれぞれの寄与の決定方法の議論が進む

- 格子QCD計算

- arXiv:1710.09011, update by K.-F. Liu et al.

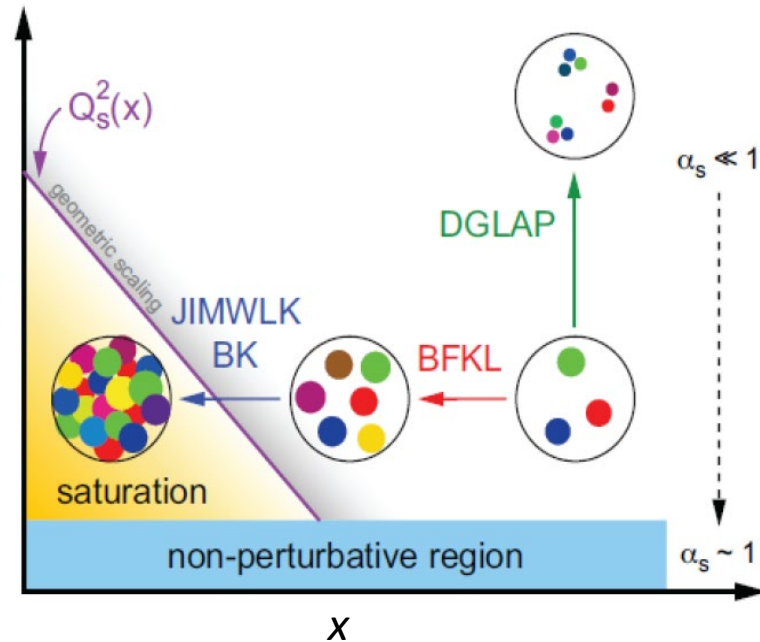
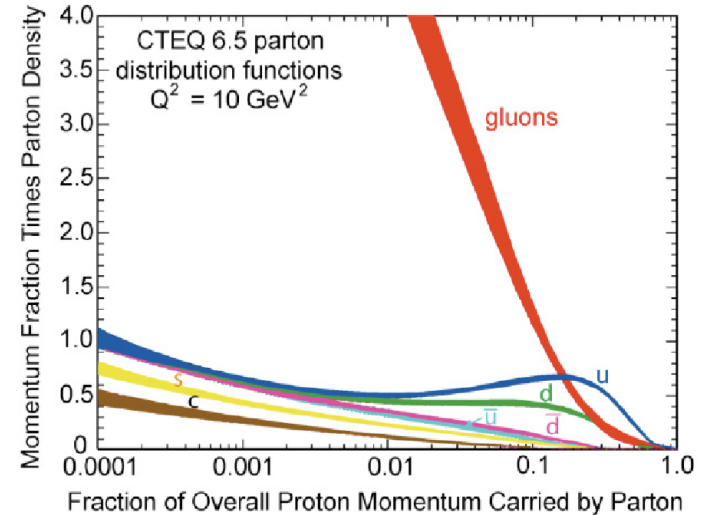
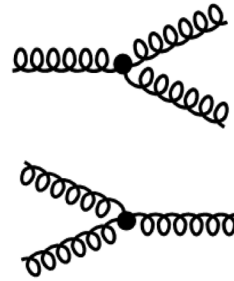
- 理論計算と実験測定の精密比較を今後進める

- 質量、スピン、圧力、半径、...



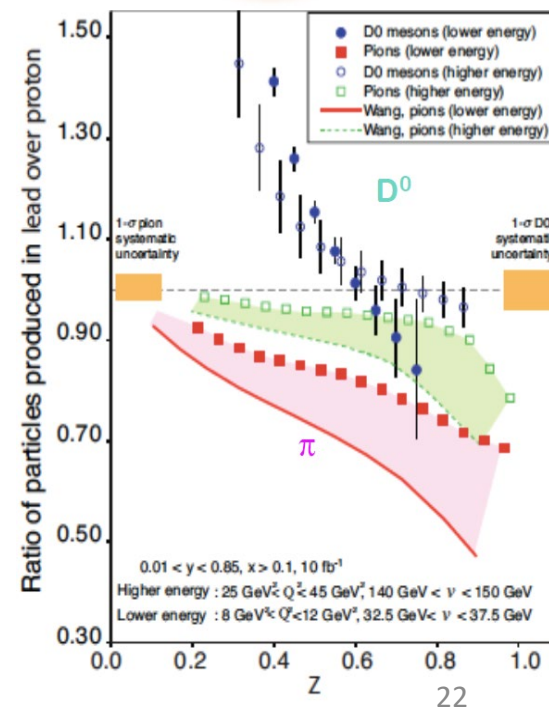
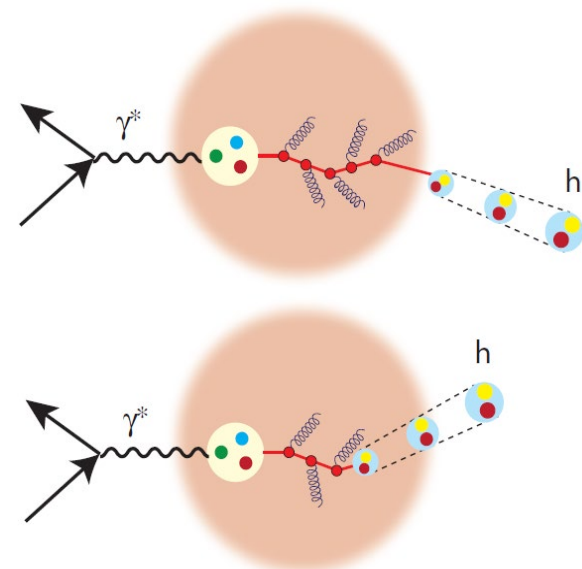
グルーオン飽和

- グルーオン放出
 - 低い x 領域における発散
- グルーオン再結合
 - 発散を制限
- つり合ったところで飽和状態となる
 - 古典的な描像に基づく予想
 - 「粒子状態ではない集団的な場」としてのグルーオンが存在すると考えられる
- 量子的な集団的グルーオン場の発見
 - 飽和グルーオンモデルであるカラーグラス凝縮 (CGC) モデルにより、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

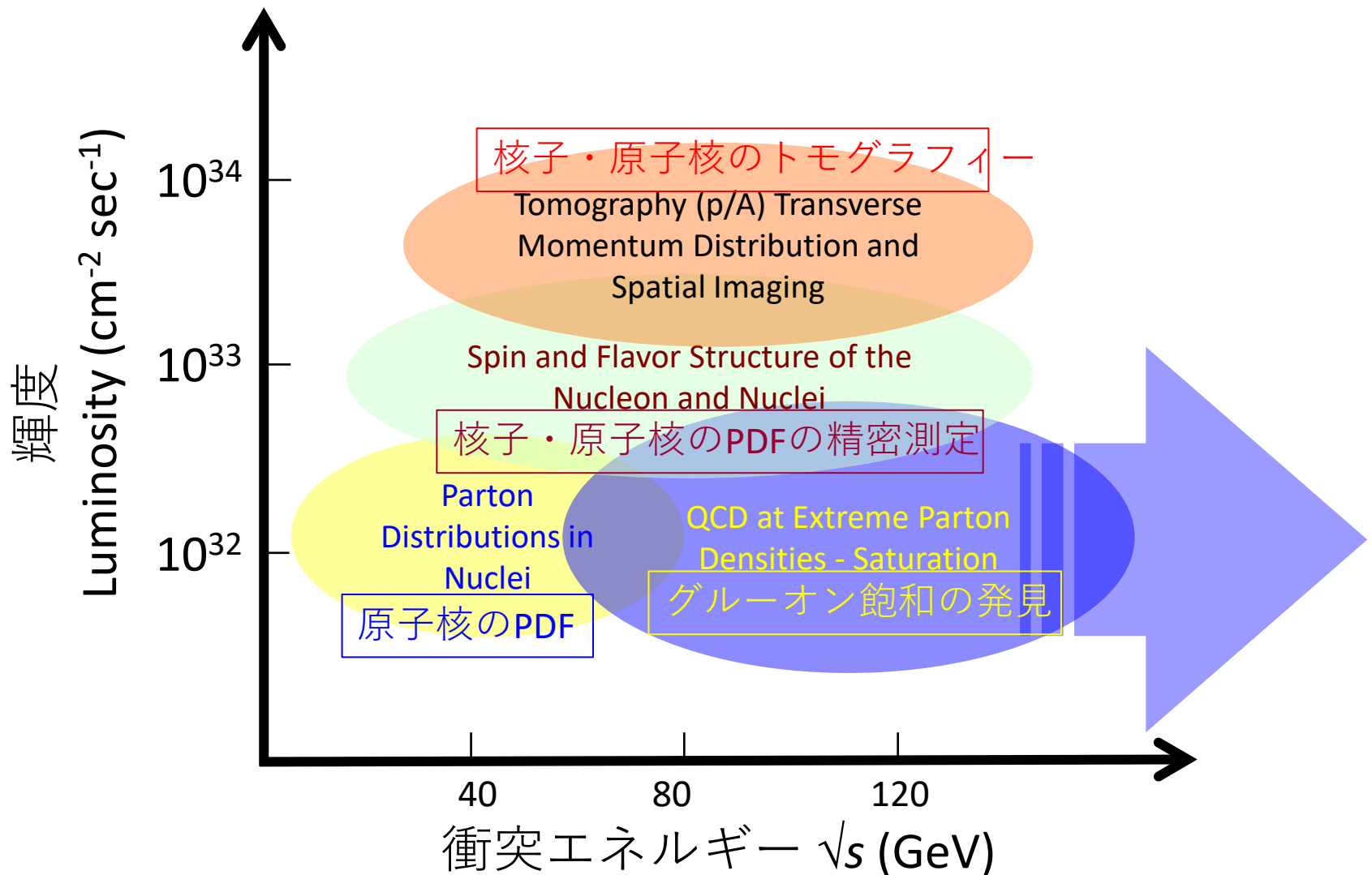


原子核内部でのハドロニ化

- 核物質中 (cold nuclear matter) でのクォーク、グルーオンのハドロニ化、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？
- ハドロニ化の質量依存
 - 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

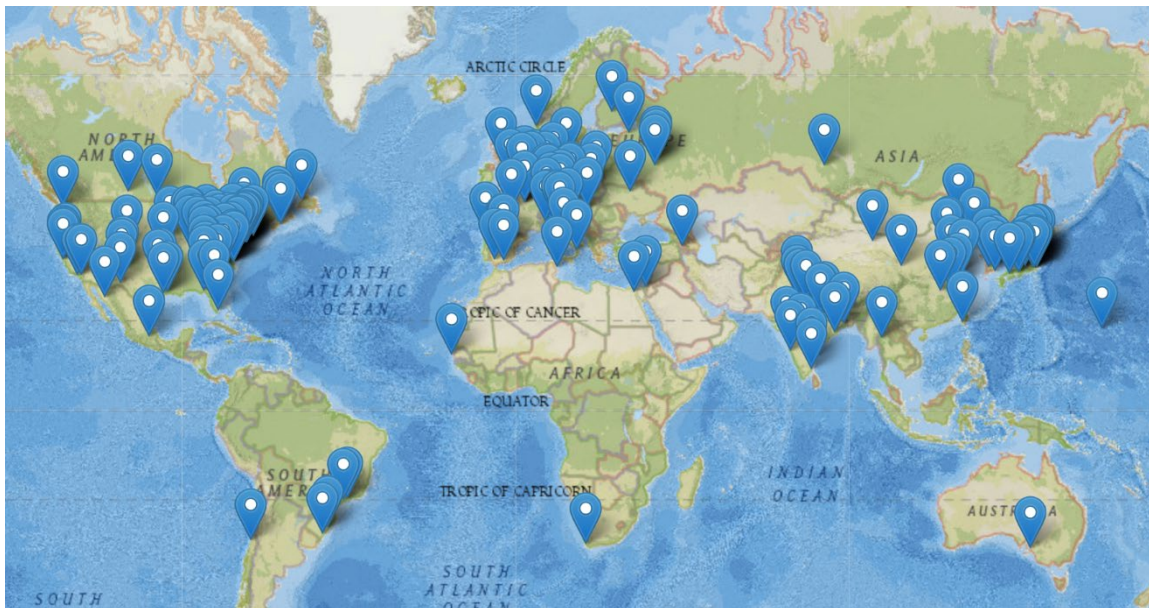
- 今後10年間におけるLattice QCD（格子量子色力学）の発展は実験精度に匹敵するか、もしくはそれを超えるものになることは明らかである
 - 計算機テクノロジーの発展
 - 計算機プロジェクトの必要性
- EICにおけるクォークとグルーオンの物理はLattice QCDの発展とともに進む
- 精密な理論計算と実験による精密測定の比較によりQCDの研究を行い、核子・原子核・QGPの理解を確立する



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

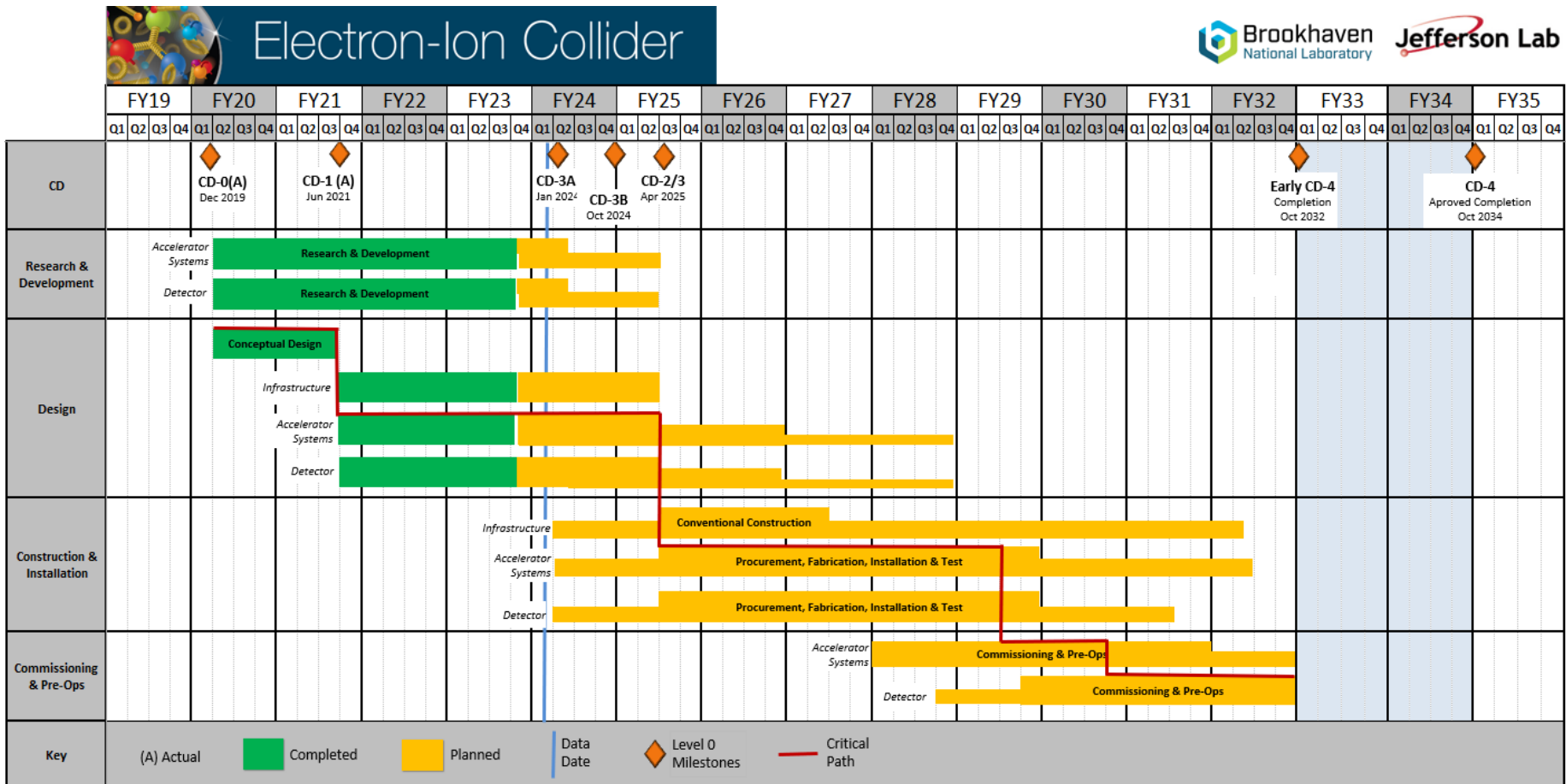


EICの状況

- 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

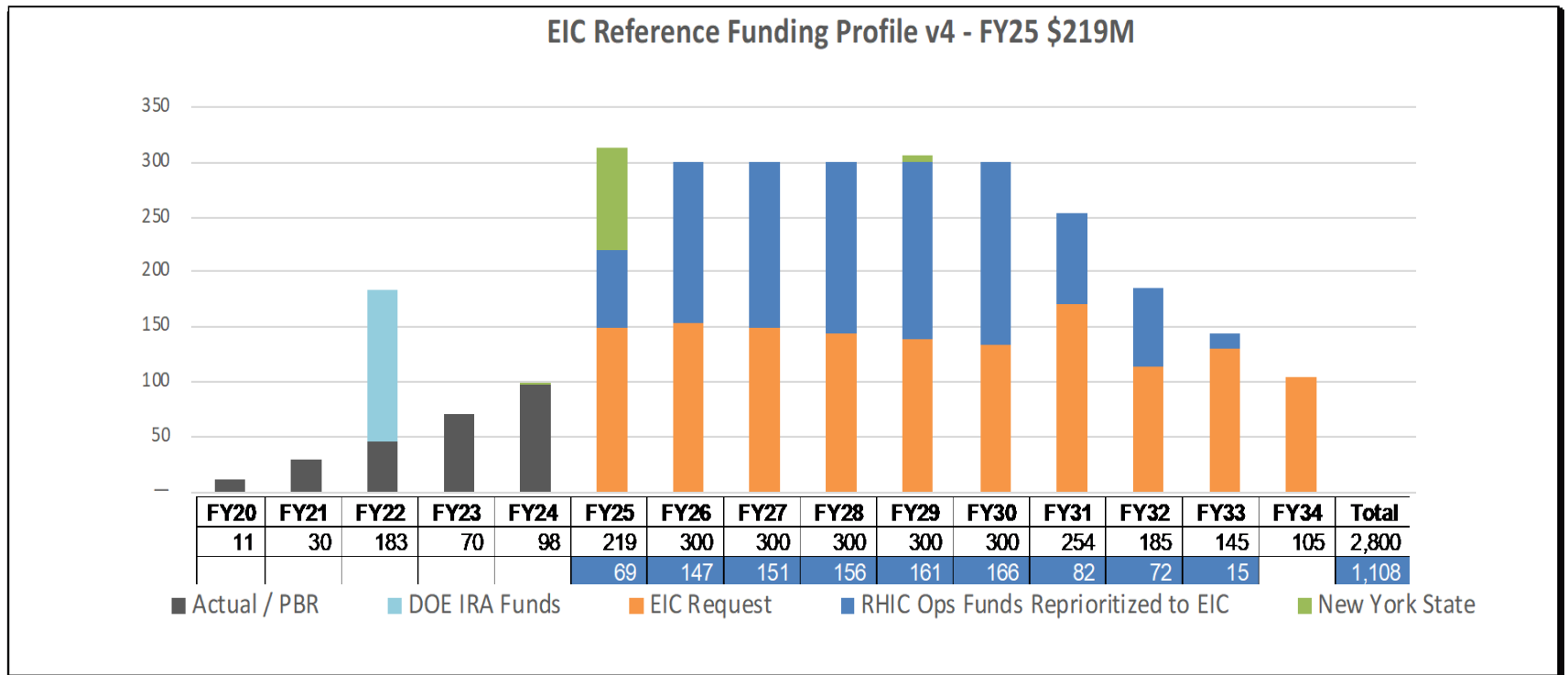
EICの状況 (スケジュール)

- CD-3A: 長納期品調達の承認
 - Review 2023.11, Approval 2024.3
- CD-2/3: 基本性能の評価、建設の開始
 - 2025.4

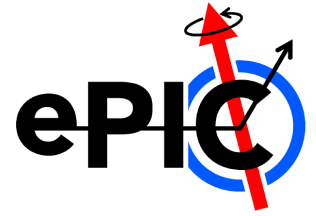


EICの状況 (資金)

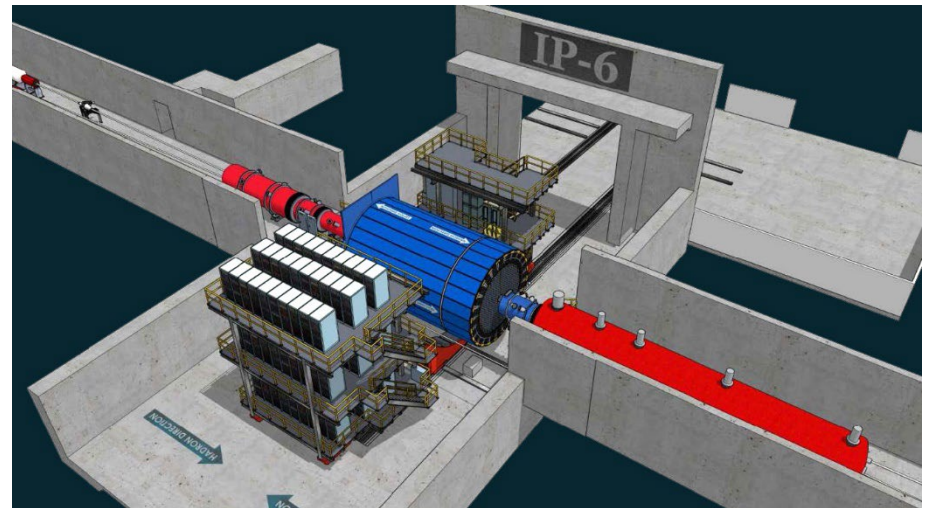
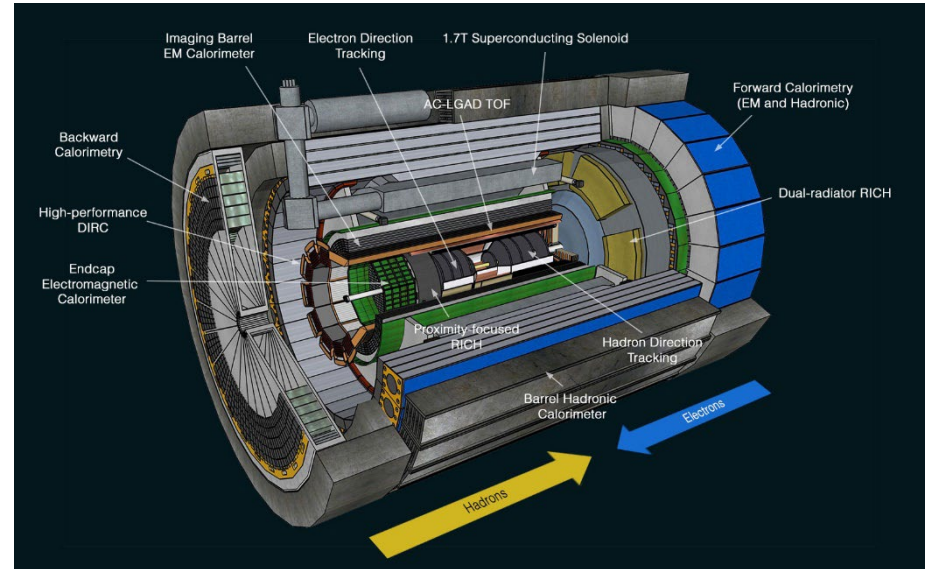
- 2023年度までのDOE資金\$294.2M (IRA資金\$138Mを含む)
- 2024年度大統領予算要求\$98.5M
- 保留中のNY州コミットメント\$100M
- RHICの運転資金の大部分は2025年度からEIC建設に優先され、年間\$150Mに達すると予想
- 2025年度の資金は未定、RHICの運転計画にもよる



ePIC実験

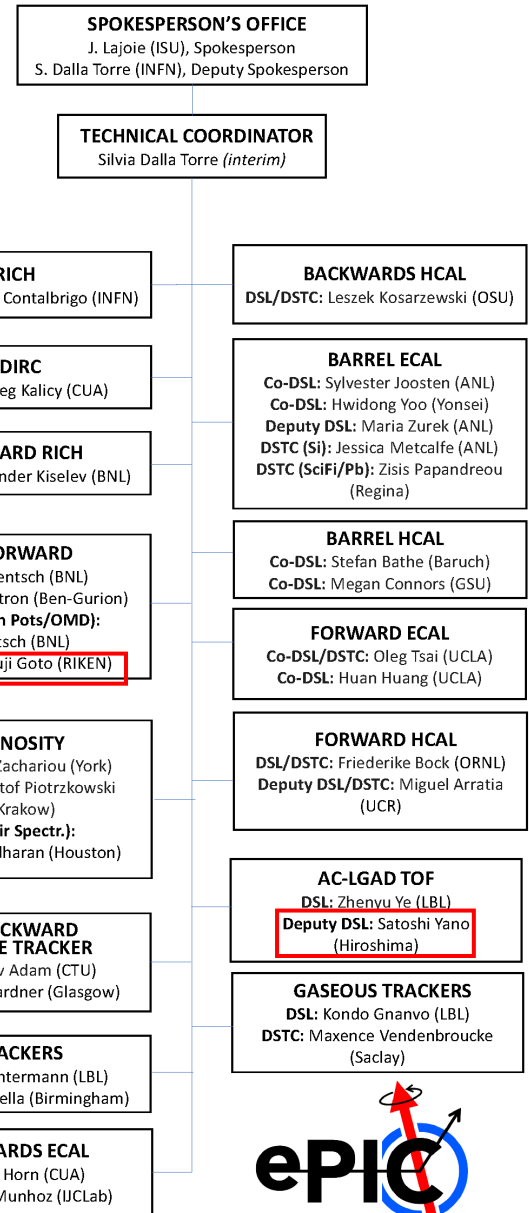


- 2021.3: EIC計画から検出器提案のコール
- 2021.12: 3つの検出器提案の提出
 - 日本グループはECCE検出器consortiumへ参加
- 2022.3: DPAP（検出器提案諮問委員会）が最初の検出器の基本設計としてECCE検出器を採用
 - ECCEと他の検出器共同研究を統合して第一検出器の技術設計の議論
- 2022.7: ePIC検出器共同研究



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

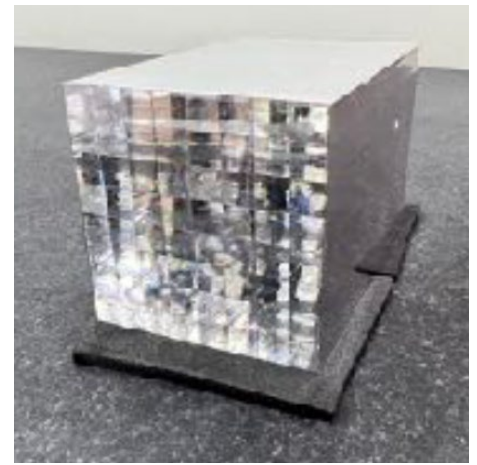


EIC日本グループの活動

- 日本学術会議マスタープラン2020提出
 - 推進母体：山形大、理研、協力機関：神戸大、日本大、KEKなど
 - 提案者：大西彰正 山形大学理学部長
 - 学術大型研究計画として選定された
- 2022年：日本学術会議「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」
 - 「国際高エネルギー量子科学フロンティア：海外施設で展開するQCD研究」(aka 高エネルギーQCDフロンティア構想)の一部としてEIC計画への参加を提案
 - 提案者：小安重夫 理化学研究所開拓研究本部長
 - 参加グループ：理研、山形大、JAEA、日本大、筑波大、筑波技術大、東大CNS、広島大、奈良女子大、長崎総科大、神戸大、信州大、九州大、KEK、名古屋大、東大ICRR
 - 参加人数約50名（スタッフ30名+ポスドク6名+博士課程学生10名+修士）
 - ePIC実験全体に対して10%程度の人数
 - 提案はJ-PARC拡張とRIBF高度化と並ぶ第3の柱とすることを目指して提案し、日本核物理学委員会承認された
- 長年にわたり、海外での国際共同実験を主導してきた実績
- 米国EIC計画への国内推進体制は万全に整っており、量子色力学（QCD）研究を日本が主導して完遂する
- メーリングリストの開設
 - eic-japan-l@ml.riken.jp
- 当面の会合は木曜23時から開催
 - <https://indico2.riken.jp/category/6/>
- アジアグループ（韓国、台湾、インド、中国、…）グループとの協力の議論
 - Monthly Zoom meeting
 - Mailing list: eic-asia-l@ml.riken.jp

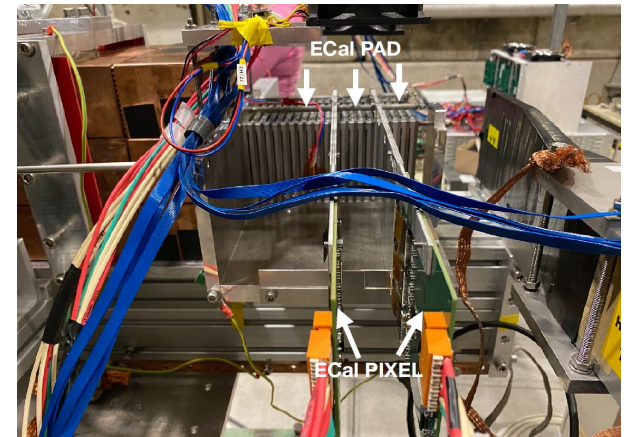
- 結晶カロリメータ

- 台湾グループがLYSO結晶のプロトタイプ検出器を製作
- テストビーム@東北大ELPH



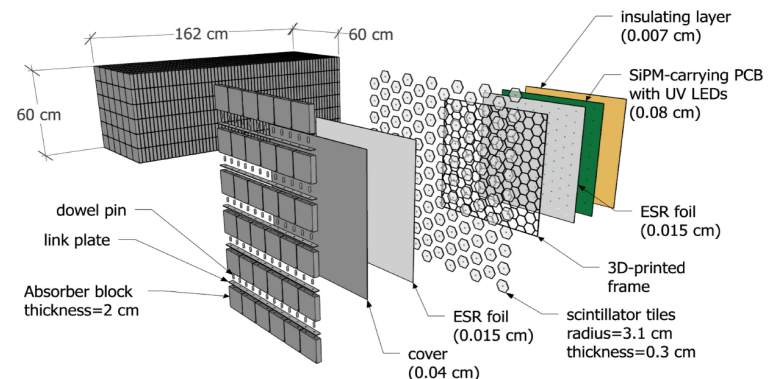
- W + Siイメージングカロリメータ

- ALICE-FoCal-Eの技術
- FoCalテストビーム@CERN-PS & SPS
- FoCal-E Padテストビーム@東北大ELPH
- 中性子照射テスト@理研RANS



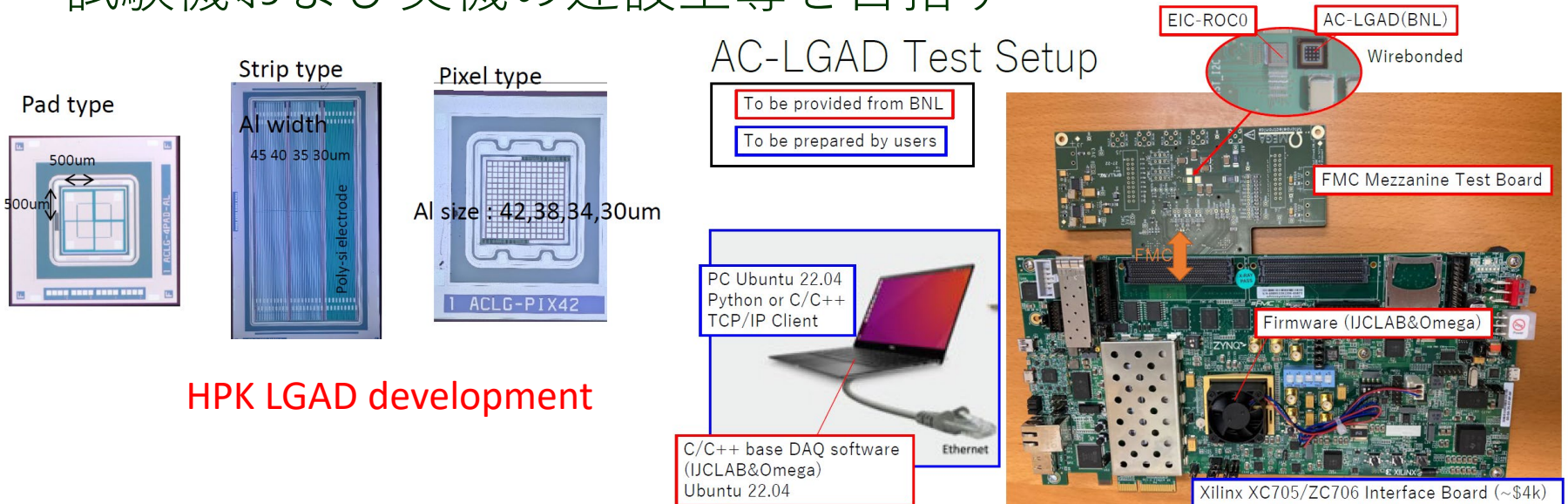
- ハドロンカロリメータ

- SiPM-on-tile technology
 - ePIC Forward Hadron Calorimeterの技術
- 鉄 + シンチレータ



AC-LGAD

- 時間および空間分解能に優れたAC-LGADを用いた飛行時間測定器バレル部の開発
- 2023年度、BNLで製作したセンサーとフランスで製作した読出しASICを組み合わせたテストボードを入手
- 広島大に高性能測定機器を準備してテストベンチを立ち上げた
- 今後、HPK社とのセンサー開発、多種類のセンサーとASICについて性能評価を行う
- 運動量測定に対する効果も含む全体の設計評価を開始
- 試験機および実機の建設主導を目指す



ストリーミングデータ収集系

- EICの衝突レート500kHzの全事象をトリガーレスで取る
- フロントエンドからのデータ総量は100 Tbps
- FPGAやGPUを用いた生データをオンラインで再構成する機構
- 東大CNSはSPADI-Allianceと協力
 - ハードウェア加速演算機を用いたオンラインのデータ処理系の開発
 - AI/ML技術の応用
 - リソース策定のためのベンチマーキング
 - ストリームデータ処理系の詳細設計

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