

Electron-Ion Collider (EIC) 計画と その物理

2018年10月1日 (月) @ 原研

後藤雄二

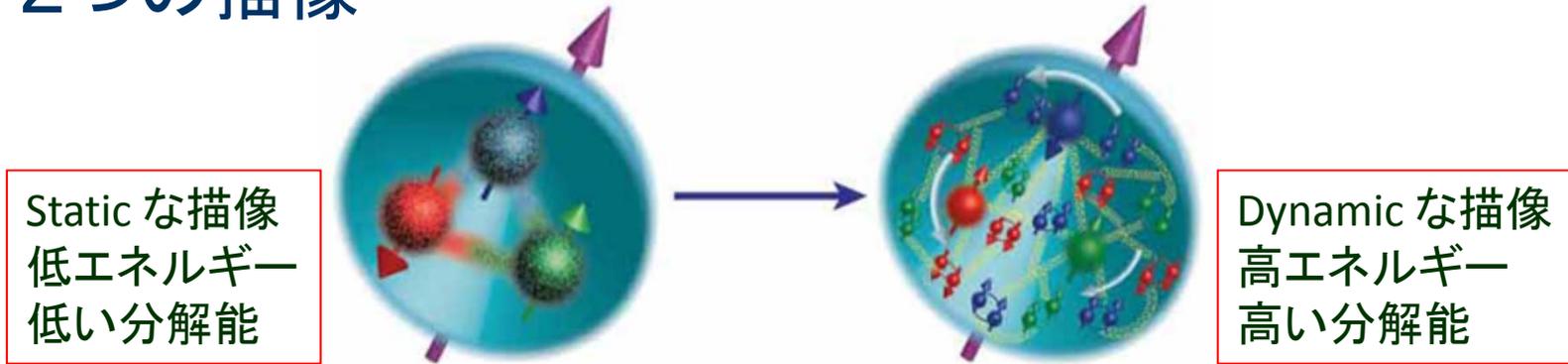
理研仁科センター

目次

- EICの物理の概要
- EIC計画の進行状況
- EICの物理
 - パarton分布関数測定の精密化
 - 核子・原子核のトモグラフィー
 - グルーオン飽和
 - 原子核内部でのハドロン化
- EIC加速器/検出器
- EIC Users Group
- まとめ

陽子の謎

• 2つの描像



構成子クォーク描像

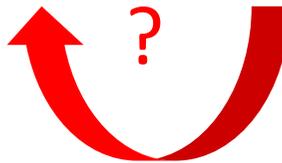
核子(ハドロン)の
磁気モーメントを説明

クォーク・グルーオン描像

核子(陽子)のスピンの謎
偏極深非弾性散乱(DIS)により、
クォークのスピンの核子(陽子)の
スピンを担う割合は約30%

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta g + L$$

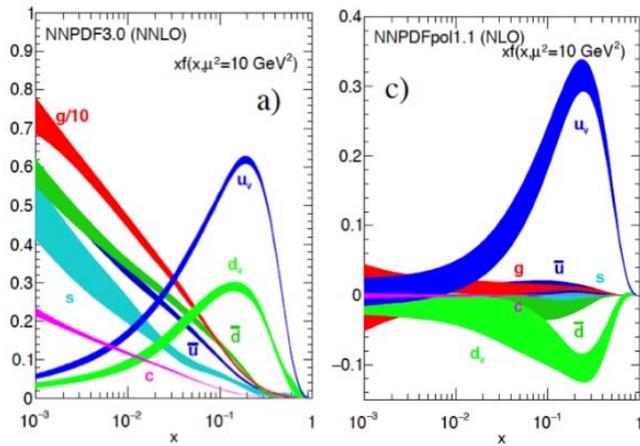
軌道角運動量
グルーオン・スピンの寄与
クォーク・スピンの寄与



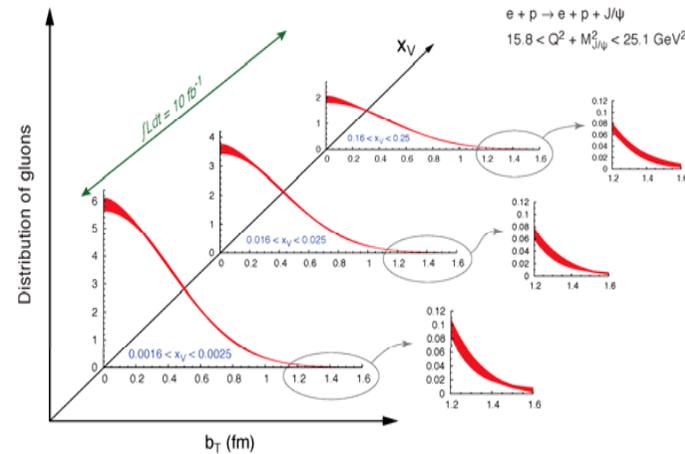
クォーク・グルーオン描像で構成子クォークを説明することができるか?
2つの描像の対応を付けることができるか?

クォーク・グルーオン描像

- 1次元描像から3次元描像へ



クォーク、グルーオンの1次元
(運動量比、 x) 非偏極、偏極分布



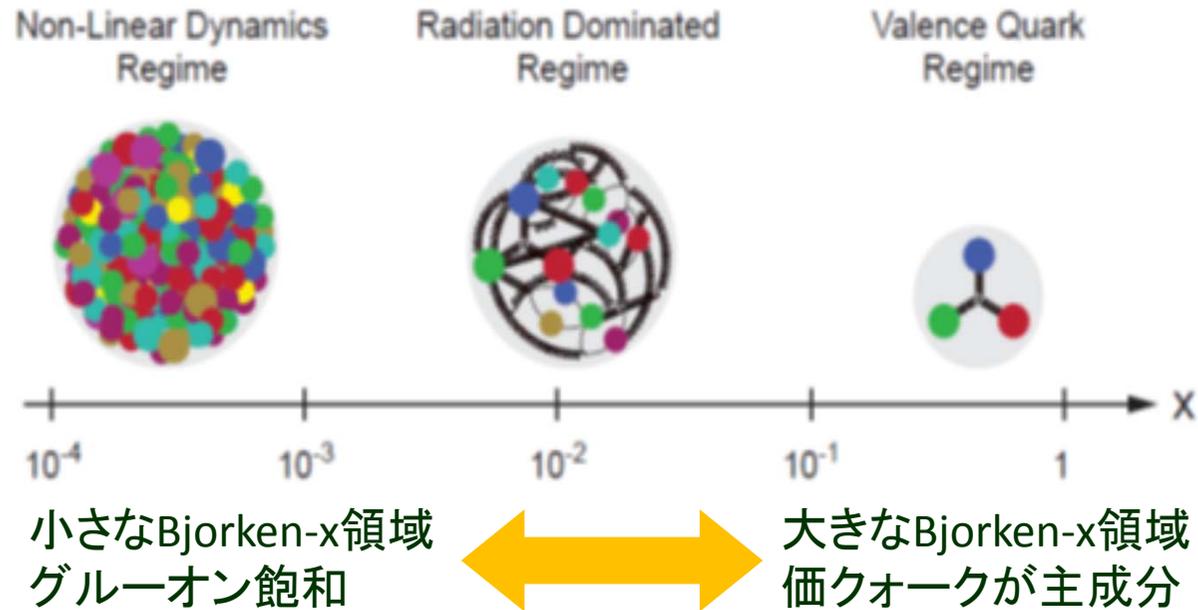
クォーク、グルーオンの電荷分布、磁気
モーメント分布、質量分布、半径(R)の測定
軌道運動の理解、軌道角運動量の決定

陽子の謎

- スピンの謎
- 質量の謎
 - クォーク・グルーオンの質量、運動エネルギー、凝縮
- 3次元分布→半径
 - 半径の謎

クォーク・グルーオン描像

- 新たな陽子の3次元描像の確立

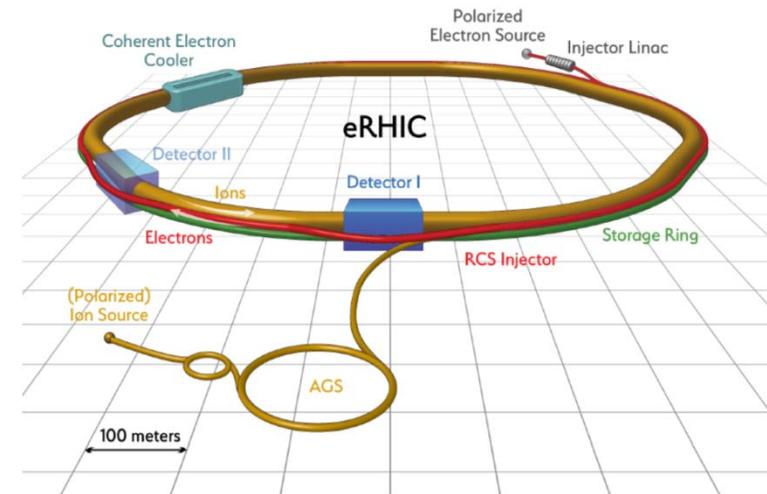


- 小さなBjorken-x領域におけるグルーオン飽和
 - 集団的グルーオン場の発見
 - 高密度グルーオン物質の創発的性質の研究

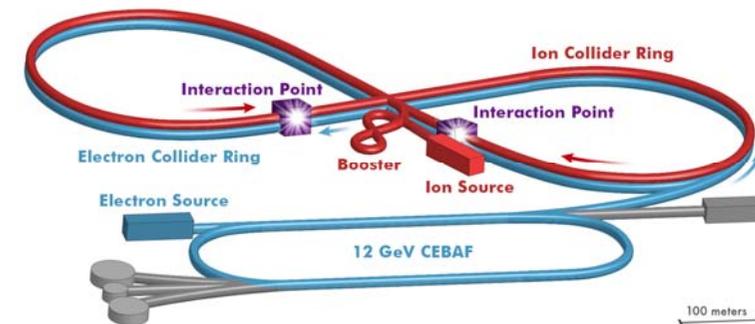
EIC (Electron Ion Collider) 計画

- 高エネルギーQCD研究のフロンティア
 - クォーク・グルーオン描像に基づく核子(ハドロン)・原子核 (cold nuclear matter) の研究
- 世界初の偏極電子+陽子/軽イオンおよび電子+重イオン衝突型加速器
 - 広い(Q^2, x)領域
- 電子+陽子/軽イオン衝突
 - 偏極ビーム: e, p, d/ ^3He
 - HERAの100-1000倍の輝度 $L_{ep} \sim 10^{33-34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 衝突エネルギー $\sqrt{s} = 20 - 100$ (140) GeV
- 電子+重イオン衝突
 - 広い範囲の核種

eRHIC at BNL

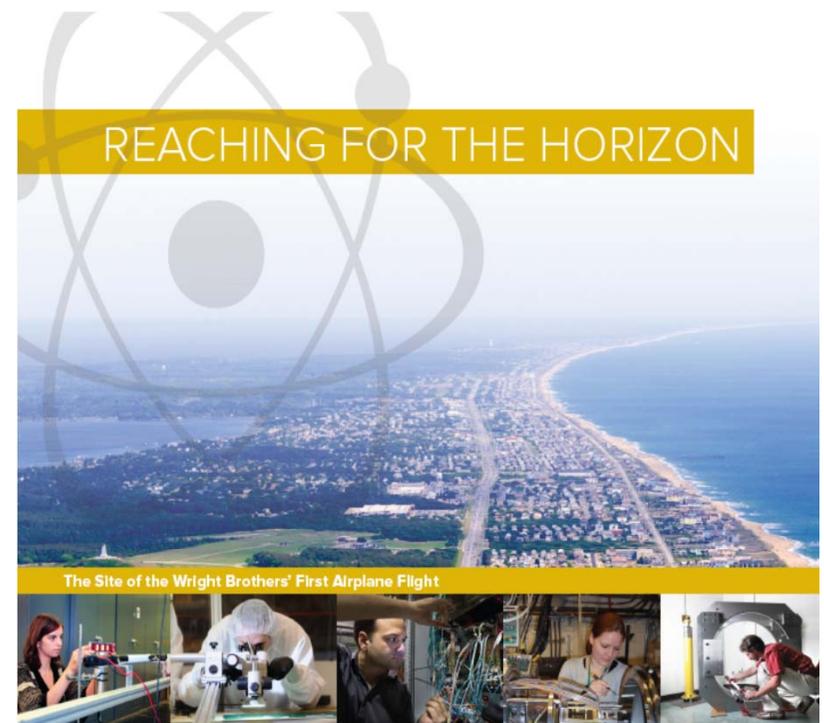


JLEIC at Jefferson Lab



EIC計画の進行状況

- NSAC 2015 Long Range Plan
 - We recommend a high-energy high luminosity polarized Electron Ion Collider as the highest priority for new facility construction after the completion of FRIB.
- NAS (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) review request by DOE
 - US-based EIC Science Assessment

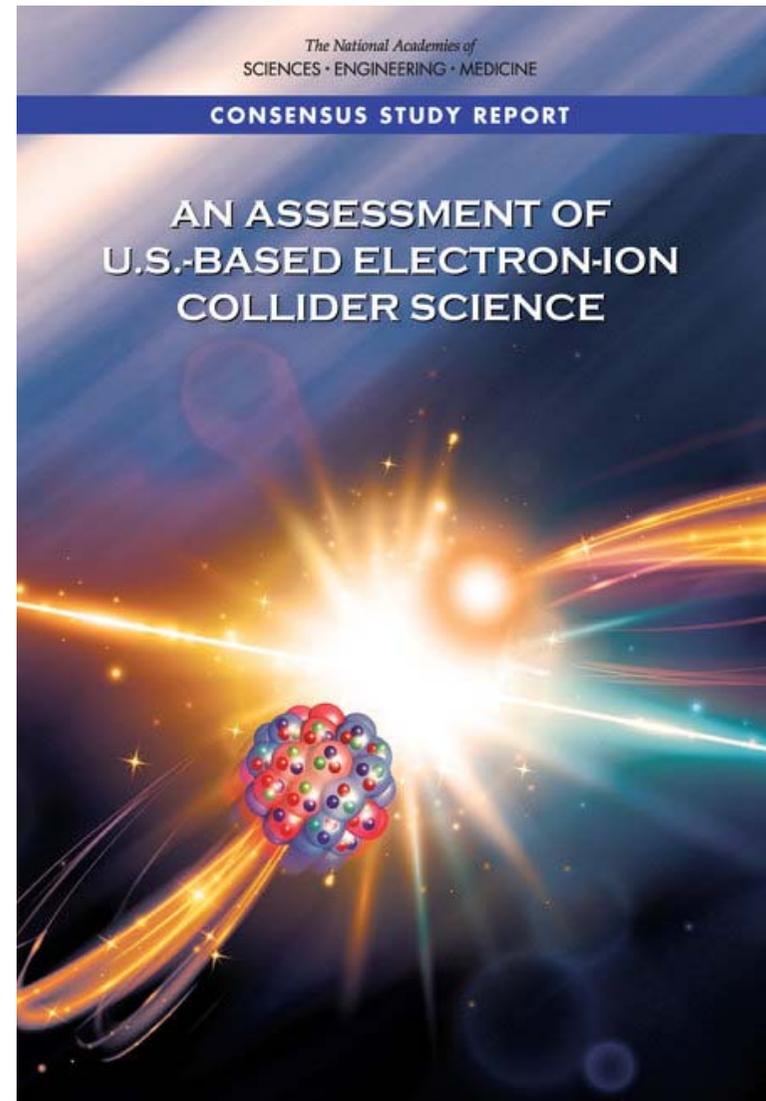


The 2015
LONG RANGE PLAN
for NUCLEAR SCIENCE



EIC計画の進行状況

- NAS webinar and NAS report release 7/24/2018
 - Webinar presentation by Gordon Baym (Co-chair)
 - The committee finds that the science that can be addressed by an EIC is compelling, fundamental and timely.
 - Very positive report
- CD-0 (US mission need statement) could be awarded after the completion of the NAS study ~2018/2019
 - Various (critical) accelerator R&D questions will not be answered until ~2019

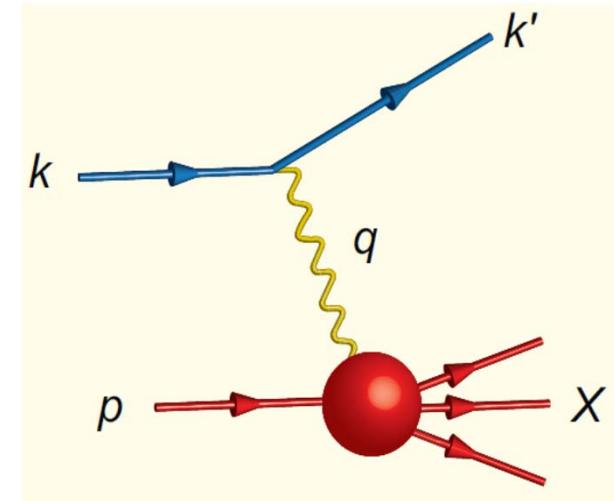


EIC計画の進行状況

- Site selection may occur around 2019/2020
- EIC facility construction has to start after FRIB completion, with anticipated FRIB construction to ramp down around 2020
- Optimistic scenario would have EIC funds start in FY20, more realistically begin of construction funds in FY22/FY23 time frame
- Completion of EIC facility construction would be around 2025-2030 timeframe

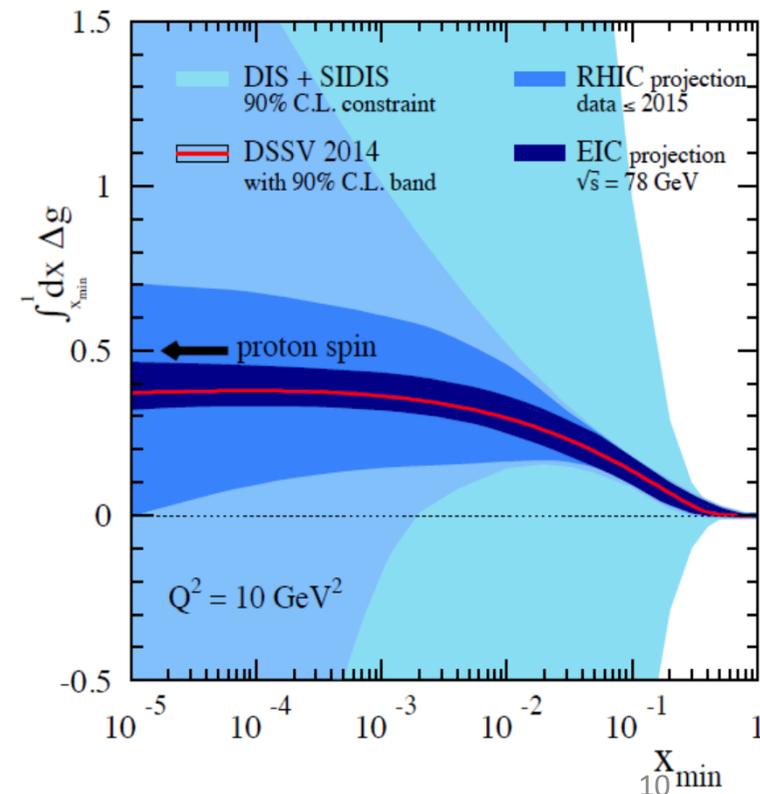
パートン分布関数測定の高精密化

- 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
 - 陽子の進行方向1次元に対するパートンの運動量の割合の分布を与える



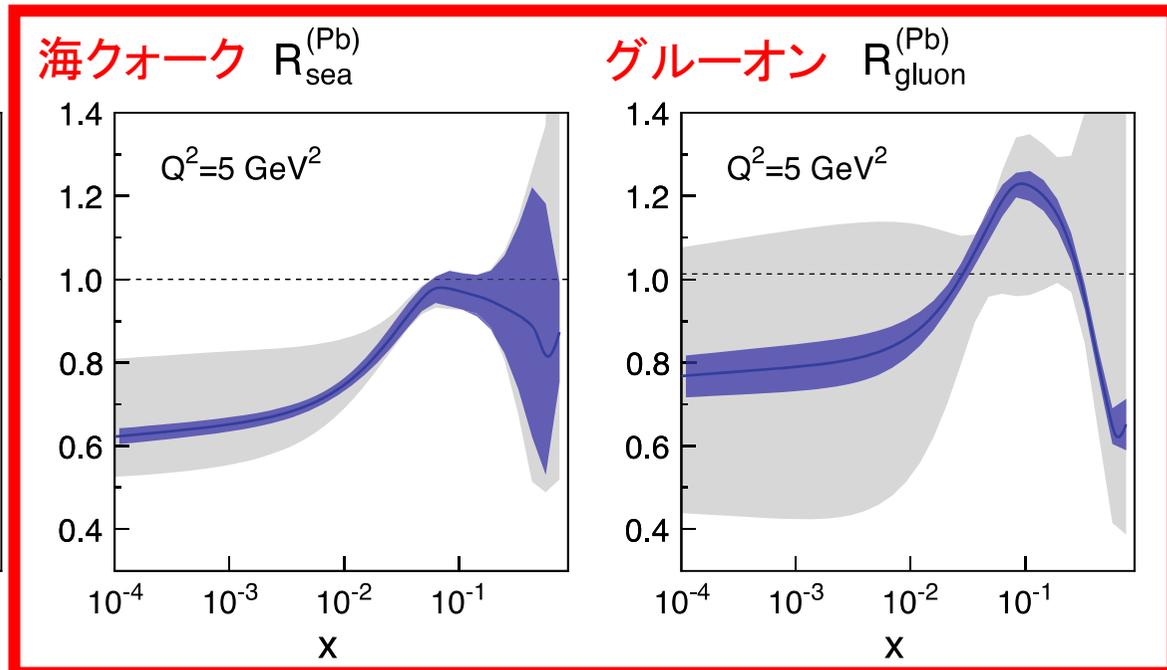
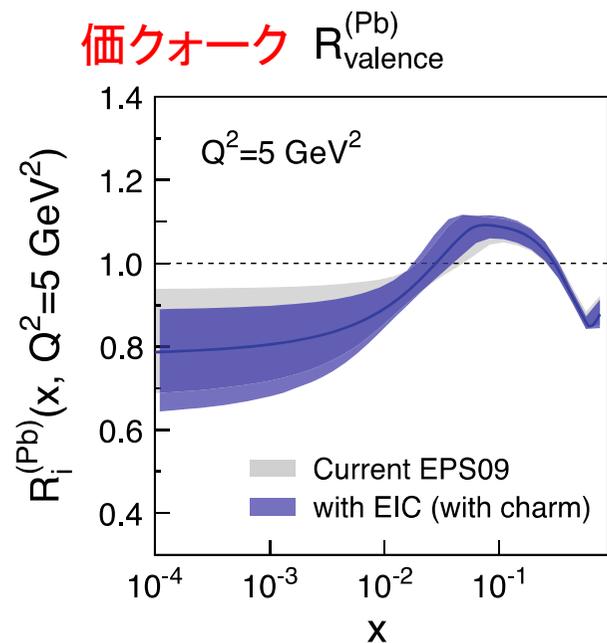
- 核子スピン
 - 偏極DISによる精密なクォーク偏極とグルーオン偏極の決定
 - 発展方程式
 - 小さなBjorken-x領域

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta g + L \quad \begin{array}{l} \text{軌道角運動量} \\ \text{グルーオン・スピンの寄与} \\ \text{クォーク・スピンの寄与} \end{array}$$

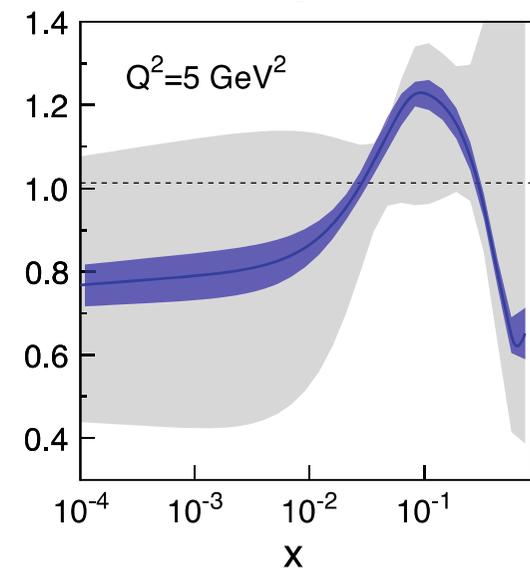


パートン分布関数測定の高精密化

- 原子核のパートン分布関数 (nPDF)
 - 現在及び将来のLHC、RHICでは到達できないnPDF測定を海クォーク、グルーオンに対して行う
 - 小さなBjorken-x領域でのグルーオン飽和の発見

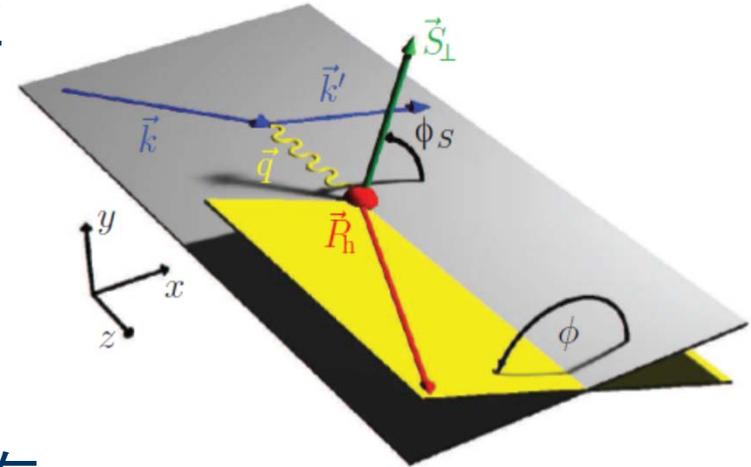


グルーオン $R_{\text{gluon}}^{(\text{Pb})}$



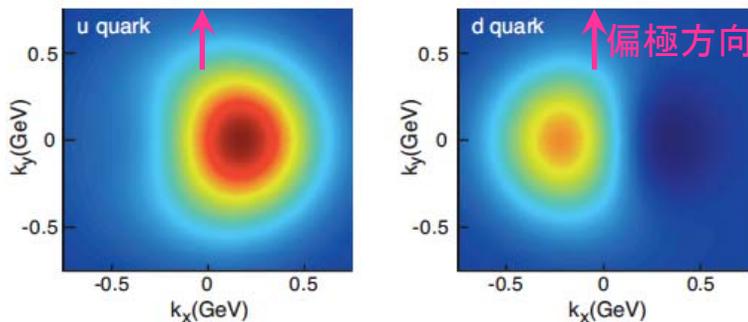
パートン分布関数測定の高精密化

- Semi-Inclusive DIS (SIDIS)
 - クォーク偏極のフレーバー依存性
 - 横運動量依存性 (軌道運動)
- TMD分布関数
 - TMD = Transverse Momentum Dependent
 - クォーク、反クォーク、グルーオン
 - 横方向の運動量を含む3次元分布
 - スピンと軌道運動の相関



Sivers関数:
核子スピンとパートン横運動量の相関

Sivers function at $x = 0.1$



October 1, 2018

Leading Twist TMDs

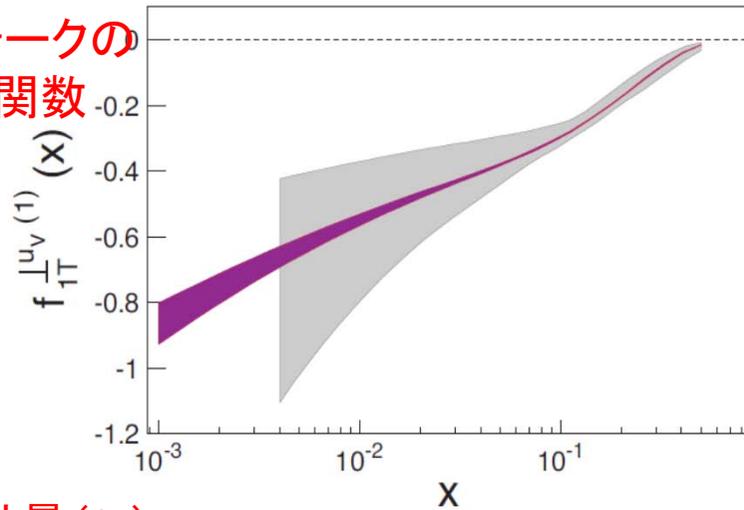
○ → Nucleon Spin ⊙ → Quark Spin

		Quark Polarization		
		Un-Polarized (U)	Longitudinally Polarized (L)	Transversely Polarized (T)
Nucleon Polarization	U	$f_1 = \odot$ 非偏極		$h_1^\perp = \uparrow - \downarrow$ Boer-Mulders
	L		$g_{1L} = \odot \rightarrow - \odot \rightarrow$ Helicity	$h_{1L}^\perp = \odot \rightarrow - \odot \rightarrow$
	T	$f_{1T}^\perp = \uparrow - \downarrow$ Sivers	$g_{1T}^\perp = \uparrow - \downarrow$	$h_1 = \uparrow - \downarrow$ Transversity $h_{1T}^\perp = \uparrow - \downarrow$

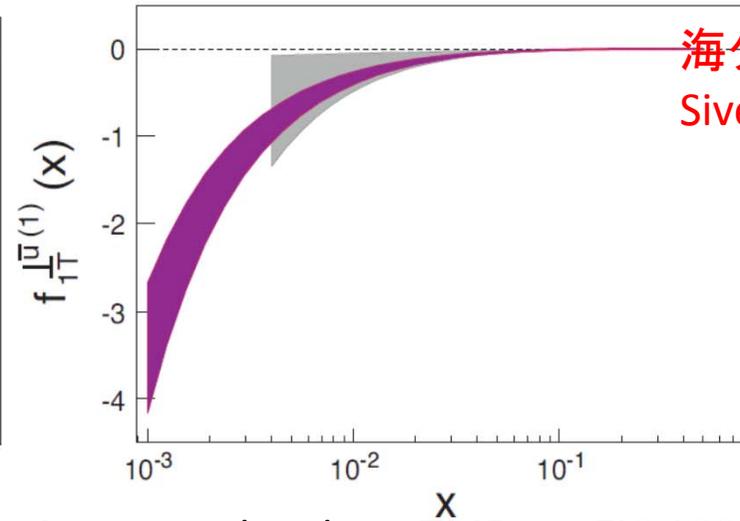
TMDs at EIC

Sivers function extracted for valence (left) and sea (right) up quarks from (grey) currently available data and (purple) projection at EIC $\sqrt{s} = 45$ GeV, 10 fb^{-1}

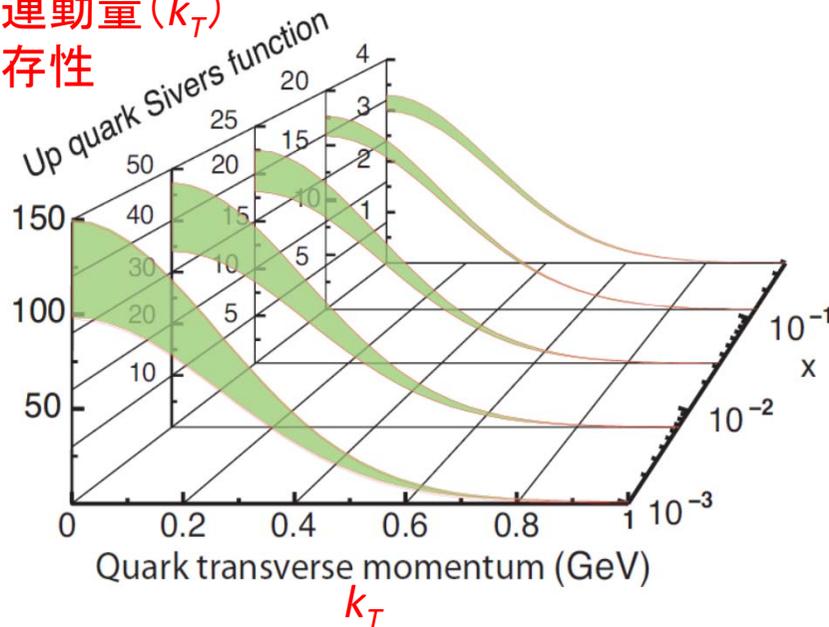
価クォークの
Sivers関数



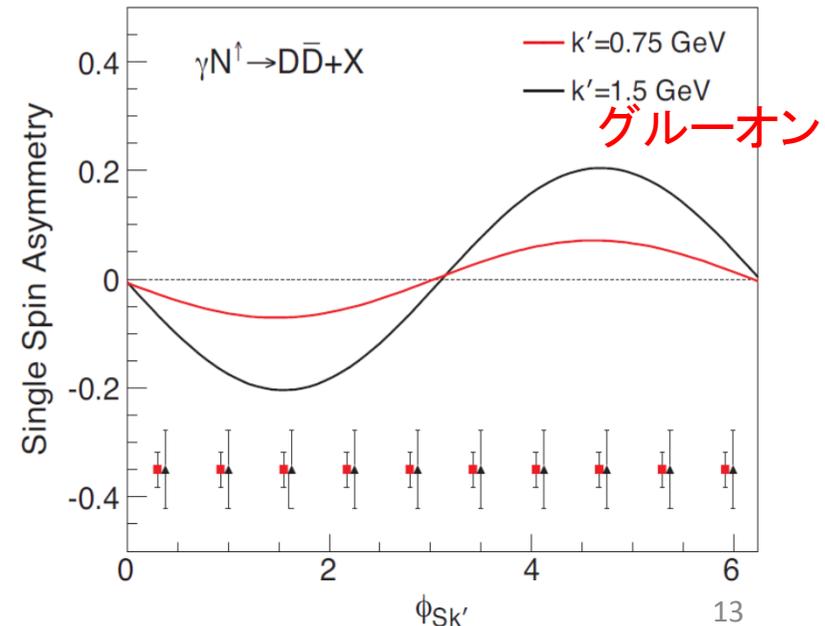
海クォークの
Sivers関数



横運動量 (k_T)
依存性



Access to the gluon TMDs at EIC 100 fb^{-1}



核子・原子核のトモグラフィー

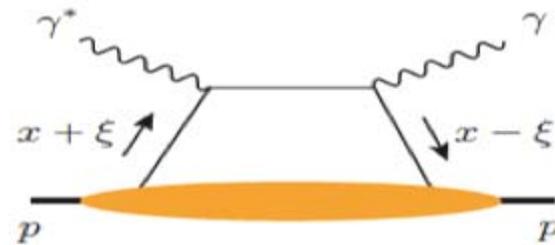
- 深部仮想コンプトン散乱

- DVCS
- Exclusive process

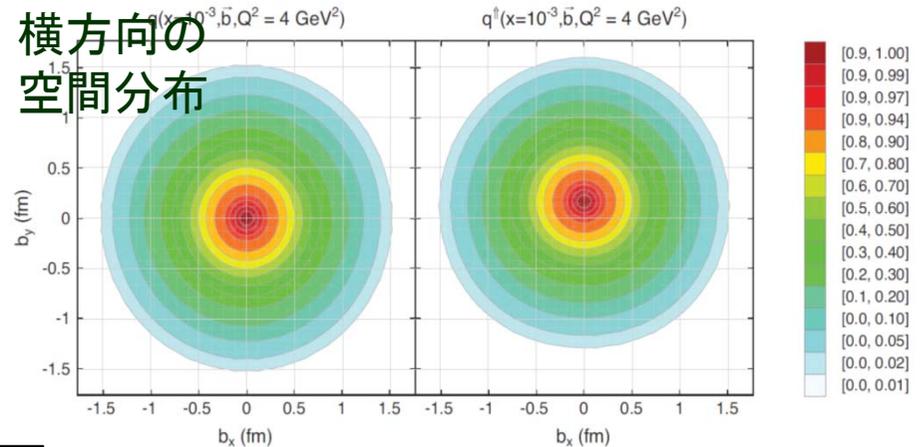
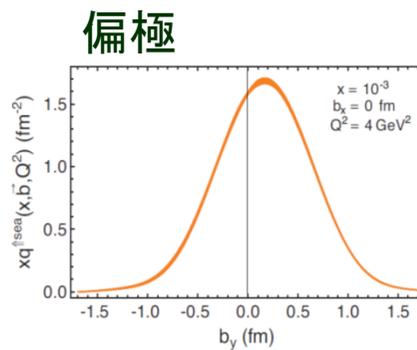
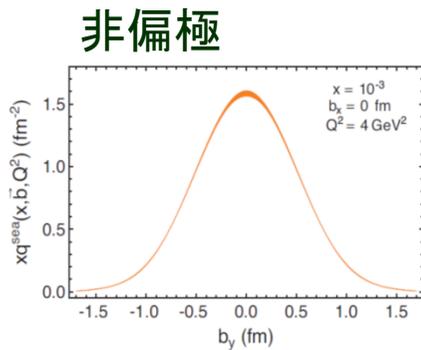
- 一般化された分布関数

- GPD = Generalized Parton Distribution
- 横方向の空間分布 (トモグラフィー = 断層撮影)

DVCS (Deeply Virtual Compton Scattering)



Spatial distribution of sea quarks in unpolarized proton (left) and polarized proton (right) at EIC 100 fb⁻¹ and corresponding density of partons in the transverse plane



- 軌道角運動量

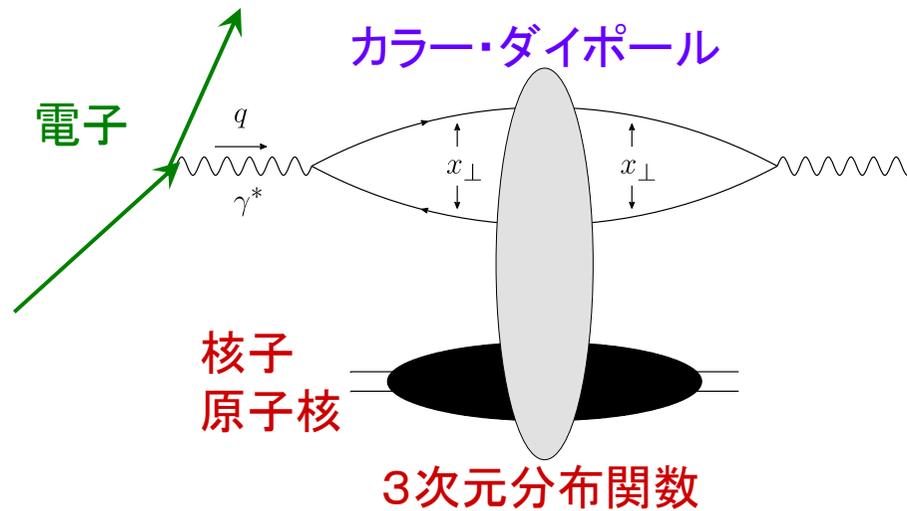
- Jiの和則

$$J_q^z = \frac{1}{2} \sum \Delta q + \sum L_q^z$$

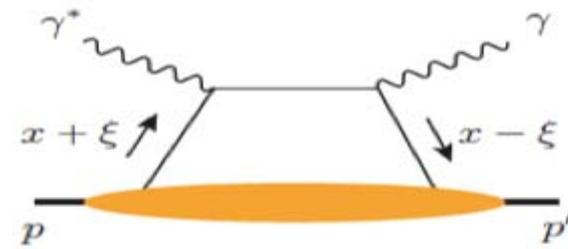
$$J_q^z = \frac{1}{2} \left(\int_{-1}^1 x dx \left(H^q + E^q \right) \right)_{t \rightarrow 0}$$

核子・原子核のトモグラフィ

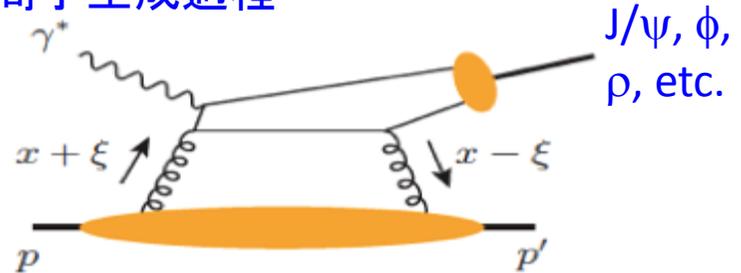
- EIC = カラー・ダイポール顕微鏡



深部仮想コンプトン散乱(DVCS)過程



中間子生成過程



- exclusive (排他的) 過程やdiffraction (回折) 過程を用い、クォークやグルーオンの3次元分布関数を測定する
 - HERA: 第1世代
 - eRHIC: 第2世代 (高輝度、重イオン、偏極)
- グルーオンの分布関数を測定し、グルーオン飽和の研究を行う

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

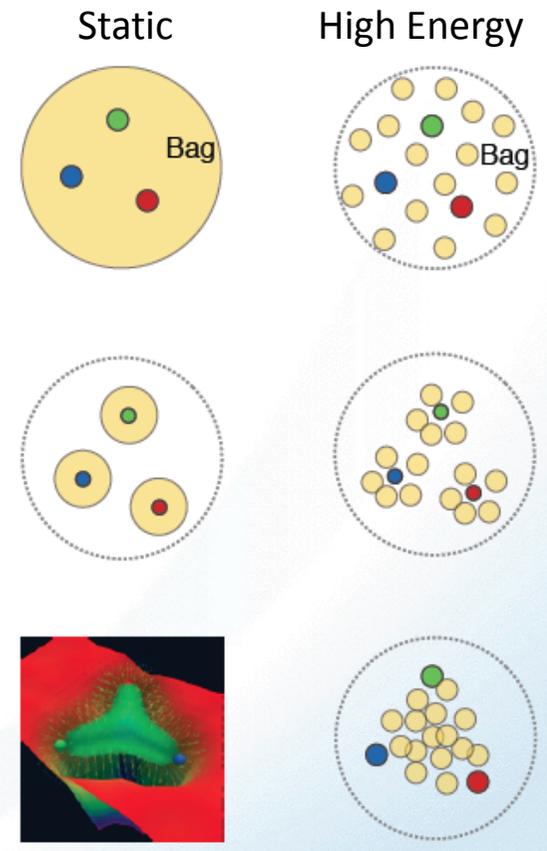
- グルーオン半径 > 電荷半径

- 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

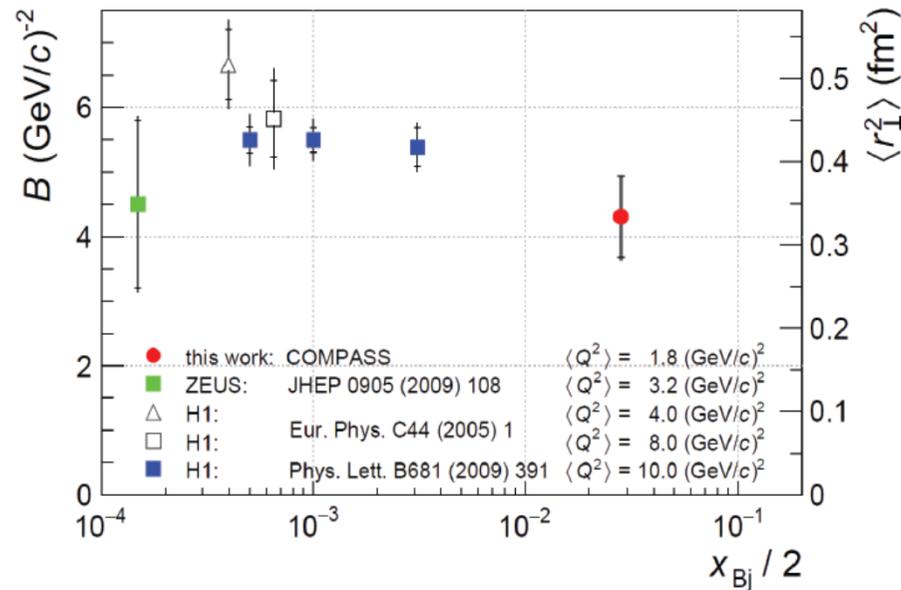
- グルーオン半径 < 電荷半径



- 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？

核子の半径

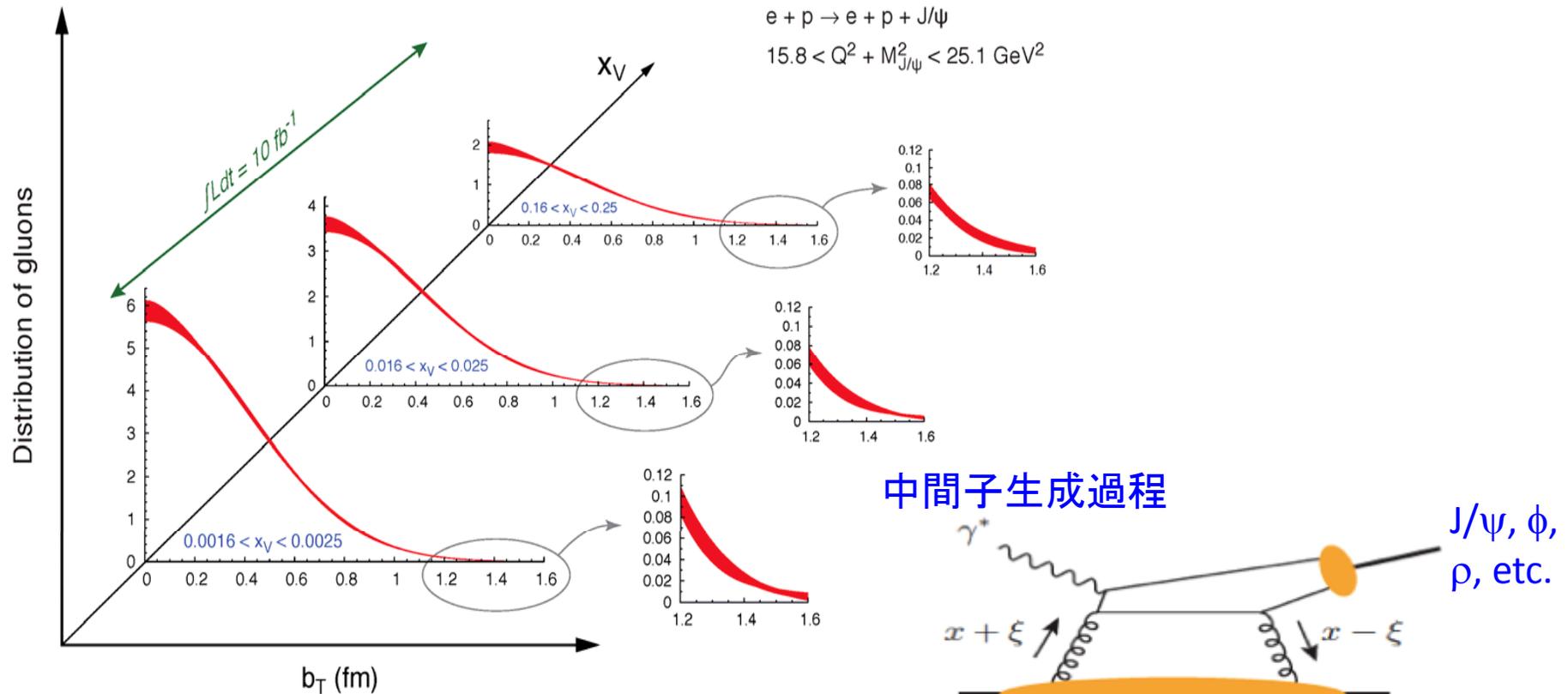
- DVCS測定による陽子トモグラフィ
 - グルーオン (HERA)、海クォーク (COMPASS) の半径 0.6 – 0.7 fm
 - 電磁相互作用における半径 0.84 – 0.9 fm より小さい



核子・原子核のトモグラフィー

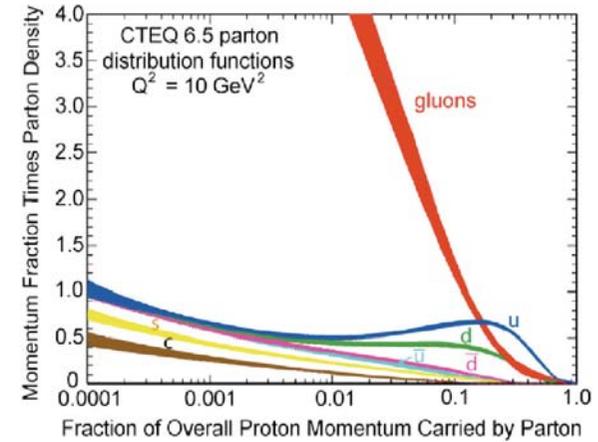
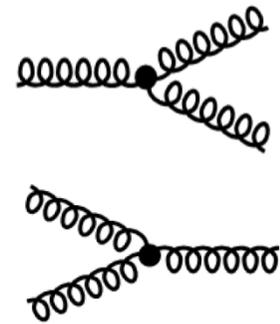
中間子生成

- 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(トモグラフィー)
- 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

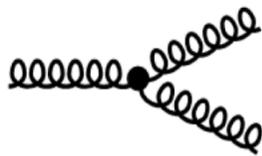


グルーオン飽和

- 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



gluon emission



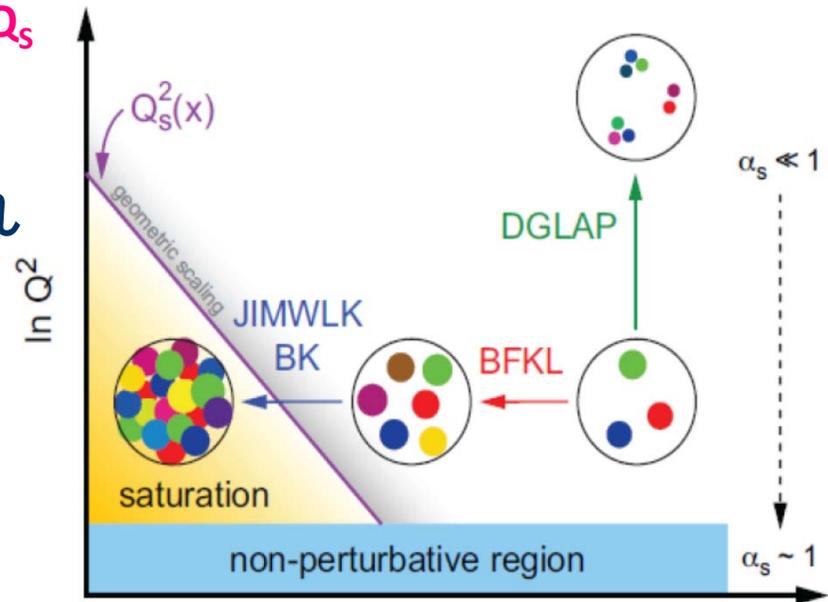
gluon recombination



=

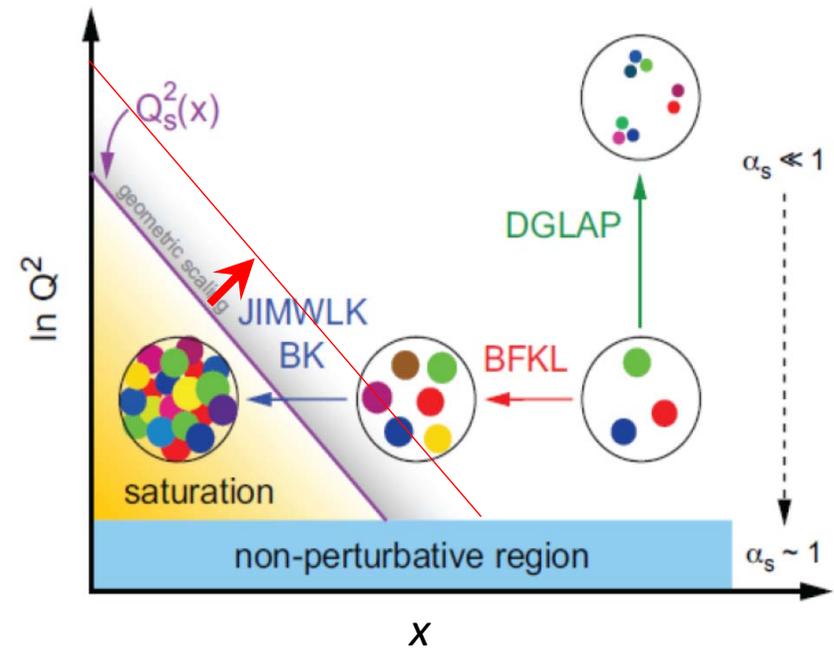
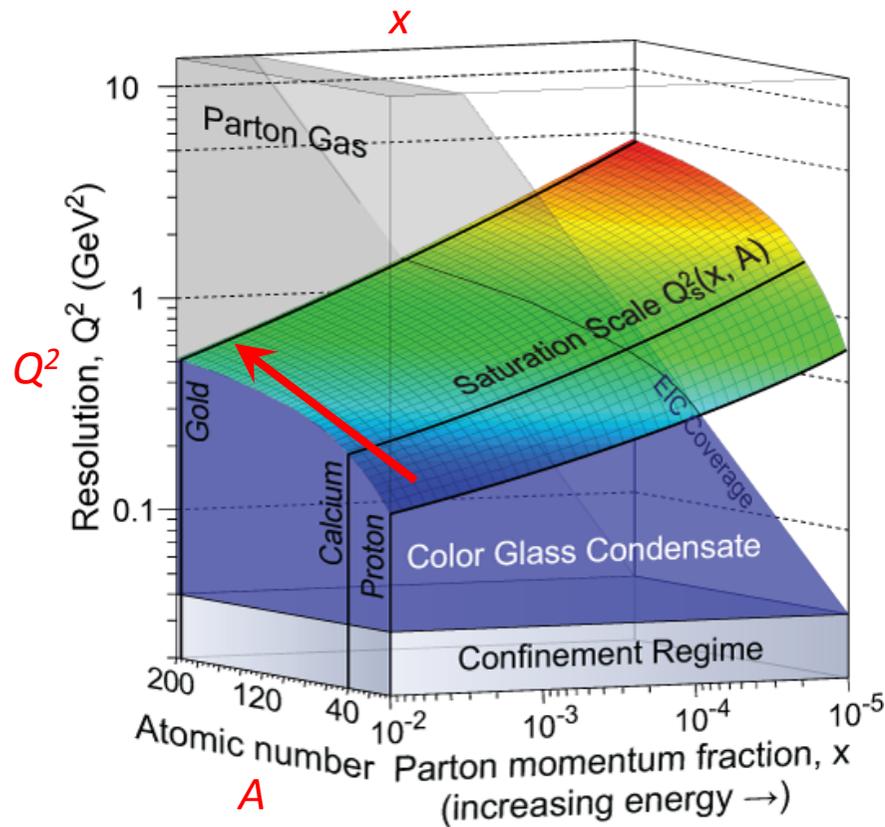
at Q_s

- 古典的な描像に基づき、観測されたことのない「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



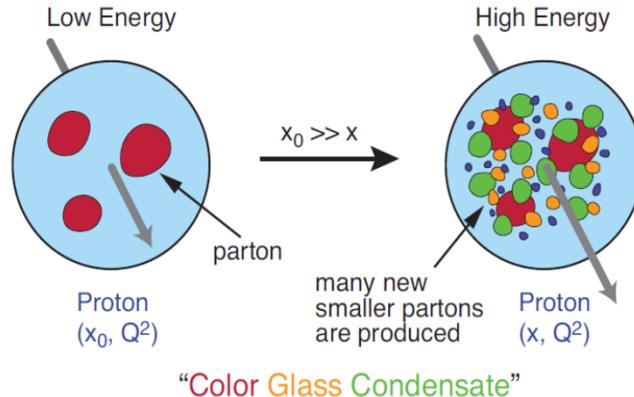
グルーオン飽和

- 原子核による Q_s^2 スケールの増大
 - 電子+原子核衝突

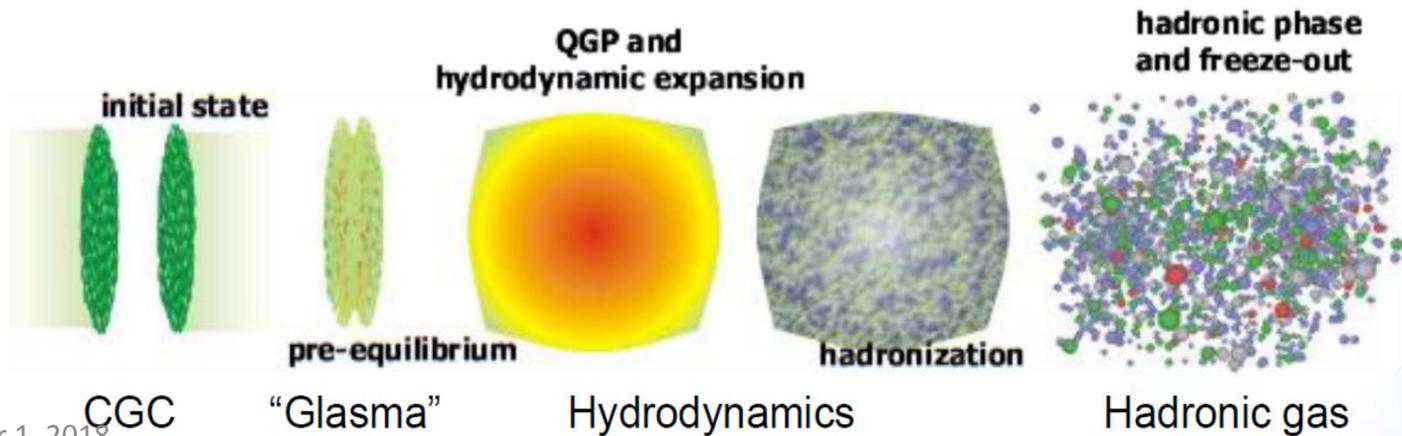


グルーオン飽和

- 飽和グルーオン模型であるカイラルガラス凝縮 (CGC) 模型により、実験との精密な比較を行うことができる
 - 発見されない場合は古典的には理解できない？

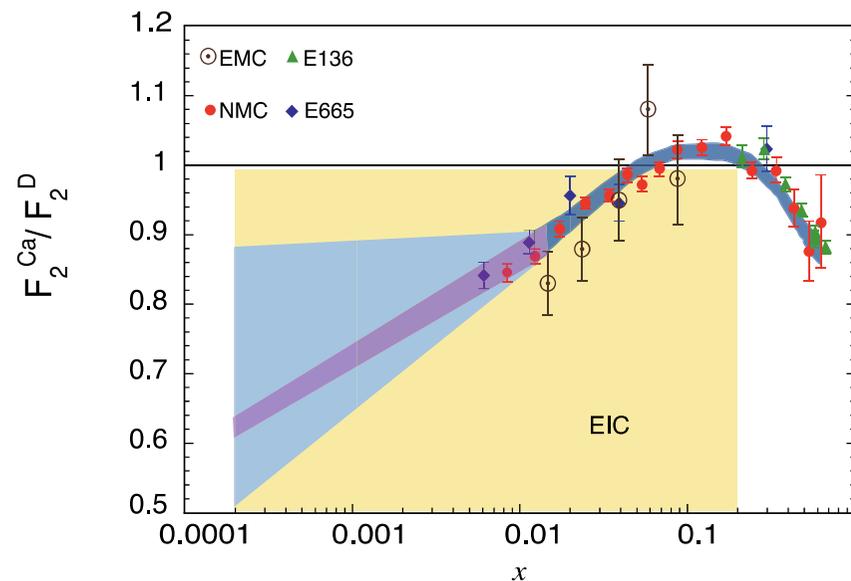
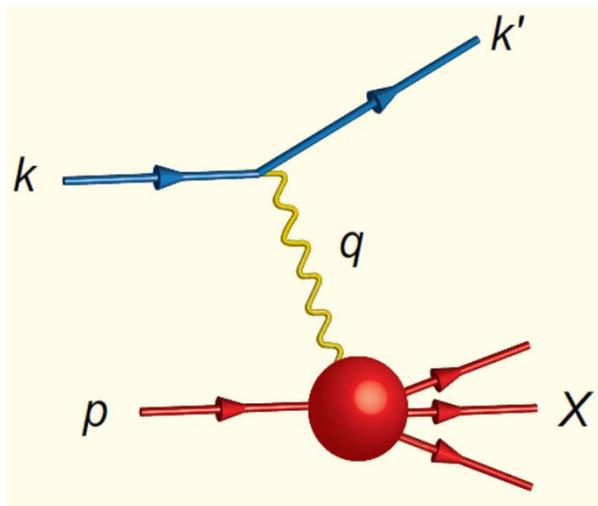


- RHICで発見されたQGPの生成メカニズムの理解のためには、その初期状態である原子核のクォーク・グルーオン描像に基づいた精密な理解が不可欠である



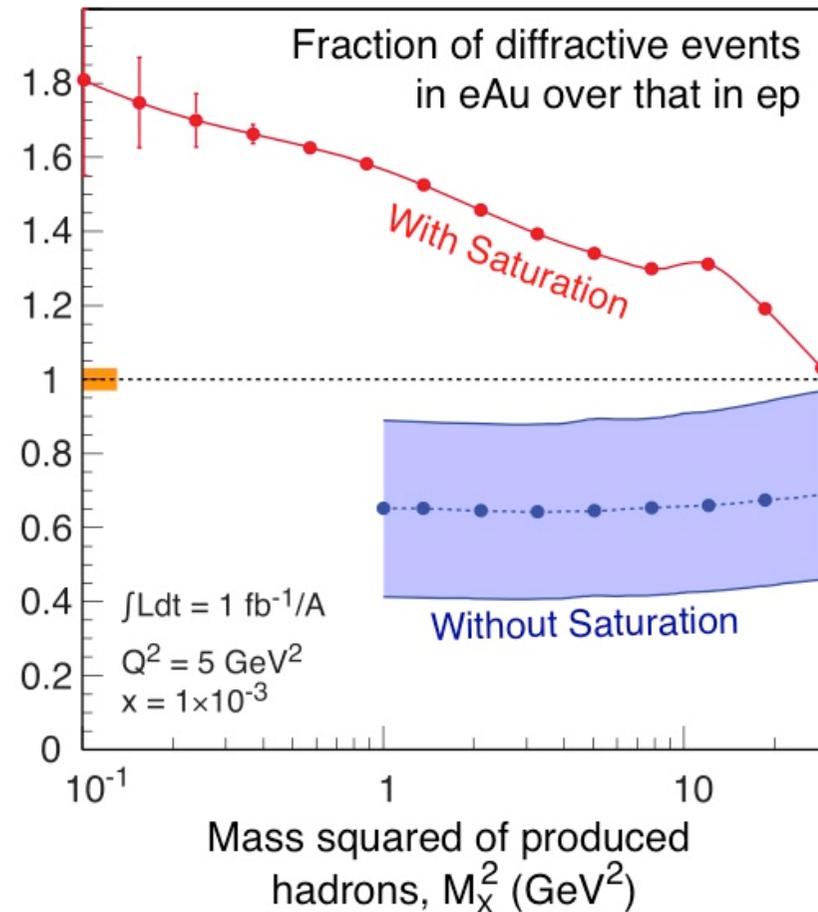
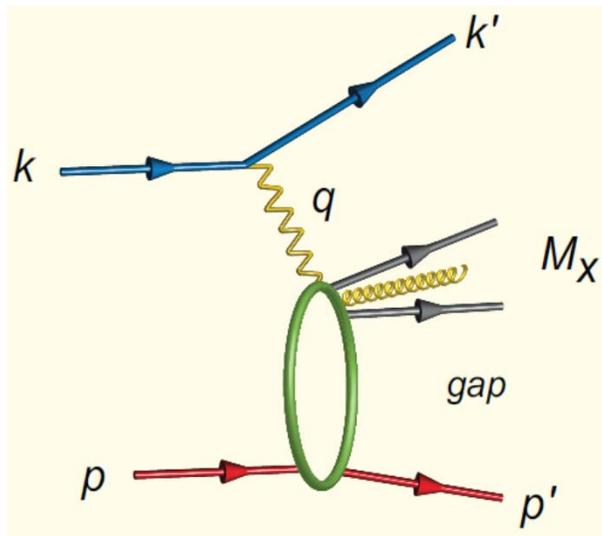
グルーオン飽和

- 深非弾性散乱 (inclusive DIS)
- グルーオンの飽和状態が存在しているかどうかは原子核内部の構造関数の変化を測定することによりわかる
- 構造関数 F_2 の比の測定
 - 原子核内部でクォークやグルーオンの分布や相互作用はどのような影響を受けるか？
 - Fermi運動、EMC効果、遮蔽、飽和



グルーオン飽和

- Diffractive cross section $\sigma_{\text{diff}} \propto [g(x, Q^2)]^2$
- HERA e+p では、10-15% diffractive
- EIC e+A ではCGCの予想では25-30% diffractive

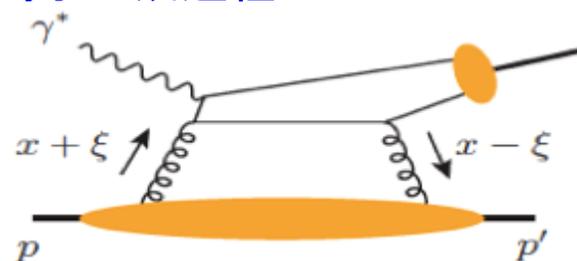


原子核の3次元構造

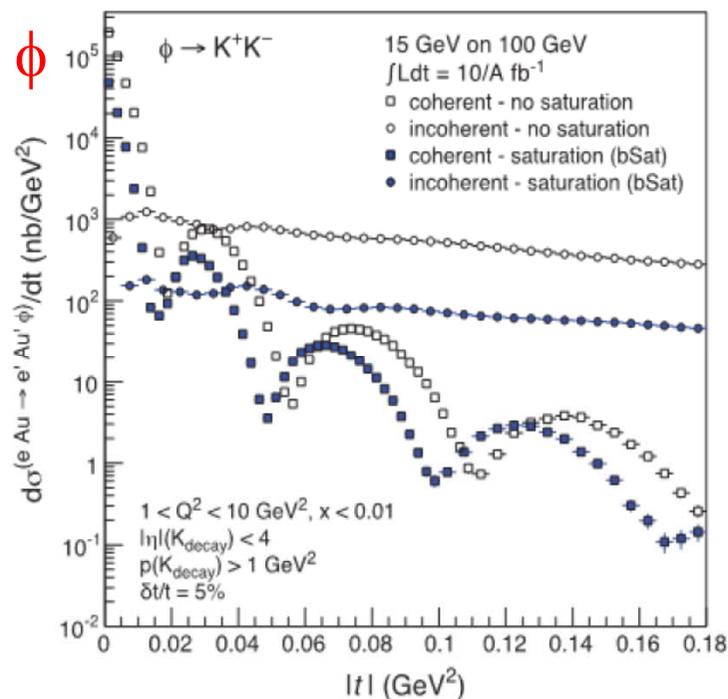
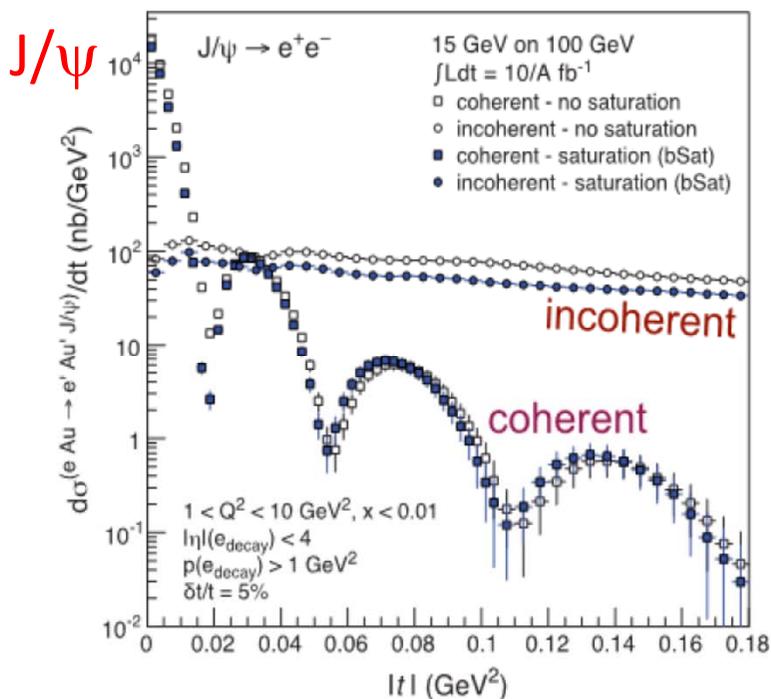
- Diffractive ベクトル中間子生成

- ϕ 中間子はグルーオン飽和に対して感度高い

中間子生成過程

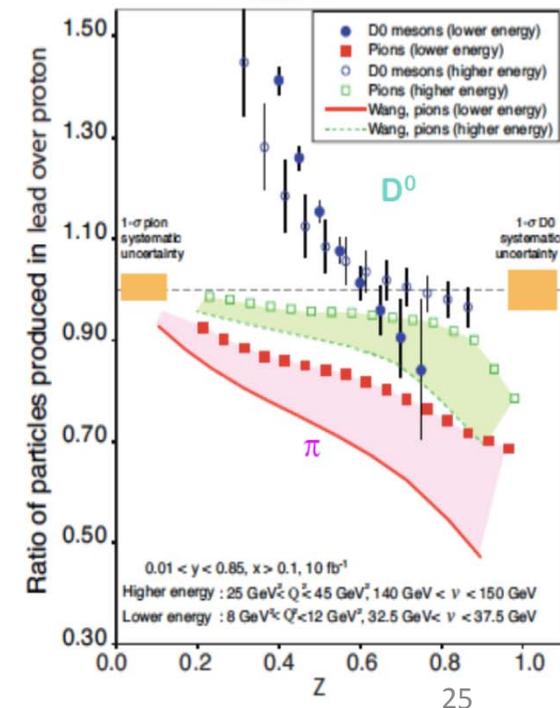
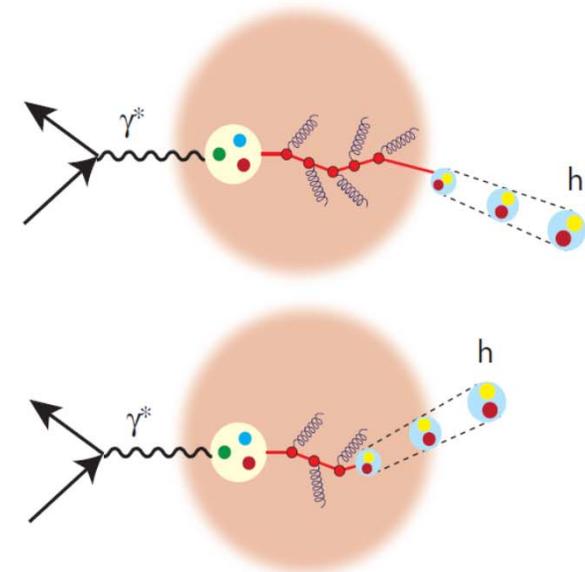


$J/\psi, \phi, \rho, \text{ etc.}$

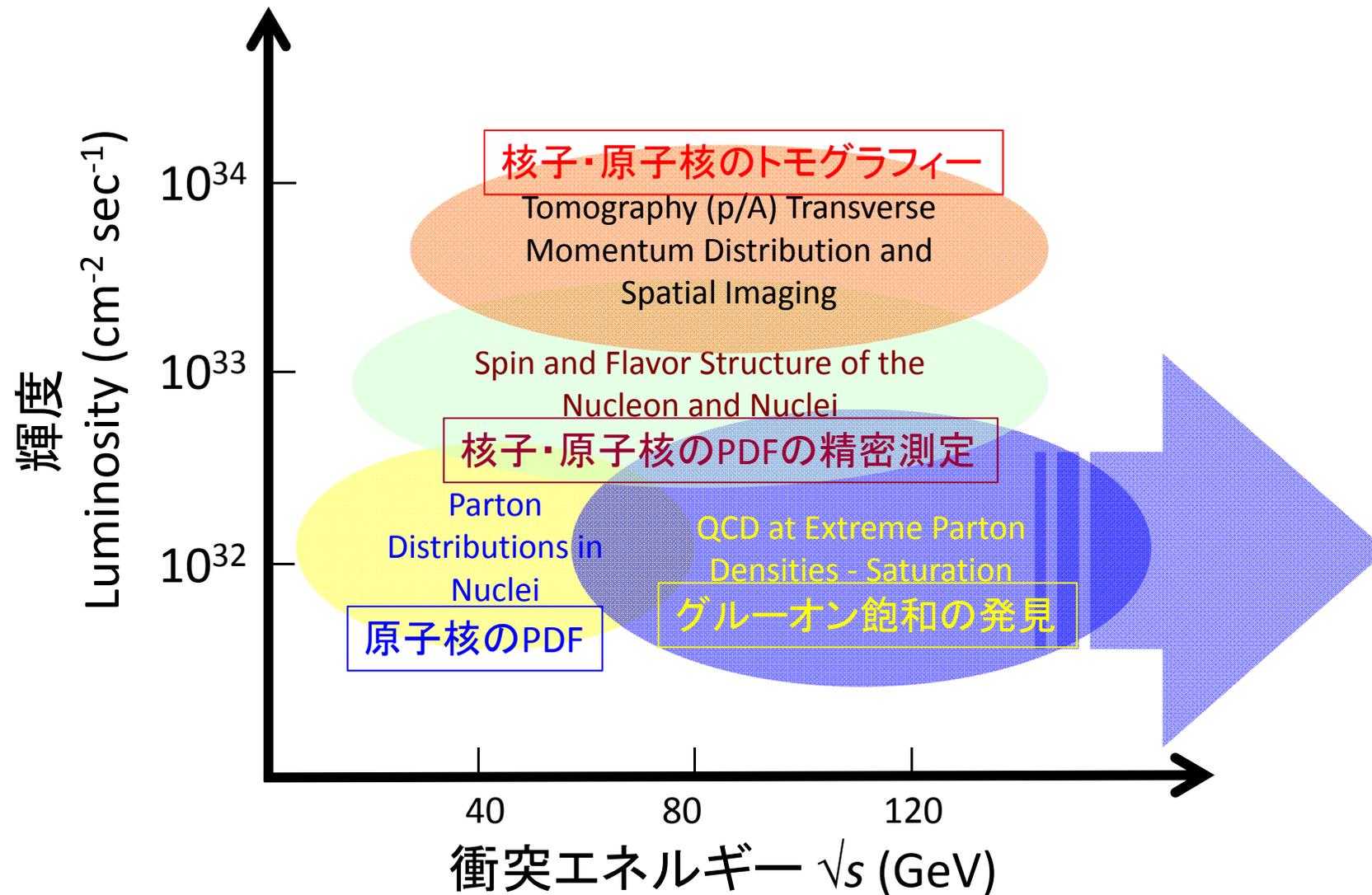


原子核内部でのハドロン化

- 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

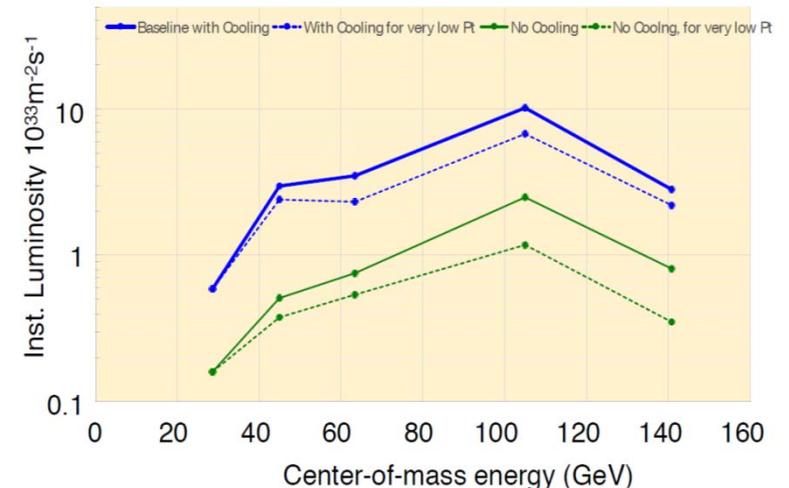
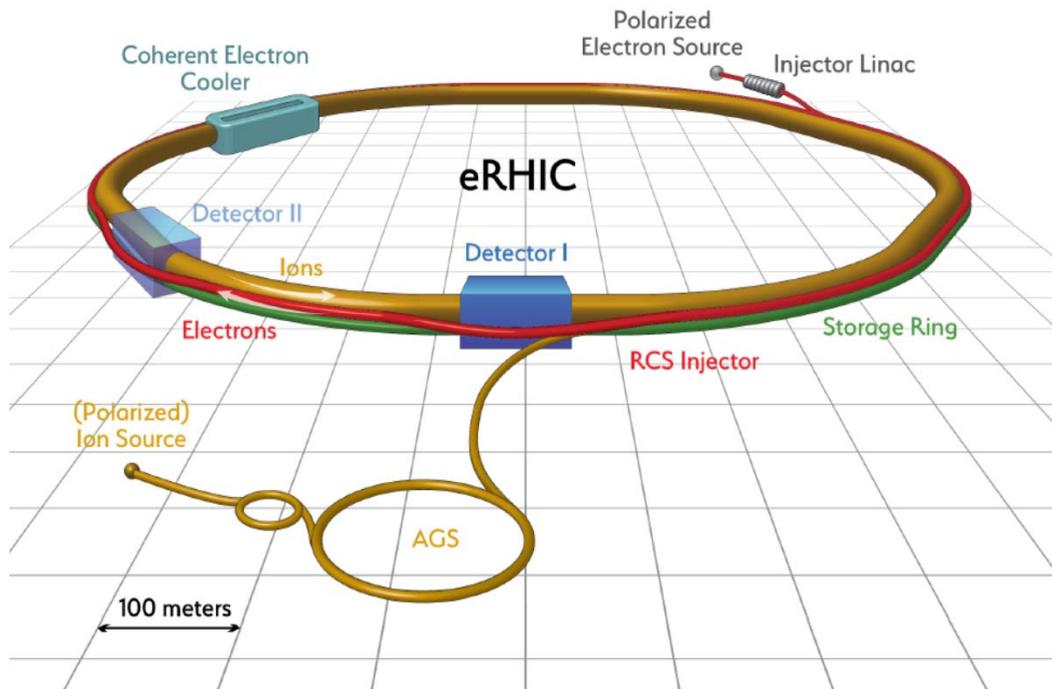
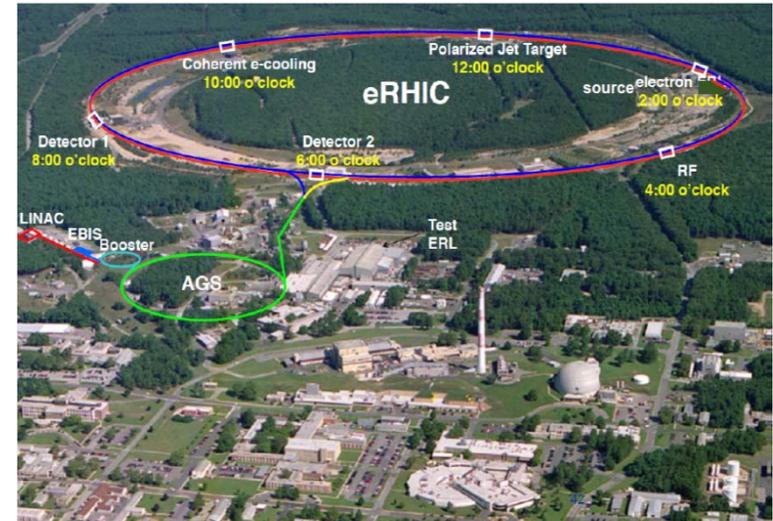


EICの物理と輝度・エネルギー



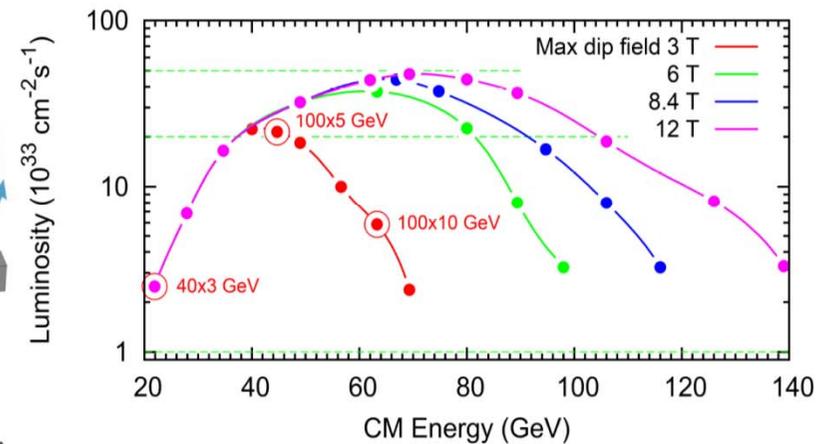
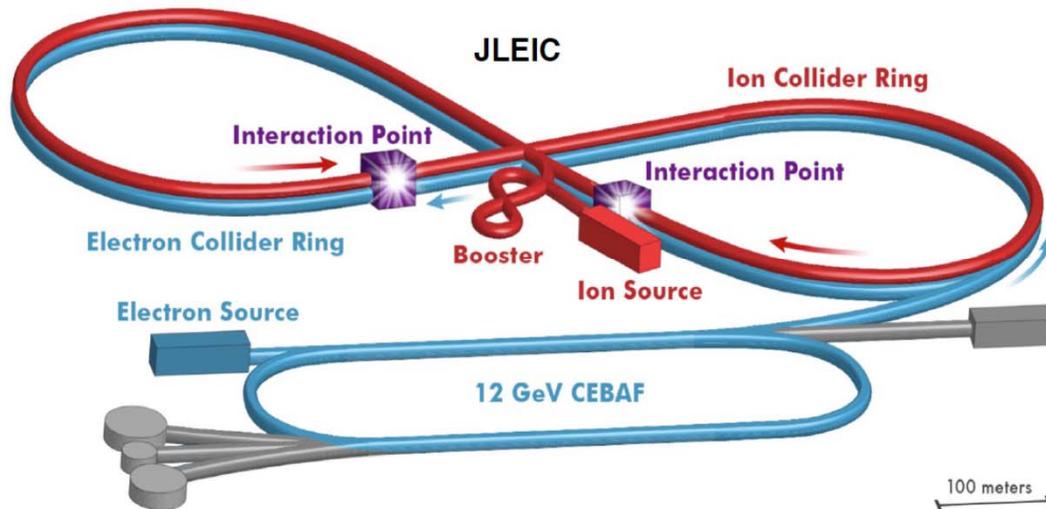
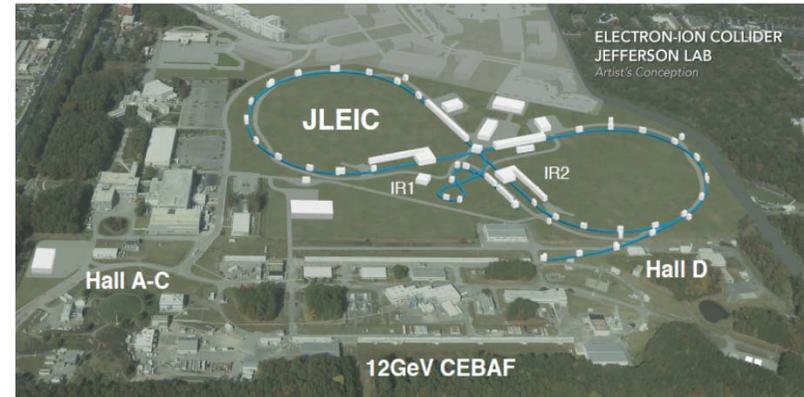
eRHIC @ BNL

- Electron storage ring 5 – 18 GeV
 - ~80% polarization
- Proton beams up to 275 GeV
 - ~70% polarization
- Ion beams up to 100 GeV/u



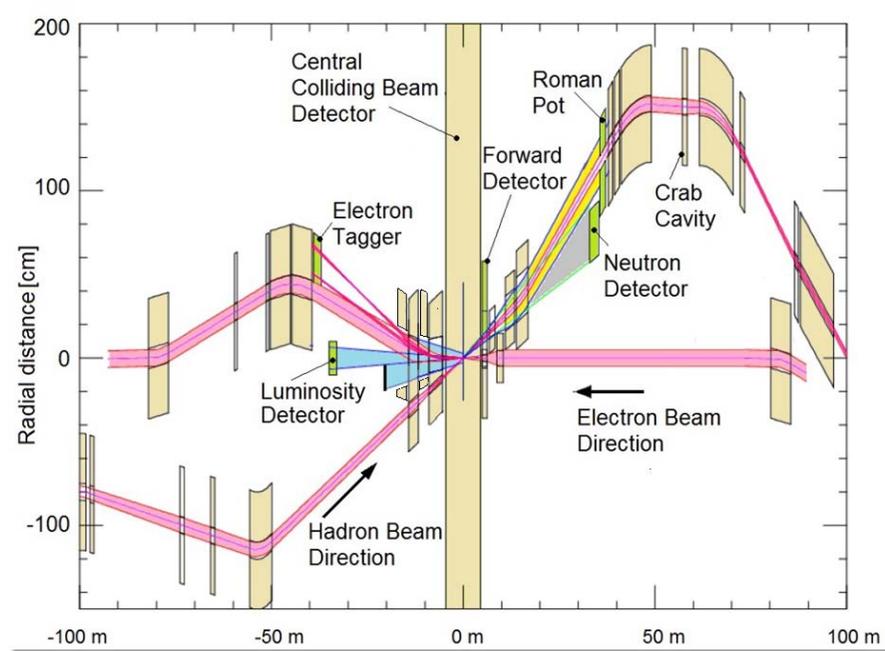
JLEIC @ JLab

- Polarized electrons 3 – 12 GeV
 - 75-80% polarization
- Polarized protons 40 – 100 GeV
 - 80% polarization
- Ions 16 – 40 GeV/u

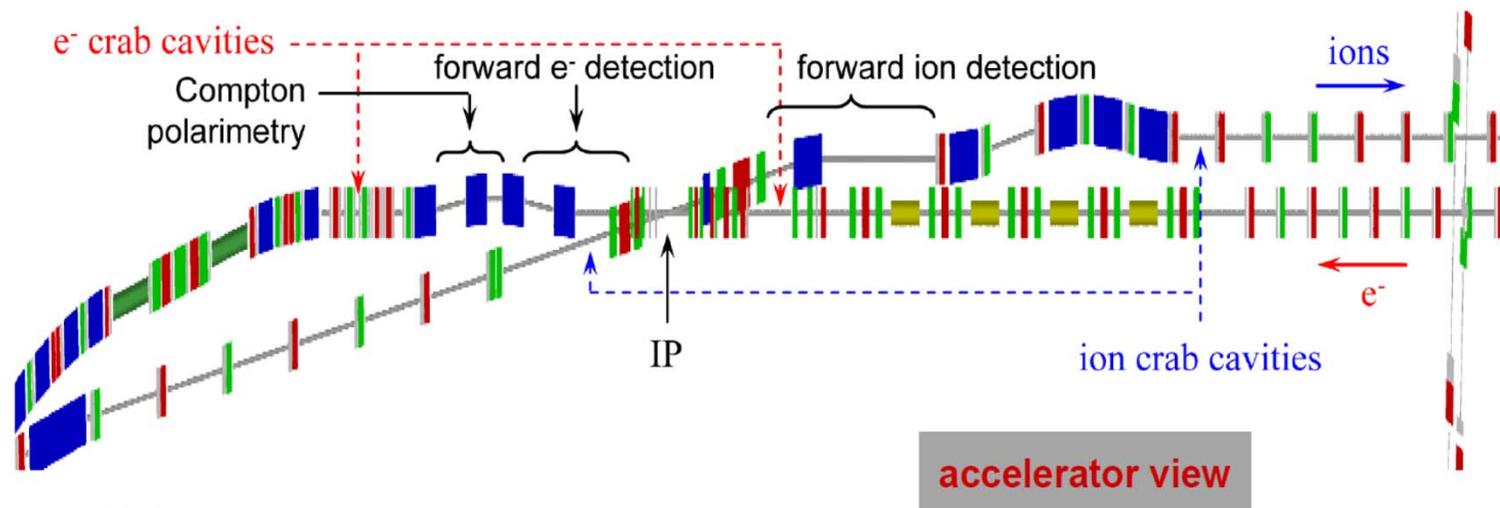


Interaction region design

- BNL

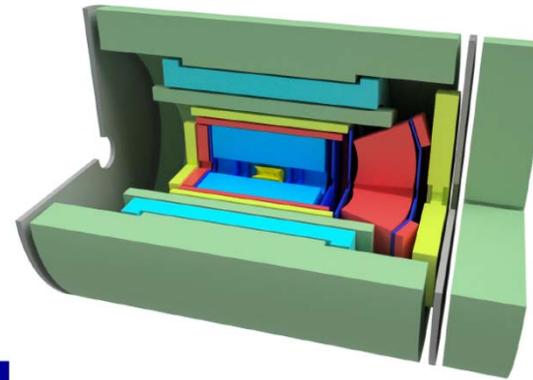
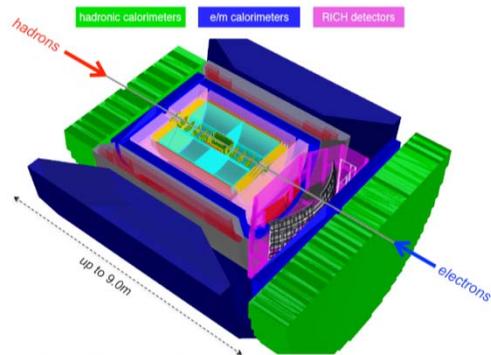


- JLab

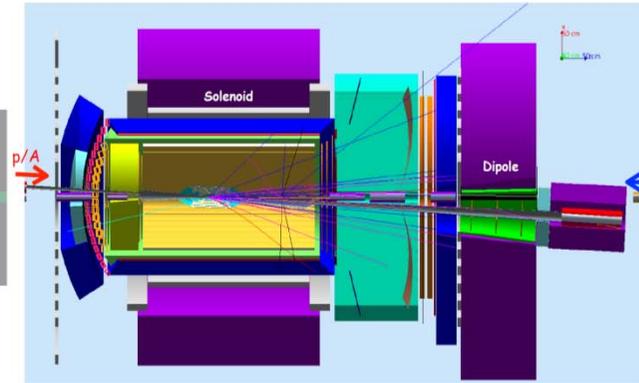
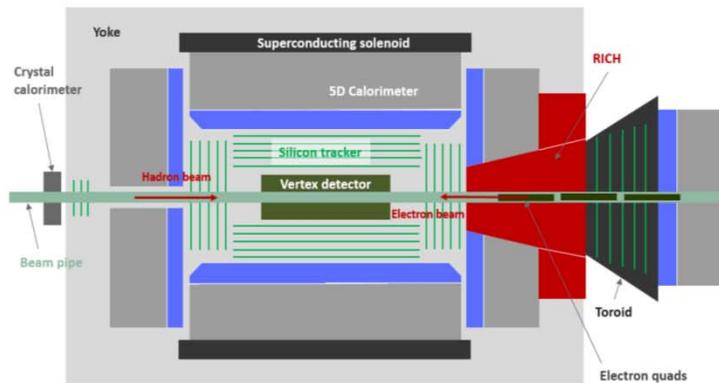


EIC検出器

- BNL
 - BEAST
 - EIC-sPHENIX



- JLab
 - TOPSiDE
 - JLEIC

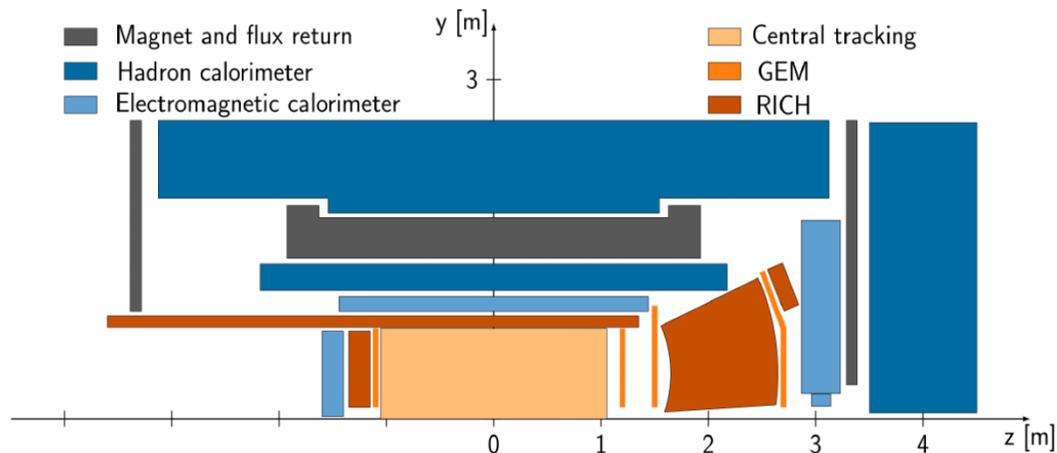
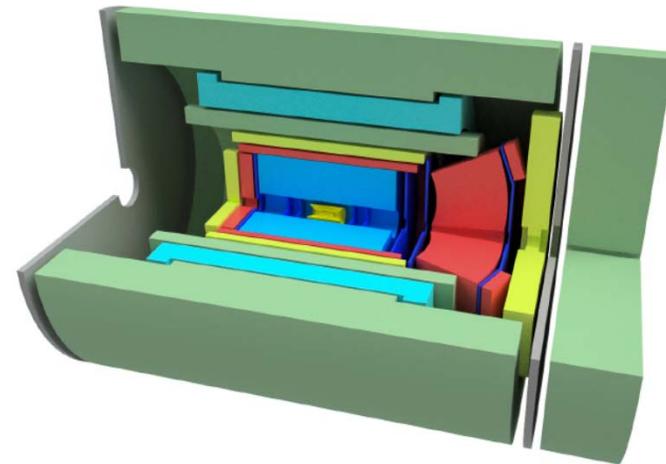
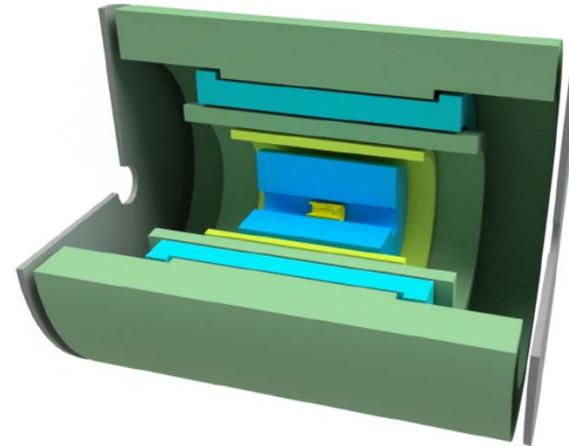


EIC検出器

- 中央 & 前方検出器
 - 4π coverage, $|\eta| < 3.5$
 - 電磁 & ハドロンカロリメータ
 - 飛跡検出器、 $\Delta p/p \sim \text{few}\%$
 - 粒子識別、広い運動領域での $\pi/K/p$ separation
 - 衝突点検出器、 $10\text{-}20 \mu\text{m}$
- 散乱電子検出器、後方 & 中央
 - 低物質質量、 $\sim 5\% X/X_0$
 - 電子識別、 e/h separation
- 低角度トリガー
 - 反跳陽子、低 Q^2 散乱電子、前方中性子
- 輝度(絶対 & 相対)測定
 - Bethe-Heitler 過程
- 偏極度測定
 - 電子および陽子・軽イオン

EIC-sPHENIX検出器

- sPHENIX検出器
 - BaBar超電導ソレノイド磁石を用いた4 π 検出器
 - $|\eta| < 1.1$ and $0 < \phi < 2\pi$
 - 電磁およびハドロンカロリメータ
 - TPC
 - シリコン検出器
 - 2022-2023稼働へ向けて建設
- EIC-sPHENIX検出器
 - Design study が進んでいる



October 1, 2018

EIC Users Group (EICUG)

- EIC Users Group
 - Established in summer 2016
 - > 800 collaborators
 - Experimentalists
 - Theorists
 - Accelerator scientists
 - Support and others
 - > 170 institutes
 - 30 countries
- R&D activities
 - EIC detector R&D program operated by BNL with ~\$1M / year
 - EIC accelerator R&D with ~\$7M / year



まとめ

- EIC計画の進行状況
 - NAS webinar & report release 7/24/2018
 - CD-0 ~2018/2019, site selection ~2019/2020
 - Construction start in 2020-23, completion in 2025-30
- EICの物理
 - 高エネルギーQCD研究のフロンティア、クォーク・グルーオン描像に基づく核子(ハドロン)・原子核(cold nuclear matter)の研究
 - パarton分布関数測定の精密化
 - 核子スピン、nPDF、フレーバー依存性、TMD分布
 - 核子・原子核のトモグラフィー
 - 3次元構造、クォーク・グルーオン分布の半径
 - グルーオン飽和
 - 集団的グルーオン場の発見、高密度グルーオン物質の創発的性質の研究
 - 原子核内部でのハドロン化
- EIC加速器/検出器
 - EIC-sPHENIX検出器の design study が進んでいる
- EIC Users Group および R&D activities
 - ご参加ご検討ください