

Electron-Ion Collider (EIC) の現状、今後

第17回高エネルギーQCD・核子構造勉強会

2021年2月5日(金)

後藤雄二 (理研)

内容

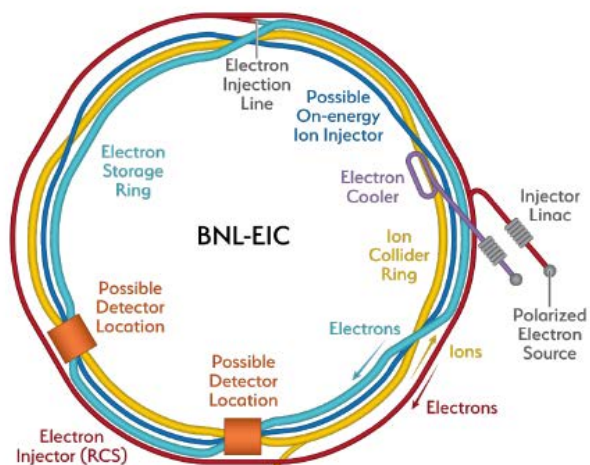
- U.S. Electron-Ion Collider (EIC)
 - イントロ
 - EICの物理
 - 核子の質量
 - 核子のスピン
 - グルーオン飽和
 - EICの現状、今後
- EIC日本グループの活動
 - Expression of Interest
 - EICの前方、最前方の物理
 - EIC検出器
 - 最前方カロリメータ
 - 前方ハドロンカロリメータ
 - シリコン検出器

イントロ

- 核子・原子核の世界の多様性はQCDを起源とするものです。EICはその多様性を追及するQCD物理の次世代Frontier Machineです。
- QCDに基づき核子・原子核の究極の内部構造を測定し、基本となる様々な性質（質量、スピン、大きさなど）に対しその起源を追求します。
- 核子・原子核の世界の多様性は既に十分たくさん知られていますが、高エネルギー・高輝度・高機能のEICはこれまで発見されていないさらに多様な世界を切り拓き、多様な現象に対する新たな理解をもたらします。
- そしてEICによって得られる核子・原子核の世界の新たな発見、理解は、他の物理の多様性と相互理解されたとき、より大きな発展をもたらすでしょう。

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



- Center of Mass Energies 20 GeV – 141 GeV
- Maximum Luminosity $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Hadron Beam Polarization 80%
- Electron Beam Polarization 80%
- Ion Species Range p to Uranium
- Number of interaction regions up to two

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

(Polarized) Ion Source

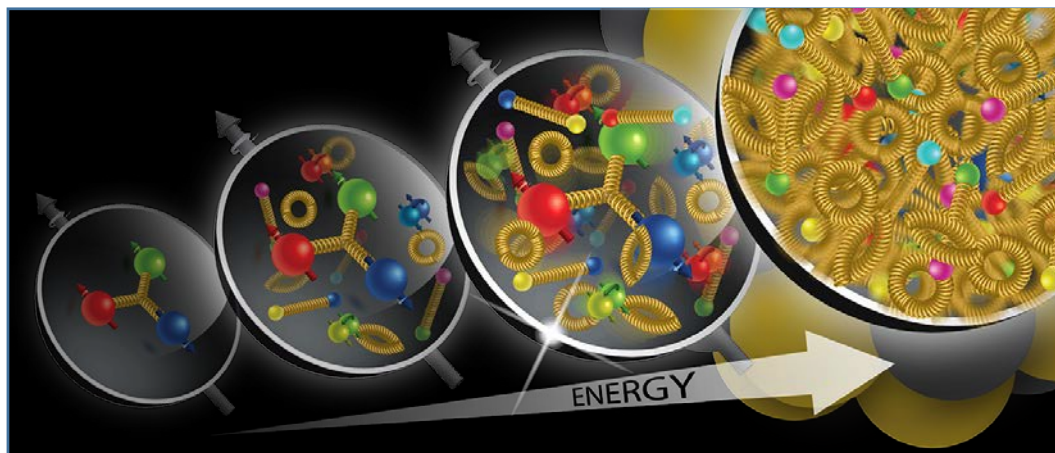
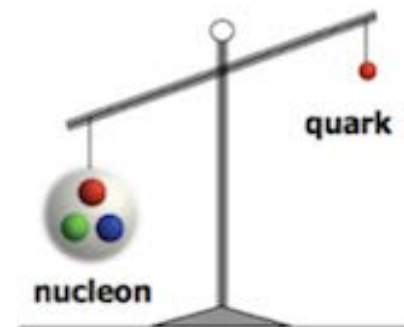
AGS

- Hadron Storage Ring
- Hadron Injector Complex
- Electron Storage Ring
- Electron Injector Synchrotron
- Electron Cooler
- Possible On-energy Hadron Injector Ring

Electron-Ion Collider 8

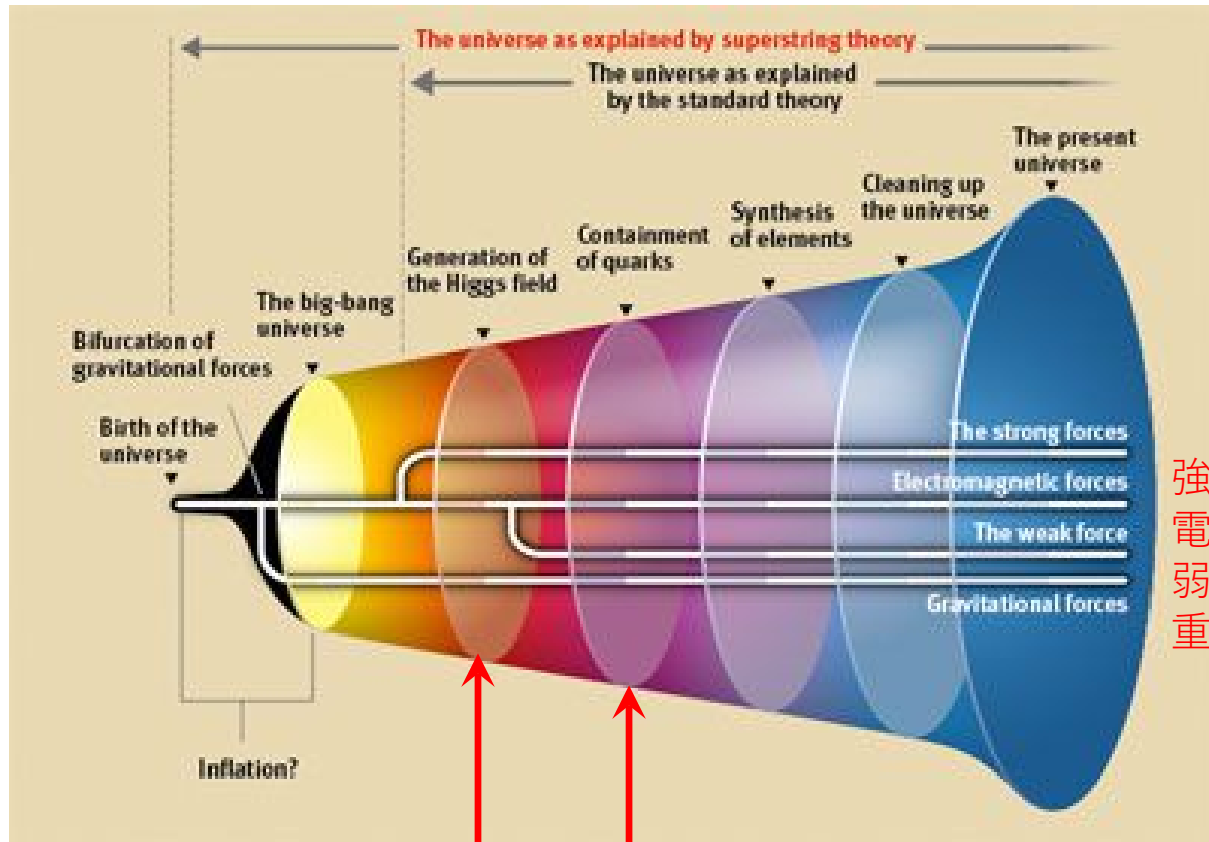
EICの物理

- 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



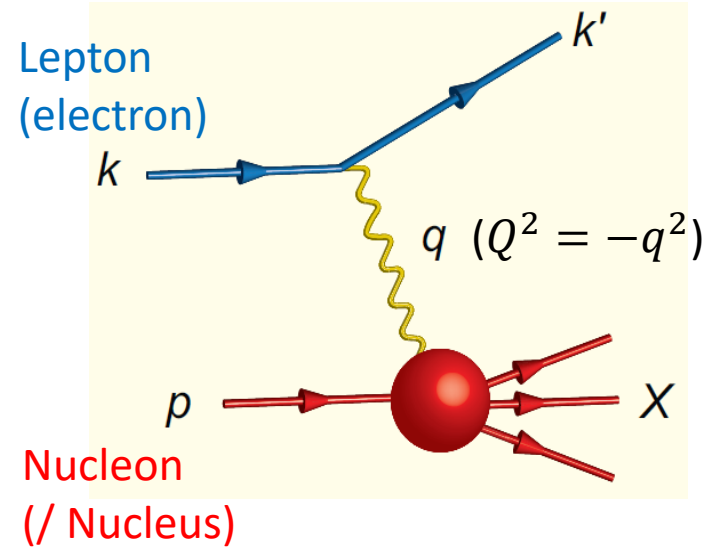
対称性の破れ
Higgs場

クォークの閉じ込め
カイラル対称性の破れ

クォーク・グルーオン構造

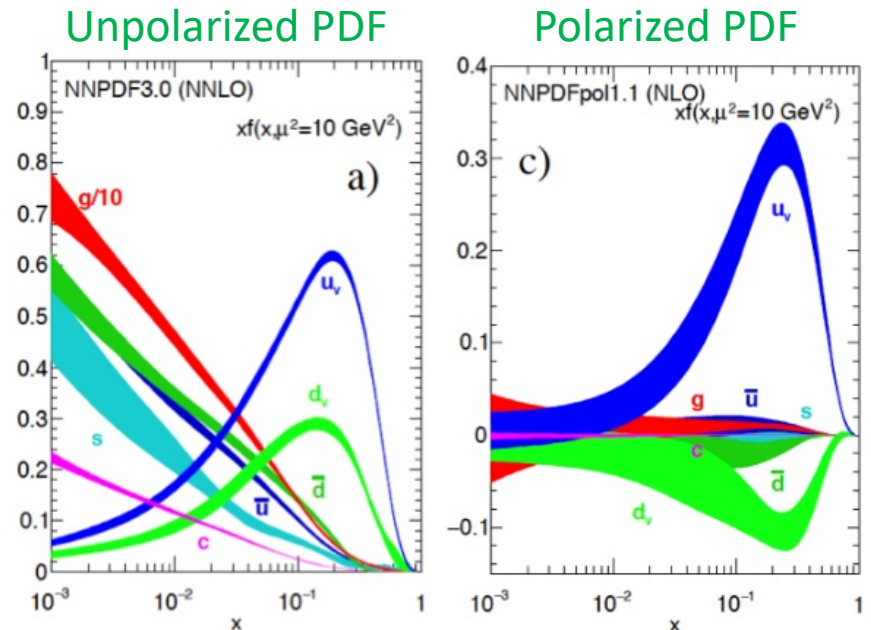
- レプトン（電子）の深非弾性散乱（inclusive DIS）

- 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



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

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

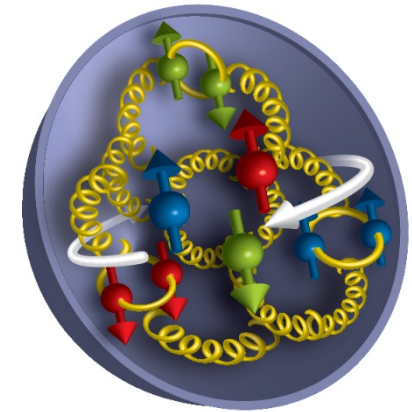
$\Delta\Sigma/2$ = Quark contribution to Proton Spin

L_Q = Quark Orbital Ang. Mom

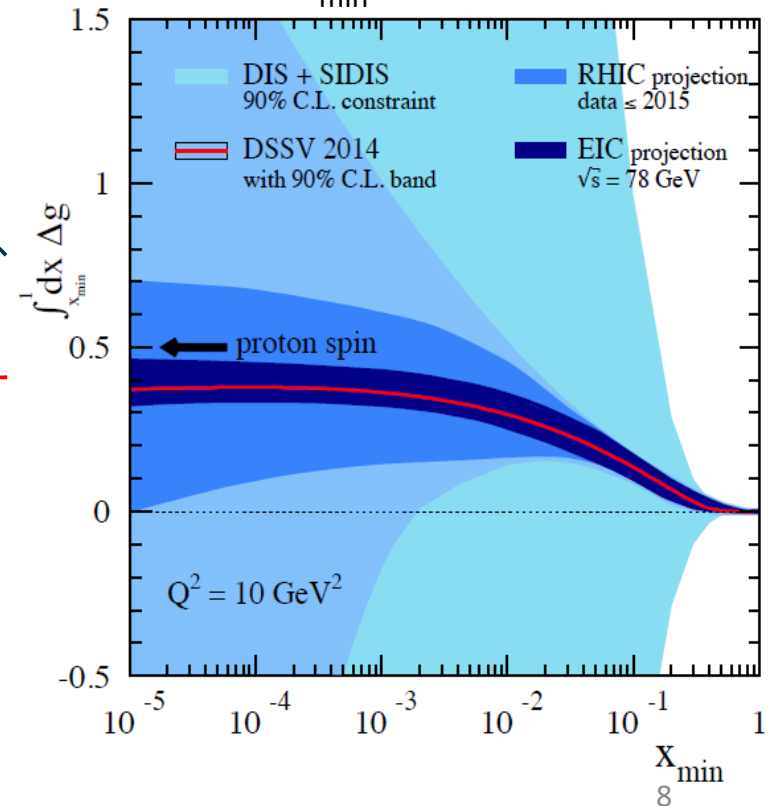
Δg = Gluon contribution to Proton Spin

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

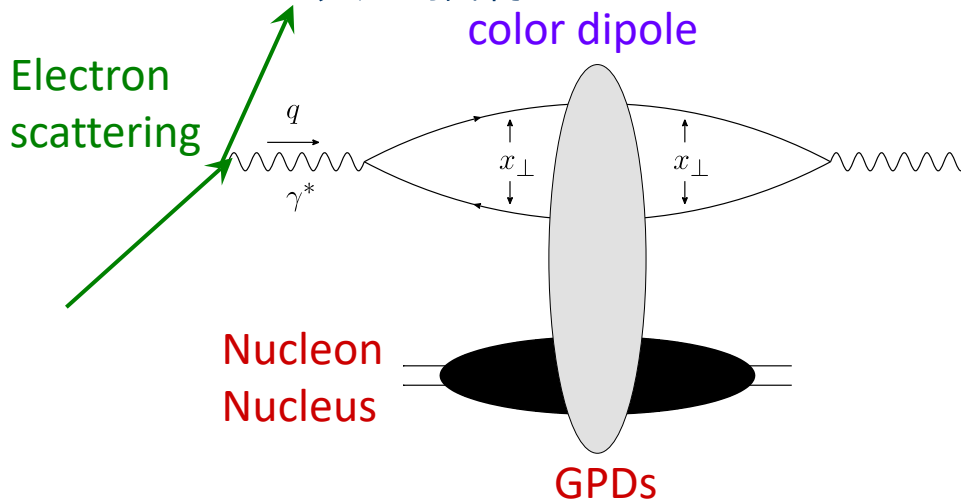


Integrated gluon polarization down to x_{\min}

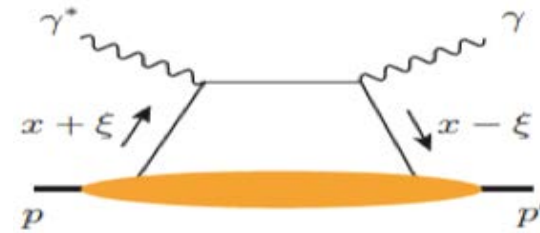


核子・原子核内部の空間分布

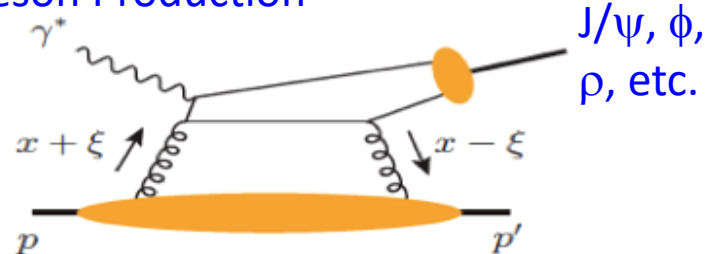
- EIC = カラー・ダイポール顕微鏡
 - exclusive (排他的) 過程やdiffractive (回折) 過程
 - 三次元描像



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 の和則

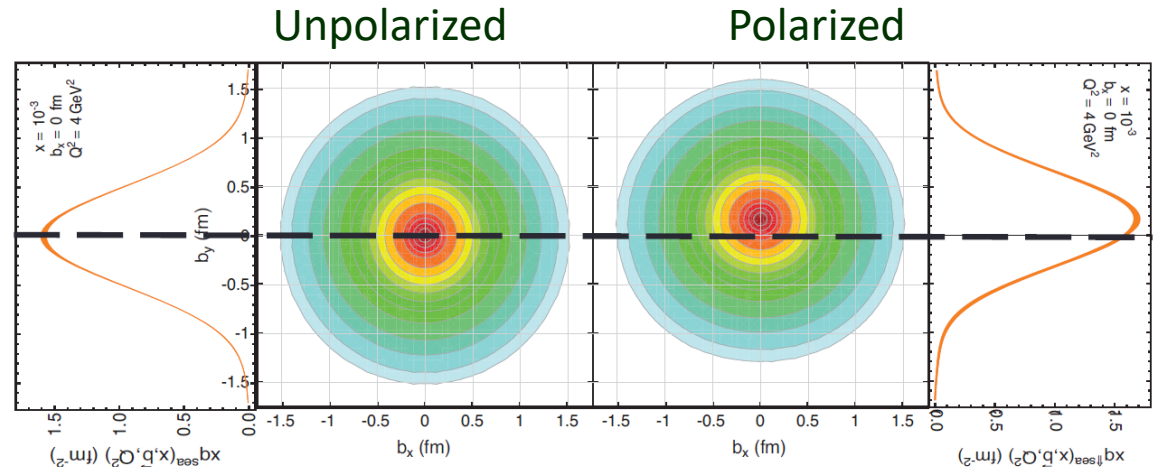
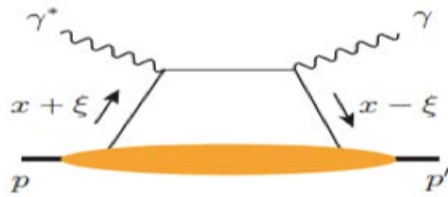
$$J_q^z = \frac{1}{2} \sum_q \Delta q + \sum_q L_q = \frac{1}{2} \left(\int_{-1}^1 x dx (H^q + E^q) \right)_{t \rightarrow 0}$$

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

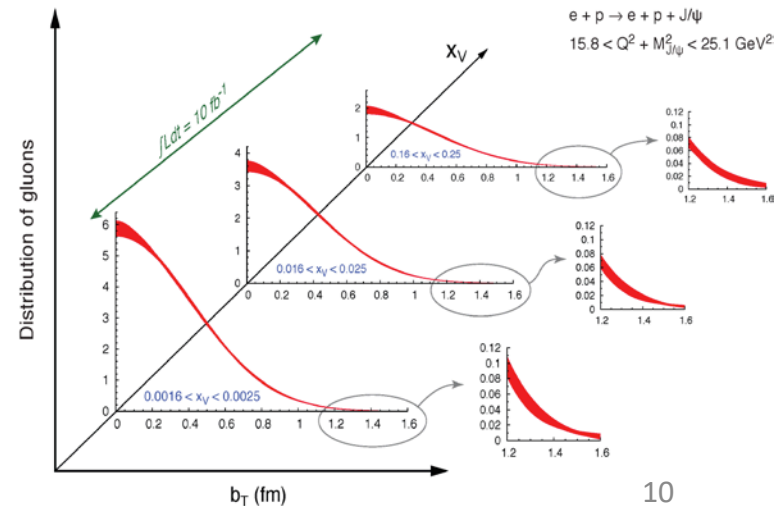
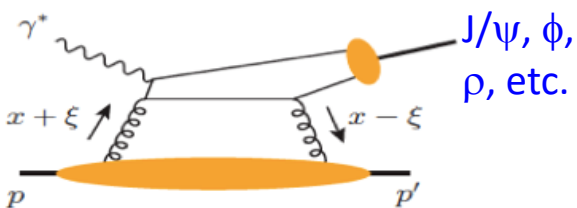
EIC 100 fb⁻¹ での海クォークの空間分布と対応する横断面におけるパートン密度



• 中間子生成過程

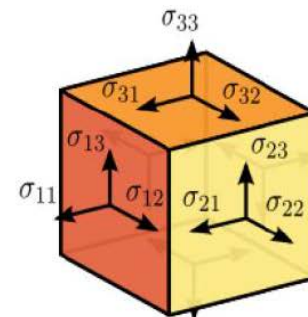
- J/ψ, φ, ρ等を測定することによりグルーオンの空間分布を測定する (トモグラフィ)
- 高ルミノシティ測定により、大きな半径に対しても精密な測定を行うことができる

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



新たな核子構造の描像

- エネルギー・運動量テンソル (EMT)

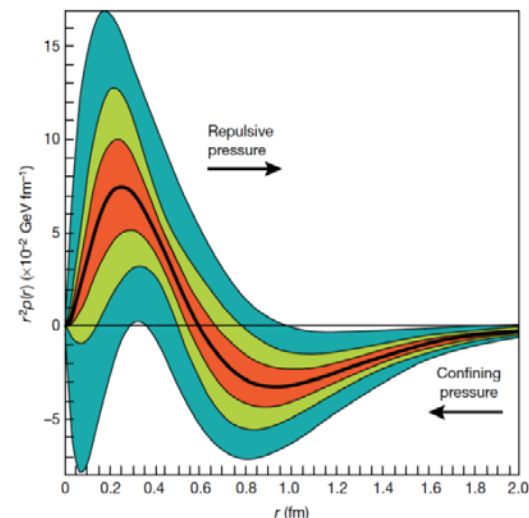


$$T^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} \text{Energy density} & \text{Momentum density} & & \\ T^{00} & T^{01} & T^{02} & T^{03} \\ T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} \\ T^{20} & T^{21} & T^{22} & T^{23} \\ T^{30} & T^{31} & T^{32} & T^{33} \\ \text{Energy flux} & \text{Momentum flux} & & \end{bmatrix}$$

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)

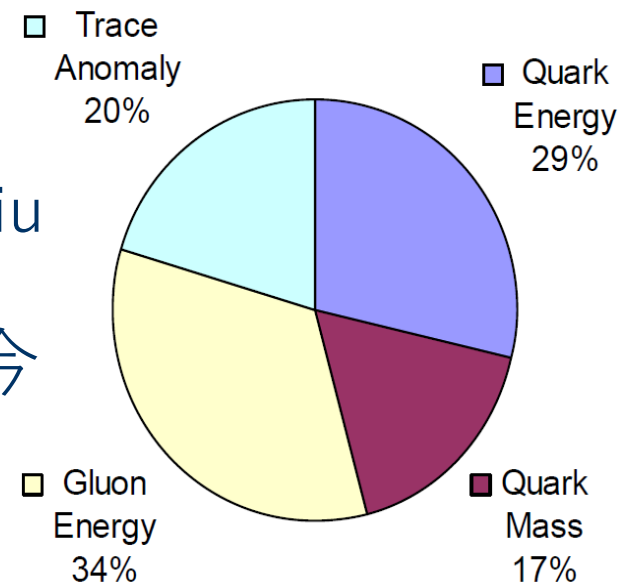
Quark Energy

Gloun Energy

Quark Mass

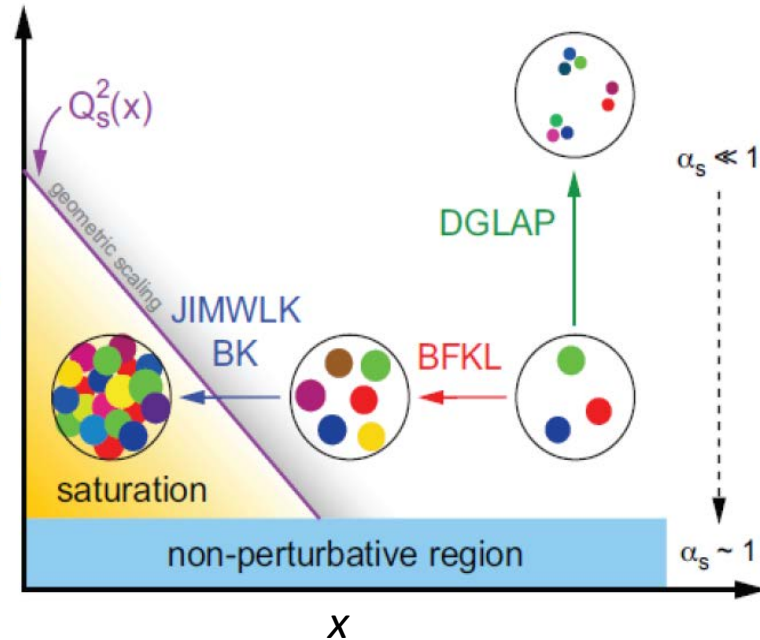
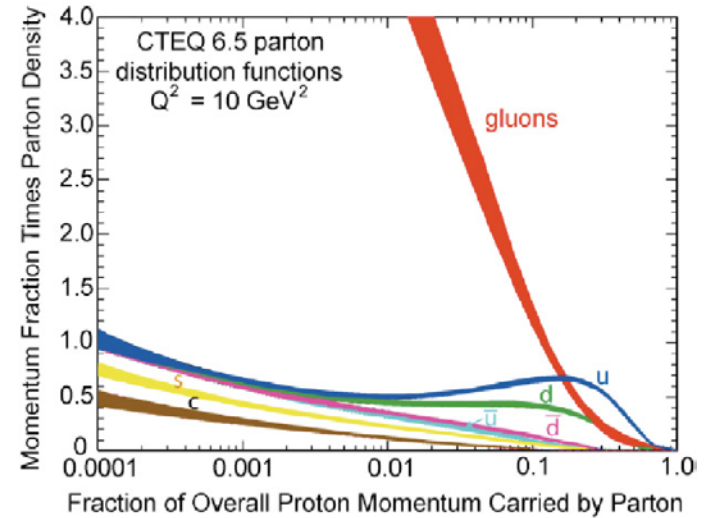
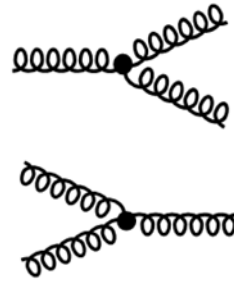
Trace Anomaly

- 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

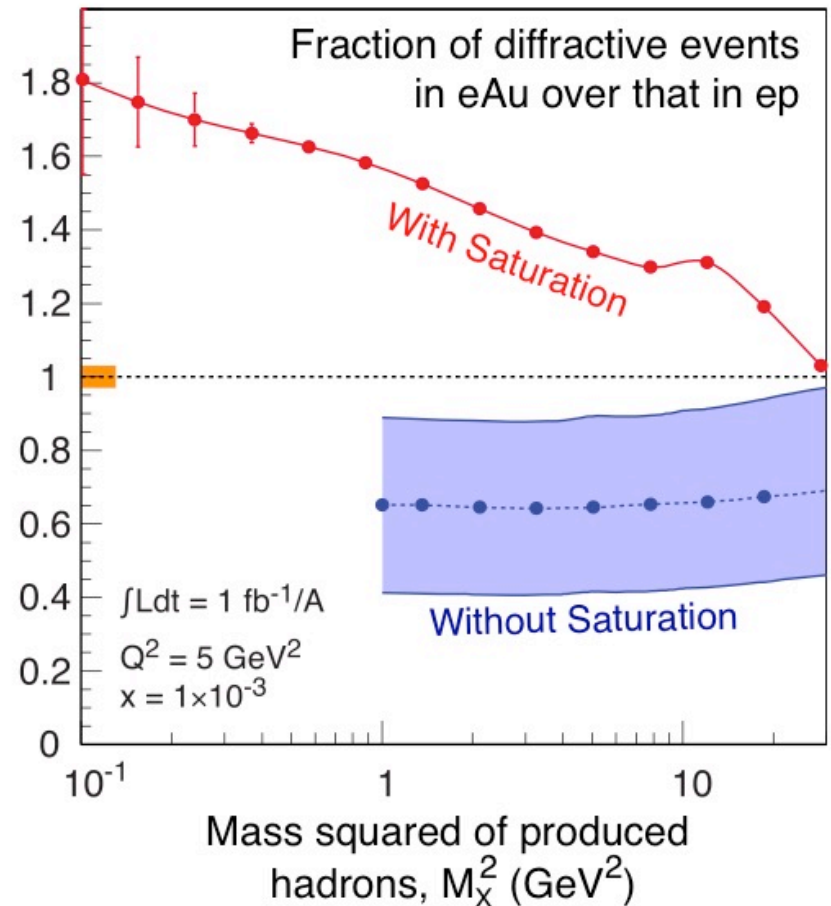
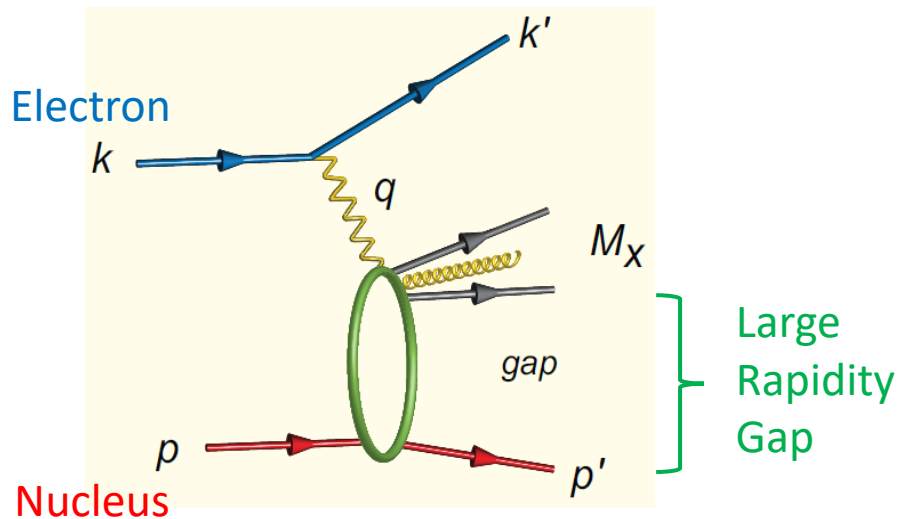
- グルーオン放出
 - 低い x 領域における発散
- グルーオン再結合
 - 発散を制限
- つり合ったところで飽和状態となる
 - 古典的な描像に基づく予想
 - 「粒子状態ではない集団的な場」としてのグルーオンが存在すると考えられる
- 量子的な集団的グルーオン場の発見
 - 飽和グルーオンモデルであるカラーグラス凝縮 (CGC) モデルにより、実験との精密な比較を行うことができる
- RHICで発見されたQGPの生成メカニズムの理解のためには、その初期状態である原子核のクォーク・グルーオン描像に基づいた精密な理解が不可欠である



$e+A$ 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

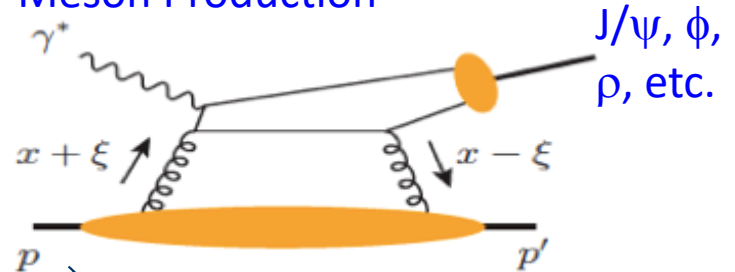
$$\sigma_{\text{diff}} \propto [g(x, Q^2)]^2$$



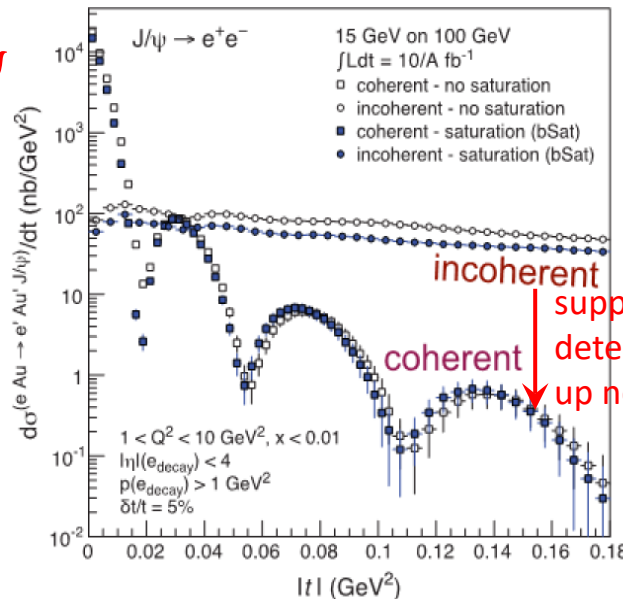
$e+A$ 衝突によるグルーオン飽和

- 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

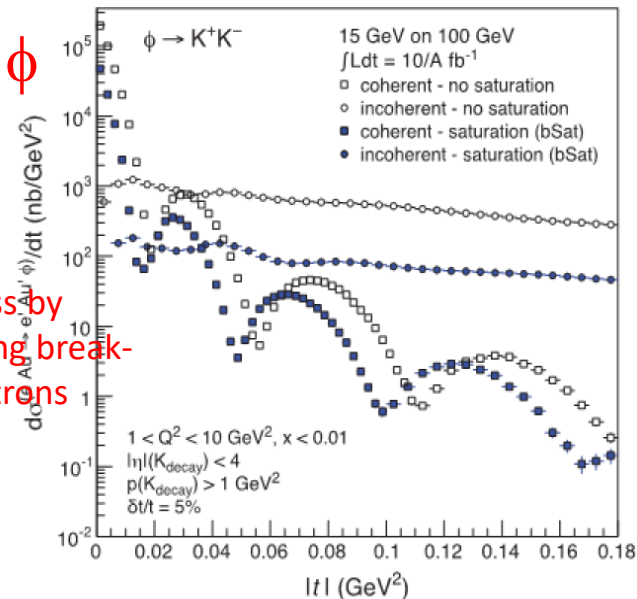
Meson Production



J/ψ



ϕ



EICの現状

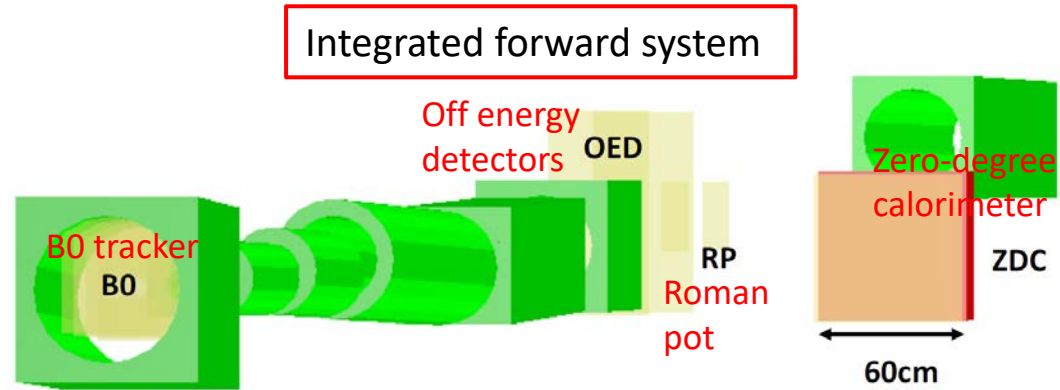
- 2019.12: CD-0 (科学的意義の承認)
- 2020.1: ブルックヘブン国立研究所が建設場所として選ばれた
- EICユーザーグループ
 - 米、欧、アジアからの参加者1000名以上
- 2020: EICユーザーグループからYellow Reportの作成、CD-1獲得を目指す
- 2020.11: EIC実験プログラムへの協力の可能性についてのExpression of Interest (EOI)
- 2nd detector & IR の議論
- 2021: 検出器コラボレーションの形成と提案
- CD-3 (建設開始) 2023?

EIC日本グループ

- マスタープラン2020
 - 学術大型研究計画として選定
 - 推進母体：山形大、理研
 - 協力機関：神戸大、日本大、KEKなど
- EIC日本グループの形成
 - 原子核物理領域に高エネルギー物理領域を加えた加速器実験業界として協力するグループの形成
 - 定期的な会合、勉強会を開催
 - 2020.8 KEK研究会「素粒子・原子核コライダー物理の交点」
- 2020.5 EIC R&D program proposal “Developing a high resolution ZDC for the EIC”
 - eRD27として採択
- 2020.11 EIC日本グループからExpression of Interestの提出
 - Forward hadron calorimeter
 - Zero-Degree Calorimeter (ZDC)
 - シリコン検出器

EIC Detector R&D Proposal

- “Developing a High Resolution ZDC for EIC”
 - 2020.5 提案
 - 2020.8 eRD27として採択
- 低エネルギー光子の検出
 - 検出器とアクセプタンスのシミュレーション
- 電磁およびハドロンカロリメータ
 - 検出器シミュレーション
 - 較正方法
 - (理研によるALICE-FoCal R&D)
 - (カンサス大によるLHC-ZDC R&D)
- 放射線耐久性
 - シミュレーション計算
 - 放射線耐久テスト



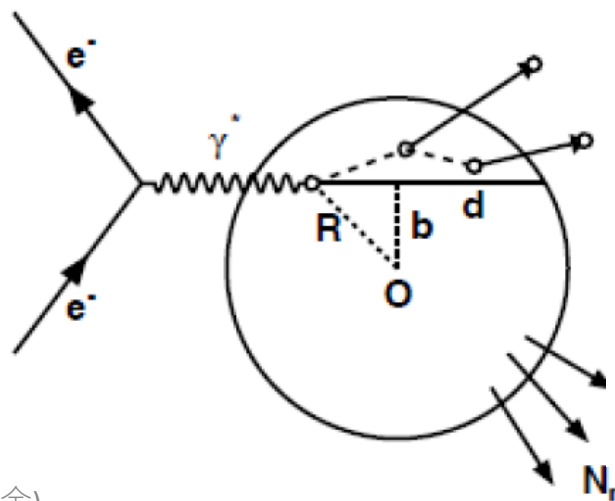
Performance requirements and resources requested

Detector R&D	Physics	Performance requirements	Resource requested	Support & collaboration
Soft photon detection	e+A nuclear breakup veto	$E_\gamma \leq 300$ MeV	detector simulation	This proposal Calorimeter consortium
		acceptance	acceptance simulation	This proposal BeAGLE group
		detector technology	detector R&D	N/A in FY21
EM + hadron calorimeter	e+A collision geometry	neutron multiplicity	high resolution not necessary	BeAGLE group
	spectator tagging	energy & position resolution	detector simulation	This proposal
	meson structure	neutron & Λ acceptance	detector simulation	This proposal Meson structure WG
		detector technology	FoCal R&D LHC-ZDC R&D	RIKEN Kansas Univ.
	calibration scheme	design & simulation system test	This proposal N/A in FY21	
Radiation hardness		radiation dose	simulation study	This proposal Kobe Univ.
		detector technology	radiation test	This proposal Calorimeter consortium

Table 1: Table of performance requirements.

$e+A$ 衝突におけるゼロ度

- 励起原子核の分裂
 - 蒸発中性子(および陽子)
 - Coherent過程のおよそ90%を識別
 - 励起原子核の脱励起からの光子
 - 広い t 領域でのゼロ度での中性子と光子の測定が必要
- 事象ごとの衝突形状の特性評価
 - ゼロ度の前方中性子多重度による標識
 - b : 衝突パラメータ
 - d : 原子核中で叩かれたパートンの経路長
 - 中心(high d)とスキン(low d)
 - 原子核の媒質効果の研究



核内カスケードは d とともに増加する (前方粒子生成)

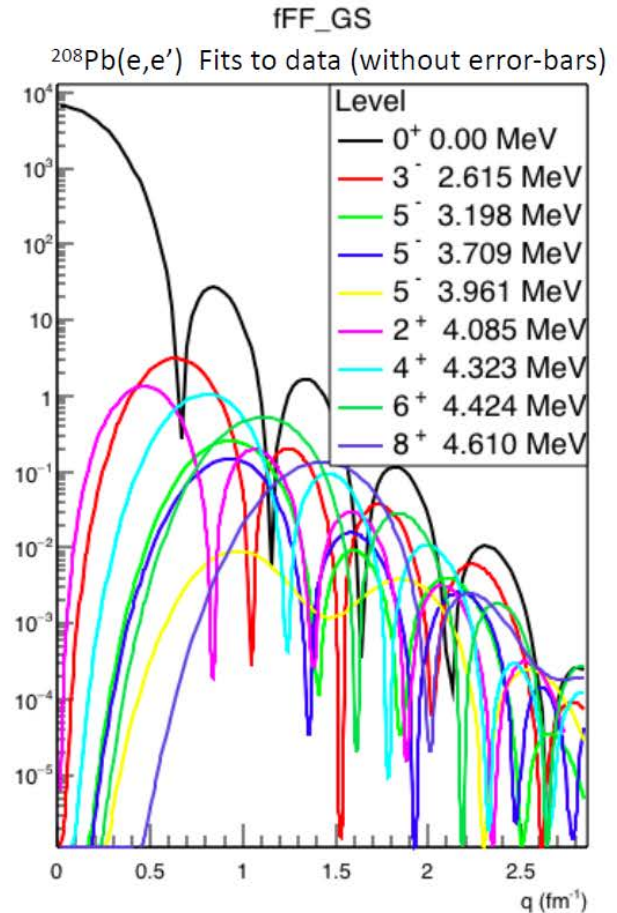
励起原子核からの原子核の蒸発 (最前方)

$e+A$ 衝突におけるゼロ度

Slide by C. Hyde

ZDC EMCAL: DEEP EXCLUSIVE NUCLEI

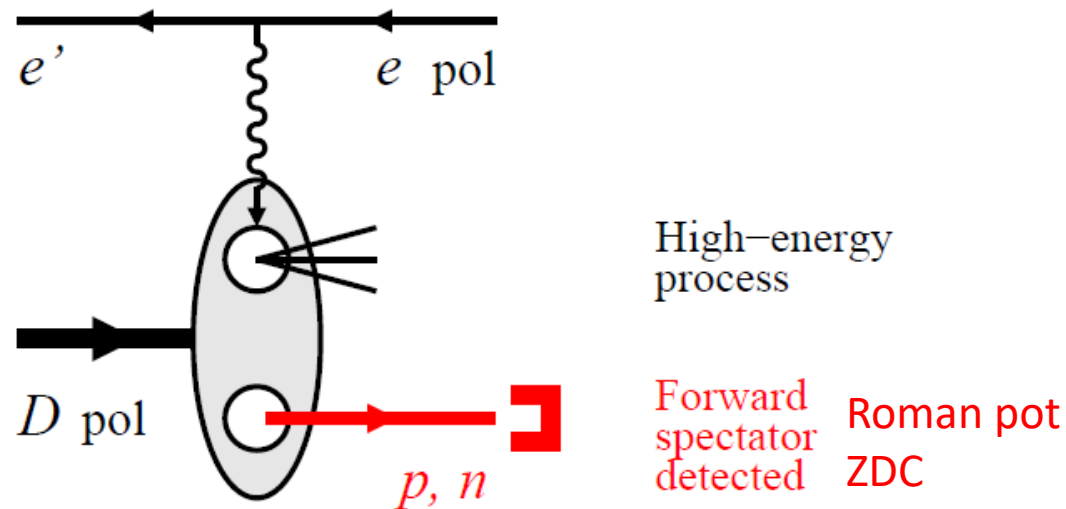
- Gluon Density from e.g. $^{208}\text{Pb}(e,e'\phi)^{208}\text{Pb}$
 - Final state nucleus is lost in beam envelope
 - Veto breakup of Pb nucleus.
 - Thousands of bound states excitable by photo-excitation
 - These will wash out diffractive minima.
 - Possible veto by detection of boosted decay photons
 - At $P_{\text{Pb}} = 275 \cdot Z \text{ GeV}$, boost $\gamma = 117$
 - Each photon has 32% detection probability within 4mr cone



- 脱励起からの光子を検出して、励起原子核の事象を排除
- 低エネルギー光子 $\sim 300 \text{ MeV}$
- 4 mrad アクセプタンスでは検出率が低い

$e+d/{}^3\text{He}$ 衝突におけるゼロ度

- Spectatorの標識
 - 中性子の構造
 - 中性子のスピン構造、S波とD波の分離
 - 核子の相互作用
 - 短距離相関(SRC)とEMC効果の関連



短距離相関

Nucleon Momentum Distribution

- Short range correlation (SRC)

- ~20%の核子はSRC対
 - 18%はp-n対
 - 大きな相対運動量(> 300 MeV/c)
 - 小さな重心系運動量を持ち、空間的に近接

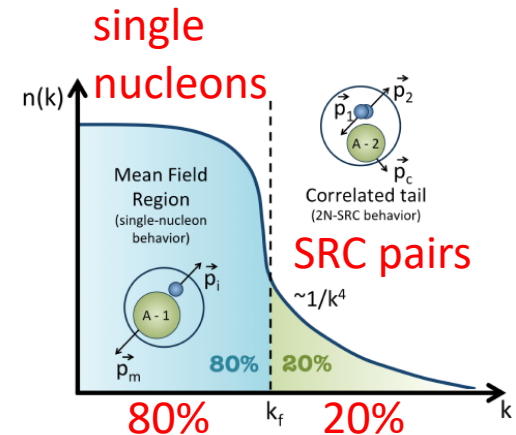
- EMC効果

- EMC実験において原子核DISにおいて原子核構造の変化が発見された
- 原子核構造(PDF)はSRC対によって大きく変化?

- 標識付きDIS at JLab → EIC

- e+D at JLab: Hall B & C
- e+D & e+A at EIC

- 標識付きSRC at EIC

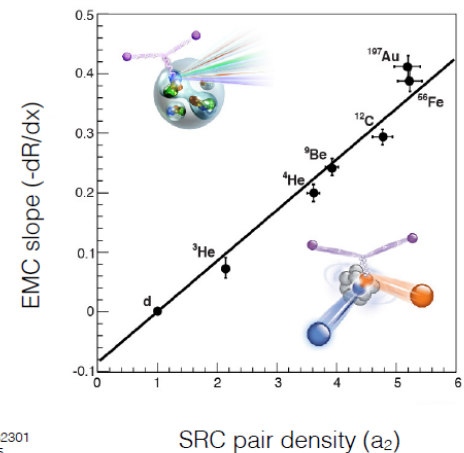


OLD DOMINION

Hauenstein | 09/24/2019

8

EMC and SRC Correlation



Weinstein et al., PRL 106, 052301 (2011), Hen et al., PRC 85, 047301(2012)

SRC pair density (a_2)

OLD DOMINION

Hauenstein | 09/24/2019

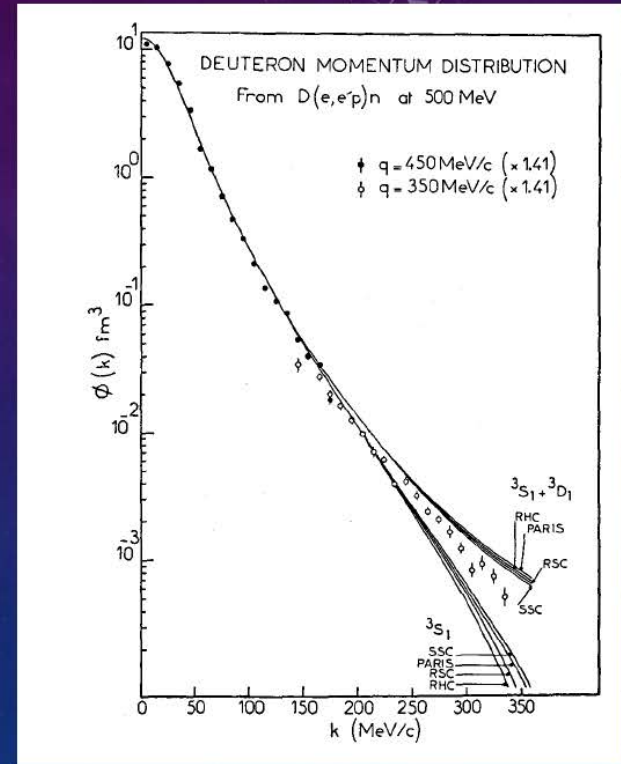
14

slides by Heuenstein

Spectatorの標識

ZDC RESOLUTION: SINGLE NEUTRON EVENTS

- Measuring the properties of a bound proton:
Spectator tagging: e.g. $D(e,e'n)X$
 - $P_D = 275 \text{ GeV}/c \rightarrow p_n = P_D(1+\alpha)/2 \approx 137 \text{ GeV}/c$
 - Rest frame neutron momentum $\approx \alpha M$
 - If ZDC resolution = 50% $[\text{GeV}/E_n]^{1/2}$
 $\rightarrow 4.5\% @ 137 \text{ GeV}/c$
 - $\sigma(\alpha) \approx \sigma(p)/p \approx 0.045$
 \rightarrow Rest-frame $\sigma(p_n) \approx 40 \text{ MeV}/c$
- Spatial resolution 1 cm ?
 - $\sigma(p_T) \approx (137 \text{ GeV}/c) (1 \text{ cm})/(32m) = 43 \text{ MeV}/c$

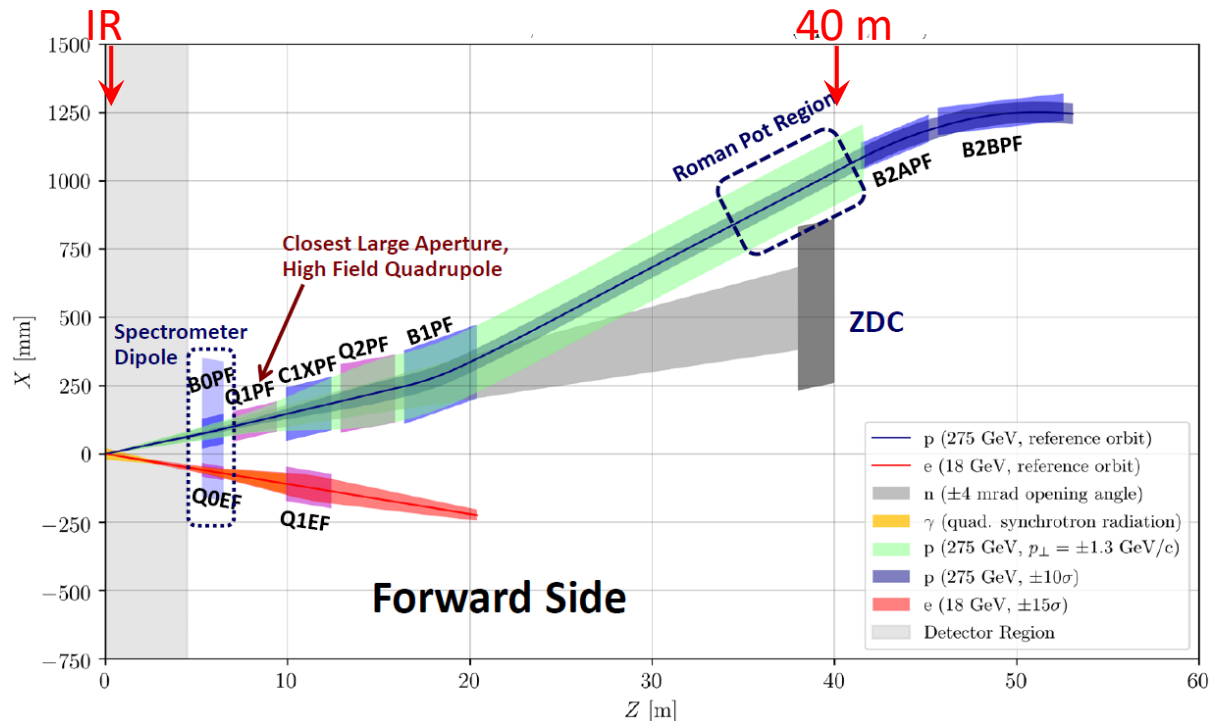


Slide by C. Hyde

- ビームの拡がりと同程度の p_T 分解能 $\sim 40\text{-}50 \text{ MeV}/c$
- 空間分解能 1cm $\rightarrow p_T$ 分解能 $\sim 40 \text{ MeV}/c$
- ZDCエネルギー分解能 $50\%/\sqrt{E} \text{ (GeV)} \rightarrow 4.5\% @ 137 \text{ GeV}/c$
 $\rightarrow p_T$ 分解能 $\sim 40 \text{ MeV}/c$

EIC IR 設計

- アクセプタンス
 - BNLのEIC設計では25 mradの交差角
 - ZDCを置ける前方の磁石の開口角は ± 4 mrad
- ZDCの横方向のシャワーの漏れを抑える大きさ
 - ~ 2 interaction length
 - e.g. 60cm x 60cm



低エネルギー光子の検出

- 励起原子核からの光子
 - 衝突がcoherentであることを識別する
 - BeAGLEグループ(eRD17)と協同でシミュレーション
- できる限り大きな開口部、開口角
 - ZDCに対する開口角が4.5 mradの場合、20%の光子しか検出できない
 - Second IRの設計で大きなZDCアクセプタンスを得ることが出来るか？
- 全吸収カロリメータ
 - 十分良いエネルギー分解能
 - e.g. 結晶シンチレータ (LYSO, PWO, ...)
 - カロリメータ・コンソーシアム(eRD1)との協同

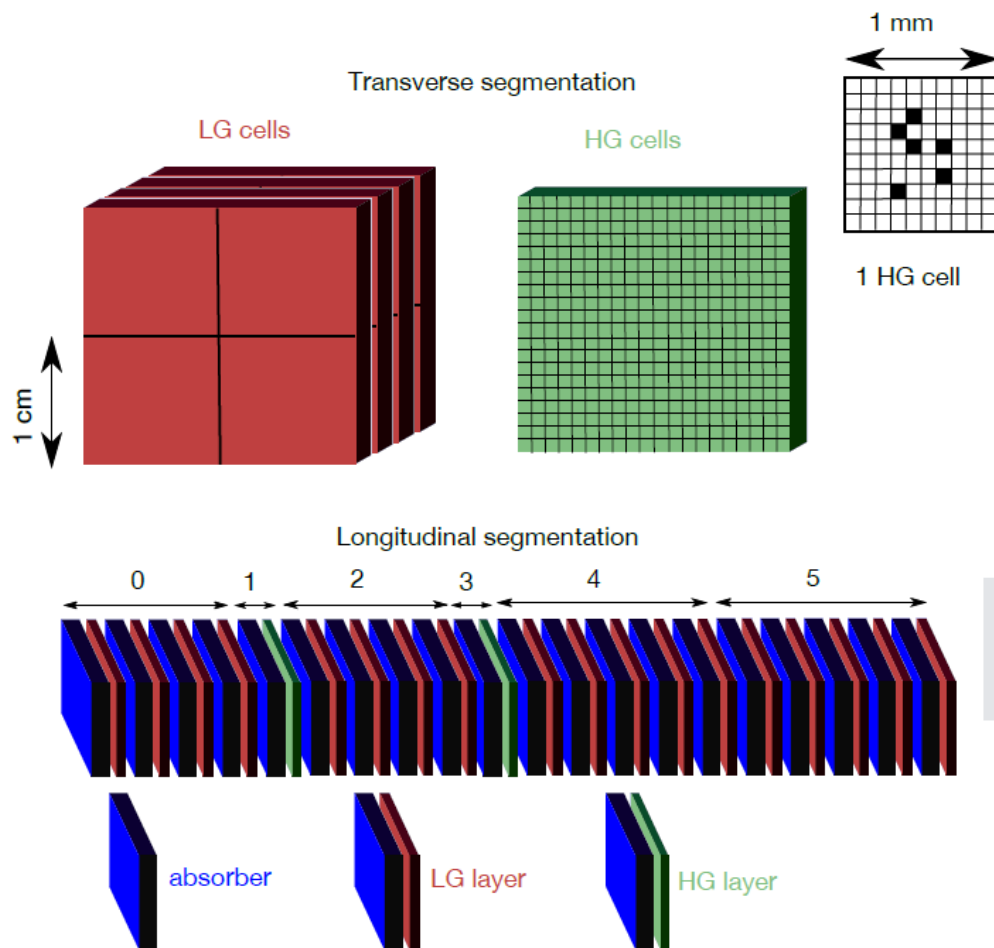
電磁およびハドロンカロリメータ

- アクセプタンス
 - e+A衝突で原子核分裂からのspectator中性子事象を排除するため $60 \times 60 \text{ cm}^2$
- エネルギー、位置、 p_T 分解能
 - ハドロンエネルギー分解能 $< 50\% / \sqrt{E} \text{ (GeV)} \oplus \text{constant term}$
 - 十分な縦方向の大きさ、10 interaction length
 - 十分な横方向の大きさ、2 interaction length
 - よいハドロンエネルギー分解能を得るためにシャワーの漏れを抑える

ALICE FoCal-E



FoCal-E basic design



The design of the detector:

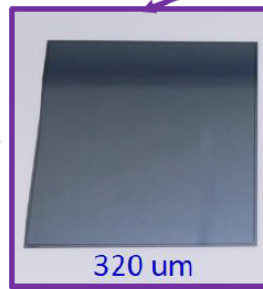
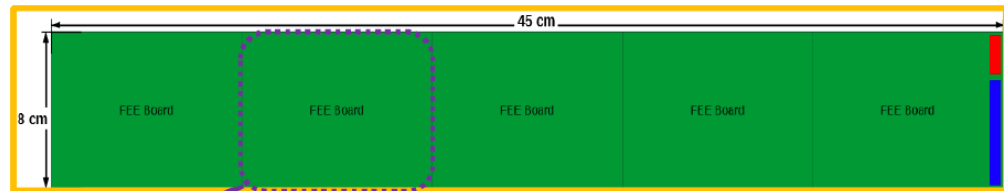
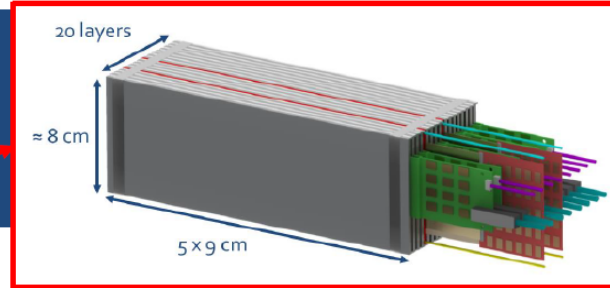
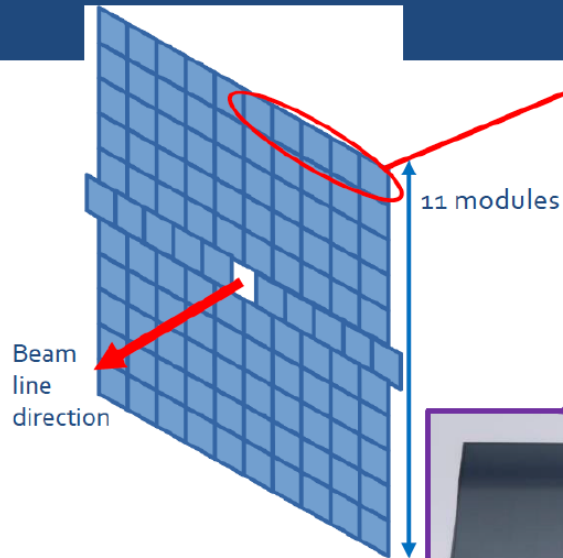
- 20 layers: W ($3.5\text{mm} \approx 1 X_0$) + Si-sensors (2 types):
 - low granularity (LG), Si-pads
 - high granularity (HG), pixels (e.g. CMOS-MAPS)
- Moliere radius $\sim 1\text{-}2\text{ cm}$

	LG	HG
pixel/pad size	$\approx 1\text{ cm}^2$	$\approx 30 \times 30\ \mu\text{m}^2$
total # of pixels/pads	$\approx 2.5 \times 10^5$	$\approx 2.5 \times 10^9$

The surface area of the detector will be about 1 m^2

ALICE FoCal-E

FEW DEFINITIONS



Module:

Composed of 18 **pad-layers** + 2 MAPS layer

Pad layers:

Composed of 5 **pads sensors** + associated FEE-PCB
1 FEE-PCB linked to readout PCB (Aggregator board)

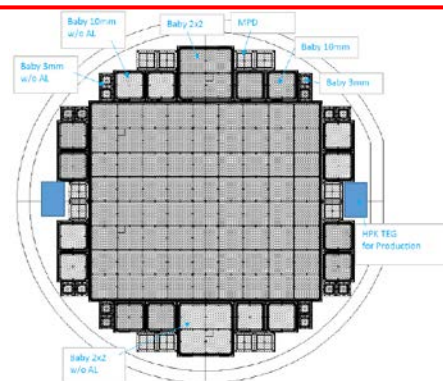
Si-pad:

Built up from silicon pad sensors with a granularity of $1 \times 1 \text{ cm}^2$
Sensitive area of $9 \times 8 \text{ cm}^2$ for each sensor: total of **72 pixels**

05/29/2020

F. RARBI - Online meeting with RIKEN group 3

New silicon pad sensor for final FoCal



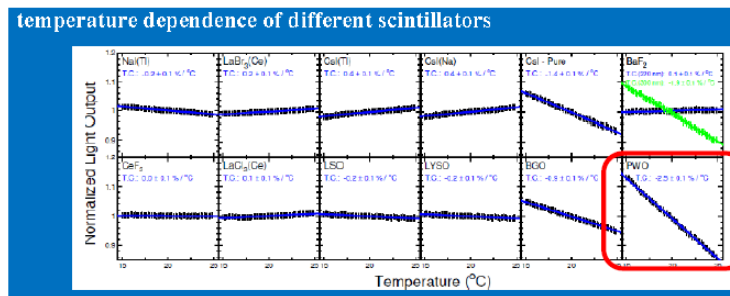
Calorimeter Consortium (eRD1)

- 結晶シンチレータ
 - PbWO_4 、LYSOなど
 - 300 MeV程度からの低エネルギー光子の検出（全吸収？）
- ガラスシンチレータ
 - 光学的、放射性耐性に優れる

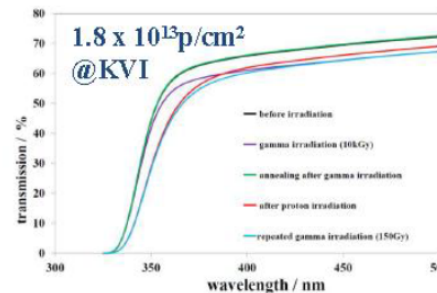
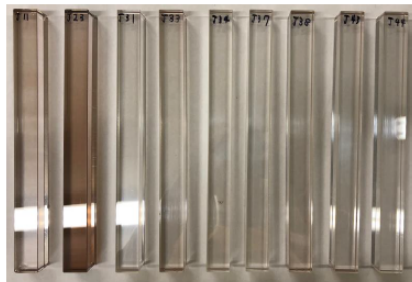
Crystals in EMCal: PbWO_4

- PbWO_4 material of choice for many EMCals – high density, fast response, large and granular solid angle, etc., but also limitations, e.g. hadron radiation damage

Slide by
T. Horn



PbWO₄ light yield
temperature
dependence: 2%/°C

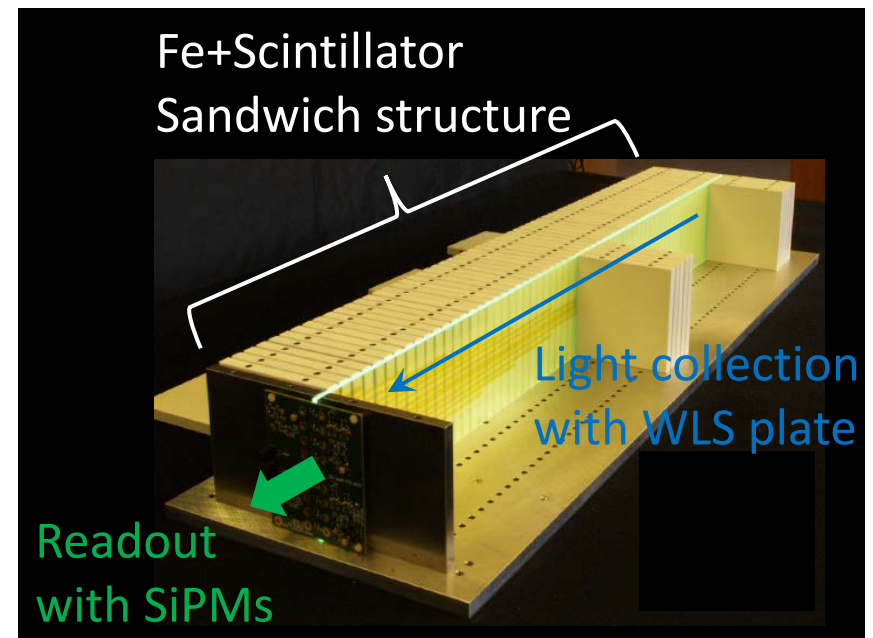


前方の物理

- 大きな運動量比を担う領域
- 終状態ハドロンによるDISの運動学の計算
 - 荷電カレント過程($e+q \rightarrow \nu+q'$)の場合に特に重要
 - 中性カレント過程に対しても分解能を大きく向上
- 前方ハドロンカロリメータはdiffractive事象を示すlarge rapidity gapを識別するための密封性を与える

前方ハドロンカロリメータR&D

- 前方のジェットの識別、ハドロンエネルギー測定、トリガーに不可欠
- UCLAグループ (STAR実験高度化)、EIC検出器R&D (eRD1、カロリメータコンソーシアム) と協同
- 最小限の部品数で拡張性と再構成が可能
 - 建設・稼働に必要な資源を最小限に抑制
- 鉄+シンチのサンドイッチ (STAR FCSは38層)
- 10cm x 10cm x 90cmのタワー
- 4.5 interaction length
- WLSによる集光
- SiPMによる読み出し
- エネルギー分解能
 - $\sigma_E/E = 70\%/\sqrt{E} \text{ (GeV)}$
 - Constant/noise terms?

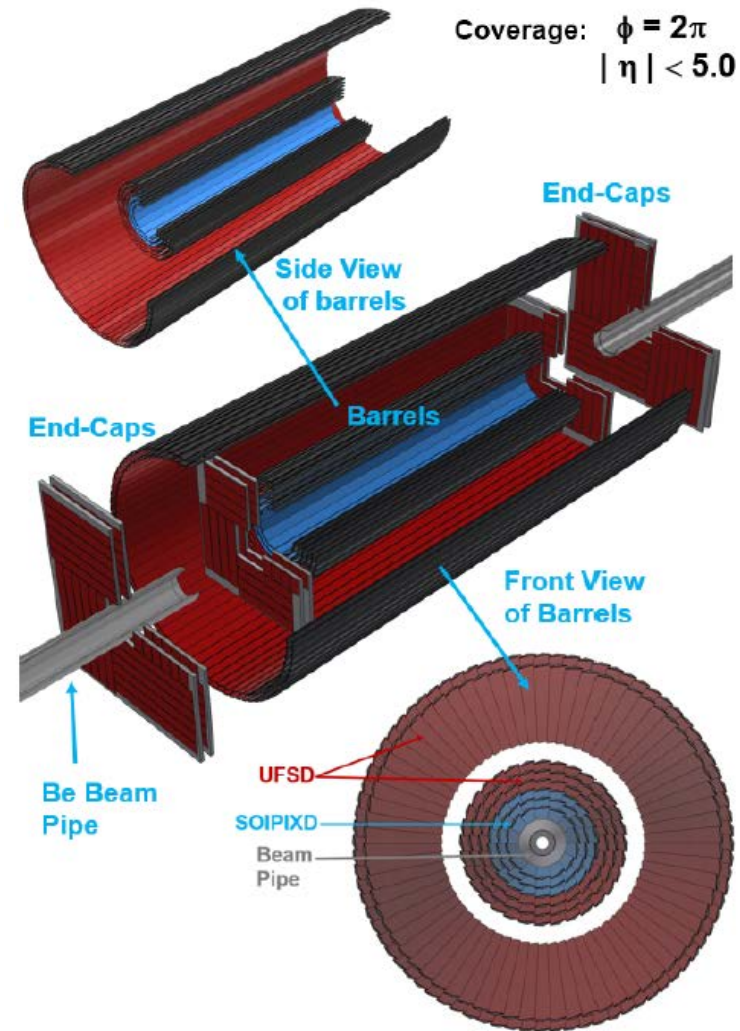


シリコン検出器

- Silicon-on-insulator monolithic pixel (SOIPIX)
 - KEKグループが開発
 - 飛跡分解能 $0.68 \pm 0.006 \mu\text{m}$ (120 GeVテストビーム)
 - ANLとBNLの共同研究者と 4π シリコンハイブリッド衝突点検出器の内層として提案
- 重いフレーバーの崩壊点を検出
 - 原子核媒質中のエネルギー損失、破碎やハドロン化の変異に対する質量やフレーバー依存性を研究するために最適なプローブ

Silicon Hybrid Detector = SOIPIXD + UFSD

Coverage: $\phi = 2\pi$
 $|\eta| < 5.0$



まとめ

- EICはBNLに建設されるQCD物理の次世代 Frontier Machineである
- EICの物理
 - 核子の質量
 - 核子のスピン
 - グルーオン飽和
- EIC日本グループの活動
 - EICの前方・最前方の物理
 - 衝突形状の標識 → e+A衝突によるグルーオン飽和など
 - Spectatorの標識 → 中性子の構造、短距離相関など
 - (パイ中間子・K中間子の構造)
 - (最前方のバリオン生成)
 - EIC検出器
 - 最前方カロリメータ
 - 前方ハドロンカロリメータ
 - シリコン検出器

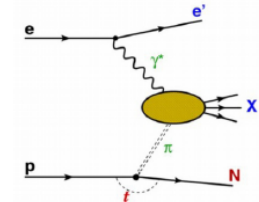
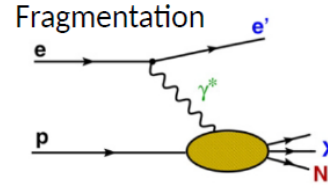
Backup Slides

Physics at zero degree of EIC

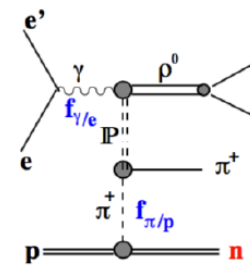
- Leading baryons
 - Fragmentation
 - One pion exchange (OPE)

One Pion Exchange (OPE)

Fragmentation



LN in DIS

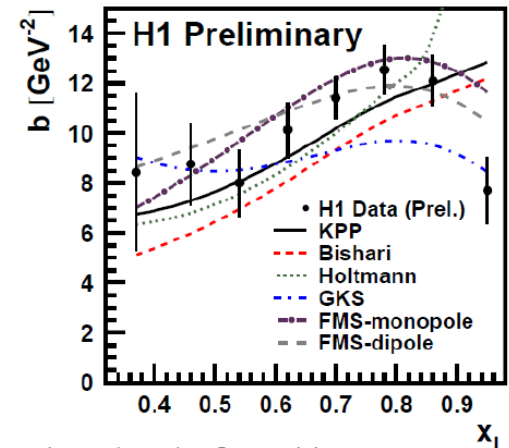
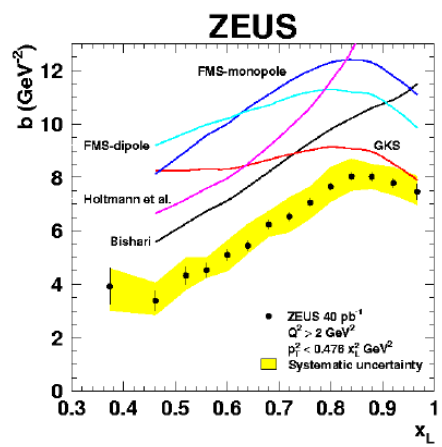
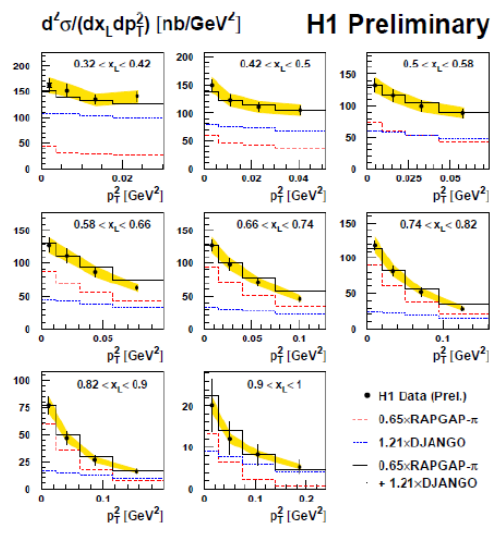


$$d\sigma_{\gamma^* p \rightarrow nX} = f_{\pi/p}(x_L, t) \times d\sigma_{\gamma^* \pi \rightarrow X}$$

The distribution of $p_T^2 (=t)$ is defined solely by the pion flux

Sensitivity to the pion flux

p_T^2 dependence in bins of x_L



Slope of exponential p_T^2 dependence computed to various pion-flux models

18

slide by Ciesielski

Inconsistency @ HERA

→ Need more data to understand production mechanism

ALICE FoCal

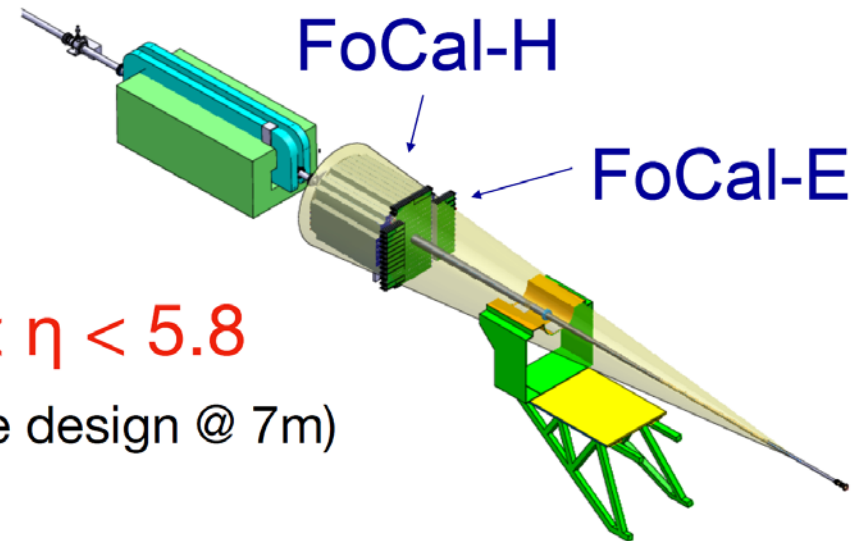
- FoCal-E

- High-granularity Si-W calorimeter for photon and π^0

- FoCal-H

- Conventional metal-(baseline design @ 7m) scintillator sampling calorimeter for photon isolation and jets

$$3.4 < \eta < 5.8$$

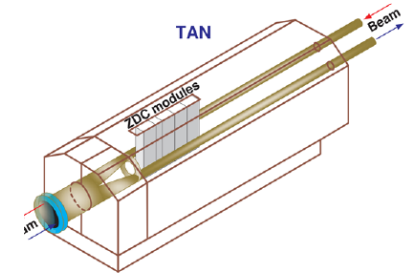
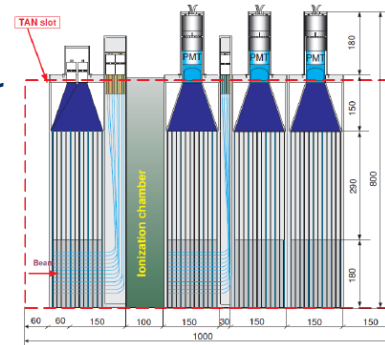


	19	2020				2021				2022				2023				2024				2025				2026				2027			
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4				
LHC		LS2				Run-3												LS3								Run-4							
LoI	■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■		■				
R&D	■				■				■				■				■				■				■								
Test beam	■				■				■				■				■				■				■								
TDR	■				■				■				■				■				■				■								
Final design	■				■				■				■				■				■				■								
Production, construction, test of module	■				■				■				■				■				■				■								
Pre-assembly, calibration with test beam	■				■				■				■				■				■				■								
Installation and commissioning	■				■				■				■				■				■				■								
Physics data taking	■				■				■				■				■				■				■								

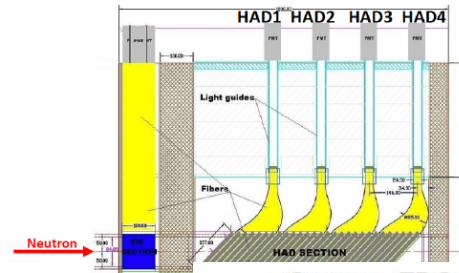
ZDC at LHC

slides by Longo

- ATLAS & CMS ZDC
 - W-quartz sampling calorimeter



See talk by
E. Adams

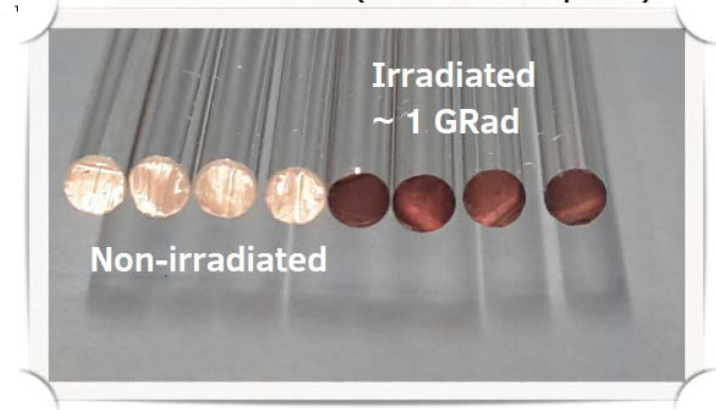


- ▶ ZDCs located in the **TAN** (140 m from IPs)
- ▶ W - quartz sampling calorimeters
- ▶ ATLAS: EM + 3 Hadronic modules
- ▶ CMS: EM + 4 Hadronic modules

- JZCaP collaboration

- ATLAS + CMS joint R&D effort
- Radiation-hard fused silica rods
- Increasing H₂ concentration
- Tested at higher doses than we expect at EIC
- LHC group done significant work on calibrating Fluka dose simulation

Current ZDC rods (GE 214 fused quartz)

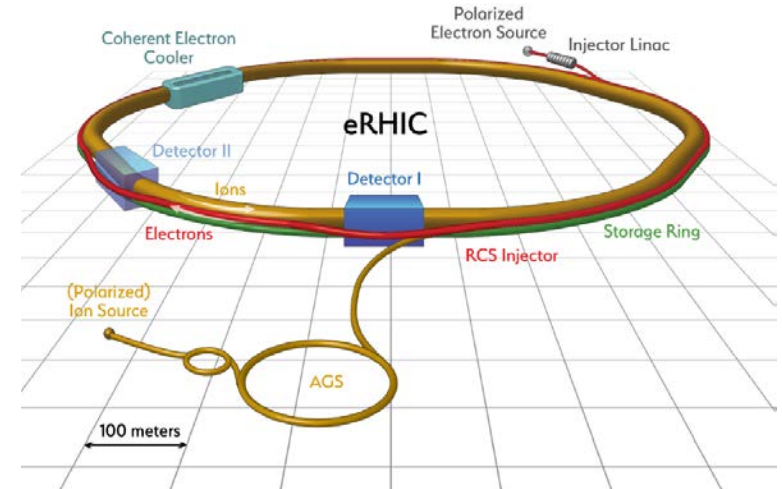


- ▶ Fused quartz with high level of impurities inadequate for any pp running and damaged during PbPb running.

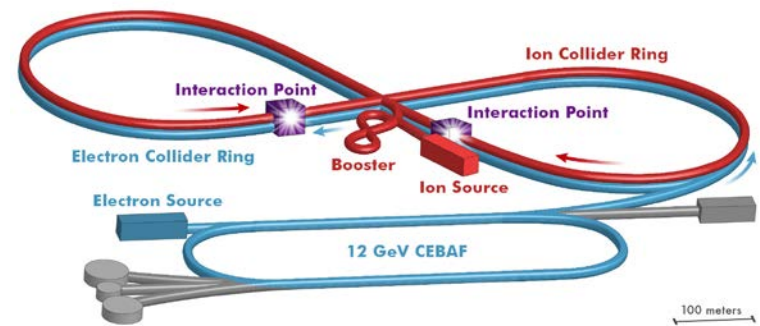
EIC - Electron Ion Collider

- High-energy QCD frontier to study nucleon (hadron) and nucleus (cold nuclear matter) from quarks and gluons
- World's first polarized electron + proton / light-ion / heavy-ion collider
 - Wide (Q^2, x) region
- Electron + proton / light-ion collision
 - Polarized beam
 - e, p, d/³He
 - High luminosity
 - $L_{ep} \sim 10^{33-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 100-1000 times HERA
 - Collision energy
 - $\sqrt{s} = 20 - 100$ (140) GeV
- Electron + heavy-ion collision
 - Wide range in nuclei

eRHIC at BNL

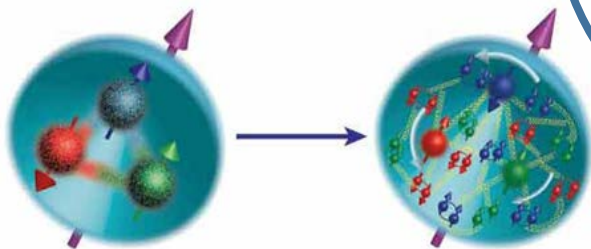


JLEIC at Jefferson Lab



Physics at EIC

Understanding how the nucleon structure and properties emerge from quarks and gluons and their interactions from QCD

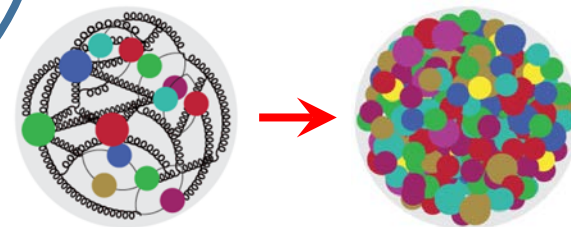


How does the mass of the nucleon arise?

3D Picture of the Nucleons and Nuclei

- *Transverse -Momentum Distribution and Spatial Imaging*
- *Orbital Motion of Quarks and Gluons Inside*

Systematic understanding of the structure of nucleons and nuclei covering the wide kinematic range



New Picture

Precision Measurement

How does the spin of the nucleon arise?
Spin and Flavor Structure of the Nucleons and Nuclei

- *Gluon Polarization*
- *Quarks and Gluons Inside the Nuclei*
- *Hadronization*

Luminosity

Collision Energy

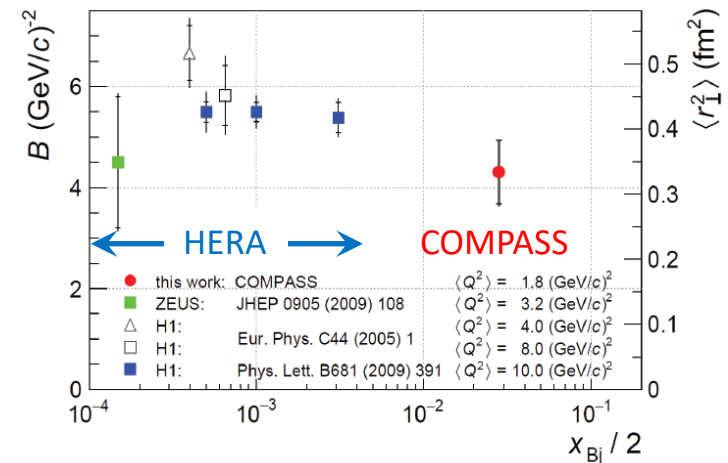
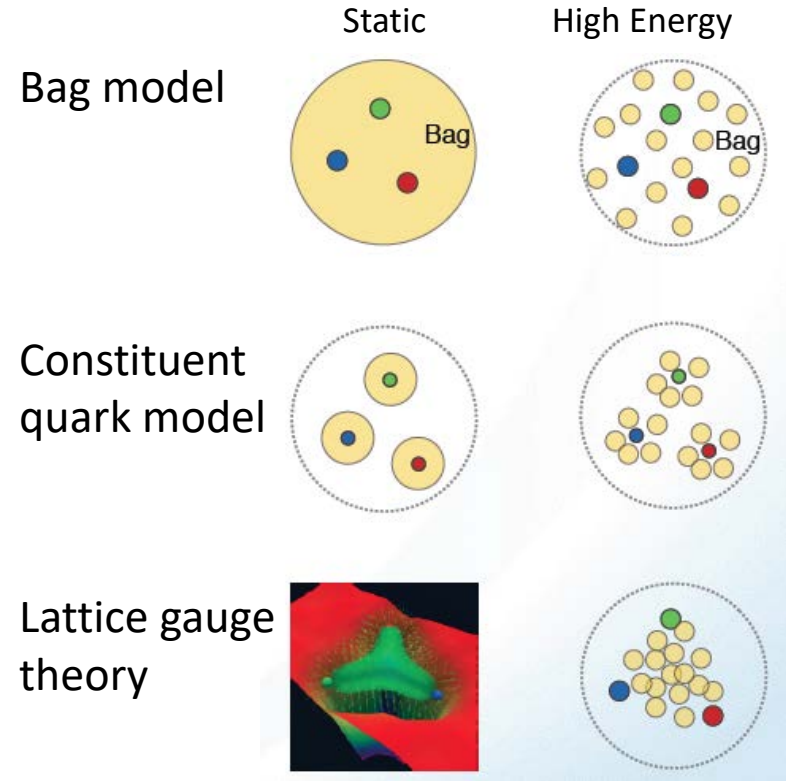
Discovery

What are the emergent properties of dense systems of gluons?

- Gluon Saturation at Extreme Density
- *Initial State of the QGP (Quark-Gluon Plasma)*

3D structure of the nucleon

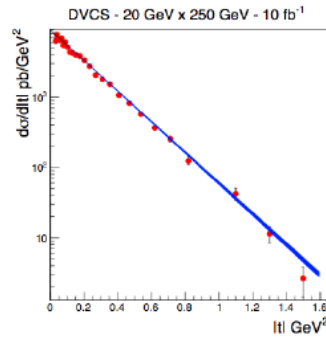
- How are quarks and gluons confined inside the nucleon?
 - Bag model
 - gluon radius > charged radius
 - Constituent quark model
 - gluon radius ~ charged radius
 - Lattice gauge theory (with slow moving quarks)
 - gluon radius < charged radius
- Need measurement of transverse images of the quarks and gluons in the nucleon
- Proton tomography with **GPD** measurement
 - $R = 0.6 - 0.7$ fm for gluon (HERA) and sea quark (COMPASS)
 - Smaller than 0.85 fm with EM interaction



Physics at zero degree of EIC

- Very forward proton acceptance for DVCS exclusive measurement

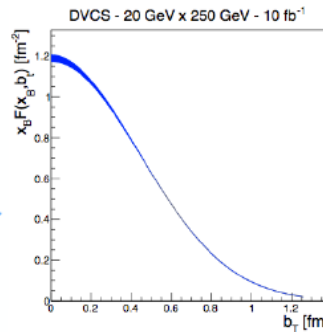
Measurement



Plots from
EIC White Paper:

Fourier
transform

Physics observable (cross-section vs impact parameter)

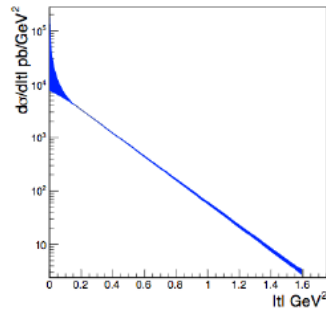


Requirement:

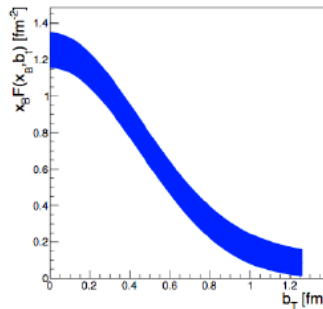
$$\int L_{\text{int}} = 10 \text{ fb}^{-1}$$

$$0.18 < p_T \text{ (GeV)} < 1.3$$

$$0.03 < |t| \text{ (GeV}^2\text{)} < 1.6$$



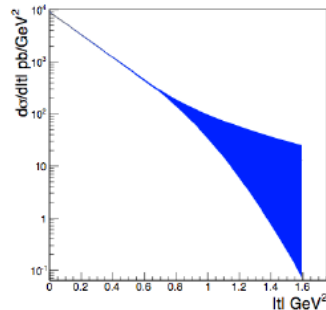
limited
lower
 p_T -acceptance



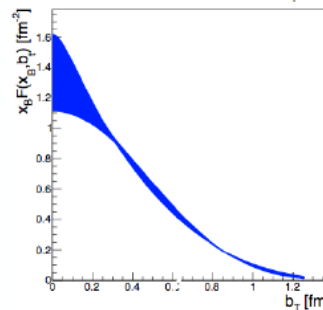
Uncertainty in normalization

$$\int L_{\text{int}} = 10 \text{ fb}^{-1}$$

$$0.44 < p_T \text{ (GeV)} < 1.3$$



limited
higher
 p_T -acceptance



Uncertainty in slope and shape

$$\int L_{\text{int}} = 10 \text{ fb}^{-1}$$

$$0.18 < p_T \text{ (GeV)} < 0.8$$

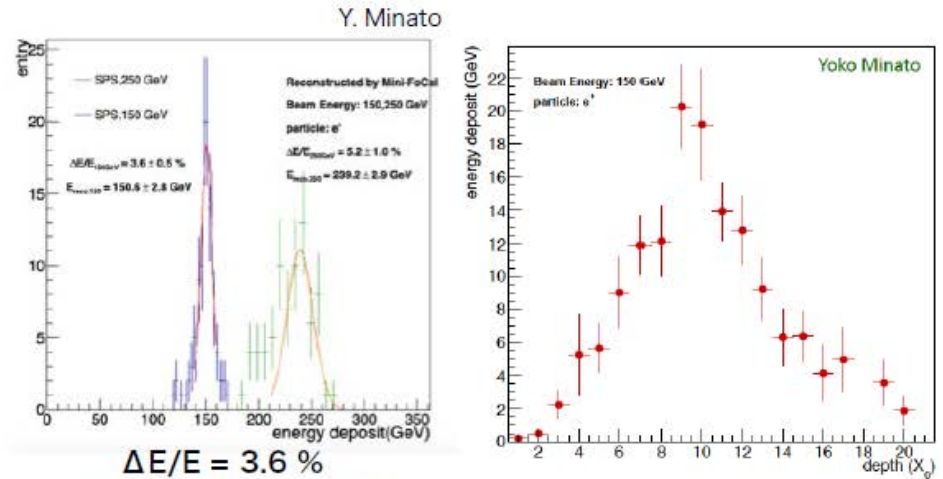
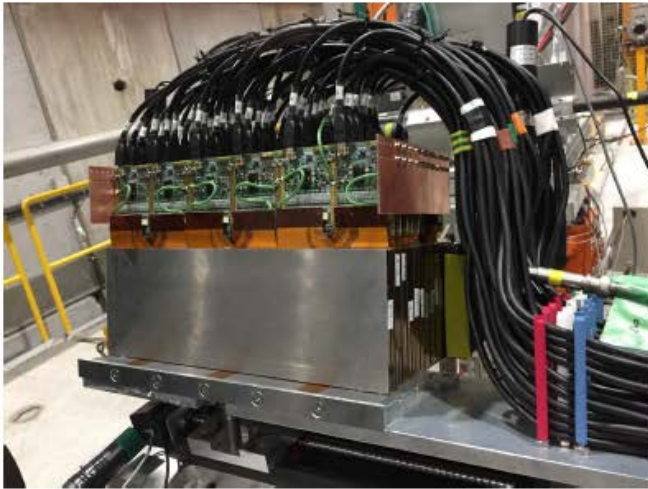
**We need a proton spectrometer
with large acceptance!**

shown by Fazio & Jentsch

ALICE FoCal-E

8

mini-FoCal at PS and SPS (2018)



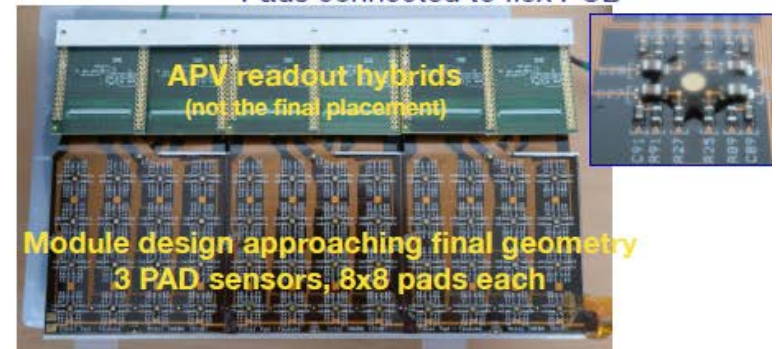
$\Delta E/E = 3.6 \%$

@ 150 GeV/c , e^- (SPS)

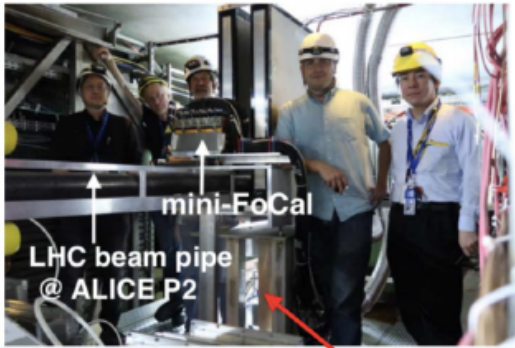
Pads connected to flex PCB



- “mini-FoCal” has been built in Tsukuba, and shipped to CERN for test beam and ALICE test in 2018
- APV25 hybrid + SRS for readout

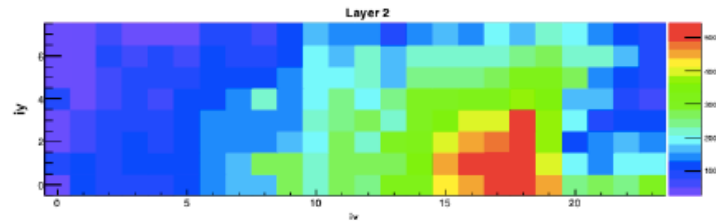


mini-FoCal in ALICE (2018)

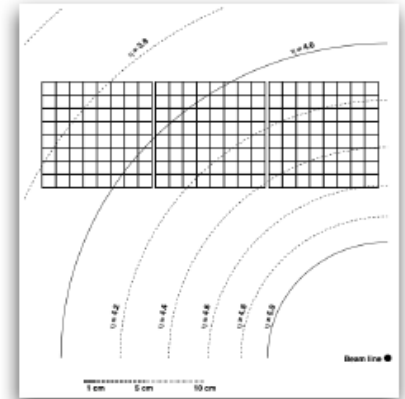


SRS system under the table

Hit Map of mini-FoCal in ALICE

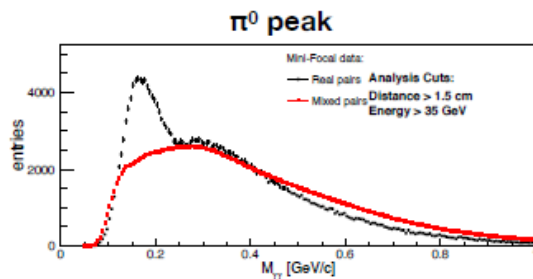


Acceptance



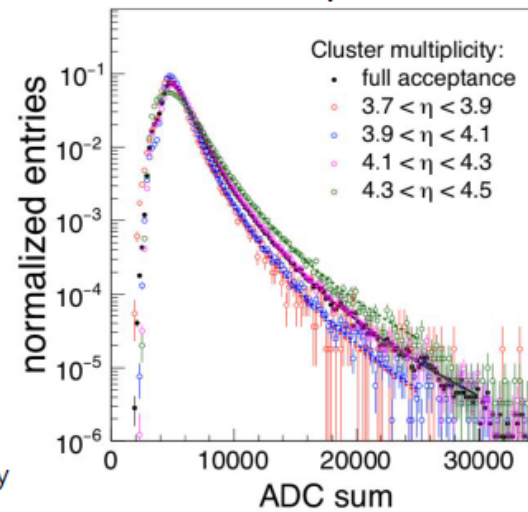
Goal: measure/verify backgrounds in situ with p+p @ $\sqrt{s} = 13$ TeV collisions in ALICE

- Calibration based on test beam
- Comparison to MC (cluster spectrum, slid lines)



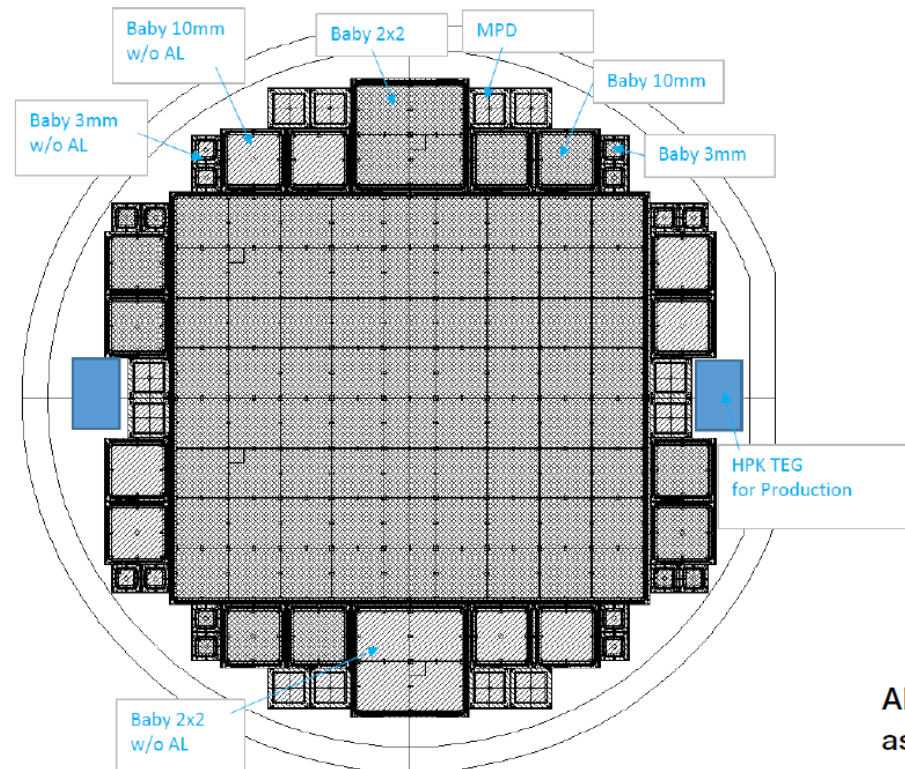
N. Novitzky

Cluster spectrum



ALICE FoCal

1. New silicon pad sensor for final FoCal



Almost final version
as of Aug. 19, 2020

ALICE FoCal

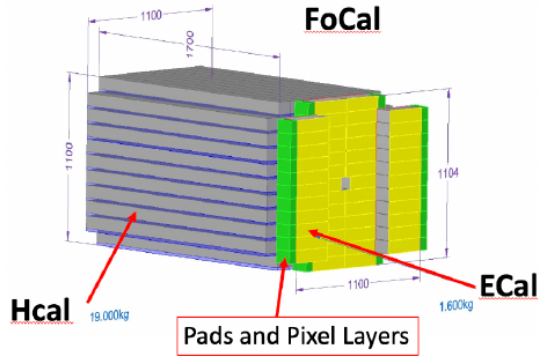
- RIKEN participation in FoCal
 - FoCal-E pad readout and trigger development
 - Test beam
- Participants
 - Yuji Goto (scientist): 0.25 FTE
 - Itaru Nakagawa (scientist): 0.25 FTE
 - Minho Kim (new postdoc from Oct. 2020): 1 FTE
- Budgetary contribution
 - Additional FoCal-E pad sensors in 2020-2021
 - Student support for Japanese & non-Japanese universities
 - Tsukuba U.
 - Travel support for visiting staffs

ALICE FoCal

- We'd like to build approx. 10cm x 20cm prototype FoCal-E detector to be used at RHIC/sPHENIX in 2024
 - Approx. size of 10cm x 20cm
 - Located at zero degree, in front of ZDC
 - Measurement of photon, π^0 , and neutron cross section and left-right asymmetry in polarized p+p and p+A collisions
 - Construction in 2022-2023 by RIKEN budget
 - We'll need appropriate contract with FoCal group for technology transfer and purchase
- In 2023, we may consider prototype test at RHIC/sPHENIX in A+A collisions

ALICE-FoCal

FoCal - main components 3



Pads

1 layer = 5 towers design, and silicon sensor (8 x 9 cells)

- 1) Total number of modules: $11 \times 2 = 22$ modules
- 2) Total number of Pad layers: $22 \times 18 = 396$ layers
- 3) Total number of towers : $22 \times 5 = 110$ towers
- 4) Total number of silicon sensors: $396 \times 5 = 1,980$ sensors
- 5) Total number of readout ch.: $(8 \times 9) \times 1,980 = 142,560$ ch

+396 FEE PCB, 180 aggregator boards, 8 CRU

HCal: ~2K channels

Timescale till Run-4 8

	2019	2020				2021				2022				2023				2024				2025				2026				2027			
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
LHC		LS2				Run-3												LS3								Run-4							
Lol																																	
R&D																																	
Test beam																																	
TDR																																	
Final design																																	
Production, construction, test of module																																	
Pre-assembly, calibration with test beam																																	
Installation and commissioning																																	
Physics data taking																																	

ALICE FoCal

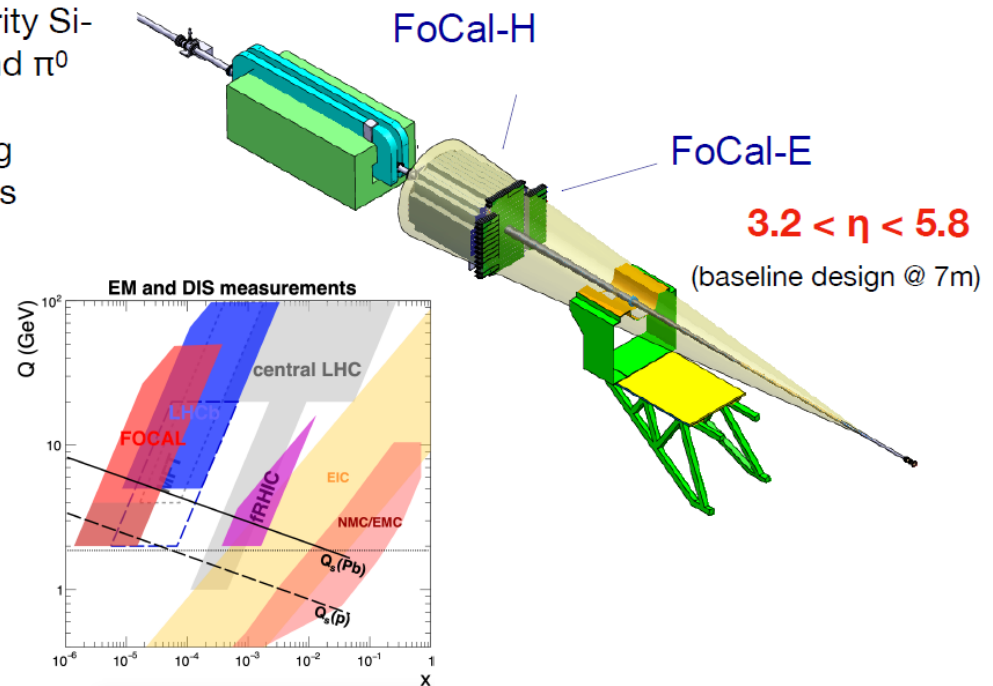
ALICE FoCal upgrade for LHC-Run4 (2027-)

FoCal-E (PAD & PIXEL): high-granularity Si-W sampling calorimeter for photons and π^0

FoCal-H: conventional Cu-Sc sampling calorimeter for photon isolation and jets

Observables:

- π^0 (and other neutral mesons)
- Isolated photons
- Jets (and di-jets)
- J/ψ (Υ) in UPC
- W, Z maybe possible
- Event plane and centrality



3

4. Timescale and cost Pad (short term, 2020-2021)

Component	Description	Target	2020				2021				
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
Pad 01	Silicon sensor design	Q1/20	■								
Pad 01	New mask for silicon sensor	Q2/20		■							
Pad 01	Test production	Q4/20			■	■					
Pad 02	Prototype board design	Q2/20		■							
Pad 02	Test board production	Q3/20			■						
Pad 02	Test board assembly	Q4/20				■					
Pad 02	Firmware for readout	Q4/20					■				
Pad 02	Integration and module test	Q4/20						■			
Pad 02	ELPH beam test	Q1/21						■			
Pad 03	Conceptual design mechanics and cooling	Q1/20	■								
Pad 03	Cooling test for readout board	Q3/20			■						
Pad 03	Materials for PM available	Q4/20				■					
Pad 04	LV power infrastructure conceptual design	Q3/21								■	
Pad 05	HV prototype qualification for PM	Q3/20			■						
Pad 05	HV infrastructure conceptual design	Q3/21								■	
Pad 07	Readout receiver/ FLP prototype	Q4/20				■					
	CERN test beam	Q2/21							■		
	TDR	Q3/21								■	
	Final design	Q4/21									■

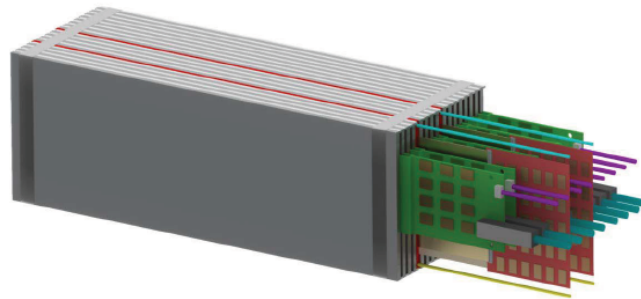
- [PM] : Prototype Module
- Pad 01 sensor specification
 - Pad 02 readout board design (and connection)
 - Pad 03 module mechanical design and cooling
 - Pad 04 LV power infrastructure
 - Pad 05 HV for sensors
 - Pad 06 QA performance, componets and system test
 - Pad 07 FLP/EPN connections and software
 - Pad08 DCS/controls

ALICE-FoCal

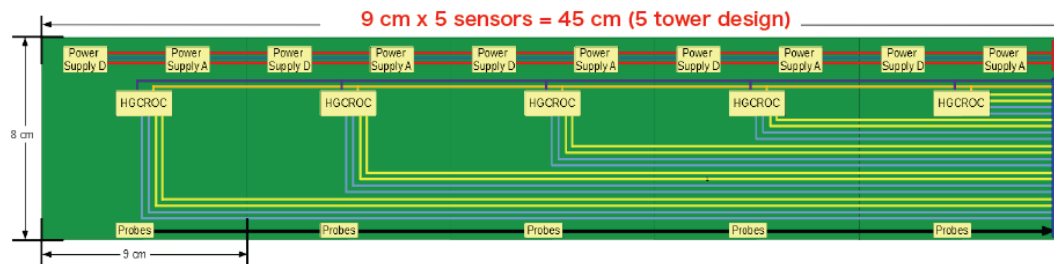
- For RHICf upgrade (2022 or 2024)
 - Space restriction at RHICf
 - FoCal prototype with new readout scheme for RHICf?
 - Readout electronics integration to sPHENIX electronics & DAQ system

Module: 18 layers of Pad + 2 layers of MAPS

4



Layer: 5 silicon sensors side by side with PCB



ZDC at LHC

Dependence on ATLAS/CMS ZDC

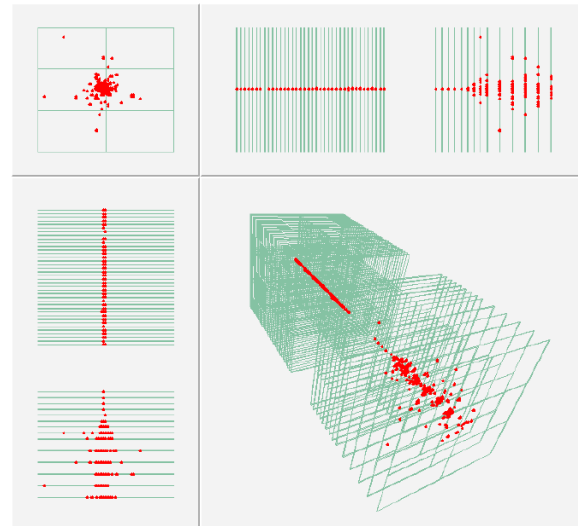
- We may incorporate rad hard fused silica developed for LHC forward detectors.
- These fibers are already tested at higher doses than we expect to see at EIC.
- LHC group also has done significant work on calibrating Fluka dose simulations and we can benefit from this.
- LHC group planning new test beam campaign when Covid permits. This will help calibrate simulations.

17

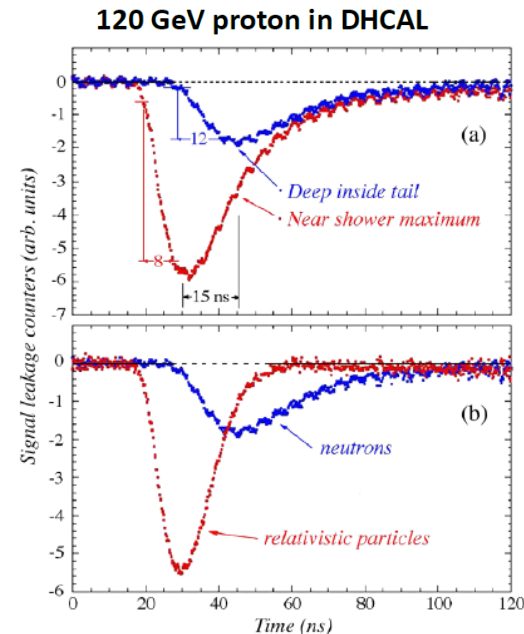
ZdEiC

Detector requirements

- TOPSiDE / CALICE
 - Imaging calorimeter
 - Improving e/h with software compensation
- EIC HCal R&D
 - Improving e/h with timing (dual-gate offline compensation)
 - Energy resolution better than $\sim 40\%/\sqrt{E}$ (GeV) + few% is challenging
- ALICE FoCal



shown
by Repond



shown
by Tsai

Simulation studies

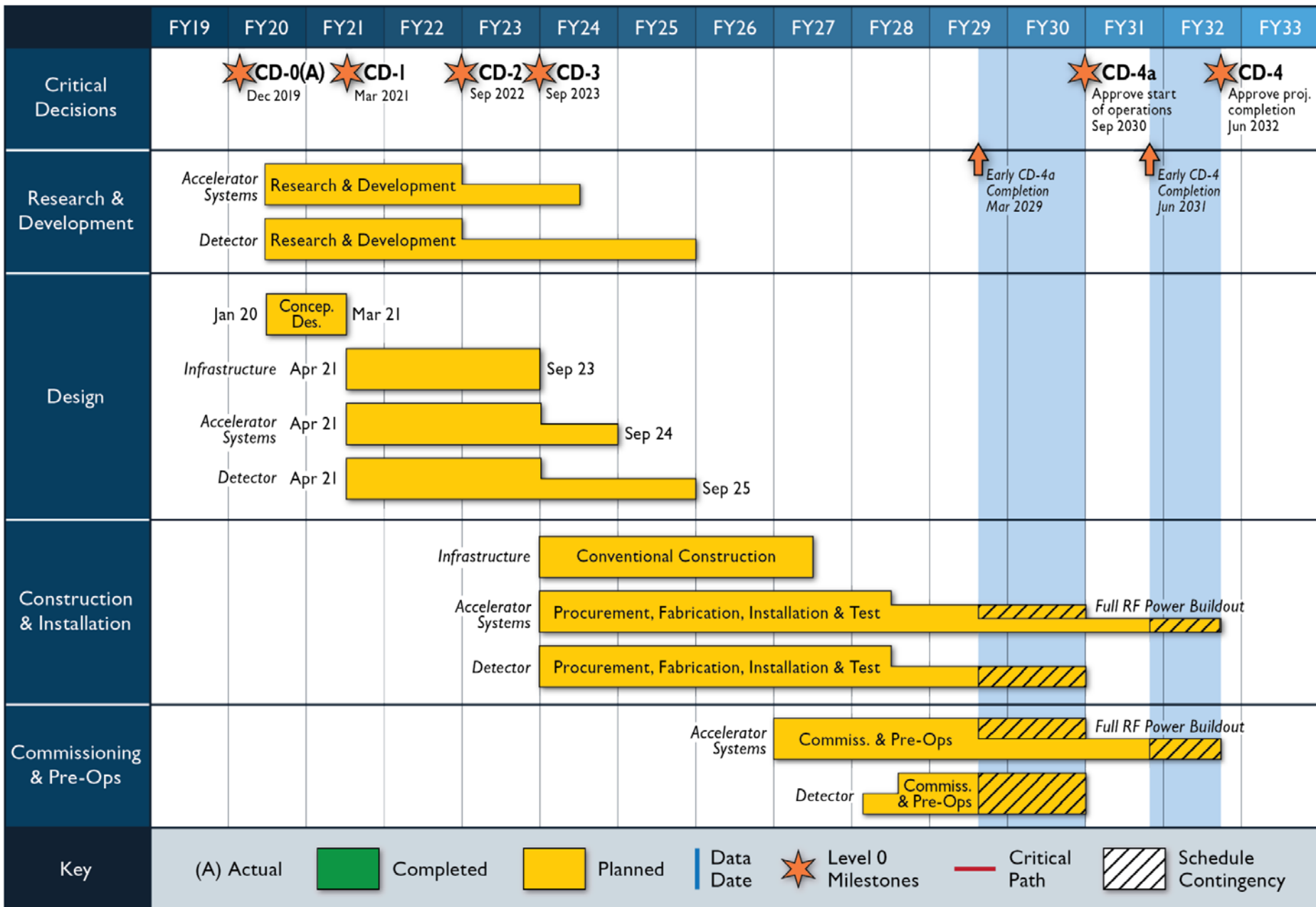
- Collaboration with BeAGLE group (eRD17) and calorimeter consortium (eRD1)
 - ALICE FoCal geometry included in Geant4 (g4e framework)
- Soft photon detection
 - Acceptance & efficiency
 - Detector simulation & evaluation
 - Effect for downstream calorimeter (resolution, pID)
- EM + hadron calorimeter
 - Detector simulation
 - EM + hadron configuration & evaluation
 - Energy & position resolution
 - Leakage (size), e/h (technology)
 - Calibration system evaluation
 - Physics simulation
 - Evaluation for spectrum measurement
- Radiation dose

Draft Timeline for Written Instruments

	Quarter and FY	
CD-0	1Q2020	
CD-1	2Q2021	Project Annex in place, SOI and support letter as needed
CD-2	4Q2022	MOUs or Project Planning Document in place
CD-3	Critical Decision	
CD-4A CD-4B	3Q2030 4Q2032	MOUs for operations



EIC Schedule



電子・イオン衝突型加速器 (EIC) 計画

η	Nomenclature			Tracking			Electrons		$\pi/K/p$		HCAL	Muons						
				Resolution	Allowed X/X0	Si-Vortex	Resolution $\sigma E/E$	PID	p-Range (GeV/c)	Separation	Resolution $\sigma E/E$							
-6.9 to -5.8	↓ p/A	Auxiliary Detectors	low-Q2 tagger	$\sigma\theta/\theta < 1.5\%$; $10^{-6} < Q^2 < 10^{-2} \text{ GeV}^2$														
...																		
-4.5 to -4.0			Instrumentation to separate charged particles from photons															
-4.0 to -3.5							2%/√E											
-3.5 to -3.0	Central Detector	Backward Detector	$\sigma p/p \sim 0.1\% \times p + 2.0\%$	~5% or less X	TBD			π suppression up to $1:10^4$	$\leq 7 \text{ GeV/c}$	$\geq 3\sigma$	-50%/√E							
-3.0 to -2.5			$\sigma p/p \sim -0.05\% \times p + 1.0\%$															
-2.5 to -2.0			7%/√E															
-2.0 to -1.5																		
-1.5 to -1.0																		
-1.0 to -0.5																		
-0.5 to 0.0		Barrel	$\sigma p/p \sim -0.05\% \times p + 0.5\%$										$\sigma_{xyz} \sim 20 \mu\text{m}$, $d\theta(z) \sim d\theta(r\theta) \sim 20/p_T \text{ GeV } \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$		$\leq 5 \text{ GeV/c}$			
0.0 to 0.5																		
0.5 to 1.0																		
1.0 to 1.5		Forward Detectors	$\sigma p/p \sim -0.05\% \times p + 1.0\%$												$\leq 8 \text{ GeV/c}$			
1.5 to 2.0																		
2.0 to 2.5						$\leq 20 \text{ GeV/c}$												
2.5 to 3.0			$\sigma p/p \sim 0.1\% \times p + 2.0\%$			$\leq 45 \text{ GeV/c}$												
3.0 to 3.5																		
3.5 to 4.0	↑ e	Auxiliary Detectors	Instrumentation to separate charged particles from photons															
4.0 to 4.5			Neutron Detection															
...			Proton Spectrometer	$\sigma_{\text{intrinsic}}(t / t) < 1\%$; Acceptance: $0.2 < p_T < 1.2 \text{ GeV/c}$														
> 6.2																		

